

茨城工業高等専門学校

研 究 彙 報

第 55 号

令和 2 年 4 月

RESEARCH REPORTS

OF

NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY(KOSEN),

IBARAKI COLLEGE

NO. 55

APRIL 2020

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 55 号

目 次

- 1 Verilog HDL 応用教育における教材
..... 児玉 隆一郎 (1)
- 2 映画『スカイ・クロラ』における英語の使用について
..... 平澤 順治 (10)
- 3 マイクロスケール実験を導入した化学教育の試み
..... 久保木 祐生 (21)

Verilog HDL 応用教育における教材

兒玉 隆一郎

Lecture Materials for Verilog HDL Application Program

Ryuichiro KODAMA

Abstract: This paper provides new lecture materials for Verilog HDL application program. The ultimate application of Verilog HDL seems to be the construction of CPU as far as the available lecture notes about Verilog HDL are seen in the Internet. Before reaching CPU, many students may find attractive the peripheral I/O applications such as VGA, Mouse, sound, and the basics behind those applications. This paper summarizes the editor's lecture which was conducted in 2019 being focused on those applications. The source code of Verilog HDL is listed so that those materials might be hopefully referred by the readers for their future lecture.

1 はじめに

FPGA(Field Programmable Gate Array)はその業界における投資とエンジニアリングニーズを背景に市場規模が拡大しつつある。開発を支える重要な要素として HDL(Hardware Description Language)がある。Verilog HDL は HDL の一つとして実装だけでなく、実装前シミュレーションにも利用される。Verilog HDL を教育カリキュラムに加える高等専門学校も存在し、FPGA を活用できる人材の育成に努めている。

HDL の教育は日本を含む世界的な広がりを見せており、大学における教育の内容はインターネット上で公開されたシラバスや講義ノートにより垣間見られる。近年の動向として FPGA に CPU コアを搭載する動きがある。このような動向が後押ししていると思われるが、公開された講義ノートを参照する限り Verilog HDL 応用教育に CPU の実装を据えているケースが見受けられる。

しかし、CPU を支える入出力機器に重きを置いた教育についてはまとまった形で見かけることがなかった。そこで、入出力機器である VGA やマウスの制御記述を Verilog HDL に大きく取り入れた応用教育を導入した。本稿では、2019 年度に情報系 3 年の学生に対して行われた科目「論理回路 II」の教材を編集した。学生は 1 年前に基本的な論理回路を教科書 [1] で「論理回路 I」として実施済である。関連の教育に携わる読者においては、本教材が授業設計の参考となれば幸いである。

2 Verilog HDL の授業内容と本稿の構成

2.1 開発環境

FPGA の開発キットを利用して、実際に HDL が動作するところを学生に見せながら授業を進めている。開発キットには [2] を使用した。インターネットからダウンロードした開発環境 (Xilinx, Inc.) を PC に展開して、付属の USB コードにより開発キットの FPGA 基板と PC を接続し、HDL で開発した実行コードを PC から基板に流し実行する。開発キットには丁寧なマニュアルが付属されており、ゼロベースから FPGA を動作

させる手順および演習が載っている。

開発キットの基板は BASYS3 Artix-7 (以下 BASYS3) と呼ばれ、LED やスイッチといった基本 I/O の他、VGA 端子、HID (Human Interface Device) 対応 USB コネクタが搭載されている。また、Digilent, Inc. による標準 I/O ポートが実装されており、別売りの多様な I/O デバイスを接続できる。授業では音の実験のためにスピーカー用アンプを搭載するデバイスをこの I/O に接続して用いた。

実際に FPGA を動作させる前に、プログラムによっては動作をシミュレーションにて確認する。シミュレータには Icarus Verilog[3] を利用した。これであれば、学生も手軽に持参した PC に組込んで動作を確認することができる。

2.2 シラバス

表 1 に授業構成の概要をまとめた。FPGA についての基礎的知識を学んだ後、Verilog HDL の言語とその応用を学ぶ。簡単な組合せ回路および順序回路が記述できることが応用前の基礎力となる。本稿の対象は表における応用 (1) から (3) であり、十分な基礎力を前提に授業が行われる。

表 1 Verilog HDL 用シラバスの概要

| No | テーマ | キーワード |
|----|---------------------------|--|
| 1 | FPGA の基礎 | 歴史, 構成要素, 設計フロー |
| 2 | シミュレータ | Icarus Verilog |
| 3 | Verilog HDL の基礎 | 基本文法 |
| 4 | Verilog HDL による 組合せ回路 | 算術演算回路, デコーダ回路 |
| 5 | Verilog HDL による 順序回路 | フリップフロップ, 自動販売機の例, カウンタ, シフトレジスタ |
| 6 | Verilog HDL と テストベンチ記述 | |
| 7 | 応用 (1) 準備 | クロック, ループ処理 |
| 8 | 応用 (2) 周辺 I/O | VGA, Mouse, Sound |
| 9 | 応用 (3) CPU | |

2.3 本稿の構成

3章に応用で多用するプログラミングパターン、4章にVGA、5章にマウス、6章に音の学習素材を説明する。7章に授業のアンケート結果、8章に結言を述べる。

本稿ではVerilog HDLのソースコードを載せている。FPGAで動作させるためには、これに加えてトップモジュールの引数をI/Oに割り付ける必要がある。この方法は、[2]のマニュアルに詳述されているので参照されたい。

3 応用の準備

具体的な応用事例に入る前に、事例に共通的に使われるプログラミングパターンを学習する場を設けた。一つがクロックの分周であり、もう一つがループ処理である。

3.1 クロック

通常、開発キット基板にはベースとなるクロックが用意されている。BASYS3の場合は100MHzのクロックが用意されている。しかし、応用では分周して周波数を変更して利用することが多い。その分周のプログラミングパターンを学習する。

図1は、後述のVGA用信号処理moduleプログラムの抜粋である。clkには100MHzのクロックが与えられるとき、clk4に25MHzの分周クロックを作りたい。25MHzはVGAの画面上のピクセルを走査させるための基本周波数になる。

```
1 input clk, rst;
2 reg [1:0] cnt;
3 reg clk4;
4
5 always @(posedge clk) begin
6   if (rst) begin
7     cnt <= 2'b0;
8     clk4 <= 1'b0;
9   end else begin
10    cnt <= cnt + 2'b01;
11    clk4 <= (cnt == 2'b0);
12  end
13 end
```

図1 Clock Division

2ビット変数cntのオーバフローを許容しながら、それをインクリメントしcnt == 0が巡ってきたタイミングでclk4をHighにしている。これで4回に1回Highとなり、分周により25MHzが実現できる。

3.2 ループ処理

ループ処理はVerilog HDLのfor文やwhile文で実現できる。しかし、実際に応用で用いられるループはある周期に同期した繰り返し動作となることが多い。後述するVGAの同期信号生成やマウスのシリアル通信がその例となる。そこで、クロックに同期してカウンタを更新するループをVerilog HDLで記述するプログラミングパターンを学習する。

図2は、二重ループをするプログラムである。ループ変数はx1, x2である。それぞれ0から3までの値を取る。x1は1重目のループ変数であり、この値が3になると次の値が0になると同時に2重目のx2がインクリメントされる。

x1n, x2nはそれぞれx1, x2の次の値を計算して保持して

いる。wire変数で定義してassign文で計算しているが、もっと論理が複雑な場合はreg変数にしてalways(*)により計算する。always(@)文の中に次の値の計算を組み入れてコンパクトにする例もあるかもしれない。しかし、ノンブロッキング代入を使うと、値の評価タイミングが通常のプログラミングと異なるため、注意を要する。パターンとして覚えてもらい、不注意によるミスを防ぎたい。

```
1 `timescale 10ns/100ps
2 module loop(clk, clearN);
3 input clk, clearN;
4 reg [3:0] x1, x2;
5 wire [3:0] x1n, x2n;
6
7 always @(posedge clk) begin
8   if (~clearN) begin
9     x1 <= 0;
10    x2 <= 0;
11  end else begin
12    x1 <= x1n;
13    x2 <= x2n;
14  end
15 end
16
17 assign x1n = (x1 == 4'h3) ? 0 : x1 + 1;
18 assign x2n = (x1 != 4'h3) ? x2 : (x2 == 4'h3) ? 0 : x2 + 1;
19
20 endmodule
```

図2 Double Loop

```
1 `timescale 10ns/100ps
2 module bsort(clk, clearN, done);
3 input clk, clearN;
4 output done;
5 reg [7:0] dline[0:9];
6 reg [7:0] counter;
7 reg dirty;
8 wire sw;
9 wire [7:0] d1, d2;
10 wire [7:0] next_counter;
11 wire next_dirty;
12
13 always @(posedge clk) begin
14   if (~clearN) begin
15     dline[0] <= 188; dline[1] <= 153;
16     dline[2] <= 41; dline[3] <= 58;
17     dline[4] <= 181; dline[5] <= 80;
18     dline[6] <= 64; dline[7] <= 124;
19     dline[8] <= 24; dline[9] <= 165;
20     counter <= 0;
21     dirty <= 1;
22   end else begin
23     if (~done) begin
24       counter <= next_counter;
25       dirty <= next_dirty;
26       dline[counter] <= d1;
27       dline[counter+1] <= d2;
28     end
29   end
30 end
31
32 assign sw = (dline[counter] > dline[counter+1]);
33 assign d1 = (sw) ? dline[counter+1] : dline[counter];
34 assign d2 = (sw) ? dline[counter] : dline[counter+1];
35 assign next_counter = (counter < 8) ? counter + 1 : 0;
36 assign next_dirty = (sw) ? 1 : (counter == 8) ? 0 : dirty;
37 assign done = (counter == 8) && (~dirty);
38
39 endmodule
```

図3 Bubble Sort

図2をデモするために図3のプログラムを用意している。こ

これはバブルソートを実行するプログラムである。ループ変数は counter 一つである。リセット信号 clearN により dline 配列が初期化される。リセットが終わると、クロック clk のタイミング毎にソートがスタートする。最終的に done が High となって、この配列が昇順にソートされる。図 4 は、テストベンチとなっている。ソートが終了すると配列を印字する。

```

1 module test_bsort;
2 reg clk, clearN;
3 wire done;
4 integer i;
5
6 bsort b(.clk(clk), .clearN(clearN), .done(done));
7
8 always begin clk=0; #10 clk=1; #10; end
9
10 initial begin
11 $dumpfile("bsort.vcd");$dumpvars;
12 clearN=0; #2; #20; clearN=1;
13 @(done);
14 for (i=0;i<10;i=i+1) $display("%d", b.dline[i]);
15 $display("----");
16 $finish;
17 end
18 endmodule

```

図 4 Bubble Sort Testbench

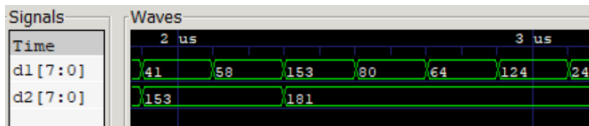


図 5 timing chart

図 3 と図 4 のプログラムは Icarus Verilog で動作確認することができる。テストベンチで確認する以外に、GTKWave[4]によりタイムチャートでソートの途中経過を確認することもできる。dumpfile("bsort.vcd")により出力されたファイル bsort.vcd を引数に与えて GTKWave を起動することで、図 5 のようなタイムチャートを確認できる。変数 d1, d2 がモニターされ、バブルソートにより 153 が 41, 58 を追い抜いて 181 の手前で停留し、その先は 181 が他の小さな値を追い抜いていく様子が確認できる。このような視覚的なツールは分かりやすく、教育にも適している。

4 VGA (Video Graphic Array)

BASYS3 には VGA 端子が搭載されている。この端子にプロジェクトやディスプレイモニタを接続すれば Verilog HDL で描いた画像が表示される。図 6 は、VGA の同期信号を生成し、更に BASYS3 のスライドスイッチに応じて全画面に色を付けて表示するプログラムである。

module 引数にある rgb, hsync, vsync が VGA インタフェース用の変数である。rgb は赤、緑、青それぞれ 4 ビットずつの情報をもつ 12 ビットの変数で、画面の 1 ピクセルごとにこの値を設定することで画像が描かれる。ピクセルごとに色を変える事例は次の節で述べる。ここではスライドスイッチ sw[0], sw[1], sw[2] の値がそれぞれ High ならば、それぞれ赤、緑、青に画面全体の色を変える。

VGA インタフェースは、昔のブラウン管テレビのイメージを継承したモデルとなっている。ブラウン管では電子線が画面の水平方向に動き、そのオンオフにより画面の蛍光が明滅し、線状の様子が描かれる。電子線が左から右に走査され右終点まで来ると、電子線を左始点まで戻し、1 ピクセル分下にずらす。これを続けて最下部まで表示し終えたら、電子線を左上始点まで戻す。以上を続けることにより画面が描かれる。以上のハードイメージをモデルに置き換え、VGA では 1 ピクセル下の線の左始点に戻すタイミングで通常 High の hsync 変数を一定時間 Low にする、また、左上始点に戻すタイミングで通常 High の vsync 変数を一定時間 Low にするという仕様になっている。

```

1 `timescale 1ns / 1ps
2 // VGA 640 x 480, pixel freq.=25MHz
3 module vga_top(clk, rst, rgb, hsync, vsync, sw, LED);
4 input clk, rst; output [11:0] rgb; output hsync, vsync;
5 input [15:0] sw; output [15:0] LED;
6
7 wire disp_on; reg [1:0] count4; reg clk40ns;
8 reg [9:0] hcount, vcount; wire [9:0] nhcount, nvcount;
9
10 always @(posedge clk) begin
11 if (rst) begin
12 count4 <= 2'b0;
13 clk40ns <= 1'b0;
14 end else begin
15 count4 <= count4 + 2'b01;
16 clk40ns <= (count4 == 2'b0);
17 end
18 end
19
20 always @(posedge clk) begin
21 if (rst) begin
22 hcount <= 10'd0;
23 vcount <= 10'd0;
24 end else if (clk40ns) begin
25 hcount <= nhcount;
26 vcount <= nvcount;
27 end
28 end
29 assign nhcount = (hcount == 800-1) ? 0 : hcount + 1;
30 assign nvcount = (vcount != 800-1) ? vcount :
31 (vcount == 525-1) ? 0 : vcount + 1;
32 assign hsync = ((hcount >= 16)&&(hcount < 16+96)) ? 0 : 1;
33 assign vsync = ((vcount >= 10)&&(vcount < 10+2)) ? 0 : 1;
34 assign disp_on = (hcount >= 16+96+48) && (vcount >=
35 10+2+33);
36
37 wire [11:0] sw_rgb = (sw[0] ? 12'b1111_0000_0000 :
38 (sw[1] ? 12'b0000_1111_0000 :
39 (sw[2] ? 12'b0000_0000_1111 :
40 12'b0000_0000_0000);
41 assign rgb = (disp_on) ? sw_rgb : 12'b0000_0000_0000;
42 endmodule

```

図 6 VGA

図 6 のプログラムは、水平方向に 640 ピクセル、垂直方向に 480 ピクセルの画面を表示する。hcount, vcount がループ変数であり、それぞれ、0 から (800 - 1), 0 から (525 - 1) の値を取る。このループの周期は 25MHz (ピクセル周期) である。hcount が 16 から (16 + 96) の間 hsync が、vcount が 10 から (10 + 2) の間 vsync が Low となる。そして、hcount が (16 + 96 + 48) から 800 (800 - (16 + 96 + 48) = 640) の間、かつ、vcount が (10 + 2 + 33) から 525 (525 - (10 + 2 + 33) = 480) の間、が描画時間でありこの間 rgb を座標に応じて変化させ描画することになる。VGA の仕様にはここで使用するもの以外

