J. Technology and Education, Vol.20, No.1, pp.31-38 (2013)
教育論文

シミュレーション教育の実践と教育成果

吉村 忠与志*[1]、佐々 和洋[1]、青山 義弘[2]
福井工業高等専門学校 [1]物質工学科，[2]電子情報工学科（〒916-8507 鯖江市下司町）
*tadayosi@fukui-nct.ac.jp

Simulation Education Course and Its Outcomes

Tadayosi YOSHIMURA, Kazuhiro SASA, Yoshihiro AOYAMA
Fukui National College of Technology (Geshi-cho, Sabae, Fukui 916-8507, Japan)

(Received February 9, 2013; Accepted March 15, 2013)

Abstract

The Fukui National College of Technology focuses its efforts on information processing education. The Department of Chemistry and Biology Engineering specializes in teaching problem solving approaches based on a generalized Excel/VBA spreadsheet program which does not require the use of highly advanced programming skills. The textbook *Introduction to Excel/VBA Programming*, which deals with the subjects of "Information Processing Exercise" and "Information Chemistry", has been prepared to support the teaching of problem solving approaches using an Excel platform.

This report presents the findings derived from a questionnaire survey that was administered to students of a simulation education course (in which the above-mentioned textbook was used) to evaluate the course outcomes. This course is currently being offered by the Department of Chemistry and Biology Engineering on a trial basis to determine if the course should be included in our curriculum. Considering the high levels of satisfaction among students who have attended the course, this course can be an excellent addition to our existing curriculum.

Key words: Simulation education course, Excel/VBA programming, Excel platform, Course outcomes

1. 緒言

福井高専において情報処理教育を推進する中で、問題解決において高度なプログラミング技能を必要としない物質工学科では、表計算ソフトとして汎用化されたExcel/VBAによる問題解決方法を教授している。特に、「情報処理演習」という教科に特化した教科書「Excel/VBA プログラミング入門」を開発して Excel をプラットフォームに教授している[1, 2]。

この教科書を用いて、シミュレーション教育を実践したので、その教育成果を報告する。

2. シミュレーション教育

コンピュータ支援工学(CAE)において設計、製造や工程管理の事前検討を行う場合、問題解決のために工学シミュレーションを実施する[3]。そのとき、解決したい問題点を整理し、関連するパラメータを準備し、数学的モデルを構築して、模擬

実験を行う。現実の現象をモデル化する場合、連続変化モデルか離散変化モデルかの2通りの数学的モデルを構築する。そして、そのモデルによるシミュレーションを実施してその結果と現実のデータを対照することによってその現象の詳細を推定し分析することができる。まとめると、図1のようになる。

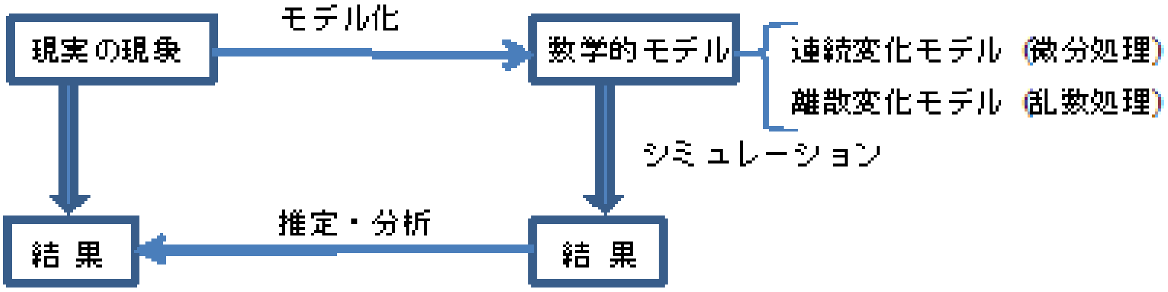


図1　シミュレーションのモデル化

図2　座学による授業風景

シミュレーションを行う上で最も有効なプラットフォームが Excel である[3]。Excel を用いて行う CAE の作業としての流れは下記のようになる。

① 目標とする現実の現象を予測して解析内容を決定する
② 解析条件をまとめて情報・データを収集する
③ 目標とするプロトタイプ(モデル式)における解析用データをシートに設定する
④ Excel/VBA でプログラミングしてシミュレーションする
⑤ 解析結果を分析・推定する

