

**問題理解過程の外化・修正支援環境の設計・開発  
—初等力学を事例として—**

**(Design and Development of Support Environment  
for Externalization and Remediation of Problem  
Understanding Phase –Case Study of Elementary  
Dynamics and Mechanics–)**

しのはら ともや

篠原 智哉

2016 年 01 月

広島大学大学院工学研究科

## 内容梗概

「人の思考」を何らかの目的を持った「情報に対する操作」と捉えることは、人工知能や認知科学における最も重要な作業仮説の一つとなっている。人の思考を情報に対する操作であると捉えると、その情報を可視化し、人によって操作可能なものとするのは、通常は明確ではない人の思考を明確にし、促進することに対する極めて有力なアプローチとなる。本研究は、情報の可視化・操作可能化という情報工学技術による人の思考の促進の可能性を教育・学習の領域で探究したものと位置付けることができる。

教育・学習においては、学習者が知識を与えられる教授の段階と、与えられた知識を使ってみることで知識の定着を図る演習の段階の二つに分けることができるとされる。このうちの演習の段階においては、学習者は教授された知識を用いる問題を与えられ、それを解くという問題解決演習が行われることが多い。この問題解決演習における問題解決の過程はさらに、問題を解くのに必要な解法を同定するための問題を理解する過程（問題理解過程）と、同定した解法を用いて実際に解く過程（解決実行過程）、の二つに分けられる。これらのうち、解決実行過程は、実際に解法を実行する過程であるといえ、実行可能な解法が定式化済みであり、またその記述形式も確立されているため、比較的扱いやすく、既に支援に関する多くの研究が行われている。これに対して、問題を理解する過程に関しては、その理解過程のモデル化から始める必要があり、いまだにその過程の支援に関する十分な研究が行われているとは言えない。また、問題解決の難しさの多くがこの理解の過程に存在するという指摘も多くの研究によってなされている。

本研究はこの理解過程を、解法同定のための思考、つまり情報の操作過程であると捉えた上で、学習者に対して操作対象となる情報を可視化することによる、操作可能化を試みたものである。このように学習者に対して情報を可視化し操作可能にすることを、教育・学習の文脈においては「外化」という言葉を用いて指すことも多く、本研究でも外化と呼ぶ。学習を目的とした外化活動においては、目的に応じた内容を、それに適した形式で表現する必要があり、これらの決定には困難さが伴うと考えられる。そこで本研究では、まず適当な表現形式と内容を定めることから始めている。そのうえで、理解過程を情報に対する操作と捉え、定めた表現形式への実際の操作として外化を実現する。さらにこのことで、情報工学的な診断を可能にし、個別な対応をも可能とすることを目指す。この診断結果に基づく個別の修正支援も本研究のテーマとなっている。

また本研究では、このような外化による学習支援の対象を、初等力学での学習課題に絞って研究を進めた。これは、理解は言語的に表現された問題記述に対する力学的な解釈であり、解決はその理解に従って数学的に行われるため、問題理解と解決実行過程の区別が

明確であり、また、これまで行われてきた様々な研究から、問題理解過程における難しさが指摘されているからである。また、現時点では、問題理解過程に関する一般性のある表現は提案されておらず、特定の課題に絞って理解過程の表現とその表現を用いた外化・修正支援を試みるのが、現実の学習において有効な支援を実現する上で必要な、一つの段階であると考えている。

本研究では、まず、初等力学での方程式の立式過程の支援を対象とし、先行研究において問題生成や問題分類の自動化を指向して提案されていた、力学問題を構成する概念の構造的記述をベースに、提供された部品からその構造的記述を学習者が組み立て、さらにその構造を基に解法の構造も組み立てることができる環境を実現した。力学の問題では、どのような物体に対してどのような力がはたらいているかが分かれば、それらに問題中の要素を関係付けて方程式を立て、解くことができるが、本研究ではこの要素の関係付けを、構造的記述によって表現させている。この研究はこの関係付けの段階を取り扱っているが、この研究を通して、物体にはたらいている力を正しく把握・記述できておらず、そのより深い原因として、力間の関係が理解できていないことが挙げられるのではないかとの知見を得た。そこでこの知見に基づき、力学系にはたらいている力間の関係のモデル表現を設定し、その表現を組み立てることを可能にする環境を実現した。これにより、より深いレベルでの問題理解を捉え、修正支援のフィードバックを行うことが可能となったことを実験的に確認できた。しかしながら、力間の関係に限らず、力自体に対して概念的に誤った理解をしている場合もあり、このような場合の修正支援が必ずしも十分ではないこともまた既に様々な研究で指摘されている。実際の教育・学習の場に対して意義のある支援を実現するためには、力自体に対する外化と修正支援を実現することが必要であると考えた。このような考えのもとで、学習者の力に対する考えと運動との関係を外化するための、学習者が系にはたらいていると理解した力に基づく運動シミュレーションの生成を試みた。これについては、実際の力の概念の学習者である中学生を被験者とした授業での実践的利用を実現し、その有効性についても確認することができた。これらの一連の力学を対象とした理解過程の外化と修正支援をまとめたものが本論文である。

本論文では、まず第1章で、問題解決演習への支援方法としてのシステム開発に関する、本研究でのアプローチについて説明する。第2章では、本研究で対象とする力学での理解への支援を目的とした先行研究を取り上げ、それぞれの方針と具体的な取り組みをまとめる。さらに、本研究の方針である理解の外化について説明する。第3章では、初等力学を対象とした、立式過程での問題理解の外化とそこへの診断・フィードバックによる学習支援システムの設計と開発について説明する。一般的な問題解決では、記述されるのは運動方程式であり、学習者の最終的な理解を推定することはできるが、そのような理解に至った過程、またそこでの誤りを見ることは難しい。そこで、このシステム上で学習者は、運動方程式の立式に至る過程での理解を段階的に外化する。それにより、従来明らかではなかった問題を理解していく過程を、詳細に見ることができる。また、工学系の大学生を対

象に行った同システムの試験的評価についても報告する。第 4 章では、初等力学における力とその関係の把握過程への学習支援を目的とした、外化による学習支援システムについて説明する。このシステム上で学習者は、一般的な力の作図に加え、グラフ表現による力間関係の表現を行うことで、自身の力とその関係に対する理解の外化を行う。このような理解は通常の問題解決やそこでの解答では明らかにならない場合も多く、誤りの発見・修正は容易ではないが、力とその関係の外化を行うことでそれらについての誤りが明らかとなり、システムによる診断・フィードバックも可能となる。また、工学系の学生を対象として行った、同システムの予備的な評価実験についても説明する。第 5 章では、初等力学での運動系を対象とした、力の把握過程での、概念的な誤りの修正を目的とした学習支援のための **Error-Based Simulation (EBS)** システムについて説明する。EBS は学習者の誤りに基づいたシミュレーションであり、学習者の持つ誤った考えは、物体の不自然な挙動として可視化される。これにより、学習者の理解した力と運動との関係が外化され、この挙動を観察することで、学習者が自身の誤りに気づき、修正することを促す。同システムについては中学校、及び高等専門学校において実践的に利用実験を行っており、これらの結果についての報告も行う。最後に第 6 章で、これらの一連の研究をまとめ、初等力学という限定された学習課題ではあるものの、問題理解過程の外化と修正に関して、人の思考を情報に対する操作として捉えるアプローチが有効であることを示せたことを述べる。

# 目次

内容梗概 .....	i
目次 .....	iv
図目次.....	vi
表目次.....	vii
<b>1. 序論 .....</b>	<b>1</b>
<b>2. 力学における誤り修正手法に関する検討.....</b>	<b>5</b>
2.1. 先行研究.....	5
2.2. 本研究の方針.....	6
<b>3. 問題理解の外化.....</b>	<b>9</b>
3.1. 前書き .....	9
3.2. 立式過程での理解とその外化 .....	10
3.2.1. 立式過程のモデル化 .....	11
3.2.2. 外化表現形式.....	13
3.2.3. 外化表現の生成過程 .....	15
3.3. 問題理解過程外化演習支援システム.....	17
3.3.1. システム概要.....	17
3.3.2. 表層構造の生成 .....	18
3.3.3. 表層構造に対する変換操作.....	19
3.3.4. 解法構造の生成 .....	21
3.4. 評価実験.....	22
3.4.1. 実験内容 .....	23
3.4.2. システム利用.....	23
3.4.3. アンケートの結果.....	25
3.5. むすび.....	26
<b>4. 力間の関係理解の外化 .....</b>	<b>28</b>
4.1. まえがき.....	28
4.2. 力の外化.....	29
4.2.1. 力の作図.....	29
4.2.2. 力の関係.....	31

<b>4.3. 力の関係外化支援システム</b> .....	<b>33</b>
4.3.1. 外化方法 .....	33
4.3.2. システム概要 .....	34
4.3.3. 力の関係図生成支援 .....	35
4.3.4. 診断とフィードバック .....	36
<b>4.4. 予備的評価実験</b> .....	<b>38</b>
4.4.1. 実験内容 .....	39
4.4.2. 誤り診断の検証 .....	46
<b>4.5. 結び</b> .....	<b>47</b>
<b>5. 力に対する理解の外化とフィードバック</b> .....	<b>49</b>
<b>5.1. まえがき</b> .....	<b>49</b>
<b>5.2. Error-Based Simulation</b> .....	<b>50</b>
5.2.1. Error-Based Simulation の概要 .....	50
5.2.2. 利用した EBS システム .....	52
5.2.3. システムで用いた課題 .....	53
<b>5.3. 中学校でのシステムの実践的利用</b> .....	<b>54</b>
5.3.1. 利用計画 .....	54
5.3.2. 各群の演習内容 .....	56
5.3.3. 評価テスト .....	57
5.3.4. 運動系での結果の分析 .....	58
5.3.5. 運動系での結果の考察 .....	63
5.3.6. 静止系での結果と分析 .....	65
<b>5.4. 高等専門学校での実践的利用</b> .....	<b>68</b>
5.4.1. 利用計画 .....	68
5.4.2. 評価テスト .....	69
5.4.3. 評価テストの結果と分析 .....	69
5.4.4. 考察 .....	71
<b>5.5. 結び</b> .....	<b>71</b>
<b>6. 結論</b> .....	<b>73</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>77</b>

## 図目次

図 3-1	SSC(Surface-Solution-Constraint)モデル	13
図 3-2	問題の例	14
図 3-3	表層構造	15
図 3-4	定式化された表層構造	16
図 3-5	解法構造	17
図 3-6	システムのユーザインタフェース	18
図 3-7	表層構造の組み立て	19
図 3-8	必要性の決定	21
図 3-9	階層的『言葉の式』表現	22
図 3-10	多く見られた誤りの例	25
図 4-1	力の作図の例	34
図 4-2	力の関係図の例	34
図 4-3	システムインタフェース	35
図 4-4	システムフロー	36
図 4-5	誤った作図の例	38
図 4-6	誤った力の作図	47
図 4-7	誤った力間関係	47
図 5-1	システムのインタフェースと EBS の例	52
図 5-2	実装された課題	54
図 5-3	転移課題	58
図 5-4	平均正解数の推移（上位群，学習課題）	60
図 5-5	平均正解数の推移（上位群，転移課題）	61
図 5-6	平均正解数の推移（下位群，学習課題）	62
図 5-7	平均正解数の推移（下位群，転移課題）	63
図 5-8	平均正解数の推移（上位群，学習課題）	66
図 5-9	平均正解数の推移（下位群，学習課題）	66
図 5-10	平均正解数の推移（上位群，転移課題）	67
図 5-11	平均正解数の推移（下位群，転移課題）	67
図 5-12	事前テストでの静止系の正解率の比較（EBS 単独群）	68
図 5-13	平均正解数の推移（学習課題）	70
図 5-14	平均正解数の推移（転移課題）	70

## 表目次

表 3-1	システム使用にて抽出された誤りの数 .....	24
表 3-2	アンケート結果 .....	26
表 4-1	力の伝播関係の例 .....	32
表 4-2	システムでの誤りと修正の人数 .....	40
表 4-3	作図での誤記の有無ごとの人数 .....	41
表 4-4	作図での欠落の有無ごとの人数 .....	41
表 4-5	プレ・ポストテストの結果 .....	43
表 4-6	上位群・下位群のプレ・ポストテストの結果 .....	43
表 4-7	上位群・下位群の再現率と誤答率の平均 .....	43
表 4-8	成績上位群・下位群で差があった質問 .....	44
表 4-9	事前アンケート回答 .....	44
表 4-10	事後アンケート回答 1 .....	45
表 4-11	事後アンケート回答 2 .....	45
表 5-1	事前テストの平均正解数 .....	55
表 5-2	平均正解数（上位群，学習課題） .....	59
表 5-3	平均正解数（上位群，転移課題） .....	60
表 5-4	平均正解数（下位群，学習課題） .....	62
表 5-5	平均正解数（下位群，転移課題） .....	62
表 5-6	テスト得点と MPEX との相関係数 .....	71



# 1. 序論

「人の思考」を何らかの目的のための「情報に対する操作」であると捉えることは、人工知能や認知科学における重要な作業仮設の一つとなっている。通常は頭の中で行われているこの情報に対する操作を、情報技術によって可視化し、操作可能にすることで、思考を支援・促進することは、ヒューマン・コンピュータ・インタラクションにおける研究の大きなトピックとなっている。またこのような情報に対する操作としての思考は、教授・学習活動においても行われているといえる。通常、教授・学習活動は、情報のやりとりを中心として行われる活動であり、例えば一般的な教室授業を想定すると、教師は生徒に教えるという活動で情報を提供しているといえる。それに対し生徒は、提供された情報について考え、それらを自身のものとすることで学習がなされるが、このような過程は、与えられた情報の関係付けという、情報への操作と捉えられる。そのため、情報の可視化と操作可能化による思考の促進を、教育・学習活動に用いることには、意義があるといえる。このような観点から本研究は、教授・学習活動での思考の促進への、情報工学技術の利用であると位置づけることができる。

教授・学習においては、目的の内容を教授する段階と、その内容を定着させる段階がある。学習した内容を定着させる方法として、学習者にその知識を用いて解く問題を与えて解かせる問題解決演習がある。このような方法を用いることは必要であるが、その途中には多くの誤りや行き詰まりが発生しうる。そのため、これら誤りや行き詰まりを解消するための支援活動を行うことには意義があるといえる。

ここで、本研究で支援の対象としている問題解決においては、その問題を解くのに必要な解法を同定するための、「問題理解過程」と、同定した解法を用いて実際に問題を解く「解決実行過程」があるとされている[1]。これらのうち、実行過程においては、操作可能な形に定式化された解法を実行すればよく、また記述も明確であることから、機械的に扱うことができ、これまでも誤りや行き詰まりへの支援が行われている。

問題解決演習における学習者の誤りに対する、情報システムによる支援を、算数文章題の解決学習に用いられる問題に適用した試みがみられる[2]。ここでは問題の特徴付けるモデルである MIPS[3]に沿った問題の構造的記述による、問題のメタデータによって問題の特徴付けを行っている。この MIPS は、問題解決における解法の同定過程を問題の構造化の過程として記述する枠組みを提供しており、また問題解決能力の向上を解放の獲得だけでなく、解法の定着としても捉えることができる。このことにより、問題解決過程における解説・ヒントといったことが可能となる。また問題解決における困難点の推定が可能となる。また、問題解決演習では、その問題が解けた場合に次に解く問題が重要となるが、

このような次に解く問題の決定も行うことができる。これらを利用し、学習者に対する個別の対応を実現することが可能であるといえる。

同様に、問題を表すモデルを用いた力学での問題演習支援システムの試みが行われている[4]。ここでは問題間の関係を示すマイクロワールドグラフをモデルとし、問題の特徴を記述している。このシステムによる演習では、学習者が与えられた課題に正解した場合、その問題にマイクロワールドグラフ上で近傍にある、より複雑な問題が次の問題として提示される。また逆に学習者が与えられた問題に正解できなかったとき、より単純な問題が次に解く問題として提示される。このようにして与えられた問題と、元の問題との差異が、学習者が学ぶべき内容となる。このような活動もまた、学習者に対する個別対応の実現であるといえる。

このように、問題解決学習における誤りや行き詰まりへの支援は、これまでも試みられており、そこでは学習者の同定した解法やその実行での誤りが対象となっていた。これら解法やその実行からは、学習者のその問題に対する理解の結果、つまり理解の最終的な状態を予測することができる。しかしながら、この理解の最終的な状態である問題への「最終的な理解」に至る過程への支援は十分に行えていない。これは、理解過程が解法同定のための、問題に対する情報の操作による理解の状態の変化であると捉えられるが、そこでの操作はモデル化されておらず、また明記することもできていないため、そこでの誤りや行き詰まりを見出すことが困難であるためといえる。そのうえで、この理解過程が問題の本質であり、また困難さはこの過程にあるため、多くの誤りが発生するとされていることから、この問題理解過程での誤りを修正するよう支援を行うことには意義があるといえる。

そこで本研究では、この問題理解過程での誤りの修正支援の実現のために、学習者に自身の考えを図や表などで表現させる「外化」活動を用いる。ここでの外化とは学習者による自身の考えの可視化、操作可能化であるが、教育・学習の分野では外化と呼ばれるため、本研究でもこのような言葉を用いている。このような外化活動を学習者の理解について行わせることによって得られた表現は、学習者の問題理解であるため、この学習者の理解の評価が可能になるといった点から、学習支援活動として取り入れることに意義があるといえる[5,6,7]。この外化を学習支援に用いることには意義があるといえるが、一方このような学習を目的とした外化活動においては、目的に応じた内容を、それに適した形式で表現する必要がある。しかしながら、これらの決定には困難さが伴うと考えられ、学習者への負担を増加させる恐れがある[7]。また学習者の誤りや行き詰まりに対応した、システムによる学習者ごとの表現への診断や助言といった個別対応をも目的としているため、機械的に取り扱うことのできる表現である必要がある。

そこで本研究では、この表現形式と内容の決定という点について、まず目的に応じて外化する内容と、そこに適当な表現形式を提案することを考える。このような表現形式の提案を行うことは、目的に応じた内容を外化させられるようになるだけでなく、学習者が外

化を行う足がかりにもなり、負担の軽減となるといえる。

また本研究では、このような支援に関し、初等力学における、運動方程式を用いて解く問題を具体的な対象としている。このような問題においては、問題記述は文章によるものであり、ここから運動方程式を立式するために、解法として用いる数量関係を同定する過程が理解過程であるとして、それら数量関係を基に立式を行い、実際に解く実行過程と明確に分けることができる。この初等力学の問題での理解過程において学習者は、その問題で対象としている系に存在する物理的な情報と、それらの間にある関係について理解する必要があり、実質的にそれは問題の系にはたらく力や他の情報との関係の理解といえる。このような、系にはたらく力の理解は重要である反面、難しいとされており[8,9,10]、また多くの間違いが見られていることから、この理解の過程を本研究での支援の対象とすることには意義があるといえる。このような問題においては、一般的には数式の記述が行われるため、そこに含まれる数量関係から学習者の最終的な理解を推測することができるが、そのような理解に至る過程を見ることは難しく、そこにどのような誤りがあるかを見ることは難しい。この理解に至る過程に関する一般性のある表現は現時点で提案されていないため、初等力学という特定の課題に絞り、理解過程の表現の提案と、それを用いた外化・修正の支援を行うという本研究での試みは、現実の学習で有効な支援を実現するうえで必要であると考えられる。

以上のような観点から、本研究では初等力学での問題解決演習を対象とし、その理解過程での力の理解を外化させることによる、学習者の誤りの修正を目的とした学習支援環境の実現を目指している。本研究ではまず、先行研究[3]において問題生成や問題分類の自動化を指向して提案されていた、力学問題を構成する概念の構造的記述をベースにした、力学問題での問題理解を外化させる表現形式の提案を行った。さらにこの表現を用いた学習支援として、提供された部品から問題の構造的記述を学習者が段階的に組み立て、さらにその構造を基に解法の構造も組み立てることができる環境を実現した。力学の問題では、どのような物体に対してどのような力がはたらいているかが分かれば、そこから方程式を立てて解くことができる。この研究ではこのはたらく力を把握し、解法となる方程式を立てる段階という問題理解の過程を取り扱っているが、この研究を通して、力の分解・合成やつり合いといった、力間に関する誤りが確認された。このことから、物体にはたらいっている力を正しく把握・記述できないことのより深い原因として、力間関係を理解できていないということではないかとの知見を得た。一般的な問題解決においては、力自体の作図の方法は明確であり、多く行われるが、このような力間関係が明確に記述されることは少ない。そこでこの知見に基づき、力学系にはたらいっている力間関係のモデル表現を設定し、その表現を組み立てることで力間関係を明確に表現することを可能にする環境を実現した。これにより、力だけではなくそれらの関係も含んだ、より深いレベルでの問題理解を捉え、修正支援のフィードバックを行うことが可能となったことを実験的に確認できた。しかしながら、さらに力間関係だけではなく、力自体に対して概念的に

誤った理解をしている場合があり，さらにこのような誤りに対する修正支援は必ずしも十分ではないことが既に様々な研究で指摘されている．このような力自体に対する誤りについて，実際の教育・学習の場に対して意義を目指すうえでは，力自体に対する外化と修正支援を実現することが必要であると考えた．このような考えのもとで本研究では，学習者による力の外化についてただ誤りを指摘するだけでなく，外化された力に基づく運動シミュレーションの生成を行うことによる誤りの修正の促進を試みた．このようなシミュレーションを用いることで，学習者が系にはたらいっていると理解した力と運動との関係が可視化され，誤りの修正が促進されと考えられる．これについては，実際の力の概念の学習者である中学生を被験者とした授業での実践的利用を実現しその有効性のについても確認することができた．これらの一連の力学を対象とした理解過程の外化と修正支援をまとめたものが本論文である．

以下では，第 2 章では対象とする力学での理解，およびそれらに対する先行研究での支援について述べる．さらに，本研究での支援の方針について述べる．次に第 3 章では，力学での運動方程式の立式を対象とした，立式過程の段階的な外化による支援システムの設計と開発，また同システムの実験的な利用について述べる．第 4 章では，力学問題の解決にて考える，系にはたらく力とそれらの間の関係の理解に関する，図的表現を用いた演習支援システムの開発とその実験的な利用について述べる．さらに第 5 章では，同様のはたらく力の理解の支援を目的とした，学習差の誤りに基づく運動のシミュレーションである，**Error-Based Simulation** を用いた学習支援システムについて述べる．さらに，同システムの中学校，及び高等専門学校における実践的利用に関して述べる．第 6 章において，これまでの研究のまとめを行う．

## 2. 力学における誤り修正手法に関する検討

本研究では、物理・力学での運動方程式を用いて解く問題を具体的な対象としている。問題記述から解法を求め、それを用いて解く問題においては、解法を求めるための「問題理解過程」と、その解法を用いて実際に問題を解く「解法実行過程」が存在する。対象とする力学問題では、問題記述から解法となる運動方程式を立式するまでが理解過程であるといえる。この運動方程式においては、対象とする系にはたらく力と、物理的な要素との関係が数式として表されている。そのため、運動方程式の立式の過程において学習者は、問題には直接明記されていない、系にはたらく力を見つけ、それら力との関係、及び力と問題中の物理的な要素との関係を把握する必要がある。このような、系にはたらく力を正しく見つけ、それらの関係を把握することは難しいとされており[8,9,10]、また多くの間違いが見られている。さらに、この力の誤りの修正は容易ではない。そこで本研究では、この系にはたらく力を見つけ、関係を把握することを「力の理解」とし、具体的な支援対象とする。本章ではまず、この力の理解に関する先行研究について述べる。さらにその後、本研究での支援の方針について述べる。

### 2.1. 先行研究

先行研究においてこれまでに、力の理解に関する支援が試みられている。

Conati[11]らは、力学問題の解決のために用いられた一連の数式について、その適用理由を説明させるといった試みを行っている。数式は、問題中の要素の数量関係を表したものであり、つまり学習者の、物理的な要素間との関係の理解を扱ったものといえる。

また山崎ら[12]は、水平面や斜面上で運動する台車を対象とし、振り子を用いた装置ではたらく力の可視化を行っている。また加藤ら[13]は水平面や斜面上で運動する台車に対し、電子的なセンサを用いた力の計測による可視化を行っている。また南ら[14]は、センサによるはたらく力の計測とLEDによるその大きさと向きの提示を行う実験装置を開発し、直線運動や落下運動にてはたらく力の提示を行っている。これらの試みにおいては、物体にはたらく正しい力が可視化されており、学習者が誤った考えを持っていた場合に、自身の考えが正しいものと異なっていることを示すことができ、そこから誤っていることに気付くことを促している。一方で、学習者の誤りを修正する上で、学習者自身に誤りであることを納得させることの重要性が指摘されているが[15,16,17]、そのためには学習者の誤りに対して、それらが誤りであることを納得させるような学習支援が必要となる。このような観点に立つと、上記のような学習支援は科学的な理論が実際に正しいことを示してはいる

が、学習者の考えがなぜ誤っているかを示すものではなかった。そのため、これらの学習支援は、誤りであることを納得させ、修正を促す上では必ずしも十分ではないといえる[18]。

このような、学習者に間違いであることを納得させるような説明の事例として、高垣ら[19]の試みがある。ここでは運動する物体にはたらく力の問題を対象とし、正しい解答共に、広く見られるとされる誤った解答を取り上げ、なぜそれでは誤りであるのかを説明することを行っている。このような方法は、説明した誤りについては対応できているといえ、学習者が同様の誤りをしている場合には、その修正が見込まれる。しかしながら、学習者の誤りは共通しているとは限らないため、学習者の誤りに対応するとは言い難い。

これらのように、この力の理解という分野においては、学習者の誤りに対応し、それについて納得させ、修正するための働きかけを行う、といった支援の方法が必要であるといえる。このような方法の本研究での実現について、次節にて述べる。

## 2.2. 本研究の方針

本研究では、前節で述べた、初等力学での力の理解に関する学習者の誤りに応じた支援活動の実現を目指す。このような方法の実現においては、(1)学習者の誤りの抽出、(2)学習者に対する指摘、の2点が課題となる。

まず(1)についてであるが、対象としている初等力学の問題解決においては、解法となる方程式や、その実行結果が記述されることは多い。このような方程式は、問題に対する最終的な理解の記述といえ、つまり最終的な理解を推測することは可能であるといえる。しかしながら、その理解に至るまでの過程については、学習者の頭の中で行われることが多く、それを観察し診断することは困難である。そのため、その過程において、どこにどのような誤りがあったか、といったことを抽出することは困難である。このような困難さに対し、本研究では理解の外化を用いる。本研究での外化活動とは、学習者が自身の理解や認知、知識等を外部に表現することであり、またこの活動によって得られた表現を外化表現と呼ぶ。この外化活動を行うことで、学習者の理解している内容やしていない内容が明確になり、さらなる理解を生じるきっかけになるとされている[20]。また、学習者の知識や理解が外在化されることにより、それらへの外部からの診断・評価が可能になるといった効果もある。本研究ではこの、診断可能化という点に着目し、学習者に通常は診断が困難である、立式に至るまでの理解を外化させる。

