

## 高次認知過程に関する計算論的モデル研究の動向

立教大学現代心理学部 都築 誉史

立教大学大学院現代心理学研究科 菊地 学

New trends in computational modeling studies of higher-level cognitive processes

Takashi Tsuzuki (College of Contemporary Psychology, Rikkyo University) and  
Manabu Kikuchi (Graduate School of Contemporary Psychology, Rikkyo University)

Computational modeling of cognition is directed at answering the question of how human information processing comes about: it is an examination of the psychological mechanisms, processes, and knowledge structures that lie beyond the limits of human thinking. Major contemporary frameworks for cognitive modeling include the symbolic models, the connectionist models, the symbolic connectionist models (hybrid models), and the Bayesian approaches. In this article, we report on the recent progress in these various computational models that simulate empirical data of higher-level cognition. We also review the advantages and disadvantages of these models, and argue in favor of the possibility of simulating the dual process theory of cognition by combining different frameworks. It seems likely that the existing frameworks will converge and overlap as we investigate the nature of cognition.

**Key words :** computational modeling, higher-level cognition, symbolic model, connectionist model, hybrid model

特定の認知過程や認知構造を仮定し、実際にコンピュータ・シミュレーションを行う場合、計算論的モデル (computational model) という名称が用いられる。プロダクション・システム (production system) とコネクショニスト・モデル (connectionist model) は、計算論的モデル構成における主要な2つの手法である。最近では、ベイズ推定 (Bayesian inference) に基づく確率論的なモデル研究も盛んになってきた。

包括的な認知モデルは、人間の複雑な知識・認識システムに関する基本的な機構 (設計仕様) という意味で、“認知アーキテクチャ (cognitive architecture)” と呼ばれる。認知アーキテクチャにおいても、記号処理 (プロダクション・システム)、コネクショニスト・モデル、両者の組み合わせ (hybrid model) の3つが基本となる。

最近出版された、“*The Cambridge Handbook of Computational Psychology*” (Sun, 2008) は、心理学における計算論的モデルの最前線がまとめられた興味深い著作である。第II部では、認知モデル構成のパラダイムとして、コネクショニスト・モデル、ベイズ確率推定モデル (Bayesian model)、ダイナミカル・システムズ・アプローチ (dynamical systems approach)、論理ベース・モデル (logic-based model)、認知アーキテクチャの5つが紹介されている。

コネクショニスト・モデル研究で指導的な役割を果たしてきたMcClelland (2009) は、認知研究におけるモデル構成について、以下の3点をあげている。(a) モデル構成の意義は、思考能力の限界を超えて、仮説の含意を詳細に探求できる点にある。(b) シミュレーションによってはじめて、

多数の要素が相互作用して生じる、連続的な処理過程の様相が明らかになる。(c) モデルは簡潔であることが本質的に重要であり、最適性、実証的妥当性を常に評価しなければならない。

本論文は、主に、記号処理モデル、コネクショニスト・モデル、ハイブリッド・モデル、ベイズ確率推定モデルの4つに焦点を当てて、認知心理学の立場から、高次認知に関する計算論的モデル研究の動向を展望することを目的とする。

## 記号処理モデル

### プロダクション・システム

プロダクション・システムは、“もし、得られた情報が条件部Cを満たすならば、行為部Aを実行せよ”といったルール (“if-then” rule, production rule) の集合に基づいて、系列的に制御された推論を実行する (Newell & Simon, 1972)。プロダクション・システムは、(a) 情報のリストを一時的に保持するワーキングメモリ、(b) 長期記憶に対応するプロダクション記憶 (ルールの集合)、(c) ルールの実行を制御するインタープリタから構成される。

プロダクション・システムでは、“条件照合、競合解消、実行 (matching, conflict resolution, execution)” というアルゴリズムを用いる。初期状態から出発し、目標状態に至るまでサイクルが繰り返され、ルールの系列が形成されていく。このように個々のルールは単純であるが、その組合せによって複雑な課題を遂行することが可能になる。

プロダクション・システムは、個々のルールの表現形式が単一であるため作成しやすく、ルールの追加や変更が容易であるといった長所をもつ。短所としては、(a) ルールは表層的知識の表現であるため、相互関係が不明確であり、知識全体の構造を把握しにくい、(b) 競合解消の方略を吟味しないとシステムの動きをうまく予測できない、などを挙げることができる。さらに、人間は、並列的に情報処理を行っていると考えられるが、プロダクション・システムは系列処理に基づいてお

り、人間の認知モデルとしては限界がある。

## 認知アーキテクチャの試み

ACT Anderson (1976) によるACT (adaptive control of thought) モデルは、記憶にとどまらず、言語の理解・産出、推論、知識獲得といった、広範囲にわたる知的活動を扱うことを目的とした。そのため、ACTでは、宣言的知識に関しては意味ネットワークが、手続き的知識についてはプロダクション・システムが用いられた。その後、このモデルはACT\* (ACT star : Anderson, 1983)、ACT-R (Rはrationalの略 : Anderson, Bothell, Byrne, Douglass, Lebiere, & Qin, 2004) と改良が進められた。

ACT\* ACT\*モデルでは、活性化された知識に対して、プロダクション・ルールの条件照合が行われる (Anderson, 1983)。こうした活性化の制御が、人間の連想記憶や注意の仕組みをシミュレートした重要な部分となっている。ACT\*の宣言的知識のネットワークにおいて、外的な刺激や内的な処理の結果、特定のノードが活性化される。特定のノードから、強度値をもったリンクにそってネットワーク上を活性化が拡散して行く。個々のリンクの強度値は、用いられた頻度によって変化し、頻度が高ければ値は強められる。このようにして、宣言的知識の学習が行われる。

一方、手続き的知識 (プロダクション・ルール) の獲得は、(a) 明示的なルールをよく考えながら用いる段階、(b) 一貫したやり方でルールを反復練習してゆく段階、(c) ルールを無意識的に用い、手順が十分に調整されて実行速度や正確さも高くなる段階から成る。こうした学習の進展を、手続き化 (proceduralization) と呼ぶ。

