

シミュレーションに基づく学習環境における漸進的な知識獲得支援のためのマイクロワールドグラフ

東本 崇仁^{†a)} 堀口 知也^{††} 平嶋 宗[†]

Graph of Microworlds: A Framework for Assisting Progressive Knowledge Acquisition in Simulation-Based Learning Environments

Takahito TOUMOTO^{†a)}, Tomoya HORIGUCHI^{††}, and Tsukasa HIRASHIMA[†]

あらまし ある現象の理解を深める際、現象のシミュレーションである MW (MicroWorld) を用いて現象を擬体験させることは有用であるとされている。また、ある MW を体験し理解させるだけでなく、その MW から徐々に複雑なものへと移行していくことで、複雑な現象の理解へとつなげていく ICM (Increasingly Complex Microworld) のアプローチは効果的であるとされている。これまで、ICM に基づく様々な学習環境が開発され、有用性の検証も行われている。しかし、従来の研究では、固定的な MW 系列を用意するものがほとんどであり、適応性において問題があった。本論文では、適応的な制御において重要な課題である (1) 移行という観点からの MW 間の関係記述、(2) 移行に伴い発生する学習者にとって克服すべき課題の抽出とその対応への支援、に対する一つの解決手法として (a) 個々の MW の特徴及び MW 間の関係を記述する枠組みとしてマイクロワールドグラフを提案し、この枠組みに基づいて、(b) 隣接する二つの MW 間の移行に伴う課題 (タスク) を抽出する機能、及びそれに関する説明を生成する機能の実現手法を述べる。

キーワード マイクロワールド, Increasingly Complex Microworlds (ICM), 漸進的な知識獲得, モデルグラフ, マイクロワールド間タスク

1. ま え が き

ある現象の理解を深める上で、その現象を体験することは非常に有効とされている。この体験を教育的観点から擬體的に与えることを目的とした、シミュレーションに基づく学習環境 (Simulation-based Learning Environment: SLE) が、これまで数多く研究・開発されてきており、特に探索的学習を促進する上で極めて有用であることが実証されてきた [1] ~ [4]。

SLE においては、単にある現象を体験し理解させるだけでなく、その現象を徐々に複雑なものとしていくことで、より複雑な現象の理解へとつなげていくことが効果的であるとされており、このようなアプローチ

は ICM (Increasingly Complex Microworld) と呼ばれる [5], [6]。ここでマイクロワールドとは、教育的観点から作られたある具体的な現象のシミュレーションであり、学習者がその現象の背景となる法則や原理について理解可能であるように取り扱う範囲を限定しているという意味において「マイクロ」な「ワールド」である。すなわち ICM とは、学習者にとって理解が容易な単純なマイクロワールドから始めて、徐々に複雑なマイクロワールドへと漸進的に移行させることにより、結果として複雑なマイクロワールドの理解を達成させる学習支援法である。これまで、ICM に基づく様々な SLE が研究・開発され、それらの有用性の検証も行われている [6] ~ [8]。

ICM に基づく SLE における重要な課題の一つとして、提供するマイクロワールドの適応的な制御を挙げることができる。従来の研究においては、注意深く設計された固定的なマイクロワールド系列に従ってマイクロワールドの移行を進めるものがほとんどであった。このような固定的なマイクロワールド系列は、平均的

[†] 広島大学大学院工学研究科, 東広島市
Department of Information Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima-shi, 739-8527 Japan

^{††} 神戸大学大学院海事科学研究科, 神戸市
Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Kobe-shi, 658-0022 Japan

a) E-mail: toumoto@isl.hiroshima-u.ac.jp

な学習者を想定したものであり、個々の学習者にとって必ずしも適したものは限らない。計算機を用いた学習支援の高度化を指向した場合、学習者個々の能力や興味あるいは学習履歴に応じたマイクロワールドの適応的制御は不可欠な要素技術となる。

マイクロワールドの適応的制御を目指す場合に生じる主な課題としては、(1) 移行という観点からのマイクロワールド間の関係の記述、(2) 移行に伴って発生する学習者にとって克服すべき課題の抽出とその対応への支援、(3) 学習者の理解状態に応じたマイクロワールドの選択、を挙げることができる。従来の研究においては、(1) と (3) は固定的なマイクロワールド系列を決定した時点で解決される課題であり、(2) はその固定的なマイクロワールド系列における比較的少数の移行関係に関して検討を行えばよいことであった。したがって、システム作成者や教授者が注意深く設計することで解決可能な課題であったといえる。

本論文では、SLE におけるマイクロワールドの適応的制御を指向して、上記の課題 (1) 及び (2) に対する一つの解決手法を提案する。すなわち、まず (a) 個々のマイクロワールドの特徴及びマイクロワールド間の関係を記述する枠組みを提案する。この枠組みはマイクロワールドグラフ (Graph of Microworlds: GMW) と呼ばれ、一つのマイクロワールドにおいて習得すべき知識及びそのために遂行すべきタスクの記述をノード、二つのマイクロワールド間におけるこれらの差分の記述をエッジとするグラフ構造である。GMW においては、ある二つのマイクロワールド間の移行が教育的意味をもつとき、両者をエッジで結び、隣接させることになる (教育的意味の詳細は 3.2.2 で述べる)。また、この枠組みに基づいて、(b) 隣接する二つのマイクロワールド間の移行に伴って克服すべき課題を抽出してタスクとして提示する機能、及びそれに関するモデルに基づく説明を生成する機能の実現手法を提案する。ここで、マイクロワールドグラフは、それ自身個々のマイクロワールドの特徴やそれらの間の関係を自動生成するものではなく、その記述は人間が行う必要がある。また、その枠組みは、上記の課題 (1)、(2) を解決するためにはそれらの内容に関してどのような情報を記述すれば十分かを領域独立に規定するものであり、実装レベルの書式やその推論方式は、対象領域ごとに用意する必要がある。しかし、マイクロワールドグラフは、マイクロワールドの特徴やそれらの間の関係を記述するための統一的な枠組みを与えるものと

