認知心理学研究　第3巻第1号
２００５年，103-112

原著

複数桁数の大小判断における上位2桁処理モデルの提案[1),2)]

島田英昭[3)]（筑波大学）

A two-digit processing model of multi-digit number judgments

Hideaki SHIMADA (*University of Tsukuba*)

This study examines the process underlying multi-digit number judgments. Participants were required to judge which number was the larger from pairs of numbers consisting of two-, three-, or four-digits. In Experiments 1 and 2, the compatibility of the digits in the second, third, or fourth position was manipulated. Analyses carried out for number pairs with different digits in the first position indicated that there was a significant compatibility effect for the second position, but not for the third and fourth positions. In Experiment 3, dummy trials where the number pairs had the same digit in the first position were excluded, and the participants were instructed to make judgments based only on the digit in the first position. The observed compatibility effect for the second position was smaller than that found in Experiment 1. These results suggest that parallel processing of reference digits is limited to the first two positions, and that knowing in advance whether the second-position digit is important for judgments influences the processing of the second-position digit.

Key words: multi-digit number, numerical judgment, two-digit processing

本研究の目的は，複数桁数の大小判断過程を検討することであった．被験者は，2桁同士，3桁同士，4桁同士の数の大小を判断することを求められた．実験1と2では，上位から2, 3, 4桁目の適合性を操作した．最上位桁のみで判断が可能な数の組に対して分析した結果，有意な適合性効果は2桁目のみにみられ，3, 4桁目にはみられなかった．実験3では，最上位桁が等しいダミー試行を除き，さらに最上位桁のみで判断が可能であることを被験者に教示した．その結果，2桁目の適合性効果量が減少した．以上の結果から，最上位桁が異なる桁の大きさが同じ複数桁数の大小判断では2桁目までが並列処理され，2桁目の処理には2桁目が判断に必要であるかどうかについてあらかじめ認知することが重要な役割を果たすことが示された．

キーワード：複数桁数，数の大小判断，2桁処理

数の大小判断（たとえば，“2”と“5”の大小を比較する）の過程については，1桁同士の数（たとえば，Moyer & Landauer, 1967）あるいは2桁同士の数（たとえば，Dehaene, Dupoux, & Mehler, 1990; Hinrichs, Yurko, & Hu, 1981; Nuerk, Weger, & Willmes, 2001）を中心に検討が行われてきた．本研究は，これまでに比較的検討が少ない3桁以上の数の大小判断過程を明らかにするために計画した．

我々が日常の中で数の大きさを扱う場合，買い物における価格の比較や統計データの比較など，3桁以上の数を対象にすることが多いはずである．したがって本研究は，我々が日常の中で数をどのように扱っているのかという問題を解明する手がかりとなり，分かりやすい数の提示法の提案といった数の適切な利用方法を検討するための基礎的知見となることが期待される．また，2桁以下の数を扱った検討が一定の結論を得るまでに達していると思われるが，この現状を踏まえれば，それらの検討を基礎として3桁以上の数を扱う段階に達していると考えられる．

さらに，全般的な認知研究に対しての貢献もできる．たとえば，我々が獲得している数の概念は，長期的な学習の結果と考えることができる．つまり，長期的な学習の結果として獲得される知識の構造を探る手段となる．また，数の構造は良定義であり，文化によらず利用されるものである．これらの点は，計算モデル化による精緻な検討を可能にし，また教育や文化による違いを検討しやすいという利点になる．

1) 本研究実施にあたり，海保博之先生（筑波大学）にご指導いただきました．実験実施と論文執筆にあたり，井関龍太さん（筑波大学）に多大なご協力をいただきました．実験実施にあたり，鈴木祐子さん（筑波大学），岩田吉剛さん（筑波大学）にご協力いただきました．英文アブストラクトについて，Max Stephens 先生 (University of Melbourne) にご校閲いただきました．担当編集委員および匿名の査読者の方には，貴重なご意見をいただきました．ここに感謝いたします．
2) 本研究は，日本認知心理学会第1回大会，日本心理学会第67回大会において発表された．
3) 現所属：産業技術総合研究所

以下，これまでの3桁以上の数を扱った研究を概観し，その問題点を議論する．それを踏まえ，本研究の目的と利用する実験パラダイムを述べ，実験的検討に移る．

先行研究の概観と問題点　これまでの研究では，3桁以上の数の大小判断過程のモデルとして，(a) 全体処理モデル (Hinrichs, Berie, & Mosell, 1982), (b) 逐次処理モデル (Poltrock & Schwartz, 1984) の2つが提案されている．ここでは，これらのモデルの問題点を指摘し，実験的検討の準備とする．

全体処理モデルは，Hinrichs et al. (1982) により提案されたモデルである．実験では，1桁から7桁までの数を1つ提示し，その数が“5555”よりも大きいか小さいかを判断することを求めた．その結果，提示した数を横軸，反応時間を縦軸として，5555を中心としたなめらかな山形の分布に適合することが確認された．この結果を Hinrichs et al. (1982) は，心的数直線に数が写像され，大小が判断されると解釈した．

心的数直線とは，1桁数の大小判断過程の検討の中で提案された概念である．Moyer & Landauer (1967) は，“1”から“9”までの数の中で2つを提示し，大きい方の数を選択するまでの反応時間を計測した．その結果，提示された数の距離が大きくなるにつれて反応時間が短くなることが明らかになった．この現象は距離効果 (distance effect) と呼ばれる．距離効果を説明するために提案された心的数直線モデルは，心的数直線と呼ばれる表象に数が写像され，大小が判定されるとする．このとき，2数の距離が小さい場合には，心的数直線上で近い位置に写像されるために分離が難しく，反応時間が長くなるとする．全体処理モデルは，心的数直線モデルを複数桁数に拡張したものである．

