東京学芸大学リポジトリ
Tokyo Gakugei University Repository

児童における口頭数詞からアラビア数字表記への変換処理に対する数字の属性およびワーキングメモリ機能の影響

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科 公開日: 2024-05-22 キーワード (Ja): 数の変換, 児童, 数の属性, ワーキングメモリ, ETYP: 教育関連論文 キーワード (En): number transcoding, school children, properties of numbers, working memory
	作成者: 河野, 武志, 葉石, 光一 メールアドレス: 所属: 東京学芸大学, 埼玉県ふじみ野市立鶴ヶ丘小学校, 埼玉大学
URL	https://doi.org/10.50889/0002000453

児童における口頭数詞からアラビア数字表記への変換処理に対する数字の属性およびワーキングメモリ機能の影響

河野　武志*・葉石　光一**

Ⅰ．問題と目的

数の量を表す方法には様々なものがある。例えば，アラビア数字で「3」と表記される数は，英語のアルファベットによる表記では「three」，日本語の仮名・漢字では「さん」や「三」となる。これらは数を表現するための記号（code）であり，数を表す記号を別の記号に置き換えることを変換（transcoding）と言う。本研究では，数の変換の中でも，口頭で示された数（口頭数詞）を十進位取り記数法に基づくアラビア数字で表記する，数の変換に着目する。

口頭数詞とアラビア数字の間の変換の学習は，海外を含め，学校教育の初期，概ね6歳から9歳の間に行われる。日本では，小学校2年生までに10,000までの数の命数法，記数法を学習する。アラビア数字の記数法（アラビア記数法）では，10進数であれば0から9までの10個の数字のみを使用し，位を表す記号ではなく数字の位置で位が表現される。日本，中国，韓国，ベトナムといったアジアの言語の命数法は，アラビア記数法とよく対応しており，欧米の言語よりも透明性が高い（Berch, Geary, & Koepke, 2018）。そのためアジアの言語では，命数法と記数法の対応の理解が相対的に容易とされる（例えば，Miura, Okamoto, Kim, Steere, & Fayol, 1993）。一方で，例えばドイツ語では2桁の数の命数において一の位の数が十の位の数より語順が先になる倒置（例えば，21はeinundzwanzig（1と20）となる）があり，それによる誤りが生じる（Moeller, Zuber, Olsen, Nuerk, & Willmes, 2015; Zuber, Pixner, Moeller, & Nuerk, 2009）。このように，数の変換の難易に影響する要因の一つは命数における構文の特徴である（Seron, & Fayol, 1994）。そのため数の変換の発達的変化を知るには，言語に固有の特徴が現れる可能性を考慮し，当該言語による検討が必要である。

口頭数詞やアラビア数字等の数の記号システムの学習には，数を量として捉える表象の形成が必要である。数の概念の発達は，幼児期にインフォーマルな形で一定程度進行し，10前後の多少等判断による数理解，6前後の数の保存，基礎的な分配が可能になる（山口，2011）。数詞や数字等の記号は，数の概念を表現する道具であり，古池（2013）は5歳児の半数以上が11までの数を表記可能であることを報告している。こういった発達が，学校での十進位取り記数法の学習の基盤となっている。

0から9までの限られた数字で大きな数を表す十進位取り記数法の学習は，数概念の発達によりつつ，情報処理のための認知資源にも依存する。口頭数詞から数字への変換の認知モデルがいくつか示されているが，変換に必要な規則を条件に応じて実行するプロダクション・システムとしてまとめられたADAPTモデル（Barrouillet, Camos, Perruchet, & Seron（2004）は，数字の変換過程で一時的な情報の保持，更新を行うワーキングメモリ（以下，WM）への負荷の程度を，処理に必要な手順数として示し，分析可能にしたモデルであ

＊　こうの　たけし　東京学芸大学大学院連合学校教育学研究科発達支援講座，埼玉県ふじみ野市立鶴ヶ丘小学校
＊＊　はいし　こういち　埼玉大学教育学部
キーワード：数の変換／児童／数の属性／ワーキングメモリ

る。近年の研究において記数法の学習とWMとの関連が指摘されているが，ADAPTモデルはそういった検討に用いられている。例えば，Camos（2008）はADAPTモデルに基づき，変換の誤りの多さとWM機能の低さに関連があること，視空間性WMの機能の低さが数詞の統語関係の処理の誤りと関連することを示した。またZuber et al.（2009）は，処理する数字の桁の大きさや，ドイツ語にみられる倒置などの不規則な変換規則がWMへの認知的負荷を高め，数の変換処理に誤りをもたらす可能性があることを指摘している。数の変換処理が，特に視空間性WMの影響を受けることについては，十進位取り記数法が数字の位置（空間）情報によって数の大きさを表すものであり，基本的には数字の産出過程における視空間情報処理への負荷が高いことによると考えられている（Zuber et al., 2009）。