3.　教育実践

今回、高専物質工学科4年「情報化学」においてシミュレーション技術の育成を目的に教育実践を行った。図2に授業風景を示す。教育実践はシミュレーションの理論を座学で行い、演習はコンピュータ室で Excel/VBA により行った。

問題解決の演習は例題を中心で行い、連続変化問題として、一次元非定常伝熱と煤煙の拡散を挙げた。さらに、離散変化問題として、大数の法則とブラウン運動を挙げて、シミュレーション技術の育成を図った。

3.1　連続変化モデル

いろいろな自然現象は、時間や長さなどにおける連続変化であることが多く、その数式モデルは微分方程式で表現できる。そのモデル式において解析解が求められれば問題なく解くことができるが、解析解がなく数値解析を必要とする場合がある。

独立する変数が1つの場合常微分方程式を解くことになる。その変数が2つ以上になると、偏微分方程式を解くことになる。

例題1　一次元非定常伝熱問題[4]

ある温度に熱した平板を水槽に投入して冷却した場合の平板内の温度分布をシミュレーションしなさい。ただし、平板の表面温度は水槽温度で一定とし、平板材質の比熱 Cp、密度 ρ、熱伝導率 κ は提示するものとする。

この例題の数学的モデルは、次の偏微分方程式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

ただし、 $\alpha = \kappa/(\rho \cdot Cp)$であり、x 点における瞬時の温度を T とし、時間を θ とする。この基本式は、Dusinberre の数値解析法により差分化して次の近似式で示される。

