

## 小学校指導要領改訂にみられる傾向性から、 高等学校までの一連の理科概念形成に関する問題についてⅡ

—理科分野・粒子概念と大気圧の扱いを中心としての解題—

結城 敏也・結城千代子

### 初めに

#### ① 改訂理科指導要領の方針、指導要領解説書に関する振り返り

「小学校指導要領改訂にみられる傾向性から、高等学校までの一連の理科概念形成に関する問題について」でも述べたように、指導要領改訂に伴い、新たに加わった文言、記述がかなり多い。その中で、特に注目すべき点をいくつか振り返っておこう。『 』が新たに登場した部分であり、下線部は特に注目すべき箇所である。

まず、第1章総則の第1「教育課程編成の一般法則」1において、「学校のエ育活動を進めるにあたっては」に続く部分に、生きる力の育成に関する記述に加えて、『基礎的、基本的な知識および技能を確実に習得させ、これらを活用して課題を解決するために必要な思考力、判断力、表現力その他の能力を育むとともに、主体的に学習に取り組む態度を養い』との部分が登場した。

具体的には、第4節理科においては第1目標において、従来の「自然に親しみ、見通しを持って観察、実験などを行い、問題解決の能力と自然を愛する心情を育てると共に自然の事物・現象についての理解を図り、科学的な見方や考え方を養う」が『自然の事物・現象についての実感を伴った理解を図り』という表現をとってより求められる学習像の形に強化された。

これを見ると、「基礎的、基本的な知識および技能を確実に取得させ」として、実質陶冶を基礎に置くことが重視されている。そしてさらに、「これらを活用して課題を解決するために必要な思考力、判断力、表現力その他の能力を育む」という形で、実質陶冶を基盤として形式陶冶を完成させしめることが主要目的として規定される。

前回の論考では、あまりにも言われ続け、それでもまだ解決を模索せねばならない問題を強調した。つまり、現状での学校教育が主知主義的傾向に墮し、いまだ「受験対策」が学校教育の主要な目標とされていることは教育上大きな問題であり、この問題を解消する実現可能な効果的対策を打ち出す必要があるということである。現在の教育が持つ方向性を転換させることは困難である。特に教育は社会構築の基盤となる要素があり、限定された特定の学校における部分的な教育改革であればともかく、一つの国の教育方針を変更するなどと言うことは不可能に近い。

旧指導要領に見られた「ゆとり教育」の登場の際も、この根本的「変革」が試みられた

はずであるが、「変形」に終わった。「ゆとり教育」自体も概念的には正統であるものの、それまでの指導要領と異なりはするものの変革には到らなかった。この部分を含め、問題を考察してみよう。そして、今回の新指導要領がこれまでから一步踏み出そうとしたこと、つまり教育の方向転換を図ることに成功する可能性を持つことにも触れたい。

学校というものには、学校制度成立の経緯に基づく特徴があることは否定できない。コメニウスに始まる学校理念がすべての人が十分な教育を受けることを保証するための基幹として「学校」を想定していたことは否定するまでもない。また、歴史的にも社会的にも発展の余地がある社会においては、教育が社会的な階層を上昇するための手段として存在していたことは否定するまでもない。現在のUNESCO等による教育支援が意味を持つのも、教育というものを備えることが社会的階層上昇のための手段としていまだに有効であることの証拠として示すこともできるだろう。

18世紀前後から、いわゆる列強諸国を中心に義務教育の実施が始まり、一般民衆層に対する教育が普及し、同時に義務教育を介して「国民」意識が一般民衆の中に形成されてくる。教育の普及とともに社会構成は変化する。封建主義社会に見られる地縁血縁を基板とした社会の階級制から、教育に基づいた社会の階級制度が形成されてくるのもこの時期である。百科全書派が中国での科举を範例として推進した、またイリッチなどが学歴社会として批判する能力主義、ひいては能力を保証するものとしての学歴主義の発生である。社会の健全な運行を保守する基幹要員としての「エリート層」を身分・家柄で選択するのではなく、どのような学識を持っているのかで選択する社会、すなわちどのような学歴を持ち、どれだけの教育を受けているかに基づいてエリート層を選択する社会の発生である。明治以降の我が国の教育制度も、社会の学歴化という方向性に基づいて形成されてきている。また、社会における主要産業が1次産業から、2次・3次産業へと移行するにつれて、労働者に求められる知識・技能が高度化していったこともいわゆる先進諸国において教育制度が普及していったことと分離することはできない。

イリッチがすでに指摘していることだが、社会の学歴化の進展とともに、就職のために要求される学歴はインフレーションを起こす。このような学歴インフレーションはアメリカにおいてはすでに20世紀中頃には見られるようになっていたが、日本においても20世紀後半から顕在化している。社会の学歴化に伴い、職に就く場合に必要となる平均的学歴が高度化する。例えば20世紀中頃までは日本において地方公務員になるためには高卒程度の学歴が必要であったが、20世紀末頃からは大卒の学歴が必要となるようになっていく。また、親よりも上級の学校に行ったにもかかわらず、就職先は親の世代と同等あるいはより低い社会的評価しか与えられない職にしか就けないという状況が、20世紀中頃より顕著化している。このような学歴期インフレーションは、学生においては学習動機の希薄化としてあらわれる。また高等教育においては、職業教育が重視され、基礎的な一般教養科目は軽視される。実際に多くの大学において、一般教養科目の単位数の減少、従来の一般教養科目のカリキュラムからの削減として現れている。

学歴主義が社会における枠組みとなることにより、学校における学習はその枠組みに沿って変形している。社会において教育が評価されるとき、それは個々の学生が学校にお

いて「何を学習したか」ではなく、「学校を卒業した」ことが重要であり、「どの学校を卒業したか」「どの学校まで進学したか」が、一人の人間を評価する場合の重要なパラメーターとなる。その結果、教育を与える機関としての学校において重要なのは「学生・生徒が与えられたテーマの内容を理解したか」ではなく、「学生・生徒が履修確認のための試験でどれだけ高い成績を上げたか」へと移行する。極論すれば「テストで良い成績を得られれば内容を理解していなくても構わない」ということになる。教育を与える側においても、無意識のうちにも学習の評価は変化する。数年前に問題となった学科未履修の問題などは、このような現在の教育現場を支配する暗黙の認識が原因で有り、根本的な学校を巡り環境が変化しない限り形を変えて再現していくのは疑う余地もない。

