

物体の運動理解に関する研究 —慣性に関する誤概念(3)—

目白大学人文学部 西方 毅
目白大学地域文化研究所 金 宰完

【要約】

高校や大学で物理学の知識を学習したはずの青年たちが、物理現象について誤った理解や推論を行うことが知られている。それらの理解や推論の基になっている誤った信念や概念を、一般に誤概念と呼ぶが、この研究では、慣性にかかわる誤概念、「円慣性」「付属物の慣性」について検討した。今回の調査は、2005年に行ったものと同じものである。今回は、課題理解をより確実にするためにビデオを用いて課題の説明を行った。2005年に行った調査結果と今回の結果を比較して検討した結果、以下の点が明らかになった。第一は、この課題で得られた正答率はこの年代の一般的な正答率であると考えられることである。調査方法が異なるにも関わらず2005年調査と今回の調査で、各年齢段階の正答率にほとんど差が見られなかったのである。第二は、これらの課題に対する理解の発達は「操作」ではなく、単なる「知識」の獲得が中心であると考えられることである。第三は、今回の課題では明確な性差が見られたことである。ただし、2006年の調査（放物線理解の発達）では、性差が明かではなかったわけであり、力学的な課題でも領域によって性差が見られものと見られないものがあることが示唆される。これは認知発達における「領域固有性」のパラダイムを支持するものである。

キーワード：素朴理論、慣性、円慣性、誤概念、性差

1. 問題

自然界において我々が見かける通常の物体の運動は、慣性に基づく等速度運動と重力や摩擦力、その他の力に基づく加速度運動の合成により生じる。物体の運動の推測はそれらの力の合成による軌跡を推測することであると言えよう。

慣性は物体に固有の性質であり、電車や自動車動き出すときや減速する時など日常生活の中で広く経験するものである。したがって、物を動かす時、自分自身が動くとき、我々は、意識的・無意識的にその作用を考慮している。また、中学校の理科や高等学校の物理でもこの性質について「慣性の法則」として教えている。

このように慣性および慣性に基づく運動は身近な現象であると共に学習する機会が多いのであるが、それを正しく理解することは難しい。1980年代に行われた様々な研究は、多くの学生が慣性運動を含むさまざまな物理事象について間違っ

た。それらは、科学的な概念と異なるという意味で、「誤概念」(Clement, 1982), 「ru-(ル・バー)」(細谷, 1977)「素朴理論」(Vosniado, 1994)などと呼ばれる。また、そこで見いだされた学生の自生的な理論は中世の力学と類似しているという指摘もある(McCloskey, 1983)。この論文では、このような科学的概念と異なる、間違っ

た推論を導くような概念を誤概念と呼ぶことにする。誤概念については、その形成仮説がいくつか提供されている(diSessa, 1983など)。しかし、それらの発達について研究したものは少なく、生物に関する誤概念(稲垣, 1995)、力学に関する誤概念(青木, 2002, 西方, 2005, 2006など)などが散見される程度である。

慣性の誤概念についてはClement(1982)らの研究があり、また、国際比較をしたものもある(西方, 2005, 2006)。西方(2006)の研究では、ある慣性の概念では特異的な発達の傾向、

すなわち、U字型発達曲線が見られること、男女差があることなどが示唆された。今回は、円慣性（注1）および、付属物の慣性（注2：以下、付慣性と略記）の発達についてさらに詳細に検討する。

2. 方法

1) 調査対象

神奈川県横浜市の公立小学校5年生、神奈川県鎌倉市の公立中学校2年生、埼玉県さいたま市の私立大学生である（Table 1）。小学生では一クラス全員、中学生では二クラス全員が調査対象である。公立の小学校、中学校であるために、小学生、中学生共に、被験者には多様な学力の子どもが含まれる。大学生は基礎教養講座の講義を受けている一クラスの学生が調査対象である。大学は文系の大学であり、物理学の授業を受けている学生はほとんどいない（注3）。なお小学校、中学校共に、調査は担当教員に依頼した。