日本語の命数法はアラビア記数法との対応がよいことから，変換に必要なWM容量は少なく済むとされる（Moeller et al., 2015）。ただし日本語の命数法にも不規則さがないわけではない。例えば，まとまった大きさを表す十，百，千等を使う際，当該の桁の数が1の場合，「いちじゅう」「いちひゃく」等と言わない。つまりその桁の数は，命数においては省略されるが，記数においては1を記す必要がある。また，空位の桁は命数において読まれないが，記数においては0を記す必要がある。こういった処理には，規則的な変換とは異なる認知的な負荷が生じ，変換の誤りの原因となる可能性がある。しかし，日本語口頭数詞の数字への変換における児童期の発達的変化を調べた研究はなく，これらの日本語の命数法の特徴が数字への変換処理の初期学習過程に与える影響は明らかではない。また学齢期はWMの発達途上（例えば，Spencer, 2020）にあるが，そのことと日本語口頭数詞の数字への変換処理の関連も不明である。そこで本研究では，日本語口頭数詞と位取り記数法の対応の規則性，変換する数の桁数，変換に必要な処理の手順数，言語性，視空間性WMの機能が，児童期の初期段階における口頭数詞からアラビア数字への変換処理に与える影響を明らかにする。

Ⅱ．方法

１．対象児

小学校の通常の学級に在籍している定型発達児86名を対象とした。内訳は，2年生が29名（男子13名，女子16名：平均年齢8.41±0.27歳），3年生が29名（男子12名，女子17名：平均年齢9.42±0.28歳），4年生が28名（男子12名，女子16名：平均年齢10.4±0.27歳）であった。校内就学支援委員会において発達障害，知的障害の可能性が指摘され，学年相当の数字の読み書きを含め，学習に著しい遅れがあると判断された者は対象者としなかった。

２．手続き

数の変換処理課題，言語性WM課題（数唱課題），視空間性WM課題（視覚性スパン課題）を実施した。課題は2日に分けて実施し，1日目は数の変換処理課題（10分間）と言語性WM課題（10分間），2日目は数の変換処理課題（10分間）と視空間性WM課題（10分間）を行った。また，3課題とも学年毎に1つの教室で一斉に実施した。2回の測定の間には2日から3日の間隔を開けた。

（1）数の変換処理課題

課題は学年末に実施し，2年生で学習する4桁以下の数（表1に示した延べ78個：左側を初日，右側を二日目に実施）を使用した。表1中の数の欄にある数字を上から下へ順番に実施した。用いた数はその構成上，考え得る39のパタンを基本的に網羅している。これは，①千，百，十の位が1か2以上，②百，十，一の位が空位か空位でない，③桁数の組み合わせによっている。①は，千，百，十の位が1であれば，当該の桁の数は読まれないが1を記す必要があるという変換処理上の特徴によるものであり，②は，空位の桁は読まれないが0を記す必要があるという変換処理上の特徴による。1パタンあたり原則として2個の数を用意したが，パタンに該当する数が1個しか存在しない100，1000，1100については2回実施した。また，あり得るパタンのうち「二桁／十の位が1／一の位が空位」となる10を本来は課題に含める必要があるが，10は後述する変換処理の手順がパタン1から4と同一であることから，参加者の負担を考慮して課題に含めなかった。

