

高校生の物質量とモルの個別的な概念形成

— 量と単位の関係性構築の視点から —

High School Students' Separated Understandings of "amount of substance" and "mole":
A Focus on Relating Quantity with Unit

内ノ倉 真 吾

Shingo UCHINOKURA

（平成20年10月6日受理）

1 はじめに

一般的に、物質量やその数量的な関係の学習は、「モルアレルギー」と呼ばれる現象を引き起こすなど、認知的だけではなく情意的にも、高校化学の課題の一つになっている¹⁾。このような問題には、物質量とモルの概念史的な背景も指摘されている²⁾。

物質量は、個数との数的な対応関係があると同時に、質量や体積との量的な対応関係があるという、多面的な対応関係をもつ。しかし、この物質量の数的な対応関係を、高校生、大学生、一部の教師は、一面的にしか捉えられない傾向があることが、繰り返し指摘されてきた³⁾。例えば、片平らの調査によると、モルが物質量の単位であることを理解している高校生は、2割程度しかいない⁴⁾。また、物質量の数的な関係を指導する上で、「物質量はいくらか」と「何モルか」という問題に対する生徒の応答が異なる状況がある⁵⁾。これらのことは、物質量とモルの意味、特に、量と単位の関係性が捉えられていない一つの証拠とも考えられる。それでは、いかにして物質量とモルの関係が、量と単位という関係として理解されていないのだろうか。この実態については、ほとんど明らかにされてはいない。そこで本稿は、量と単位の関係性構築の視点から、高校生の物質量やモルの概念形成の実態を明らかにすることを目的とする。

2 高校生の物質量とモルの関係性構築の実態

平成17年6月中旬に某高等学校2年生（化学I履修者29名）を対象にして、質問紙調査を行った。続いて、その質問紙調査において、物質量とモルの概念化に関する記述が見られた生徒（8名）を任意に抽出して、個別にインタビュー調査を行った。

まず、質問紙調査では、「物質量」、「質量」、「原子数」の数的な対応関係についての理解を探るために、炭素と鉄という2つの物質（単体）の量的な関係を比較する問題を設定した（表1）。生徒に対しては、具体的には、物質の特性を表す3つの数量のうち、1つを固定して、残りの2つの数的な関係を比較し、その理由を回答することを求めた。

表 1. 物質の数量的な対応関係の比較問題

状況設定	状 況	比較問題	
質量が同じで、 原子数、物質量の比較	炭素 1 g と 鉄 1 g	原子の個数が多いのは、 どちらか (問 1)	物質量が大きいのは、 どちらか (問 2)
原子数が同じで、 物質量、質量の比較	炭素 1 コ と 鉄 1 コ	物質量が大きいのは、 どちらか (問 3)	質量が大きいのは、 どちらか (問 4)
物質量が同じで、 質量と原子数の比較	炭素 1 mol と 鉄 1 mol	質量が大きいのは、 どちらか (問 5)	原子の個数が多いのは、 どちらか (問 6)

続いて、インタビュー調査では、①質問紙調査の回答の内容、②物質の数量的な対応関係、③物質量とモルの関係、④物質量等の授業内容について、生徒の回答状況に応じて、適宜質問順序および表現を変えて質問した。インタビューの所用時間は、生徒一人あたり平均して30分程度であった。各生徒に了解を得た上で、インタビュー中の会話はすべて録音した。そして、録音した音声情報については文字化し、プロトコルデータとして分析に用いた。得られたプロトコルデータには、質問事項に対する回答以外にも、物質量等の理解を探る上で有用な情報が含まれると考え、すべてのプロトコルデータを分析の対象とした。

