

ISSN 0286-3391

茨城工業高等専門学校
研 究 彙 報

第 45 号

平成 22 年 3 月

RESEARCH REPORTS
OF
IBARAKI NATIONAL
COLLEGE OF TECHNOLOGY

NO. 45
MARCH 2010

茨城工業高等専門学校

茨城工業高等専門学校研究彙報 第45号

目 次

- 1 高専機構主催「海外インターンシップ制度」の創設 三好 章一・市坪 誠 (1)
- 2 ビーカーのお湯の冷め方〜〜「物理チャレンジ」に挑む
..... 田島 圭一郎・皆川 仁志・森脇 滉・矢野倉 伊織・八重樫 拓也・
一戸 香澄・高橋 雄太・芦名沢 裕太・五十嵐 浩 (5)
- 3 富士山頂対応電気ポットの試作 ——八光「熱実験コンテスト」始末
..... 矢野倉 伊織・森脇 滉・八重樫 拓也・奥山 慶洋 (15)
- 4 「富士山頂における科学教育」の試行 松澤 孝男・森脇 滉・矢野倉 伊織・八重樫 拓也・
松田 理絵・関根 恵・檜木 梨花子・矢澤 正人・保田 浩志 (21)
- 5 $\Delta T = 1$ 年程度の時間で見た原子炉内の反応
— U-235の核分裂エネルギーから見た核燃料廃棄物量の半定量的試算 —
..... 森脇 滉・田島 圭一郎・斉藤 慶太・矢野倉 伊織・奥山 慶洋 (33)
- 6 学生による原子炉シミュレーターの試作 (PWR)
..... 松田 理絵・川上 悠里・森脇 滉・斉藤 慶太・矢野倉 伊織・八重樫 拓也・松澤 孝男 (41)
- 7 技術指導における目標像の設定 — 走幅跳を対象として — 木野村 嘉則・森 信二 (57)
- 8 大気圧マイクロプラズマのプロセス化に関する研究 根本 栄治・牛久保 佑介 (65)
- 9 コバルトを添加した酸化チタン薄膜の作製とその磁気特性
..... 山口 一弘・林 永子・弥生 宗男・井上 光輝 (71)
- 10 ディスクレスによるプログラミング演習室システムの開発 滝沢 陽三・小飼 敬・山田 真 (75)
- 11 テトラフェニルポルフィリン誘導体のバナジル(IV)錯体の簡便・高収率な合成法の開拓
..... 蝦名 不二夫・安部 慎一郎・小松崎 秀人・佐藤 稔・滑川 真人・石田 明寛 (79)
- 12 二酸化チタン光触媒繊維の作製とその性質 砂金 孝志・黒澤 悟史 (87)
- 13 *Pseudomonas putida* KT2440 株由来リパーゼ遺伝子のクローニングと大腸菌での発現
..... 鈴木 康司・小堀 菜々 (91)
- 14 VBAを用いた紫外・可視吸収スペクトルの自動表示プログラムの開発 佐藤 稔・大和田 創 (97)
- 15 文部科学省科学研究費補助金採択研究 (平成21年度) (103)
- 16 文部科学省原子力研究環境整備補助金採択事業 (平成21年度) (103)
- 17 外部資金受入による共同研究・受託研究 (平成20年度) (104)
- 18 教員事績 (平成20年10月～平成21年9月) (105)
- 19 専攻科特別研究題目一覧表 (平成20年度) (121)
- 20 卒業研究題目一覧表 (平成20年度) (122)

高専機構主催「海外インターンシップ制度」の創設

三好 章一 市坪 誠*

Toward the Development of International Internship Programs based KOSEN Coop Education

Shoichi MIYOSHI and Makoto ICHITSUBO

Abstract: This paper introduces that The Institute of National Colleges of Technology, Japan (INCT) and Ibaraki National college of Technology have jointly developed International Internship Program.

1. はじめに

本論文は、平成21年度社団法人日本工学教育協会主催第57回年次大会「多様化社会を担う工学教育」に於いて口頭発表したものであるが¹⁾、本校学生、教職員に周知徹底をする目的で投稿したものである。

高専専攻科は、平成3年の制度改正により創設され、平成21年度現在、国立高専55校全てに設置されている。高専専攻科修了生は、高い求人倍率(41.1倍(平成19年度))や就職率(ほぼ100%)等の評価を得るとともに、同世代である大学技術系卒業者と比較して、専門知識、勤勉性、責任感など多くの面で優れているとの調査結果²⁾を得ていることから、今後益々その役割等への期待が高まることが予想される。

その一方で、企業側は、高専および高専専攻科に対し、英語力の強化も併せて求めており²⁾、国立高専は、それぞれ独自の教

育目標と教育プログラムにより英語力を伸ばす教育活動を行っている。顕著な事例として、茨城高専では、平成14年に「国際交流センター」を設置して、留学生支援、海外語学研修派遣、海外学術交流および海外インターンシップの支援を実施するとともに、平成15年には海外駐在経験豊富な人材を民間企業から公募採用して、学生の英語コミュニケーション力の強化や国際性の向上(国際化)を図っている。

近年、国立高専機構は、1つの法人として、55国立高専が一体となった、スケールメリットを活かした教育施策が求められており、各高専の教育資源やノウハウ等を活用した連携教育が求められている。

そこで本研究では、国際的に活躍できる実践的人材育成を目的に、専攻科生を対象とした、連携教育プログラム「海外インターンシップ」を紹介するとともに、アンケート調査の結果から、その教育効果について検討・考察を行った。

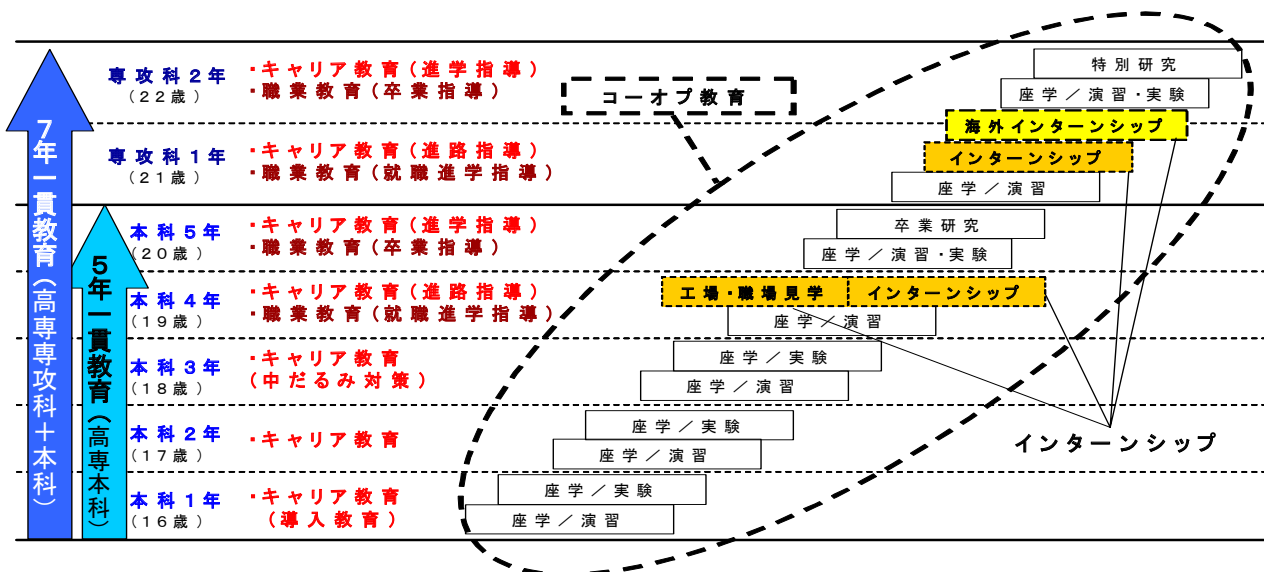


図1 高専のコーオプ教育

*国立高等専門学校機構教育研究調査室長

2. コーオプ教育「海外インターンシップ」

平成20年度、国立高専機構は、国際的に活躍できる能力を持つ実践的な技術者の養成を行うことおよびそのための共同教育の促進を図ることを目的として、国立高専の学生および機構の教職員が企業の海外事業所等において就業体験を行う「海外インターンシップ」プログラムを、新たに計画しこれを実施した。

このプログラムは、複数高専に跨る教員組織が民間企業4社（三井物産（株）、三井化学（株）、東洋エンジニアリング（株）、ツネシホールディングス（株））と連携し、協力企業の海外事業所等（シンガポール、マレーシア、フィリピン）に、学生11名、教員3名の計14名を3週間派遣するものである。

本プログラムは、①派遣対象者をインターンシップが複数回目となる専攻科生とすることで、教室での学習とインターンシップとを一定期間ずつ繰り返す「コーオプ（coop）教育」の実践とした点に大きな特徴がある（図1）。また、②引率教員にも学生と同等以上の就業体験を課したこと、③これを指導する教授陣は一つの学校組織（高専）によらない教員連合チームとしたこと、④教育目標に英語コミュニケーション力・人間力教育を掲げたこと、⑤事前研修から現地研修に至るまで教授陣が全ての教育に責任を持つ緻密な教育プログラムを立案したこと、などが特徴となる。

平成21年2月6日に高専機構と民間企業4社とが連携協定に係る調印を行い、2月25日～26日（2日間）に事前研修、3月8日～28日（3週間）に海外にて研修を行う海外インターンシップを実施した。

3. 教育効果に対する評価方法

派遣学生を対象にアンケート調査を実施した。まず、人間力とは、指導力、社交性、協調性、向上心、積極性、創造力、持

続力、論理性、思いやり、責任感、公共心、工夫する力、問題解決力、人の話を聞く力、知的探求心、プレゼンテーション力、自分の考えを相手に伝える力の17能力と定義し、派遣前において、（本科等で実施した）国内インターンシップにて得た能力（上位3項目）を質問するとともに、派遣終了後に、海外インターンシップで獲得した能力（上位3項目）を質問する調査を行った。学生の自己評価について、国内11名分、海外11名分を回収して（それぞれ回収率100%）、海外インターンシップで獲得した能力について検討を行った。なお、派遣同行した教員に対し、学生が本事業で獲得した能力についてもアンケートを行い、その評価を行った。

4. 結果および考察

4. 1 学生による自己評価：獲得した能力

国内および海外インターンシップで獲得した能力について、アンケート結果を図2にまとめた。学生が国内インターンシップにより獲得した能力は、全15項目となり、このうち顕著な能力（30%以上）は、社交性、積極性、向上心の3項目となった。

学生が海外インターンシップにより獲得した能力は、全10項目となり、このうち顕著な能力は、積極性、社交性、協調性、自分の考えを相手に伝える力の4項目となった。

これより、16歳から専門教育を受ける高専生にとって、在学中、企業等において自らの専攻や将来希望する職業に関連した就業体験を行うインターンシップは、専門知識や実務能力の向上（職業教育）、自らのビジョン・将来の職業選択を考える契機、学習意欲の向上（キャリア教育）の場となるだけでなく、人間力向上にとって有効となることが理解できた。また、教育目標を明確化した、海外インターンシップを実施した結果、英語コミュニケーション力向上の前提となる、積極性や社交性がほとんどの学生で確認され、実社会で役に立つ英語力の強化に極めて有効となることが確認できた。

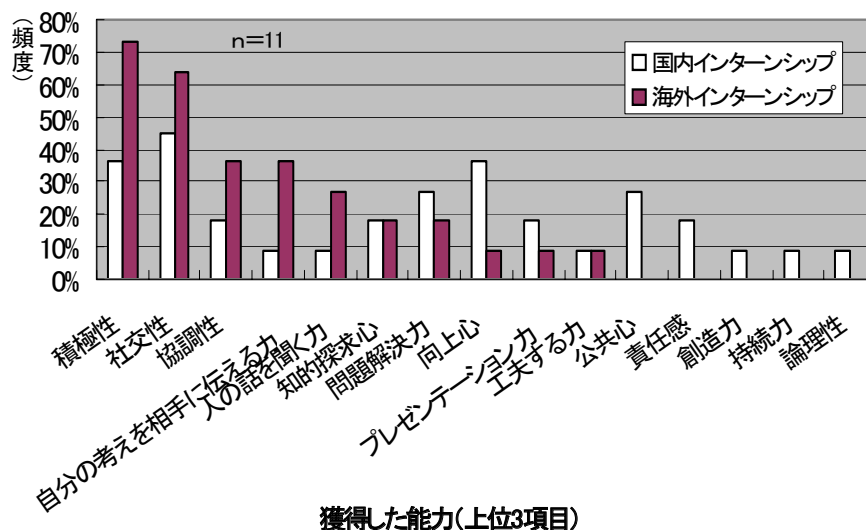


図2 インターンシップにより獲得した能力（学生による自己評価）

4. 2 教員による評価：学生が獲得した能力

教員によって評価された、学生が海外インターンシップにて獲得した能力とは、積極性 (66%)、人の話を聞く力 (66%)、プレゼンテーション力 (66%)、社交性 (33%)、向上心 (33%)、自分の考えを相手に伝える力 (33%) の6項目となった。これより、積極性や人の話を聞く力等の増強が学生の自己評価と教員評価の両方で把握され、英語プレゼンテーション力の向上にも効果が認められた。

5. おわりに

本研究により、得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 国内インターンシップは、社交性、積極性、向上心の向上に効果があること。
- 2) 海外インターンシップは、積極性や人の話を聞く力等の増進とともに、英語プレゼンテーション力の向上に効果があること。

今後の海外インターンシップでは、より長期の研修、受入海外事業所の拡大等、協力企業とより高度の連携を実施したい。

【謝辞】

三井物産 (株)、三井化学 (株)、東洋エンジニアリング (株)、ツネイホールディングス (株) 本支社および受入海外事業所における担当各位には、派遣者に対し懇切・丁寧な研修指導と、安全管理に対する多大なご配慮をいただきました。ここに深く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) (社) 日本工学教育協会第 57 回年次大会工学・工業教育研究講演会口頭発表論文「高専機構主催「海外インターンシップ制度」の創設」三好章一、市坪誠 平成 21 年 8 月 7 日-9 日
- 2) 東京高専「企業による専攻科修了者の評価ならびに専攻科教育への展望—専攻科修了生に係る企業アンケートの結果報告—」, 東京高専,
http://www.tokyo-ct.ac.jp/dbps_data/_material/_localhost/file/06_Senkouka/02_enquete/H20_kigyoku_enguete.pdf, 平成 20 年 7 月

ビーカーのお湯の冷め方〜〜「物理チャレンジ」に挑む

田島 圭一郎、皆川 仁志、森脇 滉、矢野倉 伊織、八重樫 拓也、
一戸 香澄、高橋 雄太、芦名沢 裕太、五十嵐 浩^{*1}

An analysis of how hot water in a beaker cools down : a challenge to “Physics Challenge”

Keiichiro TASHIMA, Hitoshi MINAKAWA, Akira MORIWAKI, Iori YANOKURA, Takuya YAEGASHI,
Kasumi ICHINOHE, Yuta TAKAHASHI, Yuta ASHINAZAWA, Hiroshi IGARASHI,

(ラジオ部学生, ^{*1}自然科学科)

Abstract: Heat energy can transfer from hotter to cooler objects in the following three ways: conduction, convection and radiation. In addition, fluids in containers can be cooled down because of vaporization as well. In this experiment, we analyzed how hot water in a beaker cooled down, measuring the quantity of thermal energy in each case, namely, conduction, convection, radiation, and vaporization.

1. はじめに

平成 21 年、茨城高専ラジオ部は高校生国際物理オリンピックの国内予選ともいえる、第 5 回全国物理コンテスト「物理チャレンジ」(URL: <http://www.phys-challenge.jp/>) に初めて参加した。

この大会では第 1 チャレンジと第 2 チャレンジがあり第 1 チャレンジの通過者が第 2 チャレンジに進めることになっている。第 1 チャレンジでは理論問題とレポート課題が課され、レポート問題として今回は「床に物体を落としたときの跳ね返り」と「お湯の冷め方」が出題され、応募者はいずれかについて各個人でレポートを書くことになっている。今回は第 1 チャレンジに 6 人出場し水戸会場(茨城県立水戸第一高等学校)で試験を受けた。その結果 1 名が第 2 チャレンジに進んだ。第 2 チャレンジは、全国の上位 100 名が約 4 日間、筑波大学に集まり合宿しながら、講義を受けたり見学会に参加し、課題実験と試験に臨む。参加者の中から、翌年夏の国際物理オリンピック出場者をきめる。翌年の国際大会のためオリンピックへの参加候補者は 2 年生以下である。上位入賞者(3 年生も含む)には、いくつかの大学の推薦入学の道が拓ける。

ラジオ部では、共同実験として「お湯の冷め方」について書くことにした。共同実験であるが、各人がそれぞれテーマを決めてレポートを作成した。お湯の冷め方で身近な例として容器に入ったお湯が挙げられ、ラジオ部ではビーカーにお湯を入れたときのお湯の冷め方をテーマにして実験した。はじめはお湯の温度を時間の関数で表すことを目標にしていた。文献を調べていく中「ニュートンの冷却の法則」[1]の存在を知り、ニュートンの冷却の法則が今回の実験に適用できるか検証してみるこ

にした。私たちはまず 500[ml]のビーカーに約 500 [ml]の湯を入れて、湯の温度と質量を一時間一分ごとに測定した。なお、この実験で用いた測定機器についてであるが、NIKKEI 製の水銀温度計(測定温度 100[°C]以下、最小目盛 1[°C])と AND 製 FX-1200i 電子天秤(最大測定量 1200[g]、最小目盛 0.01[g])の物を使用した。なお、実験した部屋の気温を T_m 、実験を始めた時の湯の温度を T_0 とする。

以下に湯の温度のグラフを示す。

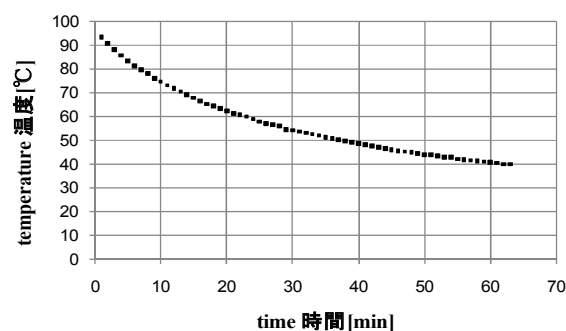


図 1 湯をビーカーに入れた時の、時間と水温の変化の関係(…湯の水温[°C] {実測値})

〈水温…100[°C]〜室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=97.0[°C]$ 〉

Fig1. The relation between time and the change of water temperature when we pour hot water in the beaker.

(…water temperature [°C] {the actual measurement})

〈water temperature…100[°C]〜room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=97.0[°C]$ 〉

測定開始直後の時は水温のグラフは曲線の様であるが、時間が経過するにつれグラフの傾きがゆるやかになっている。このデータをもとに、湯の冷却においてニュート

ンの冷却の法則を適用できるかを検証した。その結果、蓋なしのビーカーの場合則どおりの結果にならなかった。また、このグラフの近似曲線をエクセルの「近似曲線の追加」という機能を用いて指数近似を行った。

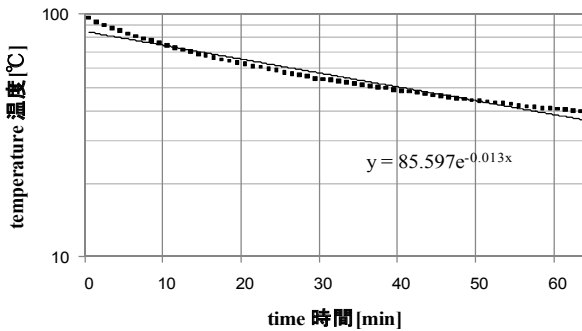


図2 図1のグラフを湯の温度を対数軸にして指数近似曲線とともに表したグラフ

(---湯の水溫[°C] [実測値]、— 指数近似曲線)

〈水溫...100[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=97.0[°C]$ 〉

Fig2.The showed graph that Fig1's graph and the Fig1's approximate curve of index as temperature to logarithmic axis.

(--- water temperature [°C] [the actual measurement],

— the approximate curve of index)

〈water temperature...100[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=97.0[°C]$ 〉

図2において、図1のグラフを指数近似して、温度を対数軸にした。この場合、指数近似曲線は直線のグラフになる。図2の場合、湯の水溫を示した測定点の連りの指数近似曲線の式の値は $y = 85.597 \exp(-0.013x)$ となった。指数近似曲線は測定点の連りと類似しているもののきれいに重なっておらず、実際の測定値のグラフは近似直線より湾曲していた。後で詳しく述べるが、ニュートンの冷却の法則は指数関数で表される。このため、図1に示されたデータではニュートンの冷却の法則が適用できなかったのである。

なぜ湯の温度の下がり方のデータが指数関数で表されないのか。これは、実験初期に水溫が急激に下がっているのが原因だと考えた。急激に下がる原因を探していたとき、ビーカーの中の湯が実験後に減っていることに気がついた。これは湯が気化して空気中に逃げたことに起因する。実験の最中、水溫が高い実験初期にはたくさんの湯気が出ており時間がたつにつれて湯気の量が減っていった。この湯気により湯が高温の時に急激に水溫が下がっていくのではないかと考え、このことを確認するために1分ごとに湯の減少量を測ってグラフを作成した。

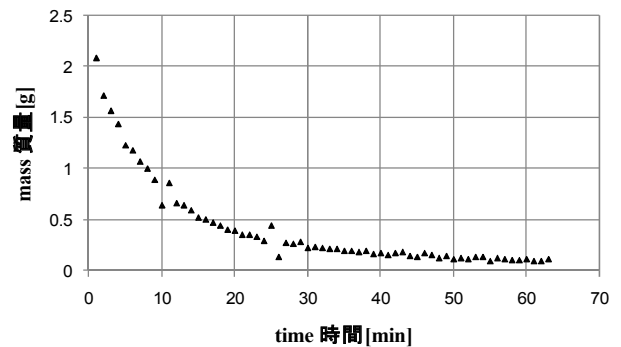


図3 湯の時間と気化による一分毎の質量減少量の関係 (▲▲ 湯の気化による一分毎の質量減少量[g])

〈水溫...100[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=97.0[°C]$ 〉

Fig4. The relation between time and the decrease of mass in a minute by evaporation in hot water.

(▲▲ decrease of mass in a minute by evaporation[g])

〈water temperature...100[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=97.0[°C]$ 〉

図3より、湯の気化による質量減少量は実験開始直後のほうが多いことがいえる。このために実験開始直後にビーカーの中の湯の温度が急激に下がるのではないかと考え、次に500 [ml]ビーカーに500 [ml]のお湯を入れてさらに、断熱材として発泡スチロールの蓋をすることにより気化がほとんど起こらない状態にした上で湯の温度を一時間測定した。



図4 上下を発泡スチロールの蓋をして密閉したビーカーの外観。上下の断熱と、ビーカー内部の空間の締め出しにより、気化の防止と系外への散逸を抑えることができる。

Fig4. The appearance of beaker that shut tight of vertical with styrene foam. This can prevent from vaporizing and scatted and lost of out of beaker by insulate of vertical and out of inside space of beaker.

その時のグラフを以下に示す。

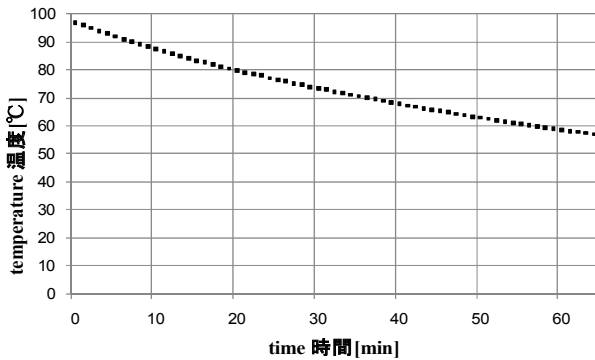


図5 ビーカーに湯を入れて発泡スチロールで蓋をした時の湯の時間と湯の温度の関係
 (…湯の水温[°C] {実測値})
 〈水温…100[°C]〜室温、蓋つき、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=97.0[°C]$ 〉
Fig5. The relation between time and the change of water temperature when we pour hot water in the beaker that shut tight with styrene foam.
 (…water temperature [°C] {the actual measurement})
 〈water temperature…100[°C]〜room temperature, lidded beaker, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=97.0[°C]$ 〉

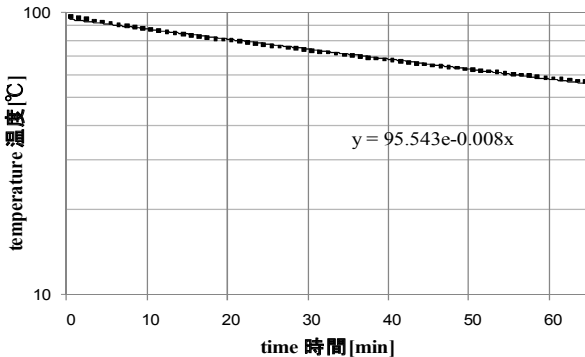


図6 図5のグラフを温度を対数軸にして指数近似曲線とともに表したグラフ
 (…湯の水温[°C] {実測値}、— 指数近似曲線)
 〈水温…100[°C]〜室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=97.0[°C]$ 〉
Fig5. The showed graph that Fig1's graph and the Fig1's approximate curve of index as temperature to logarithmic axis.
 (… water temperature [°C] {the actual measurement}, — the approximate curve of index)
 〈water temperature…100[°C]〜room temperature, lidded beaker, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=97.0[°C]$ 〉

図6の近似式の値は、 $y = 95.543 \exp(-0.008x)$ となった。このグラフから湯の気化による影響を無くすことでより時間と温度のグラフが指数関数に近づくことが示された。

図5で示されている蓋つきのデータでニュートンの冷却の法則を検証してみると、この法則が適用できたのである。

なぜ気化による影響を無くすことによってニュートンの冷却の法則が適用できたのか。この原因を検証していく中、この法則は固体に適用される法則であるということを知った。気化は熱せられた固体が冷める経路ではない。

そこで、ニュートンの冷却の法則が湯の冷却において適用できない原因が湯の気化であるという事を証明することと、湯の温度の変化と気化による水の減少を測定して、熱が気化、輻射、伝導どの経路でどの程度の割合で逃げていくのかを調べた。

なお、私たちはこれまで熱の逃げ方は伝導、輻射、対流の三通りのみと考えて実験していたが、今回の実験では、お湯と外気は対流しないとされたため、対流による逃げは考慮せず、気化による熱の逃げに特に着目した。一般的に水が気化する際に周りから熱を奪う。これを潜熱(気化熱)という。今回は、気化によるお湯の質量の変化を計測しながら、ガラスのビーカーと銅製の熱量計の容器両方で容器に入った湯の各熱移動経路(気化、輻射、伝導)での熱の逃げの解析を行った。

2. ニュートンの冷却の法則の検証

ニュートンの冷却の法則とは液体や気体などの媒質中におかれた高温の「固体」が媒質によって冷却される様子を表した法則で、媒質中の固体から媒質に熱が伝わる速度は、固体の表面積及び固体と媒質の温度差に比例する。すなわち固体の持つ熱量 Q 、時刻 t 、固体の表面積 S 、固体の温度 T 、媒質の温度 T_M の間には

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha S(T - T_M)$$

が成り立つという。このとき、比例定数 α は固体の表面及び媒質の性質によって決まる定数である。 T_{M0} とは $t = 0$ における固体の温度とし、先ほどの法則を利用すると、

$$T = (T_{M0} - T_M) \exp\left(-\frac{\alpha S}{C} t\right) + T_M \quad \dots(1)$$

(1)式は時間 t の指数関数であることが分かる。「1.はじめに」ですでに述べたことであるが、「1.はじめに」の実験では容器に蓋をしない場合、時間と水温のグラフは指数関数ではうまく表すことができず、蓋をして気化がほとんど起きないようにした場合、指数関数でうまく近似できた。このため、容器に入った液体の温度の冷め方も気化が起こらないようにすればニュートンの冷却の法則を適用できたのである。

この結果は気化によって熱の移動が行われる液体(今回は水)にはニュートンの冷却の法則が適用できないことを示している。しかし、気化、輻射、伝導による各熱

移動量それぞれを具体的に求めて気化がニュートンの冷却の法則が適用できない原因であるということを証明したわけではない。よってこれより、各熱移動経路における熱の移動、およびその割合を表して検証していくとする。

3. 各熱移動経路における熱の移動量

3.1 解析の手法

実験方法は、200 [ml] ビーカーと熱量計の銅製のカップに約 80[°C]のお湯 200[ml]を入れ、一時間一分毎に湯の温度と質量を測定した。物体の熱の移動には一般的に伝導、輻射、対流がある。そして今回は気化、輻射、伝導による熱の移動を考えた。なお、伝導に関しては全体の熱の移動分からほかの二つの要素による熱の移動分を引くことによって求めた。

今回、AND製のAD-5624 THERMOMETER 中心温度計とメーカー不詳の中心温度計を使用したそれぞれ温度の補正を行った。まず零点の温度 a [°C]と 100[°C]点での温度 b [°C]を測定した。この中心温度計はサーミスタを用いており、実際の温度変化に対する温度表示の変化が比例すると仮定した。その時、実際の温度を y [°C]、表示温度を x [°C]とすると、

$$y = \frac{100}{b-a} \times x - \frac{100}{b-a} \times a$$

となる。今回使用した2つの中心温度計の零点と100[°C]点の値は、零点が0.6[°C]で100[°C]点が102.5[°C]のもので、零点が0.0[°C]で100[°C]点が103.1[°C]のものである。今回は温度補正をしなくても差し支えないとして、そのままの表示された温度の値を使った。



図7 実験の様子。左側が銅製の容器、右側が200[ml]ビーカーである。今回の実験では、どちらの容器も電子天秤の上に載せ、質量変化と同時に湯の温度も測定した。
Fig.7. The state of this experiment. The vessel on the left side is made by copper, on the right side is beaker. We put both vessel on the electron balance and measured the

change of mass and hot water temperature at the same time this experiment.

なお、図7の電子天秤は2つとも島津製作所製LIBROR EB-330S、最大測定量 330.00[g]、最小目盛 0.01[g]である。

また、この実験では電子天秤の表示の正確さも調べた。電子天秤に分銅を載せて電子天秤の表示の正しさを確認した際、分銅の質量と電子天秤の表示にずれが出た。しかし、日を改めて再度実験してみると1回目とは違う値になった。

表3-1 電子天秤に分銅を載せた時の電子天秤の表示。左側がFX-1200i、右側がLIBROR EB-330Sである。

Table3-1.The indication of the electron balance when we put the weight on the electron balance. The left side table is FX-1200i, the right side table is LIBROR EB-330S.

分銅の質量[g]	1回目	2回目	分銅の質量[g]	1回目	2回目
50	50.01[g]	50.00[g]	50	49.99[g]	49.99[g]
100	100.01[g]	100.00[g]	100	99.98[g]	99.97[g]
150	150.02[g]	150.00[g]	150	149.96[g]	149.95[g]

この原因を分銅が受ける空気による浮力によるものではないかと仮定して実験を行い、計算を行った。

分銅に働く浮力 F [N]は分銅を取り巻く空気の密度を ρ [kg/m³]、分銅の体積を V [m³]、重力加速度を g [m/s²]とすると、

$$F = \rho Vg$$

で表される。なお、空気の密度は水銀気圧計で気圧を測定し気温を求め、理科年表[2]を用いて空気の密度を求めた。以下に分銅に働く浮力による分銅の重さの変化と電子天秤の表示のずれの関係を表した表を示す。

表3-2 浮力による分銅の重さの予想変化量

Table3-2.The expected change quantity of the weight's weight by buoyancy.

分銅の	2010/1/5(火)	2010/1/6(水)
質量[g]	(1004.0[hPa]、10.5[°C])	(1001.5[hPa]、13.8[°C])
50	0.007816[g]	0.007721[g]
100	0.01563[g]	0.01544[g]
150	0.02344[g]	0.02316[g]

表3-3 分銅を電子天秤に載せた時の電子天秤の表示。上の表がFX-1200i、下の表がLIBROR EB-330Sである。

Table3-3.The indication of electron balance when we put the weight on the electron balance. The upper table is FX-1200i, the lower table is LIBROR EB-330S.

分銅の質量[g]	2010/1/5(火) (1004.0[hPa], 10.5[°C])	2010/1/6(水) (1001.5[hPa], 13.8[°C])
50	50.00[g]	50.01[g]
100	100.01[g]	100.01[g]
150	150.01[g]	150.02[g]

分銅の質量[g]	2010/1/5(火) (1004.0[hPa], 10.5[°C])	2010/1/6(水) (1001.5[hPa], 13.8[°C])
50	49.99[g]	50.00[g]
100	99.97[g]	100.00[g]
150	149.95[g]	150.00[g]

電子天秤に表示される分銅の重さは本来「表 3-2 浮力による分銅の重さの予想変化量」に表わされた数値を引いた値になるはずであるが、表 3-2 と表 3-3 を比較してみると、予想された値とは違う値となっている。この原因として考えられるものとしては、天秤自体の精度の問題が原因としてあげられると思われる。また、FX-1200iの方に水平器が付いており、正確に水平が出せるのに対して LIBROR EB-330S のほうは水平器が付いていない。このため天秤が水平にならず表示にずれが出たとも考えられる。

しかしながら表示のずれはこの実験に大きな影響を及ぼすものではないと考え、これらの天秤を使用した。

3.2 両容器における気化による質量減少量

まず、湯の温度と一分毎の質量を電子天秤と中心温度計を用いて同時に測定した。ここで測定した一時間の質量変化のデータをもとに一分毎の質量減少量を計算した。以下に、気化によって減少した湯の質量のグラフを示す。

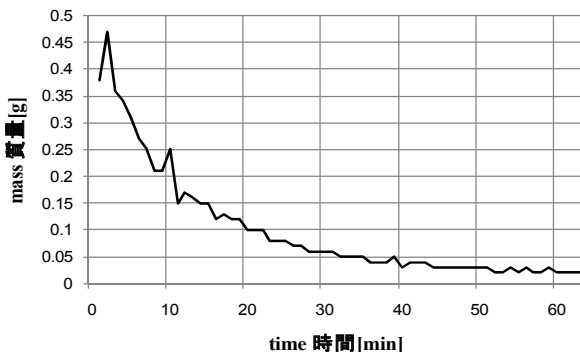


図 8 湯をビーカーに入れた時の、時間と気化による質量減少量の関係(— 質量減少量[g])
 〈水温...80[°C]〜室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$ 〉

Fig8. The relation between time and the decrease of mass by evaporation when we pour hot water in the beaker.

(— the decrease of mass[g])
 〈water temperature...80[°C]〜room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉

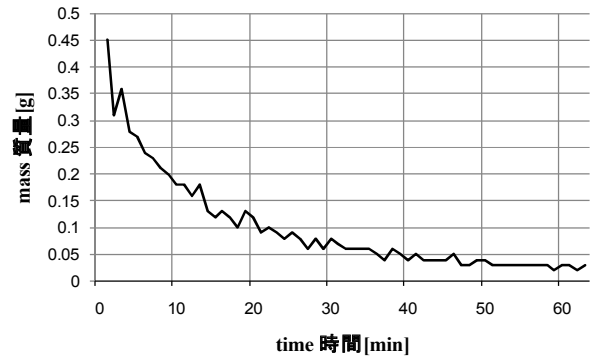


図 9 湯を銅製の容器に入れた時の、時間と気化による質量減少量の関係(— 質量減少量[g])

〈水温...80[°C]〜室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=81.2[°C]$ 〉
 Fig9. The relation between time and the decrease of mass by evaporation when we pour hot water in the vessel made by copper.

(— the decrease of mass[g])
 〈water temperature...80[°C]〜room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

グラフから読み取れるように、開始直後、つまり湯の温度が高い状態であると気化によって失われた湯の量は多く、30分を過ぎたあたりから気化による質量の逃げは少なくなった。つまり、湯の温度が高ければ気化量が増加し、低ければ減少することが湯の温度と時間の関係を表したグラフから読み取れる。このグラフから、気化による湯の熱の逃げのグラフも直線のようなグラフではなく、曲線のグラフになることが予想される。

3.3 気化による熱の移動量の分析法

湯が気化することによって失う熱量 $Q[J]$ は、気化した湯の質量を $m_q[g]$ 、水の気化熱を $q \doteq 2256[J/g]$ (539[cal/g])[3]とすると次式で表される。

$$Q = m_q \cdot q$$

以下に気化による熱の逃げの量と時間との関係を示す。

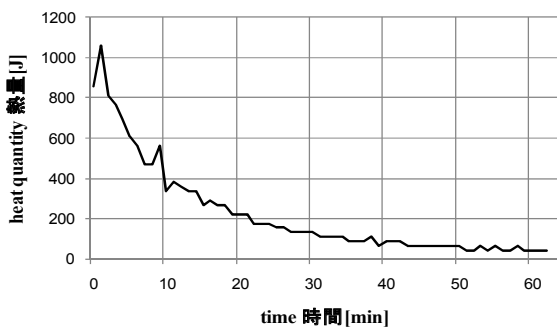


図 10 湯をビーカーに入れた時の、時間と気化による熱の逃げの量の関係(— 気化による熱の減少量[J])
 〈水温…80[°C]～室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$ 〉
Fig10. The relation between time and the escape of heat by evaporation when we pour hot water in the beaker.
 (— the escape of heat by evaporation[J])
 〈water temperature…80[°C]～room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉

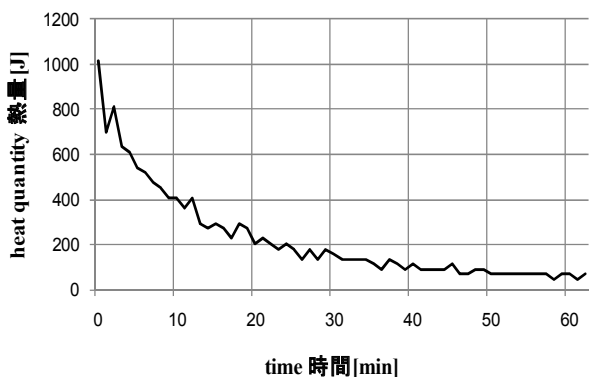


図 11 湯を銅製の容器に入れた時の、時間と気化による熱の逃げの量の関係(— 気化による減少量[J])
 〈水温…80[°C]～室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=81.2[°C]$ 〉
Fig11. The relation between time and the escape of heat by evaporation when we pour hot water in the vessel made by copper.
 (— the escape of heat by evaporation[J])
 〈water temperature…80[°C]～room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

両グラフから時間が経過するにつれて一分毎の気化による熱の減少量が減っていくことがわかる。つまり、湯が高温のときは気化する湯の量が多く、液体が低温になるにつれて気化する湯の量が減ることがわかる。

3.4 輻射による熱の移動量の分析法と結果

輻射による熱の移動は温度の関数として表せることが知られている。シュテファン-ボルツマンの法則[4]から

物体の絶対温度を $T_s[K]$ 、シュテファン-ボルツマン定数を $\sigma[W/m^2K^4]$ 、単位時間、単位面積当たりの放出エネルギーを P とすると、

$$P = \sigma \cdot T_s^4$$

が成り立つという。また物体は輻射によるエネルギーを100[%]放出せず、一定の割合で放出する。その割合を放射率と呼び、ここで ϵ とする。さらに、物体は周りの空気から輻射熱を受けていることを考慮し、空気の温度を T_t とすると先の式は

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_t^4)$$

となる。

今回空気の温度は常に一定とすると、 T_t^4 は一定値なので、 T_s^4 の関数となる。この P の値に放射した時間と表面積をかければ熱量が求められるのだが、 P は T_s の値から刻一刻と値が変わるので、一分毎の輻射による熱の逃げを求めるためには一分毎の平均の P の値を求めてから表面積と放射した時間をかければよい。積分を用いてもよいが、今回は2分単位で考えてその間の1分のときの値を平均値とした。放射率は実際に計測することができる。その方法では、放射率の設定を可変できる放射温度計と放射率が0.95の黒体テープを用いる。計測方法はまず容器に黒体テープを張り付けて、放射温度計の放射率を0.95に設定して黒体テープの部分の温度を測る。そして容器の表面の温度を測定して、その温度の値が黒体テープの部分の温度と等しくなるように再度放射率を設定する。その放射率の値が容器の放射率となる。しかし今回は、八光社のホームページ[5]に載っていた放射率表の値を用いた。銅の普通光沢面の放射率が0.072でガラスの放射率は0.95である。

これらのことを用いて、以下に湯の時間と輻射による熱移動の関係を表したグラフを示す

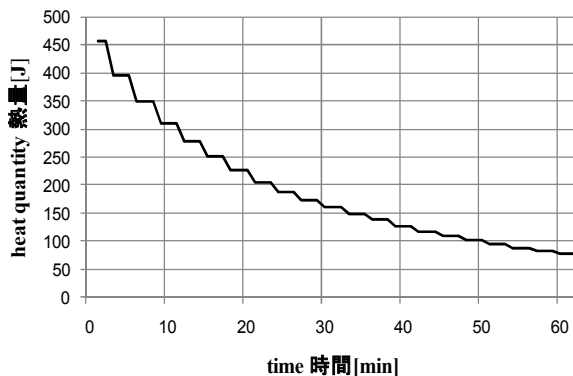


図 12 湯をビーカーに入れた時の、時間と輻射による熱の逃げの量の関係 (— 輻射による熱の逃げ[J])
 〈水温…80[°C]～室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$ 〉

Fig12. The relation between time and the escape of heat by radiation when we pour hot water in the beaker.

(— the escape of heat by radiation[g])
 〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉

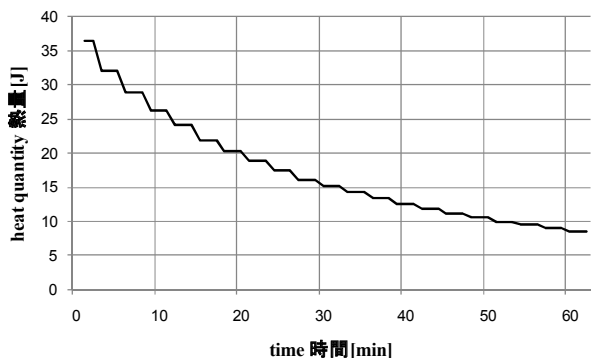


図 13 湯を銅製の容器に入れた時の、時間と輻射による熱の逃げの量の関係 (— 輻射による熱の逃げ[J])

〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

Fig13. The relation between time and the escape of heat by radiation when we pour hot water in the vessel made by copper.

(— the escape of heat by radiation[g])
 〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

3.5 伝導による熱の移動量の分析法と結果

伝導による熱の移動 Q_d は、熱の逃げの総量 Q から気化による熱の逃げ Q_k と輻射による熱の逃げ Q_h を引くことで求められる。

$$Q_d = Q - (Q_k + Q_h)$$

この式から伝導による熱の逃げと時間とのグラフを作成した。なお、伝導による熱の逃げのデータがばらつくのは、測定値同士の引き算による有効数字の桁落ちのためである。

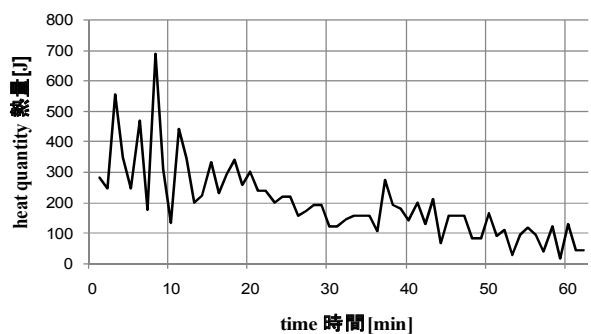


図 14 湯をビーカーに入れた時の、時間と伝導による

熱の逃げの量の関係(— 伝導による熱の逃げ[J])

〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉

Fig14. The relation between time and the escape of heat by conduction when we pour hot water in the beaker.

(— the escape of heat by conduction[J])
 〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉

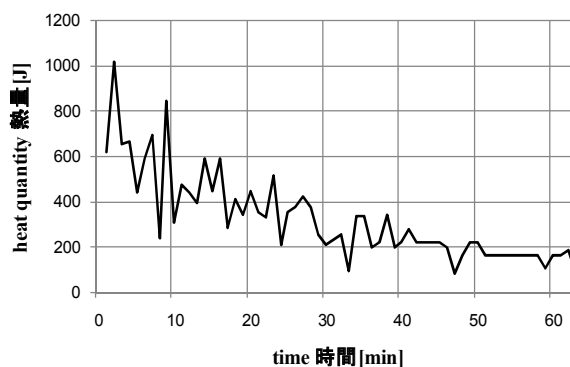


図 15 湯を銅製の容器に入れた時の、時間と伝導による熱の逃げの量の関係(— 伝導による熱の逃げ[J])

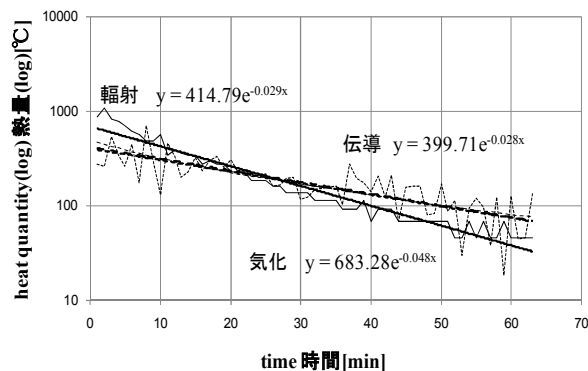
〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

Fig15. The relation between time and the escape of heat by conduction when we pour hot water in the vessel made by copper.

(— the escape of heat by conduction[J])
 〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

4. 気化、輻射、伝導によるそれぞれの熱の逃げの量のグラフの近似曲線の比較

以下に 3.2、3.3、3.4 で示した気化、輻射、伝導による熱の逃げのグラフを片対数のグラフで表し、それぞれの傾きを比較した。



— The lost heat by evaporation 気化による熱の逃げ[J]
 The lost heat by radiation 輻射による熱の逃げ[J]
 ----- The lost heat by conduction 伝導による熱の逃げ[J]
 — The approximate curve of index(evaporation) 指数近似曲線(気化)
 The approximate curve of index(radiation) 指数近似曲線(輻射)
 ----- The approximate curve of index(conduction) 指数近似曲線(伝導)

図 16 湯をビーカーに入れた時の、時間と熱量を対数軸として各熱移動経路における熱の逃げのグラフをその指数近似曲線とともに表したグラフ

〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉
 Fig16. The showed graph between time and the escaped heat at each movement way of heat and approximate curve of index as heat quantity to logarithmic axis when we pour hot water in the beaker.
 〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉

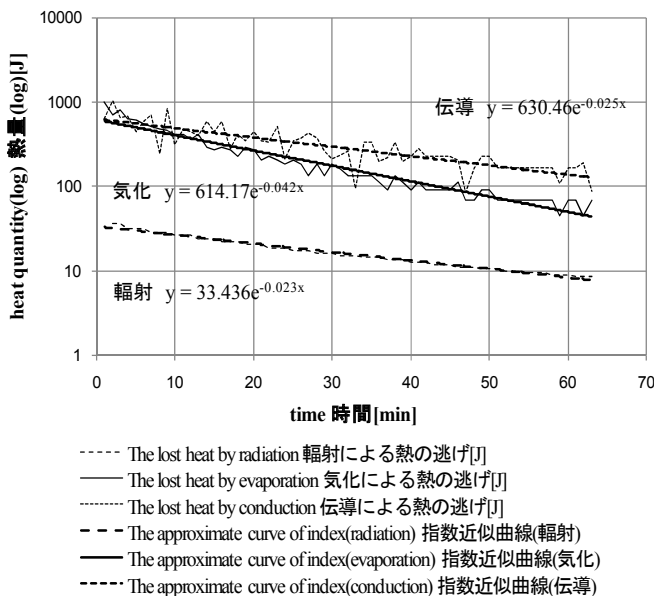


図 17 湯を銅製の容器に入れた時の、時間と熱量を対数軸として各熱移動経路における熱の逃げとその指数近似曲線を表したグラフ

〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉
 Fig17. The showed graph between time and the escaped heat at each movement way of heat and approximate curve of index as heat quantity to logarithmic axis when we pour hot water in the vessel made by copper.
 〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

図 16 のグラフにおいて、輻射と伝導の指数近似曲線が重なっており見づらいがこれは傾きがほぼ等しい、つまり輻射と伝導の熱の逃げの量を足した時に指数関数で表されるということを意味している。しかし、気化の指数近似曲線は輻射と伝導の指数近似曲線より傾いている。図 17 のグラフにおいても同様で、輻射と伝導の傾きはほぼ等しいが、気化の指数近似曲線のみ傾きが大きくなっている。

5. 各熱移動経路における熱の逃げの量の分析

以下に 3 章で求めた時間と気化、輻射、伝導それぞれの熱移動経路による熱の逃げと全体の熱の逃げの量、およびその割合の関係を示したグラフを示す。

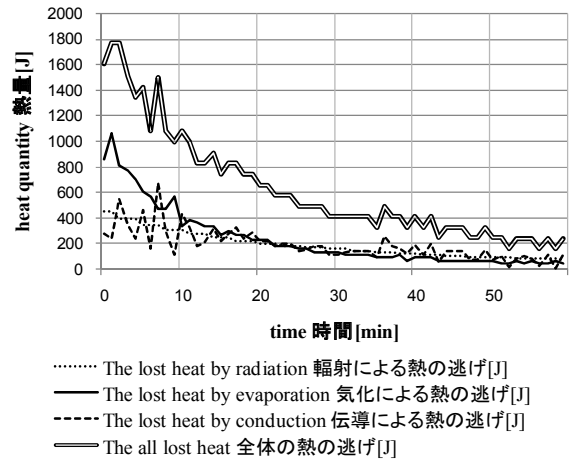


図 18 ビーカーでの、時間と各熱移動経路で逃げた熱の量の関係

〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉
 Fig18. The relation between time and the quantity of escaped heat at each movement way of heat when we pour hot water in the beaker.
 〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉

図 18 のグラフにおいて、実験開始直後は気化による熱の逃げが輻射と伝導よりも多くなっていましたが、実験開始から 20 分後あたりから一分間における気化、伝導、輻射によるそれぞれの熱の逃げの量はほぼ等しくなりました。

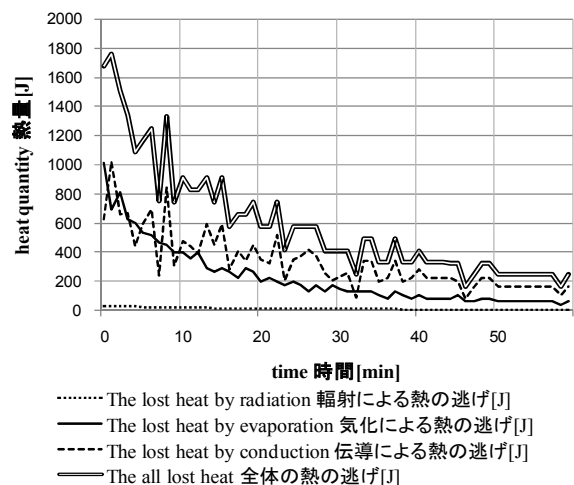


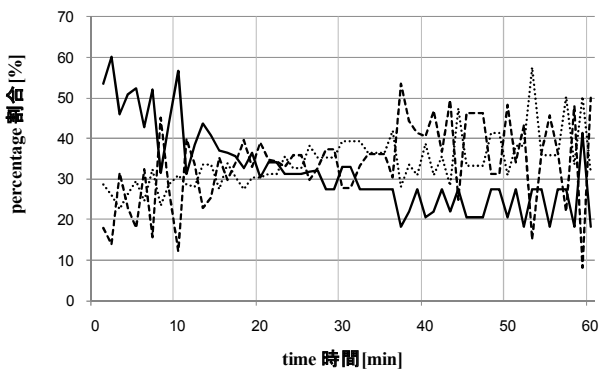
図 19 銅製の容器での、時間と各熱移動経路で逃げた熱の量の関係

〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

Fig19.The relation between time and the quantity of escaped heat at each movement way of heat when we pour hot water in the vessel made by copper.

〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

図 19 は、実験開始直後は一分間の気化と伝導による熱の逃げがほぼ同じ量であった。しかし、実験開始から 10 分後あたりから気化より伝導による熱の逃げのほうが多くなった。なお、輻射による熱の逃げは気化と伝導より非常に少ないものであった。



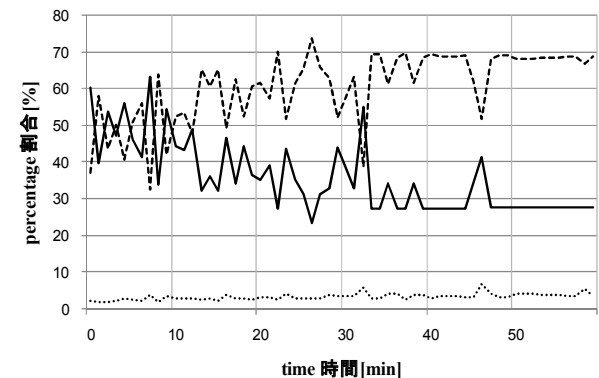
..... The percentage of lost heat by radiation 輻射による熱の逃げの割合[%]
 —— The percentage of lost heat by evaporation 気化による熱の逃げの割合[%]
 - - - - The percentage of lost heat by conduction 伝導による熱の逃げの割合[%]

図 20 ビーカーでの、時間と各熱移動経路で逃げた熱の量の割合の関係

〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉

Fig20.The relation between time and the percentage that quantity of escaped heat at each movement way of heat when we pour hot water in the beaker.

〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=79.0[°C]$ 〉



..... The percentage of lost heat by radiation 輻射による熱の逃げの割合[%]
 —— The percentage of lost heat by evaporation 気化による熱の逃げの割合[%]
 - - - - The percentage of lost heat by conduction 伝導による熱の逃げの割合[%]

図 21 銅製の容器での、時間と各熱移動経路で逃げた熱の割合の関係

〈水温...80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

Fig21.The relation between time and the percentage that quantity of escaped heat at each movement way of heat when we pour hot water in the vessel made by copper.

〈water temperature...80[°C]~room temperature, without lid, $T_m=23.0[°C]$, $T_0=81.2[°C]$ 〉

図 20 について、実験開始直後は気化による熱の逃げが 50~60[%]ほど占めていたが、時間がたつにつれ伝導と輻射に逆転された。また、図 21 においても実験開始直後は気化と伝導がほぼ同じ割合であったが、10 分ほどたつところで伝導の割合が大きくなり、気化の割合は減少した。

なお、10 分ごとの各熱移動経路における熱の逃げの割合の表も作成した。

表5-1 ビーカーでの 10 分ごとの各熱移動経路における熱の逃げの量の割合

Table5-1.The percentage of the quantity that escaped heat at each movement way of heat at every 10 minute in beaker.

時間 [min]	気化による	気化による	輻射による	輻射による	伝導による	伝導による	全体の
	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	
10	6881	48.97	3775	26.87	3396	24.17	14052
20	3091	21.76	2581	18.17	8526	60.03	14203
30	1715	31.55	1866	34.34	1853	34.11	5435
40	1038	25.80	1440	35.80	1545	38.40	4022
50	744.5	23.30	1108	34.67	1343	42.03	3195
60	541.4	24.51	872.2	39.48	795.4	36.01	2209
一時間合計	14030	32.55	11640	27.00	17440	40.00	43120

表 5-2 銅製の容器で 10 分ごとに各熱移動経路の熱の逃げの割合を求めた表

Table5-2.The percentage of the quantity that escaped heat at each movement way of heat at every 10 minute in the vessel made by copper.

時間 [min]	気化による	気化による	輻射による	輻射による	伝導による	伝導による	全体の
	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	
10	6159	49.00	307.7	2.44	6125	48.56	12592
20	3091	39.89	225.3	2.90	4446	57.21	7762
30	1827	33.77	172.3	3.18	3421	63.05	5421
40	1241	32.31	138.7	3.60	2467	64.08	3847
50	902	29.13	113.0	3.64	2088	67.22	3103
60	654	27.73	93.8	3.97	1616	68.30	2364
一時間合計	13900	39.61	1051	2.99	20140	57.39	35090

80[°C]~室温の温度範囲で一時間全体での熱の逃げの割合で一番多く割合を占めていたのは、ビーカー、銅製

の容器ともに伝導によるものだった。

実験開始から 10 分間は両容器において気化の割合が一番か伝導とほぼ同等で、ビーカーでの気化の割合は 48.91 [%]、銅製の容器の場合は 48.97 [%]であった。しかし、気化による熱の逃げは 10 分以後では伝導よりも割合が少なくなった。そして、60 分後にはビーカーの割合は 24.51 [%]、銅製の容器では 27.73 [%]と実験開始直後の割合の半分ほどになった。

6. 考察と結論

前述した結果から、以下のことが言える。

「2. ニュートンの冷却の法則の検証」において、気化による熱の逃げがニュートンの冷却の法則が成り立たない原因であるということが証明されたわけであるが、「4. 気化、輻射、伝導によるそれぞれの熱の逃げの量のグラフの近似曲線の比較」で示されているグラフが結果を裏付けている。4 章で述べたように、熱量を対数軸で表した場合、輻射と伝導の指数近似曲線の傾きはほぼ同じなのに対し、気化の指数近似曲線は輻射と伝導のグラフより傾いている。つまり、湯の熱移動経路が輻射と伝導のみであれば全体の熱の逃げは輻射と伝導の熱の逃げの和であるから指数曲線で表せるのだが、気化も含まれる場合、気化による熱の逃げを足し合わせると指数曲線で表すことができなくなってしまうのである。

また、気化による熱の逃げが湯の全体の熱の逃げにおいて伝導の次に大きな割合を占めているということも重要である。5 章で述べたように気化による熱の逃げの割合は実験開始直後には 50 [%]弱、60 分後でも 20 [%]台であり、気化が湯の冷却に及ぼす影響は大きいものである。

このため、ニュートンの冷却の法則が蓋なしのビーカーの場合には適用できなくなってしまうのである。つまり、湯のすべての熱移動が輻射と伝導にのみで構成されている場合、湯の時間と温度変化の関係は指数関数で表されるのでニュートンの冷却の法則が適用できるということである。

これらのことより、外気と触れている湯が冷めていく場合には気化による熱の逃げの影響が大きく、これがニュートンの冷却の法則が成り立たなくなる原因であるということが証明できた。

7. 今後の課題

今回の実験では、伝導による熱の逃げの量を全体の熱量からほかの二要素を引いた値としたので、厳密には求められなかった。また放射率の測定を自分たちで実験して求めたいと思う。そうすることによって、伝導、輻射による熱の逃げを厳密に求められる。また、ニュートンの冷却の法則を実際の固体で検証してみたい。

8. 謝辞

今回の研究で、八光社の熱の実験コンテストの財源から測定器を購入した。本校の自然科学科物理教員の原嘉昭先生には、熱量計の銅のカップ、電子天秤、放射温度計、ノギスなどの実験道具を貸して頂いた。ラジオ部顧問の松澤孝男先生には実験について多方面にわたって助言を頂いた。本校の人文科学科英語教員の奥山先生からは英文の正しさについて助言を頂いた。以上の方々に感謝いたします。

また、「1.はじめに」の部分で述べた物理チャレンジについてであるが、今回が初めてであったことと、新型インフルエンザによる臨時休校（7 月）の余波で前期期末試験期間が延期され第 2 チャレンジの合宿（筑波大学）と完全に重なってしまったため、合宿への参加を諦めざるを得なかった。

単なる文化部の活動と矮小化して考えず、理科教育の振興のほか、進学ルートの開拓にも通じる。学校の教務関係者や、理科教員の真剣な取り組みを期待する。

物理チャレンジへの参加および第 2 チャレンジまでの道は拓かれたので、来年度以降多くの学生が自主的に参加することと、学校としての制度的な支援（高文連以外の催しへの公休の適用）を期待する。

参考文献

- [1] 岩波 理化学事典 第 5 版第 9 刷 p.1008 No.146、発行者 山口昭男 岩波書店 2006 年刊行
- [2] 理科年表 平成 15 年版 p.374 物 26、発行者 村田誠 四郎 丸善株式会社 平成 14 年 11 月 30 日発行
- [3] 日本機械学会 蒸気表 p.7 表 I-2、発行者 田中 實 日本機械学会 1968 年刊行
- [4] 岩波 理化学事典 第 5 版第 9 刷 p.635 No.726、発行者 山口昭男 岩波書店 2006 年刊行
- [5] 八光社のホームページ
<http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01070.htm>

富士山頂対応電気ポットの試作 ——八光「熱実験コンテスト」始末

矢野倉 伊織、森脇 滉、八重樫 拓也、奥山 慶洋¹ラジオ部学生、人文科学科¹

An attempt to make an electric pot, suitable for the summit of Mt. Fuji

Iori YANOKURA, Akira MORIWAKI, Takuya YAEGASHI and Yoshihiro OKUYAMA

Abstract: A conventional electric pot does not stop heating until reaching 100 °C which is the boiling point for water at 1 atmosphere. The boiling point on a high mountain (like Mt. Fuji) decreases with a corresponding increase in altitude, because barometric pressure decreases. In the case of Mt. Fuji, the water boiling point is about 88 °C. We developed a remodeled electric pot with a temperature control function set in 1 °C gradients; not 5 °C we tried to test it at the summit of Mt. Fuji.

1. はじめに

わたしたちラジオ部員は簡易放射線測定器「はかるくん」を用いて身のまわりの自然放射線の測定を続けてきた。特に航空機内の放射線の強さに驚いた[1-3]。2次宇宙線の影響だという。地表から高さを増すとともに放射線の線量率は高くなる。それならば、国内最高地点、富士山頂上の放射線強度はどうか興味を持ち、平成18年度以来わたし達は富士山測定登山を続けている。

平成19年、NPOの「富士山測候所を活用する会」が国有財産の気象庁富士山測候所を借り受ける形で富士山頂の測候所の一般の利用の道が拓けた。平成21年度「富士山頂での科学教育の試行」という課題で利用申請し20件の採択課題のひとつとして利用の機会を得た。下界(地表)で当たり前のことが、山頂では当たり前ではなくなる。第1は気圧が約2/3になることである。理科室の水銀気圧計(フォルトンの気圧計)が使えない。水銀柱の高さが目盛り以下になってしまうからである。どうやって測るか? 気圧が下がれば血中飽和酸素濃度 SpO_2 が低下し慢性の高山病寸前になる。酸素濃度が減り火が燃え難くなる? 更に水の沸点も下がる。2泊3日の実験で得た経験の一部を紹介する。

富士山頂気象庁旧富士山測候所(図1)は山頂三角点横の海拔3776[m]にある。ラジオ部では気象庁旧富士山測候所を正式に借用し、一日目と二日目に二号庁舎1Fの食堂を借り、三日目には二号庁舎2Fの個室を二部屋借りて、実験をさせていただいた(平成21年8月23日~25日)。

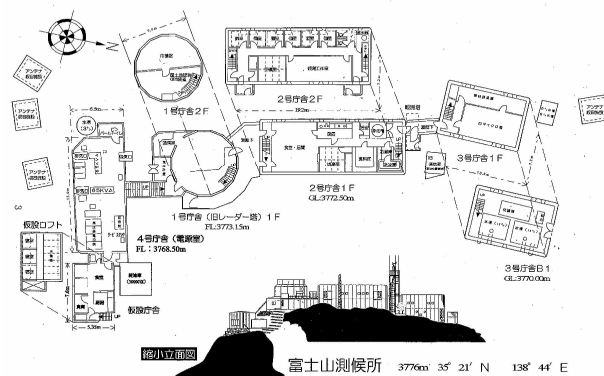


図1 富士山頂気象庁旧富士山測候所の見取り図

Fig.1 A Mt. Fuji weather station's sketch.

富士山頂では気圧の影響により、水の沸点が下界より低い。理科年表[4](平成18年版、水の沸点)に載っている気圧による沸点の公式から、富士山での気圧を644[hPa]として計算すると、水の沸点は約88[°C]である。山頂で実測すると87[°C]であった。

水の沸点の公式は、気圧を p [torr]で表すと、 $T[°C]=100.0[°C]+0.0367(p[torr]-760)-0.000023(p[torr]-760)^2$ である[1]。

[torr]は気圧の単位で1[mmHg]、すなわち133.322[Pa]である。

気圧 p を国際単位 SI の[Pa]で表すと上式は、

$T[^\circ\text{C}] = 100.0 + 0.0367(P[\text{Pa}]/133.322 - 760) - 0.000023(P[\text{Pa}]/133.322 - 760)^2$

である。

富士山頂の測候所は自炊である。水も下界から運び上げる。2006年、2007年夏、富士山測候所の見学および実験利用をした。そこで体験したことに、自炊のため電気ポットでお湯を沸かそうとすると、電気ポットのお湯は沸騰を続け、保温状態にならず運び上げた貴重な水がすぐに無くなってしまふことである。この原因は、電気ポットの設定温度 $98[^\circ\text{C}]$ になるまで、ヒータに電気を流し続けることがある。その状況を見て、気圧に合わせて保温設定温度を変える保温温度気圧追従型電気ポットを考えた。このアイデアは第2回八光熱コンの課題に採択された。1年目は担当者が多忙で具体的な解決方法の見当がつけられず気圧と高度の関係を文献で調べただけで進展しなかったが、今年度、担当者を変えて始めからやり直した。

だが、1年のもたつきは重大で、その間にメーカーの対応が進み2009年現在には電気ポットの新機能として、沸騰を感知してヒータへの出力が止まる電気ポットが発売されている。沸騰を感知して止まるという意味では、気圧追従型の電気ポットとなら変わらない。私たちは開発方針を変え、気圧追従型を放棄し設定温度を $1[^\circ\text{C}]$ 刻みで変えることのできる電気ポットを開発することにより当初の目的である富士山頂でも使用できる電気ポットの開発を行った。

2009年8月に実際に富士山に登り富士山測候所をお借りして、 $1[^\circ\text{C}]$ 刻みで保温設定温度を変えられる電気ポットを試し、好みの温度を電気ポットで作らせて、富士山のような気圧の低い場所でも使用できることがわかった。

2. 設定温度可変型電気ポットの開発

電気ポットの構造を理解するために、電気ポットの大手メーカーである「TIGER」と「象印」の2社の電気ポットを分解した。2社の電気ポットを分解した理由としては、1社だけだと、メーカー特有の癖や仕様があるかもしれないと判断したためである。分解したのは TIGER の「PVQ-G」と象印の優湯生「CV-DW」である。

まず、魔法瓶内の水を温めるヒータは2社の電気ポットとも魔法瓶の外側の底にはりついている。円盤状の形をしていて三本の線が飛び出していてテスターで抵抗を測定した。その結果 $12.0[\Omega]$ と $155.5[\Omega]$ の抵抗がヒータ内にあることがわかった。抵抗の測定は室温が $19[^\circ\text{C}]$ の環境で行った。PVQ-Gでの消費電力は $905[\text{W}]$ と記載されている。この消費電力に見合う抵抗の並びは、オームの法則から並列に繋いだ時の消費電力に近い。並列時の合成抵抗は、

$R1 \times R2 / (R1 + R2)$ より $11.14[\Omega]$ で、電気ポットのヒータには $100[\text{V}]$ の電圧がかかっているので

$P[\text{W}] = V^2/R$ より、 $898[\text{W}]$ となる。

$905[\text{W}]$ とのズレがあるが、ヒータのみの消費電力を計算し回路側の消費電力を考えていないのと、精度の悪いテスターを使用したことが原因であると考えられる。実際に他のテスターで測定しても抵抗の値がズレることがあった。

温度の測定方法は2社とも魔法瓶の底にサーミスタが取り付けられており、グリスが塗られていた。次に、魔法瓶内の水の給湯に使用する電動ポンプでは、ともにマグネットポンプを使用している。ポンプのモーター内に水が浸入しないようにするためだろう。魔法瓶はさすがに分解することはできなかったため、メーカーのホームページを見ることになった。こちらでも2社ともVE構造と呼ばれる高真空二重瓶の魔法瓶を使用している。以上のことから電気ポットの構造としては、メーカーごとの違いはほとんど見受けられない。ただ、水を効率よく保温するための構造や機能はメーカーごとに違いや特徴が見受けられる。例えば、コードレス給湯(電気ポットがコンセントに繋がれていない状態)では、象印は乾電池を使用する電動給湯の機能を持つものがあり、TIGERでは空気の力によるエア給湯の機能を持つものがある。

電気ポット自体のほかの機能は保温機能があり、象印は $98[^\circ\text{C}] \cdot 90[^\circ\text{C}] \cdot 80[^\circ\text{C}] \cdot 70[^\circ\text{C}]$ の $10[^\circ\text{C}]$ きざみで保温ができる。一方、TIGERでは $98[^\circ\text{C}] \cdot 90[^\circ\text{C}] \cdot 85[^\circ\text{C}] \cdot 80[^\circ\text{C}] \cdot 75[^\circ\text{C}]$ の $5[^\circ\text{C}]$ きざみで保温ができる。インターネットやカタログを見たが、上記のように $5[^\circ\text{C}]$ や $10[^\circ\text{C}]$ 単位で設定温度を変えるものがあったとしても、 $1[^\circ\text{C}]$ きざみで設定温度を変えられる電気ポットはなかった。この他、電気ポットの機能としては、省エネの機能が大事とされている。沸騰時は $905[\text{W}]$ もの電力を消費する電気ポットだからこそ、省エネルギーは重要視されているのだろう。もちろんこの省エネは富士山の上でも同じことである。富士山では地上から電気を運んでくるため大量に電気を使用することができない。水はもっと貴重である。わたし達は、一人2リットルのミネラルウォーターのペットボトルを準備した。飲用から、料理、手洗い、うがい全てをこれでまかなう必要がある。何度も何度も電気ポットで水を沸騰させるのは電気の浪費、水の浪費であり好ましくない。そういう点から、電気ポットの非沸騰、保温機能は重要である。

温度制御の方法として、富士電機の「PXZ-4」という温度調節機を使用した。

3. 地上での実験

まず地上で、電気ポットがどのような動作をするかを実験した。第一にどのように水の温度をあげるかだが、当然魔法瓶の底にあるヒータに出力された電気エネルギーが熱に変換されて水を温める。

電気ポット(PVQ-G)の温度の上がり方を、白金測温抵抗とデジタル温度計を使用して測定した。この二つの計測器を使用した理由としては、零点合わせを行った時の誤差が小さく信頼できるものだと判断したためである。

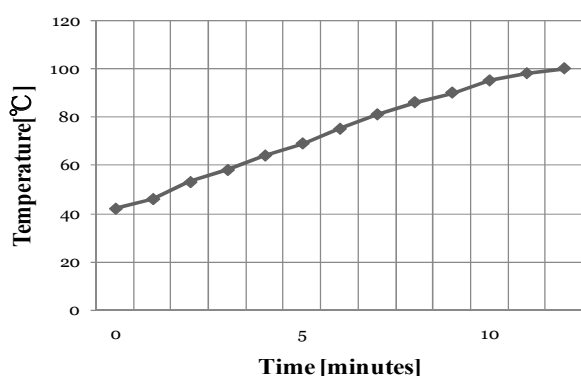


図 2 電気ポット(PVQ-G)の沸騰までの温度上昇(下界)
Fig.2 Increase in water temperature to boil water using a conventional electric pot at 1 atmosphere.

