

認知過程のコネクショニスト・モデル

教育心理学コース 河原 哲 雄

Connectionist Models of Cognitive Processes

Tetsuo KAWAHARA

10 years have passed since the 'Bible' of the parallel distributed processing was published (Rumelhart, McClelland & PDP Research Group, 1986). Throughout the decade, architectures and procedures of connectionist (a.k.a neural nets or parallel distributed processing) models have been growing more and more subtle and complex.

The aim of this article is to review some recent connectionist models for three typical research domains of higher cognitive processes (language, analogical inference, and category learning) in detail, and to speculate on their impacts on the coming decade of cognitive psychology and connectionism.

目 次

- I. コネクショニズムと認知心理学の10年
- II. 言語のコネクショニスト・モデル
 - A. 形態論的派生の学習
 - B. 単語の意味と文の構造の学習
 - C. 神経心理学的疾患とアトラクター・ネットワーク
- III. 類推のコネクショニスト・モデル
 - A. 類推の多重制約理論
 - B. その他の類推モデル
- IV. カテゴリー学習のコネクショニスト・モデル
 - A. ネットワーク学習モデルとカテゴリー学習実験
 - B. モジュール化と自己組織化
- V. まとめと展望
 - A. コネクショニスト・モデルにおける表象、ルール、説明
 - B. 残された課題

I. コネクショニズムと認知心理学の10年

McClelland, Rumelhart, & PDP Research Group (1986) による2巻本の大部の著作, 「Parallel Distributed Processing」が刊行され, それまでの認知科学研究において主流であった直列的なシンボル処理のパラダイムに代わる, 並列分散処理のパラダイムを高らかに謳い上げてから, 今年でちょうど10年が経過した。この間, 数多くのモデルが提起され, 多くの論争が闘われて来た。だが, 全否定か全肯定かといった初期のころの論

争とは異なり, コネクショニスト・モデルは, 人間の情報処理過程を認知心理学研究者が研究する際に用いるモデルの候補の一つとして, この10年で確実に地歩を固めた。コネクショニスト・モデルの基本的な仕組みや発想は, もはや認知心理学者の常識的教養の一部であるといえよう。一般向けの認知心理学の教科書に, 「コネクショニズム」や「並列分散処理モデル」の表題で1章が割かれることも決して珍しくなくなった(守, 1995; Hampson & Morris, 1996)。

だが, 一方この10年でコネクショニスト・モデルは, 初期のものとは比べてはるかに複雑で洗練されたものになってきている。筆者も含めて, 数学的・工学的素養に乏しい認知心理学者の多くにとって, 散発的に報じられる理論的発見や, モデルの工学的洗練の中で, 何が認知心理学にとって本質的に重要なのが見えにくくなってきているのも事実である。本論文の目的は, 近年(ここ10年の後半期, すなわち1990年代)に発表された高次認知過程のコネクショニスト・モデルの中から, 現在および将来の認知心理学にとってインパクトを持つと思われるものをいくつか検討することにより, モデル作成者とそうでない人々との間のギャップを少しでも埋めるとともに, 今後の認知心理学とコネクショニスト・モデルの行く末について考察しようと試みるものである。

認知心理学とコネクショニズムの橋渡しの任を果たそうとするものとしては, 既にQuinlan (1991) の "Connectionism and Psychology" や守 (1996) の「やさしいPDPモデルの話」などがある。だが, 前者はその発行年の古さゆえに, 後者はその入門書的性格ゆえに, 最

近の高度に洗練された認知プロセス・モデルの紹介とは成り得ていない。本論文でも、心理学の中でも実は最も数学的・工学的洗練の著しい知覚や運動制御のモデルについては扱わない。いわゆる高次認知過程の中から、言語、推論、カテゴリーの三つの領域を中心に挙げる。これらの領域の選択の基準は、理論的・モデル的洗練の変遷が明らかであること、認知心理学全般、ひいては人間観・発達観へのインパクトが大きいと思われることである。

なお、この論文では「コネクショニズム」、「並列分散処理 (Parallel Distributed Processing, PDP)」、「ニューラルネット」の三つを、特に区別せずに使用する。すなわち、「比較的単純なユニットが相互に結合し、活性値をやりとりすることによって全体として意味のある動作をするようなシステム」の総称として、コネクショニスト・モデルと呼ぶことにする。

II. 言語のコネクショニスト・モデル

言語は、コネクショニズムの利点と限界をテストするのにきわめて適した領域である (Hampson & Morris, 1996)。言語は多様な水準における情報の同時的な分析を含んでいる。発話を解釈したり文章を読んだりする際には、音声的、音韻的、視覚的、文法的、コミュニケーション的等々の諸側面、およびそれら相互間の制約を、高度に相互作用的な仕方で処理しなければならない。コネクショニスト・モデルの利点の一つは、こうした多重的な制約の並列的な処理に適していることである。一方で言語は、コネクショニスト・モデルでは扱うのが困難であると初期からくり返し指摘されてきた (Fodor & Pylyshyn, 1988)、構成的構造 (constituent structure) の権化である文法をそのバックボーンに持っている。逆に、直列的なシンボル処理とルールの適用に基づく伝統的な情報処理モデル、および生成文法に代表される現代言語学にとっては、この構成的構造こそがアルファでありオメガである。そのため、言語処理過程のコネクショニスト・モデルの歴史は、(1)一見すると明示的なルールやシンボルの存在を証明しているように思われる現象を、下シンボリック (sub-symbolic) 過程における並列的制約充足からの創発 (emergence) によって説明すること、(2)文法に代表される構成的構造をコネクショニスト・モデルの枠組みに取り込むこと、の二つの課題を中心に展開してきたのである。

A. 形態論的派生の学習

Rumelhart & McClelland (1986) による英語動詞過去形の学習のシミュレーションは、発表年やモデルの詳細からすると古典的な部類に属する。だが、その後多くの理論的批判や反批判、より洗練されたモデルの開発を呼んだ点で避けて通れない。

英語動詞の過去形は、現在形の語幹に -ed を付加して生成する大多数の規則変化動詞と、go→went, take→took等の少数の(だが生起頻度の高い)不規則変化動詞からなる。幼児の言語獲得過程では、いったんは正しく学習された不規則変化動詞について、一時的に規則変化の語尾を付加してしまう誤り (goed, taked など) が生じる時期を経て、再び正しい変化が習得される、いわゆるU字型学習という現象が古くから知られており、言語発達における明示的ルールの存在を示す証拠とみなされてきた。Rumelhart & McClelland (1986) は、フィードフォワード型のパターン連想ネットワーク・モデルを用いて動詞語幹の音韻表現と過去形の音韻表現の対応関係を学習させ、明示的なルールの学習がなくとも、不規則変化動詞におけるU字型学習曲線が再現されることを示した。

