

# 密度概念の発達に関する研究

## — 動向と課題 —

永瀬美帆

(2002年9月30日受理)

How understanding of density develops: The trend and prospects of study

Miho Nagase

Formal education is expected to develop children's understanding of the interrelationship between intensive and extensive quantities. Thus, studies were conducted to examine not only children's understanding of density but also the interrelationship of these quantities.

These studies have shown that children's understanding of the interrelationship of these quantities differ from formal conceptions. More specifically, the problem lies on the qualitative rather than the quantitative understanding—that is, inability to differentiating density from weight, qualitative understanding interrelationships, and equal distribution. Because these misconceptions are strong and deeply-rooted, improving children's understanding is difficult. There is, therefore, a need to develop learning strategies that can effectively promote qualitative understanding and apply these in the classrooms.

Key words: Density, Crowdedness, Relational concepts, Intensive quantity, Development

キーワード：密度，混みぐあい，関係概念，内包量，発達

## I. 本論文の意義

### 1. 密度概念研究の必要性

わが国における密度概念研究は、主に教育現場における教授・学習上の困難さの改善を目的として始まった。密度概念は、理科教育、算数教育で内包量概念のひとつとして扱われており、その教授・学習が困難であることは、従来よく知られている。松田・田中・原・松田(1995)も、学校教育ではじめて内包量の学習が登場する、小学校算数「単位量あたり」の単元を、多くの教師が、最も指導しにくい単元であると考えていることを報告している。さらに、これらの教師達は、

---

本論文は、博士課程候補論文を構成する論文の一部として、以下の審査委員により審査を受けた。

審査委員：石井眞治(主任指導教官)、井上 弥、前田 健一、森 敏昭

また、学習開発学講座植田敦三助教授より多くのご指導を賜りました。ここに謝意を表します。

この単元を十分理解できる児童は、4～5割程度だと思っていると述べている。

このような実状を反映して、教科指導に関する書物に密度の学習が取り上げられることも多く(加藤, 1982; 和田, 1994等), 密度の学習に関する心理学的立場からの実践的研究もいくつか行われてきた(荒井, 1994; 麻柄, 1995; 佐藤, 1991等)。これらの研究が、子どもたちの密度概念理解の実態の把握に資するところは大きい。しかし、密度概念の教授・学習上の困難さの改善という意味では、一定の成果はあげているものの、決定的な方法の提言には至らなかった。例えば、液体の密度概念の形成のための教授ストラテジーの効果を検討した佐藤(1991)は、反省点として、密度と浮き沈みの対応が各種液体に十分汎化しなかった点を挙げている。さらに、密度の違いをうまく言語化できず「重い-軽い」という言葉で表現するものがいたことも報告している。この佐藤(1991)の結果を踏まえ、さらに改良を加えた教授ストラテジーの効果を検討した荒井(1994)は、密度の変化に関して加算的な反応

が最後まで残ってしまったことを反省点として挙げている。また、人口密度の理解を扱った麻柄 (1995) は、麻柄 (1992) の研究結果をもとに教授上の問題点を改善するような授業を試みたにもかかわらず、従来どおりの教授を受けた児童の理解とほとんど変わらない結果であったことを報告している。

このように、実践的研究からは、学習上の困難さの原因を示唆するある程度の知見は得られたが、根本的な解決には至っていない。様々な指導上の工夫にもかかわらず、依然として密度の学習が困難である背景には、教育現場で用いられているカリキュラムが子どもたちの密度概念の発達に則しておらず、当該概念の学習以前に十分なレディネスが形成されていない可能性が考えられる。もし、レディネスが形成されていないのであれば、その形成を行わなければならない。しかし、密度概念の学習のためのレディネスとは何であろうか。これを知るためには、密度概念の形成過程や理解の様相を知る必要がある。そこで、まず、本論文では密度概念に関する心理学的立場からの内外の研究の動向を概観し、現時点までに明らかになっている点、および不十分な点を明確にする。

## 2. 先行研究における密度概念

密度の概念は、主に内包量理解に関する研究の下位領域として扱われてきた。また、科学的知識の獲得に関する研究において、物理概念のひとつとしても扱われてきた。しかし、同じ内包量であっても、速度と密度での差異<sup>1)</sup>も報告されており、単なる理論研究にとどまらず、より直接的支援をめざすのであれば、密度概念特有の理解の様相およびその発達過程と、それに基づく固有の困難さについても明らかにし、それに適した介入を行う必要がある。したがって、本論文では、様々な理論的立場から、異なる視座で研究されてきた内包量や比の概念、化学的知識の獲得に関するこれまでの研究を、密度概念という点に注目して概観することを試みる。

