

モデリング学習環境における支援タイプの違いが学習者の 振舞いおよび学習効果に与える影響の検証

An evaluation of how students' behavior and understanding are influenced by the method of assistance in model building learning environment

堀口 知也¹ 益田 哲宏² 東本 崇仁³ 平嶋 宗⁴
Tomoya Horiguchi¹, Tetsuhiro Masuda², Takahito Toumoto³, and Tsukasa Hirashima⁴

¹神戸大学大学院海事科学研究科

¹ Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

² (株) キーエンス

² Keyence Corporation

³ 東京工芸大学工学部

³ Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University

⁴ 広島大学大学院工学研究科

⁴ Department of Information Engineering, Hiroshima University

Abstract: How students learn modeling skills and concepts of system dynamics through building models was investigated, focusing on how students' behavior and understanding are influenced by the type of assistance and their prior knowledge. We implemented a function in a model-building learning environment that detects the difference between a model by students and the correct model and gives one of the two types of feedback: *structural explanation* which indicates structurally erroneous parts of a model by students to promote model completion, while *behavioral explanation* which suggests erroneous behavior of a model by students to promote reflection on the cause of error. Our experiment revealed: (1) Students assigned to structural explanation showed high model completion, but their understanding depended on whether they used feedback appropriately or not. (2) Students assigned to behavioral explanation showed less model completion, but once they completed models, they acquired a deeper understanding.

1. はじめに

本研究の主題は、動的システムのモデルを作成する学習活動を通してシステムダイナミクスに関わる知識・技能がどのように獲得されるか、それが学習者の先行知識や支援方法の違いによってどのように影響を受けるかを検証することである。

様々な自然現象や人工物の動的振舞いのモデルを作成する技能は、科学教育における重要な目標の1つであると考えられている。現象の背後にある構造や原理を同定した上で、モデルを定式化・テスト・修正することは科学の理解において本質的である。モデルの作成を通して、学習者は自己の知識を明確化・洗練・内省することができ、より深く体系的な科学の理解を得ることができる[6]。

このような学習活動を支援するため、コンピュータによる学習支援の分野では、従来より、主に動的システムを対象とするモデリング学習環境

(Model-building Learning Environment: MBE) と呼ばれるシステムが開発されてきた[3, 4, 5, 7, 10, 14]。

MBE では、学習者はモデルを表現するための部品のセットを与えられ、それらを組み合わせることによって対象系のモデルを作成する。通常、モデルを図的に表現するための GUI が提供される。各部品は何らかの形式言語の基本語彙に対応しており、作成されたモデルは形式的表現に翻訳され、その動的振舞い(パラメータの時間変化)がシミュレータによって計算され、学習者へフィードバックされる。学習者はモデルの振舞いと自らの予想とを比較し、必要であればモデルを修正する。

しかし、対象系のモデルを作成・検証することは学習者にとって必ずしも容易なタスクではない。モデルの基本的な構造を組み立てられない、各部品が表す数学的・物理的概念の不理解のためそれらを適切に用いる／組み合わせることができない、モデルの表現をその振舞いと結びつけることができない、

などの困難がしばしば見られる[4, 5, 7, 9]. 特に, 高度な数学的知識・技能を持たない初等・中等教育における学習者を支援するための様々な方法が考案されている. 定性的な語彙に基づくモデル作成とシミュレーションを可能にする方法[5, 7], モデル部品の数学的/物理的意味を説明するヘルプ機能[7, 9], モデルの文法的誤りを検出・指摘する機能[7], 正解モデルとのモデル表現上・振舞い上の差異を検出・提示する機能[4, 9], および予想と異なる振舞いの原因を同定・説明する機能[1, 2]などがその例である.

これまで, これらの支援方法の有効性の検証が行われてきた[4, 7, 9, 14]. また, モデル作成中に学習者が示す興味深い振舞い(支援機能の使用に消極的である, 場当たりの修正を行う, など)も報告されている[4, 9]. しかし, それらは支援機能がモデルの完成に寄与したか否かの評価に留まるものや[4, 9], 統合的なシステム(支援のための諸機能や授業設計・運用方法を含む)としての学習効果を評価したもの[14]が殆どであり, 支援のタイプと学習効果の関係を詳細に検討したものは少ない. また, 学習者の持つ先行知識やモデル作成中の様々な振舞いとの関係も不明瞭である. 特に, 学習の結果どのような知識が獲得されたのかの検証が十分ではない.