Table 1 被験者分布

	小学生	中学生	大学生
男子	18	43	20
女子	13	40	26
合計	31	83	46

2) 実施方法

運動軌跡に関する研究では、1対1の実験で被験者の反応を記録することが多い。しかし、ここでは、誤概念形成の一般的状況を把握するために、質問紙を用い多数の資料を集める方法をとった。また運動軌跡に関する研究では、運動軌跡を鉛筆等で描かせるのが一般的であるが、結果の解釈の容易さ、および課題の理解の容易さという観点から、先行研究から明らかになっている代表的な軌跡を前もって質問紙に記入しておき、その中から選択する方法を用いた。また、この論文で取り上げた調査課題は、Fig. 1-1及びFig. 1-2の通りである。

ただし、小学生においては、調査用紙に記入してある説明および平面図形から、空間図形、空間運動をイメージすることが困難であること

が予想される。そこで、今回は、ビデオで運動の状況を説明する方法をとった。論文筆者が、ビデオ中で飛行機、円管の模型を見せ、それを動かしながら言葉で説明した。その後、物体が、さらにどのように動くか質問する。課題と課題の間には回答の時間として30秒のポーズを挿入してある。また、実験がまったく同一条件で行われるように、実施方法、回答の記入方法など、すべてビデオ中で行った。調査担当者は、質問用紙を配り、性別、年齢などの記入を確認した後、ビデオを再生し、終了後回答を回収するだけである。また、ビデオ、質問紙共に、小学生から大学生まで同一のものを用いた。

前報告（西方，2005，2006）と同様、今回の研究でも小学生、中学生にはそれぞれの判断についての説明を問うことはしなかった。小学生・中学生共に説明が巧くできないのがその理由である。また、大学生も「たぶん見たことがある」、「こういう風に落ちると思う」など解釈不能な回答をするものが多数あり数量的な分析に困難が伴う。そのために、大学生の説明は、判断の根拠について推測する資料としてのみ用い、系統的分析は行わなかった。

3. 結果

1) 円管 (tube)

この課題には3つの選択肢を設けてある。それらは、それぞれ次のような運動を示している。①円慣性的軌跡、②最初円慣性的運動、途中から等速直線運動へ変化、③等速直線運動（正答）である。

誤答と正答の分布はFig. 2のようになった。

ここで、①の正答を選択したものは、大学生男子が一番多く、65%（以下小数第1位を四捨五入して表示）、次いで、小学生男子56%の順であり、他は30%以下となっている。

この結果から以下の点が指摘される。まず、発達的变化であるが、小学生男子で正答率がやや高く、中学生で正答率が低くなり、大学生の男子で再び正答率が高くなる。正答率を比較したところ、中学生男子—大学生男子間（ $\chi^2 = 7.847$, $df = 1$, $p < 0.01$ ）、中学生女子—大学生男子間（ $\chi^2 = 11.413$, $df = 1$, $p < 0.01$ ）、大学生男子—大学生女子間（ $\chi^2 = 5.339$, $df = 1$, $p < 0.05$ ）

で有意差が見られた。

小学生の人数が少ないために差は有意とならなかった可能性があるが、今回の結果から見る限り、円慣性の発達には、一貫した傾向がないように見受けられる。

次に性差であるが、小学生、中学生では正答率には差がない。しかし、大学生では先に述べたような差が見られた。男子の正答率が有意に高いのである。ただし、有意ではなかったが、グラフに見られるように、どの年齢段階でも女