手続き化は、手続きに関する低速で顕在的な情報 (宣言的知識) を、高速で潜在的な実装形式 (手続き的知識) に変換する過程であり、プロダクションへのコンパイル (production compilation) とも呼ばれている。

手続き的知識の学習は、複数の関連したルールを効果的な単一のルールに統合することや、既存

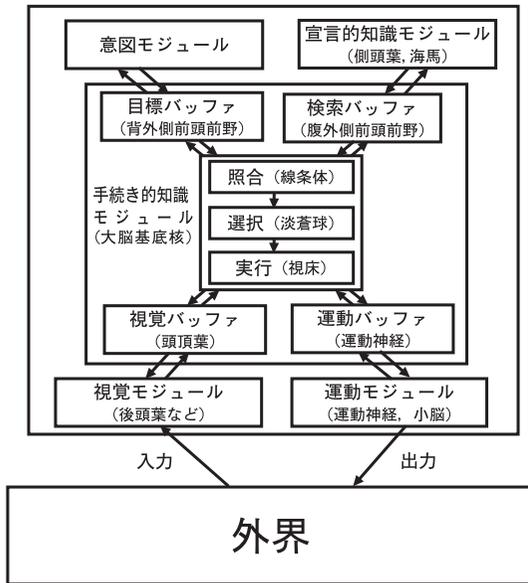


Figure 1. ACT-Rモデルの概要 (Anderson et al., 2004を一部改変)

のルールをほかの状況に一般化することによってなされる。さらに、特定のプロダクション・ルールがうまく起動されると、そのルールの強度が1単位分だけ増大する。これは、学習における練習効果に対応している。

**ACT-R** 新しいACT-Rでは、宣言的知識の基本単位をチャンク (chunk) と呼ぶ。チャンクは活性値を持ち、手続的知識の基本単位であるプロダクション・ルールも、有用度 (utility) と呼ばれる値を持つ。知識の構成単位は単純な形に整理され、目標指向的なシステム構成となっている。大きな枠組みとして、ACT-Rは意図モジュール (intentional module)、視覚・運動モジュール、2種類の知識モジュールから構成される (Figure 1 参照: Anderson, et al., 2004)。モジュールとは、脳内のほぼ独立した機能部分を意味する。各モジュールは、対応するバッファ (buffer, 情報を一時的に保持する領域) を通してのみアクセス可能である。最近、fMRIによって得られる脳内の活性化パターンと、モデルのモジュールやバッファとの対応づけが試みられるようになった。

ACT-Rは、基本的にはプロダクション・システ

ムを中心にすえた理論であり、人工知能研究で利用されることが多いLISP (LISt Processor) 言語で書かれている。ACT-Rはフリーソフトとして公開されており、自由に試用できる。

Anderson, J. R.の研究は、基本的には記号処理によって、人間の認知に関する一般モデルを構築しようとする試みであった。ただし、活性値、活性化拡散、有用度といった量的な処理過程 (記号下 (subsymbolic) と呼ぶ) も重視されている。こうした特徴から、ACT-Rを記号処理とコネクショニスト・モデルのハイブリッド・モデルと見なすこともある。

## コネクショニスト・モデル

### モデルの概要

コネクショニスト・モデルとは、脳の神経細胞をふまえた単純な処理ユニットのネットワークを用いて、人間の認知のメカニズムを理解しようとするアプローチである (McClelland, 1999)。並列分散処理モデル (parallel distributed processing model) や、ニューラルネットワーク・モデル (neural network model) も、コネクショニスト・モデルとほぼ同義である。近年、コネクショニスト・モデルは、基礎的な領域にとどまらず、記憶、言語、思考、認知発達、脳の障害、精神医学、社会的相互作用など、高次認知機能の研究にも積極的に導入されてきた (Bechtel & Abrahamsen, 2002; 守・都築・楠見, 2001; 都築, 印刷中a; 都築・河原・楠見, 2002; 都築・楠見, 2005; Van Overwalle, 2007)。

コネクショニスト・モデルでは、神経細胞に対応する処理単位をユニット、神経細胞同士のシナプス結合に対応するものを単に結合 (connection) と呼ぶ。各ユニットは活性値 (activation value) をもち、結合を通してユニット間で活性化を伝播し、並列的に相互作用する。コネクショニスト・モデルにおいて知識は、結合荷重 (connection weight) の集合として表現され、新たな知識の獲得は、局所的な学習規則に基づいた個々の結合荷

重の調節によって実現される。

ネットワークを構成する要素は、それぞれ単純で局所的な計算を行うだけであるが、並列的な相互作用の結果、ネットワーク全体として複雑な情報処理が実現される。学習規則と非線形の活性化関数に基づく局所的な相互作用によって、複雑な特性が大域的に現れる点が、コネクショニスト・モデルの重要な特徴である。

### ネットワーク形態と問題点

コネクショニスト・モデルは、ネットワークの形態によって分類できる。まず、ネットワーク構造に関しては、(a) 入力ユニットから出力ユニットまで順方向に結合されている多層ネットワーク (multi-layered network, feed-forward network) と、(b) ユニット間に双方向性の結合を有する相互結合ネットワーク (interconnected network) が基本である。

また、(c) 多層ネットワークにフィードバック結合を加えたネットワークもしばしば用いられる。Elman (1990) による言語研究で用いられた単純再帰ネットワーク (simple recurrent network: Elman, 1990; Figure 2 参照) が、その代表例と言えよう。

Rumelhart, Hinton, & Williams (1986) によって提案された、多層ネットワークにおける誤差逆伝

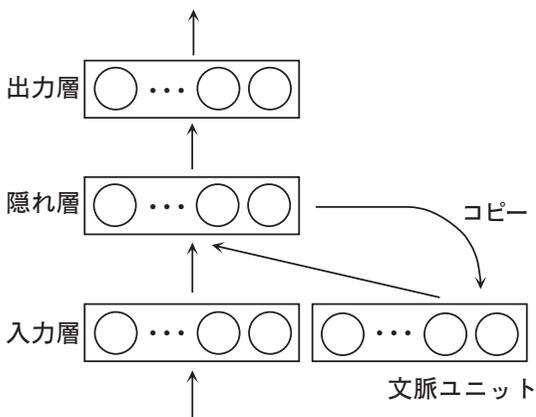


Figure 2. 単純再帰ネットワークの例 (Elman, 1990を一部改変)