なっており、この記述に基づくことで、従来アドホックに定められていたマイクロワールドの隣接関係やその差分を組織的に取り出すことが可能となり、それらに基づくことで、隣接関係の移行のためのタスクやそのタスクに関する説明を自動的に生成することが可能となる。上記の課題 (3) については、課題 (1)、(2) を解決した上で初めて検討可能な課題であること、及び学習者モデリングや教授目標の設定など、他の要素技術を関連づけながら幅広く論じる必要があることから、本論文の範囲とはしていない。

以下、2. では関連研究について紹介し、本研究を位置づける。3. では GMW の枠組みを詳述し、その記述例を示す。4. では、マイクロワールド間の移行を促すためのタスク及びそれに関する説明の生成手法について述べる。5. では本論文での提案手法の妥当性を検討し、6. ではまとめを行う。

2. 関連研究

ICM に基づく漸進的学習を支援する SLE は、これまでもいくつか開発されてきた。例えば、QUEST [8] や ThinkerTools [7]、DiBi [9] においては、単純な現象から始めて徐々に複雑な現象を学習させるため、学習者に徐々に複雑な状況やタスクを与えるマイクロワールド系列が設計されている (例えば、定性的な振舞いから定量的な振舞いへ/電圧の値から変化量へ/等速直線運動 (摩擦なし) から等加速度直線運動 (摩擦あり) へと移行させる)。一方、‘intermediate model (媒介モデル)’ [10], [11] や WHY [12], [13] においては、あるモデルの振舞いにより理解しやすい別のモデルの振舞いによって説明するため、一つの現象を様々な視点から見たモデルの組が設計されている (例えば、マクロなモデルの振舞いをミクロなモデルの振舞いからの創発として説明する)。

しかしながら、これらのシステムは上述の限界をもつ。すなわち、これらは固定的なマイクロワールド系列をもつのみであり、適応的に用いるためには、各学習者についてどのマイクロワールドを次に学習すべきか/いつそれに移行すべきかを決定することのできる人間の教師が不可欠である。また、たとえマイクロワールドを適応的に選択するためのルールを記述することが可能な場合でも、それらがモデルの差分に基づくものでなければモデルに基づく説明を生成することができず、移行に伴う課題や説明の記述はアドホックなものにならざるを得ない。このことは、近年の洗練

された教授法をもつ (ICM に基づかない) SLE [1] ~ [3] についても同様である。それらにおいては領域及び教授知識がフレームに基づいて記述されており、システム自身はモデルの差分に基づく推論能力をもたない。GMW の枠組みは、マイクロワールドの特徴及びマイクロワールド間の関係を明示的に記述しておくことにより、上記の問題の解決を図るものである。

GMW によるシステム構成法及び学習支援法の妥当性は、次の諸研究によっても示される。すなわち、Maani らは、対象系を様々な視点や粒度で見たりその時間的发展を予想したりする「システム思考」の技能が、複雑な系を対象とした問題解決能力に大きく影響することを実験的に検証した [14]。このことは、本枠組みの教育的な妥当性を示している。また、Raubal らは、実空間における経路探索を対象として、様々な状況やそこで得られる (不完全な) 知識から目標となる状況や知識を探索していく認知過程のモデルを明らかにし、その形式化を試みている [15]。これは、本枠組みの認知的な妥当性を示すとともに、GMW 上での教授・学習の文脈を同定・制御する機能 (すなわち前章の課題 (3) にかかわる諸機能) を設計する際の一つの方法を提供する。マイクロワールドでの課題遂行における学習者の行動を評価するための、種々の有用な測度も提案されている [16]。

3. マイクロワールドグラフ

3.1 マイクロワールドの記述に関する要件

マイクロワールドにおいて、学習者は (t1) ある状況で対象系の振舞いを予測することに加えて、(t2) 状況の変化に伴う系の振舞いの変化を予測することも求められる。すなわち、マイクロワールドにおけるタスクには、これらの各々に対応する 2 種類のものがある。特に後者は、状況の変化はしばしば予測に必要なモデルの変化を伴うという意味において、より複雑な現象の理解にとって本質的である。学習者は、あるモデルを用いてタスクを遂行できるだけでなく、与えられた状況に対して適切なモデルを選択できなければならない。よって、本研究の目標は、(1) モデルの組とそれらの間の差分を記述する枠組みを提案すること、及びその記述に基づいて (2) 学習者に適応的にマイクロワールド (状況とそのモデル、及び遂行すべきタスク) を提供するとともに、状況の変化に伴うモデルの変化に関する説明を生成する機能を実現することである。

物理系のモデルは、そのモデルが有効である範囲外

へと状況が変化したときに変更される^(注1)。この有効範囲は、「モデル化仮定」(モデルが有効であるために成立すべき仮定)として記述される。本研究では、モデル化仮定として次の項目を考える^(注2)。

(a1) 系の物理構造: 物理的存在物 (オブジェクト)、それらの間の関係、それらの属性、及びモデルにおいて考慮されるべき物理プロセス

(a2) 考慮されるべき系の振舞いの範囲 (例えば、モデルの時空間的な範囲、動作モードなど)

(a3) 系の境界条件

モデル化仮定の変化は物理系のモデルの変化 (物理系の振舞いの変化) を引き起こし、両者の関係を因果的に理解することは、教育的観点から見て重要である。よって、本枠組みは、モデル (の変化) のみならずモデル化仮定 (の変化) の記述をも含むものでなければならない。また、学習者にモデルの変更を促す (モデル間の差分を考えさせる) タスクの記述も必要である。

上記の議論に基づいて、次節では、マイクロワールドの記述と組織化に関する枠組みを提案する。

3.2 マイクロワールドの記述と組織化

3.2.1 マイクロワールドの記述

各マイクロワールドについて、次の情報が記述される。

(m1) 対象とする物理系とその一つのモデル

(m2) 系の物理構造: 物理的存在物 (オブジェクト)、それらの間の関係、それらの属性、及びモデルにおいて考慮されるべき物理プロセス (a1)

(m3) 考慮されるべき系の振舞いの範囲 (a2)

(m4) 系の境界条件 (a3)

(m5) モデルに基づく推論のために必要な技能 (例えば、方程式の解法など)

