

文字式の理解に関する背景的・根源的要素についての研究

古川 真哉

上越教育大学大学院修士課程 2 年

1. はじめに

文字式の学習に困難を示す生徒は少なくない。平成 15 年度教育課程実施状況調査(中学校数学)では, 単純に計算する問題は前回調査を有意に上回っているものが多いとする一方で, 数や文字式の意味の理解の問題などでは前回調査を有意に下回っているものが多いという見解を述べ, 特に中学校数学において数と式の意味理解の定着の必要性を訴えている。

歴史的な知見からも文字式は数学を創造する上で重要な役割を果たしてきた(グレイゼル,1997;カギヨリ,1997;他)。文字式の有用性ととも実感を伴って理解することや使いこなせるようになることは数学を学習する上で重要である。文字式は数や式からの一般化であり, 抽象である。したがって, 中学校の文字式の指導においては数や式の理解を背景として文字式が導入されている。しかし, 数や式を十分に理解できるようにみえる生徒でも, 同じように文字式を理解できるとは限らない。文字式理解には数や式の理解を含め, もっと根源的な要素があるのではないかと考える。本論文ではこのような要素を「文字式理解の背景的・根源的要素」と呼び, それらの解明と, 文字式指導を改善するための示唆を得ることを目的とする。

2. 文字式の理解について

文字式指導の改善の方向を示唆する研究は数多い(杜,1991;三輪,1996;国宗ら,1997;他)。また, Sfard(1991)の観点から, 文字式にも過

程と結果の二面性があると捉え, 文字式の二面性に関する理解の困難性を指摘する研究も同様である(大塚,2004;清水,1997;板垣,1998;牧野,1996;他)。文字式理解の困難性に対し, 解決を図るための様々なアプローチが提案されている(国宗,1999;谷沢 2001 他)。擬変数を用いた数字式に着目したり(藤井,1998), 数から文字への置き換えに数学的抽象化・数学的一般化が重要であることが指摘されている(北川,1987)。これらの見解に基づき, 平成 16 年 12 月に新潟県内の公立中学校において中学 3 年生を対象とし, 数から文字への移行過程に関する予備調査を実施した。その結果, Kazu と Natu の 2 人の理解に特徴的な差が現れた(【図 1】)。

The figure shows two handwritten solutions side-by-side. The top one is for a student named Kazu. It contains two problems. Problem 5 asks for the weight of 500g of 2/3 kg coins, with a handwritten calculation $500 \times \frac{2}{3} = \frac{1000}{3} \text{ kg}$. Problem 6 asks for the weight of 100g of 2/3 kg coins, with a handwritten calculation $100 \times \frac{2}{3} = \frac{200}{3} \text{ kg}$. To the right, a handwritten equation $y = 3x \text{ kg}$ is written. The bottom one is for a student named Natu. It contains the same two problems. Problem 5 has a handwritten calculation $500 \times \frac{2}{3} = \frac{1000}{3} \text{ kg}$. Problem 6 has a handwritten calculation $100 \times \frac{2}{3} = \frac{200}{3} \text{ kg}$. To the right, a handwritten equation $\frac{x}{3} \times 2 \text{ kg}$ is written.

【図 1】実際の生徒の解答

使用した調査問題は北川ら(1987)の調査問

題に基づき作成したもので、両問は問題構造が同じであるため数を文字で置き換えた形で理解できるように思われた。しかし、そうではなかったのである。問題3については2人とも正しく解答しているが、Natuは分数倍の問題3については実際の計算を施しており、分数を1つの数として扱うというよりも計算手続きのように扱っている。むしろ、Kazuの方が分数倍について正しく理解しているようにも思われる。しかし、問題6ではNatuが正答しているのに対し、Kazuは誤答しているのである。この2人の生徒の違いはどこから生じたのであろうか。中学校数学の文字式指導において、数や式から文字への移行は“単なる”数や式から文字への置き換えではすまされない、生徒にとってみれば大きな壁が存在するものと考えることができる。文字式を理解するためには数や式の理解を含めたもっと根源的な要素《背景的・根源的要素》に着目する必要性があると考えるのである。

3. 文字式理解の捉え直し

3.1. 数学の二つの側面と文字式理解

平林(1987)は次のように述べている。

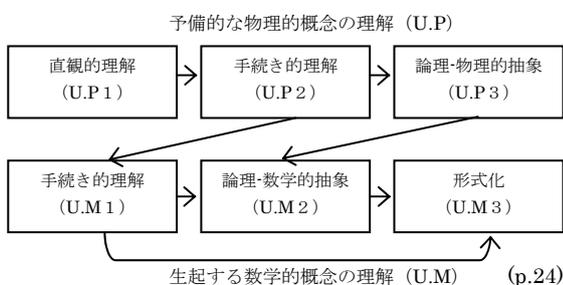
数学は二つの側面をもっている。一つは命題の体系としての側面であり、他の一つは表記の体系としての側面である。(p.386)

ある数学的概念や命題など、理解の対象となる事柄がある。その対象自体を何らかの方法や手段で理解しようと試みる。このことが命題の体系としての数学の側面である。一方で、その対象自体を何らかの方法や手段で表現する必要がある。例えば、偶数という数学的概念を理解の対象としたときに、偶数を表現するのに“2,4,6,…” “○●○●…” “2でわられる数” “ $2m$ (m は整数)”など様々な表記で表現可能なのである。実際、数学的概念の実体そのものを目で見えるように示すことはできない。しかし、何らかの形で表現しなければ考察の対象とはなり得ない。このような側