播法 (error back propagation) は、コンピュータの処理能力の飛躍的な向上を背景として、それまで困難であった諸問題に対して有効であったため、学際的に多大な影響を及ぼした。誤差逆伝播法は、出力ユニットの活性値と正答にあたる教師信号との誤差を計算し、それに基づいて、入力層、隠れ層、出力層という情報の流れとは逆の順番で、ネットワークの学習 (結合荷重の修正) を行う。

ただし、従来の記号処理モデルの方が、コネクショニスト・モデルよりも認知過程を簡潔に記述できる場合が多い。つまり、微視的構造レベルからのアプローチには、高次認知過程を扱ううえで、克服すべき問題が少なくない。しかしながら、コネクショニスト・モデルの研究者の多くは、このモデルが仮定する微視的構造が、認知の基礎となっており、高次認知機能の特質をとらえるために必要不可欠であると主張してきた (Elman, Bates, Johnson, Karmiloff-Smith, Parsi, & Plunkett, 1996; McClelland, 1999)。

高次認知過程に関する研究では、(a) 柔軟な変数バインディング (binding: 結びつけ) と、(b) 構造化された表現をコネクショニスト・モデルでどう扱うかが大きな課題となってきた。変数バインディングに関しては、ユニットの発火パターンを時系列的に同期させる、動的バインディングの手法が一つの可能性を提供している。この方法は、神経科学的な知見に基づいており (Gray, Koenig, Engel, & Singer, 1989), 視覚的注意のパルスニューラルネットワーク・モデル (pulsed neural network model) などに発展している。

構造化された表現へ対処するため、記号処理とコネクショニスト・モデルを組み合わせたモデルがいくつか提案されてきた。こうしたハイブリッド・モデルについては、次節で説明する。

### 神経細胞との比較

実際の人間の脳神経系は、約1,000億個の神経細胞から構成され、個々の神経細胞は約10,000個の神経細胞と結びついている。神経細胞内の情報伝達は電氣的・離散的であるが、神経細胞間の情

報伝達は、神経伝達物質を介して化学的・量的である。そういった意味で、コネクショニスト・モデルは、実際の神経細胞の振る舞いに対する大まかな近似にすぎない点には留意すべきであろう。

外部から入力がない神経細胞は、 $-70\text{mV}$ 程度の静止膜電位をもつ。もし、入力刺激が十分に強く、膜電位が閾値を超えると ( $-50\text{mV}$ 程度)、 $1\text{ms}$ 程度の時間幅をもつパルス状の急激な電気活動を示し、それを活動電位 (スパイク, spike) と呼ぶ。細胞体で発生したスパイクは軸索に伝わり、シナプス結合を介して、他の神経細胞に電気信号が伝えられる。

個々のスパイク応答を精密に再現する理論研究もあるが、1つの神経細胞または神経細胞集団における、短時間の平均発火頻度というマクロ量を変数として、モデルを組み立てることも有効である (深井, 2009)。後者が、コネクショニスト・モデルの方向性であり、脳が様々な論理演算を行っている可能性を探るうえで、重要な役割を果たしてきた。

## 思考に関するモデル

### 条件推論研究とベイズ確率推定モデル

**ウェイソン選択課題** 認知心理学における思考研究は、問題解決、推論 (演繹推論, 帰納推論), 意思決定の3領域が代表的である (都築, 印刷中b)。ベイズ確率推定モデルを含む理論について具体的に説明するため、以下では、条件推論研究の領域で集中的に実験的検討と理論研究がなされてきた、ウェイソン選択課題 (4枚カード問題: Wason, 1966) について述べる。問題は下記の通りである。

“一方の面に文字が、別の面に数字が書かれた



Figure 3. ウェイソン選択課題 (オリジナルの文字-数字問題: Wason, 1966)

**Table 1**  
ウェイソン選択課題 (文字-数字課題)  
に対する実験結果  
(Johnson-Laird & Wason, 1970を一部改変)

選択パターン <sup>a)</sup>	4枚のカード	選択反応率 (%)
$p$ と $q$	Eと4	46
$p$ のみ	E	33
$p$ と $q$ と $\neg q$ <sup>b)</sup>	Eと4と7	7
$p$ と $\neg q$	Eと7 (正答)	4
その他		10

<sup>a)</sup> “ $p \rightarrow q$ ”という条件文と4枚のカードを対応づけている。

<sup>b)</sup> “ $\neg$ ”は否定を表す。

カードが4枚ある。さて、‘もし、あるカードの片面に母音が書かれているならば、別の面には偶数が書かれている’ という規則が成り立っているか確かめるためには、どのカードを裏返す必要があるだろうか (Figure 3 参照)”

上記の規則を、条件文 “もし $p$ ならば $q$  ( $p \rightarrow q$ )” と関連づけて考える。E, K, 4, 7のカードは、順に、 $p$  (母音),  $\neg p$  (母音でない),  $q$  (偶数),  $\neg q$  (偶数でない) と対応している。Table 1に、抽象的な4枚カード問題 (文字-数字課題) に対する実験結果を示す (Johnson-Laird & Wason, 1970)。

E ( $p$ ) を選ぶことは正しく、規則 ( $p \rightarrow q$ ) の直接的な確認になっている。もし、Eの裏が奇数ならば、ルールに違反していることがわかる。しかし、実験参加者の46%は、“E ( $p$ ) と4 ( $q$ )”を選んだ。4 ( $q$ ) は誤答であり、4の裏が母音でも子音でも、ルールの検証には何の役にも立たない。正答は“E ( $p$ ) と7 ( $\neg q$ )”であり、7の裏がもし母音であれば、ルール違反を発見できる。