図 2 が下界で PVQ-G を使い水を沸騰させた時の測定データである。なお、この測定時はふたを取り外して、スタンドに白金測温抵抗とデジタル温度計を測定場所がほぼ同じになるように固定して行った。電気ポット内の水は通電時間に対しほぼ直線状に上昇していくことが分かる。これは沸騰させる時だけでなく、保温設定で設定温度を変えて行ったがどれもほぼ直線になった。さらに、沸騰や温度設定により電気ポットが水の温度を上げるときに流れる電流を測定した。方法としてはデジタルクランプメーターと呼ばれる交流用の測定器を用いて、電気ポットに流れる電流を測定した。沸騰設定時には約 9.0[A]の電流が抵抗 12.0[Ω]に流れ、0.6[A]が 155.5[Ω]に流れる。

保温設定時には、温度が設定温度の 3[°C]以内になると、12.0[Ω]の抵抗に電流が流れなくなり 155.5[Ω]にだけ流れる。当初ヒータの抵抗は沸騰用と保温用に使い分ける接続だと思っていたが、保温用というよりは、設定温度に近づけるためのものであった。

実際に電力 P[W]の計算式 $P[W]=I^2R$ で消費電力を計算すると、温度上昇時には $(9.0[A])^2 \times 11.14[\Omega] = 902[W]$ である。 $P[W]=V^2/R=898[W]$ と計算結果と誤差が生じているの

は、デジタルクランプメーターの測定速度が原因にあげられる。この装置は電流が流れて発生する磁場から、電流を測定するものだからである。

次に保温設定のときに何度下がれば再びヒータに出力するかを測定した。

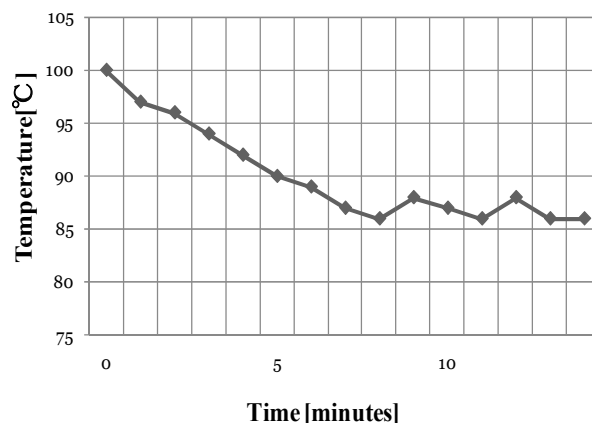


図 3 設定温度 90[°C]のときの温度変化(下界)
Fig.3 A water in electric pot changes temperatures case of a electric pot's establishment temperature is 90°C at 1 atmosphere.

図 3 は水の温度を 100[°C]にしたあとに設定温度を 90[°C]にして温度を測定したものである。設定温度は 90[°C]だが温度はけっして 90[°C]にはならずにいる。そして、温度が 4[°C]下がった 86[°C]になるとヒータに出力される。一見、この電気ポットの設定温度でも富士山で使えそうであるが、温度が安定せず余計な沸騰・蒸発が起ってしまうため、良いとは言えない。

実際に水の温度上昇により、どのくらい蒸発や沸騰で水が無くなってしまいかを測定した (温度と重量)。

使用したのは電気ポット (ピーコック魔法瓶株式会社製、電気保温エアポット WSP-22、2.2[L],650[W]) で、水を入れてヒータに出力し続け、同時に電子天秤で減った量を測定した。何故、PVQ-G と CV-DW でなくこれらの装置を使ったかという、八光社の実験費で購入した電子天秤の許容重量が 1220[g]であり、今まで使用してきた電気ポットでは重量が許容重量を超えてしまい水の加熱による重量変化を測定することが不可能であったためである。

図 4 は、下界において 1 気圧の状態での沸騰によりどのくらい水の重さが減るかを表している。沸騰により水の量は時間に対し一直線に減っている。10 分間で約 80[g]も水が失われてしまっている。単純計算で 1 時間で 480[g]で、2.2[L]の水が入る電気ポットも 5 時間もあれば沸騰が

続けば水が無くなってしまいます。このことから沸騰しないようにする必要がある。

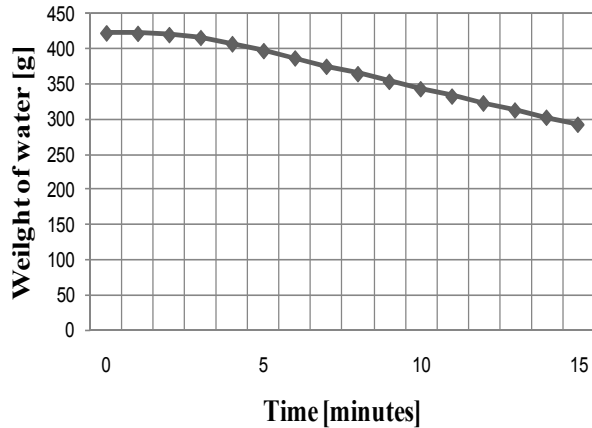


図 4 水の沸騰による重量の変化(下界)

Fig.4 Variations in the weight of water using the conventional electric pot after boiling water at 1 atmosphere.

実験時の電気ポット(WSP-22)の消費電力は、ヒータの抵抗が $17.0[\Omega]$ であるから、 $(100[V]*100[V])/17[\Omega]$ より $588[W]$ である。ワット[W]は SI 単位で[J/s]であるから時間の $10分=600[s]$ をかけて $352941[J]$ の熱量が発生した事がわかる。この熱量を水の気化熱である $2263[J/g]$ で割ると沸騰により気化した水の量が計算できる。結果は約 $156[g]$ となり、実測値の 2 倍の量の水が無くなる計算になる。これは、ヒータの熱が水だけでなく魔法瓶の容器や空気、伝導、放射、輻射したことが考えられる。このことは、それだけのエネルギーを無駄にしていると考えられる

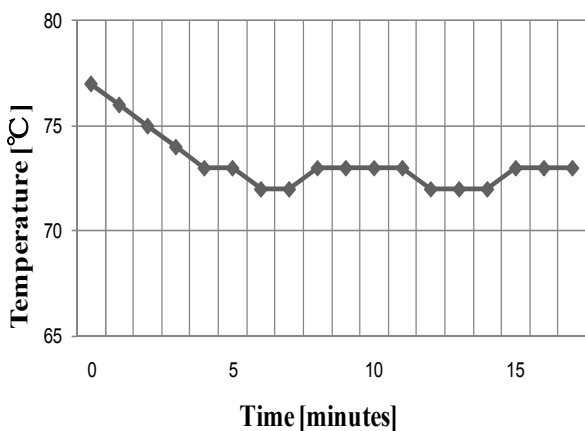


図 5 設定温度 $75[^\circ\text{C}]$ のときの温度変化(下界)

Fig.5 Variations in water temperature occur in a conventional electric pot with set temperature of $75\text{ }^\circ\text{C}$ at 1 atmosphere.

同じことを下界・1 気圧で設定温度 $75[^\circ\text{C}]$ にして行ったのが図 5 である。こちらでも同じように設定温度は $75[^\circ\text{C}]$ だが水温は $75[^\circ\text{C}]$ にはならず $73[^\circ\text{C}]$ と $72[^\circ\text{C}]$ で停滞している。

他に気になったことだが、電気ポットの温度表示は $5[^\circ\text{C}]$ きざみでしか表示してくれない。さらに温度表示の誤差がひどく $5[^\circ\text{C}]$ 以上温度表示が異なっている状態もある。商品の電気ポットは安価だが信頼度の低いサーミスタを温度センサーに使用しているためだと思われる。

4. 電気ポットの改造

我々の設定温度を $1[^\circ\text{C}]$ きざみで変えられる電器ポットは、温度調節機と、白金測温抵抗、SSR(半導体リレー)を使用して行う。温度調節機は「富士電機」の「PXZ-4」を、SSR は「秋月電気」の「ソリッドステートリレーキット」($35[A]$ タイプ)を使用した。

電気ポットの改造は魔法瓶の容器本体とヒータをそのまま用いる。ヒータの抵抗が小さい接続に、外部電源として SSR を介して温度調節機を繋ぐ。白金測温抵抗は温度の測定に使い、温度調節機に直接つなぐ。そうすることで温度調節機に白金測温抵抗で測定した温度を測定値として表示することができる。さきほどから測定器具として挙げていた白金測温抵抗はこのことであり、測定誤差が非常に小さいため信用できる。ただし白金線を使用しているため価格は電気ポット 1 台より高価である。

改良型電気ポットの使い方であるが、温度調節機は自分で好きな設定温度を決めることができ、測定値との差から出力をする。そして、測定値が設定温度になると出力がとまるという動作をする。

5. 富士山頂での実験

2009 年 8 月に実際に富士山頂まで行き、富士山測候所をお借りして改造した電気ポットの動作実験を行った。図 6 は富士山頂の測候所内で行った動作実験の様子である。

まず最初に、水-氷 2 相共存系での温度センサー類の零点合わせにより誤差を導き出す。零点合わせとは、ビーカーなどの容器に氷と水を入れて($0[^\circ\text{C}]$ の状況を作る)、その温度を測定し零度から何度の誤差があるかを測ることである。沸点の気圧変化に比べ、氷点の気圧変化は非常に小さい。温度センサーがサーミスタの「PicoLogger」では誤差が $1.4[^\circ\text{C}]$ であった。この「PicoLogger」はパソコンとパラレルケーブルで繋ぐことによって、温度や照度などのデータを記録し保存できるものである。ただ、前述で示したように測定誤差が大きいことが欠点である。



図 6 富士山頂上での実験風景

Fig.6 An experiment scene at the summit of Mt. Fuji.

次に、富士山での水の沸点が何度なのかを測定した。測定器具は水銀温度計と、デジタル温度計と白金測温抵抗である。測定結果は、水銀温度計では 87.5[°C]、デジタル温度計は 87.6[°C]、白金測温抵抗では 87[°C]を示したが、時々 88[°C]と表示することもあった。測定した時間の気圧は気象庁のアメダスのデータより 644[hPa]であった[5]から、沸点は約 88[°C]である。水銀温度計の誤差は -0.5[°C]、デジタル温度計は -0.4[°C]、白金測温抵抗は少数第一桁まで表示されないため誤差は -1[°C]以内である。図 7 で示すデータは誤差を修正したものである。

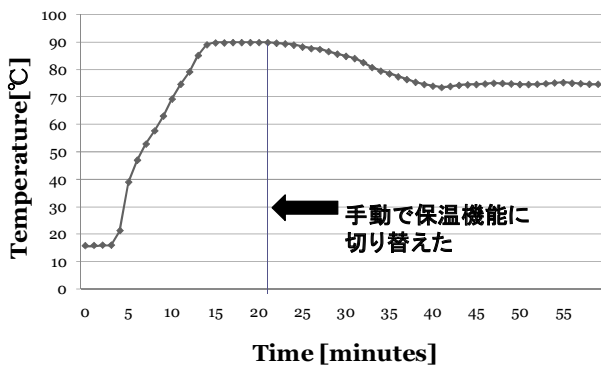


図 7 市販の電気ポット PVQ-G の富士山での温度変化

Fig.7 Using the conventional electric pot, the variations in the water temperature before and after boiling water at the summit of Mt. Fuji

図 7 は市販電気ポット(PVQ-G)を富士山頂で使用した時のポット内の温度変化を表している。地上で扱えばポット内の水は 100[°C]になるが、88[°C]付近で温度上昇が止まっていることがわかる。温度上昇が止まりはするが、沸騰は続いている状態であったのが約 5 分間続いていた。たしかに、富士山だと電気ポットは沸騰を続けてしまうことが分かった。ただ、この電気ポット PVQ-G には 5[°C]きざみで設定温度を変えられる保温機能があるので途中から保温機能に切り替えた。

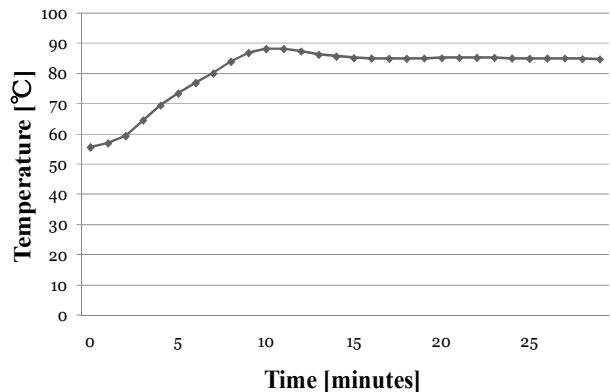


図 8 改造電気ポット(PVQ-G)の温度変化(富士山頂)

Fig.8 Using a retrofitted electric pot with a temperature control function for each 1 °C rise, the variations in water temperature are shown before and after the water was boiled at 88 °C at the summit of Mt. Fuji.

図 8 は改造した電気ポット(PVQ-G)の富士山での温度変化を表している。はじめは設定温度を 86[°C]にしたが、沸騰が起こってしまい、温度調節機の出力が止まらなかった。すぐに設定温度を 85[°C]に変えると出力がうまく止まり、85[°C]付近に温度変化が停滞した。図 8 を見ると、温度変化は一定のように見受けられるが、白金測温抵抗では 85[°C]と 84[°C]を行ったり来たりしている。

市販の電気ポットの保温設定として最高は 98[°C]である。これは、保温が 100[°C]だと沸騰し続け水が蒸発してしまい、設定温度が 99[°C]でも沸騰が起こりえるから保温の最高温度を 98[°C]にしているのではないと思う。

結果として、沸騰を起こさずに水を温めることができ、沸騰により水が減ることを抑えられる。

本来の目的として気圧追従型の電気ポットの企画があったが、水の沸点を知りたいければ気圧から算出できる。今回は気圧を計測する装置として「USB ウェザーボード」(ストロベリー・リナックス社)を使用した。名前の通り USB でパソコンと通信することができる。

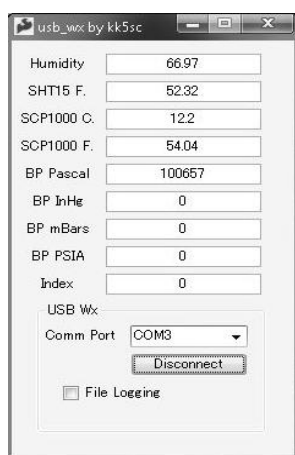


図 9 USBウェザーボードを用いた気圧の測定

Fig.9 Barometric measurement using a USB Weather Board.

図9は「usb_weather_v2」というソフトでUSBウェザーボードで計測した気圧や他のパラメータを表示している。BP Pascalの値100657が気圧[Pa]である。

6. 結果と考察

今回の試みの結果としては1[°C]きざみで自由に設定温度を変えることのできる電気ポットを作ることができるということが分かった。すなわち、当初の目的である、湯を沸騰させず、水の浪費を防ぎつつ水温(湯温)を一定に保つことが可能になった。

今回、失敗したということは、測定実験に不慣れのため、富士山での電気ポットの温度上昇を測定するときに、温度センサーの精度の悪い「PicoLogger」という測定器具に頼ってしまったことである。当時は1分毎に自動で測定したデータをとれ、MicrosoftのExcelなどに出力できるこの装置が便利であり、測定誤差(精度の悪さ)が大きいことを気にしていなかった。手間がかかっても丁寧に実験することが大事だということが、データの解析をしていて分かった。富士山に行くという貴重な機会を、もっとよく考えるべきだった。

次に、研究に遅れをとってしまったことである。無用の足踏みで一年の研究の遅れで市販の電気ポットの性能が向上し、せっかくのアイデアが普通の平凡なものになってしまったことは、影響が大きすぎる。

気圧センサなどもパソコンを介さず自立した装置として使用するはずだったが、私達の技術不足により期限内に実現できなかったことも反省することである。

以上のように反省すべき点は多々あり、反省するだけでなく次回に同じ失敗をしないために役立てていく必要がある。

電気ポット自体の話としては、富士山頂で使える1[°C]きざみで設定温度を変えることのできる電気ポットは作れたのだが、

メーカー自体はそういった物を出していない。恐らく作れる技術はあるのだろうが、需要がないのだろう。価格も高くなる。沸騰させず、1[°C]単位で水の温度がほしいなどと言う人はあまり聞いたことがない。しかし富士山で働く人たちなど、必要としている人がいるのでこれからも研究を続けていく。

結論として、水の貴重な富士山でも安心して水を温められる電気ポットを作成できた。ただ、改良すべき点はある。例えば、市販の温度調節機を使用せず自分でプログラムを作りマイコンで制御することなどである。これからの研究の課題である。

謝辞

私達の興味を実験課題(八光熱実験コンテスト)に採択していただきました八光社に感謝いたします。また、旧富士山測候所を、わたし達学生のささやかな興味に基づく科学実験のために使用を許可していただきましたNPO法人「富士山測候所を活用する会」に感謝します。航空機内の放射線測定以来終始活動を支援していただきました独立行政法人放射線医学総合研究所の保田浩志先生に心から感謝します。課題申請「富士山頂における科学実験の試行」をして富士山頂実験の環境を整えていただいた(株)数理設計研究所の矢澤正人所長、北海道大学工学研究科の関根恵先輩、茨城大学理学部の檜木梨花子さん、ラジオ部顧問の松沢孝男先生に感謝いたします。

参考文献

- [1] 松沢孝男、奥山慶洋、関根恵、浅野健、高崎良一、高柳拓也、身のまわりの放射線の測定の試行、一航空機、富士山、2次宇宙線、北朝鮮の核実験一、茨城工業高等専門学校研究彙報、第42号、pp. 45-52 (2008).
- [2] 松沢孝男、大沼侑司、会澤雄基、阿久津達也、森脇滉、中島宏昌、飯嶋竜司、箕輪栞、関根恵、保田浩志、宇宙線の測定を目指した富士山登山、*ibid.*, 第43号、pp. 35-46(2008).
- [3] 奥山慶洋、森脇滉、飯嶋竜司、目時彩加、オーストラリア語学研修時の環境測定、*ibid.*, 第44号、pp. 17-22 (2008).
- [4] 理科年表 国立天文台編 (平成18年度版)
- [5] webサイト 気象庁
URL: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

「富士山頂における科学教育」の試行

松沢 孝男¹、森脇 滉²、矢野倉 伊織²、八重樫 拓也²、松田 理絵²、関根 恵³、檜木 梨花子⁴、矢澤 正人⁵、保田 浩志⁶
自然科学科¹、ラジオ部学生²、北海道大学³、茨城大学⁴、株式会社数理設計研究所⁵、放射線医学総合研究所⁶

A trial of science education at the summit of Mt. Fuji

Takao MATSUZAWA¹, Akira MORIWAKI², Iori YANOKURA², Takuya YAEGASHI², Rie MATSUDA²,
Megumi SEKINE³, Rikako HINOKI⁴, Masato YAZAWA⁵, and Hiroshi YASUDA⁶

Abstract: We performed a trial of scientific education, at the summit of Mt. Fuji, the highest point in Japan. The environment, on the top of Mt. Fuji is somewhat different from that of usual living space. The following tasks were assigned; measurement of secondary cosmic rays(muon); observation of intensities of ultraviolet light; measurement of boiling temperature of hot water; observation of shape of flame of candle; measurement of saturation of peripheral oxygen (SpO₂), and so on.

1. はじめに

本校は東海村に隣接するひたちなか市に存立し、東海第2原子力発電所のEPZ(発電所から半径10[km])内に位置する。その上1999年の東海村のJCO社の臨界事故の際は、同社から10[km]以内に出された屋内退避勧告を体験した地域でもある[1-3]。しかし新入生に接すると既にJCO臨界事故の風化が進んでいて事故のことを知らない。本校の「地政学的？」位置を意識し、平時のPA教育の一環として、ラジオ部の学生と簡易放射線測定器「はかるくん」を用いた環境放射線測定を継続して行っている。

更にその発展として学生の海外語学研修時、簡易放射線測定器「はかるくん」を用いて飛行機中の放射線の測定、現地の環境放射線なども行っている[4-6]。その際、航空機内の放射線の強さに驚いた。2次宇宙線の影響だという。地表から高さを増すとともに放射線の線量率は高くなる。それならば、国内最高地点、富士山頂上の放射線強度はどうかという興味を持ち、平成18年度以来、私達は富士山環境放射線測定登山を続けてきた。

平成19年、NPOの「富士山測候所を活用する会」が国有財産の気象庁富士山測候所を借り受ける形で一般の利用の道が拓けた。今年度(平成21年、2009年)「富士山頂での科学教育の試行」という課題で利用申請し20件の採択課題のひとつとして利用の機会を得た。

下界(地表)で当たり前のことが、富士山頂では当たり前ではなくなる。第1は気圧が下界の約2/3(図1の平均値は約645[hPa])になることである。理科室にあるような水銀気圧計(フォルトンの気圧計)が使えない。水銀柱の高さが目盛り以下になってしまうからである。旧富士山測候所における有人気象観測当時においては、「富士山仕様」のフォルトン型気圧計が用いられていた。その気圧計が撤去された現在、どうやって気圧を測るか？また気圧が下がれば血中酸素飽和度SpO₂が低下し急性の高山病になる。酸素濃度が減り火が燃え難くなる？更に水の沸点も下がる。紫外線が強くとろろと耳たぶまで日焼けし、ろりと耳の形に皮膚がみげれる。旧測候所でありながら、現在は観測データの送受用の通信もままならない。飲料水も雑用水もなく、各自もち込みの素泊まり、トイレは汲み取り式(1日10人が限界)である。

被雷の恐れがあり無線アンテナは立て難い。その上設置場所は国立公園内で屋外アンテナ設置の条件は厳しく、また気象庁の気象データ無線送信機があるため、電波の発信も歓迎されない。

このような状況の富士山頂旧測候所の利用を志し、正規利用にたどり着き2泊3日の実験利用で得た経験の一部を紹介する。

まず、7月、8月の富士山頂の気象環境について紹介する。気象庁の気象データベース[7]から、2009年7~8月の山頂の現地気圧、気温(最高、最低、平均)、相対湿度(最低、平均)、日照時間の日変化を示す。

(1) 気圧 Barometric pressure at the summit of Mt. Fuji,

現地気圧(海面補正なし)は図1のとおりである。平均値は645[hPa]程度である。0.636気圧に相当する。1気圧の2/3以下である。グラフの横軸は、7月換算の日付である。例:8月1日=7月32日

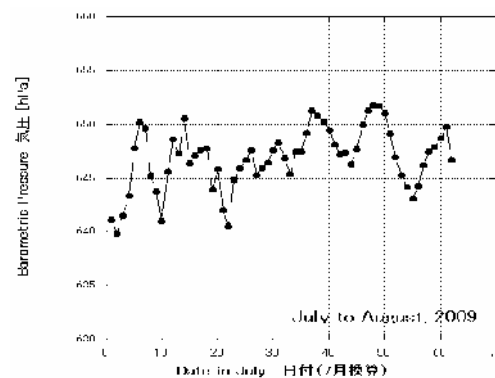


Fig. 1 Barometric pressure at the summit of Mt. Fuji, during July to August in 2009[7]

図1 富士山頂の気圧、2009年7月~8月[7]

下界で考える大型台風[5]の中心気圧(高々940[hPa]程度)に比べ、桁違いに気圧は低い。当然、水の沸騰点(沸点)も低くなっているはずであり、高山病の原因にもなる。酸素濃度(相対酸素濃度)は、下界も山頂も変わらない。ただし、絶対濃度(重量濃度)はほぼ気圧

に比例し山頂では地上のほぼ 2/3 になると考えられる。

(2) 気温 Air temperature at the summit of Mt. Fuji

乾燥空気は高度(気圧)変化し1 [km]上昇すると約 6 [°C]下がると聞いたことがある。理科年表 [9]で調べると、米国標準大気、ICAO 標準大気というモデルがあり、高度 11 [km]までの対流圏の大気の気温変化率は -6.5 [°C/km]とある。Wikipedia では更に詳しく、「この標準によれば海面上での気圧は 101.3[kPa]で、気温は 15°C、気温減率は 6.5 [°C/km]である。この状態は高度 11 [km]まで続き、そこでは気圧は 22.632 [kPa]、気温は-56.5 [°C]まで落ち込んでいる。高度 12 [km]を超えるあたりから気温はほぼ一定となる。」と記されている。

海面の温度が変わったり、海面の真上でない山地では、海面直上のモデルの空間とは条件が異なると思われる。

2009年7月~8月の富士山頂の気温(平均、最高、最低)は、気象庁データによれば、図2 のようであった。この期間の平均気温は5 ±4[°C]程度であった。

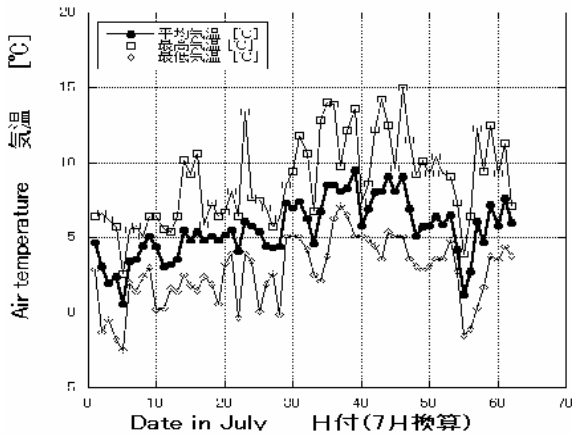


Fig. 2 Air temperature at the summit of Mt. Fuji during July to August in 2009 [7]

図2 富士山頂の気温、2009年7月~8月 [7]

(3) 相対湿度 Relative Humidity at the summit of Mt. Fuji

山頂は大変乾燥している。汗をかいたという感じがしない。しかし相対湿度の値でみると、平均値が 60~100 [%] になっている。データを図 3 に示す。平野部の夏季の相対湿度との違いは、最低湿度にある。平野部では水分量の比較的大きい土壌・植物からの蒸発・蒸散により、夏季の湿度が 30%を下回することは殆どないが、地表の影響を受けにくい富士山頂では好天時には湿度が極端にさがることわかる。

(4) 日照時間 Duration of bright sunshine time at the summit of Mt. Fuji,

2009年8月下旬は晴れの日が多かったことが分かる。

日の出、日の入り時刻東京(2008) [9]

6月30日 04:28~19:01 太陽の出ている時間: 14:33=14.55 時間

7月30日 04:47~18:47 太陽の出ている時間: 14:00=14.00 時間

9月8日 05:18~17:59 太陽の出ている時間: 12:41=12.68 時間

である。日照時間のデータを図 4 に示す。

日の出から日没までの時間がおおよそ 14 時間のとき、日照時間が 12 時間以上ある日が 8 日以上ある。

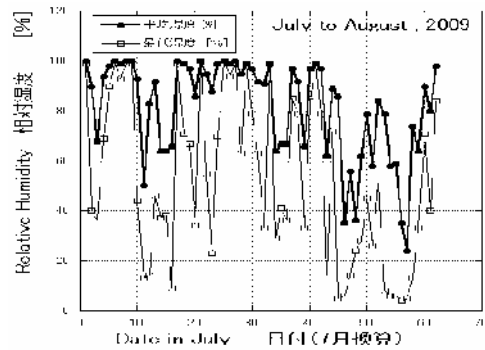


Fig. 3 Relative Humidity at the summit of Mt. Fuji during July to August in 2009 [9]

図3 富士山頂の相対湿度、2009年7月~8月 [9]

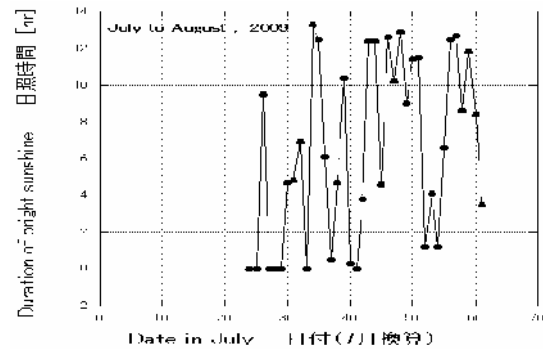


Fig. 4 Duration of bright sunshine time at the summit of Mt. Fuji during July to August in 2009 [7]

図4 富士山頂の日照時間、2009年7月~8月 [7]

(5) 富士山頂気象庁旧富士山測候所の見取り図

A Mt. Fuji weather station's sketch

次に富士山頂剣ヶ峰の旧富士山測候所の見取り図を図 5 に示す。旧測候所は標高 3776 [m]の三角点のすぐ脇にある。本年度使用可能であった建物は 1 号庁舎と 2 号庁舎の一部であった。

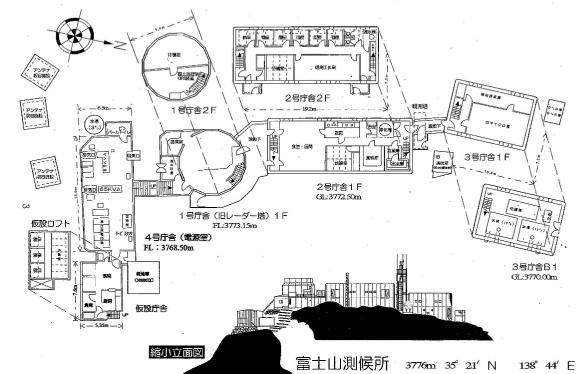


Fig. 5 A sketch of Mt. Fuji weather station

図5 富士山頂気象庁旧富士山測候所の見取り図

1. 何を実験するか

学生と富士山に登ったら何ができるか、また何をしたいか考えてみた。思いついたことは次の各のテーマである。

- (1) ろうそくの炎の燃え方
- (2) 山頂での湯の沸き方、冷え方
- (3) 山頂用電気ポットの開発
- (4) 登山時および山頂での放射線測定
- (5) 山頂での2次宇宙線測定
- (6) 登山時の体調の変化(脈拍、血圧、および血中酸素飽和度 SpO_2 の測定)
- (7) 超微小出力無線通信による遠距離データ通信の試行
- (8) 紫外線強度測定
- (9) 物体の質量の測定、重力加速度の測定(電子天秤で)
- (10) 夜空の明るさの測定(SQM=Sky Quality Meter、夜空メーターを用いて測定する)
- (11) 高度と気圧の測定

それらの実験が実現可能か山頂の旧測候所の条件も掲げてみた。地上(下界)にくらべ、富士山頂は、

- (あ) 標高が高い。
 - (い) 気圧が低い。
 - (う) 酸素濃度(分圧)が低い。
 - (え) 空気が澄んでいる、光害が少ない。
 - (お) 雷が多い、被雷の可能性。
 - (か) 停電の可能性が高い。装置にはUPS(無停電装置)が必要である。
 - (き) 紫外線、宇宙線の強度が下界より高い。
 - (く) 水(飲料水、生活水)の供給が無い。トイレは汲み取り式。
 - (け) 夏季だけ下界から電気は通じている。非常用発電機もある。
 - (こ) 固定電話・常時接続有線インターネットのような固定通信インフラは無い。(NPO 山頂班は2年ほど前から携帯インターネットなどを利用している)
 - (さ) 実験機材は下界より持ち上げる。機材とごみはすべて持ち帰る。
 - (し) 参加者数名で全てまかなう。
- という、条件(制約)がある。

これらの条件(制約)がある場合、初めに掲げた希望ほどの程度実現するか考えた。更に各テーマの理由、動機、目的を考えると、

(1) ろうそくの炎の燃え方

NPO よりの依頼実験(教育関係者)でテーマとして考える。

小学校の理科に由来がありそうである。炎が消える酸素濃度(限界酸素濃度)が問題になっているらしい。

検定教科書、「たのしい理科」小学校6年(上)の「ものの燃え方と空気」の章に、ろうそくを集気ビン中で燃焼させ、点火前と炎が消えたときの酸素濃度をガス検知管で測定し、夫々21%と17%の数値を示し、酸素が17%残っていても火が消えることを示している。

NPO への問い合わせは、山頂の気圧が地上の2/3なら酸素濃度(平野部大気全量に対する酸素の相対量)は、 $21\% \times (2/3) = 14\%$ で限界酸素濃度17%より低い。果たして富士山頂でろうそくの炎が灯るか

実験で確認してほしいというものであった。

私達は、ろうそくの燃焼実験の経験はない。燃焼の何を指標に測るか考え、炎の長さおよび重量(電子天秤)で測ることにする。状況を記録するビデオカメラも持参する(重い)。

(2) 山頂での湯の沸き方、冷え方の測定

本年度の物理チャレンジ(高校生物理オリンピック、日本代表選抜のための課題レポートのテーマのひとつが「お湯の冷め方」であった。当ラジオ部では6名応募し、1名が2次選抜(全国100名)に進んだ)。この実験を環境を変えて行う。レポート提出後の自由研究。

(3) 富士山頂用電気ポットの開発

本年度の物理チャレンジ(高校生物理オリンピック、日本代表選抜のための課題レポートのテーマのひとつが「お湯の冷め方」であった。当ラジオ部では6名応募し、1名が2次選抜(全国100名)に進んだ)。この実験を環境を変えて行う。レポート提出後の自由研究。

(4) 登山時および山頂での放射線測定

本来の目的 [1-6]、(簡易放射線測定器「はかるくん」、およびGM管)を用いて測定する。

(5) 山頂での2次宇宙線の測定

本来の目的[1-6]、2次宇宙線の測定の試行、GM管2本で自作同時計数回路を作ることと、その装置で測定しているものが雑音でなく2次宇宙線(ミュオン)であることの実験による証明も必要。

(6) 登山時の体調の変化(脈拍、血圧、および血中酸素飽和度

SpO_2 の測定)、登山時および山頂での高山病対策として実施気圧および高度と、各人の血中酸素飽和度 SpO_2 の測定を行う。

(7) 超微小出力無線通信による遠距離データ通信の試行

山頂の旧測候所には、測定データを下界に送る通信インフラが整備されていない(固定電話も、有線インターネットも無い)。測定データをリアルタイムで直接茨城高専に微弱無線で送信することを試みる。野生動物の行動調査や土砂崩れ、洪水等を検知・通報する超微小出力無線通信を応用し、富士山頂から限界距離(見通し距離の最遠地、約200[km])の茨城高専まで、放射線測定データを送信する実験の予備実験を考える。

(8) 紫外線強度測定

前回の富士山登山で、山頂の紫外線の強度が高いことは体験済みである[6]。耳たぶまで日焼けし耳たぶの形の皮膚がはがれた。学生の海外の語学研修時、オーストラリアで測った紫外線強度と比較する。

(9) 物体の質量の測定、重力加速度の測定(電子天秤利用)

物理の授業の重力加速度の話の応用で実際の電子天秤による物体の重量の測定で、空気の浮力と重力を決める。「お湯の沸き方冷め方」の実験(空気の浮力の補正)の応用でもある。

重力加速度の大きさ 東京 : $g=9.7976 [g/m^2]$ (羽田[9])

富士山 : $g=9.788 [g/m^2]$ (測候所、東大)

の値を信じるなら、 $9.788/9.7976=0.99902$ であるから、密度の分かた密度の大きな約1000[g]の物体を0.1[g]の精度の秤で計れば、重力加速度の比は求められると考えた。空気の浮力の補正も行うが、化学天秤ではないので高密度(分銅か、鉄、銅、鉛)の試料を用いる。

(10) 夜空の明るさの測定(SQM=Sky Quality Meter、夜空メーターによる光害調査

(11) 高度と気圧の測定、全ての実験に通じる基本データの採取

以下、紙面の許す限り、体験を報告する。

(1)、(2)、(9)の電子天秤を用いた実験は、出発直前の学内の研究室移動(引越し)で故障させてしまい断念した。(10)の夜空の明るさの測定の予備実験は、担当予定者がハワイのスパル望遠鏡の実験参加と重なり今回は断念した。当人は測候所の現地説明会にのみ参加した。(7)の実験は、平成20年に山頂付近の山小屋にて実施した、

3 それぞれの実験

(1) ろうそくの炎の燃え方

富士山に行くのならろうそくの実験をしてとのリクエストが NPO にあった。山頂の酸素の相対濃度は地上と同じであるが重量濃度は減る。火がつくかどうか問題である。安全に配慮して実験を行い山頂と下界でのろうそくの炎の燃え方をビデオ撮影と炎の長さの測定で行った。

実験 壁に定規を固定し、長さを 3 [cm]に切断したろうそくを鉛直に立て点火し、炎をビデオカメラで撮影した。30秒ごとに、炎の長さ、炎の形を測定、後は、燃焼時間を測定した。下界でも対照実験を行った。泥縄式であるがファラディの「ろうそくの科学」の古典を読んだ[8]。



Fig. 6 Flame of candle at the summit of Mt. Fuji

図6 富士山頂でのろうそくの炎

図7は、横軸に燃焼時間、縦軸に炎の長さを取り、棒グラフを描いた。ここから、ろうそくの燃焼時間と炎の長さだけ、結果を述べる。

- 1 ろうそくの燃焼時間は、下界より富士山頂の方が、長い。
- 2 ろうそくの炎の長さは、下界より富士山頂の方が、短い。

炎の能の長さは 2.5 [cm]~3.0 [cm]の間で変動している(図7)。経過時間やろうそくの長さとは関係ない。炎の長さの変動を三角関数関と見立て、周期 T、振幅 A、振動数 f、角速度 ω 、初期位相

ϕ などを導き出すことによって、おおよその燃え方を表す。

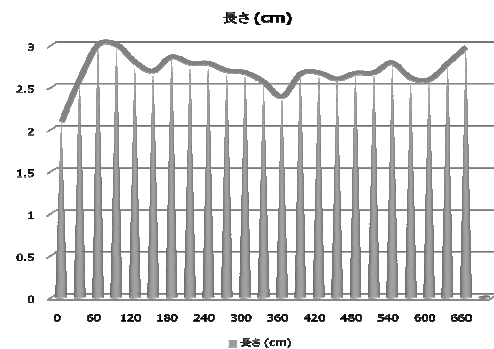


Fig. 7 Gradual change of length of candle flame

図7 ろうそくの炎の長さの緩やかな時間変化

まず sin 関数か cos 関数か、関数型を考え解析を行う。時間 60 [s]のとき炎の長さは 3 [cm]、660 [s]のとき、3 [cm]なので、cos 関数でやった方がちょうどよい。その方が、初期位相 ϕ を考えずに済むためである。660[s] - 60[s] = 600[s]の内に、データの山は 5 回あった。そのデータの山と山同士の間隔の平均を取ると、150 [s]の周期 T となった。f = 1/T より、f = 6.67 × 10⁻³ [Hz]となる。ω = 2π/T より、ω = π/75 [rad/s]となる。ろうそくの長さがある値を下回らないとして考える。すると、cos 関数は、ある値 B より上の値にあるということになる。600 [s]間の炎の長さの平均から、B = 2.74 [cm]となる。

最後に振幅 A であるが、振幅はここで言う cos 関数の最大値に等しい。そこで、さきほど求めた B に、0 [s]のときの変位 y、つまり、0 [s]のときのろうそくの長さ 3 [cm]になるようにする。これにより、振幅 A の値は、3 - B = 0.26 [cm]になる。

結果的に、振幅 A = 0.26 [cm]、周期 T = 150 [s] (秒)、振動数 f = 6.67 × 10⁻³ [Hz]、角速度 ω = π/75 [rad/s]、初期位相 φ = 0、振幅 B = 2.74 [cm]となった。最終的な実験式は、

$$y = 0.26 \text{ [cm]} \cos(\pi/75 \cdot t) + 2.74 \text{ [cm]}$$

となった。

将来、微分や積分を習ったら、フーリエ変換という方法で数値が時間的に変動するデータの解析を行えることを先生から聞いた。それまでに、実験の再現性実験等行うべきことが残っている。

富士山頂は気圧が低く、酸素の絶対濃度が低い。その環境の中で、山頂におけるろうそく、マッチ・ライターの炎の燃え方の観測を行った。実験をする上で、ろうそくに火を灯すものとして、マッチ、ライター、チャッカマンと用いて、山頂でも、下界と同じように火を灯せるかを試す簡単な実験を行った。富士山頂ではこれらマッチ、ライター、チャッカマンでは火がつかないと思っている人がいるようだが、山頂の着火実験ではいずれも着火した。ただし火のつき方は悪かった。何回か操作して初めて着火する。着火のしやすさ・しにくさを表す指標を考える必要がある。小学校の理科6年上の燃焼実験と比較するには山頂でも集気瓶(閉鎖系)で実験する必要があると、あとで気づいた。

地上実験

学校に戻り、修理の終わった電子天秤を用いて、ろうそくの燃焼中の重量変化の測定を行った。使用した電子天秤は、AND 製

FX-1200i 電子天秤で、最大秤量 1200 [g]、最小目盛 0.01 [g]、すなわち 10 [mg]まで直読できる機種である。

この電子天秤を用い燃焼中のろうそくの重量の 30 秒ごとの時間変化を測定した。測定の結果を図 8 に示す。実験式は、

$$y=0.75446 - 0.001115x \quad : R=0.99987$$

となった。y は重量 [g]、x は経過時間 [s] である。グラフを拡大してみると、実測値は近似直線の上下に僅かに震動している。炎の長さの振動と対応したものか、単なる測定誤差のばらつきか解析してみる必要がある。(八重樫拓也)

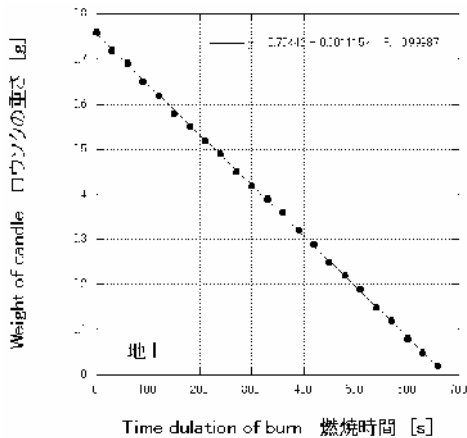


Fig. 8 Relative weight change of candle during burning
 図 8 ろうそくの燃焼中の重量変化

(2) 富士山頂用電気ポットの開発 [11]

旧富士山測候所は自炊である。水も運び上げる。2006 年、2007 年夏、富士山測候所の見学および実験利用をした。そこで体験したことに、自炊のため電気ポットでお湯を沸かそうとすると、電気ポットのお湯は沸騰を続け、保温状態にならず運び上げた貴重な水がすぐに無くなってしまふことである。この原因は、電気ポットの設定温度 98 [°C]になるまで、ヒータに電気を流し続けることがある。その状況を見て、気圧に合わせて保温設定温度を変える保温温度気圧追従型電気ポットを考えた(八光熱コンテストに応募した)。

市販の電気ポットは標高 2000 [m]以上での利用を禁じている。メーカーのプログラムの手抜きで保温機能が働かない。一旦地上の沸騰温度 100(98)°Cに達しないと保温動作に切り変わらないため水は沸騰し続ける。メーカーが対応しないなら山頂用に無断改造を試み、試作品を実際に富士山頂に持ち上げ測候所で動作機能を確認した。

富士山山頂では気圧の影響により、水の沸点が下界より低い。理科年表(平成 20 年版、水の沸点)に載っている気圧による沸点の公式から、富士山での気圧を 644 [hPa]として計算すると、水の沸点は約 88 [°C]である。山頂で実測すると 87 [°C]であった。

だが、2009 年現在には電気ポットの新機能として、沸騰を感知してヒータへの出力が止まる電気ポットが発売されている。沸騰を感知して止まるという意味では、気圧追従型の電気ポットとなら変わらない。開発方針を変え、設定温度を 1°C 刻みで変えることのできる電気

ポット無断改造キットを開発した。

2009 年 8 月に実際に富士山に登り富士山測候所をお借りして、1°C 刻みで保温設定温度を変えられる電気ポットを試し、好みの温度を電気ポットで作らせて、富士山のような気圧の低い場所でも使用できることがわかった。(測候所では長年サーモスタットでやかんを乗せた電気コンロを制御していたそうです)

図 10 は市販の電気ポットを富士山頂で使用したときの温度変化である [11]。



Fig.9 An experiment scene at the summit of Mt. Fuji.
 図 9 富士山頂上での実験風景

まず、富士山頂での水の沸点が何度なのかを測定した。測定器具は水銀温度計と、デジタル温度計と白金測温抵抗である。0°Cの水-氷共存系で定点とはいえないが各温度計の検査をおこなった。沸騰している湯の温度の測定結果は、水銀温度計では 87.5 [°C]、デジタル温度計は 87.6 [°C]、白金測温抵抗では 87 [°C]を示したが、時々 88 [°C]と表示することもあった。測定した時間の気圧は気象庁のアメダスのデータより 644 [hPa]であった[10]から、沸点は約 88 [°C]である。水銀温度計の誤差は 0.5 [°C]、デジタル温度計は 0.4 [°C]、白金測温抵抗は少数第桁まで表示されないので誤差は 1 [°C]以内である。図 10 で示すデータは誤差を修正したものである。

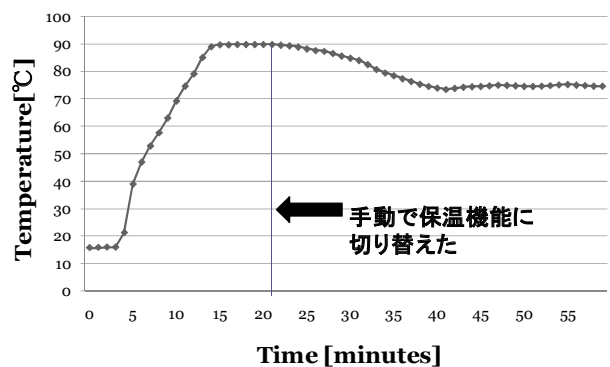


Fig.10 Using the conventional electric pot, the variations in the water temperature before and after boiling water at the summit of Mt. Fuji

図 10 市販電気ポット PVQ-G の富士山での温度変化

図 10 は市販電気ポット(PVQ-G)を富士山頂で使用した時のポット内の温度変化を表している。地上で扱えばポット内の水は 100 [°C]になるが、88[°C]付近で温度上昇が止まっていることがわかる。温度上昇が止まりはするが、沸騰は続いている状態であったのが約 5 分間続いていた。たしかに、富士山頂だと電気ポットは沸騰を続けてしまうことが分かった。ただ、この電気ポット PVQ-G には 5 [°C]きざみで設定温度を変えられる保温機能があるので途中から手動で保温機能に切り替えた。

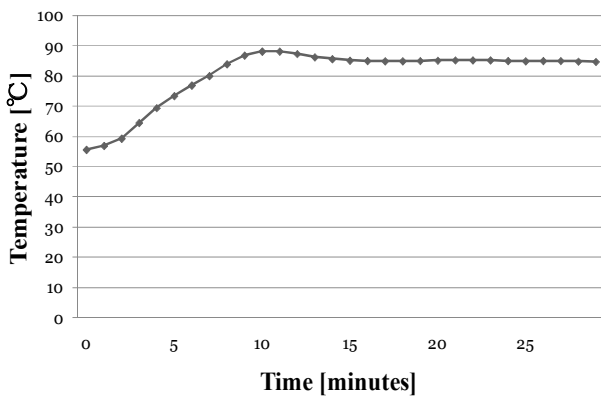


Fig.11 Using a retrofitted electric pot with a temperature control function for each 1 °C rise, the variations in water temperature are shown before and after the water was boiled at 88 °C at the summit of Mt. Fuji.

図 11 改造電気ポット(PVQ-G)の温度変化(富士山頂)

図 11 は改造した電気ポット(PVQ-G)の富士山での温度変化を表している。はじめは設定温度を 86 [°C]にしたが、沸騰が起こってしまい、温度調節機の出力が止まらなかった。すぐに設定温度を 85 [°C]に変えると出力がうまく止まり、85 [°C]付近に温度変化が停滞した。図 11 を見ると、温度変化は一定のように見受けられるが、白金測温抵抗では 85 [°C]と 84 [°C]を行ったり来たりしている。これらの成果を含め、八光熱実験コンテストに実験レポートを送った。(矢野倉伊織)

(3) 本来の目的、富士山における 2 次宇宙線ミュオン測定

GM管 2 本で同時計数回路を作ること、その装置で測定しているものが雑音でなく 2 次宇宙線(ミュオン)であることの実験による証明

(3.1) 航空機内の放射線

成田からウィーンまでの航空機内の放射線強度を簡易放射線測定器「はかるくん」と GM 管 (RM-60, Aware 製) で測定した。「はかるくん」の線量率と GM 管の計数率の値の変化は見事に対応している [4]。「はかるくん」が非エネルギー補償型のためである。横軸に飛行時間、縦軸に線量率をとりグラフを描いて面積を求めると、その面積は飛行時間中に浴びた放射線の線量(飛行線量)に相当する。「はかるくん」で測ると、北回り航路の成田空港からウィーンまでの線量は 2.96 [μ Sv]、南半球側へ向かう成田からニュージーランドまでの線量は 1.20

[μ Sv]であった [4]。簡易放射線測定器「はかるくん」による国際線機内の線量測定値と FAA の CARI-6、放医研の JISCARD の航空線量計算値とでは 20~30 倍も開きがあった [4]。巡航高度における二次宇宙線の存在と、「はかるくん」の検出器のエネルギー特性が原因である。飛行線量の測定値と計算値の 20~30 倍もの乖離から、二次宇宙線の高所・定点・継続測定の必要性を感じた。気象庁より NPO 法人「富士山測候所を活用する会」への測候所の貸与開始と、放医研の研究者の好意で破格の共同研究者として富士山測候所の利用の機会を得た[12]。

(3.2) 下界および富士山における環境放射線測定

学生と富士山測候所の見学(現地見学会)を 2 年 (2006 年、2007 年)行い、山頂および登山・下山中の環境放射線測定、気圧および高度の測定を行った。登山・測定開始時より山頂付近になるに従い線量率・計数率が増えている [4-5]。

(3.3) 平地におけるミュオンの測定

GM 管(RM-80)を 2 台重ね、夫々の出力を AND 回路(C-Box)に接続し簡易型の同時計数測定回路とした。時間窓は 50 [μ s]である。この測定器で検知できる放射線を宇宙線と想定し実験を行った[4]。2 台の GM 管の間に鉛の遮蔽を置き鉛の厚さと透過する放射線の計数率(同時計数測定)の関係を図 12 に示す。

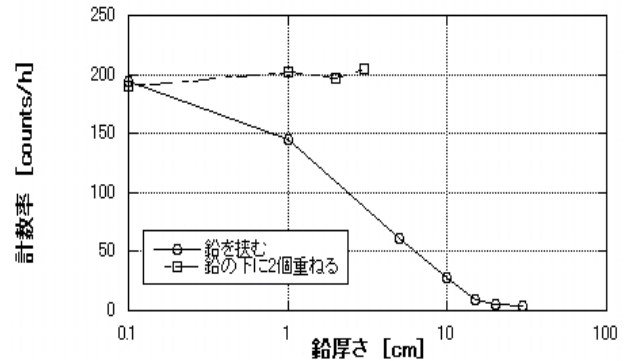


Fig. 12 Coincidence measurement of cosmic rays

図 12 同時計数測定回路の計数率の鉛厚さ依存性(RM-80 + C-Box)

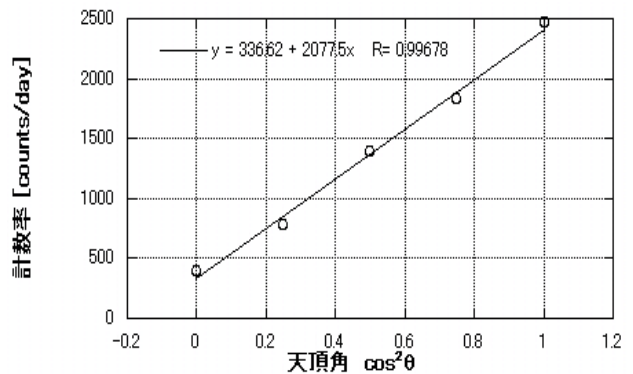


Fig. 13 Counting rare vs. Zenith angle $\cos^2 \theta$

図13 計数率の天頂角依存性、 $\cos^2 \theta$ プロット

測定している放射線が宇宙線（ミューオン）であることの確認のため、装置を天頂に対し傾け、入射放射線の計数率の天頂角 θ 依存性を調べた。遮蔽の鉛の厚さは1 [mm]にした。測定結果を図13に示す。宇宙線の $\cos^2 \theta$ 則にほぼ対応している。

(3.4)GM 管 2 台での自作同時計数測定器の試作 [10]

ストロベリー・リナックス社の GM 管は、USB を通してパソコンから外部電源を得て作動する。この機器は主に γ 線のカウント数を測定し、パソコンにカウント数を記録することができる。この GM 管を2台同時に通過するような高エネルギー粒子（ミューオン）が通過するときだけにカウントする同時計数測定器の試作を行った。

2つの機器に同時に電流が流れた時に1カウントとする回路を作る。ストロベリー・リナックス社の GM 管の真理値表によると、イベントがない時は信号1になっており、イベントが発生した（粒子が入射した）時に信号0になる仕組みである。2台の GM 管が同時に信号0になる時に出力側に1の信号を出すため、シリコンゲート CMOS 技術を用いた高速 CMOS2 入力 OR ゲートの TC74HC32A DIP14-P-300-2.54（東芝）を用いて信号を取り出す回路を作成した。

A	B	Y
H	H	H
L	H	H
H	L	H
L	L	L

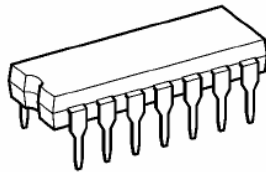


Fig.14 Truth table Fig.15 TC74HC32AP DIP14-P-300-2.54n
 図14 真理値表 図15 TC74HC32AP DIP14-P-300-2.54n

GM 管 3 台を用い、それぞれ GM1、GM2、GM3 と記述することにする。GM1 と GM2 の同時計数測定値を GM3 に出力してパソコンへ記録する。まず、GND(ピン番号:7)と Vcc(14)を電源とし、GM3 の電源部分に接続した。次に、1A(1)を GM1 の信号取り出し部分へ、1B(2)を GM2 の信号取り出し部分へ接続した。1Y(3)を GM3 の信号入力部分へ接続した。GM1 と GM2 は USB で外部電力を供給する仕組みであったが、それぞれ電力供給部分へ乾電池(4つ)の電池ケースを取り付けた。

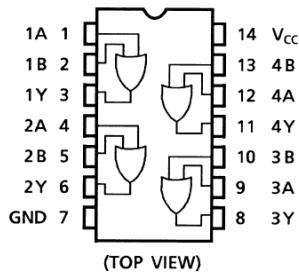


Fig.16 Pin connection
 図16 ピン接続図

このように、GM1 と GM2 の同時計数計測を行い、その結果を GM3 へ出力しパソコンでデータを蓄積できる自作 GM 管 2 台での

同時計数測定器の作成に成功した。

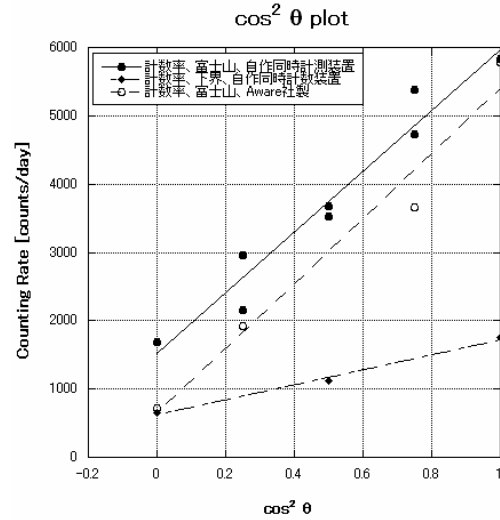


Fig.17 Comparison of two coincidence circuit, self made and C-box
 図17 2種類の同時計数回路の比較, 自作および市販同時計数測定回路 C-box

前報[5]で示した2次宇宙線の測定とほぼ同じ測定が、自作の同時計数回路でもできるようになった。（関根恵、松沢孝男）

(4) 体調管理、脈拍、血中酸素飽和度(SpO₂)の測定

登山時の体調の変化(血圧、脈拍および血中酸素飽和度 SpO₂)を測定し、登山時および山頂での高山病対策として実施した。

気圧および高度と、各人の血中酸素飽和度 SpO₂ の測定を行う。以下は2007年の登山の際のSpO₂データである [5]。地上データは測定器がなく推測(98%以上)である。

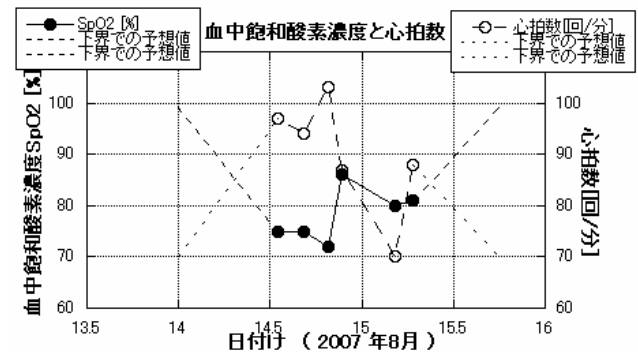


Fig.18 Saturation of peripheral oxygen SpO₂ and pulse rate, 2007, (Female, 21 years old) [4]
 図18 2007年の登山時の血中酸素飽和度 SpO₂ と脈拍数 (21歳、女性) [4]

14日夜の酸素飽和度の増加の原因は不明である。特別な処置はしておらず、食事をして落ち着いたためではないかと当人は感じている。

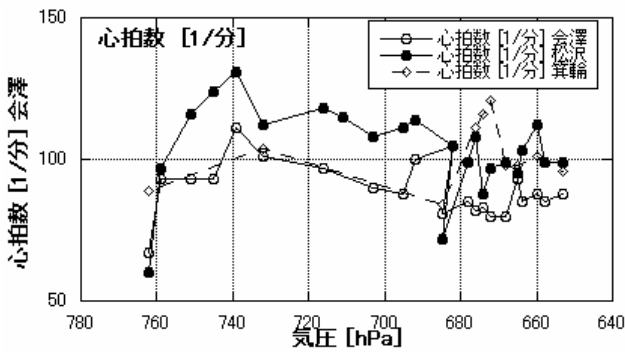


Fig.19 Pulse rate by male_1(19), male_2(61), and female(16), in 2007 [5].

