
 <<研究報告>>

計算障害における情報処理モデル

橋本さゆり*¹ 亀井 尚

Processing Models for Calculation Disorders

Sayuri HASHIMOTO Takashi KAMEI

Abstract : Henschen, in 1919, systematically described calculation disorders after a thorough survey of the material available, and named them ‘acalculia’. Henschen had already pointed out that cipher and number disorders must be differentiated from calculation disorders proper. The concept of acalculia was refined in 1926 by Berger, who proposed a distinction between primary and secondary acalculia. In this study, we outline a classification of the acalculias and the modular architecture of numerical processing as a guide to present the research on acalculia. It must be underlined that recent models for acalculia are not universally accepted and that alternative architectures have been proposed.

Key words : 失算 (acalculia), 算術的事実 (arithmetical facts), モジュール構造 (modular architecture)

はじめに

計算能力は、数字の空間配置の認知、数字の操作（いわゆる演算）、短期記憶、注意の集中・持続などから成り、人間の諸能力の中で最も高次の部類に属する認知機能である。社会生活の上でも大変重要なものであり、値札を読む、電話をかけるなどの日常的行動の多くにおいてこの技能は用いられている。大脳損傷によって計算過程のどこかが障害されて、演算ができなくなる状態を「失算あるいは失計算 (acalculia)」と呼ばれている。これは、計算障害の中でも一旦獲得された計算機能の障害を指し、発達性計算障害 (developmental dyscalculia) とは区別される。計算というのは高度で複雑な心的過程であるので、その障害である失算は意識障害、認知症、失語、失読、失書、半側空間無視、視空間認知障害など様々な高次機能障害で出現する。失算という障害を文献上、初めて確立したのはHenschen (1919) であ

り、以後多くの研究者が失算のメカニズムについて研究を展開してきた。

本研究では、失算に関する過去の文献を基に、失算についての歴史的経過、代表的な失算の分類法及び計算に関する情報処理モデルについて紹介すると共に、その意義について検証した。

初期の失算研究¹⁾

1808年にGallとSpurzheimは、計算中枢が脳に存在するという仮説を、骨相図に描いて示した。彼らは「人には数学の法則にふれることを可能にしてくれる器官がある」そしてその器官は「前頭葉の眼窩外縁部の最も側面の脳回に存在する」との結論に達した。しかし、1860年代のBrocaによる失語症発見によって骨相学が減衰し、脳と行動の関係を研究するために生み出された新しい方法論が、数学能力の研究にも応用されるようになった。

19世紀後半の失語学者たちは、数の操作能力の障害に気づき、これは広汎な言語障害の一型であ

* 1 恵み野病院リハビリテーション科

ると解釈した。しかし、Lewandowsky & Stadelmann (1908) は、筆算と暗算の障害をそれぞれ、数字の読みの「欠陥」と、数字の「視覚表象」の障害とに起因すると考えた。彼らの論文では、失語症とは明らかに異なる障害として計算能力の障害そのものに主眼を置いたところであった。さらに、失語症の原因とみなされている部位とは別の部位によって計算障害が起こることを初めて提案した。

Henschen (1919) は失算という障害を最初に系統化した点で功績があった。彼は失算について、数の読字や書字の障害である「数失読」や「数失書」とは別個に扱い、失算が失語症に関係なく起こりうる可能性を示した。しかし彼は、暗算能力の障害と筆算能力の障害とを区別することを怠り、また足し算、引き算を調査するにとどまった。

Berger (1926) は、短期記憶や持続的注意といった特定の能力が計算問題を解くのに必要であるという視点をもとに、「一次的失算 (primary acalculia)」と「二次的失算 (secondary acalculia)」との区別を提案した。また、一次的失算が、計算を障害する程ではない他の障害を合わせもつ可能性はあるものの、他のより広汎な障害に起因するとは考えられないとの結論に達した。

失算の分類法

1. Hecaenの分類 (1961)²⁾

Hecaen et al. (1961) は、失算の原因と推定されるメカニズムをもとに、獲得性計算障害の分類を提案した。彼らは、神経心理学的障害が頻繁に失算とともにみられはしても、必ずしも種々の失算の原因とはならないことを明らかにしたが、随伴症状に関しては分類型間でかなりの重複がある点に留意する必要がある。