旧指導要領に見られた「ゆとり教育」についても、教育において自主的に考え行動する、一見「無駄な時間」が重要であると言う意味では概念的に正統的なものであった。それにもかかわらず、実際の教育現状で実施するにはあまりにも稚拙だった。教育関係者からの大反対を押し切って、「 $\pi$ を3として教える」で知られるように、「抽象度が高く学習困難な概念」を意図的に学習対象から省くことにより、「ゆとり」は「学習内容の精選」ではなく「学習内容の幼稚化」となり、基本的な概念学習に欠陥を抱える『ゆとり世代』を生み出すこととなった。また「ゆとり」を学校における授業時数の削減とのみ把握したために、教えるべき知識容量の削減をもたらした。これは特に、より高度な教育を受けるために必要な知識部分の削減として現れ、高等教育段階において基礎的な知識を教えなければ授業が成立しないような状態をもたらしている。

このように、実際の教育現状においては、「教育理念」や「教育方針」よりも、それらの実現の手法が強い影響を与えることになる。

このように考えると、現在の教育現状における問題も、旧来の指導要領が主知主義に傾いていたことよりも、主知主義的教育内容を「どのようにして」実際の教育現場で生徒達に伝えていくかという手法に問題があったととらえるべきである。

新教育要領について考えてみよう。新教育要領は、教育現状において『「内容の理解よりも、穴埋め問題あるいは選択式問題での回答率の上昇を教育成果の上昇としてとらえること』に疑問を投げかけないような現状』に対する批判としては、歩みを進めているといえる。

これまでの学校における学習が主知主義的な傾向に偏っていた。また、上級学校への進学率の上昇とともに、「知識」を「記憶」し、「記憶した知識」によりペーパー上の穴埋め問題で良い点を取ることが、「学習の成果が上がった」という考え方が学校現場で蔓延してしまった。その結果、「経験を元に世界を理解すること」よりも「アチーブメントテストで高得点を撮ること」が学習の基本であり、このような試験解答の技法を効率的に伝授することが教員のとるべき立場であると規定されてしまうようになっている。これに対して、新指導要領は、このような現状を確実に否定してきている。

抽象的な「知識」を与え、それを「記憶」させることでは概念は形成されない。それぞれの学習者が持つ具体的な経験に即し、現象の世界において生起しているできごとを、自

分自身の感覚を通して把握し、その具体的な出来事を抽象化し、概念として形成するというプロセスが、概念の獲得には不可欠である。このような経験主義的学習は、カリキュラムに置いては、(カリキュラム作成者の側で無意識のうちに) 幼児教育を受けていく過程で当然ながら経験しているものとして不当にも「既経験のもの」として前提されていたり、あるいは小学校の生活科における体験学習、理科分野での実験という形式で行われるものとされている。しかしながら、実際の教育現場では主知主義的学習が重視され、あるいは様々な学校行事を優先するために経験の獲得に不可欠な実験や体験は軽視され、他の主知主義的事項の暗記のための授業あるいは学校行事のために削減される。すなわち、教師が教卓上で実験を例示したり、実際には実験を実施しないでテキストを参照しながらの説明で済ましてしまう傾向性が強い。

これは、指導要領などでどのような理念や実践の方向性を指導したとしても、「指導上の必要性」の一言で教育過程において重要な要素が「現場の判断」で削減されてしまうことの危険性を示している。現在の過度に進行した学歴社会化の趨勢の元では、「基本的な知識技能を身につける」ことよりも、「上級学校」への、あるいは「より高い評価が与えられる学校」への進学者を増大させることが、学校および教師に対する評価基準となってしまうという問題を無視することはできない。このような社会の学歴化に基づく要求を拒否する方策を学校側で持ち得ない以上は、単に理念とか方針という点から教育の改革を遂行しようとしても、パッチワーク的なぼろ隠しに推移し、教育の根本的な立て直しを期待することはできない。

とはいうものの、我々が前回の分析でも示したように、今回の指導要領改定は、学校教育における主知主義的傾向を否定し、経験主義的学習を強化することを主眼にしている。そして、このような経験的学習の強化が十分におこなわれるのであれば、これは教育現場からの是正として、単に「方針」を変更するよりも教育の歪みを是正する手段としては有効性が高い。

このような指導要領を踏まえ、提示された小学校学習指導要領解説理科編を見てみよう。冒頭近くの2「改訂の趣旨」(1)「理科の改善の基本方針および具体的事項」の中で、中央教育審議会の答申(i)「改善の基本方針」が(ア)から(オ)まで示されている。その中の(イ)において、『科学的な概念の理解など基礎的・基本的な知識・技能の確実な定着を測る観点から、「エネルギー」「粒子」「生命」「地球」などの科学の基本的な見方や概念を柱として、子ども達の発達の段階を踏まえ、小・中・高等学校を通じた理科の内容の構造化を図る方向で改善する。』と述べられている。これは、明らかに、学習に置いては教科書に提示されている知識を単に記憶することではなく、学習主体である各生徒の経験に基づいて概念理解を形成する方向性を、学習の指導に対して求めていることを示している。

ここであらためて注目したいのは、指導要領上の内容区分に、原子分子の構造を念頭に置いた「粒子」概念が登場した点である。これは、第2節「理科の内容区分」、1A「物質・エネルギー」の解説において、さらに具体的に以下のように言及されている。

『「粒子」と言った科学の基本的な見方や概念は、さらに「粒子の存在」「粒子の結合」「粒子の保存性」「粒子の持つエネルギー」に分けて考えられる。』



これは、小学校の段階から、現代科学の基礎である原子論について展望を持って取り扱うことを求めている。今回は、この粒子概念を実際に小学校、中学校の教科書で意識して登場させている場面に関し、幾つもの問題点をはらんでいる点に関して解題、考察を加えた。