に、多様なサイズ、色仕様、ピクセル周期の組合せが用意されている。

4.1 矩形の表示

単色の画面が表示できたので、次は画面に4つの矩形を表示する。まず、座標変数 (vx, vy) を定義する。図7はそのプログラムである。このプログラムを先の図6における vga_top module 内に配置すればよい。座標は画面の左上を原点 (0,0) として右方向に x 軸、下方向に y 軸となる。また、この座標変数が有効な期間以外は rgb を 0 にする必要があり、その処理に備えて有効な期間中 High になる変数 disp_on が図6内に定義されている。

```

1 wire [12:0] vx, vy; wire xon, yon;
2 assign xon = ((hcount >= (16+96+48)) && (hcount < 800));
3 assign yon = ((vcount >= (10+2+33)) && (vcount < 525));
4 assign vx = xon ? (hcount - (16+96+48)) : 0;
5 assign vy = yon ? (vcount - (10+2+33)) : 0;

```

図7 x, y coordinates

図8は4つの矩形を描くプログラムである。図6の40行目をこのプログラムに置き換えることで動作する。このプログラムを動作させたときの画面イメージが図9である。

```

1 wire [11:0] sq_a, sq_b, sq_c, sq_d, o_rgb;
2 assign sq_a = ((vx >= 120) && (vy >= 40) && (vx <= 280) &&
3 (vy <= 200)) ? 12'b0000_1111_0000 :
4 12'b0000_0000_0000;
5 assign sq_b = ((vx >= 200) && (vy >= 120) && (vx <= 360) &&
6 (vy <= 280)) ? 12'b1111_0000_0000 :
7 12'b0000_0000_0000;
8 assign sq_c = ((vx >= 280) && (vy >= 200) && (vx <= 440) &&
9 (vy <= 360)) ? 12'b0000_0000_1111 :
10 12'b0000_0000_0000;
11 assign sq_d = ((vx >= 360) && (vy >= 280) && (vx <= 520) &&
12 (vy <= 440)) ? 12'b0000_1111_0000 :
13 12'b0000_0000_0000;
14
15 assign rgb = (disp_on) ? sq_a|sq_b|sq_c|sq_d :
16 12'b0000_0000_0000;

```

図8 Display of Rectangles

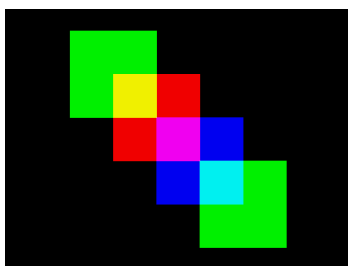


図9 Rectangles on VGA

図9から分かるように、矩形が重なる部分で色が変わっている。これは rgb の計算において矩形の色を論理和しているためである。緑と赤、赤と青、青と緑の論理和がそれぞれ、黄、マゼンタ、シアンになっていることが分かる。授業では3原色とそのビット表現について学ぶ。

また、矩形の座標を時間とともに移動させることにより動画が表示される。このとき、画面の表示処理と座標の移動処理が

重なると画面がちらつくこと、これを回避するためにダブルバッファなどの手法があることを学ぶ。

4.2 シミュレーション

VGA の出力を画面 (またはプロジェクタ) で確認できる。しかし、実際の画面を得るまでには Verilog を合成・実装・ダウンロードする必要があり、時間がかかる。また、講義ノートを作成する場合、出力画像を作成する必要もある。そこで VGA の出力信号 (hsync, vsync, rgb) をシミュレーション用モジュールで受けて、画像に変換する。図10にその変換プロセスを示す。シミュレーション用モジュールは図の Dsim でクロックやリセット信号の生成も行う。あるタイミングの全画面の RGB 値を 16 進でファイルに出力する。シミュレーション後にこれを BMP などの画像ファイルに変換する。

これにより、早く結果を見て問題をフィードバックし、期待する結果を早く得ることができる。加えて、画像ファイルとして結果を保存し資料化することもできる。図9や後に出てくる画像の図は、このシミュレータから出力したものである。

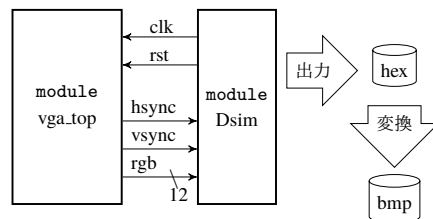


図10 VGA simulation

4.3 フォント

```

1 wire [11:0] block0;
2 assign block0 = ((vx >= 300) && (vx <= 330) &&
3 (vy >= 200) && (vy <= 220) && (disp_on)) ? 12'
4 b0000_0000_1111 : 12'b0000_0000_0000;
5 reg [7:0] font [0:11*8-1]; wire font0_on;
6 wire [11:0] f0_rgb;
7 initial $readmemh("font.mem", font);
8 wire font1_on; reg [26:0] cnt32; reg [3:0] dcnt;
9 always @(posedge clk) begin
10 cnt32 <= cnt32 + 1;
11 dcnt <= (cnt32 == 0) ? ((dcnt >= 9) ? 0 : dcnt + 1) :
12 dcnt;
13 end
14 assign font1_on = !((vx >= 310) && (vx < 318) &&
15 (vy >= 205) && (vy < 213) && (disp_on)) ? 0 :
16 ((font[(dcnt<3)+(vy - 205)] << (vx - 310)) & 8'
17 b1000_0000) ? 1 : 0;
18 assign rgb = (font1_on) ? 12'b0000_0000_0000 : block0;

```

図11 Display of numbers

画面に文字が表示できればアプリケーションの可能性がより広がる。図11は、数字フォントを組み込み、画面中央に周期的に数字を0から9カウントアップ表示し、これを繰り返す。このプログラムをVGAのプログラム(図6)に入れることによりVGAに文字が表示される。

図中 initial \$readmemh は配列の初期化である。これはシミュレーション以外の論理合成でも有効であり大きい配列を初期化したいときに使える。但し、これは実装系に依存するため、開発環境に合わせ使用方法に注意を要する。

ここで初期化しているのは、ビットマップフォントであり、その構造例を図 12 に示す。図には数字 5 のビットマップフォントが示されている。その右側に、横 8 ビットで左端ピクセルを MSB(Most Significant Bit) とした色付きピクセルのビットパターンが 16 進で表示されている。initial \$readmemh の引数にある font.mem はビットマップパターンのファイルであり、図のような 8 個の 16 進数が文字数分記述される。配列変数 font はこの値に初期化される。

ビットマップフォントは、手作りしなくてもインターネット上で公開されたものがあり簡単に上記のような 16 進数に変換して利用することができる。

授業ではビットマップフォントの構造と例を説明し、キャラクター端末におけるキャラクタジェネレータの仕組みを勉強する。

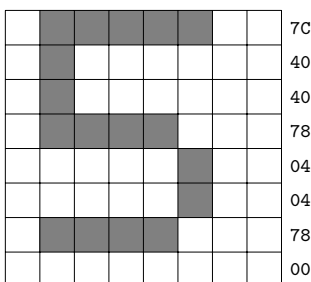


図 12 8×8 Bitmap Font Structure

4.4 画像ファイルの表示

携帯電話の利用拡大とともに画像ファイルは学生にとって身近な存在となっている。携帯電話で撮影した普通の画像が VGA に表示されると、技術への親近感が増す。

図 13 は画像ファイルを VGA に表示する。このプログラムを VGA のプログラム (図 6) に入れることにより VGA に画像ファイルが表示される。できるだけ大きい画像を処理したく 2 の累乗単位でコンパイルチェックしたところ BASYS3 では画像サイズ 128×128 (RGB12bit) が限界のようである。但し、このサイズでは、後に説明する画像処理のプログラムが BASYS3 のメモリアオーバーのため全部同時には搭載できなかった。

```

1 reg [11:0] i128 [0:128*128-1];
2
3 initial $readmemh("i128.mem", i128);
4
5 wire [11:0] i128_image;
6 wire i128_image_on;
7 assign i128_image_on = (vy >= 100)&&(vy <= 100+127)&&
8 (vx >= 300)&&(vx <= 300+127)&&disp_on;
9 assign i128_image = (i128_image_on) ?
10 i128[(vx-300)+(127-(vy-100))*128] :
11 12'b0000_0000_0000;
12 assign rgb = i128_image ;

```

図 13 Display of a Image File

図 14 に BMP ファイル [5] である i128.bmp(128×128, 24bit カラー) を先の図 13 のプログラムで参照する i128.mem に変換する C 言語のプログラムを掲載する。このプログラムをコン

パイルした実行ファイルを i128.bmp のあるディレクトリで動作させ、標準出力に i128.mem を指定すれば変換される。

BMP ファイルで注意すべき点は座標系である。BMP の座標系は画像の左下が原点 (0,0) となる。一方、VGA は左上が原点 (0,0) なので、y 座標を変換する必要がある。ここでは、図 13 内で変換 ((127-(vy-100)) の部位) している。

```

1 #include <stdio.h>
2 int main()
3 {
4     unsigned char header[54]; int w, h, cw; int i, j;
5     unsigned int rgb; unsigned char dummy, c, r, g, b;
6     FILE *f = fopen("i128.bmp", "r");
7     fread(header, 54, 1, f);
8     for (i=0;i<128*128;i++) {
9         fread(&b, 1, 1, f); fread(&g, 1, 1, f);
10        fread(&r, 1, 1, f); rgb = 0;
11        rgb |= ((unsigned int)(r>>4))<<8;
12        rgb |= ((unsigned int)(g>>4))<<4;
13        rgb |= ((unsigned int)(b>>4));
14        printf("%03x_/_/%d,%d,%d\n", rgb, i/128, i%128);
15    }
16    fclose(f);
17 }

```

図 14 C code to convert bmp file to Verilog memory image

4.5 画像処理

画像表示ができれば、それをリアルタイムに画像処理したい。いくつかの処理例を見ることで画像処理の手順を学ぶ。

```

1 wire mos_image_on;
2 assign mos_image_on = (vy >= 100)&&(vy <= 100+127)&&
3 (vx >= 300)&&(vx <= 300+127)&&disp_on;
4 assign rgb = (i128_image_on) ?
5 i128[((vx-300)&10'b1111111100)+
6 (127-((vy-100)&10'b1111111100))*128] :
7 12'b0000_0000_0000;

```

図 15 Pixelization



図 16 Pixelized Picture

図 15 はピクセル化 (4×4 を同色にする) 画像のプログラム、図 16 はその出力例である。ピクセル化は指定するピクセルの矩形の左上の点の色に矩形を塗りつぶす。その結果、画像は不連続なピクセルにより描かれる。図 15 のプログラムで、座標を 10'b1111111100 で論理積するところが、矩形に塗りつぶす処理になっている。

もっと一般的な画像処理として Convolution Matrix による方法がある [6]。これによれば、ある画素値とそれを中心とする周囲 8 方向の画素値、計 9 画素値を用いて、画像処理計算を行う。

表 2 Convolution Matrix

| | | |
|-----|-----|-----|
| f00 | f10 | f20 |
| f01 | f11 | f21 |
| f02 | f12 | f22 |

```

1 function [3:0] to_gray;
2 input [9:0] x, y;
3 reg [11:0] a;
4 begin
5   a = i128[x+y*128];
6   to_gray = (a[11:8] + a[7:4] + a[3:0])/3;
7 end
8 endfunction
9 wire iproc_on;
10 assign iproc_on = (vy >= 100+1)&&(vy <= 100+127-1)&&
11   (vx >= 300+1)&&(vx <= 300+127-1)&&disp_on;
12 wire [7:0] f00, f10, f20, f01, f11, f21, f02, f12, f22;
13 assign f00 = iproc_on ?
14   to_gray(vx-300-1,127-(vy-100)+1) : 4'b0;
15 assign f10 = iproc_on ?
16   to_gray(vx-300,127-(vy-100)+1) : 4'b0;
17 assign f20 = iproc_on ?
18   to_gray(vx-300+1,127-(vy-100)+1) : 4'b0;
19 assign f01 = iproc_on ?
20   to_gray(vx-300-1,127-(vy-100)) : 4'b0;
21 assign f11 = iproc_on ?
22   to_gray(vx-300,127-(vy-100)) : 4'b0;
23 assign f21 = iproc_on ?
24   to_gray(vx-300+1,127-(vy-100)) : 4'b0;
25 assign f02 = iproc_on ?
26   to_gray(vx-300-1,127-(vy-100)-1) : 4'b0;
27 assign f12 = iproc_on ?
28   to_gray(vx-300,127-(vy-100)-1) : 4'b0;
29 assign f22 = iproc_on ?
30   to_gray(vx-300+1,127-(vy-100)-1) : 4'b0;

```

図 17 Convolution Matrix Elements

```

1 wire [7:0] norm; // normalize (c)
2 assign norm = (f00+f10+f20+f01+f11+f21+f02+f12+f22)/9;
3 wire [7:0] shrp_p; // sharp (d)
4 wire [7:0] shrp;
5 assign shrp_p = (5*f11<f10+f01+f21+f12) ? 0 :
6   5*f11-f10-f01-f21-f12;
7 assign shrp = (shrp_p & 8'b11110000) ? 4'b1111 : shrp_p;
8 wire [7:0] prewitt_p; // Prewitt (e)
9 wire [7:0] prewitt;
10 assign prewitt_p = (f00+f10+f20<f02+f12+f22) ? 0 :
11   f00+f10+f20-f02-f12-f22;
12 assign prewitt = (prewitt_p & 8'b11110000) ? 4'b1111 :
13   prewitt_p;
14 wire [7:0] sobel_p; // Sobel (f)
15 wire [7:0] sobel;
16 assign sobel_p = (f00+2*f10+f20<f02+2*f12+f22) ? 0 :
17   f00+2*f10+f20-f02-2*f12-f22;
18 assign sobel = (sobel_p & 8'b11110000) ? 4'b1111 :
19   sobel_p;
20 wire [7:0] lap_p; // Laplacian (g)
21 wire [7:0] lap;
22 assign lap_p = (4*f11<f10+f01+f21+f12) ? 0 :
23   4*f11-f10-f01-f21-f12;
24 assign lap = (lap_p & 8'b11110000) ? 4'b1111 : lap_p;
25 wire [7:0] emb_p; // Emboss (h)
26 wire [7:0] emb;
27 assign emb_p = (f00 < f22) ? 0 :
28   f00 - f22;
29 assign emb = emb_p;

```

図 18 Image Processing

表 2 に Convolution Matrix に対応する変数を示す。中央の画素値を f11 とし、その周囲に 8 個の画素値が並ぶ。その計算を図 17 に示す。画素値は全て 16 階調のグレー画素で計算さ

れる。このため RGB の平均値をグレー画素値として扱っている (function to_gray)。また、Convolution Matrix の計算で 1 ピクセル外側の画素値を参照するため、表示領域を 1 ドット内側に設定している (iproc_on)。

計算された 9 個の変数を用いて画像処理を行う。図 18 に 6 種類の画像処理を示す。例えば、平滑化であれば図の変数 norm に画素値が計算されるので、これを VGA の rgb に設定すれば平滑化された画像が出力される。実際のプログラムでは、スライドスイッチで画像処理の種類を切り替えて表示する。

図 18 の処理には、アンダーフローやオーバーフローを配慮した計算が含まれる。

図 19 に画像処理結果を示す。(a) は 12bit カラーのオリジナル画像、(b) は (a) を 16 階調のグレー表示とした画像であり、(c) から (h) までは、図 18 のプログラム内の処理に対応した出力画像である。限られた解像度の中で、視認できる範囲では期待された画像が得られている。授業では画像処理の名称と効果、そして Verilog HDL の実装方法について学ぶ。