(m6) モデルを理解するために遂行すべきタスク

項目 (m2)、(m3) 及び (m4) は、物理系のモデル (m1) が有効であるためのモデル化仮定の有意味な組合せを表す。項目 (m5) は、タスクを遂行するためにモデルとともに用いられる技能を表す (例えば、定量モデルにおける数値計算など)。項目 (m6) は、学習者に対して提示されるタスクを表し、その遂行に必要な知識が ((m1) ~ (m5) の部分集合として) 付されている。

モデルに基づく推論の観点からは、タスクには 2 種

(注1): 物理の問題解決について、本論文で用いる用語を付録に示す。

(注2): Falkenhainer らによる議論 [17] に基づき、独自に再分類した。

類のものが存在する．一つは、当該のマイクロワールドにおけるモデルを用いて遂行可能なタスクであり、もう一つは、別のマイクロワールドへの移行（すなわち別のモデル）を必要とするタスクである．先述のタスク (t1) はすべて前者であり、タスク (t2) のうち状況の変化がモデル化仮定の変化を引き起こさないもの、つまりモデルの変更を必要としないタスクもこれに相当する．これらを MW 内タスクと呼び、その遂行のために必要な知識は、当該のマイクロワールドの項目 (m1) ~ (m5) を用いて記述される．タスク (t2) のうち状況の変化がモデル化仮定の変化を引き起こすもの、つまりモデルの変更を必要とするタスクは後者に相当する．これを MW 間タスクと呼び、その遂行のために必要な知識は、移行前/後のマイクロワールドの項目 (m1) ~ (m5) を用いて記述される．MW 間タスクの記述には、移行すべきマイクロワールドへのポイントが含まれる．

3.2.2 マイクロワールドの組織化

前項のように記述されたマイクロワールドの組を組織化するための枠組みとして、マイクロワールドグラフ (Graph of Microworlds: GMW) [18] を提案する．これによって、各学習者に対して適応的にマイクロワールド系列を生成することが可能となる．GMW は、モデル化仮定の変更により物理系のモデルがどのように変化するかを記述するための枠組みであるモデルグラフ (Graph of Models: GoM) [19], [20] を拡張したものである．GoM の各ノードは対象とする物理系の可能なモデルを、各エッジはモデル化仮定の変更（モデルの移行と呼ぶ）を表しており、主として観測データからのモデル同定や故障診断などに用いられる．

GMW においては、GoM のノードをマイクロワールドへ、エッジをマイクロワールド間の可能な移行へと拡張している．すなわち、マイクロワールドのモデルを理解することによって習得できる知識、及びそのために遂行すべきタスクという二つの教育的概念を導入している．各マイクロワールドにおいて習得できる知識（目標知識と呼ぶ）は、モデル、モデル化仮定、及びモデルとともに用いられる技能（すなわち (m1) ~ (m5)）であり、その習得を促すために提示すべき MW 内タスク（すなわち (m6)）も併せて記述される．

また、GMW において、ある二つのマイクロワールド間の目標知識の差分が十分小さく教育的意味をもつとみなせるとき、両者はエッジで結ばれる（隣接する）．エッジには、両者の目標知識の差分、及びその習

得（マイクロワールドの移行）を促すために提示すべき MW 間タスクが記述される．ここで、マイクロワールドの移行が教育的意味をもつとは、両者のモデルをその順序で学習することが、何らかの教授・学習の文脈において「既習のモデルの発展としての新しいモデルの学習」とみなせることを表す．例えば、図 2 において、MW-1 と MW-2 は多くの状況を共有しており、摩擦力及びそれに起因する加速度の有無のみが異なる．すなわち、「水平面上の直線運動」という状況に注目したとき、後者は前者を一般化した（発展させた）ものとなっている．また、同図の MW-1 と MW-4 も多くの状況を共有しており、各々が対象とする時間的・空間的範囲のみが異なる．すなわち、「（障害物のある）水平面上における直線運動」の時間的推移に注目したとき、後者は前者を（時間的に）発展させたものとみなすことができる．しかし、このような関係を目標知識（の差分）の記述から形式的に決定することは困難であるため、マイクロワールド間の関係付けは、（想定される）何らかの教授・学習の文脈に基づき、GMW の記述者の判断で行うものとする．

このようにして記述された GMW においては、一つのマイクロワールドには目標知識の差分が小さいいくつかのマイクロワールドが隣接しており、教授・学習の文脈に応じて次に学ぶべき適切なマイクロワールドを、学習支援システムが選択することが可能となる（ただし、教授・学習の文脈の推定とそれに基づくマイクロワールド選択の機構は、本論文の範囲外である）．

GMW 上での学習においては、それを構成するマイクロワールドの目標知識（及びその差分）のすべてまたは一部が学習目標として設定され、また、各々に対応するタスクのすべてまたは一部の達成の成否を診断することにより、それぞれの達成度が評価される．タスクの遂行を支援するための手段（観測・操作ツールなど）は、各々のマイクロワールドにおいて適宜提供されるものとする．

[例 1] カーリングの例題 (1)

図 1 は、カーリングに似た状況設定を示している．ストーン M_1 は、位置 x_0 においてプレイヤーにより初速度 v_0 で投射され、位置 x_1 に置かれたストーン M_2 に衝突するまで氷上を右方へ滑走する．ただし、氷上の摩擦が無視できず、十分な初速度が与えられなければ、衝突せずに x_0 と x_1 の間（区間 $[x_0, x_1]$ と表記する）で停止する．また、プレイヤーの判断により、 M_1 の滑走前にこの区間をブルーム（ほうき）で



図 1 カーリングに似た状況
Fig.1 Curling-like problem.