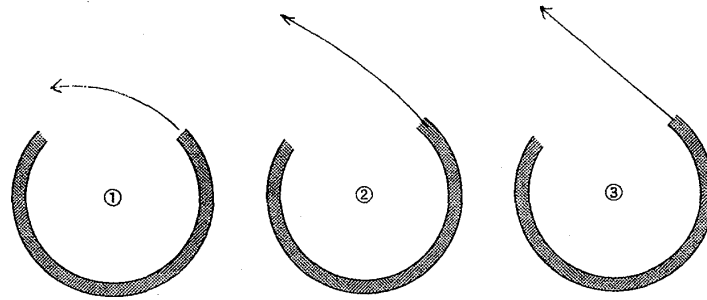


Fig. 1-1 Tube 課題

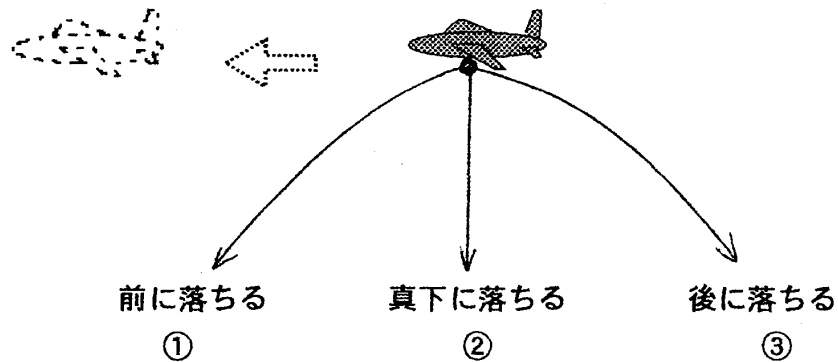


Fig. 1-2 airplain 課題

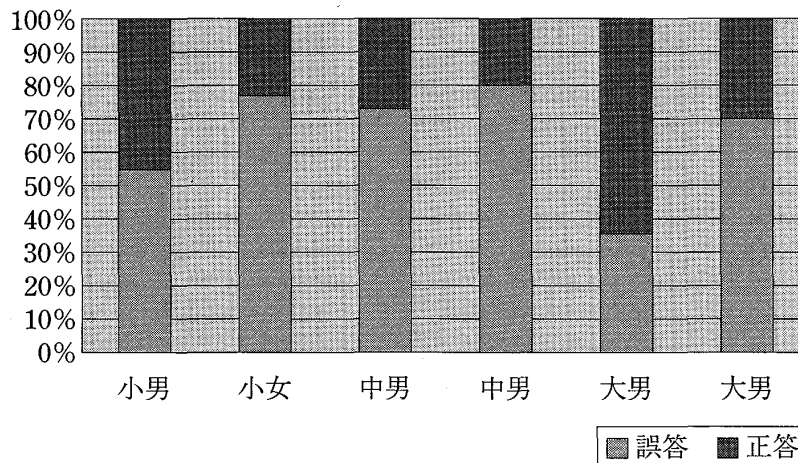


Fig. 2 tube 2006 年調査

子よりも男子の正答率が高いように見受けられる。差が有意ではないとは言え注目される。

2) 付慣性 (airplane)

この課題には選択肢が3つある。①前方に放物線を描いて落下する軌跡 (正答), ②真下に落下する軌跡, ③後方に放物線を描いて落下する軌跡の3つである。

正答と誤答の分布は Fig. 3 のようになった。

この結果から以下の点が指摘される。まず、発達的变化であるが、男子に限れば、年齢の上昇に伴って正答率も上昇するよう見える。しかし、その差は、どの学年間でも有意ではなかった。今回の結果に限れば、発達的变化は明瞭ではないと言えるであろう。

次に性差であるが、どの学年でも男子の方の正答率が高いように見える。しかし、その差は、

大学生の男子—女子間 ($\chi^2 = 6.398, df = 1, p < 0.05$) のみで有意であっただけで、他の学年では有意ではなかった。円慣性の場合と同様の傾向である。

4. 考察

以上の結果について、前回の調査 (西方, 2005) との比較を基に、発達的变化および性差について検討する。

①円慣性

Fig. 4 は、前回の調査の結果を誤答—正答で整理しなおしたものである。Fig. 2 と比較検討すると以下の点が明確になる。

第一は、各年齢段階間の分布の類似性である。小学生では、2005年の調査での正答率が男子18%、女子15%であったが、今回は、男子22%、女子15%である。同様に、大学生男子では、