また、これまでの研究では、密度を明確に定義することがなかったため、密度概念に関する研究といっても、物質の密度、液体の密度、人口密度等様々な密度が同じ密度の名のもとに研究対象とされてきた。したがって、本論文では、まず、密度の定義づけを行い、その分類に基づいてこれまでの研究の動向を概観していくものとする。

## 3. 本論文における密度の定義

密度は、「内包量」すなわち、単純に加算することのできない、質的な強さをあらわす量のひとつである。

和田 (1994) によれば、内包量は、空間・時間・分布・位差という型の組み合わせによって4つに分類できる。このうち密度は、空間・分布型にあたり、他に、時間・分布型の流量、空間・位差型の勾配、時間・位差型の速度がある。密度はさらに、ある外延量が他の外延量の上に一様に分布している「分布密度」と、ある外延量が他の外延量に含まれている「含有密度」の2つに分類される。このうち、中学1年理科1分野で学習される物質の密度や、小学6年(旧指導要領では5年)「単位量あたり」の単元で学習される人口密度は、ともに分布密度にあたる。このうち、理科教育で扱われる物質の密度(density)は、「連続量/連続量」という内包量の基本的な形態をとる。これに対し、人口密度に代表されるような、算数教育で扱われる密度は、「分離量/分離量、あるいは分離量/連続量」という形態をとる。本論文では、これらの形態をとる密度を、いわゆる密度(density)と区別するため「crowdedness」と表すものとする<sup>2)</sup>。

その上で、本論文では、分布密度を扱った研究を中心に、densityタイプの密度を扱った研究と、crowdednessタイプの密度を扱った研究の大きく2つにわけて概観を行う。

## II. 研究の動向

### 1. densityタイプの密度

密度に関する概念をはじめて扱ったのは、Piagetとその共同研究者(Inhelder & Piaget, 1955/1958; Piaget, 1970/1972; Piaget & Inhelder, 1941/1974)である。他の量概念同様、論理操作構造の発達の中に位置づけている。そして、密度一般を、重さや空間的大きさとのあいだの二次的関係として捉え、二次的操作、あるいは関係相互の関係の構成や二つの基準系の共応が可能になる、形式的操作の段階(11, 12歳頃〜)において獲得されるとした(Inhelder & Piaget, 1955/1958; Piaget, 1970/1972)。

Piaget & Inhelder (1941/1974) では、物質質量・重さ・体積の各保存の成立と、粒子観(アトミズム)の発生を調べるなかで、densityタイプの密度を取り上げ、2つ以上の物体の密度の違いを説明させる実験を行っている。具体的には、材質の違いが一見しただけでわかる、形も大きさも異なる物体(毛糸・コルク・小石)の重さの比較と、材質の違いが一見しただけでは不明な、形も大きさも同じ物体(2つの小石、2つの貨幣)の重さの比較を行わせている。その結果、4つの段階が導かれた。第1段階は、物質質量、重さ、体積のすべてが概念的に未分化で、物体の重さの違いを、

大きさやかさばりぐあいによって説明しようとする段階である。第2段階は、物質の概念のみが、重さや体積の概念から分化した状態にあり、物体の重さの違いを、材質の違いやアニミズムによって説明しようとする段階である。ここまでの段階では、いかなる密度概念も、粒子観も持っていないとされている。しかし、第3段階になると、重さの概念を確立し、重さの恒常性を認識することにより、粒子観の萌芽が見られる。これにより、物体の重さの違いを、中につままっているかつまっていないかという物質の充満度 (fullness) によって説明しようとする。第4段階は、分化した物質、重さ、体積の概念を系統的に関係づけられるようになり、それによって確立された、圧縮と減圧のシエマ (密度) によって物体の重さの違いを説明しようとする段階である。すなわち、密度概念獲得の段階である。このことから、密度概念の出現には圧縮と減圧のシエマという粒子観 (アトミズム) が関与することが明らかになった。これに基づき、Strauss, Globerson & Mintz (1983) は、原子論的スキーマ (atomistic schema) を用いたトレーニングの効果を検証し、天才児・普通児ともに効果が見られたことを報告している。

しかし、Piaget & Inhelder (1941/1974) の研究で実際に行わせているのは「重さ」の違いの説明であり、「重さ」と「密度」が言語的に曖昧なものとなっている。これに対し、Smith, Carey & Wisner (1985) は、3歳から9歳までの子ども達を対象に、非言語的課題と言語的課題の両方を用いて、大きさ・重さ・密度の概念的分化に関する事例研究を行った。Piaget & Inhelder (1941/1974) が、何の密度概念も持っていない段階の幼い子供たちは未分化な大きさ-重さ概念を用いていると主張したのに対し、Smith et al. (1985) は、3, 4歳の子どもに、感じの重さ (felt weight) 概念の使用が見られることを示した。そして、5~7歳頃になると、それは「重み (heavy)」と「大きさに対する重み (heavy for size)」という2つの成分からなる未分化な重さ-密度概念になること、さらに、それは発達とともに次第に分化して、8~9歳頃になると、何人かは分化した密度概念と、分化し再構成された重さ概念の2つを用いることができるようになることを明らかにした。そして、9歳頃までの子どもには、単位体積あたりというような考え方がまだないため、「単位あたりの重さ (weight per unit)」として密度を概念化することはできないが、代わりに「大きさに対する重さ (heaviness for size)」として概念化を行っていることを主張した。すなわち、概念化の方法が異なるものの、形式的操作の段階以前においても、子供たちは、理論的構造をもった密度概念を持っていることが