Pinker & Prince (1988) は、Rumelhartらのモデル(以下、R & Mモデルと略称)を、言語学的観点から詳細に批判した。最も厳しい批判の対象になったのは、学習刺激の提示スケジュールが現実の言語発達事態と比べて非現実的な点である。R & Mモデルでは、まず第一段階で大半が不規則変化動詞からなる高頻度動詞のセットを学習し、次に多くが規則変化動詞からなる中頻度動詞のセットを学習する。こうした学習セットの不連続性は、幼児が実際に経験するものとは考え難い。Pinkerらは、これ以外にも、R & Mモデルでは音韻的表現同士の写像のみを対象としていることから、同音異義語が区別できない(例えば、ring→rang, ring→ringed)など多くの問題点を指摘した。もっとも、これらの問題点の中のいくつかは、コネクショニスト・モデルに普遍の問題というよりは、R & Mモデルの実装上の限界に起因するものであることが後に明らかになった。

その後、R & Mモデルの問題点を克服しようと試みるコネクショニスト・モデルがいくつも開発された。まず、Plunkett & Marchman (1991) は、固定した学習セットに対して三層のネットワークにおけるバックプロパゲーション学習手続きを適用し、U字型学習曲線が再現されることを示した。さらにPlunkett & Marchman (1993) では、より自然な漸進的な学習スケジュール(動詞の数が少しずつ増えてゆく)を採用し、シミュレー

ジョンの結果が実際の発達データ (Marcus et al., 1992) の詳細をよく近似していることを示した。このモデルから得られ、発達データで確認された理論的予測の中には、過剰般化の出現時期が、語彙中の規則変化／不規則変化動詞の相対的な比率に依存するという、それまでの言語学で知られていなかったものもあった。

また、同音異義語の区別に関しては、Hoeffner & McClelland (1993) では、意味表現から音韻表現への写像を学習するネットワークを開発して、R & Mモデルの問題点を克服した。

Pinkerはこれらの改良版のコネクショニスト・モデルには言及していないようであるが、Pinker (1991) では神経病理学的な知見を援用して、動詞の規則変化と不規則変化が脳内の別のシステムに依存することを主張した。すなわち、過去形生成ルールを含む特定の言語学的ルールの習得に障害を示す発達性の言語障害児 (Specific Language Impairment, SLI) と、これとは逆に過去形生成ルールには問題がないが、不規則変化の習得に困難をきたす認知発達障害児 (Williams Syndrome) の存在 (神経心理学的に言えば、両者の二重分離) である。Pinker (1991) は、これらの知見をもとに、規則変化動詞は明示的なルール学習、不規則変化動詞は連想ネットワークによる学習という二段構えの処理を主張した。だがこの主張に対しては、臨床データの解釈が必ずしも明快ではない (SLIは広範な知覚運動障害、Williams Syndromeは広範な知的障害を含んでいる) 他、後述するHinton, Plaut & Shallice (1993) による失読症のシミュレーション・モデルに見るように、質的に異なる障害の存在が必ずしもネットワークの構造的な分離を保証するものではないという反論が可能である。

英語動詞過去形の学習以外では、MacWhinney et al. (1989) による、ドイツ語における定冠詞の学習のモデルがある。多くの言語学者は、そのあまりの複雑さゆえにドイツ語名詞の性には一貫した規則性がないとみなしてきたが、MacWhinneyらの学習モデルは、音韻的、形態論的、意味論的 (現実世界における性別) 等の多数の微妙な手がかりの相互作用から、ネイティブ・スピーカーと同様の一貫した (だが明示的なルール適用ではないような) 分類を習得することが出来たのであった。

ここまで概観してきたように、フィードフォワード型連想ネットワークによる形態論的派生の学習モデルは、多くの批判に耐えながら洗練を深めてきた。今後は言語学的なルールや構造など既知の知識の再現にとどまらず、Plunkett & Marchman (1993) のような、ルールに基

づく言語理論からは得られない予測を産み出すようなモデルを開発することが要求されるであろう。

B. 単語の意味と文の構造の学習

前節で検討した形態論的派生の学習では、基本型と派生形の表現の間に適切な写像関係を見いだすことが問題であった。だが、系列的に提示される単語列から文の意味を理解したり、そうした経験を積むことによって文法的な構造を学習するためには、時間的な構造の抽出や、距離の離れた要素間の依存関係への注目といった、質的に異なる困難な問題に対処しなくてはならない。

Elman (1990) は、単純な再帰的 (recurrent) ネットワークにバックプロパゲーション学習則を適用して、文の後続要素の予測課題をシミュレートした。再帰的ネットワークでは、システムの内的状態 (この場合は隠れ層における活性化パターン) を保持 (次の時点における入力文脈として付加) することで、過去の履歴情報と現在の刺激に基づく未来の予測を行う。学習の結果、ネットワークが後続の単語そのものを特定する能力はきわめて低かった (人間でも同様であろう) が、後続の単語の文法的カテゴリーの予測は、かなり正確であった。Elmanが、各単語に対する隠れ層の活性化パターンのクラスター分析を行ったところ、文の中での文法的役割に対応するような内部表現が形成されていることが見いだされた。すなわち、名詞は名詞、動詞は動詞といった大きなクラスターがまずあり、さらに動詞のクラスター内では他動詞と自動詞といった下位分割がなされていたのである。この結果は、抽象的な文法的カテゴリーに相当する構造を、そうした抽象的カテゴリーをシステム内に明示的に表現することなく、単純な再帰的ネットワークがボトムアップ的に学習可能であることを示唆している。

Elman (1990) の結果は、初期のコネクショニスト・モデルが扱うのが難しいとされていた系列的構造の学習を可能にした点で印象深いが、学習刺激の複雑さは単文レベルであった。Elman (1993) では、さらに進んで、関係詞節の埋め込みによって、距離の離れた依存関係に注目しなければ正しく答えられないような複文における学習 (動詞の一致など) に挑戦した。まず学習初期から完全なネットワークに対して完全な複文を提示した場合には、学習はうまくいかなかった。だがElmanは、最終的に、学習を成功させるための二つの条件を見いだした。第一の条件は、初期の学習セットでは提示文の文法的な複雑さを制限し、漸進的に複雑な文を加えていくことである。第二の条件は、学習の初期段階で再帰的ネットワー

クの記憶容量を制限し、学習の進展につれて増大させていくことである。後者の記憶容量の操作は、前者の学習刺激の操作と同様な効果を示した（すなわち、最終的に距離の離れた名詞と動詞の一致の学習が可能になった）。後者の条件は特に、作業記憶容量の制限という、一見すると言語獲得をむしろ制限するように思われる非言語的要因が、実は複雑な文法構造の獲得の必要条件である可能性を示唆している点で、きわめて興味深い。この予測もまた、コネクショニスト・モデルによる実際のシミュレーションを通じて初めて浮かび上がってきたものである。

なお、単文レベルではあるが、より自然な文における各単語への格役割 (role) の割り当てを学習するモデルとして、St. John & McClelland (1990) の文ゲシュタルト・モデルがある。このモデルはやや複雑な再帰的ネットワークを用いて、系列位置、語の辞書的意味、常識的知識（「バス運転手はステーキを好む」）等の複数の情報源に由来する多重的制約充足によって、文中に明示されていない要素の格を予測することなどが可能であった（なおこのモデルに関しては、乾 (1993) に比較的詳しい解説がある）。