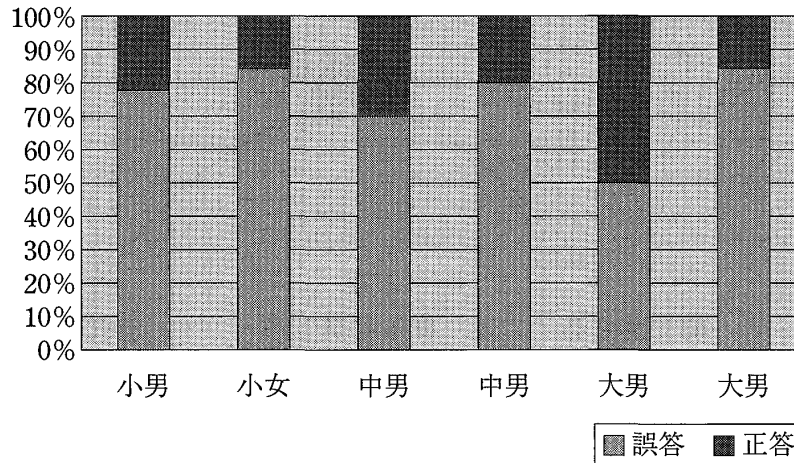


Fig. 3 airplane 2006年調査

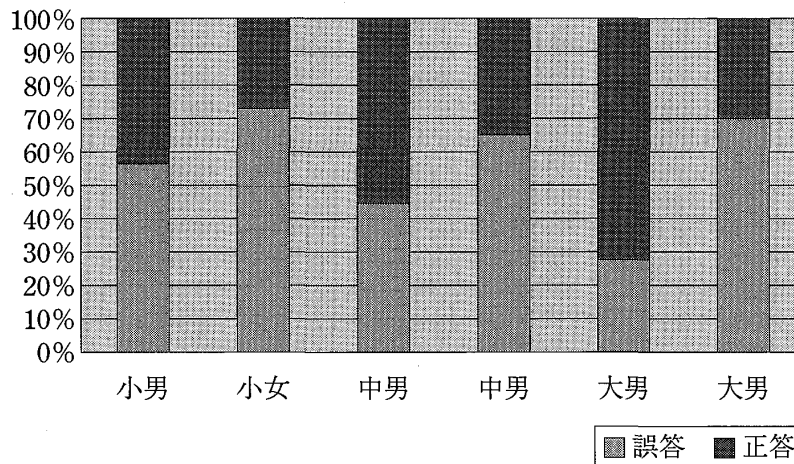


Fig. 4 tube 2005年調査

2005年男子42%、女子20%である。今回は、男子50%、女子15%となっている。前回と今回の男子間、女子間のそれぞれで統計的な差はなく、まったく同じ分布であった。

ここで、中学生だけは2005年の結果と今回の結果はかなり異なっている。男子の正答率が女子よりも高いという傾向は同じであるが、正答の割合が異なるのである。すなわち2005年の結果の方が正答率が高い。これはなぜだろうか。この点については、次のような可能性が考えられる。現在の中学校学習指導要領・理科によれば、等速直線運動を学ぶのは中学校2年生となっている。また、その内容を見ると、斜面や平面を転がる球の運動を取り上げて学習する。そこで、「他の力が加わらない場合は、物体は等速直線運動を行う」と学ぶのである。

2005年の調査でも今回の調査でも、中学生はちょうどこの学年を対象としている。したがって、上述の学習が行われる可能性がある。ここで、このような運動を学習した直後にこの調査が行われたのであれば、「直線運動」という言葉が判断に影響し、正答率が上がる可能性がある。また、実施時期もこの可能性を示唆している。2005年の調査は1月に実施され、今回の調査は9月に実施されたのである。調査の実施時期から、今回の調査対象中学生は、まだ「等速直線運動」を学んでいなかった可能性が高いが、2005年の中学生はすでに学んでいた可能性が高い(注4)。