正答である“Eと7”を選んだのは、たった4%の参加者にすぎなかった。その後の追試でも、文字-数字問題形式のウェイソン選択課題において、大学生の正答率は10%程度であることが知られている。

マッチングバイアス Evans & Lynch (1973)

は、“もし表がRならば、裏は3ではない”というように、否定形を含む規則を用いた場合、Rと肯定形の3が選択されやすくなることを見出した。確証バイアス説が正しければ、後件に基づいて、3以外の数字が選択されるはずである。この結果は、条件文に明示された項目とマッチする事例（この例では、Rと3）を選択する傾向であると解釈され、マッチングバイアス（matching bias）と名付けられた。

**心理論理** 人間が論理的に妥当な抽象ルールを保持しており、これを適用して演繹推論を行うと主張するのが、心理論理（mental logic）理論である（Braine, 1998）。この立場では、人間の推論エラーは、与えられた前提や結論の文に対する理解の誤り、推理の正しい連鎖を構成する上での推論過程の失敗、処理途中の情報維持の失敗などに起因すると考える。心理論理の考え方は、Piaget（1952）の認知発達理論にその原型を見ることができる。最近では、Bringsjord（2008）が、論理に基づく計算論的認知モデル（logic-based computational cognitive modeling）として、さらに精緻なモデルを提案している。

**情報獲得理論（ベイズ確率推定モデル）** 近年の研究として、ベイズ推定に基づく情報獲得理論（information gain theory）がある（Oaksford & Chater, 1994）。この立場では、推論課題において、規則が適用されているかどうかを判断するため、実験参加者は最も情報量の多い証拠を探していると考えられる。ウェイソン選択課題におけるカードの選ばれやすさは、そのカードを裏返すことによって得られる情報量の期待値（expected information gain：期待獲得情報量）によって決まると見なす。

Oaksford & Chater（1994）は、 $p$ や $q$ の生起確率が比較的小さいという仮定（希少性仮定, rarity assumption）を設けると、非論理的であると見なされていた選択（Table 1の $q$ ）の方が、正答（Table 1の $\neg q$ ）よりも期待獲得情報量が高いことを、条件付き確率の計算によって示した。最近、Chater & Oaksford（2008）は、“*The probabilistic mind: Prospects for Bayesian cognitive science*”を

編纂し、ベイズ推定といった確率論に基づいた認知科学へのアプローチを提唱している。

**ベイジアンネットワーク** 条件推論研究とは別の領域であるが、ベイズ確率推定モデルと関連した研究として、ベイジアンネットワーク（Bayesian network, belief network）が重要である。現在、パターン認識や機械学習といった研究分野では、誤差逆伝播法に代表されるニューラルネットワークは、複数ある重要な手法の一つとして位置づけられている（Bishop, 2006）。最近では、ベイジアンネットワークや、サポートベクトルマシン（support vector machine）といった、効率の良い手法も用いられるようになった。

ベイジアンネットワークとは、複数の確率変数間の質的な依存関係をグラフ構造によって表し、変数間の量的な関係を条件付き確率で表した確率モデルである。確率変数、依存関係を表すグラフ構造、条件付き確率といった3種類の構成要素によって定義される（本村, 2005）。コネクショニスト・モデルの構成要素とベイジアンネットワークの構成要素の間には対応関係があり、両者を組み合わせたモデルも研究されるようになった（McClelland, 2009）。

## 類推に関するモデル

次に、問題解決の一種である類推に関する近年のモデルについて説明する。2つの異なる状況に何らかの類似性があるとき、類推（analogy）が生じる。過去に経験した問題の内容が、今取り組んでいる問題の解法と類似しているとき、類推を用いることができる。当面の対象である問題を、ターゲット（target problem）と呼び、ターゲットと類似した過去の知識をソース（source）と呼ぶ。

たとえば、(a) ジョンはメアリーのことが好きで、(b) メアリーはサムのが好きで、(c) ジョンはサムに嫉妬している、と知っていたとしよう（これは、ソースとなる知識である）。さて、(a) サリーはトムのが好きで、(b) トムはキャシーのが好き、とわかったとする（これは、ターゲットに相当する）。ここで、(c) “サリーはキャ

シーに嫉妬する”と考えるのは、妥当な類推的推論である (Hummel & Holyoak, 2003b 寺尾訳 2005)。

類推による問題解決過程には、(1) ターゲットを理解し、ソースを長期記憶から検索した上で、ターゲットとソースとの間の類似関係に気づく段階、(2) ソースとターゲットを対応づける写像 (mapping) の段階、(3) 対応関係を、ターゲットに対する解の生成に適用する段階といった3段階がある。

上の例では、ソースとターゲットの共通性から、“もし、人物XはYが好きで、人物YはZが好きならば、人物XはZに嫉妬するだろう”と一般化できる。こうした複数の問題にまたがる概念を、問題スキーマ (problem schema) と呼ぶ。スキーマ帰納 (schema induction) とは、スキーマを利用可能にするプロセスをさす。

多重制約理論 (Holyoak & Thagard, 1995) によれば、(a) 問題中の対象の意味的な類似、(b) 問題中の対象が形成する関係の一致 (構造的な一致)、(c) 問題が同一の目標をもつこと (プラグマティックな (pragmatic) 類似性) といった3要因が、類推に際してソースの検索に影響を与えると主張される。

Holyoak, K. J.のグループは、類推問題を、要素が興奮性や抑制性のリンクで結合されたネットワークで表現し、上記3つの制約を用いて、並列的な

活性化の拡散を収束させるモデル (Analogical Constraint Mapping Engine: Holyoak & Thagard, 1989) を提案した。近年、Hummel & Holyoak (2003a, b) は、記号的コネクショニスト・モデルの一種であるLISA (Learning and Inference with Schemas and Analogies) を発表している。

LISAの知識表象は (Figure 4 参照)、(a) 分散表現による意味ユニット (最下層の小さな円)、(b) 対象と格役割を表す局所的なユニット (大きな円: 対象, 三角形: 格役割)、(c) 命題ユニット (楕円: P1, P2, P3) の3層から構成されており、関係するユニットは、発火パターンを同期させることによって動的に結びつけられる。LISAは、類推的写像、類推的推論、スキーマ帰納などに関する広範囲の実験データを再現することができた。