表１　変換処理課題で用いた数の内訳

パタン	数	数の構成	変換手順と手順数
1	3, 4	一桁	P1 P4a：2
2	13, 14	二桁／十の位が 1	P1 P4a：2
3	20, 40	二桁／一の位が空位	P1 P4a：2
4	27, 62	二桁	P1 P4a：2
5	100, 100	三桁／百の位が 1／一、十の位が空位	P2a P4b：2
6	112, 116	三桁／百、十の位が 1	P2a P1 P4c：3
7	400, 800	三桁／十、一の位が空位	P1 P2b P4b：3
8	150, 160	三桁／百の位が 1／一の位が空位	P2a P1 P4c：3
9	122, 164	三桁／百の位が 1	P2a P1 P4c：3
10	105, 108	三桁／百の位が 1／十の位が空位	P2a P1 P4c P4b：4
11	613, 715	三桁／十の位が 1	P1 P2b P1 P4c：4
12	230, 420	三桁／一の位が空位	P1 P2b P1 P4c：4
13	632, 768	三桁	P1 P2b P1 P4c：4
14	303, 705	三桁／十の位が空位	P1 P2b P1 P4c P4b：5
15	1000, 1000	四桁／千の位が 1／百、十、一の位が空位	P3a P4b：2
16	1100, 1100	四桁／千、百の位が 1／十、一の位が空位	P3a P2c P4b：3
17	5000, 8000	四桁／百、十、一の位が空位	P1 P3b P4b：3
18	1001, 1008	四桁／千の位が 1／百、十の位が空位	P3a P1 P4c P4b：4
19	1012, 1014	四桁／千の位が 1／百の位が空位／十の位が 1	P3a P1 P4c P4b：4
20	1020, 1060	四桁／千の位が 1／百、一の位が空位	P3a P1 P4c P4b：4
21	1114, 1115	四桁／千、百、十の位が 1	P3a P2c P1 P4c：4
22	2100, 7100	四桁／百の位が 1／十、一の位が空位	P1 P3b P2c P4b：4
23	1057, 1089	四桁／千の位が 1／百の位が空位	P3a P1 P4c P4b：4
24	1102, 1104	四桁／千、百の位が 1／十の位が空位	P3a P2c P1 P4c P4b：5
25	1130, 1160	四桁／千、百の位が 1／一の位が空位	P3a P2a P1 P4b：4
26	1159, 1181	四桁／千、百の位が 1	P3a P2a P1 P4b：4
27	4003, 5001	四桁／百、十の位が空位	P1 P3b P1 P4c P4b：5
28	2010, 6060	四桁／百、一の位が空位	P1 P3b P1 P4c P4b：5
29	2011, 7012	四桁／百の位が空位／十の位が 1	P1 P3b P1 P4c P4b：5
30	3111, 6113	四桁／百、十の位が 1	P1 P3b P2a P1 P4c：5
31	2700, 7600	四桁／十、一の位が空位	P1 P3b P1 P2d P4b：5
32	7035, 9049	四桁／百の位が空位	P1 P3b P1 P4c P4b：5
33	5104, 8101	四桁／百の位が 1／十の位が空位	P1 P3b P2c P1 P4c P4b：6
34	4130, 6180	四桁／百の位が 1／一の位が空位	P1 P3b P2c P1 P4c：5
35	2914, 8216	四桁／十の位が 1	P1 P3b P1 P2d P1 P4c：6
36	3147, 5127	四桁／百の位が 1	P1 P3b P2c P1 P4c：5
37	2660, 6980	四桁／一の位が空位	P1 P3b P2c P1 P4c：5
38	3708, 6503	四桁／十の位が空位	P1 P3b P1 P3d P1 P4c P4b：7
39	5635, 7947	四桁	P1 P3b P1 P3d P1 P4c：6

左から２列目、数の欄：①網掛けした数字は不規則変換に該当する
②左側の数字は初日、右側の数字は２日目に実施した

変換処理課題は，児童が普段使用している教室で行った。第一著者の他に２名の教員が実施と観察を補助するために在室した。課題を始める前，児童に10.5cm×7.5cmの大きさの用紙45枚が１セットになったものを配布し，実験者が読み上げる数を１枚に１つずつ書くよう指示した。数は２回繰り返し読み上げた。１日に39個ずつ，計78個の数の書き取りを実施した。

(2) 数の変換に関するADAPTモデル

本研究では，数の変換処理過程の検討においてBarrouillet et al.（2004）のADAPTモデルを参考にした。ADAPTモデルはフランス語と英語の数の変換のモデルだが，以下の通り日本語の変換処理に適用できるよう整理した。なお本研究は，４桁以下の数の変換処理を分析対象としたため，以下に示すのはその範囲での整理である。

１）日本語記数法の構成要素

口頭数詞を数字に変換する場合，数詞の構成要素を分解し，心的辞書に照らして処理に繋げる必要がある。英語に関して言えば十進位取り記数法の構成要素にはunit（oneからnine），teen（elevenからnineteen），decade（tenからninety）の３種類が存在する。これらに加え，３桁以上の数の表記にはhundred，thousandの処理が必要である。これらには，それ自体が100や1000といった数を表すことに加え，上述の要素と統語的に結びつ

くことによって数を表す（例えば，“three hundred and eighteen”により318を表す）といった特徴がある。これは数を表すだけのunit，teen，decadeと異なる（例えば“two thirteen”といった表現はない）。

日本語の「ひゃく」「せん」の機能はhundred，thousandと同様である。一方，日本語にteenとdecadeにあたる語はなく，例えば13は「じゅう・さん」，20は「に・じゅう」というように，teenとdecadeにあたる数をunitとtenの統語的関係によって表す。つまり日本語の「じゅう」は10という数を表す他に，unitとの組み合わせによりteenとdecadeを表現するものであり，その点でhundred，thousandと同じ機能をもつ。

2）ADAPTモデル

ADAPTモデルは，口頭数詞から数字への変換をプロダクション・システムとして示したものである。プロダクション・システムでは，入力に対して「条件を満たす場合に行為を実行せよ」という，条件と行為の間のプロダクション・ルールに基づいて情報処理が進むことを仮定する。具体的には，数詞の音韻情報が長期記憶にあるプロダクション・ルールと照らし合わされ，条件部が一致するルールが抽出，実行される。処理が終わるまでの過程はWMに保持されるため，変換処理はWMの機能の影響を受ける。表2はADAPTモデルを元に，9999までの日本語数詞の変換に必要なプロダクション・ルールをまとめたものである。ルールは大まかに4種（P1，P2，P3，P4）に分類される。処理の概略は次の通りである。