明らかとなった。その後、Smith, Snir & Grosslight (1992) は、6年生と7年生 (小6と中1) における重さと密度の概念的分化についても調べている。その結果、この年齢段階においても、大半の生徒に、未分化な重さ-密度概念の使用が見られることが明らかとなった。このことから、未分化な重さ-密度概念の使用は、形式的操作の段階にも及んでいる可能性が示唆されたといえる。また、この概念的未分化は、重さと密度のあいだに特有の現象であることも、Mullet & Gervais (1990) により示されている。

Mullet & Gervais (1990) は、6年生と9年生 (小6と中3) を対象に、質量 (mass) と重さ (weight) の概念の間の区別について調べた。その結果、質量 (mass) は、物質の量 (quantity of matter) という用語に置き換えられており、重さ (weight) とは異なるものとして認識されていることが明らかとなった。直感的には、密度同様、重さと混同しやすいと考えられる質量 (mass) には、重さとの概念的未分化は見られなかったのである。

これらの研究により、重さと密度の概念的未分化が、形式的操作の段階をも含む広範な年齢段階においてみられること、およびこの未分化な概念が、理論的な構造をもっていることが示された。したがって、概念的分化を促すためには、概念変化を促す教授の介入の必要性があることが示された。

Hewson & Hewson (1983) は、13歳から20歳までを含む中学3年生 (平均16歳) を対象として、科学的概念の学習における概念変化方略の効果を検討している。その結果、密度の概念のみ、プレテストとポストテストで代替概念に変化がみられなかったと報告した。この結果について、Hewson & Hewson (1983) は、密度の概念が、この年齢段階では教えるのが困難な概念であったためであると考察している。しかし、これは同時に、密度の代替概念が、質量や体積の代替概念よりも強固であり、学校教育の影響を受けにくいことを示しているといえる。これは、Hewson (1986) や Smith, Maclin, Grosslight & Davis (1997) の結果からも裏づけられる。Hewson (1986) は、14歳から22歳 (平均18歳) までを含む高校生を対象に、密度に関する科学的知識の獲得を調べている。その結果、日常経験により形成された代替概念 (alternative conceptions) が、学校教育における正規の概念学習を妨げていることを示した。また、Smith et al. (1997) は、8年生 (中2) を対象に、学校教育前に生徒が持っている物質・質量・体積・密度についての質的な概念理解を調べた。その結果、物質と密度の質的な概念が、物質 (matter) に関する共通感覚的理論

(commonsense theories) として組織化されており、それが密度の理解を妨げていることを明らかにした。

これらの研究により、学校教育以前に子どもたちが持っている素朴な密度概念が、正規の密度概念とは異なることが明らかとなった。そしてそれが強固であるために、学習が妨げられていることが示された。しかし、これらの研究からはまだ、適切な介入法が十分に呈示されたとはいえない。

この一因は、学校教育で求められている密度概念理解と、研究で扱われている密度概念理解にギャップがあるためだと考えられる。本来、学校教育で求められている密度概念理解は、密度とそれを導く2つの外延量との関係の把握までを含む理解である。すなわち、内包量の指導の際の型分けの3用法<sup>3)</sup>のいずれの課題をも正しく解決できるようになることである(佐藤, 1991)。従って、効果的な介入のためには、まず密度とそれを導く2つの外延量との関係についての児童・生徒の理解の様相を知る必要がある。しかし、多くの研究が、密度を求めるのには直接関係ない外延量と密度との関係や、密度を導く外延量のうちいずれか1つと密度の関係の理解を明らかにしたにとどまっている。

これに対し、情報統合理論の立場では、密度とそれを導く2つの外延量との関係概念を扱い、主に定量的理解の側面について明らかにしている。関係概念の理解を扱う際、従来の中心化の考え方に従うなら、幼い子どもたちは、1つの顕著な次元にのみ基づいて判断を行うのであり、幼い子どもたちは、関係についての理解を全く有していない段階にあることになる。情報統合理論の立場では、この中心化の考え方に反論し、幼い子どもでも2つ以上の次元の情報を統合した判断が可能であると主張している。

