

幼児期における物理概念の発達： 知識の相互作用の観点から

鈴木宏昭

青山学院大学文学部

0 . 全体の構成

人間は、さまざまな情報源から知識を獲得する。知識の獲得は、自らの実際の体験に基づくこともあるし、親や教師からの指示、教示に基づくこともある。また知識の獲得は何も直接的であるだけでなく、本やテレビなどのメディア、他人の行動の観察などからも行われる。このようにして獲得された知識は、その後の経験や知識間の関係により、異なるタイプの知識となり、人間の認知において複雑な相互作用を行う。

従来の研究では、特定の知識のみが関与する状況を作り出し、想定した知識の存在の確認実験を行うことが多かった。これは、研究の出発点としては妥当なものであることは疑い得ない。しかし、ある程度まで知識の存在が確認できた領域では、知識間の相互作用に注目する必要がある。相互作用を無視した分析は、知識の生成について適切な分析が出来ない場合が多い。多くの研究では、 x 歳児になると y 課題が達成可能であることから、 y に関する知識 z が獲得された、という形で研究をまとめる。しかしながら、知識 z がいかにして生成されたのかは、こうした研究方法からは明らかにならない。さらに、問題なのは人間の文脈依存性である。多くの研究が示すところによれば、ある課題が達成できない子供（よってそのための知識を持ち合わせていないと判断される子供）であっても、適当な文脈さえ与えると、課題が達成できてしまうことが示されている。また、その逆もある。通常は、課題達成が可能なのに、ある本質的ではない変更を課題に加えると、その課題の達成に失敗してしまうこともある。

このような困難を克服するためには、知識の単位をより小さなものへと分解し、これらと課題の与える情報との相互作用として、子供のパフォーマンスを分析する必要があると思われる。

本研究では幼児期における物理概念の発達過程を、上に述べたような知識の相互作用の観点から解明するために、二つのテーマについての研究を行った。一つは温度概念の発達過程であり、もう一つは物理的全体 - 部分関係の認識の発達である。以下、1 節では温度概念の発達過程、2 節では物理的全体 - 部分関係の認識の発達についての研究の成果を報告する。

1 . 温度概念の発達

近年の認知発達研究は、子どもが生後1年までに物理現象を説明するためのかなり洗練された理論を持っていることを明らかにしてきた (Baillargeon, Kotovsky, & Needham, 1995; Spelke, 1991)。一方、多くの素朴物理研究は、大学教育を受けた成人であっても物理現象の理解は、正当な物理学理論とは全く異なっていることを指摘している (diSessa, 1993; McCloskey et al., 1983, 村山, 1989, 塩川他, 1987)。たとえば、物体の性質や基本的な運動については乳児でも理解できるのに対して、力のベクトルや力学的な意味での慣性や作用反作用については大人であっても正当な理解にはほど遠いレベルにある。

この一見不可解な現象の背後には、扱う物理現象の違いが存在する。乳児研究の扱う物理現象は一般に直接的に観察可能なものであるのに対し、成人を対象とした素朴物理研究では、力、慣性、運動の成分など直接的には観察できないものの働きを取り上げている。こうしたことから、乳児研究で取り上げなかった複雑な物理現象の理解がいかに達成されるのか (また達成されないのか) を研究し、人間の素朴物理理論の全貌を明らかにする必要があると思われる。

本研究では熱と温度に関する子どもの理解の発達を取り上げる。熱と温度及び燃焼はきわめて日常的な現象であるが、科学史上からも明らかのように、その解明には長い年月がかかり、原子論的物質観、熱力学第1, 2法則などを用いたシステム的理解が必要であった。したがって、こうした理解が一個人の個体発生の中で完全な形で再現されることはまれであることは容易に理解できる。だが、幼児期にあっても熱、温度、燃焼を理解するための何らかの枠組みは存在するはずである。幼児期における熱、温度、燃焼についての素朴理論の自発的生成メカニズムを特定することを本研究の最終目標とする。

