

# 段階的外化表現を利用した力学での問題理解に関する支援

## Support for Problem Understanding in Physics Problems by Using of Incremental External Expression

篠原 智哉<sup>\*1</sup>  
Tomoya Shinohara

山元 翔<sup>\*1</sup>  
Sho Yamamoto

平嶋 宗<sup>\*2</sup>  
Tsukasa Hirashima

<sup>\*1</sup> 広島大学大学院工学研究科学習工学研究室  
Learning Engineering Laboratory, Graduate School of Engineering, Hiroshima University

<sup>\*2</sup> 広島大学 大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Hiroshima University

When support learner's solving of problem, to diagnose errors in his/her solving process is important. One of the ways to realize such support, externalization of learner's understandings is thought. If it is possible to diagnose the externalized expression, it can be expected to support the learner more effectively and adaptively about errors or lacking points included in learner's solving process. In this study, we devised a model of problem solving at a mechanics word problem as a concrete example, and attempt to realize an automatic diagnosis function of the externalization express. We have already developed a prototype system supports learners based on the model, and in this paper describe results of a preliminary use of the system.

### 1. はじめに

問題の解決過程には、問題を構造化し適切な解法を同定する「問題理解の過程」と、同定された解法を実行する「解法実行の過程」があるとされている[Polya 1957]。問題解決を行う学習者への支援の際、これら過程に誤りがあるか、またどこでどのように誤ったかを判断することが重要であるが、それらを学習者の解答から直接的に得ることは困難であるといえる。

このような困難さへの対処法の一つとして、学習者に自分の考えを図や文章などで記述させる「理解の外化」[松井 1997]があり、また記述されたものを外化表現と呼ぶ。外化表現には学習者の問題解決の過程が具体的な記述として現れるため、そこに含まれる誤りを診断することで、学習者の学習上の不十分な点や間違っただ点に対するより効果的で適応的な学習支援が可能になると期待できる。また、この外化活動自体が学習者に自身の問題解決への認識を促し、より深い学習へのつながるという効果も期待される。

このような外化による学習支援の一つとして、算数・数学の文章題での立式支援システムに関する研究が行われている[中川 2010]。この研究では、立式過程の段階的なモデル化と、それぞれの過程での「言葉の式」を利用した外化により、問題解決過程での誤りを明確化し、支援することを目指している。

本研究では、力学問題を対象とした外化による支援の試みとして、同問題の解決に対する段階的なモデル化と、このモデルに基づく学習支援システム的设计・開発を行った。

以下、本稿では、第 2 章において、先行研究での支援における「言葉の式」の特徴やその利用について詳しく述べ、第 3 章ではこの支援方法の力学への適用におけるモデルの変更点を提案する。第 4 章では新しいモデルの定義とその説明を行い、第 5 章ではこのモデルを利用した支援システムについて述べる。また、第 6 章ではこのシステムを利用した評価実験について説明し、最後に全体をまとめ、今後の課題・展望について述べる。

### 2. 「言葉の式」の定義

「言葉の式」とは、数量を言語で、関係を演算子で表した言語的表現と記号的表現の中間表現であり、算数・数学教育においては、計算式中の数量を言葉に置き換えたものというかたちで広く用いられている。中川らはこの「言葉の式」をその特徴から階層的な構造を持つものとして捉え、

1. 問題中に現れる属性値を表す言葉をリーフ(葉)とする
2. 葉となることばを演算関係で結び付けることで生まれる数値、さらにそれら数値を演算関係で結び付けることで生まれる数値に対応する言葉を中間のノードとする
3. ルート(根)は問題自体を表す
4. ルートの子ノードはそれぞれ問題を解決する式の左辺と右辺を表す言葉である

という構造を持つ“階層的「言葉の式」表現”(図 1)として定義している。図 1 にその例を示す。中川らは、問題に対してこの“階層的「言葉の式」表現”を用意し、その表現を部品化したうえで学習者に与え、組み立てさせることで立式の支援を行っている。

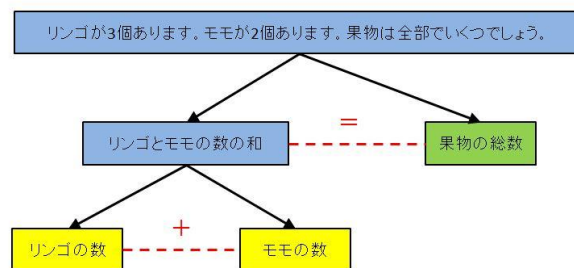


図 1: “階層的「言葉の式」表現”の例

### 3. 力学の問題における解決モデル

本章では、異なる問題分野の一例として力学の問題を取り上げ、先行研究での支援方法[中川 2010]の他の問題分野への応用可能性について分析・考察する。

### 3.1 解法同定を目的とした問題の構造化とその支援

平嶋らは[平嶋 1992], 問題の解決過程を, 「問題理解の過程」と「解法実行の過程」の二つで捉えたいうで, 問題理解の過程を実質的に解法の選択に必要な問題の表層を生成する過程であるとし, この生成を「問題の構造化」と表現している。