このような外化による知識の整理や確認、振り返りやより深い理解の促進といった効果を期待し、またそれらを利用した学習支援がこれまでに試みられている。例えば柏原ら[20]は「ダイアグラム」と「比較表」とを用いた外化活動を対象とし、補助を伴った外化活動の効果の検討を行っている。また金西は学習者による自身の理解への「外化」と「内省」の効果に着目し、それら活動を支援するための学習システムについて検討している[21]。伊藤の研究においては、循環系の学習を対象とし、図や文章の記述による自己説明の効果を

検証している[22]. これらは学習者が外化を行うこと自体、及びその外化表現への学習者自身による振り返りの効果を狙ったものであるといえ、そのため外化の引き出し方や、振り返りの補助といったことが主な論点となっていた。

外化活動を引き出すことに加え、外化された表現への診断・修正を扱った例として、金西らの行った研究が挙げられる[23]. 彼らは地理問題の解法過程への自己説明を用いた学習を対象とし、それら説明を可視化させ、それら表現を洗練するためにアドバイスをを行う、また表現から学習者の理解度を見積もる、といった支援活動の検討を行っている。この試みは理解の外化に対する診断を行った例といえるが、ここでは最終的な理解を外化させており、本研究で目指す理解に至る過程を扱ったものではない。また力学問題を対象として、解決のために用いられた一連の数式の適用理由を説明させるといった自己説明の試みも行われている[23]. このような試みは本研究での目的に近いといえるが、力学問題を解くうえで重要な点の一つである力間の関係については、最終的な理解であるところの数式の形で表されており、やはりそのような理解に至る過程を見ることは行われていない。

また、一般的にはこの外化活動が自発的に行われることは少ないとされており、その理由として外化する内容や形式の決定の困難さが挙げられる。例えば学習支援を目的とした外化活動においては、目的に応じた内容を、それに適した形式で表現する必要があるが、これらの決定には困難さが伴うと考えられ、学習者への負担を増加させる恐れがある[7]. このように、外化活動自体には困難さが伴うといえる。このような困難さに対し、本研究では外化する内容、及び外化表現形式を定め、また外化の手順を明確化することで、これらの問題を取り扱う。

次に(2)の学習者に対する指摘についてであるが、本研究では外化を学習に取り入れることを目的としており、そのためには外化することだけでなく、そこへのフィードバックが必要といえる。その際、生成される外化表現は学習者の理解を反映しているため、学習者の理解が異なれば、外化活動の結果である外化表現も異なることが予想されるため、必要なフィードバックも異なる。このような活動を、1人の教授者が複数の学習者に対応する必要がある状況で用いることは、人的コストなどの点から現実的とは言えない。また、学習者に対応可能な教授者を用意できない場合も考えられる。そこで本研究では、計算機上に学習支援環境を作ることで、このような対応を実現する。本研究では外化活動の実現のために、外化表現形式、またその手順の提案を行っている。そのため、外化させる内容が決まれば、外化活動の結果である正しい外化表現もまた決定される。そのため、学習者が計算機上で生成した外化表現に対し、計算機が診断・フィードバックを行うことが可能となる。このような方法により、教授者が直接的に対応できない状況であっても、外化による学習支援を行うことが可能になる。

以上のことから本研究では、この力の理解を対象とした、学習者による理解の外化とそこに対するフィードバックによる学習支援環境の実現を目指している。その中で、力の理解の一般的な表現の一つである運動方程式を対象とした、立式過程の外化による学習支援

環境を開発した。この立式過程では、運動方程式という問題への最終的な理解に至る過程として、系にはたらく力と、それら力と問題中に含まれる力学的な要素との関係を理解する必要がある。そこでこの理解を段階的に外化させることで、そこに含まれる誤りを抽出し、修正を促す。またこのような外化活動やそこへの診断・フィードバックが可能となる学習支援環境を、計算機上のシステムとして開発した。

また、力の理解を表す表現として、運動方程式以外にも、力の作図が広く一般的に用いられているが、このような表現は、その系にはたらく力をより具体的に表現しているといえる。このような力の作図を行う際、学習者は、系にはたらくと考えている力やその詳細、またそれらの関係について考えている。このような力間関係の理解は、運動方程式を立式するうえで必要であるが、作図された力から、力の存在は見るができるものの、その力の詳細やそれらの関係については明示されていない場合もある。そこで本研究では、この力の作図を対象とし、通常の作図に加え、それらについての詳細な説明や、それらの関係についても記述させ外化させる、外化による学習支援システムの開発も行っている。

さらに、この力の作図に対しては、間違いを見つけることとともに、それらを修正するようなフィードバックが必要であると考えられる。これまでに開発したシステムでは、この誤りの存在や箇所を指摘し、修正するよう促すことが行われてきた。しかしながら、このような手法では学習者の誤りに対し、なぜ誤っているのかを指摘したことにはならず、学習者が誤りであることに納得できないことが予想される。またどのように修正するかを示すことを行っていなければ、修正を促すことが十分には行えないと考えられる。そこで本研究では、この力の作図を対象とし、誤りの修正を促すために、学習者の誤りに基づく運動のシミュレーションである、**Error-Based Simulation** を用いた、学習支援環境の運動系への拡張を行った。また、同システムを用いて行った、2つの実践的利用についても報告する。



## 3. 問題理解の外化

第3章では、第2章で取り上げた、立式過程の段階的な外化を用いた学習支援システムについて述べる。本章では、本研究で提案する力学での立式過程のモデル、及びそれに基づく学習支援システムの設計・開発について述べる。また、同システムの実験的な利用に関しても述べる。

### 3.1. 前書き

問題に対し数式を適用することで解く問題の解決においては、適切な数式を適用できるように問題を理解する「問題理解過程」と、その数式を用いて実際に解を求める「問題を解く過程」が存在する[1,24,25]。多くの学習者にとって、この問題理解過程はより困難であるとされており、多くの問題解決上の誤りや行き詰まりがこの理解過程で発生しているとされている[26]。このことから、この問題理解課程での誤りや行き詰まりの修正は、問題解決での誤りや行き詰まりに対する支援として有効であるといえる。しかしながら、この問題理解過程は多くの場合、学習者の頭の中で行われるものであり、外界から観察することは困難である。そのため、この過程での誤りや行き詰まりを見出し、修正するといった支援は容易ではない。

このような、問題理解過程の不可視性による支援の困難さに対し、「外化」を行うことが一つの解決策となると考えられる。ここで外化とは、学習者が自身の理解や認知、知識等を外界に表現することであり、学習者自身がそれらについて振り返り、整理や確認を行う上で有用であるとされている。また、教授者らは外化されたものを調べることができるため、それによって学習者の理解度や持っている知識を評価することができる[7]。

ここで問題理解課程について考えると、学習者の問題に対する自身の最終的な理解に基づいて立式を行っており、つまり式は問題への最終的な理解を外化したものであると考えられる。この式の表記方法は明確に定められており、そこに表現されたことを読み取ることが可能であるため、問題に対する学習者の最終的な理解を教授者が捉えることは不可能ではない。一方で、その式を立てるような理解に至る過程がどのようなものであったかについては、外化されることはあまりない。そのため、最終的な式に誤りが含まれていた場合にも、なぜそのような誤ったのかを断定することは難しいといえる。また、何らかの行き詰まりによって式が立てられていない場合でも、どこでどのような行き詰まりが発生したかを見出すことはできない。

このような原因として、(i)理解課程を記述する明確な方法が確立されていないこと、(ii)記述すること自体が煩雑であること、の2点が挙げられる。そこで本研究ではこれまでに、対象とする初歩的な高校力学での運動方程式の立式を対象とし、(1)具体的で明確な外化表現の提案、(2)外化表現作成とそれに対する診断・フィードバック環境の設計・開発を行うことで、学習者による問題理解過程の外化と、その外化された表現に対する診断やフィードバックが可能な学習環境の実現を目指した[27,28]。

以下では、このような目的のために提案する外化表現について概説し、さらにその表現を用いて開発した外化による学習支援システムに関して述べる。さらに同システムの予備的な利用についても述べる。

### 3.2. 立式過程での理解とその外化

外化を学習活動の中に取り入れるという試みはこれまでにすでに行われているといえるが、その多くは学習者が外化を行うこと自体、及びその外化表現への学習者自身による振り返りの効果を狙ったものであった[20,23,29]。そのため、外化の引き出し方や、振り返りの補助といったことが主な論点となっていた。一方で、本研究では具体的な問題の解決を対象とし、さらにそこでの問題理解における誤りの修正を目的としている。そのため、これまでにあまり論じられてこなかった、学習者の外化表現を診断し、理解における誤りを指摘するフィードバックを実現する必要があった。

このような診断・フィードバックとして、先行研究においては、力学を対象とし、解決のために用いられた一連の数式の適用理由を説明させるといった自己説明が行われており、これは本研究の目指すところに近いといえる[11,30]。しかしながら、このような自己説明で説明の対象としている数式は、解法の同定の結果として立てられるものであり、そこでは問題に対する理解はすでに行われている。つまり数式への説明は、実質的には問題に対する最終的な理解を説明させることに相当している。それに対し本研究では、問題の理解に至る過程を取り扱うことを目的としており、先行研究[11,30]ではこの過程を捉えているとはいえない。

つまり、本研究の目的のためには、問題に対する理解に至る課程を外化する表現方法が必要であるといえる。その表現方法は、実際の問題解決で理解する内容に基づき、さらにそれらの内容を表現できる必要がある。その実現のために本研究では、力学に対する問題解決課程の段階的なモデル化を行った。以下ではまず、本研究でのベースとなる力学の問題解決過程モデルについて概説する。さらに、このモデルを利用した、問題理解過程の段階的な外化とそこへの支援を実現するための学習支援環境の設計・開発について述べる。さらに、この環境の実験的な利用を通じた、問題理解過程の外化と支援の可能性の確認についても述べる。

### 3.2.1. 立式過程のモデル化

先行研究[33,34]において、力学問題の問題解決過程に対し、(1)問題文中に明示された概念及び概念間の関連を表現した表層構造を生成する表層構造生成過程、(2)表層構造内の概念や関連を必要に応じて力学的なものに置き換え、数式を適用可能な構造（定式化構造）を生成する定式化過程、(3)定式化構造に対する数式の適用とその結果の定式化構造への追加によって、求めている解を含んだ構造（目標構造）を生成する解導出過程、の三つの段階で問題解決を表現するモデル（SSC(Surface-Solution-Constraint)モデル、図 3.1）が提案されている。このモデルでは、問題解決過程を、その問題の構造的表現の生成とその洗練として表現している。またこれまでに、このモデルに沿った問題表現に基づく、問題順序の動的構成[31]、補助問題の分析[32]、マイクロワールド間の関係付け[33]、問題の自動生成[34]といった、計算機による問題の取り扱いによる学習支援が実現されている。そのためこのモデルは、力学の問題を構造的な形式を用いて表現する上で、ある程度の妥当性を持っているといえる。

そこで本研究では、このモデルに通常の問題解決にて行われていると考えられる思考・理解操作を対応させることで、同分野の問題解決過程を詳細に表現できると考えた。その上で、同モデル内の構造的な表現を実際に記述させることで、理解過程の一連の外化が可能であると考えている。

表層構造生成過程は問題を読んで言語的に理解する過程であり、問題文中に明示された概念及び概念間の関係を使って一つのまとまった構造を作ることとしてモデル化されている。具体的には、問題文中に明示的に含まれているオブジェクト、オブジェクトの持つ属性、オブジェクト間の関係が意味ネットワーク形式で表現されたものが表層構造となる。

表層構造は言語的な理解を表現したものであり、この構造に対して力学の公式などの数量関係を適用するためには、力学的な表現に変換することが必要となる場合がある。具体的には、

- ①式を立てる対象の選択
- ②式に用いる属性の選択
- ③属性間の関係の構造化

が必要となる。たとえば問題が対象とする系に複数の物体があれば、それらのうち式を立てる対象を決定する必要がある。また「動摩擦係数」と「静止摩擦係数」が問題に含まれる場合、一つの式の中にこれらを両方用いることはなく、いずれを用いるかという理解が必要である。これらのような理解は立式のために必要であるが、一般的には表現されないため、これらに含まれる誤りを見出すことは容易ではない。そのため、本研究で外化する対象として扱うことには意義があるといえる。ここではこのような理解に基づく変換過程を定式化過程と呼び、力学の公式等の数量関係を適用できるようになった構造表現を定式

化構造と呼んでいる。

定式化構造が作られたということは、その問題が表している力学的現象が同定されたことを意味する。現象が同定されれば、その現象における力学的属性間の数量関係が定まることとなる。この数量関係の同定、及び適用により、問題に与えられている既知の属性値から、問題が求めている未知の属性値を導くことが解導出過程となる。そして、解となる値を含んだ構造表現を、目標表現と呼んでいる。またこの現象の同定により、その状況に存在する数量関係が決定されるが、このような数量関係全体を「制約構造」と呼び、問題の特徴記述の一つとしている。そして、その制約構造によって定められた数量間関係の一部を用いて組み立てられる具体的な計算手順を解法構造と呼んでいる。

本研究では学習者に、(1)オブジェクト、属性、オブジェクト間の関係を組み立てて表層構造を作る、(2)表層構造を変換して定式化構造を作る、そして(3)定式化構造を構成する属性を使って、解法構造を組み立てる、ことを行わせる。(1)の作業は問題に対する学習者の言語的な理解を表している。また、(2)の作業は学習者が言語的に理解した問題に対し行った、力学的な理解について表していることになる。また(3)の作業は問題内の数量的な関係の把握を表しているといえ、この作業が行えていれば、以降は立式やその計算といった数学的な操作を行うことになる。そのため、これら 3 つの作業によって力学問題での理解過程を表現でき、また通常の問題解決においては明確に表されるものではないため、外化支援の重要な対象といえる。

このように生成された三構造により、問題解決過程は説明可能である。そのことから、これら構造の生成は、問題解決過程の外化とみなすことができると考えられる。そのため、これら構造の表現を用いた診断は、問題解決への診断の一つとして有効であると考えられる。

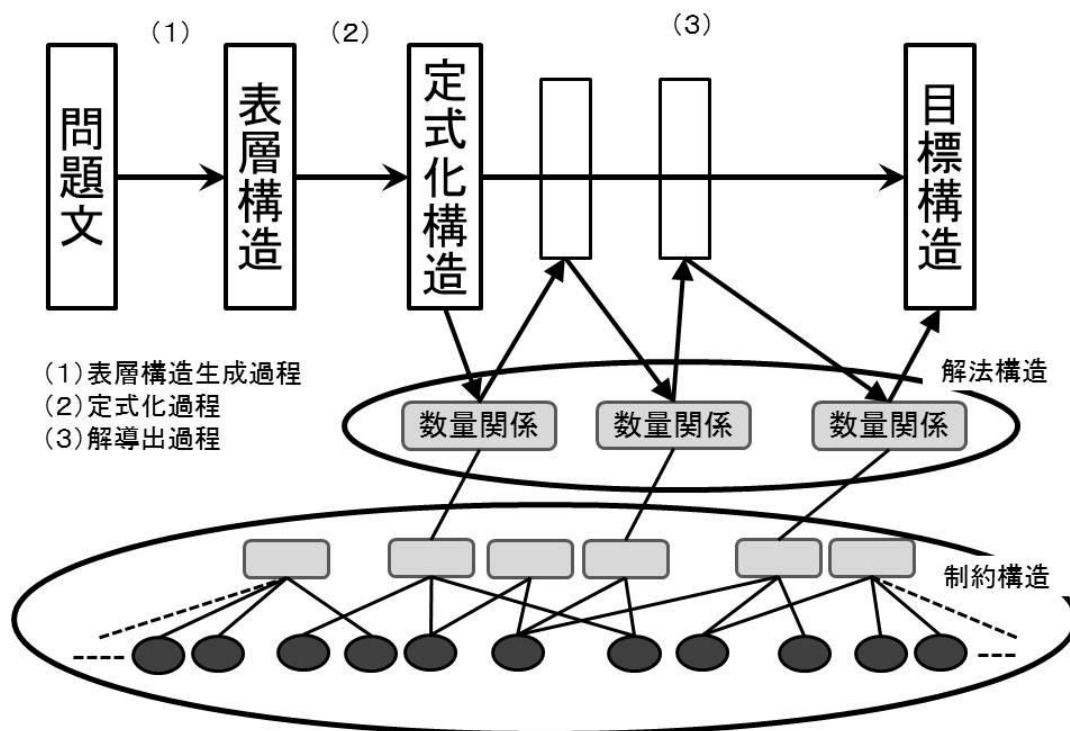


図 3-1 SSC(Surface-Solution-Constraint)モデル

### 3.2.2.外化表現形式

本研究では前項のモデルに対し、具体的で記述可能な表現形式を提供することで、問題理解過程の外化環境を実現する。以下、図 3.2 に示した問題を具体例とし、それぞれの構造表現及びその操作について説明する。

本研究での問題解決過程モデルでは、表層構造として、問題文中に明示的に含まれているオブジェクト、属性、オブジェクト間の関係を利用した意味ネットワーク形式での表現を用いている。ここで「オブジェクト」とは、問題内に含まれる物理的な“モノ”のうち、力や運動の対象となり得るものを指す。例えば「ブロック」「ボール」或いはより単純に「物体」などと表記されるものがある。なお、問題中にはこの「オブジェクト」以外の“モノ”，例えば「壁」「天井」「糸」なども存在するが、これらは「オブジェクト」に何らかの影響を与える反面、それ自体が力や運動の対象となることはない。そこでこれらは「属性」「関係」（後述）にて表現される。

次に「属性」とは、オブジェクトの持つ情報のうち、数量（記号）として問題内に存在するものを指す。例えば「質量」「加速度」「はたらく力」などがこれに当てはまる。またこの属性は、表層構造内にこれ単体で存在するものではなく、必ずオブジェクトに結びついている必要がある。

「関係」とは、問題中に明記された、二つのオブジェクト間の関わり合いを表す。例えば「重なり合っている」「隣接している」「糸でつながれている」などがこれに当てはまる。この関係もまた、表層構造内にそれ単体で存在するものでなく、二つのオブジェクトを繋ぐ形で存在する必要がある。

このような構造には、学習者の問題に対する言語的な理解が表れ、またそれを診断することが可能となる。具体的な例として、図 3.2 に示した問題についての表層構造を図 3.3 に示す。図内において、桃色ノードは、問題内のオブジェクト（ブロック A, B）を表現している。黄色のノードは、オブジェクト間の関係を表すものであり、そこから出た 2 本のリンクでオブジェクトを繋ぐことにより、それらの関係を表現する。それ以外の水色のノードは属性を表すものであり、それぞれ接続されたオブジェクトに関する情報（質量、加速度など）である。

#### 問題

角度 $\theta$ の滑らかな斜面上に、ブロックAが置かれている。Aの質量はMである。Aは、滑車を介して他のブロックBに、糸Lによって接続されている。Bは宙吊りにされている。Bの質量はmである。このような状態で静かに手を放すと、二つのブロックは静止した。この時の、Aに働く糸Lの張力Tをもとめよ。ただし、以下の値、  
 斜面からの垂直抗力: N  
 重力加速度: g  
 を用いてもよい。

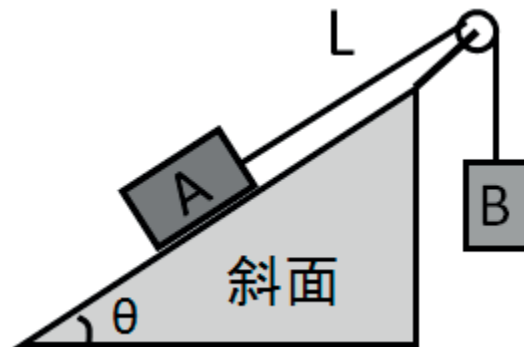


図 3-2 問題の例

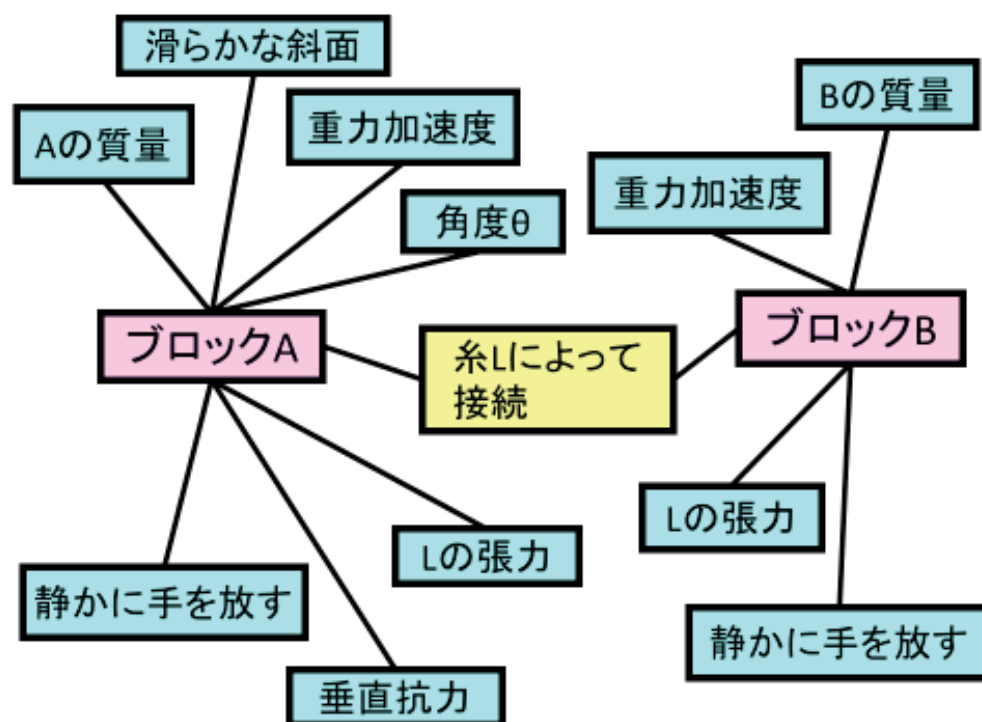


図 3-3 表層構造

### 3.2.3.外化表現の生成過程

定式化過程は、対象とする問題を解くための解法の同定を目的としており、いくつかの問題解決モデルではこれを表層構造への洗練として表現している。特に、力学の問題においては、公式などの数量関係が解法となるため、適切な公式が同定・適用可能な形に表層構造を変換することが定式化操作であるといえる。そこで本研究では、この「適切な数量関係が同定・適用可能な構造への変換」という操作には「表層構造内の要素の選別」と「要素への力学的な解釈」があると考え、このような変換を具体的な操作として設定し、学習者に行わせることが定式化過程の外化となるとしている。

力学で用いられる所謂公式としての数量関係は、何らかの対象の持つ属性値と演算関係から、別の値を導き出すために用いられる。つまり「適切な数量関係が同定・適用可能な構造」とは、より具体的に「立式の対象、及び力学的な記述で表されたその属性から成る構造」とすることができる。このような構造への変換操作としては、立式対象のオブジェクトの選択、力学的な属性への変換、が行われる。例えば、図 3.2 の問題においてはブロック A を対象とした立式を行う必要がある。また、「静かに手を離す」あるいは「なめらかである」といった属性は、「初速度 0」や「摩擦係数 0」といった力学的な属性に変換される必要がある。これらのような操作により、表層構造への変換としての問題の定式化が行われる。このような変換操作においては、学習者の問題への力学的な理解が表れると考えら

れ、そこでの誤りへの支援につなげることが出来ると考えられる。適切に定式化された構造に対しては、必要な力学的公式を適用することが可能となる。

定式化構造に現れた属性を用いて、解を導くための解法を組み立てることができる。図 3.4 の定式化構造の場合であれば、図 3.5 のような解法を組み立てることができる。この構造内では、数量を表す言葉のノード、導出元と導出結果という上位・下位概念を表す矢印、言葉間の演算子を表す破線のリンクを用いて、問題内の数量関係を表している。例えば、「A にはたらく重力」は、「A の質量」と「重力加速度」から積算を用いて導出されるが、これは「A にはたらく重力」から「A の質量」と「重力加速度」に伸びた矢印と、その間の積算の関係を表すリンクによって表される。また「斜面平行成分」は「角度  $\theta$ 」一つから演算を用いずに導出されるため、直接矢印でつなぐ形で表される。

このように組み立てられた構造を解法構造と呼ぶ。この過程における、定式化構造に現れた属性から必要なものを取り出し組み立てるという操作は、問題内の数量的な関係の理解を表現しているといえ、この解法構造の組み立ても外化の対象としている。

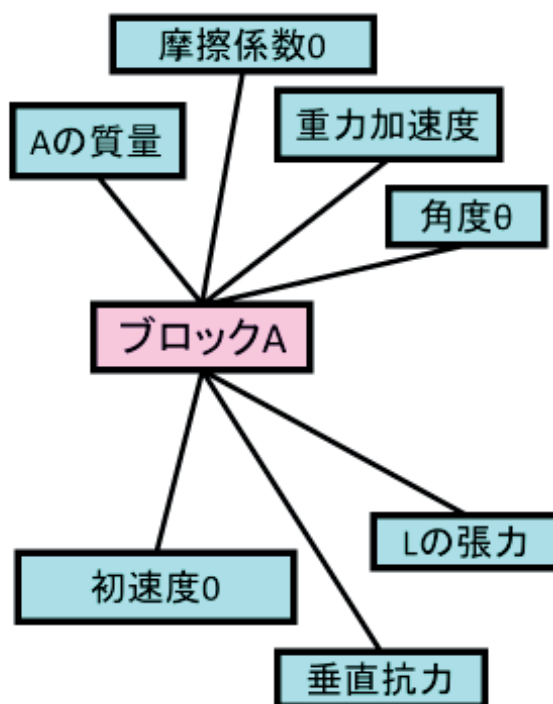


図 3-4 定式化された表層構造



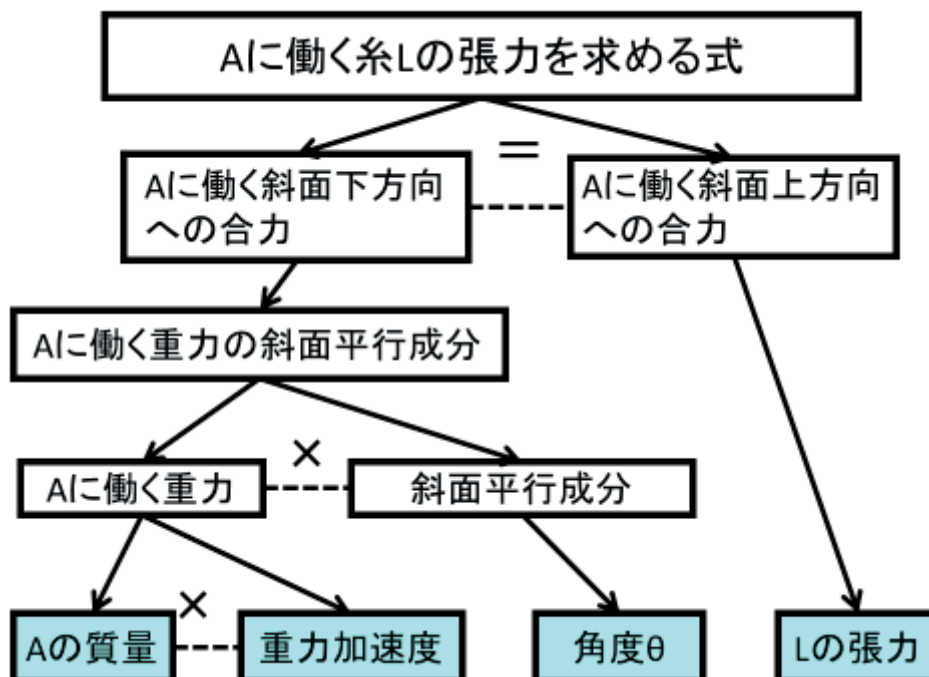


図 3-5 解法構造

### 3.3. 問題理解過程外化演習支援システム

本研究では、提案する外化活動を一連の学習活動の中に取り入れ、理解過程への診断とフィードバックを実現することを目指している。そのためには、学習者の外化表現に対する個別的な対応が必要となるが、教授者側への負担といった点などから実際には容易ではない。そこで本研究では、このような学習環境を実現するための学習システムの設計・開発を行っている。本節では、このシステムについて説明する。