図 19 2007 年登山時の脈拍数と気圧の関係、男(19 歳)、男(61 歳) および女(16 歳) [5]

以下は今年の高度、気圧、高度、SpO₂の測定データである。
 まず高度と気圧の実測データを示す。数値は未校正である。図 20,21 は標高が高くなるほど、気圧が低くなっている傾向が出ている。気圧のセンサーは電氣的に求めた絶対圧力である(秋月電子、3D)

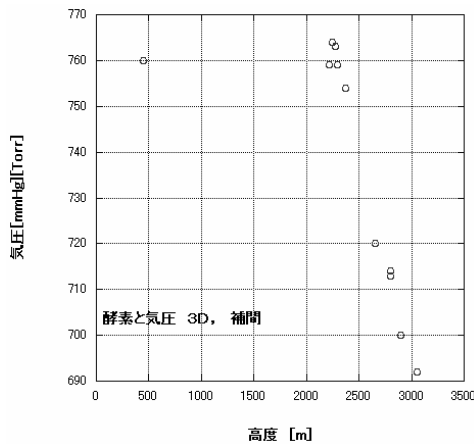


Fig.20 Air pressure vs. altitude

図 20 高度と気圧

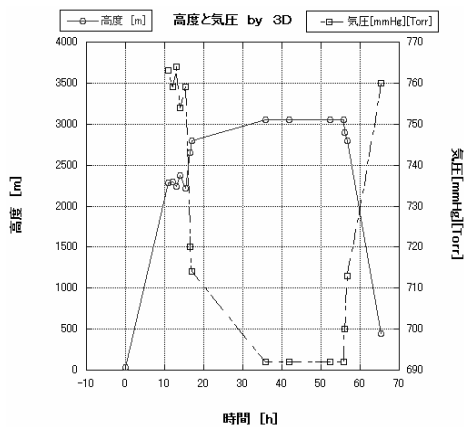


Fig.21 Air pressure, altitude vs. time

図 21 気圧と高度と時間経過

脈拍、血中酸素飽和度が高度および気圧と依存関係がある様子を図 22,23 に示す。

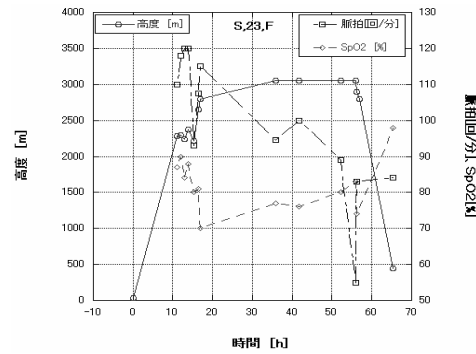


Fig. 22 Altitude, pulse rate, saturation of peripheral oxygen SpO₂ vs. time (Female, 23 years old)

図 22 高度、脈拍、血中酸素飽和度 SpO₂と経過時間 (23 歳、女性)

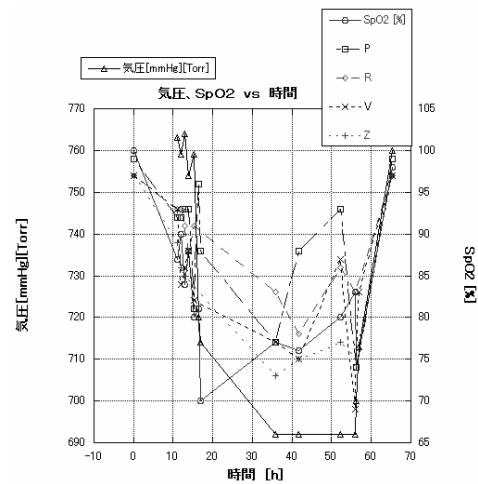


Fig. 23 Air pressure, saturation of peripheral oxygen, SpO₂ vs. time

図 23 気圧、血中酸素飽和度 SpO₂と経過時間(5名)

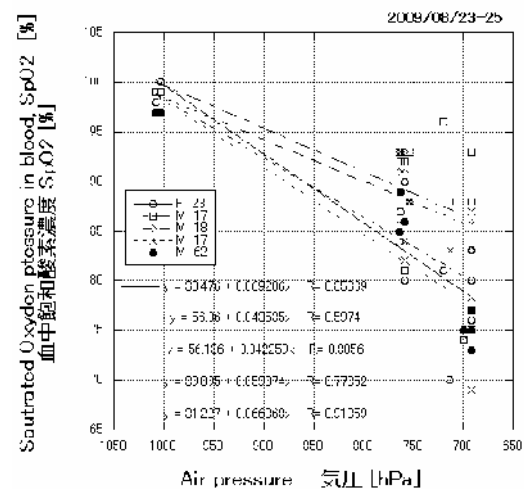


Fig. 24 Saturation of peripheral oxygen SpO₂ vs. air pressure

図 24 血中酸素飽和度 SpO₂と気圧(5名)。山頂で SpO₂ 87%の2名は、特に元気な学生(男子、17歳および18歳)、SpO₂ 約80%の3名は、若干ばて気味(男子17歳、男子62歳、女子23歳)であった。

時間、時刻を媒介変数にせず参加者5名の各人の血中酸素飽和度と気圧の関係を図24に示す。記号Fは女性、Mは男性、数字は年齢である。いずれも予備的なデータであるが、気圧低下(高度上昇)とともに血中酸素飽和度 SpO_2 が減少していることを示している。(関根恵、森脇混、八重樫拓也、矢野倉伊織、会澤雄基、松沢孝男)

(5) 超微小出力無線通信による遠距離データ通信の試行

山頂の旧測候所には、測定データを下界に送る通信インフラが無い(固定電話も、有線インターネットも無い)

野鳥の生態観察や防災(土砂崩れ検知)用の超小電力無線機を改良し、僅か0.4mWの出力(006Pの乾電池1本)で富士山頂から限界距離(見通し距離の最遠地、約200km)の茨城高専まで放射線測定データを直接リアルタイムで送信する実験の予備実験を考えた。1024ビットの擬似雑音を用いたスペクトラム拡散方式を用い成功した。超微小出力無線 QRP にも相当する。

(5.1) 超微小出力無線通信による遠距離データ送信の企画と試行

富士山測候所の利用を始めてみて測候所には通信環境の無いことに気づいた。旧測候所には電話回線もインターネット環境も無い。如何にして測定データを下界に送るか測候所利用の各研究グループが模索中である(人工衛星、無線LAN等)。我々は、ラジオ部の特徴を生かして、放射線のGM管による測定データを超小電力の無線機でリアルタイムで直接茨城高専に送る方法の開発を試みた。富士山頂から茨城高専までの距離は約200[km]あり、直進するVHF/UHF波の到達限界距離219[km]に近い。

試作機の原型機(株数理工設計研究所のMAD-SS,高速同期スペクトラム拡散通信評価キット)のアンテナ高度と飛距離のカタログ値を図25に示す(○および●印)。原型機の出力は5nW、実線は、アンテナ高度による到達限界距離 $x = \sqrt{2Rh}$ である。□印は富士三町から茨城高専に届く条件である。採用した通信のモードは1024TIPの拡散コード利用のデジタルスペクトラム拡散方式である。

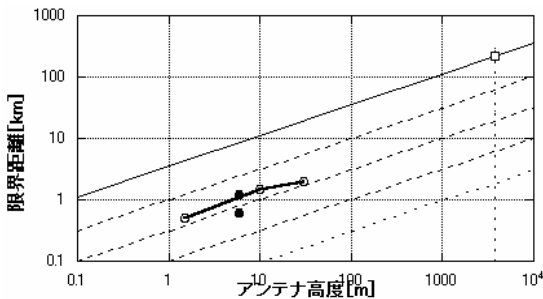


Fig.25 Altitude of antenna and leap distance of prototype set
図25 原型機のアンテナ高度と飛距離のカタログ値
実線は、アンテナ高度による到達限界距離 $x = \sqrt{2Rh}$

原型機の出力を約8万倍の0.38[mW]に、受信機のアンテナの利得を12.6dBi、データの転送速度は10bpsにした。信号の確実性を維持するため、GM管の積算カウンタ数は同じ数値が3回並んだとき

正しいデータとした。電源は006P(9V)の乾電池である。予備実験として、富士山頂山小屋から超小電力の無線機(出力0.38[mW])でGM管の測定データをリアルタイムで茨城高専まで200kmを送信することに成功した。茨城高専に届いた測定データとそれをグラフ化したものを図26,27,28に示す。

今後、同種の超微小電力測定器兼送信機を赤城山地蔵岳、榛名山等にも設置し実機の野外実験と電波伝搬特性の試験と、装置が他の通信系統に影響を与えないことの実証実験を行い次の富士山測候所での実験を目指す予定である。

(松沢孝男、矢澤正人)

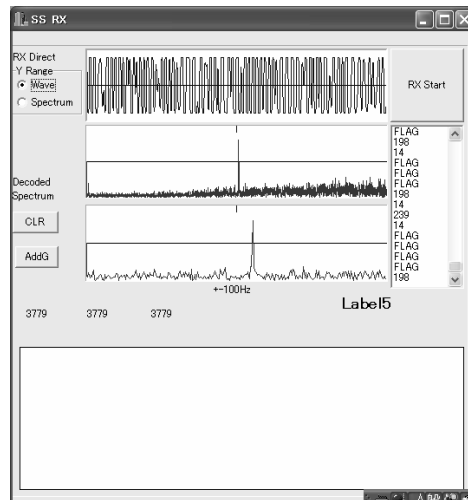


Fig. 26 As received and FFT treated wave signals
図26 受信電波とFFT後の波形と読み取りデータ

西暦年/月/日 時刻	積算カウンタ
200*/**/** 15:22:17	2630, 2630, 2630
200*/**/** 15:23:04	2656, 2656, 2656
200*/**/** 15:24:48	2707, 2707, 2707
200*/**/** 15:29:48	2814, 2814, 2814

Fig. 27 Example of received data

図27 実際の読み取りデータの例

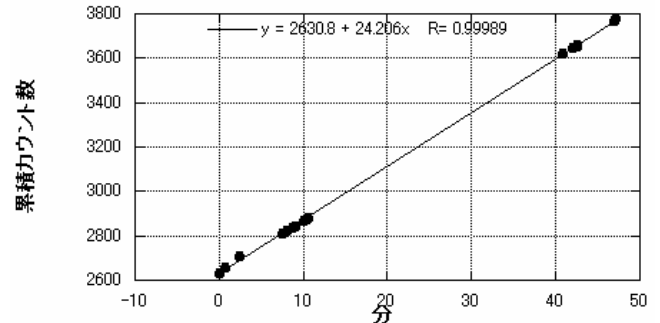


Fig. 28 Radiation background data plot with directly received data

図28 富士山頂山小屋より茨城高専に直接届いた測定データを基に作図。直線の傾きよりバックグラウンドが24.2cpmと分かる

(6) 紫外線強度測定

前回の富士山登山で、山頂の紫外線の強度が高いことは体験済みである[6]。耳たぶまで日焼けし耳たぶの形の皮膚がはがれた。学生の海外の語学研修時、オーストラリアで測った紫外線強度と比較する。

(6.1) はじめに

2007年の富士登山の際に日焼け止めを塗っていない腕や耳が日光の紫外線で水膨れを起こした状態になるなど、雲の上の山頂では日光が強く感じられた。

そこで、2009年の富士登山の際に紫外線強度を測定してみることにした。

また、旅行雑誌やガイドブックをみると、オーストラリアでは紫外線が強いと記載されている。そこで、オーストラリアにおける紫外線強度についても測定することにした。

(6.2) 方法

富士山頂滞在時、オーストラリアでの語学研修中、紫外線強度を太陽を直視できる環境にて測定した。測定器はケニス デジタル紫外線強度計 UV-340を用いた。また、測定地点における太陽高度を[10]を用いて調べ、太陽光が太陽の南中時に大気圏を通過する距離dを次のように調べた。

図29のように地球の中心を原点にとった座標を考える。点aを観測地点、点bを太陽光が現地時間の正午に大気圏に突入する地点、地球の半径をr、地表から大気圏までの高度をh、太陽高度をθとする(θは太陽の仰角、[10],[13])。

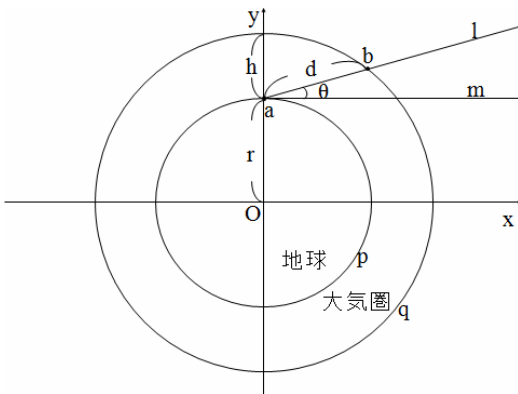


Fig.29 coordinate, origin is center of the earth

図29 地球の中心を原点にとった座標

円qの方程式は、 $x^2 + y^2 = (r + h)^2$ …①

直線lの方程式は、 $y = x \cdot \tan \theta + r$ ……②

点bの座標は円qと直線lの交点であるから

②を①に代入して

$$x^2 + (x \cdot \tan \theta + r)^2 = (r + h)^2$$

$$(1 + \tan^2 \theta) \cdot x^2 + 2x \cdot \tan \theta - (2rh + h^2) = 0$$

xは正に存在するから

∴

$$x = \frac{-r \tan \theta + \sqrt{r^2 \cdot \tan^2 \theta + (1 + \tan^2 \theta)h(2r + h)}}{(1 + \tan^2 \theta)}$$

空気層の厚さhは地球の直径2dに比べれば遙かに小さい。2r >> hだから、

$$x = \frac{-r \tan \theta + \sqrt{r^2 \cdot \tan^2 \theta + (1 + \tan^2 \theta) \cdot 2rh}}{(1 + \tan^2 \theta)} \dots \textcircled{3}$$

y = x · tan θ + r だから、

$$y = \frac{-r \tan \theta + \sqrt{r^2 \cdot \tan^2 \theta + (1 + \tan^2 \theta) \cdot 2rh}}{(1 + \tan^2 \theta)} \tan \theta + r$$

$$= \frac{-r \tan \theta + \sqrt{r^2 \cdot \tan^2 \theta + (1 + \tan^2 \theta) \cdot 2rh}}{(1 + \tan^2 \theta)} \tan \theta + r$$

..... ④

よって、太陽光が大気圏を通過する距離dは

$$d = \sqrt{x^2 + (y - r)^2}$$

$$d^2 = x^2 + (y - r)^2$$

$$= \left(\frac{-r \tan \theta + \sqrt{r^2 \cdot \tan^2 \theta + (1 + \tan^2 \theta) \cdot 2rh}}{(1 + \tan^2 \theta)} \right)^2$$

$$\times (1 + \tan^2 \theta)$$

$$= \{-r \tan \theta + \sqrt{r^2 \cdot \tan^2 \theta + (1 + \tan^2 \theta) \cdot 2rh}\}^2 / (1 + \tan^2 \theta)$$

となり③、④を代入することで求められる。

(6.3) 結果と考察

2008年(H20)年8月7日の日本(茨城高専)と2008年(H20)年9月7日および10日のオーストラリア(シドニー)、2009年(H21)年8月24日の紫外線強度の変化を図30、太陽高度の変化を図31 太陽光が通過する距離を図32に示す[6]。

オーストラリアで冬の紫外線強度を測定してみたところ、日本の真夏とほぼ同じで、富士山頂ではそれらよりも紫外線強度が強かった。計測時、オーストラリアでは冬であり、太陽高度が水戸より低かった。また、南中時の太陽高度をもとに調べた太陽光が大気圏を進む距離は、シドニーの方が長い。富士山頂では太陽高度、太陽光が大気圏を進む距離は水戸とさほど変化がなかった。このことから、シドニーの方が太陽光の減衰が大きい。それにもかかわらず、冬のオーストラリアの紫外線の強度が夏の日本と同じであることから、オーストラリアでは紫外線の強度が日本より強いといえる。オゾンホール拡大と関

係は不明である。

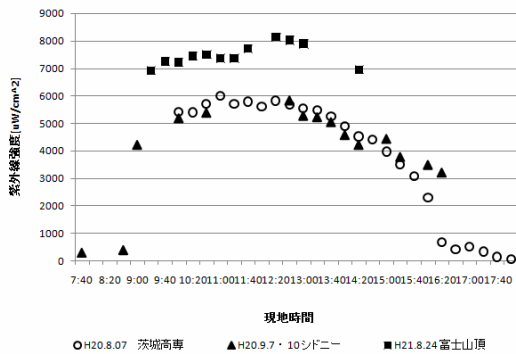


Fig. 30 Intensities of ultra violet light, INCT, Sydney, and Mt. Fuji
 図30 茨城高専 H20 年 8 月 7 日、オーストラリア H20 年 9 月 7、10 日、富士山頂 H21 年 8 月 24 日の紫外線強度の時間変化(現地時間)

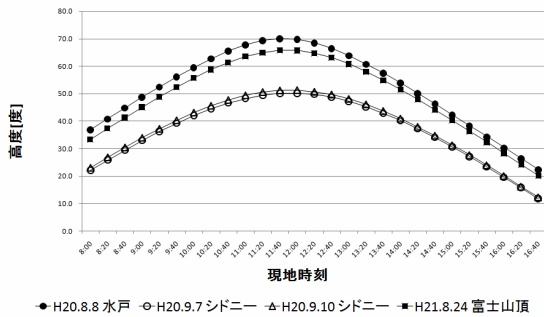


Fig.31 Solar angle Mito, Sydney, and Mt. Fuji
 図31 水戸 H20 年 8 月 8 日、シドニー H20 年 9 月 7 日・10 日、富士山頂 H21 年 8 月 24 日の太陽高度の変化(各現地時間) [5]

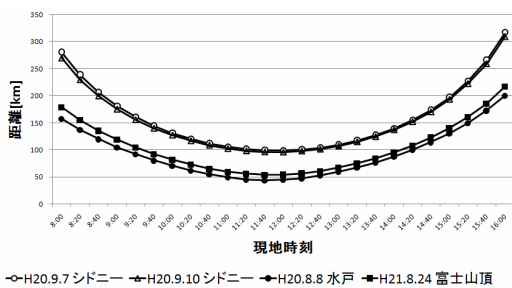


Fig.32 Change of transit distance of sun light in atmosphere in time of day, Sydney, Mito, and Mt. Fuji
 図32 水戸 H20 年 8 月 8 日、シドニー H20 年 9 月 7 日・10 日、富士山頂 H21 年 8 月 24 日の太陽光が通過する大気圏の距離の時間変化(各現地時間)

しかし、空気の汚れ、あるいは、湿気のため、地表に届く紫外線の量が減っているだけという可能性もある。今後は空気の汚れや湿度など今回の測定項目以外の環境調査も継続的に行う必要がある。
 (森脇晃)

4 まとめ

頭で知っているだけのことを、それで満足せず実際に実験で確かめることは科学の第一歩である。真の教育として実施すればよいのだが機会は少ない。今回、富士山の山頂という特殊、極限の環境を生かしたさまざまな科学実験を学生と試行することができた。この恵まれた実験の機会を得た学生は、更に下界(地上)でも自分の課題を見つけ問題を掘り下げていくことになる。

謝辞

山頂での科学教育として実験の機会を与えていただいた NPO 法人富士山測候所を活用する会の皆様にご感謝します。ろうそくの実験の提案をしていただいた高知県吾川郡いの町立神谷中学校の田辺益広先生に感謝します。

参考文献

- [1] Takao Matsuzawa, Kunihiko Iioka, and Yoshiharu Kawai, Mamma dose rate in the vicinity of JCO as of approximately 8:00 pm on September 30, 1999, Journal of Environmental Radioactivity, 50 (2000) pp. 27-36.
- [2] 松沢孝男、飯岡邦彦、河井義春、臨界状態が続く 1999 年 9 月 30 日 20 時頃の JCO 社周辺の γ 線の空間線量率(その1)、茨城工業高等専門学校研究彙報、第 35 号(2000)、pp. 32-39.
- [3] 松沢孝男、臨界事故から約 130 日後の JCO の敷地内および周辺の空間線量率:JCO 報告、その 3、*ibid.*、第 39 号(2004)、pp. 41-52.
- [4] 松沢孝男、奥山慶洋、関根恵、浅野健、高崎良一、高柳拓也、身のまわりの放射線の測定の試行、—航空機、富士山、2 次宇宙線、北朝鮮の核実験—、*ibid.*、第 42 号、pp. 45-52(2007)。
- [5] 松沢孝男、大沼侑司、会澤雄基、阿久津達也、森脇晃、中島宏昌、飯嶋竜司、箕輪菜、関根恵、保田浩志、宇宙線の測定を目指した富士山登山、*ibid.*、第 43 号、pp. 35-46(2008)。
- [6] 森脇晃ほか、オーストラリア語学研修時の環境測定 *ibid.*、第 44 号、pp. 17-22(2009)。
- [7] 気象庁、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/>
- [8] フェラデー、吉田光邦訳「ロウソクの科学」、講談社文庫、昭和 47 年、第 1 刷発行、同 矢島祐利訳、岩波書店、1983(昭和 54)。
- [9] 国立天文台編理科年表、2009 年版。
- [10] 国立天文台編理科年表、2008 年版。
- [11] 矢野倉 伊織、森脇 晃、八重樫 拓也、奥山 慶洋 富士山頂対応電気ポットの試作 —八光「熱実験[コンテスト]」始末、茨城工業高等専門学校研究彙報、第 45 号、(2010)。(掲載予定)
- [12] 関根恵、大沼侑司、会澤雄基、阿久津達也、森脇晃、中島宏昌、飯嶋竜司、箕輪菜、松田理絵、松澤孝男、保田浩志、学生による飛行機・富士山における宇宙線測定の試行、第 10 回「環境放射能」研究会予稿集、(2009.03.03-03.05)於高エネルギー技術研究所。
- [13] 「国立天文台、暦計算室、こよみの計算」。
<http://www.nao.ac.jp/koyomi/koyomix/koyomix.html>

Δ T = 1 年程度の時間で見た原子炉内の反応 — U-235 の核分裂エネルギーから見た核燃料廃棄物量の半定量的試算 —

森脇 滉*、田島 圭一郎*、斉藤 慶太*、矢野倉 伊織*、奥山 慶洋

ラジオ部学生*、人文科学科

The nuclear fission in a nuclear reactor in one year.

- The estimation of the amount of used nuclear fuel, using public data. -

Akira MORIWAKI*, Keiichiro TASHIMA*, Keita SAITO*, Iori YANOKURA*, and Yasuhiro OKUYAMA

Abstract: Nuclear power plants in Japan have played a major role in energy production. However the nuclear fuel cycle has not yet overcome that many problems. We tried to estimate the trend of nuclear fuel waste. In addition, we took a look at the measurements involved in nuclear waste. This is one of the research reports by the Radio Club, about spent nuclear fuel in Japan.

1. はじめに

我が茨城工業高等専門学校のある半径 10km 以内に東海第二原子力発電所を始め多数の原子力関係事業所がある。

そのため、我がラジオ部ではこれまでに、平時における自然放射線の強度の測定[1]や、発電用原子炉の高経年化を考慮した原子力発電の設備容量の近未来予測の試算[2]などを行ってきた。また 2007 年、2009 年は、日本初の原子炉である JRR-1 を用いた原子炉シミュレーターの運転実習を行った。

これらの活動を通して、実際に原子炉の中ではどのような現象が起こっているのか調べようとしたが、世間の原子力発電や原子炉の説明は難しすぎる[3]か、逆にあまりにも定性的[4]で、量の概念が無い、計算途中を省いた結論のみで「信じる」か「信じない」かし対応ができない宗教のように感じられ、2008 年からは原子炉シミュレーターの試作を行っている。

その調査中、ウラン 235 の 1 原子が核分裂する際に約 200MeV の熱エネルギーが生じることを知り、これを用いて核燃料廃棄物の量を自分で算出できるのではないかと思い、調査を試みた。

2. 核燃料廃棄物の簡易的試算

2.1. 方法

まず、ウラン 235 の 1 原子が核分裂する際に約 200MeV の熱エネルギーが生じることを利用して、簡易的に核燃料廃棄物の量を次のように試算した。

原子力発電所の 1 年間の発電電力量を Q_e 、熱エネルギーから電気エネルギーに変換する際の変換効率を X とすると原子力発電所にて 1 年間に発生した熱量 Q_t は

$$Q_t = \frac{Q_e}{X} \text{ [J]} \dots \text{①}$$

となる。なお、 Q_e は文献[5]を用いた。

U-235 原子が一回核分裂する際に生じるエネルギーを Q_0 とすると

$$\begin{aligned} Q_0 &= 200 \text{ [MeV/個]} \\ &= 2 \times 10^8 \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ [J/個]} \\ &= 3.20 \times 10^{-11} \text{ [J/個]} \end{aligned}$$

となる。

原子力発電所にて発生した熱量は Q_t であるから核分裂した U-235 原子の個数 N は①より

$$\begin{aligned} N &= \frac{Q_t}{Q_0} \text{ [個]} \\ &= \frac{Q_e}{X Q_0} \text{ [個]} \dots \text{②} \end{aligned}$$

となる。

U-235 の原子量を ^{235}U とすると

$$^{235}\text{U} = 235 \text{ [g/mol]}$$

となり、アボガドロ定数を N_0 とすると

$$N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ [個/mol]}$$

となる。

これより、U-235 の質量 M_{235U} は②より

$$M_{235U} = \frac{N^{235U}}{N_0} [g]$$

$$= \frac{Q_e^{235U}}{XQ_0N_0} [g] \dots ③$$

よって、使用前の核燃料の U-235 の濃縮度を Y とすると使用前の核燃料の質量 M は③より

$$M = \frac{M_{235U}}{Y} [g]$$

$$= \frac{Q_e^{235U}}{XYQ_0N_0} [g]$$

となり、核燃料の質量 M は求まる。

今回の調査では、使用前の核燃料の質量と核燃料廃棄物の質量は同じとした。なお、この過程の信憑性については、4.2.1 の⑧式で検証する。

また、U-235 の 1 原子が核分裂する際に 200MeV の熱エネルギーが生じ、一度核分裂した核燃料は再度核分裂しないとした。

文献にて変換効率 X、濃縮度 Y を調べてみたところ、変換効率 34% 程度、濃縮度 3% 程度であったため変換効率 34%、濃縮度 3% とした。なお、この変換効率、濃縮度についての検証は 4.2.1 にて述べる。

2.2. 結果と考察

2.1 の方法で調査した結果、図 1 のように電気出力量、核燃料廃棄物の変化が出た。核燃料廃棄物量は年々増加しており、累計核燃料廃棄物も増加している。しかし、これだけではどれほどの量であるのか比較、検討しようもない為、次の 3. を行った。

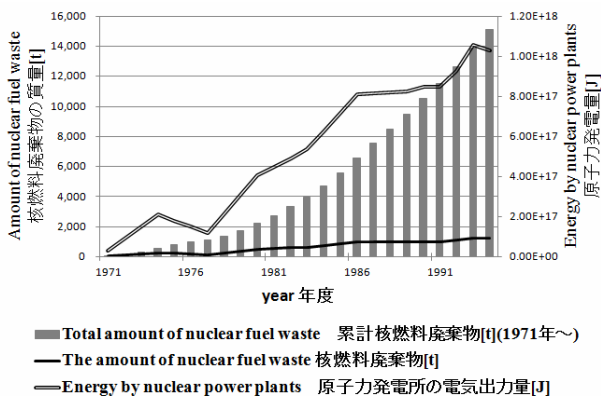


Fig. 1 The total amount of nuclear fuel waste and energy of nuclear power plants

図1 核燃料廃棄物の質量と原子力発電による電気出力量の年度ごと変化

3. 今後の核燃料廃棄物の変化の簡易的予測

3.1. 方法

次に、先ほどの 2. で調べた結果に再処理工場で再処理した核燃料廃棄物の量、海外に輸出した核燃料廃棄物のデータを差し引いた未処理の核燃料廃棄物の量を算出した。また、国内の貯蔵可能量のデータから未処理の核燃料廃棄物は今後貯蔵施設に収まるのか調べてみた。

この調査では、原子力発電所の電気出力は減ることは考えにくい為、1900 年代と同じ核燃料廃棄物を今後 2050 年までに毎年発生するとし、再処理施設、貯蔵施設は現在予定されているもののみと仮定した。データは[4],[5],[6]を用いた。なお、原子力発電所の設備容量を考慮した今後の予測の手法については 4.2.2 で述べる。

3.2. 結果と考察

3.1 の方法で調査した結果、図 2 のように未処理の核燃料廃棄物の量と国内貯蔵可能量がでた。

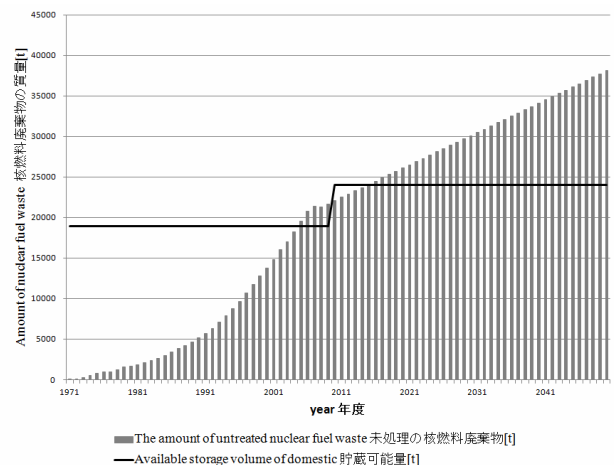


Fig. 2 The total amount of untreated nuclear fuel waste and available storage volume of domestic

図2 未処理の核燃料廃棄物量と国内の貯蔵可能量の変化

未処理の核燃料廃棄物の量は 2010 年に年間 800[t] の核燃料廃棄物を再処理する六ヶ所再処理工場が操業するにもかかわらず、処理しきれずに年々増加している。また、2010 年に青森県むつ市に 5000[t] 貯蔵可能な貯蔵施設が操業するにもかかわらず、2018 年には未処理の核燃料廃棄物が貯蔵可能量を上回っている。

これから、今の軽水炉、再処理工場、貯蔵施設のままでは核燃料廃棄物が増えてしまい、日本だけでは核燃料廃棄物を処理しきれない状況になってしまうだろう。

4. 日本の使用済み核燃料の保管可能性の半定量的試算

4.1 動機

使用済み核燃料の将来の保管可能性について予測をしてみた。日本の原子力発電所全体では毎年約 900 から 1000 [t] 近くの使用済み核燃料が発生している[7]。しかし、青森県六ヶ所村の再処理工場(2010 年に本格的な稼働を予定)では、年に約 800 [t] 使用済み核燃料が再処理されていることになっている。この数値から、年間 200 [t] は再処理されないことが分かる。これは、青森県むつ市の 5000 [t] の使用済み核燃料を貯蔵できる中間貯蔵施設と各発電所の使用済み核燃料を貯蔵する施設に随時貯蔵されることになっている[8]。しかし、貯蔵量にも限界があることは明らかなので、いつ日本で使用済み核燃料が保管できなくなるかを予測し、保管できないときは対策案も考えてみた。

4.2 予測の手法

日本全体で発生する使用済み核燃料の毎年の積算量、日本の貯蔵可能量と再処理量の積算量を求めて、前者の量と後者の量を比べることによって、貯蔵の可否が分かる。また将来の予測をするので建設予定の原子力発電所を含めて使用済み核燃料の発生量と全貯蔵可能量を求める必要がある。

4.2.1 使用済み核燃料の積算量の求め方

日本には2010年までに20300[t]使用済み核燃料が発生すると見積もられている[9]。しかし、それ以後の将来発生しうる使用済み核燃料のデータは自分が深めたなかでは見つからなかった。そこで建設予定の原子力発電所の許可出力(発電量)をもとにして、発電量と使用済み核燃料は比例するという前提で、単位発電量あたりの使用済み核燃料の発生量を求めた。その値を許可出力にかけることによって使用済み核燃料が求められる。今回の予測にあたってはウラン 235 のみが原子炉で燃焼すると仮定した。

仮に 1 [W] の出力を一年間得るための核燃料の量を求める。ウラン 235 は核分裂する際に $Q_i=200$ [MeV] のエネルギーを放出する。これをジュールの値に換算すると

$$Q_i=3.20 \times 10^{11} [J] \dots \textcircled{4}$$

となる。一年間に 1 [W] の出力を出し続けるのに必要な熱量の総量 Q_y は一年間を 365 日として秒に直すと、

$$Q_y=3.15 \times 10^7 [J] \dots \textcircled{5}$$

となる。⑤式を④式で割ることによって一年間に必要なウランの個数がわかる。よって一年間に必要なモル数 U_n がわかる。アボガドロ数を $N_0=6.02 \times 10^{23}$ にすると、モル数 U_n は

$$U_n = \frac{Q_y}{N_0 \cdot Q_i} [\text{mol}] \dots \textcircled{6}$$

となる。ウラン235の質量数は235 [g/mol] である。この値と⑥式の値をかければ必要なウランの質量 U_m が求められる。その値は

$$U_m=U_n \times 235 [\text{g/mol}] \dots \textcircled{7}$$

となった。ウラン235の濃縮度はa [%] とすると全体のウランの質量は⑦式に100/aをかければ単位年間出力あたりの燃料の質量 F_y は、

$$F_y = U_m \times \left(\frac{100}{a} \right) \times 10^{-3} [\text{kg}]$$

となる。今回の F_y の値は

$$F_y = 9.61 \times 10^{-6} [\text{kg}]$$

であった。ここでウラン濃縮度の仮定の方法について述べる。今回原子力文化振興財団が発行している「原子力発電3」の表を用いて各原子力発電所のウラン235の濃縮度を調べた。表1がBWR型原子力発電所のウラン235の濃縮度の表、表2がPWR型原子力発電所のウラン235の濃縮度の表である。

Table 1 Concentrated level of uranium 235 of BWR type nuclear plant in Japan

表1 日本におけるBWR型原子力発電所のウラン235の濃縮度

発電所名		初装荷炉心[%]	取替炉心[%]
日本原子力発電	東海第二	2.2	3.4
日本原子力発電	敦賀1号	2.2	3.4
東北電力	女川1号	2.3	3.5
東北電力	女川2号	2.5	3.5
東北電力	女川3号		
東北電力	東通1号		
東京電力	福島第一1	2.1	3.4
東京電力	福島第一2	2.2	3.6
東京電力	福島第一3	2.2	3.6
東京電力	福島第一4	2.2	3.6
東京電力	福島第一5	2.2	3.6
東京電力	福島第一6	2.2	3.4
東京電力	福島第二1	2.2	3.4
東京電力	福島第二2	2.2	3.4
東京電力	福島第二3	2.2	3.4
東京電力	福島第二4	2.2	3.4
東京電力	柏崎刈羽1	2.2	3.4
東京電力	柏崎刈羽2	2.2	3.4
東京電力	柏崎刈羽3	2.5	3.4
東京電力	柏崎刈羽4	2.5	3.4
東京電力	柏崎刈羽5	2.2	3.4
東京電力	柏崎刈羽6	2.6	3.5
東京電力	柏崎刈羽7	2.6	3.5
中部電力	浜岡1号	2.5	3.6
中部電力	浜岡2号	2.3	3.6
中部電力	浜岡3号	2.2	3.4
中部電力	浜岡4号	2	3.4
中部電力	浜岡5号		
北陸電力	志賀1号	2.4	3.6
北陸電力	志賀2号		
中国電力	島根1号	2.09	3.4
中国電力	島根2号	2.2	3.4
平均値		2.27	3.46

Table 2 Concentrated level of uranium 235 of PWR type nuclear plant in Japan

表2 日本におけるPWR型原子力発電所のウラン235の濃縮度

発電所名	ウラン濃縮度[%]			取替炉心[%]
	1	2	3	
北海道電力 泊1号	2.27	3.03	3.4	3.4
北海道電力 泊2号	2.27	3.03	3.4	3.4
関西電力 美浜1号	2.23	3	3.4	3.2
関西電力 美浜2号	2.3	3	3.4	3.5
関西電力 美浜3号	2	2.7	3.4	3.4
関西電力 高浜1号	2	2.7	3.4	3.4
関西電力 高浜2号	2	2.7	3.35	3.4
関西電力 高浜3号	2.1	2.6	3.1	4.1
関西電力 高浜4号	2.1	2.6	3.1	4.1
関西電力 大飯1号	2.1	2.6	3.1	4.1
関西電力 大飯2号	2.1	2.6	3.1	4.1
関西電力 大飯3号	2	3.5	4.1	4.1
関西電力 大飯4号	2	3.5	4.1	4.1
四国電力 伊方1号	2.27	3.03	3.4	3.4
四国電力 伊方2号	2.27	3.03	3.4	3.4
四国電力 伊方3号	2	3.5	4.1	3.6
九州電力 玄海1号	2.27	3.03	3.4	4.1
九州電力 玄海2号	2.27	3.03	3.4	4.1
九州電力 玄海3号	2	3.5	4.1	4.1
九州電力 玄海4号	2.1	3.5	4.1	4.1
九州電力 川内1号	2.1	2.6	3.1	4.1
九州電力 川内2号	2.1	2.6	3.1	4.1
日本原子力発電 敦賀2号	2.1	2.6	3.1	4.1
平均値	2.12826087	2.95565217	3.458696	3.8

まず表1で一部の原子力発電所のウラン235の濃縮度の値が抜けているが、これは資料が1995時点までのデータしか載せられていないため1995年以降に建設された原子力発電所については記載されていない。表1の初装荷炉心というのは、装荷されて何年か経った燃料のウラン235の濃縮度である。取替炉心というのは、新しく装荷される燃料のウラン235の濃縮度である。表2の項目1、2、3は炉心の燃料を3つに分けた場合の各部分のウラン235の濃縮度である。取替炉心は、表1と同じである。今回、予想使用済み核燃料を求める際には取替炉心のウラン235の濃縮度を用いた。それは項目1、2、3や初装荷炉心について、元は取替炉心のウラン235の濃縮度と等しかったからである。今回PWR型、BWR型それぞれについて取替炉心におけるウラン235の濃縮度の平均値を求めた。その値は、BWR型は3.46で標準偏差は±0.087[%]、PWR型は3.8で標準偏差は±0.36[%]であった。設備容量の予測をする際、ABWR型はBWR型と同じ濃縮にして、APWR型はPWR型と同じ濃縮にした。原子力発電所の許可出力とF_yの値、原子力発電所の稼働率を掛けた値が必要な燃料の値となる。しかし、許可出力は取り出せる電気エネルギーの値なので、実際にはそれよりも多くの熱エネルギーを発生させている。表1と表2に各原子力発電所の熱出力、電気出力、熱効率の資料値[9]を示す。

表を見ると値がいくつか抜けているものがあるが、これは「原子力3」のデータが1995年までしかないために1995年以降に建設された原子力発電所のデータが載っていないためである。この表からPWRの熱効率の平均値は34.24 [%]、BWRの熱効率の平均値は34.01 [%]だということが分かる。よってPWR、BWRとも熱効率はほとんど変わらず、今回はすべての原子力発電所で熱効率が34 [%]と仮定した。許可出力にF_yをかけたものに100/34をかければ必要な燃料の量が求められる。

原子力発電は原子核が核分裂した際のエネルギーを利用しているが、そのとき質量がエネルギーに変わるので、質量が減るはずである。1 [J]取り出す際に減少する質量を、質量とエネルギーの等価性から求めてみた。

Table 3 The table of PWR nuclear plant of heat output, electronic output, heat efficiency

表3 PWR型原子力発電所の熱出力、電気出力、熱効率の表

発電所名		熱出力[MW]	電気出力[MW]	熱効率[%]
北海道電力 泊1号		1650	579	35.09
北海道電力 泊2号		1650	579	35.09
関西電力 美浜1号		1031	340	32.98
関西電力 美浜2号		1456	500	34.34
関西電力 美浜3号		2440	826	33.85
関西電力 高浜1号		2440	826	33.85
関西電力 高浜2号		2440	826	33.85
関西電力 高浜3号		2660	870	32.71
関西電力 高浜4号		2260	870	38.50
関西電力 大飯1号		3423	1175	34.33
関西電力 大飯2号		3423	1175	34.33
関西電力 大飯3号		3423	1180	34.47
関西電力 大飯4号		3423	1180	34.47
四国電力 伊方1号		1650	566	34.30
四国電力 伊方2号		1650	566	34.30
四国電力 伊方3号		2660	890	33.46
九州電力 玄海1号		1650	559	33.88
九州電力 玄海2号		1650	559	33.88
九州電力 玄海3号		3423	1180	34.47
九州電力 玄海4号		3423	1180	34.47
九州電力 川内1号		2660	890	33.46
九州電力 川内2号		2660	890	33.46
日本原子力発電 敦賀2号		3423	1160	33.89
平均値				34.24

Table 4 The of BWR nuclear plant of heat output, electronic output, heat efficiency

表4 BWR型原子力発電所の熱出力、電気出力、熱効率の表

発電所名		熱出力[MW]	電気出力[MW]	熱効率[%]
日本原子力発電 東海第二		3293	1100	33.40
日本原子力発電 敦賀1号		1064	357	33.55
東北電力 女川1号		1593	524	32.89
東北電力 女川2号		2436	825	33.87
東北電力 女川3号				
東北電力 東通1号				
東京電力 福島第一1号		1380	460	33.33
東京電力 福島第一2号		2381	784	32.93
東京電力 福島第一3号		2381	784	32.93
東京電力 福島第一4号		2381	784	32.93
東京電力 福島第一5号		2381	784	32.93
東京電力 福島第一6号		3293	1100	33.40
東京電力 福島第二1号		3293	1100	33.40
東京電力 福島第二2号		3293	1100	33.40
東京電力 福島第二3号		3293	1100	33.40
東京電力 福島第二4号		3293	1100	33.40
東京電力 柏崎刈羽1号		3293	1100	33.40
東京電力 柏崎刈羽2号		3293	1100	33.40
東京電力 柏崎刈羽3号		3293	1100	33.40
東京電力 柏崎刈羽4号		3293	1100	33.40
東京電力 柏崎刈羽5号		3293	1100	33.40
東京電力 柏崎刈羽6号		3296	1356	41.14
東京電力 柏崎刈羽7号		3296	1356	41.14
中部電力 浜岡1号		1593	540	33.90
中部電力 浜岡2号		2436	840	34.48
中部電力 浜岡3号		3293	1100	33.40
中部電力 浜岡4号		3293	1137	34.53
中部電力 浜岡5号				
北陸電力 志賀1号		1593	540	33.90
北陸電力 志賀2号				
中国電力 島根1号		1380	460	33.33
中国電力 島根2号		2436	820	33.66
平均値				34.01

$$E[J] = m[\text{kg}]c[\text{m/s}^2] \dots \textcircled{8}$$

の⑧式から質量mについて解くと、

$$m[\text{kg}] = \frac{E[\text{J}]}{(c[\text{m/s}])^2}$$

$$= \frac{E}{c^2} [\text{kg}]$$

この式に $E=1 [\text{J}]$ 、 $c=3.0 \times 10^8 [\text{m/s}]$ を代入すると、 $1.11 \times 10^{-17} [\text{kg}]$ となる。一年間に $1 [\text{W}]$ の出力を出し続けた場合の質量の減少量は $3.504 \times 10^{-10} [\text{kg}]$ となる。この値は全体の燃料 F_f の値の $3.65 \times 10^{-3} [\%]$ より、今回の研究では無視してよい量である。このことから、燃料は使用前後で質量が変わらないといえる。

F_f の値が実際の値と比べてどれくらい近いのか調べてみた。2007年の使用済み核燃料の発生量を F_f の値を用いて求めてみた。その値は $1172 [\text{t}]$ であった。実際に発生している使用済み核燃料を調べてみたら、「原子力2008」には毎年約900から1000 $[\text{t}]$ の使用済み核燃料が発生しているとしてあった。最大値の1000 $[\text{t}]$ が発生しているとしたときの誤差評価を行った。その値は $17.2 [\%]$ であった。予測した使用済み核燃料の量は $17.2 [\%]$ の誤差があるといえるが、今回の研究では差支えないとした。差支えないとして今回の F_f の値は数値の上では合っているといえる。しかしウラン燃料はウラン235の濃縮度が $1 [\%]$ になったとき使用済み核燃料として廃棄される。今回の予測ではウラン235がすべて燃えるとしていたので実際の使用済み核燃料は予想の場合の使用済み核燃料よりも多くなるはずである。何故同じ量になるのかというと、実際の燃料では燃えないウラン238がプルトニウムに変わりそれが燃えているからである。そのプルトニウムが燃えたことによって発生した熱量が、予想の場合でウラン235が $1 [\%]$ 多く燃えることによって発生する熱量にほぼ等しいことになる。

次に既存の原子力発電所の設備容量と建設計画にもとづく予想設備容量から、使用済み核燃料の積算予想量を作成した。データは政府の資料の値 $[10]$ 、実際の発電量は設備容量に設備利用率をかけるのだが、1985年から2006年の日本全体の設備利用率の平均からその値を $75.3 [\%]$ にした。予想設備容量を出す際に、原子力発電所の運転期間を仮定した。建設された年に応じて運転期間を40年から60年に定めた。国は適切に維持管理がなされた場合本来の運転期間である30年間よりも長く運転できるとしている。 $[11]$ つまり新しい原子力発電所は技術の進歩により想定された運転期間40年より長く運転できるとした。具体的に述べると1970年代に建設されたものは40年、1980年代に建設されたものは50年、1990年代以降に建設されたものは60年と仮定して計算した。そして各地の原子力発電所で寿命を迎えたとき、寿命を迎えた原子力発電所の改良型の原子力発電所に建て替えられると仮定した。建て替えられた原子力発電所の運転開始までの期間は、炉の冷却から建て替え工事を含めて20年とした。下に延命、建て替えを仮定した場合の予想設備容量と延命はするが建て替えはしない場合の予想設備容量のグラフを示す。

グラフを見ると2030年あたりから、建替えされない場合は設備容量が減り続け、建替えされた場合設備容量は一旦減少した後最盛期の設備容量に持ち直すことがわかる。将来の使用済み核燃料の発生を予測するときには、設備容量の予測をすることは重要である。現状のように建て替えをしないという仮定では設備容量が減少してしまうことは図3のグラフからわかり、政府や電力会社が将来的に原子力発電

所の設備容量が減ったまますることは考えにくい。

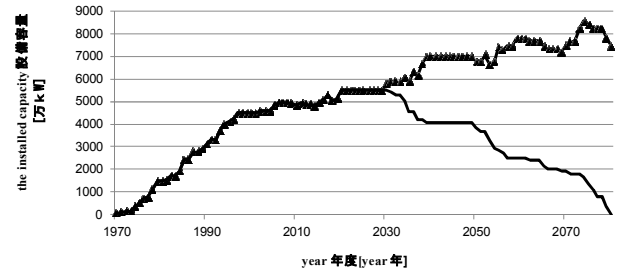


Fig. 3 The estimate of installed capacity (▲ The case of nuclear plants are replaced and prolonged —The case of nuclear plants are prolonged without replacing)

図3 設備容量の予測 (▲建て替え、延命をした場合の予想設備容量—建て替えはせず延命した場合。)

建て替えや新規建設をして設備容量を現在以上に維持していくと考えられる。政府や電力会社が具体的にどのようなことをするのかはまだわからないので、自分なりに設備容量が現状以上に維持できるように仮定をしてみた。今回、使用済み核燃料の発生予測をする際には、自分で仮定を置いた時の設備容量の予測の値を用いた。

4.2.2 使用済み核燃料の貯蔵可能量の求め方

日本における使用済み核燃料の貯蔵方法には各原子力発電所のサイトの管理容量以内のサイト内保管、青森県むつ市の中間貯蔵所、六ヶ所村の再処理工場の保管所での保管である。各原子力発電所の管理容量の値の予測法について述べる前に管理容量の定義について述べる。管理容量の値は平成20年度版原子力白書の値 $[12]$ を用いた。白書の中で管理容量とは、貯蔵量から1炉心分の燃料と1取替分を差し引いた値と定義されていた。1炉心分の燃料と1取替分の燃料については説明が特になかったので、管理容量の定義についてもよくわからなかった。そこで他の資料をあたって、管理容量の定義を確かめることにした。今回は日本原子力文化振興財団の「原子力発電3」の値 $[9]$ を照らし合わせることによって、1炉心分の燃料と1取替分の燃料について説明する。1炉心分の燃料についてだが、「原子力発電3」にある全ウラン装荷量の値と原子力白書の1炉心分の燃料の値がほぼ等しかった。

表3を見ると東北電力女川、東北電力東通、中部電力浜岡、北陸電力志賀については値が大きく違っている。これは、「原子力3」に乗ってあるデータが1995年までで、それ以降に建設された原子力発電所のデータがないためである。今回用いた原子力白書は平成20年度版なので値が違っている。そこで、原子力白書の表で「原子力3」に載っていない原子力発電所の1炉心分の燃料を抜かして、横軸に1炉心分の燃料、縦軸に全ウラン装荷量をとったグラフを作成した。

Table 5 One reactor core fuel of each nuclear plant site and fuel for one substitution of each nuclear plant site

表5 各原子力発電所サイトの1炉心、1取替分の燃料と「原子力発電3」にある全ウラン装荷量

電力会社		1炉心 [tU]	1取替分 [tU]	1炉心分の燃料を1取 替分で割った値	「原子力3」の全 ウラン装荷量[t]
北海道電力	泊	100	30	3	97
東北電力	女川	260	60	4	159
東北電力	東通	130	30	4	0
東京電力	福島第一	580	150	4	576
東京電力	福島第二	520	140	4	528
東京電力	柏崎刈羽	960	250	4	960
中部電力	浜岡	570	140	4	440
北陸電力	志賀	210	50	4	63
関西電力	美浜	160	50	3	160
関西電力	高浜	290	100	3	288
関西電力	大飯	360	110	3	350
中国電力	島根	170	40	4	164
四国電力	伊方	170	60	3	168
九州電力	玄海	270	100	3	274
九州電力	川内	140	50	3	144
日本原子力発電	敦賀	140	40	4	141
日本原子力発電	東海第二	130	30	4	131

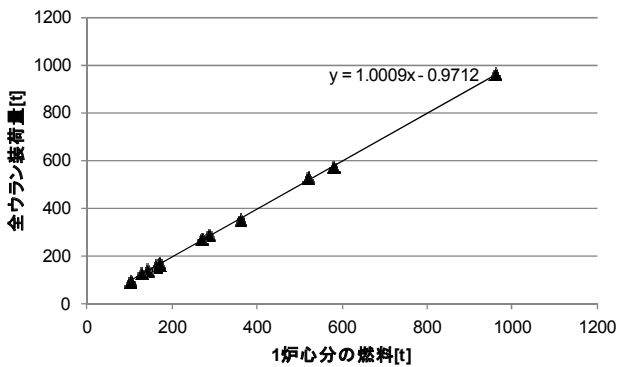


Fig. 4 The relation between the nuclear fuel of one reactor and the amount of all installed uranium fuel(—Approximation straight line,▲All amounts of uranium loadings)

図4 1炉心分の燃料と全ウラン装荷量のグラフ（—近似直線、▲全ウラン装荷量）

グラフを見ると、ほとんどy=xのグラフになっている。よって1炉心分の燃料は全ウラン装荷量に等しいことが分かった。次に、1取替分について説明する。表に1炉心分の燃料を1取替分で割った時の値がある。この値は小数点第一位を四捨五入した値なのだが、すべて3と4の値となっている。一般的に原子力発電所では燃料を1度に全部替えるのではなく、3、4回に分けてすべてを入れ替える。表の値が取替回数と合うので、1取替分は一回に取り換える発電所の燃料の量といえる。またほとんどのサイトで、PWR型の原子力発電所のサイトでは1炉心分の燃料を1取替分で割った時の値が3で、BWR型の原子力発電所のサイトでは4であった。しかし日本原子力発電敦賀ではBWR型とPWR型がそれぞれ1つあり、日本原子力発電東海第二はBWR型の東海第二原子力発電所一つのみだが、1炉心分の燃料を1取替分で割った時の値は4であった。日本原子力発電の原子力発電所に関しては、一概にPWR型では燃料を3回、BWR型では燃料を4回に分けて入れ替えるとは言えない。しかし、他の原子力発電所ではPWR型では燃料を3回、BWR型では燃料を4回に分けて入れ替えている

といえる。最終的に原子力白書の1炉心分とは発電所の炉の中にある全ウラン装荷量のこと、炉心全部の燃料であるといえる。そして、1取替分とは一年間で交換する核燃料の量のことであるといえる。ここで管理容量の定義について述べる。管理容量とは貯蔵量から1炉心分の燃料と1取替分を差し引いた値と定義されていた。1炉心分の燃料が炉心全体の燃料、1取替分が一年間で交換する核燃料の量のことであるから、管理容量はそのサイトが受け入れられる使用済み核燃料のことだといえる。ここまで管理容量の定義について述べてきたが、次に管理容量の予測法について述べる。現在の日本全体のサイトの管理容量は19240 [t]である。しかし原子力白書には将来建造される原子力発電所の管理容量は載っていない。そこで、サイトごとに1万kWの設備容量あたりの管理容量をもとめた。そしてその値を新規の原子力発電所の設備容量や建て替えたときに増加した設備容量にかけることによって、将来増設される管理容量を求めた。次の表がサイトごとの1万kWの設備容量あたりの管理容量を載せた表である。

Table 6 Managing capacity for each installed capacity for each site for 10,000kW

表6 サイトごとの1万kWの設備容量あたりの管理容量

	管理容量[t]	設備容量[万kW]	単位管理容量[t]
北海道電力泊	420	115.8	3.63
東北電力女川	790	217.4	3.63
東北電力東通	230	110	2.09
東京電力福島第一	2,100	469.6	4.47
東京電力福島第二	1,360	440	3.09
東京電力柏崎刈羽	2,910	821.2	3.54
中部電力浜岡	1,580	488.4	3.24
北陸電力志賀	690	189.8	3.64
関西電力美浜	620	166.6	3.72
関西電力高浜	1,630	339.2	4.81
関西電力大飯	1,900	471	4.03
中国電力島根	600	128	4.69
四国電力伊方	930	202.2	4.60
九州電力玄海	1,060	347.8	3.05
九州電力川内	1,140	178	6.40
日本原子力発電敦賀	860	151.7	5.67
日本原子力発電東海第二	410	110	3.73
合計	19,240	4946.7	3.89

青森県むつ市にある中間貯蔵所は5000 [t]の使用済み核燃料を保管できる施設である。この施設は2010年に3000 [t]で操業が始まる予定である[6]。残りの2000 [t]については具体的な予定がないので、その年には操業するとした。よって、2010年に5000 [t]の使用済み核燃料が保管できる。次に六ヶ所村の再処理工場の保管所だが、すでに運用が開始されている。保管容量は2817 [t][13]である。4.2.3の図5のグラフは年度ごとの使用済み核燃料の貯蔵可能積算量のグラフである。

4.2.3 使用済み核燃料の再処理量の求め方

使用済み核燃料の再処理量には、海外に委託した再処理量と青森県六ヶ所村の再処理工場での再処理量がある。日本はこれまでに海外で7140 [t][14]の使用済み核燃料を再処理した。海外再処理量の将来予測について述べる。日本は核燃料サイクルをできるだけ日本国内で達成させようとしている。その例として日本は燃料濃縮段階から核燃料サイクルを行っている。

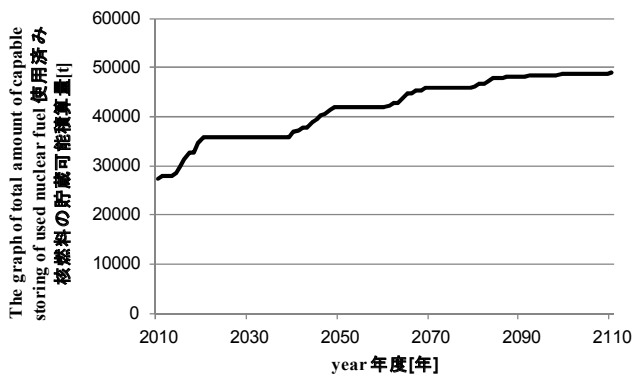


Fig. 5 The graph of total amount of capable storing of used nuclear fuel a year (— total amount of capable storing of used nuclear fuel)

図5 年度ごとの使用済み核燃料の貯蔵可能積算量のグラフ (—使用済み核燃料の貯蔵可能積算量)

よって、日本は今後海外再処理を行わないだろうと仮定した。次に国内での再処理量の予測について述べる。青森県六ヶ所村の再処理工場については2010年には操業できる予定であり、年に800[t]の使用済み核燃料を再処理する。また再処理工場にも寿命があるので今回その運転期間を原子力発電所と同じ40年と仮定した。再処理工場については建て替えをするという仮定はしなかった。

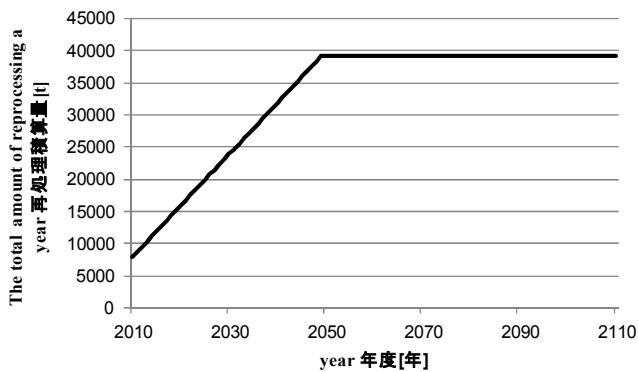


Fig. 6 The graph of total amount of reprocessing a year (—total amount of reprocessing)

図6 年度ごとの再処理積算量のグラフ (—再処理積算量)

5. 予測結果

4章で述べた結果より使用済み核燃料の予測可能性を調べた。予想使用済み核燃料の積算量は棒グラフで表して、貯蔵可能量と再処理量を合わせた積算量を折れ線グラフにした。つまり棒グラフが折れ線グラフを超えていない場合、保管と再処理がすべての使用済み核燃料になされていることになる。その結果のグラフを図7に示す。

このグラフより2052年に使用済み核燃料が貯蔵できなくなることが分かった。そこで対策を考えてみた。まず貯蔵可能量を増やすことがあげられる。しかし、貯蔵可能量を増やしただけでは、再処理されない地上に使用済み核燃料という高レベル放射性廃棄物が処分されることになる。政府は使用済み核燃料を地層処分することにして

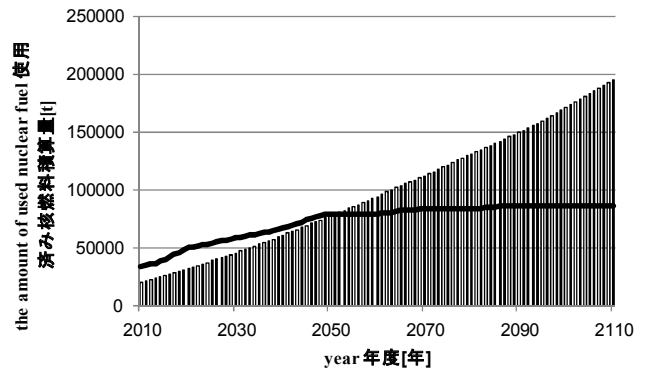


Fig. 7 The graph of the total amount of used nuclear fuel and the graph of the total amount of available storing and reprocessing (—total amount of available storing and reprocessing, ■total amount of used nuclear fuel)

図7 使用済み核燃料の積算量グラフと、貯蔵可能量と再処理量の積算量グラフ。(棒グラフ...使用済み核燃料積算量 折れ線グラフ...貯蔵可能量と再処理量の積算量)

いるので、一時しのぎ程度にしか増やせない。そこで再処理量を増やす対策が妥当だといえる。再処理量を増やす一つ目の方法は、海外再処理量を増やす方法である。しかし日本は核燃料サイクルを独自で進めることにしているので海外再処理は今後行わないとしている。二つ目は国内の再処理量を増やす方法である。国内再処理なら使用済み核燃料の量は減り、国内で行われるので今回はこれが妥当な対策だと考えた。詳しく述べると2010年に青森県六ヶ所村の年間800[t]の使用済み核燃料を再処理できる工場が動き出してから20年後に同規模の工場が1基建設されると仮定した。そして2010年に稼働した青森県六ヶ所村の工場の運転期間を40年として、運転終了後に別のもう一基の六ヶ所村の工場と同規模の工場が運転するとした。つまり日本国内で2030年から常に年1600[t]の使用済み核燃料が再処理できる体制を仮定した。その時のグラフが図8のグラフである。

グラフを見ると常に棒グラフが折れ線グラフを下回っていることが分かる。よって2030年以降から使用済み核燃料を年に1600[t]再処理することにより使用済み核燃料が貯蔵可能量に収まることが分かる。

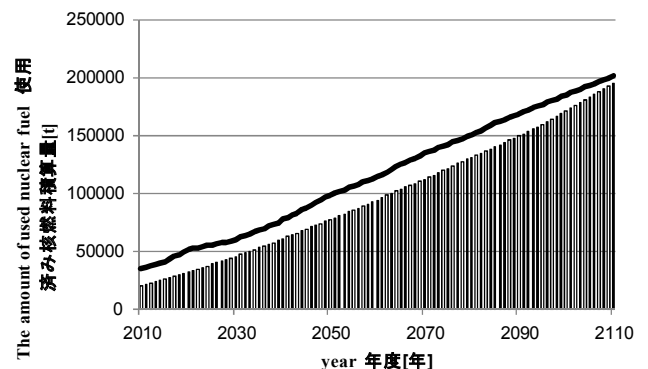


Fig. 8 The graph of the total amount of used nuclear fuel and the graph of

the total amount of available storing and total amount of reprocessing in the case of 1600[t] used nuclear fuel are reprocessed a year since 2030 in japan(■total amount of available storing and reprocessing, ■total amount of used nuclear fuel)

図8 日本で2030年から年間1600[t]の使用済み核燃料が再処理された時の使用済み核燃料の積算量グラフと、貯蔵可能量と再処理量の積算量グラフ。(棒グラフ...使用済み核燃料積算量 折れ線グラフ...貯蔵可能量と再処理量の積算量)

6. 結論

予測結果の章で青森県六ヶ所村の再処理工場のみでは、使用済み核燃料が保管しきれなくなり2030年以降から使用済み核燃料の再処理量を2倍の1600[t]にすることによって貯蔵可能量に収まることが分かる。しかし、高レベル放射性廃棄物である使用済み核燃料が地上の施設に貯蔵されることになる。図9のグラフは対策した場合の再処理されないで保管される使用済み核燃料のグラフである。

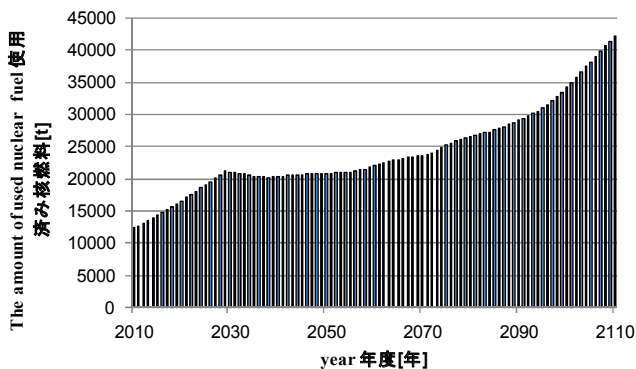


Fig. 9 The graph of the total amount of used nuclear fuel which are not reprocessed(■ total amount of used nuclear fuel)

図9 再処理されない使用済み核燃料の積算量グラフ (棒グラフ...使用済み核燃料の積算量)

つまりグラフにある使用済み核燃料が地上の施設に保管されることになる。使用済み核燃料には高レベル放射性廃棄物が含まれている。すると近い将来で考えると高レベル放射性廃棄物が地上で保管されることになる。高レベル放射性廃棄物を地層処分する方針であれば、青森県六ヶ所村の再処理工場と同規模の工場を2基にしても足りない。地上に使用済み核燃料という高レベル放射性廃棄物をなくすためには、今回の対策案である1年に使用済み核燃料1600[t]を再処理できる体制以上に再処理量を増やす必要がある。4.2.1で示した原子力発電所の設備容量の予測で、2009年現在までに建設が予定されている原子力発電所のみしか新規建設しない場合、2080年代には設備容量が0になってしまう。つまり、原子力発電反対運動が起こらずともいずれ原子力発電所はなくなってしまいます。しかし日本で、原子力発電はベース電源として2006年現在30.5% [15]の発電割合を占めているため、今の水準以上に発電割合が保たれると考えられる。その理由として、原子力発電所は二酸化炭素の排出量が主要な発電方法である火力発電よりも少ないことが挙げられる。二酸化炭素の排出を抑えるた

めには原子力発電所の発電割合を減らせないからだ。使用済み核燃料の処理に問題があるといえるが、対策を施して原子力発電の設備容量を着実に増やしていくことが必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、文部科学省、日本原子力文化振興財団、日本原子力産業協会、日本原子力研究開発機構(JAEA)東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所の虎田真一郎氏、東京大学の長崎晋也教授、京都大学原子炉実験所の山名元教授にお世話になりました。

また原子力人材育成事業の運営にあたり、本校の自然科学科の松澤孝男先生、機械システム工学科の富永学先生、池田耕先生にもお世話になりました。以上の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 松沢ほか、身のまわりの放射線の測定の試行、茨城工業高等専門学校研究彙報第42号(平成19年) pp.45-52.
- [2] 松沢ほか、原子炉の寿命を考慮した原子力発電の設備容量の将来予測と原子炉建て替えの試算、茨城工業高等専門学校研究彙報第43号(平成20年) pp.23-34.
- [3] 都甲泰正・岡芳明、「大学講義シリーズ 原子工学概論」コロナ社(1987).
- [4] 経済産業省資源エネルギー庁編集、原子力2007、(財)日本原子力文化振興財団
- [5] 「原子力の基礎講座 3.原子力発電所」、(財)日本原子力文化振興財団
- [6] 「平成19年度版 原子力白書」、原子力委員会
- [7] 経済産業省資源エネルギー庁編集、原子力2008、(財)日本原子力文化振興財団 p.47
- [8] 平成20年度版 原子力白書、原子力委員会 p.93
- [9] 「原子力の基礎講座 3.原子力発電所」、(財)日本原子力文化振興財団 pp.120-143
- [10] 経済産業省資源エネルギー庁編集、原子力2009、(財)日本原子力文化振興財団 p.136
- [11] 平成20年度版 原子力白書、原子力委員会 p.83
- [12] 平成20年度版 原子力白書、原子力委員会 p.94
- [13] 平成20年度版 原子力白書、原子力委員会 p.95
- [14] 海外再処理について
- [15] 経済産業省資源エネルギー庁編集、原子力2008、(財)日本原子力文化振興財団 p.11

学生による原子炉シミュレーターの試作 (PWR)

松田 理絵, 川上 悠里, 森脇 滉, 斉藤 慶太, 矢野倉 伊織, 八重樫 拓也, 松澤 孝男

Trial product of reactor simulator made by students (PWR)

Rie MATSUDA, Yuri KAWAKAMI, Akira MORIWAKI, Keita SAITO, Iori YANOKURA, Takuya YAEGASHI and Takao MATSUZAWA

Abstract: We answered a challenged to design a program that can estimate various parameters concerning a typical nuclear power plant: From thermal power, reactor type(PWR / BWR), and frequency of alternating current power. Simple calculation was an easy way to find tendencies and rules of all data. In analysis process, we find some tendencies in which a parameter has direct connection with thermal power, or, it has a connection with another factor, besides thermal power.

1. はじめに

原子炉・原子力エネルギーに関する学習として、様々な関連施設や、専門家の方を招いて幅広いお話を伺ったりするなどの活動をしてきた。しかし、それだけでは理解できないことも多かった。そこで、定量的に原子炉および原子力発電プラントへの理解をより深くするために、公表されているデータだけを用いて数値相互の因果関係を解説（学習）し自分たちで簡単な発電プラントの設計をするようなプログラムを書くことができればと思い、製作に挑戦した。

世界の発電用原子炉

現在世界で稼働中の原子力発電プラントは、表 1、表 2 のように、設備容量で言ってもまた原子炉基数で言っても、加圧水型軽水炉 (PWR)、沸騰水型軽水炉 (BWR) の 2 種類の原子炉だけで世界の原子力開発プラントの約 80% を超える。世界的には加圧水型軽水炉 (PWR) が多くの割合を占めている。さらに、重水炉 (HWR)、軽水炉冷却黒鉛減速炉 (LWGR) まで加えれば設備容量で言っても、また原子炉基数で言っても 95% を超える[1]。

表 3、表 4 から日本の場合には PWR と BWR のみで、しかも沸騰水型軽水炉 (BWR) が半数以上である[1]。

Table 1 Generating Capacity of Nuclear Power Plants in the World in operation by Reactor Type. As of January 1. 2009.

表 1 炉型別の世界の原子力発電設備容量 (運転中)
(グロス電気出力, 2009 年 1 月 1 日現在 [1])

	電気出力 (10MWe)	割合 (%)	累計 (%)
加圧水型軽水炉 PWR	25559.0	65.46	65.46
沸騰水型軽水炉 BWR	8704.8	22.29	87.7
重水炉 HWR	2385.9	6.11	93.86

軽水冷却黒鉛減速炉 LWGR	1250.0	3.20	97.06
ガス炉 GR	170.2	2.74	99.80
高速炉 FR	74.0	0.19	100.0
合計	39044.4	100.0	

Table 2 Number of Nuclear Power Plants in the World in operation by Reactor Type. As of January 1. 2009.

表 2 炉型別の世界の原子力発電設備 (運転中)
(原子炉基数, 2009 年 1 月 1 日現在 [1])

	基数(基)	割合(%)	累計(%)
加圧水型軽水炉 PWR	264	61.11	61.11
沸騰水型軽水炉 BWR	92	21.29	82.40
重水炉 HWR	44	10.19	92.59
軽水冷却黒鉛減速炉 LWGR	12	2.78	95.37
ガス炉 GR	18	4.17	99.54
高速炉 FR	2	0.46	100.0
合計	432	100.0	

Table 3 Generating Capacity of Nuclear Power Plants in Japan in operation by Reactor Type. As of January 1. 2009.

表 3 炉型別の日本の原子力発電設備容量 (運転中)
(グロス電気出力, 2009 年 1 月 1 日現在 [1])

	電気出力 (10MWe)	割合 (%)	累計 (%)
加圧水型軽水炉 PWR	1936.6	40.40	40.40
沸騰水型軽水炉 BWR	2856.9	59.60	100.0
合計	7493.5	100.0	

Table 4 Number of Nuclear Power Plants in Japan in operation by Reactor Type. As of January 1, 2009.