中川らは[中川 2010], 立式という解法の同定に対し, 「階層的「言葉の式」表現」を段階的に生成させ, その過程を外化させることで, 支援を実現している。すなわち, 先行研究では, 「階層的「言葉の式」表現」を利用した算数・数学の文章題での問題の構造化, 及びその過程の外化・診断による支援が行われていると考えられる。

### 3.2 “階層的「言葉の式」表現”を利用した構造化の適用

「言葉の式」での立式支援の他の問題分野への応用を考える際, その支援内容より, 対象となる問題は, 同様の「階層的「言葉の式」表現」を利用した構造化が可能である必要がある。先行研究[中川 2010]においては, 「言葉の式」について, 「それぞれの言葉は, 2 つ(以上)の言葉とその間の演算記号によって表す」ものとし, それら言葉によって問題を階層的に構造化している。

このような構造化の可能性が見られる問題分野として, 物理・力学での立式による解決を行う問題が考えられる。この分野においては, 例えば「重力」が「質量」と「重力加速度」の乗算で求められる, といったような問題中の数量関係を用いれば, その問題を「階層的「言葉の式」表現」として構造化可能であると考えられ, またこの構造化内での「言葉の式」は先行研究における「言葉の式」と同様の特徴を持つといえる。そのため, 力学問題は「階層的「言葉の式」表現」による構造化の適用可能分野のひとつであると考えられる。

### 3.3 支援方法の応用

ここでは, 力学の問題に対し, 先行研究での支援方法が直接適用可能であるかを考える。

「階層的「言葉の式」表現」の組み立てにより, 学習者は, 数量関係の階層的な構成として問題の構造化を捉えることが可能であると考えられる。しかしながら, この構造化内に用いられる数量関係は, その問題が対象とする状況に存在する数量関係の一部であると考えられ[平嶋 1995], どの数量関係を用いる必要があるかを捉える必要があるといえる。そのために学習者は, 問題中の要素の内, 問題解決に必要なものを選別する必要があるといえる。また, 必要な要素は問題記述の内容から判断されるが, そのために学習者は, 問題の記述内容を正確に捉えている必要があるといえる。

上のような二点について,

- 学習者が捉えた問題記述の内容の外化とその診断
- 必要な数量関係の決定のための要素の選別, 及びその外化と診断

といった支援が考えられるが, 先行研究[中川 2010]での支援においてこれらは行われていなかった。そこで, 本研究では, 前述の問題解決過程モデルにこれら二点を追加することで, 力学の問題へ適用可能な問題解決過程モデルを提案する。

### 3.4 力学問題での問題解決過程モデル

本研究では, 前節で述べた 2 つの操作を先行研究での問題解決過程モデルに追加することで, 「表層構造生成過程」「表層構造変換過程」「立式過程」の三過程から成る問題解決過程モデルを提案する。

「表層構造生成過程」では, 問題中に明示されるオブジェクト, 属性, 関係を利用し, 問題記述の内容を表現する「表層構造」を生成する。「表層構造変換過程」では, 表層構造に変換操作を行い, 立式を行う上で必要な数量関係によって構成された「階層的「言葉の式」表現」を組み立てる。「立式過程」では, 組み立てられた「階層的「言葉の式」表現」より, 目的となる式を立てる。

このような問題解決過程モデルの利用により, 力学の問題に対する「言葉の式」を用いた立式支援を行う。

## 4. 力学の問題への適用

本章では, 新しいモデルに関して, 力学における「力の釣り合い」分野の問題を例に, 各過程におけるより具体的な定義と操作について述べる。

### 4.1 適用する分野

本研究での問題解決過程モデルは, 力学問題での支援を目的とするものであるが, 同分野における問題は種類により性質・特徴が異なると考えられる。そのため, それら全てへの対応に関しては, その断定は容易ではない。そこで, 本研究内においては「力の釣り合い」分野に関する適用を行うことによる, 問題解決過程モデル自体の説明, 及び正当性に関する確認のみにとどめる。なお, 適用可能範囲に関する考察については, 今後の研究における重要な課題の一つであると考えられる。