$$T_n' = \frac{T_{n-1} + (m-2)T_n + T_{n+1}}{m}$$

ただし、モジュラス $m = (\Delta x^2)/\alpha \cdot \Delta\theta$ である。

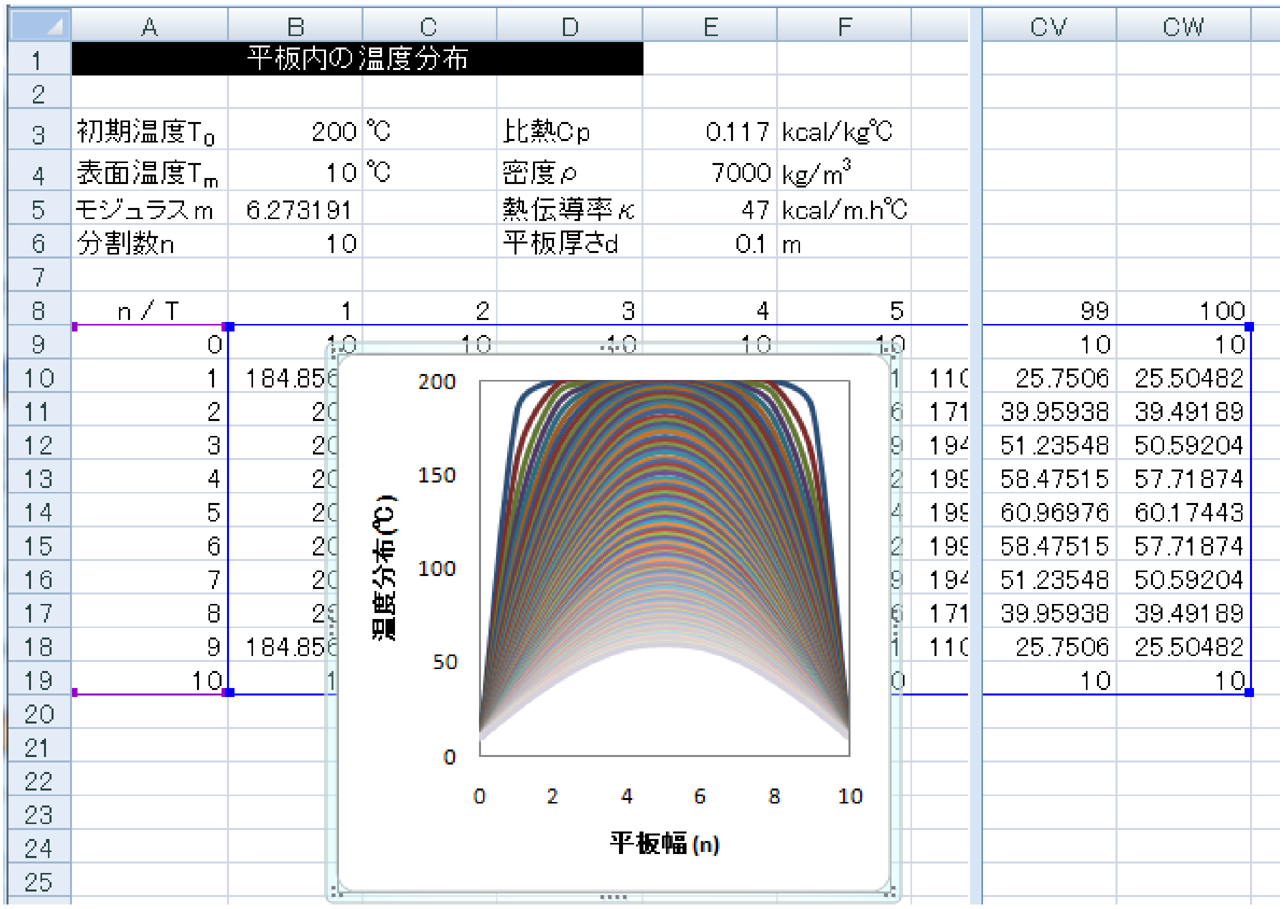


図 3　熱伝導率 47kcal/m.h℃の場合の温度分布

近似解を示す差分式による数値解析をマクロでプログラミングする。本報では紙面の都合ですべての例題のマクロコードを省略する。興味のあ

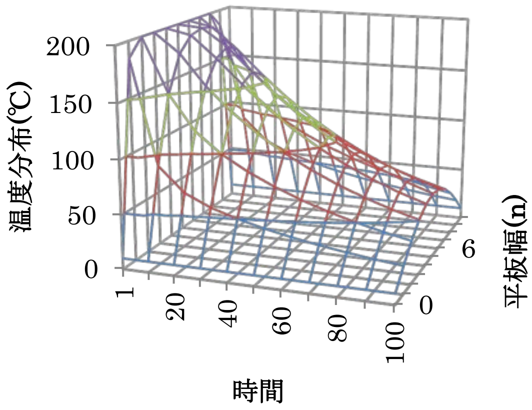


図 4　等高線図による温度分布図

る方には公開する。図 3 のシートに平板材質の比熱 Cp、密度 ρ、熱伝導率 κ を提示して実行した。提示の実験条件の場合、200℃に熱せられた平板を 10℃の水槽に投入したので、平板の表面温度は 10℃と一定で、図 4 のような等高線図で温度分布を立体視することができる。

例題 2　煤煙の大気拡散問題

大気中に汚染物質(煤煙)が煙突から拡散する様子をシミュレーションしなさい。ただし、各条件・パラメータについては提示するものとする。

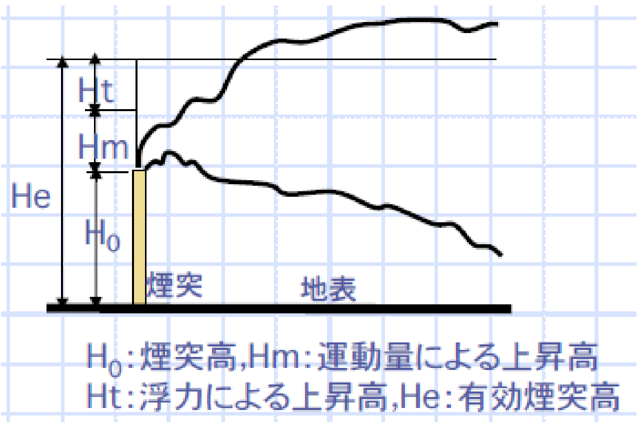


図 5　有効煙突高度の定義

煙突からの物質の拡散は 3 次元現象であるが、発生場所からの距離 x(km)のみについて考えれば、物質の移動速度で表すことができる。

$$J_x = D_x \frac{\partial C}{\partial x}$$

物質の拡散係数 Dx は物質で決まる物性値である。汚染物質の濃度の推定法には、ボサンケ(Bosanquet)の式が提案されている[5]。有効煙突高の定義は、図 5 のようである。