(1) 数の失読と失書 (alexia and agrafia for numbers): 文字の失読や失書、または他の失語症状を伴う場合と伴わない場合があり、文字の失読・失書と数字の失読・失書は合併することもあれ

ば、単独で起こることもある。

(2) 数の空間構成の障害: 演算の初期段階で数字の配置を誤るもので、頻繁に数字の不整列、視覚失認、上下転倒、順序逆転などとして現れる。視覚構成障害、半側空間無視、視野障害などの視空間認知障害を伴う。

(3) 失算術 (anarithmetria): 数字の失読・失書、視空間認知障害による空間性失算が見られなくとも生ずるもので、演算操作そのものの障害である。

2. 山鳥の分類 (1985)³⁾

(1) 失象徴性失算 (asymbolic acalculia): 記号として表記される数概念の理解および表出障害。

(2) 失演算 (anarithmetria): 数値を一つの単位としては理解するが計算が出来ない。計算の基本的な約束が失われるため、繰り上げ、繰り下げ、位取りなどが出来なくなる一次性演算障害と、九九の記憶障害、短期記憶の障害による繰り上げ繰り下げ数の忘却、注意集中障害により計算が出来なくなる二次性演算障害に分けられる。

(3) 視空間性失算 (visuospatial acalculia): 数概念そのものは冒されず、演算能力自体も存在するが、視空間認知障害のため計算が不可能となる。

(4) 左一側性失算: 脳梁切断あるいはその他の脳梁損傷によって、左視野のみに入力された計算が出来ない。

3. 松田の分類 (2004)⁴⁾

(1) 数処理の障害: 数の読み書き障害に代表される、数の処理障害であり、失語や他の読み書き障害は必ずしも合併しない。

(2) 一次性失算: 以下の4型に分類された。

①算術的事実 (arithmetical facts) の障害: 算術的能力は意味記憶の中の1カテゴリーであり、その中の下位項目にある算術的事実に対する選択的なアクセス障害を呈した症状。算術的事実とは、単純な計算結果の一種の「記憶」となるもので、基本的な計算についての

知識のことである。

- ②計算手続きの障害：算術的事実を想起するだけでは解決しない複数桁の計算で明らかとなる障害。
 - ③演算記号の認知障害：演算記号のみの理解障害を呈する特殊な症状。
 - ④算術的概念の障害：機械的な計算ができて、その背景にある算術的概念や法則を理解できない症状。
- (3) 二次性失算：以下の3型に分類された。
- ①失語症に伴う失算：失語症に伴う錯語や読み書き障害によって、正確な計算が困難となる症状。
 - ②視空間性失算：主に筆算で認められ、空間構成障害のため桁を混乱した計算となってしまう症状。
 - ③全般的注意力低下や知能低下に伴う失算：さまざまな形で計算障害が出現し得るが、特に計算手続きの障害を来しやすい。

また、Benson (1996) は、失算を、1. 失演算 2. 失語性失算 3. 失読性失算 4. 失書性失算 5. 前頭葉性失算 6. 空間性失算というように6型に分類した。他に、Grewil (1952), Critchley (1953), Levin (1979) などの分類法がある。

計算に関する情報処理モデル⁵⁾

Hecaen et al. (1961) の分類は、計算障害についての現在の知識を整理するのに便利な体系として提示されたが、その類型は互いに重複する部分があり、またすべてを網羅するというわけではなかった。さらに、彼らの分類については計算を含めた数の脳内処理の機序に示唆を与えるものではなかった。後にMcCloskey et al. (1987) が指摘したように、彼らの分類は数の処理と計算過程が数の読み書き、空間処理能力、計算能力に依存することを仮定しているが、これらの能力自体がいまだに不明確であり、数処理や計算過程の解明には限界があった。