全体処理モデルが抱える問題は，判断される数のすべての桁が並列に処理されるという点である．つまり，桁が大きくなった場合に，その並列処理の限界が仮定されていない．人間の情報処理限界を考慮した際には，一定の処理限界を仮定することが妥当であり，後に述べる Poltrock & Schwartz (1984) はこの点を指摘し，実験的検討を通して全体処理モデルを否定している．

この点を考慮すると，Hinrichs et al. (1982) が全体処理モデルを提唱する際に用いた，山形の分布を確認する際の統計処理の方法に問題がある．分析では，提示された数と5555との距離に基づく変数を独立変数，反応時間を従属変数とした回帰分析が用いられた．このとき，下位にある桁は回帰モデルの中できわめて小さな影響しか持っておらず，たとえ下位にある桁の影響がなくてもモデルがある程度適合してしまうという問題がある．同様の問題点は Itsukushima, Tozawa, & Itagaki (1990) によっても指摘されており，すべての桁が並列に処理されるという解釈には疑問が残る．

Poltrock & Schwartz (1984) は，上記の問題を指摘した上で，桁の大きさが同じである場合の大小判断では，最上位桁の処理が完了したときに限り次の桁が処理されるとする逐次処理モデルを提案した．たとえば，“abcd”と“efgh”の大小判断をする場合，はじめに“a”と“e”の処理が行われるが，最上位桁の処理が完了しなければ次の桁の“b”と“f”が処理されないとする．

実験では，2つの4桁数，あるいは6桁数が提示され，大きい方の数を選択する課題が用いられた．操作された変数は，上位桁の一致範囲である．たとえば“2345”と“6745”は最上位桁が一致しない条件である（一致なし条件）．また，“2345”と“2675”は，最上位桁が一致し，2桁目が一致しない条件であり（1桁一致条件），2桁一致（“2643”と“2675”）以下同様に条件が設定された．その結果，一致範囲を独立変数，反応時間を従属変数とした線形回帰が確認された．この回帰は，“反応時間＝桁のシフトと比較のコスト×桁の一致範囲＋切片”と解釈された．つまり，上位桁が一致していると判断された際に，順次処理される桁がシフトすることから，線形回帰になると解釈された．

逐次処理モデルの抱える問題点は，これまでの2桁数を扱った研究との整合性である．たとえば，Hinrichs et al. (1981) は，提示された2桁数が，“55”より大きいか小さいかを判断する課題を行い，反応時間を計測した．その結果，横軸を提示した数，縦軸を反応時間とした分布は，55を中心としたなめらかな山形になることが確認された．この結果で重要なことは，十の位のみで大小の判断が可能であるにもかかわらず，一の位の処理が行われることである．たとえば“61”が提示された場合よりも，“69”が提示された場合の方が反応時間が短い．これは，最上位桁で判断が可能である場合には次の桁の処理が行われないとする逐次処理モデルでは説明ができない．

本研究の目的と実験パラダイム　本研究では，以上に述べた全体処理モデルと逐次処理モデルの問題点を解決するために，新たな処理モデルの提案を行い，そのモデルの検証とパラメータ決定のための実験を行う．

全体処理モデルと逐次処理モデルは，桁の大きさが同じで，かつ最上位桁が異なる数の大小判断において実験的に分離が可能である．逐次処理モデルでは，最上位桁の処理のみが行われ，2桁目以降は処理されない．一方で，全体処理モデルでは，心的数直線に写像するために，すべての桁が並列処理される．しかし，これらの制約がこれまでの実験結果の説明を困難にしていることは先に述べた通りである．

そこで本研究は，上位からある一定の範囲の桁が並列処理され，それらの桁が一致したときに限り，それ以降の範囲の桁が処理されるとするモデルを提案する．たと

えば，2桁目までが並列処理され，3桁目以降は2桁目までが一致したときに限り処理されるとすれば，“2345” と “6789” の場合には “23” と “67” による判断がなされることになる．また，3桁目までが並列処理されるとすれば，同様に “2345” と “6789” の場合には “234” と “678” による判断がなされることになる．このモデルは，処理限界が仮定され，さらに2桁数を扱った研究結果との整合性が得られる．したがって，上記で議論したこれまでのモデルの問題点を解決できる．

本研究では，桁の大きさが同じで，最上位桁が異なる数の大小判断課題を用い，適合性効果 (compatibility effect) の生起を吟味することで，上記のモデルの分離を試みる．適合性とは，最上位桁とそれ以降の桁の大小の方向の一致性である．たとえば2桁数の大小判断において，“52” と “67” は十の位と一の位がともに “67” の方が大きい，つまり大小の方向が一致するが，“57” と “62” は方向が異なる．前者は適合条件，後者は不適合条件と呼ばれ，十の位が等しい場合には，適合条件の方が反応時間が短いことが明らかになっている．この現象が適合性効果と呼ばれる（たとえば，Dehaene et al., 1990）．

本研究では，これを3桁以上の数に拡張する．たとえば3桁数では，2, 3桁目の適合性をそれぞれ操作する．“218” と “454” を例にとれば，最上位桁に対して2桁目の方向は一致し，3桁目の方向は一致しない2桁目適合・3桁目不適合条件である．3桁数の場合の材料例を Table 1 に示す．

