

# 物理概念の形成要件に関する考察

—— 「運動の量」をとらえる ——

山本 健治・狩野 勉\*・中川 生一\*

倉敷芸術科学大学産業科学技術学部

\*岡山理科大学理学部

(1995年9月30日 受理)

## 1. はじめに

新大学の開学年度から非物理系学科1年生を対象に基礎物理学の講義と実験を担当している筆者の一人は、講義中の教科指導において簡単な演示実験と演習を採り入れて、学習者のエピソード記憶と意味記憶からなる概念要素に配慮しながら、運動法則に関する認知的方略の技能の向上をはかった。“力”などの概念学習では、伝統的な静力学のみに基づく導入の形態にとらわれることなく、「運動の量」の理解を先行させるやり方で動的な観点も考慮した教育プログラムと取り組んだ。すなわち、運動量保存の法則を最初から扱う教材構成のかたちをとり、“慣性質量”の概念の十分な浸透をめざした。ここではその実践と分析の結果を報告する。

ところで、総理府の世論調査で『科学技術への興味・関心があるか?』との質問に対して、『ある』と答えた者の比率は1981年には20歳代がトップで55%だったのが、その後減少の一途をたどり、1995年には45%を割って他世代と比べて最も低くなっている<sup>1)</sup>。ブラックボックス化したハイテク機器に囲まれて快適な成長期を過ごす世代が科学と技術のしくみに目を向けるよう、教育の場で彼等の興味と関心を引く教材研究に努める意義は大きい。とくに大学初年級の物理教育においては、学生がそれまでに受け入れてきた内容を重んじることが大切だと考える。学問体系の表面的な理解にとどまりがちな物理教育の現状から、自己実現の一環としての自然現象の観察・探究と創造性の構築をめざすものへの脱却をはかる必要性も認められる<sup>2)</sup>。そのような視点にも配慮しながら論旨を展開したい。

## 2. 「運動法則」概念確立の要件

大学の理工系その他の学部には、物理を専攻科目としてではなく基礎教育科目や教員資格の関連科目として履修する学生もいる。我々は、初年級の物理学講義や学生実験の指導を通じて、彼らが“質量”や“力”の概念把握に関して中途半端な気分を残しているという共通認識を抱くようになった。大学新入生に対するアンケート調査の結果には、物理の学習履歴の中で「運動法則」が大きなネックとなったことが表れている<sup>3)</sup>。実は、別のアンケー

ト調査結果によると、高校1年生たちは〔等速度運動〕や〔等加速度運動〕などの運動学から〔慣性の法則〕や〔作用・反作用の法則〕を経て〔運動の第2法則〕の学習に至るとき、“慣性質量”の唐突な出現にとまどう傾向が強いのである(図1・グループ1)。それなら“重力質量”だけで間に合わせるか、それとも曖昧にしておくかだが、実際どちらの選択も好ましい結果をもたらさない。“力”の概念についても、『運動物体は力をもっている』とか『物体が大きいほど大きな力をもつ』というような「運動の量」の不十分な取り組みに起因すると思われる‘pre-conception’ (または‘children’s science’) は大学生にさえ見られる。なお、本稿では物体の運動のしかたに関わる質量や速度を「運動の量」と呼ぶことにする。

“運動量”はことばとしては日常生活に定着していないが、概念としては親しみやすい実感があるのに加えて、保存量の認識は学童期に確立するというピアジェの報告が我々にそれを重視する方針をとらせた。個人が経験した出来事は、事象の起こった時間と場所に従って主観的現実としてエピソード的(episodic)に記憶されるとともに、繰り返された出来事の特徴は時間がたつと抽象化、一般化され、客観的現実としてスキーマ的(semantic)に記憶される<sup>4)</sup>。学習者の視点に着目して教材構造を編成することは、個人的な記録であるエピソード記憶の付与と一般的な事実からなる意味記憶への転化、すなわち、“定義された概念”の定着を視野におさめた積極的な教育活動をおこなうことに相当する。ところで、学習者の視点に立つとは具体的にはどういう意味だろうか。かつて、質量保存の法則のところ、『質量とは何か?』という質問を受けたことがある。年度当初第2講目の授業中であ