そこで, 本研究では, システムダイナミクスに関わる知識・技能の習得を目標として, モデリング学習環境における支援機能の違いが学習者の振舞いおよび学習効果にどのように影響するか, また, 先行知識がそれらとどのように関係するかを, 実験によって検証した.

2. 関連研究

これまで, 動的システムを対象とした数多くのモデリング学習環境が開発され, 様々な支援方法が提案されてきた[1, 2, 4, 5, 7, 9, 14]. それらのシステムにおける学習目標や対象学習者は様々であるが, ここでは, 動的システムの理解およびそのモデルを作成する技能の習得を指向した研究を取り上げる.

Bravoらは, 学習者によるモデルを参照モデル(教師による正解モデル)と比較して両者の差異(誤り箇所)を列挙し, 各々に対応した助言を生成・提示する機能を開発した[4]. 助言はモデル作成の進度に応じて幾つかのレベルに分けられており, モデルに含まれる量のタイプや必要性, 量間の依存関係に関する誤りなどを指摘する. 評価実験の結果, 生成された助言の多くは妥当なものであり, それらは正しいモデルを完成するのに有効であったことが示されたが, モデル作成を通して学習者の動的システムに関する理解がどのように深まったか動的システムの

理解に関する学習効果は測定されていない.

Bredewegらは, Garp3/DynaLearn プロジェクトにおいて, 学習者によるモデルの誤りに対する種々の知的フィードバック機能を実現している[1, 2, 9]. 学習者によるモデルにおける(正解モデルに比しての)部品の過不足を指摘する機能, ある量の予期しない振舞いの原因を同定し因果的に説明する機能などが実現されている. 幾つかの機能については評価実験が行われ, モデル作成中に学習者がそれらをどのように用いるかについて興味深い知見(例えば, 思考を中断されることを嫌い支援機能を使おうとしない, 誤りを指摘されてもその意味がわからず修正できない, など)が得られているものの, やはり動的システムの理解に関する学習効果は検証されていない.

VanLehnらは, Dragoon と呼ばれるモデリング学習環境に様々な支援機能(例えば, 学習者によるモデルの振舞いと正しいそれとのずれをパラメータ毎にプロットする機能, モデルの作成をガイドし(誤った入力には即時フィードバックが返される)次の手順を助言する機能など)を実装し, それらの有無による学習効果を比較する実験を行った[14]. その結果, 支援機能を用いた学習は動的システムに関する理解を促進することを検証し, またモデルを作成する技能の習熟プロセスについて興味深い示唆を行った. ただし, 同実験はシステムの諸機能を総合的に評価したものであり(学習者は異なる支援機能を併せて用いることができた), 各々の支援機能が学習者の行動や学習効果にどのような影響を与えたかは必ずしも明らかではない.

これらを始めとする先行研究では, モデル作成中の学習者の様々な興味深い行動が明らかにされてきた. その中には, 支援機能を用いることに消極的である, 助言を与えられてもモデルを修正しようとしていない/場当たりの修正する, 支援機能を濫用して理解を伴わずにモデルを完成させる, などの不適切な行動も含まれる. そこで, 各々の支援機能が学習者のどのような行動を引き起こし, それが動的システムの理解にどのような効果を及ぼすか, さらには学習者の持つ先行知識の影響などを, 互いに関連づけて検証することが必要である.