このように考えれば、前回の結果で中学2年

生の正答率が高かったことは説明できる。ただし、この点を確認するためには、等速直線運動の授業を受けた後に、円管課題の正答率が上がるかどうかを検討することが必要になる。この点は今後の課題である。

以上のことを念頭において見ると、両調査の結果は極めて似ていると言えよう。調査時期や調査場所、調査方法などが異なる(2005年は単純な質問紙、今回はビデオによる説明を加えた)にも関わらず、極めて近い正答率分布になっているのである。この点は大いに示唆的である。

次に性差であるが、2005年の調査でも今回の調査でも、すべて男子の正答率の方が女子よりも高くなっている。今回の調査では有意差はなかったが、2005年調査では、小学生男女間($\chi^2 = 4.301, df = 1, p < 0.05$)、大学生男女間($\chi^2 = 21.292, df = 1, p < 0.001$)で有意差が見られた。先に見たように、今回の調査では性差については大学生のみにしか有意差が見られなかった。しかし、今回の正答率と2005年の正答率とは極めて近かったわけで、もし、今回の調査でも被験者数が十分に多ければ男女差が有意になる可能性はある。

とすれば、この課題に関して言えば、「『円慣性』誤概念には性差が存在する」と断定して良いであろう。この点も極めて重要な結果である。

②付慣性

Fig. 5は、前回の調査の結果を正答—誤答で整理し直したものである。Fig. 3と比較検討す

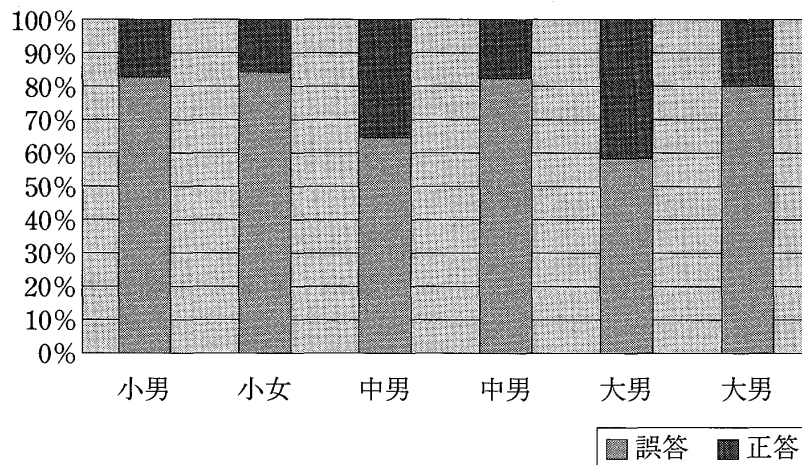


Fig. 5 airplane 2005年調査

ると以下の点が明確になる。

まず、第一は、正答率の類似性である。tube 課題でも見られたが、airplane 課題ではさらにこの傾向が顕著である。2005年の回答分布と今回の回答分布がまったく同じ形になっており、その割合もほとんど同じなのである。調査時期、調査場所、調査方法の相違にも関わらず、両調査の分布の形、割合が同じであるということは、このような課題においては、今回見られた正答率が一般的な傾向であることを示唆すると言えよう。

次に、tube 課題と異なり、正答率が明瞭な単純増加曲線となっていることが注目される。このことについては次の三点が指摘される。

一つは、この運動では、学校での学習の効果は考えにくいことである。慣性によるものであれ重力よるものであれ、飛行機から落下する物体の運動を理科の授業の中で取り上げることはないからである。その結果、学習効果による変動が表れず、結果的に単純加曲線になったのではないだろうか。