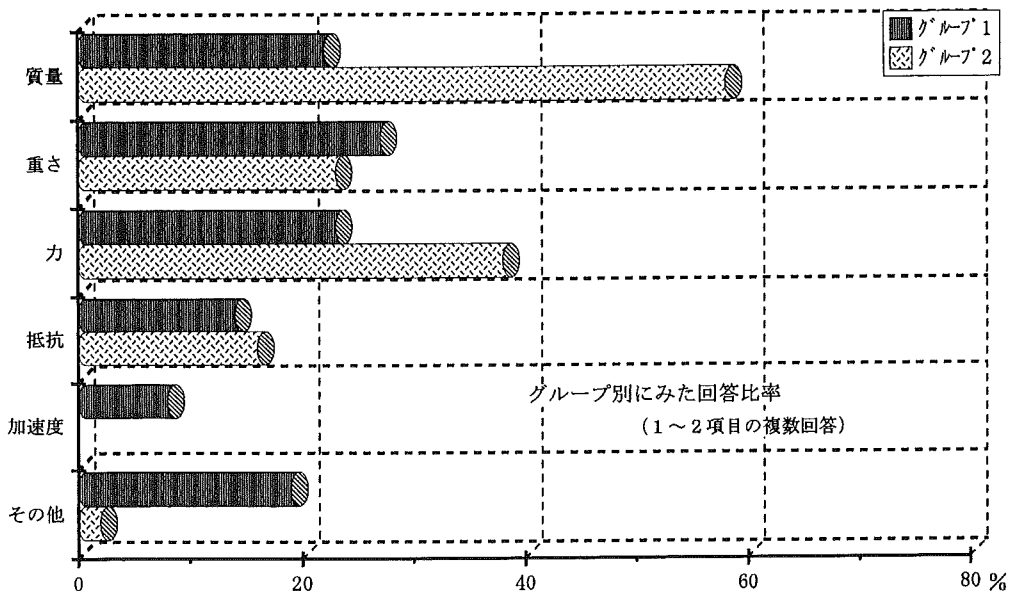


図1. 「速度の変化を決定するのは何だと思うか?」通常の単元順に学習した高校1年生のグループ1と、簡単な衝突現象の分析と取り組んでから第2法則を学習したグループ2に対するアンケート調査結果。

った。教師にはあたりまえの簡単な用語であっても、それが何らかの理由で理解できない場合には意味のない‘おまじない’以上のものにはなりえない。そう考えながら、衝突現象との遭遇はエピソードを生み出す条件をたっぷり備えているし、また、現象のもつ意味と質量や力の概念についても、じっくり探究する機会を設定していることは間違いないという確信が湧いてきたのだった。

ふたたび高校物理の話題になるが、教育における一つの試みとして、このような状況を逆に利用した授業を展開するとどうなるであろうか。教科書に登場する単元の順序に逆らって、図2のような探究活動を運動の第2法則の学習の前においたところ、[作用・反作用]や[力のつりあい]で出会った“力”の概念は“速度”や“質量”などの「運動の量」と区別され始めたのだった(図1・グループ2, 1993年度教科指導)。いくつかの力学概念のせめぎ合いが引き起こされたのち、初め曖昧であった“質量”と“重さ”のちがいが明瞭になるなど、「運動の量」は[運動の第2法則]の学習の動機をさそう先行概念の役割りを果たすことが理解できた<sup>2)</sup>。