1) 数量的な対応関係の比較問題の結果

物質の数量的な対応関係を比較する問題（質問紙調査）の結果は、表 2 および図 1 に示すとおりであった。

表 2. 質問紙調査の正答率

設 問	正答率
問 1	33.3%
問 2	56.7%
問 3	23.3%
問 4	73.3%
問 5	53.3%
問 6	50.0%

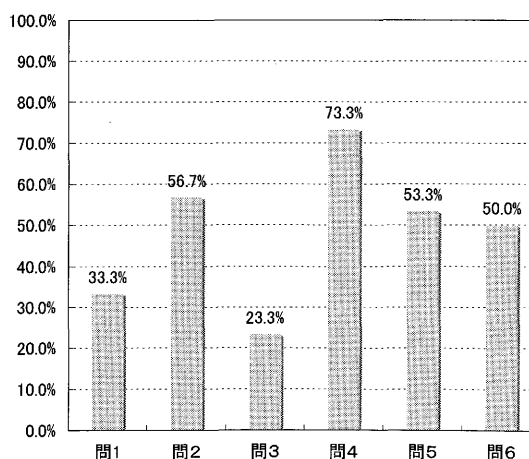


図 1. 数量的な対応関係の比較問題（正答率）

問 4 は、原子数と質量の関係を考慮するまでもなく、炭素よりも鉄の方が重いという日常的な知識を適用できさえすれば、回答できる可能性もあり、他の設問と比べて正答率（73.3%）が高い。一方、問 4 を除く他の設問は、せいぜい半数程度の生徒が正答したのみであった。もちろん、正答した生徒であっても、その根拠までもが妥当であるとは限らない。この点については、インタビュー調査にて補完し、その分析の結果は、以下に示す。

2) 量と単位の関係性とその構築の段階

物質量とモルの関係とは何かと言えば、時間と秒、長さメートル、質量とグラムなどと同様に、量とその単位の関係である。一般的に、あるものの性質を量的に捉えるとき、直接的な比較と間接的な比較が可能である。長さであれば、2つのものを直接並べて、比較することができる。また、質量であれば、天秤を使って2つのものを直接的に比較することができる。直接的な比較と比べて、より広範囲に適用できるのが、間接的な比較である。この間接的な比較では、ある基準、すなわち、単位を決定して、その単位の倍数としての量を比較する。それぞれの量によって異なるとは言え、直接的な比較や道具を使っての測定行為や概念的な操作による間接的な比較を通じて、量と単位の関係性が構築される。物質量とモルについても、量と単位という関係である以上、同様の関係が成り立つ。

物質量とモルは、時間や長さと同じように、量と単位の関係概念ではあるが、その関係概念の形成過程は、他の量と同じとは言えない。そこで、物質量とモルの関係をどのように認識しているのか、質量、個数などの他の数量との関係も踏まえて、実態を探る必要がある。

一部の生徒を除いて、ほとんどの生徒が、物質量とモルの間にある、量と単位の関係性を認識していない。しかしながら、生徒の関係性についての理解には、いくつかの段階が存在することが指摘できる。物質量の学習では、物質量とその他の量との関係（外在的な対応関係）と、量と単位の関係（内在的な対応関係）を同時に学習することになる。この物質量に関わる二つの対応関係を基準にすると、生徒の実態は大きく次の四つに分類することができた。すなわち、その段階とは、第一に、数量的な対応関係などに基づいて物質量とモルの関係自体がないと考える段階、第二に、数量的な対応関係とは異なる何かしらの関係性を想定できる段階、そして、第三に、数量的な対応関係と量と単位の間を区別して、類推的に捉えられている段階、第四に、物質量とモルの関係が単位と量の関係であることを認識している段階である（表3）。ただし、これらの段階は、認識の程度に関する段階であって、認識の発達が進行する段階ではない。なお、インタビューした生徒8名のうち、第一段階に相当する生徒が5名、残りの三つの段階に相当する生徒がそれぞれ1名ずつであった。

表3. 物質量とモルの関係性に関する認識の段階とその内容

分類	認識している内容	生徒数
1	物質量とモルは、まったく関係がないと思っている（もしくは、そもそも両者を理解していない）。	5名
2	物質量とモルは、関係性があること自体は認識している（ただし、内的・外的な関係の区別は不明瞭）。	1名
3	物質量とモルの関係を、アナロジーなどにより、質量や原子数との関係（外的な関係）と区別できている。	1名
4	物質量とモルの関係を、明確に量と単位の間（内的な関係）として理解している。	1名

3) 量と単位の関係性構築の段階とその特質

例えば、生徒Aは、モルとアボガドロ数⁶⁾との数的な対応関係について理解できている一方

で、物質質量とモルの間にある量と単位の関係性については、まったくと言ってよいほど理解していなかった（事例1）。なお、プロトコル中に示したアルファベットAは、インタビューした生徒Aを表し、Rは、調査者である筆者を表す。表記の方法は、以下同様である。

