

書字の認知理論と運動理論

—書字に関する大学院生・研究者向け教科書のための研究ノート—

Cognitive and kinematic theories of handwriting
—Handwriting research notes for a textbook for graduate students and researchers—

河野 俊 寛 (人間科学部スポーツ学科教授)
Toshihiro KONO (Faculty of Human Sciences, Department of Sport Science, Professor)

〈要旨〉

書字は、脳内の音韻を文字に変換する過程である。その過程は、大きく二つに分けることができる。一つは音韻が文字表象へと変換される認知レベルであり、もう一つは文字表象が文字へと変換される運動レベルである。認知レベルにおける理論としては、二重経路モデルとトライアングル・モデルがある。運動レベルにおける理論としては、閉ループ理論、スキーマ理論、計算理論モデル、シナジーモデルがある。計算理論モデルには、躍度(ジャーク)最小化モデル、トルク変化最小化モデル、終点誤差分散最小モデルがある。書字運動理論としては、スキーマ理論によるもの、計算理論モデルのトルク変化最小化モデルによるものが提案されている。

〈キーワード〉

書字, 認知理論, 運動理論

1 はじめに

書字は、脳内の音韻を文字に変換する過程である。その過程は、大きく2つに分けることができる。一つは認知面であり、もう一つは運動面である。認知面において音韻は文字表象へと変換され、運動面において文字表象が文字へと変換される。音韻が文字表象に変換される過程については、読みの二重経路モデルとトライアングル・モデルと同様のモデルが提案されている(河野, 2008)。運動面については、スキーマ理論モデル、到達運動を基礎とした書字運動の計算理論モデルが提案されている。以下で、書字の認知理論と運動理論について概観する。

2 書字の認知理論

2-1 二重経路モデル

読みの二重経路モデル(dual-route model)は、Coltheart(1978)によれば、規則に基づいて文字を音韻に変換する非語彙経路(sublexical route)と、語彙情報の辞書を用いて文字列全体を音韻に変換する語彙経路(lexical route)という二つの経路があるという。書字の二重経路モデルは、Weeks, Davies, Parris, Robinson(2003)によって示されている。それによると、聴覚的に入力された音

声は聴覚的分析を経て聴覚入力辞書を通して文字出力へと達する語彙経路と、音素-文字素変換を経て文字出力に達する非語彙経路があるとする。さらに語彙経路は、意味システムを介して文字出力辞書に至る意味経路と、音韻出力辞書から文字出力辞書に至る非意味経路に分かれる。

成人の失語症検査の一つであるSALA失語症検査(藤井, 長塚, 吉田, Howard, Franklin, Whitworth, 2004)は二重経路モデルである。漢字, ひらがな, カタカナすべてに対して、聴覚的, 視覚的両モダリティにおける入力と出力を備えた, 単語の情報処理モデルを提案している。

2-2 トライアングル・モデル

トライアングル・モデル(triangle model), 別名, コネクションリスト・モデル(connectionist model)は, Seidenberg, McClelland(1989)によれば, 語彙経路, 非語彙経路のような文字列の持つ属性に特化した下位処理構造は想定せず, 単語, 非語とも同じ構造と計算原理で, すなわち, 文字, 音韻, 意味の各層が, それぞれ中間層(intermediate layer, あるいは, 隠れ層 hidden layer)を介して, 双方向的に情報のやりとりをして処理するとする。伏見, 伊集院, 辰巳(2000)は, 日本語におけるトラ

イアングル・モデルを提案している。

2-3 漢字と仮名

仮名と漢字の読み書きを二重経路モデルで説明する場合、仮名は非語彙経路で処理され、漢字は語彙経路で処理される、という説明が多い（例えば、斎藤, 1981）。しかし、トライアングル・モデルにおいては、漢字書字、特に複数の読みを持つ漢字書字成績が悪い場合は、音韻層から文字層へのプロセスだけでは処理できず、意味層からの助けを必要とするためである、と説明ができるように、仮名と漢字の処理について別経路を想定する必要はない。