## 二重過程理論と発展的な諸問題

### 二重過程理論と思考スタイル

ウェイソン選択課題でマッチングバイアスを発見したEvans, J. St. B. T.らは、人間の推論が、(a) 直感的なヒューリスティック過程と、(b) 意識的なアナリティック過程から成るとするモデル (heuristic analytic model) を提案した (Evans & Over, 1996)。彼らは、マッチングバイアスは、ヒューリスティック過程で生じると主張している。

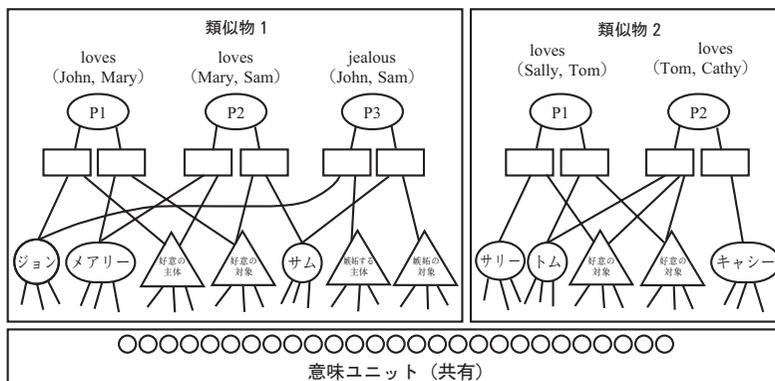


Figure 4. 2つの類似物に関するLISAの表象 (Hummel & Holyoak, 2003b 寺尾訳 2005)

人間の思考に関するこうした二重過程理論 (dual process theory) は、他の研究者によっても提案されており、(a) 高速、並列的で、自動的な“システム1 (潜在的過程)”と、(b) 低速、継時的で、注意の容量を必要とする“システム2 (顕在的過程)”が区別されている (Stanovich & West, 2000)。システム2は容量限界があり、低速だが、抽象的な思考が可能であり、システム1をモニターする役割を果たすことがある。知能の個人差は、システム1ではなく、主にシステム2と関連していると主張されている。

プロスペクト理論やヒューリスティックスなどの研究で、2002年のノーベル経済学賞を受賞したKahneman (2003) も、システム1とシステム2の区分を認めており、判断と意思決定における複数のヒューリスティックスは、直感的なシステム1に依存すると見なしている (Figure 5 参照)。

こうした二重過程理論は、近年の心理学研究ではそれほど珍しいものではない。二重課題において、学習当初には意識的に注意し、逐次的に課題を遂行する制御的過程 (controlled process) が、練習を反復することによって、並列的に実行可能な自動的過程 (automatic process) に移行することが知られている。ACT-Rの項で説明した熟達化

や、宣言的知識の手続き的知識への変換も、二重過程と関連している。

社会心理学における態度変容研究の領域で、Petty & Cacioppo (1986) は、(a) メッセージの受け手の関与が高く、情報が精緻化される可能性が高く、持続的な態度につながる中心ルートと、(b) 関与が低く、情報が精緻化される可能性が低く、不安定な態度につながる周辺ルートとを区別した精緻化可能性モデル (elaboration likelihood model) を提唱し、その後の研究に大きな影響を与えた。

従来、認知研究においては、一般的な法則性を探究することに重点をおき、個人差や文脈に依存した差違を、それほど重視して来なかったと考えることができる。意思決定スタイルに関する研究も徐々に進んできており、こうした個人差要因と、主要な認知要因とを組み合わせることによって、新たな知見が得られる可能性がある (菊地・都築・富田, 2009; 都築, 2008)。

#### 異種モデルの結合

1980年代前半まで、人間の hoch 認知過程のシミュレーションは、逐次的な記号処理モデルによってなされており (e.g., ACT-R), 記号を用いた構造

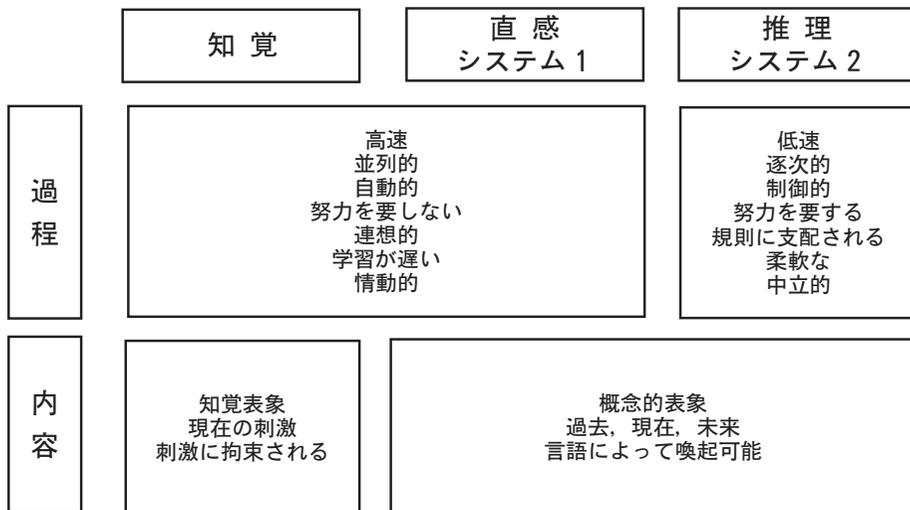


Figure 5. システム1・システム2における処理過程と内容 (Kahneman, 2003を翻訳)

的表現とルールが前提とされていた。これに対して、1980年代後半から発展して行ったコネクショニスト・モデルは、前記号的表現と並列分散処理を用いており、記号処理モデルを支持する研究者との間で、さまざまな論争が行われた (Marcus, 2001)。