本研究ではまず、幼児における温度の理解について実験を行う。熱と温度および燃焼に関する領域の実験では、熱の指標として温度が用いられることが多いが、そもそも幼児においては温度自体の理解がどのようになされているかが明らかではない。そこで、実験1では、就学前の子どもにおける温度の理解について予備的な調査を行う。特にここでは温度の内包量としての性質を子どもがどの程度理解しているかに焦点を当てる。

実験1

方法

被験者：都内の保育園の年少 (平均月齢 50 ヶ月)、年中 (平均月齢 62 ヶ月)、年長クラス (平均月齢 73 ヶ月) 各 10 名 (男女 5 名ずつ) が実験に参加した。

課題：3 つのタイプの課題を用意した。1 つめは冷たい液体と冷たい液体

を混ぜる CC タイプ、2 つめは熱い液体と冷たい液体を混ぜる HC タイプ、3 つめは熱い液体と熱い液体を混ぜる HH タイプである。各々のタイプについて、2 題ずつ課題を用意し、計 6 題の課題を実施した。

各課題は 3 つの場面からなる紙芝居の形式で実施された。各紙芝居には子どもに馴染み深い 3 人(または 3 匹)のキャラクタが用いられた。まず 2 人のキャラクタが熱い、あるいは冷たい飲物を準備しているところ(第 1 場面)に、第 3 のキャラクタが登場し、その飲物を分けてほしいと依頼する(第 2 場面)が続き、第 3 場面でそれが実行されるというものである。紙芝居の後に、混ぜた液体と他の液体の温度とを比較をさせた。ただし、HH および CC 課題では元の 2 つの液体の温度が同じであるとしているため、質問は 1 回であったのに対して、HC 課題では元の 2 つの液体との温度の比較を各々行うため、1 課題につき 2 つの質問を受けた。

結果と考察

得点化と修正：素得点での正解率は CC 課題が 38%、HC 課題が 55%、HH 課題が 37% となっており、就学前児は温度の内包性について正しく理解していないという結果が得られた。しかしながら、誤答の中には、ある温度のものを別容器に移すとその温度はいくぶん室温に近づくという熱伝導を考慮したための回答が含まれている可能性があったため、熱伝導を考慮し、得点化をしないとした。その結果、全体の正答率は 70% を越えるという驚くべき結果が得られた。課題による差、年齢差が全く見られず、4 歳以降はほぼ大人と同じ理解に至っていることが示唆された。

非加法性の理解：熱い液体同士の混合により液体はより熱くなる、また冷たい液体同士の混合により液体はより冷たくなるという加法的反応は就学前児においてすらほとんどみられなかった(どの年齢でも 20% 以下)。

だが、この実験で用いた得点化には 1 つの問題がある。この実験では、等温の熱い液体の混合において「より冷たくなる」、等温の冷たい液体の混合において「より熱くなる」も正答と見なしている。これは、熱伝導を考慮したための得点化であったが、上記の子どもの反応がこのような推論の結果生じたものであるという保証はない。

そこで実験 2 では、変化の程度を尋ねることにより、この問題点を回避し、より正確に子どもの温度の理解を把握することを試みる。具体的には、上記のような反応が生じた場合、どの程度熱く(あるいは冷たく)なるのかを尋ね、その度合いが少ない場合のみを正答とする。また、別容器に入れることによる温度変化を子どもが実際に理解しているかどうかを、混合とは別文脈で確かめることとした。さらに、被験児の年齢層を広げることによって、より広く発達的变化を把握することを試みる。

実験 2

方法

被験児：都内幼稚園児年少児 9 名（平均月齢 51 ヶ月）、年中児 13 名（平均月齢 60 ヶ月）、年長児 14 名（平均月齢 76 ヶ月）及び、都内学童保育クラブ児童 1 年生 11 名、2 年生 10 名、3 年生 10 名の計 67 名が被験児として実験に参加した。

課題：課題は混合課題を 6 題、及び確認のための付加課題 2 題からなっていた。混合課題は実験 1 と同様のものである。紙芝居後の質問も実験 1 と同様であるが、CC 課題において第三の液体がもとの液体よりも熱い（暖かい、あるいはぬるい）、HH 課題において第三の液体が冷たい（ぬるい）という回答がなされた場合は、その程度をたずねる質問を行った。

