

中学生の物理法則の理解における数学の役割

湯澤正通・山本泰昌¹

(2000年9月30日受理)

Role of mathematics in students' understanding of physical rules in science

Masamichi Yuzawa and Yasumasa Yamamoto

The present study examined roles that mathematics plays in students' understanding of physical laws in science. Students in two classes of public junior high school received two types of instructions concerning the physical law predicting that weight of oxidized metal is proportionate to weight of metal before oxidation. Students under the experimental condition deduced the physical law from an atomic model first, and then designed experiments for themselves to obtain the proportion of weight of magnesium to weight of oxidized magnesium by using their knowledge about proportionality that they had learned in mathematics class. Students under the control condition induced the physical law from experiments of oxidation of magnesium. It was found that students under the experimental condition did better on tests about the calculation based on the physical law and took measurement errors into consideration more appropriately than students under the control condition.

Key Words: physical laws, mathematics, junior high school students, understanding

キーワード：物理法則、数学、中学生、理解

人々が日常生活で自然の事物や事象の働きについて獲得する知識が必ずしも科学理論と合致しないことがわかっている (e.g. Clement, 1983; diSessa, 1993; McCloskey, 1983)。このような知識は、素朴概念、誤概念、代替概念などと呼ばれ、その修正が困難であるばかりでなく、学校での科学的な知識の学習を阻害することが指摘されている (Champagne, Gunstone, & Klopfer, 1985; Chinn & Brewer, 1993; 中山, 1998)。

素朴概念の修正が困難な理由として、素朴概念と科学的概念との共約不能性 (Carey, 1985) を挙げることができる。共約不能性とは、素朴概念を構成する中心的な考えが科学概念のそれと異なっていることであり、そのため、単なる日常的な経験の積み重ねでは、素朴概念の中心的な考えは変化しないとされる (Carey & Spelke, 1994)。Carey & Spelke (1994) は、中心的な概念を再構成するためには、領域間のマッピングが必要であるとする。この点について本研究で取り上げる金属の酸化を例に説明しよう。

中学理科第1分野「化学変化と原子・分子」では、

金属の燃焼の実験を行い、金属の質量と、燃焼によって金属と化合する酸素の質量との間に一定の関係があることを学習する。しかし、日常生活では燃やすことによってものが灰になることを知っている子どもが漫然と金属の燃焼を見ている限り、そのような見方に疑問を抱くことはない。異なる質量の金属を燃やすことによって、その質量に対応した酸化金属ができることを単純な観察以外の手段で認識する必要がある。そのために、科学者は、物理現象を数的表現にマッピングしたうえで、そこでの規則性を探求し、再び、物理的現象に立ち返る。同様に、子どもたちは、天秤によって燃焼前後の質量を測定し、それをグラフで表現することによって、数の領域から知識を取り入れ、物理現象に関する考え方を修正する。このように、素朴概念の再構成には、領域間の知識のマッピングが重要な役割をはたしていると考えられる。

領域間の知識のマッピングが素朴概念の再構成に重要な役割をはしているとするれば、数学と関連づけて理科を教えることが生徒たちの科学概念の理解を促進するはずである。そこで、本研究では、理科と数学を横断的に関連づけることの認知的な効果を検討する。

¹ 大野町立大野中学校

では、理科と数学の関連づけを生徒はどの程度、自発的に行うのであろうか。大学生を対象とした実験室的な研究では、数学から物理学への自発的な知識の転移が示唆されている (Bassok & Holyoak, 1989)。しかし、中学生を対象に行った調査によると、数学と理科の異なった文脈で同型の問題を解かせた場合、数学の問題では正答できるが、理科の問題では正答することができない生徒がいること (西川, 1992)、数学と理科の同型の問題に対して、異なった解法を用いること (石井・箕輪・橋本, 1996) などが報告されている。これらの研究結果から、本来、生徒が数学から理科へ自発的に知識を転移させる可能性があるにもかかわらず、実際はそうになっていないことが示唆される。

本研究では、数学と理科を関連付けた授業を行うことの認知的な効果を実証的に検討するために、数学と理科を関連付けた授業 (実験群) と、従来の教科書通りの授業 (統制群) を比較する。両授業の違いは、以下の点である。