C. 神経心理学的疾患とアトラクター・ネットワーク

コネクショニスト・モデルは、神経系の活動そのもののモデルではなく、神経系の活動から洞察を得たモデルであるといわれている。だが、多くの研究者は、将来的には神経生理学・神経心理学との連携が深まっていくことを期待しているに違いない。その意味では、これから紹介する、いったん完成されたコネクショニスト・モデルに損傷を与えることによって神経心理学的疾患を再現しようとするシミュレーション研究は重要である。

これらの研究では、習熟した活動パターンに対してそれぞれアトラクターを形成するような再帰的・相互作用的なネットワークを用いる。こうしたアトラクター・ネットワークでは、入力によって引き起こされた初期の活動パターンが、ユニット間の相互作用を通じて、次第に近傍のアトラクターの活動パターンへと引き込まれる。アトラクターは、状態空間中の点（点アトラクター）の他に、リミットサイクルやカオスになる可能性もあるはずだが、これまでの研究では、主に点アトラクターが対象とされてきた。

一部のユニットやリンクを取り除くなどしてネットワークに損傷を与えると、アトラクターへの引き込み領域の形や位置が変化する。その結果、初期の活動パターンが、

損傷前のアトラクターとは別の、誤った反応と対応するアトラクターへと引き込まれることが起こるのである。

Hinton & Shallice (1991) は、文字素から意味素への写像をバックプロパゲーションで学習させた再帰的ネットワークの一部に損傷を与えることにより、深層失読症 (deep dyslexia) の症状を再現できることを示した。深層失読症では、riverを/ocean/と読んでしまったり、darkを/night/と読んでしまったりする意味的誤りと、sandalを/scandals/と読んでしまう視覚的誤りが併存するが、一方で、deafを/deef/と発音してしまうような、表層失読に多い音韻的誤りはない。Hintonらのネットワークは学習の結果、視覚的類似性と意味的類似性の両方に敏感なアトラクター引き込み領域の配置を形成しており、損傷によってこの配置が微妙に崩れることにより、深層失読症と同様の誤った反応が生じることになったのである。

Hinton & Shallice (1993) ではさらに、抽象語では具象語よりも意味素特徴が少なく、そのためアトラクターへの引き込みが相対的に弱いという仮定を導入することで、(1)tableのような具象語の方が、truthのような抽象語よりも読み誤りが少ない；(2)sympathyを/orchestra/と読むような (symphonyを經由) 視覚的誤りと意味的誤りの混合形が生じる；等々の深層失読症に特有のその他の性質も説明できることを示している。

こうしたアトラクター・ネットワークへの損傷により神経心理学的疾患をシミュレートする研究は、これら以外にも、Farah, O'Reilly, & Vecera (1993) による相貌失認 (prosopagnosia) の研究や、Farah & McClelland (1991) によるカテゴリー特異的な喚語障害の研究などがあり、きわめて有望な方法である。今後は、単機能の障害だけを問題にするのではなく、言語機能全体の構成を考慮したモデルの構築が期待されるところである。

III. 類推のコネクショニスト・モデル

言語と並び立つ、人間の hoch 認知の最も主要なレパートリーである「思考」の領域から、本章では類推 (analogy) の問題を取り上げる。人間が日常的に遭遇するあらゆる個別の問題解決場面ごとに、手段-目標分析のような一般的な問題解決手法で対処していると考えるのは現実的でない。したがって、過去に遭遇した経験 (ベース) を現在直面している問題 (ターゲット) にあてはめる (写像する) 類推の過程の解明は、思考の心理学にとって不可欠である。また、Lakoff (1987) は、類推や比喩

が日常言語のあらゆる領域に遍在していることを豊富な例で示している。

類推はまた、認知過程のコネクショニスト・モデルにとって試金石となる重要なテーマでもある (Markman & Gentner, 1996)。類推は、表象の補完、類似性に基づく一般化、優雅な退行 (graceful degradation)、学習といったコネクショニスト・モデルが得意とする内容を含んでいる。一方で、類推は本質的に関係のシステムの写像を含む構造依存的な過程である。従来のコネクショニスト・モデルでは扱うのが困難であるとされてきた、こうした過程の解明にどれだけ資することができるかは、認知心理学の研究パラダイムとしてのコネクショニズムの全体的評価に直結するといっても過言ではない。

A. 類推の多重制約理論

類推のプロセスは、(1)ターゲット問題の表象、(2)長期記憶からのベースの検索、(3)写像、(4)正当化、の四つのサブプロセスからなると考えられる。実際の類推はこれらのサブプロセスが再帰的に統合されたものと考えべきであろうが、これまでは(1)と(4)に関係する研究は少ない (認知心理学実験を含めた類推研究全体の概観と考察については、鈴木, 1996を参照)。

検索と写像のサブプロセスを含む類推過程の理論的枠組みとして代表的なのは、Holyoak & Thagard (1995)の多重制約理論 (multiconstraint theory) である。多重制約理論では、類推的思考は、類似、構造、目的の3つの制約を同時に満足させることを本質的に含んでいると考え、この多重制約充足問題を局所表現を用いたコネクショニスト・ネットワークへと実装する。

まず、検索よりも単純な写像プロセスに関するモデルとしてACME (Analogical Constraint Mapping Engine) について説明する (Holyoak & Thagard, 1989)。ACMEでは、個々のユニットはベースとターゲットの要素 (述語、項、高階の関係) の対応関係に関する仮説に対応し、リンクは仮説間の両立可能性等を示す制約に対応する。制約には、内的制約と外的制約がある。内的制約とは、ベースとターゲットの対応の構造に関する制約であり、項は項、述語は述語とのみ対応するなどの構造的整合性 (structural consistency) の制約と、1対1写像の制約がある。外的制約には、意味的類似性とプラグマティックな中心性がある。これらはそれぞれ特殊ユニットを設定し、そこから意味的に類似したユニットや問題解決過程で重要なユニットへと正のリンクを張って実現する。ACMEでは写像プロセスを、こうして設

定された制約ネットワークを緩和アルゴリズムを用いて収束させることでシミュレートする。すなわち、活性化値の伝播を並列的にくり返して、最終的に安定した時点において高い活性化値を保っているのが、解として得られた写像関係である。

ACMEの計算能力に関しては、100以上の述語を用いた大規模な問題や、ベースやターゲットの表現が不完全な問題でも実用的な時間で写像が可能であったという。また、人間の類推過程との比較では、ペルシャ湾岸戦争と第二次世界大戦の写像を見いだすという問題に対して、複雑で不完全に記述された状況から整合的な対応関係を見いだす人間の能力をよく再現した。例えば、1991年当時の合衆国／ブッシュ大統領は、第二次大戦当時の合衆国／ルーズヴェルト大統領か第二次大戦当時のイギリス／チャーチル首相のいずれかの対応で写像されたが、人間でもACMEでも、両者が混合したような写像は見られなかった (Spellman & Holyoak, 1992)。