#### 3.3.1. システム概要

本システムは、前節にて述べた問題解決モデルに沿った外化活動、及びその外化表現への診断・フィードバックを行うことを目的としている。システムのユーザインタフェースを図 3.6 に示す。画面左側は問題提示のためのスペースであり、問題文及び図が表示される。画面右側は作業用スペースであり、学習の作業はここで行われる。学習者は、画面上部に表示される作業内容に従うことで、外化活動を進める。また、各段階での外化表現は「解答」ボタンを押すことでシステムによって診断され、ポップアップウィンドウにて正誤のフィードバックが返される。そこで誤りがなければ次の段階へと進むことができ、そうで

ない場合は修正を行う。

また本研究で用いるシステム上での構造の組み立てには、問題作成者、或いは教授者が問題に対して適当と考える各構造をあらかじめ用意し、それを分解したものを学習者に提供し、組み立てさせるといった Kit-Build 方式[35,36]を採用する。Kit-Build 方式では、必要な部品が学習者にあらかじめ与えられていることから、構造の構成要素を問題文より取り出すといった分節化作業が認識作業に置き換わることになるが、構造化の作業は保存されているといえる。また、教授者が用意した正解と学習者が組み立てた構造は同じ部品で構成されていることから、それらの差分として誤りや不完全な部分を容易に取り出すことができるため、表現への自動的な診断とフィードバックを目指すうえでも有効な手段であるといえる。加えて、理解過程の外化、という必ずしも慣れていない作業を学習者に行わせる上での足場がけとしてこの単純化は有用であると思われる。つまり、Kit-Build 方式の採用により、分節化の誤り・行き詰まりを捉えることはできないが、構造化の誤りや行き詰まりは捉えることができるということになる。このように分節化を認識に置き換えることの妥当性はさらに今後検討していくことが必要となるが、現時点では学習者による理解過程の外化とその診断の実現を優先した方式の採用となっている。

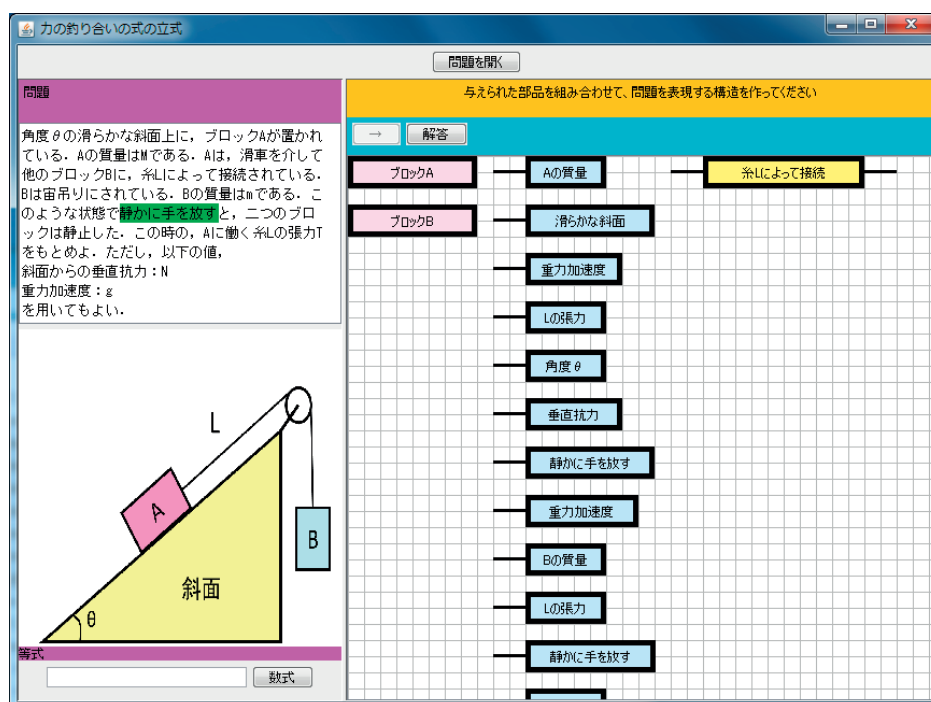


図 3-6 システムのユーザインタフェース

### 3.3.2.表層構造の生成

表層構造の生成段階にて学習者は、キット化された「オブジェクト」「属性」「関係」が

作業スペースに与えられ (図 3.6), これらに対しドラッグ&ドロップ操作を行うことで, 表層構造を生成する (図 3.7). 生成後, 「解答」ボタンを押すことで, 表層構造への正しいものとの比較による診断がシステムにより行われる. ここでは, 属性や関係が未接続, 或いは接続先が不適切といった誤りが想定され, そのような要素が抽出可能である. これら抽出された要素を枠線の色の変化という強調の形でフィードバックすることで, 学習者へ誤りを提示し, 再考を促す.

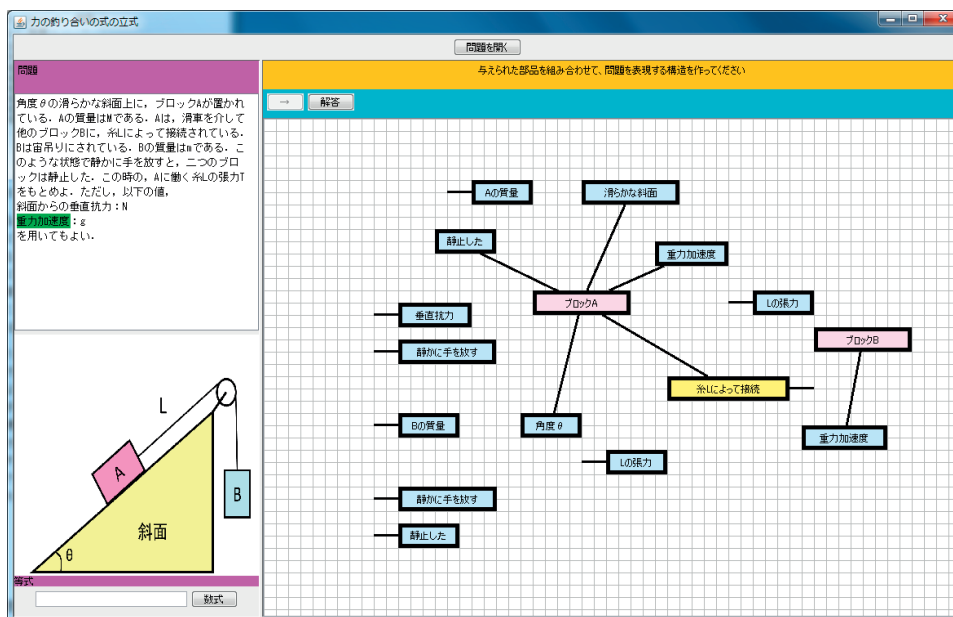


図 3-7 表層構造の組み立て

### 3.3.3. 表層構造に対する変換操作

表層構造の変換段階では学習者は, 先に生成した表層構造に対し, 前述のような変換操作を行う. ここでの変換操作は, 表層構造内から解決に用いる要素の抽出を行い, またそれらに力学的解釈を加えることに対応しているため, 学習者の問題理解過程を表現することが可能となると考えている. この操作により, 数式の適用が可能なように問題を定式化することが, ここでの目標となる.

まず学習者は, 問題で解くべき力の対象となっているオブジェクトを選択する. この際, 構造内の選んだオブジェクトをクリックすることで, これを選択することができる. ここでの誤りとしては, 対象の未選択, 或いは不適切な選択が想定されるが, これらは実際に選択された対象を確認することで診断可能である. 実際の操作としては, 選択された状態で「解答」ボタンを押すことにより, 診断が行われる. 正しい対象が選択されていた場合, 選択が正しかった旨の伝達, 及び選ばれたオブジェクトとそのオブジェクトに付随する属

性のみから成る構造への変換が行われ、次の段階へと進む、という形でのフィードバックがなされる。選択が不適切であった場合には、オブジェクトの選択が間違っており、再考する必要があることを学習者に指摘するというフィードバックが示される。

次に学習者は、定式化構造内より、問題を解くために必要な属性を抽出する。問題記述に含まれる要素・情報により問題状況は説明されるが、これらすべてを数式内に用いるとは限らない。そのため、このような解法に用いる属性の選択は、通常の問題解決における解法構築での一つの操作として行われていると考えられる。

具体的な操作としては、表層構造内の属性を右クリックしてポップアップウィンドウを表示し、その中から「必要」「不必要」のいずれかを選択することで、属性ごとの必要性を決定する（図 3.8）。

すべての属性に対する必要性の決定後、「解答」ボタンを押すことで、診断とフィードバックが行われる。ここでの誤りとしては、属性への必要性の未決定、及び決定の間違いが想定できるが、このような属性は正解との比較により抽出可能である。決定が全て正しければ、その旨が提示され、次の段階へと進む。間違えた箇所があった場合には、それら属性が強調される、といったフィードバックが返される。

さらに学習者は、表層構造内の属性に対する洗練を行う。属性は問題内の記述を用い、言語的に示されているが、それらの一部には数量関係を適用することができない。そこで、その意味を表す物理的な記述へと変換する必要がある。具体的な操作として、各属性ノードを右クリックすることでポップアップウィンドウのリストを表示し、その中から適用すべき記述、もしくは「そのまま使用」を選択する。全ての属性にこのような操作を行うことで、数量関係が適用できるようになり、よって表層構造は定式化されたと言える。

定式化が行えたと判断し、学習者が「解答」ボタンを押すことで、正解の定式化構造との差分の検出による診断が行われる。ここでの誤りとしては、変換が必要な属性の未変換や不適切な変換、あるいはそのまま用いる属性への変換などが想定されるが、これらは正解との差分として抽出可能である。変換が全て正しければ、表層構造は定式化構造へと変換されたことになり、その旨が伝えられ、続けて解法構造の生成を行うことになる。誤りを含む属性が抽出された場合には、それら属性の枠線の色による強調という形でのフィードバックが与えられる。

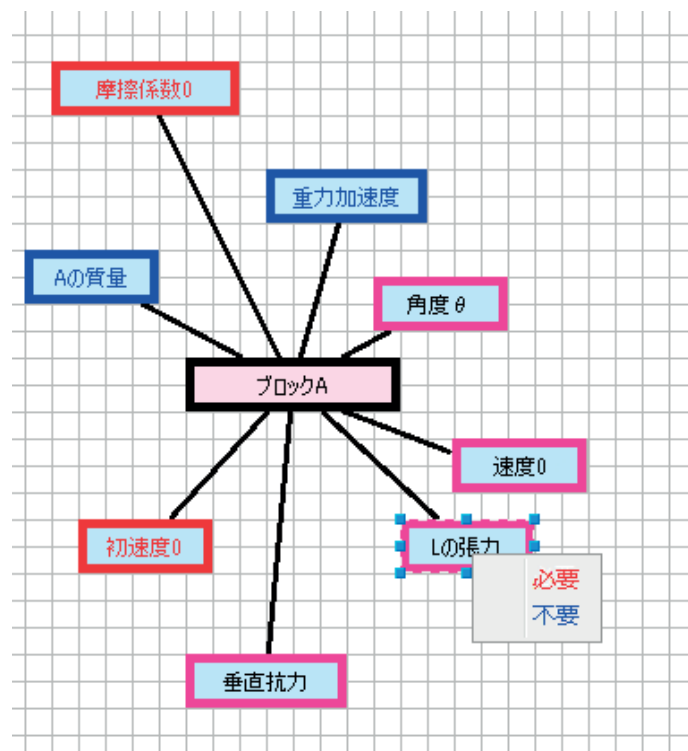


図 3-8 必要性の決定

### 3.3.4. 解法構造の生成

定式化された問題に対し学習者は、先の操作で定式化された構造内の属性を利用し、解法構造を生成する。本研究では、解法構造を一連の数量関係として捉えており、これを図 3.5 のような、言葉と、それらの間の数量関係を用いた階層的構造である「階層的『言葉の式』表現」[37]として表現する。解法構造内の最下層には定式化構造中の属性値が配置され、その上層はそれら属性値、及びそれらの間の演算子によって構成される数量関係である。最上層に位置する式が、問題解決における目的の式である。

このような構造の生成に際し、まず学習者には、定式化構造内で必要とした属性を含む、解法構造内で用いられる言葉がキットとして与えられる。学習者は、これらキット、及び自身で生成する矢印を用いた言葉の階層的な構造を組み立てると、言葉間の演算子の決定により、「階層的『言葉の式』表現」を組み立てる（図 3.9）。組み立てられた表現には診断が行われ、誤りがあればフィードバックが示される。

この階層的『言葉の式』表現の生成に際しまず学習者は、与えられた言葉を矢印のリンクで接続することで、階層的な言葉の構造を生成する。生成後、構造に対する診断が行われるが、その際、不適切な接続のリンクが誤りとして想定される。これらは正解との比較により抽出されるため、誤りがあった場合には、この抽出されたリンクが色の変更という

形でフィードバックされる。全て正しい場合には、その旨が伝えられ、次の操作に進む。

次に学習者は、構造内の言葉間の演算関係について、ポップアップメニューからの選択によって決定を行う。ここでは、演算関係の未決定や不適切な選択が誤りとして想定され、診断によってこれらの抽出が行われる。このような誤りが抽出された場合には、その箇所へのリンクの色が変更されることでフィードバックされる。

以上のような操作により、対象とする問題に適した解法構造が生成される。この構造の表す一連の数量関係の適用により、目標となる解を求めるための式が立てられる。

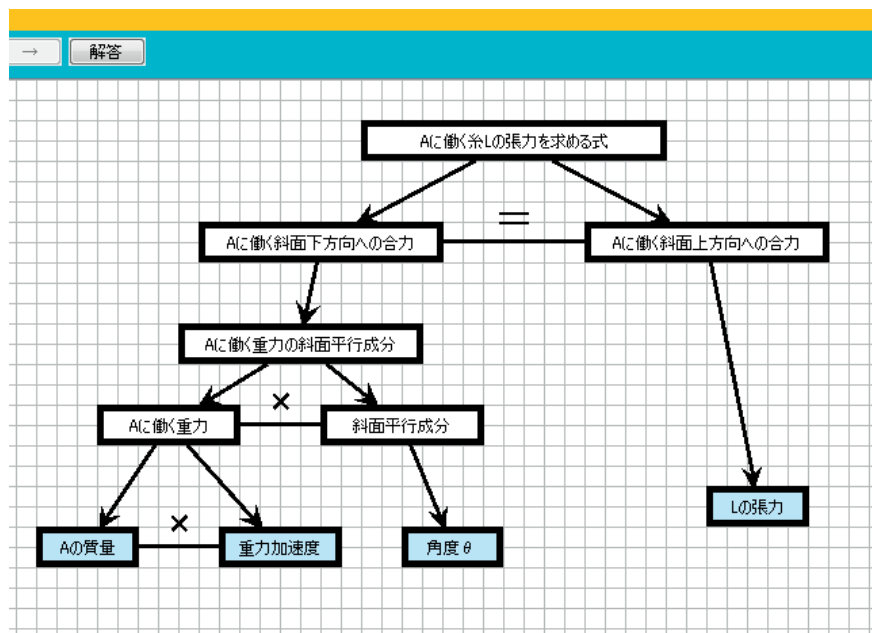


図 3-9 階層的『言葉の式』表現

### 3.4. 評価実験

本学習環境では、学習者は前述の構造を生成・変更しながら実際に問題解決を行っていくこととなる。このような作業は学習者にとって未経験のものであるが、学習者が問題理解の過程において同じような構造を頭の中で操作しているのであれば、比較的簡単に学習者もこれらの生成・変更を行えると予想でき、また、問題を解くことの助けになる、あるいは問題解決の過程で行っている作業であるとのコメントが得られるであろうと予想される。問題理解過程の外化を実施したシステムはこれまでに実現されてこなかったことから、本研究では、まず本環境での外化の実施可能性とその外化作業が被験者にとって有用と判断されるかどうかを確認することを目指した。この評価は、想定した作業が行えるか、およびその作業に価値がありそうか、といった学習環境の評価としては予備的なものといえることから、対象となる課題についてはすでに問題解決能力を持っている被験者による利

用を通して行った。結果として、被験者は特に大きな支障なく本環境での外化を行うことができ、アンケートにおいても、この外化表現が妥当であり、また、その作業が問題を解決するうえで有用であるとの回答を得ている。

### 3.4.1. 実験内容

今回の実験は、提案するモデルと表現形式により、学習者の理解過程の外化が実現されているかの確認を主な目的としている。被験者は、工学系学部 3 年生 6 名であり、全員高校、及び大学において力学に関する授業を経験している。これらの被験者は、このシステムが力学の問題解決学習の支援を目的として設計されたものであり、そのような目的において利用可能であるかどうかを調べるため予備的な実験であるとの説明を受けている。このような説明は実験の結果をシステムに対してポジティブに働く可能性もあるが、このシステムが実践的に利用される場合には、そのシステムの意図するところを説明した上で利用されることが前提となるため、特に大きな問題にはならないと判断している。次項より、システム使用の概要、及び使用後に行ったアンケートについて述べる、

### 3.4.2. システム利用

今回の実験で被験者は、システム上で 3 問の問題に回答した。これらは、高校物理の教科書における例題として用いられているもの、或いはそれと同程度の難易度を持った問題である。今回の実験の主な目的が提案するモデルと表現形式による外化実現性であったことから、被験者らにはシステム使用開始前、回答の継続が不可能であると判断した場合には、その旨を申告するよう指示したが、そのような申し出は見られなかった。被験者 6 人は 3 問全てを終了しており、システムの平均使用時間は 32.8 分であった。

システム使用全体を通して、被験者全体で 55 件の誤りが抽出された。以下の表 3.1 に、被験者ごとの各段階での誤りの回数を示す。

抽出された誤りには、「接続されていないリンクが残っている」「無回答のまま解答ボタンを押す」といったような、システム使用に関する誤りであると考えられるものも含まれており、これらについてはユーザインタフェースの向上にて対応するべきであると考えられる。

全ての被験者に共通した誤りとして、最大ではない静止摩擦力を求める問題の③の過程において、静止摩擦係数を『必要』とした、というものである。これは、静止摩擦力と最大静止摩擦力の混同による誤りであると考えられる。全体として 1 ないし 2 回の指摘によって改善されている。

また、被験者 C, D, F は、解法構造組み立ての際、図 3.10 に示す同じ誤りを犯していた。被験者の半数に見られたことから、表現に関する共通した認識によるものであると考

えられる。一方で、残りの半数の被験者は問題なくこの過程を終わらせている。また、解法構造内の矢印の向きをすべて逆にする、という間違いを繰り返した被験者が 2 名いたことも、表現方法に起因する困難さのひとつと考えられた。これらのような問題点の解消のため、全ての学習者に共通して認識可能な表現上のルール of 定義が必要であると考えられる。

上記のような誤りに加え、力の釣り合いの対象として違うオブジェクトを選択する、複数のオブジェクトを選択する、属性の必要性を間違えるといった誤りが何点か見受けられた。ここまでに述べた誤りは、問題解決上、或いは理解上の誤りとの対応が予想されるものが中心となっている。このような誤りが表現されたことは、理解過程の外化の実現可能性を示していると予想される。またこれらが概ね指摘後には修正されていることも、有意義な外化の実現の指標として読み取られる。

表 3-1 システム使用にて抽出された誤りの数

被験者   段階	①	②	③	④	合計
A	0	0	1	0	1
B	0	1	2	0	3
C	1	0	2	15	18
D	4	2	2	1	9
E	0	2	4	8	14
F	0	1	2	7	10
平均	0.83	1	2.2	5.2	9.2

- ①表層構造生成過程
- ②定式化過程 1 : 対象となるオブジェクトの選択
- ③定式化過程 2 : 属性の必要性の決定
- ④解法構造の組み立て過程



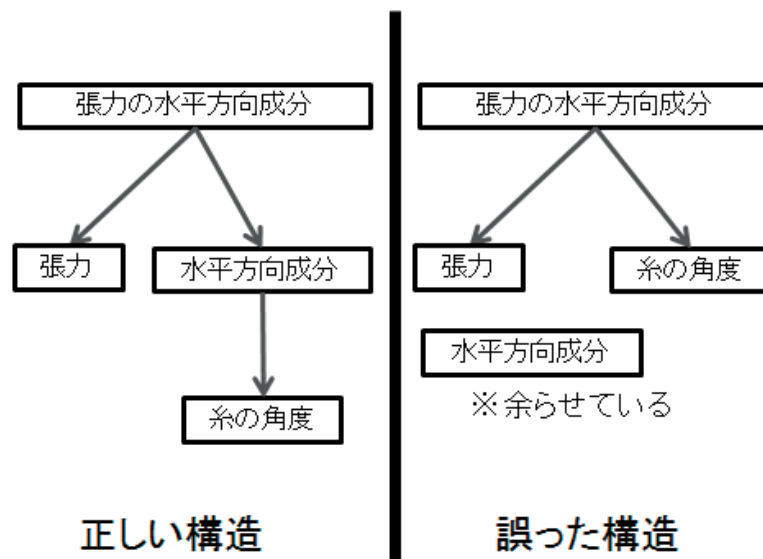


図 3-10 多く見られた誤りの例

### 3.4.3. アンケートの結果

アンケートでは主に、提案する学習方法の有用性、モデルの妥当性、システムでの再現性等について、被験者に評価させた。全ての質問において、評価は4段階の選択式で行われている。また、各質問には自由記述欄を設けており、選択肢に対する理由を記述することもできた。以下の表 3.2 にその結果を示す。

質問①については、多くの被験者が肯定的に回答している。このことより、本研究の主な目的である、問題理解過程の外化という点については、その実現の可能性が見られる。「あまり思わない」と回答した被験者は、この回答について、「理解していることを全て記述することは冗長であると感じた」としており、表現自体の欠陥を指摘するものではなかった。

質問②に対する回答より、全員がこのシステムを用いて行う外化活動が学習にとって有用であると判断していた。

質問③については、被験者の半数以上が肯定している。このこともまた、理解過程の外化の実現という点について、その可能性を示していると考えられる。一方で、自由記述として、「矢印の向きが理解しにくい」「リンクの接続・未接続が分かるほうがよい」といった、システムの使用性に関する意見も得られており、ユーザインタフェースの改良の必要が考えられる。

一方で、システムからのフィードバックに関しては多くの被験者が否定的な意見を示している(質問④)。この回答に関してさらに調査したところ、誤りの診断自体が間違っているとの指摘ではなく、現在の誤りのみを指摘するフィードバックが単純すぎ、誤りについてより詳細な説明が必要であるとの指摘であった。問題理解過程に対する外化とフィー

ドバックの実現という意味では、特に問題なかったと考えているが、本システムを実践的に利用する上では、誤りの説明の詳細化が非常に重要な課題となっている。

表 3-2 アンケート結果

回答   質問	①	②	③	④
思う	2	1	0	1
少し思う	3	5	4	1
あまり思わない	1	0	2	3
思わない	0	0	0	1

- ①今回用いた外化表現は、力学問題の理解を表現するのに適切であると思いますか。
- ②問題の段階的な変換による立式は、学習者にとって有効であると思いますか。
- ③今回演習で使用したシステムでは、自分がやりたい操作を十分に行えたと思いますか。
- ④使用したシステムでは、間違ったときに指摘が行われましたが、その内容が適切であったと思いますか。

### 3.5. むすび

本章では、物理・力学問題における理解過程を外化させ、さらにこれを利用した診断・フィードバックを行う学習環境の実現に関して述べた。そしてそのための一つの方法として、既存の問題解決過程を参考にした具体的な外化表現方法と操作内容の提案、及びこの外化方法を利用した学習支援システムの設計・開発、およびその実験的な評価について述べた。

システムの実験的利用を通して、被験者が本システムを用いた問題理解過程の外化を違和感なく行えること、この活動が学習として意義があるとの感想を持っていることが分かった。人の思考過程において生成・処理される対象を断定することは容易ではなく、またそれらの表現形式を提案することもまた困難であるといえる。そのうえで、被験者が外化操作を行うことが出来たことや、問題理解過程を外化できたと感じていることは、提案するモデルや表現形式にて思考内容の表現がなされたことの一つの指標となると考えられ、十分に適切な表現であるとはいえないものの、外化実現の可能性を示していると考えられる。

また、学習活動としての有意義さに関する学習者の感想は、力学を対象とした問題理解過程の外化とその診断・フィードバックを実現する一つの方法として、本研究で採用している方法が有望であることを示しており、学習者を対象とした実践的な利用を目指して本研究を進めることの意義を明らかにできたと考えている。

また、システムからのフィードバックに関しては、改良の余地が大きいことも示されて

いる。学習者の誤りへの対処内容については、妥当な方法は決定されておらず、様々な見地からの考察が必要である。そのため、今回のような指摘は、対処方法を考慮するうえで非常に重要であるといえる。

また、ユーザインタフェース的な改善の必要性も明らかになっている。本研究のような外化による診断という手法を用いた学習者への支援活動は前例に乏しく、手法自体の向上に加え、それらをいかに実現するかもまた、新たな試みとなるといえる。そのため実践的な学習環境の実現、また学習活動の妥当性を述べるうえで、適切なユーザインタフェースは必須であるが、現時点では十分とはいえない。そのうえで、今回の実験的使用における諸問題は、問題点の確認として有意義であったといえる。