Mullet & Vidal (1986) は、11~15歳までを含む8年生(中2)を対象として、質量・体積・密度の関係の直感的理解(intuitive understanding)の発達過程を調べた。その結果、同じ密度・質量・体積の関係でも、関係の仕方によって理解度に差があることを明らかにした。具体的には、最も易しいのが、質量について判断を行う  $\text{Mass} = \text{volume} \times \text{density}$  タイプ、次いで、密度について判断を行う  $\text{Density} = \text{mass} / \text{volume}$  タイプ、そして最も難しいのは、体積について判断を行う  $\text{Volume} = \text{mass} / \text{density}$  タイプの理解であった。Mullet & Vidal (1986) は、このタイプ差を、日常経験の豊富さの違いであると説明している。また、いずれのタイプについても、正しい乗法ルールを用いて3つの次元を統合することは非常に難しく、生徒の多くが、加算ルールや減算ルールを用いていた。

その後、Leoni & Mullet (1993) は、Mullet & Vidal

(1986) と同様の方法を用いて、保育園児から大学生までの発達過程を明らかにした。その結果、密度や体積について判断を行うタイプについては、一貫して優勢なルールはあまり見られないことが明らかとなった。一方、質量について判断を行うタイプは、小2頃から加算ルール ( $\text{Mass} = \text{volume} + \text{density}$ ) が見られるようになり、小4以降はこの加算ルールが主流になることがわかった。そして、中3(9年生)頃から正しい乗法ルールの使用が見られるようになることから、一概に結論づけることはできないとしながらも、この年齢がターニングポイントであろうと指摘している。また、この9年生の理解と差が見られたのは、大学生のうち科学専攻の学生のみであったことも報告されている。さらに、質量の判断のために密度を用いることは、保育園児でも可能なのに対し、密度の判断に質量を用いることは、6年生頃にならなければできないといった発達差が生じていることも、この研究により明らかとなった。

さらに、概念的未分化を扱った Smith et al. (1992) の、密度概念理解の困難さは質的レベルにあるという指摘同様、関係概念理解においても、その困難さは質的側面の理解にあることが、Chartier, Mullet & Grandjean (1991) の結果から示唆されている。Chartier et al. (1991) は、職業学校の学業不振児(15歳)を対象に、関係概念理解について調べ、コンピューター補助学習の効果を検証した。その結果、算出問題においてはコンピューター補助学習の効果がみられること、および、算出問題よりも関係をたずねる問題のほうが困難であることを明らかにした。そして、比例的関係については特別授業の前でも理解していたが、反比例的関係については授業後でも理解が困難であったと報告している。このような、算出はできても質的理解はなされていないという子どもたちの実態は、同じ内包量概念のひとつである速さの理解を扱った布施川・麻柄(1989)における、公式を適用して答えを算出することは可能だが、内包量の基本的性質は理解されていないという指摘にもうかがえる。

したがって、教授の介入は、まず、質的理解の側面に焦点を当てて行われることが効果的であると考えられる。しかし、情報統合理論の立場からの関係概念研究は、主に定量的理解の側面を扱っており、関係の質的理解(定性的理解)の側面についてはまだ不十分である。関係概念の定性的理解<sup>4)</sup>の様相とその発達については、次の crowdedness タイプの密度に関する研究において主に扱われている。

## 2. crowdedness タイプの密度

crowdedness タイプの密度は、数概念の研究にお

いて、Piaget & Szeminska (1941/1962) 以来、数量の比較判断や数の保存に影響を与える知覚的要因として注目されてきた (Baron, Lawson & Siegel, 1975; Cuneo, 1982; Kingma & Roelings, 1982; Lawson, Baron & Siegel, 1974; McLaughlin, 1981; Siegel, 1974; Smither, Smiley, & Rees, 1974; Ward, 1980 等)。しかし、概念研究の対象として扱ったものは非常に少なく、数と長さによって決まる密度を扱った、松田・永瀬・小嶋・三宅・谷村・森田 (2000) や、松田・小嶋・森田・谷村・三宅 (2001)、永瀬 (2000, 2002) にとどまる。これらの研究には、3つの大きな特徴がある。第1に、crowdedness タイプの密度概念理解を扱っているという点、第2に、密度とそれを導く2つの外延量との関係概念を扱っているという点、そして第3に、定性的理解の側面に焦点を当てているという点である。

松田他 (2000) は、同じ内包量である速さ概念を扱った研究 (Matsuda, 1994; 松田・田中・原・松田, 1995等) で用いたパラダイム<sup>5)</sup>を適用し、3つの二者関係 (長さと密度、密度と数、数と長さ)、および1つの三者関係 (密度=数/長さ、長さ=数/密度、数=長さ×密度の3つのタイプがある) の理解について、幼稚園児から小学5年生までの発達過程を調べている。その結果、比例的二者関係 (密度と数、数と長さの関係) の理解が比較的初期に形成されるのに対し、反比例的二者関係 (長さと密度の関係) の理解は困難であること、そして三者関係を理解している者は、小5 (10歳) でも全体の約25%であることを明らかにした。