付加課題は、第三の容器に液体を移すことにより、温度が変化することを子どもが認識しているかを確認するために行われた。これらの課題では、単に熱いお湯、あるいは冷たい水をコップに移すと温度がどのように変化するかを尋ねた。

結果と考察

非加法性の理解：CC 課題で加法的反応が一貫して見られたのは、就学前児で 8.3%、就学児童で 3.2%（1 名のみ）であり、HH 課題では、前者は 8.3%、後者は 12.9%であった。

熱伝導の理解：CC、HH 課題における就学前児の正答率は著しく上昇する。熱伝導を考慮した修正を加えた得点化を行うと、修正得点は修正前の素得点に比べ、1.5 倍程度に上昇する。また、付加課題において、就学前児の 80%、容器の変更による温度の変化を正しく予測できている子どもが少なからず存在することがわかる。ただし、就学児童では変化なしとする割合が高くなる。

発達的变化：温度の内包性の理解には発達的变化が見られる。熱伝導を考慮した得点化によると、就学前児の正答率は 60%程度であるのに対して、就学児童は 80%以上になる。また、各課題タイプにおける完全正解者も就学前では 40%程度であるが、就学後は平均で 75%程度となる。この 2 つの間の移行は年長児と 1 年生の間に存在するようである。

課題差：等温液体の混合（CC 課題、HH 課題）は異なる温度の液体の混合（HC 課題）よりも正答率が低くなる。異なる温度の液体の混合での正解率は就学前児の場合はどの年齢でも 60%程度、就学児童の場合は 90%程度の正答率である。一方、等温液体の混合問題では、熱伝導を考慮しない得点化によると、年少、年中児では正答する者がほとんどなく、2、3 年生でも 50%程度の正答率である。

討論

本実験は、混合における温度の変化の理解が発達に伴ってどのように変化するのかを明らかにすることを目的として、就学前児および小学生を対象に行われた。

その結果明らかになったのは、次の4点に集約される。第一に非加法性の理解である。どの年齢の子どもであっても、等温の液体を混ぜるとより冷たく（熱く）なるという加法的反応の比率はさして高いものではなく、幼児であっても温度を外延量とみなしているという証拠はないことがわかった。

第二には、熱伝導の理解である。就学前児であっても、液体を別容器に移すことによる温度変化の方向を正しく予測することができることがわかった。ただし、変化の程度についての正確な推定を行うことは難しい。興味深い点は、就学児童の場合は変化なしとする比率が高まることである。

第三は、温度の内包性の理解には発達的变化が見られることである。熱伝導を考慮した得点化によると、就学前児の正答率は60%程度であるのに対して、就学児童は90%程度になる。また、各課題タイプにおける完全正解者も就学前では40%程度であるが、就学後は平均で75%程度となる。この2つの間の移行は年長児と1年生の間に存在することも明らかにされた。

第四は、課題差の存在である。等温液体の混合は異なる温度の液体の混合よりも正答率が低くなる。異なる温度の液体の混合での正解率は就学前児の場合はどの年齢でも60%程度、就学児童の場合は90%程度の正答率であるが、等温液体の混合問題では、熱伝導を考慮しない得点化によると、年少、年中児では正答する者がほとんどなく、2、3年生でも50%程度の正答率である。

これらの結果は先行研究のそれとは著しい対比をなす。先行研究では、液体の混合による温度変化の理解は、10歳を過ぎてからとされており、12歳になっても完全にはならないとしている研究もある (Stavy & Berkowitz, 1980)。一方、本研究では4歳程度においても一定の理解がなされていることが示された。

温度の理解の発達における相互作用

上述の結果を合理的に説明するための要因として、次のようなものが考えられる。ひとつは領域固有の知識であり、もうひとつは領域に依存しない一般的な因果的知識の一つである変化 - 変化バイアスである。