表4 炉型別の日本の原子力発電設備 (運転中)
(原子炉基数, 2009年1月1日現在[1])

	基数 (基)	割合(%)	累計(%)
加圧水型軽水炉 PWR	23	43.40	43.40
沸騰水型軽水炉 BWR	30	56.60	100.0
合計	53	100.0	

以下の各パラメータについて熱出力との関係を求めた。

「3 原子力発電」付表2[2]

設置者名/発電所名/所在地/炉型/認可出力/電調審決定年月日/原子炉設置認可年月日/着工年月日/運転開始年月日/建設費/主契約者/機器国産比率

「3 原子力発電」付表4 (PWR) [2]

- (a) 炉型式, 熱出力, 電気出力
炉心
冷却材 (圧力, 温度, 流量), 主要寸法, 全ウラン装荷量, 減速材対燃料体積比, 平均熱流速
- (b) 燃料体
燃料の種類, ペレット (直径, 長さ), U-235 濃縮度, 最大線出力密度, 被覆材 (材質, 外形厚さ, 表面最高温度)
- (c) 燃料体
燃料集合体 (個数, 燃料要素配列, 燃料要素数, 燃料棒有効長さ, 燃料集合体全長, 燃料最高温度)
制御棒 (形式, 個数, 吸収材の材質)
- (d) 原子炉圧力容器
設計圧力, 設計温度, 圧力容器重量, 主要寸法, ASME CODE, 原子炉冷却系統設備, 冷却材ポンプ (型式, 容積), 加圧器 (型式, 容積)
- (e) 原子炉冷却系統設備
蒸気発生器 (形式, 個数, 設計圧力, 伝熱管本数, 材質, 主要寸法)
- (f) タービン発電機設備関係
蒸気タービン (型式, 出力, 回転数, タービン入口蒸気圧力, タービン入口温度, 蒸気流量)
発電機 (型式, 容積, 回転数)
- (g) 格納容器
形式, 設計圧力, 設計温度, 主要寸法, 漏洩率

「3 原子力発電」付表5 (BWR) [2]

- (a) 炉型式, 熱出力, 電気出力
炉心
冷却材 (圧力, 温度, 流量), 主要寸法, 全ウラン装荷量, 減速材対燃料体積比, 平均熱流速

- (b) 燃料体
燃料の種類, ペレット (直径, 長さ), U-235 濃縮度, 平均燃焼度, 最大線出力密度, 被覆材 (材質, 外形厚さ, 表面最高温度)
- (c) 燃料体
燃料集合体 (個数, 燃料要素配列, 燃料要素数, 燃料棒有効長さ, 燃料集合体全長, 燃料最高温度)
制御棒 (形式, 個数, 吸収材の材質)
原子炉圧力容器
設計圧力, 設計温度
- (d) 原子炉圧力容器
圧力容器重量, 主要寸法, ASME CODE, 冷却系統設備
原子炉冷却系統設備
冷却材ポンプ (型式, 容積), 再循環ポンプ (型式, 容積)
- (e) タービン発電機設備関係
蒸気タービン (型式, 出力, 回転数, タービン入口蒸気圧力, タービン入口温度, 蒸気流量)
発電機 (型式, 容積, 回転数)
- (f) 格納容器
形式, 設計圧力, 設計温度, 主要寸法, 漏洩率

2. 解析方法

第1段階 平均・標準偏差・変動率

現在日本で稼動している加圧水型原子炉 (PWR) および沸騰水型原子炉 (BWR) の原子力発電所の発電プラントの設計パラメータの公開数値データを解説し, その規則性を探り, 任意の出力の原子力発電プラントの設計パラメータ (原子炉諸元) を推定できるようにすることを目指した。

解析に用いた基礎数値データは, 原子力文化振興財団刊の原子力基礎講座全10巻の第3分冊「原子力発電」(平成8年3月(改定第5版))[2]の巻末付表2, 4, 5とした。この付表は一部, 通産省刊「原子力発電便覧」'95を参照しており, 1995年(平成7年)12月末現在のデータである。

共同作業のデータ解析にあたり, 扱うデータ群の範囲および単位を明確にしておくことはデータ量の多さ以上に重要であると考えたからである。単位はあえてSIには統一(変換)せず, 典拠の表に出ている数値・単位はそのまま使用した。単位変換作業に伴うミス, 作業者同士の連絡の不徹底に伴うデータと数値の取り違いを防ぐためである。前年の作業では, cgs系とMKS系の変換で1000倍のミスをしたのを見逃し, 大恥をかいているからである。

改良型原子炉 APWR, ABWRについては他のデータ類から収集した。

PWR, BWRの発電プラントについては, 「原子力発電」[2]

の付表を参考に、国内の全て原子力発電プラントのパラメータと熱出力との相関関係を調べる。その中で、熱出力との相関関係が弱いと判断できたものについては、どのような規則性の下でその値が算出されているのかを考えた。

この時、近似式は直線回帰を原則とする。近似式と共に決定係数の二乗 (R^2) も算出することにする。直線回帰のままだと決定係数が小さい値にしかならないことがあるが、近似式の次数を高くしてしまうと、データが存在する出力は正確な値を算出することができるが、データ群から外れた出力や、データとデータの間の出力に対するそれぞれのパラメータの値を算出しようとすると、妥当とは言えないであろう数値が算出されてしまうためである。

また、この解析の際に用いるのは表計算ソフト Excel とした。その理由は、自力で計算プログラムを組むよりも遥かに容易で、且つ、データに対して多様な処理を行えるからである。以下、本稿では PWR を中心に報告する。

3. 解析結果・考察

3. 1 第1段階 平均・標準偏差・変動率

Table 5 Average, Standard deviation, and Volatility of nuclear reactor parameters (PWR)

表5 原子炉パラメータの平均・標準偏差・変動率 (PWR)

パラメータ		平均	標準偏差	変動率
熱出力[MW]		2476.870	788.350	0.318
電気出力[MW]		842.000	270.434	0.321
炉心	冷却材圧力 [kg/cm ² g],定数	157.000	0.000	0.000
	冷却材温度入口 [°C]	287.652	2.014	0.007
	冷却材温度出口 [°C]	322.783	2.044	0.006
	冷却材流量 [10 ³ t/hr]	44.317	12.731	0.287
	主要寸法/炉心有効高さ[m]	3.632	0.127	0.035
	主要寸法/炉心等価直径[m]	2.942	0.384	0.1305
	減速材対燃料体積比	3.424	0.085	0.025
	全ウラン装荷量 [t]	68.261	17.22	0.252
	平均熱流速 [kcal/m ² h]	504130.435	28068.592	0.056
	ペレット直径 [mm]	8.716	0.562	0.064
ペレット長さ [mm]	10.726	0.852	0.079	
燃料体	U - 235 濃縮度 初装荷炉心[%]	2.956	0.344	0.116
	U - 235 濃縮度 取替炉心[%]	3.691	0.345	0.093
	平均燃焼度/初装荷炉心 [GWD/tU]	25.77	3.706	0.144
	平均燃焼度/平衡炉心 [GWD/tU]	35.600	4.695	0.132
	最大線出力密度 [kW/m]	45.731	7.380	0.161
	被覆材/外径 [mm]	10.083	0.623	0.062
	被覆材/厚さ [mm]	0.594	0.026	0.044
	被覆材/表面最高温度[°C]	343.739	12.552	0.037
	燃料集合体/個数[個],整数	155.435	29.683	0.191
	燃料集合体/燃料要素配列	244.261	44.768	0.183
	燃料集合体/燃料要素数[本]	36228.696	12440.369	0.343
	燃料棒有効長さ [m]	3.633	0.127	0.035
	燃料集合体/燃料集合体全長 [m]	4.068	0.125	0.031
	燃料集合体/燃料最高温度[°C]	1872.174	90.099	0.048
	制御棒	制御棒/個数 [個],整数	43.182	11.578
原子炉圧力容器	設計圧力 [kg/cm ² g],定数	175.000	0.000	0.000
	設計温度[°C],定数	343.000	0.000	0.000
	圧力容器重量[t]	316.435	69.209	0.219
	主要寸法/全高 [m]	12.239	0.795	0.065
	主要寸法/内径 [m]	3.892	0.437	0.112
原子炉冷却系統設備	冷却材(またはポンプ)/容量 [t/h]	19960.87	866.638	0.044
	加圧器/容量 [t/h]	38.426	9.616	0.25

原子炉冷却系統設備	蒸気発生器/個数[個],整数	2.957	0.825	0.279
	蒸気発生器/設計圧力/胴側 [kg/cm ² g]	78.339	3.300	0.042
	蒸気発生器/設計圧力/管側 [kg/cm ² g],定数	175.000	0.000	0.000
	蒸気発生器/伝熱管本数[本/管]	3423.652	220.034	0.064
	蒸気発生器/主要寸法/全高 [m]	20.439	1.323	0.065
	蒸気発生器/伝熱管外径[mm]	22.063	0.657	0.030
	蒸気発生器/伝熱管内厚[mm]	1.279	0.032	0.025
タービン発電機設備関係	蒸気タービン/出力[MW]	842.043	270.388	0.321
	蒸気タービン/回転数[rpm],	1773.913	86.431	0.049
	タービン入口蒸気圧力[kg/cm ² g]	56.100	2.909	0.052
	蒸気タービン入口温度[°C]	271.022	3.275	0.012
	蒸気タービン/蒸気流量[t/h]	4757.043	1497.438	0.315
	発電機/容量 [kVA]	940608.700	294586.000	0.313
	回転数[rpm],	1773.913	86.431	0.049
格納容器	設計圧力(内圧) [kg/cm ² g]	2.643	0.871	0.330
	設計温度[°C]	133.043	9.354	0.070
	主要寸法/全高 [m]	69.891	9.477	0.136
	主要寸法/中心線内径[m]	38.391	4.271	0.111
	漏えい率[%],定数	0.100	0.000	0.000

圧力の単位[kg/cm²g]中の g は質量の[g]ではなく、ゲージ圧を示す「g」である。

表5を作成した段階では、それぞれのパラメータの持つ意味が分からないものばかりだったので、すべてのパラメータの平均値、標準偏差、変動率(=標準偏差/平均)をとり、その変動率で変数を分類した。その変動率の分布を示したのが図1である。

変動率で分類した PWR の変数の内訳は、

(1) 数値データ

変動率 0%: (日本の PWR では固定値) 5 項目
 変動率<2%: 3 項目 ここまでを便宜的に定数とみなす。

変動率<10%: 23 項目

変動率<20%: 10 項目

変動率>20%: 18 項目+6 項目 (付表2)

(2) 文字データ

定数: 8 項目

変数: 5 項目+1 項目 (付表2)

これより、変動率[0%]のもの、 $0 < x \leq 20[\%]$ のもの、 $20 \leq x[\%]$ のものに分類できるのではないかとみた。

変動率とパラメータを見ていくと、20[%]以上のものに関しては、熱出力との関連性がみられるのではないかと推測できるものだった。

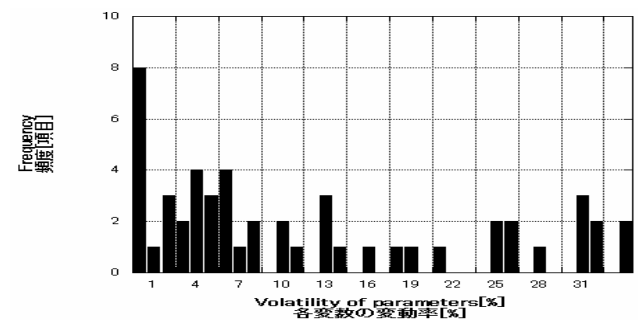


Fig. 1 Frequency vs. Volatility of parameters

図1 頻度对各変数の変動率

3. 2 第2段階 各パラメータと熱出力との原理的考察からの直線関係

原子炉の各パラメータの解析結果は、以下のように3つの傾向にまとめられることが分かった。

1. 出力との相関関係が強いもの
2. 熱出力との直線関係はあるが、他の要素も絡んできているもの
3. 熱出力との直線関係が弱いもの

以下で、それぞれの傾向が特に強く現れたものをいくつか挙げてみる。

3-2-1. 熱出力との直線関係が強いもの

(1) 電気出力, generating power

図2は、電気出力と熱出力の関係を示したグラフである。

電気出力は熱出力に比例するが、発生した「熱」のすべてが「電気」に変わるわけではないという、発電効率との関係があることを改めて確認する。

図 3 は、各炉の電気出力[MWe]を熱出力[MWt]で割ることで算出した発電効率である。この発電効率の平均値は 33.98[%]であった。標準偏差は 0.65[%]である。よって、変動率は 1.91[%]であった。図 2 より、熱出力は熱出力[MWe]にほぼ比例する。そして、図 3 で発電効率は一定であるので図 2 と図 3 は矛盾しない。

図 4,図 5 は熱出力をさらにグロス出力とネット出力で描画したものである。グロス出力からネット出力を引いた値を、さらに熱出力に対してどれだけの割合であるかというものを示したのが図 6 である。前述のように、グロス出力とネット出力の差はほぼ一定で推移するが、図 6 によるとその値は、熱出力が大きくなるほどに割合は小さくなっているのが分かる。ただし、傾向としては熱出力に比例して自家消費電力が小さくなっていることは読み取れるが、ばらつきは大きい。

また、この発電効率の上限はカルノーサイクル (式 1) によって理論的に説明される。計算上、軽水炉 (出口温度約 300[°C]) では熱効率は約 48[%]である[3]。しかし、理論上の値と実際に運用した場合の値は必ずしも一致するとは限らない。様々な環境要因が重なり、理論値よりも効率が落ちる結果になっていると思われる (図 8 参照)。図 8 のいくつかの●印は実際の PWR における発電効率の値である[2]。

$$\eta_c = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \dots (式 1)$$

- η_c : カルノーサイクルの熱効率
- T_1 : 高温側 : 出口温度[K]
- T_2 : 低温側 : 海水温度 (約 300[K] = 27[°C])

図 8 はカルノーサイクルの熱効率の式 1 に T_2 の値を変化させて (300[K], 325[K], 350[K], 375[K]) 代入した際の熱効率の上限の理論値である。

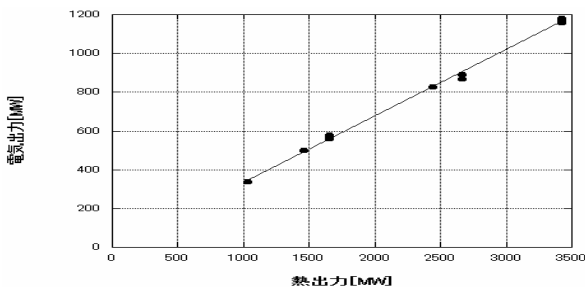


Fig. 2 Generated Electric power vs thermal power (PWR)

図 2 電気出力対熱出力 (PWR)

$$y = 0.3425x - 6.3417 \quad (x:[MWt], y:[MWe])$$

決定係数 R^2 (以下 R^2 とする) : 0.9968

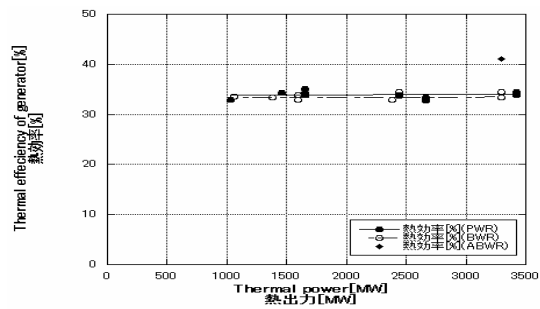


Fig. 3 Thermal Efficiency of Generator vs. thermal power (PWR/BWR/ABWR) (Gross)

図 3 発電効率対熱出力 (PWR/BWR/ABWR) (発電端)

- PWR : $y = -0.00008x + 34.24 \quad R^2: 0.0097$
- BWR : $y = 0.0006x + 32.327 \quad R^2: 0.0548$
- ◆ : ABWR の値

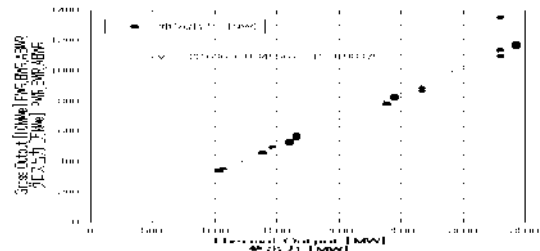


Fig. 4 Generated Electric power vs thermal power (PWR/BWR/ABWR)

図 4 グロス出力対熱出力 (PWR/BWR/ABWR)

$$y = 0.34956x - 22.686 \quad R^2: 0.98379$$

- : PWR, BWR
- : ABWR の値

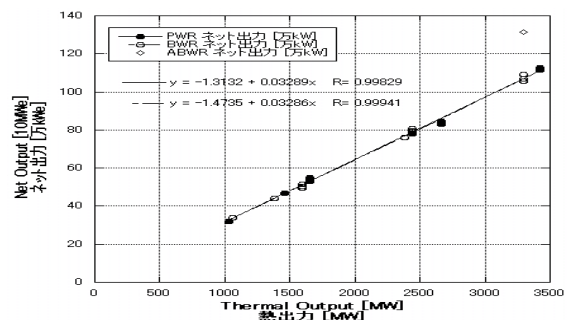


Fig. 5 Generated Electric power vs thermal power (PWR/BWR/ABWR)

図 5 ネット出力対熱出力 (PWR/BWR/ABWR)

- PWR : $y = 0.03289x - 1.3132 \quad R^2: 0.99829$
- BWR : $y = 0.03286x - 1.4735 \quad R^2: 0.99941$
- ◇ABWR の値

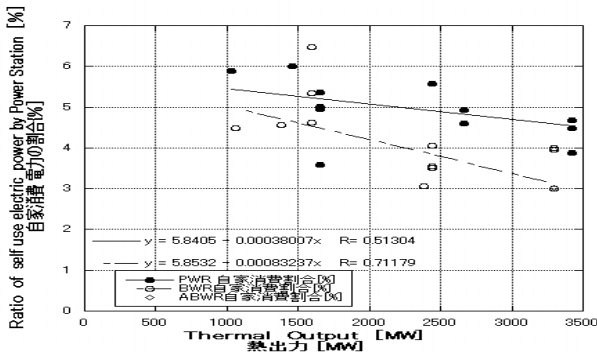


Fig. 6 Self Expenditure of electricity vs. thermal power (PWR/BWR/ABWR)

図6 自家消費電力割合対熱出力 (PWR/BWR/ABWR)

●PWR : $y = 0.00038007x + 5.8405$ $R^2 : 0.51304$
 ○BWR : $y = 0.00083237x + 5.8532$ $R^2 : 0.71179$

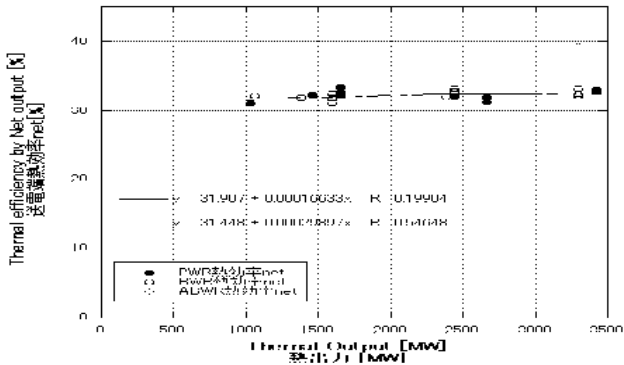


Fig. 7 Thermal Efficiency of Generator vs. thermal power (PWR/BWR/ABWR) (Net)

図7 発電熱効率 (ネット) 対熱出力 (PWR/BWR/ABWR)

●PWR : $y = 0.00016633x + 31.907$ $R^2 : 0.19904$
 ○BWR : $y = 0.00029897x + 31.448$ $R^2 : 0.54648$

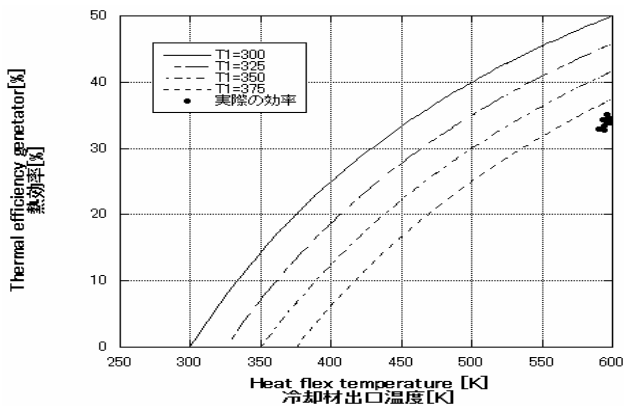


Fig. 8 Thermal Efficiency of Generator vs. thermal power by Carnot Cycle (PWR/BWR/ABWR)

図8 熱効率対冷却材出口温度 (カルノーサイクル理論値) (PWR/BWR/ABWR)

図3と図7はPWRとBWRの熱効率を示したものである。こうしてみると、どちらも熱出力に熱効率は関わらないということが分かる。図3,4,5と図7のBWRのデータで1つだけ外れた点(値)があるが、それはBWRの改良型である改良加圧水型軽水炉(ABWR)のデータである。BWRだけに限定すれば図3の発電効率と同じになる。ABWRは従来のPWR、BWRより明らかに熱効率が良くなっていることが図3, 4, 5, 7, から読み取れる。

蒸気タービンでのランキンサイクルの理論熱効率

カルノーサイクルでは湿り蒸気からの断熱圧縮という実現困難な部分が存在する。ランキンサイクルはその部分を除いている[5]。例えば、

- ①蒸気タービンから排気を復水して飽和水にする。
 - ②給水ポンプでその水を断熱圧縮する。
 - ③等圧のまま蒸気タービン入口温度に達するまで加熱する。
- といった過程を繰り返している。今回は、原子力発電所での蒸気タービンの効率をランキンサイクルで示してみる。そのためにいくつかの仮定を行う。

- ①復水した後の飽和水の温度を 20[°C]、圧力を 1[atm] (大気圧) とする。
- ②吸水ポンプで BWR では 67[atm]、PWR では 58[atm] に加圧するとする。
- ③蒸気タービンの入口温度を BWR では 283[°C]、PWR では 273[°C] とする。

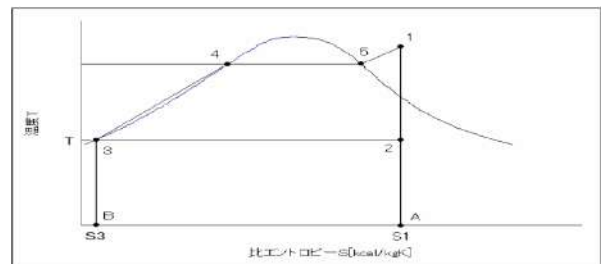


Fig. 9 T-S Curve of Rankine Cycle
 図9 ランキンサイクル概略図 (T-s 線図)

これから効率を求める。

最初に BWR の場合を考える。このランキンサイクル全体に投入する熱量を Q_1 、放熱量を Q_2 、蒸気タービン入口 (図6の点1の状態) での比エンタルピーを h_1 、比エントロピーを S_1 、給水ポンプ (図の点3の状態) での比エンタルピーを h_3 、比エントロピーを S_3 とする。以下の関係が成り立つ。

$$q_1 = h_1 - h_3$$

$$\Delta S = S_1 - S_3$$

$$q_2 = T \Delta S \quad (\text{ここでの } T \text{ は } 20[^\circ\text{C}] = 293[\text{K}])$$

$$\eta = (q_1 - q_2) / q_1$$

ここで q_1 は図の面積 1AB345 を示し, q_2 は図の面積 2AB3 を示している。つまり面積が熱量を表している。 $q_1 = h_1 - h_3 =$ 面積 1AB345 という関係がある。

後はこれに分かっているデータと蒸気表[6] (日本機学会: 蒸気表 1968 丸善) に基づき, h_1, h_3, S_1, S_3 を代入し計算した。まず, 蒸気表で 67[atm] (BWR のタービン入口の蒸気圧力) でのデータを探す。もしも無い場合はその間のデータから推定する。そこから, 20[°C], 283[°C]での比エンタルピー h_3, h_1 を q_1 の式に代入すると, $q_1=2687$ [kJ/kg]を得た。

また, 蒸気タービン入口とそこからの排気では比エントロピー S は等しいので, S_1 は圧力 67[atm], 温度 283[°C]での値を用いた。 S_3 は圧力 1[atm], 温度 20[°C]での値を用いて計算すると, $\Delta S=5.55$ [kJ/kgK]を得た。これから, $q_2=1627$ [kJ/kg]が求められ, その効率は $\eta = (2687 - 1627) / 2687 = 0.394 = 39.4$ [%] という結果になる。

これは PWR に関しても圧力・温度を変えれば, 同様に求められる。その結果 PWR での効率は 38.9%という結果となった。

ここで注意して頂きたいのは, 蒸気タービン内での効率を示しているのであって, この結果だけではどちらの炉型の方が効率が良いとは言えない。

(2) 冷却材流量, flow rate of coolant

冷却材とは, 原子炉中で起こる核分裂による熱を吸収し, 炉の熱を冷ます (炉心熔融を防ぐ) 役割を果たす流体のことである。

図 10 と上記の説明から分かるように, 炉の温度が高くなれば, それに伴って冷却材は多く必要とされる。

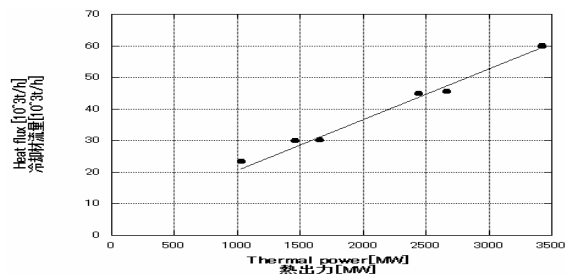


Fig. 10 Heat Flux vs. thermal power (PWR)

図 10 冷却材流量対熱出力 (PWR)

(直線近似より階段関数のほうがよく合いそうである)

$$y = 0.0161x + 4.5026 \quad R^2 : 0.98161$$

(3) 全ウラン装荷量, total Uranium charge

軽水炉の燃料はウランである。よって, より多くの熱出力を得ようとすれば, 必然的にウランの量も多くなる。

だが, そのウラン (U-235) の濃縮度が高ければ, 必要量および将来の使用済み燃料の量は少なくなると考えた。

濃縮度 (U-235) \times 全ウラン装荷量 \propto 熱出力ではないかと予想して, 計算を行ってみたがほぼ図 11 と同じような結果になった。

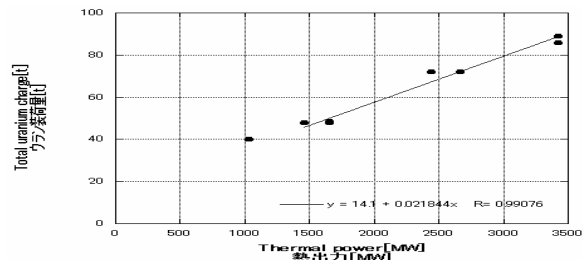


Fig. 11 Total uranium charge vs. thermal power (PWR)

図 11 全ウラン装荷量対熱出力 (PWR)

(直線近似より階段関数のほうがよく合いそうである)

$$y = 0.0216x + 14.654 \quad R^2 : 0.9817$$

(4) 平均熱流束, mean heat flux

平均熱流速は $1[h] \cdot 1[m^2]$ 当たりの熱量である。美浜 1 号 (熱出力 1031[MW]) はあまりに型が古く, このグラフ上では意味をなさない値であろうということこの炉についてはプロットのみで, 直線近似の範囲には含めなかった。その上でグラフを見てみると, ほぼ一定になっているのが分かる。

また, このパラメータは後述する面積出力密度 q'' と同義である。[kcal/m²]と [W/m²h]は一見単位が違っているが, 単位換算するとどちらも同じ次元になる。限界熱流束[7]との比較で重要な量である。

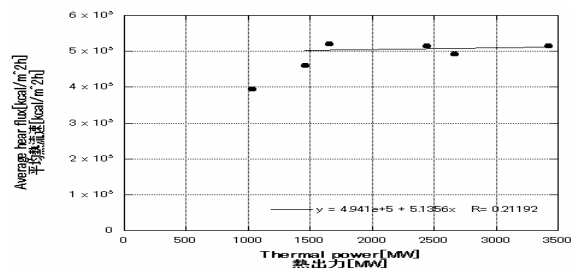


Fig. 12 Average heat flux vs. thermal power (PWR)

図 12 平均熱流速対熱出力 (PWR)

$$y = 4.941 \times 10^5 + 5.1356x \quad R^2 : 0.04491$$

(4) 冷却材入り口温度, inlet and outlet temperature of coolant

炉を冷やすための冷却材の温度は, ほぼ一定であることが図 13 より分かる。ただし, 熱出力が大きくなれば取

り出される熱も大きくなってしまいます。よって、冷却材の流量を増やすという方法をとっている。(図 10 も併せて参照)

図 14 は、熱出力と炉心の有効高さ、炉心の等価直径の関係を表している。

炉心の高さは、3.66[m]と一定である。ただし、熱出力 1000[MW]付近の一つ 3.66[m]から外れた高さがあるが、これは美浜 1 号のもので、初期に建設されたものであるから、無視して考える。

炉心有効高さ 3.66[m]は中途半端な数字に見えるが、日本が原子炉建設の手本とした欧米では、3.66[m]=12[feet]である。よって、この数字は単に手本にした国のものをそのままメートル単位に直しただけのものである。

また、炉心の高さを変えないということは、直径を大きくしていかないことには、装荷できるウラン量を増やせないのだから、極端に大きな熱出力を得ることはできない。高さを出力に応じて高くできないのは、燃料集合体の交換作業の利便性と、炉心設計の単純化(合理化)のためではないかと思う。

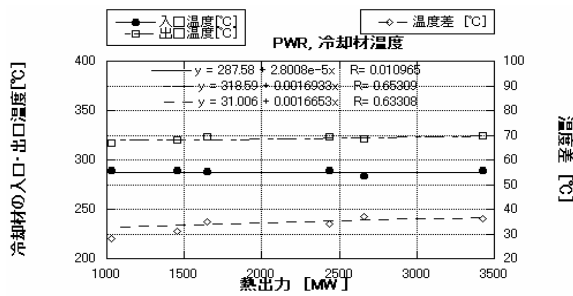


Fig. 13 Inlet and outlet temperature of coolant vs. thermal power (PWR)

図 13 冷却材出入口温度/出入口温度差対熱出力 (PWR)

入口温度: $y=287.58+2.8008e-5x$ $R^2 : 0.010965$

出口温度: $y=318.59+0.0016933x$ $R^2 : 0.65309$

温度差: $y=31.006+0.0016653x$ $R^2 : 0.63308$

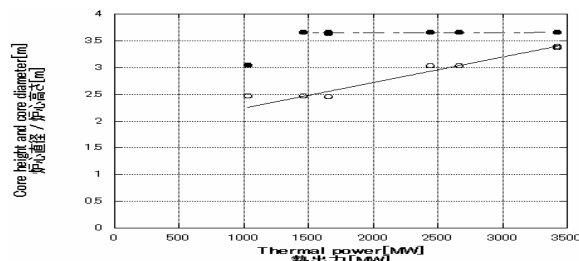


Fig. 14 Core height and core diameter vs. thermal power (PWR)

図 14 炉心有効高さ/炉心等価直径対熱出力 (PWR)

● 炉心有効高さ : $y = 3.6503$ $R^2 = 0.1526$

○ 炉心等価直径 : $y = 0.0005x + 1.76$ $R^2 : 0.9578$

(6) 面積出力密度, surface density of power
被覆材の温度制限[6]

熱出力をペレット直径を使用した側面積と被覆管直径を使用した側面積で割って、それぞれ面出力密度 q'' を求めた (図 15)。それらに相当するのが平均熱流速であるので、比較した。平均熱流速は被覆管の直径を使用して算出した出力密度とほぼ同一となることが分かった。

熱的制限は、第 1 に燃料中心温度が UO_2 の融点を超えないことである。この制限は、線出力密度の限界として表される。

$q''(r) < q''_{max} \sim 660$ [W/cm²]=66[kW/m²]: UO_2 の燃料要素。

第 2 の制限は、被覆表面熱流束がいつも核沸騰限界 (DNB) 以下にすることである。すなわち、

$q''(r) < q''_{DNB} \sim 300$ [W/cm²] 以下にすることである。

これら工学的要請を示したのが、「出力密度限界値」 [7] である。

予想では、限界値はある程度平均熱流速に近い値になると思っていたが、実際は図 15 のように平均熱流速と出力密度限界値では約 6 倍の開きがあり、安全面に配慮した設計になっていることが分かった。

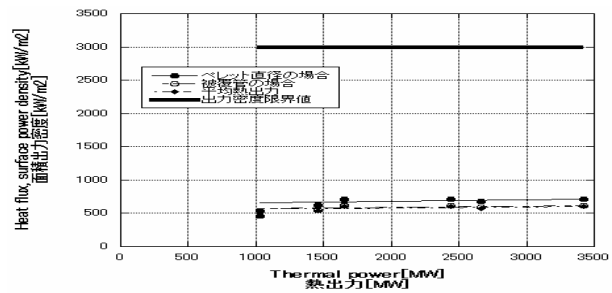


Fig 15 Heat flux, surface power density vs. thermal power (PWR)

図 15 面出力密度 (平均熱流速) 対熱出力 (PWR)

ペレット直径 : $y = 639.23 + 0.022638x$ $R^2 : 0.19164$

被覆管 : $y = 556.67 + 0.017858x$ $R^2 : 0.16044$

平均熱出力 : $y = 550.69 + 0.015125x$ $R^2 : 0.13259$

(4) 濃縮度相対位置, distribution of enrichment of fuel pellet in the reactor

図 16 は炉心内を中心・中・外に 3 分割した時の、初装荷ウランの濃縮度の分布である。PWR についてのグラフなので 14×14, 15×15, 17×17 の 3 種類の配列方法があるが、いずれにしても中心の濃縮度が一番低く、外側が一番高いことが分かる。

炉心寿命初期には、平坦な出力分布を得るためにこのような濃縮度の分布を意図的に与えているらしい。取替炉心の濃縮度は初装荷炉心の外側 (一番濃縮度の高いもの) とほぼ同じ値である。燃料交換の際、外側の燃料は徐々に内側に移行され (シャフリング) 炉心の出力は平

坦になるよう配慮されていることがわかる。(B~U)

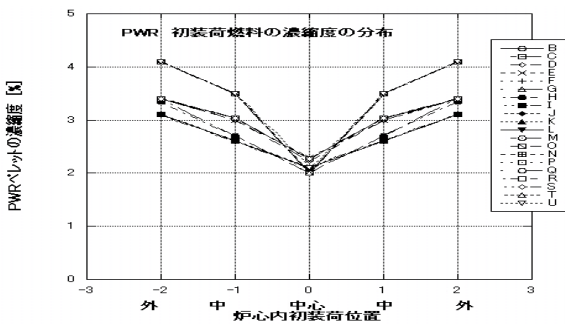


Fig. 16 distribution of enrichment in the reactor
図 16 濃縮対濃縮度相対位置(PWR) (横軸は任意目盛)

(5) タービン蒸気流量, Steam flux for turbo generator

熱出力が上がれば、それに伴って炉の温度も上がる。ただし、上げたままにすると燃料溶融を起こすので、冷却材が多く必要となる。蒸気も多く発生する(図 17)。図 13 でも述べたが、熱出力がかわっても冷却材の温度はほとんど変化させない設計になっている。

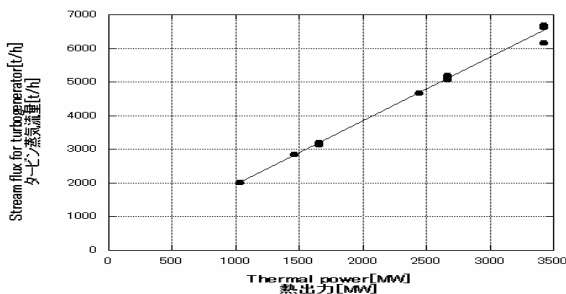


Fig. 17 Steam flux for turbo generator vs. thermal power (PWR)

図 17 タービン蒸気流量対熱出力 (PWR)
 $y = 1.8917x + 71.512 \quad R^2 : 0.9919$

(6) 体積出力密度, volume power density

単位体積当たりのエネルギー放出量 (エネルギー密度) を計算した。計算は 3 つのパターンに沿って行った。③は、炉心にある燃料と冷却水を意識した計算となっている (水の体積は体積に含めない)。

炉心の体積核分裂熱源 $q'''(r)$ は、1 核種の場合、
 $q'''(r) = w_f N(r) \int dE \sigma_f(E) \phi(r, E)$ という記述があった[7]。
 w_f は有効開放エネルギー(200MeV)、 $N(r)$ は原子密度、 dE は微小エネルギー幅、 $\sigma_f(E)$ は反応断面積、 $\phi(r, E)$ は中性子束であろう。

- ① 燃料集合体 1 本あたりのエネルギー ; P/N
- ② 炉心 (有効高さ H , 等価直径 D) の単位体積 (1 m^3)

あたりのエネルギー ; $P / ((\pi/4) \times D^2 \times H)$

- ③ 燃料要素 (ペレット) の単位体積 (1 m^3) あたりのエネルギー ; $P / ((\pi/4) \times d^2 \times H \times n)$

記号の意味 : 熱出力 P / 燃料集合体本数 N / 炉心等価直径 D / 炉心有効高さ H / ペレット等価直径 d / 燃料要素数 n
以上の式から図 18 のグラフにある 3 つのグラフは導出した。

②は炉心内の水まで含めて計算しているが、③は燃料であるペレット 1 本当り計算した。

エネルギー密度計算なので、図 18 から分かるように、ペレット $1[\text{m}^3]$ の出力密度が一番高くなっている。続いて、炉心全体で考えたときである。

体積当たりの出力 (エネルギー) を一定にするためには、 $D^2 / (n \cdot d^2)$ も減速材対燃料体積比も一定でなければならない。図 19 に示すように、熱出力に関わらずほぼ一定の値であることから、熱出力、減速材対燃料体積比、炉心等価直径、燃料要素数、ペレット直径がパラメータになっているから、この 5 つのうち 4 つを決めてやれば、残りの 1 つのパラメータも決定できることになる。

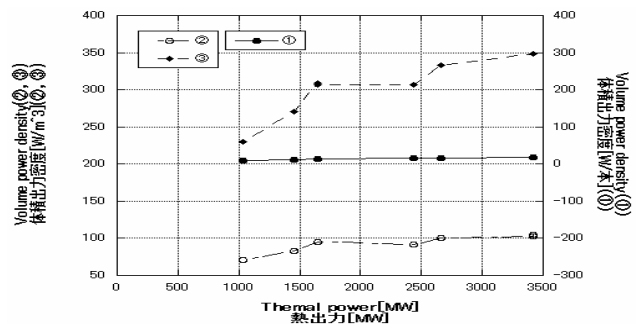


Fig. 18 Volume power density vs. thermal power (PWR)
図 18 体積出力密度対熱出力 (PWR)

- ① $y = 240.32 + 0.03237x \quad R^2 = 0.88349$
- ② $y = 76.265 + 0.0083573x \quad R^2 = 0.81777$
- ③ $y = 8.4942 + 0.0028524x \quad R^2 = 0.93631$

3-2. 熱出力との直線関係はあるが、他の要素も絡んでいるもの

(1) 燃料集合体個数, number of fuel assembly

ここまで PWR におけるパラメータを見てきたが、この燃料集合体個数に関しては比較のために BWR についても考察する。

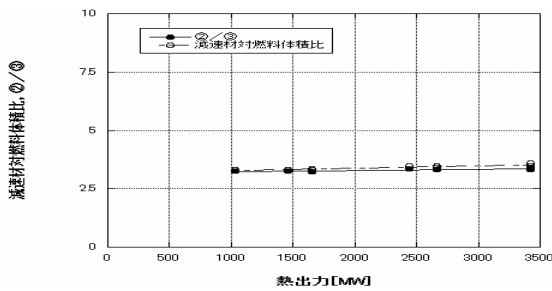


Fig. 19 Moderator of fuel volume ratio, ②/③ vs. thermal power

図 19 減速材対燃料体積比, ②/③ 対 熱出力

● : $y = 3.1801 + 4.9864e-5x$ $R^2 : 0.67187$
 ○ : $y = 3.2066 + 8.7823e-5x$ $R^2 : 0.65999$

燃料集合体とは、原子炉の燃料であるウランペレット(ウランを小さな円筒状に焼結したもの)を連ねた燃料要素と呼ばれるものをいくつか集めて束のようにしたものである。原子炉は燃料集合体をいくつも並べる。

図 20 では、PWR と BWR で同一熱出力に対する燃料集合体個数は大差があるが、図 21 の燃料要素本数で比べると両者の差はほとんどなくなっている。PWR と BWR の燃料ペレットの直径は僅かに異なる (10%)。

熱出力と燃料ペレットの断面積の関係を以下の図 22~25 に示す。

図 21 ではほぼ重なっていた PWR と BWR の燃料要素数は、ペレットの断面積も考えてやると、かえって差が広がってしまった (図 22)。そこで、PWR にはウラン濃縮度を掛けてみた。すると、図 23 にあるように、PWR と BWR はほぼ重なった。

よって、二つは本質的には同じ規則性で設計されているのではないかと思われる。

PWR には燃料要素の配列規則が 3 種類ある。14×14, 15×15, 17×17 である。それぞれに対応して燃料集合体個数は 121 個, 157 個, 193 個となっている (図 20 の PWR 参照)。燃料集合体個数は型が大きくなる毎に 36 個増えている。

PWR では、炉の形式ごとに出力密度の設計が異なる。一方、BWR の設計では炉心の設計時、1 種類の出力密度の燃料要素、燃料集合体を必要な本数だけ並べる簡単 (合理化された) 設計になっている。

PWR については、燃料集合体内の燃料要素の本数は、14×14 配列と 15×15 配列を比べると 15×15 配列の方が 36 個多く、同様に 17×17 配列の方が 15×15 配列よりも 36 本多い。燃料要素本数は、等差数列で表される。燃料集合体の本数 N は、 $N = 121 + 36 \cdot m$ ($m=1, 2, 3$, 自然数) で表される。

BWR の場合は、歴史的には 7×7 配列があり、また改良型 BWR(ABWR)では 9×9 配列が採用されているが、日本の BWR ではほぼ全原子炉が 8×8 配列である。一方、日本の

PWR の場合は、14×14, 15×15, 17×17 の配列ごとに、ペレット直径、ペレット高さ、焼結体の密度、U-235 の濃縮度等が異なり、熱出力と集合体本数の関係は単純ではない。ペレット直径の違いはあるが、燃料要素本数と熱出力の関係のほうが燃料集合体本数と熱出力の関係より単純だと思われる。次の図 27 に、PWR と BWR の燃料要素本数の偶奇性と熱出力の関係を示す。

また、図 26 と図 28, 図 29 について考える。図 28 は PWR における燃料集合体配置の概略図で、図 29 は BWR における燃料集合体配置の概略図である。両方とも大きな円が炉心の横断面であり、中央にある●が炉心の中心である。

燃料集合体の配置を決定する場合、炉心の横断面を 4 等分し、1/4 のみに対して配置の仕方を決め、それを残りの 3/4 にも適用する。そのために、BWR は中心を通過してそのまま 4 等分されている。ということは、中心を囲むように四方に燃料集合体は配置されるが、中心には燃料集合体は置かない ($N = 4m$)。

だが、図 28 にあるように PWR は中心を含んで 4 等分される。ということは、中心にも燃料集合体が配置されるということである。よって、その分、燃料集合体個数を 4 で割ると 1 余るということになる ($N = 4m+1$)。

燃料集合体個数が奇数になるか偶数になるかは、このような配置設計に由来する設計会社の技術者の好みである。

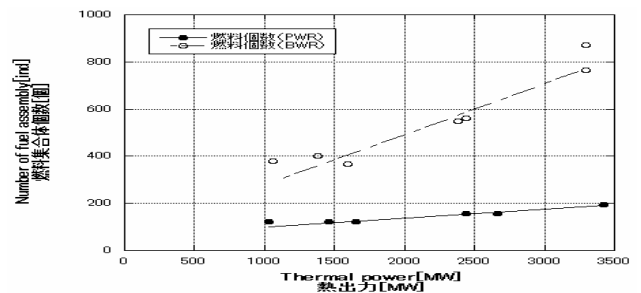


Fig. 20 Number of fuel assembly vs. thermal power (PWR/BWR)

図 20 燃料集合体個数対熱出力 (PWR/BWR)

● PWR : $y = 0.037x + 68.803$ $R^2 : 0.9654$
 ○ BWR : $y = 0.222x + 40.905$ $R^2 : 0.95986$

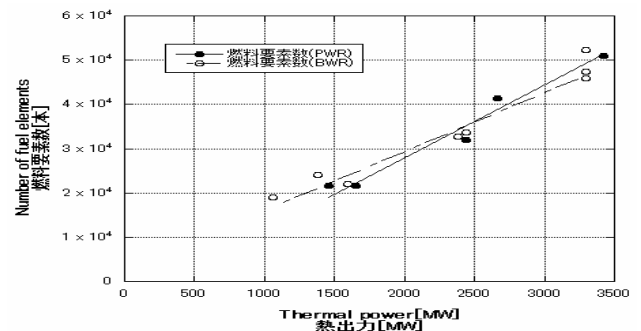


Fig. 21 Number of fuel elements vs. thermal power

(PWR/BWR)

図 21 燃料要素数対熱出力 (PWR/BWR)

(PWR は直線近似より階段関数のほうがよく合いそうである)

● PWR : $y=16.449x-4932$ $R^2 : 0.9765$
 ○ BWR : $y=13.324x + 2510.9$ $R^2 : 0.9584$

Table 6 Fuel assembly configuration and diameter of fuel pellet and density

表 6 燃料要素配列とペレット直径, ペレット密度

炉型	燃料要素配列	ペレット直径	ペレット密度
PWR	14×14	0.93cm	93%TD
	15×15	0.93cm	
	17×17	0.82cm	95%TD
BWR	7×7		
	8×8	1.04cm	97%TD
	9×9A	1.12cm	97%TD
	9×9B	1.10cm	97%TD

TD : 理論密度 (10.96 [g/cm³])

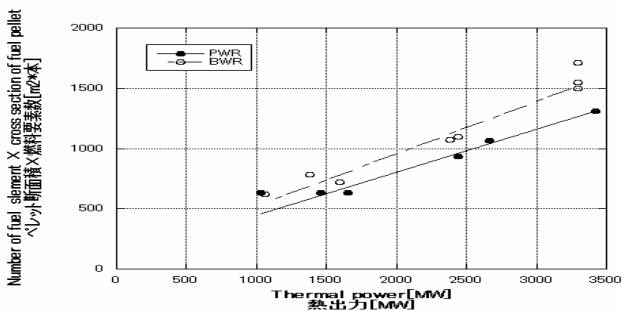


Fig. 22 Number of fuel element X cross section of fuel pellet (PWR/BWR)

図 22 燃料要素数×ペレット断面積対熱出力 (PWR/BWR)
 (PWR は直線近似より階段関数のほうがよく合いそうである)

● PWR : $y = 0.3559x + 92.165$ $R^2 : 0.9721$
 ○ BWR : $y = 0.4353x + 82.003$ $R^2 : 0.9584$

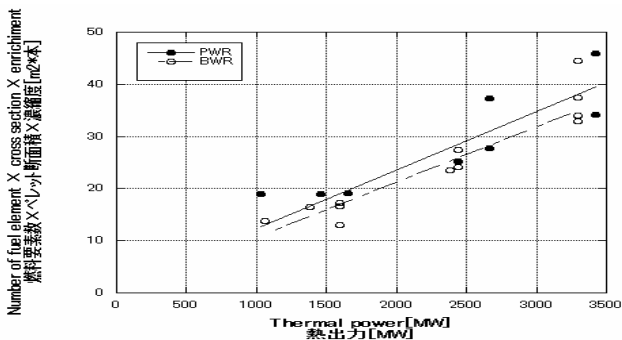


Fig. 23 Number of fuel element x cross section x enrichment vs. thermal power (PWR/BWR)

図 23 燃料要素数×断面積×濃縮度対熱出力 (PWR/BWR)
 濃縮度 PWR・BWR : 中

(直線近似より階段関数のほうがよく合いそうである)

● PWR : $y = 0.0107x + 2.7646$ $R^2 : 0.9721$
 ○ BWR : $y = 0.0131x + 2.4616$ $R^2 : 0.9584$

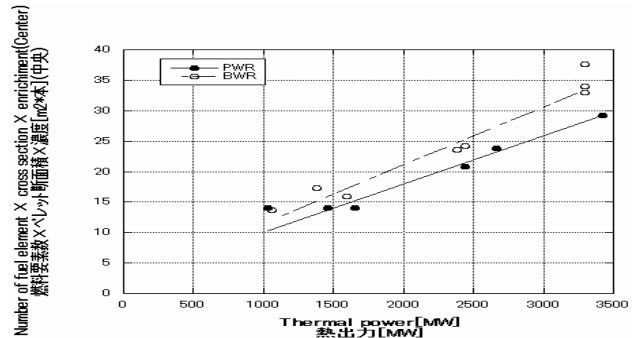


Fig. 24 Number of fuel element X cross section X enrichment (Center) vs. thermal power (PWR/BWR)

図 24 燃料要素数×ペレット断面積×濃縮度対熱出力 (PWR/BWR) - 中心

(直線近似より階段関数のほうがよく合いそうである)

● PWE: $y = 4.0743 + 0.0066236x$ $R^2 : 0.95842$
 ○ BWR: $y = -1.3575 + 0.010745x$ $R^2 : 0.74319$

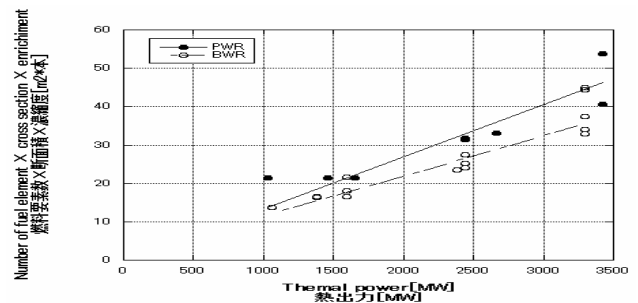


Fig. 25 Number of fuel element X cross section X enrichment (Outside) vs. thermal power (PWR/BWR)

図 25 燃料要素数×ペレット断面積×濃縮度対熱出力 (PWR/BWR) - 外

(PWR は直線近似より階段関数のほうがよく合いそうである)

● PWR: $y = -0.24614 + 0.013614x$ $R^2 : 0.85444$
 ○ BWR: $y = 1.1919 + 0.010422x$ $R^2 : 0.82272$

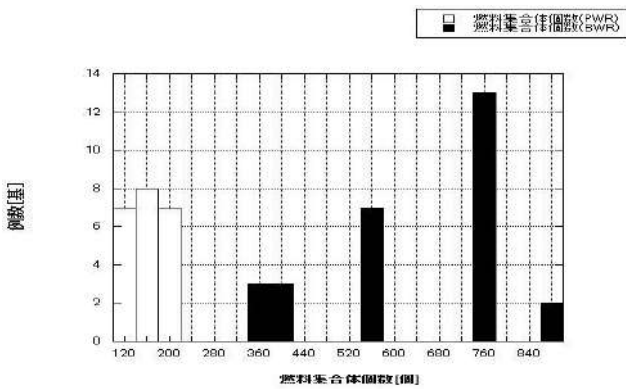


Fig. 26 Distribution of number of fuel assembly vs. thermal power (PWR/BWR)

図 26 燃料集合体個数対例数 (PWR/BWR)

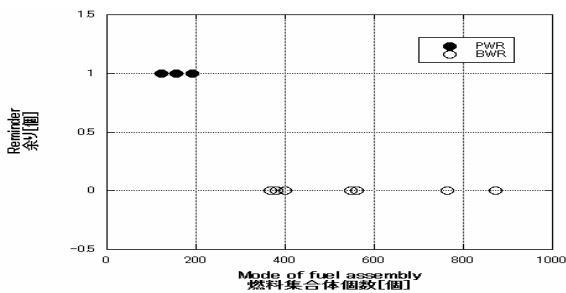
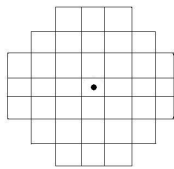


Fig. 27 Remained of fuel assembly divided by 4 (PWR/BWR)

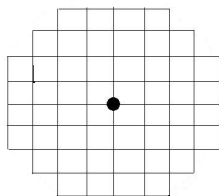
図 27 燃料集合体個数を 4 で割った余り



$$N=4m+1$$

Fig. 28 Fuel assembly arrangement outline chart of PWR

図 28 PWR の燃料集合体配置概略図、WH 社好み？



$$N=4m$$

Fig. 29 Fuel assembly arrangement outline chart of BWR

図 29 BWR の燃料集合体配置概略図、GE 社好み？

(2) 建設費, construction costs

PWR の建設費と熱出力の関係性をグラフに表すと図 30 のようになる。図 30 のグラフからも分かるように、建設費は同じ規模の熱出力の炉の建設であっても、ばらつきは大きい。図 30 のように建設費を片対数でプロットすると、熱出力に関連して建設費も増大している様子が分かる。

これは、発電所を建設する場所や広さ、また建設当時の物価に依るところが大きいからだと思われる。また、図 30 のように対数でプロットすると各熱出力での対数標準偏差はほぼ同一になった。

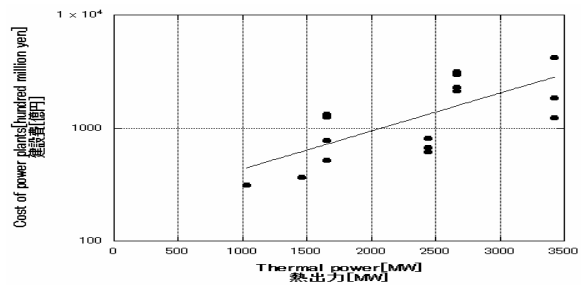


Fig. 30 Construction cost of power plants vs. thermal power (PWR)

図 30 建設費対熱出力 (PWR)

$$y = 199.8e^{0.00077x} \quad R^2 : 0.59473$$

(3) 線出力密度, liner power density q'

燃料の温度制限 [7]

1 秒間に燃料棒 1 [m] 当たりからどれだけのエネルギーが放出されているのかを計算した。

最大線出力密度 (= 660[W/m]) は、参考文献[7]から引用した数字である。この値を超える出力密度になると燃料中心溶融の恐れがあるので、運転はそれ以下のエネルギー密度に抑えなければならない(未照射の UO_2 の融点は 2800°C、燃焼度が上がるごとに融点が下がる)。

平均線出力密度は、放出されるエネルギーを Q 、熱出力を P 、燃料棒有効長さを l 、燃料要素数を N とすると、

$$Q = P / (l \times N)$$

で導出することができる。

最大線出力密度は、同じ大きさの熱出力を取り出そうとした場合であっても値が分散するが、平均線出力密度はほぼ同じ大きさである。面積出力密度は 6 倍ほど余裕があったが、最大線出力密度は、線出力密度の限界とほぼ同じ値で、ゆとりが無い。

$$q'(r) < q'_{max} \approx 660 \text{ [W/cm]} = 66 \text{ [kW/m]} : UO_2 \text{ の燃料要素。}$$

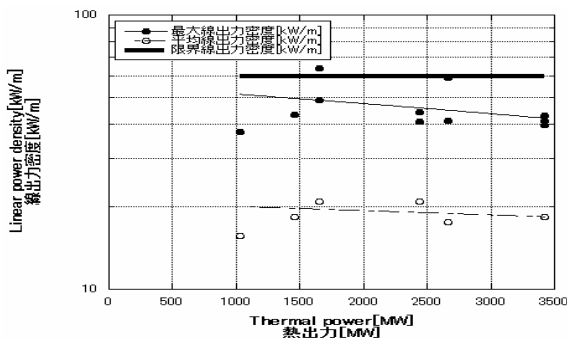


Fig. 31 Linear power density vs. thermal power (PWR)

図 31 線出力密度対熱出力 (PWR)

●最大 : $y = 55.342 - 0.0038877x$ $R^2 : 0.17246$
 ○平均 : $y = 20.742 - 0.0006912x$ $R^2 : 0.11658$

(4) 燃焼度 Burnup

燃焼度は核燃料単位質量当たりの核分裂エネルギー発生量 (1[t]のウラン燃料が発生する熱の量) を意味する。初装荷燃料と取替え燃料とでは濃縮度および燃焼状態が若干異なるため燃焼度も異なる。図 32 に燃焼度と熱出力の関係を示す。

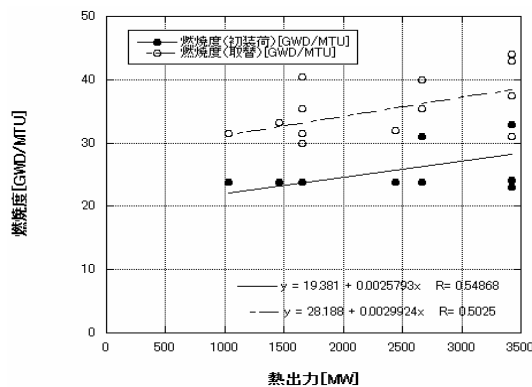


Fig. 32 Burnup of initial loading and commutation fuel vs. thermal power (PWR)

図 32 初装荷燃料および取替え燃料の燃焼度と熱出力 (PWR)

○ 取替え燃料の燃焼度
 $y = 19.381 + 0.0025793x$ $R^2 : 0.30104$
 別解釈 $y=31$ (一定)
 ● 初装荷燃料の燃焼度
 $y = 28.188 + 0.0029924x$ $R^2 : 0.25250$
 別解釈 $y = 23$ (一定)

図 32 より、初装荷燃料の燃焼度は設計段階で値 (最低値) がほぼ決定されており (23MWD/tU)、例外は少ない。取替え燃料の燃焼度は、最小値は 31MWD/tU と読み取れるが、炉心設計のさまざまな影響や、経験、試行が反映されているようではつきが大きい。

一定出力の連続運転連の場合、燃焼度を熱出力で割れば、その原子炉では 1 [t]のウラン燃料で何日運転連できるか概算できることになる。この値に全ウラン装荷量を掛ければ、現在装荷の燃料で運転できる最大 (最長) 日数が推定できる。実際は燃焼の不均一の是正のための燃料交換 (シャプリング) もあり、それほど単純ではないだろうが。

(5) 熱出力との関係が階段関数 (離散量) になるもの step function (discrete value)

気発生器個数、燃料要素配列、制御棒本数、冷却材ポンプ台数、加圧器個数、加圧器容量、燃料集合体個数、燃料要素数等は、その性質上、離散量になる可能性が高い。

例として、気発生器個数と熱出力の関係を次の図 32 に示す。離散量の整数値のものも、熱出力と関係付けられる場合もある。熱出力約 900 [MWt]あたり蒸気発生器 1 個を必要とし、安全のため最小設置数を 2 個と考えているのかもしれない。WH 社の PWR の設計方針を調べるには、外国の熱出力 1000 [MWt]以下の原子炉の例を調べる必要がある。

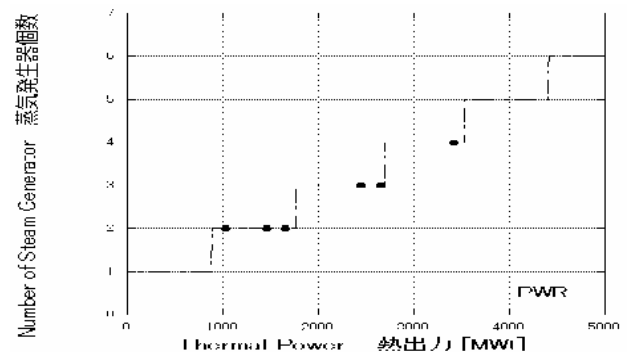


Fig. 33 Number of Steam Generator vs. thermal power.

図 33 蒸気発生器個数対熱出力

$y = \text{INT}(1 + x/900)$ INT: 整数化関数 (階段関数)

直線近似という制約を解き図 10, 11, 14, 20 等のデータを再解析すれば、近似の精度は若干向上する可能性がある。あとで分かったことであるが、WH の PWR 開発では、180, 270, 360 万 kW というタイプの試作機が作られており、図 32 の階段と符合する。図 33 は、始めから台数ということで階段関数を使用した。蒸気発生機のほか、冷却水ポンプ、RCCS 等、整数の機器があり、これらの機器の情報を組み合わせて、再解析を行えば、直線近似にこだわらない、更に近似度の高い解析が期待できると考えられる。

3-3. 熱出力とは無関係に、他の要素 (規則性) によって決定されているもの

(1) タービン回転数, rotational number of turbine

タービン回転数に関しては、PWR や BWR というような区別が必要がないため、1つのグラフにまとめた。

タービンの回転数は、これまでに挙げたパラメータとは違い、図 33 から分かるように熱出力との関連性が見られない。ここで注目したのは、各発電所の給電地している地域である。

周波数 50[Hz]の場合：1500[rpm] (東日本)

周波数 60[Hz]の場合：1800[rpm] (西日本)

また、一般的に 1 分あたりの回転数は、

$$\text{回転数[rpm]} = \text{周波数[Hz]} \times 60[\text{s}]$$

で求められる。その考え方で行くと、東日本にある原子炉のタービンの回転数は毎分 3000 回転であるし、西日本にある原子炉のタービンの回転数は毎分 3600 回転である。だが、実際の原子炉は一般的に考えられる回転数の半分の回転しかしない。これは、原子炉があまり温度を上げられないために蒸気の質が悪く、動翼が長いために、遠心力緩和を考えなければならず、火力発電の半分の回転数になっている。発電機の電極数を倍にして 50Hz および 60Hz の電気の発電を行っている。

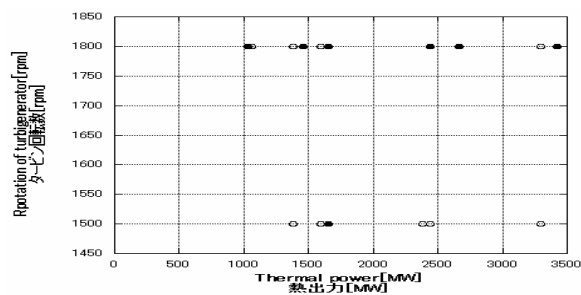


Fig. 34 Rotation of turbo generator vs. thermal power (PWR/BWR)

図 34 タービン回転数対出力 (PWR/BWR)

給電地域: 関東以北: 1500 [rpm]

関西以南: 1800 [rpm]

文字変数も、熱出力に応じて変化する。変化しない「文字定数」もある。

文字定数 (日本の 23 基の PWR 型原子炉では同一のもの)

燃料の種類 (UO_2), 燃料被覆材材質 (ジルカローイ-4)、制御棒型式、制御棒吸収材材質 (Ag, In, Cd)、冷却系加圧器型式、蒸気発生器材質管側 (Ni, Cr, Fe 合金)

文字変数 (出力等で変わるもの)

主契約者、原子炉停客系冷却材ポンプ型式、同加圧機型式、蒸気発生機型式、蒸気発生機材質胴側、蒸気タービン型式、発電機型式、格納容器型式

表 5 のような数値で表すパラメーターの他、「原子力発電」[2]には、多数の文字変数があり、これらの文字データの変数も熱出力との関係で分類した。対象とした項目のみ掲げる。

燃料の種類、燃料被覆材材質、制御棒型式、制御棒吸収材材質、压力容器適用 ASME CODE のセクション、冷却材ポンプ型式、蒸気発生器型式、同材質、蒸気タービン型式、発電機型式、格納容器型式など (PWR)。

臨界計算・MCNP

公開データの学習により、現存の日本の原子力発電プラントの原子炉諸元 (設計パラメーター) を原子炉の熱出力 (および、炉型と発電機の周波数) さえ指定すれば推定で来る状態にたどり着いた。存在しない熱出力の原子炉の定数も予言できる。ただし、その予想データの信頼性は、別の方法で検証する必要がある。炉心の臨界計算が最重要であると考えた。微積分・微分方程式を駆使した解析的方法による臨界計算は無理なので、モンテカルロ法 (乱数) による臨界計算を考えた。定石である MCNP を求めようとした。ところが、米国共和党の「核不拡散政策」の徹底で、6 月 22 日以降、米国製の MCNP およびそれを用いて開発したプログラムの配布・入手は禁止されてしまった。

現在、他の方法による計算結果の確認方法を模索している。MVP を念頭においているが、入手および、内容の理解の障壁がある。(MVP:核データを連続エネルギーで取り扱い、核データと遮蔽計算コード間のインタフェースが最も精度良く行えるようになってきている、モンテカルロ法に基づく国産の計算コード。)

BWR 原子炉シミュレーター, Hide-yoshi

原子力発電の原子炉の理解の手助けを目的とした、原子力発電所の運転を体験することができる原子炉シミュレーションゲーム。東北大学大学院工学研究科で製作されたプログラム。これが公開されており、原子炉の BWR の動特性の部分进行学习するには都合がよい。わたし達は、静特性の部分しか考慮してこなかった。FP の発生や、毒、Pu の生成、発電等考えなくて良いので構造は単純ではある。理解できれば、同じ方法で PWR 用を開発してみたい。使用言語は、C 言語等の文字記述式言語ではなく、LabVIEW という簡易言語を使用している。できれば卒論にまにあわせたい。ただし、内容の理解と、開発言語の学習が必要である。

4. 結論

現在の原子力発電プラントの原子炉の設計はほとんどが工学的手法 (=材料やシステムの制限によって大きさを決める方法) で決定されている。そのため、線出力密度 q' 、面積出力密度 q'' 、 $D2/(n \cdot d2)$ 、減速材対燃料体積比によって、炉の大体の大きさを決定できるということが分かった。

また、多くのパラメータが熱出力に依存していることが

分かったが、ほぼ全てのグラフで ABWR のデータだけは PWR はもちろん、BWR からみずれることが分かった (高効率化されている)。ABWR は発電のための規格からして全く違うのだとデータを見ていく中で改めて実感することになった。

さらに、以下のような各パラメータの実験式を計算したことで、プログラム作成が非常に簡単になった。これらの近似式ではないものを使ったものもあるが、概ね以下の通りに製作した。

数値データを解析していくことで、約 80 項目の各パラメータの意味が分かってきて面白かった。

各パラメータの推定式の例 (PWR) 単位は文献 [3] (一部)

電気出力

$$y = 0.3425x - 6.3417$$

$$\text{決定係数 } R^2 \text{ (以下 } R^2 \text{ とする)} : 0.99361$$

グロス出力

$$\bullet \text{PWR} : y = 0.03289x - 1.3132 \quad R^2 : 0.99658$$

$$\circ \text{BWR} : y = 0.03286x - 1.4735 \quad R^2 : 0.99882$$

ネット出力

$$\bullet \text{PWR} : y = 0.03289x - 1.3132 \quad R^2 : 0.99317$$

$$\circ \text{BWR} : y = 0.03286x - 1.4735 \quad R^2 : 0.99882$$

発電効率

$$\bullet \text{PWR} : y = -0.00008x + 34.24 \quad R^2 : 0.0097$$

$$\circ \text{BWR} : y = 0.0006x + 32.327 \quad R^2 : 0.0548$$

自家消費電力割合

$$\bullet \text{PWR} : y = 0.00038007x + 5.8405 \quad R^2 : 0.51304$$

$$\circ \text{BWR} : y = 0.00083237x + 5.8532 \quad R^2 : 0.71179$$

発電効率 (ネット)

$$\bullet \text{PWR} : y = 0.00016633x + 31.907 \quad R^2 : 0.19904$$

$$\circ \text{BWR} : y = 0.00029897x + 31.448 \quad R^2 : 0.54648$$

冷却材流量

$$y = 0.0161x + 4.5026 \quad R^2 : 0.98160$$

全ウラン装荷量

$$y = 14.1 + 0.021844x \quad R^2 : 0.9817$$

平均熱流速

$$y = 4.941e+5 + 5.1356x \quad R^2 : 0.04491$$

冷却材入口温度・出口温度の温度差

$$\text{入口温度: } y = 287.58 + 2.8008 \cdot 10^{-5}x \quad R^2 : 0.010965$$

$$\text{出口温度: } y = 318.59 + 0.0016933x \quad R^2 : 0.65309$$

$$\text{温度差: } y = 31.006 + 0.0016653x \quad R^2 : 0.63308$$

炉心主要寸法

炉心有効高さ

$$\bullet \text{炉心高さ} : y = 3.6503 \quad R^2 : 0.1526$$

炉心有効直径

$$\circ \text{炉心直径} : y = 0.0005x + 1.76 \quad R^2 = 0.9578$$

面出力密度

$$\text{ペレット直径} : y = 639.23 + 0.022638x \quad R^2 : 0.19164$$

$$\text{被覆管} : y = 556.67 + 0.017858x \quad R^2 : 0.16044$$

$$\text{平均熱流束} : y = 550.69 + 0.015125x \quad R^2 : 13259$$

タービン蒸気流量

$$y = 1.8917x + 71.512 \quad R^2 : 0.9919$$

体積出力密度 (体積の意味により、次の 3 種の値がありうる) 炉心体積あたり、燃料棒 1 本あたり、燃料集合体 1 本あたりなど

$$\text{① } y = 240.32 + 0.03237x \quad R^2 : 0.88349$$

$$\text{② } y = 76.265 + 0.0083573x \quad R^2 : 0.81777$$

$$\text{③ } y = 8.4942 + 0.0028524x \quad R^2 : 0.93631$$

減速材対燃料体積比

$$\bullet : y = 3.1801 + 4.9864 \cdot 10^{-5}x \quad R^2 : 0.67187$$

$D^2 / (n \times d^2)$

$$\circ : y = 3.2066 + 8.7823 \cdot 10^{-5}x \quad R^2 : 0.65999$$

燃料集合体個数

$$\bullet \text{PWR} : y = 0.037x + 68.803 \quad R^2 : 0.9654$$

$$\circ \text{BWR} : y = 0.222x + 40.905 \quad R^2 : 0.95986$$

燃料要素数

$$\bullet : y = 16.449x - 4932 \quad R^2 : 0.9765$$

$$\circ : y = 13.324x + 2510.9 \quad R^2 : 0.9584$$

燃料要素数 × 断面積 × 濃縮度対熱出力 (PWR/BWR) - 中

$$\bullet \text{PWR} : y = 0.0107x + 2.7646 \quad R^2 : 0.9721$$

$$\circ \text{BWR} : y = 0.0131x + 2.4616 \quad R^2 : 0.9584$$

燃料要素数 × 断面積 × 濃縮度対熱出力 (PWR/BWR) - 中心

$$\bullet y = 4.0743 + 0.0066236x \quad R^2 : 0.95842$$

$$\circ y = -1.3575 + 0.010745x \quad R^2 : 0.74319$$

燃料要素数 × 断面積 × 濃縮度対熱出力 (PWR/BWR) - 外

$$\bullet y = -0.24614 + 0.013614x \quad R^2 : 0.85444$$

$$\circ y = 1.1919 + 0.010422x \quad R^2 : 0.82272$$

燃料要素数 × ペレット断面積

$$\bullet \text{PWR} : y = 0.3559x + 92.165 \quad R^2 : 0.9721$$

$$\circ \text{BWR} : y = 0.4353x + 82.003 \quad R^2 : 0.9584$$

燃料の燃焼度

$$\circ \text{取替え燃料} : y = 19.381 + 0.0025793x \quad R^2 : 30104$$

$$\text{別解釈 } y = 31 \quad (\text{一定})$$

$$\bullet \text{初装荷燃料} : y = 28.188 + 0.0029924x \quad R^2 : 0.25250$$

$$\text{別解釈 } y = 23 \quad (\text{一定})$$

蒸気発生器個数対熱出力

$$y = \text{INT}(1 + x/900) : \text{INT}(): \text{整数化関数}$$

蒸気タービン・発電機回転数

$$\text{給電地域: 関東以北: } 1500 \text{ [rpm]}$$

$$\text{関西以南: } 1800 \text{ [rpm]}$$

蒸気タービン蒸気流量

$$y = 1.8917x + 71.512 \quad R^2 : 0.9919$$

建設費

$$y = 199.8e^{0.00077x} \quad R^2 : 0.59473$$

任意の熱出力に対し、これらの原子炉パラメータの値を計算すれば、素人でも四則計算だけで原子力発電プランの概要は計算できる。ただし、検証ができない。

5. プログラミング

2009年夏の第20回全国高専プログラミングコンテストに「電脳原子炉『my原子炉』」と題して出場した。

原子炉の各パラメータの値や材質などの膨大な数のパラメータの概算値などを、わずか3パラメータ（熱出力・炉型・周波数）から算出するというプログラムを、10進 BASIC で製作することに挑戦した。下調べに対し好評を賜った。プログラミングコンテスト用には PWR だけでなく BWR, APWR, ABWR の定数も解説して全てに対応するプログラムにし発表しましたが、個々のパラメーターの数値の意味を理解しないままの機械的、表面的な数値解析であった。解析の対象を「数値」でなく、「原子力発電プラントシステム」と捉えなおし、深い理解を目指します。

マルチプラットフォーム

プログラム制作に当たっては、国際規格（ISO）のある、また国内規格（JIS）のあるプログラミング言語で、かつ、フリーのコンパイラまたはインタープリターの存在する言語を選んだ。

誰でも、どこでも「実行」できる言語環境を重視した。

業界標準と思われる C 言語（C++ 言語）や JAVA で書けば汎用性・移植性、構造化に優れた良い業務用ソフトができるということではない。解析対象に対する深い理解が重要である。特に、素人のクラブ活動で開発プロジェクトを組む場合、構成員の中にさまざまなレベルの学生が混在している。今回のようなデータ解析を中心にしたテーマの場合「プログラミング言語だけ得意」というメンバーがいて特定の言語にのみこだわり目的のシステムの理解をしようとしない場合活動が頓挫する。ラジオ部では過去2回の高専プロコン応募時、このような内部の妨害に遭遇し苦い思いをしているため、今回はコーディングは先延ばし、労力を Excel による原子力発電システムの解析に集中した。参加メンバー全員が、学校でも自宅でも開発に携わることができるように、国際規格（ISO）のある、また国内規格（JIS）のあるプログラミング言語で、かつ、フリーのコンパイラまたはインタープリターの存在する言語を選んだ。誰でも、どこでも「開発」および「実行」ができる言語環境を重視した。開発言語は（仮称）十進 BASIC にした（Windows 版, Linux 版, Mac 版がある）。

高専プログラムコンテストは無事終了したので（敢闘賞）今後、落ち着いて各データの数値の意味（どんな理屈でこのような数値が出てくるのかなど）の理解をこれからの課題として卒業研究に邁進し成果に反映させたい。

謝辞

文部科学省の原子力人材育成事業の支援によって、PC を揃えることができました。ありがとうございました。

原子炉シミュレータ（JRR-1）の実習をさせてくださった JAEA 原子力研修所の方々、貴重な体験をありがとうございました。私たちのプログラムに[1],[2]の数値データの使用を許可していただきました原子力文化振興財団および JAIF の方々に感謝いたします。PWR（玄海原子力発電所）を見学させてくださった九州電力の方々、BWR（福島原子力発電所）を見学させてくださった東京電力の方々、ありがとうございました。（仮称）十進 BASIC を製作されました白石和夫先生にも、感謝しております。

参考文献

- [1] 世界の原子力発電の開発の動向 2009年版－2009年1月1日現在－, 日本原子力産業協会, 2009.
- [2] 原子力の基礎講座 3, 「原子力発電」, 財団法人日本原子力文化振興財団発行, 平成8年改定第5版
- [3] 藤家洋一, 「原子力－自然に学び, 自然を真似る－」, 2005. ERC 出版.
- [4] 世界の原子力発電の開発の動向 2007/2008年版－2008年1月1日現在－, 日本原子力産業協会, 2008.
- [5] 斉藤武, 大竹一友, 三田地紘史「工業熱力学通論」日刊工業新聞社, (1983). (機械科の熱力の教科書)
- [6] 日本機会学会: 蒸気表 1968 丸善
- [7] ジェームス J. ドウデルルスタット, ルイス J. ハミルトン著, 成田正邦, 藤田文行訳「原子炉の理論と解析(下)」, 現代工学社, 1981.
- [8] 成田邦夫著, 量子エネルギー工学入門, 現代工学社, 2002.