$$H_e = H_0 + 0.65(H_m + H_t)$$

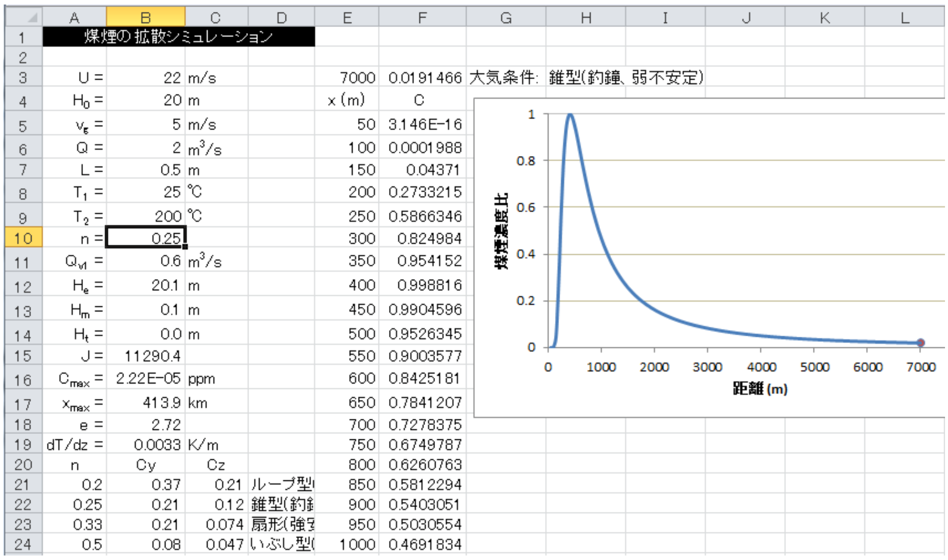
$$H_m = \frac{4.77}{1 + \frac{0.43U}{v_g}} \cdot \frac{\sqrt{Q_{v1} v_g}}{U}$$

$$H_t = 6.37g \frac{Q_{v1} \Delta T}{U^3 T_1} \left(\log_e J^2 + \frac{2}{J} - 2 \right)$$

$$J = \frac{U^2}{\sqrt{Q_{v1} v_g}} \left(0.43 \sqrt{\frac{T_1}{g\left(d\theta/_{dz}\right)}} - 0.28 \frac{v_g}{g} \cdot \frac{T_1}{\Delta T} \right) + 1$$

ただし、H_0:煙突高(m)、U:風速(m/s)、v_g:吐出速度(m/s)、Q_{v1}:T_1 における排ガス量(m^3/s)、T_1:大気温度(K)、ΔT:排ガス温度差(K)、g:重力加速度 9.81(m/s^2)、dθ/dz:大気の温位勾配 0.0033(K/m)である。

煤煙の拡散式はサットン(Sutton)によって、拡散幅を風下距離 x の関数として次式で与えられている[5]。



	A	B	C	D	E	F	G
1	煤煙の拡散シミュレーション						
2							
3	U =	22	m/s		7000	0.0191466	大気条件: 錐型(釣鐘、弱不安定)
4	H_0 =	20	m		x (m)	C	
5	v_g =	5	m/s		50	3.146E-16	
6	Q =	2	m^3/s		100	0.0001988	
7	L =	0.5	m		150	0.04371	
8	T_1 =	25	℃		200	0.2733215	
9	T_2 =	200	℃		250	0.5866346	
10	n =	0.25			300	0.824984	
11	Q_{v1} =	0.6	m^3/s		350	0.954152	
12	H_e =	20.1	m		400	0.998816	
13	H_m =	0.1	m		450	0.9904596	
14	H_t =	0.0	m		500	0.9526345	
15	J =	11290.4			550	0.9003577	
16	C_{max} =	2.22E-05	ppm		600	0.8425181	
17	x_{max} =	413.9	km		650	0.7841207	
18	e =	2.72			700	0.7278375	
19	dT/dz =	0.0033	K/m		750	0.6749787	
20	n	Cy	Cz		800	0.6260763	
21	0.2	0.37	0.21	ループ型(	850	0.5812294	
22	0.25	0.21	0.12	錐型(釣鐘	900	0.5403051	
23	0.33	0.21	0.074	扇形(強安	950	0.5030554	
24	0.5	0.08	0.047	いぶし型(	1000	0.4691834	