従来の授業は、生徒たちが異なる質量の金属を燃焼させる実験を行い、そのときの金属の質量と酸化した金属の質量を測定し、それをグラフに表すことで、両者の関係を調べるというものであった。ところが、測定誤差のある質量の関係を見出すことは子どもにとって必ずしも容易なことではなく、しばしば教師が強引に比例関係を導入することになることが報告されている (山本, 1999)。そのような授業では、子どもたちは、燃焼前後の金属の質量関係と比例関係の対応 (マッピング) を理解しにくいと考えられる (質量関係をグラフに書いても直線にならないのに、比例と見なすことが理解できない)。そのことは、また、数学から理科へ転移が難しい原因であると考えられる。一方、強引に対応づけを教えられることで、生徒たちは、燃焼という現実の現象に測定誤差があることを認識せず、金属の質量関係を解明するために比例の知識を適切に活用することができないと考えられる。

それに対して、実験群の授業では、燃焼前後の金属の質量関係から比例関係を帰納するのではなく、予め分子モデルから酸化の現象を説明し、燃焼前後の金属の質量関係が比例関係であることを演繹する。すなわち、最初の段階で、物理現象を数式的表現にマッピングする (例えば、酸化によって Cu と O が 1 対 1 で結合することを教える)。そして、子どもたちは、燃焼前後の金属の質量関係が比例関係であることを前提として、その質量比 (整数比) を求めるという課題を解決する。生徒たちは、測定誤差のために、きれいな整数比を求めることができず、関数の知識を活用しながら課題を解決することが求められる。なお、実験群の授業では、

数学の教師も授業に参加し、数学で学習した「関数」の知識を活用することが授業の明確な目標とされる。

授業の効果は、次の観点から検討された。

1) 数学の関数の知識を用いて、酸化前後の金属の質量関係を予測し、計算できる。これは、生徒が数学と理科の知識を対応づけることができたかどうかの指標となる。

2) 測定誤差のある物理現象と物理法則を区別し、前者から後者を推測しようとし、そのための道具として比例概念を利用する。これは、生徒が現実の現象を解明する道具として学習した知識を適応的に利用できるかどうかの指標となる。

方 法

授業の参加者

公立中学校 2 年 2 クラスを 1 クラスずつ実験群、統制群に割り当てた。実験群の生徒数 35 名 (男子 20 名、女子 15 名)、統制群の生徒数 37 名 (男子 20 名、女子 17 名) であった。理科に関する両クラスの生徒たちの成績はほぼ等しかった。

実験群と統制群の授業

本研究の対象となる授業は、理科第 1 分野「化学変化と原子・分子」(全 18 時間) 中の小単元「化学変化と質量」の一部である (5 時間)。ここでは、酸化の実験を行い、金属と酸素の質量の間に一定の関係があることを見出すことを目標としている。実験群と統制群で酸化に関して教師が生徒に伝える情報は、できる限り統制した。実験群と統制群の授業の違いは、以下の点である。①分子モデルによる酸化の説明が、実験群では、1 h に行うのに対して、統制群では、2 h に行う。②実験群では、燃焼の前後での金属の質量比を求めるという課題を 2 回行うのに対して、統制群では、最初、異なる質量の金属を燃焼させる実験を行い、1 度だけ、燃焼の前後での金属の質量比を求めるという課題を行う。③実験群の授業では、理科担当の教師と数学担当の教師 2 人が教室にいたが、統制群の授業では理科担当の教師 1 人が教室にいた。実験群、統制群の授業ともに、教師は、黒板の前で話をする以外、生徒の質問に対してのみ答えるようにした。

実験群と統制群の授業の流れを表 1 に示す。

実験群の授業は、理科と数学の教師がチームを組んで実施した。授業の進行やクラス全体に対する説明は、主に理科の教師が担当し、数学の教師は、各班を巡回し、個別に指導を行った。以下、実験群の授業における生徒の学習活動である。1h) 酸化が金属原子と酸素原子の結びつきであること、Mg (マグネシウム)

表1 実験群と統制群の授業の流れ (全5時間)

| | 実験群 | 統制群 |
|-----|---|--|
| 1 h | 教師が金属 (Mg) の酸化を分子モデルによって説明し, Mgの質量とMgOの質量が比例関係にあることを指摘する。 | 生徒は各班で異なる質量のMgを燃焼させ, MgとMgOの質量をグラフに記す。 |
| 2 h | 生徒は班ごとにMgとMgOの質量比 (整数比) を求める実験計画を立てる。 | 前時のグラフが比例になることを教師が確認し, 質量比を求める。また, 酸化を分子モデルによって説明する。 |
| 3 h | 生徒は班ごとに前時の計画により実験を行い, MgとMgOの質量比を求め, 発表する。 | 生徒は班ごとにCuとCuOの質量比を求めるための実験計画を考える。 |
| 4 h | 生徒はクラス全体で前時の実験結果を考察する。次に, 各自, CuとCuOの質量比を求めるための実験計画を考える。 | 生徒は班ごとに前時の計画により実験を行い, CuとCuOの質量比を求め, 発表する。 |
| 5 h | 生徒は班ごとに実験を行い, CuとCuOの質量比を求め, 発表する。教師が単元での学習をまとめる。 | 生徒はクラス全体で前時の実験結果を考察する。教師が単元での学習をまとめる。 |

