

## モデリング学習環境におけるモデルの差異検出機能とその評価

## Evaluation of the function which detects differences between learners' models and current models in a model-building learning environment

益田哲宏\*  
Tetsuhiro Masuda

堀口知也\*  
Tomoya Horiguchi

\* 神戸大学大学院海事科学研究科  
Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

In science education, the model-building learning environment is one of the promising methods for promoting learners' ability to make appropriate models of various phenomena with scientific concepts. However, it isn't an easy task for most learners and some assistance is necessary. We have developed the function which detects differences between learners' models and current models and gives feedback about errors to learners. We conducted an experiment for evaluating the function which revealed that: (1) the degree of model completion increases by using the function, (2) the degree of final model completion is correlated with the frequency of using the function, and the correlation is clearer for learners with little prior knowledge and for easier tasks, and (3) the learners who prefer mathematical explanation of errors think more deeply about why their models are erroneous.

## 1. はじめに

科学教育の重要な目的の一つは、様々な現象に対して適切なモデルを作成する能力を養うことであり<sup>[Collins 1996]</sup>、これを概念的な理解と呼ぶ。より良いモデルを作成するには、対象系に含まれる原理や法則の深い理解が不可欠であり、領域の概念的な理解への到達が鍵となる。これを達成するための一つの方法としてモデリング学習環境が開発されている<sup>[Biswas 2001], [Breaweg 2009]</sup>。

モデリング学習環境では学習者にモデルを表現するための部品セットを与え、それらの組み合わせでモデルを作成することができる。各モデル部品はなんらかの形式言語における基本語彙に対応しており、従来のモデリング学習環境では数学的表現がよく用いられ、数値計算によりその振る舞いを表現していた。しかし、数学的な表現では対象系の振る舞いを直感的に理解することは難しく、領域の概念的な理解に必ずしも向いているとは言えない。一方、最近のモデリング学習環境では定性推論における表現を用い、定性的なシミュレーションを行うものも存在する。定性的なシミュレーションでは対象系の振る舞いを、多い／少ない、増加／減少、といった離散的概念で表現することが可能であり、これは学習者にも直感的に理解しやすく、領域の概念的な理解に適している。これらのモデリング学習環境の有用性は、教育における実践経験を通して実証されている。

しかし、学習者が対象系をモデリングすることは一般に難しい。定性的なモデルであっても実質的には形式言語を用いた表現であり、方程式の立式と同様に物理的、数学的な概念的な理解が必要になる。

このため、従来のモデリング学習環境では、モデル部品の使い方に関するヘルプ、モデルの文法上の誤りを指摘する文法チェックなど、様々な支援機能が実装・評価されてきた。しかし、それらの有効性や学習効果は、学習者の既有知識や課題の難易度などによって大きく異なり、評価が一定しない<sup>[Bravo 2006]</sup>。モデリング学習中におけるこれら支援機能の使われ方を含め、種々の要因を整理した上での分析が必要である。

そこで本研究では、支援機能の一つとして学習者作成モデルと正解モデルの差を表示する機能を実現し、モデリング過程

における同機能の使われ方、学習者の既有知識や課題の難易度などによる学習効果への影響を、実験を通して調査した。

## 2. モデリング学習環境

### 2.1 従来のモデリング学習環境

モデリング学習環境はモデリングを通して、学習した知識を正確・精密にすること、内省や他者との議論を通して科学的な理解を深めることなどを支援する目的で開発されてきた。実際の教育現場においても一定の効果が確認されている<sup>[船川 2002]</sup>。

従来のモデリング学習環境では主として数学的道具(数式)が用いられてきた。しかし、数式の立式は特に初等教育の学習者にとって難しく、また数値的なシミュレーションはその結果を直感的に解釈し難い。さらに、計算に必要なパラメータの値を測定できなければシミュレーションできないなど課題も多い。

そこで近年、定性的な語彙を用いてモデリングを行わせ、定性推論の技術<sup>[Weld 1990]</sup>を用いてそれをシミュレートするモデリング学習環境が開発されるようになった。これにより、数式を用いずにモデルを表現でき、より直感的にシミュレーション結果を捉えることができるようになった。

### 2.2 Evans

本研究で使用したモデリング学習環境 Evans について説明する。Evans は著者らが開発中のシステムであり、動的な系を対象とし、定性的な語彙を用いたモデリングと定性的なシミュレーションを行うことができる。モデリングとシミュレーションを通して、学習者は学習した原理や法則が具体的にどのような状況で使われるか体験し、現象における因果関係を考察することができる。これは実際の科学者・技術者が行っている活動の疑似体験であり、単に公式化された原理や法則に数値を代入して方程式を解く「問題演習」とは異なり、より豊かな学習を実現することが期待される。