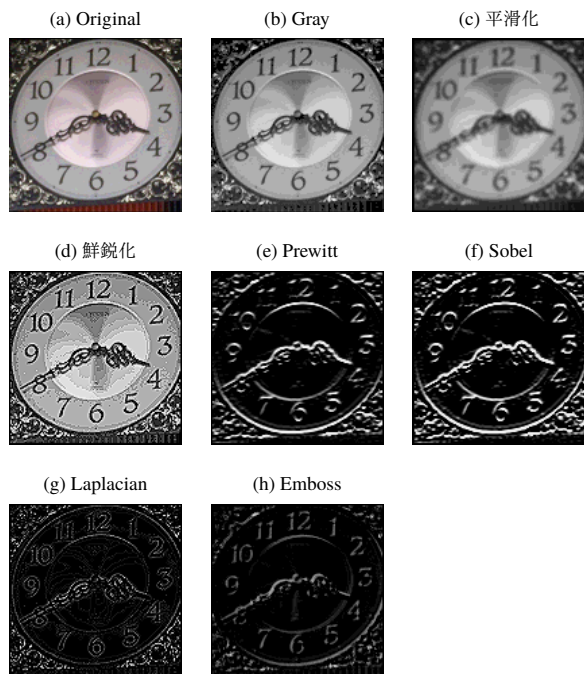


図 19 Image Processing

5 マウス

マウスは今日、コンピュータの必須付属機器になったと言える。そのマウスがコンピュータとシリアル通信で接続されていること、そして、その中身を学ぶ。シリアル通信の実装方法をここで学ぶことになる。

現在市販のマウスが USB(Universal Serial Bus) により簡単に接続できるのも、事実上標準のシリアル通信プロトコルが使われているおかげである。プロトコルは [7] などで公開されている。このプロトコルが使われた当時のコンピュータの名前を付けて、マウスは PS/2 mouse と呼ばれる。キーボードも同様のプロトコルが定義され、使われている。

PS/2 mouse のハードインタフェースは同期用のクロック信号線とデータ線の 2 本である。この 2 本を通して双方向通信ができるハード機構が仕組みられている。つまり、マウスからボタンのオンオフや座標の変化をコンピュータに知らせるだけでなく、コンピュータからマウスにコマンドを送ることもできる。

授業ではマウスから送られてくる情報の処理に集中するため、マウスからコンピュータへの通信は省いた。ただし、完全に省くとマウスはうまく動作しない。PS/2 mouse は電源立ち上げ時にはコンピュータからのコマンド待ちモードになり、座標やボタンの情報はモードを切り替えないと送られない。そこで、マウスの電源立ち上げ時のモード切替だけは BASYS3 に付属しているデモプログラムによって行い、その後、開発したシリアル通信プログラムを通电のままダウンロード後動作させる。

```

1  `timescale 1ns / 1ps
2  module ps2mouse(
3      input rst,
4      input PS2Clk,
5      output reg signed [10:0] cur_mx, cur_my,
6      output reg [2:0] mbtn
7  );
8  reg [5:0] bitcnt;
9  wire [5:0] next_bitcnt;
10 reg [44:0] bit_image;
11 reg [44:0] frame;
12 wire good_frame, framechk;
13 reg signed [10:0] m_x, m_y;
14 wire [8:0] x_delta, y_delta;
15 parameter X_MAX = 640-1, Y_MAX = 480-1;
16
17 assign x_delta = (bitcnt != 43) ?
18     0 : (good_frame) ? {frame[5],frame[19:12]} : 0;
19 assign y_delta = (bitcnt != 43) ?
20     0 : (good_frame) ? {frame[6],frame[30:23]} : 0;
21 always @(*) begin
22     cur_mx = m_x + $signed(x_delta);
23     cur_my = m_y - $signed(y_delta);
24     if (cur_mx > X_MAX) cur_mx = X_MAX;
25     if (cur_mx < 0) cur_mx = 0;
26     if (cur_my > Y_MAX) cur_my = Y_MAX;
27     if (cur_my < 0) cur_my = 0;
28 end
29 always @(*) begin
30     if (next_bitcnt == 0) mbtn = frame[3:1];
31 end
32 always @(negedge PS2Clk or posedge rst) begin
33     if (rst) begin
34         bitcnt <= 0; m_x <= 0; m_y <= 0;
35     end else begin
36         bitcnt <= next_bitcnt; bit_image[bitcnt] <= PS2Data;
37         m_x <= cur_mx; m_y <= cur_my;
38     end
39 end
40 assign next_bitcnt = (bitcnt >= 43) ? 0 : bitcnt + 1;
41 always @(*) frame = (next_bitcnt == 0) ? bit_image : frame;
42 assign framechk = (~frame[0])&&(frame[10])&&
43     (~frame[11])&&(frame[21])&&(~frame[22])&&(frame[32])&&
44     (~frame[33])&&(frame[43])&&(~frame[8:1])&&(~frame[9])&&
45     (~frame[19:12])&&(frame[20])&&
46     (~frame[30:23])&&(frame[31])&&
47     (~frame[41:34])&&(frame[42]);
48 assign good_frame = framechk;
49 endmodule

```

図 20 Serial Communication for Mouse

図 20 に PS/2 mouse のシリアル通信を記す。この module は、PS/2 mouse のハードインタフェースである PS2Clk, PSData によりシリアル通信を行い、マウスが動くたびに送られる通信

伝文から画面 (640×480) 上のマウスポインタの座標 `cur_mx`, `cur_my`, および、ボタンのオンオフ `mbtn` を出力する。

図 20 はマウスから送られる 4 バイトを処理する。1 バイトあたり、先頭に start bit (Low) 後ろに odd parity bit と stop bit (High) が付くので、バイト当たり 11 ビットの構成となり全部で 44 ビットを受信する。bitcnt はループ変数として、0 から 43 まで PS2Clk に同期して増加する。配列 bit_image に bitcnt を添え字として PSData から読み出したビットが順次格納されていく。start bit, odd parity bit, stop bit は変数 framechk によって検査される。

マウスの種類によっては、送られる伝文のバイト数が異なる。本来は、コンピュータ側からマウスに種類の間合せがあり、その応答に応じてバイト数を変化させる。今回は、コンピュータからマウスへのコマンド送信を行わないので、種類 (つまり、送信伝文のバイト数とフォーマット) が既知のマウスを選んで接続している。

5.1 マウスポインタの表示

```

1  wire m_on, m_paint;
2  wire [1:0] m_ctype;
3  assign m_on = (vx >= mx)&&(vx <= mx+15)&&
4      (vy >= my)&&(vy <= my+15)&&(disp_on);
5  assign m_ctype = (m_on) ?
6      (get_arrow(vy-my)>>((15-vx+mx)*2))&2'b11 : 2'b11;
7  assign m_paint = m_on && ((m_ctype == 2'b00) ||
8      (m_ctype == 2'b01));
9  assign rgb = (~m_paint) ? b_rgb :
10     (m_ctype == 2'b00) ? 12'b0000_0000_0000 :
11     12'b1111_1111_1111 ;

```

図 21 Serial Communication

取得したマウスの座標情報を使ってその位置をポインタで表示する。マウスを動かすとポインタが動くという当たり前の景色がどのようにして実現されているか体感できる。図 21 がポインタを表示するプログラムである。これを VGA のプログラム内に組み込むことによりマウスの動作に応じてポインタが動く。(mx, my) がポインタの座標である。

ポインタによく使われる矢印の画像は 16×16 の大きさとする。1 ピクセル当たり 2 ビットの情報をもたせる。2'b00 が黒、2'b01 が白、それ以外は透明となる。関数 get_arrow (関数の定義は割愛する) は y 座標から 32 ビットの情報を返すので、x 座標により 2 ビットを切り出す。2 ビットの情報が透明であれば b_rgb の値を使う。b_rgb には、ポインタから見た背景の色を別途設定することになる。この仕組みは BASYS3 のデモプログラム (VHDL にて実装) を参考にしている。

5.2 Widget

VGA とマウスが動作すると入出力が出揃う。授業ではマウスで操作できる Widget として、Window や button を実現してデモを見せている。ここで、Metastability 回避処理を説明している。マウスの処理が外部クロック (PS2Clk) によって行われ、画面の動作は内部クロック (100MHz) によって行われる。クロックの源泉が異なるため、2 者間の情報伝達を工夫しないと、伝達が欠落しかねないからである。

6 音

BASYS3 には直接スピーカーをつなぐコネクタは用意されていない。そこで、スピーカー接続用に外部周辺基板 (Pmod AMP2 by Digilent Inc.) を用意した。これによって、1 ビットの Digital Output のオンオフがイヤホンジャック経由でスピーカーに伝わる。

音の基本として、まず、音階の A の音 (日本語読みでラの音) を鳴らす。A 音の標準周波数は 440Hz[8] である。オクターブの音を識別するために、この音を A4 と表記する。1 オクターブ上の音は A5, 下の音は A3 などとなる。

図 22 は A4 の音を出すプログラムである。トップ module は audio であり、その内部で noteA がインスタンス化されている。CLK100MHZ, sw, btnC, LED, JB はそれぞれ、内部クロック、スライドスイッチ、プッシュボタン、LED ランプ、外部周辺基板インタフェースに割り付けられる。Pmod AMP2 は BASYS3 の物理ピン JB に接続される。そのインタフェースである JB[0], JB[2], JB[3] はそれぞれ、スピーカへの電圧オンオフ、dB 調整、スピーカへの接続オンオフ (High で接続) に割り付けられる。

BASYS3 の内部クロックは 100MHz である。これを印加・分周して 440Hz を得るには、100MHz の posedge を 113636 (= $100 \times 10^6 / 880$, 以下カウンタ値) 回カウントするごとに信号 beep のオンオフを反転し、この信号をスピーカに与える。

```

1 module noteA(
2   input clk,
3   output reg beep
4 );
5 reg [24:0] counter;
6 always @(posedge clk) begin
7   if (counter == 0) counter <= 113636; else counter <=
8     counter - 1;
9   if (counter == 0) beep <= ~beep;
10 end
11 endmodule
12 module audio(
13   CLK100MHZ, sw, btnC, LED, JB );
14 input CLK100MHZ; input [15:0] sw;
15 input btnC; output [15:0] LED; output [3:0] JB;
16 wire beep;
17 noteA fn(CLK100MHZ, beep);
18 assign LED[0] = beep;
19 assign JB[0] = beep;
20 assign JB[1] = btnC;
21 assign JB[3] = sw[0];
22 endmodule

```

図 22 Sound of Music Note A4

6.1 音階

図 23 のプログラムは音楽を奏でる。図 22 と同様に、audio 内で fullnotes をインスタンス化して動作する。1 オクターブ上の音を得るには周波数を 2 倍する。また、1 オクターブは 12 音なので半音上の音を得るには周波数を $\sqrt[2]{2}$ (≈ 1.059463) 倍する。従って、例えば、C4 の 1 オクターブ上である C5 は、カウンタ値が $191112/2 = 95556$ となる。また、A4 の半音上 A#4 はカウンタ値が $113636/1.059463 = 107258$ となる。図 23 の関数 get_freq は C4 から C5 までのカウンタ値を返す。

```

1 module fullnotes(
2   input clk, output reg beep=0;
3   function [24:0] get_freq;
4   input [7:0] key;
5   begin
6     case (key)
7       0: get_freq = 191112; // C4;
8       1: get_freq = 180386; // C#4;
9       2: get_freq = 170262; // D4;
10      3: get_freq = 160706; // D#4;
11      4: get_freq = 151686; // E4;
12      5: get_freq = 143172; // F4;
13      6: get_freq = 135137; // F#4;
14      7: get_freq = 127552; // G4;
15      8: get_freq = 120393; // G#4;
16      9: get_freq = 113636; // A4;
17     10: get_freq = 107258; // A#4;
18     11: get_freq = 101238; // B4;
19     12: get_freq = 95556; // C5;
20     default: get_freq = 0;
21   endcase
22 end
23 endfunction
24 reg [24:0] counter=0; reg [24:0] bpcnt=0, nbpcnt=0;
25 reg [11:0] t1000=0, nt1000=0; reg [24:0] timer=0, ntimer=0;
26 parameter MLEN = 434;
27 reg [7:0] music[0:MLEN-1]; reg [16:0] mptr=0, nmptr=0;
28 initial $readmemh("mozart2.mem", music);
29
30 always @(posedge clk) begin
31   timer <= ntimer; mptr <= nmptr;
32   t1000 <= nt1000; bpcnt <= nbpcnt;
33 end
34 always @(*) begin
35   ntimer = timer; nmptr = mptr;
36   nt1000 = t1000; nbpcnt = bpcnt;
37   if (timer == 0) begin
38     nbpcnt = get_bpcnt(
39       ((music[mptr]) & (8'b1111_0000)) >> 4,
40       (music[mptr]) & (8'b0000_1111));
41     ntimer = 12_500 * music[mptr+1]; nt1000 = 1000;
42     nmptr = mptr + 2; if (nmptr >= MLEN) nmptr = 0;
43   end else begin
44     if (t1000 > 0) nt1000 = t1000 - 1;
45     else begin
46       nt1000 = 1000; ntimer = timer - 1;
47     end
48   end
49 end
50
51 function [24:0] get_bpcnt;
52 input [7:0] tone; input [3:0] oct; reg [24:0] cnt;
53 begin
54   cnt = get_freq(tone);
55   if (oct > 4) begin
56     get_bpcnt = cnt >> (oct - 4);
57   end else if (oct < 4) begin
58     get_bpcnt = cnt << (4 - oct);
59   end else get_bpcnt = cnt;
60 end
61 endfunction
62
63 always @(posedge clk) begin
64   if (counter == 0) counter <= bpcnt;
65   else counter <= counter - 1;
66   if ((counter == 0) && (bpcnt != 0) && (timer > 150))
67     beep <= ~beep;
68 end
69 endmodule

```

図 23 Music Player

曲は mozart2.mem 内に 16 進数で記述される。1 音は 2 バイトで構成され、先頭のバイトの MSB4 ビットに 12 音階情報として 0 から 11 の値 (C4 から B4 に対応)、LSB4 ビットにはオクターブ情報 (例えば C4 であれば 4) が入っている。2 バイト目には音を伸ばす長さが入っている。この長さの単位は 0.125 秒/ビットである。1 ビット (0.125 秒) を 16 分音符とすると、4

分音符当たり 0.5 秒, よって, 120 拍/分のテンポで演奏される.

また, 図 23 はループ変数などを `always @(*)` 内の論理で設定している例になっている. その学習にも役立つ.

6.2 ピアノキーボード

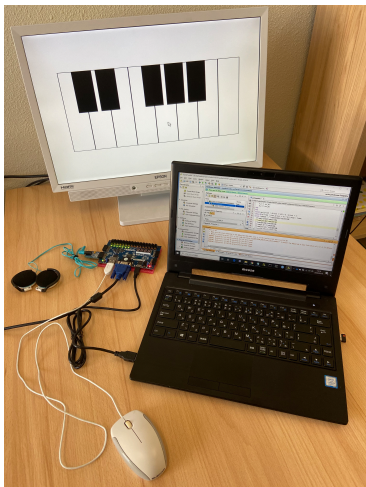


図 24 Application of Piano Keyboard

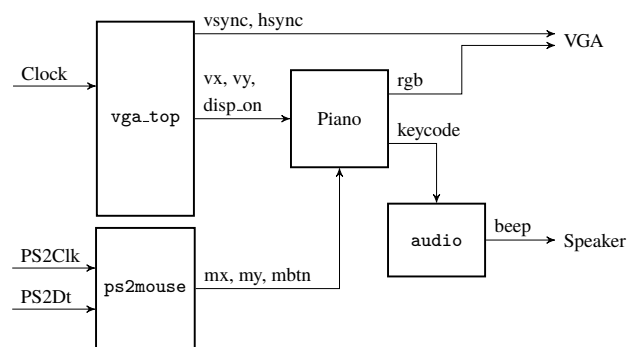


図 25 Design of Piano Keyboard

以上述べてきた, VGA, マウス, 音を統合したアプリケーションとしてピアノキーボードを作っている. その様子を図 24 に写真で示す. 中央左側に BASYS3 基板があり, 基板にはスピーカー, マウス, VGA, PC が接続されている. 奥にあるディスプレイモニタには VGA でプログラミングした鍵盤が映っている. マウスを押下することにより, 対応する音が鳴る. これが, 応用としての集大成となる.