〔事例1〕 A：生徒A R：調査者

R：物質質量とモルがセットで出てきているのね。この2つの関係はどうだと思う？

A：物質質量とモルですか？

R：うん。関係していると思う？同じようなところに、習っているんだよ。

A：はい。えーっ、物質質量、1モル、うーん。モル、1モルっていうのは、 6.0×10^{23} という数っていうか、それは個数ですよ。

R：うん。まったくつながりがあるように見えない？

A：見えない。物質質量と質量は違うんですよ？物質質量は重さですよ？

生徒Aは、物質質量とモルの間に関係性が存在すること自体を認識していないか、もしくは、問われている関係とは、数量的な対応関係のことを意味し、その関係なら存在しないと思っている、いずれかの状態にあると考えられる。いずれにせよ、物質質量とモルの関係性において、量と単位の関係が認識されていないことには変わりない。したがって、生徒Aは、量と単位の関係性構築の第一段階にあると見てよいだろう。

物質質量に比べて、モル、特に1モルがアボガドロ数個の原子・分子数と対応していることについては、生徒にはよりよく理解されている。ただし、この1モルと個数との数的な対応関係が形成されていることが、別の量的な対応関係や量と単位の間を構築し難くしていると思われる。つまり、1モルは、個数のことを表しているのだから、質量などと関係することは思えないという状況を作り出している。

同じように生徒Bは、「 $1\text{mol} = 6.0 \times 10^{23}$ 個」という1モルの数的な対応関係を指摘する一方で、物質質量とモルにはこのような数的な対応関係がないことから、両者がまったく関係のないものと考えている（事例2）。

〔事例2〕 B：生徒 R：調査者

B：物質質量とモルですか？どんな、どんな関係か？

R：関係があったのか、まったく違うものなのか、似たようなものだったのか？

B：関係があるもの？えっ？物質質量とモル、ですよ。

第二段階にある生徒Cは、物質質量とモルにはそもそも数的な対応関係がないものの、強い結びつきがあるということは考えていた。しかしながら、その強い結びつきが何であるのかは、明確な考えはもってはいなかった。そこで、量と単位の間を明確にするために、他の量と単位の間をアナロジー（analogy）として提示した。このアナロジーは、よく知っている領域として質量とグラムの間、体積とリットルの間を用いて、生徒Cが物質質量とモルの関係についてもっている考えが明瞭になるように意図して用いた。

生徒Cは、物質質量とモルが量と単位の間であることについて、明確に理解していなかったため、両者が互換的に活用されることが「ごちゃごちゃ」と感じている。しかし、このアナロジーによって、物質質量とモルを量と単位の間として捉え直すことができている（事例3）。

〔事例3〕 C：生徒C R：調査者

R：重さだったらグラム、キログラムっていう単位で表す。物質質量だったら、モルという単位で表す。体積でだったら、ミリリットルとかリットルとかで表す。

それが物質質量とモルの関係。どうかな？ちょっと違いがわかるかな？

C：（沈黙15秒）じゃあ、物質質量の単位がモルってことですか？

物質質量の多面的な関係である、数量的な対応関係を理解すること自体が難しく、ましてや量と単位との関係との区別をつけるのは生徒にとっては難しい。そのような中で、生徒Dは、数量的な対応関係と区別して、量と単位の関係性をアナロジーとして定式化することができていた（事例4）。

〔事例4〕D：生徒D

D：重さは1キロは。「重さ」っていうのが、「物質質量」で、「1キロ」っていうのが、「1モル」みたいな。こんな感じ。

ただし、生徒Dは、キロやモルが単位であることは意識していなかったが、重さとキロの量と単位の関係を用いて、物質質量とモルの関係を捉えることができていた。また、生徒Dは、数量的な対応関係についても理解することができていた（図2）。

$$6.0 \times 10^{23} \text{個} = \frac{\text{mol}}{\text{物質質量}} = 29$$

図2. 生徒Dによる数量的な対応関係の理解

そして、生徒Eにあっては、「物質質量の単位がモル」であることを明言しており、量と単位の関係性構築の第四段階に到達しており、物質質量の数量的な対応関係についても理解することができている。なお、これまで指摘してきた量と単位の関係性構築の段階で考えれば、第三・四段階にある生徒は、量と単位の関係性だけではなく、数量的な対応関係についても理解できている。

論理的に考えれば、数量的な対応関係が、量と単位との関係を前提として成立している。しかしながら、第一段階にある生徒の実態を考えれば、必ずしも量と単位の関係が、数量的な対応関係の形成の前提になっていない。むしろ、数量的な対応関係を部分的に形成すること、または、適切に形成できないことによって、量と単位の関係性自体を構築することが困難になっていると考えられる。さらには、物質質量やモル、質量などの概念間の混乱を引き起こし、関連の学習を阻害していると思われる。言い換えれば、物質質量概念の形成において、量と単位の関係性が含まれていないことが、当該概念の形成過程に何かしらの問題があることを含意していると言える。そこで、量と単位の関係性が構築されていないことから、物質質量やモルの概念が個別的に形成されていると考え、以下では、両者の概念形成の実態とその特質を検討することにする。