領域固有の知識：これについては二つの知識源が考えられる。一つは、日常生活における熱や温度の経験から半ば自発的に獲得されたものであり、もう一つは日常生活における数の経験および学校における算数から獲得された知識である。子どもは日常生活の中でさまざまな形で温度についての経験を重ねている。経験から獲得したこのような知識が、子どもの温度評定に関与している可能性は高い。たとえば、熱伝導についての知識は明らかに経験から獲得されたものであろう。また、この知識の存在は課題差の主要な原因となっていると考えられる。一般に異なる温度の液体の混合はよく日常的に経験しうるが、厳密に等温である液体の混合を経験することは少ない。こうしたことが課題によるパフォーマンスの差を生み出してい

ると考えられる。

もう一つの算数から得られた知識、特に加法に関する知識はある種の子どもたちのパフォーマンスを特徴づける。たとえば、誤答の中に占める加法的エラーの割合は、年齢が上昇するに従って増加することはこの知識の働きがある場面で強くなることに関係すると思われる。

変化 - 変化バイアス：等温の液体の混合において、熱伝導を考慮しない得点化の場合、年少、年中児の正答率はほぼ0に近い。これを経験による差で説明するには無理がある。

ここでは、変化 - 変化バイアスと呼べるような抽象的な知識が関与している可能性がある。このバイアスは「ある変化が生じれば、別の部分にも変化が生じる」という因果的理解を支えていると考えられる。このバイアスが働くことにより、「混合によって何らかの変化が生じる」という予測が導かれる。ここでこの予測と協調的に働くのが、前述の熱伝導についての知識である。この二つの相互作用に基づいて変化の方向が確定されることになると考えられる。

このように、発達はこの領域や経験に固有な知識と一般的なバイアスである変化 - 変化バイアスの二つの知識間の相互作用によって説明できる可能性がある。一般的に、経験が少なく、領域知識が用いられない場合には、変化 - 変化バイアスが強く働き、変化の方向を特定するための探索が行われる。一方、領域知識を用いやすい場合には、変化 - 変化バイアスの働きは弱く、経験からの推論によった推定が行われると考えられる。これらの相互作用をモデルとして完成させることが今後の課題である。

2 . 物理的全体 - 部分関係の認識の発達

認知発達研究における主流の理論の多くは知識の獲得に焦点をあて、その知識が徐々に複雑化するという図式を採用してきた。つまり、初期には単純な知識しか持たない子供が徐々に複雑な知識を獲得していくというものである。

しかしながら、こうしたアプローチは文脈固有性の問題に対してうまく対処することが出来ない。文脈固有性についての研究は、標準的な課題状況では失敗してしまう子どもが、それを少し変えた課題状況においては適切な形で処理を行うことが出来ることを明らかにしてきた(Siegal, 1991)。このことは子どもが課題を処理するための複雑な知識をまったく持ち合わせていないわけではないことを示している。子どもは何らかの形で複雑な課題を処理するための知識を獲得しているが、それを標準的な課題状況では適用することが出来ないという可能性が存在する。

この限界について、Karmiloff-Smithは興味深いデータを提供している。

彼女の一連の実験では、存在しない事物(家ではない家、人ではない人)を子供に描かせ、その特性が分析された。その結果、年少の子供はある構成要素を削除する、あるいは余分に付け加えるなどの変更を行う一方、年長の子供は構成要素の接続関係を大きく変化させることが明らかになった(Karmiloff-Smith, 1992)。この結果は、子供の発達過程において物理的対象の部分 - 全体関係の把握に変化が見られることを示唆している。年少児では部分同士が分かちがたい形で結びつき、可塑性に欠ける全体を構成しているのに対して、年長になると部分が相互にある程度まで独立した実体として存在し、それらがある種の機能的、空間的關係によって全体に統合されている可能性がある。

全体の認識が先にあり、そこから部分への分化、および部分と全体との有機的統合が生じるという仮説は、上記の主流の理論では捉えきれない、新たな視点を発達に導入する可能性がある。

本研究では、就学前の子供にレゴブロックで作られた簡単なモデル図形を提示し、それを構成させ、その際のストラテジーを分析することにより、上記の可能性を検討するための考察を行う。