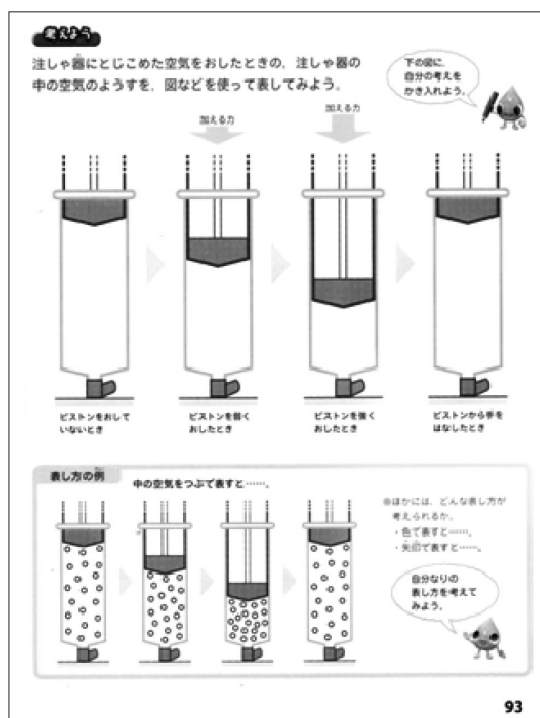
本論文において、粒子概念が指導要領で前面に出して導入されてきているにも関わらず、十分にその真価を発揮できていない点について、「大気圧」に関して考察してみたい。そのために、「圧力の定義」、「水压」などととも「大気圧」を扱う単元項目「圧力」の範囲全体も視野に入れて検証する。

## ②中学校段階での大気圧の登場の仕方と問題点

### —改訂後の中学校教科書の大気圧に関する記述例—

T社小学校理科の教科書において、最初に「粒」の表現を生徒に期待する場面として、気体分子のイメージが表現されているのは、期せずして圧力に関わる場面である。といっても、学習の目的は圧力概念の習得にはない。

図1を見てみよう。ここでは、注射器のピストンを押すと空気のかさがへり、手を離すと再び戻るとい現象を、「粒の分布の粗密」の表現で理解することが期待されている。押しつぶす力を加えると空気が大きく体積変化すること（相対して水の体積変化は小さいこ



(図1) 東京書籍 小学校教科書 新しい理科4年 p93

と)を知るのがこの学習における目的である。

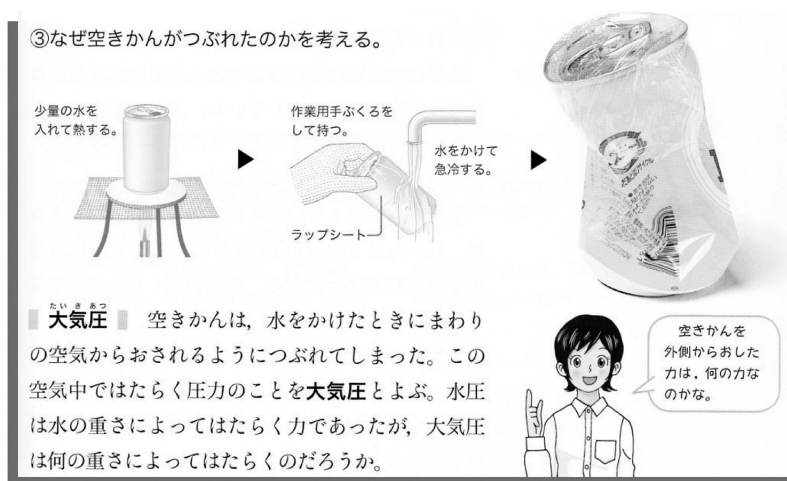
これは、空気の分子を表現するという点が主軸ではない。体積の大小と分布の粗密は、日常体験からも受け入れやすいという配慮からの登場である。(空気を「粒」で表す必然性は特にふれられない。) 空気が潰されて混み入った粒で表現される場面に、圧力が高いという言葉は登場しないが、このイメージは後の「圧力の学習」に反映されてしかるべきである。

しかし、小学校段階での「粒」の表現は、イメージ止まりで、正確には原子や分子の表現とはなっていない。特に大きな問題点として、原子や分子が運動しているイメージを伝えていないことがある。(当然のことながら絶対零度でないかぎり原子、分子は運動している。) しかし、中、高の学習において登場する原子、分子を「粒」としてイメージするための前段階として、このような表現になじむ目的で、敢えてこのような曖昧な表現で紙面に登場してきたといえる。そのためこの段階の表現では、「粒子の運動」は意図的に削除されている。また『真空』概念は、原子論が認められていく歴史の中で最も大きな役割を果たしてきているが、この『真空』概念に関しても触れられることはない。図中の粒の間が「真空」であることをは提示されない。

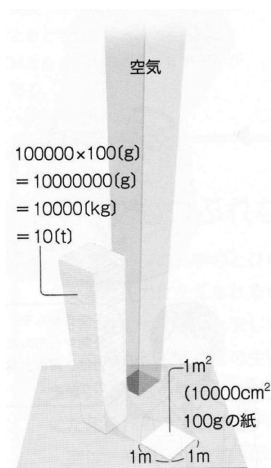
実際の教育現場において、この単元を指導する場合には、教員の側が、この表現の意図と問題点を十分に理解していることが重要である。

しかし、理系専攻の教員でないと、この図のどこが不正確な表現であるのかが理解できないまま指導を進めてしまう危険性が高い。

さて、小学校においては、他に圧力に関する事項は「風の力」や「水鉄砲」「空気を熱するとかさが増える」「蒸気は羽根を回す」など、巨視的な基礎の経験として多数扱われ



(図2) 東京書籍 中学校教科書 新しい科学1年 p177



〔図2〕海面上での大気圧 海面上では、 $1\text{m}^2$ 100gの紙を約10万枚重ねたときの圧力と同じ大きさの大気圧がはたらいている。

(図3) 東京書籍 同 新しい科学1年 p178

るが、単独で取り上げる、あるいは粒子性を踏まえた解釈をする学習項目にはなっていない。

単元「圧力」の学習は中学校を待つことになる。指導要領改訂に伴い、今4月から中学校で使用されている東京書籍の教科書に図2のような「大気圧」に関する表現が登場する。

この記述を見るかぎり、小学校理科教科書において先行的に粒子概念が示唆されているのにもかかわらず、中学校教科書においては、この先行する提示は生かされていない。

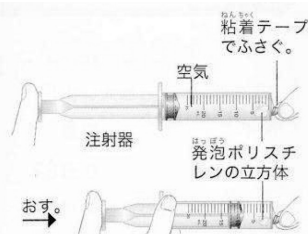
この中学の学習の中で、「大気圧は大気の重さ」というイメージを強く与えている。実はこのイメージ自体が大きな問題点を含んでいる。

図3等を見たときここで学習者の持つイメージは「上に乗っかられて重い」である。下方向の力は当然のように納得できる。ところが、大気圧は四方八方にはたらく。「上から押されて重い」から「横からも下からも同じ強さで押される」に至るためには、もう一段思考のステップを越えなければならない。この段差に関する配慮が十分とはいえず大気圧の理解に困難が生じる。