3 質量や計算手続きに関係付けた物質質量概念の形成

1) 重さの種概念としての物質質量の概念化

物質質量は、他の数量と対応関係があるとしても、基本的には一つの独立した量である。しかしながら、物質質量概念は、他の量との関係の中で形成されている。もちろん、他の量と関係付けること自体は問題ではない。むしろ、問題は、どのように他の量と関係付けられているのか、

という関係のあり方にある。量と単位の関係性を構築できていない生徒は、物質量を質量との関係によって概念化している。具体的には、重さの種概念として物質量の概念を形成している。例えば、生徒Bは、質量を日常的に経験する「重さ」として捉え、この質量の意味から物質量概念を形成している（事例5）。

〔事例5〕 B：生徒B

B：物質量と質量はなんか自分的に、なんか違う重さみたいな感じで捉えてしまったから、それでわからなかったのかなあって。

質量の意味から物質量の意味が形成される、この概念化の過程は、アナロジー的な認知過程とも考えられる。アナロジー的な認知過程とは、よく知っているもの（ベース領域）から、新しく知りたいと思うもの（ターゲット領域）へと、ベース領域のもつ意味内容が移行される、すなわち、写像される認知過程である⁷⁾。

ここでは、ベースが質量概念であり、ターゲットは物質量概念である。本来的には、アナロジー的な認知過程では、因果関係などの高次の関係性の写像が優先する⁸⁾。高次の関係性に着目した写像が起これば、物質量と質量は、異なる次元に属する独立した物理量であり、その意味での写像が起こるはずである。つまり、物質量は、独立した量であって、質量とは異なる量であることが含意される。しかし、実際には質量のもつ「重さ」の意味が写像されている。これは、生徒Bが物質量と質量の表面的な特徴である言語表記に着目したことを意味している。このような物質量の概念化は、アナロジー的な認知過程において、高次の関係性ではなく、表面的な関係性に着目して起こる、一つの誤った概念形成である⁹⁾。

そして、「重さ」の意味での物質量と質量のアナロジーは、教師によって教授されたものではなく、生徒自身による自己生成アナロジーである。この自己生成アナロジーは、生徒自身の興味関心や認知状態に基づいて生成され、概念的な理解が促進される一方で¹⁰⁾、表面的な類似性にもみに焦点化される可能性がある¹¹⁾。このアナロジーは、量と単位の関係性についてのものではなく、量と量の関係性についてのアナロジーである。どのようなベース、ターゲットを選択するのかによって、両者の間に成立する類似性は異なったものになる。生徒自身がアナロジーを使って、積極的に物質量の概念を形成しようとしているが、実態は逆に混乱を招く結果となっている（事例6）。

〔事例6〕 A：生徒A R：調査者

A：物質量、質量っていうのは、そのものの量ってことって考えているんですよ。

R：そのものの量って？

A：そのものの量。その物質の量だから、言っていること一緒なんじゃないかなって、自分の中で、考えている質量と物質量って意味が、すごく一緒なので。

事実、質問紙調査でも、4割強の生徒が、物質量と質量などとの区別することが難しいと指摘している。そして、仮に区別しているといっても、物質量はあくまでも重さの一種である（事例7）。

〔事例7〕 B：生徒B

B：物質量は、いえ、1モルあたりの重さですか？

このように、生徒は、物質量を重さの意味で概念化している一方で、物質量と質量との量的な対応関係についてまでは考えが及んでいない。物質量と質量についての量と量のアナロジー

で誤った認知状態にある生徒に、対応関係を物質質量とモルの関係性に修正したアナロジーを提示すると、量と単位の関係性についての理解を促進できた（事例8）。

〔事例8〕 A：生徒A R：調査者

R：3、単位をつけて、3モルと。3モルの物質質量。

A：ああっ、ああっ、なるほど。モルと物質質量の関係ってというのは、物質質量の単位がモルですよって。

このことから、物質質量を重さの種概念として捉える量と量のアナロジーは、生徒にとって特に実感を伴ったものではなく、また、既存の知識と十分に関連付けられたものではない、と言える。そして、このアナロジーによる物質質量の概念形成は十分なものではなく、実感を伴って理解できるような別のアナロジーによって変容可能なものと考えられる。