面が表記の体系としての数学の側面である。このときに、どの表記を用いるかが問題となる。表記によってはその後の思考を発展させたり逆に制限を与えたりする重要な問題を含むのである。また、平林は数学教育の表記論的研究の目的を、単なる用語の整備や記号の統一にあるだけではない。最終的には数学教育の問題を表記されたもの(言語・記号・図)の問題に還元して論じようとしたものであり、数学的活動を一つの言語活動として捉え、言語・記号として表出された活動を通して、内面的な数学的活動を制御するという算数・数学教育の客観的な指導方法論を樹立することとしている。このような数学の二つの側面から文字式理解を捉え直すことを試みる。文字式は数学を創造するための代表的な表記である。文字式には書く際の約束や使用するときのきまりなど文字式使用上の規約が含まれる。文字式理解はまさに表記の体系としての側面である。一方で、表記としての文字式を理解する際には、文字式によって表現される対象にも目を向ける必要がある。文字式が表しうるものは数量であり、数学的関係や数学的構造である。すなわち、文字式で表現される対象は数学的概念である。文字式で表現する際には、その対象自体を理解しておく必要がある。したがって、文字式理解には命題の体系としての理解の側面もあることになる。最終的には表記としての文字式を理解することが目標であるが、その過程には表現の対象となる命題自体の理解も見逃してはいけないということになる。したがって、文字式理解の背景的・根源的要素にもこの二つの側面があると考えることができる。文字式を理解する際には表記としての理解を先に目指すべきではない。表記の対象となる命題の理解が先にあり、理解した命題をよりよく表現できる手段としての表記、それが文字式であるということを理解する必要があると考えるのである。

3.2. 背景的・根源的要素を捉える枠組み

上記の立場から生徒の実際的な文字式理解を捉える枠組みとして Herscovics ら(1998)の理解の二層モデル(【図2】)に着目する。



【図2】理解の二層モデル

理解の二層モデルについて中原(1995)は、以下のように概括している。

《第1の層》予備的な物理的な概念の理解

(以下, U.P) の構成要素

直観的理解 (以下, U.P1)

手近にある観念の全体的知覚に関わる理解。本質的に視覚的知覚に基づく考え方に起因する。およその、数的でない近似が与えられる。

＜例＞乗法場面とそうでない場面との判別。配列が異なっている2つの乗法場面、例えば下の2つの場面の視覚的比較等。

○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
 ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

手続き的理解 (以下, U.P2)

学習者が U.P1 と関連づけることができ、また適切に使うことができるような、論理-物理的 手続きの獲得に関わる理解。

＜例＞加法的場面の乗法的場面への変換。1対多対応的乗法(同数個ずつ配分)場面と1対1対応的乗法(1つずつの同数回の配分)場面との関連づけ等。

論理-物理的抽象 (以下, U.P3)

論理-物理的不変性の構成, 論理-物理的変形の可逆性と合成, それらの一般化に関わる理解。

＜例＞多様な乗法的配置における全体の不变性の構成。例えば, 12個のおはじきの 2×6 , 3×4 , 4×3 等々の配置における不变性の構成, おはじきを用いた, 乗法の分配法則の理解等。

《第2の層》生起する数学的概念の理解

(以下, U.M) の構成要素

手続き的理解 (以下, U.M1)

学習者が、基礎をなす準備的な物理的な概念と関連づけることができ、適切に使うことができ、明白な論理-数学的手続きの獲得に関わる理解。
 ＜例＞数直線や図などを利用して、3飛び、4飛びで全体の個数を求めること。累加の使用等。

論理-数学的抽象 (以下, U.M2)

論理-数学的不変性の構成, 論理-数学的可逆性と合成, それらの一般化などに関わる理解。
 ＜例＞具体物に頼ることなく, 乗法の結果の一意性やある数の因数への分解, 加法に対する乗法の分配法則などの獲得に関わるもの。

形式化 (以下, U.M3)

数学的概念をきちんと定義すること。手続き的理解や抽象の結果を数学的な記号で表すこと。公理化や数学的証明を行うこと。

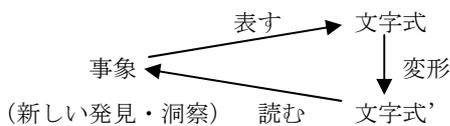
＜例＞ 4×3 , $\bigcirc \times (\triangle + \square) = \bigcirc \times \triangle + \bigcirc \times \square$ 等。

理解の二層モデルは数学的概念の理解を、物理的概念および数学的概念の二層の理解から捉えることができ、理解の状態やその過程を捉えることができる有効な枠組みである。文字式は数学的概念を数学的な記号で表したものである。文字式の理解はこの二層モデルという形式化の段階として捉えることができる。すなわち、表記としての文字式理解の側面である。一方で、この二層モデルは形式化に至る過程を具体的に捉えることができる。物理的概念の理解を含めた数学的概念の理解を経て、その結果として形式化に至るという過程が示されている。この過程は、命題としての理解の側面を深める過程として考えることができる。数学的な命題を物理的概念から理解したり、理解した物理的概念を数学的概念として生起させることによって命題としての理解が深化し、最終的にその結果をどう表すかという形式化の段階へと至るものと考えられる。これにより、文字式理解の背景的・根源的要素を具体的に特定する。文字式理解の背景的・根源的要素とは、数や式の理解を含め、物理的概念をも含めた数学的概念の理解である。そして、文字式は理解した数学的概念を形式的に表現するための表記である。しかし、二層モデルには問題点も