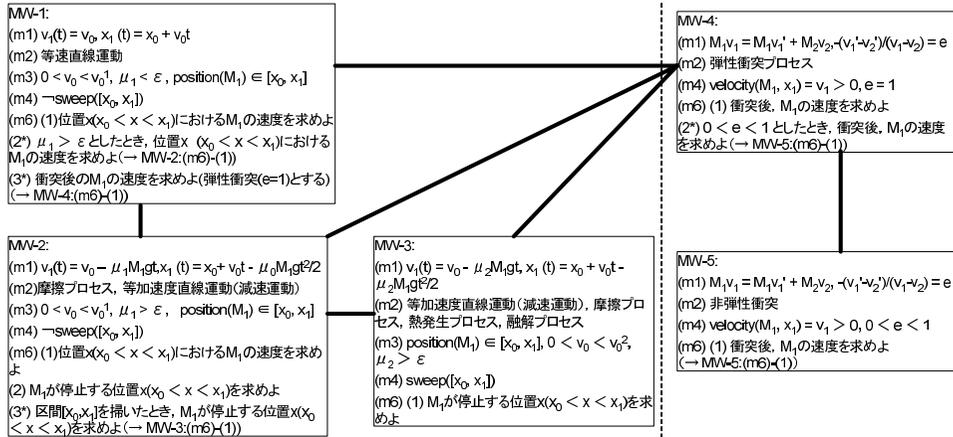


図 2 カーリングに似た状況のマイクロワールドグラフ
Fig.2 Graph of MicroWorlds for curling-like problem.

一様に掃いておくこともある。

この物理系の振舞いをモデル化するとき、様々な物理構造（例えば、摩擦を無視できる/できない、ほうきで掃く/掃かない、定性/定量的な属性の考慮）や振舞いの範囲（例えば、衝突前/後の区間、衝突の瞬間）、及び境界条件（例えば、初速度が大きい/小さい）が考えられ、それらに対応した複数のモデルが存在する。これらのモデルは、各々を理解するために遂行すべきタスクとともに、図 2^(注3)に示されるような GMW へと組織化される（ここでは、各マイクロワールドの特徴 (m1) ~ (m6) は簡単な assertions のリストとして記述されている）。

ここで、各マイクロワールドにおける目標知識のうち、それぞれが対象とする物理プロセス及びそのモデルが学習目標として設定されているものとする。MW-1 の MW 内タスク (1) により等速直線運動を学習した学習者に、MW-1 の MW 間タスク (2*) を提示したとする。このとき、タスクにおける状況の変更により摩擦が無視できなくなるため、学習者は MW-2 への移行を促される（このタスクの遂行により、MW-1 と MW-2 の差分である「等加速度直線運動（減速運動）」及び「摩擦プロセス」を学習すると期待される）。一方、MW-1 の MW 間タスク (3*) を提供したとき、

MW-1 において考慮外であった振舞いの範囲（衝突後）を考慮する必要が生じるため、学習者は MW-4 への移行を促される（このタスクの遂行により、MW-1 と MW-4 の差分である「弾性衝突プロセス」を学習すると期待される）。

また、MW-2 において MW 間タスク (2*) を提示した場合、学習者が MW-2 で習得した知識や技能のみを用いると、誤った解を導出することになる。この誤りは学習者に「熱発生プロセス」と「融解プロセス」の学習、すなわち MW-3 への移行を促す。同様に、MW-4 の MW 間タスク (2*) は、学習者に「非弾性衝突プロセス」の学習、すなわち MW-5 への移行を促す。

数学的には、これらのモデルのいくつかを一つの（パラメータが連続的に変化する）モデルとして記述することも可能である（例えば MW-1, MW-2 及び MW-3）。しかし、教育的観点から見ると、これらは

(注3): 1. v_0^1 と v_0^2 は、摩擦係数の値がそれぞれ μ_1 と μ_2 であるときに、衝突が起きるための M_1 の最小の初速度である。
2. 区間 $[x_0, x_1]$ における摩擦係数の値が ε よりも小さい/大きいとき、摩擦力を無視できる/できない。
3. アスタリスク (*) が右肩に付されているタスクは、移行すべきマイクロワールドへのポイントをもつ MW 間タスクである。
4. 各 MW において、(m2), (m3) 及び (m4) 間の因果関係は明示的に記述されているものとする。

質的に異なる物理構造を対象としており、各々の習得を促すタスク及びその遂行のために与えるべき支援やツールなども異なったものとなる。よって、これらを一つのマイクロワールドとした場合、教材や教授・学習支援にかかわる多くの知識を互いの整合性をとりながら記述する必要が生じる。これに対し、これらを複数のマイクロワールド (GMW) とする場合、これらの知識の記述は、各々のマイクロワールド及びそれらの間の関係にかかわるものにモジュール化された比較的単純なものとなり、互いの整合性をとるための負荷が軽減される。

4. パラメータ修正規則によるマイクロワールド移行の支援

本章では、マイクロワールドの移行を支援する方法について述べる。本研究では、マイクロワールドの移行 (状況の変化) に伴うモデルの変化 (差異) を、次の二つの場合に分けて考えている。第 1 は、二つのモデルの間に「一般化/特殊化」の関係が認められる場合であり、第 2 は、そのような関係が認められない場合である。例えば [例 1] の MW-1 は、MW-2 において μ_1 の値が無視できるほど小さい状況を対象としており、前者のモデルは後者のそれを特殊化したものとなっている。MW-2 と MW-3, MW-4 と MW-5 のモデルについても同様の関係が成り立つ。これに対して、MW-1 (または MW-2, MW-3) と MW-4 のモデル間の差異は、考慮すべき空間的・時間的範囲 (すなわち振舞いの範囲) の変化によるものであり、「一般化/特殊化」の関係は認められない。また、衝突前後の速度変化を定性的に表すモデルや衝突の機構を分子レベルで表すモデルを考えたとき、これらと MW-4 との差異は対象系をとらえる際の視点 (粒度) の変化によるものであり、やはり「一般化/特殊化」の関係は認められない。後者の場合、移行先のマイクロワールドにおいては移行前に学習した知識や技能に基づく解法が実行できず (例えば、図 2 の MW-1 から MW-4 へ移行する場合)、このことは、次のマイクロワールドへの移行、すなわち新しい知識や技能の学習を十分に動機づけると考えられる。一方、前者の場合、移行先のマイクロワールドにおいても以前の解法がそのまま実行できる場合が多い (例えば、図 2 の MW-1 から MW-2 へ移行する場合)。よって、学習者は以前に習得した (移行先のマイクロワールドにおいては不適切な) 知識や技能を用いて誤った解を導出しながらそ

