

存在のメタファーを拠り所とした物理概念について

—視覚化されにくい量を対象とする場合の教材観—

山本 健治

倉敷芸術科学大学産業科学技術学部

(1999年9月30日 受理)

1. 序

「存在のメタファー」, 「物理概念」, そして「教材観」と, いったい何が言いたいのだろうか? と不思議に思われたのではなからうか。物理用語の中には実に多くのメタファー＝比喩が存在する。バカな! 物理と言えは精密科学だぞ。そんな曖昧なものがある、たまるか。まあまあ落ち着いてください。これからちゃんとお説明申し上げますから。

レイコフとジョンソンは著書の中で,

『人間の概念体系の一部は, 基本的に比喩的である¹⁾。』

『われわれの通常概念体系は, その大部分がメタファーによって構造を与えられている²⁾。』

と述べている。瀬戸賢一は「科学メタファー」について,

『科学は, 厳密であることを目指すのであるが, つねにそうであるわけではない。…(中略)…しばしば, その用語を厳密に定義することが, 科学的探求の中心の一つとなっているからである。』

と説明した³⁾。

最近「磁石と鉄が引き合う力の課題」において, 小学生と中学生の思考が聞き取り調査された⁴⁾。それによると, 円柱状のコロの上で棒磁石と鉄柱が引き合って動くさまを見た被験者の半数以上は『物体が運動するのは(磁石が鉄を引くのは), 物体が力をもっているからである』という思考様式「存在のメタファー」をもっていた。また磁石と鉄が静止している場合でも, ‘力は物体に内在している’ と考えるメタファーが存在していた⁵⁾。力学の基本的概念である“力”は, 運動の第三法則によると, 2つの互いに相互作用し合う物体(ここでは磁石と鉄)の間で働くのであるから, 磁石または鉄のどちらかが単独に担うと考えることは出来ない。つまり物理的に正しい認識をもっていれば“力”は, 運動量, エネルギー, 熱などと違って, 単一の物体に備わった「存在のメタファー」とはなり得ないものである。ただし筆者は, そのことが問題だと言っているのではない。人間とはそもそも, 概念形成の各々の段階で, その時々自分に見合ったメタファー構造をつくり上げていくものなのだ。磁石と鉄が引き合うような相互作用は, 2物体の衝突と本質的に

同じ現象である。引力と斥力の違いはあっても、どちらも相互作用であるから、被験者が“力”と名付けた「存在のメタファー」については、‘それは運動量と呼ばれる量の添加（注入）能力である’ことに気付けばよいのである。それを考えさせる一つの方法が「磁石と鉄の相互作用」であることを中山たちは示してくれた。これは我々が衝突現象を例に挙げて指摘したこととまったく同じことである⁶⁾。ただ、我々が“運動の量”を採りあげたのに対して、中山らは“力”を相手にし、しかも、それを「メタファー」という枠組み—素朴概念という心理学領域の流れに一步踏み込んだ見方—で検討しようと試みた。

小論では、上記のように“力”というモノに見立てられた「存在のメタファー」は、運動物体がもつ“運動量”を“運動の勢い”に見立てた「存在のメタファー」とどのような関係にあるのかを考察する。運動量は“運動の勢い（速さと重さの両方）”というモノに見立てられる。質量を“重さ”と見立てるメタファーには、重力空間を“物体を落とす”性格のモノである⁷⁾と見立てる「空間のメタファー」や、手のひらをずしりと⁸⁾圧す「触覚のメタファー」も関係していると考えられる。したがって入門的な学習の場面では“質量”よりも“重さ”の方が適切なのであろう。また本来、運動量は抽象化を経なければ視覚化することの出来ない物理量である。それは、質量という“量”を“速度”にかかる単なる数係数と想定してはじめて、紙面上にベクトルとして描くことが出来るからである。量子力学で“運動量座標”を考えるのはまた別な話である。瀬戸のメタファー系統図で「存在のメタファー」と横並びに置かれた「運動のメタファー」には（出版で公表されている限りでは）“運動量”は公然と掲げられてはいない⁹⁾。現在のところまだ調査や解析はなされていないが、いずれ本テーマは、学習者に対する実態調査を必要とするであろう。