評価テスト・期末テスト

下の量の銅を十分加熱してから, 電子天秤で質量を測定したところ, 以下のようになった。この表から銅と酸化銅の質量比をどのように求めたらよいか。

| | | | | | | |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 銅(g) | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 |
| 酸化銅(g) | 1.2 | 2.5 | 3.7 | 4.1 | 6.2 | 6.7 |

【求める方法】

【求めた結果】

図1 評価テスト

の原子数と酸化後のMgOの分子数が比例の関係にあること, したがって両者の質量も比例の関係にあることをワークシートに記入しながら学習する。2h) MgとMgOの質量比が簡単な整数比で表されることを告げられ, その整数比を求める実験計画を班ごと (全6班) に立てる。3h) 前時の実験計画に基づいて, 班ごとに実験を行い, 整数比を求め, その結果をクラス全体に発表する。4h) 前時の実験で各班の結果がバラバラになった理由をクラス全体で話し合う。次に, Cu (銅) とCuO (酸化銅) の質量比が簡単な整数比で表されることを告げられ, その整数比を求めるための実験計画を個別に考える。5h) 前時の立てた計画

が似ている生徒どうして班を構成し (全6班), 実験を行い, CuとCuOの質量比を求め, クラス全体に発表する。最後に, CuとCuOの質量比の理論値をグラフに示し, 教師が単元の学習をまとめる。

統制群の授業は, 教科書に従い, 理科の教師が一人で進めた。以下, 統制群の授業における生徒の学習活動である。1h) 各班 (全6班) で異なる質量のMg (0.2g, 0.4g, 0.6g) を燃焼し, MgとMgO質量をグラフに記す。2h) 教師は, 前時のグラフから, MgとMgOの質量が比例関係にあることを確認し, その比を求める。また, 酸化が金属原子と酸素原子の結びつきであること, Mgの原子数と酸化後のMgOの分子数が同様の関係にあることを説明する。さらに, MgとMgOの質量が直線上に並ばなかった理由をクラス全体で話し合う。3h) CuとCuOの質量比 (整数比) を求めるための実験計画を最初, 個人で考え, 次に, その計画を班で話し合う。4h) 前時の実験計画に基づいて, 班ごとに実験を行い, 整数比を求め。5h) 前時の結果をクラス全体に発表し, 各班の結果がバラバラになった理由をクラス全体で話し合う。最後に, CuとCuOの質量比の理論値をグラフに示し, 教師が単元での学習をまとめる。

授業の効果を検討するための資料

本研究では, 授業の内容や効果を検討するための資料として, 授業の観察, 授業のビデオ, 生徒のワークシート, 評価テスト, 期末テストを用いた。評価テスト (図1) は, 実験群, 統制群ともに, 5時間の授業終了直後の授業時間に実施された。評価テストは, 燃焼前後で測定したCuとCuOの質量から, 質量比を求めさせる問題であるが, 測定結果の表に意図的に測定誤差を含めていた。また, 期末テストは, CuとCuOの質量のグラフを提示したうえで, CuとCuOの質量比, 特定のCuと化合するOの質量, MgとOの質量比を与えたときのグラフの描画, MgとCuの質量比などを求めている。いずれも, 比例の知識によって回答できる問題である。

結 果

酸化による金属の質量関係の予測・計算

授業効果の第1の指標として, 数学の関数の知識を用いて, 酸化前後の金属の質量関係を予測し, 計算できることが, 実験群と統制群で異なっているかどうかを検討した。評価テスト1問, 期末テスト4問, 計5問に対して正答した回数を得点とした。授業前の中間テストにおける理科の得点の平均 (2クラス全体) によって成績の高低に生徒を分類し, 実験群と統制群の

平均点を示したのが表3である。成績低群では、実験群と統制群の得点にほとんど差は見られないが、成績高群では、実験群の得点が統制群のそれより高くなっている。2クラス(実験群、統制群)×2成績(高低)の分散分析を行ったところ、有意水準に近い交互作用が見られ($F(1,68) = 3.93, p < .1$)、単純主効果の検定の結果、成績高群で実験群と統制群の間に有意な得点差が見られた($F(1,68) = 6.53, p < .05$)。