本研究では，実験1, 2において，並列処理の範囲の同定を行い，限界が2桁目までにあることを示す．実験3では，2桁目の処理が必要であるかどうかをあらかじめ認知することが2桁目の処理に重要な役割を果たしていることを示し，2桁目の処理の特性の一つを示す．

Table 1
3桁数の材料例（実験1）

		3桁目の適合性	
		適　合	不適合
2桁目の適合性	適　合	214 458	218 454
	不適合	254 418	258 414

総合考察では，本研究が提案するモデルがこれまでの実験結果を矛盾無く説明できること示し，提案するモデルについての議論を行う．

実　験　1

実験1では，上記の操作により，これまでに提案された2つのモデルの予測性を検討すると同時に，本研究の提案するモデルにおける並列処理の限界の同定を行うことを目的とする．課題として，最上位桁が異なる，2桁同士，3桁同士，および4桁同士の数の大小判断課題を用いる．操作する変数は，2桁目以降の適合性である．逐次処理モデルに従えば，最上位桁が異なる場合は次の桁の処理は行われないため，適合性効果は生じないことが予測される．全体処理モデルに従えば，すべての桁が並列処理されるため，適合性効果はすべての条件において生じると予測される．最後に，本研究の提案するモデルに従えば，一定範囲の桁までが並列処理されると考えられるので，適合性効果が一定範囲にまで生じることが予測される．

以上の予測を Table 2 にまとめておく．なお，Table 2 に示した上位2桁処理モデルとは，一定範囲の並列処理の限界を持つとするモデルの一つで，2桁目までの並列処理がなされると仮定するモデルである．3桁目や4桁目に限界があるとするモデルも，同様に予測が可能で

Table 2
各処理モデルからの予測（実験1, 2）

処理モデル		適合性の位置					
		2桁数	3桁数		4桁数		
		2桁目	2桁目	3桁目	2桁目	3桁目	4桁目
実験1	全体処理モデル	+	+	+	+	+	+
	逐次処理モデル	0	0	0	0	0	0
	上位2桁処理モデル	+	+	0	+	0	0
実験2	全体処理モデル	※	※	+	※	+	+
	逐次処理モデル	−	−	0	−	0	0
	上位2桁処理モデル	※	※	0	※	0	0

注：＋は適合条件の反応時間が短いこと，0は適合条件と不適合条件の反応時間差がないこと，−は適合条件の反応時間が長いことを示す．※は，適合性効果と距離効果の関数で反応時間の差が決定される．

ある．

方法

被験者　成人13名が実験に参加した．年齢は18歳から31歳まで，平均21歳であった．

実験装置　実験の制御にコンピュータ（IBM製 Net Vista 26J）を用いた．被験者の反応はキーボード（富士通製 FMV-KB321）により入力された．刺激の提示には，17インチ CRT ディスプレイ（三菱製 RDS171X）を用いた．

材料　2桁同士，3桁同士，4桁同士の数の組を準備し，2桁目以降の適合性を操作した．これにより，2桁数では2桁目の適合性についての2条件，3桁数では2(2桁目の適合性)×2(3桁目の適合性）の4条件，4桁数では同様に8条件を設定した．

用意した数の組において，最上位桁の距離は2から4であるものとした．また，2桁目以降は距離が4あるいは5であるものを用いた．適合性は対応する下位桁を入れ替えることによって操作したため，各条件に含まれる最上位桁のパターンは同じである．たとえば適合条件“21”と“45”に対して，不適合条件“25”と“41”であり，3, 4桁数も同様に設定した (Table 1)．以上の手続きで，合計14条件に9種ずつの数の組を用意した．

上記の数の組に加えて，Nuerk et al. (2001) に従い，最上位桁のみでは大小判断ができないダミー刺激（たとえば，“245”と“267”）を加えた．ダミー刺激は，2桁数では1桁目が一致し2桁目が一致しないもの4種，3桁数では1桁目のみが一致し2, 3桁目が一致しないもの4種と，1, 2桁目がともに一致し3桁目が一致しないもの4種，同様に4桁数では1桁目のみ一致，1, 2桁目が一致，1, 2, 3桁目が一致するものそれぞれ4種ずつ，合計で24種を準備した．

以上の手続きにより，合計150種の数の組を準備した．なお，刺激として用いた数は1から9までであり，0は含まなかった．

数の組は，ディスプレイの中央に水平方向に提示した．提示する数の間には，1桁分の大きさのスペースを空けた（たとえば，“2345 6789”）．ディスプレイ上に提示した刺激の大きさは，縦方向についてはすべての条件で視角にしておよそ0.7度（ディスプレイ上で13 mm）であった．また，横方向については，提示された刺激全体で，2桁数がおよそ2.0度 (35 mm)，3桁数が2.9度 (50 mm)，4桁数が3.7度 (65 mm) であった．

手続き　1試行は，被験者が左手任意の指で割り当てられたキーを押すことで始まった．最初に，750 msの注視点を提示した．注視点には，その後に2桁数が提示される場合には“aa aa”，同様に3, 4桁数の場合にはそれぞれ“aaa aaa”, “aaaa aaaa”を用いることで，その試行で提示する桁の大きさを予告した．注視点が消えた直後に，数の組を注視点と同じ位置に提示した．被験者には，左右の数の中で大きい方を選択し，右手人差し指と中指を用いて，左右に割り当てられたキーをできるだけ速く正確に押すことを求めた．数の組は被験者がキーを押すまで表示し続け，被験者がキーを押したときに消去し，次の試行に移った．