### 4.2 表層構造の生成過程

本研究における問題解決過程モデルでは, 表層構造として, 問題中に明示された, オブジェクト, オブジェクトの持つ属性, オブジェクト間の関係を要素とする, 意味ネットワーク形式での表現を利用する。「オブジェクト」は, 問題中に見られる物理的オブジェクトのうち, 運動の対象と定義する。「属性」は, オブジェクトに関する情報であり, 具体的な値を持つものとする。「関係」は, オブジェクト間の関連を表す。

表層構造生成過程では, 上のような定義に基づき, 問題記述の内容を表現する表層構造を生成し, 外化する。このような操作により, 学習者は, 問題中の要素とそれらの繋がりととして, 問題記述の内容を捉えることが出来ると考えられる。また, この外化表現に対する診断を行うことで, 学習者が問題記述内容を捉えるうえでの支援を行うことが出来ると考えられる。

### 4.3 表層構造の変換過程

#### (1) 段階的な表層構造の変換操作

本研究での問題解決過程モデルでは, 表層構造に対し, オブジェクトの選定, 属性の選定, 「階層的「言葉の式」表現」の組み立てという 3 つの段階を持った変換を行うことで, 「階層的「言葉の式」表現」を生成する。

「オブジェクトの選定」では, 問題で対象とする力の釣り合いの発生しているオブジェクトを選ぶことにより, 表層構造を不要なオブジェクト, それらに付随する属性, 及び関係が除去された構造へと変換する。以下, このように変換された構造を「オブジェクト決定構造」と呼び, またこの変換段階を「オブジェクト決定段階」と呼ぶ。

「属性の選定」では, 主体決定構造内の属性に対し, それらが必要か否かを決定することで, 主体決定構造を, 立式において必要な属性が決定された構造へと変換する。以下, このように変換された構造を「属性決定構造」と呼び, またこの変換段階を「属性決定段階」と呼ぶ。

「階層的「言葉の式」表現」の組み立て」では、属性決定構造内において必要とされている属性を最下層の言葉とし、「階層的「言葉の式」表現」を組み立てる。以下、この変換段階を「階層的「言葉の式」表現」組立段階と呼ぶ。

以上のような段階的な操作により、学習者は、「階層的「言葉の式」表現」を組み立てる。

## (2) 表層構造の変換による学習者への意識付け

力とは、その大きさ、向き、作用点の三要素によってその効果が定まるとされており、これらについて正しく知ったうえで力を表現することが出来ることは、すなわち力を捉えたうえで表現であると考えられる。

ここで、本研究での問題解決過程モデルにおける学習者への意識付けについて考える。まず、オブジェクト決定段階においては、何に対する力の釣り合いを考えるか、という形で、問題において対象とする力の「作用点」を捉えることが出来ると思われる。また、「階層的「言葉の式」表現」組立段階においては、力の「向き」、及び計算式としての「大きさ」を捉えられると考えられる。つまり、この段階的な操作に「階層的「言葉の式」表現」を組み立てることで、学習者は力について捉えることが出来ると思われる。

## 4.4 立式過程

この過程においては、組み立てた「階層的「言葉の式」表現」に対し、最下層の「言葉」に問題中の対応する属性値を、さらにその上位の言葉に式をそれぞれ適用することで、最終的な目的となる式を立てる。

## 5. システム

### 5.1 システム概要

本研究にて提案する問題解決過程モデルに従った学習活動の実現の際、診断を行う教授者側への負担が考えられる。そこで、本研究ではモデルに従った問題解決とその各段階での学習者の外化活動の補助、及びそこで示された外化表現に対する診断による支援を行うシステムの設計・開発を行っている。

システム上において学習者は、モデルでの「表層構造の生成」「表層構造の変換」「立式」といった操作を行い、またその結果を外化する。システムは、その外化表現を診断し、誤りがあれば指摘を行う。

ここで、学習者による外化の際、学習者が用いる「言葉」の違いにより、システムでの診断が困難になるという問題が考えられる。そこで、本研究でのシステムにおいては、各外化表現の生成に対し、Kit-Build方式[平嶋 2009, 福田 2009]を用いることで、用いる「言葉」を統一させ、システムによる診断を実現している。

### 5.2 システム使用の流れ

システムでの演習では、まず「表層構造生成過程」として、学習者には解くべき問題、及びキット化された表層構造が与えられる。学習者は、このキットを操作し、表層構造を生成する。その後、システムによる診断が行われ、誤りがあれば指摘される。また、誤りがなければ表層構造変換過程へと進む。