今後の展望としては、より実践的な学習環境の実現が望まれる。そのためには、今回明らかになったフィードバック上の問題について、診断面、及びフィードバック内容の両方から考察することが必要である。また、診断について考察する上で、表現内で用いる要素や言葉に関するより明確な定義、加えて学習者の誤りに関する考察が必要であると考えられる。同時に、システムのユーザインタフェース的な改善も必要である。

## 4. 力間の関係理解の外化

第3章では、力学での立式過程を対象とした、力とそれに関する項目の関連づけに関する、外化を利用した学習支援システムの設計・開発について述べた。第4章では、同様の力学問題を対象とした、系にはたらく力とそれらの間にある関係に関する、外化による学習支援システムについて述べる。また、同システムの実験的な利用についても述べる。

### 4.1. まえがき

力学問題での問題の理解とは、その問題が対象としている系に存在している物理的な属性と、その属性間に関する理解と捉えることができる。特にその中でも、系にはたらく力の存在とそれら力間に関する理解は解法の適用過程に大きく影響を与えるため、重要な役割を果たしているといえ[38,39]、またこれらの理解に対する誤りも多い[39,40,41]。一方で、この力や力間に関する理解は通常の問題解決やそこでの解答では明らかにならない場合も多く、誤りの確認・修正は容易とはいえない。

このような困難さに対し、学習者に外化を行わせるという方法が考えられる。外化とは自分の知識や理解を文章や図表などで表現することであり、対象の理解やメタ認知的気づきの促進に関して効果があると報告されている[5,7,42]。例えば中学校や高校の力学において、物体系にはたらく力を矢印で作図させることが多いが、これは力の存在に関する理解の外化の一つであるといえることができ、この意味での理解の外化はすでに行われているといえる。一方、このような形態の外化においては(1)外化に対するフィードバック(2)力の持つ意味や関係の外化、の2つが課題となる。

まず、フィードバックをどのように与えるのか、という課題は外化の学習効果を向上させる上で常に発生する問題であり、計算機による支援が一つの解決策として多くの研究で採用されている[20,23,36]。

もう一つの課題は力の存在だけでなく、力の意味や力間に関する関係も外化の対象としなければならないという点である。これまでにも、力学における外化の研究はいくつか行われており、例えば Chi は力学の例題学習を取り扱い、学習者に例題学習中に考えていること全般の発話による外化を行わせている[43,44,30]。これらは学習者の思考内容の心理学的調査にとどまっており、外化への支援は行っていない、力学を対象とした学習支援環境である Andes[11,45]では、力の作図と作図した力の記号化及びその記号を用いた立式を支援しており、力学問題の解決における力の重視と外化という点では本研究と同じ観点を持っているが、力間に関する関係は外化の対象とはなっていなかった。その理由として、系が一つのオブジ

ェクトとして表現可能な場合は、そのオブジェクトに対する力は一つの運動方程式もしくははつり合いの式を構成するものとして解釈することができ、それらの力間の関係は方程式として表現されているといえることが挙げられる。しかしながら、系が複数のオブジェクトにより成り立っている場合には、伝搬、作用・反作用、つり合い、分解・合成の関係などがあり、それらを把握していることが不可欠である。最終的に一つのオブジェクトとして取り扱う場合も、これらの力の区別と関係付けが不可欠となる。また本研究においてこれまでに、運動方程式の立式過程での理解を対象とした外化を試みている[46]。ここでは系にはたらく力について運動方程式を立てる際に必要な、力と問題中の物理属性との関係について、学習者の理解の外化を行わせている。しかしながら、力間の関係についてははたらく力の把握という立式以前の段階に必要な理解と考え、外化の対象としていなかった。

そこで本研究では、具体的には力と力間の関係の理解の外化とそこへの診断・フィードバックの実現を試みている。そのためにまず力間の関係を外化できるようにするための準備として、外化の対象となる力と力間の関係の整理を行った。そして、これら力と力間の関係を部品として用意した上で、学習者が力学系における力に関する理解の外化表現を作成することのできるインタフェースと、そのインタフェースを用いて作成された外化表現を診断する機能を開発した。また、これらの外化支援機能の予備的な評価実験を行った。

以下では、まず本研究の外化対象である力間の関係について説明し、さらに力間の関係の外化方法とその支援機能について説明する。さらに、開発した外化支援機能の評価実験について述べ、最後にまとめと今後の課題について述べる。

## 4.2. 力の外化

力学問題解決における解法適用のためには、その問題が対象としている系に存在している物理的な属性と、その属性間の関係に対する理解が必要であり、その中でもはたらいっている力と力間の関係の理解が解法の適用過程に大きく影響を与える。また一般的な力学の問題解決において、解法の適用過程へのフィードバックは行われているが、その解法の適用の前提となった力に対する理解を取り扱っている例はない。そこで本研究では、力学問題の力に対する理解の外化を取り扱う。

### 4.2.1. 力の作図

力の作図とは、物体にはたらく力を矢印で描画するという作業であり、中学校や高校の力学の授業で用いられており、問題集などでも問題として出題されている。しかし、力学の科学的概念を学習したことがある学習者でもこの力の作図を正しく行えない人は少なくない[43]。このことは、正しい概念に基づいて作図をしていないことが一つの原因となり、正しく力を把握できていないことと考えられる。

本研究ではこの作図の際に、力間の関係にも着目する。例えば平面上で静止した物体についてつり合いの式を立てる場合、まず物体に重力がはたらいており、そのために垂直抗力がはたらくという因果的な関係をもとにして、物体系にはたらく力を把握する。またそれら把握した力に解法となる式を適用するためには、重力と垂直抗力がつり合っているという大小関係を把握していなければならない。このように、力学問題の解決のためには力自体だけでなく、それら力間の関係をも捉える必要があるといえる[38,47,48]。またそれら捉えることが、力の欠落の防止や異なる物理状況への対応に繋がると考えられる。

このように、力間の関係を捉えることは重要であると考えられるが、一般的な力学の問題解決における力の作図作業で学習者は把握した力自体を矢印で図に記述するものの、その把握や立式の際に考えるべき力間の関係については明確に記述されることは少ない。そのため、学習者が捉えた力間の関係について十分に読み取ることができず、それらに対する誤りの修正は困難であるといえる。

そこで本研究では、力の作図自体についての知識はあるが、力間の正しい関係に基づいて力を正しく捉えられていない学習者に対して、把握した力や力間の関係を外化させ、その外化表現に対する診断・フィードバックを行い、力間の関係理解の支援を行う。そのことにより、力と力間の関係把握の能力を身に着け、通常の問題解決においてもそれらの把握が可能になると考えられる。

このような力学問題解決での外化を扱った例として、Conati と VanLehn[11,45]の研究では、通常力学問題解決に沿った解法選択や適用の過程の外化を行わせているが、ここでは把握した力について自由体図 (free body diagram) によって学習者に作図させている。そこでは立式の対象となる物体を 1 つ定め、その物体にはたらく力の記述、及びそれら力に記号、対象物、向きといった定義を行っているが、力間の関係は扱っていなかった。しかし、複数のオブジェクトから構成される系を考えると、そこにはたらく力を把握するためには単体で自明な力に加え、他の力との関係によってはたらくことが分かる力をも把握する必要がある。そのため、適切な力間の関係を適用し、それによって力を把握していく段階を確認し、そこでの誤りを修正するためには学習者の捉えた力間の関係を表現させる必要がある。

またこのような力間の関係を扱った関連研究として、学習者の誤りを定性推論するために、力間の関係や力と物理状況の関係などをモデル化した研究[38,47]が行われているが、そこでは学習者自身に捉えた力や力間の関係を外化させるということも行われていない。

このような理由から本研究では、力間の関係に着目した外化による理解の支援を目的としている。そのためまず、力間の関係とはどのようなものなのか整理する必要がある。これについては次項で説明する。

## 4.2.2.力の関係

本研究では、力を理解し運動方程式を立式するために必要な力間の関係を次の 4 つとしている。

- ・ 伝播関係
- ・ 作用・反作用
- ・ つり合いの関係
- ・ 合成・分解

以下にそれぞれの関係について説明する。

### ●伝播関係

力学系にはたらく力には、単独で存在が分かる力と、発生のためにほかの力が必要な力がある[38]。そこで本研究では、後者の理解のために必要な、ある力とその力が発生するために必要な力との関係を力の伝播関係と定義する。堀口らは力ごとにその発生条件と発生する力間の関係を力の発生・伝播ルールとしてまとめている[48]。この研究では「重力」「張力」をはじめ 6 つの力を対象としており、それらの発生条件や属性をルールとしてまとめていたが、高校力学の範囲の力を全て扱えられていなかったため、本研究では高校力学の範囲で取り扱われている力のうち記述されていない力を追記した[49]。そして、この拡張した力の発生・伝播ルールから、発生条件として力が必要なルールを抽出し、伝播関係として整理した（例を表 4.1 に示す）。結果として、先行研究[48]に対して、「万有引力」「弾性力」をはじめとする 16 個の力とそれらの力を捉える上で必要な 27 個のルールが追加されたことになる。

ここで力とは「作用点」「向き」「大きさ」の 3 つから定まるとされている。そしてこの伝播関係は、発生する力とその原因となる力の作用点と向き（大きさ）から考えることができる。

### ●作用・反作用

ある物体から別の物体に力がはたらくとき、反作用となる力は必ず発生するため、複数の物体からなる系にはたらく力を把握するうえで常に考慮する必要がある。そこで本研究ではこれら 2 力間の関係を作用・反作用の関係として、力の理解に必要な関係の 1 つに定義している。

### ●つり合い

実際の問題解決の際は、便宜上 4 方向（鉛直、水平、面垂直、面平行）のいずれかに合

成・分解して，方向ごとのつり合いを考える場合が多い．そのため本研究では，つり合いを以下のように定義する．

ある物体の各方向において

- ・上（左）向きの合力  $F$  = 下（右）向きの合力  $F'$   
 $\Rightarrow F$  と  $F'$  はつり合っている
- ・上（左）向きの合力  $F \neq$  下（右）向きの合力  $F'$   
 $\Rightarrow F$  と  $F'$  はつり合っていない

#### ●合成・分解

力のつり合いなどを考える際に力の合成・分解といった操作がしばしば行われるが，この合成・分解の関係について以下のように定義する．

ある物体において

- ・力  $f_1 +$  力  $f_2 + \dots +$  力  $f_n \rightarrow$  力  $F$  ( $2 \leq n$ )  
 $\Rightarrow f_1, f_2, \dots, f_n$  は  $F$  に合成される
- ・力  $F \rightarrow$  力  $f_1 +$  力  $f_2 + \dots +$  力  $f_n$  ( $2 \leq n$ )  
 $\Rightarrow F$  は  $f_1, f_2, \dots, f_n$  に分解される

以上のような，力のつり合いの関係，及び力の合成・分解の関係の把握は適切な式を適用するうえで必要であるが，通常の問題解決ではこれらの把握を読み取ることは難しく，外化支援の対象として意義があると考えられる．

表 4-1 力の伝播関係の例

発生する力	物理条件	原因となる力
静止摩擦力 $F_1$ ●作用点：物体 1 の隣接面 ●向き： $F$ と逆向き ●大きさ： $F$ と等しい	●物体 1 と物体 2 が隣接 ●隣接面の静止摩擦係数 $\mu > 0$ ●物体 1 と物体 2 が隣接	垂直抗力 $N$ ●作用点：隣接面 ●向き：隣接面垂直方向 ●大きさ：—
静止摩擦力 $F_2$ ●作用点：物体 2 の隣接面 ●向き： $F_1$ と逆向き ●大きさ： $F$ と等しい	面水平方向に相対（加） 速度 = 0	押す／引く力 $F$ ●作用点：物体 1 ●向き：物体 1 の隣接面平行方向 ●大きさ：—



## 4.3. 力の関係外化支援システム

4.2.2 項で整理した力間の関係をもとに、力間の関係の外化表現を作成することのできるインタフェースと、そのインタフェースを用いて作成された外化表現を診断する機能の設計・開発を行った。本節では、この開発した外化支援機能について詳細を述べる。

### 4.3.1. 外化方法

まず本研究での外化活動では、学習者の持つ力間の関係に対する考えを外化させるということを目的としている。そのことから、そこで用いられる表現形式はまず概念間の関係を表すものでなければならない。

次に、用いられる外化表現は、認識しやすい表現である必要がある。学習者は外化活動の一つとして、外化された表現の観察を行っており、このことが外化による効果が生じる一つの要因として考えられる。そのため外化表現が何を表しているのか認識しづらい場合、外化による効果を妨げる恐れがあるので、力間の関係が認識しやすい表現である必要がある。

これら 2 つの要件を満たす外化方法として、グラフ表現による外化がある。力をノードで、関係をリンクで表すことで、物体系にはたらく力間の関係を表現したグラフ（以下、力の関係図）を作成することができる。このような関係図は力とその関係についての外化に特化したものとなっているが、本研究の目的が力と力間の関係の理解に焦点を当てたものとなっていることから、妥当な表現であると考えている。また同様な表現は、これまでも力やその関係を表す試みに用いられているが[38]、そこでは学習者の系に対する理解の定性推論に用いられており、本研究とは異なった目的での利用であると考えている。

例えば図 4.1 のような、重力①と垂直抗力②がつり合っているという関係や、押す力④とそれに対する垂直抗力③が作用・反作用の関係にあることを表すことができる（図 4.2）。またグラフ表現を用いることで、自由記述などの文章で表す方法と違い、視覚的に認識しやすい表現となり、自身の理解への振り返りが容易になる。さらに診断やフィードバックの明示といったシステムでの処理が比較的容易であるというメリットもある。

本研究ではこのグラフ表現による外化表現を記述できるインタフェースと、その外化表現を診断する機能を実装したシステムの設計・開発を行った。このシステムについて次項から説明していく。

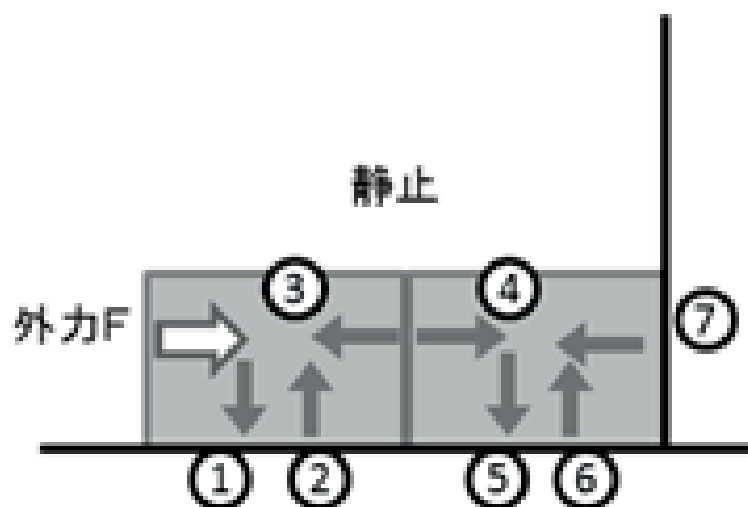


図 4-1 力の作図の例

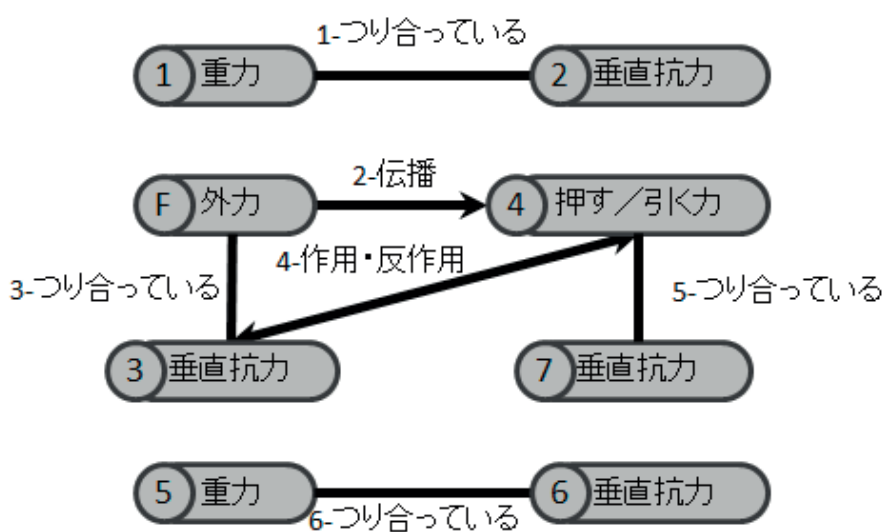


図 4-2 力の関係図の例

#### 4.3.2. システム概要

本システムでの外化は、力の作図と力の関係図の作成の二段階に分けて行われる。図 4.3 にそのインターフェースを示した。このインターフェース上で、学習者はまず画面左の力の作図領域において、作図を行いたい部分でのクリックとドラッグ操作によって作図を行い、さらに作図した力の名前を入力する。またこのときシステムは、作図された力に対応する

力のノードを画面右側の力の関係図領域生成する。この作図と名前を入力を物体系にはたらいっている全ての力について行う。次に学習者は力間に存在すると考えられる関係をリストから選択することで関係リンクを生成する。さらに学習者は生成された力のノードとリンクを用い、ドラッグ&ドロップ操作によってノードとリンクの接続を行うことで、力の関係図の作成を行う。そして最後に、作図した力と作成した力の関係図それぞれに対して、システムは診断・フィードバックを行う。

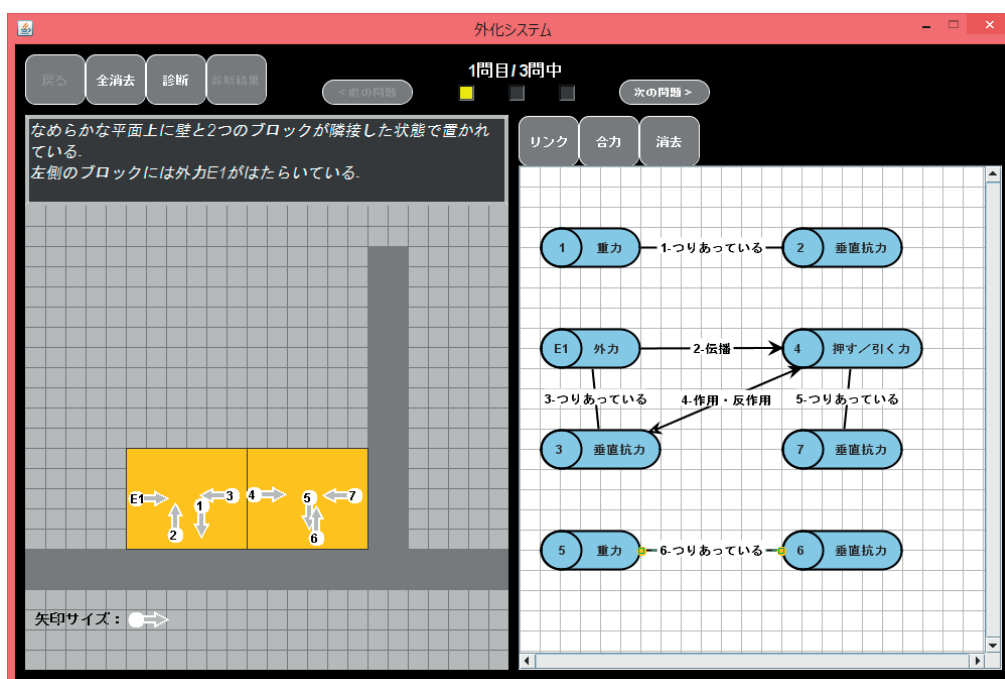


図 4-3 システムインタフェース

### 4.3.3.力の関係図生成支援

外化の問題点は、自発的には起こりにくい活動であるとともに、学習者にとって負荷の大きい活動であることである。そのため、この外化活動を促進・補助するための何らかの支援が必要となる。

そこで本システムでは、ユーザが力の作図を行い、その力の名前を選択するとノードが自動生成される機能を実装することで、関係図作成の際の学習者の負担の軽減を行っている。またこのような支援により、力の関係図の作成に必要なノードが部品として自動的に用意されるため、力の関係図を作成するきっかけができる。またリンクについては、4.2.2項で整理した関係をメニュー形式で用意しており、この中から選択するという簡略化された操作によってリンクを生成することが出来る。そしてユーザによる力の関係図の作成作業はノードとリンクの接続に限定されることもまた、ユーザの負担の軽減につながると考

えている。また、システムには学習者の作図結果を診断し、フィードバックを返す支援機能が実装されており、この点については次節にて詳しく述べる。システムフローを図 4.4 に示す。

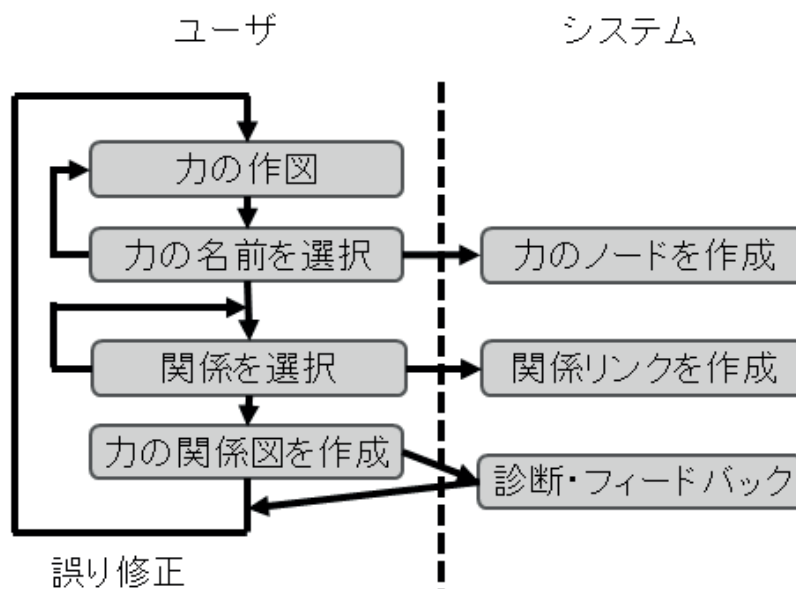


図 4-4 システムフロー

#### 4.3.4. 診断とフィードバック

力は「作用点」「向き」「大きさ」の 3 つの要素によって定まるとされており、さらにこの 3 つからその力の名前が決定されると考えられる。そのため力の作図における正解データには、物体系にかかるそれぞれの力の「名前」「対象物」「位置」「向き」「大きさ」が記述されている（「作用点」は「対象物」と「位置」の 2 つに分けて考える）。作図された全ての力について、それぞれ正解データとの間で要素を総当たりで比較し診断を行う。

力の関係図の診断は、関係（リンク）ごとに行う。一つの関係には、関係の種類、リンクの方向、リンクの接続元（ソース）の名前、ソースの作図データ（名前も含む）、リンクの接続先（ターゲット）の名前、ターゲットの作図データ（名前も含む）の 6 つの要素が存在する。そして、力の作図の診断と同様に、それぞれの関係について正解データと総当たりで比較することで診断を行う。

この比較において要素が一つだけ異なる正解データが見つかった場合、本システムではこの解答をその正解データを意図した間違いであると判断し、異なる要素を誤りとして指摘するフィードバックを実装している。このとき、学習者の解答データがどの正解データと対応しているのかを判定しなければならない。そこで、それぞれの要素に優先度をつけ、

最終的に意図している可能性の最も高い正解データを選出している。

力の作図については、まず力を捉えるうえで根本的であるとの考えから、「対象物」「向き」の一致を前提とする。次に残りの「名前」「位置」「大きさ」のうち、力自体を表すという点から「名前」の優先度を高くしている。また、「位置」は力の種類によって決定されるが「大きさ」は決定されないことから、「大きさ」をより優先度の低いものとしている。このような観点から、学習者の記述した力に対し、次のような優先度で正解データとの比較を行い、意図したものと判断する。

（「対象物」「向き」が一致するものとの比較）

「名前」「位置」が一致する正解データ

> 「名前」「大きさ」が一致する正解データ

> 「位置」「大きさ」が一致する正解データ

力の関係図についても同様に、「種類」「向き」「接続元の名前」「接続元の作図データ」「接続先の名前」「接続先の作図データ」の6つの要素に優先度を設けている。6つの要素が全て一致する正解データが存在する場合、それは正解と判断される。そうでない場合、まずここで「接続元（接続先）の作図データ」（以下、「作図データ」）が一致しないとは、力の作図の診断において不正解と診断されたことと同義である。間違った力に力間の関係を考えることは本来正しくないため、「作図データ」が一致することは、学習者の意図する関係を推測するうえで前提となると考えられる。同様に、「接続元（接続先）の名前」（以下、「名前」）も前提とする。次に残りの「種類」「向き」のうち、「向き」は「種類」が理解されて初めて定まるため、これらのうち「種類」の方がより優先度が高いと考えられる。このような観点から、学習者の記述した力間の関係に対し、次のような順番で一致する正解データを探し、意図したものと判断する。

「作図データ」「名前」「種類」が一致する正解データ

> 「作図データ」「名前」「向き」が一致する正解データ

> 「作図データ」「種類」「向き」が一致する正解データ

> 「名前」「種類」「向き」が一致するデータ

このような方法で意図していると判断した正解データと、学習者の記述した力や力間の関係との間で相違している要素を提示することで、学習者へのフィードバックとしている。また、2つ以上の要素が異なっているものについては現時点では判断できないものとし、単純に間違いとして提示している。

例えば図 4.5 のような状況において、学習者が図 5 右のような「重力」を作図したと考える。この時、この作図された力と「対象物」と「向き」の両方が一致する正解データは「重

力」と「(上のブロックが) 押す力」の二つである(図 4.5 左. 説明のために他の力は描いていない). そのためこの場合には, この力が重力と押す力のどちらを意図して作図されたのかを判定する. この例では, 正解の重力の作図に対しては「名前」と「大きさ」が一致し「位置」が異なっており, 正解の押す力の作図に対しては, 「位置」と「大きさ」が一致し, 「名前」が異なっている. 力の作図においては, 「名前」の優先度を高く設定しているため, 「名前」の一致している重力の作図の誤りと判定し, 作図位置が誤っていると指摘する.

なお, 本システムで用いている診断における優先度の妥当性については, 現時点では検証されたものとなっていない. この優先度の妥当性についての検証も, 今後の本研究の課題となっている.