試行は2つのブロックに分割した．用意した150種の数の組の左右を入れ替えることで合計300種の刺激を作成し，この300種の大小判断を1ブロックとした．はじめに20試行の練習を行い，300試行のブロックを，休憩を挟み2度繰り返した．練習試行に用いた刺激は，300種の中からランダムに選択した．1ブロック内の試行順序は，被験者ごとにランダム化した．

実験に要した時間は，平均して25分程度であった．

結果と考察

まず，ダミー刺激を含む試行の反応は分析から除いた．次に，分析対象の試行の反応から誤答を除いた．誤答率は，分析対象の反応全体の4.2%であった．誤答率がきわめて低いため，反応時間のみの分析とした．被験者ごとに，正答の反応時間の中で，平均から3*SD*以上離れた反応時間は異常反応として分析から除いた．以上の手続きにより，誤答と合わせ，合計5.6%を分析から除外した．

適合性効果を確認するために，Nuerk et al. (2001) や Poltrock & Schwartz (1984) と同様の適合性効果量を，操作した6種の適合性について以下のように定義し，被験者ごとに求めた．

分析対象となる126種の数の組に対して，4度繰り返し測定した反応時間の幾何平均値を求めた．その126の代表値を用いて，14の実験条件ごとに，それぞれ割り当てた9種の数の組の算術平均値と標準偏差を算出し，Table 3に示した．

以上のようにして求めた14条件の平均反応時間に対して，2桁数では2桁目の不適合条件の反応時間から適合条件の反応時間を引くことで適合性効果量を求めた．また，3桁数では，2桁目の適合性効果量を，2桁目が適合していない2条件の平均反応時間から2桁目が適合している2条件の平均反応時間を引くことで求めた．3桁数の3桁目，および4桁数も同様である．以上により求めた6種の適合性効果量の平均と標準誤差をTable 4に示す．

これら6条件のそれぞれに対して，平均＝0を帰無仮説としたt検定（両側，以下同様）を行った．その結果，2桁目の場合は2, 3, 4桁数すべてにおいて有意であったが（順に，$t(12)=3.87$, $SE=6.86$, $p<.01$; $t(12)=5.95$, $SE=3.89$, $p<.01$; $t(12)=2.97$, $SE=4.79$, $p<.05$)，3桁目以降は有意ではなかった（3桁数3桁目，4桁数3, 4桁目の順に，$t(12)=0.78$, $SE=5.23$; $t(12)=1.96$,

Table 3
各条件の平均反応時間と標準偏差

桁の大きさ	適合性の位置			実験１		実験２		実験３	
	２桁目	３桁目	４桁目	RT	SD	RT	SD	RT	SD
２桁	適　合			563	84	571	51	524	59
	不適合			589	87	585	57	529	56
３桁	適　合	適　合		593	77	596	57	535	60
		不適合		602	84	595	58	532	63
	不適合	適　合		621	85	591	53	546	62
		不適合		620	92	601	58	533	59
４桁	適　合	適　合	適　合	623	97	593	53	539	58
			不適合	610	90	608	73	542	60
		不適合	適　合	612	89	597	56	538	55
			不適合	607	88	611	60	548	59
	不適合	適　合	適　合	632	88	594	64	549	60
			不適合	626	99	595	58	545	59
		不適合	適　合	623	86	607	64	551	66
			不適合	628	95	600	55	546	57

注：RT は平均反応時間，SD は標本標準偏差．
単位は ms.

$SE=2.71$; $t(12)=1.48$, $SE=2.90$).

また，2, 3, 4 桁数の各結果を 2, 3 桁目についてそれぞれ統合し，より頑健な比較を試みた．2, 3, 4 桁数の統合した２桁目の適合性効果量に対する同様の t 検定の結果は有意であった ($t(12)=4.99$, $SE=4.27$, $p<.01$). 一方， 3，4 桁数における統合した３桁目の適合性効果量に対しては有意ではなかった ($t(12)=0.21$，$SE=3.01$). これらの平均値を Table 4 に示す．

以上から，適合性効果は２桁目のみに生じることが明らかになった．この結果は，桁の大きさが同じで最上位桁が異なる数の大小判断には，最上位桁と２桁目が並列処理され，それ以降の数は処理されないことを示していると考えられる．したがって，先に述べた全体処理モデルと逐次処理モデルの予測に反し，これらのモデルは支持できない．そして，本研究が提案する一定範囲の桁が処理されるとするモデルが支持され， その範囲は２桁目までであることが明らかになった．

以下，実験１で示された２桁目までに限界があるとする仮説を上位２桁処理モデルと呼ぶことにする．

実　験　2

実験１では，最上位桁を一致させた上で，２桁目以降の適合性を操作するという手続きにより得た材料を用いた．実験２では，この手続きを変化させて検討を行うことで，実験１の結果が特定の数の組に固有のものではないことを示す．これにより，実験１で明らかになった上位２桁処理モデルの妥当性を検討する．

実験１と異なる点は，Nuerk et al. (2001) が用いたように，２桁目までの数（たとえば “2345” であれば “23”) の距離を適合条件と不適合条件でほぼ等しくなるように設定することである．たとえば，２桁数では，実験１では適合条件が “35” と “79” に対して，不適合条件では “39” と “75” のように，２桁目を入れ替えることで条件設定をした．前者は距離が 44，後者は距離が 36 となる．一般的に適合条件は不適合条件に比べて数全体の距離が小さくなる．そこで，最上位桁を修正することで，２桁目までの数の距離が条件間で平均的にほぼ等しくなるような数の組を準備した．たとえば，実験１の “35” と “79” の組は，実験２では適合条件が “45” と “79”，不適合条件が “49” と “85” のように調整し，適合条件の距離が 34，不適合条件の距離が 36 となる．同様に，3, 4 桁数では，２桁目までの数の距離の平均が，各条件でほぼ等しくなるような数の組を準備した．