「表層構造変換過程」において、学習者は、モデルに従った表層構造への変換操作を行う。変換の各段階において、システムによる診断が行われ、誤りがあれば指摘が行われる。また、誤りがなければ段階が進み、最終的に「階層的「言葉の式」表現」が組み立てられる。

「立式過程」においては、組み立てられた「階層的「言葉の式」表現」中の「言葉」に対応する式を適用することで、最終的な目的となる式を立てる。システムは、式の適用、及び立てた式に対する診断を行う。この目的の式を立てるまでがモデル、及びシステムでの支援内容である。

## 5.3 システムインタフェース

ここでは、開発したシステムについて、実際の画面を示して説明する。以下に、システム使用中の画面(図2)を示す。

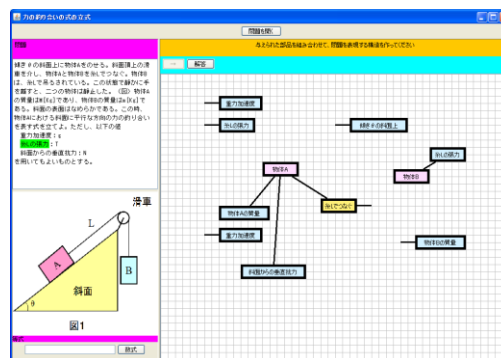


図2:システムインタフェース

画面左部分は、問題提示領域となっており、学習者が現在取り組んでいる問題はここに示される。また、問題の選択は、画面上部の「問題を開く」ボタンを押すことで行われる。

画面右部分は、作業領域である。問題解決中の操作は、この領域内にて行われる。また、各段階での診断については、作業領域上部の「解答」ボタンを押すことで行われる。また、最終的な目的となる式は、画面左下の入力欄にて解答する。

## 6. 評価実験

本研究では、システム利用での演習による評価実験を行った。主な評価点は、提案するモデルの妥当性、モデルに従った演習の有用性、システムの操作性や機能の十分さ等である。評価は、プレ・ポストテストの得点、及びアンケートによって行った。

### 6.1 実験方法

今回の実験では、工学系課程を専攻しており、力学問題の学習経験のある大学生6名を対象としている。まず、被験者にはプレテストとして、一般的な力学問題を解いてもらった。そのあと、システムによる問題演習を行ってもらい、ポストテストとして再び力学の問題を解いてもらった。ポストテストの終了後、アンケートに回答してもらった。

### 6.2 プレ・ポストテスト

#### (1) 問題内容

プレ・ポストテストでは、一般的な問題演習などで用いられる、立式を行うことで目的の値を求める力学分野の問題を用い、二段階でのテストを行った。まず初めに、提示した問題を解いてもらった。この際、問題解決中に使用した式、及びそれら式に対する出来るだけ詳しい説明を、すべて記述するよう指示した。以下、ここまでを問題前半と呼ぶ。続いて、問題中に存在する力について、それぞれがどのような力であるかをできるだけ詳しく説明させた。この部分を問題後半と呼ぶ。

テストで用いた問題は、プレ・ポストそれぞれ2問である。うち1問は、プレ・ポストに共通するものであり、システム演習でも用

いている。残りの問題はプレ・ポストにて異なっており、システム演習でも同じ問題は利用していない。以下、共通する問題を問題 A、共通しない問題の内プレテストで用いたものを問題 B、ポストテストで用いたものを問題 C と呼ぶ。

## (2) 評価方法

問題前半においては、問題解決中に必要と考えられる式をどれだけ記述できているか、またその式を用いた目的が正当であったかを評価した。ここで、必要な式とは、提案する問題解決過程モデルでの“階層的「言葉の式」表現”にて表されるすべての数量関係であり、これらを捉えることが問題の構造化において必要であると考えられる。

問題後半においては、それぞれの力に対し、その三要素を記述できているかを評価した。

## 6.3 実験結果

### (1) 問題前半

使用した問題 A に対し、プレテストにおいては、6 名の被験者中 4 名が正解を示しており、ポストテストにおいては全員が正解を示していた。また、問題 B、C はともに全ての被験者が正解を示した。そこで、プレテストでの問題 A の正解者群(以下、被験者 A~D)と不正解者群(以下、被験者 E、F)に被験者を分け、結果を分析した。

正解者群に関しては、問題 A に関し、プレテストとポストテスト間において、記述された式の数、及び目的まで正しく記述できた式の数について、有意差は認められなかったが、記述された式の数に関する上昇の有意傾向( $p=0.18>0.10$ , 両側検定)、及び目的まで記述された式の数に関する上昇の有意傾向( $p=0.25>0.10$ , 両側検定)が見られた。また、プレテストとポストテストそれぞれ二問を通しての記述された式の割合、及び目的まで記述できた式の割合についても、有意差は現れなかったが、上昇が有意傾向として見られた。(記述された式の割合:  $p=0.12>0.10$ , 目的まで記述された式の割合:  $p=0.14>0.10$ )