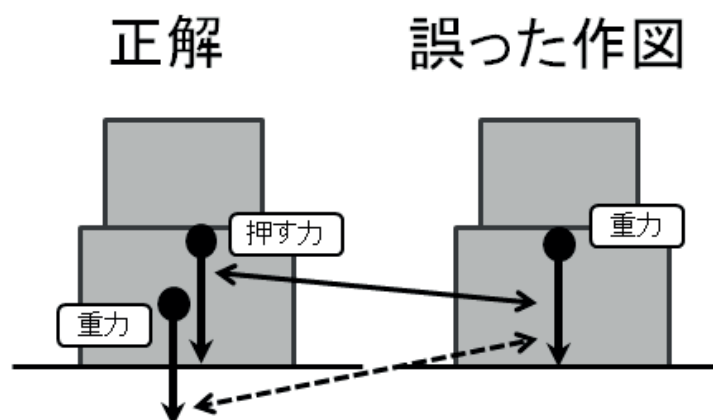


図 4-5 誤った作図の例

#### 4.4. 予備的評価実験

本評価実験の目的は, 本システムを用いた力と力間の関係に関する外化が学習活動として成立するかどうかを確認することである. そこでまず, 外化活動が行えたかどうかを確認するために利用ログ, 事前・事後アンケートの収集・分析を行った. またこの活動が外化に関する学習効果をもたらしていることを確認するために, 外化に関するプレ・ポストテストの実施とその結果の分析を行った. さらに, 4.3.4 項で述べた誤りの診断法の妥当性の検証を, 本利用において得られた主な誤りに関して行った. 本研究の目標が外化による対象に対するより深い理解の達成にあるのに対し, 本評価はシステムを用いた外化活動が学習活動になっていることを確認しているだけであり, 予備的なものといえるが, 同様な

学習活動がこれまでに実施されていないことを考えると、本評価の段階でも十分に意義のある結果になっていると判断している。より深い理解の達成に関する評価は、今後の課題となっている。

#### 4.4.1. 実験内容

被験者は工学系の学生 29 名で、大学の入試にあたっては全員物理学を選択している。まず簡単な事前アンケートに答えてもらった後、力間の関係の記述方法についての説明した上で、プレテストを 5 分間、システム利用を約 15 分間、ポストテストを 5 分間実施し、最後に事後アンケートに回答してもらった。

##### (i) システムの利用

システム利用では図 1 に示した状況を課題とし、正解となる記述は図 1 と図 2 である。正解となる力の数は 7 個、関係の数は 6 本である。システム演習に使用した課題は 1 問であるが、今回の利用の目的である外化活動がシステム上で行えることの確認としては、問題は無いと考えている。現時点では力と力間の関係の把握が外化の対象となっており、基本的な問題においても力と力間の関係の把握が十分にできていないような学習者を支援対象としている。このため、課題としては比較的単純な課題を使用している。また力の合成・分解の関係は取り扱っていないが、これは通常の力学演習でも行われる操作あり、それ自体の理解は事前の説明のみであっても十分であると考えている。

システムのログデータ（有効データ 24 名分）からは、被験者が 1 人当たり診断ごとの累計で平均 45.63 回の力の記述や 26.08 回の関係の記述といった多くの外化活動や、作図したものに対する診断・フィードバックを 1 人当たり平均 6.29 回行っており、本システムを利用することで、インタラクティブな活動が行えたといえる。

被験者の誤りについて詳しく見ると、誤った力の作図は 100 件あり、それらは、力を間違った対象に記述した「対象物の間違い」(76 件)、力を間違った位置に記述した「位置の間違い」(16 件)、問題の状況では発生しない力を記述した「状況理解の間違い」(8 件)のいずれかに分類された。また、力間の関係図の作成における誤りは 178 件確認され、その内 125 件の誤り（約 70%）が「物体系の捉え方の間違い」(36 件)、「作用・反作用とつり合いの概念が逆」(42 件)、「力の作図の誤りに伴う間違い」(47 件)に分類された。これら以外の誤りは、1 人しか誤りが生じていない場合や、どういう誤りか判断が困難なものであるため、分析は行っていない。これら誤った力や関係を生成した『誤記』の誤り、及び必要な力や関係を生成しなかった『欠落』の誤りをした人数、及びフィードバック後には最終的にそれら誤りを修正できた人数を表 4.2 に示す。結果として、力の作図の誤りをした人よりも、力の関係図の誤りをした人の方が多くみられ、誤りの修正が行われた割合につい

でも力の関係図の方が力の作図よりも少ないことが分かる。

また、被験者ごとに見ると、力の作図での誤り数は1人平均4.17件、不偏分散は46.06であり、力の作図では全く誤りのない被験者は24名中11名いた。一方力の関係図では分析対象とした誤りの数は1人平均5.21件、不偏分散は22.78であり、全く誤りがなかったのは24名中4名であった。これらそれぞれの作図での誤りの有無ごとの人数（0内は分析対象者24名に対する割合）について表4.3にまとめる。これより特に、力の作図では誤りがなかった11名の被験者であってもそのうち10名が、力の関係図では誤りを示したことから、力に比べその間の関係の理解が十分ではないと考えられる。一方で、4名の被験者は力の関係図において誤った記述を行ってはおらず、操作自体に大きな困難さがあったとは考えにくい。同様の分析を欠落についても行ったところ、力の作図での欠落数は1人平均1.83件、不偏分散は13.88であり、全く欠落のない被験者は24名中16名いた。一方力の関係図では欠落の数は1人平均12.79件、不偏分散は106.78であり、全く欠落がなかったのは24名中2名であった。これらについて表4.4にまとめる。これより、力の作図では欠落がなかった16名の被験者のうち14名が、力の関係図では欠落した関係があったことが分かる。

これらのことから、通常正しく力の作図を行うことが出来る、或いは何らかの指導によって正しく作図できるようになった学習者であっても、力間の関係の適切な理解が伴っていない場合があると考えられる。また通常それら理解は明示されることが少ないため、それら理解の間違いを明確化し修正するために、力間の関係への理解を外化することには意義があるといえる。

さらに、関係図での誤りに関して詳しく見る。多く見られた3つの誤りのうち、「物体系の捉え方が誤っている」とは、複数であるが同じ運動（静止）を行うブロックを1つのオブジェクトとして扱うという、系の捉え方に依存する誤りである。また「力の作図の誤りに伴って誤っている」とは、力の作図の時点で誤った力を作図してしまったために、関係記述でもそれが使われ、結果的に誤りとなったというものである。すなわち、純粋な力間の関係に関する間違いとしては、先行研究[50,51]で見られたような「作用・反作用と力のつり合いとの混同」がその多くを占めていることが分かる。このように誤りが明らかになったこと、またそれらの多くが修正されていることから、力間の関係作図には意義があるといえる。

表 4-2 システムでの誤りと修正の人数

誤りのパターン			誤りをした被験者数 (間違い件数)	修正した被験者 数
力の作図 の誤り	誤記	対象物	10(76)	10
		位置	5(16)	3
		状況理解	1(8)	1



	欠落	①重力	1(1)	1
		②(垂直)抗力	1(1)	1
		③(垂直)抗力	6(17)	6
		④押す・引く力	4(18)	4
		⑤重力	2(2)	1
		⑥(垂直)抗力	2(2)	1
		⑦(垂直)抗力	1(3)	1
関係図の誤り	誤記	物体系の捉え方	14(36)	9
		作用・反作用とつりあい	11(42)	8
		作図の誤りに伴う誤り	8(47)	6
	欠落	①つりあっている	4(9)	3
		②伝播	16(56)	10
		③つりあっている	16(90)	10
		④作用・反作用	17(64)	10
		⑤つりあっている	16(78)	10
		⑥つりあっている	5(10)	3

表 4-3 作図での誤記の有無ごとの人数

		力の関係図での誤り	
		無	有
力の作図での誤り	無	1(4.2%)	10(41.7%)
	有	3(12.5%)	10(41.7%)

表 4-4 作図での欠落の有無ごとの人数

		力の関係図での誤り	
		無	有
力の作図での誤り	無	2(8.3%)	14(58.3%)
	有	0(0%)	8(33.3%)

## (ii) プレ・ポストテスト

プレ・ポストテストの内容は、ある物体系にはたらく力が作図された状況を提示し、その力と力間の関係を 4.3 節で説明した関係図の形式で答えてもらうものである。問題群は a

群と b 群の 2 つを作成し、被験者も A 群と B 群の 2 グループに分けた上で、プレテストとポストテストで交互に使うことで問題のカウンターバランスをとった。問題群はともに 3 問ずつであり、a 群での正解の関係数は 19 個、b 群では 21 個であった。

間違いには (1) 必要な関係を描けない (2) 不必要な関係を描く、の二種類の誤りがあるため、以下の式から得られる F 値を得点とした。

$$(\text{適合率}) = (\text{正解解答数}) / (\text{解答数})$$

$$(\text{再現率}) = (\text{正解解答数}) / (\text{正解数})$$

$$F \text{ 値} = (2 * (\text{適合率}) * (\text{再現率})) / ((\text{適合率}) + (\text{再現率}))$$

プレテストおよびポストテストの結果を表 4.5 にまとめた。この成績について重複測定 - 分散分析法 (有意水準  $\alpha=0.05$ ) により分析を行った。その結果、交互作用は見られず、また被験者群間で問題群をプレ・ポストテストで交互に使用したことによる得点への影響は見られなかった。そのため、問題群間における差はないものと考えられる。一方で、プレ・ポストテストの成績は全体として有意に向上しており ( $F=12.57, P=0.001$  (両側)), 効果量は中程度であった ( $d=0.673$ )。この成績の変化をさらに詳しく調べるために、得点が 0.4 点以上である成績上位群 (15 名) と 0.4 点未満である成績下位群 (14 名) のグループに分けて分析を行った。各グループのテスト結果を表 4.6 に示す。それぞれのグループの平均点の差について有意水準  $\alpha=0.05$  で対応のある t 検定を行ったところ、成績上位群には有意差はなく ( $t(15)=-1.12, P=0.28$  (両側)), 効果量も小 ( $|d|=0.37$ ) であった。しかし、成績下位群については有意差が見られ ( $t(14)=-4.45, P=0.001$  (両側)), 効果量も大 ( $|d|=1.54$ ) となった。

この点についてさらに分析するため、正解の関係のうち解答できた割合である再現率、及び解答のうちの間違いの割合である誤答率をシステム使用前後でそれぞれ比較した (表 4.7)。その結果、成績下位群では再現率の有意な上昇が見られ ( $t(14)=-4.02, P=0.001$  (両側)), 効果量も大 ( $|d|=1.30$ ) であった。また、誤答率の有意な減少が見られ ( $t(14)=3.18, P=0.007$  (両側)), 効果量も大 ( $|d|=1.04$ ) であった。一方、成績上位群では再現率 ( $t(15)=-1.45, P=0.168$  (両側)), 誤答率 ( $t(15)=-0.34, P=0.740$  (両側)) とともに有意な差は見られず、効果量も再現率で中 ( $|d|=0.418$ )、誤答率で小 ( $|d|=0.122$ ) であった。

これらの結果をまとめると、成績下位群については再現率の上昇と誤答率の低下という両面について、得点としての成績の向上が見られたといえ、これらの成績向上には力と力間の関係の外化という具体的な作業が貢献した可能性がある。ただし、本実験は予備的なものであり、システムの利用時間や取り組んだ課題を考えれば、この結果を持って直ちに本システムの学習における有用性と主張できるものではない。

表 4-5 プレ・ポストテストの結果

	平均点	標準偏差
プレテスト (N=29)	0.408	0.158
ポストテスト (N=29)	0.516	0.164

表 4-6 上位群・下位群のプレ・ポストテストの結果

		平均点	標準偏差
成績上位群 (N=15)	プレテスト	0.539	0.085
	ポストテスト	0.582	0.142
成績下位群 (N=14)	プレテスト	0.267	0.063
	ポストテスト	0.446	0.151

表 4-7 上位群・下位群の再現率と誤答率の平均

		プレ	ポスト
成績上位群 (N=15)	再現率	0.420	0.467
	誤答率	0.201	0.219
成績下位群 (N=14)	再現率	0.193	0.344
	誤答率	0.501	0.308

## (iii) アンケート

プレテストの前、及びポストテストの後にアンケートを行った。事前アンケートでは I, II 両問とも 4 件法、事後アンケートでは質問①から⑨が 4 件法であり、事後アンケートの質問⑩と⑪が 2 件法である。アンケートについては、システムにおける力の作図のしやすさと、力間の関係の理解に関する項目についてプレテスト成績上位・下位によって異なる傾向が見られた。作図がしやすかったかについては、成績上位群に作図がしづらいという人が多く見られ、ある程度理解している人にとってはシステムにおける制限によって使いづらく感じたと考えられる。また、力間の関係の理解については、これまでも力間の関係について理解できていたと思うという人が成績上位群、そう思わないという人は成績下位群に多く、力間の関係の理解がそのままプレテストの成績に表れたといえる (表 4.8)。これら以外の項目については、成績による差はあまり見られなかったのでまとめて述べる。事前アンケートでの回答を表 4.9 に、事後アンケートでの回答を表 4.10, 表 4.11 に示す。事前アンケートにて以前の力学問題解決における力の作図について聞いたところ、多くの被験者が力の作図をこれまで正しく行っていたと回答したのに対し (表 4.9: 質問 I), 事後アンケートでは約半数の人がシステムでの力の作図はうまく行えなかったと回答しており (表 4.10: 質問①), 力学の科学的概念を知っている学習者でも正しく力の作図を行うこと

は難しいこと、また正しくない作図に対する適切な指導が十分に行われていない可能性があることが考えられる。また、力間の関係についても、システムでの力の関係図の作成ができなかったと回答した人が半数以上で（表 4.10：質問②）、ログデータからの分析でも述べたように、実際に力の作図よりも誤りが多かったことから、力間の関係を外化することは作図以上に難しい活動だったと考えられる。また、これらの作図作業の困難さに関して、システムについての否定的な意見は少なく、システムの利用性に起因するとは考えにくい（表 4.10：質問④⑤）。加えて、この力間の関係の理解が重要であるという肯定的な意見をほとんどの被験者から得られており（表 4.10：質問⑨）、また不適切な関係や、不足している関係はないという意見もほとんどの被験者から得られたため（表 4.11：質問⑩⑪）、本実験で使用した力間の関係の有用性が示唆される。前述のように操作性、またフィードバックについては、共に肯定的な意見が 7～8 割程度得られ（表 4.11：質問⑦⑧）、ある程度使いやすいシステムを開発できたといえるが、自由記述の内容から、操作上の見やすさや、視覚的に認識しやすいフィードバックについて、今後の課題として検討する必要がある。

表 4-8 成績上位群・下位群で差があった質問

		そう思う	まあまあ そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
質問 A	上位群	4	4	7	0
	下位群	7	5	2	0
質問 B	上位群	0	10	4	1
	下位群	1	2	9	2

質問 A：システムで力を作図する操作はやりやすかったと思うか

質問 B：これまでの力学学習ではこのシステムで行ったような力間の関係の理解ができていたと思うか

表 4-9 事前アンケート回答

	そう思う	まあまあ そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
質問 I	7	20	2	0
質問 II	12	15	1	1

質問 I：これまでに力学問題を解くときに、正しく力を作図することができたと思うか

質問 II：これまでに力の作図をするとき力と力間の関係について考えながら作図を行っていたと思うか

表 4-10 事後アンケート回答 1

	そう思う	まあまあ そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
質問①	1	13	15	0
質問②	0	12	17	0
質問③	7	18	3	1
質問④	11	9	9	0
質問⑤	4	17	8	0
質問⑥	11	11	5	2
質問⑦	11	13	3	2
質問⑧	1	12	13	3
質問⑨	17	11	1	0

質問①：システムでの力の作図は正しくできたと思うか

質問②：システムでの力の関係図の作成は正しくできたと思うか

質問③：システムで力の関係図を作成することで、力間の関係について考えながら力の作図を行えたと思うか

質問④：システムで力を作図する操作はやりやすかったと思うか

質問⑤：システムで力の関係図を作成する操作はやりやすかったと思うか

質問⑥：フィードバックで指摘された点は適切だったと思うか

質問⑦：フィードバックの指摘は誤りの修正に役立ったと思うか

質問⑧：これまでの力学学習ではこのシステムで行ったような力間の関係の理解ができていたと思うか

質問⑨：このシステムで行ったような力間の関係の理解が、力学を理解するうえで重要だと思うか

表 4-11 事後アンケート回答 2

	はい	いいえ
質問⑩	2	27
質問⑪	0	29

質問⑩：力間の関係について、最初に配布した関係の記述方法の説明の中に、不適切な関係があったか

質問⑪：力間の関係について、今回示した記述方法以外で必要だと思う関係があったか

#### (iv)考察

アンケート結果やシステムのログデータから、被験者は力間の関係を意識しながらシステム演習に取り組んでいたと考えることができる。このことから、本実験で用いたシステム上で、力とその関係に関する外化活動の実現が行えたと考えられる。一方、本実験で用いた課題は1問のみであり、比較的短時間での利用であったことから、能力向上や問題解決への影響についてはさらに検証する必要がある。

### 4.4.2.誤り診断の検証

4.3節において、力の作図と力の関係図それぞれについて、正解データと比較する診断方法を述べた。本システムでは、この診断結果に基づいて学習者に対するフィードバックを生成しているため、この診断の妥当性を確認しておく必要がある。ここでは、本システムの利用を通して得られた主な誤りに関して、その診断が妥当であったかどうかの検証を行った。

本検証では、本システムの利用での演習問題に対して2名以上が記述した9個の力の記述の誤りおよび13個の力間の関係の記述の誤りを対象として、これらの問題を完答できた工学系の学生7名にシステムの診断が妥当であるかどうかを2件法で回答してもらった。具体的には、その誤った記述に対応する正解の判定が妥当かどうかを尋ねるアンケートに答えてもらった。

全体的には肯定的な意見が多く得られたため、本システムにおける診断方法が不適切なものではないと考えられる。しかし、図4.6にaやbとして示した力が作図された場合、システムではaは図1の正解の力③を、bは図1の⑦を意図した間違いであると診断していたが、この点については4名が不適切であるとしており、摩擦力を意図した間違いとすべきであるという意見を得られた。また、図4.7上に示す力間の関係が記述された場合、システムではこれを誤りとして診断しているが、そのことに対する否定的な意見を3名から得られた。その理由は、隣接する2つの物体を1つと見なした場合、力のつり合いであると考えることが出来るというものであった。これに関連し、図4.7下に示す関係には対応する正解データが無いと診断しているが、図4.7上の図を正解と見なせば、つり合いの関係を意図した間違いと判断するべきであるとする意見も得られている。

これらのように、特定の場合においては例外的な診断が必要と考えられ、診断方法を改善する必要がある。またこのアンケート調査では、利用実験で実際に生じた誤りについて調査を行ったが、他の物理状況で生じる誤りについても調査を行い、診断方法の妥当性を検証していく必要がある。

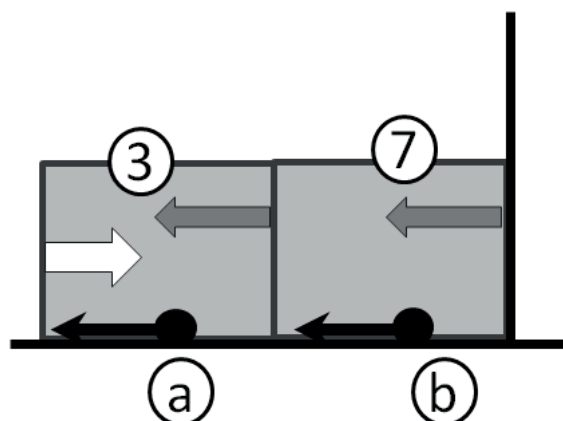


図 4-6 誤った力の作図

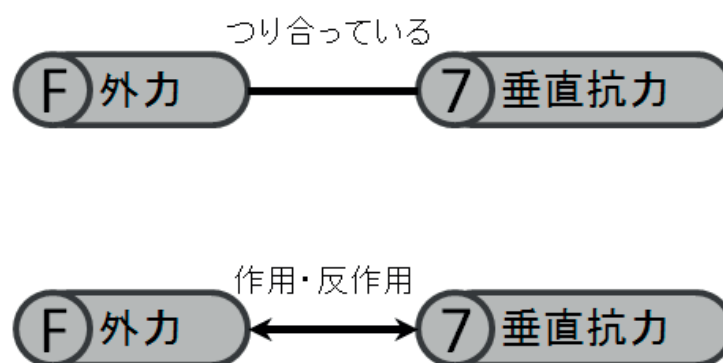


図 4-7 誤った力間の関係

## 4.5. 結び

本章では、力学分野における学習支援として力と力間の関係の理解の促進を目的とし、外化を用いた手法の提案を行った。ここではまず、対象となる力間の関係について整理した。また、その力間の関係を記述することができるインタフェースと、記述された外化表現を診断しフィードバックを返す機能を設計し、システムとして実装した。これらの外化支援機能の評価実験を行ったところ、実験データから、本システムの利用が外化活動の促進となる可能性が示された。また本システムの診断の妥当性についてアンケート調査を行ったところ、概ね本研究の診断方法が不適切ではないことが示唆されたが、特定の場合に

において改善の必要があると考えられる。

今後の課題として、システムの操作性の向上と、フィードバックの改善が挙げられる。

フィードバックについては、力の関係図において学習者の解答に誤りがあるとき、正解データとの差分を関係図上で示すなど、視覚的に認識しやすいフィードバックに改善していく必要がある。

また本研究で行った評価実験は予備的なものであり、実験環境の都合上、十分な時間を設けて行うことができなかった。そのため、改めてシステムや診断方法、学習効果の妥当性について検証していく必要がある。診断については、特定の場合における例外的な診断に加え、今回観測されなかった誤りに対する検討も必要といえる。また学習効果については、力間の関係の理解だけではなく、力の作図や問題解決への影響についても調査する必要があると考えている。

また、現時点では系にはたらく力の把握という初歩的な能力の獲得・向上を目的とすることから、例題についても比較的単純なものを用いている。今後、より複雑な力学系への拡張の必要性が考えられるが、その際現時点で診断のためにシステムが総当たりの手法を行っていることから、計算量増加が予想される。これにより、演習時の計算機への負担増、またその回避のために問題の複雑さに制約が課される可能性が考えられる。したがって、より複雑な課題を取り扱えるようにするためには、診断方法やシステム上での処理方法の再検討が必要となる。



## 5. 力に対する理解の外化とフィードバック

第4章では、力学問題における、系にはたらく力とそれらの間の関係の理解に関する学習支援システムについて述べた。そこでは力間関係に対する理解を対象としていたが、力自体に対する誤りもまた考えられる。また、そこでは学習者の間違っただけの理解に対し指摘を行っていたが、それらの修正のためのフィードバックについては十分に行われていなかった。本章では、同分野での力に対する誤りの修正の具体的な手法として、**Error-Based Simulation** について述べる。また、同手法を用いたシステムの実践的な利用に関しても述べる。

### 5.1. まえがき

初等力学においては物体の運動を知るために、運動方程式を立て、それを解く必要がある。筆者らはこれまでに、この立式を段階的に外化させ、そこでの間違いを抽出し修正することを試みてきた[46]。一方で、この立式を行う前の段階として、系にはたらく力を正しく把握することが必要となるが、この力の把握がしばしば多くの学習者にとって最も困難な段階であることが指摘されている[9,10,38]。このため、このはたらく力の把握の段階を対象とした学習支援を行うことには意義があると言える。

このような運動系でのはたらく力に関する学習支援はこれまでもさまざまな形で試みられている。山崎ら[12]は、水平面や斜面上で運動する台車を対象とし、振り子を用いた装置でのはたらく力の可視化を行っている。また加藤ら[14]は水平面や斜面上で運動する台車に対し、電子的なセンサを用いた力の計測による可視化を行っている。また南ら[13]は、センサによるはたらく力の計測とLEDによるその大きさと向きへの提示を行う実験装置を開発し、直線運動や落下運動にてはたらく力の提示を行っている。これらの試みにおいては、物体にはたらく正しい力が可視化されており、学習者が誤った考えを持っていた場合に、自身の考えが正しいものと異なっていることによって、誤っていることに気付くことを促している。一方で、学習者の誤りを修正する上で、学習者自身に誤りであることを納得させることの重要性が指摘されているが[15,16,17]、そのためには学習者の誤りに応じた学習支援が必要となる。このような観点に立つと、どのような誤りに対しても、同じ正解を提示することになる上記のような学習支援は、学習者の誤りに応じた学習支援を目指すものではなかった。そのため、これらの学習支援は、学習者の考えが正しくないことを指摘してはいるものの、どのように誤っているかは示しておらず、誤りであることを納得させる上で必ずしも十分ではないといえる[18]。

また Tao ら[52]はコンピュータプログラム上での運動のシミュレーションを利用した教授を行っている。ここでは幾つかの物体（宇宙船、モデルカー、スカイダイバー）の運動を対象とし、その運動とはたらく力の予想と観察を行っている。このため、学習者が誤った考えを持っていた場合、予想と違う運動が現れるため、誤りに対する納得性の高いフィードバックが与えられると期待できる。しかしながら、そこでは力について答える際、学習者は力の原因（エンジンが起動しているか否か等）で答えており、実際に力自体を記述してはいない、また運動方向以外の方向の力を扱わないなど、学習者の力の把握を十分に捉えられているとはいえない。

これらの考察に基づくと、学習者による力の把握を運動系に対して直接的に表現させたうえで、それを運動に反映させることが有力な方法であると考えられる。そのような方法として、学習者による力の把握の直接的な表現を運動に反映させ、その把握が誤っている場合にそれらに応じた不自然な運動を生成する **Error-Based Simulation (EBS)** が提案されている[17,53,54,55,56,57]。この方法の実践的な利用及びその有効性についての検証は、静止系に対する力の把握の誤りに対しては既に行われているが[56,57]、運動系に対しては行われていなかった。静止系においては静止している状態が正しく、そこから外れた動きはすべて間違っていると判断可能であるのに対し、運動系においては、正しい運動と間違った運動との差を判断することが必要となるため、静止系での **EBS** の実践的な有効性をもって、運動系でも同様に有効であるということとはできない。そこで本研究では、この運動系に対しての **EBS** の効果の評価を行った。

## 5.2. Error-Based Simulation

本節では、本研究で用いている **Error-Based Simulation (EBS)** に関して述べる。

### 5.2.1. Error-Based Simulation の概要

**EBS** は学習者の立てた運動方程式中の誤りを、方程式の世界から、物体の挙動の世界へと反映することによって生成される運動のシミュレーションである。すなわち **EBS** は、力学系を構成する物体の不自然な振舞いを提示し、物体の正しい挙動（以下、**Normal Simulation : NS**）との差異として誤りを可視化する。先行研究[17]ではこの可視化の条件を顕在化条件と呼び、

1. **EBS** と **NS** との間において対象とする物体の速度が定性的な差異を示す
2. 対象とする物体の速度が定性的な差異を示さない場合、何らかのパラメータ摂動に対する速度の変化率において、**EBS** と **NS** との間に定性的な差異を示す

の二つの条件を顕在性として設定している。さらに「(1)と(2)の両方を満たす」「(1)のみを満たす」「(2)のみを満たす」の順に、顕在性が大きいとしている。

また **EBS** は、単に顕在性が大きいだけでなく **EBS** に対する信頼性である「もっともら

しき」を伴っている必要があり、顕在化のためのパラメータ変動に影響を受ける。さらにスムーズな学習のために、EBSによって顕在化された差異が学習者の学習すべきことを適切に示唆しているという「示唆性」が重要になり、これは誤りの原因と示唆されるものと一致するかということの意味する。EBSの有効性はこれら3つの要因に影響を受ける[17].