プログラムの規模が大きくなると, 設計にブロック図を利用すると見通しがよくなる. 図 25 はピアノキーボードのブロック図である. ボックスがモジュール, それをつなぐ線がインタフェースである. 図中の `vga_top`, `ps2mouse`, `audio` は既出のモジュールを改造したものであり, 新規に作るべきモジュールが `Piano`(鍵盤の表示とマウスボタンの応答) である. 入出力関係と処理内容が明確になり, 入出力の過不足なく実装を進めていくことができる. ブロック図で設計する手順をこのアプリケーションを通して学ぶ.

7 授業の結果

授業終了後に学生にアンケートを取っている. 学生が 4 段階 (1: 難しい, 2: あまり理解できない, 3: ある程度理解, 4: よく理解した) で授業を評価している. 結果は, 有効回答者 36 名で, 表 1 における項番 5, 6(順序回路, テストベンチ) の平均値が 2.79 および項番 7, 8, 9 (応用) の平均値が 2.71 で, 標準偏差は共に 0.70 であった.

理解度の平均値としては若干の落ち込みがあるが, 応用のプログラミングに至るまで興味を維持してもらえたと感じる. 一方, 今後の改善点は, Verilog HDL 応用をもっと身近に感じてもらう工夫である. 例えば実験によって自ら, 失敗と成功を体験してもらう方法などを検討したい.

8 結言

Verilog HDL の授業において応用例として開発したプログラム, および授業で強調した点を紹介した. VGA, マウス, 音といった知覚に直接響く題材を扱うことで, 多様な応用を学習する環境ができた.

学生が社会に出て実際の問題に立ち向かうとき, 言語の可能性を探索することもあるだろう. それに備えて応用の幅を広げる工夫は学校教育において重要だと考える.

なお本論文ではサンプルコードリストを掲載している. これらのコードを利用したことにより発生したいかなる損害も一切の責任を負わない.

謝辞

茨城工業高等専門学校滝沢陽三教授には, 論理回路のシラバスについてご指導をいただいた. この場を借りて御礼を申し上げます.

参考文献

- [1] 高橋寛. 論理回路ノート. コロナ社, Mar. 1979.
- [2] キットで学ぶ教材研究委員会. *FPGA チャレンジャー入門編: XILINX-Artex-7 版 キット + CD (キットで学ぶ! シリーズ)*. アドウィン, Mar. 2018. ISBN: 9784903272863.
- [3] Stephen Williams and Michael Baxter. *Icarus verilog: open-source verilog more than a year later*. 2002.
- [4] Tony Bybell. *GtkWave electronic waveform viewer*. 2010.
- [5] John Miano. *Compressed image file formats: Jpeg, png, gif, xbm, bmp*. Addison-Wesley Professional, 1999.
- [6] Gary Bradski and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. O'Reilly Media, Inc., 2008.
- [7] Adam Chapweske. *The PS/2 mouse/keyboard protocol*. <http://www.computer-engineering.org/ps2protocol>. 2003.
- [8] *Acoustics – Standard tuning frequency (Standard musical pitch)*. Standard. Geneva, CH: International Organization for Standardization, Mar. 1975.

映画『スカイ・クロラ』における英語の使用について

平澤 順治

一 緒言

ネットの連載記事において、押井守監督の興味深い発言があった(一)。対談形式の記事中で、あるマーベル映画(二)におけるメタファーについての指摘があり、さらに「エンタメと自分の哲学、ある種のメッセージ性との両立というのは大変難しい」と自らの監督作品を踏まえた上での発言である。

じつは「スカイ・クロラ」(08)はかなりうまくいったんだよ。だけど、うまくいきすぎて誰にも気がついてもらえなかった(笑)。僕は原作を微妙なところだけいじくつていて、その微妙にいじくつたところに気がつけばすぐにかる仕掛けになつて。でもその辺は語られたことがない。

ここでいう原作とは、森博嗣の小説『スカイ・クロラ The Sky Crawlers』である(三)。もう少し厳密に言えば、この小説は全5冊、短編集1冊からなるシリーズの第1冊目であり、映画の内容はこの第1作『スカイ・クロラ The Sky Crawlers』に第2作『ナ・バ・テア None But Air』(四)の要素が若干付け加えられたものとなつている。

押井の発言は続く。

「ビューティフル・ドリーマー」は記号的にわかりやすく作つたから、語つてくれる人間は山ほどいたし、「機動警察パトレイバー2 the Movie」(93)(以下「パト2」)に至つては「みんな大好き『パト2』」だから。ああいう政治的なやつはわかりやすい。でも政治的なメッセージじゃない部分とかになつてくると見えにくくなつてくるし、読み解く人間も極端に減る(五)。

映画『スカイ・クロラ』に監督が秘めたメッセージとは何だろうか。映画の(表)のテーマについては、押井監督は当初から「僕は今、若い人たちに伝えたいことがある」と繰り返ししており、既に様々な場所で語られている。前作『イノセンス』が作品としては高い評価を受けたものの興行的には目標に及ばなかった反省を活かし、本作『スカイ・クロラ』では監督自らが広報にも積極的に携わり、公開前後に様々な場で発言を行なつて(六)。思春期のまま歳を取らない「キルドレ」という

永遠の生を生きる架空のパイロット達を現代日本に生きる若者達に重ね、生の内実を問う本作のテーマは、主人公である函南優一(カンナミユウイチ)の最後の独白に凝縮される。

いつも通る道でも 違うところを踏んで歩くことができる
いつも通る道だからつて 景色は同じじゃない
それだけではいけないのか
それだけのことだから いけないのか

場面は異なるが、小説にこのセリフの元となる文章を見ることが出来る。すなわち、小説の問題意識を映画は確実に踏襲している。

(表)のテーマは深遠だが、明確である。つまり、押井が「気がついてもらえなかった」と言っているのは、製作陣と観客が共有した(表)のテーマではなく、隠された(裏)のテーマのことであろう。先に引用した発言の中から、(裏)のテーマを見出す手がかりとなる部分を抽出してみよう。

- ヒント(A) 原作と微妙に変更されたところから読み取れる
- ヒント(B) 気づいた人間は少なく、あまり語られていない
- ヒント(C) 政治的なメッセージではない

ヒント(A)を念頭に置きつつ改めて小説と映画を見直せば、映画で変更された点を指摘するのは割と容易い。しかし前述の通り押井は多くの発言を残しており、公開当時、映画に関連する書籍等も複数出版され、また原作者が人気作家の森博嗣だったこともあり(七)、『スカイ・クロラ』に関する言説は他の映画に比べれば豊富に流通していたとも言えよう。つまり、ヒント(B)にあるような、あまり語られていない、という条件をも満たす変更点を探すのは、途端に困難な作業となる。さらにヒント(C)も条件として同時に満たすとなれば、なおさらである。

著者は、この微妙な変更点とは、映画における英語の使用ではないか、との仮説を立てた。本稿ではこの仮説に基づき押井監督からの秘められた(裏)のメッセージを探る。

以下、第2章では小説と映画の差異をまとめ、第3章では英語の使用に関する言

及の有無について確認する。第4章では劇中の公用語について考察し、第5章にて結言を述べる。

二 小説と映画の差異

小説を読み進めながら、物語の進行に沿って抽出した小説と映画の差異を列挙する。小説は中公文庫版(三)、映画はDVD収録の劇場公開版(八)ならびに同梱の「スカイクリエイターズ」(九)を基とする。文字と映像・音声という表現手法がそもそも異なるため、何をもって差異とするか明確な線引きはできないが、本稿では著者の仮説を確認する意味で重要と思われる点を主観に基づき列挙した。

(『ナイン・ストーリーズ』の引用)

小説では目次の直後、タイトルが「The Sky Crawlers」と英語で表記され、サリンジャーの『ナイン・ストーリーズ』(一〇)第6話「Teddy」から一部が英語で引用される。ページをめくると裏には日本語で「スカイ・クロラ」と横書きで書かれ、「テディ」の同じ箇所が日本語訳文から引用されやはり横書きに書かれている。『ナイン・ストーリーズ』は以降、第1話から第5話まで、各話の扉となるページに冒頭と同じく表ページに英語、裏ページに日本語横書きで同じ内容、という趣向で合計6回引用される。映画にはサリンジャーは特に反映されていない。

(プロログ)

冒頭、小説は主人公の見る夢から始まり、その夢の記憶を引きずったままベットで目覚めた「僕」の独白へ続く。以降、全編を通して主人公の一人称視点で進行する。かたや映画の方は、CGを駆使した圧巻の空戦シーンから始まり、「ティーチャー」と呼ばれる強敵の出現により混乱するパイロット同士の無線越しのやりとりが英語で交わされる。このため日本のアニメーション映画でありながら日本語の字幕が付く。被弾し黒煙を吐き出しながら雲間に墜ちていく戦闘機と、銀色の機体に描かれた黒豹のマーキングを見せつけるかのようにして飛び去る戦闘機。その後、雲の他は何もない上空の風景をバックに印象的なテーマ曲が流れるオーブニングロール、この視点は飛翔する戦闘機からのものと思われ、高度を下げた機体がある基地の滑走路に降り立つシーンに繋がる。

小説では、寝付けなくなった「僕」と夜間に整備作業中だった笹倉の初対面の会話が描かれるが、笹倉の名前も、それどころか主人公「僕」の名前すら、プロログの段階ではまだ明示されない。映画でも主人公と笹倉の初対面のシーンとなるが、日中、機体から降り立つ主人公を地上にいる笹倉が出迎える形であり、互いに交わす自己紹介のセリフの中で、観客もまた「函南優一」「笹倉」というそれぞれ

の名前を知る。また、映画の笹倉は中年女性として描かれている(笹倉が男性から女性に変更された理由は押井本人から繰り返し語られており、パイロット達が子供で、それを迎える母親という位置付けである(六))。

(第1話 カウリング)

小説では各話ごと、飛行機の部品名がエピソードのタイトルとして掲げられる。第1話は上司である草薙水素(クサナギスイト)のオフィスから始まる。ここで「僕」は「カンナミ・ユーイチ(映画ではユーイチ)」は、当基地への配属、ならびに同室の土岐野とのフライトを命じられる。

映画のみ、滑走路で折れたマツチを拾う草薙のシーンがこのタイミングに挿入される。函南はタバコに火をつけ終わったのち無意識にマツチを折って捨てる癖があり、この癖は後に重要な意味を持つ。小説は函南の一人称で進行するため、函南が直接目にしていない草薙の姿は、本シーンを含め映画のみの演出となる。

湯田川との会話、土岐野機とのフライト、敵機撃墜まで小説と映画の流れは同一である。ただし、小説では地上でもフライト中でも彼らは日本語で会話するが(正確には会話文も日本語で書かれている、に過ぎないが)、映画ではフライト中のパイロット同士の会話は、冒頭の戦闘シーンと同じく全て英語(二)で交わされる。帰投後、函南と土岐野は二人揃って司令室で草薙へ報告。映画ではこのタイミングで函南から草薙への「あなたは、キルドレですか」という重要なセリフが入る。キルドレとは『スカイ・クロラ』独自の世界観の核となる、歳をとらない、戦死する以外には死なない子供、という存在である。小説ではこの場面の報告は簡単に終わる。

小説、映画とも、土岐野に誘われて外出、ドライブインで女性2名と待ち合わせとなる。映画ではドライブインの壁掛けテレビで戦況の解説を流しているが、このテレビから流れる音声は英語である。一人で店に来た笹倉と鉢合わせするの共通するが、小説での笹倉は男性、映画では女性のため、登場の意味合い、笹倉の反応が異なっている。

合流した女性を、小説では次のように表現している。

黒いミニの子は、名前をクスマミといった。ストレットの髪が短くて、チョコレートみたいな顔だ。もう一人の白いワンピースの子は、フーコ。髪はピンクで短い。胸元にフクロウの入れ墨をしていた。

映画では、クスマミは茶色の髪を結び上げ、薄紫のワンピースに白のファーコート、口元のホクロがチャームポイントだが、チョコレートのような顔という形容詞が適切かどうかは個人の主観によるだろう。フーコは短い黒髪に黒のロングコート、フ

クロウの入れ墨は原作通りだが、全体の雰囲気は映画の方が大人びていると言えよう。キャラクター造形の違いはあるが、4人で車に乗って娯館に移動、函南とフーコの会話、という流れは小説、映画に共通である。

(第2話 キヤノピイ)

小説はオイル漏れで基地に引き返した函南と草薙の会話のシーン、原作ではこちらのタイムミングで「貴女は、キルドレですか？」のセリフが入る(「貴女」に「あなた」のルビ)。映画と異なり、函南がこのセリフを口にするのは草薙と二人きりのタイムミングで、土岐野は居ない(映画でも何かを察した土岐野はすぐに席を外すのだが)。函南は笹倉に借りたバイクで一人ドライブインに向かい、敵の爆撃機を目標。迎撃のため函南の機体で出撃した草薙は、帰投後「関連会社の観測所」に抗議のため、函南を助手席に座らせ黒いスポーツカーを飛ばす。函南の運転で帰る最中、車中での函南と草薙の会話までが第2話である。

(第3話 ファイレット)

引き続き小説について述べる。函南と土岐野、草薙の妹(実は娘)瑞季の3人の会話、瑞季に溶接メガネを掛けさせるくだり。函南の夢。篠田とのフライト、草薙に代わり見学者の対応、このお礼として夕食に招待される函南。草薙の運転で向かった先は会社の保有する宿泊施設とされる小さなログハウスであった。「その二日後」函南は湯田川とフライト、敵機に遭遇し湯田川機は撃墜されてしまう。

さて、映画版では小説の第2話、第3話に相当するエピソードがかなり入り組んだ順序で並び替えられ、再構成されている。まず映画のみ、函南と土岐野の出撃中に彼らの居室に入る草薙の様子が描かれる。この出撃中にオイル漏れで1機のみ引き返す函南。着陸後、函南と草薙は(表面上)事務的な会話を交わすのみ。函南と瑞季の2人の会話(土岐野はまだフライト中なので居ない)、瑞季に格納庫を案内し溶接メガネを掛けさせるくだり。草薙が瑞季を迎えに来て、ここで函南に見学者の対応を依頼する。見学者は全員英語を話し、函南も英語で応対する。作画上も見学者はヨーロッパ系の中年女性として描かれ、ロケハン時に撮影した写真からキャラクターを起こしたとされる(二二)。

見学中に突如鳴り響く警報音、ここからのシーンは小説『スカイ・クロラ』にはなく、2冊目の『ナ・バ・テア』からインスパイアされたものと推測できる(二三)。煙を引いて墜落する戦闘機は、函南たちの乗る「散香(さんか)」と同型機のため、同じ「ロストック社」に所属するものと分かる。落下地点にて、取り巻く一般人の中に「可哀相に……」と咽び泣く中年女性(セリフは英語、日本語字幕が入る)。これを聞いた草薙は、ゆっくりと眼鏡を外したのちに、次のセリフを叫ぶ。

Enough is enough!

可哀相なんかじゃない、可哀相なんかじゃない!

同情なんかで、あいつを侮辱するな!