指摘されている(中原,1995)。その中の1つに、形式化の段階には記号的表現や論理的証明など多くのことが盛り込まれすぎている点が挙げられている。実際、文字式で表すことは形式化の中の数学的な記号で表すことを示しているが、文字式理解は文字式で表現することのみの理解ではない。文字式を使うことの理解や文字式を使ってみた結果が何を表しているのかを理解することも必要になってくる。形式化の理解の段階を、文字式で表すことと捉えるだけではなく、より詳細に捉えるための別の枠組みが必要となるのである。

3.3. 文字式利用の図式

理解の二層モデルの形式化には、公理化や数学的証明を行うこと等が含まれる。文字式理解の観点から、形式化をより詳細に捉えるための枠組みとして三輪(1996)の文字式利用の図式(【図3】)に着目する。



【図3】文字式利用の図式 (p.2)

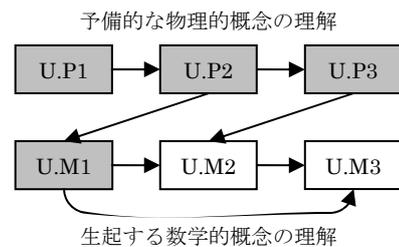
この図式は、点で示される3つの状態：事象，文字式，文字式'と線で示される3つの過程：表す，変形，読むから成る三角形の形状のものであり，3つの過程を一廻りする事で，新しい発見や洞察が得られることが期待されている。この図式は文字式を利用した数学的な証明そのものの図式であり，二層モデルという形式化としての文字式理解を詳細に捉えることができる枠組みとして考えることができる。また，この図式は文字式の学習過程としても有効である。上述した文字式理解の背景的・根源的要素が文字式の学習過程にどのように取り入れられるかという点に関しても示唆を与えるものである。本論文では，特に「表す」「読む」過程に焦点をあてて文字式理解の背景的・根源的要素を取り入れることと

し，背景的・根源的要素が生徒の文字式理解にどのような効果をもたらすのかを分析・考察する。

4. 実際の授業の分析と考察

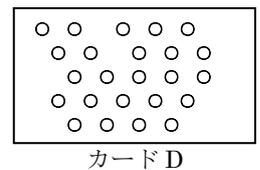
4.1. 学習はじめの理解の状態

2005年5月の期間に中学校2年生を対象とし，文字式を使った説明の単元にて計6時間の実験授業を実施した。事前調査の結果では偶数を「2でわれる数」奇数を「2でわれない数」と答えた生徒が大半を占めていた。第1時の授業のはじめに理解の二層モデルに基づき偶数や奇数の予備的な物理的概念の理解の状態をマグネットや○印を印したカードなどを用いて確認したところ，【図4】のような理解の状態であることが確認できた。



【図4】学習はじめの理解の状態

ここで注目すべきは U.P3 (論理・物理的抽象)の理解が確認できたことである。これはカードDが偶数であることを○印の個数を数え上げるという操作から判断していたことに対し，1人の生徒 Taka が次のように発言したことに基づく。



1177 Taka 2個ずつのペアがわかれば，12個いないじゃん

1179 Taka 別にそこが偶数でも奇数でも，2個ずつのペアがあれば2でわれるということだから，だから別に・・

Taka は，数えることなしでも2個ずつのペアになっていればそれが何組あっても偶数であることが判断できるという。これは偶数が2個ずつのペアから構成されていて，しかも

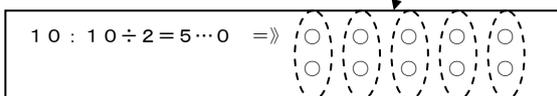
ペアの個数に関わらず偶数であることが理解できているものと捉えることができる。偶数の物理的構造が抽象され、物理的に一般化された偶数が理解されているものであり、U.P 3 (論理-物理的抽象)の状態であることを示している。

生徒は偶数(奇数も同様)に対する物理的概念をそれぞれ理解している状態であったが、数学的概念としては「2でわる」という操作的手続き的な理解が強い傾向にある。このような状態から生徒たちはどのように U.M 2 (論理-数学的抽象)を達成し、U.M 3 (形式化)へと到達していくのか、更に、文字式を理解をどのように深化させることができるのか、その学習過程を次の場面で分析・考察する。

4.2. U.M 2, U.M 3が達成される場面

偶数は「2でわれる数」であることを確認し、数6が偶数であることを実際に2でわるという手続き的操作から確認した。その後マグネット(○印)で表現した数6を、2つずつのペアで考えたとき、生徒は「 $3 \times 2 = 6$ 」と表現できることを導いた。この「 3×2 」と表現された「3」について生徒は、「2つずつのまとまり」「ペアの数」とし、「2」については「まとまっている数」と意味付けた。この後が次の場面である。

4037 T さて、で、例えば、10だったら、これ(10を板書)2でわれるっていうときだったら、10わる2は5あまり0(板書： $10 \div 2 = 5 \dots 0$)と考えていましたが、この(マグネットを黒板につけながら)2つずつのまとまりということを考えれば、この(黒板のマグネットを2つずつの○で囲みながら)2つずつのまとまりということを考えれば、これ今度どうですか？



4038 Ss . . .

4039 T 今度はどうかな、13番のTubaさん。

4040 Tuba . . . 5かける2。(小さい声)

4041 T (板書： 5×2)

4037 T これ今度はどうですか？ に対して生徒ははじめ困惑するが、4040 Tuba . . . 5かける2 と答える。Tuba も他生徒と同様に困惑しており、しばらくの沈黙の後に小さい声で答えたものであった。ここでの教師は、物理的に表現された「2のまとまりが5組あるもの」を指示しながら、 2×5 という数式表現に結びつけることを意図した発問であったが、生徒にはその意図が伝わらず困惑を起こした。しかしTubaはその困惑の中で「5かける2」と答える。通常 2×5 と表現すべきであるがこのとき生徒は乗数と被乗数との関係を逆にしている。ここで推測されることは、生徒は教師が指示した物理的表現を参照していたわけではなく、例に書かれていた数10を参照し「5かける2」と答えたものではないだろうか。したがってこの段階では物理的表現と数式表現との結びつきは不十分なものと考えられる。ここで教師は生徒のいう「 5×2 」の意味を問う。