ベースの検索過程は、長期記憶に蓄積された膨大な情報を扱わなくてはならない点で、写像よりも計算論的にずっと困難である。ACMEでは、意味的類似性はプログラマーが事前に設定したが、検索過程では類似した要素をそのつど関連付ける内在的な機構が必要になる。Thagard, Holyoak, Nelson, & Gochfeld (1990) による検索過程のシミュレーションであるARCS (Analog Retrieval by Constraint Satisfaction) では、自然言語における単語間のkind-of, part-of関係を表現した電子辞書であるWordNet (Miller et al., 1990) を組み込むことでこの問題に対処した。

ARCSは三段階で動作する。(1)意味的類似性 (WordNet) を用いて関連性のあるベースの候補を選択する。(2)構造と目的の制約を加えて、制約ネットワークを構築する。(3)緩和アルゴリズムにより、最も関与性の高いベースアナログを決定する。

ARCSの計算論的な評価に関しては、イソップ物語のデータベースを用いた計算実験では、事例数を10から100に増やしても、緩和所要サイクルは二倍にしか増えなかったという。また、人間の検索過程との比較では、ベースの複数の候補が記憶内で互いに競合的な関係にあることが検索の条件である、というような新たな仮説を生成しており、ある程度実験的にも確認されている (Wharton et al., 1994)。

B. その他の類推モデル

局所的表現を用いた制約充足ネットワークの枠組みに

よる類推のシミュレーションで、ACME,ARCSの対抗馬にあたるものとして、GentnerらのSME, MAC/FACがある。SME (Structure Mapping Engine, Falkenhainer, Forbus & Gentner, 1989) は、構造写像理論 (Gentner, 1983) に基づく写像プロセスのシミュレーションである。ACMEとの相違点は、SMEでは1対1写像を例外を許さないハードな制約とみなしている点や、写像段階では目的の制約を導入しないこと等である。

MAC/FAC (Many Are Called but Few Are Chosen, Genter & Forbus, 1991) による検索プロセスのシミュレーションは、(1)単純な非構造的マッチング機構を用いて候補を選択する、(2)SMEを用いて各候補とターゲットの構造的一致の度合を計算、という二段階で動作する。MAC/FACの問題点は、ACMEのWord Netのような意味ネットワークを持たないので柔軟性に欠けており、第一段階で可能な候補の多くを棄却してしまう可能性があることである。構造写像理論を実装したはずのMAC/FACが、非構造的な検索機構を用いているのは、Gentner, Ratterman & Forbus (1993) に代表される実験研究において、検索段階での構造的要因の影響を否定する結果を重く見たためであろう。だが一方で、構造的要因の影響を示唆する実験結果もある (Wharton et al., 1994)。

これまで見てきたような問題解決型の類推とは別に、一種の高次知覚として類推を捉えようとした一連の研究として、HofstadterらのCopycatプロジェクトがある (Mitchell, 1993; Hofstadter & Mitchell, 1995)。彼らの主張の眼目は、高次知覚は直立的・意識的に心的ルールを適用した結果ではなく、非常に多くの独立な並列的活動の統計的な結果として創発するものだということである。人間の思考や行動を特徴づける柔軟さは、こうした意識下の水準における活動の流動性に多くを負っているというのである。Copycatでは、多数の小さなエージェント (codelet) がダイナミックに相互作用しながらアナログ表現の生成、写像、補完を行う。Copycatは、状況からの圧力に応じて概念のスリップ (類似した別の概念に置き換えられる) が起こる機構 (slipnet) を導入して、類推の柔軟さを捉えている。

例えば、問題1: 「abcがabdに変化したとする。ijkを同じように変化させなさい。」に対しては、ほとんどの人がijlを答える。この場合、ルールは「最も右にある文字を、アルファベットの次の文字で置き換えなさい。」である。次に問題2: 「aabcがaabdcに変化したとする。

ijkkを同様に変化させなさい。」に対しては、ijklとは答えずに、kが重なっていることに注目して、ijllとする人がいる。この場合、ルールは「最も右にあるグループをアルファベットの次で置き換えなさい。」に変化している。ここで、文字という概念が、文脈の圧力によって、グループという関係のある概念にスリップしたのである。Copycatが捉えようとするのは、こうした人間の心的流動性 (fluidity) である。Copycatが産出する解答の中には、すぐに得られる簡単な解 (abc→abd, mrrjjj→mrrkkk) と、洞察に富んでいるが得るのが難しい解 (abc→abd, mrrjjj→mrrjjjj: 文字の数に注目) の両方が含まれており、その頻度や反応時間の分布は、人間の被験者の解答とよく対応している。

Copycatのアーキテクチャは、正確にはコネクショニストではないが、それは将来のコネクショニスト・モデルの拡張の一つの方向を指し示しているか、あるいはコネクショニスト・モデルの現在のアーキテクチャを維持したままで、同様の柔軟な処理を可能にするような計算手続きをいずれ模索しなければならないかのどちらかであろう。

Copycatにおけるアナログの動的な構成・再構成過程と比較すると、ACMEやSMEの写像過程は、文法的に可能な組み合わせの力まかせの探索を行っている点で、実時間における人間の心理過程のシミュレーションとはみなし難い。一方、Copycatの最大の問題点は、適応領域が現在のところ、文字列を用いた比例的類推課題やテーブル上の食器の配置 (Hofstadter & French, 1992) といったトイ・ワールドに限られていることである。問題解決のような複雑な領域への適用可能性に関しては未知数である。

Holyoak & Thagard (1995) は、「類推 (研究) は、認知科学におけるサクセス・ストーリーの一つである」と書いている。確かに、高次認知の最たる類推に対してさえ、コネクショニスト・モデルによる解明が進んでいることの意義は大きい。だが一方で、現状での類推過程のシミュレーションに、まだ多くの問題点が残されているのも事実である。もちろん第1の課題は、ACME, ARCS, SME, MAC/FACのような問題解決型類推のモデルと、Copycatのような知覚型の類推のモデルの間のギャップを埋めることである。前者に関しては、よりプロセス指向の柔軟な処理が、後者に関しては適用領域の拡大が求められよう。それ以外の問題点としては、ベースの検索における創造的な構成過程を捉えるモデルがまだないことが挙げられる (Ross, 1989)。また将来的には、検

索や写像といったサブプロセスを別々に扱うのではなく、問題の表象や正当化のサブプロセスをも含み、それら全体を再帰的に統合した類推の全体的モデルが要求されるであろう。

IV. カテゴリー学習のコネクショニスト・モデル

言語、類推に続き、第3の高次認知の領域としてカテゴリー学習のコネクショニスト・モデルについて検討する。カテゴリー学習実験のシミュレーション・モデルは、言語や類推のモデルと比較すると、高次認知の名に値しないのではないと思われるほど構造的には単純なものが多い。だが、これらは以下でも見るように、実験課題における人間のオンライン反応プロセスとの対応を直接探求している点で、やはりなくてはならない重要な使命を担っている。またこの領域は、モジュール化や自己組織化といった、これからのコネクショニスト認知モデルを考える上で避けて通れない重要な問題と常に先鋭に接している領域でもある。