短いセリフだが、英語と日本語が混交する。まず最初に「Enough is enough!」と叫んだのは一般人の女性に対して聞かせるつもりでの英語の使用だったのである。だが、眼鏡を外した後に開かれた目は、真つ直ぐ前を見据えたままで中年女性の方向を見ようとはしていない。「可哀相なんかじゃない」と言葉にしてしまうことで一気に感情が昂り、最後の「侮辱するな」はほとんど絶叫に近い。叫びながら一般人に向かつて歩き出す草薙、警備の人間と笹倉に制止される。激昂したままスポーツカーに向かう草薙を見て、函南は先回りをして助手席に座るよう促し、自分が運転席に座る。煙草に火をつけ、眼鏡をかけ直す草薙と、その所作を待つてからおもむろにエンジンを始動させる函南。

映画の中でも重要なシーンの一つだが、小説の方はもう少し経緯が複雑である。映画で墜落したのは近隣の基地に所属すると思われる、彼/彼女らとは直接面識のないパイロットであるが、『ナ・バ・テア』では比嘉澤(ヒガサワ)という女性パイロットが、草薙とのフライト(『ナ・バ・テア』は『スカイ・クロラ』の前日譚であり、草薙は現役のパイロット)において被弾、ぎりぎり基地まで帰投できたかという間際で墜落してしまう。最後の無線交信まで比嘉澤は機体の損傷しか草薙に伝えていなかったが、実は機体だけでなく自らも負傷しており、飛行中に失血死したと思わせる記述になっている。着陸後、墜落現場に急行した草薙は、担架に乗せられた比嘉澤の死に顔を見る。さらに言えば、草薙と比嘉澤の間には、基地で唯一「キルドレ」でない大人の男性パイロット「ティーチャ」を巡っての確執と葛藤があり、シリーズを通して比嘉澤の戦死は草薙にとっての大きなターニングポイントとなっている。

「可哀相に……」と誰かが言った。

僕は一度、自分の靴を見た。泥の中に、僕は立っている。

比嘉澤の顔は汚れていなかった。

可哀相なんかじゃない。

小説における1回目の「可哀相なんかじゃない」は、草薙の内面で語られたものだった。草薙自身に言い聞かせるためのものだった、とも読めるだろう。しかし、草薙はこの感情を彼女自身の中に押し止めておくことができなかった。

「可哀相」また誰かが言った。

溜息を一つ。

「可哀相じゃない！」振り返って僕は大声で叫んだ。
彼らの方へ僕は近づく。全員がさつと後退する。

「馬鹿野郎！ 帰れ！ とつとと帰れ！」

小説の方が、罵倒の表現が直裁、とも言えるだろうか。そして小説のこの場面には、笹倉も函南も（あるいは同じような位置付けのキャラクターも）登場しない。小説の草薙の叫びの方が、より一層に孤独である。

さて、映画では場面が切り替わりドライブインに向かう函南、爆撃機を目撃、草薙の撃撃・掃射、戦区司令部への抗議と続く。帰り道、函南がスポーツカーを運転するところも小説と同一だが、草薙の指示で会社の宿泊施設に移動。2名での夕食のシーンとなる。場面が切り替わり、湯田川と函南のフライト、湯田川が撃墜される。映画では、湯田川を撃墜したのは「ティーチャー」であることが機体の黒豹のマーキングにより明示される（ちなみに小説では「ティーチャ」と表記され、『スカイ・クロラ』ではその存在は草薙の口から語られるものの「ティーチャ」という名称そのものは出現せず、第2作『ナ・バ・テア』で初めて記載される）。

さらに映画では、自ら撃撃し「ティーチャー」と一戦交えるも敗北、フーコのいる娼館近くに不時着する草薙が描かれる。小説では草薙が撃墜されるエピソードは無い。第3作『ダウン・ツ・ヘブン Down to Heaven』（一四）の冒頭、撃墜したと思つた敵機から思わぬ反撃を浴び負傷、入院する草薙のエピソードが書かれているが、この時の相手は「ティーチャ」機ではなく、また草薙も通常通り着陸した後には笹倉が負傷に気がついた、という流れのため不時着でもなく、完全に映画独自のエピソードである。ただし、映画のこのタイミングでフーコから函南に語られる草薙の過去：フーコの客であった「ティーチャー」の元に草薙が押しかけるエピソードは、『ナ・バ・テア』において草薙の一人称で語られる（一五）。

小説の第2話、第3話に対応する映画のシーケンスは複雑に並べ替えられており、さらに原作には無い味方機の墜落場面、草薙の不時着場面が挿入されている。函南がドライブインに向かうバイク、函南と草薙が乗るスポーツカーの場面はそれぞれ同じレイアウトで繰り返され、小説以上にデジャヴを強く感じさせる。

（第4話 スピンナ）

小説の第4話の冒頭は「移動日は雨だった」の一文から始まり、唐突な移動から始まる。読み進めるに従い、草薙と3名のパイロットが別の基地に移動することが判明する。全体の戦況が見えぬまま、十分な説明がないまま命令だけが下される、ただしその事をさほど重要視していない主人公の心情も含め、状況が伝わる文章である。移動した先の女性エースパイロット三ツ矢の登場、大規模な戦闘があり、混

戦の中、三ツ矢は黒豹が描かれたスカイリイによる味方機の撃墜を目撃していた。小説では三ツ矢のチームのみ2機墜とされるが、映画では篠田機も落とされる。

作戦終了後、「知らない街を見に行こう」と土岐野に誘われ外出する函南（ここで土岐野は「知らない国」ではなく「知らない街」と表現する。この世界において、「国」という概念がどのようになっているのか、はなはだ不明瞭である）。偶然なのか、草薙が合流、3名でボウリング、土岐野は居合わせた地元の若い女性を誘って居なくなつてしまい、函南と草薙は店を変えて食事。したたかに酔つた草薙と、車に乗り込むまで。

映画は函南の一人称視点という制約に縛られないため、大規模な攻勢作戦の場面では、大空を埋め尽くすような数の航空機同士の戦闘が、空中給油の様子や空母から発進し合流する戦闘機、爆撃機の対空銃座のシーンなど様々な視点から精緻に描かれ、本作の見所の一つとなつている。ただ、プロットに関しては小説とほぼ同じ進行である。

（第5話 スポイラ）

元の基地に戻ることなつた函南。草薙、土岐野はもちろん、三ツ矢とそのチームメイトも一緒に移動となる。函南と土岐野の会話、函南と三ツ矢の会話、そして草薙に銃を向ける三ツ矢；その後の展開は小説と映画で大きく異なるが、本稿での論考の及ばないところであり、またこのラストが押井監督の言う「微妙なところ」であるはずはないので、本稿では展開が入り組んだ第2話・第3話に比し、第4話・第5話はほぼ小説通りのプロットをなぞつていることの確認に留めたい。

三 英語の使用に関する言説の有無

映画『スカイ・クロラ』に関わる言説の中で、劇中の英語について触れたものがあるだろうか。映画の公開から十年以上が経過しているが、入手可能な資料について再確認した。

まず、押井守本人はどうだろうか。前述の通り映画について多くを語つた監督だが、『アニメはいかに夢を見るか』（六）『スカイ・クロラ オフィシャルガイド Material』（一六）『スカイ・クロラ オフィシャルガイド Surface』（一七）を読み返しても、英語に関するコメントは見つけられなかった。

2008年8月の映画公開の直前、7月末に発行された『凡人として生きること』（一八）の「はじめに」には、

僕が映像だけでは伝えられなかった言葉が本書にはつづられており、僕が言葉にできなかった思いが映画には描かれている。

との言葉がある。この本を映画『スカイ・クロラ』を補完するもの、あるいは同時期の押井監督の思想を訓み解く上で必読のものと捉えても良いだろう。例えばこの本の「あとがき」には「今こそ言葉が大切な時」との副題が添えられ、言葉によるコミュニケーションについての押井監督の考えを窺い知ることができるが、日本語／英語という言語に関する記述は1冊を通して無い。

監督以外ではどうだろうか。DVD同梱の「スカイクリエイターズ」(九)では、プロデューサー石井朋彦による解説をストーリーに沿って読むことができる。セリフではないが、英語の使用に関して、次のような発言があった。

メインタイトルとクレジットは、日本語名と英語名が、一本の横線によって上下に区切られています。この横線は、上空と地上を区切る雲を象徴しています。タイトルクレジットにおいても、空と地上を分けるというテーマを、一貫させようとしているのです。

日本語と英語、異なる言語が何らかの分断の象徴として意図的に用いられていることが示唆される。さらに、チャプター3、函南が土岐野と組んで初めて飛ぶ場面について解説する中に、次の一文がある。

優一たちは、戦闘中は無線を介して英語で会話をしています。英語は日本語と違い、文頭に動詞や形容詞、形容動詞といった述語が置かれる為、戦闘の目的がすぐに判る為なのですが、地上では日本語で喋っているキルドレたちが、空の上では異なる言語を話す事によって、雲上と地上における臨場感や時間の流れを変えたいという演出的意図でもあります。

劇中、英語が使用される背景と演出上の効果について明確に語られている。あえてここに筆者の個人的な見解を追加するならば、函南が英語を使用することにより、彼が訓練を受けたパイロットであることが強調されていると考える。日本のアニメーションにおいては、主人公が主役メカを操縦する、という行為が無意識に了解される傾向があり、主人公の父親がたまたまそのロボット兵器を設計した技術者だったり、たまたまそのロボット兵器を運用する司令官だったりするだけで、主人公が最新鋭の機体に乗る込むことがお約束として是認される。『スカイ・クロラ』では主人公が基地異動後の初フライトにおいて、空中では英語を使うという職業上のルールを理解していることを明確に見せることにより、パイロットが特殊技能を有するプロフェッショナルであることが、説得力を持って描かれている。パイロットが英語を使用するというのは本作品の中だけの設定ではない。現実の航空管制の現場でも国際民間航空機関 (ICAO) が定めた標準用語に基づき、原則英語での通信が

規定されている(二九)。日本の航空自衛隊でもパイロットとのやりとりに英語が使用されることは、「パト2」こと『機動警察パトレイバー2 the Movie』(二〇)において押井監督自身が描いている。『スカイ・クロラ』の15年前に公開された作品である。

さて、英語の使用は、押井監督の指示によるものだろうか、プロデューサーの意向が反映されているのだろうか。

パイロットが英語で話す演出は、脚本の段階で決定していた。伊藤ちひろの手になる脚本は、2006年の3月から6月まで、押井監督とのやりとりを重ね第五稿にして決定稿となつたとされる(二二)。脱稿時のオープニングには次のように書かれている(二二)。

○プロローグ／空戦

暗闇にホットマイクを通した声が流れる。

コーション ボギードープ ブレイク

声2 『警戒！上方に敵機、回避せよ！』

(中略)

ストップ シェルテイ ノーワンキルヒム ブレイク

声2 『やめろ(シェルテイ)！奴には勝てない！反転して逃げろ！』

キル ティーチャー

声3 『(ティーチャー)を撃墜する！』

コードネーム「シェルテイ」と呼ばれたパイロットは、函南の、あるいは栗田仁朗の、前世なのだろうか。単に「キル ティーチャー」では命令形、「(ティーチャー)を撃墜せよ」になつてしまったため(緊急時のため省略、という解釈もあるが)、詳細なセリフはアフレコまでに練り直す前提だったのではないかと推測する。

同じ決定稿において、函南の最後のセリフは次のようになる。

キル マイファーザー

優一「(ティーチャー)を撃墜する」

映画の該当場面ではそれぞれ、プロローグもラストも決定稿通り「(ティーチャー)を撃墜する」という同じ字幕が出されるが、英語のセリフは「I'm gonna kill him」と「I'll kill my father」の違いがあり、函南の「父殺し」の宣言が観客に強いインパクトを与える。なお、決定稿で英語が使用されるのは空中でのパイロット同士の会話のみ、見学のシーンや味方機墜落のシーンでは、日本語のセリフやト書きしか書かれていない。

誰の提案によるものか、までは特定できなかったが、なぜ函南達が雲の上では英語を使うのか、少なくとも演出上の理由は見つかったように思える。しかし逆に、この理由ではテレビのニュースや見学者の日常会話までが英語であることの説明にはなっていないとも思える。

なお、細かいところでは、キャラクターデザインと作画監督を務めた西尾鉄也が、ドライブインのマスターに関して次のように語っている(二三)。

初めは外国人だと聞いて、そのつもりで描いたんですが、コンテがあがつてきたら日本語話して結局日本人ということに。

顔は外国人だが日本語を話すから日本人だ、という指摘は、実はかなり重要な指摘だと思える。また、各キャラクターが各場面での言語を使用するのか、コンテの段階で決定したとも読める。ここではとりあえず、発言の紹介のみに留める。

作り手側の発言だけではなく、受け手側の発言も可能なかぎり確認しておきたい。宇野は『母性のデイスピア』(二四)において宮崎駿、富野由悠季、押井守という日本を代表する3名のアニメ監督について論じており、押井作品については『ピュティフル・ドリーマー』から『天使のたまご』(二五)『紅い眼鏡』(二六)といったいわばマイナーな作品も丹念に追い、『スカイ・クロラ』にもかなりの紙幅を費やしている。しかし、宇野は現代の日本を「絶望的に空疎な状況」とし、その成立過程を明らかにするという観点から押井作品の変遷を見ており、『スカイ・クロラ』は「映像の世紀」が終焉した後の「エディプス的な物語構造に後退」した作品であると批判的に位置付けている。アニメーション上の細かい演出については論考の主眼とするところではなく、日本語／英語の使い分けも含め言及が無い。

高橋の『サイボーグ・フィロソフィー』(二七)はサブタイトルに「『攻殻機動隊』『スカイ・クロラ』をめぐる」を標榜するが、2008年10月の出版であり、『攻殻機動隊』は土郎正宗の原作から押井守と神山健治それぞれの映像作品までを視野に入れているが、『スカイ・クロラ』は再生医療の観点から森博嗣の小説を論ずるにとどまっておらず、映画への言及は無い。高橋の論述のその後の展開をResearchMapで確認(二八)したが、映画『スカイ・クロラ』を対象にしたものは無いようである。「サイボーグ」への関心だけでは、映画に描かれた「キルドレ」は、魅力的ではなかったのだろうか。

その他、前述の『スカイ・クロラ オフィシャルガイド Material』(二六)には森博嗣、京極夏彦、行定勲のインタビュが載るが(森は原作者、行定は脚本監修ではあるがアニメの演出に対しては受け手側の立場と捉えた)森が声優の演技を秀逸と言及するのみであり英語使用の指摘は無い(『スカイ・クロラ オフィシャルガ

イド Surface』(二七)は公開直前の5月刊行であり、多くの対談やインタビュが載るが、映画の感想はタイムイング的に語りようが無い)。

入手可能な資料の範疇ではあるが、英語の使用に関する言及は少なく、ヒント(B)の条件は満たしていると結論付けた。

本章の最後に、そもそも英語の使用が「微妙」な変更と言いつけるのかについて検討する。ここでは『スカイ・クロラ』前後の押井守監督作品に着目する。

2004年公開の『イノセンス』(二九)は、同じく押井が監督した1995年の『攻殻機動隊』の続編であり、土郎正宗のコミックを原作とするアニメーション映画である。セリフは全て日本語だが、「電子戦」の映像表現として広東語の音声が入る。また、警察の建物であることを示す「警」1文字のネオンサイン、重要参事人となるハッカーが死亡した際に空中に浮かび上がる遺言の文字、カードに書かれた「aemeth(真実)」と「maeth(死)」の文字などが印象深い。