大気圧(図4)、水压(図5)に関して、それらが四方八方から受ける力であることを示す実験は以下のように示される。

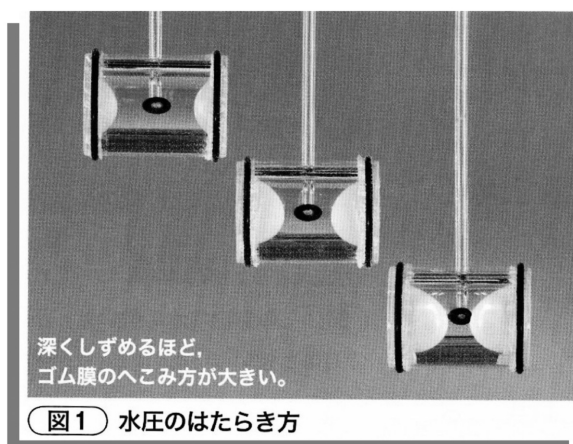


〔図3〕空気の圧力のはたらく向きを調べる実験 気圧を下げてふくらんだマシュマロは、気圧をもとにもどすと、同じ形のまま縮む。

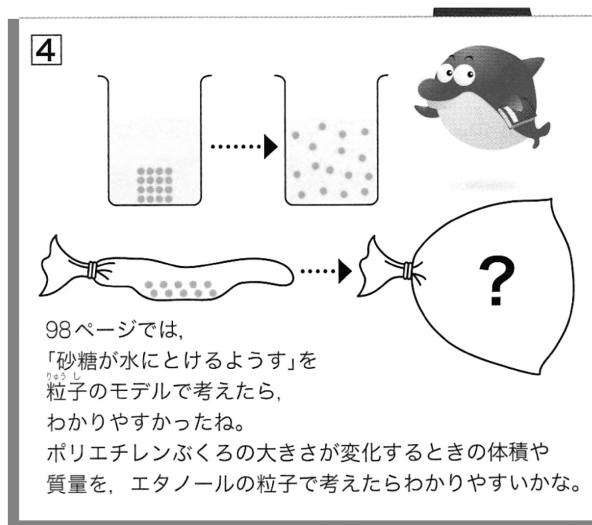


〔図4〕注射器で空気の圧力のはたらき方を調べる実験 圧力が高くなると、立方体は同じ形のまま

(図4) 東京書籍 同 新しい科学1年 p179



(図5) 東京書籍 同 新しい科学1年 p174



(図6) 東京書籍 同 新しい科学1年 p115

しかし、この観察だけから、中々十分なイメージを得ることは難しいようである。

図6で固体と液体、気体を「粒」で表現した比較図が登場する。ここではじめて、「粒」の配置に言及する。しかし、「粒の間」の空間についての言及できない。

また、氷の立体構造を「粒」でしめすが、やはり、「粒の間」の空間についての言及はない。

以上のように、小中学校では極めて限られた図のみで粒子の表現を使うこれらの結果と

して、「粒」で描く物がケースバイケースとなり、「世界にあるすべての物質は原子の集合体である」という、統一的な理解には到りにくい。さらに、粒子表現している際でも「粒子は必ず運動している」表現になっていないために、「世界を構成する原子、分子は常に運動しているエネルギーを持った存在である」という理解にはまるで到らない。

小学校指導要領ではせっかく「粒子」のほかに「エネルギー」と言う柱を立てていながら、その間の連携が取れないために、微視的世界観の構築の機会を、みすみす逃していることになる。

これは理系専攻ではない小学校教員の場合、教師自体が所持している概念に少なからぬ混乱が生じている可能性が高ことを示している。また教師自体が所持している概念が混乱している場合には、生徒が概念を形成するにあたって、多大な悪影響を与えてしまうことになる。

### ③圧力の学習におけるプレ概念や困難さに関する報告例

小、中、高の生徒の持つ粒子像全体に関する誤概念の報告は枚挙にいとまがないが、今回のテーマ「圧力」に関するプレ概念や教授法に関する教員側の認識の報告を幾つか上げてみようと思う。

まず、以前から指摘されている子どもの持つプレ概念に「真空は物体を引きつける」がある。アリストテレスの「真空嫌悪説」に類似したもので、科学史上でも長く信じられ、多くの子どもがもっているイメージと考えられる。これは授業の過程では主として「低圧のピストンを引くことが出来ない」の観察後に最も顕著に確認される。また大気圧によりドラム缶が潰れるなどの実験を見た場合でも修正されない場合が多い。最近では川上泰司「理科学習における言語活動の充実に関する研究—中学校第一分野「圧力」単元を中心として—」科教研報vol.24 No.2 p53—56などでも調査指摘されている。

単元「圧力」は中学理科では今改定前までは第一分野の初頭「身近な物理現象」の中で取り扱われる。奈良県立教育研究所長期研修員赤木紀公が「知的好奇心や探究心を育む理科教材の開発」において、平成15年から19年に渡る全国10県にわたる各種調査の資料を元に現場の正答率、通過率に関する問題点をまとめている。そこで、「身近な物理現象」が正答率60%以下と指摘される回数は、理科第一分野の範囲において電流とその利用について、全体の2番目に高く15回を超えている。（ちなみに第二分野の範囲では最も困難と思われる「植物の生活と種類」や「地球と宇宙」の11回である。）「身近な物理現象」には光と音の学習も含まれており、この困難さの主因が圧力だけとはいえないが、正答率や通過率が低くなる要因として、「目にみえない粒子（原子や分子）をイメージしにくい。」があげられている。また、「気体は目に見えないので存在を意識させることが困難、重さに対する認識が乏しい」などの指摘がある。

また、国立教育政策研究所によって全国の中学校500校の理科主任を対象に行われた2001年、2003年、生徒の理解度およびつまづき調査や、理科教師が教えるにくいと感じる単元調査から、第一分野では「力」と「圧力」が、「水溶液」と「イオン」に並んで困難な



単元としてあげられている。

吉岡有文による「理科教育における自然認識研究のとらえ直し」日本理科教育学会では、広く認識されている次の点が指摘されている。「静水の圧力変化は同じ大きさで伝わることは知られている。しかし、多くの生徒は、最初に力を加えた方向に最大の圧力が伝わると思う傾向にある。たとえば、注射器の中に水を入れ小さな泡をつくる。注射器にゴム栓をして、水平にしたまま、ピストンを押し込むと泡はどうかと生徒に問う。（「泡入り注射器」問題と呼ぶ。）多くの生徒は泡はピストン方向に動くと答える。」である。これは水压により泡が四方八方から均一に押されて、大きさが均一に縮むのが正答である。それが、力を加えた方向への移動と予想されていて、十分統一的な水压の理解がなされていないことがわかる。また、吉岡は「「水压」と「水の流れ」は区別されない。」との趣旨の報告も述べている。