①P1：この処理は，心的辞書内の語彙に基づいて行われる，数詞に含まれる表象単位の分解を契機として生じ，表象単位に対応する数字の形態の検索，WMでの保持，次の情報の読み込みへと続く。なお学習の初期には，二桁の数，例えば25については「に・じゅう・ご」というように3つの表象単位に分解して逐次処理される。しかし変換に慣れることでこういった分解は必要なくなり，ひとつの表象単位として直接出力されるようになる。本研究の参加者は2年生以上であり，この段階に達していると考えられるため，一桁，二桁の数の処理はP1が適用されるものとして分析した。

②P2：「ひゃく」の処理は，百の位の数が1の場合と2以上の場合とで異なっている。百の位が2以上であるP2bの処理が基本であり，百の位の数に続けて十の位，一の位のための枠を2つセット（例えば，2__等）して次の入力を読み込む。一方，百の位の数が1の場合，日本語では「いち・ひゃく」とは言わず単に「ひゃく」と言うため，それを聞いて1を出力する必要がある（P2a）。3桁の数の処理であるP2a，P2bの初めの段階では後に続く数字のための枠がないが，4桁の数の百の位の処理（P2c，P2d）では，千の位の処理の段階で枠がセットされる点がP2a，P2bと異なる。

③P3：P2と同様，「せん」の処理についても千の位の数が1の場合と2以上の場合で異なっている。やはり千の位の数が2以上であるP3bが基本で有り，千の位の数に続けて百の位，十の位，一の位のための枠を3つセットして次の入力を読み込む。千の位の数が1の場合，明示されない1を出力する手続となる（P3a）。

④P4：終了の処理は，2桁までの数（P4a）と3桁以上の数（P4b，P4c）で分けられる。2桁までの数の場合は分解されることなく直接出力され，それ以上の入力がなければ処理が停止する（P4a）。3桁以上の数では，枠があるにも関わらずそれを埋める情報が入ってこない場合がある（例えば表3）。この場合，枠は空位を表す0で埋めて停止となる（P4b）。なおP4cは，行為の最後に「次の入力の読み込み」があるが，入力がなく枠が残っていればP4bの手続きがとられて停止（表4の最下段），枠がなければそのまま停止となる（表5の最下段）。

数の変換が停止するまでに必要な手順数（例えば表5では4）が増えるほど処理は複雑でWMに対する負荷が増大すると言える。表1右の変換手順と手順数の欄には当該パタンの数の変換に必要な処理（表2）とその数をまとめた。

表3，4，5に示したように，同じ桁数であっても251，401，200では処理の手順数が異なり，処理の負荷は単純に桁数と対応しない。しかし扱う桁が増えることで処理する情報量は基本的に増加するため，桁数が処理の発達的変化に関係する可能性もまた否定できない。そのため本研究では，数の変換処理の発達的変

表２　ADAPT モデルにおける数の変換手続き

手順	条件	行為
P1	入力：心的辞書内の数の表象単位	・入力に対応する数字の形態を長期記憶から検索 ・WM に数字の形態を保持 ・次の入力の読み込み
P2a 「ひゃく」の処理 100-199	入力：「ひゃく」 WM：情報なし 枠：なし	・数字の 1 を出力 ・1 に続けて 2 つ枠をセット ・次の入力の読み込み
P2b 「ひゃく」の処理 200-999	入力：「ひゃく」 WM：情報あり 枠：なし	・WM の情報を出力 ・WM の情報を消去 ・出力した WM 情報に続けて 2 つ枠をセット ・次の入力の読み込み
P2c 「ひゃく」の処理 4 桁の数の百の位が 1	入力：「ひゃく」 WM：情報なし 枠：あり	・数字の 1 を出力 ・次の入力の読み込み
P2d 「ひゃく」の処理 4 桁の数の百の位が 2-9	入力：「ひゃく」 WM：情報あり 枠：あり	・WM の情報を出力 ・WM の情報を消去 ・次の入力の読み込み
P3a 「せん」の処理 1000-1999	入力：「せん」 WM：情報なし 枠：なし	・数字の 1 を出力 ・1 に続けて 3 つ枠をセット ・次の入力の読み込み
P3b 「せん」の処理 2000-9999	入力：「せん」 WM：情報あり 枠：なし	・WM の情報を出力 ・WM の情報を消去 ・出力した WM の情報に続けて 3 つ枠をセット ・次の入力の読み込み
P4a 終了の処理 2 桁までの数	入力：終了 WM：情報あり 枠：なし	・WM の情報を出力 ・停止
P4b 終了の処理 3 桁以上の数	入力：終了 WM：情報なし 枠：あり	・枠を 0 で埋める ・停止
P4c 終了の処理 3 桁以上の数	入力：終了 WM：情報あり 枠：あり	・WM の情報を出力 ・WM の情報を消去 ・次の入力の読み込み

表３　P4bの手続き：200（に・ひゃく）の場合

手順数	入力	手順	文字列	WM の情報	枠の有無
1	に	P1		2	無し
2	ひゃく	P2b	2_ _	無し	有り
3	終了	P4b	200	無し	無し
			停止		