なお、カテゴリー学習のコネクショニスト・モデルのうち、1990年頃までのものについては、河原(1992)で概観した(また、Schyns, 1991も参照)。

A. ネットワーク学習モデルとカテゴリー学習実験

本節では、1990年以降におけるカテゴリー学習のコネクショニスト・モデルの中から、最も先端的な研究が続けている、Kruschke(1992, 1996)の一連のモデルを中心に紹介する。これ以前の研究については、必要に応じて簡単に触れるにとどめる。

恣意的な人工刺激を用いたカテゴリー学習実験における人間の反応のシミュレーションに関しては、Nosofsky(1988)の一般化事例モデル(Generalized Context Model, GCM)が、ほぼ完成の域に達していると思われていた。だがそこで残された問題として浮上してきたのが、カテゴリーの基準比率(base rate)をめぐる二つの問題である。

第1の問題は、Gluck & Bower(1988)が提起した「基準比率の無視」現象である。Gluckらは、4つの特性からなる刺激を高頻度カテゴリー(75%) / 低頻度カテゴリー(25%)のいずれかに分類させる学習実験を行った。この時、四つのうちのある一つの特性を所与として、両者のカテゴリーが正解である条件付き確率が等しくなるようにした。転移セッションにおいて、この特性を単独で提示して、各カテゴリーへの所属の確率を評定させたところ、ベイズの定理から計算される基準値とは異な

り、低頻度カテゴリーへの所属確率の方が高頻度カテゴリーへの所属確率よりも高く評定される傾向があった。Gluck & Bower(1988)は、特性に対応する入力ユニット層とカテゴリーに対応する出力ユニット層の間の結合荷重をデルタルールによって学習する、隠れ層を持たない単純な線形ネットワーク学習モデル(LMSネットワーク・モデル)を用いて、この現象を再現することに成功した。この結果は、従来のカテゴリー学習モデルでは、ベイズ確率に準拠した確率評定を予想(事例モデル)したり、基準比率の効果を全く考慮に入れられない(プロトタイプ・モデル)など、いずれもこの現象を再現できない点で重要であった。

第2の問題は、Medin & Edelson(1988)が見いだした「基準比率の逆転効果(Inverse Base Rate Effect)」である。彼らはそれぞれ、高頻度カテゴリーのメンバーは、両カテゴリーに現れる共有特性(I)と高頻度カテゴリーのみに現れる示唆的特性(PC)のペア、低頻度カテゴリーのメンバーは、共有特性(I)と、低頻度カテゴリーのみに現れる示差的特性(PR)のペアからなるような学習実験を行った。すると、転移セッションにおいて、共有特性を単独提示した場合(I)や、共有特性と高頻度・低頻度両カテゴリーの示差的特徴を3つとも提示した場合(I+PC+PR)にはベイズの定理に準拠した反応(高頻度カテゴリーの選好)が得られたが、両カテゴリーの示差的特徴のペア(PC+PR)を提示した場合には、ベイズ的な規準とは逆の反応(低頻度カテゴリーの選好)が得られたのである。この結果は、事例モデルはもちろん、入力刺激パターンにあらかじめ修飾を施さない限り(Markman, 1989)、LMSネットワーク・モデルによっても再現することが出来なかった。

このような中で現れたKruschke(1992)のALCOVE(Attention Learning Covering Map)は、事例モデルとコネクショニスト・モデルのそれぞれの利点を統合しようとしたモデル(事例に基づくネットワークモデル)である。事例モデルは、個々の事例の記憶以外の学習メカニズムを必要としない。新事例の分類は、記憶中から検索された類似した過去の事例に基づいて行われる。そのため、個別の事例が被験者の反応に与える影響などを、他のモデルよりもうまく説明できる。これに対して、ネットワーク学習モデルの利点は、そのエラー駆動型の学習メカニズムにある。経験するすべての事例が平等の影響力を持つ事例モデルと異なり、ネットワーク学習モデルでは、システムの現時点での「期待」に大きく反するような事例ほど、システムのその後の反応に大きな変化を

もたらず。Gluck & Bower (1988) のLMSネットワーク・モデルが、「基準比率の無視」効果を再現することが出来たのも、このエラー駆動型の処理のおかげである。

ALCOVEでは、事例を構成する特性次元に対応する入力ユニットの層と、分類結果のカテゴリに対応する出力層のユニットの間に、提示事例のそれぞれに対応する隠れユニットの層がある。入力刺激との類似性に応じてこの事例ユニットが活性化し、その総和が出力ユニットの活性化値となる。このことにより、事例モデルと同等のパフォーマンスが可能になる。また、エラー駆動型の学習メカニズムにより学習プロセス、特に各次元への選択的注意の変化が説明できる。なお、提示事例ごとに隠れユニットを用意するのは、計算論的に非現実的と思われるであろうが、Kruschkeによれば、入力空間を全体的にカバーするに足る適当な数の事例ユニットをあらかじめ分布させておくことでも、同等のパフォーマンスが得られるとしている。

Kruschke (1992) によればALCOVEは、適切な特性次元への注目、特性間相関の影響、基準比率の無視効果、高頻度の例外が存在する場合のU字型学習曲線といった実験データの再現、および壊滅的干渉(後述)への頑健性といった優れた特質を示した。だが、これらのうち基準比率の無視効果に関しては、多くの場合ALCOVEでは正確な再現が出来ないことがLewandowsky (1995) により指摘された。そこで、Kruschke (1996) は、Gluck & Bower (1988) のLMSネットワーク・モデルを拡張したネットワーク学習モデルADIT (Attention to Distinctive Input) を開発した。拡張の第一は、示差的特徴へと注意を移行するメカニズムを導入したことであり、第二は、出力ユニットの活性化値(特性とカテゴリの連合)と観測された基準比率を統合して最終的な分類反応を行うようにしたことである。こうした拡張により、基準比率の無視効果と、基準比率の逆転効果の両方を単一のモデルで再現することに成功したのである。

Medin & Edelson (1988) の実験について見ると、基準比率の差はまず、高頻度カテゴリの方が先に学習されるという結果をもたらす。その後低頻度カテゴリを学習する際には、誤反応を生み出す共有特性(I)ではなく、示差的特性(PR)に注意が集中する。転移セッションにおいて両カテゴリの示差的特性のペア(PC+PR)を提示した場合には、低頻度カテゴリの示差的特性(PR)と低頻度カテゴリの間の強い連合が、高頻度カテゴリの示差的特徴が持つ基準比率情報に打ち勝って、ベイズ的規準から期待されるのとは逆の反応が得られる

と考えるのである。

ADITには、提示事例に対応する隠れユニットの層はない。この点についてKruschke (1996) は、事例モデルのアーキテクチャによっては基準比率の問題を原理的に扱えないことを意味するものではないと主張している。いずれにしてもADITは、現時点でもっとも強力なカテゴリ学習モデルであり、Kruschkeはその後も、このモデルに短期記憶や方略的推測(strategic guessing)のメカニズムを組み込むなどの拡張を続けている(Kruschke & Erickson, 1995)。