２桁目までの数の距離を統制した理由は，実験１と異なる材料を用いることを保証し，その上で比較する３つのモデルについて，以下の予測が得られることである．

まず，逐次処理モデルでは，２桁目の不適合条件の反応時間が適合条件よりも短いことが予測される．これは，

Table 4
各条件の適合性効果量と標準誤差

桁の大きさ	適合性の位置	適合性効果量				
		実験 1	実験 2	実験 2（距離による統制）	実験 1, 2 統合	実験 3
2 桁	2 桁目	26.6**	13.7	29.1*	27.6**	5.6
		(6.9)	(6.4)	(8.7)	(5.4)	(6.0)
3 桁	2 桁目	23.2**	0.3	15.7**	20.1**	6.2
		(3.9)	(4.3)	(4.0)	(2.9)	(4.5)
	3 桁目	4.1	4.8	4.8	4.4	−7.5
		(5.2)	(4.1)	(4.1)	(3.5)	(5.5)
4 桁	2 桁目	14.2*	−3.4	12.0*	13.3**	5.5**
		(4.8)	(4.4)	(4.7)	(3.4)	(1.1)
	3 桁目	−5.3	6.0	6.0	−0.7	2.2
		(2.7)	(4.6)	(4.6)	(2.8)	(2.1)
	4 桁目	−4.3	6.1	6.1	0.0	0.7
		(2.9)	(3.0)	(3.0)	(2.4)	(2.9)
				平均適合性効果量		
	2 桁目	21.3**	3.5	18.9**	20.3**	5.8
		(4.3)	(6.2)	(4.4)	(3.1)	(2.9)
	3 桁目	−0.6	5.4	5.4	1.8	−2.7
		(3.0)	(3.4)	(3.4)	(2.3)	(3.0)
距離効果の偏回帰係数				−92.1**		
				(17.8)		

注：括弧内は標準誤差.
実験 2 では，適合条件と不適合条件の反応時間の差を示してある.
* $p<.05$, ** $p<.01$

2 桁目までの数の距離を統制した刺激を用いることにより，不適合条件は最上位桁の距離が大きくなり，距離効果が生じるためである．また，逐次処理モデルは最上位桁のみ処理されるとすることから，3, 4 桁目の適合性効果は実験 1 と同様に生じないことが予測される.

上位 2 桁処理モデルに基づく予測では，距離効果により適合条件の反応時間が長くなるが，2 桁目の適合性効果により適合条件の反応時間が短くなる．このため，距離効果と適合性効果の相対的な効果の違いにより，2 桁目の適合条件と不適合条件の反応時間の予測が異なる．したがって，上位 2 桁処理モデルからは上位 2 桁目の適合条件と不適合条件の反応時間の差に明確な予測はできないが，距離効果と 2 桁目の適合性効果を統計的に分離すれば，それぞれの効果を確認することができると予測される．また，3, 4 桁目については，上位 2 桁処理モデルは 3 桁目以降の処理は行われないとすることから，実験 1 と同様に適合性効果は生じないと予測される.

全体処理モデルの場合は，2 桁目については上位 2 桁処理モデルの予測に一致する．また，3, 4 桁目については，距離の統制は 2 桁目までの数の距離に行っているため，3, 4 桁目の適合性の操作は実験 1 と同様である．したがって，適合条件の反応時間が不適合条件よりも短くなることが予測される.

以上の予測を Table 2 にまとめておく.

方法

実験 1 に参加していない成人 10 名が実験に参加した．年齢は，22 歳から 30 歳まで，平均 25 歳であった．材料として，上記のように統制した刺激を準備した．ダミー刺激は，実験 1 と同様のものを用いた．その他の点は，すべて実験 1 と同様であった.

結果と考察

実験 1 と同様，ダミー刺激に対する反応は分析から除いた．分析対象となる反応の誤答率は，平均 3.4% であった．実験 1 と同様の手続きにより異常反応を分析から除いた結果，誤答と合わせて，4.7% を分析から除いた．誤答率がきわめて低いため，実験 1 と同様に，反応時間のみの分析とした.

まず，実験 1 と同様の手続きで，2 桁目以降の適合条件と不適合条件の反応時間の差を算出した.

ここで，3 桁数における 3 桁目の反応時間の差が，74.4 ms である被験者がみられた．この被験者を除いた

他の被験者の反応時間の差の平均値が4.8 ms，標準偏差が11.5 msであり，この被験者の反応時間の差は，他の被験者の平均に比較しておよそ6*SD*の距離がある．このため，この値を異常値とみなし，この被験者のデータを排除した9人の被験者のデータを分析対象とした．各条件の平均反応時間と標準偏差をTable 3に示す．

実験1と同様に，適合条件と不適合条件の反応時間の差を吟味する．6条件それぞれの反応時間の差と標準誤差をTable 4に示す．これらの反応時間の差に対して，実験1と同様のt検定により比較した．その結果，2桁目に関しては，いずれも有意ではなかった（2, 3, 4桁数の順に，$t(8)=2.15$，$SE=6.35$；$t(8)=0.06$，$SE=4.27$；$t(8)=0.77$，$SE=4.39$）．また，実験1と同様に効果を統合して比較した場合も有意ではなかった（$t(8)=1.30$, $SE=6.22$）．