方法

被験者： 都内幼稚園の年少児 11 名(男:9、女:2)、年中児 10 名(男:5、女:5)、年長児 14 名(男:8、女:6)が実験に参加した。

課題： 5 または 7 個のレゴブロックからなるモデル 4 種類を用いた。モデル 5a, 7a, 7b は胴体部分と 2 つの対称な羽部分からなる飛行機、あるいは鳥のような形状をしたものであった。モデル 5b は、胴体部分、頭部、尾部からなる直線状のものであった。

手続き： 上記の 4 つのモデルを、5a、7a、7b、5b の順序で提示し、それらと同じものを作るように指示した。なお、被験者の半数にはモデルにラベルを与えたが、今回はその分析を行わない¹。実験は被験児が完成したと告げるか、あきらめるまで行った。構成の過程はビデオテープに録画され、これをもとに分析を行った。

結果

年齢差・性差

まず被験児の作成した図形を次の基準で得点化した。これは、

0 点：作成図形がモデルとはまったく異なっている(用いるブロックの個数自体も異なっているケースが多い)。

1 点：接合部がややずれているものの、作成図形がモデルとほぼ同じ形をしている。

¹ ラベル群では、モデル 1 は小さい飛行機、モデル 2 は鳥、モデル 3 は大きい飛行機、モデル 4 はヘビと名づけた。ラベルの有無についての検定は両群間に差がないことを示した。

2点：作成図形がモデルと同じ、
というものであった。

この結果、年少児と年中、年長児の間にはっきりとした差が見られた。また、データを見ると男児は女児に比べてかなり成績が高いことがわかった。そこで、年齢と性を独立変数とする分散分析を行ったところ、モデルが7の場合には、年齢差、性差、およびその交互作用が5%水準で有意であった（各々、 $F(2,29)=5.34$ 、 $F(1,29)=5.52$ 、 $F(2,29)=5.54$ ）。男児の場合には3歳児とそれ以降の子どものパフォーマンスの間に大きな差が見られるのに対して、女児の場合は、5歳児とそれ以前の間には大きな差が見られるのである。これは一般的に空間的な理解を伴う課題において報告されている性差に関係するものと思われる。

ストラテジーの分析

本研究で用いたモデルは、いずれも頭部、胴体部、羽根部の3つのパーツからなっている。したがって構成のストラテジーは大きく2つに分けられる。1つは、部分をまず作り、それを最後に統合するというものであり、これを部分 - 統合ストラテジーと呼ぶ。一方、隣接するパーツを次々と連鎖的に接続していく構成ストラテジーも存在し、これは連鎖ストラテジーと呼ぶ。また構成したものがモデルとあまりにかけ離れているため、いずれとも判別できないものもあり、これをその他とした。

一般に連鎖型ストラテジーはモデル図形とのマッチングをベースにしたものである。したがって事前のプランニングがほとんど必要ないとともに、モデルをよく見て作る限り作業記憶に負荷をかけない効率的にストラテジーである。一方、部分 - 統合ストラテジーはプランニングを必要とし、構成の時点で自分がどの部分を作成しているのか、どこまで出来ているのかを把握しておかねばならない。この意味でこのストラテジーは効率はよくない。しかし、このストラテジーの使用は、部分の有機的統合として全体を捉える指標となる。むしろ、連鎖ストラテジーの使用がもつぱらこのような認識の欠如を意味するものではない。

年齢とストラテジーの利用については、明確な関係を見ることが出来なかった。これは前述したように同一年齢群であっても男児と女児の間にはっきりとした差が存在するためである。そこで、2つのストラテジーの利用と全体的なパフォーマンスの関係を明らかにするために、被験者を0から2点までの低得点群($n=9$)、3 - 5点までの中得点群($n=6$)、6 - 8点の高得点群($n=20$)の3つに分類し、各々の群での各ストラテジーの利用率を調べた。その結果、連鎖ストラテジーは得点が高くなるにつれて、その使用率が高くなる一方、統合ストラテジーにはそのような傾向は見られず、逆U字型の曲線が見られることがわかった。低得点の群では連鎖ストラテジーの数も少ないが、その他の占める割合が高く、部分 - 統合ストラテジーも30%台の使用にとどまっている。一方、中程度の得点の子どもではその他が消失し、連鎖、部分 - 統合の両方が増えているが、後者の伸び率が前者を