第二は、この課題が、認知発達で見られるU字型発達課題（注5）とは異なっていることである。すなわち、この課題に正答するためには、何らかの論理的な操作を必要とするのではなく、単純な経験的な知識があれば良いことを示唆している。この点はさらに検討してみたい。

第三に、この課題でも性差が見られる。ただし、今回の結果では大学生だけで有意差が見られたが、小学生、中学生では差が有意ではなかった。2005年の調査では、中学生（ $\chi^2 = 5.078$, $df = 1$, $p < 0.05$ ）、大学生（ $\chi^2 = 7.127$, $df = 1$, $p < 0.01$ ）で有意差が見られた。先に述べたように、2005年の調査結果と今回の調査結果では、正答率がほとんど同じであった。したがって、今回の調査では被験者数が少なかったために有意にならなかったものであり、実際には性差は存在する可能性が高い。

5. 要約

円慣性および付慣性の調査結果から、以下の点が明らかになった。

第一は、両方の調査で見いだされた正答率の類似性である。2005年調査と今回の調査では、

課題の内容はまったく同じであるが、実施の状況、実施方法は大きく異なる。それにも関わらずほとんど同じ正答率になったのである。このことは、ここで見られた正答率分布が、各年齢段階の標準的な正答率分布であることを示唆している。

第二は、この二つの慣性判断の発達には、認知操作能力の発達が関係しておらず、単純な経験的な知識の増加のみによるものではないかということである。そのことは、今回の調査で見られた発達的变化が認知操作能力の関係する課題でしばしば見られるU字型の曲線ではなく、単純増加曲線になっていることから結論される。もし、そうであるならば、このような力学的な現象理解においては、操作ではなく経験を通して得た知識、概念による解決が主になっているということになる。この点は、現在の認知心理学の主張する「領域固有性」パラダイムを支持するものと言えるであろう。

第三は、このような課題、円慣性課題および付慣性課題においては、普遍的に性差が存在することである。両調査結果がまったく同じ傾向を示したのである。とすると、それは男女のどのような認知的な特性に基づくものであろうか。それについては検討の余地がある。

ただし、2006年調査の他の項目（落下物体の放物線軌跡理解など）では、性差が見られなかった。2006年調査の内容は、放物線運動理解に関するものであった。このことは、運動理解が個々の運動領域によって異なること、すなわち、運動の種類によって異なる操作、知識、イメージなどの組み合わせによる複雑なものであることを示すように思われる。

以上の諸点は、運動理解がどのようになされるか、どのように発達するかについて重要な示唆を与えるものである。

<注>

注1 円形の軌道を運動する物体は、その軌道内を運動中に、円運動を行うような一種の勢いを得る。そして、その軌道から出た後も、その勢いによって円運動を行う、とする考え方、概念がある。もちろん、このような考え方はニュートンの力学により、否定されてい

る。ともあれ、このような間違っただけの考え方をここでは便宜的に「円慣性」と呼ぶ。このような慣性概念は中世の力学にも見られる (Grant, 1971)。

注2 運動している物体に付属して物体 (自動車の屋根の上の荷物など) も慣性を持つわけであり、運動している物体から切り離された場合は、その慣性に従って運動を続ける (急ブレーキをかけた場合、自動車の前方に落ちる)。ところが、この付属している物体は、運動の主体ではないわけであるから、運動の主体から切り離された場合、慣性運動を行わない (自動車から落ちた場合、重力の影響のみにより、直下に落ちる) とする理解が存在する。このような理解をここでは便宜的に「付慣性」と呼ぶ。

注3 多くの研究者が、物理学を高校や大学で学習した学生でも、誤った運動判断を行うものが多く見られることを指摘している (Clement, 1982 など)。ただし、物理学を学習した学生と学習していない学生の誤判断率の差については、筆者の知る限りではほとんど研究されていない。日常的認知の強固さ、学習による修正の困難さに研究者の関心が注がれており、他の要因、たとえば知能などの素因、学習など環境要因などとの関連についてはそれほど注目されていないことによるものであろう。