表1. 理科学習における概念を構成する記憶要素<sup>5)</sup>

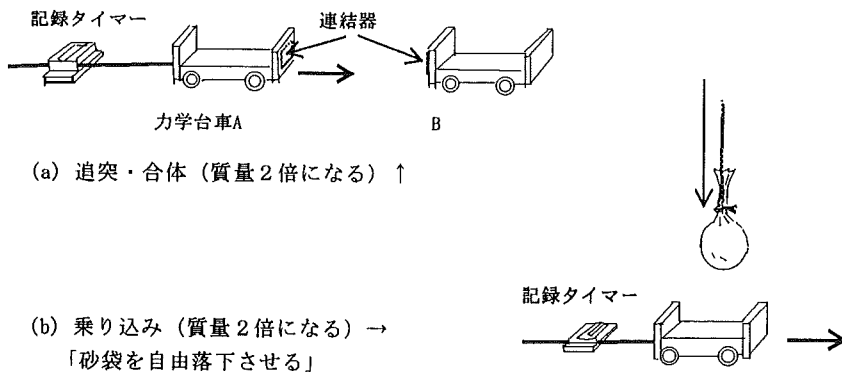
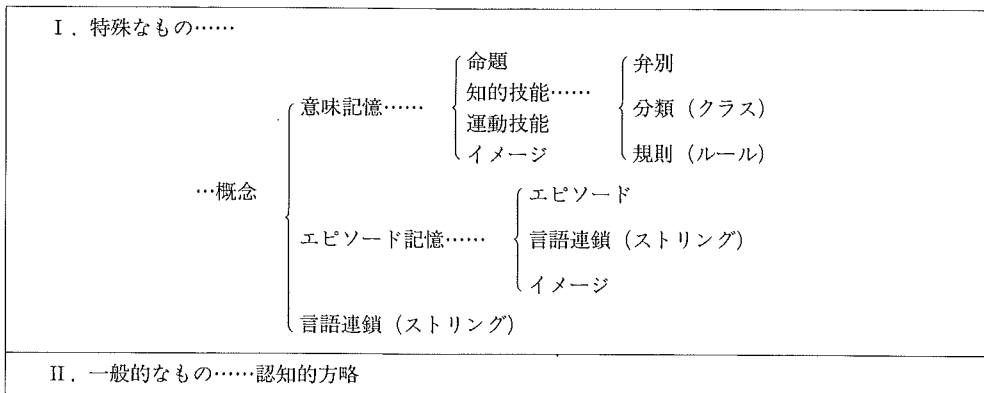


図2. 非弾性衝突実験

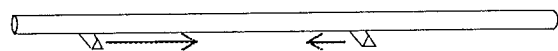
このようなプログラムと取り組んだきっかけは、高校1年生(図1)と大学1年生対象の調査結果<sup>3)</sup>にあったわけだが、なぜ「運動の量」なのかを整理しておく必要がある。すなわち、これがどのように「運動法則」概念の形成に関係するのかというと、一つには“重さ”から“質量”への概念の一般化が大きな意味をもつことだ。ただ単に、質量は微分方程式の係数に過ぎないという認識で終わってほしくない。第二には、たとえ科学概念としては不完全で漠然としたものであっても、自分なりに考えた産物という意味において能動的かつ有為な‘力’に関する pre-conception が理解を一層深めるのに役立つことである。未発達な概念を補強するとか、間違った概念を正す、などというよりもっと積極的な意義がここにはある。大学生の場合にも、これら2つの視点が「運動法則」の円滑な学習を助けるであろうと考えられた。

### 3. エピソード記憶と意味記憶の役割

学習者が図2(a), (b)の2種の衝突に本質的な差異のないことを見いだす過程こそ、エピソード記憶から意味記憶が形成される過程である。初年級対象の物理学の講義中に衝突を見せながら説明する演示を試みたところ、効果があるように思われた。衝突現象の体験はインパクトが強く、高校生のみならず大学生に対してもエピソード記憶を成立させるのに有効である。しかし、概念形成に役立つ事例は巷にあふれているから、教材研究にはこと欠かない。人の一生という長い時間のスケールで考えるとき、様々のタイプの人々に科学のおもしろさや学問の豊かな応用面に敏感になってほしいという願いを強くする。

自分に関わりのある領分がそこにあるという印象のもてる場面こそ、学習者にエピソード記憶を呼び起こす。そのような授業を工夫することが質的に新しい次の学習のステップにつながる。意図的に概念形成をはかる例を他にあげるとすれば、力のモーメントに関する図3のような演示実験や演習課題もそのようなものの範疇に入るだろうか。力のモーメントは新課程カリキュラムの施行にともなって、1997年度大学入試から扱われる。

受講生の一人が質問にやってきた。『自動車とトラックの衝突を想像してみたのですが、自動車側の被害を少なくするためには自動車の質量は大きい方がいいのでしょうか、小さい方がいいのでしょうか?』実際の出来事だったら恐ろしいことだが、1時間ほど物理の議論をした後で、筆者は高校生のとき教師から『水平にして一端を固定した弾性板の上に多数のビー玉を連続して落させ、そのとき板が受ける力について考えよ』と問いかけら