2) 計算手続きに依拠した物質質量の概念化

生徒は、物質質量と質量との量的な対応関係を理解する以前に、いかにして両者を区別するのか、ということに困難を抱えている。この両者を区別する方法として、物質質量を重さの一種、つまり、質量の別種として捉えることによって、質量との便宜的な区別をしている。

物質質量の概念形成は、重さとの関連付けるアナロジーによるものだけではない。例えば、生徒Fは、両者を区別する別の方法として、計算手続きの差異を利用している（事例9）。

〔事例9〕 F：生徒F R：調査者

R：物質質量と質量って同じものかな？違うものかな？

F：いや、違うと思います。

R：違う、どう違う？

F：どう…なんだっけな？なんか物質質量は、なんつうだろう、なんつうんだろう。

ああなんも、なんも浮かんでこないです。

R：浮かんでこない。違うとは思う？

F：違うとは思う。

R：なんで？

F：え、計算している中で、計算の仕方ぜんぜん違う。

この計算手続きに関する知識は、「物質質量とは何であるのか」という宣言的な知識¹²⁾に対して、「物質質量の計算はどのように行うのか」という手続き的な知識¹³⁾に相当する。生徒が、計算手続きの差異によって両者を区別していることは、計算手続きという手続き的な知識によって、物質質量の概念を操作的に定義している、ということでもある。

宣言的な知識の形式にて、ある概念が表現されにくい場合、一般的に当該概念が操作的に定義されることがある。例えば、長さ、時間、電流の概念などの形成過程では、物差しや時計などの器具を使った測定行為によって定義され、概念化されることもあるだろう。これは、ある単位を基準にした測定行為による量の概念規定であり、本来論理的順序は逆であるといえるが、学習の過程では、操作的に量の概念が定義されることに問題はない。

長さや時間などが単位を基準にした測定行為で概念規定されることがあるのとは対照的に、物質質量は、計算手続きによって操作的に概念規定されている。この点で、物質質量概念の形成過程は、他の量と比べて特異であると言える。高校化学の教科書¹⁴⁾には、「モルを単位として測定した量が物質質量である」という記述が認められるものの、生徒は、このような操作的な定義に基づいて物質質量概念を形成しているのではない。もし、生徒が単位モルによる操作的な定義

によって物質量を概念化していれば、当然の帰結ながら物質量とモルの関係性が構築されているはずである。しかしながら、実際は、単位ではなくて、計算手続きによって操作的に物質量の概念が形成されている側面がある。

4 計数単位や単位変換としてのモル概念の形成

1) 「ダース」のアナロジーと計数単位としてのモル

インタビューしたすべての生徒が、「1モル=6.0×10²³個」という物質量と個数との数的な対応関係があることを理解していた。もちろん、このとき物質量とモルとの関係性が十分に理解されていなかったとしても、1モルと個数との間の数的な対応関係を理解することができている。1モルがどのような量であるのか、という点においては生徒間に差異があるが、モル自体がどのような意味であるのか、という点においては、ほとんど差異がない。

物質量と個数の数的な対応関係、もしくは、モルの定義として、「1モル=6.0×10²³個」という関係性が教授される。この関係性は、「ダース」のアナロジー¹⁵⁾によって説明されることが多い¹⁶⁾。実際、教科書の記述¹⁷⁾や教師の説明¹⁸⁾でも、「ダース」のアナロジーに言及されている。例えば、生徒Dは、ダースとモルを同じような意味をもつと理解している(事例10)。

[事例10] D:生徒D R:調査者
 R:モルをダースにたとえたらどうかな?
 D:1ダースが12本。ああ、同じ意味。
 R:うん?同じ意味っていうのは?
 D:こっちは6.0×10²³個が1モルって、イコールじゃないですか。1ダースっていうのは12本だから、わかりやすいんじゃないか…
 R:わかりやすいっていうのは、似ているって?
 D:似てる。うん、ただ、なんか文字を変えただけ。

「ダース」のアナロジーの認知過程には、「1モル=6.0×10²³個」という関係性の意味が関与しているはずである。そこで、このようなアナロジーの認知過程に着目することによって、モルの意味と概念化の過程を検証できる。