技術指導における目標像の設定

—走幅跳を対象として—

木野村 嘉則・森 信二

The setting of target models in technical coaching — The case study of The Long Jump—

Yoshinori KINOMURA and Shinji MORI

Abstract: In technical training, target models are presented to individual athlete depending on his/her condition (Meinel, 1981). Thus, the purpose of this study was to report practical case of technical training considering athlete's condition and consider case of issue of setting target models at technical coaching. The case of long jump's technical coaching to one specialized vocational high school student octathlete was intended. His technical defect were evaluated and target model was set based on whether there are chance improved it in a short time. Following phenomena were appeared:

- 1) At first, when simpler long jump's model than general ideal models was set as simple target model and he try to achieve it, his long jump performance was improved.
- 2) However, when other simple target model was added in his target model and he took part in the competition remained non-achievement it, his long jump performance was declined.

Athlete should take part in the competition after enough training, if he'll not be able to achieve to master target model in time, he should prepare to use one had already learned.

はじめに

スポーツ技術とは「ある一定のスポーツの課題をもっともよく解決していくために、実践のなかで発生し、検証された仕方」であり、「その解決の仕方は合理的でなければならない」（マイネル, 1981）。そのため、スポーツの指導において技術指導を行う際には、その指導対象となっている技術が合目的であり、できるだけ経済的にスポーツの達成を可能にする仕方である必要がある。しかし、コーチや選手がこの合目的で経済的な仕方として、ある仕方を学習目標として設定する際には、単純にその競技の成果主義的な合目的性原理だけで仕方を設定するわけにはいかず、さらに生理学的、物理学的な運動法則との合致によってだけで仕方の成否判断を行うことはできない（金子, 2009）。さらに、選手がスポーツ技術を身につけるには技術達成力が不可欠であり、また技術を実際に個々が達成する際には個人技法として多様な変形を余儀なくされる（朝岡, 1999）。したがって、実際のトレーニング場面では選手の場合に応じた仕方を身につける取り組みが行われていると考えられる。

一般的な仕方としての技術ではなく、その選手の場合に応じた合理的な運動解決法を提示する場面の一例として、吉本ら(2009)の女子体操競技の平均台における「側方倒立回転」の指導事例が挙げられる。吉本ら(2009)は、部分的には技術欠点を含むやり方の習得を目指し、平均台全体の演技完成度を高めることに成功している。技術欠点を含むやり方を用いたのは「とにかく安定する：

合目的」+「恐怖感が少なく、他の技も安心して行える：経済的」＝合理的と考えたため、選手の場合と照らし合わせたときに合理的であったと考えられたためである。このように、スポーツ技術の指導における目標像の設定は、選手がおかれている状況の厳密な分析抜きには成立しないであろう。

今回事例として取り上げる走幅跳のトレーニングへの示唆を提供する知見として、助走速度が記録に大きな影響を及ぼすことが示されている（Luhtanen and Komi 1979, Hay and Miler 1985, Hay 1986, Hay et al. 1986, Hay 1993, Lee et al. 1994, Bae 2002, 志賀ほか 2002, Graham-Smith and Lees 2005; Moura et al. 2005, 小山 2009）。さらに水平速度が高いだけではなく、踏切では助走で獲得した水平速度を効果的に鉛直速度に変換することが重要であることが示されている(Lee et al. 1994)。

そのため、指導書におけるトレーニングへの示唆の多くは、助走と踏切のパフォーマンスに対する因果関係を背景に述べられている。ポポフ（1965）は、多くのトレーニング手段の内容として助走および踏切の技術・体力（筋力）トレーニング法を挙げている。村木（1982）も主要なトレーニング手段と内容として、スプリント運動・跳躍運動・専門的筋力の養成を挙げている。岡野（1994）も同様に、助走における水平速度の獲得および力強い踏切を達成する技術および体力トレーニングの紹介が主な内容となっている。また（財）日本陸上競技連盟編の陸上競技コーチングマニュアル（1987）における走幅跳のトレーニングの概要でも助走速度および踏切技術の習得のためのトレーニング法が紹介され

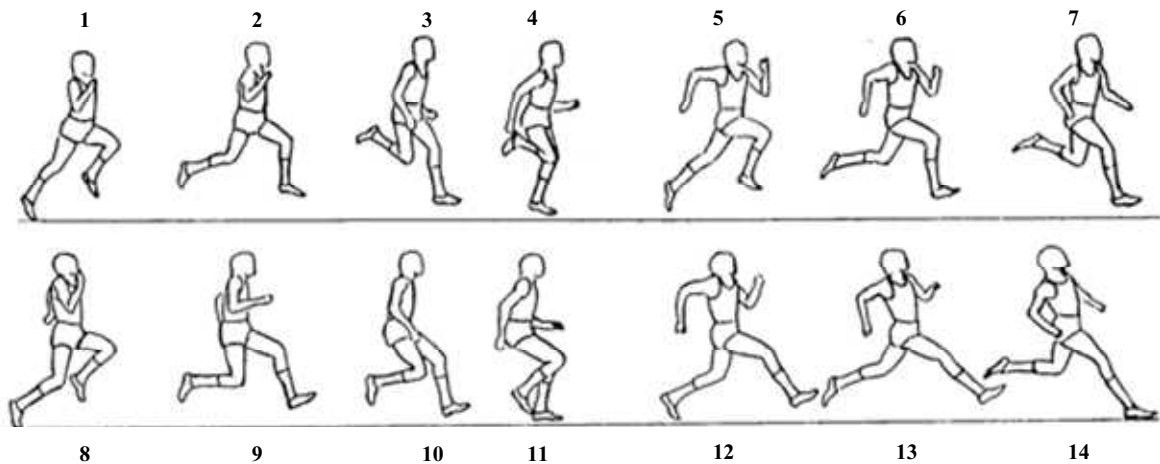


図 1 助走の踏切4歩前と3歩前(上)そして踏切2歩前と1歩前(下)のステップの7つの局面についての同期視覚的提示。Tidow(1991)より改変

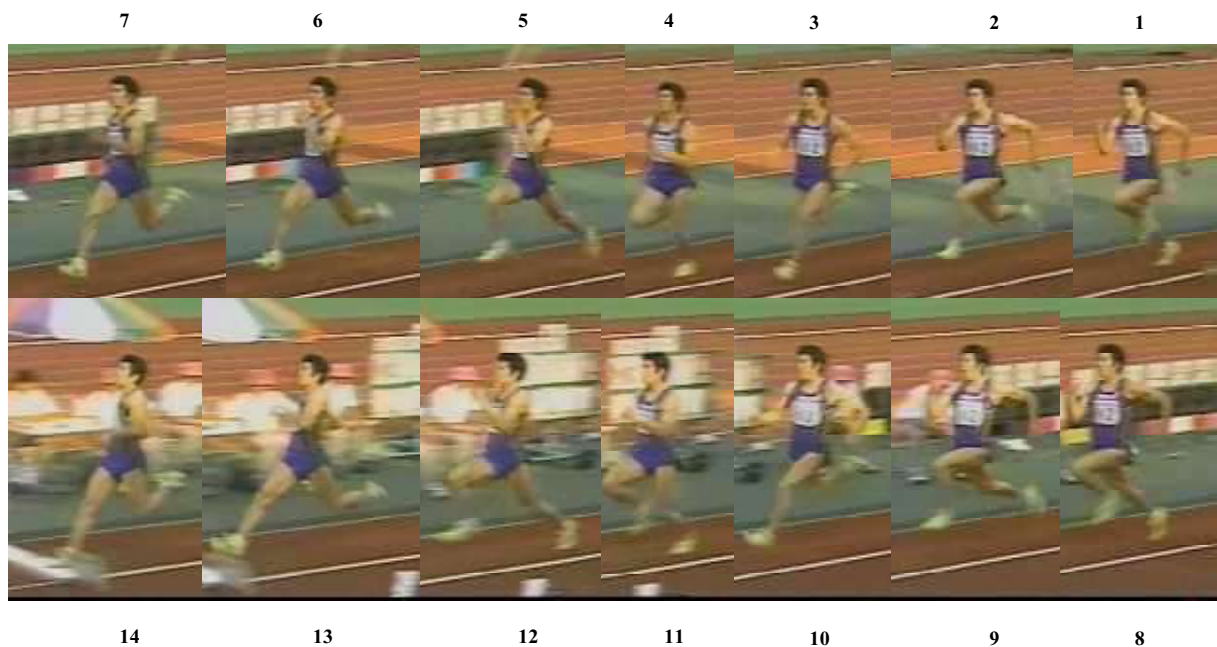


図 2 田川選手の踏切準備動作(1999年の全日本実業団における8m15の試技)

ている。

ここで技術に関しては、陸上競技においても、Tidow(1981)は目標像の提示は効果的な指導にとって不可欠であると考え、世界一流選手の特徴を分析し、各運動局面に対応した目標技術を提示した。Tidow(1989)は走幅跳に関して、主に助走、踏切、空中、着地の局面に目標技術を提示している(また、後にTidow(1991)は踏切2歩前から踏切までの踏切準備動作を追加した)。このような多くの世界一流選手から得られた記述はコーチの指導のヒントとして有効となるだろう。

ただし、実際の指導においては、理論的な知識に加えて、吉本(2009)のように具体的な選手の状況を考慮しながらトレーニングにおける目標像を設定していく必要があると考えられる。そして、このような具体的なトレーニングを検討した報告は個別的な事例であり、直接一般化するには適さないが、実践的なトレーニング

への示唆を得るために蓄積されていくべきであろう。

そこで本研究では、走幅跳の技術指導において筆者が直面した問題点を抽出し、その技術指導と目標像の設定に関して考察することを目的とする。

対象者の特徴

筆者は2009年の4月より非常勤講師として赴任し、対象者のT選手とは2009年の4月30日に出会った。T選手は八種競技にてインターハイの地区予選を勝ち上がり、県大会(5月14日～)を控えていた。県大会を突破した後は地域大会(6月19日～)が開催され、T選手は地域大会を目標試合としていた。また、T選手は週に6日、1日数時間のトレーニングを行っており、その中で筆者は月に2、3日、1回1時間ほど技術指導にあたっていた。

競技会までに直接指導にあたる機会は数回であり、さらにT選手は混成競技者のため、走幅跳以外の種目にも時間を割く必要があった。そのため筆者は「少ない指導で記録を向上させるにはどうするか」に焦点をあてて走幅跳の指導にあたった。

なおT選手は08年の秋から八種競技に取り組み、それまでは中距離選手であったため、これまで走幅跳に割いたトレーニングはわずかなものであった。

指導における目標像

ここでは、実際の指導に際して筆者がT選手に対して設定した指導における目標像に関して述べることにする。筆者は実際の指導において、T選手の試技は踏切前数歩での減速が著しく、特に極端なストライドの短縮が気になった。また、踏切もつぶれた跳躍であり、着地もロスが大きいと感じた。実際の指導の際の目標像の設定は、指導しながらそのつど、試合までの時間などT選手の状況を考慮して設定したが、おおむねの目標像は指導初期から以下のように設定していた。

筆者はT選手に対して、踏切前にストライドを維持したまま踏み切ること、着地で脚をしっかりと前上方に伸ばすことよう指示した。走幅跳の踏切準備動作の技術の目標像として Tidow (1991)は一流走幅跳競技者の踏切2歩前および1歩前について、踏切前の2歩では踏切のための直接的な準備として(図1の下段のように)短距離疾走動作とは大きく異なる動作が行われると報告している。しかし、スポーツ技術を身につけるには技術達成力が不可欠であり(朝岡 1999)、T選手に対してこのような特徴をそのまま技術

1 2 3 4



図3 県総体におけるT選手の着地動作

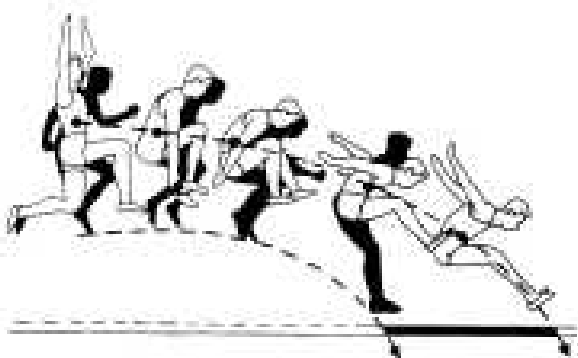


図4 シットイングスタイルによる着地の有効性
Марков, Д. П. Озолина, Н. Г.(1965)

の習得目標像として提示することは適切でないと判断した。特に踏切一步前に沈み込み、そこから踏切脚を前方に差し出すような動作(図1の下段)は困難な動作であると思われる。かえって踏切前の減速が大きくなるなどの不都合が生じる危険性に配慮し、もっと簡単な目標像を提示することとした。

そこで、踏切前数歩のストライドを維持して走りぬけるように踏切動作を行うことで助走速度の低下を少なくしようと考えた。また、わが国の一流走幅跳選手である田川選手は踏切準備動作を比較的抑え走り抜けるような動作で日本歴代3位(2009年11月現在)となる8m15の跳躍を行っている(図2)。さらに、筆者は三段跳を専門としているが、三段跳では極端な踏切準備動作を行うことは一般的ではない(ベルホシヤンスキー 1962, 村木 1982, (財)日本陸上競技連盟 1987, 岡野 1994)ため、「駆け抜ける」ようにした助走を用いて走幅跳の競技会にも出場している。筆者は走幅跳では7m28の自己ベストを有しており、「駆け抜けるように」踏み切ったとしてもT選手が自己ベストを更新するには有効な方法になりえると感じた。したがって、現実的に考え、T選手が短い時間の中で自己ベスト記録に到達するには、踏切準備動作は省略し、駆け抜けるやり方を目標像に設定した。

次に、踏切前のストライドに関する修正がある程度の成功をおさめたと感じたため、着地の修正に着手することにした。T選手の県大会の試技における着地には改善の余地が大きくあると感じた(図3)。有効な着地姿勢としてはシットイングスタイル(図4)が提示されている。ポポフ(1965)は両膝を高く上げ、上体をやや前傾させて両足を前に突き出すことが有効であり、着地の際に足をできる限り身体重心の軌跡に近づける必要があると述べ、大きく体を前傾させ体を二つに折ったような着地よりも有効であることを示唆している。そして村木(1982)は有効な着地体勢への導入が目指される結果として、空間フォームが形成されると述べ、空中動作は有効な着地体勢を獲得することを目的とする必要性を示唆している。そこで、筆者は、着地体勢を整えシットイングスタイルへ近づけることを意図してT選手に脚を上前方に伸ばす意識を持たせた。着地の際に脚を伸ばしやすいうように、踏切時に振り上げ脚(リードレッグ)を抱え込むように振り上げ、空中で思い切り脚を伸ばすよう指導した。

つまり、本研究において筆者がT選手に提示した目標像は、踏切前では疾走動作を大きく変容させず、空中動作では着地においてバランスを保って脚を伸ばすことを目指した、単純な走幅跳と言えらう。

実際の指導時期と内容

1. 県大会まで(4月30日)

4月30日はインターハイの地区予選の映像を部員と一緒に見ていた。そのときに、T選手と初めて話し、T選手が県大会に八種競技(5月13日と14日)で出場することを知った。筆者は地区予選でのT選手の試技(図5)を見て、踏切前の減速が著しく、踏切で上手く地面から反発を受け取れない「つぶれた跳躍」だと感じた。

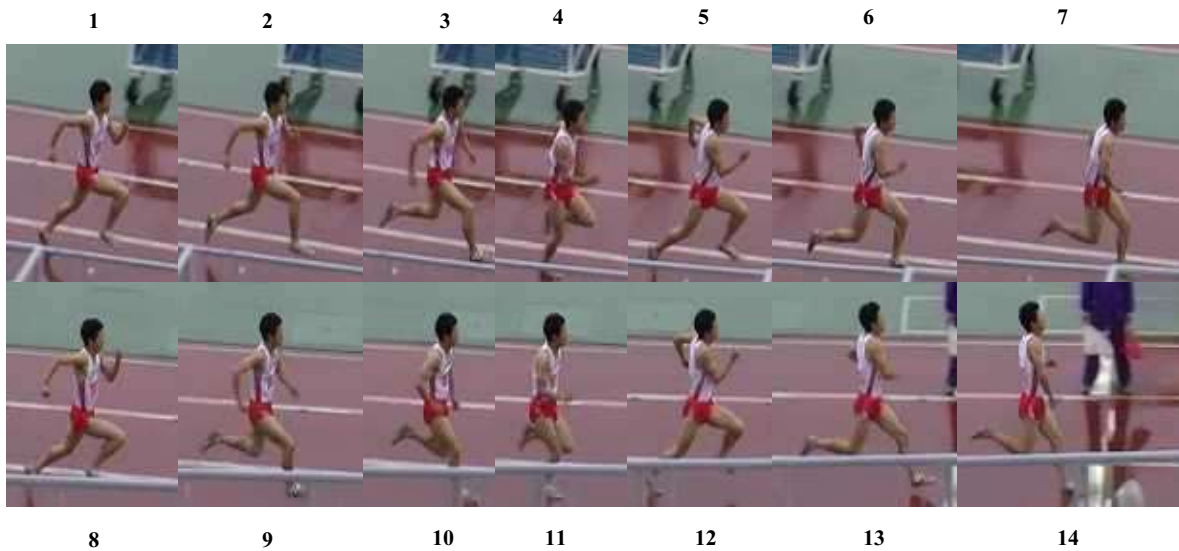


図 5 地区予選における T 選手の試技

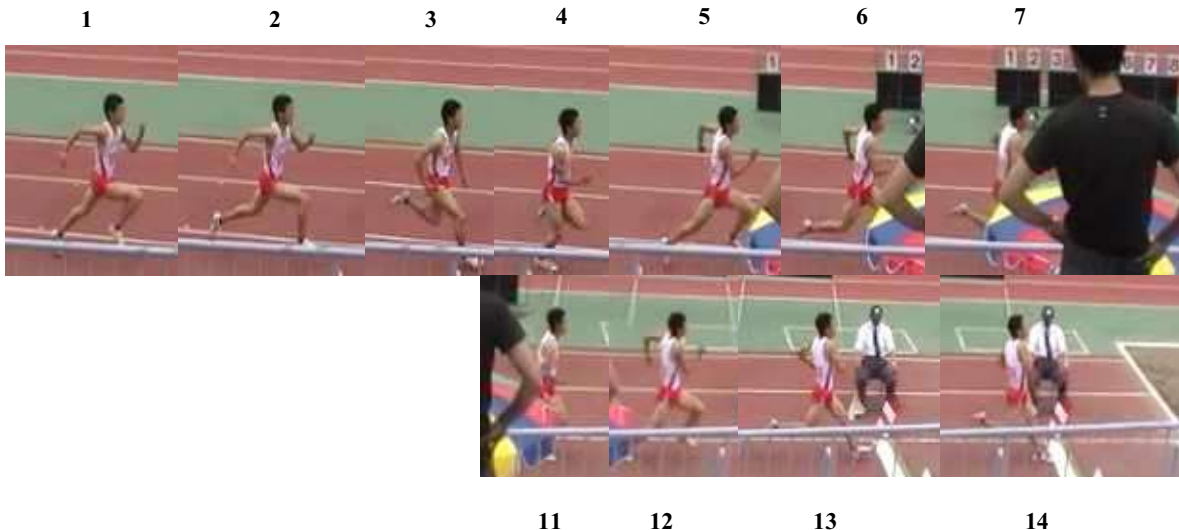


図 6 県大会における T 選手の試技

その中でも特に、踏切前に極端にストライドを短くして走っていることが窮屈に感じ、県大会までに技術指導で取り上げる内容だと感じた。踏切前の数歩で T 選手がストライドを短縮し急激にピッチを高めようとしていると感じたため、踏切前の意識に関して T 選手に話を聞くことにした。T 選手と助走に関する会話をすると、T 選手が以下のように述べていた。

「踏切前の数歩では、ピッチを高めて駆け上がるようにする。ピッチを高めることが走幅跳には重要だと思う。」

確かに T 選手の発言のように踏切前にピッチを高めることは走幅跳に一般的な特徴である。ポポフ(1965)は「踏切前の最後の 1 歩のピッチを速めることは、力強い、ダイナミックな踏切りをして高記録を出すために絶対に必要な条件である」と述べ、村木(1982)、岡野(1994)も踏切前にピッチを高めることを一般的な特徴としている。しかし、その際にストライドを極端に短縮すると疾走速度が著しく低下してしまい、助走で獲得した速度を生かせ

ない。そこで、著者は「ピッチを高めていくのはいい意識だ。そのときに、ストライドを維持しながら踏切るように助走練習をして、県大会ではそこに集中しよう」とアドバイスを行った。

具体的には T 選手に踏切 4 歩前の踏切板との距離感が短いと感じたので、村木(1995)を参考に、この距離が 9m に近づくよう修正を促し、ストライドを維持したまま踏切局面を迎えるよう指示した。なお、筆者はビデオを見ながらのアドバイスのみを行い、実際のトレーニングは T 選手が自分なりに行った。

2. 県大会から地域大会(5月20～6月11日)

5月20日にインターハイ県予選の映像を部員と一緒に見た。県大会での T 選手の試技(図6)では、踏切前のストライドの極端な短縮がなくなり、5m62の自己ベストであった(たとえば図5と図6の2や6や13番目の写真に関して比較すると図6の疾走フォームでは、両脚が前後に大きく開き力強いことがわかる)。そこ

で、今度はロスの大きい着地動作を改善することとした。T選手の着地は立ったままで砂場に足を着くような動作となっている(図3の3)ため、この局面の修正により記録の向上が見込めると感じたからである。著者は助走を短縮した走幅跳を用いた着地の練習に取り組みさせることとした。具体的には4歩から6歩による数歩の助走を用い、踏切時にリードレッグ(遊脚、踏切脚と反対の脚)を強く抱え込むこと、空中で両足をそろえて脚を斜め上に伸ばす感じで着地しようとする、を強調するよう求めた。

地域大会まで、これらのポイントを意識して短助走での跳躍を行った(図7)。走幅跳のトレーニングにおいて助走歩数を短縮して跳躍練習を行うことは一般的であり(ポポフ 1965, 村木 1982, 岡野 1994), 森長(2009)も自身のトレーニングで中核を担ったと報告しているが、T選手はこのようなトレーニングに慣れていなかった。そのため、助走の段階からごちなく跳躍が成立しない試技が何本か続いた。その後、慣れてくると少しずつポイントを意識してトレーニングを行えるようになり、次第に脚を前方に伸ばして着地を行えるようになった(図8の2から4)。

3. 地域大会から県選手権(7月2日)

地域予選における結果は自己ベストに届かない5m47となった(図9)。着地は足をそろえて前に出していた(図10の2)が、助走の前半の加速が不足し、踏切前ピッチが上がり切らない助走となってしまう(図9の3や7や10の接地時に遊脚が後方に残り乗り遅れているため、12の踏切1歩前の離地で強く地面を蹴り13

と14のように踏切においても遊脚の前方へのスイングが遅くなり減速してしまっている)。また、空中では上半身を起こして着地を迎えていたが、実際に着地するときには県大会と同じく、上半身を大きく前に倒して着地しており、着地動作の改善は達成されなかった。T選手は「着地動作の修正が気になってしまった」と述べており、そのせいで助走全体が消極的になり助走速度が低下してしまっただと考えられる。T選手は7月3日の茨城県選手権の十種競技に参加することになっていたため、助走の前半でもっと地面を押して大きなストライドを確保しながら加速をするようアドバイスをした。県選手権の結果は5m61とはほぼ自己ベストの記録であった(図11)。関東大会よりも助走でスムーズに加速し、踏切ることが出来ていた。

指導で生じた問題点

今回の事例では、T選手は助走の踏切前のピッチとストライドの関係の修正を行って自己ベストを更新したが、着地動作への指導の結果、再び助走に欠点が現れパフォーマンスが低下した。着地に先行する踏切や助走の局面においても着地動作を上手く行うことを意識し、助走や踏切に悪影響を及ぼしたと考えられる。特に関東大会においてT選手は「着地動作を気にして」助走の局面で縮こまっていたように感じた。

指導前にT選手は「踏切前でピッチを高めることが重要」と考え、ピッチを高めるようとして極端にストライドが小さくなって

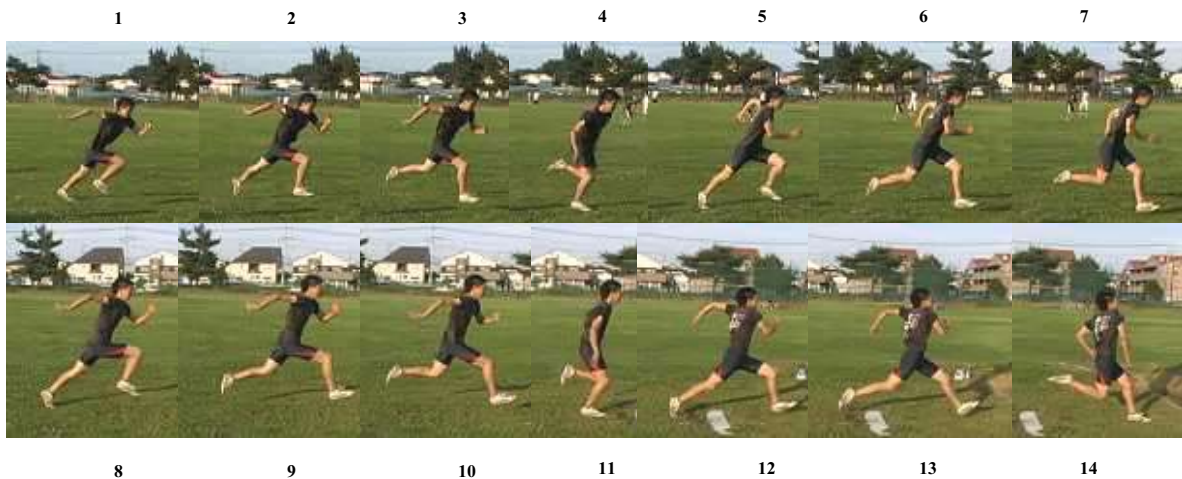


図7 6歩助走による走幅跳(6月11日)



図8 6歩助走による走幅跳の着地(6月11日)

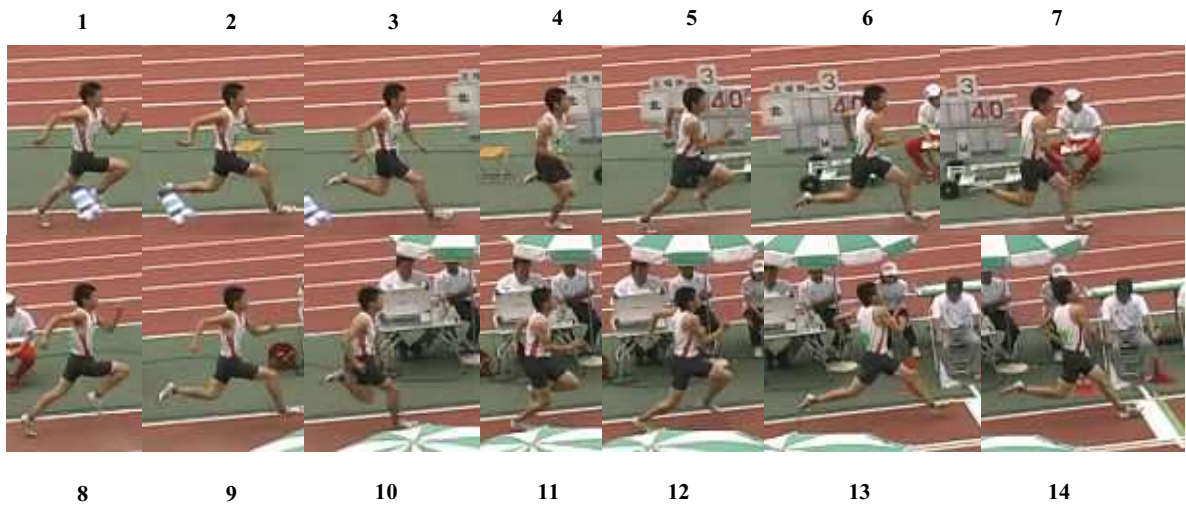


図 9 地域大会における T 選手の試技

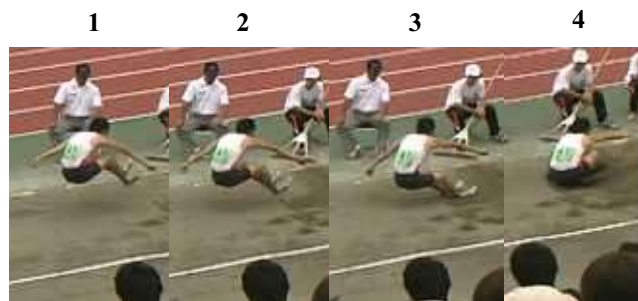


図 10 地域大会における T 選手の着地

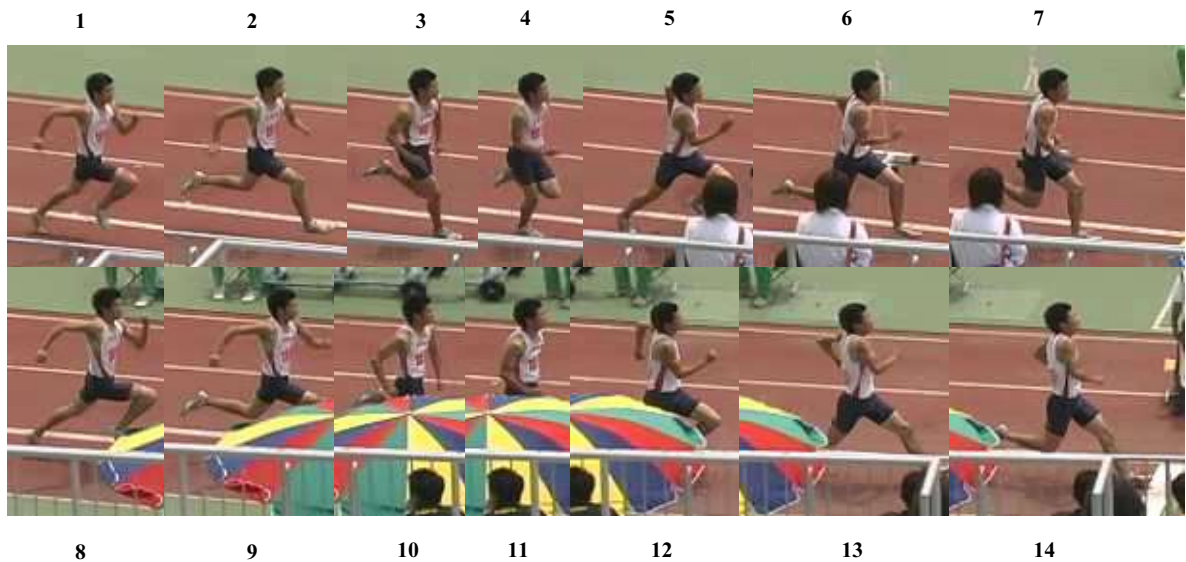


図 11 県選手権における T 選手の試技

しまい、踏切前の大きな減速を招いてしまっていた(図 5)。一度、踏切前にストライドを保つように指導し助走速度を維持して踏み切って自己ベストを更新していた(図 6)が、地域大会の試技では着地が気になって助走が消極的になってしまっていたため、踏切前に無理やりピッチを高めざるを得なくなったように見えた。つまり、T 選手にとって、着地に関して修正が不完全であったため試合では走幅跳全体にとって負の影響を与えたと言えよう。

実践面への示唆

T 選手は技術トレーニングにより動作を修正した後に、異なる局面に欠点が現れてしまった。また、着地動作に関しては、短助走ではシットイングスタイルに近い動作となっていた。しかし、試合においては空中局面に着地の改善の兆しが現れてきたものの、以前の欠点に近い動作の特徴が現れ着地動作の改善は達成されなかった。

短助走跳躍を技術トレーニングとして用いる際には試合で用いる動作の習得を目指して行うべき(木野村ら 2008, 2009)と考えられるが、短助走での試技の成功が、そのまま試合助走の試技での即座の成功を意味するわけではない。今後、助走歩数を徐々に伸ばしていく中で、習得目標とする技術の習熟を目指していく必要があるだろう。

また、技術を習得する過程ではパフォーマンスが一時的に低下してしまうことがある(グロッサーら, 1995)。そのため、選手の技術習得の状況や競技会までの時間を考慮し、技術の習得に間に合わなかった場面を想定しておくべきであろう。

謝辞

日々、トレーニングに励み陸上競技部員に感謝するとともに、今後の学生生活及び競技者生活の充実を願っております。なお、城キリスト教大学天野秀哉氏、徳山大学齊藤雅記氏には多くのご批評をいただきました。ありがとうございました。

文献

- 1). 朝岡正雄 (1999) スポーツ運動学序説. 不昧堂出版.
- 2). Bae, S.-J. (2002) Biomechanical relationship between the long jump takeoff motion and flight distance performed by elite athletes. *Journal of education and health science*. 48(1):151.
- 3). Graham-Smith, G and Lees, A. (2005) A three-dimensional kinematic analysis of the long jump take-off. *Journal of sports sciences*. 23(9):891-903.
- 4). グロッサー ノイマイヤー:朝岡正雄訳(1995) 選手とコーチのためのスポーツ技術のトレーニング. 大修館書店
- 5). Hay, J. G and Miller, J. A. (1985) Technique used in transition from approach to takeoff in the long jump. *International journal of sport biomechanics*. 1:174-184.
- 6). Hay, J. G (1986) The biomechanics of the long jump. *Exercise sport science review*. 14:401-446.
- 7). Hay, J. G (1993) Citius, altius longius (faster, higher, longer): the biomechanics of jumping for distance. *Journal of biomechanics*. 26 supply 1:7-21.
- 8). 金子明友 (2009)スポーツ運動学. 明和出版.
- 9). 木野村嘉則 村木征人 (2008) 走幅跳における助走歩数の変化に伴う踏切動作の変容. *日本スポーツ方法学会第 19 回大会大会号*. 31
- 10). 木野村嘉則 小山宏之 谷川聡 村木征人 (2009)短助走での走幅跳における助走歩数の変化に伴う踏切局面中の速度変化—身体的回転及び伸縮による速度変化の観点から—. *日本スポーツ方法学会第 20 回大会大会号*. 35
- 11). 小山宏之 (2009)走幅跳の助走スピードの標準値. *月刊陸上競技 2009 年 11 月号*. 講談社 pp158-160
- 12). Lee, A., Graham-Smith, P. and Fowler, N. (1994) A biomechanical analysis of the last stride, touchdown, and takeoff characteristics of the men's long jump. *Journal of applied biomechanics*. 10:61-78.
- 13). Lisa, A, B., and Nicholas, P, L., (2006) Changes in long jump take-off technique with increasing run-up speed. *Journal of sports science*. 24(8): 889-897.
- 14). Марков, Д. П Озолина, Н. Г.(1965) Легкая атлетика. Физкультура и Спорт Москва
- 15). マイネル:金子明友訳 (1981) マイネル・スポーツ運動学. 大修館書店
- 16). 森長正樹(2009) 思い切り跳ぶために磨いた“技術”. *月刊陸上競技 2009 年 11 月号*. 講談社 pp133-135
- 17). Moura, N. A., Paula Moura, T. F., and Borin, J. P. (2005) Approach speed and performance in the horizontal jump: What do Brazilian athletes do? *New studies in athletics*. 3:43-48.
- 18). 村木征人 室伏重信 加藤昭: 大石三四郎 浅田隆夫編 (1982) 現代スポーツコーチ実践講座 2 陸上競技(フィールド). ぎょうせい.
- 19). 村木征人(1995) 助走跳躍における運動抑制現象の運動方法論的解釈とコーチング. *スポーツ方法学研究* 8(1):129-138
- 20). 岡野進(1994) 陸上競技 ジャンプトレーニング・マニュアル. ベースボール・マガジン社
- 21). ウラジミール・ポポフ: 岡本正巳訳 (1965) 走幅跳のトレーニング. ベースボール・マガジン社
- 22). Tidow. G (1981) Modell zur Technischulung und Bewegungsbeurteilung in der Leichtathletik. *Leistungssport*. 11(4): 264-277
- 23). Tidow. G (1989) Model technique analysis sheet for the horizontal jumps-The Long Jump. *New studies in athletics*. 3:47-62
- 24). Tidow. G (1991) Zur Sollwert-Präzision der Absprungvorbereitung beim Weitsprung/Preparations for take-off in long jump. *Sportmotorisches Lernen und Techniktraining*. 61-65.
- 25). ユー・ベルホジャンスキー: 岡本正巳 小泉健司訳 (1962) 三段跳のトレーニング. ベースボール・マガジン社
- 26). 吉本忠弘 佐藤晋也 (2009) 技術指導における目標像の設定. *日本スポーツ方法学会第 20 回大会大会号*. 24
- 27). (財)日本陸上競技連盟(1987) 陸上競技のコーチングマニュアル. ベースボール・マガジン社

大気圧マイクロプラズマのプロセス化に関する研究

根本 栄治、牛久保 佑介*

A study of adopting atmospheric micro-plasma in plasma process

Eiji NEMOTO and Yusuke USHIKUBO*

Abstract: Electron temperature (T_e) and electron density (n_e) are most important parameters of plasma, respectively. However, increasing pressure around plasma, theoretical diagnostic will not fit for actual phenomenon because of electron-heavy particle and heavy particle-heavy particle collision frequencies rising. The UV and visible optical emission spectroscopy (OES) applied for theoretical diagnostics toward He-plasma in the atmosphere. Relative emission line intensities of neutral helium are estimated for the principal quantum number $n=3$ to 2 transitions. The population density was calculated from comparison of the 6 spectrum with defined excitation temperature (T_{ex}) in internal partition function to estimate T_e from T_{ex} . The other method is based on Collisional-Radiative model (CR model) to calculate T_e and n_e . Moreover, we gained gas temperature (T_g) from OH \cdot (306.4[nm]) emission line. In the result, $n_e=1 \times 10^{11}$ [cm^{-3}], $T_e=1.8\text{-}2.4$ [eV] and $T_g=400\text{-}550$ [K] on various apparatus conditions. And we tested utilizing the atmospheric micro-plasma in deposition process to make TiO_2 film from TiO_2 powder. A way to check TiO_2 film, we adopted observation of surface on TiO_2 film by SEM. Experimental conditions at process were RF power = 10[W], torch-base distance = 1[mm] and processing time = 5[min]. In the result, transparent films were gained on optional position. The present consequences, demonstrated us possibility of adopting atmospheric micro-plasma in plasma process.

1. 緒言

現在多くの分野の生産活動において、プラズマ(Plasma)は欠かすことのできないものになっている。身近なものでは照明器具やディスプレイなどが有り、工業的には超微細加工技術、表面改質、化学分析、バイオマテリアル⁽¹⁾への応用等、我々の生活を支える基幹技術となっており、大きな存在価値を持っていることにその理由がある。

近年、特に企業においてエネルギー問題や CO_2 削減への対策の必要が迫られており、そのためにエネルギー効率と時間効率の向上、省エネルギーの実現等が求められている。その具体的な打開策の一つとして、近年では大気圧下でも容易にプラズマを発生・維持できるマイクロプラズマトーチの研究が盛んに行われている。これらは電極間距離を短くし、誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge: DBD) を利用したものが多く、キャピラリー内に電離しやすいガス (He, Ar, Ne など) を流し、そのキャピラリー内でプラズマを発生・維持させるものである。このマイクロプラズマトーチを利用して、エッチング用ガスを混ぜることに

* ジャトコ株式会社,

〒417-0001 静岡県富士市今泉 700-1, JATCO Ltd, 700-1, Imaizumi, Fuji City, Shizuoka, 417-0001, Japan, E-mail:yusuke_ushikubo@jatco.co.jp

よる基板の高速エッチングや、特定ガスを混ぜることによる高分子表面の表面改質、キャピラリー内に金属を設置させることによるナノ構造物質の作製等が行われている。しかし一方で、大気圧下のプラズマでは真空中に比べ、大気中の元素の混入やエネルギー流出、空気の流れといった影響を受けやすいという事実もあり、実際のプロセスに応用するために定常的な検討方法が必要とされている。

従来から、真空中のプラズマに対する評価手法としては、一般的に (ラングミュア) プローブ法^{(2),(3)} (Langmuir Probe Method)と分光法(Optical Emission Spectroscopy: OES)が適用されていた。プローブ法とは、プラズマ中に差し込まれたプローブに流れ込むプラズマポテンシャルと電子電流、またはイオン電流を測定し、その特性からパラメータを決定する。そのため、測定自体は比較的簡便であるものの、プローブ周辺に形成されるシース^{(4),(5)} (電荷の運動を減衰する領域) がプローブ径よりも十分に大きく無衝突性^{(6),(7)}である分には有用であるが、大気圧のような高圧状態で形成される衝突性シースでは過剰なポテンシャルと電流が現れてしまう⁽⁸⁾ことから、計測に対して妥当な理論であるという仮定を前提としなければならず、補正を行うための検討には向かない。また、接触測定であることから、プラズマ源の形状あるいはプラズマに対する擾乱の影響を考えると適用自体が困難な場合がある。

一方、分光法とは、プラズマ中の原子過程に伴う特定波長の発光スペクトルを、分光器を介して観測し、その発光スペクトルからプラズマの状態およびパラメータを決定するため、分光器の性能に対する依存性が高く、さらに理論も難解な場合が多い。その上高圧状態では、理論検討において有効とされていた局所熱平衡状態^{(9),(10)} (LTE) という仮定が成立しないという問題もある。しかし、プラズマへの影響が実質的に皆無であること、また、プラズマの状態や形状に対して柔軟に対応できるという性格を持っていることから、現在では多くのプラズマ研究に取り入れられている代表的な手法である。

そこで本研究では、He ガスを用いた大気圧マイクロプラズマを持続的に生成できる実験装置を製作し、二酸化チタン (TiO₂) の成膜プロセスに応用するシステムの開発を行った。特に分光法において、真空中での分光理論に励起温度と言うパラメータを追加することで大気圧下での補正を試み、実験装置と実験条件に対する再現性並びにプロセスへの応用可否の検討を目的とした。

2. 実験装置

実験システム⁽¹¹⁾の概略を Fig.1 に示す。まず、プラズマ生成用の電力源には直流安定化電源 (GZV4000: Switching Power Supply、第一電波工業株式会社) と高周波送信機 (IC-910D: VHF/UHF All Mode Transceiver、アイコム株式会社、438.26[MHz]を発生) を使用し、送電経路のインピーダンスの整合を行うためマッチングユニット (NT-272: Network Tuner、株式会社クラニシ) を介してプラズマトーチ (Fig.2) へと電力を供給する。

プラズマトーチは石英管 (外径: 3[mm]、内径: 1.5[mm]) の内部に電極としてタングステン線 (直径: 0.5[mm]、純度: 99.95[%]、NILACOi) を設置、また、この電極には絶縁管 (HB 製、外径: 1[mm]、内径: 0.4[mm]) をはめ込み、さら

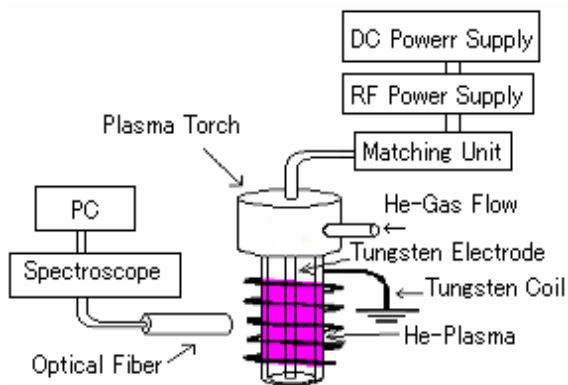


Fig.1 Outline of experimental setup.

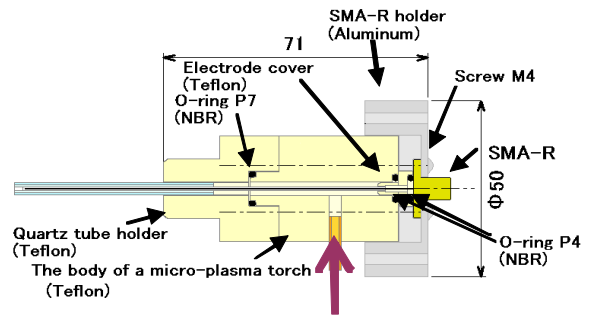


Fig. 2 Frame of a micro-plasma torch.

に石英管の周囲にタングステン線 (直径: 0.1[mm]、純度: 99.95[%]、Nilaco) で作ったコイルを複数回巻く。石英管中にプラズマ発生用ガスとして He を流すことで得られるプラズマのスペクトルを分光器 (HR-4000 Ocean-Optics) により、PCに取り込む。なお、スコープとしてコア径が 600[μ m]の光ファイバーを接続した。TiO₂ の成膜プロセスは、Fig.3 に示す攪拌容器中に TiO₂ 粉末を投入し、ファン (CF-60R アイネックス) で攪拌しつつ He ガスに TiO₂ を混入させることで、基板上に堆積させる。攪拌容器は内部を円錐状にすることで攪拌した TiO₂ 粉末が容器外へ流出しやすくなるようにしてある。

3. 理論

3.1 プラズマ中の原子過程

プラズマ中の過程を大きく分類すると、物質が最も安定に存在できる状態である基底準位から量子的に活性化される励起(excitation)・電離(ionization)の過程と、活性化された状態から低エネルギー状態へと変化する脱励起(de-excitation)・再結合(recombination)・自然放射(spontaneous transition)の過程となる。

前者を補足すると、プラズマ中において質量の軽い電子は

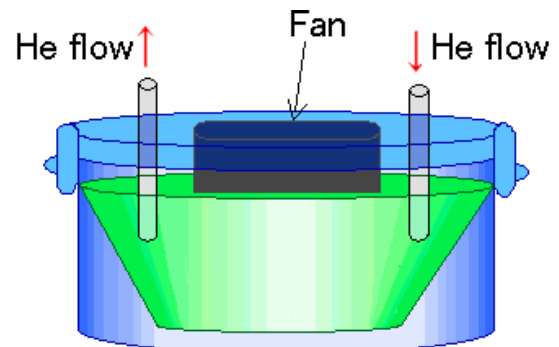


Fig.3 Fame of stirrer.

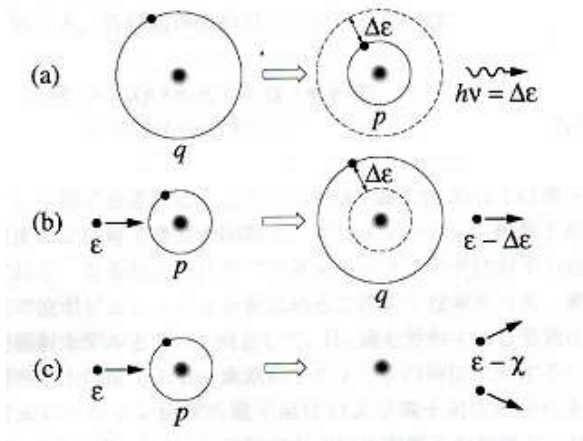


Fig.4 Schematic diagrams of the atomic processes : (a) spontaneous transition, (b) electron impact excitation, and (c) electron impact ionization. Where χ in (c) stands for the ionization potential of the left hand side atoms in level p.

電界からエネルギーを受け取り、高い運動エネルギーを持った状態で衝突を介して重い原子にエネルギーを伝達する。しかし、原子と電子では質量比が大きいため重い原子の運動エネルギーは殆ど増加せず、電子のエネルギーがほぼ一方的に原子の内部エネルギーに変換される。

その結果、原子が励起あるいは電離することが可能となる。また、電離する際に放出される電子（二次電子）は他の粒子との間で同じような衝突を繰り返し、電子雪崩と言うさらなる励起や電離を引き起こす。

一方、後者の内容は、励起された状態にある原子が他の比較的エネルギーが低く、かつ同程度の質量を持った粒子との衝突によってエネルギーを平均化されてしまうことから発生する脱励起、イオンが電子との衝突で安定状態となってしてしまう再結合、励起状態の持続可能時間（励起寿命）を終えることで自発的に低エネルギー状態に自然放射する過程となる。

Fig. 4 に、原子過程の概要⁽¹²⁾を示す。但し、励起と脱励起、電離と再結合は逆過程として考えているため、脱励起と再結合は省略している。

3.2 分光理論

今回我々が適用する分光理論は、プラズマの電子温度と電子密度、さらにガス温度を得ることを目的としている。観測対象となるプラズマから得られる観測スペクトルの波長と遷移形態(主量子数と方位量子数の変化)の関係を Fig.5 に示す。

具体的な手法は、電子エネルギー分布関数(EEDF)を Maxwell-Boltzmann 分布と仮定した分子分配関数⁽¹³⁾中に励起温度を定義⁽¹⁴⁾し、Fig. 6 の He I の中性線に対する発

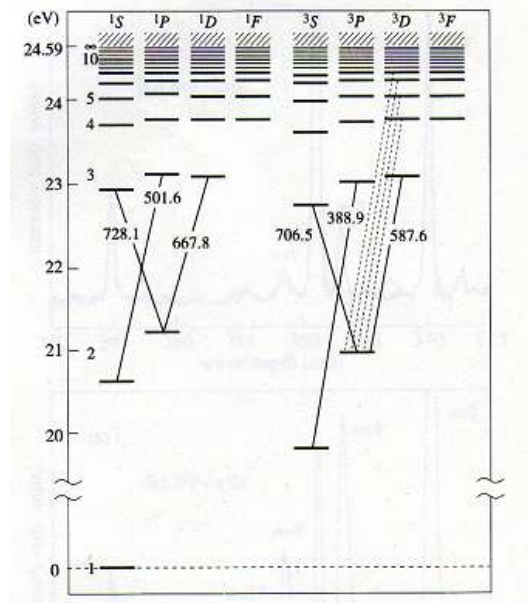


Fig.5 Grotrian diagram of neutral helium.

光強度比⁽¹⁵⁾から電子温度を推定する方法 (1) 式と、(2) 式に示す衝突-輻射モデル⁽¹⁶⁾ (CR モデル) を基本としたプラズマモデルから、He I 中性線の観測スペクトルを再現できる電子温度と電子密度の同定を併用することで正確性の向上を図る。

さらに実際のスペクトルでは、306.4[nm]付近にOHに起因する $\text{OH} \cdot (\text{A}^2\Sigma^+ \rightarrow \text{X}^2\Pi)$ という振動-回転スペクトルが観測されている。このスペクトルは振動励起単位 0 のバンドを含んでいることから、本来 $T_g = F(T_{\text{vib}}, T_{\text{rot}})$ となる分光理論を簡略化して適用することができ、その結果 T_g の分配関数が T_{rot} のみとなることで T_g と T_{rot} の相関性が強く

$$I = NA_{q,p} h \frac{c}{\lambda} \frac{g_q \exp(-\epsilon_q / kT)}{\sum_i^q g_i \exp(-\epsilon_i / kT)} V \frac{\Omega}{4\pi} \dots\dots (1)$$

$$\frac{dn_{(p)}}{dt} = - \left\{ \sum_{q>p} C_{(p,q)} n_e + \sum_{q<p} A_{(p,q)} + S_{(p)} n_e \right\} n_{(p)} + \sum_{q>p} \{ C_{(q,p)} n_e + A_{(q,p)} \} n_{(q)} + \{ \alpha_{(p)} n_e + \beta_{(p)} + \beta_{d(p)} \} n_i n_e \dots\dots(2)$$

$$C_{(q,p)} = \int \sigma_{qp}(v) f(v) v dv \dots\dots(3)$$

$$I = K v^4 i \exp \left\{ -hcB' \left[J'(J'+1) \right] / kT_{\text{rot}} \right\} J' = \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \frac{9}{2}, \frac{11}{2}, \frac{13}{2} \dots\dots(4)$$

なると考えられる。上記の理由から、ガス温度を得る手法として $\text{OH} \cdot (\text{A}^2\Sigma^+ \rightarrow \text{X}^2\Pi)$ の Q 枝に対するスペクトルフイッティングによるガス温度同定⁽¹⁷⁾を行う。

これらの理論を、プラズマの体積および電極形状に直接影響するコイルの条件と高周波出力に関連させて考える。また、成膜プロセスに関しては、基板をトーチ先端から 1 [mm] ほど離して設置し、プラズマに対する理論検討において最も高温になりやすく、膜表面の変化が大きくなると思われる 10[W] の高周波出力において行った。

4. 結果および考察

まず、前述の CR モデルから再現した He I 中性線と実験から観測された He I 中性線の比較を Fig.6 および Fig.7 に示す。結果に関しては、501.6[nm]に現れる $2^3\text{S}-3^3\text{P}$ に由来

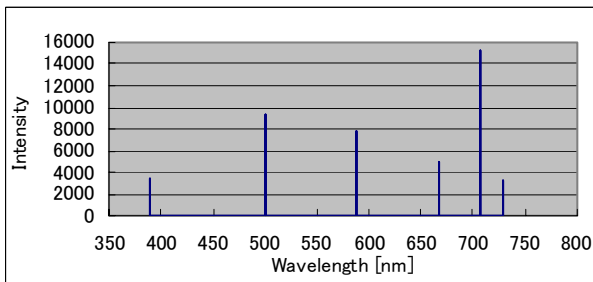


Fig.6 Observed He I spectrum.

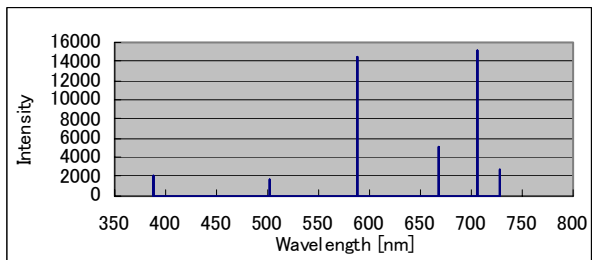


Fig.7 Calculated He I spectrum.

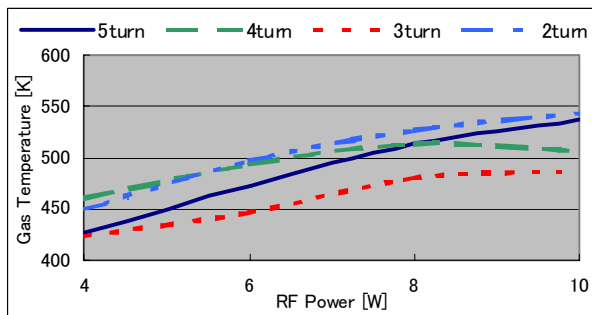


Fig.8 Gas temperature dependence on RF power about external coil condition.

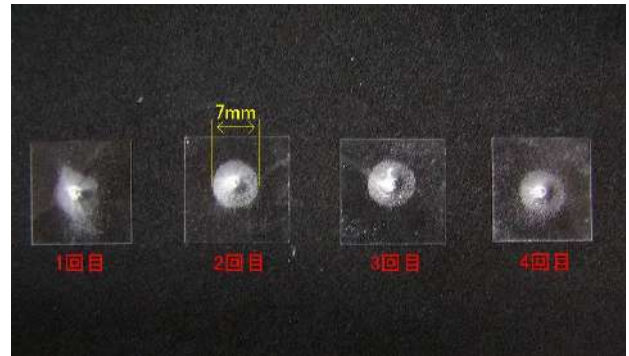


Fig.9 Results of succession process in same condition at RF power = 10[W] and 5[min] processing.

するスペクトルは大きくずれたものの、650~750[nm]に観測された 3 本は良く再現することができた。なお、電子密度を $10^{11}[\text{cm}^{-3}]$ 程度とした際に高く再現でき、電子温度は高周波出力とコイルの条件を変化させても 2.0~2.4[eV]として得られた。また、励起温度から推定した電子温度は同じ条件で 1.8~2.4[eV]程度となり、全体的に CR モデルに比べて低く得られた。この 2 種の結果は、各励起準位のポピュレーションに直接関わる分布関数を Maxwell-Boltzmann 分布と仮定したことから同程度の値となった。

他方、Fig.8 に有るようにガス温度の範囲はおよそ 400~550[K]で高周波出力の増加に伴って高くなるのが見て取れ、また、実験結果の処理（各コイル巻数のガス温度は 3 種の長さの平均値として扱っている）では、コイル長さから計算したプラズマ体積の増加には、必ずしも影響されていないことが分かった。

以上を踏まえ、高周波出力 10[W]、トーチから 1[mm]離

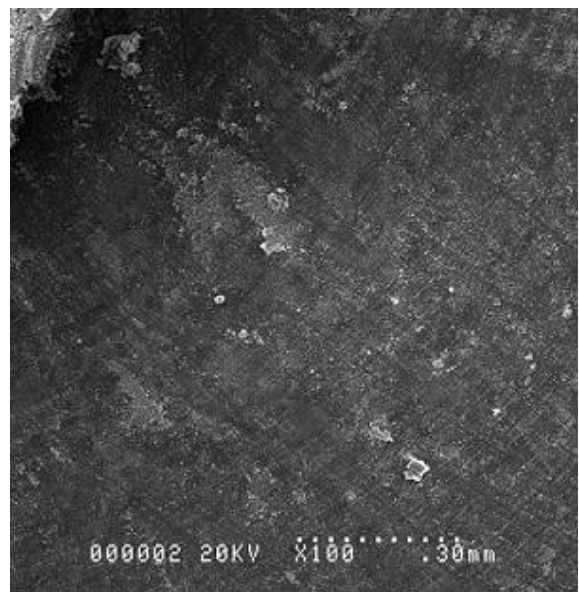
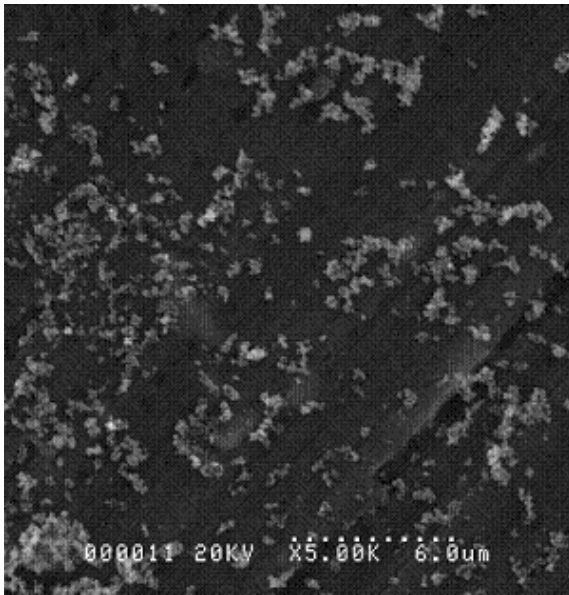
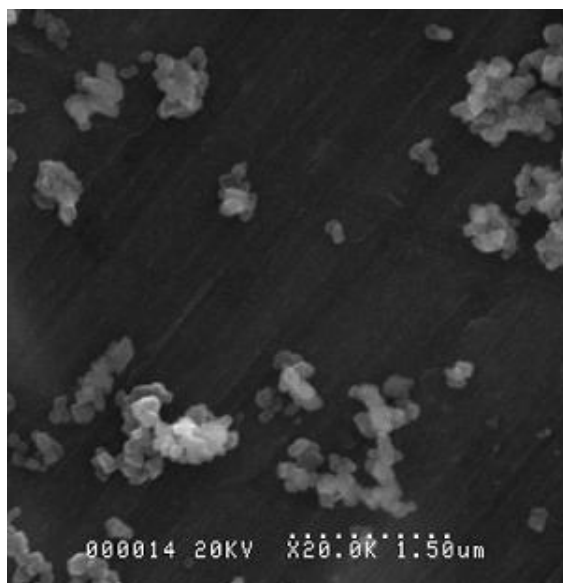


Fig.10 Observation on surface of TiO_2 film.

Fig.11 Observation on surface of TiO₂ film.

した位置に置いた基板の上に TiO₂ の成膜を行った結果を、Fig. 9 に示す。4 枚のガラス板を並べているのは、得られる TiO₂ 膜の形状に関する再現性を確認するためである。そして、4 回続けて行った結果は、いずれも直径 7[mm]程度の範囲にのみ堆積しているということが、目視でも確認することができた。但し、Fig. 9 では膜の位置を見やすくするため、あえて表面に付着している粉末を取り除いていない。

さらに、Fig.10~12 は SEM による TiO₂ 薄膜の表面観察結果である。いずれも撮影範囲全体に TiO₂ 薄膜が成膜されており、TiO₂ の粒子が表面に付着してはいるものの、資料台のカッターマークが確認できることから透明な膜ができていることが確認できた。

Fig.12 Observation on surface of TiO₂ film.

5. 結 言

- 1) 本研究で得られた電子温度については、励起温度からの推定と CR モデルによる同定という 2 種の方法で検討し、どちらも同程度の値として得られたことから、指標としては有効である。
- 2) プラズマの電子エネルギー分布関数を Maxwell-Boltzmann 分布とした理論では、現象の理解としては不十分である可能性が高い。補正理論の検討のためにも直接測定法を取り入れることが望ましい。
- 3) ガス温度が得られたことから、プロセス材料の選択性について検討が可能となった。
- 4) TiO₂ については、完全な粒子状態から透明な薄膜を得ることが確認できた。

参考文献

- (1) 橋邦英：“マイクロプラズマの基礎と展望”、応用物理学会誌、第 75 巻、第 4 号 (2006)。
- (2) I. Langmuir: “The Interaction of Electron and Positive Ion Space Charge in Cathode Sheaths”, Phys. Rev., Vol.33, (1929), pp.954-989.
- (3) I. Langmuir: “The effect of Space Charge and Initial Velocities on the Potential Distribution and Thermionic Current between Parallel Plane Electrodes”, Phys. Rev., 21(1923), pp.419 – 435.
- (4) I. Langmuir and K. T. Compton: “Electrical Discharges in Gas Part I Survey of Fundamental Processes”, Review of Modern Physics, 2-2 (1930), pp.123-242.
- (5) K. T. Compton and I. Langmuir: “Electrical Discharges in Gases, Part II Fundamental Phenomena in Electrical Discharges”, Reviews of Modern Physics, 3-2 (1931), pp.191-257.
- (6) L. Tonks and I. Langmuir: “A General Theory of The Plasma of an Arc”, Phys. Rev., 34-15 (1929), pp.876-922.
- (7) J. -S. Chang and J. G. Laframboise: “Probe Theory for Arbitrary Shape in a Large Debye Length, Stationary Plasma”, Phys. Fluids, 19-1, (1976), pp.25-31.
- (8) H. Amemiya et al.: “プローブ計測の基礎から応用まで”, J. Plasma Fusion Res., 81-7 (2005), pp.482-525.
- (9) T. Fujimoto: “Kinetics of Ionization-Recombination of a Plasma and Population Density of Excited Ions. IV. Recombining Plasma – Low-Temperature Case”, J.

- Phys. Soc. Jap. 49-4(1980), pp.1569-1576.
- (10) T. Fujimoto and R. W. P. McWhirter: "Validity Criteria for Local Thermodynamic Equilibrium in Plasma Spectroscopy", Phys. Rev. A, 42-11(1990), PP. 6588-6601.
- (11) 張替 寛司: 大気圧マイクロプラズマ重合装置による膜形成とそのバイオセンサへの応用、筑波大学大学院修士論文, (2006).
- (12) M. Goto, I. Murakami, T. Fujimoto:"2. スペクトルからわかること", J. Plasma Fusion Res. 80-1,(2004), pp.45-52.
- (13) プラズマ・核融合学会編:"プラズマの生成と診断—応用への道—", (2004).
- (14) P. Teulet *et al.*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer , 70(2001), pp. 159-287.
- (15) 日本機械学会編:"原子・分子の流れ 希薄気体力学とその応用", 共立出版株式会社.
- (16) M. Goto and T. Fujimoto, NIFS-DATA-43 (1997).
- (17) J. Janca and C. Tesaf, Masaryk University Brno, Czech Republic.

コバルトを添加した酸化チタン薄膜の作製とその磁気特性

山口一弘, 林永子*, 弥生宗男, 井上光輝**

Preparation of cobalt doped Ti oxide films and their magnetic properties

Kazuhiro YAMAGUCHI, Eiko HAYASHI, Kazuo YAYOI, and Mitsuteru INOUE

Abstract: In an attempt to obtain diluted ferromagnetic semiconductors, we prepared Co-doped TiO₂ films on glass substrates by sol-gel synthesis. X-ray diffraction patterns of films with Co low concentration C_{Co} under 5% and high C_{Co} such as 15% were assigned to anatase and rutile TiO₂, respectively. All films showed ferromagnetic behavior at room temperature. Their magneto-optical Faraday spectra were quite different from those of cobalt films and clusters. This result suggested that the origin of ferromagnetism is assigned to Co-substituted TiO₂.