すでに紹介したように、コネクショニスト・モデルのアーキテクチャを用いて、明示的知識の記号表現も取り扱おうとする立場は、記号的コネクショニスト・モデル、または、構造的コネクショニスト・モデルと呼ばれている。こうしたハイブリッド・モデルに関しては、1990年代後半以降、多くの研究が行われてきた (e.g., Hummel & Holyoak, 2003a, b; Kintsch, 1998)。最近の例としては、Sun, Slusarz, & Terry (2005) による CLARION (Connectionist Learning with Adaptive Rule Induction Online) モデルをあげることができる。CLARIONもACT-Rと同様に、認知アーキテクチャの一つとして知られている。

脳における複雑な処理手続きは、複数の異なる機能を持つモジュールを組み合わせることで構成された、メタネットワークによって実現されるという考え

方もある。研究例として、O'Reilly & Munakata (2000) は、(a) 側頭皮質や頭頂皮質では、連想や推論などの処理が行われ、モデルとしては相互結合ネットワークに対応し、(b) 前頭前皮質ではワーキングメモリに相当する処理が行われ、原型としては単純再帰ネットワークに対応すると述べている。さらに、(c) 海馬では、高速・任意の学習が行われるとし、詳細な海馬モデルを提案している。

ニューラルネットワークの基礎研究において、入力データを自動的に幾つかの小領域に分類し、各領域各々に専用のシステムを割り当て、出力を統合する手法が知られている。これは、混合エキスパート・モデル (mixture of experts model: Jacobs, Jordan, Nowlan, & Hinton, 1991) と呼ばれ、領域専用のサブシステムはエキスパート、出力を合成するサブシステムはゲート関数 (gating function) と名付けられている。このモデルを決定木 (decision tree) のように組み合わせた階層的混合エキスパート・モデル (hierarchical mixture of experts model) は、さらに高い能力を持つことが知られている (Figure 6 参照: Bishop, 2006;

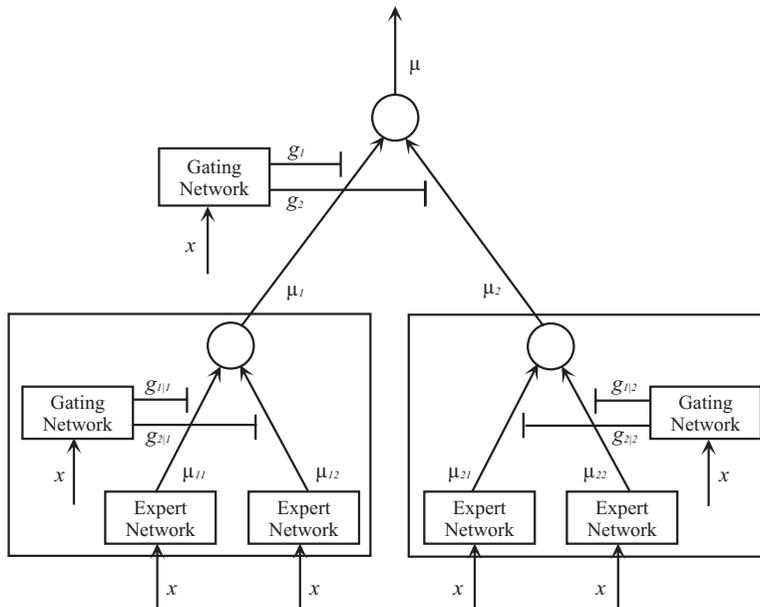


Figure 6. 階層的混合エキスパート・モデル (Jordan & Jacobs, 1994)



これに対して、“認知革命の第2波”と呼ばれることもあるように、1980年代半ばごろから、研究の流れが大きく変化した。その担い手の一つが、前述の通り、脳神経系にヒントを得たコネクショニスト・モデルの発展であった（Rumelhart, McClelland, & the PDP Research Group, 1986；都築, 2002）。

Marr (1982 乾・安藤訳 1987) は認知研究に多大な影響を与えた著書の中で、良く知られているように、情報処理装置を理解するために必要な3水準を区別した。つまり、(a) 計算の目的、適切性、実行可能な方略の論理に関する“計算理論”の水準、(b) 計算理論の実現に関わる“表現とアルゴリズム”の水準、(c) “ハードウェアによる実現”の水準の3つである。

Marr (1982 乾・安藤訳 1987) は、“機構に基づく思考 (mechanism-based thinking)” の危険性を指摘し、研究の目標が、人間の能力の一側面に関する真の理解ではなく、その模倣にすぎないプログラムの作成にすり替わってしまうことを警告している。一例として、プロダクション・システムをあげ、“人間の脳が非常に基本的な水準で、そのようなまがい表現方法をとっているとは、私にはとうてい信じられない”とまで述べている。27年前の著作ではあるが、独創的な先駆者の意見は傾聴に値する。工学と理学は別であり、認知心理学は後者に属する。近年の認知研究は、物作りを目指す工学的アプローチの影響を受けすぎているのかもしれない。

高次認知は、記憶、言語、思考の3つが主な研究領域である。記憶に関しては膨大な研究が行われ、数多くの精緻なモデルが提出された (e.g., O'Reilly & Munakata, 2000)。一方、言語使用は歴史的な慣用に大きく依存しており、厳密な“正解 (公理)” が存在しないといった意味で、非常に難しい研究領域である。Chomsky, N.による生成文法理論の約半世紀にわたる複雑な変遷が、その困難さをよく示していると言えよう。

Jackendoff (2002) は、主流派の統語中心主義と袂を分かち、音韻論、統語論、意味論を並列機

構としてとらえるアプローチを提案している。Jackendoff (2002) による“認知神経科学にとっての4つの難題”は、言語が脳の中でどのように具体化されるのかを問うものであり、認知研究者によってしばしば引用されている (Barrett, Feldman, & MacDermid, 2008; van der Velde & de Kamps, 2006)。