実際に Evans を使用してモデリングを行った例を示す。図 1 は生態系におけるカエルの個体数の変動を表すモデルである。

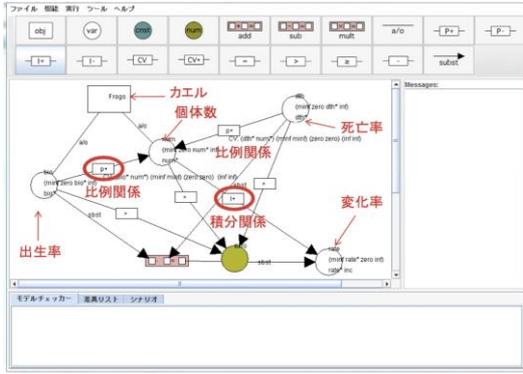


図1 カエルの個体数の変動を表すモデル

個体数は生誕率と死亡率の差、すなわち変動率の積分関係であり、また生誕率、死亡率は個体数に比例している。図2は図1のモデルをシミュレートした結果である。

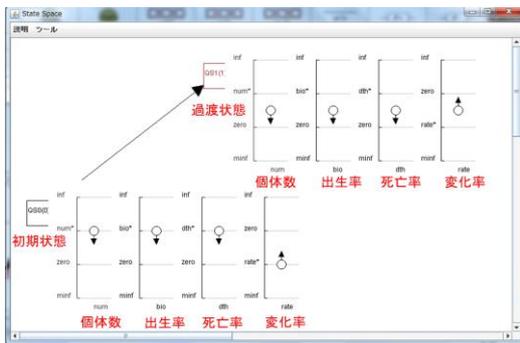


図2 カエルの個体数の変動を示すシミュレーション

QS0(0)は初期状態であり、個体数、出生率、死亡率は減少傾向を示し、変化率は増加傾向を示している。この状態は瞬時に QS1(1)の状態に移行し、各変量は過渡状態にあることがわかる。過渡状態では各変量の値(数値)は実際には刻々と変化しているが定性値としては同じであるため同一の状態として表すことができる。このように全ての値を定性値として扱うことで、不要な細部を気にせず対象系の重要な特徴のみを把握することができる。

### 2.3 モデリング学習環境の問題点

従来の多くのモデリング学習環境では GUI でモデル部品を提供することで、それらを配置・関係づけるといった直感的な操作でモデリングを行うことが可能である。しかし、作成されたモデルは必ずしも正しいとは限らない。もしモデルに文法規則への違反があった場合、そのモデルはシミュレーションを行うことはできない。そこで先行研究では Evans にモデルが文法規則に違反していないかチェックする機能(モデルチェック)を実装し支援を試みた。図3は Evans での文法規則違反とその支援例である。



図3 モデルの文法規則違反とモデルチェック

Evans では sbst(代入)リンクは片方を演算のノードに、もう一方は量を表すノードに配置するよう規定しているが、図3では両側に量を表すノードが配置されている。モデルチェック機能はこのような文法規則違反を検出し、エラーメッセージを提示する。

モデルチェック機能を実装した結果、学習者はモデルに文法ミスがないか確認し、ミスがあった場合はそれを修正するといった行動が見られ、ミスの数も減っていった。しかし、正解モデルとの一致度(モデル完成度)は必ずしも高くなかった。これは、学習者はシミュレーション結果に本来考えられない結果が含まれていても、モデルのどの部分を修正すればよいか理解できなかったためであると考えられる。この結果を踏まえて本研究では、作成されたモデルと正解モデルの差を表示する機能(差異リスト)を Evans に実装し、支援を試みた。

### 3. 差異リストの設計と実装

本研究では、Evans に支援機能として差異リストを実装した。本節ではこの差異リストについて説明する。

差異リストは、学習者が作成したモデルと正解モデルを比較し、その差を学習者に提示する機能である。また、差の説明方法として、単に正解モデルとの部品の過不足及び部品間の関係(矢印)の方向の違いを指摘する「構造の差の説明」と、各変数間の値(の変化)の関係の不自然さを指摘する「数学的な意味の説明」の2種類を用意した。構造の差の説明では作成したモデルがなぜ間違いなのかについての説明能力を全く持っていないが数学的な意味の説明では一定の説明能力を有する(全ての状況において十分な説明ができるとは限らない。より高次の物理的な不自然さを指摘しなければならない場合も存在する。)