『スカイ・クロラ』の翌年、2009年公開の『アサルトガールズ』(三〇)はアニメーションではなく実写作品であり、押井は監督と脚本を務める。主人公「グレイ」役に黒木メイサ、「カーネル」役に佐伯日菜子、「ルシファ」役に菊地凜子(『スカイ・クロラ』では草薙の声を担当)、そして唯一の男性キャラ「イエーガー」役に藤木義勝がキャストイングされ、仮想のゲーム「アヴァロン(f)」の世界でモンスターと闘う。冒頭、英語のナレーションと共に日本語字幕が表示され、本作の世界観が饒舌に語られる。その後のストーリーにおいても、日本人俳優でありながらセリフは全て英語で交わされ日本語の字幕が付く。唯一、グレイがイエーガーを臨時のパーティーに誘う場面でのみ、日本語での会話がなされるが、システム(ゲームマスターと呼ばれる天の声)から警告が発せられる。以下は映画の字幕であり、実際の音声は双方とも英語である。

(ゲームマスター) ローカル言語の使用は禁止条項に触れる

(グレイ) うるさいわね! 込み入った話をするんだから特例で認めてよ

(ゲームマスター) プレイヤー0251 今回だけだ

(グレイ) ありがとう

その後、獲得ポイントの配分までの「込み入った話」は日本語、その後の戦闘シーンでは英語、ステージの中ボスを倒した後の本音の部分だけまた日本語が使われる。なぜ日本語がローカル言語で禁止なのかも含めて、細かい説明はなされない。

押井作品においては複数言語の混在、使い分け、切り替え、字幕の効果的な利用といった演出手法は特別なものではなく、『スカイ・クロラ』においても特に不自然さを感じさせない。以上の検討から、筆者は押井の言う「微妙」な変化が英語の使用を指すのではないかと推論している。

四 劇中の公用語について

映画の中で複数の言語が使用されていることを意識して、再度、本作を鑑賞すると、一つの疑問が浮かんでくる。

この国の、公用語は一体、何語なのだろうか？

物語の主要な人物名は日本的な名前であり、画面上での明示はないが漢字表記があり読み仮名が振られている。彼／彼女らは普段は日本語を話す。彼／彼女らが登場する戦闘機は「散香（さんか）」と名付けられている。どうしても「玉碎散華（さんげ）」という言葉を連想せずにはいられない。三ツ矢達の基地で運用されていた双発機は「染赤（そめあか）」と呼ばれ、やはり日本語の名称である。一方、対抗するラウテルン社の戦闘機は「ティーチャー」の駆る「スカイリイ」や「フォーチューン」など、英語らしい名前がついている。

ドライブインのテレビニュースでは英語で戦況が伝えられ、見学の場面では誘導するガイドも、誘導される見学者も全員英語を使用している。戦死したパイロットを見て咽び泣く女性も英語で悲嘆に暮れていた。基地を移動した後、ボーリング場で土岐野がナンパした若い女性達、草薙と化粧室で言葉交わした中年女性、泥酔して歩く草薙と函南に車から罵声を飛ばす男性、いずれも英語ではない外国語で話し、筆者はなんとなく東欧系の言語と感ずるだけで内容は全く聞き取れなかった（後述するロケハンの経緯から、またスタッフクレジットでは声優の中に英語キャストと共にポーランド語キャストが紹介されている（三二）ため、ポーランド語と確認できる）。一般人⇨大人は現地語で話し、軍人、あるいはキルドレは日本語を話すということだろうか？

否、ドライブインのマスターやクスマ、フコ達は函南達と日本語で会話する。一方で、草薙の机上に置かれた作戦指令書と思しき書類は英語で書かれている。軍（ロストック社）の正式書類には英語が使われているようだ。さらにまた一方で、湯田川が折り目正しく畳んでいた新聞は、日本語の見出しが描かれていることが画面から見てとれる。

新聞ならば、現実世界の日本における英字新聞のように、一般紙の他に一定数のコミュニティに向けた発行ということも考えられる。一方で、雑多な客で賑わうドライブインのテレビの音声は英語のチャンネルに合わせられていた、ということは、やはり公用語は英語、ただし国内に英語と日本語の両方を話せる一定数のコミュニティを擁する国、と解釈するのが自然ではないか。すなわち、日本からの移民を受け入れたヨーロッパの小国が舞台、という可能性である。

映画の制作にあたり、押井監督以下主要スタッフは海外へロケハンに出かけている。行き先はアイルランド、続いてポーランドの2国である。アイルランドは主にメインとなる冤離洲（ウリス）基地とその周辺のイメージとして、ポーランドは主

に大攻勢作戦時に移動した別の基地（三月兔（さんがつうさぎ）基地という名称が設定されているが、劇中では全く触れられない）とその周辺のイメージとして使われたようである。プロデューサー石井朋彦の証言がある（三三）。

『スカイ・クロラ』において押井は当初、世界を中・東欧を中心に展開させた」と発言していた。原作から読み取れる舞台は、日本のようでもあり、アメリカの沿岸のようでもあったが、いずれの世界も映画として表現するには映像的魅力に欠けると判断したのだ。

原作の舞台はどこなのだろうか。読者の想像に委ねられているところが小説の醍醐味ではあるが、小説『スカイ・クロラ』では一箇所だけ、仄めかしがある（三三）。

「ジェット・エンジンは知っているよな？」

「うん、少しなら」

それは五十年もまえの戦争の頃、ヨーロッパで開発された推進システムだった。ロケット・エンジンのように、後方へ気体を噴出して推力を得る。

日夜怪しげな研究開発に没頭する笹倉（小説なので男性）と、函南との会話である。このやり取りで、『スカイ・クロラ』は全くの異次元世界の物語などではなく、我々の住む世界と地続きの、ありえたかもしれない世界だ、ということが示される。筆者の個人的な感想を言えば、この場面には少し蛇足めいたものを感じるが、近未来のようでありながらプロペラの戦闘機しか存在しない世界、という虚構を成立させるためには必要なコマなのかもしれない。「ヨーロッパで開発」という語のニュアンスから、舞台はヨーロッパ以外であるように読める。さらに「五十年もまえの戦争」が第二次世界大戦を示すのならば、その時点で兵器としての飛行機を開発できた国は、ヨーロッパ以外にはアメリカ、ソ連、日本といったところだろう。石井の日本もしくはアメリカという推測に符合する。

ところが前述のように映画のロケハンにはアイルランドとポーランドで行われており、函南達の戦闘機はドイツ軍機のイメージで、ラウテルン社の戦闘機はイギリス軍機のイメージでデザインされている（三四）。さらに草薙のスポーツカーは小説では「黒いスポーツカー」「六気筒だろうか」としか書かれていないが（三五）、映画では明らかにボルシェの2シーターオープン、すなわちドイツ製スポーツカーが描かれており、函南が笹倉に借りるスクーターもイタリア製スバルの改造車両として描かれる。画面からは明らかにヨーロッパの雰囲気が出されている。

欧州を舞台に日本人パイロットが命懸けで戦争をする不思議、日本語と英語の奇妙な混淆：押井監督は、ここに日本の敗戦の、ありえたかもしれない別の形を描い

たのではないか。

1945年9月2日、戦艦ミズーリ上でポツダム宣言受諾の宣誓が行われ、日本は敗戦した。しかし我々日本人は、天皇による玉音放送が流れた8月15日を終戦記念日として歴史に止めようとしている(三六)。後退ではなく転進、全滅ではなく玉砕、敗戦ではなく終戦：果たして、我々の戦争は終わったのだろうか？

このように考えると、2箇所のロケ地もまた、深い意味を持つていると考えられる。アイルランドの公用語はアイルランド語(ゲール語)と英語(三七)、ポーランドの公用語はポーランド語である(三八)。西尾の言葉にあったように、あるいは藤原正彦の著作のタイトル通り、『祖国とは国語』である(三九)。アイルランド語を話すからアイルランド人であり、ポーランド語を話すからポーランド人である。『祖国とは国語』から引用する。

若い頃、ドーデの『最後の授業』を読んだ。普仏戦争でドイツに占領されたアルザス地方の、小さな村の小学校の話である。占領軍の命令でフランス語による授業が打ち切られることとなり、最後の授業が行われた。老先生の教室には、子供たちの他、かつての教え子である村人たちもやつてくる。授業の最後に先生は、悲痛な表情で「国は占領されても君たちがフランス語を忘れない限り国は滅びない」と言う。

ただし、アイルランド語を話すからアイルランド「国民」ではないし、ポーランド語を話すからポーランド「国民」ではない。アイルランドは公用語をアイルランド語と定めているにもかかわらずほとんどの国民が日常会話に英語を使用し(四〇)、一方、ポーランドでは2005年に「少数民族法」を施行し、ポーランド語「以外」の言語を使用するポーランド国民への配慮が進められている(四一)。どちらも過去に他国に抑圧・蹂躪された悲しい歴史により、現代において自国語に関する複雑な問題を抱えている。

日本においては敗戦による全面降伏を受諾した以上、戦勝国により日本語が禁じられ英語が公用語となる可能性はあった。結果的には日本人は敗戦後も日本語を使い続けることになり、日本語文化を延命させることができた。日本人がいつまでも敗戦を受け入れられない(言語化できない)こと(四二)も、母国語消滅の危機と真剣に向き合わなかった(四三)ことに遠因があるように思える。

戦後、戦勝国による日本の占領政策が変わっていたら、『スカイ・クロラ』の世界は(「ギルドレ」はともかく)ヨーロッパにおける日本人外人部隊として、ある意味、実現していたのかも知れないのである。

『スカイ・クロラ』公開直前の2008年3月、押井は軍事評論家の岡部いさく

との共著『戦争のリアル』を出版し、次のように語っている(四四)。

日本人のトラウマとしての敗戦。それから敗者の愉悅に浸るっているある意味特権的な歴史。たぶんこの二つから日本人は戦争を語り始めるしかない。

押井が戦争を語る際、常に戦後の日本のあり方が意識されている。表現者として戦争を扱う以上、『スカイ・クロラ』製作においても同じ問題意識があったはずである。なぜ日本人がヨーロッパの空で戦うのか、押井なりの解答が用意されていたはずで、その世界観を元に英語と日本語の使い分けがなされたと考える。

映画公開から約2年半の後、2011年3月に日本では東日本大震災が発生。地震と津波により、福島の原子力発電所はメルトスルーに至った。押井守は震災後の日本のあり方に対して、震災の翌年、『コミュニケーションは、要らない』(四五)を上梓。強い危機感を持つて警鐘を鳴らしている。

言葉を恣意的に用いるものは、その言葉とともに滅びるしかない。(まえがき)

狭い島国であるのにもかかわらず、我々の意識は、はっきりと分断されている。(第1章)

今の政治家たちも嘘をつくけれど、墓まで持つていく覚悟があるのだろうか。(第2章)

日本人の言語能力は間違いなく落ちている。(第3章)

日本人は何かシビリアな状況をつきつけられるとブレーカーを下ろして思考を停止し、裏付けのない願望に浸ってしまう。(第4章)

あの節電騒ぎも難民体験もどうせすぐに忘れるだろうと思っていたけれど、僕の想像よりもはるかに早かった。(第5章)

本書を読むことで押井の日本や日本語に対する考えの一面を知ることができる。ただし、映画『スカイ・クロラ』と同時期に出版した『凡人として生きること』と読み比べると、若者を諭すような厳しくも温かい口調は鳴りを潜め、直截な表現による強烈な批判が展開されている。小説版の草薙が「馬鹿野郎」と叫んだように、あまりにもストレートな表現で：しかし、この本の最終章において押井が述べる結論は、やはり『スカイ・クロラ』のテーマに通底するものである。

人間が考えるべきことなんて最終的にはひとつしかない。
自分の人生とどう向き合うのかだ。(第6章)

映画『スカイクロラ』に隠された(裏)のテーマを追って、震災後の押井の社会批判までたどり着いた。ヒント(A)から映画と小説の微妙な違いとは英語の使用ではないか、との仮説を立て、ヒント(B)に関して英語に関する発言がほとんど無いことを確認した。英語の使用を手がかりとするならば、架空の外人部隊が戦後日本のありえたかも知れない形態を表しているのではないか、すなわち、日本人とは何か、日本語とは何か、戦争とは/平和とは何か、という問題意識が隠されたテーマではないかと考えた。ただし、ヒント(C)として見た通り(裏)のテーマは政治的なものではない。これらの諸問題に、政治のレベルではなく(政治問題として捉え結果的に思考停止に陥るのではなく)、まず個人のレベルで向き合っ

五 結言

2008年公開のアニメーション映画『スカイ・クロラ』において、監督が込めた(裏)のテーマを探り、小説と映画の違いを確認するとともに、劇中の使用言語について考察した。架空の世界でありながら日本の敗戦後の別の姿を示すことで、日本人一人ひとりが戦争と平和について考察し総括すべきとのメッセージが隠されているのではないかと結論づけた。

六 付記

本稿では十分に考察しえなかつたが、映画の舞台となる兎離洲(ウリス)基地と
言う地名も、少し引つかかる地名である。いかにも、欧州の地名に漢字を当て字し
たような語感を伴っているからである。小説では第5章で登場する。

「地名辞典オンライン」(四六)によれば、日本国内に漢字の「兎」を含む市区町
村は無く、「兎」を含む町域名は21箇所あるが、読みが「うさぎ」11箇所、
「と(とつ)」7箇所、「うさい」2箇所、「う」と読むのは京都府木津川市賀茂
町兎並(うなみ)の1箇所のみである。「洲」は中洲を意味しこの漢字を用いる地
名は多い。小説では第3話に(基地は大きな川に挟まれた中州にある)との表現が
あるが、映画ではこの設定は無視され、広大な牧草地に囲まれた飛行場として描か
れている。近くを小川が蛇行しているもの「洲」と呼ぶには似つかわしくない。
中州という設定が意図的に変更されたのか、それとも無意識に無視されたのか、
疑問を解消することができなかった。

参考文献・注

- (一) 押井守、野田真外『米国が抱いた最大の恐怖「内部に潜む洗脳者」「キャプテン・アメリカ/ウィンター・ソルジャー」(2014年)前編』日経ビジネスオンライン 押井守の「映画で学ぶ現代史」 2019年 <https://business.nikkei.com/atc/seminar/19/00088/11200007/> 最終アクセス2020年2月18日
- (二) マーベル『キャプテン・アメリカ/ウィンター・ソルジャー』(Blu-ray, VVAS2921) ウォルト・ディズニー・ジャパン、2014年
なお、前掲(一)の押井の解説に依れば、「ウィンター・ソルジャー」とは帰還兵のことを指し、アメリカが抱える組織内部の洗脳者への恐怖が背景にあるとされる。
- (三) 森博嗣『スカイ・クロラ The Sky Crawlers』中公文庫、2004年
(単行本は2001年6月発行)
- (四) 森博嗣『ナ・バ・テア None But Air』中公文庫、2005年
(単行本は2004年6月発行)
その後、『ダウン・ツ・ヘブン』(2005年6月)、『フラッタ・リンツ・ライフ』(2006年6月)、『クレイドゥ・ザ・スカイ』(2007年6月)、短編集『スカイ・イクリプス』(2008年6月)と1年に1冊のペースで発行される。
- (五) 「ビューティフル・ドリーマー」とは押井が脚本・監督を務めた1984年の作品『うる星やつら2 ビューティフル・ドリーマー』である。
また「パト2」とは1989年の『機動警察パトレイバー劇場版』に続くヒット作であり、どちらも押井守が監督を務めた。
押井守脚本・監督『うる星やつら2 ビューティフル・ドリーマー』(DVD, TDV2627D) 東宝株式会社、1984年
- (六) 押井守監督『機動警察パトレイバー劇場版』
(DVD, BCBA-0505) バンダイビジュアル株式会社、1989年
押井守監督『機動警察パトレイバー2 the Movie』
(DVD, BCBA-0506) バンダイビジュアル株式会社、1993年
押井守編著『アニメはいかに夢を見るか 『スカイ・クロラ』制作現場から』岩波書店、2008年
前半は押井の想いが綴られ、後半はプロデューサー石井朋彦の制作記録。
森博嗣は1996年『すべてがFになる』でデビュー。デビュー作が第1回メフィスト賞受賞、というよりは、森のデビューを飾るためにメフィスト賞が準備された向きもあるが、「理系ミステリ」とも称される独特の文
- (七)