表2 期末テスト、評価テストでの正答数

| | 実験群 | | 統制群 | |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 成績高 (n=23) | 成績低 (n=12) | 成績高 (n=22) | 成績低 (n=15) |
| 正答数 | 2.57 (1.25) | 0.50 (0.65) | 1.68 (1.29) | 0.73 (0.93) |

注1) 期末テスト4問、評価テスト1問、計5問

注2) 成績の高低群は、中間テストの理科の平均点により分類した。

表3 評価テストに対しそれぞれの解決パターンを示した生徒の人数

| | 実験群 | 統制群 |
|---|-----|-----|
| 白紙 | 0 | 14 |
| 数の操作のみから回答を生成する | 1 | 11 |
| グラフを描くが、グラフの読み方、描き方が分からず、回答がない | 9 | 3 |
| グラフを描き、視覚的に回答を求め、グラフを読み違える | 1 | 0 |
| グラフを描き、視覚的に回答を求め、グラフが不正確なため、回答が不正解 | 5 | 3 |
| グラフを描くが、誤差のある数を含めて回答を計算する(不正解) | 3 | 4 |
| グラフを描き、直線上に位置する点のみを考慮して、回答を計算するが、計算間違いのため、不正解 | 1 | 0 |
| グラフを描き、誤差のない数から正しい回答を計算する | 5 | 2 |
| グラフを描き、視覚的に正しい回答を生成する | 10 | 0 |

表4 理科と数学のチームティーチングに対する生徒の反応(実験群)

| 生徒の反応 | 人数 |
|--|----|
| 数学と理科の関係性に対する発見と驚き 例：まさか理科と数学がここまで密接した関係だと言うことに正直驚かされました。 | 17 |
| チームティーチングに対する反応 例：この授業は2人も先生がいるくらいだからものすごく大事な所だと思った。 | 6 |
| ポジティブな反応 例：理科を数学みたいにして今日の理科は結構分かりやすかった。 | 3 |
| ネガティブな反応 例：理科なのに数学だった。数学はよくわからないから嫌いだ。 | 9 |
| 授業に関する疑問 例：マグネシウムや酸素などの原子はどのくらいの重さなのだろうか。 | 6 |

以上の結果から、成績高群で、実験群の生徒が統制群の生徒よりも、数学の関数の知識を用いて、酸化前後の金属の質量関係を予測し、計算する得点が高い傾向があり、実験群の授業の効果が見られた。

測定誤差に対する適切な対応

授業効果の第2の指標として、測定誤差のある物理現象と物理法則を区別し、前者から後者を推測しようとし、そのための道具として比例概念を利用できるかどうかについて、評価テストの回答パターンを分析した。表3は、評価テストに対してそれぞれの解決パターンを示した生徒の人数を示している。

実験群では、ほとんどの生徒が表からグラフを作成したのに対して(35人中34人)、統制群では、グラフを作成した生徒はあまり多くなかった(37人中12人)($p = .000$: フィッシャーの直接法による比率の検定、以下同様)。また、実験群では、グラフを描き、誤差のある測定値を無視し、正答した生徒の割合は、34人中15人であるのに対して、統制群では、37人中2人であった($p = .002$)。一方、統制群の生徒の多くは、グラフを描かず、表の数を操作して回答を求めた(37人中11人)。それに対して、実験では、そのような生徒は少なかった(35人中1人)($p = .002$)。さらに、グラフを描かず、表の数を操作して回答を求めた統制群の生徒11人のうち、正しい測定値を用いて、正答したのは、3人であり、その他の生徒は、誤差を含めた測定値全体の平均や誤差のある数値から比を計算したため、誤答している(8人)。

以上の結果から、実験群の生徒が誤差のある測定値をそのまま使用せず、グラフを利用して、正しい測定値を推測したうえで、質量比を求めようとしたのに対して、統制群の生徒は、測定誤差を必ずしも考慮せず、そのまま質量比を求めようとした。すなわち、実験群の生徒は、測定誤差のある物理現象と物理法則を区別し、前者から後者を推測しようとし、そのための道具として比例概念を利用する傾向が強かった。この点に関しても、実験群の授業の効果が確認された。