実際の例を示す。図4を正解モデル、図5を学習者が作成した誤りのあるモデルとする。

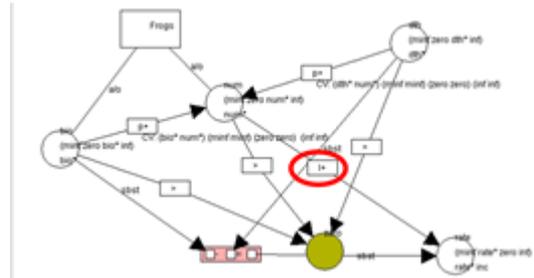


図4 正解モデル

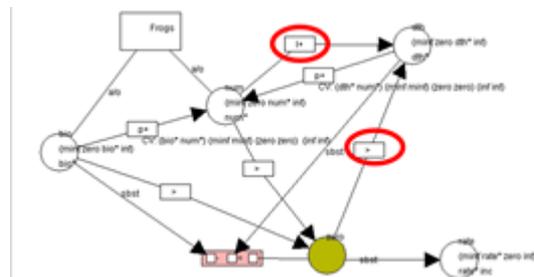


図5 学習者が作成した誤りのあるモデル

図4、図5内の丸で囲った箇所は2つのモデルの異なる箇所を示している。また、図5のモデルに文法規則違反は存在しない。差異リスト機能はこのようなモデルの構造的な誤りを検出し、支援を行う。

次に差異リスト機能の支援の例を示す。図5のモデルの誤りに関する構造の差の説明例が図6、数学的な意味に関する説明例が図7である。

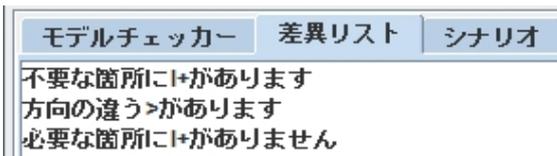


図6 構造の差の説明

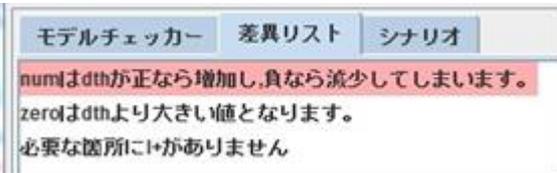


図7 数学的な意味の説明

なおエラーメッセージと部品は対応しており、エラーメッセージ上にマウスポインタを乗せることで、どの部品に対してのエラーメッセージなのか確認することができる(ただし必要な部品の不足の場合は確認することはできない)。図 6,7 の通り、一番下のエラーメッセージには違いはないが、一番上及び中央では、異なるエラーメッセージが表示されている。

## 4. 検証実験

本節では、本研究で実装した差異リストの有効性を検証するために行った実験とその結果について述べる。

### 4.1 実験計画

#### a) 目的

本実験の目的は、差異リスト機能を使用することでモデル完成度が向上するか、差異リストの使用頻度と最終的なモデル完成度に関係性があるか、説明の違いとモデル完成度に関係性があるかを明らかにすることである。

#### b) 被験者 理工系大学生 6人である。

#### c) 使用道具

- Evans: 2.2 節で述べたモデリング学習環境である。
- チュートリアル資料: Evans の基本操作やモデリングの仕方などを具体例を用いながら説明した冊子。
- モデリング課題 1~4: 課題 1 はチュートリアルの例題を発展させたバスタブの水の流入について、課題 2 はカエルの個体数(出生と死亡)について、課題 3 は底部が接続された二つのタンク間の水の流れについて、課題 4 は接触した二つの物体間の熱の流れ(熱平衡)についてのモデルを作成する課題である。課題 1 と 2、課題 3 と 4 はそれぞれ同形(対象領域は異なるがものの流れという点では同じ構造を持つ)、また課題 1, 2 が比較的易しい問題であるのに対して課題 3, 4 はより発展的な問題という位置づけである。なお、モデルに必要な部品は予め全てモデル作成画面上に用意されており、一部定義域等の値を記述済みである。
- アンケート: 差異リストが役に立ったか、モデルの修正の仕方、構造の差の説明と数学的な意味の説明とどちらが有効であったかなどを調査するアンケートである。

#### d) 手順

実験の手順を示す。なお実験は 6 人の被験者を 1 週目が 4 人、2 週目が 2 人に分け、3 週目は全員で行った。

##### • 1, 2 週目

- 概要説明(約 5 分): 実験の流れを簡潔に説明した。
- チュートリアル(約 10 分): チュートリアル資料を使用し、実験者が実際にモデルを作成しながら説明を行った。