(a). 棒の重心を見つけるために支点を近づける演示



(b). 棒の重さを求める計算 — 演習

図3. 「力のモーメント」の簡単な例

表2. 講義の基本プログラム

<p>I. 高校生の場合の実状理解をもとに、大学生では…</p> <p>〈保存則からの出発〉</p> <p>① 質量保存の法則……物理に登場する物体を量の変わらないものとして取り扱う根拠を与える。</p> <p>② 運動量保存の法則……2体衝突の例を引き合いに出す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・これから直接、「慣性の法則」と「作用・反作用の法則」を定理として導かれる。</li> <li>・力を定義しさえすれば (<math>F = dp/dt</math>)、運動の第2法則さえも導かれる。</li> </ul> <p>③ 質点系と剛体の運動</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・力のモーメント</li> <li>・質量中心の運動</li> <li>・重心の運動</li> <li>・相対座標の運動 (以下省略)</li> </ul>
<p>II. 注意事項</p> <p>〈教材重視〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・学習者の興味を刺激するよう、教材研究にとくに意を用いる。</li> </ul> <p>〈過程指向〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・個人的なエピソード記憶とつながりやすい日常の身近な現象や話題、平易で意外性のある演示実験を織りまぜる。意味記憶の確立に直接せまろうとする説明中心の、いわゆる講述的な授業をするのではない。1/3程度の時間を各単元の演習にあてるなど工夫して意味記憶の定着を図る。</li> </ul>

れたエピソード記憶と、その後にはわかにかに形成された“力”に関する意味記憶とを思い出した。—ああ…そうかっ！ 運動方程式で扱える力は、緩やかに作用する力に限らないんだな！—それは、“力”に関する第2のエピソード記憶とそれに続く意味記憶の深まりだったように思われる。特に、高校物理の教科書では力学概念の意味記憶を主幹に配した記述がなされているので<sup>6)</sup>、日常経験とかけ離れた印象は否めない(図4-a)。傍系的に導入されている質量と力の学習の動

機付けを静力学だけに頼らず、身近な衝突現象を経由するなどして、運動の量として位置づける工夫をするならばエピソード記憶はつくられやすい(図4-b)。

4. 実践と検討

[力のつりあい] や [力のモーメント] の単元では、静力学実験器のセットや長い柄のついた箒さえ教室に持参して簡単な演示実験をおこなった。また、全体の講義時間の3割

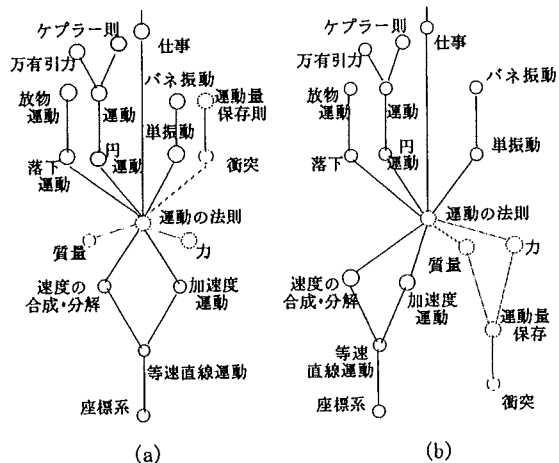
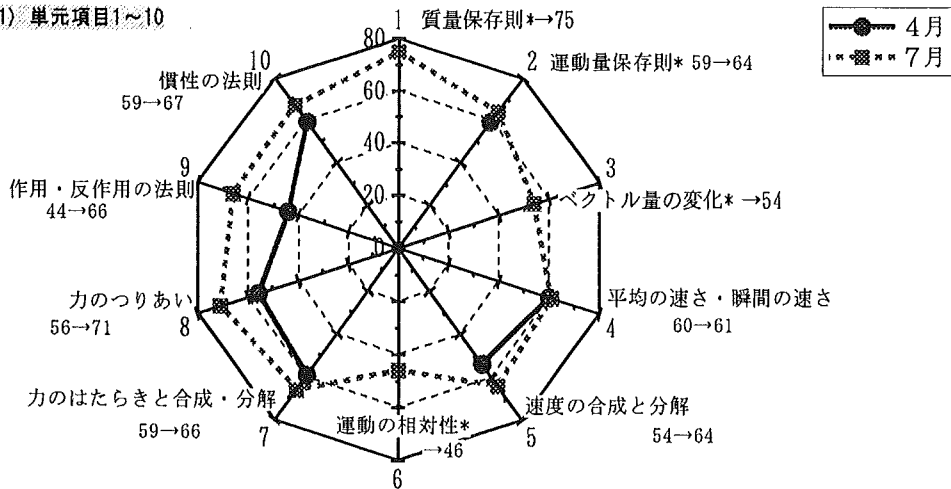