1. はじめに

スピントロニクスは、電子の電荷とスピンの両方を同時に制御することで新しいエレクトロニクス分野の開拓を目指している。希薄磁性半導体は、InAs や GaAs などの III-V 族半導体に磁性原子（たとえば Mn）を添加した化合物で、半導体でありながら強磁性を示し、スピントロニクス材料の候補である¹⁾。これらは、近年の非平衡結晶成長技術の進歩により合成が可能となった材料である。

一方、ZnO や TiO₂ などのワイドギャップ半導体に磁性原子を添加した酸化物もスピントロニクスの基礎材料として研究されている²⁾。最近では、Cu などの非磁性原子をドーピングした場合でも、強磁性を示す結果が示されて注目を浴びている³⁾。また、これらの酸化物半導体は、環境への負荷が小さく、III-V 族半導体の製造プロセスに比べると、高度な結晶成長技術を必要としないなどのメリットがある。

本研究では、磁性原子として Co を選び、これを TiO₂ に添加することで、室温で強磁性を示す酸化物半導体の作製を試みた。作製にはゾル・ゲル法を用いて、単結晶基板上ではなく、ガラス基板上に成膜した。ここでは、Co 添加量に対して、試料の結晶構造、磁気特性、光学特性および磁気光学特性を報告する。

2. 実験方法

まず、チタニウムテトライソプロポキシドと酢酸コバルト・4水和物を 2-メトキシエタノールに溶解し、コーティング溶液を調製した。ここで、Co 添加量 C_{Co} を溶液調製時の Ti に対する Co の mol 比で定義する。次に、ガラス基板上 (Corning #7059) にスピントロニクスコーティングし、大気中 300°C、5min の前熱処理を施して成膜した。この工程を 4~6 回繰り返した後、 10^{-3} [Pa] 程度の真空中、500~650°C の種々の温度 T_v で、1h の真空中熱処理を施した。

結晶構造の同定には、X 線回折 (Cu-K α) を、磁気特性の評価には振動試料型磁力計を、吸収スペクトル測定には、分光光度計を用いた。磁気光学ファラデー特性の評価には、偏光面変調法を用いて、回転角のスペクトルを観測した。

3. 実験結果と考察

3.1 結晶構造

Fig.1 は、真空中熱処理温度 T_v に対する X 線回折 (XRD) パターンを示す。ここで、Fig.1(a)と(b)は、それぞれ Co 添加量 $C_{Co}=3\%$ と 15% の XRD パターンである。 $C_{Co}=3\%$ の試料ではアナターゼ型 TiO₂ に一致する回折線が見られ、熱処理温度と共に回折強度は増加する。また、アナターゼ型結晶は(101)配向していることが分かる。一方、 $C_{Co}=15\%$ の試

* 茨城高専専攻科修了生

** 豊橋技術科学大学

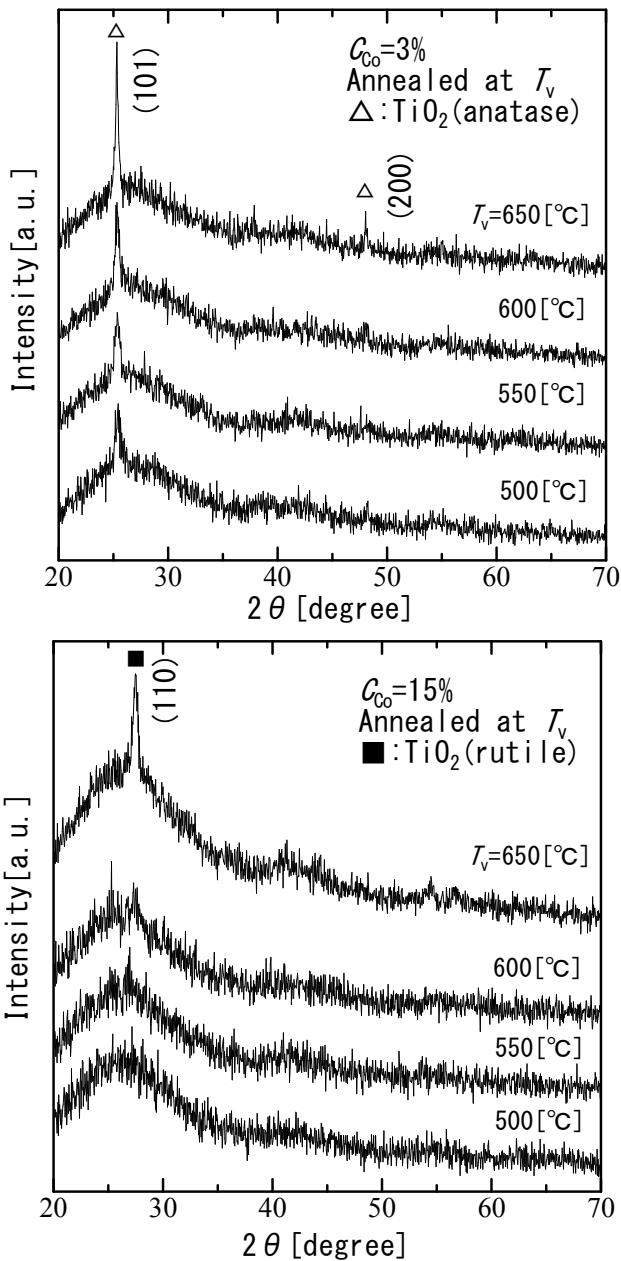


Fig.1 X-ray diffraction patterns of films annealed at T_v , where (a) $C_{Co}=3\%$ and (b) 15% .

料では、 600°C まで明確な回折線を示さないが、 650°C でルチル型 TiO_2 に一致する回折線を示す。また、ルチル型結晶は(110)配向していることが分かる。全体的にみると、5%以下ではアナターゼ型単相を、10%ではアナターゼ型とルチル型の両方を、15%ではルチル型単相を、20%ではルチル型と未同定の結晶相を観測した。

Fig.2 は、 C_{Co} に対するアナターゼ型 TiO_2 の(101)面間隔 $d(101)$ の変化を示す。ここで、 $T_v=650^\circ\text{C}$ である。 $d(101)$ は C_{Co}

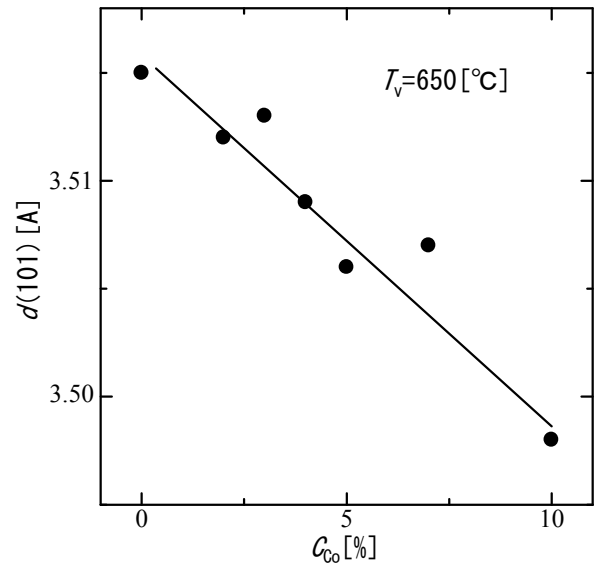


Fig.2 Spacing $d(101)$ vs. Co concentration C_{Co} .

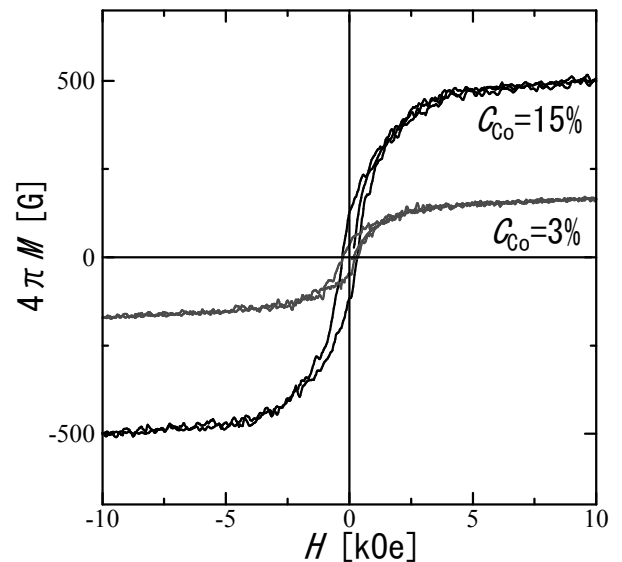


Fig.3 Magnetization curves of films with $C_{Co}=3\%$ and 15% .

に対してほぼ直線的に減少することが分かる。この原因の一つとして、 Co^{2+} が Ti^{4+} を置換するとき、電荷補償のために O^{2-} が欠損することが考えられる。一方、ルチル型では、 C_{Co} に対する面間隔 $d(110)$ の変化は観測されなかった。

3.2 磁気特性

Fig.3 は、 $C_{Co}=3\%$ と 15% の試料の、室温における磁化曲線を示す。両試料とも強磁性を示すことが分かる。Fig.4 は、 C_{Co} に対する飽和磁化 $4\pi M_s$ の変化を示す。アナターゼ型を示す C_{Co} の範囲では、飽和磁化は C_{Co} に比例して増加する。一方、ルチル型を示す範囲では、飽和磁化に大きな変化が見られない。

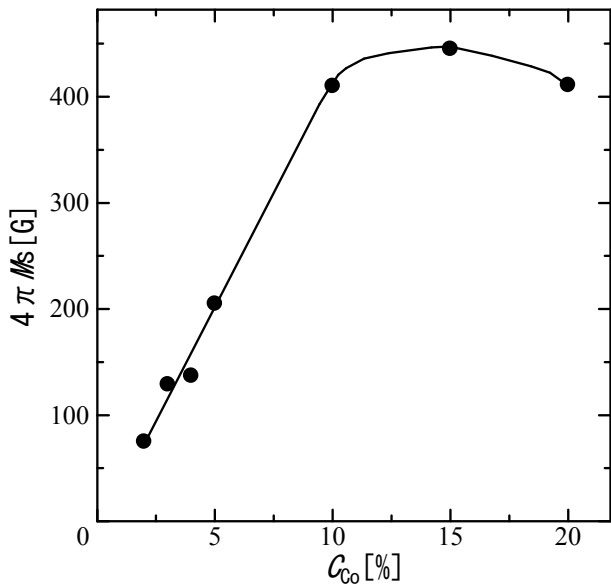


Fig.4 Saturation magnetization $4\pi Ms$ vs. C_{Co} .

$C_{Co}=3\%$ の試料の飽和磁化は、 $4\pi Ms=129[G]$ で、Co原子1個当たりのモーメントを算出すると、金属Coの場合と同程度の $m=1.6\mu_B$ である。また、 $C_{Co}=15\%$ では、 $4\pi Ms=445[G]$ 、 $m=1.0\mu_B$ である。

3.3 光学特性

Fig.5は、 C_{Co} に対する光吸収スペクトルを示す。但し、膜面からの反射などの補正は行っていない。スペクトルの脈動は試料面とガラス基板での多重反射によるものと思われる。すべての試料は高い透光性を持ち、吸収端は C_{Co} の増加と共に長波長側にシフトしていることが分かる。これはアナターゼ型とルチル型のバンドギャップの違いによるものであろう。すなわち、バルク値で比較すると、アナターゼ型は3.2[eV]、ルチル型は3.0[eV]のバンドギャップがあるために、試料はアナターゼ型からルチル型への変化に伴って、吸収端は長波長にシフトすると考えられる。

バンドギャップエネルギー E_g を評価するために、吸収スペクトルから、エネルギー $h\nu$ に対する $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{2}}$ の変化をFig.6に示す。 E_g は、 $C_{Co}=3\%$ で3.38[eV]、 $C_{Co}=10\%$ で3.32[eV]、 $C_{Co}=20\%$ で3.24[eV]となった。これらの値は、先に示したバルク値よりも大きい。一般的に、ドーパントや格子欠陥が導入されると、バンドギャップが広がることが知られている。作製した試料では、Coがドーパントとして働いていることや酸素欠損などが原因として考えられる。

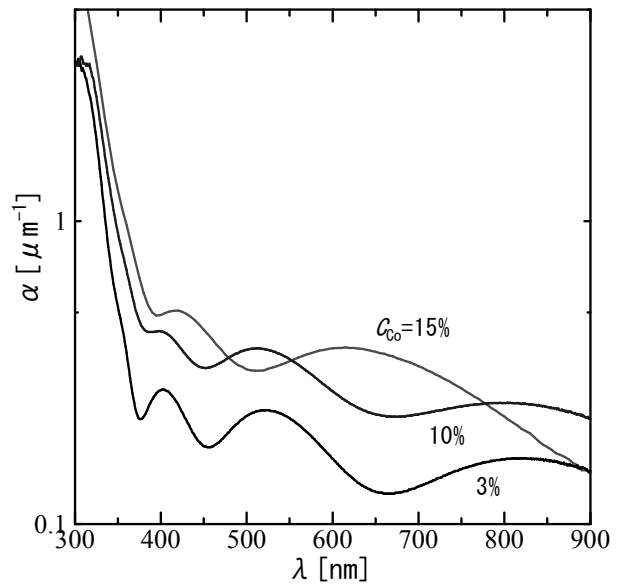


Fig.5 Optical absorption of films with $C_{Co}=3\%$, 10%, and 15%.

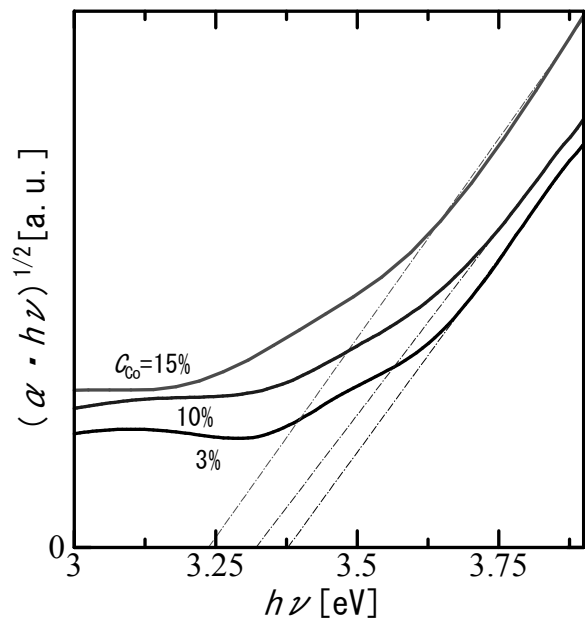


Fig.6 $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{2}}$ vs. $h\nu$ for films with $C_{Co}=3\%$, 10%, and 15%.

3.4 磁気光学特性

希薄磁性半導体は、磁性原子で半導体原子の一部を置換するわけであるが、置換せずに半導体中に磁性原子が析出する場合がある。そうすると、希薄磁性半導体の性質ではなく、析出物の磁性を見てしまうことになる。本研究においても、CoがTiO₂中に微粒子として析出している疑いはあ

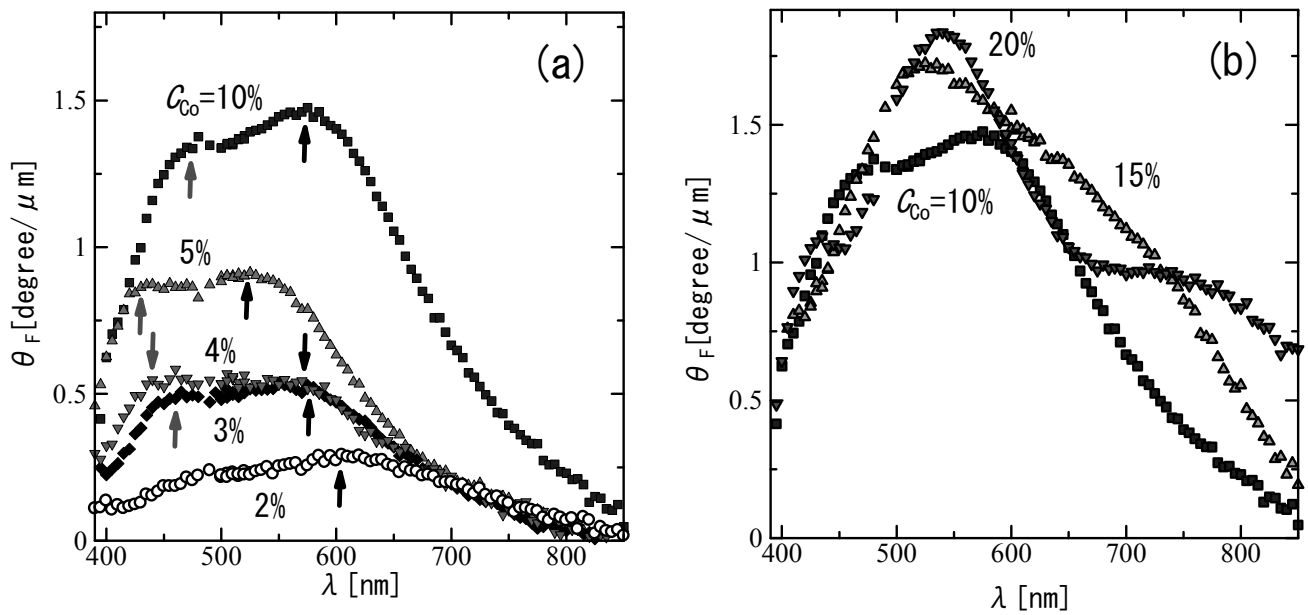


Fig.7 Faraday rotation spectra of films.

る。そこで、磁気光学ファラデー特性を評価し、強磁性の起源を考察した。

Fig.7 は、 C_{Co} に対する磁気光学ファラデースペクトルを示す。ここで、アナターゼ型を示す試料とルチル型を示す試料に大別し、それぞれのスペクトルを(a)と(b)に示した。比較のために、10%のものは重複して載せてある。これらのスペクトルは金属 Co と全く異なる。しかしながら、スペクトルの振る舞いは複雑である。(a)に示すように、アナターゼ型の試料のスペクトルでは、長波長側で C_{Co} に対してほぼ変化が見られない。ところが、短波長側に着目すると、 $C_{Co}=3\%$ の試料では、440[nm]と 560[nm]付近で非常にブロードなピークが見られ、 C_{Co} の増加と共に、短波長側にシフトしているように見える。一方、ルチル型の試料では、測定波長全体で複雑に変化する。例えば、 $C_{Co}=20\%$ では、550[nm]付近のピークと長波長側にブロードな盛り上がりが見られる。これらのスペクトルの原因は未だ分かっていない。

ところで、以前、我々は透明なプラスチック中に Co 微粒子を分散させた媒体を作製し、その磁気光学ファラデースペクトルが金属 Co のものと全く異なることを示した⁴⁾。しかしながら、Co 微粒子分散膜のスペクトルは、波長に対して単調に減少し、今回観測したスペクトルとは大きく異なる。このことから、作製した試料のスペクトルの起源は Co 微粒子によるものではないと考えている。しかしながら、

確実な根拠を示すためには、バンドギャップ付近での磁気円二色性を観測する必要がある。

4. まとめ

室温において強磁性を示す希薄磁性半導体を作製するために、TiO₂ に Co を添加した薄膜の作製を試みた。作製にはゾル・ゲル法を用いて、スピナーコートによりガラス基板上に成膜し、Co 添加量に対して、試料の結晶構造、磁気特性、光学特性、磁気光学ファラデー特性を調査した。これらの結果から、試料は、Co 添加量に応じて、アナターゼ型とルチル型の TiO₂ の結晶構造を示し、いずれの場合も、室温で強磁性を示した。磁気光学ファラデースペクトルは、金属 Co や Co 微粒子分散媒体のものと全く異なり、このことから、強磁性の起源は Co 微粒子の析出によるものではなく、Co 置換 TiO₂ の可能性が高いと考えられる。

参考文献

- 1) F.Matsukura et al., *Phy. Rev.* B57 (1998) R2037.
- 2) H.J.Lee et al., *Appl.Phys.Lett.* 81 (2002) 4020.
- 3) S.Duhalde et al., *Phys. Rev. B* 72 (2005) R161313.
- 4) A.Horikawa et al., *Mat.Sci.Eng.* A217/218(1996)348.

ディスクレスによるプログラミング演習室システムの開発

滝沢 陽三, 小飼 敬, 山田 真

Development and Maintenance of Diskless System for Programming Laboratory

Yozo TAKIZAWA, Kei KOGAI, and Makoto YAMADA

Abstract: Authors describe a programming laboratory based on the diskless system that is constructed under their design. The construction policies and results of maintenance are described, not only the techniques of diskless systems using Linux-based operating systems. They also describe that LiveCD of Linux-based OS is useful to construct the diskless system.

1. はじめに

本論文では、ディスクレスシステムの技術を用いて構築されているプログラミング演習室（情報工学演習室）システムについて報告すると共に¹⁾、導入の経緯や運用に関する諸問題について議論する。

2. 情報工学演習室のシステム運用

2. 1 演習室システムの経緯

本校情報処理センター管轄の演習室のうち、電子情報工学科棟 1 階の情報工学演習室のシステムはプログラミング演習に特化して構成されており、オペレーティングシステム (OS) として伝統的に UNIX 系 OS を使用している。初期には BSD を搭載したミニコンピュータをダム端末で使用するなどしていたが、安価な PC ハードウェアの性能向上に伴い、平成 9 年頃より、PC をクライアントマシンとして導入し、UNIX 系 OS (当初は Solaris) をそれぞれに搭載して利用するようになった。

クライアント・サーバ方式によるシステムの最大の問題点として、各クライアントマシンに導入するソフトウェアの保守作業に多大な負担がかかることが挙げられる。ユーザ情報の管理はサーバマシン側でネットワーク共有により一括して行うことが以前より可能だったが、各クライアントマシンのソフトウェア機能はクライアントマシン自身で担うのが一般的である。これは、ソフトウェアライセンスの問題に加え、ソフトウェア機能がグラフィカルインターフェース (GUI) をもつウィンドウシステムにまで需要が拡大し、ネットワークを介して文字情報のみやりとりすれば済んでいたダム端末方式と同じネットワーク共有システムを実現できないことが背景にある。このため、Windows や MacOS など、GUI 中心の操作環境をもつ他の OS を共同利用する場合も同様の問題を抱えている。

この問題点を解決するため、情報工学演習室では平成 15 年度より、クライアントマシンにハードディスクを持たせず、ソフ

トウェア機能の全てをサーバシステムとネットワーク共有する、ディスクレスシステムを採用している。ディスクレスシステムの基本的な考え方は、起動時にネットワーク経由でソフトウェア機能のほとんどをメモリ上に読み込み、メモリ空間の一部を仮想的なハードディスクとして用いることである。これにより、頻繁に実行される OS の基本機能などが、ネットワーク性能の制約なしに共同利用できるようになる。

ディスクレスシステムの問題点は、仮想ディスクとして別途利用できるだけのメモリをもっていなければならないこと、利用するソフトウェア機能がネットワーク経由で任意に複製することが許されているライセンスをもっていなければならないこと、の 2 つがある。情報工学演習室のシステムでは、平均的な PC よりも 2 倍程度のメモリ容量をもったハードウェアを導入すると共に、OS としてはフリーソフトウェアの Linux ベースの OS パッケージを使用している。

2. 2 業者製シン・クライアントによるシステム導入

平成 15 年度に導入されたシステムは、業者によって用意されたシン・クライアントのシステムとしてハードウェアおよびソフトウェアが構成されている。シン・クライアント (thin client) は一般的に、クライアント側に必要最低限の機能のみを処理させる仕組みを指すが、このシステムの場合は、クライアントマシンとして通常の PC ハードウェアをコンパクトな筐体に収めたものを製品として製作し、HDD なしのディスクレスマシンとしての動作保証を行っている。動作保証は、業者側が用意した Linux ベースのディスクレスシステムだけでなく、Windows ベースのディスクレスシステムも想定している。ただし、情報工学演習室はプログラミング演習に特化していることから、Linux ベース (VineLinux) のディスクレスシステムのみ導入している。一般的に、UNIX 系 OS をベースとしたシステムよりも Windows をベースとしたシステムの方が負荷が高く、結果として、快適な動作環境が得られている。クライアントマシンは、平成 15 年度導入の時点で Pentium4 2.4GHz、メモリ 512MB という性能だ

った。

導入されたディスクレスシステムの概要は次の通りである。

・クライアントマシンはHDDを持たない他は標準的なPCアーキテクチャであるが、当時は標準搭載が少なかったネットワークブート機能を備えていた（図1）。



図1 業者製シン・クライアント（旧システム）

・クライアント用OSとしてVineLinuxが採用されている。ディスクレス用の初期ブートイメージファイルは業者より提供されたが、イメージファイルの内容を本校側で変更することで、システム機能の修正などの対応を行うことができた。

・サーバマシンは、ブート用とアカウント情報・ファイル共有の2台が用意された（図2）。OSは双方ともフリー版のRed Hat Linuxを採用し、ウィンドウシステムはインストールしていない。



図2 旧システムのサーバマシン

・ブート用サーバは、クライアントのネットワークブート時に応答し、カーネルや基本システムファイル（RAMディスクイメージファイル）を送出すると共に、クライアント利用時に/usr等をファイル共有で提供する。これらの機能を提供するため、DHCP/TFTP/NFSの各サーバプログラムが稼働している。

・アカウント情報・ファイル共有サーバでは、NISによるアカウント情報の管理を行うと共に、NFSによるホームディレクトリおよび/usr/local等のシステム固有のファイル共有を提供している。

以上のシステムを約5年間運用してきたが、クライアント側のハードウェア障害は皆無であった。クライアント利用時においてソフトウェア的な障害で利用が継続できなくなる事例は見られたが、ユーザごとのアプリケーションソフト設定ファイルの障害がほぼ全ての原因であり、修復は迅速に行われた。サーバ側の障害については、ファイル共有サーバにハードウェア的なディスク障害が一度発生した。ホームディレクトリのあったディスクに障害が発生したため、新規HDDと交換した上で、バックアップファイルからの復元を行うことで対処した。

3 PCハードウェアによる独自構築の検討

3.1 独自構築の背景

平成15年度に導入したシステムのうち、シン・クライアント部分は5年間リースだったため、平成20年度中に更新する必要があった。しかし、リース期間は年度途中の終了だったため、上述のシステムを安価に買い取って継続利用できるようにすると共に、平成21年度から新規システムを導入・運用することとした。買い取り額はそれまでのリース額の4か月分で済んだため、平成20年度中の予算のみで買い取ることができた。

新システムは、旧システムとは異なり、汎用的なPC類を導入し、本校教職員側でディスクレスシステムを構築することとした。これは、業者開発のシステムはカーネルや基本ライブラリのバージョンアップに限界があること、ネットワークブート機能搭載のPCが普及していること、その普及に伴いUNIX系OSによるディスクレスシステム構築が極めて容易となったこと、などからである。また、昨今の予算状況の変化により、新規導入システムの予算額はより低くすることが求められていた。このため、新規システムは、安価なPCハードウェアを導入すると共に、ソフトウェア部分は本校の教職員で独自に構築することで、予算も大幅に抑えることを想定した。

新システムのハードウェア導入は平成20年度中に滞りなく行われた。クライアント用PCはCeleron 1.8GHz、メモリ1GBであり、ネットワークブート機能を備えている（図3）。また、サーバマシンはPentium Dual-Core 2GHz、メモリ1GB、320GBのハードディスクを搭載している（図4）。台数構成は旧システムと同じく、クライアントマシン50台、サーバマシン2台である。ただし、情報工学演習室はクライアントマシンとして教員用を含め46台しか置けないため、残り4台は予備マシンとして維持している。

なお、新システムのクライアントマシンは通常のPCハードウェアのため、従来のシン・クライアント用ハードウェアより筐体が大きくなっているが、情報工学演習室の机は大きさに余裕

があるため、現在の併用時でも特に問題にはなっていない(図5)。



図3 新システムのクライアントマシン



図4 新システムのサーバマシン



図5 クライアントマシンの比較

3. 2 独自構築の技術的要因

昨今の PC ハードウェアには、PXE (Preboot eXecution Environment) と呼ばれるネットワークブート機能が標準搭載されていることが多い。これは、Intel 社が策定した規格であり、主にネットワーク経由の OS 起動の初期段階に必要な機能を、Ethernet カードのファームウェアプログラムとして提供する。より具体的には、IP アドレスの動的配布のための通信方式である DHCP と、簡易ファイル転送方式である TFTP の、それぞれクライアント機能を組み合わせたものである。また、これらの方式でブートローダ (OS 本体を読み込むためのプログラム) をネットワーク経由で得るための PXE サーバが必要になる。初期の起動の流れは次のようになる。

- ・クライアントマシンの PXE が DHCP により接続ネットワーク (LAN) 全体に向けて自身の IP アドレスを要求する。この時、クライアントマシン自身の識別子として Ethernet の物理アドレス (MAC アドレス) が送付される。
- ・サーバマシンが MAC アドレスに対応づけられた IP アドレス (ディスクレスでは通常、あらかじめ固定アドレスとしてサーバ上で割り当てておく) を LAN 全体に送付する。この時、サーバマシン自身の IP アドレス情報も送付される。
- ・クライアントマシンの PXE が自身の IP アドレスとサーバマシンの IP アドレスを用いて、TFTP によりサーバに対してブートローダを要求する。
- ・サーバマシンはクライアントマシンにブートローダを送る。
- ・クライアントマシンの PXE はブートローダを読み込み、ブートローダに制御を移す。

PXE が直接 OS 本体を読み込まずブートローダを介して読み込むようになっているのは、PXE のファームウェアは通常 ROM に記録されており、ごく小さなプログラムコードしか用意できないため、OS 本体を読み込むのに必要な通信方式の全てを実現できないためである。PXE は、DHCP/TFTP の基本的なクライアント機能のみを用いてより大きなブートローダプログラムをメモリ (RAM) に読み込んで制御を移し、ブートローダがより高度な通信方式によってあらかじめ OS 本体を読み込むようにしている。なお、PXE のようにブートローダを読み込むためのプログラムを IPL (Initial Program Loader) と呼ぶことがある。IPL は、ネットワークブートだけでなく HDD など起動可能な様々なデバイスからの起動 (ブート) に対応していることが多い。システムの起動に関する一連の処理はブートストラップ (bootstrap) と呼ばれている。

Linux ベースの OS については、PXELinux と呼ばれる PXE 対応ブートローダが利用可能である²⁾。PXELinux はクライアントマシンに読み込まれた後、Linux カーネルや RAM ディスクイメージファイルをネットワーク経由で読み込み、OS 本体であるカーネルに制御を移すことで OS 起動を完了する。ただし、メモリ領域の一部をシステムハードディスクとみなして稼働しなければならないため、カーネル自身もディスクレスであることを想

定したものにしておかなければならない。また、TFTP は大きいサイズのファイルを読み込むことができないため、カーネルやイメージファイルはファイル共有システムである NFS で読み込まれることが多い。

3. 3 Linux ベースの OS のディスクレス化

前節の通り、Linux ベースの OS を起動するには、DHCP/TFTP/NFS サーバ機能を有し、ブートローダプログラムの準備や諸設定を行ったサーバマシンが必要である。また、読み込まれる Linux カーネルはメモリ領域の一部をシステムハードディスクとみなして稼動するよう再構築しておかなければならず、基本システムファイル部を RAM ディスクイメージファイルとして作成しておかなければならない。また、ディスクレス化するか否かに関わらず、ユーザ情報の一括管理を行うためのサーバ機能 (NIS) やユーザ登録作業、ユーザ領域 (ホームディレクトリ) 等をネットワーク共有するための諸設定も必要である。新システムは旧システムと同じく、ディスクレス化に関わる部分をブートサーバ、それ以外のユーザ管理・ファイル共有などの部分をファイルサーバとして構築することを想定している。

ディスクレス化に関わる部分の構築手順は特に明確になっていないため、今回の演習室システム構築にあたり、筆者らは手順をまとめている。概要は次の通り。

- ・ブートサーバに必要な OS 等をインストールし初期設定する。
- ・各クライアントマシンの MAC アドレスを調べる。
- ・調べた MAC アドレスを元に DHCP サーバを設定する。
- ・PXELinux を用意し、TFTP サーバを設定する。
- ・クライアントマシンを起動し、PXELinux 稼動を確認する。
- ・ディスクレス用の Linux カーネルを構築する。
- ・PXELinux の設定ファイルで構築したカーネルの指定を行う。
- ・クライアントマシンを起動し、カーネル起動まで確認する。
- ・RAM ディスク (システム) イメージファイルを作成する。
- ・PXELinux の設定ファイルでイメージファイルを指定する。
- ・クライアントマシンを起動し、システム起動まで確認する。

構築手順が一般的には明確になっていないのは、サーバシステムの OS は必ずしもクライアントシステムと同一のものを用意しなくても良く、DHCP/TFTP/NFS サーバ機能を提供さえすれば実現可能であるためと考えられる (これらのサーバ機能の導入・設定方法は、OS や実装プログラムごとに手順や仕組みが全く異なる)。筆者らは当初、OS の基本パッケージが比較的小さい NetBSD/i386 (インストールパッケージの大きさが 250MB 弱) を用いてブートサーバの試作を行ったが、クライアント側システムのバージョンアップを容易とするため、現在はサーバシステムにもクライアントマシンと同じ Linux ベースの OS パッケージを用いている。

4. 新システム構築の実際と課題

筆者らは前章にて述べた手順や方針でディスクレスシステムを構築した。利用した Linux 系 OS は Ubuntu Desktop であり、実際には LiveCD と呼ばれる、CD-R に焼いて起動できる CD イメージファイルを用いている。これは、基本システムファイル部を構成する RAM ディスクイメージファイルをゼロから構築する必要がないためである。ただし、そのままではログイン処理が行われない管理者 (root) 権限のみの利用となってしまうため、イメージファイル内を改造し、別途用意される NIS サーバと連動するよう修正しなければならない。この修正はディスクレス化とは別の対応となるので、本論文では詳細を省略する。

Ubuntu Desktop の LiveCD による起動時間 (クライアントマシンの電源を入れてからデスクトップ環境が利用できるようになるまでの時間) は旧システムとほぼ同じであった。ネットワーク機能 (100Mbps) を含めてハードウェアの性能は旧システムとあまり変わらない一方、稼動ソフトウェアの規模は大きくなっていることから、事前に想定された以上の良好な結果と考えられる。

今後の課題として、システムバージョンアップを容易とする再構築手順の確立が挙げられる。旧システムの最大の問題点はカーネルを含むシステム部のバージョンアップの困難さであるが、今回構築した LiveCD を利用したシステムは、今後の OS のバージョンアップ版公開に併せて迅速に追従することが可能と考えられる。しかし、LiveCD はあくまで CD ドライブからの起動を想定しているため、最終的には通常システムと同じ利用環境を期待するディスクレスシステムとは概念が異なる。このため、LiveCD への改造は少々時間がかかる上に、LiveCD の内容を確認しながら進めなければならないため、手順を定めて半自動的にバージョンアップを行うことができない。解決策のひとつとして、クライアントマシンの 1 台に構築用の HDD を加えてモデルマシンとし、そのマシンに対するバージョンアップとシステムディスクのイメージファイル生成を半自動的に行う手順を明確にすることが考えられる。

また、今後のハードウェア不良に伴うクライアントマシン交換を想定した場合、複数のハードウェアを対象とした起動の仕組みを用意しなければならない可能性がある。これは、上記バージョンアップ手順の一部として組み込むことが適切と考えられる。

参考文献

- 1) 滝沢, 他: ディスクレスによるプログラミング演習室システムの運用, 第 29 回高等専門学校情報処理教育研究発表会講演論文集(2009).
- 2) The Syslinux Project, <http://syslinux.zytor.com/>.
- 3) Diskless NetBSD HOW-TO, <http://www.netbsd.org/docs/network/netboot/>

テトラフェニルポルフィリン誘導体のバナジル(IV)錯体の簡便・高収率な合成法の開拓

蝦名 不二夫、安部 慎一郎、小松崎 秀人、佐藤 稔、滑川 真人、石田 明寛

The Study on Convenient and High-yield Preparation of Vanadyl(IV) Complexes with Tetraphenylporphyrin Derivatives

Fujio EBINA, Shin-ichiro ABE, Hidehito KOMATSUZAKI, Minoru SATOH, Masato NAMEKAWA, and Akihiro ISHIDA

Abstract: To develop the convenient and high yield preparation of vanadyl(IV) complexes with tetraphenylporphyrin derivatives, several methods have been examined. For the synthesis of vanadyl(IV) complexes with tetraphenylporphyrin(TPP) and its derivatives having electron-donating groups, the target complexes were easily obtained by refluxing the corresponding porphyrins and vanadium(III) alkoxide in dimethylacetamide(DMAc), isolating the crude products with filtration from the mixture of the reaction solution and water, and purifying the crude products with silica gel chromatograph. The preparation of vanadyl(IV) complexes with the TPP derivatives bearing electron withdrawing groups has been successively carried out by reflux of the porphyrin and vanadyl(IV) acetylacetonate in either 1,2,4-trichlorobenzene(TCB) or dimethylsulfoxide(DMSO), removal of the solvent in vacuo, and purification of the crude products with silica gel chromatograph. The vanadyl(IV) complexes with anionic TPP derivatives have also been synthesized using vanadyl sulfate and the anionic porphyrins by refluxing in 1,2-glycol. The crude products were easily isolated from the mixture of the reaction solution and excess amounts of acetone, and purified by alumina chromatograph.

1. はじめに

1-1. バナジウム及びそのポルフィリン錯体の概要と機能

バナジウムは原子番号 23 の第一遷移元素であり、工業的にはその酸化物である五酸化バナジウムがナフタレンから無水フタル酸を合成するための酸化触媒として有名である。生物界では、ホヤなどの原索動物の血中に存在するヘモバナジンが、当初、ヘモグロビン様の呼吸色素と考えられていたが、その後、酸素運搬能がないことが判明し、その機能は未だ不明のままである¹⁾。ただし、バナジウムタンパクが何らかの酵素機能を果たしていることは十分推察される。また、*A.nodosum* や *C.officinalis* などの海藻中には、ハロゲン化された天然有機物がよく見出され、バナジウムを活性点とする *haloperoxidase* がこれら化合物のハロゲン化に関与していることが知られている²⁾。この *haloperoxidase* 活性は通常の鎖式アミン配位子を有するバナジウム(V)錯体を用いたモデル系でも、再現されることが報告されている³⁾。

一方、近年、図1に示したテトラ(4-スルフォニルフェニル)ポルフィリン(TPPS)のバナジル(IV)錯体が血糖値を下げるインシュリン様活性を有していることが報告され⁴⁾、バナジル(IV)ポルフィリン錯体の機能として注目されている。インシュリンは膵臓で作られ、血糖値を下げる働きをするホルモンであるが、その産生機能が欠如した病気が糖尿病である。現在、この大きな社会問題となっている糖尿病の治療は、遺伝子組み換え技術で作られるヒトインシュリンの皮下注射または重い副作用を持つ合成薬剤の投与が主流であり、患者は肉体的、精神的に負担を強いられているが、バナジル(IV)ポルフィリン錯体は経口投与が可能

で毒性が低いなどの理由から治療薬への応用が期待されている^{5) 6)}。また、バナジル(IV)ポルフィリン錯体はヘム酵素の補欠分子であるヘムの代用品となる可能性も秘めている

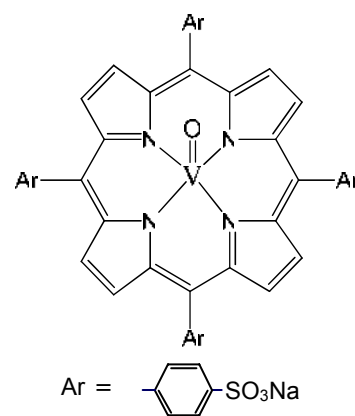
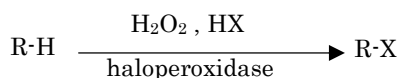


図1. バナジル(IV)TPPS錯体

る。ヘムとは、鉄プロトポルフィリン錯体の総称であり、ヘム酵素の活性中心であるが、これをバナジル(IV)ポルフィリン錯体に置き換えることにより、これまで知られているヘム酵素の機能を飛躍的に増幅したり、まったく異なった反応パターンへと誘導できる可能性を秘めている。例えば、典型的なヘム酵素であるチトクロムP-450は有機物への酸素添加酵素であり、各種金属ポルフィリンを用いた簡単なモデル系反応がいくつか報告されている。これをバナジル(IV)ポルフィリン錯体で行うとどのような特性を示すか興味深い。さらに、上記の非ヘム酵素である *haloperoxidase* のモデル反応についてもバナジル(IV)ポルフィリン錯体で代替できないかという疑問も湧いてくる。*haloperoxidase* の反応は下に示すとおりであり、過酸化水素により高酸化状態になったバナジウム錯体が X⁻イオンを酸化して X⁺イオン(あるいは XO⁻イオン)に変え、これが有機基質と反応してハロゲン化物が生成すると考えられている。したがって、バ

バナジル(IV)ポルフィリン錯体を過酸化水素で酸化して高酸化状態にできれば、haloperoxidase 様活性が再現されるは

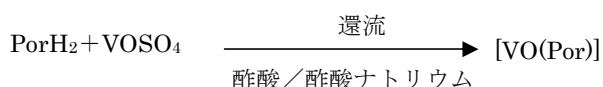


ずである。ハロゲン化アルキルは、求核反応、求電子反応、ラジカル反応、クロスカップリングなどの有機合成反応において試薬として用いられている大変重要な化合物であることから、アルカンをハロゲン化物に直接変換できるこの反応は大変重要である。

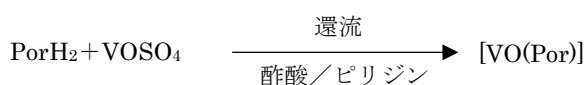
このように、バナジル(IV)ポルフィリン錯体には、いろいろな未知の機能が秘められていると思われるが、その探索のためには、まず、いろいろなタイプのバナジル(IV)ポルフィリン錯体の合成法を確立しておく必要がある。

1-2. バナジル(IV)ポルフィリン錯体の従来の合成法

バナジル(IV)ポルフィリン錯体の従来の合成法をまとめると、まず始めに、1956年、Erdmanらはエチオポルフィリンのバナジル(IV)錯体を得るために、バナジウム源を硫酸バナジル、反応溶媒を酢酸、脱プロトン剤を酢酸ナトリウムとして、エチオポルフィリンと共に還流する合成法を確立した。この合成法は、合成時間が2から3時間と比較的短時間であり、さらに定量的であった⁷⁾。

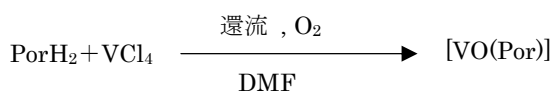


また、Linらは、1996年、上記合成法において、脱プロトン剤をピリジンに変更して、テトラフェニルポルフィリン(TPPH₂)に適用した。この時、合成時間は4時間とエチオポルフィリンの場合と同様に、比較的短時間であり、目的錯体も定量的に得られたが、バナジウム源である硫酸バナジルをポルフィリンの100倍量使用するという難点があった⁸⁾。このことから、Erdmanらが確立した合成法は、エ



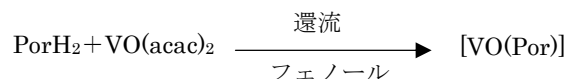
チオポルフィリンのような電子供与基を有するポルフィリンのバナジル(IV)錯体の合成には適当であるが、TPPH₂のような電子吸引基を有するポルフィリンのバナジル(IV)錯体の合成にはあまり適さないと考えられる。

1970年には、Alderらがポルフィリンと四塩化バナジウムをジメチルホルムアミド(DMF)中で還流する合成法を報告している⁹⁾。しかし、反応の完結にかなりの時間がか



かることや、バナジウム源として用いた四塩化バナジウムは我が国では入手しづらいうえに、溶媒中の水分と反応し、すぐさま加水分解して沈殿してしまうため、取扱いに注意を要するという問題がある。

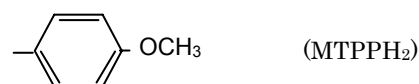
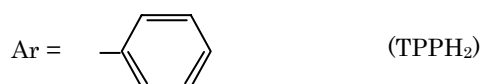
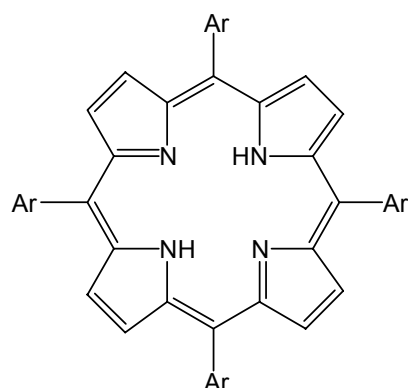
一方、Buchlerらはバナジウム源として酸化バナジウムアセチルアセトナト、VO(acac)₂を用い、フェノール中で還流する合成法を確立している⁹⁾。この合成法は高温でアセチルアセトナトを熱分解する必要があるが、反応時間が2から3時間と短時間であり、非常に定量的であるという利点があり、さらに、酸化バナジウムアセチルアセトナ



トが熱分解することで放出されるアセチルアセトナートイオンが脱プロトン剤の役割を果たすため、特に脱プロトン剤を必要としない。問題は劇物のフェノールを溶媒として用いていることであり、取扱いに注意を要することや、実際にこの合成法を試してみると、反応終了後、フェノールの除去が容易ではないということが判明した。

このように、バナジル(IV)ポルフィリン錯体の合成法はいくつか知られているが、汎用的で簡便な合成法が十分確立されているとは言い難い。そこで、本研究では、バナジル(IV)ポルフィリン錯体の新たな機能の探索を目指して、まず、各種タイプのバナジル(IV)ポルフィリン錯体の簡便で高収率な合成法を開拓することにした。

なお、本研究で使用したポルフィリン類はテトラフェニルポルフィリン(TPPH₂)及びその各種誘導体であり、電子供与性 TPP 誘導体としてテトラ(p-メトキシフェニル)ポルフィリン(MTPPH₂)、電子吸引性 TPP 誘導体としてテトラ(4-クロロフェニル)ポルフィリン(CTPPH₂)、テトラ(2,6-ジフルオロフェニル)ポルフィリン(F₈TPPH₂)、テトラ(2,3,4,5,6-ペンタフルオロフェニル)ポルフィリン(F₂₀TPPH₂)、陰イオン性 TPP 誘導体としてテトラ(4-スルホフェニル)ポルフィリン(TPPSH₂)、テトラ(2,6-ジフルオロ-3-スルホフェニル)ポルフィリン(F₈TPPSH₂)を用いた。



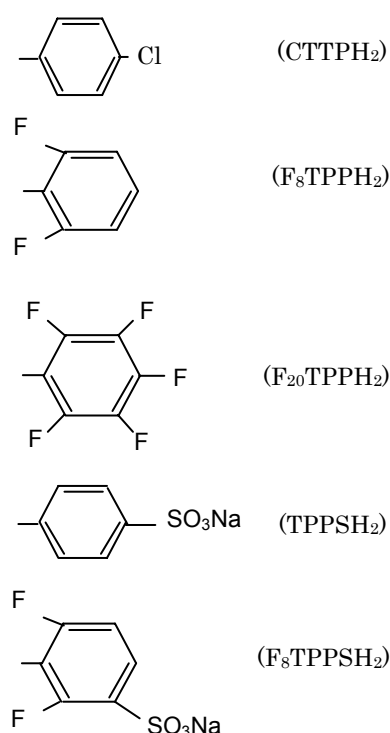


図2. 本特別研究で使用したポルフィリン類

2. 実験及び結果と考察

2-1. TPPH₂ 及び電子供与性 TPP 誘導体のバナジル (IV) 錯体の新規合成法

新たなバナジル(IV)TPP 錯体の合成法の開拓にあたり、まず、バナジウム源の選定から始めた。通常、バナジル(IV)錯体の合成では、単塩である三塩化バナジウム(III)、VCl₃、や硫酸バナジル(IV)、VOSO₄、がよく用いられるが、前者については、加水分解しやすく、塩化水素を発生して水酸化物の沈殿を生じるという難点がある。また、後者については、バナジル(IV)イオンのイオン半径が大きく、錯形成しづらいので、反応には比較的高温が必要であるという特徴が考えられる。さらに、酸化バナジウムアセチルアセトナトもバナジウム源に用いられるが、この場合も酸化バナジウムアセチルアセトナトを熱分解する必要がある、190℃以上の高温が必要である。ただし、この場合は、アセチルアセトナトイオンが脱プロトン剤として機能し、特に脱プロトン剤を必要としない利点もある。

一般に、金属錯体合成において、金属源は単純なものの方が簡便であり、反応温度もあまり高くなくことが望ましい。その観点で言えば、三塩化バナジウムが一番好ましいが、上記のとおり難点もある。ただし、この難点は三塩化バナジウムをアルコールに溶かして加熱し、バナジウムアルコキシドに変換すれば簡単に解決されるだけでなく、アルコキシドイオンが脱プロトン剤になるという利点も生じてくる。そこで、バナジル(IV)TPP 錯体の新規合成法では、

バナジウムアルコキシドをバナジウム源とすることにした。

また、これに基づき、反応溶媒を選定する必要があるが、あまり高温を必要としないことから、沸点が150℃~160℃の非プロトン性溶媒が好ましいと思われ、ジエチレングリコールジメチルエーテル(ダイグライム)、ジメチルホルムアミド(DMF)、ジメチルアセトアミド(DMAc)などを候補とした。しかしながら、ダイグライムは過酸化物を含み、副反応を起こしやすく、また DMF は Alder らの報告から反応が遅いことが知られていたため、取りあえず、DMAc を反応溶媒とすることとした。

実験方法としては、0.5g(8.13×10⁻⁴mol)の TPPH₂ を 100ml の DMAc に入れ、還流し、沸騰が始まってからポルフィリンの3倍モル量のバナジウムアルコキシドを入れ、空気開放系にて24時間還流を行った。なお、バナジウムアルコキシドは、ポルフィリンの3倍モル量である0.38g(2.44×10⁻³mol)の三塩化バナジウムを一度エタノールに溶かしてホットプレートを用いて加熱し、エトキシドにした後、反応溶液の温度を下げないようにヘキサノールを加えてアルコール交換を行いながら加熱濃縮し調製した。また、バナジウムアルコキシドを反応溶液に加える際、残存している塩化水素がある場合はトリエチルアミンで中和した。反応終了後、反応溶液を大量の水に注ぎ、そこに飽和食塩水を加えて溶液の極性を上げることで目的錯体を効率よく沈殿させ、濾別した。粗目的錯体は乾燥後、シリカゲルカラムクロマトグラフ(展開溶媒: 塩化メチレン)で最終精製を行った。赤紫結晶。収率は88%であった。

図3には本法(以下、合成法Iと略す。)における吸収スペクトルの経時変化を示した。1時間後のスペクトル(A)では、ほとんどTPPH₂のスペクトルであり、400nm付近にソーレ吸収帯が、515、550、590、645nm付近にQ吸収帯がみられる。一方、反応終了後の吸収スペクトル(C)においてはTPPH₂のスペクトルパターンは完全に消失し、バナジル(IV) TPP 錯体のソーレ吸収帯が長波長側にシフトして415nm付近に、Q吸収帯も一本の吸収帯が547nm付近に観測され、Linらの報告と一致した⁸⁾。この吸収スペクトルの経時変化から、本法によるバナジル(IV)TPP 錯体の合成には24時間を要することが判明したが、バナジウム(III)アルコキシドの添加量をさらに過剰にすると反応時間が短縮されることも見出した。

また、図4に合成したバナジル(IV)TPP 錯体のIRスペクトルを示す。1000cm⁻¹付近にV=Oの伸縮振動が見られ、このことから目的物であるバナジル(IV)TPP 錯体が生成していることが確認された。

合成法Iの利点をまとめると、①バナジウム源として単純なバナジウムアルコキシドを用いて、TPPH₂とDMAc中で還流するだけで、目的錯体を簡便・高収率で調製できること、②目的錯体の粗生成物が反応溶液を水に注ぎ濾別するだけで簡単に得られること、③アルコキシドを用いているので、他の脱プロトン剤は不要であること、④空気開放下で還流を行うだけで、バナジウム(III)からバナジウム

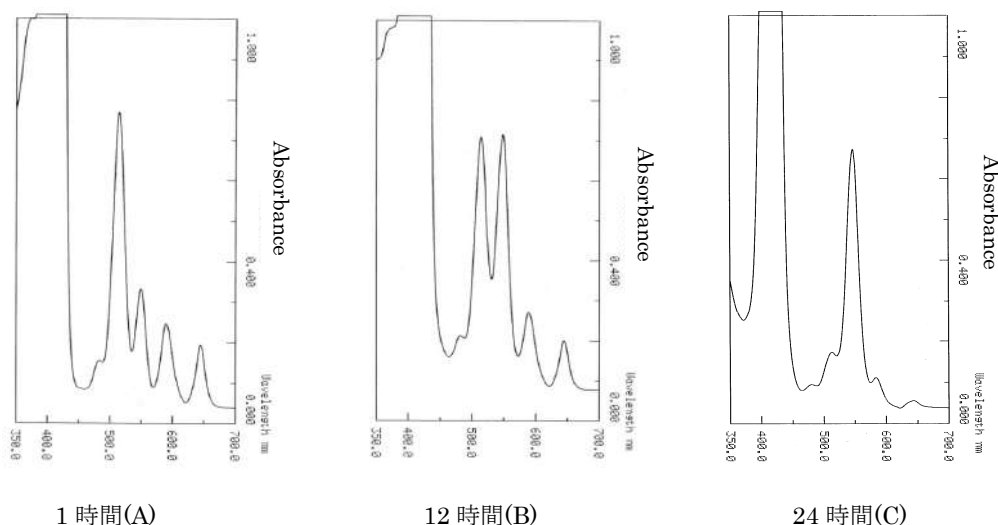


図3. バナジル(IV) TPP 錯体の合成における吸収スペクトルの経時変化

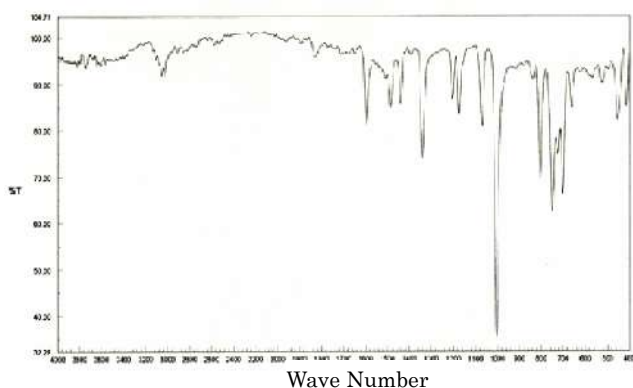


図4. バナジル(IV) TPP 錯体の赤外吸収スペクトル

(IV)への酸化が容易に達成されること、などが挙げられる。一方、合成法 I の欠点として、合成時間がやや長いことが挙げられるが、金属源の添加量を増すことにより、この問題も解消される。

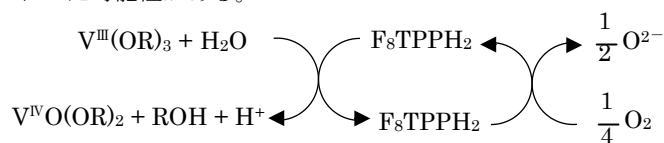
なお、合成法 I をフェニル側鎖にメトキシ基の付いた電子供与性 TPP 誘導体である MTPPH₂ のバナジル(IV)錯体の合成に適用したところ、バナジル(IV) TPP 錯体の合成と同様に、収率 90% で赤紫色の目的錯体が得られた。

2-2. 電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV) 錯体の新規合成法

次に、電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の合成法の検討に移り、まず、TPPH₂ のバナジル(IV)錯体に関して新たに開拓した合成法 I を適用することにした。始め、フェニル側鎖の 4 位に塩素の付いた比較的電子吸引性の弱い CTPPH₂ をポルフィリンとして用いたが、3 倍モル量のバナジウムアルコキッドでは反応が進行しないことが判明した。これは、バナジウムイオンのポルフィリン環への錯体の安定度定数が小さいことが原因であると考えられる

ため、Lin らが行ったほどではないが、バナジウムアルコキッドを過剰量とすることで反応は進行すると考えた。そこで、バナジウムアルコキッドを CTPPH₂ の 20 倍モル量とし、再度、バナジル(IV)CTPP 錯体の合成を試みたところ、86% の収率で紫色の目的錯体を得ることができた。次に、フェニル側鎖の 2,6 位に塩素より電子吸引性の強いフッ素が 2 つ付いた F₈TPPH₂ のバナジル(IV)錯体の合成に合成法 I を適用したところ、20 倍モル量のバナジウムアルコキッドを用いても反応の進行は見られなかった。そこで、電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の合成に汎用的に適用できる合成法をさらに開拓することにした。

まず、F₈TPPH₂ のバナジル(IV)錯体が生成しなかった原因を考えると、バナジウム(III)アルコキッドが、何らかの触媒作用で酸化されて、錯形成しづらい他の化学種、例えば、バナジル(IV)アルコキッドあるいはその難溶性物に変わった可能性がある。



すなわち、F₈TPPH₂ のような電子吸引性 TPP 誘導体は電子不足状態にあり、酸化力があると考えられるので、バナジウム(III)イオンをバナジル(IV)イオンに酸化し、自身は奪った電子を溶存している酸素に渡して、元に戻るような機構が可能である。もし、この機構が正しければ、バナジウム(III)イオンはポルフィリン環に挿入される前に酸化され、よりイオンサイズの大きなバナジル(IV)イオンとなり、錯形成が困難になったことが説明される。この仮説は、今後、ESR を用いて検証する予定である。

それ故、電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の新たな合成法では、バナジウム源として、始めからバナジル(IV)化合物を用いることにした。その候補には、硫酸バナジルと酸化バナジウムアセチルアセトナトがあるが、脂溶

性溶媒への溶解性及び脱プロトン剤が不要であるとの観点から、後者を使用することにした。また、反応溶媒としては、酸化バナジウムアセチルアセトナトを熱分解する必要があるため 190°C以上の沸点を持ち、かつ、バナジル(IV)源もボルフィリンも両方溶かすものである必要があり、沸点が 213°Cの 1,2,4-トリクロロベンゼン(1,2,4-TCB)を選定した。

0.5g(6.58×10^{-4} mol)の F_8 TPPH₂とその 5 倍モル量の酸化バナジウムアセチルアセトナトを 100ml の 1,2,4-TCB に入れ、空気開放下で還流した。反応の進行具合は前記のように吸収スペクトルで追跡し、12 時間で反応が完結したことを確認した。反応終了後、真空蒸留にて溶媒を除去し、シリカゲルカラムクロマトグラフ(展開溶媒: 塩化メチレン:ヘキサン=1:1)で最終精製した。収率は 93%であった。

図 5 に本法(以下、合成法 II と略す。)により得られた電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の吸収スペクトルを示す。バナジル(IV)CTPP 錯体の吸収スペクトルでは 420nm 付近にソール吸収帯が、550nm 付近に一本の Q 吸収帯が見られる。一方、バナジル(IV) F_8 TPP 錯体の吸収スペクトルでは、410nm 付近にソール吸収帯が、540、575nm 付近に 2 本の Q 吸収帯が見られる。さらに、バナジル(IV) F_{20} TPP 錯体の吸収スペクトルでは、410nm 付近にソール吸収帯が、540、580nm 付近に Q 吸収帯が見られる。

また、合成法 II を F_8 TPPH₂ より電子供与性の強い TPP 誘導体である、フェニル側鎖にフッ素が 5 つ付いた F_{20} TPPH₂ のバナジル(IV)錯体の合成に適用したところ、収率 94%で赤紫色の目的錯体を得た。

ここで、合成法 II の利点をまとめると、①入手容易な酸化バナジウムアセチルアセトナトとボルフィリンを 1,2,4-TCB 中で還流するだけで、簡便にして高収率にバナジル(IV)錯体が合成できること、②脱プロトン剤が不要であること、③反応溶媒が除去さえできれば、精製も簡単であること、などである。一方、欠点としては、反応溶媒で

ある、高沸点の 1,2,4-TCB を真空系で除去する必要があり、煩雑な操作を要することである。ただし、反応溶媒を回収して再利用するという観点からすればあまり欠点とも言えない部分もあるが、やはり、合成法は簡単な操作から成り立っていた方が優れていることは確かである。そこで、CTPPH₂を用いて、目的錯体の単離が容易になるような合成法 II の変法をさらに検討した。

まず、変法 A として、Buchler らの行ったフェノールを反応溶媒とする合成法を電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の合成に適用できるか検討した。0.25g(3.32×10^{-4} mol)の CTPPH₂とその 5 倍モル量の酸化バナジウムアセチルアセトナトならびに沸点上昇剤として臭化リチウム 6.5g を 50ml のフェノールに入れて 18 時間還流したところ、吸収スペクトルから反応の完結を確認した。反応終了後、反応溶液を熱水に注いで析出した目的錯体を濾別・乾燥し、シリカゲルカラムクロマトグラフ(展開溶媒: 塩化メチレン)で最終精製した。その結果、見かけの収率は 90%程度であった。しかしながら、精製物はフェノール臭を有し、完全にフェノールが除去されていないことが判明した。なお、この変法 A で、沸点上昇剤として臭化リチウムを用いたのはフェノールの沸点が 182°Cとやや低めであり、190°C以上の反応温度を確保しなかったからであり、反応溶液を熱水に注いだのは、フェノールの水への溶解性を十分確保しなかったからである。変法 A は簡便ではあるが、①フェノールは劇物であり、取扱いに注意が必要であること、②フェノールの除去に予想以上に手間取ることなどがあり、あまり良い変法とは言えなかった。

次に、変法 B として、沸点が 189°Cであり、水にも可溶性なジメチルスルホキシド(DMSO)を反応溶媒として用いた合成系を検討した。0.5g(6.64×10^{-4} mol)の CTPPH₂とその 5 倍モル量の酸化バナジウムアセチルアセトナトを 100ml の DMSO に入れ、吸収スペクトルで追跡しながら 18 時間還流した。反応終了後、合成法 I と同様に反応溶液を水に

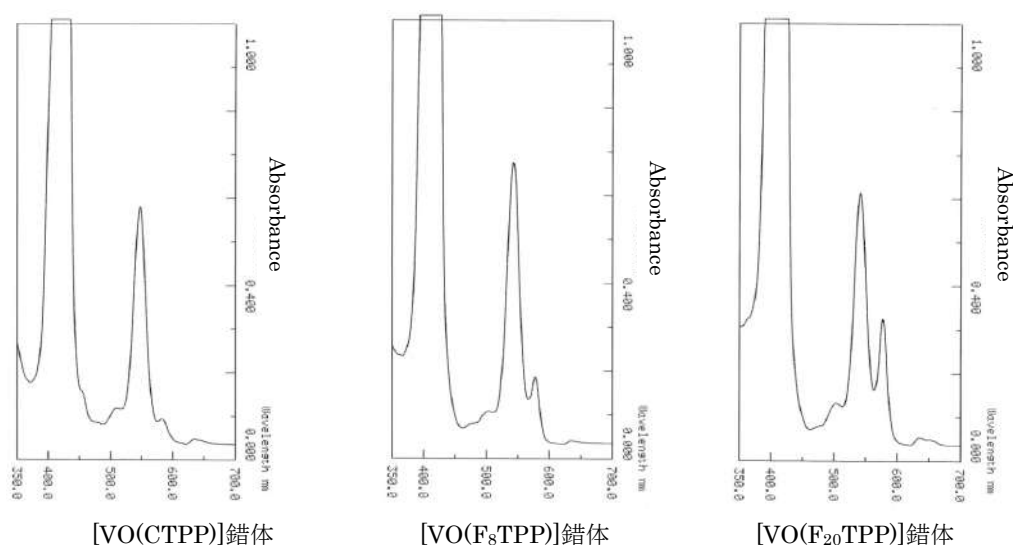


図 5. 電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の吸収スペクトル

注いで目的錯体を単離し、シリカゲルカラムクロマトグラフ(展開溶媒:塩化メチレン)で最終精製を行った。収率は90%であった。変法 B は、合成法 II の問題点を解決した点では優れているが、最大の問題は DMSO が反応中に分解し、悪臭を発生する硫黄化合物を副生することである。したがって、変法 B を実施する場合は、排気系がしっかりしたドラフトで行うことが必須である。

さらに、変法 C として、DMSO より熱安定性の良いヘキサメチルリン酸トリアミド(HMPA、沸点 233°C)を用いた合成法についても検討してみた。しかしながら、この系では反応の進行がまったく見られず、断念した。恐らく、溶媒に用いた HMPA のアミン部分がバナジル(IV)イオンに配位し、安定化してしまったためと思われる。

結局、電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の合成法としては、真空系を常備している研究室においては合成法 II が、そうでない研究室においては十分な排気の下で変法 B が良好であるという結果が得られた。

2-3. 陰イオン性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の新規合成法

電子供与性ならびに電子吸引性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の合成法の開拓に成功したところで、第三の課題として、陰イオン性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の合成法の検討を試みた。陰イオン性 TPP 誘導体はフェニル側鎖にスルホアニオン(-SO₃⁻)などが結合したものであるため、いずれにしても電子吸引性 TPP 誘導体とみなすことができる。それ故、合成戦略の基本的な考え方は合成法 II と同じであるが、イオン性のポルフィリンであるため、1,2,4-TCB などの無極性的な溶媒は使用できず、極性が強く、高沸点で、酸化バナジウムアセチルアセトナトも可溶性な溶媒が求められる。この観点で言えば、DMSO が最適であり、まず、悪臭問題はあるが、合成法 II の変法 B によるバナジル(IV)錯体の合成を検討した。

始めに、フェニル側鎖の 4 位にスルホアニオンが付いた TPPSH₂ のバナジル(IV)錯体の合成を行った。0.5g(4.89 × 10⁻⁴mol)の TPPSH₂ とその 5 倍モル量の酸化バナジウムアセチルアセトナトを 100ml の DMSO に入れて還流したところ、12 時間後に吸収スペクトルは完全にバナジル(IV)ポルフィリン錯体のパターンに変化した。反応終了後、真空蒸留にて溶媒を除去し、透析により単塩や小分子を除去して最終精製した。紫色結晶。収率は 87%であった。

次に、フェニル側鎖の 2,6 位にフッ素ならびに 3 位にスルホアニオンが付いた F₈TPPSH₂ のバナジル(IV)錯体の合成に本法を適用し、同様に反応を行った。しかしながら、吸収スペクトルで反応を追跡した結果、反応が途中で止まり、平衡混合物のような状態のままであった。この状況は、酸化バナジウムアセチルアセトナトを過剰量加えても改善されなかった。次に、アルミナカラムクロマトグラフにより、遊離の F₈TPPSH₂ とバナジル(IV)F₈TPPS 錯体を分離しようと試みたが、良好な分離条件を見つけることができ

ず、断念した。

したがって、変法 B は陰イオン性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の汎用的な合成法とは言えず、さらに、①DMSO の分解物が悪臭を放つこと、②溶媒除去が煩雑であること、などの問題があったので、TPPSH₂ のバナジル(IV)錯体の合成系を用いて最適な溶媒を再検討することにした。選定条件として、①高沸点であること、②高温で安定であること、③陰イオン性ポルフィリンが可溶性極性溶媒であること、などを考慮して水酸基を 2 つ有するグリコール類をその候補と考えた。

始めに、エチレングリコール(EG、沸点 198°C)を反応溶媒とする合成系を検討した。0.2g(1.96 × 10⁻⁴mol)の TPPSH₂ とその 5 倍モル量の酸化バナジウムアセチルアセトナトを 50ml の EG に入れて還流した。酸化バナジウムアセチルアセトナトは室温では EG に溶けづらかったが、高温では適度な溶解度を示すと仮定した。吸収スペクトルで反応の進行を追跡したところ、24 時間経っても完結には至らず、72 時間還流し続けてようやく反応の完結を確認した。さらに、反応溶媒を 1,2-プロピレングリコール(1,2-PG、188°C)と 1,2-ブチレングリコール(1,2-BG、191°C)に代えた場合でも、同様な結果が得られた。しかし、同じグリコール類でも 1,3-ブチレングリコール(1,3-BG、208°C)と 1,4-ブチレングリコール(1,4-BG、229°C)を用いた場合には、反応の進行は見られなかった。これは、1,2-グリコールでは vic-ジオールとバナジル(IV)イオンが 5 員環のキレートを形成し、適度に安定化するので、バナジル(IV)イオンへの分解を促したためと思われる。いずれにせよ、1,2-グリコールは陰イオン性 TPP 誘導体のバナジル(IV)錯体の合成溶媒として使用できることが判明した。

また、この合成法における粗目的錯体の単離・精製方法の改善も試みた。すなわち、合成法 I では、粗目的錯体を単離する際、目的錯体が脂溶性であることから、反応溶液を極性の水に注ぐことで粗目的錯体を析出させて単離したが、この場合は目的錯体がイオン性であるため、反応溶液にアセトンなどの有機溶媒を貧溶媒として加えることにより、粗目的錯体を析出させようとしたところ、簡単に析出し、単離することができた。さらに、粗目的錯体は濾別・乾燥後、アルミナカラムクロマトグラフ(展開溶媒:水:アセトン=1:1)にて精製できることも見出した。収率はどの



図 6. MW 法における合成装置

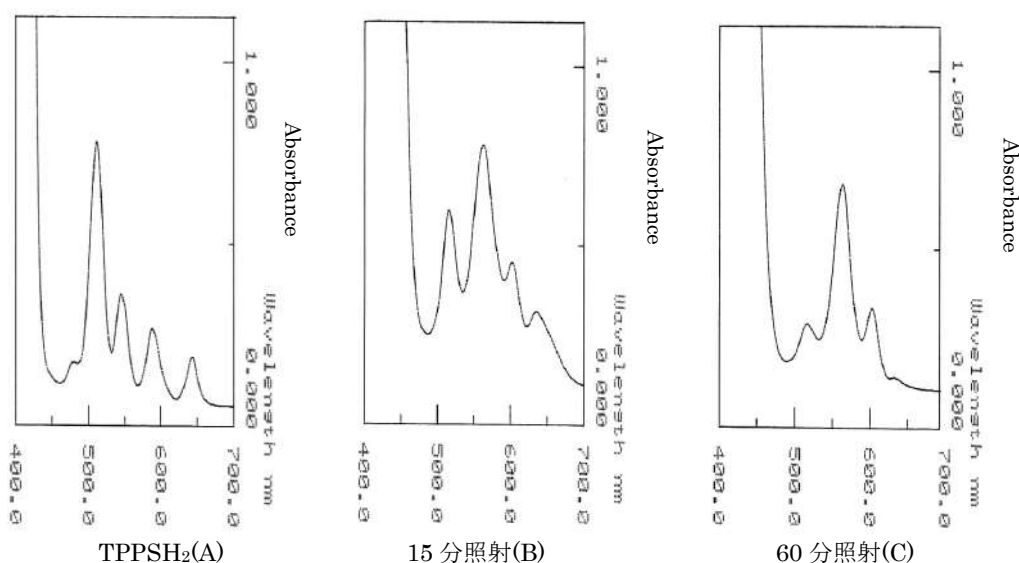


図7. MW法によるバナジル(IV)TPPS錯体合成の吸収ルペクトルの経時変化

1,2-グリコールを用いた場合でも80%程度であり、紫色の結晶が得られた。(以下、このような単離・精製法を含め、1,2-グリコールを用いた合成法を合成法Ⅲと略す。)

合成法Ⅲの欠点としては、反応時間が長すぎる事が挙げられる。そこで、この欠点を解消するために、マイクロ波合成法(MW法)を合成法Ⅲに適用することで反応時間の短縮を試みた。0.08g(7.84×10^{-5} mol)のTPPSH₂とその5倍モル量の酸化バナジウムアセチルアセトナトを20mlのEGに入れ、図6に示すような装置を用いてMW法を行った。また、MWの照射には5分加熱、5分放置を交互に行うインターバル法を採用した。

図7にMW法にてバナジル(IV)TPPS錯体を合成した際の吸収スペクトルの経時変化を示す。図中のMW照射時間は、5分加熱の総計である。図より、Q吸収帯である510、545、590、645nm付近の吸収が、合成開始直後、すぐに変化していき、1時間程度でバナジル(IV)TPPS錯体のQ吸収帯である565、605nm付近の吸収帯となったことから、反応の完結を確認した。反応終了後、合成法Ⅲに従って目的錯体を単離・精製したところ、収率は85%であった。

合成法Ⅲは、MW法を用いると、①短時間に定量的に合成可能であること、②単離・精製法も簡便であることなどより、陰イオン性TPP誘導体のバナジル(IV)錯体の合成法として優れていると思われるが、未だ、F₈TPPSH₂のバナジル(IV)錯体の合成に適用しておらず、現時点では汎用性のある合成法かどうか不明である。

また、合成法Ⅲのフラスコ反応では、反応時間が3日間もかかるのに対し、MW法では1時間程度で反応は完結しており、両者の差が大きすぎるくらいもある。合成法Ⅲでは、バナジウム源である酸化バナジウムアセチルアセトナトの高温における1,2-グリコールへの溶解度は適度であると仮定したが、実際はあまり溶けておらず、一方、MW法では急激な加熱である程度の溶解度は確保されたと考える

と、この現象も説明可能である。そこで、現在、酸化バナジウムアセチルアセトナトの1,2-グリコールへの溶解度を再検証するとともに、高温で1,2-グリコールに可溶な他のバナジウム源を、再度、検討中である。1つの可能性として、三塩化バナジウムを1,2-グリコールのアルコキシドに変換するという工夫も考えられる。

1,2-グリコールを金属錯体の合成溶媒として用いた例は、これまでの検索結果では見当たらず、合成法Ⅲは新たな合成系として注目に値する。

以上、本研究により、各種テトラフェニルポルフィリン誘導体のバナジル(IV)錯体の高収率かつ簡便な合成法を概ね確立することができた。今後のさらなる研究成果に期待したい。

参考文献

- 1) 大木道則ら編「化学大辞典 第1版第1刷」、p1791、東京化学同人(1989)。
- 2) J. S. Martinez, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 3289 (2001).
- 3) V. L. Record, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **118**, 3469(1996).
- 4) H. Sakurai, *Chem. Record*, **2**, 237(2002).
- 5) H. Sakurai, *Bioorg. Med. Chem. Soc.*, **14**, 3469(1996).
- 6) 桜井ら著、第55回錯体化学討論会講演要旨集、pp64-65 (2005)。
- 7) J. G. Erdman, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **78**, 5844(1956).
- 8) Ching-Yao Lin, and T. G. Spiro, *Inorg. Chem.* **35**, 5237 (1996).
- 9) D. Dolphin ed., *The Porphyrins, Volume I, Structure and Synthesis, Part A*, Academic Press Inc. (1978).