3. モデリング学習環境 Evans

3.1 概要

本研究では, 筆者らが開発を進めているモデリング学習環境 Evans を用いた[10, 11]. Evans では, 動的システムを対象として, 定性的語彙を用いたモデル作成と定性的シミュレーションを行うことができ

る。その枠組みは QSIM[15]に基づき、オブジェクト、量（変数・定数）、比例関係、積分関係、演算関係、対応関係、大小関係などの基本語彙を表すモデル部品が用意されている。学習者は、これらを組み合わせることで様々な系のモデルを作成することができる。量には定性的な値を設定することができ、完全な定量情報が与えられない系をも扱うことができる。

図1は、蛇口と排水口を持つバスタブの水量変化（蛇口から一定の水量が流入し、同時に排水口から水位に比例した水量が流出する）を表すモデルの例である。作成されたモデルは定性方程式に変換され、その振舞いが計算される。例えば、水量が初期値から少し減った状態で一定となる（流入量と流出量が平衡する）振舞いが、定性的状態（各変量の定性値の集合）の時系列として表示される。振舞いを一意に決定するのに十分な情報が与えられないとき曖昧性が生じ、あり得るすべての振舞いが列挙される。この例では、初期値の与え方によって、水量が初期値から少し増えた状態で一定となる、水量がほぼゼロになる、などの状態も生じ得る。

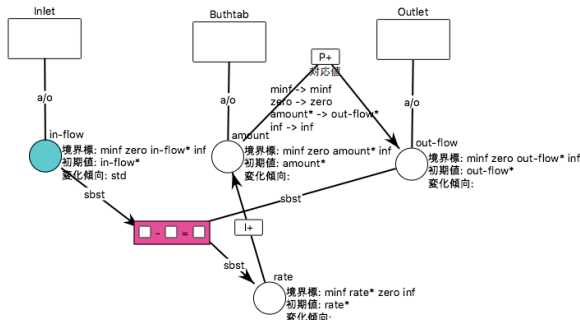


図1 バスタブの水量変化モデル

3.2 支援機能

モデリング学習環境において有益な学習活動を行うためには、学習者は各モデル部品の意味や使用法を理解し、少なくとも文法的に正しい実行可能な「初期モデル」を作成する必要がある。また、生成されたシミュレーションがモデルの検証に有益な情報を提供するためには、モデルはある程度の完成度を備えて（一定数の制約を含んで）いなければならない。しかし、学習者はしばしば文法的に誤ったモデルを作成し、またきわめて完成度の低い（制約の疎らな）初期モデルを作成することが報告されている[9]。

Evans にはこれまで、各モデル部品の意味や使用法などの説明を学習者の要求に応じて表示するヘルプ機能や、作成されたモデルの文法的誤りを検出・指摘する文法チェッカなどが実装されてきた。予備実験の結果、これらの機能は文法的に正しいモデルの作成を促進するものの、モデルの意味的誤りの修

正や完成度の向上には必ずしも貢献しなかった[11]。

そこで本研究では、学習者の誤ったモデルに適応的なフィードバックを与える機能として、学習者が作成したモデルと教師が用意した正解モデルとを比較し、その差異を提示・説明する「差異リスト」と呼ばれる機能を実装した。検出された差異の説明方法としては、主にモデルの完成度向上を狙いとする「構造説明」と、モデルの意味的誤りの熟考・修正を狙いとする「振舞い説明」の二種類を用意した。前者は、単に正解モデルとの構造的な違い（量・関係の過不足や量間の関係の方向の誤り）を指摘するものであり、それに従ってモデルを修正すれば比較的簡単に（意味的誤りの原因を理解しなくても）完成度を向上させることができる。後者は、量間の関係の誤りに起因する振舞いの不自然さ（例えば二変量間のあるべき「比例関係」が不足しているとき、一方が増加しても他方が必ずしも増加しないこと）を指摘するものである。モデルを正しく修正するためには、モデルの表現とその振舞いの関係を理解する必要があり、モデルの意味的誤りの原因についての熟考を促す効果があると期待される。

差異リストにおける「構造説明」は、学習者がモデルの完成のみを目的として濫用する可能性を含むという点において、学習支援機能としては不完全である。しかし、理解を伴わないモデルであっても、そのシミュレーションを繰り返し観察することを通して、動的システムに関する理解が進む可能性も否定できない。一方、「構造説明」は学習者にモデルの誤りに関する熟考を促すものの、それが正しい修正につながるとは限らない。そのため、モデルの完成度が上がらずシミュレーションから有益な情報を得られない可能性がある。本研究では両者の比較により、支援機能と学習者の行動、モデルの完成度と動的システムに関する理解の関係を調べていく。