B. モジュール化と自己組織化

前節での概観により、一回分の実験室実験データを正確に再現する必要があるような場面では、比較的単純な線形ネットワーク学習モデルやその拡張が、意外にも最適であることが明らかになった。だが、現実的なスケールにおける日常的/科学的概念の学習を考える際には、より強力なアーキテクチャや学習メカニズムが必要になるものと考えられる。

II-A節で見たように、形態論的派生の学習のような長期の発達データのシミュレーションでは、バックプロパゲーション学習則を用いた一様なネットワークが多用されてきた。だが、バックプロパゲーション・ネットワークを認知プロセスのモデルとみなすには、いくつかの障害がある(Murre & Goebel, 1996)。

第一の問題は収束の遅さである。多くの場合、バックプロパゲーション・ネットワークへの入力パターンの提示と、現実場面における学習刺激との遭遇とを対応させることは、ほとんど不可能である。第二の問題は、生物学的な現実性が低いことである。誤差シグナルがシナプスを後方に伝播していくとする生理学的な証拠は皆無である。第三の問題は、心理学的な現実性、すなわち認知モデルへの応用における問題である。例えば、Kruschke (1993) が示したように、バックプロパゲーション・ネットワークは、関与する次元への選択的な注意の配分に失敗する。また、一連の学習刺激セットを学習させた後で、別の学習刺激セットを続けて学習させると、前の学習内容がほぼ上書きされて消えてしまうという壊滅的干渉(catastrophic interference)が生じるという問題もある(McCloskey & Cohen, 1989; Ratcliff, 1990)。

これらの問題点の多くは、一様なネットワーク構造に一様な学習手続きを適用することに起因している。そこで近年、ネットワーク構造のモジュール化や、自己組織化の方法論に注目が集まるようになってきた。

モジュール型ネットワークを用いた人間のカテゴリー化のモデルとしては、Murre (1992) による CALM (Categorizing And Learning Module) がある。モジュール型のデザインを用いると、「短距離では抑制／長距離では活性化」という、新皮質におけるコラム構造から洞察を得たアイデアを非常に自然な形で実装することが可能である。すなわち、モジュール内部では側抑制によるユニット間の競合、モジュール間では結合の学習による構造的情報のコード化という大域的構造化により、現実の脳が直面するような複雑な問題に対しても、効率的に対処することが期待されるのである。CALMは、既に文字認知における単語優位性効果、顕在記憶／潜在記憶のシミュレーションなどで成果をあげている。モジュール分割を具体的にどのように行うかに関しては、神経心理学的研究とのさらなる連携が望まれよう。

モジュール型ネットワークのもう一つの方向性として、Carpenter & Grossberg (1988) の ART (Adaptive Resonance Theory) を挙げておく。ARTの目的の一つは、学習システムにとっての普遍的問題である「安定性／可塑性のジレンマ」を解消することである。学習システムが、有意味な事象に対して可塑的（適応的）であり続けながら、同時に無関係な事象に対して安定性を維持し続けることはいかにして可能なのであろうか。可塑性は、ネットワークへの新たな表象の導入のために、また安定性は、既存の表象を無事に保つ（壊滅的干渉を避ける）ためにいずれも必要不可欠である。ARTモジュールは F 1 層と F 2 層という二層で構成されている。F 2 層は、F 1 層に提示される新たなパターンへのトップダウン的な期待を保持しており、両者のミスマッチが検出されると、別の候補を次々と動的に検索し、最終的に、既存の候補で分類する／新カテゴリーを生成する／無関係な刺激として廃棄する、のいずれかの反応を選択する。

CALMにせよARTにせよ、構造的に複雑な分だけ、現実の認知プロセスとの間に正確な対応をとるには大きな困難が伴う。だが長期にわたる学習や記憶のシミュレーションのためには、何らかの形でのモジュール化や自己組織化の発想を取り入れることが必要であると思われる。

ネットワークの自己組織化の手法としては、Kohonen (1989) の自己組織化マップが有力である。これを用いた概念発達過程のシミュレーションとして、Schyns (1992) のモデルがある。Schynsのモデルでは、カテゴリー化と命名 (naming) のプロセスが別のモジュールに分離している。カテゴリー化モジュールは、

Kohonenの自己組織化アルゴリズムにより、入力刺激を2次元マップ上の活性化パターンへと写像する。互いに類似した入力刺激は、マップ上の近接した領域を活性化化する。こうして、入力刺激の構造に対応して、マップ上で活性化される領域が次第に分割されていく。次に命名モジュールは教師付き学習により、カテゴリー化モジュールが生成した概念表現とカテゴリー名との連合を行う。このモデルによるシミュレーションは、プロトタイプ効果、語彙ラベルの効果、カテゴリー階層の構築、相互排他性制約など、概念発達過程で見られる多くの現象の再現に成功した。

現在のカテゴリー学習モデルに欠けており、今後最も集中的な探求を要しているのは、学習の過程での、「特性次元そのものの生成」の学習であろう (Schyns & Murphy, 1994)。自己組織化やモジュール化の手法の導入は、この問題を解明するための第一歩であると考えられる。行く手には困難な問題が山積しているが、別の観点からすれば、この特性次元の生成問題こそが、シンボル処理的なモデルでは扱いが根本的に難しい、コネクショニスト・ネットワークによる解明に最も適した課題であると考えられる。

カテゴリー学習モデルのもう一つの大きな課題は、既存の概念の組み合わせ (conceptual combination) や、本論文の I 章で紹介したような類推による新概念の生成、ひいてはいわゆる理論ベースの概念 (Murphy & Medin, 1985) といった、よりマクロなカテゴリー使用のモデルと、どのように接続していくかである。こうした問題を探求していく途上では、コネクショニスト・モデルとシンボル処理モデルとのハイブリッドなども、有力な候補として浮上してくるであろう。

V. まとめと展望

Hampson & Morris (1996) によると、コネクショニズムの高次認知への適用に対して見られる態度には、「試してみなければ何も得られまい」、「なぜコネクショニズムとシンボル処理の両方が必要なの?」、「俺の屍を乗り越えてからやれ!」の三つの類型があるという。本論文では、コネクショニズムの存在意義にかかわるような哲学的議論は避け、上の三つの中でいえば第一の実用的な態度に立って、有望と思われるモデルの紹介に努めてきた (コネクショニズムの存立基盤や、シンボル処理的パラダイムとの優劣に関する今なお続く論争については、van Gelder, 1991; Clark, 1993等を参照されたい)。だが、最後を締めくくるにあたって、高次認知過程のコ

ネクショニスト・モデルの次の10年へと思いをめぐらせる上で避けて通れず、また認知心理学者の中でもいまだ誤解の多いと思われる「コネクショニスト・モデルにとって表象、ルールとは何か」という問題について考察を加えておく。