表４　空位の処理：401（よん・ひゃく・いち）の場合

手順数	入力	手順	文字列	WM の情報	枠の有無
1	よん	P1		4	無し
2	ひゃく	P2b	4_ _	無し	有り
3	いち	P1	4_ _	1	有り
4	終了	P4c	4_1	無し	有り
5	終了	P4b	401	無し	無し
			停止		

表５　P2bの手続き：251（に・ひゃく・ごじゅういち）の場合

手順数	入力	手順	文字列	WM の情報	枠の有無
1	に	P1		2	無し
2	ひゃく	P2b	2_ _	無し	有り
3	ごじゅういち	P1	2_ _	51	有り
4	終了	P4c	251	無し	無し
			停止		

化を，ADAPTモデルに基づく処理の手順数，および桁数の両面から検討する。

（3）言語性WM課題

WISC-IV知能検査の数唱課題（順唱，逆唱）を参考に，言語性WM課題を実施した。WISC-IVの通常の手続きでは，実験者が読み上げた数系列を口頭で再生させるが，本課題では読み上げられた数を紙に記入させた。数系列の提示においては，WISC-IVの手順に則り，およそ1秒に1つ，実験者が数を読み上げた。順唱では読み上げられた数系列を順番通りに，逆唱では読み上げられた順番の逆順に記入させた。参加者には，読み上げ終了後に数系列を記入するように伝え，実験者と補助者はそのように実施できているか確認した。課題は二桁からスタートし，順唱では最長九桁，逆唱では最長八桁の数系列まで実施した。課題は同一桁について2問用意し，2問とも解答できなかった場合は，課題遂行を終了するよう伝えた。補助者には参加者の様子を観察し，終了条件を理解できていない児童がいた場合，課題を終了するよう当該児童に告げてもらった。正しく再生できた場合を1点とし，順唱と逆唱の結果をそれぞれ点数化した。順唱は2から9桁の数系列が各2問であるため最高得点は16点，逆唱は2桁の数系列4問，3から8桁の数系列が各2問であるため，やはり最高得点は16点であった。なお，WISC-IVの通常の手続きでは記憶した内容を口頭で報告させるが，本研究では学年毎に教室において一斉に課題を実施したため，記憶した数系列（逆唱においてはその逆）を用紙に記入させた。

（4）視空間性WM課題

視空間性WM課題として，Westerberg, Hirvikoski, Forssberg, and Klingberg（2004）に基づいた視覚性スパン課題を実施した。課題では4×4の格子の枡目に一つずつ提示される赤丸の提示場所と提示順を記憶し，同様の格子が描かれた用紙に記入することを求めた。正順での再生と逆順での再生を行い，正順では赤丸が提示された枡目に，提示された通りに1から順番を記入させ，逆順では提示されたものとは逆の順序になるよう，1から数字を記入させた。両課題とも赤丸の提示が終了してから解答を記入するよう指示した。正順，逆順ともに，提示される赤丸の数が2から9まで，それぞれ2問ずつ実施した。2問とも解答できなかった場合，課題遂行を終了するよう伝えた。補助者は，終了条件が理解できていない参加者がいた場合，課題を終了するよう告げてもらった。課題は，教室の黒板に設置したスクリーンにプロジェクタで投影した。赤丸の表示時間は2250ミリ秒，赤丸の提示時間間隔は750ミリ秒であった。正しく再生できた場合を1点とし，正順と逆順の結果をそれぞれ点数化した。正順，逆順いずれの場合も提示した赤丸は2から9個であり，それぞれ2問実施したため，最高得点は16点であった。なお，Westerbergらの方法では，記憶した内容を指差しで解答させるが，本研究では学年毎に教室において課題を一斉に実施したため，記憶した提示順（逆順についてはその逆）を用紙に記入させた。

３．倫理的配慮

本研究の目的や方法，個人情報の留意について，文書に基づき，学校関係者，保護者，対象児に説明し，同意を得て測定を実施した。この際，同意を撤回可能であることについても確認した。また測定にあたっては，対象児の体調等に留意するとともに，測定の途中であっても止めて構わないことを伝えた。本研究は埼玉大学の研究倫理委員会より承認を受けた（承認番号R2-E-19）。

Ⅲ．結果

１．誤答率に対する桁数と手順数の影響

表6，7は，学年ごとの誤答率を桁数に基づいて整理したものである。上述のように日本語の命数法と記数法は，欧米の言語に比べて対応が良いものの，特殊な対応関係となっているものがある。具体的には，①千，百の位の数の両方，又は一方が1である場合と，②百，十の位の両方，又は一方に空位がある場合である。①，②の一方のみ，または両方に該当する数（表1の網掛けされている数）は，命数に現れない1や0を記数において記す必要があることから，命数法と記数法の対応が不透明な不規則変換が必要な数として，結果を分けて示した。規則的変換，不規則変換のいずれについても，学年と桁数を要因とする分散分析を行なったところ，いずれも