図 6　大気条件 n = 0.25 の場合

$$C(x)=\frac{2Q}{\pi C_y C_z U x^{2-n}}\exp\left(-\frac{H_e^2}{C_z^2 x^{2-n}}\right)$$

ただし、サットンの大気乱れ係数 C_y、C_z、n は実験によって決められ、煙の状態の大気安定度を表している。

煤煙の最大着地濃度 C_{max} とその風下距離 x_{max} は次式で与えられる。

$$C_{max}=\frac{2Q}{\pi e U H_e^2}\left(\frac{C_z}{C_y}\right)$$

$$x_{max}=\left(\frac{H_e}{C_z}\right)^{\frac{2}{2-n}}$$

以上の条件式をワークシートおよびマクロコードに設定し、煤煙の拡散シミュレーションを行ったのが図 6 である。有効煙突高さ H_e を大きくすると、最大着地濃度 Cmax を小さくすることができ、その風下距離 xmax は大きくなる[6]。

3.2　離散変化モデル

離散変化するモデルにおいては、完全なサイコロを振ってあらゆる条件を網羅するためには一様な乱数のもとでシミュレーションを実施する。でたらめで一様な数を乱数といい、どの数も等しい確率で不規則になる数である。このように乱数によるシミュレーションをモンテカルロ法という。

Excel には乱数発生関数 RAND()が用意されており、その発生条件は次の 4 つが考えられ、乱数発生の機構はすべて満足しており、利用できる。

① 乱数の発生モードが速い

② 出現する周期が長い

③ シミュレーションに必要な再現性がある

④ 統計的検定に耐える一様なランダム性がある

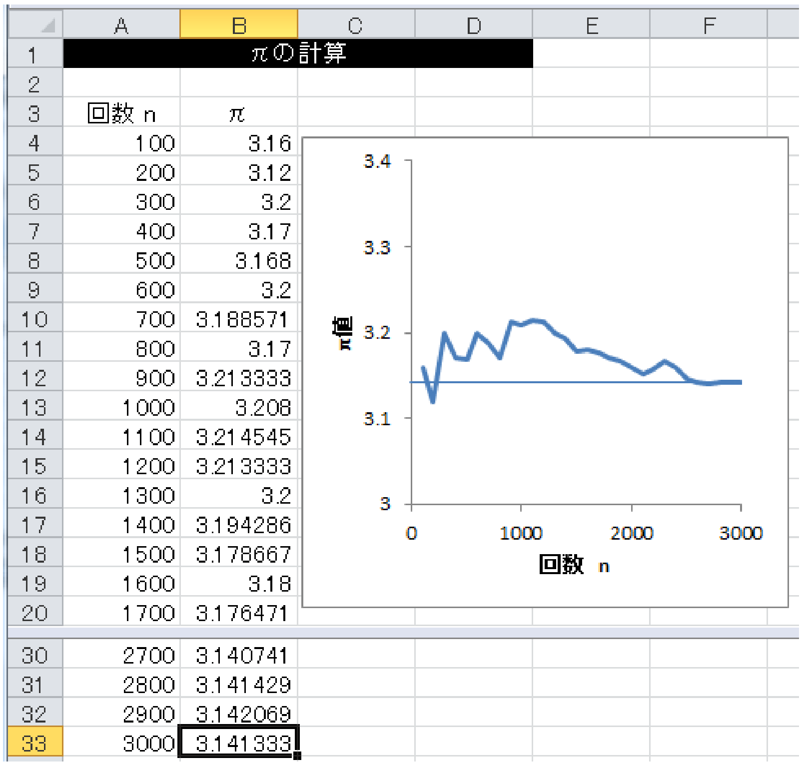
例題 3　大数法則問題[1]