浮力に関する調査にも大気圧、水压に関係する問題点が散見できる。「子どもの素朴概念」日本理科教育学会編を始めとする、山梨大学の堀哲夫の研究による一連の報告や、稲垣成哲「物体の形状が浮力の認識に及ぼす影響」人間科学研究vol.3 No.1, 新里和也他「水中の物体に働く浮力の認識に関する調査」北海道教育大学紀要教育科学編62 (2) p253-262によると、「浮力のちがいは形状よりも深さによる」「深いほうが浮力は大きくなる」が知られており、大学生に至るまで調査対象の3割が持ち続けている報告がある。「水面よりも底のほうが広い形状は浮力が大きい」「円錐のほうが大きい」などの形状の印象で、もちあげられ、支えられやすいという印象と浮力の大きさが直結している。また重さとの関わりでは「どちらも同じ」（4割程度）に対して「浮力は軽いもののほうが大きくはたらく」（3割）が「重いほうが大きくはたらく」（2割）を上回った。また、浮いていく、沈んでいくなど位置変化する物体に対する浮力の認識には、沈むときは働かないなど一貫性のない認識のほうが、一貫性のある認識を上回る報告もあり、浮力に関して水压概念との混乱も報告されている。

これらは、水の重さと水压、水の動きと水压が混同されていることに原因がある。一方で水压を生じさせる水分子の運動のイメージが欠けている。

教員の側にも原因がある。千葉市教育センターによる理科教育に関する研究「千葉市理科教員の現状と課題」平成23年度紀要第20号には、小学校教員が、小学校4年の気圧や水压関連の授業にある程度の苦手意識をもっている報告がある。力という目に見えぬ概念の中でも、水压、大気圧というのは特に意識しにくいものである。教員の側がしっかりとしたイメージを持ち、それを子どもに伝達していかないかぎり、「目にみえない事象」についての抽象概念の獲得は難しい。

前回の報告に、下条隆嗣 他5名「小学校理科への物質の粒子像導入の可能性—児童の持つ粒子像についての調査—」東京学芸大学紀要自然科学系58 pp.15-39, 2006において、小学校理科への物質の粒子像導入の可能性に関して、児童の持つ粒子像を調査した報告\*1の中で、原子・分子の知識を聞いたことがあっても何か分からないか、知らないと答えながら、「物質を構成している粒」をイメージする力があることが報告されている。ま

た、水溶液は粒子像を考えやすい現象であり、鉛筆の芯などの固体は教師の簡単な教示で粒子の集合体だと捉えやすくなること、反面、気体は匂いの拡散などの場合も粒子像を持って考えにくいとの報告がでている。ただ子ども達は、これらの粒子像がかるうじて目に見えるか、顕微鏡で見える大きさとしてイメージし、極限として考えてもイメージできる小ささに限界がある報告もある。

そして、「すべての物が目に見えないくらいの小さな物でできている」というキーワードの説明には、「そうかもしれない」と答える児童と、「信じられない、実感が沸かない」と答える児童がいて、個人差があると報告されているが、それでも、この簡単な教示で、日常現象を粒子像を用いて考えやすくなるという効果が認められている。

多くの場合、我々は何が正しいかについての直接的な経験を持つことはないことも過去に述べてきた。「理論」を提出する科学者の活動を信頼し、それに基づいて我々の世界認知を構成する。もちろん構成にあたっては、我々の経験に基づく判断を行う。しかしながら初等教育に置いては、そのような判断力の育成自体が途上であり、事実の確認と、それに基づく判断自体を学習者に期待し過ぎることには問題がある。むしろ、初等教育から中等教育にかけては、学習者は教師の提示するものを信頼し、それを学習することによって、直接的な経験では獲得が困難な世界の有様を知り、それに基づいて自己の判断力を育成することが主要な教育目的となっている。

そのため、粒子像のような、日常的経験を越えたところにある自然理解を構成するにあたっては、学習者の経験を基盤とした、かつ概念的にも適切な「たとえ」を表示して行くという教師の働きかけ、特に学習者に対して教師への信頼感を育成していくことが無視できぬ比重を占めることになる。「水圧」、「大気圧」においても、運動する粒子の表現というが欠かせない。

イメージの教示は現象の観察と抱き合わせで、このように目に見えない概念の統一的な理解に効果があることは他にも多く報告されている。

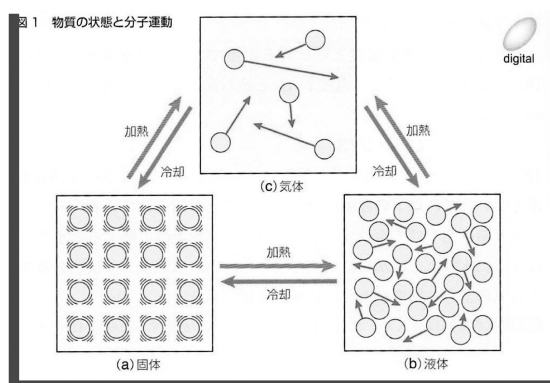
#### ④気体分子運動論と圧力の間の連環が悪い点

以上の例のような「大気圧」に関わる生徒のプレ概念の克服の難しさを、解決できる可能性として今回導入された小学校からの「粒子」イメージを活用できるはずであるが、現時点では効果的な活用がなされていない。改定は小中高と連動して行われたのであるから、全体を視野に入れた教科書づくりも期待されるが、制作現場での連携は現時点ではほとんど機能していない。

実際、「大気圧」に関して粒子の運動をイメージして理解する場面は、高校で物理を選択しないかぎり巡りあう事はない。

中学で登場する下図では、まだ十分には分子運動が表現されていない。しかし、唯一運動をイメージさせている箇所でもありここを効果的に利用して、運動状態をイメージさせるべきである。