4041 T (板書： 5×2) 5かける2、この5って何ですか？2って何ですか？

4042 T さっきの、Tomさん、5って何ですか？

4043 Tom ペアの数。

4044 T じゃあ、2って何ですか？さっきのMiさん。

4045 Mi . . . (後ろの人と相談し、)まとまっている数。

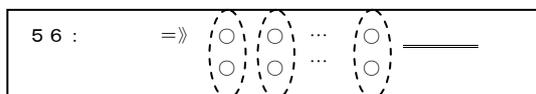
4046 T (6の例と10の例を指しながら)何か同じように言えますよね。

教師の問いかけにより、通常 2×5 を表現している物理的表現(2のまとまりが5組あるもの)を、生徒は「 5×2 」と表現した式に乗数と被乗数との関係を逆にしたまま「ペアの数」と「まとまっている数」として意味付けていくのである。

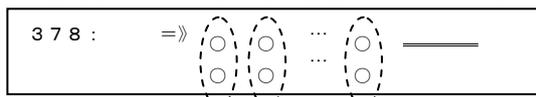
更に次のように続く。

4047 T んーと、じゃあちょっととびます。56だったら、56わる2を計算してもいいんだけど、2つずつのまとまり(図を描き加えながら)ということを考えた

きに、どんなように表せますか(マグネットの隣に下線を引く)? ・ ・ 書いてみてください。



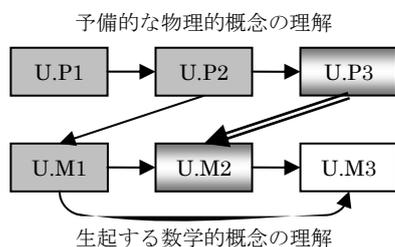
4048 T ついでに、こんなものもどうか、(板書: 378)もう1問追加しました。



(中略)

4050 (生徒が黒板に記入: 28×2 , 189×2)

ここで生徒は数と物理的表現と数式表現との結びつきを理解したと捉えることができる。このときの物理的表現は「…印」を用いて表したものであり、生徒は偶数の物理的な一般的表現であることを理解している。すなわち偶数についての U.P3 にあたるものである。また、生徒はこの一連の文脈から偶数は $(*) \times 2$ のようになっていることを抽象している。数 56 や 378 は偶数だから $(*) \times 2$ のようになっているという理解のもとで 28×2 と表現しているのである(例えば、数 56 は 14×4 や 7×8 と表現できるがここでは迷わず 28×2 と表現している)。これは偶数の積構造が抽象されており、偶数についての生徒の理解が U.M2 の状態にあることを示している。すなわちここで U.P3 と U.M2 とが結びついたと捉えることができる (【図5】)。



【図5】U.M2の達成

このときに更に注目すべきことが起こる。数 378 について考えていた生徒 Mura はまず $\square \times 2$ と自分のノートに記してから、その後 \square に当てはまる数を $378 \div 2$ を実行しながら 189×2 を求めていた。そのことを教師が取

り上げた場面である。

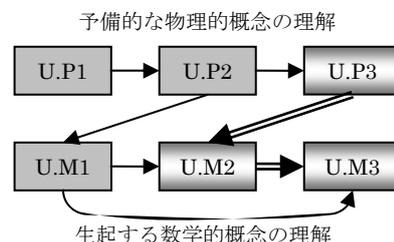
4051 T 確認してください。・ ・ はい、いくつかやってきましたが、2のまとまりということ考えると、こういうふう (5×2 , 28×2 など) に表してあげることがわかったと思います。で、Mura 君が前にいるからよく見えるんだけど、Mura 君がおもしろいことしていました。これ (378) 考えるときに、ここ (板書: $\square \times 2$) で考えてくれたんだよね。

4052 Sat えー、いいねえ。

4053 T あー、いいねっていう声が出ましたね。そうだね、これ ($\square \times 2$) いいねって思うんだよね、どういうところがいいと思った?

4054 Sat え、何か、何かいいです。

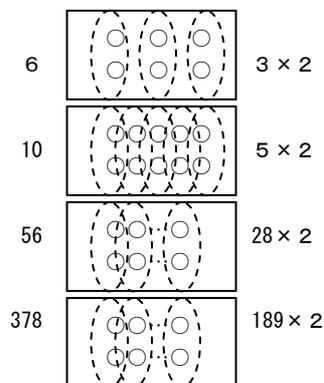
ここでの Mura は一般化のプロセスを経て偶数がいつでも $(*) \times 2$ のようになっていることを理解した上で、それを表現するための手段として「 $\square \times 2$ 」という表現を自らつくり上げていたのである。これは文字こそ用いていないものの記号で一般的な偶数を表現できたことを示している。そしてこの表現を教師が取り上げる(4051T)と、4052 Sat えー、いいねえと即座に反応する生徒が現れる。Sat は「 $\square \times 2$ 」のよさを明確に説明することはできなかったが直観的にそのよさを感じることができたのである。偶数を記号で一般的に表現できることのよさに共感した状態である。すなわちここに U.M3 (形式化)が達成し(【図6】), しかも生徒の自然な発展として形式化が起こったことが示されている。