III. モデリングセッション 1(約 25 分): 被験者に課題 1 を解かせた。差異リストは構造の差の説明を使用した。

IV. モデリングセッション 2(約 25 分): 被験者に課題 2 を解かせた。数学的な意味の説明を使用した。

##### • 3 週目

I. 概要説明(約 5 分): 実験の流れを簡潔に説明した。

II. モデリングセッション 3(約 30 分): 被験者に課題 3 を解かせた。差異リストは構造の差の説明を使用した。

III. モデリングセッション 4(約 30 分): 被験者に課題 4 を解かせた。数学的な意味の説明を使用した。

セッション中、被験者には約 5 分間隔でモデルの保存の指示を行った。また、セッション中の被験者による主要な操作はすべて操作ログとして自動的に記録される。また、モデル完成度は被験者が作成したモデルと正解モデルを比較し、リンクの配置が一致していれば1点加算する方式で採点する。

## 4.2 実験結果と考察

### (1) 差異リストの使用回数とモデル完成度

被験者がモデルの保存作業を行った際のモデルの完成度を採点し、各インターバル間での差異リストの使用回数をカウントした。図 8 はある被験者の結果である。

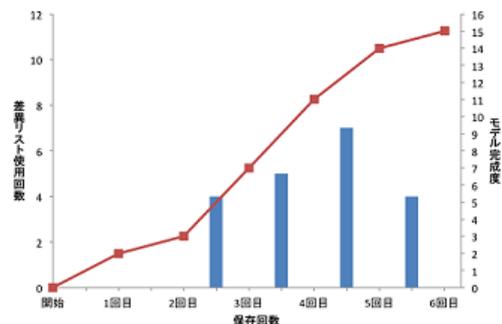


図8 差異リスト使用回数とモデル完成度の推移

図中の折れ線はモデル完成度を示し、縦棒は各インターバル間の差異リスト使用回数を表している。全被験者、セッションの結果を総合し、差異リストを使用したインターバルと使用していないインターバルとにおけるモデル完成度(得点)の上昇をまとめたものが表 1 である。

項目	インターバル数		得点上昇総和		得点上昇率	
	使用	不使用	使用	不使用	使用	不使用
セッション1	10	20	10	27	1.00	1.35
セッション2	19	11	31	17	1.63	1.55
セッション3	20	16	43	28	2.15	1.75
セッション4	24	12	67	14	2.79	1.17
合計	73	59	151	86	2.07	1.46

得点上昇総和はインターバル毎のモデル完成度の増加分の総和であり、得点上昇総和からインターバル数を割ることで得点上昇率を算出した。全セッションの合計で差異リスト使用時の得点上昇率が差異リストを使用していない得点上昇率より高く、差異リストを使用することでモデル完成度が上昇することが示されている。

また、セッション毎での得点上昇率を比較すると、セッション1では差異リストを使用していない得点上昇率が高く、セッション2では同程度であり、セッション3, 4では差異リストを使用した得点上昇率が高い。これは課題の難易度が影響していることが考えられる。セッション1の課題はチュートリアルの例題と類似しているため取り組み易く、支援なしでもモデルを作成できたと考え

られる。これに対して、セッション 2 の課題はチュートリアルには類似の例題がなく、やや難しい課題である。セッション 3,4 の課題はセッション 1,2 と比べ使用するモデル部品の数も多く複雑なのでより難しい課題と言える。易しい課題では差異リストを使用していない得点上昇率の方が高い、もしくは同程度という結果に対し、難しい課題では差異リスト使用時の得点上昇率の方が高くなることが示唆される。

## (2) 全差異リスト使用回数と最終的なモデルの完成度

各モデリングセッション中の全差異リスト使用回数とセッション終了時のモデル完成度を被験者毎に集計した。図 9 はセッション 1 での結果である。

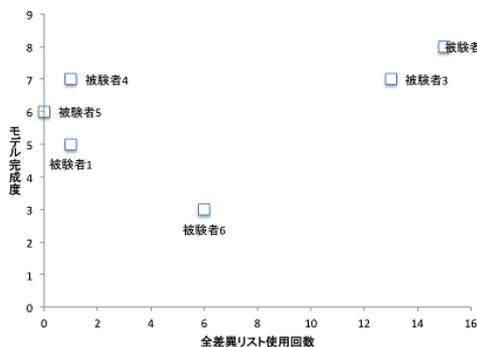


図 9 セッション 1 における全差異リスト使用回数と最終的なモデル完成度

差異リストの使用回数の少ない被験者を外れ値とみなし分散分析を行ったところ有意であった ( $F(1,1) = 1875, p < .05$ )。またセッション 2,3 においても同様に分散分析を行ったところ、有意差は示されなかったが、散布図上のデータは直線上に並んでおり、正の相関関係が示唆される。しかし、セッション 4 においては相関関係が示されなかった。図 10 にセッション 4 での結果を示す。