また、中学校理科の指導要領は「大気圧」の扱いで粒子性と、その運動への言及はない。



(図7) 東京書籍 高校教科書 物理1 p222

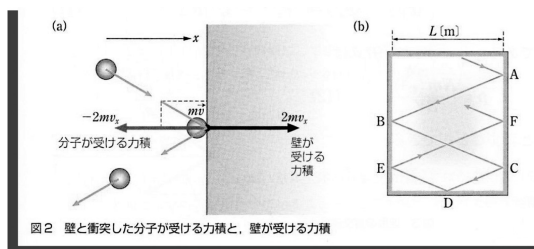


図2 壁と衝突した分子が受ける力積と、壁が受ける力積

東京書籍物理2 p183

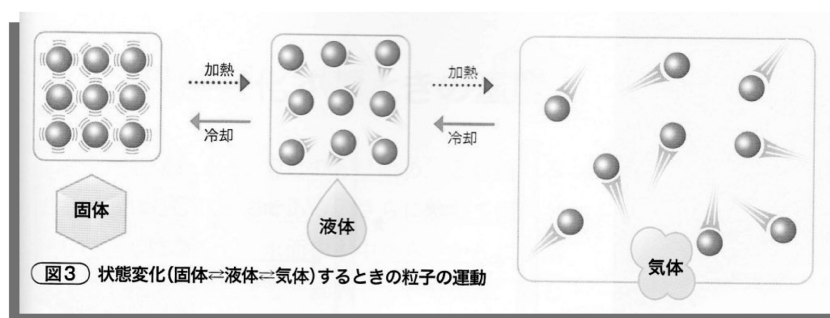


図3 状態変化(固体⇄液体⇄気体)するときの粒子の運動

(図8) 東京書籍 中学校教科書 新しい科学1年 p

粒子の運動エネルギーにも言及しない。気体の表現で、粒子の衝突を圧力と捉えるイメージも登場しない。せっかく、図8のような、粒子の運動状態の違いをイメージさせるような図が登場しながら、十分に「大気圧」との連携が図られずに終わっているのである。この段階が抜けているために気体分子運動論と圧力の間の連環は極めて悪いまになっている。

### ⑤高校の前段階として、動く粒と大気圧のイメージを与える展開例を考える

小学校から粒子を重視する以上、その御利益をさまざまな場面で展開すべきである。もともと粒子とエネルギーという二本柱をたてながら、その連関が悪いのでは意味が無い。イメージとして提示する粒子に、運動と運動エネルギーを見た上で、それを多くの現象に活用しないのは問題である。原子、分子、イオン全てに運動があり、それが世界の現象を生じさせているという、重要な基本要素である点が活用できなくては、関連現象の解釈が統一的になされない結果を生む。

「大気圧」において、子どもにも理解できる身の回りの話題から、展開する例を考えてみよう。

水の三態のイメージ図から発展させて、空気分子は自由に飛び回る気体であるイメージを持つことができると仮定しよう。空間を自由に、勢い良く飛び回っているとするのである。これをもとにどのように展開すれば、身の回りの「大気圧」の現象を解釈できるようになるだろうか。

#### 【ストローという身近な製品】

一人用の紙パックのジュースはストローが付属している。本体についているストローを取り外して伸ばし、とがった先で飲み口のふた部分を突き破って飲む。飲んでいって中身がなくなってくると、紙パックがつぶれてきて飲みにくくなるのが難点だった。最近これを解決した、エチケットストローという製品がある。これはストローで飲んで口を離すときに下品な音がしないという宣伝文句を持ち、ストローに不思議なくぼみがついている。くぼみは溝状で、飲み口に近い部分の側面に、1、2 cmの長さで、縦に細く浅く入っている。飲み口にストローの形に丸くあいた穴は、ぴったりとストローの側面に密着していて、細い溝があると、その穴とストローの間にわずかな隙間が生じる。ジュースを飲んで中身が減っていくと、中身が減ることで紙パックはつぶれていくが、溝があれば隙間から空気が入って、紙パックはつぶれることはない。

当たり前に使っているストローだが、細い口の入れ物からも、大きな瓶からも突き刺すだけで適量が飲める、この便利なものを誰が使い始めたのだろうか。古代エジプトの壁画に、ビールをおぼしきものを瓶からストロー上のもので飲んでいる様子が描かれていたり、昔話の「やまんばと馬方」に屋根の茅を抜いて、天井裏から囲炉裏の甘酒を吸い上げてしまう話が出ていたり、古くからその利用方法に人は気がついていていたものと考えられる。

ところで、昔話の馬方は二階の梁から炉端の甘酒を飲んだのだから、かやぶき屋根の材がチガヤやススキでは1 mに満たないので、これはヨシを使った屋根だったのだろう。これなら1本で4から5 mの長さがあるから、吸い上げるのに、さぞ苦労したことだろうが、梁からおそらく3～4 mは下にあった甘酒も飲めたはずである。この梁の高さが、もし、10 mで、そんなに長いヨシがあったとしても（まあそんな長い葦はないが）、馬方は甘酒を飲めただろうか。じつは、どんなにがんばってものめなかったはずなのである。

ストローで吸い上げることでできる高さには限界がある。水やジュースならおよそ10m。ストローだけではなく、吸引ポンプはある高さ以上まで水を引き上げられない。この事実は昔から、地中深くから直接水を吸い上げる必要性があったために、広く知られていた。

もともと、灌漑のための揚水や鉱山などの排水では、水をいかにうまく運び上げるかが課題で、古くはアルキメデスの螺旋ポンプが使われていて、らせん状の中を水を徐々に上に持ち上げていく方法がとられていた。これはポンペイの遺跡でも発見されている。

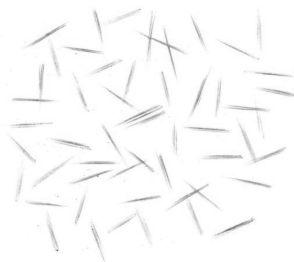
17世紀初頭、需要の増加で金属の採掘に拍車がかかり、深く掘り進むにつれて、排水の際に吸引式の「10mの限界」が大きな問題になってくる。当時のイタリアのトスカーナ公がガリレオに揚水の相談をしたとの逸話も語られるほどの大きな問題が、大気圧と真空の追求に拍車をかけたと考えられている。

### [ストローを取り巻く動く空気分子]

直径1mをこえる巨大な風船を自転車の空気入れを使ってふくらませて口を閉じ、投げしてみると、受け取るとき、ちょっとおどろくほどずんと衝撃をかんじる。私たちを取り巻いている空気は、なるほど重さがある。下敷きの真ん中に粘着テープでビニールひもととりつけ、引っ張り上げようとしてみると大きな重みがかかっているのがわかる。どのくらいの重さかという下敷き1枚にかかる空気の重さは約450kg 重である。これが見上げる空にまで続いてある地球を取り巻く厚い大気の重量である。空気は地球の重力によって地上に引き止められていて、そんな大気という気体の海の底に私たちは暮らしている。