A. コネクショニスト・モデルにおける表象、ルール、説明

Clark (1993) によれば、コネクショニズムの登場によって生じた変化の中核は、認知科学の対象に対する、静態的(コード指向的)な理解から、より深く発達の(能力・プロセス指向的)な観点への移行であるという。すなわち、(1)構造的な表象を不変の土台(「思考の言語」としてでなく、認知活動の一時的な所産と見ること；(2)思考(素朴心理学でいう心的状態)と内的な計算状態の間の対応関係が、概念の重ね合わせ的・分散的モデルによって緩められていること；の二点が従来のシンボル処理的モデルとの決定的差異であるという。

前述したElman (1990) の文法構造を学習する再帰的ネットワークでは、学習の結果、隠れユニット層の内部表象が、空間を言語学的範疇に対応する語彙カテゴリーに分割した。注意しなくてはならないのは、ここで(クラスター分析等の手法によって事後的に)観察された「表象」は、実は高度に文脈依存的かつ動態的なものだったことである。他から分離された語彙検索の段階や単語の表象というものはなく、『単語は、望ましい行動を支える心的諸状態を構築するのを助ける道標にすぎない。表象はこれらの心的諸状態のスナップショットである(Elman, 1991)』。

心的な「ルール」についても同様である。Pinker & Prince (1988) は、Rumelhart & McClelland (1986) による英語動詞過去形の学習のシミュレーションに関して、コネクショニスト・モデルは言語学が既に明らかにしたルールを不完全にインプリメントしたものに過ぎないと結論付けた。だが、Pinker (1991) 自身が、後には過去形形成システムの一部としてコネクショニスト・ネットワークを取り入れたことからすれば、事実はむしろ逆だったとも考えられよう。すなわち、言語学的なルール(と例外のリスト)は、コネクショニスト・モデルによって初めて捉えられるような動的・複合的な規則性の一部を、マクロな観点から不正確に定式化したものに過ぎないのである。実際、コネクショニスト・モデルの本領は、「ルール+例外」の定式からシステムティックな逸脱が起こるような場面でこそ発揮される(Seidenberg, 1992)。今後は、こうした逸脱に由来する新たな理論的予測を産

み出さないような、単に既存のルールを再現するだけのコネクショニスト・モデルには、ほとんど意義が見いだされないであろう。また逆に、この点を誤解したままのシンボル処理的観点からのコネクショニズム批判に対しては、討論の労力を割く必要がない。

なお、還元主義の旗手であるChurchland (1989) は、「説明的理解」でさえも、貯蔵されたプロトタイプへの一種の同化(assimilation)に過ぎないと喝破している。だが、ここまで極端な意見になると、多くの認知心理学者の同意を得られるかどうか疑わしい。高次認知過程のかなりの部分が、意識的・直列的な心的操作に依存しているのは、ほとんど疑いようのない事実である。目下の課題は、こうした直列的な心的操作と下意識の並列的・動的表象がどのように相互作用しているかを明らかにすることである。この問題に関しては、Karmiloff-Smith (1992) の「表象書き換え仮説」などが有望であるが、具体的なアーキテクチャとして提案されたものはまだ少ない(科学的仮説形成に関してMcMillan et al.1991；カテゴリー学習に関してErickson & Kruschke, 1996など)。これらの理論に関しては、稿を改めて論じる必要があるだろう。

B. 残された課題

本論文で取り上げることのできなかった話題の中には、1990年代の認知科学を特徴づける新たな潮流である状況認知主義や、非線形動的システムとしての認知・発達観との関係といった、コネクショニズムの今後を見通す上できわめて重要な問題も含まれている。とはいえ、前者は「頭の中のシンボルやルール、世界のモデルを既存の構造と見なさず、むしろそれらが環境の豊富で動的な構造と主体の相互作用から生成してくる過程を捉えようと試みる」という点で、コネクショニズムの本来の発想と共有する部分が多い。また、後者の非線形動的システム・モデルの研究においては、コネクショニズムの手法は取り立てて明言する必要もないほど多用されている。現状のコネクショニスト・モデルについては、「動的」という面ではやや物足りない感があるが、その多くはシミュレーションの対象となった認知過程が、たまたまそれほどダイナミズムを要求しなかった結果であると考えられる。再帰的なアトラクター・ネットワークを用いた学習のモデルが、さらに多様な動的な構造を作り出すために、Freeman (1991) が臭覚の研究で見いだしたようなカオスの問題を考慮に入れなくてはならなくなるのは時間の問題であろう。

これまでのコネクショニスト・モデルは、素朴心理学

や伝統的言語学・認知科学が前提としてきた構造を解体し、そうした構造を生ぜしめたプロセスにまでたち戻って新たに組み立てなおす作業を通じて力を得てきたといえよう。だが、今後10年のコネクショニズムの真価は、壊すべき既存の構造やルールが存在しない新たな領域を開拓していくことができるかどうかにかかっていると思われる。