アナロジーのベースである、ダースとは、鉛筆などの本数12という数を一つのまとまりとして捉え、これを新たな単位と考える計数単位である。このような計数単位には、ダース以外にもグロスなどがある。この計数単位としてのダースを「1モル=6.0×10²³個」と対応付ければ、「12本:1ダース=6.0×10²³個:1モル」と表現することができる。この関係性の中では、ダースの場合と同じように、モルは6.0×10²³個を一つのまとまりとして捉え、これを新しい単位と考える計数単位の意味となる。この計数単位の意味でのモルは、生徒の言葉を使えば、「束」というメタファーによっても表現できる。

計数単位としてのモルは、何をどれくらいのまとまりで数えるのか、ということが関心の中心となる。逆に言えば、計量単位ではないため、どの量の単位であるのか、どのように測定されるのかという点には、関心が払われることがない。計数単位としてのモルの概念化は、おのずと量と単位の関係性に着目されることなく進行することになる。

「ダース」のアナロジーによってモルの概念化が促進される一方で、モルを計数単位の意味で理解できず、誤解している生徒が一部にはいる(事例11)。

〔事例11〕 A：生徒A

A：これはCのときですか？これが例えば、さっきだったら、54本で1ダースってことですか？

（中略）

A：1ダースが12。1ダースが12本っていうと、私はこれ見たときに12本。1ダースが12本っていうのわかっているんですけど、Cが12じゃないですか、それが混ざってまして、今の今まで。

生徒Aの誤解では、ダースとモルの関係ではなく、ダースと基準となる12という数へと関心が焦点化されている。生徒Aの考える対応関係とは、「12本：1ダース＝原子量12の炭素原子12個：1モル」、さらには、「12本：1ダース＝原子量54の鉄原子54個：1モル」となっている。このように教科書執筆者や教師の意図したように、必ずしも生徒がアナロジーの対応関係を形成してくれるわけではない¹⁹⁾。教師と生徒の間には、認知的な差異もあるため、アナロジーの活用において、生徒が意図しない対応関係を導く可能性を常に考慮しておかなければならない。

2) 単位変換としてのモルの概念化

生徒は、「1モル＝ 6.0×10^{23} 個」という数的な対応関係や「ダース」のアナロジーなどから、モルを概念化している。また、一部の生徒は、「ダース」のアナロジーとは別のアナロジーを活用してモル概念を形成している。

例えば、「 6.0×10^{23} を1で表して」、「計算して」、「書き方が違う」という生徒Gの回答は、「 6.0×10^{23} 」から「1」へと数を数学的に変換し、その数を「モル」(mol)という記号を用いて表現する、という認知過程の関わりを示唆している(事例12)。

〔事例12〕 G：生徒G R：調査者

G： 6.0×10^{23} を1で表して、そういう感じで計算していったのがモルかな。同じだから。

R：同じものを表しているんだけど？

G：それをちょっと書き方が違うのかなって。

このような認知過程を辿るような直接的な教授は行われていない²⁰⁾。その言明は、生徒が自ら既存の知識を用いて、モル概念を形成する一種の自己生成アナロジーだと考えられる。

では、どのようなアナロジーなのか。アナロジーであるとするれば、ベースとターゲットの異なる二つの領域が存在するはずである。ターゲットは、当然のことながら、モルとアボガドロ数の関係である。それでは、ベースとは一体何であろうか。生徒Cだけではなく、生徒Dも同じような数(6.0×10^{23} と1)の数学的な変換という考え方を、顕在化している(事例13)。

〔事例13〕 E：生徒E

E：多い6.2何とか(6.0×10^{23})を1モルにして、たとえて、たとえているというか、変えたりしているところが。

これらの生徒たちの意味する数の数学的な変換とは、これまでの学習経験と生活経験からよく知っている「SI接頭語」²¹⁾の活用に相当する。

数多くある「SI接頭語」の中から、「1000＝1キロ(記号：k)」を用いた質量の表現を一つの事例として取り上げ、アナロジーによる「モル」の概念化という認知過程を検討しよう。ベース領域としての「1000 g＝1 kg」は、1000という数を、キロという接頭語(記号：k)をつけて変換したものである。キロという接頭語は、10の整数乗の接頭語の一つであり、10の

3乗倍を意味するとき用いる。生徒がよく活用している接頭語としては、他にもミリ (m) などがあり、接頭語のついた数量から接頭語をつけない数量への変換もしくはその逆の変換は、慣れ親しんだ数量の単位変換操作であるといつてよい。