正方形に接する半径 1 の 1/4 円を描き、1/4 円内にヒットする数により、その部分の面積からπを求めなさい。

1/4 円内は $f(x,y)=x^2+y^2<1$ の関係である。その中にヒットする数による部分面積は次式より求められる。

$$S=\iint_0^1 f(x,y)dxdy\cong\frac{hit}{n}$$

この面積値はπ/4 に漸近することを例題で確認する。



回数 n	π
100	3.16
200	3.12
300	3.2
400	3.17
500	3.168
600	3.2
700	3.188571
800	3.17
900	3.213333
1000	3.208
1100	3.214545
1200	3.213333
1300	3.2
1400	3.194286
1500	3.178667
1600	3.18
1700	3.176471
2700	3.140741
2800	3.141429
2900	3.142069
3000	3.141333

図 7　πの計算結果

まず乱数を発生させて点(x, y)を算出してその点が 1/4 円内にヒットしたときのヒット数をカウントして繰り返しを 100 から 3000 回とするプログラムをマクロでコードする。その計算結果を図 7 に示す。繰り返し回数が増えるほどπ(3.1415926)値に漸近している。

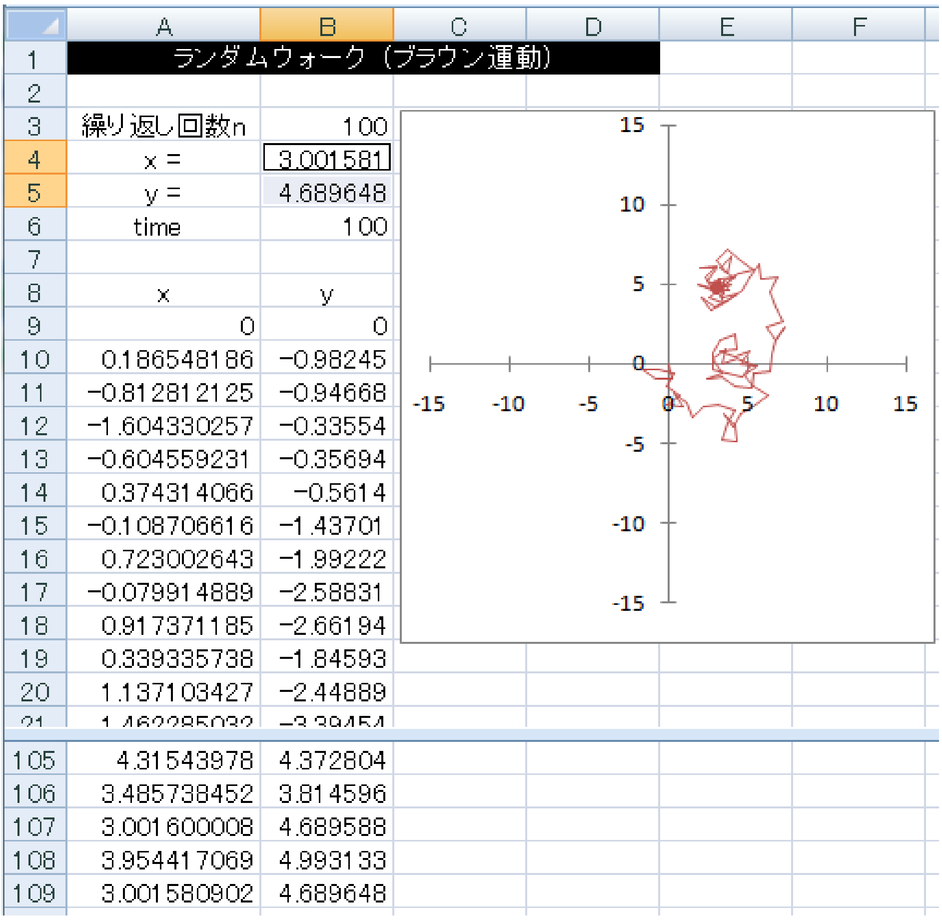
乱数の発生はワーク関数では RAND()を用いるが、マクロコードでは Rnd を用いるときは乱数発

生を初期化するために Randmize を用いることが必要である。

例題 4　ブラウン運動問題[1]