れに気づかず、マイクロワールドの移行が適切に行われない場合が考えられる。そこで、本論文では、前者の場合を対象とした支援の方法を考案する。

このような場合、学習者が用いた以前のモデルが新しい状況においてなぜ不適切であるか、(その状況において適切である)「正しい」モデルとどう異なるかを説明する必要がある。すなわち、誤ったモデルと正しいモデルの振舞いの差異をそれらのモデル化仮定の差異に関係づける (すなわち、観察可能な結果をその原因に関係づける)、モデルに基づく説明が生成できなければならない。本章では、その一つの手法として、パラメータ修正規則を用いた説明生成 [18], [21] について述べる。

GoM の枠組みは、それぞれのモデル化仮定の変更が、モデルに基づいて計算されるパラメータの値に定性的にどのような影響を与えるかを記述した「パラメータ修正規則」の組をもつ^(注4)。それらを用いて、現在のモデルにより計算されるパラメータの値 (予測) と実際の系において測定される値 (観測) とが異なるとき、適切なモデルの移行を推論することができる。パラメータ修正規則は次のように記述される。

If モデル化仮定 $assump$ が (部分的に) $assump'$ に変更されたとき、
Then いくつかのパラメータの値が定性的に変化する/
変化しない (増加/不変/減少)

これは、状況の変化により物理系のモデルが変化した場合、系のいくつかのパラメータの値が増加/不変/減少することを意味している。パラメータ修正規則を用いることで、GMW におけるマイクロワールドの移行を支援する機能を、次のように実現することができる。まず、両者に照合するパラメータ修正規則が探索される。次に、照合した規則を参照して、状況がどのように変化したときに当該のパラメータがどのような値をとるか (または変化するか) を問う MW 間タスクが、同定あるいは生成される。学習者がタスクの遂行に困難をもつとき、二つのモデルにより計算されるパラメータの値の差異とそれらのモデル化仮定の差異を関係づける説明が生成される。このようにして、マイクロワールドの移行の必要性を、学習者が誤って予

(注4): GoM では、隣接するモデルが何らかの (「一般化/特殊化」を含む)「近似」の関係にある場合のみが扱われる。

```

PC-Rule-1:
IF position( $M_1$ )  $\in$  [ $x_0, x_1$ ],  $0 < v_0 < v_0^1$ , not sweep( $[x_0, x_1]$ ) and changed( $\mu_1 < \epsilon \Rightarrow \mu_1 > \epsilon$ ) and changed(consider(等速直線運動)  $\Rightarrow$  consider(等加速度直線運動(減速運動))) and considered(摩擦プロセス)
THEN decrease(velocity( $M_1, x$ ))

PC-Rule-2:
IF position( $M_1$ )  $\in$  [ $x_0, x_1$ ] and consider(等加速度直線運動(減速運動), 摩擦プロセス) and changed( $0 < v_0 < v_0^1 \Rightarrow 0 < v_0 < v_0^2$ ) and changed( $\neg$ sweep( $[x_0, x_1]$ )  $\Rightarrow$  sweep( $[x_0, x_1]$ )) and considered(熱発生プロセス, 融解プロセス)
THEN change(friction( $M_1, ice$ ) =  $\mu_1 \Rightarrow$  friction( $M_1, ice$ ) =  $\mu_2$ ,  $\epsilon < \mu_2 < \mu_1$ ), increase(velocity( $M_1, x$ )), position( $M_1, v_1 = 0$ ))
    
```

図 3 パラメータ修正規則 (1)(2)
Fig. 3 PC-Rules (1)(2).

測した現象とマイクロワールドにおいて観測された現象の差異に基づいて説明することが可能となる。

[例 2] カーリングの例題 (2)

図 2 における GMW のパラメータ修正規則のうち、二つを図 3 に例示する。一方は MW-1 から MW-2 への移行に関するものであり、もう一方は MW-2 から MW-3 への移行に関するものである (それぞれ、[例 1] の書式に照合する production rules として記述されている)。

PC-Rule-1 を用いると、MW-1 から MW-2 への移行を促すためには、摩擦係数 μ_1 が増加したときの M_1 の速度 (の変化) について問う MW-1 の MW 間タスク (m6)-(2*) が適切であることが推論される。一方、PC-Rule-2 を用いると、MW-2 から MW-3 への移行を促すためには、氷の表面が掃かれたときの M_1 の止まる停止位置 (の変化) を問う MW-2 の MW 間タスク (m6)-(3*) が適切であることが推論される。学習者がこれらのタスクの遂行に困難をもつとき、これらの規則及びマイクロワールドに記述された情報を用いて、モデルに基づく説明が生成される。

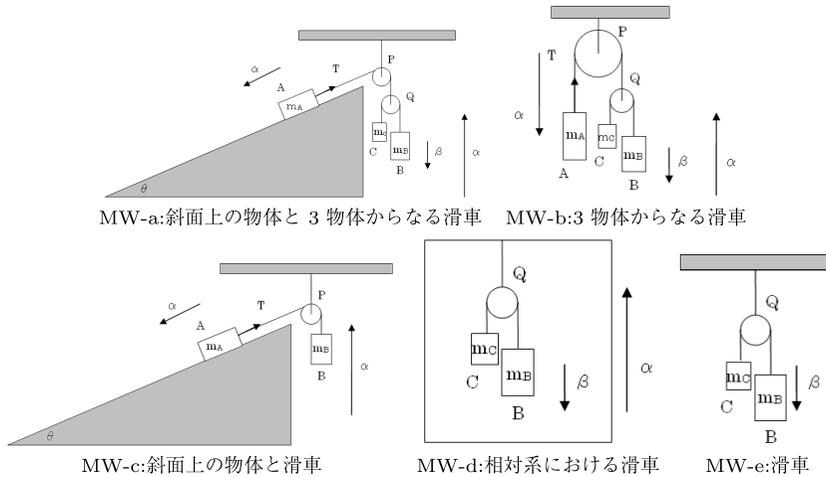
なお、パラメータ修正規則は特定のマイクロワールド間の関係に付されるのではなく、より一般的な状況の変化を対象として記述される。すなわち、個々のマイクロワールドにおける状況やタスクの記述とは独立に記述される (ただし、照合のため、両者は同じ書式に従う必要がある)。例えば、図 6 のパラメータ修正規則 PC-Rule-a は、図 5 の GMW における MW-b から MW-a への移行タスクを自動生成するために適用されるが、その条件部 (状況の変化) はこれらのマイクロワールドにおける状況 (の変化) の一部 (一つの質点が空中にある/斜面上にある) に照合しているにすぎない。換言すれば、同規則は他のマイクロワ