この限界を神経心理学 (neuropsychology) の分

野で打ち破ろうとしたのがWarrington (1982) であった。彼女は、計算の手続きに関する知識は保たれるが、一種の「記憶」である算術的事実の再生に障害があると考えられる症例を報告した。彼女は、反応速度と暗算が、軽度の計算障害で感度の高い尺度であることを発見し、さらに計算問題の迅速な概算力も検査して数量認知的概算を求めた。これらの方法によって、数量概念と個々の数の知識が保たれている患者でも正確な計算が出来ないという実態を明らかにした。この報告をきっかけに、算術的事実の概念が広く紹介された。計算手続きを分離して捉えることが提唱されたことにより、計算障害についての研究に新たな展開をもたらしたわけである。

1. McCloskey model (1987)⁶⁾

最も著名で、またそれゆえ批判の対象ともなる数の脳内処理モデルが‘McCloskey model’である。McCloskeyは数概念が10進法に従って正確に表現されていると考えた

彼はそれまで脳内の数処理に関する仮説とモデルを構築してきたが、その特徴は、数処理の各側面をモジュール構造 (modular architecture) に分け、その中心に数の抽象的概念 (abstract semantic internal representation) を設定した点にあった。また、このモデルでは数の処理と計算過程を明確に区別されている。前者は数の読み書きと発話や聴覚的理解 (transcodingを含む) を指し、後者は算術的事実と計算手続きの問題 (calculation procedures) に対応する。なお、transcodingとは、“five”を“5”と書く、“5”を“five”と読む、などのように、言語的数表現とアラビア表記による数表現の相互変換を指す。また、transcodingには数の意味理解を経なければ成立しない立場と、意味理解を介さずに直接成立する立場とがあると考えられる。

2. Triple-code model (1992)⁷⁾

DehaeneとCohenにより順次改訂されてきたモデルである。その出発点はDehaene et al. (1991)

の報告例であり，ここでは数処理に2つの符号表記ルート（route-symbolic notation）を用いて正確な数の表現と記憶・計算を行うルートと，アナログ表記量（analog representation of quantities）を用いて計算の概略の評価を行うルートが存在すると仮定し，dual-route modelが提案された．彼らのデータ処理は杜撰で，その論理的根拠は弱いものの，McClosky modelが厳密な「符号表記（symbolic notation）」しか扱わないのに対して，アナログ基準を取り入れた点に特徴があった．その後Dehaene（1992）の報告でtriple-code modelの概要が提示された．すなわち，数の処理は3種類のコードである，「数の話し言葉コード（numerals）」「アラビア表記コード（numbers）」「アナログ的数概念コード（quantities）」がそれぞれ脳内の別の部位に蓄えられており，そこで6種類のtranscodingが作用すると考えた．数の話し言葉のコードは言語的数の（音声的・視覚的）入力と出力，数えあげ，単純な加法と乗法の事実に関与し，アラビア表記コードはアラビア表記数の入力と出力，正確な評価，複数桁の数の計算に，またアナログ的数概念コードは規模の比較，量の評価，概算に関与するものと考えられる．（図，参照）

以上紹介したモデル以外に，Ashcraft（1992），Campbell&Clark（1992），Cipolotti（1995）がそれぞれ情報処理モデルを提唱している．

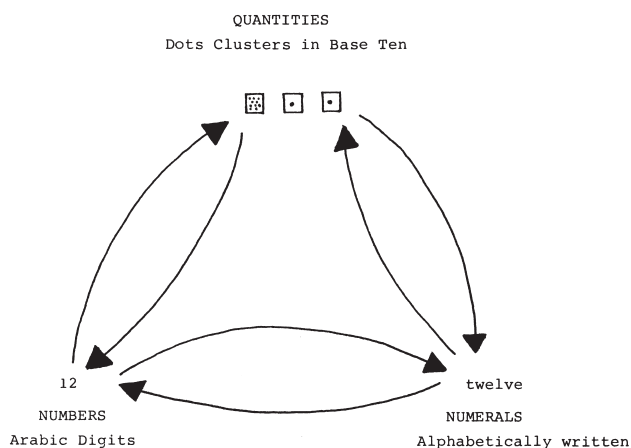


図 triple-code modelの概要
3種類のコード間で6種類のtranscodingが作用する

考 察

これまでに提案されてきた計算に関する情報処理モデルの問題点について順次検証する．

まず，McClosky modelの図式において最も批判されているのは，transcodingを含めた全ての情報処理過程がabstract semantic internal representationを経由しないと成立しないという点である（Campbellら，1988；Clarkら，1991）．これはモジュール構造に分割するという立場に対する批判でもある．Deloche et al.（1987）は意味を介さないtranscoding-asemantic transcodingを提案している．Campbell（1994）も算術的事実へのルートについて意味ルートsemantic routeを加えたモデルを提案している．