Hino, Lupker (1998) は、漢字単語とカタカナ単語の出現頻度を操作して、音読課題、語彙判断課題、およびGo/No-Go音読課題での漢字単語とカタカナ単語の出現頻度効果の大きさを比較した結果、漢字単語とカタカナ単語を別経路で処理することを想定しないトライアングル・モデルでの予想を支持する結果となったことを報告している。

伊集院 (2005) は、二重経路モデルにおいても、仮名と漢字とで異なる処理がされているわけではない、と主張している。その理由は、漢字も話し言葉を記述するという意味ではアルファベットと同じ表音文字であるからである、としている。

二重経路モデルのSALA失語症検査においても、仮名も漢字も語彙的、非語彙的の両方の処理がされる、という立場をとっている。

漢字と仮名では脳内での言語処理機構が異なっているのではないかという仮説がある。そしてその仮説の元、漢字と仮名の大脳皮質における言語処理の偏在について研究が行われてきた。それが「漢字仮名問題」である（河村, 2007a）。

櫻井 (2005) は、PET, fMRIを用いた賦活試験の結果と脳損傷例の分析から、脳の解剖学的な対応がある音韻経路と形態経路の二重経路モデルを提案している。音韻経路は、文字、単語の音韻情報を継時的に視覚イメージに変換する経路である。形態経路は、文字、単語の視覚イメージを伝える経路である。音韻経路は、角回を経て前頭葉運動前野の手の領域に到達する経路であり、形態経路は、下側頭皮質から角回を経て上頭頂小葉に達し、音韻経路と同様に前頭葉運動前野の手の領域に到達する経路と想定されている。仮名は音韻経路と形態経路の両方で処理され、漢字は主に形態経路で処理される、としている。

河村 (2007b) は、仮名は視覚野から直接角回に向かう経路で処理され、漢字は左側頭葉を経る経路と仮名と同様に直接角回に向かう経路の2つで処理される、と考えている。

しかし、Sugishita, Otomo, Kabe, Yunoki (1992) や 杉

下 (2000) のように、書字・読字いずれにおいても、漢字が仮名より障害される大脳損傷部位や、仮名が漢字より障害される大脳損傷部位として根拠のある部位は見あたらない、として、仮名と漢字の乖離に対しては疑問を呈している研究者もいる。

3 書字の運動理論

3-1 一般的な運動理論

(1) 閉ループ理論 (Adams, 1971)

閉ループ理論 (closed loop theory) は、工学における自動制御理論の影響を受けて生まれた理論である。フィードバックによって記憶痕跡 (memory trace) と知覚痕跡 (perceptual trace) の運動誤差を修正していく学習理論である。記憶痕跡は、運動を選択し開始する機能を持っている。知覚痕跡は、運動を比較して、エラーを同定する内的表象として機能する。しかし、この理論では、新しい運動プログラムの学習過程を説明できないこと、運動の数だけ存在する運動プログラムが脳に記憶されなければならないこと、などの問題が指摘されている。

(2) スキーマ理論 (Schmidt, 1975)

スキーマ (schema) とは、すでに個体の側で成立している一般化された運動プログラムである。この説では、過去の経験によって形成された運動パターンである一般化運動プログラム (generalized motor programs; GMP) にしたがって運動を産生する再生スキーマと、実際の運動の正確さを評価する再認スキーマが仮定される。スキーマ理論では、環境側の変化によって動作が変化する過程を説明することが難しいことが指摘されている。

(3) 計算理論モデル

Marr (1982) によって、神経科学の理論的理解の枠組みとして3レベルが提唱されている。計算理論のレベル (level of computational theory)、表現とアルゴリズムのレベル (level of representation and algorithm)、及び、実装のレベル (level of hardware implementation) である。計算理論のレベルは、脳が計算で果たすべき目的は何か、そして、外界の物理的な拘束条件が与えられた時に、その目的を果たすためにはどのような計算が必要か、を明らかにする。以下に、具体的な計算理論モデルについて概観する。