ブラウン運動という 2 次元ランダムウォークをシミュレーションしなさい。ただし、繰り返し回数は 100 回とする。

2 次元のランダムウォークとして、まず始点は原点(0, 0)として出発する。0 から 2π までの乱数を発生させて座標(x, y)を計算し、一歩ずつ進ませ



	A	B
1	ランダムウォーク（ブラウン運動）	
2		
3	繰り返し回数n	100
4	x =	3.001581
5	y =	4.689648
6	time	100
7		
8	x	y
9	0	0
10	0.186548186	-0.98245
11	-0.812812125	-0.94668
12	-1.604330257	-0.33554
13	-0.604559231	-0.35694
14	0.374314066	-0.5614
15	-0.108706616	-1.43701
16	0.723002643	-1.99222
17	-0.079914889	-2.58831
18	0.917371185	-2.66194
19	0.339335738	-1.84593
20	1.137103427	-2.44889
21	1.462285032	-3.39454
105	4.31543978	4.372804
106	3.485738452	3.814596
107	3.001600008	4.689588
108	3.954417069	4.993133
109	3.001580902	4.689648

図 8　ブラウン運動のシミュレーション

る。データ設定を示し、ブラウン運動をシミュレーションしたのが図 8 である。

ブラウン(Brown)は水面に浮かんでいる花粉が不規則に微かに動き回る現象を発見し、ブラウン運動と名付けた。酒飲みの酔っ払いが千鳥足で歩き回る様子に似ているので酔歩、ランダムウォークともいう。これを再現するために乱数を用いる。

計算するだけだと瞬時に出力されてしまうので、ランダムウォークを視覚化するために表示の遅延機能を付加するとよい。さらに、視覚化するうえで、図 8 のセル”B4, B5”を活性表現するために Range(“B4, B5”).Activate を用いる必要がある。

シミュレーション技術の育成において、学生実習を行う上で、計算結果を視覚化することは重要である。その点、Excel/VBA をシミュレーションのプラットフォームにすることは有意義である。

4.　教育成果

4.1　アンケート項目

アンケート項目は下記のものです。

1.　あなたは今回の「シミュレーション教育」が初めてですか。 (はい・いいえ)
「はい」と答えた方は、2 に進む。「いいえ」と答えた方は 5 に進む。
2.　今回の授業でシミュレーションの意義を理解できましたか。 (はい・いいえ)
3.　Excel をフラットフォームとするプログラミングは理解できましたか。(はい・いいえ)
4.　乱数はどのような場合に利用するとよいと思いますか。(具体的に記述してください。)
5.　数学的モデルに 2 つありますが、乱数処理をするものは次のどちらですか。
(連続変化モデル・離散変化モデル)
6.　モンテカルロ法とはどんなものですか。(具体

的に記述してください。)

7. 以前に C 言語を習ったと思いますが、問題解決のためのプログラミングには、どちらが理解できましたか。(C・Excel/VBA)

8. シラバスに記述のない「シミュレーション教育」を受けたことに対してどうですか。
   (満足・不満足)