4. 実験

4.1 実験計画

目的 モデルの作成を通じた学習において、モデルの完成度の向上を指向したフィードバックを受けた学習者と（構造説明群）、誤り原因の熟考を促進するフィードバックを受けた学習者（振舞い説明群）とで、学習者の行動やモデルの完成度、動的システムに関する理解がどのように異なるか（あるいは同じか）を調査する。

仮説 初めに次の作業仮説を置く。「仮説1：誤りとその修正方法を直接的に説明される構造説明群よりも、それらを間接的にされ熟考を促される振舞い説

明群の方が、動的システムに関する理解が高くなる」
被験者 理工系大学生・大学院生 17名
道具

- (1) モデリング学習環境 Evans : 3.1 節で述べたシステムであり、被験者は GUI を用いて対象系の定性モデルを作成し、定性シミュレーションによりその振舞いを観察することができる。基本的操作を説明するオンラインヘルプ、モデルの文法的誤りを即時フィードバックする機能、および 3.2 節で述べた差異リストが実装されており（構造説明／振舞い説明のいずれかが提示される）、モデル作成中に被験者はそれらを自由に用いることができる。被験者による操作はすべてログに記録される。
 - (2) チュートリアル資料：被験者に Evans におけるモデル作成を練習させるための資料である。動的システムのモデル、操作方法、およびモデル部品に関する簡単な説明に続いて、3.1 節のバスタブの例を単純化した二つの練習課題（蛇口からの流入のみ、および排水口からの流出のみにしたもの）が記載されている。
 - (3) モデリング課題：被験者には、3.1 節のバスタブの水量変化のモデルを作成させた。前述の通り、学習者はしばしば制約の疎らなモデルを作成し、シミュレーションその他の支援機能から有益な情報を受け取ることができない。そこで本実験では、モデル作成に必要な部品のインスタンス（想定される正解モデルを分解して用意し、初期値なども予め設定しておく）をすべて与え、被験者のすべきことはそれらを組み合わせてモデルを完成させることのみとした。このようにして、モデル作成の中でも難しいとされる、対象系の構造を分析して適切な部品のインスタンスを作成する作業の負荷を取り除き、モデル作成における支援機能の役割を焦点化する。
 - (4) 理解度測定テスト：2.1 節で述べたシステムダイナミクスに関する理解を測定するため、3.1 節のバスタブの水量変化、および RC 回路における電荷の移動を対象として、それぞれ同節(1)～(4)の理解を問う小問からなるテストを用意した。前者はモデリング課題と同一の系を扱う「学習課題」、後者は前者と同形となる系を扱う「転移課題」との位置づけである。満点は 37 点である。
- 手順** 初めに、プレテストとして理解度測定テストに解答させた。次に、チュートリアル資料を用いて導入を行った後、Evans 上でモデリング課題に取り組ませた。このとき被験者は、差異リストにおいて構造説明が提示される群（8 名）と振舞い説明が提示される群（9 名）に分けられた。最後に、ポスト

テストとして理解度測定テストに解答させた（プレテストと同一）。約一ヶ月後に、遅延テストとして理解度測定テストに解答させた（前二者と同一）。

測度 プレーポストテスト間の得点上昇度で学習の即時的効果を、ポスト遅延テスト間の得点下降度で知識の一般化効果を測定する。また、被験者が最終的に作成したモデルと正しいモデルとの一致度に基づいてモデル完成度を算出した（満点は 3 点）。さらに、モデル作成中の 1 分間あたりの支援機能（差異リスト）の使用回数をログ記録より算出した。

4.2 結果と考察

両群の各テストにおける平均点を表 1 に示す。二要因の分散分析（要因 A：説明条件（2 水準）、要因 B：テスト（3 水準））を実施したところ、交互作用が有意であったので ($p < .05$)、単純主効果の検定を行った。その結果、説明条件の要因は有意ではなかったが、テストの要因が有意であったので（テスト（構造説明）： $F=23.783$; $p < .01$ 、テスト（振舞い説明）： $F=7.039$; $p < .01$ ）、多重比較を行ったところ、構造説明群ではプレーポストテスト間およびプレー遅延テスト間に有意差があり ($p < .01$, $p < .01$)、振舞い説明群ではポスト遅延テスト間、プレー遅延テスト間に有意差があった ($p < .05$, $p < .01$)。