さらに，3, 4桁目についても有意ではなく（3桁数3桁目，4桁数3, 4桁目の順に，$t(8)=1.18$，$SE=4.07$；$t(8)=1.30$, $SE=4.60$；$t(8)=2.02$, $SE=3.05$），実験1と同様に3桁目の効果を統合して分析した結果も有意ではなかった（$t(8)=1.60$, $SE=3.36$）．

以上の結果から，2桁目の反応時間の差を予測する逐次処理モデルは支持できない．また，3, 4桁目の差を予測する全体処理モデルも支持できない．したがって，以下は上位2桁処理モデルについて吟味する．

2桁目の反応時間に差がなかったことに対しての説明は，次の2つが考えられる．一つは，上位2桁処理モデルによる予測で，距離効果と適合性効果が同程度生じたことによって差が相殺されたことである．もう一つは，単なる測定誤差により統計的な有意差が得られなかったことである．そこで，距離効果と適合性効果の相互作用を確認するために，以下の重回帰分析を行った．なお，この重回帰分析の手法は，Lorch & Myers (1990) に従った．

実験1と同様に，4度繰り返し測定した126種の数の組に対する反応時間の幾何平均値を求めた．この手続きを被験者ごとに行い，被験者ごとに126の反応時間のデータを得た．

次に，被験者ごとに，126の反応時間のデータを従属変数として重回帰分析を行った．独立変数として，以下のものを設定した．第1に，最上位桁の距離による距離効果を示す変数で，最上位桁をD_1, D_2としたとき，$\log_{10}|D_1-D_2|$により定義した．第2に，桁の大きさを示すダミー変数である．これは，桁が大きい場合は，符号化に要する時間が長いことが期待されるためである．2桁数の場合に1，それ以外の場合に0をとる2桁数のための変数，および同様に3桁数のための変数を準備した．これらの変数の偏回帰係数は，4桁数と比較した相対的な反応時間の差を示すことになる．最後に，適合性効果に関する変数を6種設定した．一つは，2桁数における2桁目の適合性を示すもので，2桁数における不適合条件の場合は1，それ以外の場合は0を設定した．以下同様に，3, 4桁数の2桁目以降にダミー変数を設定した．以上の手続きにより，独立変数として合計9種を準備した．

被験者ごとに重回帰分析を行った後，重要である距離効果の変数と2桁目の適合性に関するダミー変数の偏回帰係数に対して，被験者全員の平均値を算出した．それらの値をTable 4に示す．

各平均値に対してt検定を行った結果，まず，距離効果の偏回帰係数が有意であった（$t(8)=5.17$，$SE=17.82$，$p<.01$）．また，適合性に関する偏回帰係数は，2, 3, 4桁数のいずれの場合も2桁目が有意であり（順に，$t(8)=3.34$, $SE=8.70$, $p<.05$；$t(8)=3.92$, $SE=4.00$, $p<.01$；$t(8)=2.56$，$SE=4.70$, $p<.05$），実験1と同様に効果を統合しても有意であった（$t(8)=4.31$，$SE=4.39$，$p<.01$）．以上の分析から，先に行われた分析において適合条件と不適合条件に反応時間の差が2桁目にみられなかった背景には，距離効果と適合性効果が相殺されていることが原因であることが明らかになった．

最後に，適合性効果に対するより頑健な分析をするために，実験1のデータと，距離による統制が行われた後の実験2のデータを統合して分析を行い，結果をTable 4に示す．その結果，2桁目の適合性効果は2, 3, 4桁数のすべてにおいて有意であり（順に，$t(21)=5.11$，$SE=5.39$，$p<.01$；$t(21)=6.83$，$SE=2.94$，$p<.01$；$t(21)=3.88$, $SE=3.43$, $p<.01$），それらを統合した場合も有意であった（$t(21)=6.54$，$SE=3.11$，$p<.01$）．一方で，3桁目以降はいずれも有意ではなく（3桁数3桁目，4桁数3, 4桁目の順に，$t(21)=1.24$, $SE=3.52$；$t(21)=0.25$, $SE=2.75$；$t(21)=0.01$, $SE=2.41$），3桁目の効果を統合した結果も有意ではなかった（$t(21)=0.78$，$SE=2.34$）．

以上から，適合性効果は2桁目に生じ，3, 4桁目には生じないことが明らかになった．この結果は，上位2桁処理モデルを支持するものである．

実験3

実験1, 2において用いた最上位桁が異なる数の大小判断では，2桁目は判断に必要ない，いわば余計な情報である．にもかかわらず，最上位桁と並列に処理が行われることが明らかになった．実験3では，ここまでの結果を踏まえ，2桁目の処理の特性をさらに吟味することを目的として計画した．

実験3では，2桁目が判断に必要であるかどうかについてあらかじめ認知すること（以下，必要性の認知とする）が，2桁目の処理に影響していることを仮説として

検討する．ここで言う必要性の認知とは，大小判断する対象が提示される以前の段階で，大小判断に必要な情報となる可能性が被験者の中で明らかになっていることを指す．実験1, 2では，最上位桁のみでは判断ができないダミー刺激を試行中に含んでいるため，2桁目の処理の必要性が認知されていることになる．ダミー刺激が提示された場合，2桁目が大小判断に必要な情報となるからである．