2. 物理におけるメタファーの意義

「メタ（向こうに）ファー（運ぶ）」には、未知なるモノ（A）を既知なるモノ（a）に見立てる意味がある。たとえば「目玉焼き」は黄身の部分（A）を目玉（a）に見立てている。実物の目玉を指していないことは明らかだ。「目玉…」は‘黄身焼き’とは呼べない何か—黄身の部分の何かに当たる未知なモノを実にぴったりと表現している。同様に、「見る」は、しばしば「知る」に転じて用いられる。「みる」の主要な意味は「見る」「知る」「守る」である、などなど。日本語で最も「メタファー」に近い意味をもっている言葉は「比喩」である。しかし日本語で比喩といえ、たぶん文学的色彩を帯びてくる嫌いがある。それは比喩が文学に大きな役割を果たした歴史をもっているし、作品の批評にもよく用いられたので当然である。そればかりでなく、科学には「単なる比喩的説明に終わらないで…」のように、「比喩」を偶然のたとえ話に過ぎないものとしてタブー視する傾向もある。それを如実に表しているのが「アナロジー」に対する評価との格差である。参考までに、「アナロジー」に近い意味をもつ言葉は「類似（性）」であるが、これに対する科学者からの評価は「比喩」よりも高い。それにはちゃんとした理由がある。「ア

ナロジー」は「メタファー」が一貫性を備えて一般化したものと考えてよい。《メタファー思考》を著した瀬戸は、

『アナロジーとは一貫したメタファーの連続的対応のことで、メタファーが点对応とすればアナロジーは面対応である』

と表現している³⁾。科学は「偶然の一結果」を評価しない。しかし同じような事例が増えてくれば「再現性のある結果」となり、それは見直されて評価される。有力なメタファーを瀬戸にならって潜在的なアナロジーにとらえることにしよう。

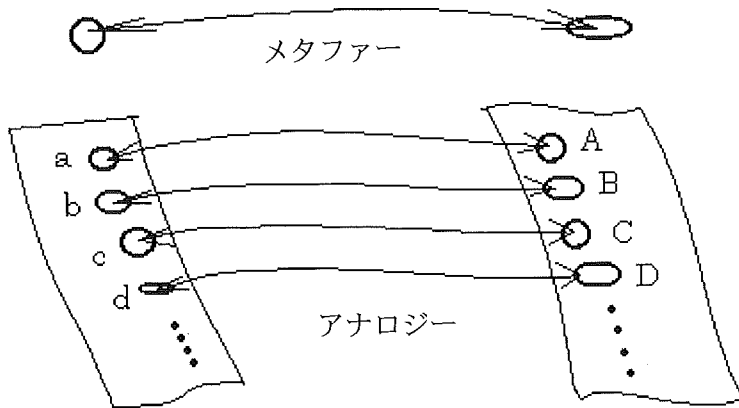


図1 メタファーとアナロジーの違い³⁾

さて、彼の精力的な仕事によると、優れたメタファーは優れた着想を表現している。優れたメタファーは、すぐにアナロジーの方へ展開しようとする潜在力を秘めている。科学史を紐解くと、水素原子の構造を太陽系に見立てた模型が考えられたし、光を粒子か波に見立てた論争もあった。電気の流れ (A) が水の流れ (a) のメタファーで教えられ、かつ研究されたし、それは現在も続いている。オームの法則はまさにその典型であった。ファラデーは砂鉄の示す磁力の方向から類推して磁気や電気の力線を描いた。空間にあって電氣的な力の方向を示す何か (B) を磁気の場合の磁力線との類推で電気力線 (b) と呼べば、それがマクスウェルをして「電場」という抽象概念に赴かせた。磁場や電場が理解できれば、もはや磁力線や電気力線には用がないのかというと、決してそのようなことはないのである。

3. 存在のメタファーと視覚化

中山らの被験者の半数以上が持ち合わせていた「存在のメタファー」は、将来意識の中で直接的には「運動量の添加」、間接的には「力を伝える場」という理解に形を変えていくための重要な手がかりになり得ると考えられる。しかし、その調査が示していたよう

に、小中学生にとって鉄と磁石では、2物体の接触がない分だけ衝突よりも難しい。接触のある衝突でさえ、相互作用のわかる段階に達していない児童・生徒にとっては難しい現象である。“力”というモノに見立てる存在のメタファーを発見したことは、メタファーを学習者の概念の発達段階を知る尺度として捉えた点で評価できる。筆者は『“力”をもっている』が『“目玉”焼き』と同程度にたやすくメタファーとなり得るものかと驚いている。つまり“目玉”は確かに既知のモノだとしても、“力”が既知のモノであるとは考えられないのである。“力”が既知ならば、もはや力と質量と加速度の間にある関係、運動の法則の一角が理解できたことになる。そう簡単でないのは、運動の法則は、これら3者が全体として関わっている法則である点だ。だから、“力”と呼ばれたメタファーはやがて変容するモノである点が“目玉”とは異なっている。被験者がその時点で“力”を既知と思い込んでいたということか。