図4. カクタス・グラフにみる教科構造の現状(a)と試案(b)

強を演習に充て、認知的方略の技能が獲得されやすいよう心がけた。重要な概念をエピソード記憶と意味記憶とに関連づけるような場面設定に意を用いた結果、2つの保存法則、力、質量の概念の理解は向上した(図5-1)。しかし、障害にぶつかったものもある。率直に言えば、抽象性の高いもの(たとえばガリレイ変換・運動の相対性)や複雑な計算の避けられないもの(角運動量、ポテンシャルの演習)は思ったほど実が上らなかった(図5-2)。演習不足の一面もあり講義形態に検討の余地もある。また、別の意味で理解されにくかったものとして、[等速円運動]と[ケプラーの法則]がある。別の意味というのは、学生には『自分とはとてもあのような大法則なんか思いつけない…』というような後込みがみられたことを指すのだが、そのような学習観の誤解をとくことも大切だ。なお受講生たちの理解度については、各自の自己評価を無記名アンケート方式により調査・整理した資

## (1) 単元項目1~10



## (2) 単元項目11~21

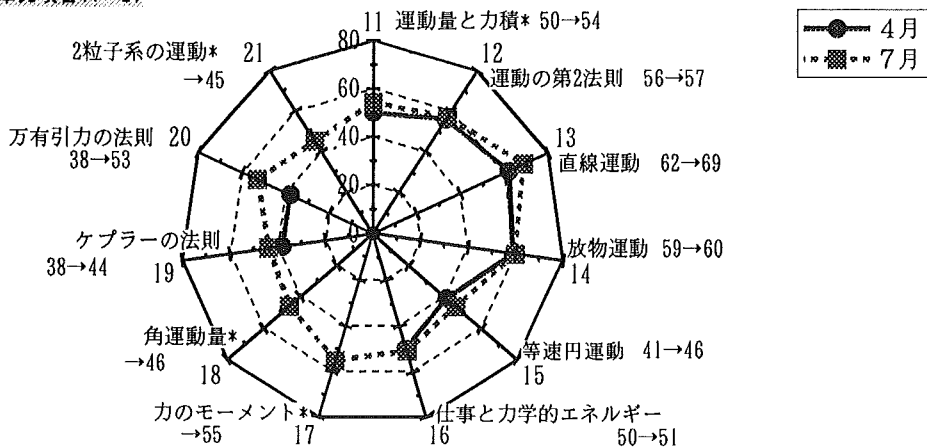


図5. 理解度の自己評価推移

\*印は高校物理では扱わない内容、高度なもの、または学習の順序が異なるものをさす。

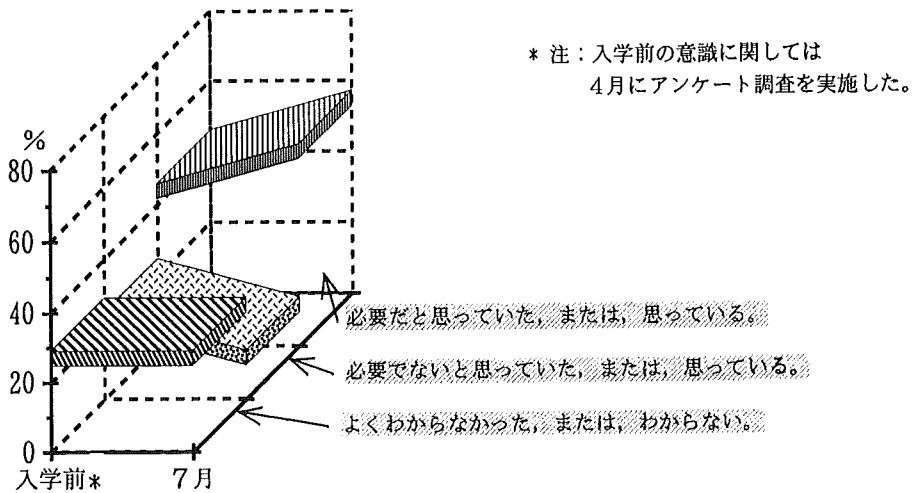


図6. あなたにとって物理は必要ですか, 必要ないですか?

表3. なぜ必要(または不必要)だと思ったのですか?

判断の理由(自由な記述形式による)	入学前	7月
理系にとっては必要な基礎科目だと思ったから。	5人	4人
化学の勉強に関係があり, 役立つから。	4	5
物理か化学の関係に進むつもりだったから。	2	—
物理は生活と深く結びついているから。	0	2
教職の資格取得に必要な単位だから。	1	1
これからの専門の勉強には必要ないと思ったから。	3	0
将来物理と関わりをもつことはないから。	1	1
興味がないから。役に立たないと思ったから。	2	2
高校の先生に必要だと言われたから。	1	—
必要かどうかは判断できないから。	6	6

料を参考にした。資料は学習者自身の主観にもとづいた自己評価であることをお断りしておく。