先行研究においては、静止が正しい運動となる物理系を対象としたEBSの利用を行っている。ここで用いられたシステムにおいては、学習者は物体にはたらいていると考えた力を実際に作図し、その作図に基づく物体の運動のシミュレーションをシステムが提示する。そしてこのシミュレーションを、学習者にとって既知である現実での物体の運動と比較することで、それらの間の矛盾に気づき、学習者の誤りの修正につながる、という学習活動が行われている[56,57]. このような静止系においては、力の正誤が運動の有無として表れ、またそこでのEBSの効果が確認されている。

先行研究で対象とした静止系におけるEBSの場合、速度および速度の変化率の二つの顕在性条件を両方満たすことになる。これに対し本研究で対象とする運動系では、時間というパラメータ摂動に対する速度の変化率、つまり加速度という形で顕在化条件の(2)のみを満たすことになり、(1)と(2)の両方を満たす静止系よりも顕在性が劣ることが予想される。例えば、運動系で多く見られる間違いとして、図 5.1 の(1)のように運動の向きに余剰の力を描くというものがあるが、これは加速度として顕在化される。一方、もっともらしさに関しては、静止系においても運動系においても、時間というパラメータを変動させることで顕在化を行っており、この点についての違いはない。また示唆性に関しても、誤りの原因である余剰な力や欠落は、運動の向きで示唆されるため、やはり静止系の場合と同様である。これらより、「もっともらしさ」「示唆性」の2点に関しては、EBSを運動系において利用した場合でも静止系と同様であるといえる。したがって本研究の目的は、顕在性において劣る運動系でのEBSの効果を実践的に検証するためのものと位置付けることができる。

また、先行研究においては該当範囲の履修の3か月後にEBS利用を行っており、これは忘却するに至る一定期間後に行われたものとなっている。そこで、本研究においても忘却に至る十分な時間をとり、また授業内で行うというスケジュールの都合からも、該当範囲の学習から8ヶ月後に利用を行った。



図 5-1 システムのインターフェースと EBS の例

### 5.2.2.利用した EBS システム.

本研究では、運動系に対する EBS システムを、Android タブレット上に実装した。図 5.1 の(1)は EBS システムのインターフェースを示す。システム画面は、上段の問題文、中段の各種ボタン群、そして下段の作図領域、という構成になっている。このシステムには、学習者による力の作図と EBS による誤りの修正の促進という 2 つの機能が実装されている。本節ではこのシステムについて、行う演習やそこでの操作を概説する。

本システムにおける演習において学習者は、まず提示された問題について、与えられた図に力の作図を行う。この作図機能は、学習者が一般的に行われる矢印での力の作図と同様の作業を、画面上で行えるよう設計されている。具体的な作図作業として学習者は、力の矢印を描き始めたい場所を指で押さえ、描きたい方向に指を動かし、任意の長さになったときに指を離すことで、矢印が作図される。力の矢印の長さはその力の大きさを表すが、本システムでは矢印は 3 段階の長さで作図可能であり、実際の長さと共に色によって識別できるよう表現される。また力の矢印の向きはその力のはたらく向きを表すが、本システムでは鉛直方向、水平方向、物体の運動方向とそれに対して垂直な方向に作図することができる。力の矢印の始点はその力のはたらく場所を表すが、本システムでは物体の上下左右と中心から描くことが出来る。また、一度作図した矢印を消去したい場合には、その矢印の先端をロングタップすることで、消去することができる。図 5.1 の例では、等速直線運動する人物に関する課題を示しており、人物の中心から下向きと右向きの矢印を、また足元から上向きの矢印を作図している。このような作図は、運動の向きに力がはたらくという典型的な誤りの一例である。

作図の完了後、学習者は「入力完了」ボタンをタップすることで、自身の作図に基づく運動のシミュレーションを見ることが出来る。例えば図 5.1 の(1)のような誤った作図の場合には、鉛直方向には正しくつり合った力が作図されているが、運動の向きに本来は存在しない力が作図されているために、人物は図 5.1 の(2)に図示するような加速度運動を行うことになり、またシステムは実際にインターフェース上でこれを提示する。現実での正しい

運動は図 5.1 の(3)に図示するような等速直線運動であり、学習者にとって既知であるため、このシミュレーションを観察することで、学習者は自身の誤りに気づき、修正することが期待できる。作図結果の正誤はシステムによって診断されており、作図結果が正しければ学習者は次の問題に進むことが出来る。なお、各問題での物体の正しい運動は、その問題の開始時に一度インタフェース上で提示され、また「正しい運動を見る」ボタンをタップすることで、作図中にいつでも確認することができる。また、自力で正答できない場合には、「ギブアップ」ボタンをタップすることで、次の問題に進むことが出来る。

### 5.2.3.システムで用いた課題.

本節では、本研究で使用したシステムに実装されている課題について説明する。

本研究では、初速度を持った物体の運動（以下、運動系）についての演習を主な目的としている。対象となる最も単純な種類の運動系としては、①運動方向に力がはたらいでない等速直線運動、が考えられる。

次に、同様に等速直線運動であるが、はたらいしている力が異なる②運動方向で力がつり合っている等速直線運動、が挙げられる。さらに③加速度をもった運動、が考えられる。

上記①～③を含み、中学校で対象とする具体的な課題として、

- (A) 摩擦のない氷の上を等速直線運動する人 (①)
- (B) パラシュートを開いて等速で落下する人 (②)
- (C) 垂直に投げ上げられたボール (③)

の 3 問を基本課題として実装した。また、上記①～③に対応し、より複雑なはたらく力の応用課題として、

- (D) 宇宙空間で等速直線運動する宇宙船 (①)
- (E) 摩擦のある水平面上で物体を等速で押す (②)
- (F) 斜方投射されたボール (③)

も実装している。

また、後述の中学校での実践に際し、静止系についての学習が運動系についての学習の前段階であり、力学系における力の復習を行う上で、先に静止系を行い、次に運動系を行うのが望ましいという現場の要望を取り入れ、先行研究[56]にて用いられた課題の一部である以下の 3 つを実装している。これらの静止系については、本研究においては先行研究の追試の位置づけとなる。

- (a) 床の上に静止するブロック
- (b) 壁に向かって押され静止する 2 つのブロック
- (c) 床の上に積み重ねられた 2 つのブロック

実装されている課題を図 5.2 に示す。

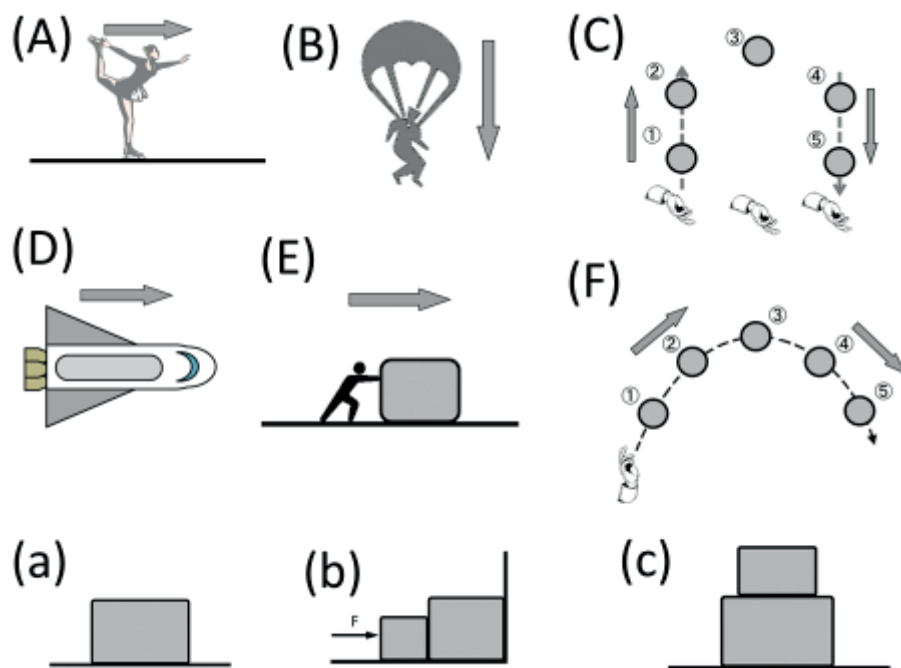


図 5-2 実装された課題

### 5.3. 中学校でのシステムの実践的利用

本研究では、前節で述べた EBS システムの効果の確認のため、中学校での実践的な利用を行っている。本節ではこの実践の詳細について述べる。

#### 5.3.1. 利用計画

本研究では、運動系における力の把握課題に対する EBS システムの効果进行调查するために、中学校理科における授業での利用を行った。事前に該当の公立中学校に赴き、理科担当教員に EBS システムとその課題を見せた上で、同中学校の理科の授業に利用可能であることを確認し、教員との相談の上で利用計画を立てた。この利用においては、(1)EBS システムを用いて演習課題を解く自習を主に行い、残り時間で演習課題の正解を教員が説明した群 (EBS 単独群)、(2)EBS システムを用いて力と動きの関係を見せながら授業を行った群 (EBS 利用授業群)、(3)通常行っている形式で演習課題を題材とした講義を行った群 (通常授業群)、の 3 群を設けて、それぞれ 1 クラスを割り当てた。(1)と(2)がそれぞれ異なった形での EBS システムの利用となり、実験群に相当する。(3)は統制群となる。(1)と(3)については、EBS の利用が初めての同一教員が担当した。(2)については、本実践の協力者であり静止系の EBS システムの利用経験のある教員が担当した。生徒は該当範囲を 8 ヶ月前に受講済みの 3 年生であり、今回の授業は復習と位置付けて行われた。

また、本研究の目的は運動系の EBS の効果の検証であるが、本実践に当たり、担当の教員より、実践の手順としては教科書の順序に沿って静止系の力についての授業を行った後で、運動系の授業を行うのが実践においては妥当であるという見解を得たためそれに従った。この場合、静止系の学習が運動系の成績に与える影響が問題となることが考えられたが、(1)初等力学において静止系と運動系は明確に区別して教えられている現状を考えると、静止系の学習に伴う運動系の成績向上は比較的遠い転移になるといえること、(2)担当教員らの見解は、静止系の学習を行うだけで運動系の成績が向上することはほとんどないというものであったこと、の 2 点から検証結果を左右するほどの大きな影響は与えないであろうと判断した。また、いずれの群についても静止系の授業と運動系の授業の両方をこの順で行ったことについては同等であるため、群間に現れた差はその演習方法によるものといえることができる。これらのことから、今回の実践の流れは最適であったとはいえないものの、実際の学校現場で実践的にシステムを用い、その効果を確認するうえでは妥当であったと考えている。

利用手順としては、上のような判断に基づき、また 2 週間という期間の中で行う必要もあり、事前テスト (25 分)、事前テストと同じ週 (EBS 単独群：3 日後、通常授業群：1 日後、EBS 利用授業群：3 日後) に第 1 回の授業 (静止系)、その翌週 (EBS 単独群：6 日後、通常授業群：7 日後、EBS 利用授業群：5 日後) に第 2 回の授業 (運動系)、第 2 回の授業の後 (EBS 単独群：1 日後、通常授業群：2 日後、EBS 利用授業群：1 日後) に事後テスト (30 分)、という構成で実施した。また、全群に関して事後テストの 33 日後に遅延テストを実施した。間隔がずれているのは、時間割の都合である。なお 1 時限は 45 分であった。また演習やテストでの欠席を考慮した結果、分析対象は EBS 単独群が 35 名、通常授業群が 37 名、EBS 利用授業群が 33 名となった。また詳細は次節にて述べるが、事前テストの課題のうち分析に用いた課題の成績 (運動系 3 問、静止系 3 問) は、表 5.1 に示した通りであり、各群で差は見られなかった。

表 5-1 事前テストの平均正解数

	運動系 (3 点満点)	静止系 (3 点満点)
EBS 単独群 (N=35)	mean=0.286 SD=0.511	mean=0.257 SD=0.498
EBS 利用授業群 (N=33)	mean=0.394 SD=0.600	mean=0.273 SD=0.565
通常授業群 (N=37)	mean=0.541 SD=0.825	mean=0.297 SD=0.513

### 5.3.2.各群の演習内容

本節では、(1)EBS 単独群(2)EBS 利用授業群(3)通常授業群の各演習方法について述べる。

#### (1)EBS 単独群

EBS 単独演習群では、生徒全員に対し、1 台ずつタブレット PC を配布し、EBS システムを利用することで演習活動を行った。演習時間内においてまず、約 10 分間を使ってシステムの操作方法の説明を実験者（システム作成者）が行った。その後約 30 分間、生徒に 1 人 1 人のペースでのシステムでの演習を行わせた。その際、システムの使用方法等に関する質問には実験者が対応したが、演習内容や解答に対する質問には答えなかった。

EBS 単独での演習には、作図、シミュレーションの観察、誤りの発見、修正といった過程が必要であり、一般的な演習よりも時間を要する。また、正解が提示されることもないため、最終的に解けた課題数が学習者ごとに異なることが予想される。それと共に、前述のように、単純な運動系での運動は 3 つに大別でき、それぞれについて学習する必要がある。これらのことから、運動系の演習に関しては、前述の(A)～(C)の基本課題 3 問を解くことを目標とし、それらが解けた者に対しては(D)～(F)の応用課題 3 問にも取り組むことを許した。結果として、基本課題を全問解くことができなかった生徒は 2 名であり、基本課題を全問解くことができた生徒は残りの 33 名であった。応用課題に取り組んだ生徒は全員が少なくとも 1 問を解いており、応用課題すべてを解いた生徒は 29 名であった。静止系の演習に関しては、(a)～(c)の 3 問の完了を目標とした。生徒の 33 名が少なくとも 1 問を解いており、11 名は 3 問全問を解いていた。

演習の終了後、約 5 分間を利用し、授業担当の教員によって正解となる作図の説明を行った。説明には、大型のディスプレイを用い、EBS システムの画面上での正解となる作図とその場合の運動を表示して行った。またこの際、運動系の演習では後述の通常授業群で対象とした(A)～(C)の 3 問のみ、静止系の演習では全 3 問を説明の対象とした。

#### (2)EBS 利用授業群

EBS 利用授業群においても、生徒全員に対し、1 台ずつタブレット PC を配布し、EBS システムを利用した授業を行った。この群の演習では、実装された課題を 1 問ずつ、まず EBS システムを用いて生徒が自身で演習を行い、その後教員が EBS システムの画面を大型のディスプレイに表示して生徒に見せながら、全員に対して解説を行う、といった形式での授業を行った。またその際、正しい作図では正しい運動が行なわれることと共に、多く見られる間違った作図を取り上げ、その場合に起こる間違った運動も提示した。

このような方法では、各課題において注意すべき点を EBS を用いて端的に説明できることもあり、運動系においては予定していた 6 問全てを、静止系では 3 問全てを取り扱うことができた。

#### (3)通常授業群

通常授業群では、一般的な授業の形での説明を行った。授業時間内では最初の約 10 分間



を用い、生徒はプリントで作図を行った。その後、約 30 分を利用して、担当教員がはたらく力を課題ごとに解説した。この解説の内容については、担当教員に委任したが、EBS との比較という観点から、何らかの誤った力の作図を取り上げ、そのような力が実際にはたらいっている場合にどのような運動をするか、といった仮定を用いる説明は行わないものとした。この制限は、通常の授業においては元々このような説明は行わないため、特に問題がないとのことであった。最後に、約 5 分間を用いて、復習として各課題の正解を再度説明した。またその際、授業最初に用いたものと同じプリントを復習プリントとして配布し、確認の作図を行わせた。これは、授業のまとめとして行ったものであるが、EBS 単独群における正解の説明に対応するものとなっている。

この通常授業群では、全被験者が確実に課題に正解できることを目標とし、様々な角度からの詳細な説明を行った。その結果、このような説明には 1 問あたりにかかる時間が長く、説明できる課題数が限られた。このことから、運動系の演習で取り扱うことができたのは上記の 3 種類の運動に対応した基本課題 3 問であり、静止系の演習では課題 3 問全問であった。

### 5.3.3. 評価テスト

今回の利用では、効果測定のための筆記テストを行った。各テストは演習と同様、与えられた図に対し、力の矢印の作図を行うというものであり、演習とは別の時間にて行われた。

事前テストでは前述の運動系の(A)～(F)、及び静止系の(a)～(c)の 9 問を用い、25 分間で解答した。

事後テストでは事前テストの課題 9 問に加え、さらに転移課題として運動系の 4 問、及び静止系の 2 問の 6 問を用い、30 分で解答した。運動系の追加の 4 問はそれぞれ、

- (G) 摩擦のない斜面上と水平面上を運動する台車
- (H) 摩擦のない氷の上で押されて加速するそり
- (I) 摩擦のある床の上を減速しながら滑って行く箱
- (J) 等速度で上昇するエレベータ

である。また、静止系の 2 問は、

- (d) 壁に向かって押され静止する 3 つのブロック
  - (e) 床の上に積み重ねられた 3 つのブロック
- である。

利用した転移課題を図 5.3 に示す。

遅延テストは事後テストから 1 ヶ月後に実施され、課題や方式は事後テストと同様であり、解答時間も同様に 30 分で行った。これらテストの結果等については、次項にまとめる。

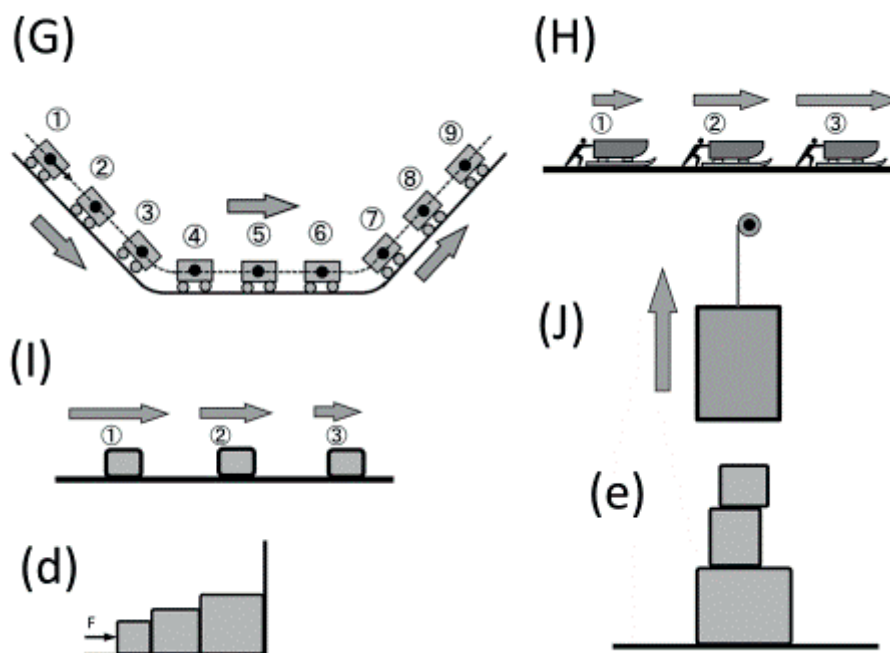


図 5-3 転移課題

### 5.3.4.運動系での結果の分析

本章では、今回の実践での目的である運動系におけるシステムの効果を見るために行った、テスト結果の分析について述べる。今回の分析には、正解した課題数を用いている。また、運動系の学習課題(D)は何も力がはたらいっていないため、いかなる矢印も作図しないのが正解だが、無記入との識別が出来なかったため、今回の分析では除外した。

さらに、上記のような理由から、運動系においては授業において扱われた課題数が群によって異なる。このため、運動系における学習課題の分析は、全学習者が取り組んだといえる基本課題 3 問に絞って行うことにする。転移課題については、4 問すべてを分析対象としている。

EBS を用いた演習では学習者に正解が示されることはなく、シミュレーションを基に自身の間違いに気づき修正する、といういわば発見的な学習が行われる。そのため、そこには学習者の事前の知識や能力が影響すると考えられる。そのため分析の際、学習者の事前知識を考慮する必要がある。そこで、事前テストでの運動系の正解数を分析したところ、対象とした全 3 問中の平均が 0.410 となっており、このことから少なくとも 1 問は解けており、ある程度の理解はあると考えられる者と、全く解けておらず、あまり理解できていない者に被験者を大別できることが分かる。そこで、この正解数を基準に生徒を少なくとも 1 問は解けた上位群と全く解けなかった下位群の 2 組に分け、事前テストでの成績の差による効果の差を含めた分析を行った。なお、正解数は低いものの、記入された力は 3 問

全体で一人当たり平均 8.610 本であり、これは分析対象とした学習課題 3 問の正解となる矢印の総数 9 本 ((A)2 本(B)2 本(C)5 本) に近い。このような解答、また、事前テストの監督を行った教員も、通常の課題と同様に取り組んでいたとの感想を得ていることから、テストへの取り組みには問題が無かったと判断している。

以下に正解数の分析を行うが、統計処理は「ANOVA4 on the Web」[58]を用いて行った。

#### (i) 上位群

EBS 単独群では 9 名、EBS 利用授業群では 11 名、通常授業群では 14 名が上位群に該当した。システムログの分析の結果、EBS 単独群の上位群 9 名のうち 8 名が利用時間内に運動系の課題 6 問全問にシステム上で正解でき、EBS 利用授業群の上位群では 11 名全員が利用時間内に運動系の課題 6 問全問にシステム上で正しい作図を行っていた。また通常授業群の授業最後に復習として同じ課題にもう一度作図を行ったが、そこでは上位群 14 名全員が授業内で用いた運動系の 3 問全問に正解していた。

学習課題においては、どの群についても、事前・事後間で統計的に有意に正解数が向上しており、また事後・遅延間で有意な低下は見られなかった。また、群間での成績の有意な差はどの時点においても無かった (表 5.2, 図 5.4)。

転移課題においては、どの群も事後・遅延間での正解数の有意な差は見られなかった。群間に関しては、遅延テストにおいてのみ、EBS 単独群と通常授業群の間 ( $p = 0.0410 < 0.05$ ) において、正解数の有意差が見られた (表 5.3, 図 5.5)。

表 5-2 平均正解数 (上位群, 学習課題)

	事前	事後	遅延
EBS 単独群 (N=9)	mean=1.111 SD=0.314	mean=2.778 SD=0.416	mean=2.556 SD=0.685
EBS 利用授業群 (N=11)	mean=1.182 SD=0.386	mean=2.818 SD=0.386	mean=2.727 SD=0.445
通常授業群 (N=14)	mean=1.429 SD=0.728	mean=2.714 SD=0.452	mean=2.643 SD=0.811

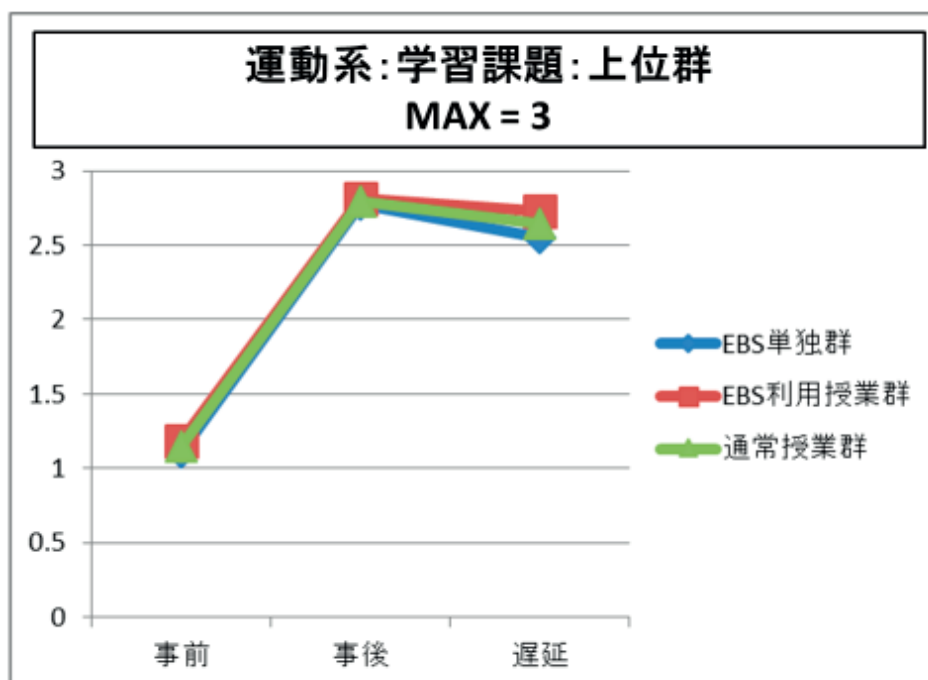


図 5-4 平均正解数の推移（上位群，学習課題）

表 5-3 平均正解数（上位群，転移課題）

	事後	遅延
EBS 单独群 (N=9)	mean=2.222 SD=1.227	mean=2.667 SD=1.563
EBS 利用授業群 (N=11)	mean=1.636 SD=1.432	mean=1.636 SD=1.367
通常授業群 (N=14)	mean=1.571 SD=1.178	mean=1.429 SD=1.237

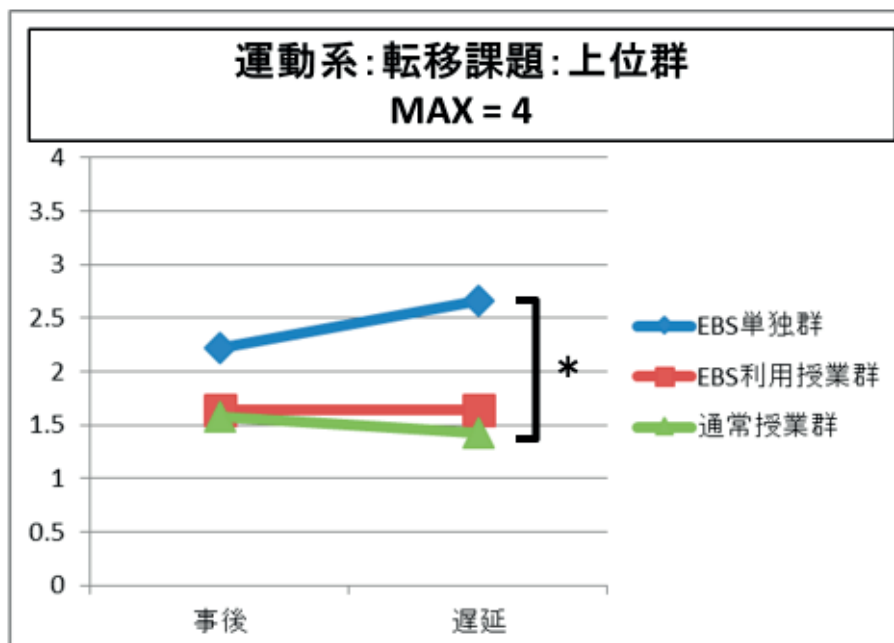


図 5-5 平均正解数の推移 (上位群, 転移課題)

(ii) 下位群

EBS 単独群では 26 名, EBS 利用授業群では 22 名, 通常授業群では 23 名が下位群に該当した. システムログの分析の結果, EBS 単独群の下位群 26 名のうち 21 名が利用時間内に運動系の課題 6 問全問にシステム上で正解しており, EBS 利用授業群の下位群でも 22 名のうち 21 名が利用時間内に運動系の課題 6 問全問にシステム上で正解していた. また通常授業群の授業最後に復習として同じ課題に行った作図では, 下位群 23 名全員が運動系の課題 3 問全問に正解していた. これらのことから, どの授業においても生徒が少なくとも指示に従った活動は行っていたと判断している.