【図6】U.M3の達成と文字式の理解

この後、 \square には小数や分数を当てはめることができないことを確認し、中学校では \square の部分に整数を表す文字mなどを用いて、さらに文字式の規約から $2m$ (m は整数)と表現できることを理解するのであった。これは生徒

が表記の側面からみた文字式を理解できたと考えることができる。ある数学的概念をよりよく表現する手段として文字式が使われることを、□という記号を介しながら理解できたのである。このとき重要な役割を果たしたものが、U.P3の理解であったと考える。ここでは、 3×2 、 5×2 、 28×2 、 189×2 と数値を徐々に大きくしながら一般化を図っている。そこに本

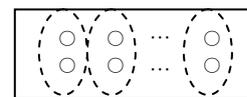


【図7】本実践での一般化プロセス

実践ではU.P3を関連付けている。生徒は【図7】のように物理的表現と数式表現とを関連付けながら一般化のプロセスをたどっている。はじめに生徒は 3×2 を2つずつのまとまりが3組、 5×2 を2つずつのまとまりが5組というように物理的表現と数式表現とを意味付けていく。乗数と被乗数の関係が逆ではあったが、この文脈から 28×2 、 189×2 を経て偶数が $(*) \times 2$ のようになっているとする数学的一般化が起こっていたと考える。このときの生徒は 28×2 や 189×2 でも2つずつのまとまりが28組、189組と意味付けることは可能であったであろうし、2つずつのまとまりが $(*)$ 組でも偶数であるという理解は達成できていたと考えることができるからである。また、この理解を支えていたものが1177Taka 2個ずつのペアがわかれば、12個いらないじゃんのアイデアである。このアイデアから偶数は「2つずつのペア(組数は関係ない)」と一般的に、かつ実感を伴った言葉で言語化することができ、この言語化された偶数の理解によって物理的表現と数式表現とを結び付けることが可能となった。偶数の理解を $(*) \times 2$ として一般的に捉えなおすことができた背景には言語化された偶数の理解や物理

的な偶数の理解など U.P3(論理・物理的抽象)が機能していたのである。

更にここで、中原(1995)のいう「翻訳」の問題が生徒に生じたと考える。ここでは【図7】にある物理的表現を生徒は「2つずつのペア」という言語的表現を介しながら、 5×2 のような数式を用いた記号的表現へと翻訳することができている状態であった。しかし、生徒は【図8】のような偶数(物理的に一般化された偶数)に対して「2つずつのペアが $(*)$ 組の偶数」と理解しながらも、それを表現する手段がない状態、すなわち、物理的表現を記号的表現へと翻訳する手段を有していない状態であったと考えられる。そこにMuraの $\square \times 2$ が紹介される。これは生徒にとって画期的な表現として現れたのではないだろうか。教師から与えられたわけのわからない表現ではなく、生徒が必要に応じて、自然な発展として作りだした偶数の一般的な表現であり、ここに「いいねえ」として受け入れられたプロセスがあったと考えるのである。「 $\square \times 2$ 」を創出し、そのよさが共感された背景にもU.P3が機能していたことが示されている。



【図8】偶数

4.3. 文字式の構造的な見方が現れ始める場面

次に「読む」過程において文字式理解の背景的・根源的要素がどのような効果をもたらすのかを、文字式の操作的な見方から構造的な見方への移行に焦点をあてて分析し、文字式理解の深化の可能性について考察する。

この場面は偶数が $2m$ 、奇数が $2n+1$ と表現できることを学習した次時にあたる第5時の学習である。生徒は命題としての「偶数と奇数の和は奇数である」ということをマグネット(物理的概念)を利用した説明や実際の数を用いた帰納的な説明から理解している状態である。そこで本時はこの命題を「文字式を使って説明してみよう」と課題設定した。はじめに教師が「偶数と奇数の和」を文字式

2m, 2n + 1 を用いて次のように表せることを生徒に確認しながら板書した(【図9】)。

<p>偶数+奇数=奇数 の説明 m, n を整数とすると, $2m + 2n + 1 = 2(m+n) + 1$</p>

【図9】教師の板書

ここで教師が「 $2(m+n) + 1$ とは何を表しているのか」と生徒に問う。すると生徒は「わからない」「これは奇数か？」と反応し、この解釈を行う場面に移る。しばらく個別で考える時間を与えた後、教室の3分の1の生徒は自ら解釈を次のように行うことができた。

5240 Higyu どんな数に2をかけても偶数になるから、それに1をたせば奇数。

これは、整数に2をかけると偶数になり、偶数に1をたすと奇数になる、という計算の過程として解釈しているものであり、Sfard (1991)のいう操作的な見方で文字式を捉えている。自ら解釈を行った生徒のうちの多くはこのような説明を記述している。この後「偶数と偶数の和は偶数である」「奇数と奇数の和は偶数である」ことを文字式を使って説明する問題に移る。このときの生徒の記述である(【図10】)。

$2(m+n)$ は $2 \times m$ と $2 \times n$ でどんな整数にも2をかければ偶数になるから $2(m+n)$ は偶数でそこに1を足すから余り1となり奇数となる。