体で人気作家となる。前掲書(六)によれば押井が小説『スカイ・クロラ』を手にしたのが2005年、この時点で森は『すべてがFになる』から始まるS&Mシリーズ全10冊、Vシリーズ全10冊等を出版している。

(八) 押井守監督『スカイ・クロラ』

(DVD, VPBV-13287) 株式会社バップ、2008年

(九) 公式ガイドブック『スカイ・クリエイターズ』前掲(八) 同梱

(一〇) サリンジャー『ナイン・ストーリーズ』野崎孝訳、新潮文庫、1974年
なお、6箇所引用を順に挙げれば、

冒頭 「テディ」(第9話)

第1話 「ド・ドミエリスの青の時代」(第8話)

第2話 「笑い男」(第4話)

第3話 「バナナフィッシュにうつつつけの日」(第1話)

第4話 「小舟のほとり」(第5話)

第5話 「エズミに捧ぐ」(第6話)

第5話とエピソードの間には引用は挟まれていない。

(一一) 前掲(八) チャプター3

厳密に言えば、戦闘の後のシーンで土岐野に撃墜数を聞かれた函南はドイツ語で2機と答える。一連のやり取りは次の通り(日本語は映画の字幕)

「Are you all right? (食らったか?)」

「No damage. (全然)」

「How many did you kill? (何機やった?)」

「Doppel. (2機)」

「Bravissimo! (ブラーボー!)」

土岐野の「ブラヴィッシモ」は「ブラーヴォ」を強調した形であり、英語化した「ブラボー」ではなく、元々のイタリア語と言えらる(イタリア人は褒める相手が男性ならブラーヴォ、女性ならブラーヴァを使い分ける)。移動後の初任務で2機撃墜の成果を嬉しく思いながらも決して驕らず、逆に照れ隠しでとっさにドイツ語を使ってみせる函南。一方、おそらくは函南の操縦の腕前を見て、彼が栗田仁朗の生まれ変わりであることを確信した土岐野だが、そのことは一切表情に出さず、能天気なイタリア語で返しふざけて見せる。それぞれの性格がわずかなやりとりにも浮き彫りになる。

(一二) 前掲(八) 収録オーディオコメンタリーより

(一三) 前掲(四) 220~230ページ

(二四) 森博嗣『ダウン・ツ・ヘブン Down to Heaven』中公文庫、2006年
ただし、草薙が怪我をしたエピソードは前掲(三)、シリーズ第1作『スカイ・クロラ』の函南との食事の場面(181ページ)において、草薙の思い出話として語られている。

(二五) 前掲(四) 245~249ページ 映画では、小説で語られる比嘉澤の死やその後の「ティーチャー」との会話といった経緯が抜け落ちており、娯館に来たという事実だけがフココから語られる。またフココは「わたしの客」としか言っておらず、その男性が「ティーチャー」かどうかは映像で仄めかしてあるに過ぎない。

(二六) 『スカイ・クロラ オフィシャルガイド Material』
中央公論新社、2008年

(二七) 『スカイ・クロラ オフィシャルガイド Surface』
中央公論新社、2008年

(二八) 押井守『凡人として生きるということ』幻冬舎新書、2008年

(二九) 中野秀夫『航空管制のはなし(七訂版)』成山堂書店、2014年

(三〇) 前掲(五) 『機動警察パトレイバー2 the Movie』
爆装した自衛隊機が首都圏に向け飛行、撃墜命令が出されるといいう緊迫の場面で英語が使われている。実はシステムへのハッキングにより作り出された幻の爆撃だった。

(三一) 前掲(六) 98~100ページ

(三二) 『スカイ・クロラ 決定稿』、Blu-ray, VPXY-7199 同梱、非売品

コードネーム「シエルティ」はシェットランド・シープドッグの愛称であり、大好きで知られる押井監督の趣味が窺われる。伊藤は軍事的な方面には詳しくない、との押井の発言もあり、パイロットのセリフや英語の使用等は押井の発案と推測できるが、その作業分担も含め確認できる資料を見つけ出すことができなかった。

(三三) 前掲(一六) 61ページ

(三四) 宇野常寛『母性のデリストピア』集英社、2017年。

(三五) 『天使のたまご』1985年、オリジナルビデオアニメ作品。筆者は未見。

(三六) 『紅い眼鏡』1987年、実写作品。筆者は未見。

(三七) 高橋透『サイボーグ・フィロソフィー』NTT出版、2008年

(三八) https://researchmap.jp/read0205948/published_papers

最終アクセス2020年4月5日

(三九) 『攻殻機動隊 DVD BOOK by 押井守 イノセンス』講談社、2017年

広東語の使用についてはDVD特典映像の監督インタビューに言及あり。

(四〇) 押井守監督『アサルトガールズ』(DVD GNBD-1564) 2009年

- (三一) 前掲(一六) 142~143ページ
- (三二) 前掲(六) 134ページ
- (三三) 前掲(三) 285ページ

現実の世界では第二次世界大戦中にジェットエンジンの戦闘機が実用化、実戦投入されている。この会話のくぐりや影には反映されない。逆に、着任した函南が草薙にカミュの「太陽が眩しかったから」を引くやりとりは、映画のみの演出で小説には無い。

- (三四) 前掲(一六) 64~78ページ
- (三五) 前掲(三) 119~120ページ

水平対向の六気筒であればボルシエしかありえないだろう。もし直列の六気筒であれば、日本の古いスカイラインやフェアレディも想起できる。

- (三六) 佐藤卓己『増補 八月十五日の神話 終戦記念日のメディア学』

- (三七) ちくま学芸文庫、2014年(2005年刊のちくま新書に加筆修正)
外務省ホームページ <https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/ireland/data.html>

- (三八) 最終アクセス2020年2月24日
外務省ホームページ <https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/poland/data.html#section1>

ポーランド基礎情報

- (三九) 最終アクセス2020年2月24日

藤原正彦『祖国とは国語』新潮文庫、2006年
『最後の授業』の引用部分は30ページから、44ページに補足がある。原作のドーデー『最後の授業』は、小学校に通う少年フランスの視点で書かれた短編小説で、藤原が引用した部分は滝田文彦の訳では次の通り。

一つの国民が奴隷にされてもその国民がじぶんの言葉を持っているかぎりは、牢獄の鍵をもっているのと同じである

注釈として「『言語をもっていれば、鎖からほどいてくれる鍵を持っているのだ』(F・ミストラル)『原註』」とある。

(小林正編『フランス短編名作集』学生社、1961年)

この作品に対しては、アルザス地方では元来ドイツ語系のアルザス語が使われていたこと、ミストラルはプロヴァンス語の話者であることなどが指摘されている。

(笠谷知代『英語教材の中の文学作品』日本英語教育史研究、第9号、77~106ページ)

なお、押井本人も『イノセンス』の段階で次のように語っていた。

ポーランドに行って、一番よくわかったのは自分が日本という国を別に好きでもなんでもないんだということ。じゃあ、自分が日本人である根拠はなにかと考えたら、やはり日本語なんだろうなとも思った。

言語が国際的なアイデンティティを規定するという意味で共通するものを感じる。ただし藤原と異なり、ここでの押井の主張は日本語教育の充実を指向するものでない。

- (四〇) (ユリイカ『特集*押井守 映像のイノセンス』青土社、2004年)
田中建彦『アイランド語の衰退とその復活政策の失敗』長野県看護大学紀要、51~60ページ、2002年

- (四一) 阿部津々子『ポーランド「少数民族法」施行10周年と岐路に立つドイツ少数民族』言語文化共同研究プロジェクト、11~20ページ、2015年

- (四二) 白井聡『永続敗戦論』講談社+α文庫、2016年
- (四三) 志賀直哉『国語問題』志賀直哉全集第7巻、300~304ページ、岩波書店、1999年

志賀直哉は戦後、フランス語を公用語にすべきと主張し批判を受けた。森有礼の英語採用説や尺貫法からメートル法への切り替えを元に論じているが、なぜフランス語なのかも含め根拠はなほ薄弱である。筆者も太宰治ファンとして志賀のこの一文に触れたため反発以外の何物も感じなかったが、冷静に考えれば敗戦後も日本語が使われ続けられると能天気信じている方が不思議なのである。志賀は無神経に、朝鮮語から日本語に切り替えた時はどうだったろう、などと書いている。

一方の太宰は戦争中は丙種で兵役を免れる自身を自嘲的に書き(『鉄面皮』等)、軍部批判は意識的にか無意識的にか控えていたが、戦争が終わると唐突に「東条の背後に、何かあるのかと思ったら、格別のものもなかった(『苦悩の年鑑』)、「阿保の文章である。東条でさえ、こんな無神経なことは書くまい」(『如是我聞』)と名指しでの東条英機批判を開始する。しかしながらこのメンタリティこそが、太宰が戦後に多くの読者の支持を集めるに至った理由なのかもしれない。

- (四四) 押井守、岡部いさく『戦争のリアル』エンターブレイン、2008年
- (四五) 押井守『コミュニケーションは、要らない』幻冬舎新書、2012年
- (四六) 『地名辞典オンライン』

<https://chimei.jitenon.jp/data/kanji.php?kanji=鬼>
最終アクセス2020年2月26日

マイクロスケール実験を導入した化学教育の試み

久保木 祐生

The Trial Lecture for Chemistry introducing Microscale Chemistry Experiment

Yuki KUBOKI

Abstract: I tried to give the lectures using microscale chemistry experiment to promote understanding of the chemistry. The microscale experiments were used for the redox reaction experiment using Iodine and soft drink with plenty of vitamin C as an antioxidant. This trial is assessed by questionnaire survey of students. The analysis of understanding and satisfaction degrees of the students were reported.

1. はじめに

工業高等専門学校（以下、高専）では、『時代にふさわしい、実践的技術者を養成する高等教育機関』¹⁾として、一般科目と専門科目を5年間で学ぶ、「くさび型教育」を特色としている。全国ほぼすべての高専で開講されている一般科目の一つに『化学』がある。茨城工業高等専門学校でも『化学』は1, 2年生の一般科目となっている。

これまで本校の一般科目としての『化学』では、検定済教科書に沿った授業を行ってきた。高校化学の検定済教科書については以前より、記述の曖昧さ²⁾、各項目の概念を理解することの難しさ³⁾などの点で、改善の必要性が提言されている。また2016年に示された中央教育審議会答申においても、「普通科における教育については、自らの人生や社会の在り方を見据えてどのような力を主体的に育むかよりも、大学入学者選抜に向けた対策が学習の動機付けとなりがちであることが課題となっている。」「高等学校における教育が小・中学校に比べ知識伝達型の授業にとどまりがちである（以下、省略）」⁴⁾と指摘されている。この指摘は、普通高校だけの問題ではなく、高専にも当てはまる。高専での、高校化学の検定教科書に沿った授業の展開は、やや難解な計算問題を論理的に考え、解答を導くことはできるようになるものの、大学受験という目的もなく、2年生以降で化学・生物・環境系を専攻として選択しない学生にとっては、学習意義を見出しにくく、入学時に専攻が化学・生物・環境系以外に決まっている学生から「なんで化学やらなきゃいけないの」という声を何度も耳にしている。また、定期試験においても、授業や課題で取り上げたことのある問題以外の出題では、基礎を理解していれば正答できるはずの問題が解答できない学生も少なくない。これまでの筆者の授業が、中央教育審議会答申で指摘されているような普通高校での教育同様、知識伝達型の授業になってしまっていることは否定できず、いま一度、高専の一般科目としての『化学』の在り方を見つめ直す必要性を感じ、現在、授業の大幅な見直

しを行っている。見直しを進める中で、特に、次の3点に焦点を当て、いろいろな授業デザインを試みている。

- 1) 中学理科と高校化学の乖離を埋める
- 2) 教科書の内容を身近な具体例と結びつける
- 3) 高専機構の定めるモデルコアカリキュラムに準拠した内容

2)の身近な具体例との結びつきについては、教科書などに書かれている『実験』や『探究活動』の内容を実践することもできるが、実験器具や試薬の準備、実験室の確保といった点で、頻繁に授業に取り入れることは難しいため、「マイクロスケール化学実験」を取り入れることとした。マイクロスケール化学実験は、1980年代よりアメリカの有機化学分野を始めとして、一般化学、化学教育に取り入れられてきた方法である⁵⁾。マイクロスケール化学実験は、通常の化学実験のスケールを小さくして行うことで、省試薬、省スペース化、実験時間の短縮化を実現できる。

本論文では、『化学』の中でも学生が理解しにくいと感じている「酸化と還元」の単元について、上述の3点を意識した授業デザインを作成し、その実践内容を報告するとともに、学生へのアンケート調査の結果を報告する。

2. 中学理科と高校化学の「酸化と還元」

中学校では、2年生の理科で「酸化」と「還元」を学習する。「酸化」は「酸素との化合」、「還元」は「酸化とは逆に、酸化物から酸素を取り去る化学変化」⁶⁾と記述がある。これは、狭義での「酸化」と「還元」であり、中学生にとっては、

「酸素と化合する」

と、意味と用語の漢字が合致するという点からも、酸素を含む化学反応を見た場合に理解しやすい。高校化学の教科書では、「①酸化・還元と酸素」、「②酸化・還元と水素」、「③酸化・還元と

電子」という順番で、展開されている⁹⁾。ここに、中学理科と高校化学の乖離が存在している。学生にとっては、これまで「酸素と化合する＝酸化」と理解していた内容が、急に酸素から水素の授受に置き換わり、「酸化と還元」の定義が酸素と水素の授受でなぜか逆になり、さらには電子の授受まで出てくるので、一気に混乱し、理解を妨げてしまうようである。

理化学辞典によると、「酸化」は「一般に、広く電子を奪われる変化またはそれに伴う化学変化をいう」、また「還元」は「一般に酸化の反対の過程、すなわち広くある物質が電子を得る過程が、その物質が還元されることに対応する。」とある⁹⁾。これは広義での「酸化」と「還元」であり、酸素に限定することなく、電子の授受で「酸化」と「還元」を定義できるということになる。つまり、水素を使った「酸化」と「還元」の定義がなくとも、電子の授受の説明で、酸素に限定しない酸化還元反応の理解に繋げることができると考えられる。しかしながら、電子は目に見えないため、「鉄が酸素と化合して錆びる」という視覚的な理解がしにくい。また、酸化還元反応は、電池、電気分解、金属の製錬や有機化学反応の基本原則であり、技術者にとって曖昧にしてはいけない内容である。まずは酸化還元反応の理解を目的として、次項に示すように授業デザインを作成した。

3. 授業デザイン

授業は、茨城高専第1学年全生徒205名を対象に行った。50分を1コマとして、3週にわたり以下の流れで授業を行った。

第1週 (50分)

1コマ目) 「酸化」「還元」の定義

第2週 (50分×連続した2時限)

2コマ目) 「酸化・還元」と「酸化数」

3コマ目) 「酸化剤・還元剤」

第3週 (50分)

4コマ目) マイクロスケール実験と清涼飲料水を用いた酸化還元反応の実験

高専機構が策定したモデルコアカリキュラムの当該学習項目における学習内容の到達目標は、「酸化還元反応について説明できる」とあるため、作成した授業デザインは、モデルコアカリキュラムに沿うようにした。