表 1 テスト結果

	プレテスト	ポストテスト	遅延テスト	テスト単純効果	プレーポスト	ポスト遅延	プレー遅延
構造説明群 (n=8)	15.50 (4.42)	20.75 (4.97)	22.63 (3.77)	$F=23.783$ $p < .01^{***}$	$t=-4.764$ $p < .01^{***}$	$t=1.701$ $p < .10^*$	$t=6.465$ $p < .01^{***}$
振舞い説明群 (n=9)	17.67 (5.31)	19.33 (4.74)	21.67 (6.73)	$F=7.039$ $p < .01^{***}$	$t=1.604$ $p > .10$	$t=2.246$ $p < .05^{**}$	$t=3.850$ $p < .01^{***}$

4.2.1 モデル作成の直後における理解度

表 1 の結果から、ポスト遅延テスト間では振舞い説明群でのみ得点が有意に上昇したが、プレーポストテスト間では逆に構造説明群でのみ得点が有意に上昇した。また、いずれにおいても説明条件による有意差は見られなかった。これは仮説 1 に反する結果であり、学習直後においてなぜ構造説明群の方が振舞い説明群より理解度が向上するかを説明する必要がある。プレーポストテスト間の上昇度とモデル完成度との相関分析を行ったところ（表 2）、被験者全体で両者に中程度の正の相関があったことから ($R=0.476$)、次の仮説を新たに置いた。

仮説 2：理解度の向上にはモデルが完成することが重要である。モデリング学習環境では、モデルがある程度完成して初めて被験者は学習に有益なフィードバックを受け取ることができ、その記憶は特にポ

ストテストにおいて有効に働く。

表2 相関分析結果

(a) 全被験者

	プレテスト得点	プレテスト上昇度	モデル完成度	支援機能使用率
プレテスト得点	1.000	-	-	-
プレテスト上昇度	-0.383	1.000	-	-
モデル完成度	-0.313	0.476	1.000	-
支援機能使用率	0.152	-0.101	0.442	1.000

(b) 構造説明群

	プレテスト得点	プレテスト上昇度	モデル完成度	支援機能使用率
プレテスト得点	1.000	-	-	-
プレテスト上昇度	-0.066	1.000	-	-
モデル完成度	-0.728	0.183	1.000	-
支援機能使用率	0.145	-0.550	0.022	1.000

(c) 振舞い説明群

	プレテスト得点	プレテスト上昇度	モデル完成度	支援機能使用率
プレテスト得点	1.000	-	-	-
プレテスト上昇度	-0.475	1.000	-	-
モデル完成度	-0.128	0.412	1.000	-
支援機能使用率	0.113	0.190	0.673	1.000

仮説2によれば、プレーポストテスト間で構造説明群でのみ得点が有意に上昇したのは、構造説明群のモデル完成度がより高かったからであると説明できる。これについて次のように分析を進めた。構造説明群と振舞い説明群の完成度についてU検定を行ったところ（非正規分布のためt検定は不適切と判断した）、両群の間に有意差は見られなかった（ $p>.10$ ）。しかし、表2を見ると、振舞い説明群ではモデル完成度とプレーポストテスト間の上昇度に中程度の正の相関が見られ（ $R=0.412$ ）、また、構造説明群では両者に相関は見られなかった（ $R=0.183$ ）。つまり振舞い説明群ではモデルを完成することが理解度向上に繋がるが、構造説明群では必ずしも理解度向上に繋がっていないといえる。また、同図における支援機能使用率とプレーポストテスト間の上昇度の相関では、振舞い説明群では相関がないが（ $R=0.190$ ）、構造説明群では中程度の負の相関が見られる（ $R=-0.550$ ）。これは、構造説明群では支援機能を濫用し、理解を深めることなくモデルの完成に専心した被験者が一定数存在したことを示唆している。