そこで実験3では，ダミー刺激を取り除くことで常に最上位桁のみで判断ができる試行系列を用いる．さらに，練習の前に，最上位桁のみで判断が可能であり，2桁目以降は無視するよう被験者に教示する．これにより，被験者は，2桁目が大小判断に必要ない情報であることが分かる．2桁目の処理の必要性の認知が大小判断のメカニズムに関わりを持つとすれば，2桁目の適合性効果は消失するか，あるいは実験1, 2に比較して小さくなることが予測される．

方法

実験1, 2に参加していない成人11名が実験に参加した．年齢は，19歳から22歳まで，平均20歳であった．材料は，実験1のものからダミー刺激を除いた数の組126種である．1ブロックは，126種の数の組の，左右を入れ替えたもの252試行よりなり，休憩をはさみ2度繰り返した．その他の点は，すべて実験1と同様であった．実験に要した時間は，20分程度であった．

結果と考察

誤答率は平均2.0%であった．実験1と同様の手続きにより異常反応を分析から除いた結果，誤答と合わせて，分析対象となる反応の3.2%が分析から除かれた．誤答率がきわめて低いため，反応時間のみの分析とした．各条件の平均反応時間と標準偏差をTable 3に示す．

実験1と同様に，6種の適合性効果量を算出し，標準誤差とともにTable 4に示す．以下，(a) 適合性効果の生起の検討，(b) 適合性効果量の変化の検討の順で分析を行った後，考察を行う．

2桁目の適合性効果の生起を検討するために，実験1と同様の t 検定を行った結果，4桁数における2桁目の適合性効果量が，5.5 msときわめて低い値ではあるが有意であった ($t(10)=5.22$, $SE=1.06$, $p<.01$)．2, 3桁の比較における2桁目の適合性効果はいずれも有意ではなかった（それぞれ，$t(10)=0.93$, $SE=5.96$; $t(10)=1.38$, $SE=4.47$）．実験1と同様に，上位2桁目の適合性効果を統合して頑健に比較した結果，有意ではなかった ($t(10)=1.98$, $SE=2.91$)．

次に，適合性効果量の変化を検討するために，実験1と3における統合した2桁目の適合性効果量を実験間比較した．その結果，2つの実験における適合性効果量の差が有意であった ($t(22)=3.13$, $SE=5.23$, $p<.01$)．

以上の結果を踏まえて考察を行う．まず，実験1と3の比較から，2桁目の処理の必要性の認知が，2桁目の処理に影響を与えることが明らかになった．その一方で，適合性効果の生起については，4桁数とそれ以外の場合で結論が一致していない．この点の説明の一つは，4桁数の場合にタイプIエラーが生じているということである．その理由は，4桁数のみに適合性効果が生じる妥当な解釈が現時点で考えることができないことである．しかし，2, 3桁数の条件において，検定力の不足によって差が検出できなかった可能性も否定できない．以上から，適合性効果の生起については，今後のさらなる検討が必要であると考えられる．

2桁目の処理の必要性の認知に関する上記の考察をまとめると，適合性効果の生起については現在のところ結論を下すことは困難であるが，必要性の認知が2桁目の処理に影響することが明らかになった．

総合考察

本研究の目的は，複数桁数の大小判断過程について，これまでに提案されたモデルの問題点を指摘した上で実験的検討を行い，それらの問題点を解決できる新たなモデルを提案することであった．特に，上位からある範囲の桁が最上位桁と並列処理されるというモデルを提案し，その処理範囲の同定とその特性を実験的に検討した．

実験1, 2では，適合性効果は2桁目までに限定され，3桁目以降には生じなかった．この結果は，これまでに提案されたモデルでは説明ができない．そして，上位からある範囲の桁が最上位桁と並列処理されるというモデルにより説明が可能であり，特にその範囲は2桁であることを明らかにして，そのモデルを上位2桁処理モデルと呼ぶこととした．

実験3では，2桁目の処理特性の検討の一つとして，2桁目の処理の必要性の認知が2桁目の処理に関わりがあるかどうかを検討した．その結果，処理の必要性が認知されていない条件において適合性効果が生起するかについては結論を下すことができなかったが，実験1との比較から，処理の必要性の認知が2桁目の処理に影響を与えることが明らかになった．

以下，総合考察として，まず，先行研究において提案されたモデルを支持する実験データが，上位2桁処理モデルによって矛盾なく説明できることを示す．次に，今後の課題を含め，上位2桁処理モデルの詳細について議論を行う．

先行研究のデータの説明

まず，全体処理モデルを提案したHinrichs et al. (1982) の検討では，序論に述べた通り，提示された数と“5555”の大小判断をする課題において，提示された数と5555の距離が大きくなるにつれて反応時間が短く

なることを示している．しかし，分析に用いられた回帰モデルは，下位にある桁の効果がない状況でも，ある程度適合する問題があることを述べた．したがって，本研究の提案した上位2桁処理モデルであっても，Hinrichs et al. (1982) のデータは矛盾なく説明が可能である．

次に，逐次処理モデルを提案した Poltrock & Schwartz (1984) は，たとえば "2345" と "6745" を上位桁の一致がない一致なし条件，"2345" と "2675" を最上位桁のみ一致する1桁一致条件とし，順次上位桁から桁の一致する範囲を操作した．分析においては，桁の一致する範囲を独立変数，反応時間を従属変数とした回帰分析を行い，線形回帰がよく適合することを示した．そして，"反応時間＝桁のシフトと比較のコスト×桁の一致範囲＋切片" と解釈した．これにより，逐次処理モデルが説明モデルとして適切であると結論づけた．

この解釈の問題点は，一致なし条件と1桁一致条件の反応時間の差，さらに1桁一致条件と2桁一致条件の差が，同じ原因によって生じているという保証はないことである．本研究の実験結果を考慮すれば，次のように結果を説明できる．