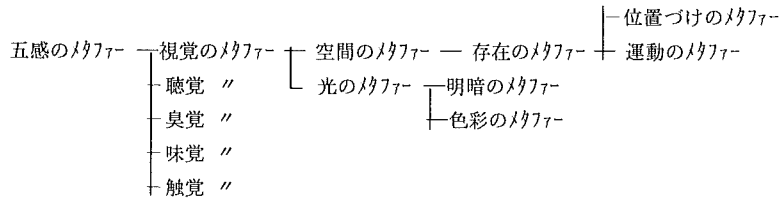


図2. 「存在のメタファー」の主幹³⁾

それでは、初級学習者にとって“力”はなぜ「視覚のメタファー」—「空間のメタファー」—「存在のメタファー」の主幹上に位置するのか。それは‘視覚の優位’と称して説明されているように³⁾,

『物事を空間化して考えようとするのは、私たち人間にとって避けられない思考の道筋である。』

からである。すると中山らの調査結果は、年齢が高じてからも場合によっては変容しがたい“力”と呼称され続ける存在のメタファーがあることを意味している。ところが、学習者は“添加される運動量 (=力積の作用)”という未知のモノを、既知のモノである“力”に見立てている、というふうを考えれば容易に合点がいく。我々は“運動量”が力学の学習効果の面で特別な意味をもっていることに早くから気づき、動力学を“力”ではなく“運動量”から導入する教材構成を検討した⁶⁾。現段階で教科書に盛り込まれているより以上に、物理教育では“運動量”の果たす役割が大きいことを主張してきた。そうしながらも“力”の呪縛から逃れることは出来なかった。それでも、学習者をニュートンの運動の法則(つまり“力”と“慣性質量”と“加速度”の関係)に先だって“運動量”と“力積の作用”とが関係し合う場面に立ち合わせる授業研究と取り組み、生徒実験のレポートを分析したり聞き取り調査も行った。この実践研究の意義については、かなり入念

に検討し評価することが出来たのだった⁶⁻⁸⁾。

学習者は年代に関わりなく、運動に含意された“力”と同じようなメタファーに拠る思考過程を踏むだろうと考えられる。あるいは、その過程を通過してもなお概念の基盤を保持していると推測される。それはたぶん‘pre-conception’とか‘children’s science’,あるいは‘素朴物理’や‘素朴概念’などと呼称されているものと同根であろう。しかしメタファーではないかという予測のもとに研究されたのは最近のことである。学習者の個人的な「エピソード記憶」は「らせん的な体験の階層」を経て「意味記憶」へと変容するものと考えられた⁷⁾。同様な意味で、“力”というモノに見立てられた「存在のメタファー」は“運動量”の「存在のメタファー」とどのような関係があるのだろうか。現在のところ、このテーマはまだ詳しく調べられていないが、検討の価値が大きいように思われる。高校生や大学生に対する調査は把握されていないので、機会があれば実施したい。

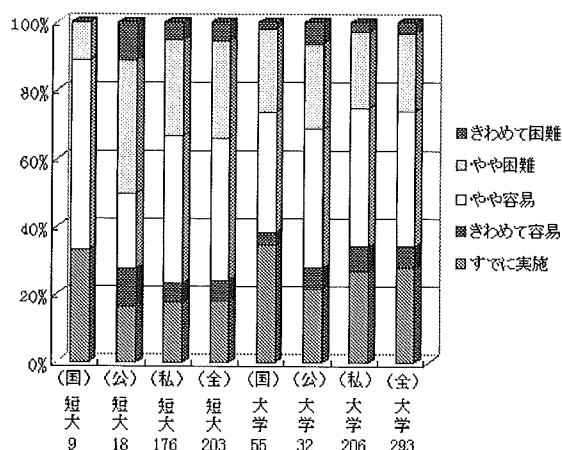


図3. マルチメディア教育の実施状況からみた大学教育における教材観
大学教育審議会答申(1991年2月)で指摘されていた改善・改革への
取り組み事項に関する質問への回答⁹⁾(数値は標本母数を表す)