以上より、仮説2は次のように修正される。

仮説2を修正して得られた知見：

振舞い説明群ではモデルを完成することが理解度向上に繋がるが、振舞い説明がモデル完成を促す力は構造説明に比べて弱いため（モデル完成度の低い被験者が複数存在した）、プレーポストテスト間で有意に得点が上昇しなかった。

一方、構造説明群では支援機能の活用の仕方によってモデルを完成させ理解が深まるか否かが決まる。構造説明はモデル完成を促す力が強い（ほぼ全員が高いモデル完成度を示した）、支援機能を適切に用い理解を伴って完成させる被験者がいる反面、これを過度に用いて理解を伴わずにモデルを完成させる被験者が一定数存在する。つまり個人に依存する度合いが強い。

また、構造説明が振舞い説明に比べてモデル完成を促す力が強いことは、次の分析からも示唆された。すなわち表2において、プレテストの得点とモデル完成度の相関を見ると、被験者全体で弱い負の相関（ $R=-0.313$ ）、特に構造説明群で強い負の相関（ $R=-0.728$ ）が見られ、先行知識が高い被験者ほど完成度が低い。この理由は次のように推察される。本実験では、実験者が想定した正解モデル（積分関係を1つ使う）を分解して用意した部品インスタンスを与えてモデルを作成させたが、ログ分析の結果、プレテスト高得点者の多くがそれとは異なる「別解モデル」（積分関係の用法が異なるがモデルとしては正しい）の作成を試みていた。構造説明群ではそのような積分関係を支援機能に従って再設定（想定された正解モデルでの用法に合わせる）する傾向が多く見られた一方、振舞い説明群ではそうでなかった（モデル作成中のすべての関係の再設定回数に対する積分関係のその割合を算出して比較したところ、構造説明群は振舞い説明群より有意に大きかった（t検定、 $p<.05$ ））。このことは、先行知識の高い被験者では、自分の想定するモデルと所与の部品（実験者が想定した正解モデルによる）とが一致しない場合、モデル完成度に負の影響があること、しかしそのような場合でも、構造説明はモデル完成を促す力が比較的強く、振舞い説明は弱いことを示唆している。

4.2.2 モデル作成から一定期間経過後の理解度

本実験では、82%の被験者においてポストー遅延テスト間で得点の上昇が見られた。また、分散分析の結果、振舞い説明群についてはその上昇は有意であった（表1）。

一般に、テストを用いて学習効果を測定する場合、学習直後に行うポストテストに比べて一定期間経過後に行う遅延テストの得点は多くの場合下降し、上昇することはまれである。しかし、特に第二言語習

得などの研究分野においては、ポストテストから遅延テストにかけて得点が上昇する例が報告されている[8, 13]. その理由は明確には検証されていないものの、文法規則を意識した明示的学習は記憶中心になりやすく効果が長続きしないのに対し、文法規則を意識しない暗黙的学習は時間経過とともに一般化された知識が徐々に形成される可能性があることが指摘されている[8].

この結果については、さらに調査を進めて再現性を確認する必要があるが、上記のことを踏まえると、現時点で次のような可能性が考えられる.

- (1) 本モデリング環境における学習は、動的システムの特定のモデル、あるいはその構成要素に関する単なる(宣言的、明示的)知識ではなく、構成要素の関係やそれを系の振舞いと結び付けるための(手続き的、暗黙的)知識の獲得に貢献した
- (2) 獲得された知識は、単なる一時的な記憶ではなく、時間が経過しても容易には消失しない程度に一般化されたものである

上記のような一般化された知識として獲得されたため、両群とも遅延テストにおいてきわめて良い保持性を示したと思われる. しかし、そのような知識は支援機能が濫用されると獲得されない. 従って、そのような濫用が起こりやすい構造説明群に比べて、振舞い説明群の方が遅延テストにおいて顕著な上昇を示したものと考えられる. ただし、群間の差異については、諸要因(支援機能やその使い方、先行知識など)を整理した上でさらに検証していく必要がある.