$(2(m+n) + 1) = \text{偶数} + \text{余り1} = \text{奇数}$

偶数+偶数=偶数の説明
mとnを整数とすると,
 $2m + 2n = 2(m+n)$

どんな整数にも2をかければ偶数になるから、偶数と1を足しても偶数になる。

奇数+奇数=偶数の説明
mとnを整数とすると,
 $2m+1 + 2n+1 = 2(m+n)+2$

【図10】Takuの解答

はじめは $2(m+n)$ に対して $2 \times m$, $2 \times n$ とし、2をかけるという操作的な見方で偶数であることを解釈している。この見方が次第に $2(m+n)$ 自体を対象とした見方へと発展し、最後の「奇数+奇数」では $2(m+n) + 2$ と変形することで偶数であることを説明している。これはSfard(1991)のいう凝縮化の段階として捉えることができる。凝縮化は操作を処理しやすい単位に詰め込む段階であり“公式的に”生まれる瞬間である。ここでの $2(m+n)$ は、それ自体を“公式的に”偶数として扱っているのである。一方で、 $2(m+n) + 1$ や $2(m+n) + 2$ についてはそれ自体を奇数や偶数と扱うことはできていない。偶数 $2(m+n)$ に1や2をたしているという操作的見方である。すなわち、ここでの生徒は文字式を対象とする見方と操作とする見方の両方が現れている状態(牧野,1996;板垣,1997)である。はじめは操作的見方で扱っていた文字式に対し、解釈を深めながら次に利用する場面ではそれ自体を対象として扱う構造的見方が次第に備わっていくものとして考えることができる。それ自体を対象としてみなければいけないような、より大きなより複雑なものを考えようとしたときに、ある1つのまとまりとしてみる見方が顕在化してくる。このようなスパイラル的な状況を経て構造的見方が養われ、文字式の理解を深化させうる可能性を示している。

ここで注目したい点として、生徒は「奇数と奇数の和は偶数である」ことの説明に対して、 $2(m+n) + 2$ と変形した文字式から偶数であることを解釈している点を挙げたい。通常教科書などでは $2(m+n+1)$ と変形した文字式から偶数であることを解釈しているが、ここでは単に形式的な解釈ではなく、自分たちなりの理解を構成した文字式から解釈しているのである。ここでも重要な役割を果たしたものがU.P3(論理-物理的抽象)であったと考える。本実践では従来の文字式指導におい

てあまり重視されていなかった物理的概念を含めた数学的概念の理解に焦点をあてている。本時でも「 $2(m+n)+1$ 」の解釈をはじめる場面では教室の3分の2以上の生徒が解釈できない状態であったため、教師はマグネット(物理的概念)を用いた説明を試みている。

5176 T じゃあ、こんなの(マグネットを取り出して)使ってみたらどうですか?あの、見えている人はいいんですよ、例えば、 $2m$ 、この2っていうのがなんだっけ?

5177 S 偶数。

5178 Tomi ペアの数。

(途中略)

5186 T ここ($2m$ を指して)に書いてあるのは?

5187 S m 。

5188 T じゃあ、何個あるんですか?

5189 Higu m 個。

5190 T そうだなー、無限っていうのもいいんだけど、・・・

5191 S m 個。

5192 S m ペア。

5193 T (板書: m 個) じゃあ、こっち($2n+1$)、 n だったらどうしようかな、(黒色のマグネットを取り出して)これ、色違うのって、・・・いい?これ、なんで色変えると思う?

5194 Higu 違う数だから。

5195 T 何と何が?

5196 Ss m と n が。

5197 T うん、(首を縦に振る)はい、じゃあこういうの(マグネット)が何個あるんですか?

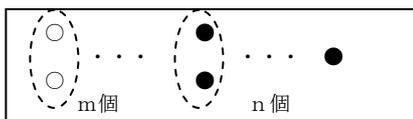
5198 S いっぱい。

5199 Ss n 個。

T n と・・・

S プラス1。

5200 T (板書: n 個) それとプラス1。で、これをたすということはどういうことだろう?それをたしたら、奇数といえるのか?

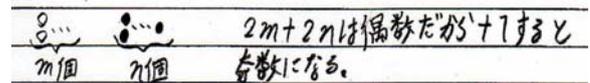


5201 Higu いえる(上がり口調で)。

5202 T うん、じゃあその理由を考えてみて

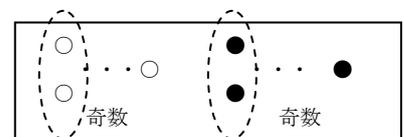
ください。

その結果、解釈できない状態であった1人の生徒 Higu がかなり自信をもった口調で反応する(プロトコル No.5201)。この後 Higu は次のように記述することができたのである(【図11】)。



【図11】 Higu の解答

この記述にはまだ不十分な点が残るものの、教師が用いたマグネット(物理的概念)からここまで解釈できるようになったという変化に注目する。また、先に述べた $2(m+n)+2$ と変形した文字式から偶数であることを解釈した背景にもこのマグネット(物理的概念)が機能していたものと考えられる。生徒の理解に【図12】のようなものがあつたとすれば、余った○と余った●



【図12】 奇数と奇数の和

を合わせて、 $+2$ とするのはごく自然であろう。それが文字式を使ったときには、 $2m+1+2n+1$ から、 $2m$ と $2n$ もしくは $2(m+n)$ は偶数とし、余った1と1をたせば2であるから、偶数に2をたしても偶数である、というように自分の解釈し易い形に変形した結果が $2(m+n)+2$ である。このように、自分たちなりの解釈を可能にした背景にはマグネット(物理的概念)があり、特に U.P3(論理・物理的抽象)が重要な役割を果たしていることを示している。