ところで、これから述べる事柄の舞台は大学初年級向きの物理学講義であり、そこで黒板と視聴覚機器とインターネットとを駆使して物理概念と何とかうまく付き合っていくという筋書きだ。ただし「教材観」は「マルチメディア」に通じる。黒板授業だけでは物足りないと感じる受講者の学習の効率も考え、授業中はビデオ教材を利用し、時間外でも個人的に学内LANを利用できるウェブページを設けた。とにかく多様な機会をとらえて物理のイメージを膨らませ易いようにしたのである。筆者が参考にした指針は、放送番組教材を選択する際にとくに重視される基準である¹⁰⁾。

多くの事例を挙げれば物理概念はアナロジー的理解に導きやすいので、授業にも多面的な工夫を施すことにした。学内LANとの接続は、通常の数値計算と同様の個人的なパソコンの利用形態の一つだ。個々の受講者が教壇からの語りかけ、板書、ビデオ教材で見た

表1 授業における教材選択基準 BEST 4

- ① 受講者の興味を引くような工夫がしてあること。
- ② 最新の情報や研究の成果が盛り込まれていること。
- ③ 内容が正確で信頼できること。
- ④ よく取材されていて資料が豊富なこと。

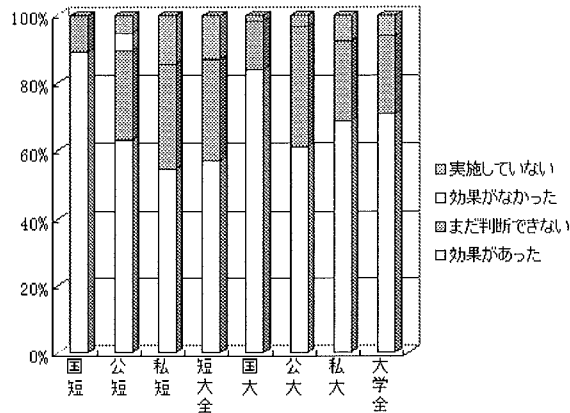


図4. 授業でのパソコン・視聴覚機器の活用状況
(これも日本の大学における教材観の一端を表している)

り聴いたりしたことがらを再確認するのに役立つようにと、講師はウェブ・ページに数式や図版を含む講義ノートを用意した¹¹⁾。ビデオ教材もウェブページも、いずれもメタファーとアナロジーに満ちあふれていて、イメージを膨らませるのには大いに役立つ。このようなメディアを利用しない手はない、ということを強調しておきたい。しかし、学習の献立としてのミニマム構成は授業だけでも間に合うように配慮してきた。時間外の確認作業はプラスαのつもりなので、インターネット接続は受講者の自由意志でなされている。したがって「マルチメディア」の道具立てについては詳細を述べるのは省略する。参考までに、日本の大学教育における「マルチメディア活用の効果の状況」と「授業でのパソコン・視聴覚機器の活用状況」は図3、4のようである。この資料からは、パソコンや視聴覚教材に対する教材観の一端を窺うことができる。また、なぜ我々が視覚のメタファーを使用する機会が多いのかについての理解が深まるにつれて、ますます、アニメやコミックの類だなどと侮ることはできない価値がこれらの教材に認められてくるから不思議だ。

4. “力の場”にも通じる「力の含意」

メタファーとアナロジーには一過的な価値しかないというわけではない。小学生や中学生のもつ“力”の概念についての聞き取り調査から、『物体が運動するのは、物体が力をもっているからである』等の思考様式「存在のメタファー」が発見された¹²⁾。磁石が鉄を引くのを見た児童・生徒は、“力”が磁石の中にあると考える。次に鉄も磁石を引き寄せ