桁数が多いほど誤答率が有意に高かった（規則的変換：$F_{3, 249}$=16.298，p<.001，η_p^2=.164；不規則変換：$F_{1, 83}$=17.293，p<.001，η_p^2=.172）。また低学年ほど誤答率は高いものの，学年の主効果は有意ではなかった（規則的変換：$F_{2, 83}$=2.414，p=.098；不規則変換：$F_{2, 83}$=2.648，p=.077）。規則的変換，不規則的変換のいずれについても，学年と桁数の交互作用は統計的に有意ではなかった（規則的変換：$F_{6, 249}$=1.665；不規則変換：$F_{2, 83}$=1.256）。規則的変換について，Bonferroniの方法により桁数間の比較を実施したところ，2年生では一桁と三，四桁，二桁と三，四桁の差，3年生では一桁と四桁，二桁と四桁の差が有意であった。不規則変換については，全ての学年で三桁と四桁の差が有意であった。

表8，9は，学年ごとの誤答率を変換に必要な手順数によってまとめたものである。やはり規則的変換と不規則変換に分けて示した。手順数と学年を要因とする分散分析を行なったところ，規則的変換，不規則変換のいずれについても，手順数が多いほど誤答率が有意に高かった（規則的変換：$F_{3, 249}$=10.331，p<.001，η_p^2=.111；不規則変換：$F_{5, 415}$=9.559，p<.001，η_p^2=.103）。また低学年ほど誤答率は高いものの，学年の主効果は有意ではなかった（規則的変換：$F_{2, 83}$=1.796；不規則変換：$F_{2, 83}$=2.244）。誤答率に関する学年と手順数の交互作用は，規則的変換，不規則的変換のいずれも統計的に有意ではなかった（規則的変換：$F_{6, 249}$=1.155；不規則変換：$F_{10, 415}$=1.689）。規則的変換について，Bonferroniの方法により多重比較を行なったところ，2年生の手順数2と4，2と5，2と6の差，3年生の手順数2と6の差が有意であった。不規則変換については，2年生の手順数2と3，2と4，2と5，2と6，2と7，3と4の差，3年生の手順数2と6，3と6の差が有意であった。

2．ワーキングメモリの発達的変化

表10は，WM課題の成績を学年ごとにまとめたものである。言語性WM課題（$F_{2, 83}$=18.495，p<.001，η_p^2=.308），視空間性WM課題（$F_{2, 83}$=4.079，p<.020，η_p^2=.089）のいずれについても，学年が上がるにつれて成績が上昇した。また言語性WM課題については2年生と4年生，3年生と4年生の差が，視空間性WM課題については2年生と4年生の差が有意であった。な

表6　規則的変換における誤答率（%）と桁数

桁数	第2学年	第3学年	第4学年
1	0	0	0
2	0.6±3.1	0	0
3	16.1±30.7	6.3±12.1	3.6±9.5
4	14.4±27.0	12.1±21.8	6.0±11.3

表7　不規則変換における誤答率（%）と桁数

桁数	第2学年	第3学年	第4学年
3	6.4±20.7	2.0±9.8	1.3±7.9
4	12.5±29.0	7.3±20.9	3.4±15.2

表8　規則的変換における誤答率（%）と手順数

手順数	第2学年	第3学年	第4学年
2	0.4±2.3	0	0
4	16.1±30.7	6.3±12.1	3.6±9.5
5	13.8±29.6	12.1±25.5	7.1±17.8
6	14.7±27.2	12.1±22.8	5.4±10.4

表9　不規則変換における誤答率（%）と手順数

手順数	第2学年	第3学年	第4学年
2	0	0	0
3	6.9±16.4	3.4±5.7	1.2±3.7
4	14.0±24.1	6.7±11.4	3.0±8.5
5	12.4±24.6	7.1±13.4	4.3±9.6
6	15.5±33.0	15.5±30.2	3.6±13.1
7	13.8±32.4	5.2±15.5	3.6±13.1

表10　学年ごとのWM課題の成績

学年	言語性	視空間性
第2学年	8.07±1.13	7.4±1.40
第3学年	8.17±1.28	8.03±1.38
第4学年	10.00±1.59	8.46±1.26

お，言語性WMと視空間性WMの相関は，2年生ではr=.429（p=.020），3年生ではr=.470（p=.010），4年生ではr=.111（p=.574）であった。

3．誤答率に対する数字の属性および参加者特性の影響

表11は，誤答率に対する数字の属性の影響を検討した結果である。変換課題に用いた数ごとに算出した誤答率を目的変数，桁数，手順数を説明変数とし，残差の正規性が確認されたため，重回帰分析（強制投入法）を行なった。従属変数は，変換を行わず，そのまま使用した。ここまでの検討により変換の規則性が誤答率に与える影響は大きくなかったため，説明変数には含めなかった。VIF値を確認したところ2.0を超える変数はなく，多重共線性の問題はないと判断した。学年を合わせた分析と，学年毎の分析を実施したところ，学年をまとめた場合，桁数，手順数の影響が有意であり，桁数，手順数が大きいほど誤答率は高かった。学年を分けて分析したところ，それぞれの学年で手順数の影響が有意だったのに対し，桁数の影響は2年生，3年生では有意傾向だが，4年生では有意ではなかった。