そして、この研究によって2つの疑念が生じた。第1に、関係概念の理解に、個々の次元の保存および各次元の影響関係が関わっているのではないかという点、第2に、三者関係を理解できる年齢は、従来考えられていたより遅いのではないかという点である。これらの点を明らかにするため、永瀬 (2000) は、小学1, 3, 5年生を対象として、密度、長さ、数の次元それぞれについて Piaget タイプの保存の達成を調べ、各次元の分化および影響関係と、関係概念の理解に及ぼす影響を検討した。その結果、第1の点については、小学1年生において、数の保存に比べて長さや密度の保存が難しく、密度と数の未分化があること、および数の次元の影響力の強さが明らかとなった。これが反比例的二者関係の把握の困難さの原因であると考えられる。第2の点については、三者関係を理解している者は、小5で全体の25%程度しかいないことを改めて確認した。さらに、密度の次元の論理的操作は小5でも困難であり、これが密度の操作を必要とする二者関係あるいは三者関係タイプの理解を困難にしている可

能性を示唆した。

松田他 (2000) および永瀬 (2000) の研究により、crowdedness タイプの密度の関係概念の定性的理解の発達過程の概要が明らかとなった。そして、この理解の獲得が10歳より遅いことが示唆された。これにより、その後の発達過程を明らかにする必要性が生じた。

一方で、内包量には、強さの量としての性質があり、教育現場では、子どもたちが、この性質の理解を欠いたまま、公式を機械的に適用することが問題となっている (布施川・麻柄, 1989; 麻柄, 1992)<sup>6)</sup>。この内包量特有の性質は、密度の場合、均等分布として置き換えられ、学校現場で学習される密度は、すべて均等分布を前提としている。また、日常場面においても、密度が比較の基準として用いられる場合 (例えば人口密度など) には、一様にならず、すなわち均等分布を仮定するという操作が必要とされる。したがって、密度概念の質的理解の発達を考える上では、この側面も無視できない。

そこで永瀬 (2002) は、小学5年生から高校2年生までを対象として、関係概念の定性的理解と均等分布理解の両側面から、密度概念の質的理解の発達過程を調べた。その際、教育現場へのより直接的な支援を意識し、教育現場でよく用いられる文章題の形式を用いた。その結果、高2でも、1次元上の密度の概念の質的理解が獲得されない可能性が示唆された。これには三者関係理解の発達の停滞が大きく関わっていると考えられる。実際、三者関係の理解は、小5から中2まで発達が見られなかった。高1を境として長さ=数/密度タイプや数=長さ×密度タイプの理解が大きく発達するが、この発達にともない、それまでよく理解していた密度=数/長さタイプの三者関係理解や、二者関係および均等分布の理解に揺らぎが生じ、正答率、獲得者割合の両面で一時的に大きく低下することが明らかとなった。このことから、この時期に知の再構造化を行っているものと考えられる。しかし、具体的にどのような再構造化が行われているのかについてはまだ不明な点も多く、この点を明らかにするためには、三者関係理解の様相とその発達について、より詳細に明らかにしていく必要がある。

### III. 今後の課題

以上を総括すると、以下のような点が明らかとなった。第1に、密度概念の学習の困難さは、質的側面の理解にある。第2に、質的側面の困難さのひとつは、広範な年齢段階にわたる重さと密度との概念的未分化である。第3に、密度に関する代替概念が、学校教育

によって変化しにくいこともまた、密度概念学習の困難さの一因である。第4に、学校教育で求められているのは、密度とそれを導く2つの外延量との関係把握までを含む理解の形成であり、概念変化のための適切な介入を行うためには、子供たちが持っている関係概念の理解を明らかにする必要がある。しかし、まだ、子どもたちが持っている関係概念理解の様相とその発達過程について十分明らかになったとはいえ、密度概念の効果的な学習のための決定的な介入方法の提言には至っていない。

以下それぞれのタイプの密度概念研究における今後の課題について述べる。まず、densityタイプの密度については、定性的理解の側面に焦点を当てた研究が必要であろう。これには、crowdednessタイプの密度に関する研究が参考になる。また、同じ内包量概念のひとつである速度と濃度の理解を扱った藤村(1990, 1997)が、定性推理課題と定量推理課題を用いて、定性的側面と定量的側面を抽出している点も参考になる。また、情報統合理論に基づく研究で用いられている課題の問題点にも注意を払わなければならない。情報統合理論的アプローチは、内包量とそれを導く2つの外延量との関係理解を調べるのに有効であり、それぞれの次元の影響のわずかな効果も検出できるという点で優れている。しかし、このアプローチは、定量的関係把握までを明らかにしようとしており、定性的理解を抽出することが難しい。また、Leoni & Mullet (1993)の課題を見ても、重さは重りの数で、体積は大きさで、一目瞭然的に量の大小関係がわかり、重さ差や体積差がそれぞれ等間隔な印象を受けるが、密度はプラスチックと木と鉄という3段階で構成されており、密度差の等間隔性に疑問が残る。判断も、重さ判断の場合には軽いから重いまで、体積判断の場合は小さいから大きいまで、という連続尺度上で表されているが、密度判断の場合にはプラスチックから鉄までを連続した密度尺度としている点で、密度の測定としてはやや無理がある。