4.4. 命題の理解と表記の理解が整合しない場面

ここでは、命題の体系の理解と表記の体系の理解とが一致しない場面を取り上げ、そこで生徒がみせた混乱から新たな課題を見出す

ことを試みる。

この場面は、前時(第4時)に文字式を使って偶数が $2m$ 、奇数が $2n+1$ と表現できることを学習した次時(第5時)にあたる。教師は学習のはじめに「 m を整数とすると、偶数はどのように表すことができるか」と生徒に確認する。すると生徒は、教師が板書した「偶数：2でわれる数」に反応し、偶数は $m/2$ のようになると答える。 $m/2$ が偶数を表しているのかどうかを確かめるために教師は、 m に実際の数値を代入して考えさせようとする。生徒に代入する数値を聞くと4、6、14、2億、5、30が挙がったが、この中の5という数値に注目が集まる。

5029 T もうここ(5)に注目してくれた、これ(5)ってさ、ここ($m/2$)に入れるとダメ?

5030 Mura そうそう、奇数なんで・・・

5031 Sat 偶数でないとダメ。

5032 T えっ、何が奇数なの?

5033 Sat 大丈夫ですか、Muraさん。

5034 T まあ、ここ($m/2$)に入れてみると、みんなはこれ(板書： $5/2$)をもう考えてくれたのかな、これ($4/2$)がマルで、こっち($5/2$)がダメで、で、何がダメなの?

5035 S 整数・・・

5036 Maru 整数だとならない。

5037 T 整数か?

5038 S 整数にならない。(5/2が)

5039 T 整数にならない、・・・整数にならない、うん、何をすると整数にならない?

5040 S 2でわる。

5041 T うん、2でわると、

5042 S プラス1。

5043 T あー、・・・

5044 S 余りがでる。

m に代入する数値として5はふさわしくないと考えている。これは「偶数は2でわれる数」という考えから導いた「 $m/2$ 」が偶数を表しているから、5や13などは m に代入する数値としてはふさわしくないというものであ

る。そこで教師は改めて生徒に問う。

5055 T m って何だ?

5056 Higu 整数。

5057 T じゃあ、 m 、13ダメ?

5058 Higu いい。

5059 Sat え? どういうことだよ?

5060 Higu だって、整数じゃん。

5061 Sat は? 奇数だし。

5062 S 整数とするって・・・

5063 S 偶数だよ。

5064 Kou 偶数じゃないといけないんだよ。

「 m を整数とすると」の記述に着目しはじめた生徒が現れるが、教室内では「偶数は2でわりきれぬ数だから $m/2$ 」という考えが強く、「 m を偶数とする」と修正しなければいけないと考え、生徒は次のように結論づける。

5086 T じゃあ、もと(m が整数だということ)を変えるの?

5087 S 整数・・・

5088 S 偶数の整数・・・

5089 S そうそう、整数の偶数・・・

5090 Taka 偶数は整数だから、整数いらんんだよ。

5091 Higu そうそれなんだよ。

5092 Ss 偶数でいいんだよ。

5093 S 偶数がいいんだよ。

ここで生徒が下した結論は「 m を偶数とすると、 $m/2$ は2でわりきれぬ(整数になる)」というものであった。

この場面は命題の体系の理解と表記の体系の理解とが整合していない場面であり、文字式理解の背景的・根源的要素が十分に機能されていない場面として捉えることができる。生徒は「その数が2でわれるならば、その数は偶数である」という命題をもっている。生徒が下した結論の背景にはこのような命題の理解があり、手続き的な概念をそのまま文字に表現しようとしたものが「 $m/2$ 」である。これは Skemp(1979)のいう論理的理解が欠如

している状態である。自分の思いを表現することと、表現されたものが自分の表現したかったことをきちんと表現できているかどうかは別の問題であることを示している。この場面における指導上の問題点は、正しいということがどのようにして決まるのかという基準が不明確な点であった。mに数値を代入したときにどんな数でも偶数を表現できるものになっているか、偶数のすべての要素が現れる表現になっているか、という基準が必要であった。生徒は前時の学習では、物理的概念を含めた数学的概念の理解から偶数が $(*) \times 2$ のようになっていることを理解し、この理解を背景にもつことで偶数が $2m$ と表現できることを理解した。文字式理解の背景的・根源的要素が機能した状態である。しかし、この文脈から離れ偶数は「2でわれる数」という手続き的な概念で考えたときには「 $m/2$ 」と表した方がよいという考えが露呈する。既習の知識の一部に依存し、そこから表現に結び付けようとしたものである。単に表すだけではなく、その表したものが自分の表したいことを表現できているかどうか、逆の考えが必要であるということをこの場面は示唆しているのである。この逆の考えとは“チェックする能力”である。あることを表現したら、それがはたして自分が表現したいと思ったことを正確に表現できているかを確認する能力である。チェックした結果、不十分な表現であれば修正できる能力でもある。このような能力を高める指導は極めて重要なものと考えられる。新たな表現を創り出すときに必要になり、単に記憶の量が問われる知識とは明らかに質が違っている。この能力はメタ認知に関わっている。岩合(1992)は、自己の行動を修正できる能力をメタ認知能力とし、学習の質を高めるのに役立つであろうという見解を示している。ここでは、自分が表現したものが必ずしも自分が表現したかったことを表現できていない場合があることを知っていて、今度は

そうしないように考えること、つまり自分の誤りやすい認知的な傾向に関する知識が必要である。重松(1992)は、メタ認知が子どもに内面化し「内なる教師」として機能するものとして期待している。“チェックする能力”が生徒の「内なる教師」の1つの要素として機能することは表現や文字式の学習のみならず、学習全般に関わる重要性を含むことになるであろう。このような“チェックする能力”を高めるための指導法の開発は今後の更なる課題として考えていきたいものである。