4.2 アンケート結果と考察

アンケートは授業を履修した学生 35 名に対して行い、全員から回答を得た。

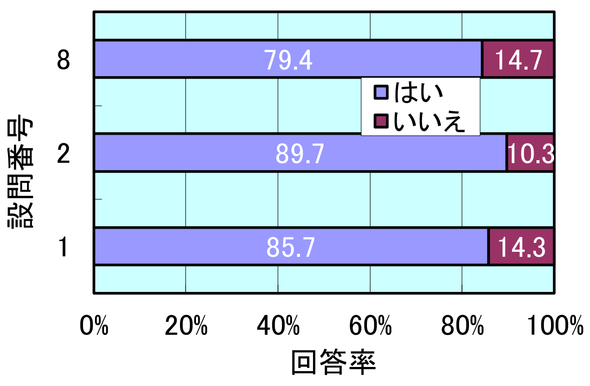


図 9　設問番号 1,2,8 の回答

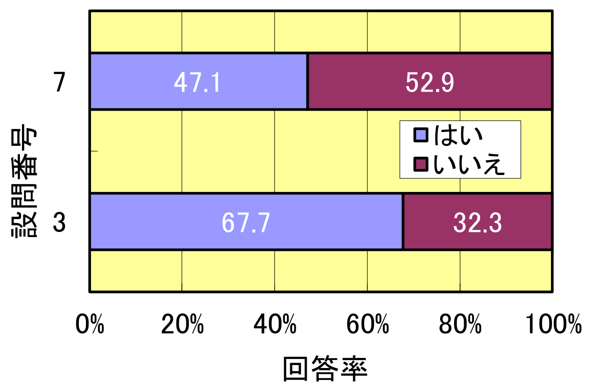


図 10　設問番号 3,7 の回答

“初回”に対して 85.7%が「はい」と回答した。シミュレーションという課題はシラバスでは設定されておらず、化学工学実験においてモンテカルロ法による課題があり、それが最初となる。この教育はその化学工学実験より先に講義されたものなので、当該学生にとっては当然初回である。しかし、14.3%の学生が「いいえ」と回答したということは、高専教育の中でシミュレーションに興味ある時点で学習を終え、既存知識としていたものと考える。興味が湧き、必要に応じてシラバス以前に自己学習を進めるのは高専教育の特長である。

“初回”と回答した学生が設問“シミュレーションの意義を理解したか”に対して 89.7%と高回答をしてくれた。最後の設問“シラバスにない課題”に対しても「満足」と回答した学生は 79.4%と高く評価してくれた。この設問に対するコメントとして、「今後のシラバスに明記し、常設すべき」という記述があったことから、新設の「シミュレーション教育」の必須性を学生自身が求めていることを確認することができた。

従来から、“Excel/VBA をプラットフォームとするプログラミング教育”を実践しているが、「はい」と回答した学生は 67.7%となったことと、設問“プログラミング言語に C か Excel/VBA か”に対して「Excel/VBA」と回答した学生は 52.9%となり、「C 言語」の理解とほぼ拮抗したものとなった。このことから、プログラミング言語の文法としては C も Basic(VBA)も言語学習としては同じレベルにあることがわかった。

近年の学生気質として、Excel は表計算ソフトとしての位置づけが固定化しており、それに付加されている VBA という Basic 言語はどうしても異質なものとなっているようである。低学年(2 年生)のプログラミングで C 言語を学習し、高学年(4 年生)に来て新たな言語 Basic を学習し、各文法の異質性から理解度を深めずに学習の消化不良を起こしているものと考えられる。物質工学科学生なので、将来プログラマーになる可能性より、いかに Excel/VBA を使って情報処理のできる実用性のほうが優先すると考えると、低学年からの Excel/VBA をプラットフォームとするプログラミ

ング教育を必須とすべきかもしれない。ゆえに、言語としてどちらを選択するかといえば、Excel に搭載されている Basic(VBA)を学ぶほうが物質工学科の修得教科に有意義なものと考えられる。

設問“乱数処理シミュレーションでの数学的モデル”に対して「離散変化モデル」が正解なのであるが、72.7%と回答し、「連続変化モデル」の回答が残りを占めた。「連続変化モデル」と回答した者のうち、微分方程式の解法に乱数によるパラメータ処理を行う意義を理解していたのは 1 名で、後の学生は乱数処理するモンテカルロ法そのものを理解していなかったようである。ゆえに、シミュレーション課題を問題解決とする演習のシラバス提示の必要性があることをわかった。

謝辞

豊橋技術科学大学主管の平成 22～24 年度高専連携プロジェクト“次世代シミュレーション技術者教育プログラムの開発”に支援されて本研究は遂行されました。

参考文献

1) 吉村忠与志、佐々和洋、青山義弘、他、Excel で数値計算の解法がわかる本、秀和システム (2009)
2) 吉村忠与志、佐々和洋、吉村三智頼、Excel/VBA プログラミング入門、CQ 出版社 (2012)
3) 吉村忠与志、Excel を用いる CAE 教育の実践と今後の課題、耐火物、vol.62(9), pp.449-457 (2010)
4) 吉村忠与志、絵とき化学パソコン便利学、オーム社(1987), pp.75-76
5) Sutton, O.G, Micrometeorology (微気象学), McGraw-Hill(1953), p.333
6) 吉村忠与志、木田稔、大気中における煤煙の拡散シミュレーション、会報 JAPC, vol.1, pp.35-50(1982)