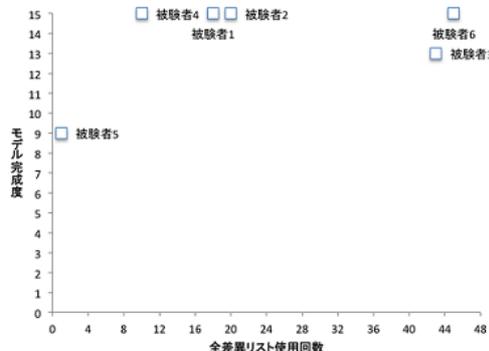


図 10 セッション 4 における全差異リスト使用回数と最終的なモデル完成度

セッション 4 ではほぼ全ての被験者が満点に近い点数を出しており、これはセッション 4 の課題がセッション 3 の課題と同形のモデルであったことに加え、それまでのモデリングの経験の蓄積による天井効果が起こったことが考えられる。

## (3) アンケート

アンケート結果から次の結果が得られた。差異リスト機能を用いてモデルの修正を行う際、モデルが何故間違っているのかを考え、修正したと回答した被験者は数学的な意味の説明の方が有用であったと回答し、エラーメッセージの有無だけにし、修正したと回答した被験者は構造の差の説明の方が有用であったと回答した。このことからモデルが何故間違っているのかを考え、修正する場合は数学的な意味の説明の方が有用と感じ、

単純にモデルの間違いを修正する場合は構造の差の説明の方が有用と感じることが示唆される。

## 5. おわりに

モデリング学習環境における支援機能として差異リスト機能はモデル完成度を向上させるという点で有用であったと言える。

また差異リストの使用回数とモデル完成度には正の相関関係が期待され、提示する説明と、差異リストを使った差異の修正方略に関係があることが示唆された。

しかし実験を通して次のような課題も明らかになった。まず、シミュレーションの実行回数が先行研究での実行回数と比べかなり少なかったことである(特にセッション 3,4 においてシミュレーションの実行を行った被験者はいなかった)。このことはモデルを作成しシミュレートするよりも差異の修正が主体となっていることを示しており、系の振る舞いを疑似体験することで理解を深めるといふモデリング学習環境の意図に反している。差異リスト機能に一定の制限をかけるなど、シミュレーションの実行と併用されるような工夫が必要である。

また、本実験では本学習環境の学習効果を測定するため、動的システムの振る舞い予測能力を問うプレ/ポストテストを行ったが、成績の向上がはっきりとは現れなかった。今後、本学習環境の学習効果を適切に測定する方法を検討していく必要がある。

## 参考文献

- [Collins 1996] Collins, A.: Design Issue for Learning Environments, In Vosniadou et al.(eds.), International Perspectives on the Design of Technology-Supported Learning Environments, pp.347-361, Lawrence Erlbaum, 1996.
- [Biswas 2001] Biswas, G., Schwartz, D., Bransford, J.: Technology Support for Complex Problem Solving-From SAD Environment to AI. In Forbus, K.D. and Feltovich, P. J.(eds.), Smart Machines in Education, pp.72-97. AAAI Press, 2001.
- [Brewer 2009] Brewer, B., Linnebank, F., Bouwer, A. and Liem, J.: Grap3 – Workbench for qualitative modeling and simulation, Ecological Informatics, 4(5-6), pp.263-281, 2009.
- [Bravo 2006] Bravo, C., van Joolingen, W.R. and de Jong, T.: Modeling and Simulation in Inquiry Learning: Checking Solutions and Giving Intelligent Advice Simulation, Vol.82, Issue.11, pp.769-784, 2006.
- [船川 2002] 船川豊, 正司和彦: モデリング学習環境における高等学校物理Ⅱ課題研究の単元開発と実践, 日本教育工学雑誌, Vol.26, pp.177-188, 2002.
- [Weld 1990] Weld, D.S. and de Kleer, J.(Eds): Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems, Morgan Kaufmann, 1990.