5. おわりに

本論文では、命題と表記の二つの側面(平林,1987)から文字式理解を捉え直し、二層モデル(Herscovics ら,1988)に基づいて文字式理解の背景的・根源的要素になり得るものを、特に偶数の理解過程を例として、認識論的に導き出した。それは、数や式の理解を含め物理的概念をも含めた数学的概念の理解であった。このように導き出した背景的・根源的要素が実際の授業過程における生徒の文字式理解にどのような効果をもたらすのかを明らかにするために計画・実施した実験授業を対象とし、特に、三輪(1996)の文字式利用の図式のうちの「表す」「読む」過程に焦点をあてて分析・考察した。

その結果、「表す」過程では生徒は偶数を自ら記号を用いて一般的に表現することができ、その表現のよさを「いいねえ」として即座に受け入れることができた。そこには物理的概念(特にU.P3)と数学的概念(特にU.M2)との結びつきを重視した一般化のプロセスがあり、言語化された偶数の理解がそれらを結びつける基盤になっていた。これは生徒が物理的表現や数式表現から言語的表現を介しながら一般的な記号的表現へと翻訳することができたことを示しており、論理・物理的抽象(U.P3)が中間的表現や数式表現から一般的な記号的表現への翻訳の仲介的役割を果たしたと考えられることができる。

また、文字式を「読む」過程では、はじめは操作的な見方で扱っていた文字式に対し、その解釈を深めながら、次に利用する際にはその文字式自体を対象として扱うような構造的な見方が次第に備わっていく、というように生徒は文字式理解を深化させていた。このような背景にも論理-物理的抽象(U.P 3)が機能しているということを明らかにした。

一方、生徒は偶数を「2でわれるもの」という概念で考えると、偶数を $m/2$ と表してしまうという傾向がみられた。これは命題の体系と表記の体系とが整合しない場合に顕れる傾向である。単に表すだけでなく、その表したものが自分の表したいことをきちんと表現できているかどうかを“チェックする能力”が必要であるということを示唆しているのである。

本論文の主要な結論は次の3点である。

- ①論理-物理的抽象は文字式理解において有効な背景的・根源的要素を構成する、ということ
- ②その指導にあたっては、文字式はそれ自体が数学的概念というわけではなく、数学的概念をよりよく表現するための表記(道具)にすぎないということを明確に意識する、ということ
- ③そして、表現の対象となる-命題の体系としての-数学的概念の理解を、表現の手段である表記の理解と相互に発達させながら指導するということが重要である、ということ

本論文では文字式理解の背景的・根源的要素について、特に論理-物理的抽象の役割に焦点をあてて論じてきた。今後、更に論理-物理的抽象の可能性について実証的に検証するとともに、背景的・根源的要素となり得る他の理解を明らかにすることが課題である。また、文字式の適切な使用においては“チェックする能力”が重要であり、この指導法の開発も今後の課題としたい。

引用・参考文献

- Anna Sfard.(1991).On the Dual Nature of Mathematical Conceptions : Reflections on Processes and Objects as Different Sides of the Same Coin. *ESIM*, 22(1), 1-36
- 藤井齊亮.(1998).「文字式の理解」に関する一考察-擬変数について. 日本数学教育学会, 第31回数学教育論文発表会論文集, 123-128.
- 藤井齊亮.(2000).「式に表す」ことの困難性について. 日本数学教育学会, 第33回数学教育論文発表会論文集, 349-354.
- グレイゼル.(1997).グレイセルの数学史 I, 訳 保坂秀正 山崎昇, 大竹出版.
- 平林一榮.(1987).数学教育の活動主義的展開. 東洋館出版社
- 板垣政樹.(1998).中学生の文字を用いた説明についての研究-文字式の二面性の理解を視点として-, 上越数学教育研究, 13, 43-52.
- 岩合一男.(1992).数学教育の研究と実践.岩合一男先生退官記念出版会, 数学教育学の新展開 (pp.2-37). 聖文社.
- カジョリ.(1997).復刻版カジョリ初等数学史, 訳 小倉金之助, 共立出版.
- 北川如矢他.(1987).分数・文字式を教えるということ. 大阪数学教育研究会. 明治図書
- 国宗進他.(1997).確かな理解をめざした文字式の学習指導.新しい授業づくり 5. 明治図書
- 牧野眞裕.(1996).文字式に関する認知的ギャップについての一考察. 日本数学教育学会, 第29回数学教育論文発表会論文集, 37-42.
- 三輪辰郎.(1996).文字式の指導序説.筑波数学教育研究, 15, 1-14.
- N. Herscovics & J.Bergeron.(1983).Models of Understanding. *ZDM, Jahrgang 15, Heft 2, April*. 75-83
- 中原忠男.(1995).算数・数学教育における構成的アプローチの研究. 聖文社
- 大塚高央.(2004).文字式のよさの指導に関する基礎的研究, 上越教育大学修士論文.
- R.R.Skemp.(1976). Relational Understanding and Instrumental Understanding, *MT*, 77, 152-163
- R.R.Skemp.(1979). Goals of Learning and Qualities of Understanding, *MT*, 88, 44-49
- R.R.Skemp.(1982). Symbolic Understanding, *MT*, 99, 59-61.
- 重松敬一.(1992).メタ認知の発達的変容.岩合一男先生退官記念出版会, 数学教育学の新展開 (pp.144-159). 聖文社
- 杜威.(1991).学校数学における文字式の学習に関する研究. 東洋館出版社.
- 谷沢浩明.(2001).文字式の学習過程に関する研究 - 事象と文字式の関連に焦点を当てて -. 上越数学教育研究, 16, 69-80.