るのを見て、今度は鉄の中にも“力”は存在していると考えるのである。これを中山らは瀬戸のいう「存在のメタファー」とみて「存在メタファー」と呼んだ。もちろん力は単一の物体内に存在するはずがなく、正しい認識によれば、力は2物体の相互の間で作用し反作用するものである。この“力”のような「存在のメタファー」が児童・生徒の思考にのほりやすい原因は、やはり経験にあると考えられる。つまり「相互作用」という高度な概念が未分化なところへ、“力のある球”とか“力のある相撲取り”とか“力のあるエンジン”など数多くの存在のメタファーを聴き、自分でも使っているせいではなからうか。物理的な相互作用は「五感のメタファー」の主幹にある「視覚のメタファー」だけでは表しきれない別の要素をもっている。バッターが投手の投げた速球の威力に負けているとき、アナウンサーはしばしば「球が重い」と表現する。この表現は「触覚のメタファー」であろう。先に述べたように本来的に五感の他のメタファーは「視覚のメタファー」に圧され気味なところへもってきて、力を及ぼし合っている磁石と鉄が互いに離れているので(図2)、なおさら「視覚のメタファー」の先にある「存在のメタファー」で考えてしまうのではなからうか。我々が取り組んだ衝突のような接触を介した現象で調査すれば、結果は多少とも異なったかも知れない。注目すべきことは“力”が“運動量”よりも高度な概念であるということだ。具体的に言えば、「物体に力積が作用する」ことを「物体に運動の勢いが乗り移る」と見立ててはいないかどうか調査なさってはいかがであらうか。さらに一般化した話題として、「物体の運動量が変わる」のは物体のまわりに“場”が存在していて、それが物体に“運動量”を注入する、“力積”を添加する、というような意味のことを言ったのは誰であったか。

ニュートンの運動の法則を正しい(しかも抽象的な)力の概念からストレートに理解することは、かなり高度な学習であると言わねばならない¹⁰⁾。特に強調したいのは「運動量を添加する」、「運動量が乗り移る」でも、「力積を作用させる」、「力積が作用する」でも、どちらでも物理的理解という点ではそれほど大きな違いはないことだ。物理用語ないし教材として、前者が文系向きで後者が理系向きというのも早計だ。中山らが存在のメタファーの実態を調査してくれたので、いまや我々はもう一歩ふみ込むことが容易になった。すなわち“運動量”を“運動の勢い”に見立てた「存在のメタファー」からニュートンの運動の法則に入ってはどうかと提案した主張^{6)~9)}を通しやすくなった。メタファーという言葉は使わなかったものの、実質このような意味のことを主張してきた。物体のもつ「運動の勢い」を「運動量」に見立てた「存在のメタファー」があるかどうかは研究に値する。それがあんなら、運動物体がもつ未知のモノ「運動量」が増えることは、既知のモノである「運動の勢い」が増すと見立てられる。さらに接触のともなう相互作用に注目することで、“力”というモノに見立ててしまい勝ちな“作用能力”を「力積の作用」であると理解する過程に乗せやすくなっていく。メタファーを概念や思考の発達段階を調査する道具としてしまっておくのは、物理教育にとってはまことに勿体ない話である。

大学審議会答申において教養教育の理念と目標を実現させるための諸方策が提言された(1998年10月)。これに対する各大学の対応は、大学教育学会から委嘱された実態調査の報告書⁹⁾から窺い知ることができる。提言と対応は、いずれも教養教育のあり方という点で、および教養教育と専門教育の連携という観点からも、早期に実施または検討すべき事柄を含みながら、過渡的かつ流動的特徴をもかもし出している。筆者は小論においてテーマを限定し、『後期中等教育からの継続性』と『マルチメディアの効果的な活用』の2点との関連で、基礎物理学Iにおける運動量概念—存在のメタファー形成の分析を試みた。

筆者の担当している基礎物理学I, II (Iは力学を, IIは量子論と電磁気学をそれぞれ中心とするもの)は機能物質化学科とソフトウェア学科の両学生に対する「専攻科目」ではあるが、少なくとも現在までのところ教養と専門をつなぐ「ブリッジ科目的要素」の一面をもつとの判断をとっている。それが講義内容をレベル面でも多彩な模様仕立てざるを得なくしている¹⁰⁾。ところが高校で物理を履修してこなかった受講生も多く、彼らは別の意味での「ブリッジ要因」を携えて教室にやってくる。それは『後期中等教育からの継続性』という要因である。未履修者全体を一律には特定できないが、少なくとも開講以来4週間も出席する人は物理の勉強に強い意欲を持っている。そして現実にはそのことをはっきり知る機会もあった。5月上旬のある時間に『高校程度のミニ物理授業を2回に分けて行うが、成績には関係ないので自分だけで必要かどうか出欠の判断をするように』と公言して、さりげなく約束の時間に待っていたときであった。ミニ授業には12名の出席者があり、このうち最終的に基礎物理学Iに合格した者は10名もいた。紙数の関係で詳しくは述べられないが、高校での履修いかに拘らず、受講生には教材に触れるチャンスを自ら生かす熱意をもって欲しいと思っている。