次に，McCloskey modelでは，abstract semantic internal representationが指数関数で表示されている点が批判の対象になっている．この指数関数列ではアラビア表記に特異的な数字の位置による桁の概念位取りの概念を説明できない．また，機能と脳内部位との関連性も検証されていない．さらに彼らのモデルに基づくならば，計算過程と理解，産生過程は乖離して障害されることが予想されるが，理解過程は初期入力であり，生産過程が最終出力である以上，これらの部位に障害があれば，計算過程の保存の可否は評価不能といわざるを得ない．また，abstract semantic internal representationの指数関数表示は静的定式化であり，計算過程に関与する算術的事実との動的関連性についてはほとんど言及されていない．これはほかの多くのモデルでも共通する問題点でもあった．

また，McCloskeyら（1991）は，個人によって「貯蔵された」算術的事実の強弱に差があり，日頃あまり使われない乗法は障害されやすいと考えているが，個々人によって算術的事実に強弱があるなら，加法<減法<乗法といった障害され易さの必然性はなく，論理に一貫性がないと考えられる．

次に，Triple-code modelの説明では，数処理に

関係する3種類のコードがそれぞれ脳内の別の部位に備わっていると考えられる。この場合 abstract internal representation は不要になり, transcoding も支配的なものとなるため, 3種のコードは連結されていると考えられる。しかし連結だけで transcoding の問題が解決されるわけではなく, この意味で triple-code model は連合説ないしは離断説の域をでないであろう。結局この時点で, 彼らのモデルでは McClosky model において明瞭であった数の脳内表現—すなわち数の理解と意味—と transcoding の問題は軽視され, 説明のないままに asemantic route と semantic route の双方がモデル化されている。また量の評価は単純に数直線上に数をプロットすることに置き換えられている。計算過程そのものがほぼ全面的に算術的事実に還元されているのは McCloskey model と変わらないと考えられる。

まとめ

失算に関する過去の文献を基に, 失算についての歴史的経過, 代表的な失算の分類法, 計算に関する情報処理モデルについて検討した結果, 以下のことが分かった。

- (1) 失算の概念を初めて確立したのは Henschen (1919) であり, 彼は, 失算が失語症に関係なく起こりうる可能性を示した。その後, Berger (1926) によって一次的失算と二次的失算の区別が提案された。
- (2) 失算の分類法としては, Hecaen の分類 (1961) が基になり, 山鳥の分類 (1985), 松田の分類 (2004) へと展開してきた。
- (3) 計算に関する情報処理モデルとしては, McCloskey model, triple-code model が代表的なものであるが, 未だ数処理や計算過程の解明には問題があり, より機能性の高い情報処理モデルへの再構築が期待される。

引用文献

- 1) 杉下守弘：臨床神経心理学，東京，朝倉書店，1995。
- 2) Hecaen H, Angelergues & R, Houillier S : Les varietes cliniques des acalculies aucours des lesions retrorolandiques : approche statistique du probleme. *Revue Neurologique*, 105 : 86–103, 1961.
- 3) 山鳥重：神経心理学入門，東京，医学書院，1985。
- 4) 松田実：計算障害の評価—神経心理評価ハンドブック—(田川皓一，編集)，東京，西村書店，2004。
- 5) 古本英晴：計算の障害—失算 acalculia—，よくわかる失語症と高次脳機能障害(鹿島晴雄，種村純，編)，東京，永井書店，2003。
- 6) McCloskey M, Caramazza A, Cognitive mechanisms in normal and impaired number processing. In Deloche G, & Seron X (Eds), *Mathematical Disabilities : A Cognitive Neuropsychological Perspective*, Lawrence Erlbaum, pp 201–218, 1987.
- 7) Dehaene S : Varieties of numerical abilities, *Cognition*, 44 : 1–42, 1992.