5. おわりに

本研究では、動的システムを対象としたモデリング学習環境において、学習者の振舞いや学習効果が支援方法や先行知識の影響をどのように受けるかについて検証を行った. その結果、学習者が作成したモデルと正解モデルとの差異を説明する支援機能を用いた場合、学習の直後において、モデルの完成度向上を狙いとする説明(構造説明)を用いた方が学習効果が大きいことが明らかになった. しかし、構造説明はモデル完成を促す力が強いいため、理解を伴わずモデル完成に専心するケースがあることも確認された. 一方、学習から一定期間経過後では、モデルの意味的誤りの熟考・修正を狙いとする説明(振舞い説明)を用いた方が学習効果が大きいことが示唆された. 今後の課題としては、追実験を行って本実験結果(特に後者)の再現性を検証するとともに、

理解度測定テストを洗練して「動的システムの理解とモデル作成技能」がどのように習得されていくかを詳細に分析していくことが挙げられる.

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科研費(課題番号16K12558)の助成を受けている.

参考文献

- [1] Beek, W. and Bredeweg, B. (2012) Context-Dependent Help for Novices Acquiring Conceptual Systems Knowledge in DynaLearn. Proc. of ITS12.
- [2] Beek, W. and Bredeweg, B. (2012) Providing Feedback for Common Problems in Learning by Conceptual Modeling using Expectation-Driven Consistency Maintenance. Proc. of QR12.
- [3] Biswas, G., Leelawong, K., Schwartz, D., Vye, N. (2005) Learning by Teaching: a new agent paradigm for educational software. Applied Artificial Intelligence, 19, pp.363-392.
- [4] Bravo, C., van Joolingen, W.R. and de Jong, T. (2006) Modeling and Simulation in Inquiry Learning: Checking Solutions and Giving Intelligent Advice Simulation, Vol82, Issue11, pp.769-784.
- [5] Bredeweg, B., Linnebank, F., Bouwer, A. and Liem, J. (2009) Garp3 - Workbench for qualitative modelling and simulation. Ecological Informatics, 4(5-6), pp.263-281.
- [6] Collins, A. (1996) Design Issues for Learning Environments. In: Vosniadou, S., Corte, E.D., Glaser, R. and Mandl, H. (eds) International Perspectives on the Design of Technology-Supported Learning Environments. Lawrence Erlbaum, pp.347-361.
- [7] K. D. Forbus, K. Carney, B. L. Sherin, and L. C. Ureel II (2009) VModel: A visual qualitative modeling environment for middle-school students, AI Magazine, vol.26, pp.63-72.
- [8] 福田 純也 (2016) 付随的学習中のアウェアネスが意識的・無意識的知識の習得に与える影響-形式-意味のつながりにおける卓立性の観点から-, 名古屋大学大学院博士論文.
- [9] Gracia, J., Liem, J., Lozano, E., Corcho, O., Trna, M., Gómez- Pérez, A., and Bredeweg, B. (2010) Semantic Techniques for Enabling Knowledge Reuse in Conceptual Modelling. In Proceedings of ISWC2010, 82-97.
- [10] Horiguchi, T., Hirashima, T. and Forbus, K.D. (2012) A Model-Building Learning Environment with Explanatory Feedback to Erroneous Models, Proc. of ITS 2012, pp.620-621.
- [11] Horiguchi, T., Masada, T. (2017) Evaluation of the function that detects the difference of learner's model from the correct model in a model-building learning environment. Proc. of HCI2017 (LNCS, volume 10274), pp.40-49.
- [12] isee systems (1985) STELLA, <http://www.iseesystems.com/>.
- [13] Scott W. Miles (2014) Spaced vs. massed distribution instruction for L2 grammar learning, System, 42, pp.412-428.
- [14] Vanlehn, K., Wetzel, J., Grover, S., & Van De Sande, B. (2016) Learning How to Construct Models of Dynamic Systems: An Initial Evaluation of the Dragoon Intelligent Tutoring System. IEEE Transactions on Learning Technologies, 10(2), pp.154-167.
- [15] Weld, D.S., deKleer, J. (1990) Readings in Qualitative Reasoning About Physical Systems, Morgan Kaufmann.