ールド間の関係にも適用可能な汎用性をもつものとなっている。対象領域において頻出するこのような部分的状況 (の変化) を対象とするパラメータ修正規則の組を記述しておくことで、GMW のすべてのエッジを逐一吟味することなく、MW 間タスクを自動生成することができる。

5. システムの試作

本論文で提案した枠組みを用いて複数のマイクロワールドを記述し、ICM に基づく漸進的な学習を支援するための機能をもつシステムのプロトタイプを実装した。すなわち本システムは、(1) 現在のマイクロワールドから移行し得るマイクロワールドの候補の生成、及び (2) マイクロワールドの移行を促進するための MW 間タスクと説明の生成、を行うことができる。前者は、GMW において現在のマイクロワールドに隣接するマイクロワールドの組を移行の候補とすることで実現される。更に、それらの各々と現在のマイクロワールドの目標知識の差分をとることにより、各々の移行において克服すべき課題を抽出することができる。後者は、移行前後のマイクロワールドにおけるモデル化仮定の差分に左辺が照合するパラメータ修正規則を用いて実現される。すなわち、そのような状況の変化が起こったときに右辺に記された物理量 (パラメータ) がどのように変化するかを問う MW 間タスクや、それに関する説明が自動生成される。なお、本実装では、各マイクロワールドの特徴 (m1) ~ (m6) は簡単な assertions のリスト (対象とするいくつかの例題を扱える程度の述語や関数が用意されている) として記述され、それらの差分はリスト間の差分をとることによって抽出される (差分を表す述語 (図 3, 図 6 の changed など) を用いた assertions として宣言される)。差分と照合すべきパラメータ修正規則は、その書式に従う production rules として記述される。照合した規則の右辺に現れるパラメータを含む (MW 内) タスクが移行前のマイクロワールドに存在すれば、それに規則の左辺が示す差分を条件として加えたものを、MW 間タスクとして自動生成する (タスクの問題文や説明文は、これらの assertions にそれぞれ簡単なテンプレートを適用することによって生成する)。

システムの動作を確認するため、複数のマイクロワールドからなる比較的複雑な例題 (大学入試問題レベル) を GMW を用いて記述するとともに、パラメータ修正規則を併せて記述し、その記述に基づいて



MW-a:斜面上の物体と3物体からなる滑車 MW-b:3物体からなる滑車

MW-c:斜面上の物体と滑車 MW-d:相対系における滑車 MW-e:滑車

図4 システムで扱うマイクロワールド群
Fig. 4 MicroWorlds.

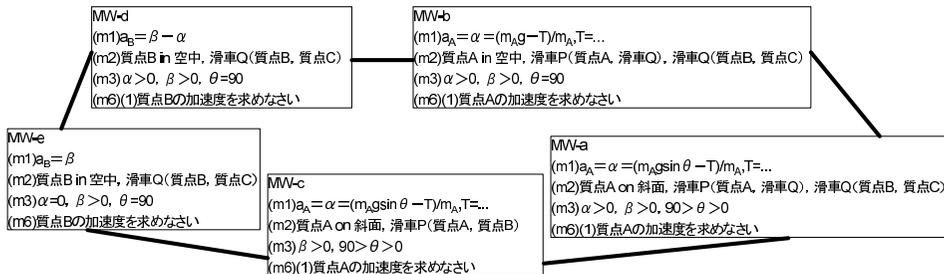


図5 システムで扱うマイクロワールドグラフ
Fig. 5 Graph of MicroWorlds.

PC-Rule-a:
IF changed((質点1 in 空中=>質点1 on 斜面) and change($\theta=90 \Rightarrow 90 > \theta > 0$)
THEN decrease(加速度(質点1))

PC-Rule-b:
IF 滑車1(オブジェクト1, オブジェクト2), changed($\alpha=0 \Rightarrow \alpha > 0$)
THEN change(相対加速度(オブジェクト1)=0 => 相対加速度(オブジェクト1) > 0), change(相対加速度(オブジェクト2)=0 => 相対加速度(オブジェクト2) > 0),
decrease(加速度(オブジェクト1)), decrease(加速度(オブジェクト2))

図6 パラメータ修正規則 (a)(b)
Fig. 6 PC-Rules (a)(b).

MW-b→MW-a
(MW間タスク MW-b:(m6)-(2*)) 空中にある質点Aが, 斜面上に配置された場合の, 質点Aの加速度を求めなさい(→MW-a:(m6)-(1))
(説明) 空中にある質点Aが, 斜面上に配置される事により, 質点Aの加速度が, $(m_A g - T)/m_A$ から $(m_A g \sin \theta - T)/m_A$ へと変化(減少)する.

MW-e→MW-d
(MW間タスク MW-e:(m6)-(2*)) 滑車Qの加速度 $\alpha > 0$ のとき, 質点Bの加速度を求めなさい(→MW-e:(m6)-(1))
(説明) 質点B, 質点Cをつるしている滑車Qの加速度 α が0から正になることにより, 質点Bの相対加速度 $\alpha > 0$ になり, 質点Cの相対加速度 $\alpha > 0$ になり, 質点Bの加速度が β から $\beta - \alpha$ へと変化(減少)する.

図7 出力結果 (1)
Fig. 7 Outputs (1).

あるマイクロワールドからの移行先の候補と, 各々についての MW 間タスク及び説明を生成させた. 図4にシステムで扱った状況を示し, 図5^(注5)に各マイクロワールドの記述と隣接関係を記述した GMW を示す. また, 図6にパラメータ修正規則の一部を示す.

以上の内容をシステムに入力した結果, 出力された MW 間タスクとそれらの説明を図7に例示する.