ベースの「 $1000\text{g} = 1\text{kg}$ 」とターゲットに「 $6.0 \times 10^{23}\text{個} = 1\text{mol}$ 」を対応させれば、 1000g が $6.0 \times 10^{23}\text{個}$ に、 1kg が 1mol にそれぞれ対応する。ベースでは、 1000g と 1kg の関係は、キロという接頭語をつけない量と接頭語をつけた量という関係であり、キロが10の整数乗倍の接頭語の意味をもつ。これらのベースの関係性をターゲットに写像することによって、 6.0×10^{23} と 1mol の関係が、モルという接頭語をつけない数と接頭語をつけた数という関係になり、モル (記号: mol) がある一定数 (6.0×10^{23}) の意味をもつようになる。

つまり、このような生徒の認知とは、ベース「 $1000\text{g} = 1\text{kg}$ 」から、ターゲット「 $6.0 \times 10^{23} = 1\text{mol}$ 」へと「S I 接頭語」と考えられるような意味が、モルに付与される認知過程である。もちろん、 1000g から 1kg への変換は、狭義の意味での単位の変換であるのに対して、 $6.0 \times 10^{23}\text{個}$ から 1mol への変換は、単位そのものが変わっているという相違点はある。しかしながら、生徒が、教師の説明を単純に受け入れているのではなく、積極的に自分の知っていることと関連付けてモル概念を形成していると考えられるならば、「S I 接頭語」とのアナロジーもしくはそれに類似した考え方が概念形成に関わっている可能性を指摘できるだろう。単位変換としてのモルの概念化であっても、どのような数量であるのかよりも、どのように単位を変換することに関心があり、量と単位の関係性を構築する契機にはなっていない。

5 おわりに

「 $1\text{mol} = 6.0 \times 10^{23}\text{個}$ 」という関係は、比較的多くの生徒に理解されているといつてよい。しかし、モルが物質量の単位であることが理解されていなければ、上記の関係は、物質量の数的な対応関係が十分に理解できているとは言えない。本稿では、この量と単位の関係性の構築に着目して、物質量やモルの概念形成の実態を明らかにした。

量と単位の関係性についての生徒の理解には、大きく四つの段階があり、ほとんどの生徒が「数的な対応関係などに基づいて物質量とモルの関係自体がないと考える段階」という最も低い段階に位置付けられた。さらに、量と単位の関係性が基礎となって、物質量の数的な対応関係が理解されているのではなかった。また、量と単位の関係性を構築できていない生徒は、 1mol と個数の数的な対応関係は理解できているが、それ以外の量的な対応関係については、ほとんど理解できていない傾向にあった。

物質量とモルの間には、量と単位の関係性が認識されていないために、個別的にそれぞれの概念が形成されていた。物質量については、質量とのアナロジーによって、重さの一種として概念化されていた。しかし、この意味での物質量概念は、特に実感を伴ったものではなく、量と単位のアナロジーを提示することによって変容可能であり、精緻化された概念ではない。また、物質量概念化では、単位モルによって測定される量としてではなく、むしろ計算手続きによって操作的に定義されている、という側面も認められた。

モルについては、生徒は、「 $1\text{mol} = 6.0 \times 10^{23}\text{個}$ 」という数的な対応関係、「ダース」とのアナロジーを活用して計数単位の意味で概念化していた。その一方で、このアナロジーで誤解している生徒もいた。また、生徒たちは「S I 接頭語」とのアナロジーを生成して、単位変換の意味でモル概念を形成していることも推測された。計数単位もしくは単位変換としてのモルの

概念化であっても、量と単位の関係性に着目してはいない。

物質質量とモルの個別的な概念形成の実態を踏まえて、今後は、単位モルによる物質質量の操作的な定義やアナロジーの活用などによって、量と単位という関係性を強調していく指導も必要だろう。

謝辞

本研究を行うに当たり、筑波大学附属坂戸高等学校の福原行也教諭には、各調査の計画段階から適切にご指導とご助言、そして多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表したい。

付記

本研究の一部は、科学研究費（課題番号20830036）の助成により行われたものである。なお、本稿は、日本教科教育学会第31回全国大会（2005年9月）での発表を、さらに加筆・修正したものである。