理科と数学を連携させた授業に対する生徒の反応

最後に、理科と数学を関連づけた授業に対する生徒の反応(授業後の感想)をまとめたのが、表4である。理科と数学を関連づけることで、数学を嫌いな生徒が理科に対しても拒否感を示す反応も少なくないが(9名)、多くの生徒が数学と理科の関連性に驚き、両者を関連付けた授業を肯定的に受け止めた。

考 察

本研究では、数学と理科を関連付けた授業を行うこ

との認知的な効果を検討した。その結果、数学と理科を関連付けた授業を受けた生徒は、そうでない生徒よりも、授業後のテストで、数学の関数の知識を用いて、酸化前後の金属の質量関係を予測し、計算する得点が高く、また、測定誤差のある物理現象と物理法則を区別したうえで、比例概念を利用して、前者から後者を推測する志向が強かった。もちろん、このような授業の効果は、授業構成(カリキュラム)の違い、課題の違いとそれに伴う授業中の生徒の活動や相互作用の違い、また教師のチームティーチングの違いなど複合的な要因に帰すべきであるが、以下、認知的な効果の2側面についてその要因を個別に考察する。

酸化による金属の質量関係の予測・計算

成績高群で、統制群よりも実験群の生徒が、酸化前後の金属の質量関係を正しく予測し、計算することができた。このことの主な理由として、実験群の授業では、燃焼前後の金属の質量関係から比例関係を帰納するのではなく、最初に分子モデルから酸化の現象を説明し、燃焼前後の金属の質量関係が比例関係であることを演繹したことが挙げられる。

通常の授業では、生徒たちが異なる質量の金属を燃焼させる実験を行い、燃焼前後の金属の質量から両者の関係を調べる。そこでは、金属の質量を数値に変換することで、物理現象を数の領域にマッピングしている。しかし、いったん数学の領域に入ると、数学の厳密な規則に従わなければならない。生徒たちは、厳密な規則に従わない数値をどのように考えればよいのか分からなくなると考えられる。実際、統制群の1hの授業でも、測定値をグラフにプロットした後、それらの点をどのように結ぶのか戸惑う生徒が多く見られた。教師に質問したり、教科書を見たり、また、点をそのまま結んでぎざぎざの線を書く班もあった。

それに対して、実験群の授業では、最初に、分子モデルによって物理現象を数の領域にマッピングする。すなわち、燃焼によって、例えば、CuとOが1対1で結合すること、したがって、燃焼前後の質量比は、 $Cu \times n$ 対 $CuO \times n$ であり、分子の質量比(Cu対CuO)となることを教える。そのようなモデルの世界では、数学の厳密な規則が成り立ち、演繹的に物理現象の法則を考えることができる。本研究では、成績高群で、実験群の授業効果が見られたが、成績高群の生徒にとって、数学の規則から演繹的に考える方が分かりやすかったのかもしれない。

「金属の質量関係の予測・計算」という授業効果の観点は、従来でも、理科の学習を評価するためにしばしば使われてきた。しかし、それが理科と数学のマッピングを測定しているという認識はなかった。また、

数学と理科の内容面での共通性のため、横断的な関連づけが必要であることは、従来も主張されてきたが(例えば、石井・箕輪・橋本、1996)、横断的な関連づけの認知心理学的な根拠は十分に認識されてこなかった。理科と数学のマッピングは、生徒にとって自明なことではなく、本研究で取り上げた酸化の現象のように、必然的に測定誤差を伴う場合や素朴概念が固い場合、マッピングの方法を工夫する必要がある。Carey & Spelke (1994)は、マッピングによって概念的変化が生じた歴史的な事例を引用し、その方法として、物理的アナロジーの利用(本研究の分子モデルがその例にあたる)、思考実験(メンタルモデルによる物理現象のシミュレーション)、矛盾する事例の分析(重い物体と軽い物体をつなげて落としたとき、アリストテレス力学によると、矛盾する予測が生じることを考えて、矛盾が解消するような手段を考える)を挙げている。今後、酸化以外の現象に関しても、具体的な方法を考えていく必要がある。

測定誤差に対する適切な対応

誤差のある測定値を与えられたとき、統制群の生徒が測定誤差を考慮せず、そのまま質量比を求めようとしたのに対して、実験群の生徒の多くは、それをそのまま使用せず、グラフを利用して、正しい値を推測したうえで、質量比を求めようとした。このことは、質量比を求める2回の実験を通して、各班の結果が一致せず、物理現象の理論値を推測するときのグラフの有効性を認識したことを考えれば、当然であるかもしれない。しかし、統制群も、1hで質量比を求めるための典型的な実験を行い、また、4hで実験群と同様の実験を行っていることから、実験を行ったこと自体よりも、最初に質量比が比例関係にあることを明確に理解したうえで、それを活用して課題解決を行うという目的意識の効果が大きかったと考えられる。