科学者のコンセンサスをもつ教師は, その立場から命題を伝達しようとして, よくコミュニケーションにおける誤ちを犯すことが知られている。すなわち, 学生たちは教師の用いたことばに対して別の意味を考えているので, 提示された命題を異なった観点からとらえようとする。また, 学生に向かって『これから学ぶことは, 君たちが今は学びはしないがある有名な理論(実験)があって, その基礎となる重要なものですから…』などと言ってみるところで何にもならない。アンケート調査結果の整理ついでに, 『物理は必要だと思うか?』『なぜそう思うのか?』の回答を図6と表3に掲げておく。

最後に蛇足を一つ。中学校や高等学校の理科教員免許状取得のための履修科目, たとえば中等理科教育(法)の中では, 《子どもの科学概念の形成はいかに行われるか》といった

内容が講義の中心に位置づけられることが重要だといわれる。教員志望の学生が、ミニ理学部に所属しているかのような意識をもつのではなく、子どもの学校教育に直接役立つ科目を履修するんだという自覚のもてる環境が必要である。

## 5. ま と め

まず、最初に“力”を学ぶとき、静力学と動力学のちがいが、つりあいと不つりあいのちがいが等々にかかわりなく、それが何から何にはたらくているのかを意識できるようにすることが肝要である。ちょうど、化学反応における色の変化が学習者の心をよくとらえるように、力のはたらきが物体の動きとして見てとれるのが効果的。次に、「運動の量」あるいは“運動量”が大きいことは衝突した相手を跳ね飛ばす力（正しくは“力積”）が大きいということだ、というふうに慣性の概念は身近な現象と深く関わっている。まして、慣性質量のたしかな概念を抜きにした運動法則の理解は期待できないので、これらを教材構成上での主幹に配置すべきであろう。さらに、ありふれた事物の描写には容易に“具体的な概念”が適用されるが、物の性質や属性、たとえば物理的な運動のようすを表すには“定義された概念”の理解が不可欠である。そのような高度な認識にいたるための最初のステップを可能にするのが衝突現象などのエピソードであった。

概念形成の条件は次のように表現されるであろう。

- (1) 概念学習のはじめには必ずエピソード記憶につながる体験があること。
- (2) エピソード記憶…意味記憶…エピソード記憶…というふうに関連性の強い想起が繰り返されること。
- (3) 創造性は‘らせん’の階層構造で示され、与えられる情報の質と学習者の個性に依存して決まること。

らせんの構造にはピッチ、輪の拡がり方、およびそれらの変化の緩急などが含まれる。そのしくみを時間的な変化の部分を除いて模式的に表したのが図7である<sup>7)</sup>。