引用文献

- Carpenter, G.A., & Grossberg, S. 1988 The ART of adaptive pattern recognition by a self-organizing neural network. *IEEE Computer*, 21, 77-88.
- Churchland, P.M. 1989 The neurocomputational perspective. Cambridge MA : MIT Press.
- Clark, A. 1993 Associative engines : Connectionism, concepts, and representational change. MIT Press, Cambridge : MA.
- Elman, J.L. 1990 Finding structure in time. *Cognitive Science*, 14, 179-211.
- Elman, J.L. 1991 Distributed representations, simple recurrent networks, and grammatical structure. *Machine Learning*, 7, 195-225.
- Elman, J.L. 1993 Learning and development in neural networks : The importance of starting small. *Cognition*, 48, 71-99.
- Erickson, M.A., & Kruschke, J.K. 1996 Learning of categories composed of rules and exceptions. In *Proceedings of the 18th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 761-766, Hillsdale NJ : LEA.
- Farah, M.J. & McClelland, J.L., 1991 A computational model of semantic memory impairment : Modality-specificity and emergent category-specificity. *Journal of Experimental Psychology : General*, 120, 339-357.
- Farah, M.J., O'Reilly, R.C., & Vecera, S.P., 1993 Dissociated overt and covert recognition as an emergent property of a lesioned neural network. *Psychological Review*, 100, 571-588.
- Falkenhainer, B, Forbus, K.D., & Gentner, D. 1989 The structure-mapping engine : Algorithm and examples. *Artificial Intelligence*, 41, 1-63.
- Fodor, J.A., & Pylyshyn, Z.W. 1988 Connectionism and cognitive architecture : A critical analysis. *Cognition*, 28, 3-71.
- Freeman, W.J., 1991 「匂いを識別する脳のカオス」, 日経サイエンス, 1991年4月号
- Gentner, D., & Forbus, K.D. 1991 MAC/FAC : A model of similarity-based retrieval. In *Proceedings of the 13th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 504-509, Hillsdale, NJ : LEA.
- Hampson, P.J., & Morris, P.E. 1996 Understanding cognition. Cambridge : MA, Blackwell Publishers Inc.
- Hoeffner, J.H., & McClelland, J.L. 1993 Can a perceptual processing deficit explain the impairment of inflectional morphology in developmental dysphasia? A computational investigation. In *Proceedings of the 25th Annual Child Language Research Forum* (E.V.Clark Ed.), Stanford CA : Center for the Study of Language and Information, 38-49.
- Hofstadter, D.R., & Mitchell, M. 1995 The Copycat project : A model of mental fluidity and analogy-making. In J.A.Barnden & K.J.Holyoak (Eds.), *Advances in connectionist and neural computation theory: vol. 3, Analogical Connections*, 31-112, Norwood NJ : Ablex.
- Holyoak, K.J., & Thagard, P. 1989 A computational model of analogical problem solving. In S.Vosniadou & A.Ortony (Eds.), *Similarity and Analogical Reasoning*, Cambridge MA : Cambridge University Press.
- Holyoak, K.J., & Thagard, P. 1995 Mental leaps : Analogy in creative thought. Cambridge MA : MIT Press.
- Karmiloff-Smith, A. 1992 Beyond modularity : A developmental perspective on cognitive science. Cambridge MA : MIT Press.
- Kohonen, T. 1989 Self-organization and associative memory, 3rd edition. Berlin : Springer.
- Kruschke, J.K. 1992 ALCOVE : An exemplar-based connectionist model of category learning. *Psychological Review*, 99, 22-44.
- Kruschke, J.K. 1993 Human category learning : Implications for backpropagation models. *Connection Science*, 5, 3-36.
- Kruschke, J.K. 1996 Base rates in category learning. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 22, 3-26.
- Kruschke, J.K., & Erickson, M.A. 1994 Learning of rules that have high-frequency exceptions : New empirical data and a hybrid connectionist model. *Proceedings of the 16th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 514-519, Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Kruschke, J.K., & Erickson, M.A. 1995 Six principles for models of category learning. *Talk presented at the 36th Annual Meeting of The Psychonomic Society*, 10 November, Los Angeles CA.
- Lewandowsky, S. 1995 Base-rate neglect in ALCOVE : A critical reevaluation. *Psychological Review*, 102, 185-191.
- Marcus, G., Pinker, S., Ullman, M., Hollander, M., Rosen, T.J., & Xu, F. 1992 Overgeneralization in language acquisition. *Monograph of the Society of Research on Child Development*, serial no.228, 57(4).
- Markman, A.B., & Gentner, D. 1996 Analogy-based reasoning. In M. A. Arbib (Ed.) *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Cambridge MA : MIT Press.
- McCloskey, M., & Cohen, N.J. 1989 Catastrophic interference in connectionist networks : The sequential learning problem. In G.H.Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, vol.24, San Diego CA : Academic Press.
- McMillan, C., Mozer, M.C., & Smolensky, P. 1991 The connectionist scientist game : Rule extraction and refinement in a neural network. In *Proceedings of the 13th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 424-430, Hillsdale NJ : LEA.
- Medin, D.L., & Edelson, S.M. 1988 Problem structure and the use of base-rate information from experience. *Journal of Experimental Psychology : General*, 117, 68-85.
- Miller, G.R., Berwick, C., Fellbaum, G., Gross, G., & Miller, K. 1990 Introduction to WordNet : An on-line lexical database. *International Journal of Lexicography*, 3, 235-244.
- Murphy, G.L., & Medin, D.L., 1985 The role of theories in conceptual coherence. *Psychological Review*, 92, 289-316.
- Murre, J.M.J. 1992 Categorization and learning in modular neural networks. Hemel Hempstead : Harvester Wheatsheaf.
- Murre, J.M.J., & Goebel, R. 1996 Connectionist modeling. In T.Dijkstra & K.de Smedt (Eds.), *Computational*

- Psycholinguistics*, Taylor & Francis, Bristol PA.
- Pinker, S. 1991 Rules of language. *Science*, 253, 530-534.
- Pinker, S., & Prince, A. 1988 On language and connectionism : Analysis of a parallel distributed processing model of language acquisition. *Cognition*, 28, 73-193.
- Plunkett, K., & Marchman, V. 1991 U-shaped learning and frequency effects in a multi-layered perceptron : Implications for child language acquisition. *Cognition*, 38, 43-102.
- Plunkett, K., & Marchman, V. 1993 From rote learning to system building : Acquiring verb morphology in children and connectionist nets. *Cognition*, 48, 21-69.
- Quinlan, P.T. 1991 Connectionism and psychology : A psychological perspective on new connectionist research. Harvester, Cambridge University Press
- Ratcliff, R. 1990 Connectionist models of recognition memory : Constraints imposed by learning and forgetting functions. *Psychological Review*, 97, 285-308.
- Ross, B.H. 1989 Reminders in learning and instruction. In S.Vosniadou & A.Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning*, Cambridge MA : Cambridge University Press.
- Rumelhart, D.E., & McClelland, J.L. 1986 On learning the past tenses of English verbs. In D.E.Rumelhart, J.L.McClelland, & PDP Research Group (Eds.) *Parallel distributed processing : Explorations in the microstructure of cognition* (Vol.2), Cambridge MA : MIT Press.
- Rumelhart, D.E., McClelland, J.L., & PDP Research Group 1986 Parallel distributed processing : Explorations in the microstructure of cognition. Cambridge MA : MIT Press.
- Schyns, P.G., 1991 Neural network models of concept learning. In B.Soucek & The IRIS Group (Eds.), *Neural and Intelligent Systems Integration*, New York, Wiley.
- Schyns, P.G., & Murphy, G.L., 1994 The ontogeny of part representation in object concepts, *Psychology of Learning and Motivation*, 31, 301-349.
- Seidenberg, M.S. 1992 Connectionism without tears. In S.Davis (Ed.), *Connectionism : Advances in Theory and Practice*, Oxford, Oxford University Press.
- St.John, M.F., & McClelland, J.L. 1990 Learning and applying contextual constraints in sentence comprehension. *Artificial Intelligence*, 46, 217-257.
- Thagard, P., Holyoak, K.J., Nelson, G., & Gochfeld, D. 1990 Analog retrieval by constraint satisfaction. *Artificial Intelligence*, 46, 259-310.
- van Gelder, T. 1990 Compositionality : A connectionist variation on a classical theme. *Cognitive Science*, 14, 355-384.
- Wharton, C.M., Holyoak, K.J., Downing, P.E., Lange, T.E., Wickens, T.D., & Metz, E.R. 1994 Below the surface : Analogical similarity and retrieval competition in reminding. *Cognitive Psychology*, 26, 64-101.
- 乾敏郎 (1993), 「高次認知機能のモデル」, 乾敏郎編「認知と学習」第 6 章, 丸善
- 河原哲雄 (1992), 「概念獲得の現状と展望」, 東京大学教育学部紀要第 32 卷, 233-241.
- 守一雄 (1995), 「認知心理学」, 岩波書店
- 守一雄 (1996), 「やさしい PDP モデルの話 文系読者のためのニューラルネットワーク理論入門」, 新曜社
- 鈴木宏昭 (1996), 「説明と類推による学習」, 波多野誼余夫編, 「認知心理学 5 学習と発達」第 6 章, 東京大学出版会