本研究で授業の効果が示唆された「測定誤差に対する適切な対応」は、現実の現象を解明する道具として学習した知識を適応的に利用するという点で、「生きる力」に通じるものがある。本研究の授業で目標とされたのは、CuとCuOなどの質量比を具体的に記憶することではない。生徒たちは、測定誤差のある現象に関する規則性を認識するための具体的な方法を学習したと考えられる。

近年、学校のクラスを科学者の共同体になぞらえ、解決方法が不確実で、真正な課題を協同で発見し、追及し、評価する共同体として位置付けようとする授業実践が提案されている(例えば、Roth & Brown, 1996)。本研究で生徒の取り組んだ課題は、①課題の目標(整数比を求める)が明確にされている、②課題を解決す

るための道具（比例に関する知識）が明確にされている、という点で、科学者の追求する課題と異なっているかもしれない。しかし、むしろ課題の目標や課題解決の道具が自明であり、相互に共有しているがゆえに、各班の生徒は、積極的に活動に参加し、意見を出し合っているように見えた。科学者の共同体でも、目標や基本的なパラダイムの共有を基盤に、議論が成り立っていると考えられる。

最後に、2002年から導入される総合的な学習の時間に対して大きな期待が寄せられている反面、基礎学力の低下が懸念されている。本研究の結果が示すように、複数の教科を効果的に連携させることで、児童・生徒の意欲を引き出すだけでなく、関連教科の理解や現実的な思考力を向上させることができる可能性がある。そのためには、課題をどのように設定し、どのような知識の活用を想定するのか、また学習の成果をどのように評価するのか、明確にする必要がある。今後、そのような研究を蓄積することが望まれる。

引用文献

- Bassok, M., & Holyoak, K. J. 1989 Interdomain transfer between insomorphic topics in algebra and physics. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **15**, 153-166.
- Carey, S. 1985 *Conceptual change in childhood*. Cambridge MA: MIT Press.
- Carey, S., & Spelke, E. 1994 Domain-specific knowledge and conceptual change. In L. A. Hirschfeld, & S. A. Gelman (Eds.), *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture*. Cambridge University Press. Pp. 169-200.
- Champagne, A. B., Gunstone, R. F., & Klopfer, L. E. 1985 Instructional consequences of students' knowledge about physical phenomena. In L. H. T. West & A. L. Pines (Eds.), *Cognitive structure and conceptual change*. New York, Academic Press. Pp.61-90.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. 1993 The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction. *Review of Educational Research*, **63**, 1-49.
- Clement, J. 1983 A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students. In A. L. Stevens & D. Gentner (Eds.) *Mental models*. Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates. Pp.325-340.
- diSessa, A. A. 1993 Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, **10**, 105-226.
- 石井俊行・箕輪明寛・橋本美彦 1996 数学と理科との関連を図った指導に関する研究—文脈依存性を克服した指導への提言— *科学教育研究*, **20**, 213-220.
- McCloskey, M. 1983 Naive theories of motion. In A. L. Stevens & D. Gentner (Eds.) *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. Pp.299-324.
- 中山迅 1998 学校知と日常知の隔たり：素朴概念の問題 湯澤正通（編）*認知心理学から理科学習への提言：開かれた学びをめざして* 京都：北大路書房 Pp.23-40.
- 西川純 1992 理科における計算能力の文脈依存性に関する研究—オームの法則を事例として— *日本理科教育学会研究紀要*, **32**, 49-60.
- Roth, W., & Bowen, G. M. 1995 Knowing and interacting: A study of culture, practices, and resources in a grade 8 open-inquiry science classroom guided by a cognitive apprenticeship metaphor. *Cognition and Instruction*, **13**, 73-128.
- Schoenfeld A. H. 1992 Learning to think mathematically: Problem solving, metacognition, and sense making in mathematics. In D. A. Grouws (Ed.), *Handbook of research on mathematics teaching and learning*. New York: Macmillan Publishing Company. Pp. 334-370.
- 山本泰昌 1999 生きる力を育む理科学習の創造—数学とのクロスカリキュラムによる金属酸化の指導— 広島県教育センター平成11年度理科教育研究講座資料

付 記

本研究は、平成11年度文部省科学研究費補助金（奨励研究A）（課題番号11710065）の補助を受けた。