上回る結果となっている。高得点の群では、部分 - 統合ストラテジーの利用が低得点群とほぼ同様なレベルまで減少する一方で、連鎖ストラテジーが増加し全体の 60%程度がこのストラテジーの利用者となっている。

全体的討論

本研究では、子供が物理的な全体 - 部分関係をどのように捉えているのか、そして発達的な変化が見られるのかを、ブロックを用いた構成課題のパフォーマンスの変化を通して検討した。その結果、利用するストラテジーとパフォーマンスとの間に興味深い関係が見られた。各パーツを構成してから、それらを最終的に統合する部分 - 統合ストラテジーの利用は、低得点と高得点では比較的少なく、中得点者において多く見られる。一方、隣接するブロックを次々と接続していく連鎖ストラテジーはパフォーマンスと単調に関係し、その使用頻度が高くなればなるほど得点も高くなることが明らかになった。

これらの結果、特に部分 - 統合ストラテジーの利用の変化については慎重に解釈する必要がある。低得点から中得点にかけて部分 - 統合ストラテジーの利用が増加することは、この両群の間に全体 - 部分関係についての質的な差があることを示している。高得点児で連鎖ストラテジーが dominant になることは、部分 - 統合ストラテジーが消失したことを意味するわけではなく、課題の特殊性にあわせてストラテジーを選択した結果と解釈すべきであろう。

固定した全体から部分への有機的な統合への発達は、領域固有性や柔軟な知識の獲得の問題に対して直接的な重要性を持つ。前述した Karmiloff-Smith のみならず、類似研究 (Smith, 1989)、スクリプト研究などは発達の過程について、本研究と同様の結果を導き出している。今後、これらの知見を組み合わせ、発達の新たな側面の探求が行われるべきであろう。

参考文献

- Baillargeon, R., Kotovsky, L., Needham, A. (1995) The acquisition of physical knowledge in infancy. In D. Sperber, D. Premack, & A. J. Premack (Eds.) *Causal Cognition: A Multidisciplinary Debate*. Oxford University Press.
- diSessa, A. A. (1993) Towards an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10, 105 - 225.
- Karmiloff-Smith, A. (1992) *Beyond Modularity: A Developmental Perspective on Cognitive Science*. Cambridge, MA: MIT.
- McCloskey, M., Washburn, A. & Flech, L. (1982) Intuitive physics: The straight-down beliefs. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 9, 636 - 649.
- 村山功 (1989) 自然科学の理解. 鈴木宏昭他「教科理解の認知心理学」

新曜社

- Siegel, M. (1991) *Knowing Children: Experiments in Conversation and Cognition*. Hillsdale, NJ: LEA.
- 塩川英男・鈴木宏昭・村山功 (1987) 「日常的経験が豊かな領域における形式的ルールの学習: 静力学のルールの学習」*発達研究* 3巻 pp.187 - 204
- Smith, L. B. (1989) From global similarities to kinds of similarities. In S. Vosniadou and A. Ortony (Eds.) *Similarity and Analogical Reasoning*. LEA
- Spelke, E. S. (1991) Physical knowledge in infancy. In S. Carey and R. Gelman (Eds.) *Epigenesis of Mind: Essays on Biology and Knowledge*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.**
- Stavy, R. & Berkowitz, B. (1980) Cognitive Conflicts as a basis for teaching quantitative aspects of the concept of temperature. *Science Education*, **64**, 679 - 692.
- 鈴木宏昭 (1999) 幼児における温度の内包性の理解. 文部省科学研究費補助金重点領域研究 115 「心の発達: 認知的成長の機構」平成 10 年度研究成果報告書 (代表: 桐谷滋), 7 - 13.
- 鈴木宏昭 (2000) 温度の内包の理解の発達の变化. 文部省科学研究費補助金重点領域研究 115 「心の発達: 認知的成長の機構」平成 11 年度研究成果報告書 (代表: 桐谷滋), 5 - 12.
- 鈴木宏昭 (2000) 温度の評定における推論モードの発達の变化. 教育心理学会大会発表論文集