認知心理学における思考研究は、前述の通り、問題解決、推論、意思決定の3領域が代表的である。ベイズ確率推定の導入によって、推論研究は大きく進展しているように思われる (例えば、服部, 2008参照)。さらに、意思決定は、消費者行動論や経済学と関連の深い分野であり、近年、活発に研究が進められてきた (都築, 印刷中d; 都築・松井, 2006; 都築・松井・木村, 2006)。意思決定に関しては、コネクショニスト・モデルと確率論的な数理モデルを組み合わせた計算論的モデルが、いくつか提案されるようになった (Roe, Busemeyer, & Townsend, 2001; Tsuzuki & Guo, 2004; Usher & McClelland, 2004)。

我が国の心理学界では、実験的研究を重視し、モデル研究を軽視する傾向が強かった。日本の認知研究も成熟してきており、2009年に、日本認知科学会では第26回大会が、認知心理学会では第7回大会が開催された。心理学研究者も、認知科学が体現している学際的な視野を意識することが必要であろう (都築, 2002; 都築・楠見, 2005)。モデル研究と実験的研究が積極的に影響を及ぼし合うことが、認知研究の将来にとって有意義であると考えられる。

## 引用文献

- Anderson, J. R. (1976). *Language, memory and thought*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., & Qin, Y. (2004). An integrated

- theory of the mind. *Psychological Review*, **111**, 1036-1060.
- Barrett, L., Feldman, J. A., & MacDermid, L. (2008). A (somewhat) new solution to the variable binding problem. *Neural Computation*, **20**, 2361-2378.
- Bechtel, A., & Abrahamsen, A. (2002). *Connectionism and the mind: Parallel processing, dynamics, and evolution in networks*, (2nd Ed.). Malden, MA: Blackwell.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer.
- Braine, M. D. S. (1998). Steps toward a mental predicate logic. In M. D. S. Braine & D. P. O'Brien (Eds.), *Mental logic*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. pp. 273-332.
- Bringsjord, S. (2008). Declarative / logic-based cognitive modeling. In R. Sun (Ed.), *The Cambridge handbook of computational psychology*. New York: Cambridge University Press. pp.127-169.
- Chater, N., & Oaksford, M. (2008). *The probabilistic mind: Prospects for Bayesian cognitive science*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognitive Science*, **14**, 179-211.
- Elman, J. L., Bates, E. A., Johnson, M. H., Karmiloff-Smith, A., Parsi, D., & Plunkett, K. (1996). *Rethinking innateness: A connectionist perspective on development*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Evans, J. St. B. T., & Lynch, J. S. (1973). Matching bias in the selection task. *British Journal of Psychology*, **64**, 391-397.
- Evans, J. St. B. T., & Over, D. E. (1996). Rationality in the selection task: Epistemic utility versus uncertainty reduction. *Psychological Review*, **103**, 356-363.
- 深井朋樹 (2009). ニューロンとシナプスの数学モデル 深井朋樹 (編) 脳の計算論 東京大学出版会 pp.5-43.
- (Fukai, T.)
- Geschwind, N. (1970). The organization of language and the brain. *Science*, **170**, 940-944.
- Gray, C. M., Koenig, P., Engel, A. K., & Singer, W. (1989). Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*, **338**, 334-337.
- Hagmann, P., Cammoun, L., Gigandet, X., Meuli, R., Honey, C. J., Wedeen, V. J., & Sporns, O. (2008). Mapping the structural core of human cerebral cortex. *PLoS Biology*, **6**, 1479-1493.
- 服部雅史 (2008). 推論と判断の等確率性仮説——思考の対称性とその適応的意味—— 認知科学, **15**, 408-427.
- (Hattori, M. (2008). The equiprobability hypothesis of reasoning and judgment: Symmetry in thinking and its adaptive implications. *Cognitive Studies*, **15**, 408-427.)
- Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1989). A computational model of analogical problem solving. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. pp. 242-266.
- Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1995). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Hummel, J. E., & Holyoak, K. J. (2003a). A symbolic connectionist theory of relational inference and generalization. *Psychological Review*, **110**, 220-264.
- Hummel, J. E., & Holyoak, K. J. (2003b). Relational inference in a neutrally-plausible cognitive architecture: An overview of the LISA project. 認知科学, **10**, 58-75.
- (寺尾 敦 (訳) 神経的に妥当な認知アーキテクチャにおける関係推論——LISAプロジェクトの概要—— 都築誉史・楠見 孝 (編著) 高次認知のコネクショニストモデル——ニューラルネットワークと記号のコネクショニズム

- 共立出版 pp.191-217.)
- Jackendoff, R. (2002). *Foundations of language: Brain, meaning, grammar, evolution*. New York: Oxford University Press.
- Jacobs, R. A., Jordan, M. I., Nowlan, S. J., & Hinton, G. E. (1991). Adaptive mixtures of local experts. *Neural Computation*, **3**, 79-87.
- Johnson-Laird, P. N., & Wason, P. C. (1970). Insight into a logical relation. *Cognitive Psychology*, **1**, 134-148.
- Jordan, M. I., & Jacobs, R. A. (1994). Hierarchical mixtures of experts and the EM algorithm. *Neural Computation*, **6**, 181-214.
- Kahneman, D. (2003). A perspective on judgment and choice: Mapping bounded rationality. *American Psychologist*, **58**, 697-720.
- 菊地 学・都築誉史・富田望仁香 (2009). 意思決定スタイルに関する 2 種類の日本語版尺度作成の試み——“非妥当性への恐れ尺度”と“不確実性への不耐性尺度”に関する検討—— 日本心理学会第73回大会発表論文集, 251.  
(Kikuchi, M., Tsuzuki, T., & Tomita, M.)
- Kintsch, W. (1998). *Comprehension: A paradigm for cognition*. New York: Cambridge University Press.
- Marcus, G. F. (2001). *The algebraic mind: Integrating connectionism and cognitive science*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: W.H. Freeman.
- (マー, D. 乾 敏郎・安藤広志 (訳) (1987). ビジョン——視覚の計算理論と脳内表現——産業図書)
- McClelland, J. L. (1999). Cognitive modeling, connectionist. In R. A. Wilson & F. C. Keil (Eds.), *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. Cambridge, MA: MIT Press. pp. 137-141.
- McClelland, J. L. (2009). The place of modeling in cognitive science. *Topics in Cognitive Science*, **1**, 11-38.
- 守 一雄・都築誉史・楠見 孝 (編著) (2001). コネクショニストモデルと心理学——脳のシミュレーションによる心の理解—— 北大路書房 (Mori, K., Tsuzuki, T., & Kusumi, T. (Eds.) (2001). *Connectionist models and psychology: Understanding mind by simulations of the brain*. Kyoto: Kitaoji-shobo.)
- 本村陽一 (2005). ベイジアンネットワーク 渡辺澄夫・萩原克幸・赤穂昭太郎・本村陽一・福水健次・岡田真人・青柳美輝 学習システムの理論と実現 森北出版 pp. 75-97.  
(Motomura, Y.)
- Newell, A. (1980). Physical symbol systems. *Cognitive Science*, **4**, 135-183.
- Newell, A., & Simon, H. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Oaksford, M., & Chater, N. (1994). A rational analysis of the selection task as optical data selection. *Psychological Review*, **101**, 608-631.
- O'Reilly, R. C., & Munakata, Y. (2000). *Computational explorations in cognitive neuroscience: Understanding the mind by simulating the brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Petty, R. E., & Cacioppo, J. T. (1986). The elaboration likelihood model of persuasion. In L. Berkowitz (Ed.), *Advances in experimental social psychology*. Vol. 19. San Diego, CA: Academic Press. pp. 123-205.
- Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. New York: International University Press.  
(ピアジェ, J. 波多野完治・滝沢武久 (訳) (1960). 知能の心理学 みすず書房)
- Roe, R. M., Busemeyer, J. R., & Townsend, J. T. (2001). Multialternative decision field theory: A dynamic connectionist model of decision making. *Psychological Review*, **108**, 370-392.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J.