3-2 計算理論モデル

書字運動は、目標に手を伸ばす上肢到達運動 (targeted reaching) の一つと考えることができる。到達運動は、運動制御の中でも最も単純なものである。しかし到達運動には、神経系→筋張力→関節トルク→関節角度→手先位置という階層があり、それぞれ冗長性 (redundancy) がある。

冗長性とは、ある一つの動作を遂行するための解が無数に存在する状況をいう。主な冗長性としては以下の三つがある。一つ目の冗長性は手先軌道の冗長性である。運動開始時の一点と到達目標の一点の間を結ぶ手先軌道は無数に存在する。二つ目の冗長性は関節の冗長性である。一つの手先軌道を実現するための関節角度の組み合わせも無数に存在する。三つ目の冗長性は筋張力の冗長性である。関節角の組が決定したとしても、その関節角を実現するための関節トルクを生成する筋張力の組は無数に存在する。これらは工学的には、計算的に一意な解を決定することができない不良設定問題 (ill-posed problem) と呼ばれている。

しかし、Morasso (1981) がマニピュランダム (manipulandum) という装置を使って2次元平面での手先軌道を計測し、手先経路はほぼ直線を描くこと、手先速度は時間軸上をほぼ対称なベル型が示すことを明らかにしている。つまり、無数にある可能な運動の中から、特別な運動だけが選択されていることになる。このような人間の身体における冗長性の問題は、ロシアの生理学者Bernsteinにより1960年代にすでに指摘されており、Bernstein問題と呼ばれている。冗長性を中枢神経系がどのように解決しているのかについては、いくつかの研究アプローチがある。

一つは最適化 (optimization) である。脳は何らかの評価関数を設定して、それが最適値をとる軌道を選択しているという考えである。評価関数の違いによって、躍度 (ジャーク) 最小化モデル (minimum-jerk model)、トルク変化最小化モデル (minimum-torque change model)、終点誤差分散最小モデル (minimum-variance model) などが提案されている。

以下にその3つの概略を説明する。

(1) 躍度 (ジャーク) 最小化モデル

Flash, Hogan (1985) が提案したモデルである。評価関数は、手先軌道の躍度 (加速度の時間変化率) を運動時間全体にわたって積分したものである。このモデルは、評価関数の値が最小になるような運動、すなわち、軌道にそった手先の加速度がなるべく滑らかに変化する運動が選択される、という考えである。

(2) トルク変化最小化モデル

Uno, Kawato, Suzuki (1989) が提案したモデルである。躍度最小化モデルでは、腕の長さ、関節トルク、外力等の条件が考慮されていないことに対して提出されている。評価関数は、トルク変化の二乗を運動全体にわたって積分したものである。これを最小化することで到達運動の説明ができる、とするものである。上腕とキネマティクス (kinematics) とダイナミクス (dynamics) を考慮に入れることで、躍度最小化モデルではできなかった以下の三つ

の実験結果を説明することができた。

- 手先の軌跡が完全な直線ではなく、微妙に曲がっていること。
- 手先が体に近いときに比べて、手先が体から離れているときには、到達運動の軌跡はより体から離れるように膨らむこと。
- 手先にバネをつけたときに、バネに引っ張られる方向に軌跡が曲がること。

このトルク変化最小化モデルには、筋張力変化最小化モデル、筋長変化最小化モデル、運動指令変化最小化モデル等に展開され、指令トルク変化最小化モデル (Nakano, Imamizu, Osu, Uno, Gomi, Yoshioka, Kawato, 1999) として精密化されている。

(3) 終点誤差分散最小モデル

Harris, Wolpert (1998) が提案したモデルである。評価関数は、手先位置と目標の誤差の二乗を目標到達時から一定時間にわたって積分したものである。到達運動の目的は、終点での誤差を小さくすることにある、とする。ノイズは運動指令に比例しているという仮説を立て、必要以上に大きな運動指令を出すとノイズが大きくなって終点での誤差が大きくなるので、なめらかな運動指令が選択される、という説明がされる。