引用文献および註

- 1) 例えば、高校生を対象にした、次のような本の書名からも明らかであろう。高松正勝（原作）、鈴木みそ（漫画）、『マンガ化学式に強くなるーさよなら、「モル」アレルギー』、講談社、2001。
- 2) 例えば、Furio, C. et al., "Difficulties in Teaching the Concepts of 'amount of substance' and 'mole' ", *International Journal of Science Education*, 22(12), pp.1285-1304, 2000. 今井泉、下条隆嗣、「物質質量（モル）概念の変遷とその高校化学への影響ー物質質量についての歴史的背景から見た教育的問題点ー」、『科学教育研究』、28(3)、149-157頁、2004。
- 3) 例えば、Lybeck, L., Marton, F., Strömdahl, H., "The Phenomenography of the 'Mole Concept' in Chemistry", *Improving learning : New Perspectives*, pp.81-108, 1988. Strömdahl, H. et al., "The Qualitatively Different Conceptions of 1mol", *International Journal of Science Education*, 16(1), pp.17-26, 1994. Staver, J R., Lumpe, A T., "Two Investigations of Students' Understanding of the Mole Concept and Its Use in Problem Solving", *Journal of Research in Science Teaching*, 32(2), pp.177-193, 1995. Case, F. M., Fraser, D. M., "An Investigation into Chemical Engineering Students' Understanding of the Mole and the Use of Concrete Activities to Promote Conceptual Change", *International Journal of Science Education*, 21(12), pp.1237-1249, 1999.
- 4) 片平克弘・高野恒雄・長洲南海男、「モル概念の定義と必要性に関する教科書記述の分析および生徒の意識調査ーモル概念指導のための基礎的資料としてー」、『日本理科教育学会研究紀要』、28(1)、27-34頁、1987。
- 5) このことは、福島県立好間高等学校の伊藤哲章教諭からご教示いただいた。
- 6) 国際純正応用科学連合（IUPAC）の *Compendium of Chemical Terminology* (1997) によれば、「アボガドロ数」は用いられておらず、国際的には mol^{-1} の次元をもつ「アボガドロ定数」を使用することになっている。ただし、本稿では、各生徒の語用法に従って

「アボガドロ数」の語を使用している。

- 7) Gentner, D., "Structure-Mapping : A Theoretical Framework for Analogy", *Cognitive Science*, 7, pp.155-170, 1983.
- 8) Ibid.
- 9) Spiro, R. J. et al., "Multiple Analogies for Complex Concepts : Antidotes for Analogy-induced Misconception in Advanced Knowledge Acquisition", in Vosniadou & Ortony(eds.), *Similarity and Analogical Reasoning*, p.507, 1989, Cambridge University Press.
- 10) Wong, E D., "Self-Generated Analogies as a Tool for Constructing and Evaluating Explanations of Scientific Phenomena", *Journal of Research in Science Teaching*, 30 (4), pp.367-380, 1993.
- 11) Yeung, L., Nancy, L., "Explorations in Promoting Conceptual Change in Electrical Concepts via Ontological Category Shift", *International Journal of Science Education*, 23(2), pp.111-149, 2001.
- 12) E. D. ガニエ、『学習指導と認知心理学』（赤堀侃司・岸学：監訳）、66頁、1989、パーソナルメディア。
- 13) 同上書、66頁。
- 14) 例えば、井口洋夫、木下實、他11名、『化学 I 』、47頁、2004、実教出版。なお、当該校の生徒は、この教科書を使用している。
- 15) モルは、「化学者のダース」という称されることもあり、この表現はメタファーと言うこともできる。ただし、本稿では、メタファーとアナロジーが共に、よく知っているものから新しいものを知る仕組みであるという点で類似したものと考え、語法が煩雑になることを避けるために、アナロジーと呼ぶことにする。メタファーとアナロジーの関係については、瀬戸賢一、『メタファー思考』、1995、講談社、が参考になる。
- 16) 例えば、田村健治、「魅力的で理解しやすい授業展開の開発（I）－単位の取り扱いと物質量（モル）の単元の指導』、『化学と教育』、46(11)、744－745頁、1998。高岸憲二、「化学表計算法－物質量計算の工夫』、『化学と教育』、47(1)、58－59頁、1999。
- 17) 前掲書14)、47頁。
- 18) 平成17年5月14日における当該クラスの授業で、担当教師がこのアナロジーに言及したことを確認している。
- 19) 例えば、Duit, R., "On the Role of Analogies and Metaphors in Learning Science", *Science Education*, 75(6), pp.649-672, 1991.
- 20) 平成17年4月下旬から7月上旬まで、当該クラスの授業を観察したが、担当教師はそのような指導はしていない。
- 21) 独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター、パンフレット『国際単位系（SI）は世界共通のルールです』、2005。