例えば MW-b から MW-a へ移行する場合, 両者における状況の差異は, 質点 A が空中に存在するか斜面上に存在するかである. この差異は質点 A の加速度の値に影響するが, 学習者がそれに気づかず MW-b に

(注5): a_A, a_B は, それぞれ質点 A の加速度, 質点 B の加速度である. 滑車 Q の加速度は α である.

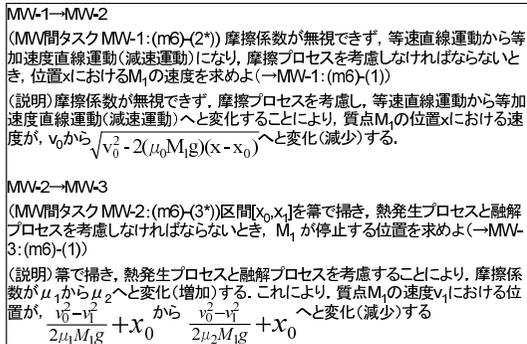


図 8 出力結果 (2)
 Fig. 8 Outputs (2).

において習得した解法をそのまま MW-a で実行する可能性がある。したがって、このような状況の変化に伴う質点 A の加速度の変化を問うタスクを、MW 間タスクとして提示することが望まれる。このとき、システムは確かに、この状況の差異に照合する PC-Rule-a を用いて、モデル化仮定（及びモデル）が変化した結果質点 A の加速度が減少するという情報を取得し、そのことを問う MW 間タスクを生成しており、更に、モデルとその振舞いの変化に関する説明を、この情報に基づいて生成していることが図 7 より分かる。同様に MW-e から MW-d に移行する場合は、PC-Rule-b に基づき、滑車が加速度をもたない場合かつ場合かの差異が影響する A の加速度の値の変化を問うタスクを、MW 間タスクとして提示し、モデルとその振舞いの変化に関する説明を生成していることが分かる。

一方、[例 1, 2] の例題における GMW の記述（図 2）及びパラメータ修正規則（図 3）をシステムに入力した結果、出力された MW 間タスクとそれらの説明を図 8 に例示する。この場合においても、抽出されたマイクロワールド間の状況の差異に照合するパラメータ修正規則に基づいて、それぞれの状況の変化に伴うパラメータの変化を問う MW 間タスク及びモデルとその振舞いの変化に関する説明を、適切に生成していることが分かる。

これらの結果から、GMW の枠組みを用いてマイクロワールドの組及びそれらの間の関係を記述することで、各々の移行において克服すべき課題を抽出してタスクとして提示する機能、及びそれに関するモデルに基づく説明を生成する機能を実現できることが確認された。

6. むすび

本論文では、SLE におけるマイクロワールドの適応的制御を指向して、(1) 移行という観点からマイクロワールド及びそれらの間の関係を記述する枠組みであるマイクロワールドグラフ (GMW) を提案し、その枠組みに基づいて、(2) マイクロワールド間の移行に伴って克服すべき課題の抽出とその習得の支援機能 (MW 間タスク及びモデルに基づく説明の生成) を実現するための一手法を提案した。本手法により、ICM に基づく SLE における高度な個別学習支援が可能になると期待される。

本論文の成果は、要求される機能を明確にした上で必要な知識の記述の枠組みを与え、その実現手法を具体化した点にある。GMW の記述は人間が行う必要があるが、その枠組みに従う限り、マイクロワールド間の関係を（アドホックな記述によるのではなく）組織的に取り出すことができる。GMW に基づくものと同様の振舞いをするシステムを一つのマイクロワールドとして実装することは可能であるが、その場合、対象となる教材の規模が大きくなるにつれ、教材・教授にかかわる多くの知識や推論規則（モデルやパラメータの切替規則を含む）を、互いの整合性をとりながら記述することは困難となる。これに対し、GMW ではこれらを複数のマイクロワールドとしてセグメント化することにより、個々のマイクロワールドやそれらの間の関係を比較的単純な記述とすることができ、記述者の負荷が軽減される。[例 1, 2] や 6. の例題に示したとおり、モデル化仮定やパラメータ修正規則によるモジュール性の高い記述を用いることで、記述すべき知識の一部（MW 間タスクやその説明）が自動生成可能となることから、このことが示されていると考える。

しかし、このように一定程度の負荷が軽減されてもなお、実際に GMW 及びパラメータ修正規則を記述することは少なくない労力を必要とする。このため、その支援法の検討が今後の課題となる。現在、個々のマイクロワールドとそれらの基盤となる GoM とを分離して記述する方法 [22] や、オーサと対話しながら MW 間タスク生成のための情報を補完する手法 [23] などの検討を行っている。一般に、GoM 及びパラメータ修正規則の記述を自動化することは難しいが [19]、モデル間の関係が限られた形式をもつときに後者を自動生成する手法は存在する [24]。今後、これらの手法の導入も含めて検討していく予定である。