次に、crowdednessタイプの密度については、三者関係理解の様相をより詳細に調べ、再構造化の過程を明らかにする必要がある。また、直接的支援を考えるのであれば、面積と数で決まる密度についても調べる必要がある。その上で、定量的側面の理解についても明らかにする必要があるだろう。さらに、crowdednessタイプの密度の関係概念の定性的理解を扱った研究(松田他, 2000; 永瀬, 2000, 2002)では、関係概念課題<sup>7)</sup>の問題点にも注意を払う必要がある。これらの課題は、幼児にも実施が可能であるという点、および密度についての関係概念の定性的理解の

全体像を捉え得るという点で非常にすぐれている。しかし、低年齢の児童にも課題を実施可能にするための工夫から、特に三者関係課題において、いくつかの問題点が存在する。まず、第1に「より〜である(になる)」という言語発達による影響を除くため、3つの具体例の中から正答を選ばせている点である。実際、Griffiths, Shantz & Sigel (1967) や Weiner (1974) は、4, 5歳までの幼い子どもには、より多い(more)より少ない(less)という語の理解が困難であることを指摘している。また Siegel (1969) は、幼い子どもたち(5歳未満)がより多い(more)より少ない(less) 同じ(same)という量的な用語に正しく反応できないことを明らかにしている。しかし、ある程度年齢の高い生徒では、2つの変化次元の変化量をも考慮して、合致するものを探さなくてはならない課題であるという印象を与え、認知負荷を高めてしまう可能性がある。ただし、ある程度年齢の高い児童・生徒が必ずそのように思考するとは言い切れない。また、変化量の考慮を行ったとしても、変化量が同じになるように課題を作成しているため、認知負荷の増加は危惧するほどではない可能性もある。第2に、変化量が同じになるような課題を作成する必要性から、三者関係課題で用いた三者関係に特定の場合のみを用いている点である。本来、三者関係には2種のパターンがある。2つの変化次元の変化量の大小関係によって判断次元の変化の方向が異なってくるものと、そうでないものである。前者は、例えば、前提条件より数が多くなり長さが長くなった場合に、密度がどうなるかについて判断するような場合である。後者は、例えば、前提条件より数が多くなり長さが短くなった場合に、密度がどうなるかについて判断するような場合である。松田他(2000)、永瀬(2000, 2002)で用いられた課題は、この前者のパターンのうち変化量が等しい場合のみを用いている。これは、回答形式を三者択一としたため、後者のパターンのような、極端に大きな量や極端に小さな量が回答となるものを除外したためである。また、前者のようなパターンにおいて、2つの変化量の大小関係を具体的課題の形で表すことが困難であったためである。しかし、高い年齢の児童・生徒を対象とする場合には、文章題を用いた提示の仕方が可能であるため、2つの変化量の大小関係を示すことが可能である。また、量的により大きくなったのか小さくなったのか、それとも同じなのかという解答形式をとることも可能である。したがって今後は、これらの問題点を克服するような課題を作成し、全てのタイプの三者関係について調べ、三者関係理解の様相をより詳細に明らかにする必要がある。

最後に、どちらのタイプの密度概念研究にも共通することであるが、必要な認知操作を特定し、それを獲得させるようなトレーニングを考案・実施し、その効果を検討していく必要がある。