1コマ目から3コマ目までは従来の授業通り、「① 酸化・還元と酸素」、「② 酸化・還元と水素」、「③ 酸化・還元と電子」という順番で「酸化」「還元」の定義を説明し、「酸化数」「酸化剤・還元剤」についての講義を教科書に沿って、自作のプリントを用いながら進めた。

4コマ目はマイクロスケール実験として、誰もが耳にしたことのあるビタミンCと色の変化が分かりやすいうがい薬(ヨウ素)を取り入れた酸化還元反応実験を行った。この実験により、前週

までの既習内容の定着が図れるのではないかと考えた。

3. 1. マイクロスケール実験による酸化還元反応実験

3. 1. 1. 実験器具

実験には以下の器具を用いた。

細胞培養用マイクロプレート (12 ウェル) のふた (VTC-P12, VIOLAMO) , 微量定量滴定びん 10 mL (WHEATON), うがい薬 (Meiji Seika ファルマ株式会社), オキシドール (小塚製薬株式会社), ビタミンC入り清涼飲料水2種類 (ハウスウェルネスフーズ株式会社, サントリーフーズ株式会社)

図1に示すように、マイクロプレートのふたには、直径約23 mm、高さ約200~300 μmの輪状突起が12個あり、突起の内側を反応場として用いることができる。微量定量滴定びんから吐出される1滴の液滴は、約44 μL、マイクロプレートのふた上での液滴の直径は約7 mmで、溶液を1滴ずつ滴下して実験の反応をみるることができる。また、異なる溶液を1滴ずつ混ぜた場合、その溶液量の少なさから、攪拌操作なしで、かつ短時間で色の変化を観察できる。また、反応場が12個あることから、グループの3人全員が1回ずつ実験をすることができる。今回は、全員が実験することは強制せずに、「グループで1回の実験でも、実験をやってみたい人全員が1回ずつ実験しても良い」と説明することとめた。

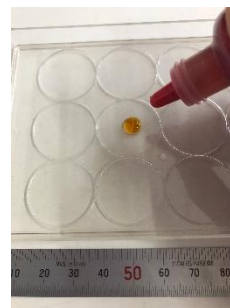


図1 実験に使用したマイクロプレートのふたと微量定量滴定びんから滴下した液滴 (1滴)。

うがい薬は容器に記載の通り、うがい薬4 mLを蒸留水60 mLで希釈して使用した。オキシドールについても、容器の記載に従い蒸留水で2倍に希釈した。希釈したうがい薬、希釈したオキシドール、清涼飲料水2種類は、微量定量滴定びんにそれぞれ小分けにし、微量定量滴定びんには、図2のようにどれがどの試薬かわかるようにラベルで表示した。

マイクロプレートのふた、4種類の溶液が入った微量定量滴定びん、キッチンペーパー1片を1セットとして、チャック付きポリ袋に入れて、各グループに配布した(図2)。キッチンペーパーは、実験中にはマイクロプレートのふたを載せ、色の変化を見やすくするために使い、実験後にはマイクロプレートのふたに付いた溶液をふき取るために配布した。



図2 各グループに配布した実験キット。

3. 1. 2. 実験内容

酸化還元反応実験は、2～3人をグループとして、以下の3実験を行った。

- ① うがい薬（ヨウ素）と清涼飲料水に含まれるビタミンC（アスコルビン酸）を反応させ、ヨウ素の褐色が消える実験。
- ② ①で色が消えた溶液にオキシドール（過酸化水素）を加えると、再び褐色に戻る実験。
- ③ ①の実験を、ビタミンCの含有量が異なる2種類の清涼飲料水で行い、ヨウ素の褐色が消えるのにそれぞれ何滴必要であったか確認する実験。

①の実験では、ヨウ素の褐色が消える様子から、酸化還元反応の半反応式、酸化数の変化を推測させた。また実験結果から、さらに、ビタミンCは酸化剤、還元剤のどちらになるかを考え、ビタミンCが飲料や食品中に「酸化防止剤」として添加されているのはなぜかをグループワークで議論させた。

②の実験では、①の実験で消えた褐色が再び観察されるようになる様子から、酸化還元反応の半反応式、酸化数の変化を推測させた。①、②の実験ともに、半反応式から酸化還元の反応式を作り、電子の授受で酸化還元反応を説明した後、反応式中の水素に着目させ、水素の授受で酸化還元反応を説明してみるというグループワークを展開した。

③の実験は、2種類の清涼飲料水を用いて、ヨウ素の褐色が消えるのにそれぞれ何滴必要かという結果から、どちらの清涼飲料水に含まれるビタミンCの量が多いかを推測させた。

4. アンケート調査による検証

4. 1. アンケート調査

アンケート調査は、授業終了後から数日後に授業を受けた学生全205名にGoogleFormsを利用して行った。

アンケートの設問は5問(最大7問)で、希望人数や感想を自由に記述する設問以外は、他肢選択式で回答するものである。設問では、以下の内容を質問した。

- 設問1 身近にあるイソジンやビタミンC入りジュースを使った、酸化還元反応の実験は楽しかったですか？
- 設問2 実験前と比べて、実験後は酸化還元反応の理解は深まったと思いますか？
- 設問3 実験中、危険（例：薬品が手につく、器具が壊れる）を感じたり、壊したらどうしようと不安を感じましたか？
- 設問4 3人で1グループは、実験をしたり、相談したりするのにちょうどよい人数でしたか？
- 設問4' 「4」の質問で、「あまりそう思わない」「そう思わない」と答えた方にお聞きします。何人で1グループが良いですか？（自由記述式）
- 設問5 今後も酸化還元実験のように、机の上で簡単にできる実験を授業に取り入れてほしいですか？
- 設問6 そのほか、酸化還元実験について感想やご意見がありましたら、自由に回答してください。

4. 2. アンケート調査の結果と分析

アンケート調査で得られた有効回答数は、190名分であった。

設問1の「身近にあるイソジンやビタミンC入りジュースを使った、酸化還元反応の実験は楽しかったですか？」の質問に、「とてもそう思う」と「そう思う」の回答が合計で93.7%（図3）であった。多くの学生が、実験を楽しんで行うことができたことが分かる。この授業中の学生の様子は、教員の目からも楽しんでいることが分かり、さらに、実験を始める前に「どうなると思う？」とグループ内で予想してから取り組んでいる様子や、手元にある飲み物の成分表示を見て「酸化防止剤（ビタミンC）」が添加されていることを確認している様子が見られた。全員が1回ずつ実験しているグループもあった。普段の授業とは異なり寝ている学生はおらず、グループ内で議論をしている姿から、クラスの全員が積極的に授業に参加していると感じた。

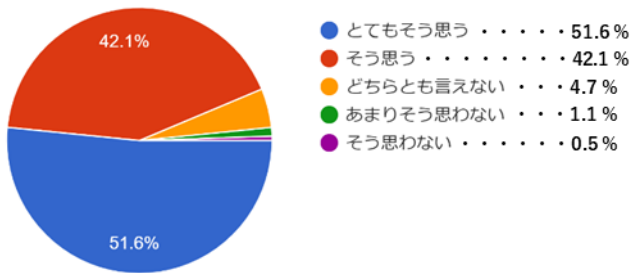


図3 設問1「身近にあるヨウ素やビタミンC入りジュースを使った、酸化還元反応の実験は楽しかったですか？」に対する回答

設問2の「実験前と比べて、実験後は酸化還元反応の理解は深まったと思いますか?」の質問に、「とてもそう思う」と「そう思う」の回答が合計で87.9% (図4)であった。この結果から、マイクロスケールで行った酸化還元反応が、約88%の学生に対して前週までに行った酸化還元反応の理解を深める役割を果たしていることが示唆された。ヨウ素の色が消えたり、戻ったりすることで、反応の変化が分かりやすかったようだ。また、実験②でオキシドール(過酸化水素)を使ったことで、「過酸化水素中の酸素の酸化数が例外である」ということの復習にもなり、さらに実験をしたことで、知識が定着したと考える。設問6の自由記述でも「実験をするのは理解が深まりやすく、見て分かるような実験に関してはとても良いと思いました。」や「身近な物で手軽に実験ができ、とても分かりやすかったので良かったです」という記述が見られた。しかし、設問1で「楽しかった」と感じた学生に対して、「理解が深まった」と感じた学生は5%程減っている。電子の授受と色の変化を結び付けることが難しいと感じる学生もいたので、今後は電子の授受が視覚的によりわかるような工夫をしたい。

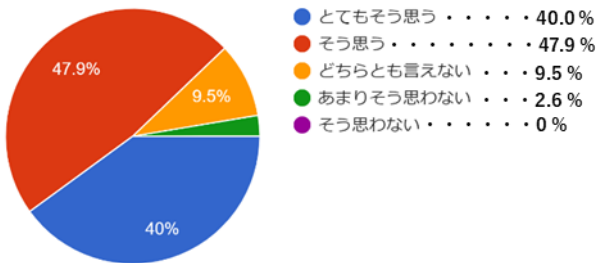


図4 設問2「実験前と比べて、実験後は酸化還元反応の理解は深まったと思いますか?」に対する回答

設問3の「実験中、危険(例:薬品が手につく、器具が壊れる)を感じたり、壊したらどうしようと不安を感じましたか?」の質問に、「とてもそう思う」と「そう思う」の回答が合計で

65.3% (図5)であった。ガラス器具のように簡単に壊れる器具はなかったものの、オキシドールやうがい薬を初めて見る学生もいたため、肌に触れても大丈夫だろうかと不安に感じた学生もいたようだ。この点に関しては、実験前の説明が不十分であったと感じているので、次回は使用器具、試薬についての説明をしっかりとすうえて、実験を始める必要がある。

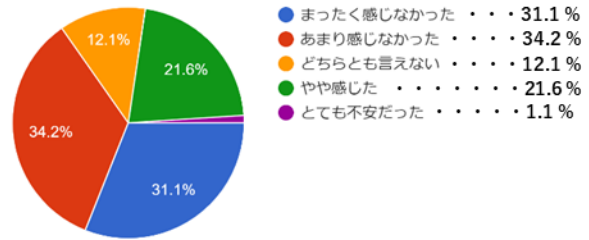


図5 設問3「実験中、危険(例:薬品が手につく、器具が壊れる)を感じたり、壊したらどうしようと不安を感じましたか?」に対する回答

設問4の「3人で1グループは、実験をしたり、相談したりするのにちょうどよい人数でしたか?」の質問に、「とてもそう思う」と「そう思う」の回答が合計で75.3% (図6)であった。多くの学生が3人程度のグループ人数をちょうどよい人数であると感じていたことが分かる。設問4では、設問4で「あまりそう思わない」「そう思わない」と答えた学生に対し、何人で1グループが良いかを回答してもらったが、「1人」「2人」の回答がそれぞれ1人ずつ、それ以外の回答は「4人以上」を示す回答であった。ホームルーム教室では、対面式のグループにしてしまうとスクリーンが見にくくなる学生が出てくるため、「3人1グループ」はホームルーム教室の横並びの3人で組んだので、「対面式でない」と相談しにくい」という回答もあった(設問6にて)。「対面式」のグループで実験をするということは、コミュニケーションをとる上で重要かどうか、今後検証していきたい。今回のマイクロスケール実験で用いた実験器具や試薬は安価であるため、40人数分揃えることも不可能ではない。実験は個人で行い、ディスカッションはグループで行うことも可能である。

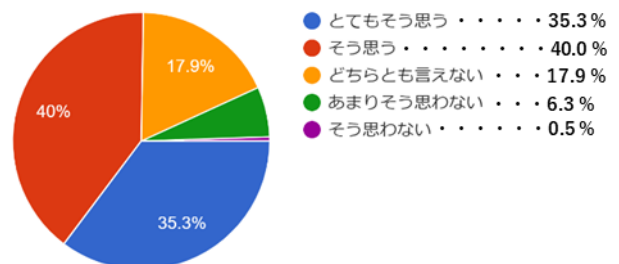


図6 設問4「3人で1グループは、実験をしたり、相談したりするのにちょうどよい人数でしたか?」に対する回答

設問5の「今後も酸化還元実験のように、机の上で簡単にできる実験を授業に取り入れてほしいですか?」の質問に、「とてもそう思う」と「そう思う」の回答が合計で93.7% (図7)であった。この結果から、ほとんどの学生が簡単にできる実験をしながら授業を受けることに積極的であることが分かる。設問6の自由記述においても、「身の回りのもので化学の実験ができることが楽しかったです。実験室で行う実験も楽しかったので、実験の回数をもっと増やしていただきたいと思いました。」、「ただ座って話を聞くだけの授業よりかは簡単な実験を行ったほうが理解が深まると思います。」や「実験をするのは理解が深まりやすく、見て分かるような実験に関してはとても良いと思いました。」という感想があった。

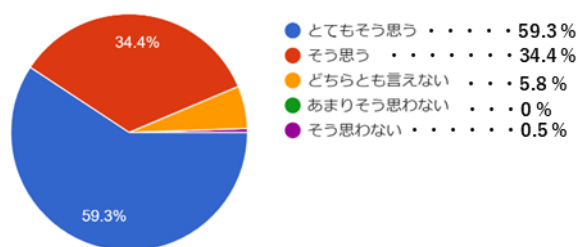


図7 設問5「今後も酸化還元実験のように、机の上で簡単にできる実験を授業に取り入れてほしいですか?」に対する回答

以上、アンケートの結果から、マイクロスケール実験を取り入れた授業は、学生の理解を深める助けとなり、積極的な授業参加を促すことに効果的であった。今回実践したマイクロスケール実験は、操作が簡便であったことから、学生は実験の手順に気が取られることなく、既習内容や知識を活用しながら、実験に取り組むことが出来たと推測される。今後は、時間配分、グループワークを苦手とする学生へのアプローチ方法、他の学習単元への簡易実験の導入について改善、発展を図っていきたい。

5. おわりに

マイクロスケール実験を取り入れた化学の授業を行い、授業後のアンケート結果から、簡易的な実験を取り入れた授業は、学生の授業への参加を促し、また理解を深めることに寄与することが分かった。

「ちょっとした実験でも、とても興味をそそられた。当たり前だが、書いた反応式の通りになるのを見て感動してしまった。やっぱり化学は面白いと思った。」

今回のアンケートにあった感想で一番印象深いものである。多くの学生が少しでも「化学は面白い」と感じる授業を今後も展開できるよう努めたい。

謝辞

本研究の実施にあたり、一般教養部 二田亜弥特命助教にご協力を賜りました。厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国立高等専門学校機構ホームページ「国立高等専門学校の学校制度上の特色」
https://www.kosen-k.go.jp/nationwide/feature/hj_1-12tokushoku.html
- 2) 渡辺正, 「理科教育のムラ文化」, 化学と教育, 67(7), p.283, 2019.
- 3) 今井泉, 「中等教育科学における「化学反応とエネルギー」の現状と課題」, 化学と教育, 65(9), p.428-431, 2017.
- 4) 今井泉, 下條隆嗣, 「物質量 (モル) 概念の変遷とその高校化学への影響—物質量についての歴史的背景から見た教育的問題点—」, 化学教育研究, 28(3), p.149-157, 2004.
- 5) 文部科学省, 中央教育審議会答申, 「幼稚園, 小学校, 中学校, 高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方策等について (答申)」, 2016.
- 6) 荻野和子, 「マイクロスケール実験の広場へのお誘い」, 化学と教育, 49, p.110, 2001.
- 7) 理科の世界 2年, 大日本図書株式会社, 平成29年2月5日再版発行.
- 8) 改定版 化学基礎, 数研出版株式会社, 平成31年3月31日発行.
- 9) 岩波 理化学辞典, 岩波書店, 2015年9月15日第5版第13刷発行.

令和元年4月発行

編集・発行 茨城工業高等専門学校
総務課研究協力・地域連携係

〒312-8508 茨城県ひたちなか市中根 866

TEL 029-271-2952