まず，一致なし条件と1桁一致条件の反応時間の差については，2桁目までを並列処理するという本研究の主張の下でも説明できる．その理由は，2桁数の大小判断では，数の距離の関数により反応時間が説明できるという知見があることである．つまり，仮に2桁目までが並列に処理されるとしても，1桁一致条件は一致なし条件に比べて常に距離が小さいため，反応時間が長くなると考えられる．これに対して，3桁目以降は，Poltrock & Schwartz (1984) の解釈の通り，順次処理されていくと考えることで，桁の一致する範囲が大きくなれば反応時間が長くなると説明できる．

以上の解釈を行うと，Poltrock & Schwartz (1984) の実験結果は，一致なし条件と1桁一致条件の反応時間の差が2桁目までの数の距離の関数，そして1桁一致条件と2桁一致条件の差は桁のシフトと比較のコストと考えることができる．これは，上位2桁処理モデルと矛盾しない説明となる．

上位2桁処理モデルの課題

本研究が提案した上位2桁処理モデルについて，さらに検討されるべき問題を以下の3点に分けて議論しておく．

第1に，実験的検討の方法の違いである．たとえば，Hinrichs et al. (1982) はある基準数に対する比較を求めているが，本研究や Poltrock & Schwartz (1984) は同時に提示した2数の大小判断を求めている．また，2数を比較する課題であっても，本研究では2, 3, 4桁数を用いたが，Poltrock & Schwartz (1984) は4, 6桁数を用いている．現在のところ，これまでに得られた結果の上位2桁処理モデルによる説明が可能ではあるが，このような実験パラダイムの違いが結果に影響を及ぼす可能性がある．今後，これらの実験パラダイムの違いを明らかにし，上位2桁処理モデルの一般化可能性と限界を明らかにしていく必要があるだろう．

第2に，本研究の示した並列処理の限界の説明である．現状では，以下の2つの説明が考えられる．

一つは，最上位桁から処理が開始されるが，3桁目の処理が行われる前に反応が完了するため，3桁目以降は処理されないという時間限界である．しかし，これまでの数の大小判断に関する研究では，このような処理時間の限界は適合性効果に重要ではないという知見が多い (Dehaene et al., 1990; Schwarz & Ischebeck, 2003)．

もう一つは，作動記憶容量の限界である．Cowan (2001) は，作動記憶内で一度に処理できる項目の限界が4項目であることを様々な実験的検討をレビューすることで示している．本研究の示した2桁目までの並列処理は，合計4つの数が一度に処理されると考えられ，この4項目の処理限界と一致している．しかし，これまでの2桁数の大小判断に関する研究では，十の位と一の位が分離されない表象である心的数直線に写像され，大小が判断されるとする主張（Dehaene et al., 1990; Hinrichs et al., 1981; これに反する知見として，Nuerk et al., 2001）もある．この場合には，2桁目までの数を1項目として考える方が妥当であると思われ，Cowan (2001) のモデルからの説明は困難になる．

以上から，なぜ2桁目に並列処理の限界があるのかという問題は，現状では解決が困難である．この問題については，今後の検討が期待される．

第3に，2桁目の処理の性質である．本研究では，最上位桁，2桁目，3桁目以降に分けて，それぞれの処理特性を明らかにしている．最上位桁は，判断に必要であるために，常に処理が行われる．これに対して2桁目は，実験1, 2で明らかになったように，判断に必要な情報でなくても最上位桁との並列処理が行われる．また，実験1と3の比較で分かるように，2桁目の処理の必要性の認知により，処理の程度が変化する．3桁目以降は，実験1, 2において明らかになったように，3桁目が判断に必要な可能性があっても，つまり，処理の必要性の認知があっても最上位桁との並列処理は行われない．以上の結果は，2桁目が，最上位桁や3桁目以降とは異なった，特殊な性質を持つことを示唆している．

本研究は，2桁目の処理に，その必要性の認知が影響することを明らかにしたが，これは2桁目の処理に影響を与える変数の一つにすぎない．さらなる検討により2桁目の処理の詳細が明らかになるだろう．

引用文献

Cowan, N. 2001 The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, **24**, 87–185.

Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. 1990 Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **16**, 626–641.

Hinrichs, J. V., Yurko, D. S., & Hu, J. 1981 Two-digit number comparison: Use of place information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **7**, 890–901.

Hinrichs, J. V., Berie, J. L., & Mosell, M. K. 1982 Place information in multidigit number comparison. *Memory and Cognition*, **10**, 487–495.

Itsukushima, Y., Tozawa, J., & Itagaki, F. 1990 Representation and retrieval of two-digit numbers in mental comparison. *Japanese Psychological Research*, **32**, 117–127.

Lorch, R. F., & Myers, J. L. 1990 Regression analyses of repeated measures data in cognitive research. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **16**, 149–157.

Moyer, R. S., & Landauer, T. K. 1967 Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, **215**, 1519–1520.

Nuerk, H., Weger, U., & Willmes, K. 2001 Decade breaks in the mental number line? Putting the tens and units back in different bins. *Cognition*, **82**, B25–B33.

Poltrock, S. E., & Schwartz, D. R. 1984 Comparative judgments of multidigit numbers. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **10**, 32–45.

Schwarz W., & Ischebeck, A. 2003 On the relative speed account of number-size interference in comparative judgments of numerals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **29**, 507–522.

(2004年8月31日受稿, 2005年6月29日受理)