## 【引用文献】

- 荒井龍弥 1994 小学生の密度概念形成をめざした構成的研究 東北福祉大学研究紀要, 18(21), 239-255.
- Baron, J., Lawson, G., & Siegel, L. S. 1975 Effect of training and set size on children's judgment of number and length. *Developmental Psychology*, 11(5), 583-588.
- Chartier, D., Mullet, E., & Grandjean, J. C. 1991 Effectiveness of a physics computer program on fifteen-year-old "technology" students. *Journal of Educational Computing Research*, 7(2), 219-232
- Cuneo, D. O. 1982 Children's judgments of numerical quantity: A new view of early quantification. *Cognitive Psychology*, 14, 13-44.
- Griffiths, J. A., Shantz, C. A., & Sigel, I. E. 1967 A methodological problem in conservation studies: The use of relational terms. *Child Development*, 38, 841-848.
- 藤村宣之 1990 児童期における内包量概念の形成過程について 教育心理学研究, 38, 277-286.
- 藤村宣之 1997 児童の数学的概念の理解に関する発達的研究—比例, 内包量, 乗除法概念の理解を中心に— 風間書房
- 布施川博美・麻柄啓一 1989 児童の速さ概念に関する教授心理学的研究 千葉大学研究紀要, 37(1), 55-66
- Hewson, M., & Hewson, P. W. 1983 Effect of instruction using students' prior knowledge and conceptual change strategies on science learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 20(8), 731-743.
- Hewson, M. G. A'B. 1986 The acquisition of scientific knowledge: Analysis and representation of student conceptions concerning density. *Science Education*, 70(2), 159-170.
- Inhelder, B., & Piaget, J. 1958 The growth of logical thinking from childhood to adolescence. Parsons, A & Milgram, S. (Inhelder, B., et Piaget, J. 1941 *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*. Presses Universitaires de France)
- 加藤達太 1982 わたしならこうする密度—中2— 理科教室 新生出版
- Kingma, J., & Roelings, U. 1982 Cardinal equivalence of small number in young children. *Perceptual and Motor Skills*, 54, 1023-1037.
- Leoni, V., & Mullet, E. 1993 Evolution in the intuitive mastery of the relationship between mass, volume, and density from nursery school to college. *Genetic, Social, and General Psychology Monographs*, 119(3), 389-412.
- Lawson, G., Baron, J., & Siegel, L. 1974 The role of number and length cues in children's quantitative judgments. *Child Development*, 45, 731-736.
- 麻柄啓一 1992 内包量に関する児童の本質的なつまづきとその修正 教育心理学研究, 40, 20-28.
- 麻柄啓一 1995 小学生に対する「人口密度」概念の学習援助 千葉大学教育実践研究, 2, 35-46.
- 松田文子・一谷幸男・松田伯彦 1986 時間, 空間, 速度の概念の発達 (I) — Piaget の実験と理論 — 鳴門教育大学研究紀要教育科学編, 1, 1-21
- 松田文子・一谷幸男・松田伯彦 1987 時間, 空間, 速度の概念の発達 (II) — Fraisse の論争 — 鳴門教育大学研究紀要教育科学編, 2, 291-308
- 松田文子・一谷幸男・松田伯彦 1988 時間, 空間, 速度の概念の発達 (III) — Piaget 批判の検討 — 鳴門教育大学研究紀要教育科学編, 3, 261-277
- 松田文子・橋本巖・松田伯彦 1990 時間, 空間, 速度の概念の発達 (IV) — 実験の方法 — 鳴門教育大学研究紀要教育科学編, 5, 285-297
- Matsuda F. 1994 Concepts about Interrelations among duration, distance, and speed in young children. *International Journal of Behavioral Development*, 17(3), 553-576.
- 松田文子・田中昭太郎・原和秀・松田伯彦 1995 時間, 距離, 速さの関係概念の形成が小学校5年生算数「速さ」の理解に及ぼす影響 発達心理学研究, 6(2), 134-143
- 松田文子・永瀬美帆・小嶋佳子・三宅幹子・谷村亮・森田愛子 2000 関係概念としての「混みぐあい」概念の発達 教育心理学研究 48(2), 109-119.
- 松田文子・小嶋佳子・森田愛子・谷村亮・三宅幹子 2001 幼児における混みぐあい, 数, 長さの関係の理解 広島大学心理学研究 1, 87-102.
- McLaughlin, J. A. 1981 Development of children's ability to judge relative numerosity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 31, 103-114.
- Mullet, E., & Vidal, D. 1986 La maitrise intuitive des relations entre masse, volume et masse volumique che des eleves du premier cycle. *European Journal of Psychology of Education*, 1(3), 47-65.