3-3 シナジー

Bernstein問題への別のアプローチとしてはシナジー (synergy) がある。

シナジーは、Bernstein自身が自由度の問題を解決するために、中枢神経系は特定の構造単位で冗長性の制御を行っている、として提案した概念である。児玉、園田 (2013) によると、「ある運動課題を達成する際に、身体各部位 (要素) が連携し、協調することによって、運動の自由度を減らすような機能的な構造・単位のこと」という定義になる。また、Latash, Turvey, Bernstein (1996) では、シナジーは以下の3つの特徴をもつ、と説明している。

- Sharing: あるタスクの達成に際して、タスク遂行のパターンを共有するもの。
- Flexibility/stability (Error compensation): タスク遂行における要素の一つが変化した際に、ほかの要素がそれを補償できるような性質をもつもの。
- Task-dependence: 異なるタスクの遂行に際して、それぞれに固有のシナジーが存在するようなもの。

このようにシナジーは、行われるタスク毎に定義されていて、特定の神経ネットワークの存在を示したものではない。したがって、筋や関節運動などそれぞれの階層に対してシナジーを定義することができる。すなわち、筋に対しては筋シナジー (muscle synergy)、関節運動では、運動

学シナジー (axial synergy), 関節間協調 (Intersegmental coordination) などが定義できる。しかし, 船戸, 青井 (2017) によると, 狭義にシナジーと言ったときには, 筋シナジーを表わすことが多いという。

シナジーは運動の機能・単位であるとしても, 実際の随意運動では, いくつかの運動要素の組み合わせがされて複合的な運動が正確に遂行される。すなわち, 実際の運動を考えると, シナジーをまとめる運動プランのようなものが必要になる。その運動プランについて Bernstein は, 運動全体の抽象的な形で記憶が脳に蓄えられていると考え, これをエングラム (engram) と呼んでいる。Kottke, Halpern, Easton, Ozel, Burrill (1978) は, エングラムを強化するためには, 運動の繰り返しが必要であり, 協調運動が可能になるためには, あらかじめプログラムされたエングラムが適切なトリガーに反応して発現するようにエングラムを強化をする必要があることを主張している。

3-4 書字運動理論

スキーマ理論では, 書字の運動等値性 (motor equivalence) が説明できる。運動等値性とは, 非利き手, 姿勢, 紙面の位置等の違いがあっても筆跡は同じであることをいう。スキーマ理論では一般化運動プログラム (GMP) を想定し, GMP に, 書字に必要な各運動要素の実行の順番, 実行のタイミング, 相対的な関係等々が記憶されている, と考える。そしてこの GMP に, 全体の運動

時間, 運動全体の大きさ, 使用する筋肉等のパラメーターが入力され, 実際の書字運動が実現されるとする。GMP の具体的な内容については, 研究者によって異なっている。例えば Teulings (1988) は, 書字運動プログラムの不変特徴として長期記憶に保存されている情報は, ①文字のトポロジカルな構造, ②ストローク構成のシーケンス, ③文字を構成する各ストロークの空間的なサイズの比率の三つであるとしている。

計算理論モデルでは, 書字運動は到達運動とは異なり, 最終点だけを拘束条件とした問題ではなく, いくつかの経由点を拘束条件とした問題を解く必要がある運動である。Wada, Kawato (1995) は, 手先が通る必要のある複数の経由点があり, 書字運動はある経由点からもう一つの経由点へ向かう到達運動で, 記憶されている経由点が, 実際に書字運動の際に読み出される, と仮定したモデルを提案している。このモデルは, トルク変化最小化モデルに依拠しており, 腕の各関節に生じた回転力の時間変化の2乗の総和を, 運動時間全体にわたって積分した値が最小になるように運動が計画されると考える。

4 最後に

書字の認知理論と運動理論を概観した。しかし, 本論文は研究ノートであるので, 浅い記述に終始してしまった。大学院生や研究者向けの教科書レベルにまで到達することを今後は目指す必要がある。