表12は，誤答率に対する対象者属性の影響を検討した結果である。対象者ごとに算出した誤答率を目的変数，言語性WM，視空間性WMを説明変数とし，残差の正規性が確認されたため，重回帰分析（強制投入法）を行なった。従属変数はそのまま使用し，変換は行わなかった。ここまでの検討により誤答率に対する学年の影響は有意ではなかったため，説明変数には含めなかった。誤答率については，二桁以下の数の変換，三，四桁の規則的変換，三，四桁の不規則変換に分けた。VIF値を確認したところ2.0を超える変数はなく，多重共線性の問題はないと判断した。二桁以下の変換については，回帰が有意ではなかった。一方，三，四桁の規則的変換，不規則的変換では，いずれについても視空間性WMの影響のみ有意であった。

Ⅳ．考察

1．数の変換の発達過程

1）学年の影響

表6から9に示したように，学年が上がるにつれて誤答率は低下する傾向がみられたが，学年の効果は有意ではなかった。表中の標準偏差から，学年の効果の個人差が大きいことが確認できる。二桁以下の数では，2年生においてもほとんど誤答がみられなかった。古池（2013）は，5歳児の半数以上で11までの数の書きが可能であることを報告している。また，Miura, & Okamoto（1989）は，1を表すブロックと10を表すブロックを組み合わせて二桁の数を表現する課題の遂行

表11　誤答率に対する桁数，手順数の影響

	全体		第2学年		第3学年		第4学年	
	β	t	β	t	β	t	β	t
桁数	.272	2.115*	.267	1.992†	.262	1.907†	.101	0.671
手順数	.400	2.115**	.354	2.634*	.327	2.381*	.315	2.089*
回帰の有意性	$F_{2,72}$=22.512**		$F_{2,71}$=17.556**		$F_{2,71}$=15.067**		$F_{2,72}$=6.521**	
調整済み R^2	.385		.328		.275		.130	

β：標準化偏回帰係数　** p<.01　* p<.05　† p<.10

表12　誤答率に対する年齢とWM機能の影響

	1-2桁		3-4桁規則的変換		3-4桁不規則変換	
	β	t	β	t	β	t
言語性WM	-.031	-.265	-.153	-1.511	-.147	-1.423
視空間性WM	-.220	-1.891	-.455	-4.504**	-.426	-4.120**
回帰の有意性	$F_{2,83}$ =2.404		$F_{2,83}$ =16.620**		$F_{2,83}$=14.051**	
調整済み R^2	.032		.269		.235	

β：標準化偏回帰係数　** p<.01　* p<.05

を日米で比較し，日本の１年生は10のまとまりを示すブロックを効果的に使うことを明らかにした。これらの知見を考慮すると，幼児期までの経験を基盤に，学校での組織的な教育を通して，二桁までの数の記数法は就学後，早期に習得されると考えられる。

２）変換の規則性，桁数および手順数の影響

表６から９に示したように，不規則変換による誤答率の顕著な高まりはみられなかった。これは欧米の言語において指摘されている，不規則変換に伴う誤答の高まり（Moeller et al., 2015; Zuber et al., 2009）とは異なる傾向であった。日本語の場合，空位の桁に０を当てる，あるいは千，百の位の数として１を当てるといった点に命数法と記数法の間の不透明さがあるが，本研究の結果は，これらが書き誤りの原因とはなりにくいことを示している。同一桁数で空位のある数とない数，例えば632と303（表１パタン14と15），5635と3708（表１パタン38と39）の手順数は，いずれも空位のある数の手順数が多い。これは変換のアルゴリズムの点で負荷が高いというだけで，生じうる書き誤りは単純に予測可能ではないことを意味している。表11に示したように，桁数と手順数の増大は，基本的に書き誤りの増加要因であり，学年を分けた重回帰分析の結果は，手順数の増大が書き誤りの増加と強く関連することを示すものとなっている。しかし，このような単純化した理解は必ずしも適切とはいえず，これは，本研究の分析の限界を示している。今後，規則性，桁数，手順数の組み合わせを整理し，統制した比較に基づいて数の変換過程の発達を分析する必要がある。