不正解者群に関しては、問題 A に関し、システムでの演習後には、全員が正解を示すようになった。プレテストとポストテスト間での記述された式の数、及び目的まで正しく記述できた式の数については、有意差は認められなかったが、記述された式の数に関する上昇の有意傾向( $p=0.15>0.10$ , 両側検定)、及び目的まで記述された式の数に関する上昇の有意傾向( $p=0.15>0.10$ , 両側検定)が見られた。また、これら式数の平均は、プレテストにおいては正解者群を下回っていたが、ポストテストでは同程度まで上昇していた。プレテストとポストテストそれぞれ二問を通しての記述された式の割合、及び目的まで記述できた式の割合については、増加について、有意差は見られなかったが、有意傾向が見られた。(記述された式の割合:  $p=0.80>0.10$ , 目的まで記述された式の割合:  $p=0.37>0.10$ )

### (2) 問題後半

問題後半にて記述させた力の三要素について被験者全体を比較したところ、「作用点」に関しては、システム演習の前後でプレ・ポストテストそれぞれ二問を通して記述された割合に有意差が認められた。(|t|=3.18>2.57, 両側検定)一方、「大きさ」「向き」が記述された割合に関しては、有意差は認められず、有意傾向も見受けられなかった。(大きさ:  $p=0.06<0.10$ , 向き:  $p=0.09<0.10$ )

### (3) アンケート

アンケート結果より「モデルにて使用した表層構造の適切さ」「主体の意識」「必要な属性の意識」「問題の変換の立式におけ

る有用性」などの点において、肯定的な意見が得られた。一方で、システムからのフィードバックについては、否定的な意見が多く見られた。

## 6.4 考察

問題前半の結果より、システム使用前のテスト結果によらず、問題解決中に記述された式の数、同程度まで上昇した。このことから、システムでの演習により、問題の構造を捉えたうえでの解決が促されているという点で、ある程度の効果が考えられる。また、問題後半の結果より、力の三要素の内「作用点」を捉えたうえでの問題解決が促されていると思われる。この力の三要素という点については、アンケート結果から、被験者への意識付けという形で効果も見受けられる。

一方で、アンケート結果より、システムからのフィードバックに関する十分さについて、否定的な意見が多く見られた。この点に関しては、システムの機能向上という形で、改善する必要があると考えられる。

## 7. まとめ

今回の研究においては、力学問題を対象とし、その理解過程の外化及び診断・フィードバックを行うシステム的设计・開発を行った。

実験結果より、現時点では、学習者による理解の外化が可能であること、またその表現のシステムでの診断が可能であることが確認されたといえる。今後は、提案する外化モデル、及びそこで得られる外化表現に対する診断・フィードバックの妥当性・有用性に関する考察を行う必要性が考えられる。また、本システムの使用による学習効果をその測定方法も含めて明らかにすることが必要であると考えられる。そのために、今回の使用から明らかになったシステム上の問題点の改善、及び改善したシステムの実践的利用を予定している。

## 参考文献

- [平嶋 1992] 平嶋宗, 中村祐一, 池田満, 溝口理一郎, 豊田順一: ITS を指向した問題解決モデル MIPS, 人工知能学会誌 Vol.7 No.3, 社団法人人工知能学会, 1992.
- [Polya 1957] Polya,G: How to solve it, Princeton University Press, 1957.
- [松井 1997] 松井紀夫, 柏原昭博, 平嶋宗, 豊田順一: 多重外化表現を用いた自己説明支援について, 電子情報通信学会技術研究報告. AI,人工知能と知識処理 96, 社団法人電子情報通信学会, 1997.
- [中川 2010] 中川和之, 平嶋宗, 舟生日出男:「言葉の式」の階層的な外化による算数・数学の文章題に対する立式支援, 先進的学習科学と工学研究会 58, 人工知能学会, 2010.
- [平嶋 1995] 平嶋宗, 東正造, 柏原昭博, 豊田順一: 補助問題の定式化, 人工知能学会誌 10, 社団法人人工知能学会, 1995.
- [平嶋 2009] 平嶋宗: 作問学習のモデル化, 第 23 回人工知能学会全国大会, 2009.
- [福田 2009] 福田裕之, 山崎和也, 舟生日出男, 平嶋宗: Ki-Build 方式による概念マップのインタラクティブ化, 先進的学習科学と工学研究会 55, 出版社, 2009.