注4 中学校の理科の教科書は、物理学・化学などの領域に関わる1分野と生物学・地学などに関わる2分野に分かれている。教科書は、両分野共に中学校3年間で2冊用いるが、それらは「上・下」などと呼ばれ、中学校2年生の半ばをめどに、使う教科書が変わる。したがって、9月では1分野上、2分野上を使っていることが多く、翌年の1月には、1分野下、2分野下を使っていることが多い。等速直線運動を扱うのは、1分野下である。したがって、2005年調査の被験者は、等速直線運動について学んでいた可能性が高い。

注5 発達の過程において、認知的操作能力が発達することにより、逆に課題解決に失敗する現象が知られている (青木, 2002年, Kamiloff-Smith et al, 1975 など)。幼い子ども

が試行錯誤を繰り返すことにより正答にたどり着くことができる課題でも、認知操作能力が発達すると、それに頼った不完全で誤った理論的推測を行うようになり正答率が下がる。その後、認知操作能力が完成することにより完全な理論的推測が可能になると正答率が再び上昇する。以上のような過程により、正答率の発達曲線はU字型を描くことになる。

<参考文献>

- 青木多寿子 (2002). 「認知発達の心理学：U字型発達曲線の解釈に見る青年前期の認知特性」九州大学出版会
- Clement, J. (1982). Student's preconception in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71
- diSessa, A. A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 15-33). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Grant, E. (1971). *Physical Science in the Middle Ages*. John Wiley & Sons, Inc.
- 細谷純 (1977). 「大自然の知的探検における『きまり』の役割 その4 『誤ルール体系』の『ルール体系』への変換」『学図教材研究 小学校理科』58 pp 1-5 学校図書
- 稲垣佳世子 (1995). 「生物概念の獲得と変化—幼児の『素朴生物学』をめぐって」
- Kamiloff-Smith, A. & Inhelder, B. (1975). If you want to get ahead, get a theory. *Cognition*, 3, 195-212.
- Krisk, H., Fieberg, E.L., & Wilkening, F. (1993). Intuitive physics in action and judgement: The development of knowledge about projectile motion. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 19, 952-966
- McCloskey, M. (1983). Naive Theories of Motion. In D. Gentner & A.L. Stevens (Eds.), *Mental models*. Lawrence Erlbaum Associates. pp.299-324
- 西方毅 (2005). 「物体の運動理解に関する研究—慣性に関する誤概念(1)—」目白大学心理学研究, 第1号, pp49-59
- 西方毅 (2006). 「物体の運動理解に関する研究」

—慣性に関する誤概念(2)— 目白大学心理学研究, 第2号, pp49-59

Siegler, R. S. (1986). *Children's Thinking*. Prentice-Hall Inc. 無藤隆, 日笠摩子(訳) (1992). 「子どもの思考」誠信書房

Vosniado, S. (1994). Capturing and Modeling Conceptual change. *Learning and Instruction*, Vol.4. pp.45-69

A study on understanding of moving object.

Misconception about inertia (3)

Tsuyoshi Nishikata Mejiro University, Faculty of Humanities

Kim Jaewan Mejiro University, Institute for Area Studies

Mejiro journal of Psychology.2007 vol.3

Abstract

It is known that students who study physics in a high school or a university make misjudges on the physical phenomena. The reason why they make mistakes is that they have misconception on physical principles. On this research we study misconceptions about motions of a ball which is shot off from circular tube and an object which falls from an airplane.

11 years old children, 14 years old and 20 years old students are examined. The results show that judgment of the motion of a ball shot off from circular tube is based on just a knowledge acquired from their experiences not on the operational ability. Second, the ratio of the correct judgment on this research looks like to show general developmental phase of understanding on this physical domain. Third, the results suggest that there are differences between male and female on the understanding of physical phenomena.

Key words : intuitive theory, inertia, misconception