学習課題においては, 事後テストにおいて通常授業群と EBS 単独群の間 ( $p = 0.0431 < 0.05$ ) 及び通常授業群と EBS 利用授業群の間 ( $p = 0.00324 < 0.05$ ) に正解数の有意差が見られた. さらに, 遅延テストにおいては通常授業群と EBS 単独群の間 ( $p = 0.0000092 < 0.05$ ), 通常授業群と EBS 利用授業群の間 ( $p = 0.0153 < 0.05$ ), EBS 利用授業群と EBS 単独群の間 ( $p = 0.0492 < 0.05$ ) それぞれに正解数の有意差が見られた (表 5.4, 図 5.6).

転移課題では, どの群についても, 事後・遅延間での正解数の有意な差は見られなかった. 一方で群間に関しては, 遅延テストにおいてのみ, EBS 利用授業群と EBS 単独群の間 ( $p = 0.0521 < 0.10$ ) にのみ, 正解数の差に有意傾向が見られた (表 5.5, 図 5.7).

表 5-4 平均正解数（下位群，学習課題）

	事前	事後	遅延
EBS 単独群 (N=26)	mean=0 SD=0	mean=2.269 SD=0.811	mean=1.308 SD=1.029
EBS 利用授業群 (N=26)	mean=0 SD=0	mean=2.696 SD=0.460	mean=2.261 SD=0.792
通常授業群 (N=23)	mean=0 SD=0	mean=2.045 SD=1.021	mean=1.727 SD=1.008

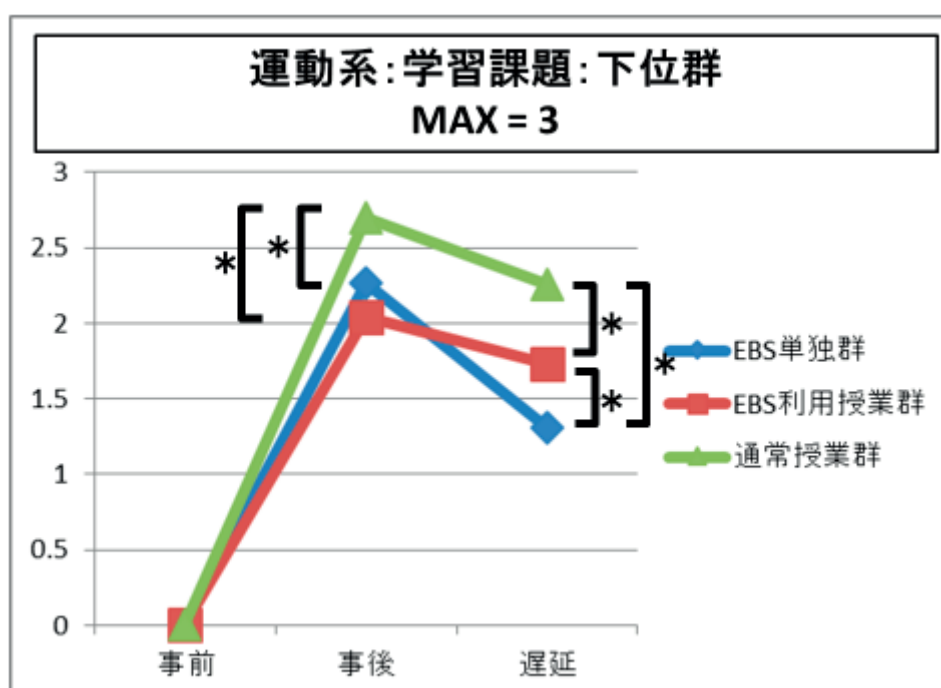


図 5-6 平均正解数の推移（下位群，学習課題）

図 5.6 :

表 5.5 :

表 5-5 平均正解数（下位群，転移課題）

	事後	遅延
EBS 単独群 (N=26)	mean=0.769 SD=0.973	mean=0.538 SD=0.843
EBS 利用授業群 (N=22)	mean=1.182 SD=1.154	mean=1.136 SD=1.217
通常授業群	mean=0.783	mean=1.000

(N=23)	SD=0.778	SD=1.180
--------	----------	----------

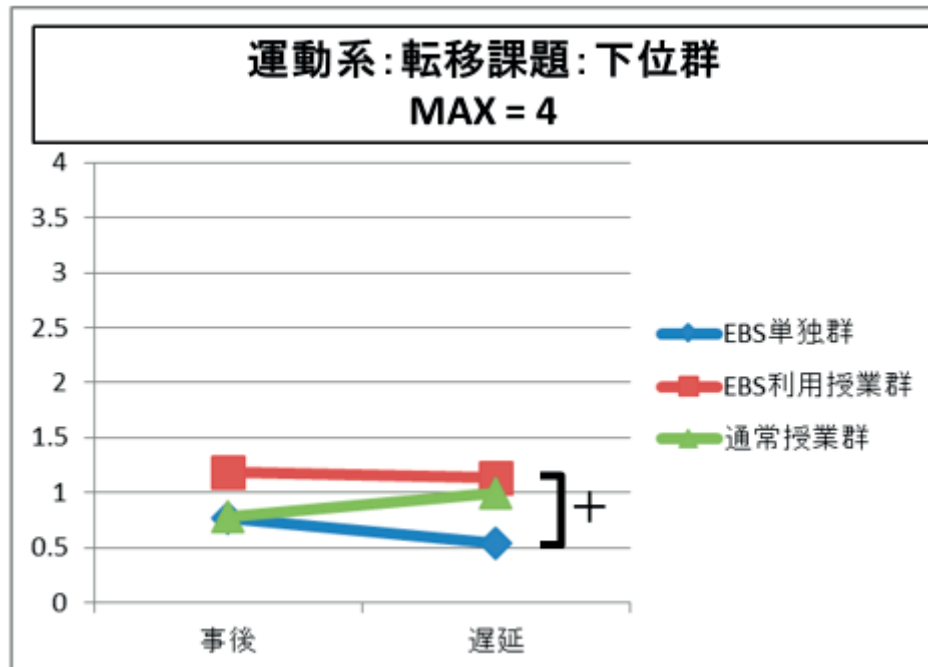


図 5-7 平均正解数の推移（下位群，転移課題）

### 5.3.5.運動系での結果の考察

今回の実践では，事前テスト成績の上位群の学習課題では，各群において事後および遅延において差が見られなかった．EBS 単独群では，時限の最後には正解を伝えたものの，演習中は EBS のみを用いた活動であったにもかかわらず，事後だけでなく遅延においても EBS 利用授業群，通常授業群と同等の成績であったことから，EBS 単独利用で通常授業および EBS 利用授業と同等の理解に到達していることが示唆された．転移課題においては，図 7 に示されたように，事後，遅延において，EBS 単独群が，通常授業群，EBS 利用授業群よりも高い成績を示した．統計的に差がいえるのは，EBS 単独群と通常授業群の遅延テストにおける有意差のみであった．この結果については，以下の下位群の検討の後，さらに考察する．

事前テスト成績の下位群の学習課題においては，事後テストにおいては通常授業群のみが有意に点が高く，遅延においては通常授業群，EBS 利用授業群，EBS 単独群の順に高くさらに各群の間に有意な差があるという結果となった．また，転移課題に関しては，通常授業群および EBS 利用授業群の正解数の推移，また両群間の正解数の関係については，正解数が低いことを除けば，上位群と同様とみなすことができるが，EBS 単独群に関しては，

遅延において上位群と異なり、EBS 利用授業群の成績より低いことが、有意傾向として示されている。

EBS は学習者に、自身の解答に誤りがあることに気付かせることを目的としているが、それらがどのように間違っているのか、それらをどう修正するのかを積極的に示すものではなく、それらは学習者が自身で見出す必要がある。そのため EBS 単独群は、EBS システムからのフィードバックに基づいて、自身で誤りに気づき、修正することが求められる。つまり、自己調整学習[59,60]を促すものになっていると位置づけることができる。自己調整学習は一般に、うまく学習が進んだ場合は高い効果が期待できるものの、学習者に高い能力を要求するものになっている。実際に、今回の実践では EBS 単独群の被験者は、1 人当たり平均 66.7 回の解答をシステム上で行っており、間違いに気づきそれを修正しようと試みていたことが見て取れ、誤りに気付くという点は満たしていると考えられる。さらにこの回数は、事前テスト上位群では平均 55.3 回、下位群では平均 70.6 回となっており、下位群であっても間違いに気づき修正を試みることができていたと考えられる。一方で、EBS では正解の提示や教科書的な説明は行っていないため、間違いの存在には気づいてもどう間違っているか、またどのように修正すべきかを見出すには高い能力が必要となり、必ずしも全員が修正には至らなかったと考えられる。このような、間違いに気づくことよりもそれを修正することのほうが難しいことは、下位群が上位群よりも有意に ( $p = 0.0336 < 0.05$ ) 多くの解答を行っていること、つまり解答の修正が困難であったことから考えられる。

この観点からすると、(1)転移課題の遅延という最も深い理解が求められる場合において、EBS 単独群の上位群が高い成績を上げていることは、高い能力を求める学習方法が合致した学習者が高い効果を得たことを示唆している。また、(2)学習課題の遅延において下位群では通常授業群、EBS 利用授業群、EBS 単独群の順に得点が高かったことから、まず EBS を用いた演習は下位群にとって容易ではなかったこと、また授業と EBS との組み合わせにより EBS 単独よりは改善されることが示唆された。さらに、(3)転移課題の遅延において、下位群では EBS 単独群が最も低い成績であり、高い能力を求める学習方法が合致しない学習者が低い効果しか得られなかったが、同時に EBS 利用授業群では通常授業群と同等の成績であり、他の問題に転移ができるレベルでの理解の程度に関しては、差がなかったことを示唆している。

なお今回の分析においては、学習課題に関しては全群で共通して取り扱った基本課題 3 問のみを分析の対象とした。そのため、この 3 問に関する以上のような下位群の結果は、通常授業群では 3 問に集中し、丁寧な説明を行ったことの効果によるものであるとも考えられる。またこの効果は、転移課題にて EBS 利用授業群と通常授業群に差がなかったことから、必ずしもより深い理解につながっていない可能性が示唆されている。しかしながら、今回の実践ではこれらの可能性の検証は十分に行われていないため、厳密な検証が今後の課題の一つであるといえる。



以上のことから、運動系における力の把握という事例においてではあるが、EBS を単独で利用することが、通常授業との比較において、成績上位の生徒に大きな効果をもたらすが、下位の生徒にもたらす効果は小さいということが示唆された。また、EBS を授業と組み合わせることで、成績下位の生徒への効果を大きくすることができるとともに、成績上位の生徒への効果が小さくなる可能性があることも示唆された。この示唆を踏まえた EBS の単独利用の適用法、および授業への組み込みへの工夫が、今後 EBS を有効活用する上での重要な課題となっている。

### 5.3.6. 静止系での結果と分析

今回、実践授業の中で EBS システムを利用したため、まずは静止系についての授業を行い、その後で運動系の授業を実施するという手順を踏んだ。このため、静止系に関しても、追試的な位置づけで、データ収集と分析を行った。結果として、学習課題 3 問に関しては、上位群（事前テストで静止系に 1 問以上正解）、下位群ともに運動系と同様の結果となった（図 5.8, 図 5.9）。また、転移課題については、2 問しか用意しなかったため、少ない課題数での分析となり正確性は低いものの、上位群については差がないが、下位群については EBS 単独群の成績が有意に低いとの結果となった（図 5.10, 図 5.11）。

先行研究[56,57]においては、EBS 単独群が通常授業群に対して有意に成績が向上し、維持されるという結果が得られていたため、さらに分析する必要が生じた。事前テスト中の静止系に関する 3 問は先行研究[58,59]における事前テスト 3 問と同じであったため、EBS 単独群のこの 3 問の成績を先行研究[58]での結果と比べたところ、各課題の正解率は図 5.12 のようになり、特に問題(a)を複雑化した問題(b)、問題(c)については、正解率に大きな差が見られた。運動系の結果に関して考察したように、EBS 単独の利用は、学習者にある程度の事前の理解を要求するものであることが示唆されており、静止系における本利用と先行研究の結果の差は、この事前の理解の影響であることが示唆される。この考察の一般性を確認することは、EBS の利用に関する今後の重要な研究課題となる。

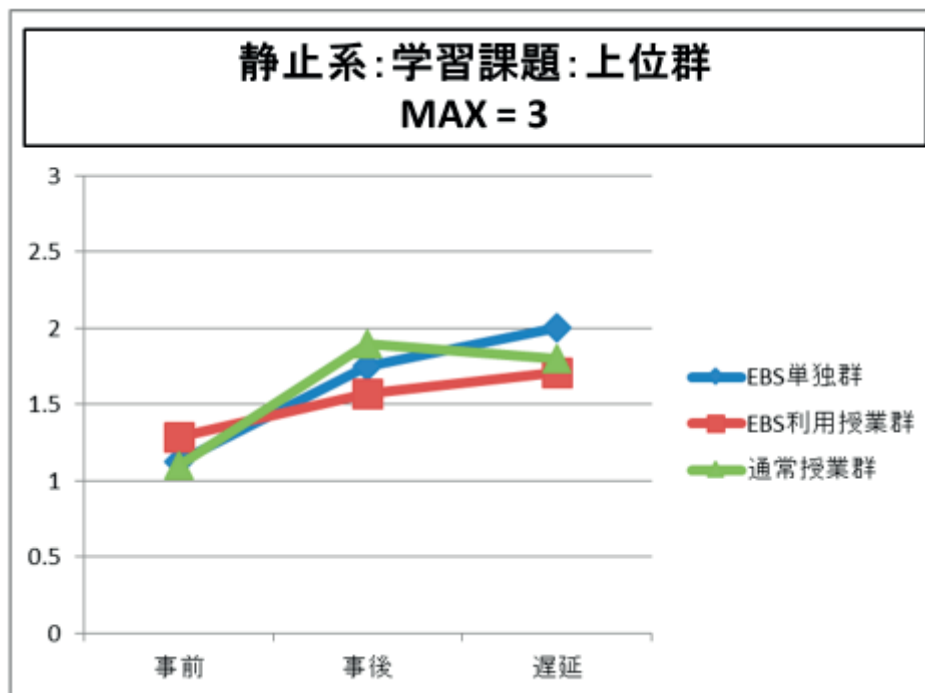


図 5-8 平均正解数の推移（上位群，学習課題）

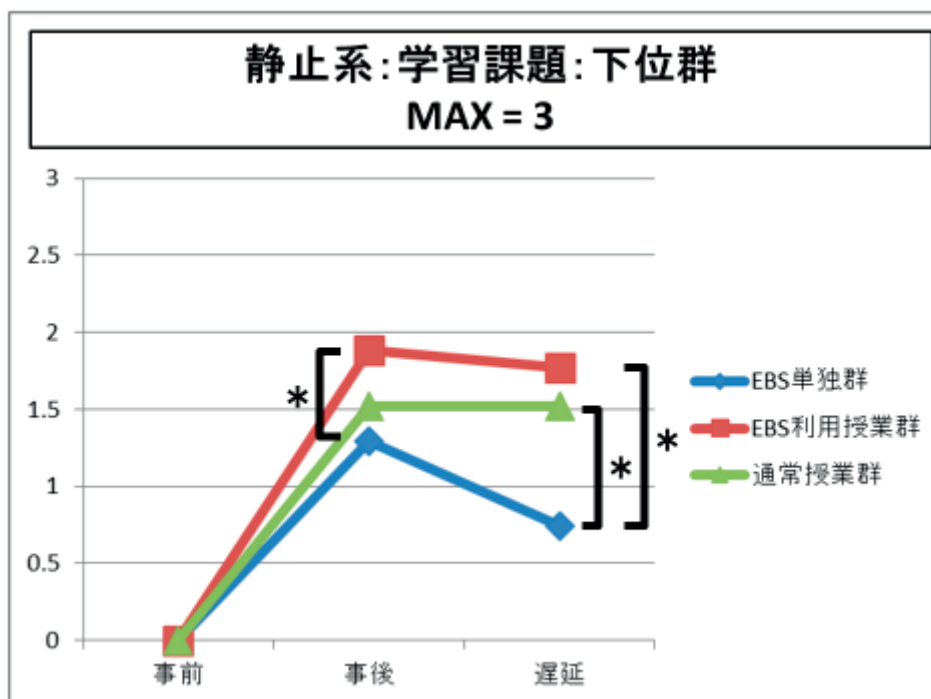


図 5-9 平均正解数の推移（下位群，学習課題）

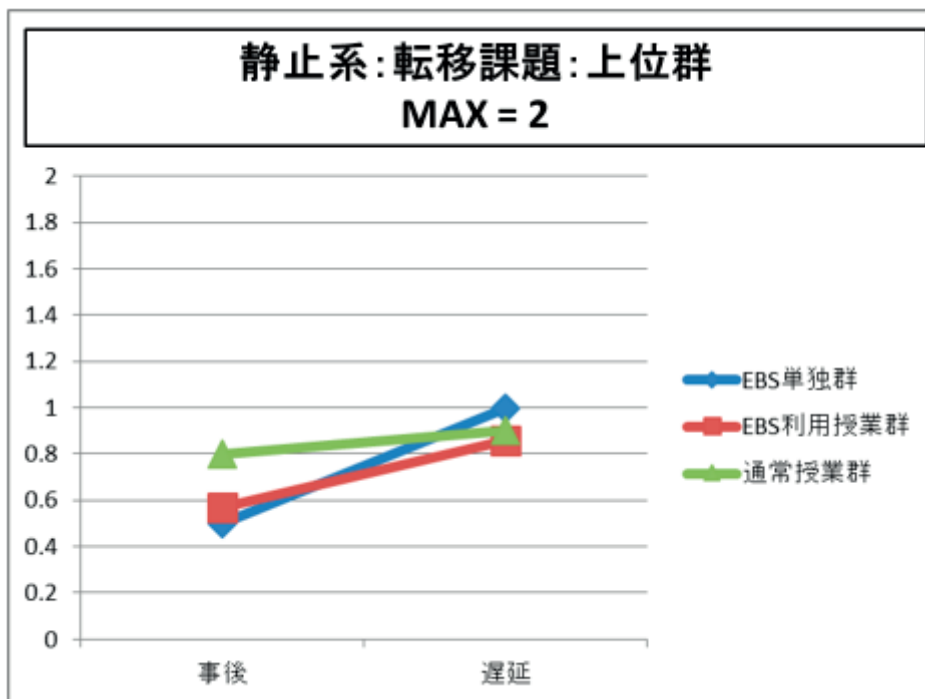


図 5-10 平均正解数の推移（上位群，転移課題）

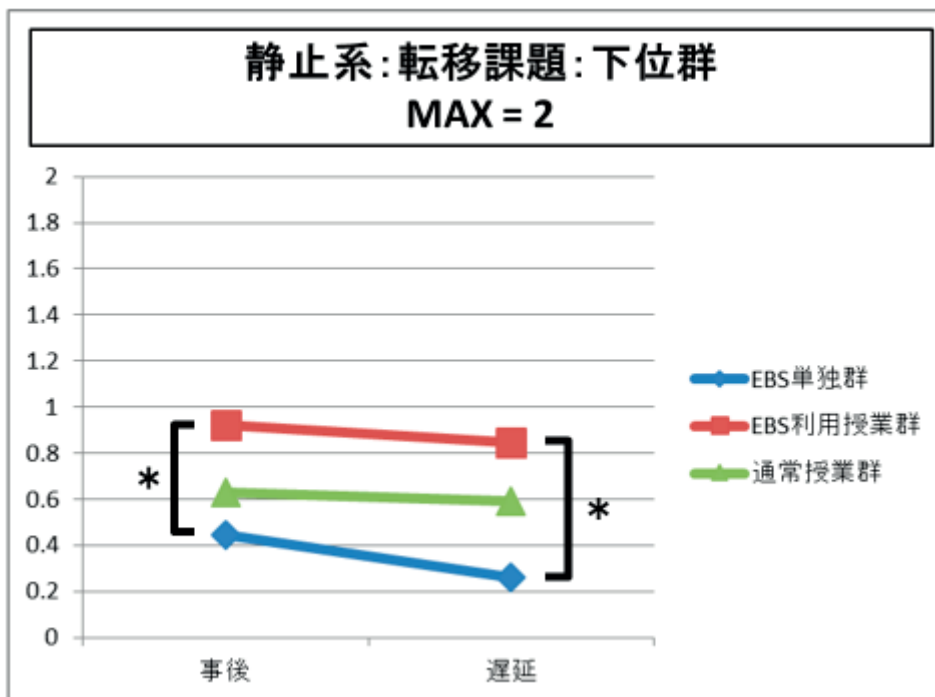


図 5-11 平均正解数の推移（下位群，転移課題）

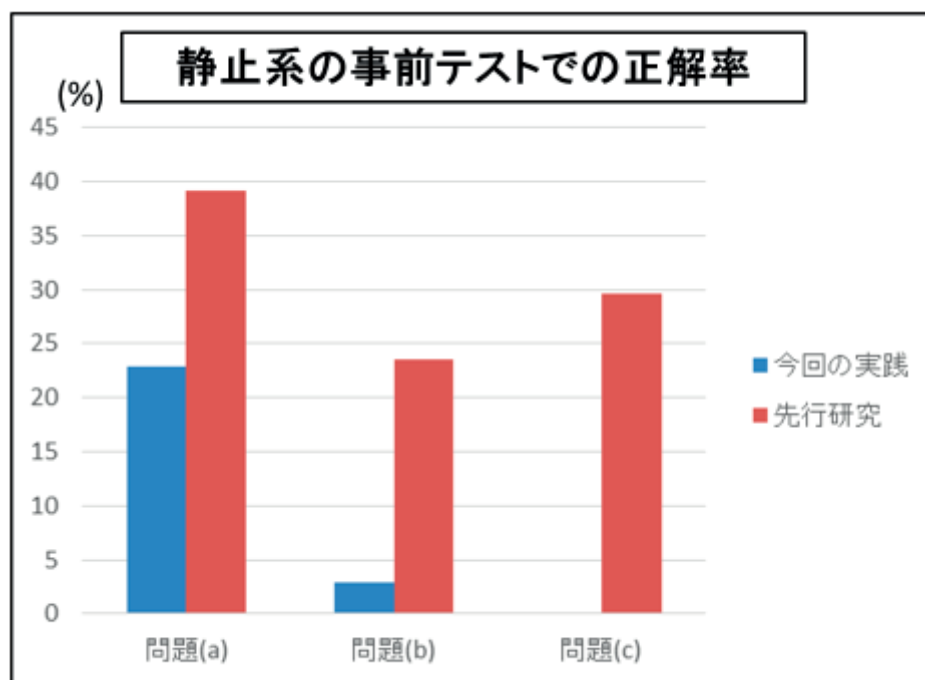


図 5-12 事前テストでの静止系の正解率の比較 (EBS 単独群)

## 5.4. 高等専門学校での実践的利用

5.3 節で述べた実践的な利用の結果より、EBS システムを用いた学習の効果は、学習者の事前理解・知識の影響を受ける可能性が示された。このことから、EBS の学習効果に影響を及ぼす要因に関するさらなる調査が必要となった。そこで、前回とは異なる条件の被験者を対象とした、EBS の実験的な利用を行った。

### 5.4.1. 利用計画

今回の実験では、運動系における EBS システムの効果と、そこへの効果に影響する学習者の要因を調査するために、実験的な利用を行った。被験者は高等専門学校 4 年生であり、一般的な高等学校での物理に相当する教育を受けている。そのため、前回の実践的利用よりも、より詳しい教授を受けた被験者といえる。

今回の実験は、直前の事前テスト (10 分)、システムの利用 (50 分)、直後の事後テスト (15 分)、そして 1 か月後に遅延テスト (15 分) という構成で実施した。今回の被験者は初等力学について既に一通りの学習を行っている想定されており、システムの利用は調査対象の運動系のみを行った。

また今回の実験は、EBS の効果に影響する要因の調査も目的としており、その中でも学

習者の学習態度に着目した。そこで今回は、力学に対する学習態度の調査である MPEX[61] を併せて行った。

### 5.4.2. 評価テスト

今回の利用においても、効果測定のための筆記テストを行った。各テストは演習と同様、与えられた図に対し、力の矢印の作図を行うというものであった。今回の実験では運動系のみを演習しており、事前テストでも前述の学習課題(A)～(F)を 10 分間で解答した。また事後テストでは、事前テストの学習課題 6 問に加え、転移課題(G)～(J)の 4 問を用い、15 分で解答した。遅延テストは事後テストから 1 ヶ月後に実施され、課題や方式は事後テストと同様であり、解答時間も同様に 15 分で行った。

### 5.4.3. 評価テストの結果と分析

今回の分析においても、5.3 節での実践的利用と同様、正解した問題数を得点として用いた分析を行っている。

学習課題においては、事前・事後間で有意に正解数が向上していた ( $p = 0.0000021 < 0.05$ )。また、遅延テストでは成績の低下が見られたが、それでも事前テストに比べ有意に高かった ( $p = 0.00627 < 0.05$ ) (図 5.13)。

転移課題においては、まず全体として、得点自体はそれほど高いものではなかった。また、事後・遅延間での得点の有意な差は見られなかった (図 5.14)。

さらに今回の実験的利用は、EBS の効果に影響する要素の検証を目的に含んでいる。そこで、EBS の効果である、学習課題における事前・事後間の得点の上昇値と、事前に行った MPEX での得点との相関について調査を行った。MPEX では質問を、「独立性」「整合性」「概念」「現実性」「数学との関連」の 5 つのクラスターに分けて分析することができるが、結果として、クラスター「独立性」の得点との間にやや相関 (相関係数: 0.455) が、「概念」の得点との間に弱い相関 (相関係数: 0.392) が、それぞれ見られた。また、転移課題の事後での得点についても同様に、「独立性」との間にやや相関 (相関係数: 0.510) が、「概念」との間に弱い相関 (相関係数: 0.369) が、それぞれ見られた。得点と各クラスターとの相関係数を、表 5.6 に示す。