文 献

- [1] M.D. Merrill, "Instructional transaction theory (ITT): Instructional design based on knowledge objects," in *Instructional-Design Theories and Models vol.II: A New Paradigm of Instructional Theory*, ed. C.M. Reigeluth, pp.397-424 (Chap. 17), Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1999.
- [2] D.M. Towne, *Learning and Instruction in Simulation Environments*, Educational Technology Publications, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- [3] D.M. Towne, T. de Jong, and H. Spada, (eds.), *Simulation-Based Experiential Learning*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.
- [4] E. Wenger, *Artificial Intelligence and Tutoring Systems: Computational and Cognitive Approaches to the Communication of Knowledge*, Morgan Kaufmann, 1987.
- [5] R.R. Burton, J.S. Brown, and G. Fischer, "Skiing as a model of instruction," in *Everyday Cognition: Its development in social context*, ed. B. Rogoff and J. Lave, Harvard Univ. Press, 1984.
- [6] G. Fischer, "Enhancing incremental learning processes with knowledge-based systems," in *Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems*, ed. H. Mandl and A. Lesgold, Springer-Verlag, 1988.
- [7] B. White and J. Frederiksen, "ThinkerTools: Causal models, conceptual change, and science education," *Cognition and Instruction*, vol.10, pp.1-100, 1993.
- [8] B. White and J. Frederiksen, "Causal model progressions as a foundation for intelligent learning environments," *Artif. Intell.*, vol.42, pp.99-157, 1990.
- [9] K. Opwis, "The flexible use of multiple mental domain representations," in *Simulation-based experiential learning*, ed. D. Towne, T. de Jong, and H. Spada, pp.77-90, Springer, Berlin/New York, 1993.
- [10] J. Frederiksen and B. White, "Conceptualizing and constructing linked models: Creating coherence in complex knowledge systems," in *The Role of Communication in Learning to Model*, ed. P. Brna, M. Baker, K. Stenning, and A. Tiberghien, pp.69-96, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 2002.
- [11] J. Frederiksen, B. White, and J. Gutwill, "Dynamic mental models in learning science: The importance of constructing derivational linkages among models," *J. Research in Science Teaching*, vol.36, no.7, pp.806-836, 1999.
- [12] A. Collins and D. Gentner, "Multiple models of evaporation processes," *Readings in qualitative reasoning about physical systems*, pp.508-512, 1989.
- [13] A.L. Stevens and A. Collins, "Multiple models of a complex system," in *Aptitude, Learning, and Instruction (vol.II)*, ed. R. Snow, P. Frederico, and W. Montague, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1980.
- [14] K.E. Maani and V. Maharaj, "Links between systems thinking and complex decision making," *System Dynamics Review*, vol.20, no.1, pp.21-48, 2004.
- [15] M. Raubal and M. Worboys, "A formal model of the process of wayfinding in built environments," *Proc. COSIT'99*, pp.381-399, 1999.
- [16] D.E. Howie and K.J. Vicente, "Measures of operator performance in complex, dynamic microworlds: Advancing the state of the art," *ERGONOMICS*, vol.41, no.4, pp.485-500, 1998.
- [17] B. Falkenhainer and K.D. Forbus, "Compositional modeling: Finding the right model for the job," *Artif. Intell.*, vol.51, pp.95-143, 1991.
- [18] T. Horiguchi and T. Hirashima, "Graph of microworlds: A framework for assisting progressive knowledge acquisition in simulation-based learning environments," *Proc. AIED2005*, pp.670-677, 2005.
- [19] S. Addanki, R. Cremonini, and J.S. Penberthy, "Graphs of models," *Artif. Intell.*, vol.51, pp.145-177, 1991.
- [20] S. Addanki, R. Cremonini, and J.S. Penberthy, "Reasoning about assumptions in graphs of models," *Proc. IJCAI-89*, pp.1432-1438, 1989.
- [21] T. Horiguchi and T. Hirashima, "A simulation-based learning environment assisting scientific activities based on the classification of 'surprisingness'," *Proc. ED-MEDIA2004*, pp.497-504, 2004.
- [22] 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋 宗, "マイクロワールドグラフにおける移行タスクとその自動生成," *教育システム情報学会第31回全国大会講演論文集*, pp.437-438, 2006.
- [23] 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋 宗, "マイクロワールドグラフにおける移行タスク自動生成システムの構築," *人工知能学会全国大会(第21回)論文集*, 2007.
- [24] D. Weld, "Approximation reformations," *Proc. AAAI-90*, pp.407-412, 1990.

付 録

物理の問題解決に関する用語

問題は、ある具体的な物理系（対象系）とその境界条件、及び対象系のどのような振舞いに注目するかを指定した質問の組として与えられる（前二者を合わせてシナリオと呼ぶ）。問題が与えられると、質問への解を得るために十分なモデルを、領域理論の適切な部分集合を具体化することによって生成する。モデルは、対象系に含まれる属性の間に成り立つ制約の集合である。

領域理論からモデルを生成する際、問題によって決まる種々のモデル化仮定が用いられる。モデル化仮定は、対象系をモデル化する際の視点や粒度、考慮すべき空間的・時間的範囲や系の動作範囲などを規定するものであり、具体化された制約が有効であるための条件を表す。

対象系（またはそのモデル）の各属性がある時刻にある値をとっていることを系の状態といい、あるシナリオにおいて系がある状態をとっていることを状況という。一般に、シナリオの摂動や系の状態変化により状況が変化すると、モデルすなわち制約集合（の一部）が変化することがある。このとき、変化する制約に対応して、対象系に適用される領域理論（の部分集合）及びモデル化仮定が変化する。

マイクロワールド (microworld: MW) は、対象系の一つのモデルと、それを学習するために行うべきタスクとを含む（後者は上記の質問に相当する）。タスクには、当該のモデルを用いて解が得られるものと、指定された状況の変化に伴い別のモデルが必要となるものがある。前者を MW 内タスク、後者を MW 間タスクと呼ぶ。

（平成 19 年 4 月 6 日受付，8 月 24 日再受付）



平嶋 宗（正員）

1986 阪大・工卒，1991 同大大学院博士課程了，同年大阪大学産業科学研究所助手，1996 同講師．1997 九州工業大学情報工学部助教授，2004 より広島大学大学院工学研究科教授．人間を系に含んだ計算機システムの高度化に興味をもっており，特に知的学習支援システムの研究に従事している．工博．人工知能学会，情報処理学会，教育システム情報学会，日本教育工学会，日本教育心理学会等各会員．



東本 崇仁（学生員）

2003 九工大・情報工学卒．2005 同大大学院情報工学研究科博士前期課程了．現在，広島大学大学院博士後期課程在学中．既習の公式を用いた間接測定を学習者に要求する実験を対象とした学習支援環境の研究，学習者の漸進的学習を支援するための適応的な実験系列の提供を可能にするマイクロワールドグラフの自動構築手法の研究，学習者自身に問題を作成させる作問学習の知的支援システムの研究に従事．



堀口 知也（正員）

1987 早大・理工・電気卒．1989 同大大学院理工学研究科修士課程了．1997 大阪大学大学院工学研究科博士課程了．同年，神戸商船大学講師．2001 同助教授．2003 神戸大学海事科学部助教授．工博．知識工学の教育応用に興味をもち，知的学習支援，情報可視化システムの研究に従事．1996 年度人工知能学会研究奨励賞，2002 年度人工知能学会研究会優秀賞受賞．情報処理学会，教育システム情報学会，日本教育工学会，日本認知科学会，日本教育心理学会，IAIED 各会員．