空気は酸素や窒素、二酸化炭素などの気体が混ざったもので、どれも、原子どうしがくっついた分子を作って行動しています。空気を作っている気体の種類は、ほんの少しだけ混ざっているものも合わせるとかなり多いので、面倒をはぶいてこれからは空気の分子と呼ぶことにする。

ストローのような身近ながら歴史的にも興味深い話題と、ちょっとした体験を経て、この空気の分子がどんなふうに、下敷きに乘っかっているかを生徒に考えさせてみるとよい。私たちがブランコに座るように、みんなでひよいと乗っかっているから重いのか。それとも、トランポリンで跳ねて遊ぶように、下敷きの上で暴れているから重いのか。これを、空間を自由に、勢い良く飛び回っている空気分子を下にイメージしてみよう。

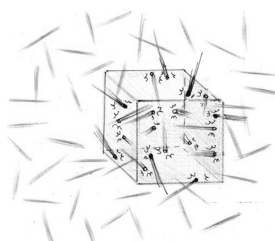


まずそこに箱を持ってきたらどうなるか。





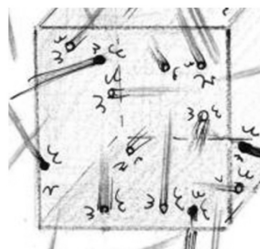
ふたを開けた箱なら、空気は自由に入出入りして、箱の中も外も同じように飛び回るだろう。それからふたを閉めても、内も外も同じように空気分子は飛び回ると思える。



ただし、何もないときとちがうことが一つ。箱の壁にぶつかる。

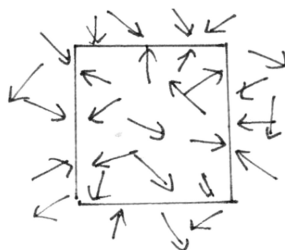
こんなふうに、身の回りでも跳び回っては壁や床やあらゆるものにぶつかり、それを押しているというイメージは、比較的素直に受け入れることができよう。

箱のかべに注目してみよう。飛んできた空気分子は、かべに邪魔されてすすめないの  
で、ぶつかるしかない。



かべの内側からも外側からも、同じくらいの数、同じくらいのいきおいで、さまざまな向きから、空気分子がぶつかってくる。運動場で自由自在に駆け回っていた子供達が、教室や廊下でも同じように駆け回って、内からも外からも壁にぶつかっている感だ。

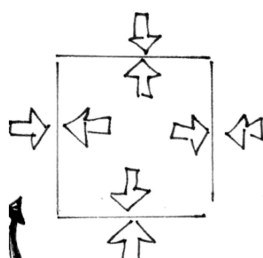
その空気分子の動きを矢印で書いてみる。



これがかべを押す力になる。

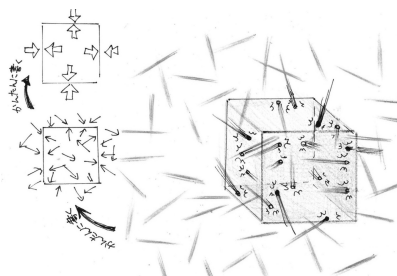
いろんな角度でぶつかるから、いろんな向きの力である。

ただ、かべを動かすということを考えたとき、そのうちのかべに垂直な向きだけを書いて、大小を比べると、かべがどちら側に動くかがわかる。

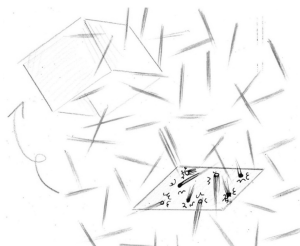


こんなふうに、同じ大きさならば、かべは動かない。

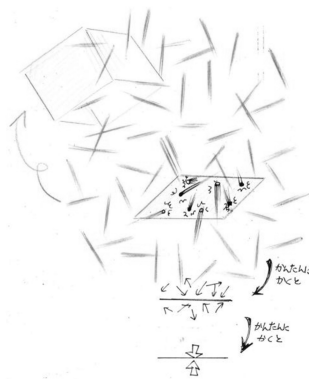
つまり、こういうことである。



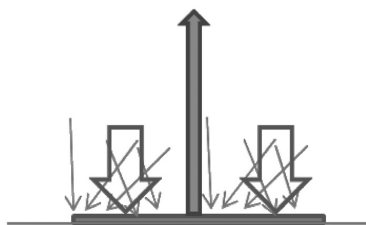
では、次に、下敷きについて考えるために、箱の上側を取り去って、底の一枚のかべにしてみる。



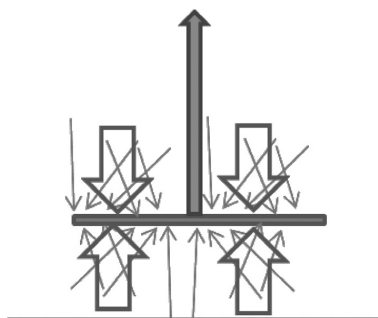
閉じ込められていた空気分子は自在に飛んでいきますが、下に残ったかべには相変わらず上からもした空も衝突している。



下敷きにもたくさんの空気の分子がぶつかっている。机の上にあるときは、机に下の面が接しているから、もっぱら上からぶつかってくるので、とても持ち上げにくい。



一旦持ち上げてしまうと、上からも下からも同じように空気の粒がぶつかるので、持ち上げる瞬間の大きな抵抗はなくなる。



つまり、空気の分子は下敷きに上にのんきに座って乗っかっているわけではない。勢い良くぶつかって、弾かれて、また飛んでいくということを繰り返している。

こんなふうに押す力を空気の圧力と呼ぶと定義する。「大気圧」の一つのイメージ化の例である。

このイメージが一度完成すると、教科書で多用される面を押す矢印での大気圧の表現

は、四方八方のどの位置、どの向きでも意味を持つものとなる。

空気は温度が高ければ分子の跳び回るスピードが増すので、ものに勢い良くぶつかって押し、熱いと空気の圧力が大きいことも受け入れやすい。空気が薄くなり、分子が減ると、ぶつかって押す回数が減るから、壁全体では圧力が減ること、空気分子の数が周囲より圧倒的に少ないと、周囲の分子ががんがん衝突して、押ししたり、穴があると、プシュー！と、勢いよく飛び込んだりすることも類推が楽になる。