２．数の変換の発達とWM機能の関連

表12の結果は，三桁以上の数の変換の誤りが，言語性WM機能と関連しない一方で，視空間性WM機能の低さによって増大することを示していた。言語性WMは，提示された数の音韻情報の保持と理解に使われるが，この結果は２年生から４年生の児童が，四桁以下の数の処理に必要な音韻情報を無理なく保持可能なことを示している。アラビア数字には桁を表す記号がなく，記数法の規則にそって適切に数字を配置することで，数字の大きさを表現する。Zuber et al.（2009）もまた，三桁以下のアラビア数字の記数法の誤りが視空間性WMと強く関連することを示しており，少なくとも四桁以下の数の変換に対する視空間性WM機能の影響の大きさは，言語の特徴によらない，一般性を備えていると考えられる。Zuberらは誤りの質の分析を行い，付加的合成（additive composition：例えば，360を30060と表記）の誤りと視空間性WMが強く結びついていることを示している。付加的合成は，数の要素（300と60）の変換に誤りはないが，位取りの規則に基づいて300に60を重ね書きすることが適切に行えていない。これは，数の変換処理における視空間性WM機能の役割を具体的に示す知見である。本研究においても，誤りの質的分析を通して，今後，数の変換の発達を詳細に示す必要がある。

３．結果に基づく教育的示唆

表６，７に示したように，桁数が多い数には４年生であっても少ないながら誤答がみられた。三桁以上の記数法の習得が児童期の後半にかけて緩やかに進む可能性が考えられる一方で，日本の学校教育では四桁以下の数について，２年生までに一通りの学習機会があることを考慮すると，３年生以上で三，四桁の数の変換に誤答がみられる場合，学習上の潜在的ニーズが存在する可能性に留意する必要があるのかもしれない。

また，数の変換の誤りは，視空間性WM機能の低さと結びついていた。この結果は，数の表記に困難のある児童の支援のポイントが，音韻情報に基づく変換結果の視空間的な統合の仕方をわかりやすく教えることであることを示唆している。

４．本研究の課題

本研究の，特に方法論に関する課題をまとめておく。分析に先立ち，課題成績の性差を確認した結果，２年生の四桁の不規則変換（$F_{1,29}$=4.289，p=.048）および手順数５の不規則変換（$F_{1,29}$=4.866，p=.036）において，いずれも女児の誤答率が高かった。しかし，学年毎の対象者数が少ないこと，性差が部分的にしかみられなかったこと，および性別の影響を検討する計画ではなかったことから，性差の分析を行うには至らなかった。

また，WM機能を測定する課題では，記憶した内容（言語性WMについては数系列，視空間性WMについ

ては刺激の提示順）を紙に記入させた。いずれも一桁の数字を記入する必要があり，課題内容として数の変換処理課題と一部重なっている。しかし，全ての対象者において一桁の数の書きが可能であることを確認し，言語性WM課題，視空間性WM課題に共通する手続きとした。参考にしたオリジナルの課題よりも負荷が高かった可能性はあるが，その負荷は言語性，視空間性課題のいずれかに偏ったものとはなっていない。しかし，課題を個別に実施することでこのような方法をとらず，課題間の重なりをなくすことは，分析の精度を高める上で必要である。また，言語性WM課題に比べ，視空間性WM課題の刺激提示時間が長かった。後者において同一スパンの課題の認知的負荷がやや高かったと可能性があり，今後，是正すべき課題である。

文献

Barrouillet, P., Camos, V., Perruchet, P., & Seron, X. (2004). ADAPT: A developmental, asemantic, and procedural model for transcoding from verbal to Arabic numerals. *Psychological Review*, 111, 368-394.

Berch, D. B., Geary, D. C., & Koepke, K. M. (2018). Language and culture in mathematical cognitive development. In D. B. Berch, D. C. Geary, & K. M. Koepke (Eds.), *Language and culture in mathematical cognition, Vol. 4*, Academic Press, Cambridge, MA, 1-29.

Camos, V. (2008) Low working memory capacity impedes both efficiency and learning of number transcoding in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99, 37-57.

古池若葉（2013）幼児における数字の読み書きの発達. 京都女子大学発達教育学部紀要，9，89-94.

Miura, I. T., Okamoto, Y., Kim, C. C., Steere, M., & Falyol, M. (1993). First graders' cognitive representation of number and understanding of place value: Cross-national comparisons: France, Japan, Korea, Sweden, and the United States. *Journal of Educational Psychology*, 85, 24-30.

Moeller, K., Zuber, J., Olsen, N., Nuerk, H. C., Willmes, K. (2015). Intransparent German number words complicate transcoding: A translingual comparison with Japanese. *Frontiers in Psychology*. 6, Article 740. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00740

Seron, X., & Fayol, M. (1994). Number transcoding in children: A functional analysis. *British Journal of Developmental Psychology*, 12, 281–300.

Spencer, J. P. (2020). The development of working memory. *Current Directions in Psychological Science*, 29(6), 545-553.

Westerberg, H., Hiriks, T., Forsberg, H., & Klingberg, T. (2004). Visuo-spatial working memory span: A sensitive measure of cognitive deficits in children with ADHD. *Child Neuropsychology*, 10(3), 155-161.

山口真希（2011）．知的障害児の数概念発達に関する研究展望．人間文化研究科年報，26，233-241.

Zuber, J., Pinner, S., Moeller K., & Nuer, H. C. (2009). On the language specificity of basic number processing: Transcoding in a language with inversion and its relation to working memory capacity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102, 60-77.