参考文献

- Adams, J. A. (1971) A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-149.
- Coltheart, M. (1978) Lexical access in simple reading tasks. In G Underwood (ed) *Strategies of Information Processing* (151-216). Academic Press.
- Flash, T. and Hogan, N. (1985) The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*, 5, 1688-1703.
- 藤林真理子, 長塚紀子, 吉田敬, Howard, D., Franklin, S., and Whitworth, A. (2004) SALA 失語症検査. エスコアル.
- 船戸徹郎, 青井伸也 (2017) シナジーの解析とその応用. 計測と制御, 56, 193-198.
- 伏見貴夫, 伊集院陸雄, 辰巳格 (2000) 漢字・仮名で書かれた単語・非語の音読に関するトライアングル・モデル(1). 失読症研究, 20, 115-125.
- Harris, C. M. and Wolpert, D. M. (1998) Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature* 394, 780-784.
- Hino, Y., and Lupker, S. J. (1998) The effects of word frequency for Japanese kana and kanji words in naming and lexical decision: Can the dual-route model save the lexical-selection account? *Journal of Experimental Psychology*, 24, 1431-1453.
- 伊集院陸雄 (2005) 単語の読み書き障害への認知神経心理学的アプローチ. 笹沼澄子編集, 言語コミュニケーション障害の新しい視点と介入理論. 医学書院, 131-156.
- 河村満 (2007a) 日本語の読み書きと漢字仮名問題. 岩田誠, 河村満編集, 神経文字学. 医学書院, 37-45.
- 河村満 (2007b) 神経文字学総論. 人工知能, 22, 258-261.
- 児玉謙太郎, 園田耕平 (2013) 身体運動研究における“Synergy”概念とその射程. The 27th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 1-4.
- 河野俊寛 (2008) 子どもの書字と発達. 福村出版.
- Kottke, F. J., Halpern, D., Easton, J. K. M., Ozel, A. T., and Burrill, C. A. (1978) Training of Coordination. *Archives of Physical Medicine Rehabilitation*, 59, 567-572.
- Latash, M. L., Turvey, M. T. and Bernstein N. A. (1996) *Dexterity and its development*. L. Erlbaum Associates.
- Marr, D. (1982) *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W.H. Freeman.
- Morasso, P. (1981) Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research*, 42, 223-227.
- Nakano, E., Imamizu, H., Osu, R., Uno, Y., Gomi, H., Yoshioka, T. and Kawato, M. (1999) Quantitative examinations

- of internal representations for arm trajectory planning: Minimum commanded torque change model. *Journal of Neurophysiology*, 81, 2140-2155.
- 斎藤洋典 (1981) 漢字と仮名の読みにおける形態素符号化および音韻的符号化の検討. *心理学研究*, 52, 266-272.
- 櫻井靖久 (2005) 健常成人における漢字単語・仮名单語の処理. 笹沼澄子編集, *言語コミュニケーション障害の新しい視点と介入理論*. 医学書院, 303-321.
- Schmidt, R. A. (1975) A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- Seidenberg, M. S. and McClelland, J. L. (1989) A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychology Review*, 96, 523-568.
- Sugishita, M., Otomo, K., Kabe, S., and Yunoki, K. (1992) A critical appraisal of neuropsychological correlates of Japanese ideogram (kanji) and phonogram (kana) reading. *Brain*, 115, 1563-1568.
- 杉下守弘 (2000) 漢字・仮名問題に関する討論. *認知神経科学*, 2, 148-153.
- Teulings, H. L. (1988) Handwriting-movement control: Research into different levels of the motor system. PhD Thesis, University of Nijmegen.
- Uno, Y., Kawato, M. and Suzuki, R. (1989) Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. Minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, 61, 89-101.
- Wada, Y., and Kawato, M. (1995) A theory for cursive handwriting based on the minimization principle. *Biological Cybernetics*, 73, 3-13.
- Weeks, B., Davies, R., Parris, B. and Robinson, G. (2003) Age of acquisition effect on spelling in surface dysgraphia. *Aphasiology*, 17, 563-584.