二酸化チタン光触媒繊維の作製とその性質

砂金 孝志, 黒澤 悟史

Synthesis and Characterization of a TiO₂ fiber Photocatalyst

Takashi ISAGO and Satoshi KUROSAWA

Abstract: Fibrous titanium dioxide(TiO₂) photocatalysts were synthesized with heat treatment(500-1000 °C) in the atmosphere or in a nitrogen gas after impregnating sewing threads with a Ti solution prepared from titanium alkoxide. The obtained TiO₂ fibers were evaluated by performing measurements of the X-ray diffraction pattern and the photo-degradation activity test of methylene blue solution. The TiO₂ fibers having a relatively higher strength could be successfully synthesized using cotton fibers for the material of threads. The anatase-type TiO₂ fibers were synthesized at the heat treatment temperature of 500 °C, the anatase-type TiO₂ fibers mixed with a small amount of the rutile-type ones were synthesized at the heat treatment temperature of 700 °C, and only the rutile-type ones were synthesized at the heat treatment temperature of 1000 °C. In addition, the strength of the fibers has been successfully slightly improved using the Ti-Si solution prepared by adding silicon alkoxide to the Ti solution. The results of the photo-degradation activity test showed that the TiO₂ fibers have a high photocatalytic activity under the ultraviolet light and also under the visible light.

1. 緒言

近年、環境ホルモン等による水質汚染、ホルムアルデヒドやトルエン等の揮発性有機化合物 (VOC) による大気汚染といった環境汚染が問題となっている。その対策として、光触媒技術が注目されている^{1)~3)}。光触媒にそのバンドギャップに相当する光が当たると電荷分離を起し、伝導電子と正孔が生じる。この電子と正孔は、触媒表面で強力な還元力と酸化力を発揮し、様々な有害物質を分解して最終的には二酸化炭素や水、各種のイオン等にする^{4)~6)}。これまでに光触媒として実用化されているのは二酸化チタン (TiO₂) である。TiO₂ の形状は、一般に薄膜や粉末である。しかし、気相、液相どちらの反応に使う場合にも扱いやすく表面積も大きくすることができ、光も奥まで入れることができる繊維状の TiO₂ についての研究は非常に少ない。これまでに報告されている繊維状 TiO₂ は高価な特殊な装置を用いて作製されていた^{7),8)}。

本研究では、この繊維状 TiO₂ 光触媒をミシン糸に Ti 系溶液を含浸させた後、大気中または窒素中で熱処理 (500~1000°C) することで作製することを試みた。そして、得られた TiO₂ 繊維は、X線回折パターン測定、メチレンブルー水溶液の光分解活性試験を行うことでその性能を評価した。

2. 実験

2.1 試薬

テトラ*i*-プロポキシチタン (Ti(O-*i*-C₃H₇)₄, 99%, 関東化学)、テトラエトキシシラン (Si(OC₂H₅)₄, 関東化学)、エタノール (C₂H₅OH, 特級, 関東化学)、硝酸 (HNO₃,

60%, 特級, 関東化学) は精製しないでそのまま用いた。

2.2 含浸溶液の調製

(1) Ti 溶液

C₂H₅OH 25ml(19.75g)に Ti(O-*i*-C₃H₇)₄ 3.55g(0.0125 mol)、60%HNO₃ 0.11g、水 (H₂O) 0.22g を加え、1時間攪拌することにより、透明な溶液を得た。

(2) Ti-Si 溶液

上記 Ti 溶液に Si(OC₂H₅)₄ 2.60g(0.0125mol)を加え、1週間攪拌を続けることにより、透明な溶液を得た。

2.3 用いた糸

Ti 溶液を含浸させるミシン糸として、天然繊維 1種 (木綿)、化学繊維 2種 (ナイロン、ポリエステル) を用いた。糸は 15cm の長さに切り、上記溶液に 1分間浸した。

2.4 TiO₂ 系繊維の作製

ミシン糸に各溶液を含浸させた後、電気炉を用いて大気中または窒素中で 500~1000°C まで一定速度で昇温し、その温度で 30分間焼結することで TiO₂ 系繊維を作製した。

2.5 有機物光分解活性試験

TiO₂ 繊維 0.050g をガラス管 (内径 7mm) に詰め、メチレンブルー水溶液 30ml (濃度 4ppm、恒温槽で 25°C に設定) が循環する装置を組み立てる (Fig. 2)。TiO₂ 繊維にキセノンランプの光 (WACOM, H X-500, 150W, 390nm より短波長カットの光 (Vis) または 330nm より短波長カットの光 (UV)) を当て、15分ごとに 2時間メチレンブルーの 665nm の吸光度を測定した。吸着による吸光度の減少があるため、遮光条件下で 1時間メチレンブルー水溶液の

循環を行い、吸着平衡に達してから光照射を行った。定量的にデータを比較するために光分解反応を1次反応として半減期を求めた。

2. 6 測定

有機物光分解活性の評価には、分光光度計 (JASCO, V-530) を用いた。繊維の結晶性は、粉末X線回折装置 (理学電機; RINT, 2000PV) を用いて評価した。

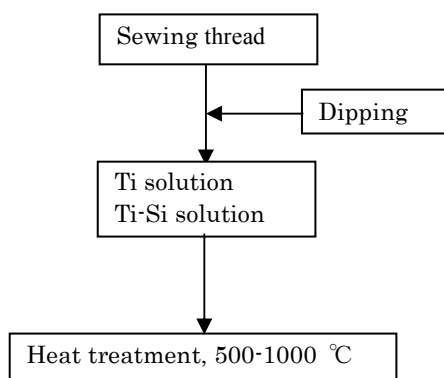


Fig.1 Synthesis process of the TiO_2 and $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ fibers.

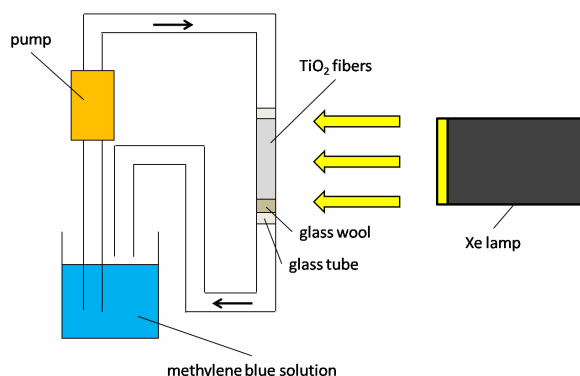


Fig.2 Apparatus for the photo-degradation activity test.

3. 実験結果と考察

3. 1 繊維の様子

天然繊維である木綿のミシン糸を使用して作製した TiO_2 繊維は、糸の形がはっきりと残っており、ある程度の強度を有した繊維となった。一方、ナイロンやポリエステル等の化学繊維を使用して作製したものは、どちらも形が崩れて塊となってしまった。これは、ナイロンやポリエステルは融点を持ち、その温度が低いため TiO_2 の焼結が起こる前に繊維の形が崩れてしまったり塊になってしまうと考えられる。一方、木綿は融点を持たず液化することなく燃焼あるいは炭化するために繊維の形が保たれると考えられる。そのため、糸としては木綿を用いることにした。Ti 溶液から作製した TiO_2 繊維は、大気中で熱処理した場合には全

て白色の繊維となったが、Ti-Si 溶液から作製した $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 繊維は 500°C の時は褐色、700°C の時は灰色、1000°C の時は白色と色が変化した。有色の原因としては、有機物が完全に焼失しなかったことが考えられる。窒素中で Ti 溶液から作製した TiO_2 繊維は黒色であり、繊維としての強度や柔軟性も大気中から得られた繊維よりも大きかった。黒色の原因は炭素ができていたためと考えられる。Fig.3 に 500°C と 1000°C の熱処理で得られた TiO_2 と $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 繊維の写真を示す。

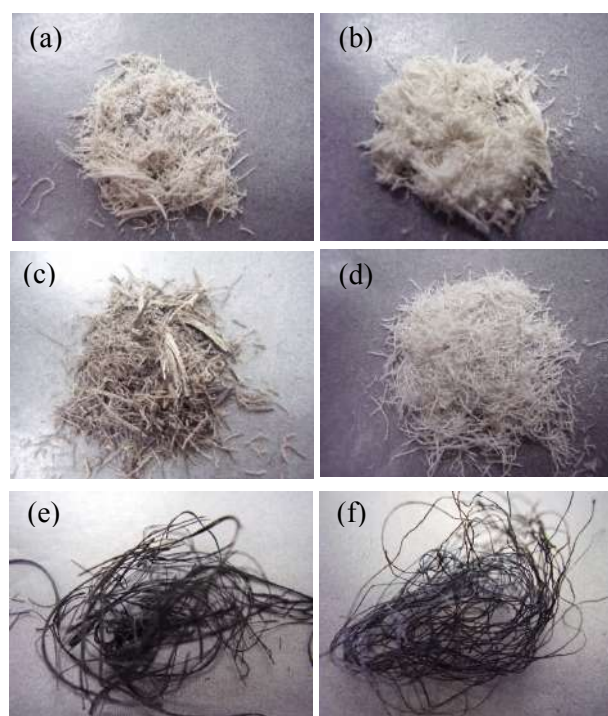


Fig.3 Photographs of TiO_2 and $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ fibers.

- (a) TiO_2 fibers (500°C, atmosphere)
- (b) TiO_2 fibers (1000°C, atmosphere)
- (c) $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ fibers (500°C, atmosphere)
- (d) $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ fibers (1000°C, atmosphere)
- (e) TiO_2 fibers (500°C, N_2)
- (f) TiO_2 fibers (1000°C, N_2)

3. 2 結晶性

Fig.4 に大気中の熱処理で得られた TiO_2 繊維と $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 繊維の X 線回折パターンを示す。 TiO_2 単独の繊維は 500°C の熱処理でアナターゼ型 TiO_2 構造、700°C でアナターゼ型に少しルチル型 TiO_2 が混じり、1000°C ではルチル型 TiO_2 のみとなった。 $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 繊維においては TiO_2 の結晶化がかなり抑えられ、700°C の熱処理でようやくアナターゼ型 TiO_2 の弱いピークが、1000°C ではアナターゼ型 TiO_2 とルチル型 TiO_2 の両方のピークが観測された。繊維の強度としては、 TiO_2 単独の繊維よりも $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 繊維の方が少し大きかったが、これはガラス化した SiO_2 による

ものと考えられる。窒素中の熱処理で得られた TiO₂ 繊維は、500℃の熱処理で弱いアナターゼ型 TiO₂ ピークが、1000℃ではルチル型 TiO₂ のみが観測された (Fig.5)。この繊維は黒色で TiO₂-SiO₂ 繊維よりも更に強度が大きかった。これは、炭素と TiO₂ が均一に混じり合っ繊維をつくっているためと考えているが、詳しい構造については現在 SEM 等の観察によって検討中である。

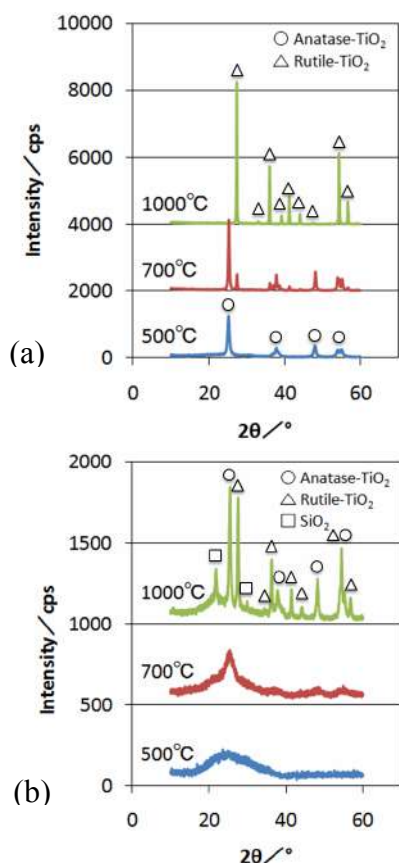


Fig.4 X-ray diffraction patterns of TiO₂(a) and TiO₂-SiO₂(b) fibers synthesized in the atmosphere.

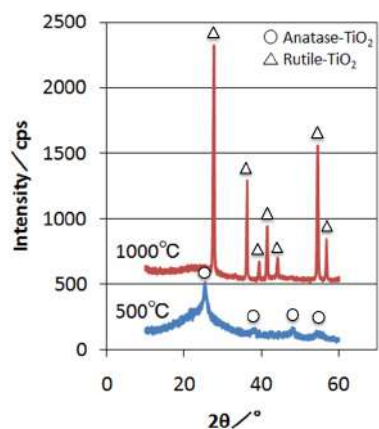


Fig.5 X-ray diffraction patterns of TiO₂ fibers synthesized in a nitrogen gas.

3. 3 有機物光分解活性

大気中の熱処理で得られた TiO₂ 繊維と TiO₂-SiO₂ 繊維の有機物光分解活性試験結果を Table 1 に半減期で示す。また、TiO₂ 繊維を用いた場合の照射時間とメチレンブルー濃度の関係を Fig.6 に示す。TiO₂ 繊維、TiO₂-SiO₂ 繊維どちらも紫外光に対して大きな光分解活性を示し、また、可視光に対しても比較的大きな活性を示した。TiO₂ 繊維については、700℃の熱処理で得られたものが、最も大きな光分解活性を有していた。この繊維は X 線回折パターンの結果から、アナターゼ型 TiO₂ にルチル型 TiO₂ が少し混じった構造である。TiO₂-SiO₂ 繊維については、熱処理温度が高いほど光分解活性が大きくなった。これは、X 線回折パターンからわかるように TiO₂ の結晶が成長するためには高い温度が必要のためと考えられる。可視光でも比較的大きな光分解活性を示す繊維が得られたが、これはアナターゼ型 TiO₂ よりバンドギャップの小さなルチル型 TiO₂ の生成や表面積が関係していると考えている。窒素中の熱処理で得られた TiO₂ 繊維については、メチレンブルーの吸着量が大きく、光を当てる前に全て吸着されてしまうため、今回は活性試験を行うことができなかった。

Table 1 Photo-decomposition of methylene blue with TiO₂ and TiO₂-SiO₂ fibers under UV or Vis irradiation.

Fibers (atmosphere)	Heat treatment Temperature(°C)	Half life (UV) t _{1/2} / min	Half life (Vis) t _{1/2} / min
TiO ₂ fibers	500	81.0	603
	700	52.8	213
	1000	205	284
TiO ₂ -SiO ₂ fibers	500	2080	∞
	700	411	2860
	1000	262	423

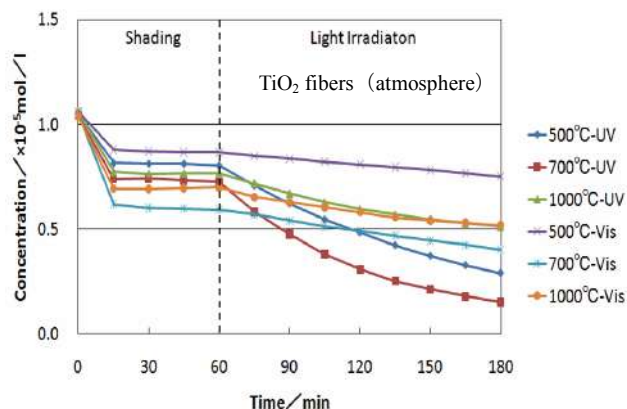


Fig.6 Plots of concentration vs. irradiation time on the photocatalytic decomposition of methylene blue under UV or Vis irradiation.

4. 総括

天然繊維である木綿のミシン糸を Ti のアルコキシドから調製した溶液に浸け、大気中または窒素中で熱処理することで比較的強度の大きな TiO_2 繊維を作製することができた。大気中 500°C の熱処理ではアナターゼ型 TiO_2 が、700°C ではアナターゼ型 TiO_2 にルチル型 TiO_2 が少し混じり、1000°C では完全にルチル型 TiO_2 のみとなった。また、Ti 溶液に Si のアルコキシドを加えて調製した Ti-Si 溶液を用いることで、繊維の強度を少し向上することができた。光分解活性試験の結果は、これら繊維が紫外光で大きな光分解活性を有し、可視光でも光分解活性があることがわかった。窒素中で熱処理することで得られた黒色の TiO_2 繊維は、強度の大きいものが得られたが、その構造、有機物分解活性等については今後より詳細に検討する予定である。

文 献

- 1) 藤嶋昭, 橋本和仁, 渡部俊也, 「光触媒のしくみ」, 日本実業出版社(2000).
- 2) 大谷文章, 「光触媒のしくみがわかる本」, 技術評論社(2003).
- 3) 橋本和仁, 坂井伸行, 入江寛, 高見和之, 砂田香矢乃, 「光触媒応用技術」, 東京図書(2007).
- 4) S. Tunesi and M. Anderson, , *J. Phys. Chem.*, **95**, 3399-3405(1991).
- 5) N. Negishi, T. Iyoda, K. Hashimoto, and A. Fujishima, *Chem. Lett.*, 841-842(1995).
- 6) M. Iwasaki, M. Hara, H. Kawada, H. Tada and S. Ito, *J. Colloid Interf. Sci.*, **224**, 202-204(2000).
- 7) 長谷川良雄, 南条吉保, 公開特許公報 特開 2002-204929.
- 8) A.K. Alves, F.A. Berutti, F.J. Clemens, T. Graule, C.P. Bergmann, *Materials Research Bulletin*, **44**, 312-317 (2009).

Pseudomonas putida KT2440 株由来リパーゼ遺伝子のクローニングと大腸菌での発現

鈴木 康司, 小堀 菜々*

Molecular cloning and expression of lipase gene from *Pseudomonas putida* KT2440 in *Escherichia coli*

Koji SUZUKI and Nana KOBORI

Abstract: Triglyceride lipase is an enzyme that catalyzes the hydrolyzation of triglyceride to glycerin and fatty acid. Bacterial lipase is a useful enzyme in the clinical diagnosis field. Most bacterial lipase needs a chaperon which constructs enzyme in the active formal structure. Recently, a kind of bacterial strain, *Pseudomonas putida* KT2440, was determined for full chromosomal DNA sequence, and the lipase gene was included for it. It is known that gene of a lipase-chaperon which mostly exists in the downstream with a lipase gene on bacterial chromosomal DNA, but doesn't exist for *P. putida* KT2440. This study aims at cloning and expression of the lipase gene for the strain. The lipase gene was amplified by using PCR, prepared in the plasmid vector pUC118 and pUC119. There were transformed into *E. coli* TOP10 strain, but the transformant did not show an enzymatic activity of lipase. In order to get activated lipase, the lipase gene and some multi-chaperon genes from *E. coli* (*gro* gene etc.) were co-transformed into *E. coli*. Some of the transformant showed a lipase activity by the *dna*, *gro*, and *tig* genes. We compared the chaperon genes between *E. coli* and *P. putida* in the DNA database (DDBJ), then, the multi-chaperon genes also found in the *P. putida* chromosome. It supposed that the lipase protein from *P. putida* could be activated by its own multi-chaperons. Thus, we have demonstrated a production of the active lipase by using an *E. coli* host vector system.

1. はじめに

脂質分解酵素であるリパーゼは反応性によりいくつかの種類に分類され、その中でもトリグリセリドリパーゼ(酵素番号 EC3. 1. 1. 3 以下リパーゼ)は、現在の脂質関連酵素分野において広く工業的に利用されており、中性脂肪を脂肪酸とグリセリンドに加水分解する可逆反応(図1)を触媒する。リパーゼはヒト膵や胃液、植物の種子、酵母・細菌等の微生物に存在し、特に微生物由来の酵素は工業的生産が可能であることから、洗濯洗剤や臨床診断用酵素などに応用されている¹⁾。リパーゼを生産する微生物として、*Pseudomonas* 属細菌が知られており、その遺伝子も数多くクローニングされている。微生物由来のリパーゼが触媒活性を示す構造になるためには、その多くがシャペロンと呼

ばれるタンパク質立体化酵素が必要であるが、これら遺伝子の組換え大腸菌宿主内での発現調節が困難である²⁾。また大腸菌は、リパーゼ耐性を有しないことから大腸菌を宿主とする遺伝子組換え体の工業化が進まない一因となっている。一方、*Pseudomonas putida* KT2440 株(以下 *Pputida*)は、国の組換え DNA 実験・製造指針によって高い安全性が認められ³⁾、*Pseudomonas* の遺伝子組換え宿主としての期待が高まっている。また近年の研究により全ゲノムシーケンスが決定され⁴⁾リパーゼ遺伝子を有していることも確認された。そこで *Pputida* 由来のリパーゼ遺伝子組換え体の工業化のためには、リパーゼ遺伝子クローニングと大腸菌での活性型リパーゼタンパク質発現系を構築する必要があり、その検討を行うこととした。

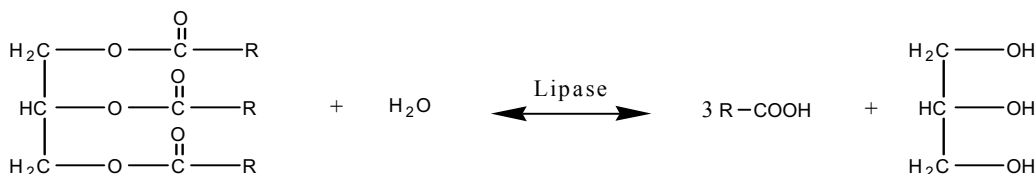


図1 リパーゼによるトリグリセリドの加水分解

*茨城高専専攻科物質工学専攻 平成19年度修了生

2. 実験

2.1 使用菌株とプラスミド

本研究で使用した組換え体大腸菌宿主には、*Escherichia coli* TOP10 [F-, *mcrA*, Φ80, *lacZ*, ΔM15, Δ(*mrr-hsdRMS-mcrBC*), Δ*lacX74*, *recA1*, *deoR*, *araD139*, Δ(*ara-leu*)7697, *galU*, *galK*, *rpsL*, (Str^R), *endA1*, *mupG*]を用いた。大腸菌ベクターは、pUC118 及び 119 を用いた。リパーゼ遺伝子は *Pseudomonas putida* KT2440 株の染色体 DNA から PCR 増幅をさせてクローニングを行った。大腸菌シャペロンは、タカラバイオ社製シャペロンプラスミドセットを用いた。これらは P1 レベル菌株であり、茨城工業高等専門学校組換えDNA実験安全管理規則に従って実験を行った。

2.2 培地と酵素試薬

大腸菌の培養には BHI (Difco 社) を、*Pseudomonas* の培養には N 培地 (栄研) を用いた。リパーゼ活性検出培地は、N 寒天培地に無塩バター 5% と pH 指示薬であるローダミン B を 0.0001% もしくはビクトリアブルーを 0.004% で添加した。これは図 1 に示した反応で中性脂肪がグリセリンと脂肪酸が生じ酸性となることで発色する。制限酵素、PCR 用試薬、その他遺伝子工学用試薬はタカラバイオ社製の酵素とそのキットを用いた。

2.3 合成 DNA と DNA 配列決定

PCR に用いた合成 DNA プローブは、インビトロジェン社に合成を依頼した。DNA 配列の決定は、(株) バイオマトリックス研究所に依頼した。得られた DNA 配列のアミノ酸変換等は、(株) ベクターの解析ソフト Sequence Assistant ver.2.2 を購入して使用した。

2.4 遺伝子解析ツール

遺伝子の検索と解析は、国立遺伝学研究所データベース (DDBJ) 中の解析ソフトを用いた。キーワード検索には ARSA を、タンパク質配列と DNA 配列の検索には BLAST と FASTA を、ゲノム解析には GIB を使用した。これらはすべてフリーソフトとして供給されている。

3. 結果および考察

3.1 *Pseudomonas putida* KT2440 株リパーゼ遺伝子の検索と解析

DDBJ のツールを用い、*Pseudomonas putida* KT2440 株のゲノムにおけるリパーゼ遺伝子を検索したところ、いくつかの脂質関連酵素が存在することがわかった (表 1)。

表 1 *P. putida* KT2440 株のリパーゼ関連遺伝子

タンパク質 No.	タンパク質の種類	アミノ酸数
PP0418	lipase, GDSL family	629
PP0892	phospholipase family protein	385
PP2083	lipase, putative	330
PP2318	lipase, GDSL family	201
PP3264	phospholipase family protein	400
PP3812	lipase, putative	339
PP4218	lipase/esterase family protein	318
PP4854	lipase	315
PP5276	phospholipase D family protein	517

微生物由来のリパーゼが触媒活性を示す構造になるためには、その多くがシャペロンと呼ばれるタンパク質立体化酵素が必要である²⁾。本解析の結果、通常リパーゼ遺伝子 (*LipA*) の下流に存在する固有シャペロン遺伝子が *Pputida* には存在していないことがわかった (図 2)。このことは、本リパーゼは固有シャペロンの存在無しで活性化されるのか、リパーゼ遺伝子近傍ではないところに活性化遺伝子が存在しているなどが示唆された。

これら脂質関連酵素の中で PP4854 リパーゼ遺伝子は他のリパーゼ生産株のリパーゼ遺伝子と相同性を示した (図 3)。*P. fluorescens* Pf-5 とは 73% と高い相同性を示し、工業的に応用されている *Chromobacterium viscosum* とも 34% の相同性を有していた。また、リパーゼ活性培地による活性試験から、*Pputida* 株は活性型のリパーゼを生産していることも確かめられた。以上のことを踏まえ、*Pputida* KT2440 株由来のリパーゼ遺伝子 (PP4854) のクローニングを行い、組換え体が活性を有するかを確認する。非活性型の場合はリパーゼ固有シャペロンの代わりとして働くシャペロンを検討する。

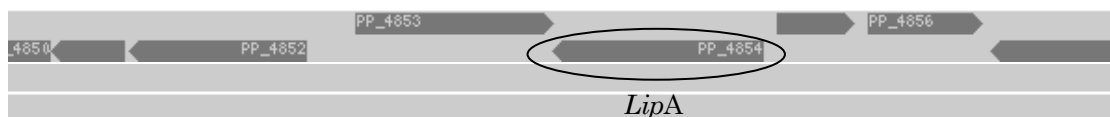


図 2 *Pseudomonas putida* 染色体 DNA におけるリパーゼ遺伝子と近傍の遺伝子

		+*** ++ * *+ ** +* +* ** *
<i>P. putida</i> KT2440	MVM-MAAVLARTRKGAAMQQLATRYPLVLPVGMVLY-PYWFGIVPALRKGGAQVFPVQV	
<i>P. fluorescens</i> Pf-5	MSQELATRYPLVLPVGMVLRLLY-PYWYGIIPALRRGGAQVIAVQV	
<i>P. aeruginosa</i> lipA	MKKKSLPLGLAIGLASLAASPLIQASTYTQTKYPIVLAHGMLGFDNIGV-DYWFGIPALRRDGAQVYVTEV	
<i>P. aeruginosa</i> lipC	MNKNKTF-LAAA-LVALAASPVAHAATDYTRTRYPVLSHGLFGPKSVGPV-DYWHAIIPALEKDGAKVFATSQ	
<i>C. viscosum</i>	MVRSMRSVAARAVAWAL-----AVMPLAGAAGLTMAASPAVAADTYAATRYPVILVHGLAGTDKDFANVVDYWYGIQSDLQSHGAKVYVANL	
<i>P. sp.</i> KWI-56	MARTMRSRVVAGAVACAMS IAPFAGTTAVMTLATTHAAMAATA PADGYAATRYPIILVHGLSGTDKYAGVVEYWYGIQEDLQQNGATVYVANL	
	* + ++ *****+ +* +*****+ + ** *+ * +** * ** *+ **	
<i>P. putida</i> KT2440	SPLHSSEV---RGEQLLAIIDDCQRTGVDKVNLI GHSQ GALSARYAAAKRPGRVASVTSVAGPNHGSELADHLERTAPGNSPQGRILKAVLH	
<i>P. fluorescens</i> Pf-5	SPLNSSEV---RGEQLLAQIQRI MAETGAARVNI GHSQ GALTARYAAARPDWVASVTSVAGPNHGSELADYLQRHSPAHSRLRGRVLSLLLR	
<i>P. aeruginosa</i> lipA	SQLDTSEV---RGEQLLQVVEEIVALSGQPKVNI GHS HGPTIRYAAVRPDLIASATSVGAPHKGS DTDLFLRQIPPGSAGEAVLSGLVNS	
<i>P. aeruginosa</i> lipC	SPVNSNEV---RGEQLLAQVEEVLALTGAEKVNI GHS QGGMTRYVYAGVAPQLVASVTTMGTPHKGTPVADAVTGFSEFLPIGTEV IASAV	
<i>C. viscosum</i>	SGFQSDDGPNRGEQLLAYVKQVLAATGATKVNLI GHS QGGLTSRYAAVAPQLVASVTTIGTPHRGSEFADFVQDVLKTDPTGLSSTVIAAF	
<i>P. sp.</i> KWI-56	SGFQSDDGANGRGEQLLAYVKTVLAATGATKVNLI GHS QGGLTSRYAAVAPDLVASVTTIGTPHRGSEFADFVQNVLAYDPTGLSSSVIAAF	
	(LP active site)	
		* + * * * +* +* + + + ** * + +**++* +
<i>P. putida</i> KT2440	GFAVLVWLETGWRDPLPVDVHASHQSLTSAGVALFNQAYPQ-GLPQTWGGG-GA--YEVN--VRYYSWSGTLQPG-----LTDQGRNRF	
<i>P. fluorescens</i> Pf-5	GISSMRLLETGYRGPQKQVDIHASHQSLTEGVALFNRYQPQ-GLPQEWGGG-GP--AQVD--VHYYSWSGILQPG-----KTNRGRNLF	
<i>P. aeruginosa</i> lipA	LGALSFLSSGSGTGTQNSLGSLE---SLNSEGAARFNAKYPQ-GIPTSACGE-GA--YKVN--VSYYSWSGSSPLT-----NFL	
<i>P. aeruginosa</i> lipC	EALFVVDIVDGGEWKGDALAA--LNSLNTPGTARFNQRPQ-AIPASACGG-GA--ETVA--VRYYSMSGTGLT-----NAL	
<i>C. viscosum</i>	VNVFTLVSSSHNTQDALAALR---TLTQAATATYRNFPQSAGLGAPGSCQTGAATETVGSQHLLYSWGGTAIQPTSTVLGVTATDTSTGTL	
<i>P. sp.</i> KWI-56	VNVFILTSSSHNTQDALAALQ---TLTARAATYQNYPSAGLGAPGSCQTGAPTETVGNTHLLYSWAGTAIQPTLSVFGITATDTSTVPL	
	* + + ** *+ *****+ + * ** *+ *+ + *+ ** **+ +**	
<i>P. putida</i> KT2440	-DG---SSRFCLFARS---FIKEKGHCDCGMVGRFSSHLGQVIGDDYPLDHLDIVNQLSLGAVGKGAE-PVRLFTEHAARLKAAGL	
<i>P. fluorescens</i> Pf-5	-DG---TNRSCRLFART---FVREAGQCDGMVGRYSSHLGQVIGDDYPLDHFDIVNQLSLGLVGKGAE-PIRLFVEHARRLKAAGL	
<i>P. aeruginosa</i> lipA	-DP-----SDAFLGASSL---TFKNGTANDGLVGTCSHLGMVIRDNYRMNHLDEVNQVFGTSLFETSPVSVYRQHANRLKNASL	
<i>P. aeruginosa</i> lipC	-DP-----SSAGLAVT---GLLFGAANDGLVGCSSHLGVSVDKDYRMDHLDEVNQLLGLVSLFESDPTQVYRQHANRLRNVL	
<i>C. viscosum</i>	-DVANVTDPSLALLATGAVMINRASGQNDGLVSRCSLFGQVISTSYHWNHLDEINQLLGVRGANAEDPVAVIRTHVNRLKLAGV	
<i>P. sp.</i> KWI-56	VDLANVLDPSLALFGTGTVMINRSGQNDGLVSKCSALYGVKSTSYKWNHLDEINQLLGVRGAYAEDPVAVIRTHANRLKLAGV	
	<i>P. :Pseudomonas C. :Chromobacterium</i> * :全てにおいて相同 + :KT2440 株と3種以上相同	

図3 各種リパーゼとのアミノ酸配列相同性の比較

3.2 PCRを用いたリパーゼ遺伝子のクローニング

P. putida KT2440 株のリパーゼ遺伝子のクローニングは、簡便な操作で少量のDNAから大量のDNA断片を得られるPCR技術を用いた⁵⁾。遺伝子を増幅させるためのプライマーは、図4に示すようなリパーゼ遺伝子のDNA配列の他、5'側に制限酵素 *Hind*III 切断部位及びリパーゼ遺伝子の翻訳効率を増加させるためにスファージ由来のSD配列⁶⁾を、3'側に制限酵素 *Eco*R I サイトを付加した。

Pseudomonas putida KT2440 株から取得した染色体DNAを鋳型とし、PCRによってリパーゼ遺伝子(*LipA*)の増幅を試み、得られたDNA断片の大きさを電気泳動法により調べた。その結果、目的とする1kbのDNA断片を得ることができた。また、得られた *LipA* DNA断片の塩基配列を決定したところ、データベース上の *LipA* 遺伝子配列とすべて一致していることも確認された。

Forward plimer

GGC AAG CTT AAG GAG GTT GTA TGG TCA TGA TGG CCG CTG TAG TGT TGG CCC GTC GTA CAC GCA AA
HindIII SD 配列 開始コドン

Reverse plimer

CGG AAT TCC GCC GCC AAG GCA CTT GAG CTA AAG CCC C
EcoR I 終止コドン

図4 PCRによるリパーゼ遺伝子増幅用合成DNAプライマー

PCR増幅された *LipA* の DNA 断片を、*lac* プロモーターの向きが異なる pUC118、119 に組み込み(図5)、これを用いて *E. coli* TOP10 を形質転換した。リパーゼ遺伝子の向きがプロモーターの向きと逆である pUC118 にリパーゼ遺伝子を導入した株(pLipA1)と、プロモーターと同じ向きである pUC119 に導入した株(pLipA2)の形質転換株を得て、それぞれリパーゼ活性培地で試験したがリパーゼの活性は得られなかった。このことから、活性が発現されなかった理由としては、① *E. coli* 宿主では *P. putida* とのプロモーターやSD配列に差異があるため、リパーゼ遺伝子が転写・翻訳されることがない、② *E. coli* 宿主の細胞膜は脂質であるため、脂質分解酵素を多量に生産することができない、③ *P. putida* 由来のリパーゼが活性型とな

るためにはシャペロンが必要である、などが推測される。②の理由について活性型リパーゼが多量に生産される株では、そのリパーゼの毒性のため生育するのが困難な状態となるため、封入体リパーゼの生産や、リパーゼ遺伝子そのものの変異など、何らかの要因でリパーゼの活性化を抑制できた株のみが生存できたとも考えられる。また、③の理由であった場合、たとえリパーゼ遺伝子が正しく導入された株であっても、リパーゼを活性化するためのシャペロンを生産できないためリパーゼを活性化することができないと考えられる。③の要因でリパーゼが活性化できないのであれば、シャペロンを組み込んだ株にリパーゼ遺伝子を導入すれば活性型のリパーゼを得ることが可能であると推測した。

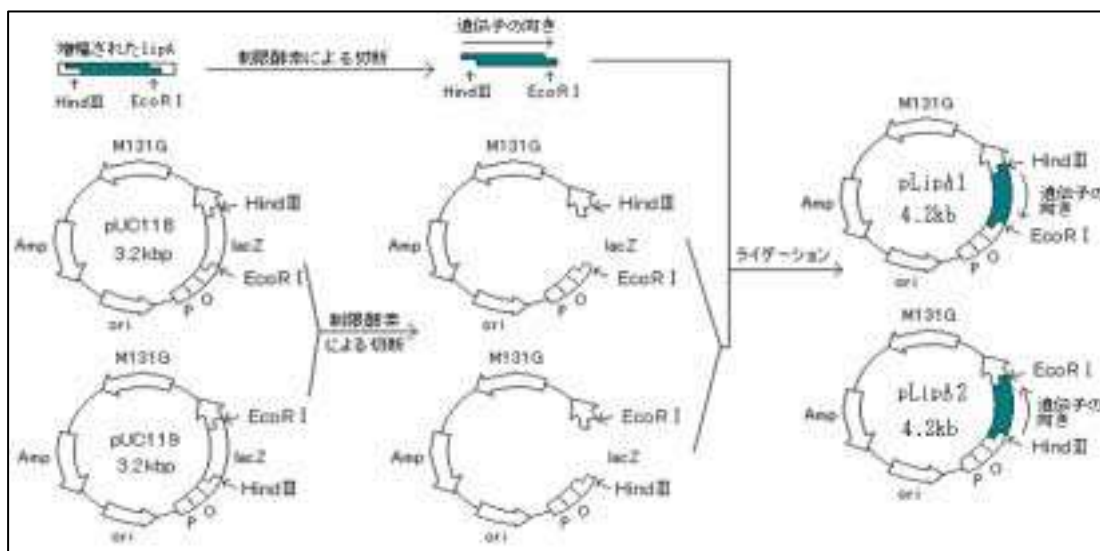


図5 pLipA1 及び pLipA2 の構築方法

3.3 大腸菌由来シャペロンを用いたリパーゼ遺伝子の発現

リパーゼタンパク質の活性発現にシャペロンが必要であるかを確認するため、*E. coli* TOP10 に大腸菌由来シャペロン遺伝子を形質転換し、更にリパーゼ遺伝子を導入することで活性型リパーゼが得られるかの検討を行った。大腸菌シャペロンは、様々なタンパク質を活性化するマルチシャペロンである *groS-L*、*dnaJ-K* 等を有するシャペロンプラスミド⁷⁻⁸⁾セット(表2)を購入して実験を行った。これらプラスミドを導入する際は、複製領域が全く同じで、異なる遺伝子配列を持つプラスミドは同一株内に存在できないというインコンパチビリティを考慮し、シャペロンプラスミドの複製領域は p15A 由来、リパーゼ遺伝子組換えプラスミドの複製領域は pMB1 由来のものとした。

表2 使用したシャペロンプラスミド

プラスミド	シャペロン	サイズ (kb)
pG-KJE8	Gro (ES-EL) Dna (K-J) GrpE	11.1
pGro7	Gro (ES-EL)	5.4
pKJE7	Dna (K-J) GrpE	7.2
pG-Tf2	Gro (ES-EL) Tf	8.3
pTf16	Tf	5.0

これら5種類のシャペロンを有する形質転換体と、更にリパーゼ遺伝子と *lac* プロモーターが逆方向の pLipA1、同方向の pLipA2 形質転換体についてローダミン B 培地及びビクトリアブルー培地でリパーゼ活性の確認を行った。ローダミン B 培地における活性発現の結果を図6に、その活性の強度を表3に示した。

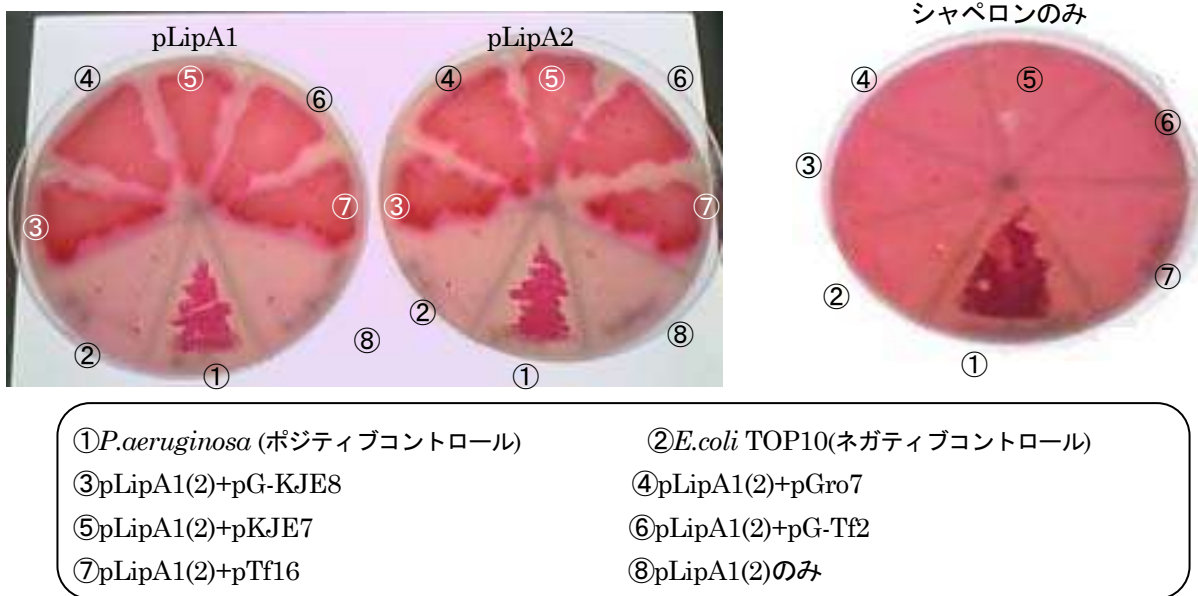


図6 ローダミンB リパーゼ活性培地における発色

表3 各シャペロンによるリパーゼ活性度合

	シャペロン	リパーゼ活性強度
pLipA1	無し	—
	Gro (ES-EL) Dna (K-J) GrpE	++
	Gro (ES-EL)	++
	Dna (K-J) GrpE	+++
	Gro (ES-EL) Tf	++
	Tf	+
pLipA2	無し	—
	Gro (ES-EL) Dna (K-J) GrpE	+++
	Gro (ES-EL)	++
	Dna (K-J) GrpE	+++
	Gro (ES-EL) Tf	+++
	Tf	++

図6及び表3より、シャペロン遺伝子のみ、リパーゼ遺伝子のみを導入した株ではリパーゼ活性が得られなかったのに対し、シャペロンとリパーゼ遺伝子を導入した株においては、その全てでリパーゼの活性化を確認することができた。特に活性が顕著であったものは DnaJ-K グループのシャペロン遺伝子が導入された株であった。今回用いたシャペロンは、それぞれ折りたたみ機構が異なり、Gro 系はある程度折りたたまれたタンパク質の形を整え、団子を作るように三次元構造に導くシャペロン、Dna 系はポリペプチド鎖に結合し洗濯

物をたたむ様にして三次元構造に導くシャペロン、Tf はリボソームに結合し、ポリペプチド鎖が作製されるごとに僅かずつポリペプチド鎖を湾曲させタンパク質が自発的に折りたたむのを助けるシャペロンである(正確にはシャペロンではなく、自発的フォールディングに関わるタンパク質である)⁹⁾。このような折りたたみ機構の違いにより、リパーゼの活性化度合いも異なったのではないかと考えられる。また、最も活性が強く現れた Dna グループシャペロンが導入された株では、Dna シャペロンによる折りたたみの結果形成されたリパーゼタンパク質の三次元構造が、活性を有するための理想的な構造に最も近かったためと考えられ、また pLipA1 と pLipA2 とのリパーゼ活性の比較において pLipA2 の方が強い活性を示す株が多い理由は、ベクターにリパーゼ遺伝子を導入した際、*lac* プロモーターの向きとリパーゼ遺伝子の向きが異なる向きであったか(pLipA1)、同じ向きであったか(pLipA2)の違いにより、タンパク質合成の際、DNA より転写される mRNA の量に差があるためと考えられる。

大腸菌マルチシャペロンを用いたリパーゼの活性化に成功したことから、*P.putida* 由来のリパーゼは、*P.putida* 株内で、自身のマルチシャペロンによって活性化されている可能性が示唆された。大腸菌のマルチシャペロンと同じような遺伝子が *P.putida* にも存在するか、DBJ を検索して確認したところ、表4のように大腸菌のマルチシャペロンと相同性を示す遺伝子領域が見つかった。また *P.putida* 染色体 DNA 上におけるこれらのマルチシャペロンとリパーゼ遺伝子との位置関係を確認したところ、離れた DNA 上に存在し、クラスターと

しては存在していなかった。なお、今回特に強い活性が得られた株に導入されていたプラスミドに組込まれているシャペロン遺伝子は、*groK*、*groJ*、*grpE*の3種である。

表4 大腸菌と *Pputida* におけるマルチシャペロンとの相同性

シャペロン遺伝子	相同性(%)
<i>groS</i>	58
<i>groL</i>	72
<i>dnaJ</i>	51
<i>dnaK</i>	76
<i>grpE</i>	47
<i>tig</i>	48

これより、*Pputida* 染色体 DNA 上で相同性を示した領域は、*Pputida* における大腸菌マルチシャペロンと同じ働きをするタンパク質をコードした遺伝子である可能性が高く、このことは、リパーゼが *Pputida* 内では自身のマルチシャペロンにより活性化されている可能性の裏づけとなりうると思われる。

今回の研究では、*Pputida* 由来のリパーゼタンパク質を活性化型で発現させることを目的とした。*Pseudomonas* では宿主-ベクター系が確立されていないため、今回は高コピー・伝達性無し of 宿主-ベクター系が確立されている大腸菌宿主において *Pseudomonas* 由来のリパーゼタンパク質の発現を目指した。大腸菌宿主で *Pseudomonas* 由来のリパーゼを発現させるにあたり、SD 配列やプロモーターの違い、大腸菌のリパーゼに対する脆弱性などの問題があるものの、これらは大腸菌由来の SD 配列・プロモーターへの配列変更やリパーゼに耐性のある大腸菌宿主のスクリーニング、大腸菌の細胞膜間に存在するペリプラズム¹⁰⁾でのリパーゼ活性発現、大腸菌に害のない失活体(封入体)で生産し、試験管内での活性化型への再構築を行うことなどで解決できると考えられる。また、大腸菌でリパーゼの大量生産を行った場合リパーゼが不活性化型となっている可能性があり、これは大腸菌由来のシャペロンに、特に Dna グループシャペロンによって活性化可能であることが確認できた。

以上、大腸菌を宿主とした *Pputida* KT2440 株由来リパーゼの活性発現が、マルチシャペロンと共に発現させることで可能であることを示した。

謝辞

本研究の実施、考察に際して、多くのご示唆を頂きましたパスツール研究所 Philippe Mazodier 教授に感謝申し上げます。また本実験の遂行において、茨城高専専攻科平成 20 年度修了生の坂本幸平氏に多大なるご協力を頂きましたことにも感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 食品産業酵素機能変換技術研究組合編：「食品産業のためのプロテインエンジニアリング」p144～182, p276(1992), 食品化学新聞社
- 2) Petra C.T., et al. *Appl Microbiol Biotechnol* **55**, 198-204(2001)
- 3) 組換え DNA 実験指針研究会：「組換え DNA 実験指針」, p19～23, p32～33, (1997) 第一法規
- 4) Nelson K.E., et al. *Environmental Microbiology*, **4**, 799-808(2002)
- 5) Mullis K.B., and Faloona F.A. *Methos Enzymol.*, **155**, 335-350(1886)
- 6) 山科 郁男 訳：「レーニンジャーの新生化学 下」p1165 (1995) 廣川書店
- 7) Nishihara, K., et al. *Appl. Environ. Microbiol.* **64**: 1694-1699 (1998).
- 8) Nishihara, K., et al. *Appl. Environ. Microbiol.* **66**: 884-889 (2000)
- 9) Thomas, J. G., et al. *Appl. Biochem. Biotech.* **66**: 197-238 (1997)
- 10) 久保 幹ら：「バイオテクノロジー～基礎原理から工業生産の実際まで～」p30,(2001), 大学教育出版

VBAを用いた紫外・可視吸収スペクトルの自動表示プログラムの開発

佐藤 稔, 大和田 創*

Development of Drawing Software of Ultraviolet -Visible Spectra with VBA

Minoru SATOH, and Hajime OHWADA

Abstract: Ultraviolet -Visible Spectrophotometers are widely used in many scientific fields. Almost everything has a computer to control the spectrometer. Then, we can graph measured spectra in the computer with attached drawing software of Ultraviolet -Visible Spectra. It is takes the attached software to graph spectra, so in computer without the software we need a lot of operations to get spectra. Thus, we developed Drawing Software of Ultraviolet -Visible Spectra with VBA. Using the software, we can graph the spectra by just clicking file name of the data file even if the attached drawing software is not in the computer.

1. はじめに

紫外・可視吸収スペクトルは物質の電子遷移に基づくものであり、その吸収極大の位置、モル吸光係数からその物質の電子状態を調べることができる。この吸収スペクトルは物質に固有であることから、紫外・可視吸収スペクトルを測定することで、化学反応が進行しているか否かを知ることができる。また、スペクトル強度が濃度に比例することを利用して、検量線を用いることによって、その物質の未知の濃度を知ることができる。このように化学の分野では紫外・可視吸収スペクトルは重要である。

最近の紫外・可視分光光度計は、分光器をコンピュータで自動制御しており、コンピュータで測定条件を指定し、測定開始をクリックするだけで、スペクトルが得られる。このような場合、専用のソフトを用いて分光器を制御するだけでなく、測定した波長と吸光度のデータを専用のファイル形式でコンピュータに保存している。この専用ソフトが入ったコンピュータで作業をする場合は問題ないが、専用ソフトが入っていないコンピュータでスペクトルの切り取り、重ね合わせ、拡大・縮小など

の作業をする場合はテキスト形式で保存されたファイルを、表計算ソフトを用いてスペクトル化する必要がある。このような場合には、テキストファイルから複数の操作を行う必要があり、数多くのテキストファイルを処理する場合には、時間と手間がかかり、非効率である。そこで、本研究では、スペクトルを専用ソフトなしで、簡単な操作のみで自動表示させるためのプログラムを作成することを目的とした。

Microsoft 社の Excel は広く普及していることから、表計算ソフトには Excel を用いることにした。Excel には「マクロの記録」と「VBA (Visual Basic for Applications)¹⁻⁴⁾」の機能が備わっている。マクロの記録には以下のような特徴がある。

- ①自分で行った操作を記録し、その記録した操作を繰り返し行えること
- ②プログラミング言語を使用しないので初心者でも簡単に作成できること
- ③記録できる操作は、Excel 内の簡単な操作だけであること
- ④汎用性を持ったプログラムを作成することができないこと

*平成 20 年度物質工学科卒業生

一例として、マクロの記録では、あるセル範囲でグラフを作成する場合に、セルの値が変化してもそれに対応したグラフを作成できる。この場合には、セル範囲が不変であることが必要であり、セル範囲が変化するには、再度マクロの記録を行わなければならない。一方、VBAには以下のような特徴がある。

- ①プログラムを構文で作成すること
 - ②複雑な操作もプログラムに組み込むことができること
 - ③プログラミング言語を使用するので、学習が必要であること
 - ④汎用性を持ったプログラムを作成することができること
- 以上のことから、VBAを用いてプログラムを作成すれば、データ数の異なるスペクトルも汎用的に表示できるため、ソフトはVBAを用いて作った。

2. データファイル

紫外・可視分光光度計は日本分光社製 JASCO V-570 を用いた。この光度計は図1に示したようにテキストファイルとしてもデータを出力することができる。

図1に示す各領域が表す内容は、以下のとおりである。まず、①の領域には、測定日や測定時間、測定した機種名等の基本情報が記載されている。次に、②の領域には、測定した時の波長間隔やXY軸の単位、開始波長、終了波長のような測定条件が記載されている。更に、③の領域には、測定した時のデータ个数、測定開始時の吸光度、吸光度の最大値と最小値が記載されている。最後に④の領域は、測定した波長と吸光度のデータが記載されている。

3. プログラム概要

測定データのテキストファイルからスペクトルを作成する場合の操作例は、次のとおりである。まず、Excel上の「開く」により、テキストファイルの選択を行う。次に、そのテキストファイルを区切り文字毎にセルに代

TITLE			
DATA TYPE			
ORIGIN	JASCO		①
OWNER			
DATE	108/12/18		
TIME	16:20:30		
SPECTROMETER/DATA SYSTEM	JASCO Corp.,		
V-570, Rev. 1.00			
RESOLUTION			②
DELTA X	-0.2		
XUNITS	NANOMETERS		
YUNITS	ABSORBANCE		
FIRST X	500.0000		③
LAST X	350.0000		
NPOINTS	751		
FIRST Y	0.59986		④
MAX Y	1.05254		
MIN Y	0.59986		
XYDATA			
500.0000	0.59986		
499.8000	0.60017		
499.6000	0.60086		
499.4000	0.60088		
499.2000	0.60093		
499.0000	0.60134		
...			

図1. データのテキストファイル出力の例

入させる設定を行う。更に Excel で開いたテキストファイルの波長と吸光度のデータの範囲を指定する。その後、「グラフの挿入」により、グラフの種類やグラフタイトル、XY軸のタイトル、凡例の有無を設定する。最後に、得られたグラフのX軸の最大値と最小値の調節を行う。

スペクトルを表示するプログラムを「プログラム1」として付録にまとめた。テキストファイルを開く操作を行う構文には、いくつか存在するが、ほとんどのものがテキストファイルの名前と存在している場所を事前にプログラム内で設定しておく必要があった。これでは、名前の異なるものや指定された場所に無いものは読み込むことができない。そこで、名前と場所を事前に指定する必要の無い GetOpenFilename を用いることにした。この関数は、選択したファイルの名前を返すというものである。この関数と開く操作を行う OpenText 関数を組み合わせることで、任意の名前と場所のテキストファイルを開くことが可能となった。このとき、区切り文字を構文内で指定しているので、その文字毎に自動でセルに代入させることも可能である。ここで、テキストファイル形式であった測定データを Excel ファイル形式へと変換を行っている。以降は、この Excel ファイル形

式の測定データを取り扱って、プログラムを作成する。

グラフを作成するには、Range関数とCells関数を組み合わされたものを用いることにした。Cells関数はセルの座標を指定することができるものであり、Range関数は、Cells関数で指定されたセルとセルの間の範囲を選択することができる。ここで、Cells関数を用いるときに、波長と吸光度のデータが始まるセルを指定するのは、簡単にできる。しかし、データが終わるセルの指定をするとき、データ個数の異なるテキストファイルでは、事前に座標を指定することができない。そこで、データのテキストファイルにあるNPOINTSの値を用いることにした。このNPOINTSは、波長と吸光度のデータ個数を表しているため、この値によってデータが終わるセルを指定することが可能になった。ここで、Excelブックにグラフを挿入し、範囲選択されたデータをグラフに適用し、グラフの種類は線のみで散布図で作成する。

更に、グラフのX軸の最大値と最小値を自動で変更させるためには、図1にあるFIRSTXとLASTXを用いることにした。これは、FIRSTXが開始波長、LASTXが終了波長を示しているため、これらの値が入っているセルを指定することで、グラフのX軸の最大値と最小値を変更することができる。さらに、X軸とY軸にはそれぞれ波長/nmと吸光度が自動で代入するようにした。

スペクトルを重ねて作成することも重要であるため、上記のプログラムを応用し、データの追加を行えるプログラムも作成した(付録プログラム2)。実際に作成したプログラムによって描いたスペクトルを図2に示す。スペクトルを追加する場合も、1個のスペクトルを作成する場合とほとんどコードは同じである。異なる点はスペクトルを重ねて作成することである。追加するテキストファイルを選択してExcelファイルに変換する。その後、新しく開いたExcelファイルから測定データの代入されたシートを前回のスペクトルがあるExcelブックに移動させる。その移動されたシート内のデータ範囲を自動で選択してスペクトルを前回作成したスペクトルに重ねるようにした。なお、シートを移動した際に、元のExcelファイルは、強制的に閉じるようにしてある。その理由は以下のとおりである。

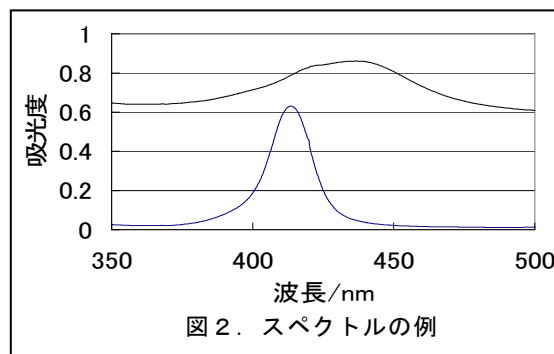


図2. スペクトルの例

データを追加するプログラムは、追加するテキストファイルをExcelファイルに変換する際に、新しいExcelブックを開く。そのため、ファイルを開いたときにはコンピュータ上に、プログラムが入っているExcelファイル、最初に作成したスペクトルがあるExcelファイル、追加するデータがあるExcelファイルの3つが存在する。データを追加するためには、追加するファイル名が必要になる。このファイル名が固定されていれば、ファイル名を指定しておくことができる。しかし、ファイル名がテキストファイル毎に異なる。テキストファイルをExcelファイルに変換したとき、コンピュータ上では3番目のExcelファイルとして認識される。そこで、このことを利用して3番目にあるExcelファイルの名前を取得させるためにNameという関数によって追加するExcelファイル名を取得し、これでデータの追加を行う。使用した3番目のファイルを使用後に閉じることによって、追加されたデータは常に3番目として扱うことができ、無制限にデータの追加が可能になる。

4. まとめ

最近の紫外・可視分光光度計は、分光器をコンピュータで制御し、測定からデータ解析、データ管理を付属の専用ソフトで行っている。このような操作は専用ソフトがインストールされているコンピュータ上で行う分には特に問題はない。しかし、通常このようなソフトは高価で、しかもコンピュータ1台のみにインストールすることが許されている。専用ソフトの導入されていないコンピュータで測定デー

データを扱うときには、測定データをテキストファイル形式で保存し、このファイルを基にスペクトルを幾つかの操作によって作成しなければならない。測定が数サンプルならばそれほど手間ではないと思うが、サンプル数が多くなると非効率である。本研究で作成したプログラムによってこのような操作を省略化し、テキストファイルの選択を行うだけでスペクトルを作成することが可能になった。スペクトルを複数重ねて作成する際にも、上記と同様にテキストファイルの選択を行うことで、自動でスペクトルを重ねて作成することができる。更に、このプログラムは、Excel が導入されているコンピュータであればどこでも使用することができる。

現在、このプログラムは、日本分光の JASCO V-570 を対象にして作成したが、別の機種であってもプログラム内容を多少変更するだけで使用できる。

5. 付録

プログラム 1²⁾

```
Sub OpenTxtFile()
    Dim myFName As String
    myFName = Application.GetOpenFilename("テキストフ
    ァイル(*.prn; *.txt; *.csv),*.prn;*.txt;*.csv")
    If myFName <> "False" Then
        Workbooks.OpenTextFilename:=myFName, Space:=True
        If StrConv(myFName, vbUpperCase) = "False" Then
    Exit Sub
        Application.ScreenUpdating = False
        Dim mySouce1 As Range
        Dim GYO1 As Integer
        Dim GYO2 As Integer
        Dim COL1 As Integer
        Dim COL2 As Integer
        Dim a As Integer
        GYO1 = 19
        COL1 = 1
        a = Cells(14, 2)
        GYO2 = a + 18
        COL2 = 2
        Set mySouce1 = Range(Cells(GYO1, COL1), Cells(GYO2,
        COL2))
        Charts.Add
        ActiveChart.SetSourceData Source:=mySouce1,
        PlotBy:=xlColumns
        ActiveChart.ChartType =
        xlXYScatterSmoothNoMarkers
```

```
Dim mySouce2 As Range
Dim mySouce3 As Range
Dim GYO3 As Integer
Dim GYO4 As Integer
Dim COL3 As Integer
Dim COL4 As Integer
Dim GYO5 As Integer
Dim GYO6 As Integer
Dim COL5 As Integer
Dim COL6 As Integer
GYO5 = 19
COL5 = 1
GYO6 = 19
COL6 = 2
GYO3 = a + 18
COL3 = 1
GYO4 = a + 18
COL4 = 2
Dim b As String
b = Workbooks(2).Worksheets(1).Name
Set mySouce2 =
Worksheets(b).Range(Worksheets(b).Cells(GYO5, COL5),
Worksheets(b).Cells(GYO3, COL3))
Set mySouce3 =
Worksheets(b).Range(Worksheets(b).Cells(GYO6, COL6),
Worksheets(b).Cells(GYO4, COL4))
ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues = mySouce2
ActiveChart.SeriesCollection(1).Values = mySouce3
ActiveChart.SeriesCollection(2).Delete
ActiveChart.Legend.Select
Selection.Delete
ActiveChart.Axes(xlValue).Select
Selection.MajorTickMark = xlOutside

Dim GYO8 As Integer
Dim GYO9 As Integer
Dim COL8 As Integer
Dim COL9 As Integer
GYO8 = 12
COL8 = 2
GYO9 = 13
COL9 = 2
ActiveChart.Axes(xlCategory).MaximumScale =
Worksheets(b).Cells(GYO8, COL8)
ActiveChart.Axes(xlCategory).MinimumScale =
Worksheets(b).Cells(GYO9, COL9)
ActiveChart.Axes(xlCategory).MajorUnit = 100
ActiveChart.Axes(xlCategory).MajorUnit = 10
With ActiveChart
    With .Axes(xlCategory)
        .HasTitle = True
        .AxisTitle.Text = "波長/nm"
    End With
    With .Axes(xlValue)
        .HasTitle = True
        .AxisTitle.Text = "吸光度"
```

```

        End With
    End With
    End If
End Sub

    プログラム 22)
Sub OpenTxtFile()
    Dim myFName2 As String
    myFName2 = Application.GetOpenFilename("テキスト
ファイル(*.prn; *.txt; *.csv);*.prn;*.txt;*.csv")
    If myFName2 <> "False" Then
        Workbooks.OpenText      Filename:=myFName2,
Space:=True
        If StrConv(myFName2, vbUpperCase) = "False" Then
Exit Sub
        Application.ScreenUpdating = False

        Dim a As String
        a = Workbooks(3).Worksheets(1).Name
        Dim b As String
        b = Workbooks(2).Name
        Worksheets(a).Move _
            After:=Workbooks(b).Sheets(1)

        Dim mySouce1 As Range
        Dim GYO1 As Integer
        Dim GYO2 As Integer
        Dim COL1 As Integer
        Dim COL2 As Integer
        Dim e As Integer
        GYO1 = 19
        COL1 = 1
        e = Cells(14, 2)
        GYO2 = e + 18
        COL2 = 2
        Set mySouce1 = Range(Cells(GYO1, COL1),
Cells(GYO2, COL2))

        Dim mySouce2 As Range
        Dim mySouce3 As Range
        Dim GYO3 As Integer
        Dim GYO4 As Integer
        Dim COL3 As Integer
        Dim COL4 As Integer
        Dim GYO5 As Integer
        Dim GYO6 As Integer
        Dim COL5 As Integer
        Dim COL6 As Integer
        GYO5 = 19
        COL5 = 1
        GYO6 = 19
        COL6 = 2
        GYO3 = e + 18
        COL3 = 1
        GYO4 = e + 18
        COL4 = 2

```

```

        Dim d As String
        d = Workbooks(2).Worksheets(1).Name
        Set mySouce2 =
Worksheets(d).Range(Worksheets(d).Cells(GYO5, COL5),
Worksheets(d).Cells(GYO3, COL3))
        Set mySouce3 =
Worksheets(d).Range(Worksheets(d).Cells(GYO6, COL6),
Worksheets(d).Cells(GYO4, COL4))

        Dim f As String
        f = Workbooks(2).Charts(1).Name
        With Charts(f).SeriesCollection.NewSeries
            .ChartType =
xlXYScatterSmoothNoMarkers
            .XValues = mySouce2
            .Values = mySouce3
        End With
    End If
End Sub

```

6. 参考文献

- (1) 大村あつし かんたんプログラミング
Excel2000VBA 基礎編 技術評論社 (2000) .
- (2) 大村あつし かんたんプログラミング
Excel2003VBA 応用編 技術評論社 (2004) .
- (3) 松本瀬理奈、「Excel VBA 辞典」、秀和システム、(2004).
- (4) 西沢夢路、「やさしくわかる Excel 関数・マクロ」、ソフトバンクパブリッシング、(2004).