- Mullet, E., & Gervais, H. 1990 Distinction between the concepts of weight and mass in high school students. *International Journal of Science Education*, **12**(2), 217-226
- 永瀬美帆 2000 混みぐあい概念の発達－関係概念理解と各次元の影響関係－ 広島大学教育学研究紀要 第一部 (学習開発関連領域) **49**, 37-44.
- 永瀬美帆 2002 密度概念の質的理解の発達－均等分布の理解と関係概念の定性的理解からの検討－ (投稿中)
- ピアジェ, J. ・ シェミンスカ, A. 遠山啓・銀林浩・滝沢武久 (訳) 1962 数の発達心理学 国土社 (Piaget, J., et Szeminska, A. 1941 *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchatel, Suisse: Delachaux & Niestle S. A.)
- ピアジェ, J. 滝沢武久 (訳) 1972 発生的認識論 白水社 (Piaget, J. 1970 *L'épistémologie génétique* Presses Universitaires de France)
- Piaget, J. & Inhelder, B. 1974 The child's construction of quantities. London: Routledge & Kegan Paul (Piaget, J., et Inhelder, B. 1941 *Le développement des quantitiés chez l'enfant*. Neuchatel, Suisse: Delachaux & Niestle S. A.)
- 佐藤康司 1991 教授ストラテジーの構成と改善に関する研究－「液体の密度」の学習について－ 東北教育心理学研究, **4**, 15-25.
- Siegel, L. S. 1974 Development of number concepts: Ordering and correspondence operations and the role of length cues. *Developmental Psychology*, **10**(6), 907-912.
- Smith, C., Carey, S., & Wiser, M. 1985 On differentiation: A case study of the development of the concept of size, weight, and density. *Cognition*, **21**, 177-237.
- Smith, C., Snir, J., & Grosslight, L. 1992 Using conceptual models to facilitate conceptual change: The case of weight-density differentiation. *Cognition and Instruction*, **9**(3), 221-283.
- Smith, C., Maclin, D., Grosslight, L., & Davis, H. 1997 Teaching for understanding: A study of students' preinstruction theories of matter and a comparison of the effectiveness of two approaches to teaching about matter and density. *Cognition and Instruction*, **15**(3), 317-394.
- Smither, S. J., Smiley, S. S., & Rees, R. 1974 The use of perceptual cues for number judgment by young children. *Child development*, **45**, 693-699.
- Strauss, S., Globerson, T. & Mintz, R. 1983 The influence of training for the atomistic schema on the development of the density concept among gifted and nongifted children. *Journal of Applied Developmental Psychology*, **4**, 125-147
- 和田常雄 1994 新たなしくわかる 算数5年の授業 あゆみ出版
- Ward, T. 1980 Separable and integral responding by children and adults to the dimension of length and density. *Child Development*, **51**, 676-684.
- Weiner, S. L. 1974 On the development of more and less. *Journal of Experimental Child Psychology*, **17**, 271-287.

### 【注】

- 1) 例えば、松田他 (2000) は、内包量概念に共通の発達過程を認めながら、速度に比較して密度の発達が遅いことを指摘している。松田他 (2000) では、この理由を、日常経験の不足と結論づけているが、速度に比べ、密度についての日常経験が不足しているという密度特有の困難さを示唆したものといえる。
- 2) 松田他 (2000) でも、長さや数によって決まる密度を、いわゆる物質の密度と区別して、「混みぐあい」と呼んでいる。
- 3) 佐藤 (1991) は、第1用法：内包量 (密度) = 外延量 A (質量) ÷ 外延量 B (体積)、第2用法：外延量 A (質量) = 内包量 (密度) × 外延量 B (体積)、第3用法：外延量 B (体積) = 外延量 A (質量) ÷ 内包量 (密度) としている。
- 4) 定性的理解とは、定量 (計量) 的理解に先立つ質的な論理構造の把握である。具体的には、1つあるいは2つの次元が変化したとき、当該判断次元が、どのくらい増減したかという変化量までわかることが定量 (計量) 的理解とすると、当該判断次元が、結果的に増えたのか減ったのかという変化の方向性がわかることが定性的理解であると考えられる。
- 5) このパラダイムは、時間・距離・速さについての関係概念を扱った Piaget の研究への批判 (松田・一谷・松田, 1986, 1987, 1988; 松田・橋本・松田, 1990) をもとに考案されたものである。
- 6) 麻柄 (1992) では、小学6年生を対象に、布施川・麻柄 (1989) が考案した「内包量の保存課題」を用いて crowdedness タイプの「人口密度」と density タイプの「物質の密度」の両方について、均等分布の理解を調べている。その結果、約半数の児童において均等分布の考え方が理解されていなかった。なお、麻柄 (1992) では、「均等分布の理解」ではな



く、「内包量の基本的性質の理解」と呼んでいる。しかし、ここでいう内包量の基本的性質とは、具体的にはその畑のどの部分の  $1\text{m}^2$  をとってみても同じ数の球根が植えられていることがわかることであり、一様な均等分布の考え方の理解のことを指していると考えられるため、永瀬（2002）では、この理解を均等分布理解と呼んでいる。

7) 松田他（2000）では、密度・長さ・数のそれぞれの次元を、横長の花壇の1次元的な密度・プランターの長さ・チューリップの花束で表していた。それぞ

れの次元には量的な大・中・小の3つがあり、中くらいの長さのプランターに中くらいの数の球根を植えると、中くらいの密度の花壇と同じ密度になるという関係を見せ、それを前提として、被験者に判断を行わせる。解答は、3選択肢（それぞれの次元の量的な大・中・小）から1つを選択する。これを一斉実施が可能なようにパソコン画面上で呈示するスタイルに改めたのが永瀬（2000）であり、さらに、文章題の形式に改めたのが永瀬（2002）である。

（主任指導教官 石井真治）