体験からエピソード記憶が生まれ、物理ではそれに法則等の理解が加味されて意味記憶への変換が起こる。これはまさに創造性を発揮しながら概念を形成していく過程である。

物理概念に関する2つの記憶要素をつ

なぐものにイメージがあり、さらに、

『この問題は同じ方法で解けるだろうか…?』といった一般的な判断に関する第3の記憶要素として認知的方略<sup>5),6)</sup>というものもある。不十分な説明を覚悟の上で付け加えるとすれば、第3節で引き合いに出した筆者の経験、力に関する意味記憶の深化がこれに当

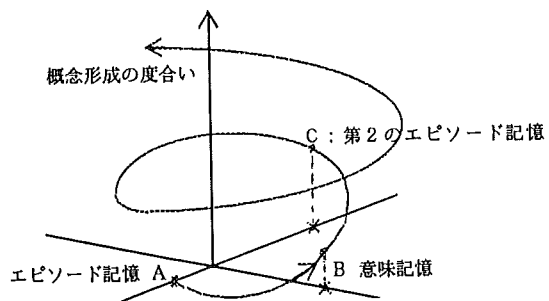


図7. 概念形成のしくみ



たるだろうか。ともかく、何らかの方法によって、エピソード記憶や意味記憶を印象深くしたり、両者のつながりについて創意工夫するのが教育カリキュラム編成や教材研究の役割である。創造的人材の育成のためには、学習者の立場に立って教育を広い意味での自己実現の一環としてとらえ、学習者が『自分に関わりのあることだと思える—』ような教材を選択して概念形成過程のらせんに沿うように配置することが重要である。このことは小中高における教科指導のみならず、大学での教育にもあてはまるものと思われる。そして、もしも意味記憶だけで十分理解できる例外的とも思えるような場面に出くわしたなら、そのときは、当該分野について概念形成があるレベルを越えたと考えて差し支えない。

#### 参考文献

- 1) 総理府調査資料：文部省高等教育局「創造的人材育成のための大学教育の改善についての緊急提言」から（平成7年7月）。
- 2) 山本健治，狩野 勉，中川生一：日本科学教育学会第19回年会論文集（1995）p.259；山本健治，中川生一，狩野 勉，宇都宮晃，宮川和也，石崎範男：同第18回年会論文集（1994）p.229。
- 3) 山本健治，狩野 勉，宮川和也，宇都宮晃，中川生一：岡山理科大学紀要第29号A（1994）p.397；動力学を運動量から始める教材構成の検討については、次の文献を参照されたい。山本健治：パーティ第9巻，第2号（1994）p.64。
- 4) 長町三生：記憶—認知心理学講座1，原著者はG. コーエン，M.W. アイゼンク，M.E. ルボワ，海文堂（1989）p.43。
- 5) 堀 哲夫，森本信也：子ども達は理科をいかに学習し教師はいかに教えるか，原著者はR. T. ホワイト，東洋館出版社（1990）。
- 6) 伊藤信隆：グラフ理論を応用した科学カリキュラムの構造解析，東洋館出版社（1990）p.46。
- 7) 中川生一，狩野 勉，山本健治：日本科学教育学会第19回年会論文集（1995）p.329，および口頭発表内容。
- 8) 杉本良一，松元俊一：日本科学教育学会第18回年会論文集（1994）p.159。

# An Investigation into the Process of Conceptual Understanding about Newton's Law of Motion

Kenji YAMAMOTO, Tutomu KARINO\* and Sei-ichi NAKAGAWA\*

*College of Science and Industrial Technology*

*Kurashiki University of Science and the Arts*

*2640 Nishinoura, Tsurajima-cho, Kurashiki-shi, Okayama 712, Japan*

*\*Faculty of Science*

*Okayama University of Science*

*1-1 Ridai-cho, Okayama 700, Japan*

(Received September 30, 1995)

We put a newly organized program of introductory physics education into practice. Our students pursue inelastic collisions first to accomplish the conceptual understanding of mass and force. After that, they begin to tackle Newton's Law of Motion. Episodic and semantic memories of the students are respected as far as possible in the present educational program, because the physics education for a freshman is a part of his own cultivation. It turns out that our experiment seems to work very good from that point of view.