文部科学省 科学研究費補助金採択研究（平成21年度）

研究種目	学科名	職名	氏名	研究課題
【新規】 基盤研究(C) 一般	人文科学科	講師	奥山慶洋	高専生の英語発信能力向上を目指した英語専門用語データベースの構築に関する研究 《研究分担者》 人文科学科 杉浦理恵 電気電子システム工学科 長野真康
【新規】 基盤研究(C) 一般	電子制御工学科	教授	堀利浩	電子回路特性評価効率化のための新周波数解析の提案とその応用
〔継続〕 若手研究(B)	物質工学科	准教授	宮下美晴	キッチン・キトサンへのラクチドのグラフト化による環境調和型高分子材料の設計
〔継続〕 若手研究(B)	人文科学科	准教授	杉浦理恵	高等専門学校生のニーズに応じたタスクの開発とその実施効果に関する研究
〔継続〕 若手研究(B)	物質工学科	准教授	小松崎秀人	トリスピラゾリルボレート配位子を持つマンガンセミキノナト錯体の合成と性質の解明
【新規】 若手研究(B)	機械システム 工学科	助教	澁澤健二	近赤外分光を用いたマイクロ波放電低圧窒素プラズマの非平衡放射解析
〔継続〕 若手研究 (スタートアップ)	電気電子 システム工学科	助教	丸山智章	歯科CADのための歯牙滑走運動シミュレータの開発

【研究分担者】

研究種目	学科名	職名	氏名	研究課題
【新規】 基盤研究(B)	人文科学科	准教授	杉浦理恵	タスク支援によるコミュニケーション能力の育成に関する調査研究 研究代表者:東京外国語大学 高島英幸

文部科学省 原子力研究環境整備補助金採択事業（平成21年度）

事業種目	学科名	職名	氏名	教育研究課題
原子力研究 促進事業	機械システム 工学科 自然科学科	教授 准教授 准教授	富永学 池田耕 松澤孝男	原子力人材育成プログラム (原子力研究促進プログラム) 低学年の学生に対する放射線・エネルギー・原子力への興味の喚起および、高学年の学生のインターンシップや研究活動を通じた原子力分野の専門教育

外部資金受入による共同研究・受託研究（平成20年度）

【共同研究】

学 科 名	職 名	氏 名	研 究 課 題
機械システム工学科	教 授	◎ 根 本 栄 治	【継続】ハイエット処理物質の熱物性測定及びその応用に関する研究
機械システム工学科	教 授	押久保 武	マグネシウム合金製新型携帯スロープの研究開発
機械システム工学科	教 授 教 授 教 授	※ 押久保 武 谷 山 久 法 柴 田 裕 一	三次元トレイ製品の性能評価
機械システム工学科	教 授 教 授 教 授	※ 押久保 武 谷 山 久 法 柴 田 裕 一	改良型三次元トレイ製品の性能評価
機械システム工学科 電子制御工学科	准教授 教 授	※ 小 堀 繁 治 住 谷 正 夫	蒸気タービン制御系の動特性解明に関する研究
電子制御工学科 機械システム工学科	准教授 教 授	※ 荒 川 臣 司 柴 田 裕 一	列車車両洗浄装置の性能向上に関する研究
電子制御工学科	准教授	荒 川 臣 司	シール印刷技術に関する研究
電子制御工学科	准教授	荒 川 臣 司	電子基板の外観検査装置の開発
電子制御工学科	准教授	飛 田 敏 光	【継続】組込みシステム開発エンジニア養成講座カリキュラムの研究2
電子制御工学科	准教授	金 成 守 康	ナノインデンテーションの応用研究と機械・材料・電子制御の融合教育の実践
電子制御工学科	准教授	菊 池 誠	接触検出機構付き拡大機構の性能の改善
電子制御工学科	准教授	岡 本 修	【継続】地点設定システムの研究開発
電子制御工学科	准教授	岡 本 修	GPS補正信号への地殻変動量の反映
電気電子システム工学科	教 授	田 辺 隆 也	植物の成長促進・制御システムの開発
電気電子システム工学科	助 教	成 慶 珉	【継続】SiC-PiNダイオードとIEGTのハイブリッド素子による高耐圧高速変換器に関する研究
電気電子システム工学科	助 教	成 慶 珉	インバータ・昇圧回路の電動工具用途への適応研究
電子情報工学科	助 手	弥 生 宗 男	磁性材料を用いた新規高機能デバイスの開発～高規則性ポーラスアルミナをテンプレートに用いた2次元磁性フォトニック結晶の作製～
物 質 工 学 科	教 授	富 田 豊	相乗効果水を基本成分とした化粧品の基礎研究
物 質 工 学 科	教 授	山 形 信 嗣	触媒を用いた含酸素化合物からのオレフィン製造に関する研究
物 質 工 学 科 物 質 工 学 科	教 授 嘱託教授	※ 砂 金 孝 志 斎 藤 保 夫	【継続】メタホウ酸ナトリウムに関する水素化反応の高効率化
物 質 工 学 科	教 授	砂 金 孝 志	フォトクロミック光差分フィルタの開発研究
物 質 工 学 科	准教授	鈴 木 康 司	臨床診断用酵素開発に関する研究

【受託研究】

学 科 名	職 名	氏 名	研 究 課 題
電気電子システム工学科	准教授	若 松 孝	タンパク質結晶化分析装置の開発 (JSTシーズ発掘試験課題)
電子制御工学科	准教授	岡 本 修	土壤汚染調査における「調査地点設定システム」の開発 (JSTシーズ発掘試験課題)
	校 長	角 田 幸 紀	将来アンテナ技術の研究

注) ※は研究代表者、◎は研究重点教員

教員事績（平成20年10月～平成21年9月）

人文科学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号（年、月）	備考
平本 留理	『十訓抄』の登場人物 — 説話集分類の視点から —	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.55-62 (2009.3)	
桐生 貴明	「仲哀天皇」「日本武尊」「神功皇后」ほか (志村有弘編 『天皇皇族歴史伝説大事典』)	勉誠出版 2008.12	
桐生 貴明	「有間皇子」「石川郎女」「大津皇子」「高橋虫麻呂」ほか (志村有弘・針原孝之編『日本文化文学人物事典』)	鼎書房 2009.2	
神山 和好	何が帰納懐疑論を発生させるのか — メラー「帰納の保証」について —	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.1-6 (2009.3)	
神山 和好	知識の阻却可能性分析について	科学基礎論学会2009年度年会 (2009.6.14)	[口頭発表]
箱山 健一	バイエルン南北縦貫鉄道と経済空間形成	ADWG.NF 2008年度12月例会研究発表 (2008.12.)	
三好 章一 市坪 誠	国際的キャリア教育「海外インターンシップ」プログラムの開発	平成21年度 国立高等学校機構主催教育 教員研究集会論文平成21年8月18-19日	
三好 章一 市坪 誠	高専機構主催「海外インターンシップ制度」の創設	(社)日本工学教育協会第57回 年次大会 工学・工業教育研究講演会口頭発表論文 平成21年8月7日(金)～9日(日)	
高橋 正人	「直喩の日英比較によって言語文化の一面を論じられるか？」	日英言語文化学会平成21年度年次大会 (6月)	[口頭発表]
島山 雄二1) 本田 謙介 田中 江扶2)	日本語に「長距離」の例外的格付与はあるのか？ : Ura(2007)の批判的検討	言語研究 第134号 pp. 141-154 日本言語学会 (2008.10)	[査読有] 1)東京農工大学 2)信州大学
Y.Hatakeyama 1) K.Honda K.Tanaka 2)	Verb movement in Japanese revisited	Journal of Japanese Linguistics Vol. 24 pp. 89-103 (2008.12)	[査読有] 1)東京農工大学 2)信州大学
島山 雄二1) 本田 謙介 田中 江扶2)	「太郎は花子のように英語ができない」の曖昧性をめぐって	日本語文法 9巻1号 pp.88-98 くろしお出版 (2009.5)	[査読有] 1)東京農工大学 2)信州大学
本田 謙介 田中 江扶1) 島山 雄二2)	日本語の教科書	島山雄二(編) ベレ出版 pp.12-93 (2009.6)	[査読無] 分担執筆 1)信州大学 2)東京農工大学

人文科学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号（年、月）	備考
杉浦 理恵	高等専門学校におけるタスクを中心とした英語教育の可能性 — ニーズ分析に基づくタスクの開発 —	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.7-16 (2009.3)	
今井 典子1) 杉浦 理恵 奥村 耕一2) 高島 英幸3)	台湾の英語教育の課題から学ぶ日本の英語教育 —「第一回 中日英語教育研究会」からの示唆 —	教職研修（教育開発研究所）7月号 pp.82-86	1)高知工業高等専門学校 2)横浜市立旭中学校 3)東京外国語大学
奥山 慶洋	携帯端末を活用した語彙学習 ネットワークの構築について	第12回外国語教育学会研究大会 (2008.11)	[口頭発表]
奥山 慶洋	モバイルラーニングによる新たな英語教育の試み	茨城工業高等専門学校英語教育フォーラム (2009.3)	[口頭発表]
奥山 慶洋 杉浦 理恵 長野 眞康	高専生の英語発進能力向上を目指した英語専門用語データベース構築に関する研究（教員・学生のニーズ分析を中心に）	全国高等専門学校英語教育学会 第33回 研究大会(2009.8)	[口頭発表]
奥山 慶洋 森脇 滉1) 飯島 竜司1) 目時 彩加1)	オーストラリア語学研修時の環境測定	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.17-22 (2009.3)	1)ラジオ部員
大塚 賢一	茨城工業高等専門学校における海外短期語学研修の言語学的教育効果検証 — 2年間のデータ分析から —	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.23-30 (2009.3)	
中井 麻記子	“Just Let Me Dress Myself”: <i>Villette</i> as a Female Quest Romance	『関西英文学研究』第2号（日本英文学会関西支部） pp. 19-39 (2008.12)	
乙黒 麻記子	The Hero におけるモームのイギリス批判	<i>Cap Ferrat</i> 第6号 pp.29-30 (日本モーム協会会誌) (2009.03)	
乙黒 麻記子	『人間の絆』における教養小説的構造の破綻	日本英文学会第81回大会Proceedings pp.101-03 (2009.09)	日本英文学会 第81回 大会[口頭発表] (2009.5)

教員事績（平成20年10月～平成21年9月）

自然科学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号（年、月）	備考
松久 隆	Fuzzy Communication Reaching Consensus under Acyclic Condition	T.-B. Ho and Z.-H. Zhou (Eds.): PRICAI 2008, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, Volume 5351, pp. 760-767 (2008.12)	単著・国際会議論文 [査読有]
松久 隆	Common-Knowledge Resolves Moral Hazard	I. Troch, F. Breiteneker (Edts.):Proceedings. MATHMOD, Vienna 2009, February 11-13, 2009. Full Papers CD Volume. Vienna University of Technology, Argesim Report No.35. ISBN 978-3-901608-35-3 (2009.2)	単著・国際会議論文 [査読有]
松久 隆	Can Communication Resolve Moral Hazard?	Nonlinear Analysis and Convex Analysis (NACA 2009), March 27-31, 2009, Abstracts, p.90 (2009.3)	単著・国際会議発表 要旨[査読有]
松久 隆	Fuzzy Communication Leading to Equilibrium through Possibility Messages	IEEE Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2009. Bradford (UK), 26-29 May 2009, IEEE Press. pp.1 - 6 (2009.5)	単著・国際会議論文 [査読有]
松久 隆	Common-Knowledge Resolves Moral Hazard in S5n-Modal Logic	6th International Conference on Computational Management Science, Geneva (CSM2009), May 1-3, 2009. Abstract p.32. (2009.5)	単著・国際会議発表 要旨[査読有]
松久 隆	Can Communication Resolve Moral Hazard?	22th Workshop on Methodologies and Tools for Complex System Modeling and Integrated Policy Assessment CSM 2009, Laxenburg, Wien (Austria), 31 August-2 September 2009. Abstract pp.40-41. (2009.8)	単著・国際会議発表 要旨[査読有]
П. С м р о к а н (P. Strokan) 1) Т. М а м с у х ц с а (松久 隆)	ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАВНОВЕСИЯ В КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ,	2009 ВЕСТНИК САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. Сер. 10, Вып. 2 удк 518.9 pp.1-9 (2009.7)	共著・大学研究所等 紀要[査読有] 1)サンクトペテルスブルグ大学・応用数理学部・大学院学生
原 嘉昭 中岡 鑑一郎 大西 彰正1) 佐々木 稔1) 沈 睿2) 松田 康弘2) 嶽山 正二郎2)	Magneto-optical study under pulsed high magnetic fields of β -FeSi ₂ single crystals grown by a chemical vapor transport method	14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems, Sendai(Japan), July 13-17,2009. Abstract pp90-92.	共著・国際会議発表 要旨[査読有] 1)山形大 2)東大物性研
原 嘉昭 高瀬 浩一1) 山崎 篤志2) 佐藤 博彦3) 宮川 宣明4) 梅山 規男4,5) 池田 伸一5)	Structural and Physical Properties of FeSe Crystals Fabricated by Chemical Vapor Transport Method	9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, Tokyo(Japan), September 7-12, 2009. Abstract PS-B-429.	共著・国際会議発表 要旨[査読有] 1)日大理工 2)甲南大理工 3)中大理工 4)東理大理 5)産総研

自然科学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号(年、月)	備考
梅山 規男1,2) 戸村 正俊3) 高瀬 浩一3) 原 茂男4) 堀口 聡4) 富永 あやか4) 佐藤 博彦4) 原 嘉昭 宮川 宣明1) 池田 伸一2)	Superconductivity on FeSe Synthesized by Various Sintering Temperatures	9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, Tokyo(Japan), September 7-12, 2009. Abstract PS-B-410.	共著・国際会議発表 要旨[査読有] 1)東理大理 2)産総研 3)日大理工 4)中大理工
原 嘉昭 高瀬 浩一1) 山崎 篤志2) 佐藤 博彦3) 宮川 宣明4) 梅山 規男4,5) 池田 伸一5)	気相法により成長したFeSe結晶の構造と物性	日本物理学会講演概要集 第64巻、第1号、第3分冊、2009.3.27-30、立教大学(東京)、p557	共著・国内学会予稿 [査読無] 1)日大理工 2)甲南大理工 3)中大理工 4)東理大理 5)産総研
原 嘉昭 中岡 鑑一郎	化学気相運送法で作製した β -FeSi ₂ 単結晶の光学特性	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.31-34 (2009.3)	共著・大学研究所等 紀要[査読無]
渡邊 義孝	茨城高専における指静脈認証システムによる応用(2) 学生の出欠席への取り組みについて	論文集「平成21年度高専教育講演論文集」371~374(2009.8)	単著・国内学会発表 要旨[査読有]
渡邊 義孝 添田 孝幸	茨城高専寮における生体認証システムによる寮の点呼の実験的な試み	論文集「高専教育」、32号、pp.701-704 (2009.3)	共著・国内学術雑誌 [査読有]

教員事績（平成20年10月～平成21年9月）

機械システム工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号（年、月）	備考
根本 栄治 山下 恭平1) 額賀 晴樹1)	二次元異方性熱伝導体の主軸熱伝導率、熱拡散率および主軸角の同時測定理論	第29回 日本熱物性学会シンポジウム論文集、p.287-289 (2008.10)	1)平成21年度専攻科2年生
山下 恭平1) 根本 栄治	固体高分子型燃料電池における膜電極接合体の熱物性測定 (第1報:燃料電池構成材料のa-b面方向の主軸熱伝導率及び主軸角の分離測定)	第29回 日本熱物性学会シンポジウム論文集、p.381-383 (2008.10)	1)平成21年度専攻科2年生
額賀 晴樹1) 根本 栄治	色素増感型太陽電池膜の熱物性測定 (第1報:プラスチック板上の酸化チタン膜における主軸熱伝導率および主軸角測定)	第29回 日本熱物性学会シンポジウム論文集、p.384-386 (2008.10)	1)平成21年度専攻科2年生
今尾 浩也1) 河野 良弘2) 西岡 将美3) 根本 栄治	高専弓道の現状と課題	論文集「高専教育」32号、p.735-740 (2009.3)	1)松江高専 2)鹿児島高専 3)鈴鹿高専
根本 栄治 石井 賢司1) 佐久間 英和1)	分子振動活性装置による処理水の熱伝導率測定	第56回 応用物理学関係連合講演会講演予稿集、p486 (2009.3)	1)(株)日本創造エネルギー研究所
根本 栄治 山下 恭平1)	固体高分子形燃料電池の触媒分布形状による発電性能向上	第56回 応用物理学関係連合講演会講演予稿集、p487 (2009.3)	1)平成21年度専攻科2年生
根本 栄治 額賀 晴樹1)	2次元フラクタル表面形状を有する太陽電池の出力特性	第56回 応用物理学関係連合講演会講演予稿集、p487 (2009.3)	1)平成21年度専攻科2年生
E.Nemoto T.Gunji 1) K.Yamashita 2) H.Nukaga 2)	Simultaneous Separation Measurement of Principal Thermal Conductivities and Principal Axis Angle of Pyrolytic Graphite Sheet for Two-Dimensional Anisotropic Material Using Integrated Multi-Temperature Probe Method	Japanese Journal of Applied Physics, 48-5, p.05EB03-1 (2009.5)	1)Nagaoka University of Technology 2)Advanced Course of Ibaraki National College of Technology
根本 栄治	金属及びセラミック系超伝導体に関する一般的熱伝導率モデルの研究	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.35-40 (2009.3)	
遠藤 勲1) 鯉淵 弘資	Non-trivial effect of the in-plane shear elasticity on the phase transitions of fixed-connectivity meshwork models	European Physical Journal B Vol.66 pp.467-475 (2008)	1)茨城高専電気電子システム工学科
鯉淵 弘資	Shape transformation transitions in a model of fixed-connectivity surfaces supported by skeletons	European Physical Journal B Vol.66 pp.85-90 (2008)	
畑岡 進也1) 鯉淵 弘資	狭い領域に閉じ込められた膜モデルの形態変化	日本機械学会茨城講演会講演論文集、pp.157-158 (2009.8)	1)平成21年度機械システム工学科5年生
飛田 隼佑1) 鯉淵 弘資	束縛された力学変数による膜モデルの相転移	日本機械学会関東支部講演会講演論文集、pp.57-59 (2008.3)	1)平成20年度機械システム工学科5年生

機械システム工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号(年、月)	備考
鯉淵 弘資	膜モデルのFlat Histogram Monte Carloシミュレーション	日本機械学会関東支部講演会講演論文集, pp.59-60 (2008.3)	
T.Yanai Y.Shibata M.Kawaji 1)	Study on Microscale Contact of Two-Liquid Droplets	4th ISCIU, p420-422, (2008,11)	1)トロント大学
Y.Shibata T.Takamine M.Kawaji 1)	Emission of Liquid Droplets From the Interface of Bidrops Pulled by a Ferrofluid in a Microchannel	ASME ICNMM09, Korea, CD-ROM (2009,6)	1)ニューヨーク市立大学
柴田 裕一 川路 正裕1)	マイクロチャンネル内を移動する二重滴の界面から放出される液滴の研究	日本混相流学会, 年間講演会論文集, A124, P22-23(2009,8)	1)ニューヨーク市立大学
富永 学 郡司 光1) 谷萩 雄一郎2) 鴨志田 武2)	低ひずみ速度域におけるSUS304ステンレス鋼の特異な変態誘起塑性	第52回 日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集別冊:富田記念シンポジウム, pp.32-33 (2008.10)	1)平成20年度専攻科1年生 2)茨城県工業技術センター
富永 学 古橋 和樹1)	光学顕微鏡下でのスペックル法による生体活動の観察	応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集(第40回)、pp.5-8 (2009.1)	1)平成20年度機械システム工学科5年生
郡司 光1) 富永 学 谷萩 雄一郎2) 鴨志田 武2)	準オーステナイト系ステンレス鋼における特異な変形挙動のひずみ速度依存性と力学的性質	応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集(第40回)、pp.93-98 (2009.1)	1)平成20年度専攻科1年生 2)茨城県工業技術センター
松澤 孝男1) 大沼 侑2) 会澤 雄基3) 松田 理絵4) 川上 悠理5) 斎藤 史靖6) 森脇 滉7) 飯嶋 竜司8) 目時 彩加9) 斎藤 慶太10) 田島 圭一郎11) 矢野倉 伊織12) 八重樫 拓也13) 関根 恵14) 富永 学	— 富士山を環境研究白自然学習の場 に — 文部科学省事業、高校生のための地域の原子力・エネルギー学習支援事業および原子力人材育成事業参加による文系クラブの活性化の試行	第14回「高専シンポジウム in高知」予稿集原稿、(2009.1)	1)自然科学科【2)~13)ラジオ部】 2)平成20年度電子情報工学科5年生 3)平成20年度電子制御工学科5年生 4)平成20年度電子情報工学科4年生 5)平成20年度機械システム工学科4年生 6)平成20年度電子制御工学科3年生 7)平成20年度電気電子システム工学科2年生 8)平成20年度電気電子システム工学科2年生 9)平成20年度機械システム工学科2年生 10)平成20年度電子情報工学科2年生 11)平成20年度電子制御工学科2年生 12)平成20年度機械システム工学科1年生 13)平成20年度電子情報工学科1年生 14)北海道大学応用理工学系

機械システム工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号(年、月)	備考
松澤 孝男1) 大沼 侑2) 会澤 雄基3) 松田 理絵4) 川上 悠理5) 斎藤 史靖6) 森脇 滉7) 飯嶋 竜司8) 目時 彩加9) 斎藤 慶太10) 田島 圭一郎11) 矢野倉 伊織12) 八重樫 拓也13) 関根 恵14) 富永 学	— 2030年頃の日本の原子力発電量の簡易予測 — 文部科学省事業、高校生のための地域の原子力・エネルギー学習支援事業および原子力人材育成事業参加による文系クラブの活性化の試行	第14回「高専シンポジウム in高知」予稿集原稿、(2009.1)	1)自然科学科 【2)～13)ラジオ部】 2)平成20年度電子情報工学科5年生 3)平成20年度電子制御工学科5年生 4)平成20年度電子情報工学科4年生 5)平成20年度機械システム工学科4年生 6)平成20年度電子制御工学科3年生 7)平成20年度電気電子システム工学科2年生 8)平成20年度電気電子システム工学科2年生 9)平成20年度機械システム工学科2年生 10)平成20年度電子情報工学科2年生 11)平成20年度電子制御工学科2年生 12)平成20年度機械システム工学科1年生 13)平成20年度電子情報工学科1年生 14)北海道大学応用理工学系
澁澤 健二 船津 賢人1) 白井 紘行1) 高草木 文雄1)	低圧窒素マイクロ波放電プラズマにおけるN ₂ 1+バンドの放射特性	平成20年度 衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.117-120, (2009.3)	1)群馬大学
澁澤 健二 船津 賢人1) 白井 紘行2) 高草木 文雄1)	低圧窒素マイクロ波放電プラズマにおけるN ₂ 1+バンドの振動非平衡について	第41回 流体力学講演会／航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2009講演集 pp.17-18, (2009.6)	1)群馬大学 2)放送大学

教員事績（平成20年10月～平成21年9月）

電子制御工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号（年、月）	備考
田山 宗徳1) 宝角 敬一	脚部障害発生時の6脚步行ロボットの 歩行アルゴリズムの研究	(社)日本機械学会関東支部 茨城講演会 論文集p.203(2009.8)	1)平成20年度専攻科 1年生
加藤 義隆1) 宝角 敬一	6脚ロボットの歩行安定化の研究	(社)日本機械学会東北支部 第45期秋季 講演会論文集p.135(2009.9)	1)平成20年度専攻科 1年生
小山 祐介1) 長谷川 勇治 伊藤 伸英2) 塚越 広光2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4)	ELID研削用導電性樹脂砥石の開発	2008年度 精密工学会北陸信越支部 学術 講演会論文集B10 (2008.11)	1)平成20年度電子制 御工学科5年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学
藤田 和生1) 長谷川 勇治 伊藤 伸英2) 塚越 広光2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4)	最終仕上げを目的としたラバーボンド 砥石の開発	2008年度 精密工学会北陸信越支部 学術 講演会論文集B11 (2008.11)	1)平成20年度電子制 御工学科5年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学
清水 大樹1) 長谷川 勇治 伊藤 伸英2) 塚越 広光2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4)	マイクロバブルを援用した効率的研削 加工システムの構築	関東学生会 第48回学生員卒業研究発表 講演会論文集1201 (2009.03)	1)平成20年度電子制 御工学科5年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学
小山 祐介1) 長谷川 勇治 伊藤 伸英2) 塚越 広光2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4)	ELID 研削用導電性樹脂砥石の開発	関東学生会 第48回学生員卒業研究発表 講演会論文集1209 (2009.03)	1)平成20年度電子制 御工学科5年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学
長田 雄一1) 長谷川 勇治 伊藤 伸英2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4)	ELID研削用ポーラス樹脂砥石の開発	2009年度 日本機械学会関東支部総会講演 会論文集21105 (2009.03)	1)平成20年度専攻科 1年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学
加藤 照子1) 大森 整1) 伊藤 伸英2) 塚越 広光2) 増田 和弘2) 長谷川 勇治 根本 昭彦3) 松澤 隆4)	ELID研削用ツール開発におけるトライ ボアプリケーションに関する研究	2009年度 精密工学会春季大会学術講演会 論文集 M32 (2009.03)	1)理化学研究所 2)茨城大学 3)日本工業大学 4)池上金型工業

電子制御工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号(年、月)	備考
長谷川 勇治 井川 裕太1) 伊藤 伸英2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4)	ELID 研削用メタルボンドポーラス砥石 の開発	2009年度 精密工学会春季大会学術講演会 論文集 M38 (2009.03)	1)平成20年度専攻科 1年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学
長谷川 勇治 藤田 和生1) 伊藤 伸英2) 塚越 広光2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4) 松澤 隆5)	ラバーボンド砥石の加工特性	2009年度 精密工学会春季大会学術講演会 論文集 M39 (2009.03)	1)平成20年度電子制 御工学科5年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学 5)池上金型工業
長谷川 勇治 会沢 雄基1) 伊藤 伸英2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4)	砥草を用いた環境調和型ELID研削用 カーボン砥石の開発	2009年度 精密工学会春季大会学術講演会 論文集 F77 (2009.03)	1)平成20年度電子制 御工学科5年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学
長谷川 勇治 井川 裕太1) 伊藤 伸英2) 大森 整3) 加藤 照子3) 根本 昭彦4)	ELID 研削用メタルボンドポーラス砥石 の開発	理化学研究所ELID研削研究会第53回 ELID研削セミナー (2009.03)	1)平成20年度専攻科 1年生 2)茨城大学 3)理化学研究所 4)日本工業大学
岡本 修	紙地図からの現地調査向けGPSナビ ゲーション	電気学会産業システム情報研究会, IIS-08-51, pp.1-4, (2008.12)	
三浦 光通1) 岡本 修 高橋 徹1) 広瀬 篤2)	土壌汚染調査における調査地点設定 に係わる測定の省力化(第4報) — ロバスト性の改善 —	土壌環境センター他共催 第15回 地下水・ 土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 講演集, pp.418-421 (2009.6)	1)環境研究センター 2)デジメイト
滝 秀範1) 住谷 正夫	ゆらぎ画像の作成	電子情報通信学会東京支部学生会研究発 表会 (2009.3)	1)豊橋技術科学大学
住谷 正夫	様々は時系列ゆらぎデータの作成	電子情報通信学会2009年総合大会, A-15- 35 (2009.3)	

教員事績 (平成20年10月～平成21年9月)

電気電子システム工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号 (年、月)	備考
I.ENDO H.Koibuchi	Non-trivial effect of the in-plane shear elasticity on the phase transitions of fixed-connectivity meshwork models.	Eur. Phys. J. B66, 467-475 (12 December 2008)	
林 和伸 遠藤 勲 柴田 尚志	茨城高専におけるPBL演習「産業技術システムデザイン工学演習」の実践	論文集「高専教育」第32号 (2009. 3)	
T.Tanabe I.Hatakeyama	Data Transfer Rate of Holographic Data Storage Systems using Write Compensation	IWHM2008, 21p5 (2008.10)	
H.Hayashi 1) T.Sase 1) T.Tanabe	High spatial resolution using optical super-resolution near-field structure	ISCIU4 p430 (2008.11)	1)専攻科2年
山下 拓哉1) 田辺 隆也 畑山 雅俊2) 竹中 久貴2)	SiC/Mg多層膜ミラーの表面保護膜の作製と特性評価	第16回 電気学会東京支部茨城支所 研究発表会PB10 (2008.12)	1)専攻科2年 2)NTT-ATN
田辺 隆也 作山 幸恵1) 福田 光男2)	植物栽培用LEDのフィードバック制御法の一検討	第16回 電気学会東京支部茨城支所 研究発表会PA06 (2008.12)	1)平成19年度電気工 学科卒業生 2)豊橋技術科学大学
福田 光男1) 松尾 あかね1) 神野 弘明1) Islam Farzana1) 中山 尚之1) 大山 祥吾1) 内海 淳志1) 田辺 隆也	半導体レーザおよび光ファイバープ ロープを用いた植物内屈折率の検出と 水分量の推定	植物環境工学 (J.SHITA)21 (1) :pp.7-14 (2009)	1)豊橋技術科学大学
H.Hayashi 1) T.Sase 1) T.Tanabe	Optically High Spatial Resolution Obtained Using Super-Resolution Near-Field Structure Disk System	Jpn. J. Appl. Phys. 48 No.03A052 (2009.3)	1)専攻科2年
田辺 隆也 山下 拓哉1) 畑山 雅俊2) 竹中 久貴2)	SiC/Mg多層膜ミラーの耐湿性表面保護 膜の作製と特性評価	小島・平林記念 機械工学・超伝導低温シン ポジウム第10回高エネ研メカ・ワークショップ CM09-P05 (2009.4)	1)専攻科2年 2)NTT-ATN
田辺 隆也	記録用信号処理技術の基礎	第2回 光ディスク懇談会資料4 (2009.7)	
田辺 隆也 福田 光男1)	植物の成長制御装置およびその方法	特願2009-196310 (2009. 8)	1)豊橋技術科学大学

電気電子システム工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号(年、月)	備考
吉田 将大1) 下田 藍子2) 田辺 隆也 福田 光男3)	LED光照明による植物の成長特性分析に関する研究	高専連携教育研究プロジェクト学生成果報告会 (2009.8)	1)電気電子システム工学科5年生 2)平成20年度電気電子システム工学科卒業生 3)豊橋技術科学大学
田辺 隆也 下田 藍子1) 吉田 将大2) 森 慶市 福田 光男3)	LED 光照明による菊成長特性の分析	日本生物環境工学会2009年福岡大会 P13 (2009.9)	1)平成20年度電気電子システム工学科卒業生 2)電気電子システム工学科5年生 3)豊橋技術科学大学
井坂 大智1) 若松 孝	四探針法による導電性薄膜の抵抗率測定	第14回電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 120, p.120 (2009.3)	1)平成20年度電気電子システム工学科5年生
井上 真嘉1) 若松 孝	低周波微小振動のレーザ計測	第14回電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 121, p.121 (2009.3)	1)平成20年度電気電子システム工学科5年生
林 明宏1) 若松 孝	簡単な光学系による低周波微小振動の計測	平成21年度 電気関係学会東北支部連合大会 講演論文集, 2D06, p.118 (2009.8)	1)平成21年度専攻科2年生
青木 克仁1) 若松 孝	有機薄膜の可視ATRスペクトル	平成21年度 電気関係学会東北支部連合大会 講演論文集, 2D07, p.119 (2009.8)	1)平成21年度専攻科2年生
青木 克仁1) 若松 孝	全反射エバネッセント光のFDTD解析	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.41-46 (2009.3)	1)平成21年度専攻科2年生
若松 孝 大西 裕季	生体高分子の結晶化方法, 結晶化装置, 及び配向制御方法	特願2009-049043 (2009.3)	
塚本 佳幸1) 吉成 偉久	Flash及び携帯電話を用いた発想支援システムの開発	平成20年度 電気学会東京支部茨城支所研究発表会, PB01, (2008.12)	1)平成20年度専攻科2年生
太田 智規1) 吉成 偉久	Ajaxを用いた協調作業システムの開発	平成20年度 電気学会東京支部茨城支所研究発表会, PB02, (2008.12)	1)平成20年度専攻科2年生
川又 友希1) 吉成 偉久	DHTMLによるアニメーションスクリプト作成ツールの開発	平成20年度 電気学会東京支部茨城支所研究発表会, PB03, (2008.12)	1)平成20年度専攻科2年生
秋山 裕信1) 瀬谷 智洋2) 成 慶珉	昇圧DC-DCコンバータのデジタル制御による出力特性	平成21年度 電気学会産業応用部門大会, Y-9, (2009年8月)	1)平成21年度専攻科1年生 2)平成20年度電気電子システム工学科卒業生

電気電子システム工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号(年、月)	備考
前田 裕文1) 伊藤 祐樹2) 成 慶珉	連系インダクタンス電圧による電力計算法	平成21年度 電気学会産業応用部門大会, Y-15, (2009年8月)	1)平成21年度専攻科1年生 2)平成20年度電気電子システム工学科卒業生
M.Kamaga K.Sung Xu Jin Y.Sato H.Ohashi	Floating gate power supply of multilevel converters for circuit integration	European Power Electronics and Drives EPE2009, 8-10Sep.	
下山田 直人1) 山中 紀明1) 丸山 智章	モーションキャプチャ・システムを用いた顎運動解析ソフトウェアの開発	電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会 第14回 講演論文集, p.153, (2009.3)	1)平成20年度電気電子システム工学科5年生
田丸 智一1) 丸山 智章	機能印象を用いた歯牙滑走シミュレータの開発	電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会 第14回 講演論文集, p.157, (2009.3)	1)平成20年度電気電子システム工学科5年生
笠井 拓明1) 丸山 智章	歯の特徴点を用いた3次元歯科CADモデルの作成	電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会 第14回 講演論文集, p.158, (2009.3)	1)平成20年度電気電子システム工学科5年生
I.Saitoh 1) H.Hayasaki 1) E.Inada 1) T.Maruyama Y.Takemoto 1) Y.Yamasaki 1)	Overlap of the primary dentition in children	J Clin Pediatr Dent, Vol.33, No.3, pp.269-274 (2009)	1)鹿児島大学大学院 医歯学総合研究科

教員事績（平成20年10月～平成21年9月）

電子情報工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号（年、月）	備考
柴田 尚志	時代に適応した新しい教育システムの構築を目指して	文部科学教育通信、No.208、pp.30-31、(2008.11)	
林 和伸1) 遠藤 勲2) 柴田 尚志	茨城高専におけるPBL演習「産業技術システムデザイン工学演習」の実践	高専教育 第32号、pp.159-164、(2009.3)	1)非常勤 2)電気電子システム工学科
羽鳥 貴大1) 市毛 勝正	DSP実装のための音源分離の検討	第16回 電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集A10 (2008.12)	1)平成20年度専攻科修了生
板谷 佳奈1) 弥生 宗男 山口 一弘 加島 篤2) 井上 光輝3) 藤井 壽崇3)	ゾル・ゲル法によるFe系強磁性酸化物の作製とその磁気及び電気特性	第16回 電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集PA16 (2008.12)	1)平成20年度電子情報工学科5年生 2)北九州高専 3)豊橋技科大
滝沢 陽三 岡田 正1) 大平 栄二1)	学生教育と連動させた地域情報化支援	工学教育、日本工学教育協会、Vol.57、No.4 (2009.7)	1)津山工業高等専門学校
滝沢 陽三 小飼 敬 山田 真	ディスクレスによるプログラミング演習室システムの運用	高等専門学校 情報処理教育研究発表会講演論文集、第29号 (2009.8)	
野口 拓也1) 小飼 敬 滝沢 陽三	SPINによる検証支援ツールの開発	第8回 情報科学技術フォーラム(FIT2009)、B-012、pp.377 - 378 (2009.9)	1)平成21年度専攻科2年生
藤澤 一博1) 小飼 敬 滝沢 陽三	VDMによる検証支援ツールの開発	第8回 情報科学技術フォーラム(FIT2009)、B-013、pp.379 - 380 (2009.9)	1)平成21年度専攻科2年生
村上 祥平1) 小飼 敬 上田 賀一1)	図式モデルのための形式記述への変換	ソフトウェアエンジニアリング最前線2009、近代科学社、p.183 (2009.9)	情報処理学会 ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム2009にてポスターセッション 1) 茨城大学

教員事績 (平成20年10月～平成21年9月)

物質工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号 (年、月)	備考
貴志 礼文 小松崎 哲 小松崎 秀人 引地 史郎1)	トリスピラゾリルボレートに配位子に有するコバルト(II)酸素錯体の分光学的性質	第5回 茨城地区分析技術交流会要旨集, p.76 (2008. 10)	1)神奈川大学工学部
竹本 史織 西連地 雅樹 三木 奈保美 佐藤 稔 小松崎 秀人 引地 史郎1)	トリスピラゾリルボレートに配位子とする金属(II)セミキノナト錯体の分光学的性質	第5回 茨城地区分析技術交流会要旨集, p.75 (2008. 10)	1)神奈川大学工学部
貴志 礼文 小松崎 哲 小松崎 秀人 引地 史郎1)	トリスピラゾリルボレートに配位子に有するコバルト(II)チオラト錯体の合成と反応性	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.22 (2008.11)	1)神奈川大学工学部
竹本 史織 西連地 雅樹 三木 奈保美 佐藤 稔 小松崎 秀人 引地 史郎1)	トリスピラゾリルボレートに配位子とする金属(II)セミキノナト錯体の合成と性質	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.23 (2008.11)	1)神奈川大学工学部
小澤 和幸 高瀬 憲幸 松崎 翔 貴志 礼文 小松崎 秀人 引地 史郎1)	トリスピラゾリルボレートに配位子に有するニッケル(II)チオラト錯体の合成と酸素分子との反応	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.24 (2008.11)	1)神奈川大学工学部
高野 与一 三木 奈保美 小松崎 真吾 小松崎 秀人 引地 史郎1)	トリスピラゾリルボレートに配位子として有するマンガン(II)セミキノナト錯体の酸化触媒能	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.25 (2008.11)	1)神奈川大学工学部
貴志 礼文 長岡 正宏 小松崎 秀人 穠田 宗隆1) 引地 史郎2)	トリスピラゾリルボレートに配位子に有するコバルト(II)チオラト錯体による酸素活性化	日本化学会第89回 春季年会講演予稿集, 2PA-023 (2009. 3)	1)東工大資源研 2)神奈川大学工学部
高野 与一 西連地 雅樹 谷口 智則 小松崎 秀人 引地 史郎1) 穠田 宗隆2)	マンガン、亜鉛、マグネシウムセミキノナト錯体の合成と酸素活性化	日本化学会第3回 関東支部大会講演予稿集, P2-001 (2009. 9)	1)神奈川大学工学部 2)東工大資源研

物質工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号(年、月)	備考
小澤 和幸 貴志 礼文 小松崎 秀人 引地 史郎1) 穂田 宗隆2)	コバルト(II)、ニッケル(II)チオラト錯体による酸素活性化反応	日本化学会第3回 関東支部大会講演予稿集, P2-002 (2009. 9)	1)神奈川大学工学部 2)東工大資源研
小松崎 佑介 千葉 洋祐 小松崎 秀人 引地 史郎1) 穂田 宗隆2)	マンガン(II)チオアセト及びチオラト錯体の合成と酸素分子との反応	日本化学会第3回 関東支部大会講演予稿集, P2-003 (2009. 9)	1)神奈川大学工学部 2)東工大資源研
鈴木 康司 小堀 菜々1)	<i>Pseudomonas putida</i> KT2440株由来リパーゼ関連遺伝子の <i>E. coli</i> における発現	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会, p.53 (2008.11)	1)平成19年度専攻科 修了生
坂本 幸平1) 鈴木 康司	<i>Pseudomonas putida</i> 由来 armX 融合タンパク質の構築	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.54 (2008.11)	1)平成20年度専攻科 2年生
小松崎 佑介1) 宮下 美晴	キチンへのラクチドの開環グラフト化の試み	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.40 (2008.11)	1)平成20年度専攻科 1年生
宇津野 彰浩1) 宮下 美晴	アルギン酸/ポリビニルアルコール系ブレンドの相溶性と分子間相互作用	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.41 (2008.11)	1)平成20年度専攻科 2年生
安 祐輔1) 佐藤 稔	ランタノイド(III)モノポルフィリン錯体の酸化状態における電子状態	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.29 (2008.11)	1)平成20年度専攻科 2年生
滑川 真人1) 安部 慎一郎 蝦名 不二夫	バナジル(IV)ポルフィリン錯体の簡便・高収率な合成法の確立	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.26 (2008.11)	1)平成19年度物質工 学科卒業生
千ヶ崎 謙伍1) 谷口 昭三	5-methylpyrrole-2, 4-dicarbaldehyde合成とそれを用いたN-混乱ポルフィリン合成の検討	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.18 (2008.11)	1)平成20年度専攻科 2年生
黒澤 悟史1) 砂金 孝志	繊維状光触媒の作製とその性質	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.28 (2008.11)	1)平成20年度専攻科 1年生
砂金 孝志 黒澤 悟史1) 大山 美香2) 中村 隼人3)	光触媒繊維の作製とその性質	第14回 高専シンポジウム in 高知 講演要旨集, p.321	1)平成20年度専攻科 1年生 2)平成19年度物質 工学科卒業生 3)平成20年度物質 工学科5年生
山形 信嗣 萩野谷 和大1) 川上 優2) 永峯 弘規2) 名越 敏昭2)	ブタノール-エタノール系からのプロピレン生成	第102回 触媒討論会(触媒討論会A)(名古屋) 講演予稿集, P041 (2008. 9)	1)平成18年度物質 工学科卒業生 2)平成19年度物質 工学科卒業生

物質工学科

氏名	論文・著書名	発表機関・出版社等 巻、号（年、月）	備考
川上 優1) 名越 敏昭1) 永峯 弘規1) 山形 信嗣	ゼオライト系触媒によるブタノールとエタノール系からのプロピレン製造	第19回 日本化学会関東支部茨城地区研究交流会予稿集, p.59 (2008.11)	1)平成19年度物質工学科卒業生
山形 信嗣 川上 優1) 名越 敏昭1)	H-ZSM-5触媒によるブタノール-エタノール系からのプロピレン合成	日本化学会第89回 春季年会講演予稿集, 2PB-046 (2009. 3)	1)平成19年度物質工学科卒業生
小林 孝行 村井 寧1) 辰巳 憲司2) 飯村 洋介2)	Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by Sphingomonas sp. enhanced by water-extractable organic matter from manure compost	Science of the Total Environment, Elsevier, 407, p5805-5810 (2009. 9)	1)株式会社 小泉 2)産業技術総合研究所
斎藤 保夫 吉崎 敦浩1)	水素貯蔵材料の循環利用を目指したホウ素酸化物の超臨界接触還元法の試み	茨城工業高等専門学校研究彙報 第44号 pp.47-54 (2009.3)	1)(有)ハイドリック・パワーシステムズ

専攻科特別研究題目一覧表(平成20年度)

特別研究題目	学生名	指導教員
産業技術システムデザイン工学専攻		
機械工学コース		
内燃機関の燃焼室における境界層温度分布の測定	大森 剛 茂	小堀 繁 治
有限要素法を用いた位相最適化のための基礎研究 — 要素形状についての検討 —	大和田 剛	押久保 武 小室 孝 文
ナノインデンテーション試験による低分子有機薄膜の力学特性評価	国本 允	金成 守 康
鋼の結晶粒に及ぼす熱処理温度の影響に関する基礎研究 — 顕微鏡組織を利用したマイクロデバイスについて —	高野橋 悠	谷山 久 法
対向光学系を用いたマイクロデジタルホログラムの再生精度向上	照沼 勇 人	池田 耕
低速域におけるPDVの開発	富永 馨	池田 耕
超音波を利用する非蝕式杖に関する研究 — 室内部材における超音波反射特性の測定 —	箕輪 侑 輔	菊池 誠
6脚歩行ロボットの歩行安定性の研究	山田 雅 也	宝角 敬 一
電気電子工学コース		
最大マッチング問題を用いた公開鍵暗号の開発	赤上 聡	安細 勉
最大マッチング問題を用いた公開鍵暗号の改良	秋山 佳 也	安細 勉
β -FeSi ₂ とSiの共析混合物の作製と近赤外PL特性	阿久津 恵 一	原 嘉 昭
Ajaxを用いた協調作業システムの開発	太田 智 規	吉成 偉 久
DHTML方式によるアニメーション作成アプリケーションの開発	川又 友 希	吉成 偉 久
近接場光応用超高密度光ディスクの記録補償に関する研究	佐瀬 徹 矢	田辺 隆 也
手動—自動制御系間の状態遷移問題に関する研究	白土 勇 輝	菊池 誠
Flash及び携帯電話を用いた発想支援システムの開発	塚本 佳 幸	吉成 偉 久
DSP実装のための音源分離の検討	羽鳥 貴 大	市毛 勝 正
超解像近接場構造ディスクの高密度再生に関する研究	林 久 生	田辺 隆 也
低コヒーレントLDを用いたデジタルホログラフィ	藤岡 祐 二	畠山 巖
SiC/Mg 多層膜ミラーの表面保護膜の作製と特性評価	山下 拓 哉	田辺 隆 也
情報工学コース		
ケアプランにおけるアセスメント支援ツールの開発	小嶋 隆 太	小飼 敬 村田 和 英
ウェブクリッピングによる情報収集を支援するアプリケーションの開発	越田 弘 樹	小飼 敬 滝沢 陽 三
応用化学コース		
アルギン酸/ポリビニルアルコール系ブレンドの相溶性と分子間相互作用	宇津野 彰 浩	宮下 美 晴
トリスピラゾリルボレート配位子を有するコバルト(II)チオラト錯体による酸素活性化反応	貴志 礼 文	小松崎 秀 人
<i>Pseudomonas putida</i> 由来 <i>armX</i> 遺伝子のクローニングと解析	坂本 幸 平	鈴木 康 司
5-methylpyrrole-2,4-dicarbaldehydeを用いた新しいN-混乱ポルフィリンの合成ルートの検討	千ヶ崎 謙 伍	谷口 昭 三
ランタノイド(III)モノポルフィリン錯体の一電子酸化生成物の電子状態	安 祐 輔	佐藤 稔

卒業研究題目一覧表(平成20年度)

機械システム工学科

卒業研究題目	学生名	指導教員
移動カメラを用いた物体の3次元形状計測に関する基礎的検討	根本 昂 宜	池田 耕
教育用PIVシステムのための光源及び粒子発生に関する調査	藤森 悠 太	池田 耕
偏光を用いた位相検波平面ドップラー流速系の開発	森 温 司	池田 耕
マイクロデジタルホログラフィーのための光学系の検討	渡邊 雄 介	池田 耕
フーリエ空間フィルタを用いたデジタルホログラフィーの精度改善	松原 真 吾	池田 耕
マイクロ波放電プラズマの流れ方向の放射測定	深谷 俊 太	澁澤 健 二
マイクロ波放電プラズマの径方向の放射測定	海老澤 尚 希	澁澤 健 二
Ar原子線を用いたボルツマンプロット法による電子的励起温度測定	棚井 佑 太	澁澤 健 二
マイクロ波放電プラズマのアフターグロー放射の測定	佐藤 圭 太	澁澤 健 二
レーザを用いた光機能材料の特性研究	岡部 孝 裕	加藤 文武
印刷物の色に関する品質管理技術の開発	天池 竜 平	加藤 文武
光学的ガス検知技術の研究	込山 裕 之	加藤 文武
3D画像/映像の作成	名塚 広 昌	加藤 文武
農作業効率化のための洗浄機器開発	石野 雄 大 酒井 将 実	押久保 武
赤外線応力測定に関する研究	仲本 和 真	押久保 武
FPCの耐折寿命向上のための研究	阿部 忍 江口 慧 太	押久保 武
はり要素による位相最適化のための基礎検討	赤羽 敬 中川 翔 平	小室 孝 文
はり要素による位相構造の力学的検討	長島 資	小室 孝 文
低温度差で駆動する模型エンジンの設計製作	福田 友 弥	小堀 繁 治
減圧下における定常層流拡散バーナーの着火および燃焼特性	吉田 遼	小堀 繁 治
平面火炎を用いた減圧環境下でのカーボンナノ物質の生成	段本 大地	小堀 繁 治
単発でエンジン燃焼を模擬できる急速圧縮膨張装置の改良	山崎 弘 毅	小堀 繁 治
マイクロチャンネル内の流動現象に関する研究	高峰 大 河	柴田 裕 一
マイクロカプセル製造技術の開発	東ヶ崎 貴 之	柴田 裕 一
氷蓄熱冷風機の開発	久保 拓 也	柴田 裕 一
微少流体制御に関する研究(アロマ精油の調合とカプセル化)	長嶋 咲	柴田 裕 一
エアバブルクリーナの性能試験	河野 俊	柴田 裕 一
温度測定による不均一な変態誘起塑性の簡易計測	佐藤 陽一朗	富永 学
生体活動観察のための顕微スペックル法の開発	古橋 和 樹	富永 学
熱溶解積層法を用いた3次元造形に関する研究	清水 裕 亮	富永 学
2重膜構造をもつ面積エネルギー膜モデルの相転移	石田 尚 俊	鯉 渕 弘 資
膜モデル研究を効率的に行うためのソフトウェアツール作成	田中 和 樹	鯉 渕 弘 資
束縛された力学変数による膜モデルの相転移	飛田 隼 佑	鯉 渕 弘 資
3次元構造を内包した膜モデルの相転移	野村 真 司	鯉 渕 弘 資
過共析鋼の三相焼入れ	大窪 健	谷山 久 法
亜共析鋼の三相焼入れ	草刈 大 樹	谷山 久 法
ステンレス鋼の高温腐食	水谷 亮 太	谷山 久 法
鋼の結晶粒に及ぼす熱処理温度の影響に関する基礎研究 — 顕微鏡組織を利用したマイクロデバイスについて —	渡邊 慶 一	谷山 久 法
三次元フラクタル伝熱素子に関する研究	長下部 寛	根本 栄 治
脱白金触媒燃料電池の開発に関する研究 (二次元異方性物質の 主軸電気抵抗率および主軸熱伝導率測定装置の開発)	小沼 碧 海	根本 栄 治
新高温酸化物超伝導体の合成・開発に関する研究	石寄 貴 大	根本 栄 治
光燃料電池の製作に関する研究	佐藤 智 洋	根本 栄 治
二次元フラクタル伝熱素子に関する研究	吉田 隼 兵	根本 栄 治

卒業研究題目一覧表(平成20年度)

電子制御工学科

卒業研究題目	学生名	指導教員
位相限定相関法を用いた位置ずれ検出法の性能評価	江崎 諒 介	荒川 臣 司
	大竹 琢 磨	
画像フーリエ変換後のスペクトルを用いた回転文字検出に関する基礎検討	菊池 勇 貴	荒川 臣 司
	鈴木 啓 文	
画像フーリエ変換を用いた情景画像中の文字領域抽出法の性能向上に関する検討	坂本 学	荒川 臣 司
	瀬谷 佑 介	
Webを利用した工学教育コンテンツの一提案	高崎 良 一	菊池 誠
	大森 雅 弘	
極配置と制御特性の評価に関する研究	白田 恵利香	菊池 誠
	中島 択 也	
二輪倒立振子の安定化に関する研究	久保田 真 仁	菊池 誠
	橋本 浩 平	
車椅子のブレーキアシストシステムに関する研究	小野崎 良 平	平澤 順 治
	中村 安 男	
屋外用自律型移動ロボットの開発	太田 和 樹	平澤 順 治
	大信 祐 太	
NXTを用いた追従型ロボットの開発	小林 寛 明	平澤 順 治
銅膜およびポリエステル膜の低荷重引張り特性に関する研究 — ナノインデンテーション試験の基礎データとして —	斎藤 仁 士	金成 守 康
	竹内 彩	
	大野 正 敏	
CCD画像取込みソフトウェアの開発に関する研究 — ナノインデンテーション試験機の試料表面観察 —	中野 功 一	金成 守 康
	埴 慎太郎	
高温ガス炉用等方性黒鉛の押し込み再現性向上に関する研究	小林 稔	金成 守 康
ELID研削用導電性樹脂砥石の加工特性	小山 祐 介	長谷川 勇 治
マイクロバブルを用いた効率的研削システムの開発	清水 大 樹	長谷川 勇 治
導電性ラバーボンド砥石の特性調査	藤田 和 生	長谷川 勇 治
環境調和型ELID研削用砥草カーボン砥石の開発	会 沢 雄 基	長谷川 勇 治
航空機部品における作業スケジューリングの基礎研究	小野木 徹 也	宝角 敬 一
6脚歩行ロボットの不整地歩行の検討	川井 友 輝	宝角 敬 一
	高野 公 平	
自操式車椅子における斜面走行時の補助装置の検討	佐藤 浩 昭	宝角 敬 一
干しいも皮むき機の開発	江幡 将 孝	岡本 修
	丹治 信 宏	
焼き干しいも機の開発	下山田 貴 生	岡本 修
	西川 諒	
GPS巡回ロボットカーの開発	照沼 雅 備	岡本 修
	深谷 俊 将	
連続ウェーブレット変換を用いた倒立振子の研究	富山 朋 哉	住谷 正 夫
歩行姿勢変化による心拍ゆらぎの解析	中村 雄 大	住谷 正 夫
脳トレによる脳活動の変化の抽出に関する研究	軍 司 光	住谷 正 夫
脳波インターフェース「NIA」の脳波を用いた検討	菊池 健 一	住谷 正 夫
マイコンを用いたゆらぎ発生装置の開発	カン・ワイマーン	住谷 正 夫
ゆらぎ画像の作成と解析	滝 秀 範	住谷 正 夫
	小野瀬 雄 大	
ネットワークを応用した移動体制御方式の検討	渡邊 瑞 樹	飛田 敏 光
	田崎 一 生	
小型高トルクモータとその制御方式の検討	岡野 直 樹	飛田 敏 光

電子制御工学科

卒業研究題目	学生名	指導教員
進化アルゴリズムを用いた制御方法の研究	小山雄帆	飛田敏光
地震管制用学習型初期微動センサの検討	仲田貴俊	飛田敏光
太陽電池・LED活用情報案内システムの検討	熊谷怜史	飛田敏光

卒業研究題目一覧表(平成20年度)

電気電子システム工学科

卒業研究題目	学生名	指導教員
電線着雪の効果的融雪とその効果の研究	伊藤 真也	長野 眞康
	横島 圭太	
不均一線路の動作減衰量の上下限の推定と伝送回路設計への応用	久保木 誉	遠藤 勲
	戸塚 堅大	
多段縦続接続不均一線路の最適化法による設計	菊池 武洋	遠藤 勲
	黒澤 翔太	
逆ミセル法によるCd-Zn-S系微粒子の物性研究	大貫 永智	森 龍男
	鹿志村 拓弥	
逆ミセル法で作成したCdSの物性研究	小松 佳一郎	森 龍男
	寺門 祐樹	
Super-RENSの記録再生に関する研究	山岸 寛樹	田辺 隆也
LED光照明による植物の成長特性の分析	下田 藍子	田辺 隆也
デジタルホログラム用記録再生補償の研究	鬼澤 聡	田辺 隆也
	高岡 諒	
光ディスクの保管条件が記録再生に及ぼす影響の解析	石間 匠	田辺 隆也
検電器によるケーブル・電線の識別法の確立	坂田 裕也	皆藤 新一
電子線回折パターン解析プログラムの構築Ⅲ	山本 紗央里	皆藤 新一
誘導電動機の特性シミュレーションソフトの構築	水越 成昭	皆藤 新一
四探針法による導電性薄膜の抵抗率測定	井坂 大智	若松 孝
ニフトリ卵白リゾチームタンパク質の結晶作製	鹿志村 直輝	若松 孝
低周波微小振動のレーザ計測3	井上 真嘉	若松 孝
二酸化炭素削減運動支援システムに関する研究	西野 俊佑	吉成 偉久
	額賀 敏史	
太陽電池アレイ変換効率の経年変化2	小城 勇樹	関口 直俊
熱電素子を利用した太陽電池出力特性	佐藤 広樹	関口 直俊
太陽水素エネルギーシステムのエネルギー評価3	菊地 貴允	関口 直俊
白金触媒量の変化による固体高分子型燃料電池の出力特性	皆藤 佑一	関口 直俊
ナップサック型暗号の鍵選択方式による改良	小池 和輝	安細 勉
	森田 一樹	
改良型ナップサック暗号の秘密分散方式への応用	島津 峻輔	安細 勉
	西山 和也	
二次電池を用いた昇圧電力変換回路の試作と検討	瀬谷 智洋	成 慶珉
SIC-SITのスイッチング特性	津賀 優斗	成 慶珉
高速大容量ドライブのためのゲートドライブ回路に関する研究	秋山 裕信	成 慶珉
連係インバータの電力制御に関する研究	伊藤 祐樹	成 慶珉
	前田 裕文	
歯の特徴点測定による3次元歯科CADモデルの作成	笠井 拓明	丸山 智章
機能印象による歯の接触運動シミュレータの開発	田丸 智一	丸山 智章
モーションキャプチャ・システムを用いた顎運動解析用ソフトウェアの開発	下山田 直人	丸山 智章
	山中 紀明	

卒業研究題目一覧表(平成20年度)

電子情報工学科

卒業研究題目	学生名	指導教員
光渦を用いたデジタルホログラフィの研究	戸邊 翼	畠山 巖
	油座 雅尚	
フォトポリマーを用いた光連想記憶の検討	和田 康佑	畠山 巖
荷物収集競技のための最適推定手法の検討	安達 裕貴	杉村 康
	江畑 千春	
	五位 洩竜也	
大地上にある円柱電荷による電界解析	小泉 弘樹	柴田 尚志
二次元多層誘電体中の線電荷による電界計算	鳥居 信	柴田 尚志
二次元異方性誘電体における分極電荷分布の解析	松竹 良平	柴田 尚志
高専生スケジュール管理システムの開発	荒張 将	四王天 正臣
	湯浅 優香	
Visual Basic による天気予報テロップ作成	大竹 明	四王天 正臣
SQL を用いたメールベースシステム	坪沼 祐一	四王天 正臣
FLASHプレイヤーの開発	小倉 将揮	村田 和英
動的負荷分散を用いた分散処理型データ収集システムの開発	佐々木 裕規	村田 和英
音楽プレイヤーソフトの開発	清水 聡	村田 和英
	大久保 諒	
自学自習支援システムに関する研究	田原 和志	滝沢 陽三
	大沼 侑司	
音声信号における雑音の除去法と評価に関する検討	岡崎 駿	市毛 勝正
	佐藤 香織	
PICを用いた計測実験の検討	芝野 恭章	市毛 勝正
独立成分分析による音源分離に関する検討	藤井 あゆみ	市毛 勝正
規則による音声合成の検討	金子 由佳理	山口 一弘
磁気特性評価アプリケーションの作成		弥生 宗男
	板谷 佳奈	山口 一弘
ゾル・ゲル法によるTi-Fe-Pb-Bi-O系薄膜の作製とその磁気及び電気特性	黒澤 龍一	弥生 宗男
	古木 裕一	弘畑 和秀
最短経路問題に関する研究	山口 優樹	弘畑 和秀
郵便配達人問題に関する研究	浅野 貴哉	弘畑 和秀
ネットワークの最大フロー問題に関する研究	伊藤 準	弘畑 和秀
最小全域木問題に関する研究	大津 融	弘畑 和秀
遺伝的アルゴリズムを用いたスケジューリング問題に関する研究	関野 嵩浩	弘畑 和秀
Vertex Magic に関する研究	粉川 大	滝沢 陽三
AR(拡張現実)システムに関する研究	酒井 洋紀	滝沢 陽三
Web 2.0を利用した高専における学生支援システムの導入とサポートサイトの開発		滝沢 陽三
	末永 万成	
3D折り紙シミュレータの開発と研究	宮本 隆史	滝沢 陽三
	阿久津 達也	
協調開発のためのモデル管理環境の実現	海老沢 拓哉	小飼 敬
	丸山 和貴	
	スッチャガン	
ペアプログラミング支援ツールの開発	菊池 大輔	小飼 敬
	西野 太樹	
大型ショッピングセンター建設による地域変化	館 祐輝	三好 章一
英単語学習におけるリハーサル法の差異による学習効果に関する一考察	岡野 雄多	奥山 慶洋
eラーニングにおいて時間表示がおよぼす学習効果に関する一考察	茂木 祐典	奥山 慶洋

卒業研究題目一覧表(平成20年度)

物質工学科

卒業研究題目	学生名	指導教員
トリフェニルホスフィンを軸配位子として持つコバルト(II)ポルフィリンへの酸素付加反応	小林 春樹	佐藤 稔
N, N'-3-ピリジレンビス(サリチリデンイミン)銅(II)錯体のコバルト(II)ポルフィリンへの配位とその磁氣的性質	小松崎 千明	佐藤 稔
ポルフィリンの溶媒による色の変化	黒川 拓都	佐藤 稔
アミノ酸感知ポルフィリンセンサー作成の試み	市村 遼太郎	佐藤 稔
VBAを用いたUVスペクトルの自動表示	大和田 創	佐藤 稔
新規な可視光応答型光触媒薄膜作製の試み	宮本 早織	砂金 孝志
TiO ₂ コート金属板の作製とその性質	菊池 徳雄紀	砂金 孝志
Ag添加光触媒フォトクロミズム材料の研究	長谷川 拓哉	砂金 孝志
ZnO薄膜を使った色素増感太陽電池の研究(4)	鹿野 大志	砂金 孝志
ZnO及びZrO ₂ ファイバーの製法研究(2)	中村 隼人	砂金 孝志
CVT法によるβ-FeSi ₂ 単結晶成長における育成条件の検討と熱力学的考察	小野 光太郎	原 嘉昭
土壌に含まれる重金属イオンの定量～家庭用電子レンジでの土壌分解法の検討・その2 鉄分析による分解率の検討	松浦 歩	須田 猛
土壌に含まれる重金属イオンの定量～家庭用電子レンジでの土壌分解法の検討・その3 全クロム分析への応用	関 栄司	須田 猛
e-ラーニングのための金属イオン定性分析学習ソフトの開発(動画による例示実験編)	小池 和希	須田 猛
e-ラーニングのための金属イオン定性分析学習ソフトの開発(バーチャルラボラトリによる実験-その1)	飛田 優幸	須田 猛
e-ラーニングのための金属イオン定性分析学習ソフトの開発(バーチャルラボラトリによる実験-その2)	岡本 祐典	須田 猛
3DOM触媒によるメタンの酸化カップリング反応	柴田 勝也	山形 信嗣
H-ZSM-5 触媒によるブタノール-エタノール系からのプロピレン合成	名越 敏昭	山形 信嗣
H-ZSM-5 触媒によるブタノールからのプロピレン合成	川上 優	山形 信嗣
メタセシス触媒によるブタノール-エタノール系からのプロピレン合成	浅野 健	山形 信嗣
メタノール-エタノール系からのプロピレン合成用の新規触媒の開発	永峯 弘規	山形 信嗣
Pseudomonas sp.由来オキサロ酢酸デカルボキシラーゼ遺伝子のクローニング(2)	和田 祐加子	鈴木 康司
Bacillus由来ジアホラーゼ遺伝子のクローニング(3)～EcoRI切断DNAの解析～	藤代 紗綾	鈴木 康司
Pseudomonas putida KT2440株由来マルチシャペロン遺伝子のクローニング(1)	大野 正人	鈴木 康司
茨城県内の有用微生物の探索(3)～温泉生息の新規微生物単離と諸性質検討～	森 恵美	鈴木 康司
茨城県内の有用微生物の探索(4)～阿字ヶ浦採取海水中の新規微生物単離と同定～	佐藤 崇史	鈴木 康司
ペクチン/水溶性合成ポリマー系ブレンドの相溶性	小泉 雅子	宮下 美晴
セルロース/ポリビニルアルコール系ブレンドの相溶性に及ぼすケン化度の効果	小口 陽太郎	宮下 美晴
ポリ(ε-カプロラクトン)/セルロースアセテートブチレート系ブレンドの力学特性	平田 恵利	宮下 美晴
コハク酸水素コレステロール/脂肪族アミン系コンプレックスの液晶形成挙動	本木 遥奈	宮下 美晴
2-(トリメチルシロキシメチル)ピロールを用いたポルフィン合成の検討	柳 星太	谷口 昭三
化粧品評価における内脂肪成分のモデルとして用いたオレイン酸酸化の検討	木村 仁亮	谷口 昭三
バイオディーゼル燃料についての調査および製造法に関する検討(1)	芥 俊美	谷口 昭三

物質工学科

卒業研究題目	学生名	指導教員
ポルフィンの合成化学的研究(23) ～ピロールの二官能性マンニツヒ塩基を用いた新たな合成法の展開～	瀬田 敬太	蝦名 不二夫
HPLCを用いた簡便な高級脂肪酸分析系の確立 ～新たな植物油の有効活用を図るために～	杵谷 舞	蝦名 不二夫
マイクロ波反応による有機合成(5) ～TPP合成の総括と金属TPP錯体合成への展開～	武田 悠一郎	蝦名 不二夫
過酸化水素を酸素源とするチトクロムP-450のモデル研究(5) ～陰イオン性鉄ポルフィリン触媒を用いたモデル系の検討～	大前 彩華	蝦名 不二夫
マンガン(II)セミキノナト錯体の合成と分子状酸素との反応	高野 与一	小松崎 秀人
α -ケトカルボキシラト配位子を有するコバルト(II)単核錯体の合成と反応性	黒澤 龍之介	小松崎 秀人
コバルト(II)チオラト錯体の合成と酸素分子との反応	長岡 正宏	小松崎 秀人
α -ケトカルボキシラト配位子を有するマンガン(II)単核錯体の合成と反応性	柴 雄一郎	小松崎 秀人
ニッケル(II)チオラト錯体による酸素活性化反応	小澤 和幸	小松崎 秀人

平成 22 年 3 月 発行

編集・発行 茨城工業高等専門学校

〒312-8508 茨城県ひたちなか市中根 866
TEL. 029 (272) 5201

印刷所 いばらき印刷 (株)

CONTENTS

1	Toward the Development of International Internship Programs based KOSEN Coop Education	Shoichi MIYOSHI and Makoto ICHITSUBO	(1)
2	An analysis of how hot water in a beaker cools down : a challenge to “Physics Challenge”	Keiichiro TASHIMA, Hitoshi MINAKAWA, Akira MORIWAKI, Iori YANOKURA, Takuya YAEGASHI, Kasumi ICHINOHE, Yuta TAKAHASHI, Yuta ASHINAZAWA and Hiroshi IGARASHI	(5)
3	An attempt to make an electric pot, suitable for the summit of Mt. Fuji	Iori YANOKURA, Akira MORIWAKI, Takuya YAEGASHI and Yoshihiro OKUYAMA	(15)
4	A trial of Science education at the summit of Mt. Fuji	Takao MATSUZAWA, Akira MORIWAKI, Iori YANOKURA, Takuya YAEGASHI, Rie MATSUDA, Megumi SEKINE, Rikako HINOKI, Masato YAZAWA and Hiroshi YASUDA	(21)
5	The atomic phenomenon of one year. — The estimation of the amount of used nuclear fuel with using the public data. —	Akira MORIWAKI, Keiichiro TASHIMA, Keita SAITO, Iori YANOKURA and Yasuhiro OKUYAMA	(33)
6	Trial product of reactor simulator made by students (PWR)	Rie MATSUDA, Yuri KAWAKAMI, Akira MORIWAKI, Keita SAITO, Iori YANOKURA, Takuya YAEGASHI and Takao MATSUZAWA	(41)
7	The setting of target models in technical coaching — The case study of The Long Jump —	Yoshinori KINOMURA and Shinji MORI	(57)
8	A study of adopting atmospheric micro-plasma in plasma process	Eiji NEMOTO and Yusuke USHIKUBO	(65)
9	Preparation of cobalt doped Ti oxide films and their magnetic properties	Kazuhiro YAMAGUCHI, Eiko HAYASHI, Kazuo YAYOI and Mitsuteru INOUE	(71)
10	Development and Maintenance of Diskless System for Programming Laboratory	Yozo TAKIZAWA, Kei KOGAI and Makoto YAMADA	(75)
11	The Study on Convenient and High-yield Preparation of Vanadyl(IV) Complexes with Tetraphenylporphyrin Derivatives.....	Fujio EBINA, Shin-ichiro ABE, Hidehito KOMATSUZAKI, Minoru SATOH, Masato NAMEKAWA and Akihiro ISHIDA	(79)
12	Synthesis and Characterization of a TiO ₂ fiber Photocatalyst	Takashi ISAGO and Satoshi KUROSAWA	(87)
13	Molecular cloning and expression of lipase gene from <i>Pseudomonas putida</i> KT2440 in <i>Escherichia coli</i>	Koji SUZUKI and Nana KOBORI	(91)
14	Development of Drawing Software of Ultraviolet -Visible Spectra with VBA	Minoru SATOH and Hajime OHWADA	(97)