ここであらためて、ストローでなぜ、ジュースが吸い上げられるか考える機会を与えると良いだろう。

ジュースやストローを取り巻く空気には分子が跳び回っていて、あらゆるところにぶつかって押して、圧力を与えている、ストローの中にも空気があり、ジュースの面を押している、ストローの外側のジュース面も同じであるということは、受け入れられやすくなる。

ストローをくわえて吸うと、ストローの中の空気が口の中に移動して、ストローの中の空気分子の数が減り、ストローの中のジュースの面を押している力が減る。これを減圧と呼ぶことを示す。

一方で、ストローの外側では先ほどと変わらぬ空気の圧力がかかっている。

例えば満員電車で扉や壁が押し返している限り、沢山の人が詰まっている車内も、扉が開いて押えがなくなると、どっと底から人が流れ出す。

ストローも同じ、他のどの部分も同じように空気の圧力がかかっているというのに、ストロー内部だけ減圧され押さえがなくなったので、中をジュースが駆け上り、飲むことができる」と説明する。

ただ、空気が押す力の大きさも無限ではない。周囲のジュース面をある一定の大きさで押しているのだから、それで押し上げ支えられる水の重量には限界がある。それが管10mの限界の理由を提示できるわけである。

イギリス行ったとき、コーヒー用のミルクポーションを開けると、その瞬間ミルクがびよっと飛び出して困った。ところが、日本のメーカーはそうならないように工夫していると聞いてどのようにしているのか調べてみたら。

すると、ミルクポーションの内がわの圧力を、周囲の空気の圧力より低くしてある、減圧してあるという。そうすると、口を開けた途端、外側の空気が、内側に入り込み、ミルクポーションの内側の方が、空気分子がすいているから、混み合った外から、ドッと飛び込むわけである。そのため中のミルクが押されて外に飛び出しにくくなる。この説明も生徒側に求めることができるようになる。

ほかに、現実には不可能だが、宇宙空間でストローでジュースを飲めるかも考えさせると面白い。ストローでジュースを飲むためには、空気が必要であることを考えれば、想像がつく。たとえジュースを容器物に入れてストローをさすことができて、空気がほとんどないのだから、いくら吸ってもストローの中の空気が減って、それにともなうジュースが上がってくることはない。宇宙ステーションの中ならば、ふわふわ体が浮いていようと、空気がある。ジュースをコップから飲むことは、ジュースが水滴になって散らばって

しまうのでやはりできないが、密閉の袋に入れたジュースにストローを差してなら、ちゃんと飲むことができる。

また、高い山に持っていったお菓子の袋が膨らむのも説明できるようになろう。高い山の上に行くと、圧力も小さくなり、いつもは釣り合っていて、ほどよい大きさでいられる理由の内圧が、外の空気の圧力より大きくなってしまう。空気分子の動きで考えてみると、お菓子の袋も、箱の時と同じように山の下でできたときに、外と釣り合う気体分子が中に入れられる。空気ではなく、中味が傷まないように窒素が多いが、それはさておき、圧力が釣り合っていることには変わらない。山の上に行くと、空気は薄くなり、飛び交う分子の数が減る。まわりの分子は減るが、袋の中は変わらず、袋は外に向けて押し広がることになる。

### ⑥教科書に欠けたものの提示場面を増やす重要性

これまでに述べたように、新指導要領は経験を媒介としての概念形成を重視する方向へ一歩踏み出している。このことは高く評価するべきである。しかしながら、義務教育である小学校中学校の9年間、さらにはすでに高校進学率が90%を越えていることを考えに入れると、12年間の教育過程の間での概念形成という側面に対する考慮が欠けていることも指摘しなければならない。ここでは「粒子」イメージが理科分野の概念形成に関して与える影響を例題として取り上げてきた。教科書作成においては、小・中・高で教科書作成が分断され、また全学年を通して有機的に概念の発達を促進させるような仕組みが存在していないことが大きな問題となっている。さらには、「教科書」では指導要領に取り入れられた事項以外は記述することができないという制度上の問題点がある。本来であれば、「粒」概念を小学校の時点から、高校に至るまで、どのように連続的に発展させていくかと言うことこそが指導要領に取り入れられ、教科書作成に反映されるべきではある。

しかしながら、現行の指導要領でこのように概念を取り入れられていない以上、「教科書」でもってこのような継続的な概念形成の補助をおこなうことは実質不可能である。

現状において考えられることは、教科書に付随する副読本を作成して、このような副読本を通して継続的な概念形成のプロセスを強化することである。そのために必要なことは、各教科において、鍵となる抽象概念を洗い出し、そのような抽象概念形成のプロセスが教科書の中でどのように把握され、援助されているかを検証する必要がある。そして、そのような概念形成を補強するためには、どのような素材を、どのように提示していけば良いかを把握しなければならない。

従来の抽象概念を知識として記憶させ、ペーパーテスト上で適切な回答さえできれば良いとする知識偏重型から、学習者が眼前に出現する現象を通して概念を形成していくことを重視した教育を推し進めていくためには、現行の指導要領、あるいはそれに基づいて作成された教科書ではまだ十分とはいえない。このような概念形成を進めていくことを重視するのであれば、そのような概念獲得の過程を補佐する教師のための、より詳細な副読本が必要とされる。教科書の整備が不十分である現時点では、我々はそのような副読本の作成を推進していく必要がある。



## The acquisition of “Particle” image in Physics in schools. -problem of textbook writing

Toshiya Yuki, Chiyoko Yuki

In the previous article, we have described the importance of concept formulation. Japanese education is historically adhered to the subjective education. This tendency is partially improved in the revised Japanese GENERAL POLICIES REGARDING CURRICULUM FORMULATION. In new policy, the importance of formal education is valued higher than previous policies. This is, certainly, an effort to re-vitalize Japanese education.

This shift is not sufficient for average students to acquire decisive abstract concepts required for the full understanding of complicated subjects. For example, Physics requires abstract concepts that would not be developed in daily experiences of average students. Those concepts require several layers of paradigm changes.

In this article, we analyze how the students acquire the concept of particle by examining the Physics textbooks from elementary school to high school.

The problem of textbook is that the text authors tend to write only for one grade year. The interaction of concepts acquisition through entire school years is neglected in the present Japanese physics textbooks.

To correct this problem, the textbooks should be arranged considering the concepts acquisition process in the entire school years. This, however, is very difficult in the present situation. Otherwise, we must produce a series of sub-textbook devoted to help teachers in order to facilitate the students' acquisition of basic abstract concepts through entire school years.