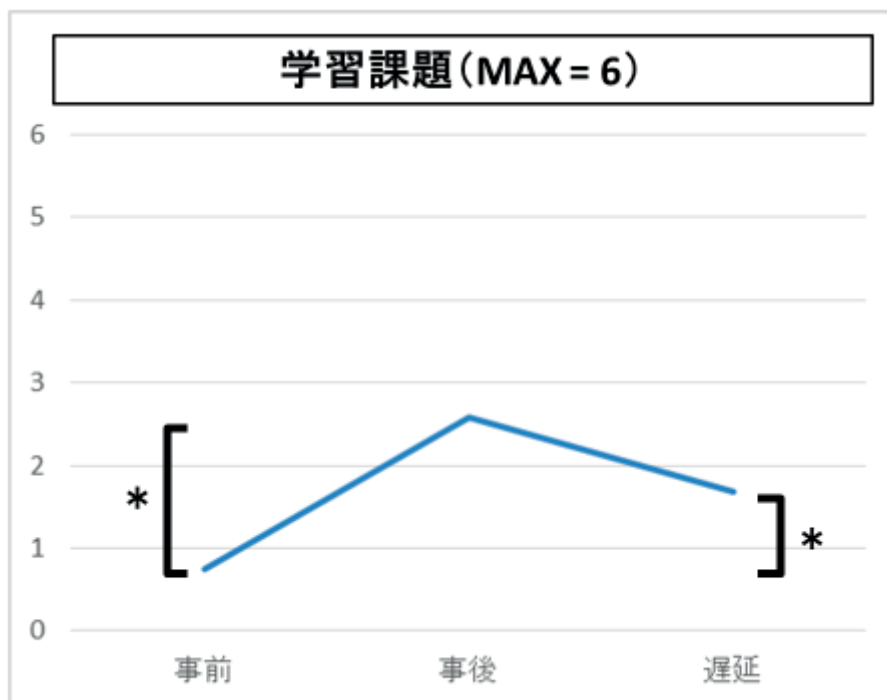


図 5-13 平均正解数の推移 (学習課題)

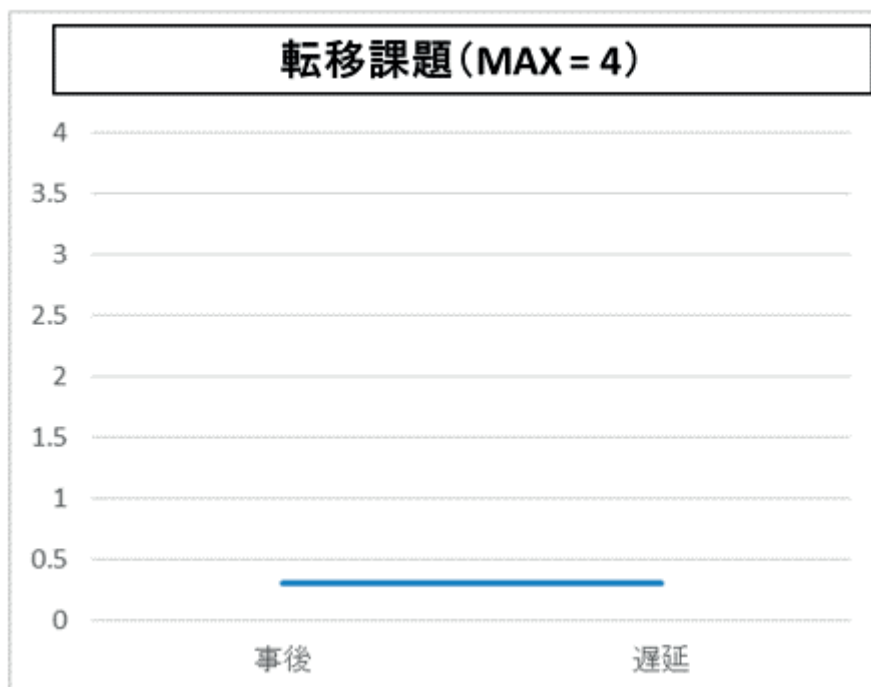


図 5-14 平均正解数の推移 (転移課題)

表 5-6 テスト得点と MPEX との相関係数

	全体	独立性	整合性	概念	現実性	数学との関連
事前・事後間の得点の上昇 (学習課題)	0.265	0.455	0.094	0.392	0.023	0.142
事後での得点 (転移課題)	0.267	0.520	0.096	0.369	$-2.32 \times 10^{-17}$	0.111

#### 5.4.4. 考察

今回の実験では、前回よりも力学についてより詳しい教授を受けていると想定される被験者を対象としているが、事前テストの結果自体には差がなく、あまり理解がされていないと考えられた。その中で、学習課題に関しては得点の上昇が見られ、遅延テストにおいても有意に高い状態が保たれていた。そのため、EBS による学習活動にて用いた内容については、理解されていたと考えられる。一方で、転移課題においては全体として低い水準となっており、異なる状況への応用が可能という程度の理解に関しては、あまりなされていないと考えられる。

さらに、MPEX にて計測した学習態度について、その影響を調査したところ、自らの理解を自分自身の意志で構築しようとする、という項目である「独立性」の項目と、学習課題での事前・事後間の得点上昇との間にやや相関がみられた。また、背後に横たわっている考え方や概念を理解することが大切だと考えている、という項目である「概念」との間にも弱い相関がみられた。またこの傾向は、転移課題の得点においても見られた。EBS による学習は前述のように、自己調整学習を促すものとなっている。そのため、今回のような能動的に理解を行おうとする学習態度を持つ被験者にとって、EBS はより大きな効果をもたらしたと考えられる。

#### 5.5. 結び

本章では、本研究にて行った、初等力学におけるはたらく力の学習支援として、これまで静止系での学習に用いられてきた、学習者の誤りを基にしたシミュレーションである Error-Based Simulation の運動系への利用、及びその効果の検証について述べた。ここでは、運動系を対象とした EBS システムの実装、及びその中学校での実践的な利用、また高等専門学校での実験的な利用についての報告を行った。

中学校における利用では、物体が初速度を持った運動系においても EBS のみを用いた演習が効果的であることを確認することが出来た。一方で、事前テストの成績が下位の生徒

に対しては、EBSのみを用いた演習が適当なものではないという結果が得られた。このような生徒に対しては、本研究で試みたEBSを教材として授業内で使用するという方法が有効であることが示唆されたが、一方この方法では、上位の生徒に対する効果が通常授業と同じレベルとなっていた。これらのことから、事前理解によってEBSの効果的な使い方が異なることが示唆された。EBSが教材として有用性を持つこと自体はこれまでの実践を通して明らかにしてきており、また、多くの現場教員の同意を得ているが、このトレードオフを踏まえた利用が必要であることが示唆されたことが、重要であると考えている。

また高等専門学校での利用においても、事前事後間でのテストの得点の上昇が見られ、また遅延テストにおいてもある程度の効果の維持が見られた。そのことに加え、テスト得点の上昇と、学習者の持つ学習態度との間に関連性があることが示唆された。このことから、事前理解以外にもEBSの利用の効果に影響を与える要因があることが予想された。

今後の重要な課題としては、今回の実践的利用において見られた、システムのみでは十分に効果が得られない学習者への対応が挙げられる。そのための方法として、現在のEBSである運動のシミュレーションと共に提示することで、理解をより促すフィードバックの検討が挙げられる。その具体的な一つの方法として、現在取り扱っている力の作図に加え、速度や加速度の作図をも行い、それぞれに対してEBSを適用することで、力・加速度・速度という運動系の理解を促す方法を検討している。また、EBSを単独で用いるのではなく、教授活動と組み合わせることに効果が見られていることから、EBSでの学習者の振舞いを捉えるための、モニタリングツールの開発を行っている。



## 6. 結論

思考とは、何らかの目的のために情報を関連づける活動であるといえ、つまり情報に対する操作であると捉えることができる。このような観点から、情報技術によって扱う情報を可視化し、操作可能にすることにより、思考の促進が可能になると考えられる。またこのような情報に対する操作としての思考は、教授・学習活動においても行われているといえ、情報の可視化と操作可能化による思考の促進を、教授・学習活動に用いることには、意義があるといえる。このような観点から本研究では、教授・学習活動での思考の促進を目的とした、情報工学技術の利用を行った。

その中で本研究では、問題解決学習を具体的な対象とし、その理解過程に対する外化を行わせることによる、そこでの誤りの修正支援を試みた。先行研究においては、問題解決学習への支援を行っているが、それらは学習者の最終的な理解、そこから行われる解法の実行を対象としていた。これに対し、本研究では、学習者の問題理解を対象とし、さらに段階的に外化させることで、そこに含まれる誤りを見出し、修正を促す、というアプローチをとった。そしてこのようなアプローチから、初等力学での力の理解を対象とし、学習者による理解の外化を用いた、学習支援システムの開発と効果の検証を行った。

第3章では、力学問題の問題解決演習での学習支援として、立式過程の外化を用いた学習支援環境の設計・開発と、その実験的な利用について述べた。ここではまず、力学での運動方程式の立式過程をモデル化し、さらにそのモデルに基づき、立式過程での理解を外化できる表現形式と操作の提案を行った。さらに、提案する表現形式を用い、立式の過程を段階的に外化し、また診断を行う学習支援システムの設計・開発を行った。通常、このような立式に至る過程は学習者の頭の中で行われることが多く、そこでの誤りを指摘することは容易ではないが、外化する環境を与えることで、それらが観察可能となり、また誤りの指摘が可能となる。また、本研究では大学生を対象とし、同システムの実験的な利用を行っている。今回の利用は外化を用いた学習支援の実現可能性の確認を目的とした予備的なものであり、被験者は既に当該内容を学習済みの大学生である。結果として、このような外化を用いた学習は有効であるという意見を得られている。このことは、本研究で採用している方法が有望であることを示しており、学習者を対象とした実践的な利用を目指して本研究を進めることの意義を明らかにできたと考えている。一方で、システムからのフィードバックに関しては、改良の余地が大きいことも示されている。また、ユーザインタフェース的な改善の必要性も指摘されており、改良の余地が大きいといえる。

第4章では、系にはたらく力の存在と、それら力間の関係に関する理解の外化を行わせることで、それら理解の誤りの指摘と修正を行わせる学習支援環境の設計・開発について

述べた。このような形態の外化においては(1)外化に対するフィードバック(2)力の持つ意味や関係の外化の方法の2つが課題となる。まず、フィードバックをどのように与えるのか、という課題は計算機による支援という解決策を用いた。もう一つの課題である、力の存在だけでなく、力の意味や力間関係も外化の対象としなければならないという点は、力間関係をマップ表現で表すことで、表現を行うこととした。そのために本研究では、具体的には力と力間関係の理解の外化とそこへの診断・フィードバックの実現を試み、そのためにまず力間関係を外化できるようにするための準備として、外化の対象となる力と力間関係の整理を行った。そして、これら力と力間関係を部品として用意した上で、学習者が力学系における力に関する理解の外化表現を作成することのできるインタフェースと、そのインタフェースを用いて作成された外化表現を診断する機能を学習支援システムとして開発した。また、システムにおけるこれらの外化支援機能の実現可能性の確認を目的とした、予備的な評価実験を行った。そこでは実験データから、本システムの利用が外化活動の促進となる可能性が示された。また本システムの診断の妥当性についてアンケート調査を行ったところ、概ね本研究の診断方法は不適切ではないことが示唆されたが、特定の場合においては改善の必要があると考えられる意見も得られている。今後の課題として、システムの操作性の向上と、フィードバックの改善が挙げられる。フィードバックについては、力の関係図において学習者の解答に誤りがあるとき、現在はそのことを指摘するにとどまっているが、正解データとの差分を関係図上で示すなど、視覚的に認識しやすいフィードバックに改善していく必要がある。また本研究で行った評価実験は予備的なものであり、システムや診断方法、学習効果の妥当性について十分に検証できていない。そのため、まず診断については、特定の場合における例外的な診断が必要という意見もあり、今回観測されなかった誤りに対する検討も必要といえる。また学習効果については、力間関係の理解だけでなく、力の作図や問題解決への影響についても調査する必要があると考えている。

第5章では、力の理解を促すフィードバックの一つとして用いた、学習者の誤りに基づく運動のシミュレーションである、**Error-Based Simulation**の、運動系への応用について述べた。運動系にはたらく力に関する学習支援はこれまでもさまざまな形で試みられているが、そこでは正当を明確に示すことによる支援が多く行われていた。このような学習支援は、学習者の誤りに応じた学習支援を目指すものではないため、学習者の考えが正しくないことを指摘してはいるものの、どのように誤っているかは示しておらず、誤りであることを納得させるものとはいえない。またコンピュータプログラム上での運動のシミュレーションを利用した教授が行われているが、そこでは力について答える際、学習者は実際に力自体を記述してはいるが、また運動方向以外の方向の力を扱わないなど、学習者の力の把握を十分に捉えられているとはいえない。これらの考察から本研究では、学習者による力の把握を運動系に対して直接的に表現させたいうえで、それを運動に反映させることが有力な方法であると考え、学習者による力の把握の直接的な表現を運動に反映させ、そ

の把握が誤っている場合にそれらに応じた不自然な運動をシステムが生成し、提示する EBS を用いた。先行研究においては、この EBS を静止系にて用いていたが、本研究ではこれを、運動系に応用している。この EBS の中学校における利用では、物体が初速度を持った運動系においても EBS のみを用いた演習の効果が確認できた。一方で、事前テストの成績、つまり事前理解によって EBS の効果的な使い方が異なることが示唆された。EBS はこれまでも効果が示されているが、このようなトレードオフを踏まえた利用が必要であることが示唆されたことが、重要であると考えている。また高等専門学校での利用においても、テストの得点の上昇や、遅延テストにおける効果の維持が見られた。またそのことに加え、テスト得点の上昇と、学習者の持つ学習態度との間に関連性があることが示唆された。このことから、事前理解以外にも EBS の利用の効果に影響を与える要因があることが予想された。また今回の実践的利用において見られた、システムのみでは十分に効果が得られない学習者への対応は、今後の重要な課題として挙げられる。そのための方法の一つとして、現在取り扱っている力の作図に加え、速度や加速度の作図をも行い、それぞれに対して EBS を適用することで、力・加速度・速度という運動系の理解を促す方法を検討している。また、EBS を単独で用いるのではなく、教授活動と組み合わせることに効果が見られていることから、EBS での学習者の振舞いを捉えるための、モニタリングツールの開発を行っている。

以上のように、本研究は力学における力の理解を具体的な対象とし、学習者による理解の外化を用いた学習支援の実現を目指したものである。本論文においては、本研究で試みた 3 つの外化による学習支援の事例をあげ、またその利用について報告した。これらの結果においてまず、従来の学習活動では行われなかった理解の外化活動を、実際に行うことが可能であった。このことから、情報技術を用いることで、この外化活動を実現することができたといえる。また実践的な利用においては、外化活動が学習者の誤りを指摘し、修正を促すという学習支援につながるということが示唆されていると考えられる。また、このような方法には、外化された表現に対する個別の対応が必要になるが、通常の教授者のみでは対応が難しい。この問題に対し、教授活動をモデル化したうえで、それらに情報技術を応用することで、可能となることが示されたと考えられる。

今後の展望としては、より実践的な形での利用を目指した、システムの改善が挙げられる。今回報告した学習支援環境のうち、第 3 章、第 4 章で述べた 2 つのシステムは、いずれにおいても、予備的な利用ではあったものの、その利用に意義が感じられるとの意見が得られている。一方で、システムからのフィードバックが十分ではないという意見も得られた。このことは、本研究にて提案する学習対象のモデル化自体には妥当性があるものの、それをシステムにて十分に生かしていないという点に起因すると考えられる。つまり、モデル化した目的の学習支援活動を、システム上にどう実現するかが課題となるといえる。また、実際の学習効果の確認は行われておらず、今後必要になると考えている。

また、第 5 章で述べたシステムでは、事前理解のある学習者、あるいは自主的に取り組

もうとする学習者にとって単独利用の効果が大きかったが、反面、そうでない学習者にとっては、利用が困難であったという結果が得られている。このことはつまり、今回あまり効果の得られていない学習者に対して、何らかの補助が必要になることを示唆している。このような点について、これまでも述べているが、力だけでなく、加速度、速度といった、運動にかかわる複数の要素について、総合的に考えさせることで、理解を促すという方法を検討している。また、EBS システムについても、これらのような改善を行ったうえで、実践的な形での利用、そしてその効果の検証が必要であると考えられる。

## 参考文献

- [1] Polya, G., "How to solve it", Princeton University Press(1954)
- [2] 平嶋宗, 河野隆宏, 柏原昭博, 豊田順一, “算数の文章題を対象とした問題演習支援機能の実現”, 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界 75(2), pp.296-304(1992)
- [3] 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 7(3), pp.475-486(1992)
- [4] 武智俊平, 林直也, 篠原智哉, 山元翔, 林雄介, 平嶋宗, “単純化方略を用いた問題解決失敗の自己克服支援システムとその実践的評価—初等力学を対象として—”, 電子情報通信学会論文誌 D, J98-D No.1, pp.130-141(2015)
- [5] 三宅なほみ, 白水始, “外化”, 認知心理学辞典, 共立出版株式会社(2002)
- [6] Collins, A., Brown, J., S., "The Computer as a Tool for Learning Through Reflection, In Heinz Mandl and Alan Lesgold, editors, Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems, pp.1-18, SpringerVerlag(1988)
- [7] 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(453), pp.1-8(1997)
- [8] 吉永千晴, 田上光輝, 竹内章, 大槻説乎, “物理の学習環境における因果関係モデルと運動方程式の自動生成およびそのモデルを用いた学習支援”, 電子情報通信学会技術研究報告. ET, 教育工学 94(425), pp.93-100(1994)
- [9] 竹中洵治, “物理学習内容の分析と効果的な教授”, 物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集 (25), pp.7-8(2008)
- [10] 大道 一弘, “力の見つけ方に関する学習者の既有知識の検討”, 日本教育心理学会総会発表論文集 (50), p.586(2008)
- [11] Conati, C., Vanlehn, K., "Toward Computer-Based Support of Meta-Cognitive Skills: a Computational Framework to Coach Self-Explanation", International Journal of Artificial Intelligence in Education, Vol.11, pp.389-415(2000)
- [12] 山崎翔平, 定本嘉郎, 牧井創, “MIF 素朴概念をなくす教材の開発と中学校での授業実践”, 物理教育 57(3), pp.215-219(2009)
- [13] 加藤信明, 定本嘉郎, “力の誤概念の解消を促す教材の開発と指導方法の改善”, 物理教育 59(3), pp.181-186(2011)
- [14] 南伸昌, 渡邊剛士, 伊東明彦, “力表示器「Fi-Cube」を活用した、中高での授業実践”, 宇都宮大学教育学部教育実践総合センター紀要 33, pp.77-83(2010)
- [15] パーキンソン, H. J., “誤りから学ぶ教育に向けて 20 世紀教育理論の再解釈”, 勁草書房(2000)

- [16] 斎藤裕, “誤概念修正教授方略としての反証法と融合法の再検討”, 人間生活学研究 (4), pp.1-12(2013)
- [17] 阪本司毅, 中村元彦, “誤概念の支持のしにくさと論理的思考力の関係”, 教育実践開発研究センター研究紀要 (23), pp.75-80(2014)
- [18] 平嶋宗, 堀口知也 “「誤りからの学習」を指向した誤り可視化の試み”, 教育システム情報学会誌 21(3), pp.178-186(2004)
- [19] 高垣マユミ, “大学生はいかに力のプリコンセプションを変容させるか”, 発達心理学研究 15(2), pp.217-229(2004)
- [20] 柏原昭博, 松井紀夫, 平嶋宗, 豊田順一 “ダイアグラムを用いた知識構造の外化支援について”, 人工知能学会誌, Vol.14(2), pp.315-325(1999)
- [21] 金西計英, “内省支援ツールを用いた科学的思考方法の学習”, 化学と教育 54(5), pp.268-271(2006)
- [22] 伊藤貴昭, “循環系学習での自己説明と図示の効果”, 哲学 115, pp.181-199(2006)
- [23] 金西計英, 妻鳥貴彦, 矢野米雄, “知的学習環境における説明洗練の可視化による学習支援”, 電子情報通信学会論文誌, D-II, J80-D-2(4), pp.972-984(1997)
- [24] Mayer, R.E., "Memory for algebra story problems", Journal of Educational Psychology, Vol.74(2), pp.199-216(1982)
- [25] Cummins, D., Kintsch, W., Reusser, K. et al., "The Role of Understanding in Solving Word Problem", Cognitive Psychology, Vol.20, Issue.4, pp.405-438(1988)
- [26] 坂本美紀, “算数文章題の解決過程における誤りの研究”, 発達心理学会, Vol.4(2), pp.117-125(1993)
- [27] 篠原智哉, 山元翔, 平嶋宗, “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”, 2011年度人工知能学会全国大会, 1H1-2(2011)
- [28] Shinohara, T., Yamamoto, S., Hirashima, T., "Kit-Build External Expression of Problem Solving in Physics Learning", ICCE2011(2011)
- [29] 長谷川忍, 柏原昭博, “ハイパー空間における適応的ナビゲーションプランニング支援”, 人工知能学会論文誌, Vol.21, No.4, pp.406-416(2006)
- [30] Chi, M. T. H., de Leeuw, N., Chiu, M. et al., "Eliciting self-explanations improves understanding", Cognitive Science, Vol.18, No.3, pp.439-477(1994)
- [31] Hirashima, T., Niitsu, T., Hirose, K., et al., "An Indexing Framework for Adaptive Arrangement of Mechanics Problem for ITS", IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E77-D, No.1, pp.19-26(1994)
- [32] 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, Vol.10, No.3, pp.413-420, 社団法人人工知能学会(1994)

- [33] 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗, “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”, 電子情報通信学会論文誌, D, 情報・システム J91-D(2), pp.303-313, 一般社団法人電子情報通信学会(2008)
- [34] 大川内祐介, 平嶋宗, “派生問題の自動生成機能の実現と実験的評価”, 先進的学習科学と工学研究会 61, pp.7-12, 人工知能学会(2011)
- [35] 山崎和也, 福田裕之, 舟生日出男, 平嶋宗, “Kit-Build 方式による概念マップのインタラクティブ化”, 人工知能学会第 55 回 ALST 研究会, pp.59-64(2009)
- [36] Yamasaki, K., Fukuda, H., Hirashima, T. et al., "Kit-Build Concept Map and Its Preliminary Evaluation", Proc. of ICCE2010, pp.290-294(2010)
- [37] 中川和之, 平嶋宗, 舟生日出男, “「言葉の式」の段階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, Vol.58, 人工知能学会(2010)
- [38] 吉永千晴, 田上光輝, 竹内章, 大槻説乎, “物理の学習環境における因果関係モデルと運動方程式の自動生成およびそのモデルを用いた学習支援”, 電子情報通信学会技術研究報告, ET, 教育工学, pp.93-100(1994)
- [39] 和田敏明, “静力学で教えたこと: あるテストの結果から”, 物理教育 35(1), pp.35-39(1987)
- [40] Clement, J., "Students' preconceptions in introductory mechanics", American Journal of Physics 50(1), pp.66-71(1982)
- [41] 佐々木一真, 平嶋宗, “力の説明入力機能を付加した EBS システムの設計・開発”, JSiSE2008 第 33 回全国大会講演論文集, pp.428-429(2008)
- [42] Collins, A., Brown, J. S., "The Computer as a Tool for Learning Through Reflection", In Heinz Mandl and Alan Lesgold, editors, Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems, pp.1-18, SpringerVerlag(1988)
- [43] Chi, M. T. H., "Self-Explanations: How Students Study and Use Examples in Learning to Solve Problems", Cognitive Science, 13, pp.145-182(1989)
- [44] Chi, M. T. H., VanLehn, K. A., "The Content of Physics Self-Explanations", The Journal of The Learning Sciences, 1(1), pp.69-105(1991)
- [45] VanLehn, K., Lynch, C., Schulze, K., et al., "The Andes Physics Tutoring System: Lessons Learned", International Journal of artificial Intelligence in Education, 15(2005)
- [46] 篠原智哉, 山元翔, 平嶋宗, “力学を対象とした問題理解過程の外化環境の設計・開発”, 教育システム 情報学会論文誌, Vol.30, No.1, pp.20-31(2013)
- [47] 浅海賢一, 竹内章, 大槻説乎: “物理系における因果関係の理解を支援するための対話方法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.10, pp.2848-2859(1997)

- [48] 堀口知也, 平嶋宗, “誤りの修正を支援するシミュレーション環境—誤り原因の示唆性を考慮した **Error-Based Simulation** の制御—”, 人工知能学会論文誌, Vol.17, No.4, pp.462-471(2002)
- [49] 佐々木一真, “力学の学習支援システムにおける力の関係の外化支援機能”, 広島大学大学院工学研究科情報工学専攻修士論文(2010)
- [50] 青野修, 西郷敏, 原田三男, 柴山修哉: “作用反作用の法則は誤解されている”, 物理教育 45(6), pp.328-329(1997)
- [51] 貫井正納: “中学校における力のはたらきかたについての理解の実態”, 物理教育 26(3), pp.214-219(1978)
- [52] Tao, P. K., Gunstone, R. F., "The Process of Conceptual Change in Force and Motion during Computer-Supported Physics Instruction", *Journal of Research in Science Teaching*, Volume 36, Issue 7, pp.859-882(1999)
- [53] 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一, “定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御”, 人工知能学会誌 12(2), pp.285-296(1997)
- [54] Hirashima, T., Horiguchi, T., Kashihara, A., Toyoda, J. "Error-Based Simulation for Error-Visualization and Its Management", *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol.9, No.1-2, pp.17-31(1998)
- [55] 堀口知也, 平嶋宗, “学習支援を指向した誤り可視化のためのロバストシミュレータ”, 人工知能学会論文誌 = *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence : AI* 21, pp.514-525(2006)
- [56] 今井功, 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗, “中学理科における **Error-based Simulation** を用いた授業実践-「ニュートンに挑戦」プロジェクト-,” 教育システム情報学会誌, Vol. 25, No. 2, pp. 194-203(2008)
- [57] Tomoya Horiguchi, Isao Imai, Takahito Toumoto, Tsukasa Hirashima “Error-Based Simulation for Error-Awareness in Learning Mechanics: An Evaluation” , *Journal of Educational Technology & Society*, Vol.17, Issue 3, pp.1-13(2014)
- [58] ANOVA4 on the Web, <http://www.hju.ac.jp/~kiriki/anova4/>, 2015.05.10
- [59] バリー・J・ジーマーマン, デイル・H・シャンク, 塚野州一 (編訳), 伊東崇達, 中西良文, 中谷素之, 伊田勝憲, 犬塚美輪 (訳), “自己調整学習の理論”, (株) 北大路書房(2006)
- [60] デイル・H・シャンク, バリー・J・ジーマーマン, 塚野州一 (編訳), 伊東崇達, 中谷素之, 秋場大輔 (訳), “自己調整学習の実践”, (株) 北大路書房(2007)
- [61] Redish, E. F., Saul, J. M. and Steinberg, R. N., "Student Expectations In Introductory Physics," *Am. J. Phys.* 66, pp.212-224(1998)