5. 結 論

“力”に見立てた存在のメタファーは、物理の学習途上ではまだ“力積の作用”との関係を明確には意識していない状態を示していると受け止められた。しかし、有力なメタファーというものは潜在的なアナロジーに等しいので、この思考の過程は固定化される可能性もある。磁石が鉄を引きつけるのを“磁石に力がある”と見立てるのであれば、これは運動量と力積の関係をメタファー化した表現にもなっている。だいたい前になるが、板倉と江沢は「運動は力を含意するというふうに考えられている」という意味のことを述べたことがある¹³⁾。運動がしばしば“力”を含意させてしまうのは、“力”というメタファーに慣れ親しんでいるからにはほかならない。運動量の変化する現象場面で、“運動の勢い”というメタファーに触れる機会をもてば、さほどの苦もなく力積の相互作用に導かれることであろう。“力”の存在メタファーは、運動量という概念の根っこの部分に相当するらしいこともわかった。これを何らかの方法で確かめることが出来れば、物理教育にとっても大変有意義である。

瀬戸と中山らの仕事を読んで感動したところから小論が始まった。ここに至り頭の中で踊っていたものが非常にはっきりしてきた。少し実態調査してからコメントすればよかったが、それはまたの機会にしたい。存在のメタファーに関して先達の意見と些細な相違があるが、検討を加えていけば共通点だけが残るものと思われる。その点、本テーマは未だオープンである。読者諸氏の忌憚のないご意見をお待ちしている。

謝 辞

茨城県立日立第一高等学校の根本和昭先生には重ねて議論に応じていただき、そのおかげで着想を得たこともあります。本学の唐川千秋先生は imago「視覚の心理学」特集号の存在に目を向けさせてくださいました。お二人に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) G.レイコフ, M.ジョンソン著, 渡部昇一他訳: レトリックと人生, 大修館書店 (1986).
- 2) G.レイコフ, M.ジョンソン著, 山梨正明訳: 人間の概念体系における比喩構造; M. ミンスキー他著, 佐伯胖編: 認知科学の基底, 産業図書, 35-56 (1986).
- 3) 瀬戸賢一: メタファー思考—意味と認識のしくみ, 講談社現代新書1247, 講談社 (1995).
- 4) 中山迅, 宮川雄司: 科学教育研究23(2), 81-88 (1999).
- 5) 中山迅, 松原道男: 日本理科教育学会研究紀要30(2), 63-68 (1989).
- 6) 山本健治, パリティ 9(2), 64-69 (1994).
- 7) 山本健治, 狩野勉, 中川生一: 倉敷芸術科学大学紀要1, 73-82 (1996).
- 8) 山本健治, 根本和昭, 狩野勉: 国際教育研究所紀要5, 25-52 (1996).
- 9) 大学教育学会委嘱調査 (河野昌晴代表編): 「大学の教養教育に関する実態調査」報告書, 倉敷芸術科学大学, 1999.
- 10) 飯森彬彦: NHK 放送研究と調査, 38(7), 46-61 (1988).
- 11) 山本健治: ウェブ・ページ, http://www.kusa.ac.jp/kenji-y/jugyo/syl_kis1.html (1995~). ただし, これは講義ノートというよりも, 補助教材により近いものである.
- 12) T. O. Pride et al.: Am.J. Phys., 66(2), 147-157 (1998), および L. C. McDermott らワシントン大学物理教育研究グループの提唱するチュートリアルは, まさにこの考え方に立って計画された.
- 13) 板倉聖宣, 江沢洋: 物理学入門, 国土社, 106 (1992): 同じ意味の指摘はもっと古いと思われるが, 筆者は歴史を調べていない.

On Children's Conceptual Understanding about Physical Quantities in Terms of Metaphorical Expressions

Kenji Yamamoto

College of Science and Industrial Technology,

Kurashiki University of Science and the Arts,

2640 Nishinoura, Tsurajima-cho, Kurashiki-shi, Okayama 712-8505, Japan

(Received September 30, 1999)

Abstract: Children can easily understand *momentum* as a quantity of something like force, energy, or vitality. This understanding is discussed in contrast with another understanding of *force* which is considered to exist, by the greater part of the elementary-school- and the junior-high-school-students, in a moving object, or in a magnetic stick that attracts and pulls down an object made of iron. Nakayama et al. considered the *force* like this to be *a metaphor of existence*. We consider, however, this kind of force represents the beginning of a conception with interactive relationship between two objects, or the second concept of *a field of force*.