- (1986). Learning internal representations by error propagation. In D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, & the PDP research group (Eds.), *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition*. Vol.1. Cambridge, MA: MIT Press. pp. 318-362.
- Rumelhart, D. E., McClelland, J. L., & the PDP Research Group (Eds.) (1986). *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition*. Vol. 1. Cambridge, MA: MIT Press.
- Stanovich, K. E., & West, R. F. (2000). Individual differences in reasoning: Implications for the rationality debate? *Behavioral and Brain Sciences*, **23**, 645-665.
- Sun, R. (2008). *The Cambridge handbook of computational psychology*. New York: Cambridge University Press.
- Sun, R., Slusarz, P., & Terry, C. (2005). The interaction of the explicit and the implicit in skill learning: A dual-process approach. *Psychological Review*, **112**, 159-192.
- 都築誉史 (編著) (2002). 認知科学パースペクティブ——心理学からの10の視点—— 信山社  
(Tsuzuki, T. (Ed.) (2002). *Perspectives of cognitive science: Ten points of view from psychology*. Tokyo: Shinzan-sya.)
- 都築誉史 (2008). 追求-後悔尺度による意思決定スタイルの測定——尺度の信頼性と自己肯定意識尺度との関係に関する検討—— 応用社会学研究 (立教大学社会学部紀要), **50**, 93-104.  
(Tsuzuki, T. (2008). Measurement of decision-making style using the maximization and regret scale: Validity of the maximization and regret scale and relationship between maximization and self-consciousness scales. *The Journal of Applied Sociology*, **50**, 93-104.)
- 都築誉史 (印刷中a). 言語と思考に関するコネクショニストモデル 楠見 孝 (編) 言語と思考 (現代の認知心理学 3) 北大路書房  
(Tsuzuki, T.)
- 都築誉史 (印刷中b). 問題解決と推論 箱田裕司・萩原 滋・都築誉史・川畑秀明 認知心理学 (New Liberal Arts Selection) 有斐閣  
(Tsuzuki, T.)
- 都築誉史 (印刷中c). 言語理解 箱田裕司・萩原 滋・都築誉史・川畑秀明 認知心理学 (New Liberal Arts Selection) 有斐閣  
(Tsuzuki, T.)
- 都築誉史 (印刷中d). 判断と意思決定 箱田裕司・萩原 滋・都築誉史・川畑秀明 認知心理学 (New Liberal Arts Selection) 有斐閣  
(Tsuzuki, T.)
- Tsuzuki, T., & Guo, F. Y. (2004). A stochastic comparison-grouping model of multialternative choice: Explaining decoy effects. *Proceedings of the Twenty-sixth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. pp.1351-1356.
- 都築誉史・河原哲雄・楠見 孝 (2002). 高次認知過程に関するコネクショニストモデルの動向 心理学研究, **72**, 541-555.  
(Tsuzuki, T., Kawahara, T., & Kusumi, T. (2002). Connectionist modeling of higher-level cognitive processes. *Japanese Journal of Psychology*, **72**, 541-555.)
- 都築誉史・楠見 孝 (編著) (2005). 高次認知のコネクショニストモデル——ニューラルネットワークと記号のコネクショニズム—— 共立出版  
(Tsuzuki, T., & Kusumi, T. (Eds.) (2005). *Connectionist models of higher-level cognition: Neural network models and symbolic connectionism*. Tokyo: Kyoritsu-syuppan.)
- 都築誉史・松井博史 (2006). 多属性意思決定における文脈効果に関するモデル研究の動向 立教大学心理学研究, **48**, 69-79.  
(Tsuzuki, T., & Matsui, H. (2006). New trends in modeling studies on context effects in multi-

- attribute decision making. *Rikkyo Psychological Research*, **48**, 69-79.)
- 都築誉史・松井博史・木村泰之 (2006). 購買意思決定において参照される商品属性に関する探索的分析 応用社会学研究 (立教大学社会学部紀要), **48**, 37-52.
- (Tsuzuki, T., Matsui, H., & Kimura, Y. (2006). An exploratory analysis of referential attributes of products in purchase decision making. *The Journal of Applied Sociology*, **48**, 37-52.)
- Usher, M., & McClelland, J. L. (2004). Loss aversion and inhibition in dynamical models of multi-alternative choice. *Psychological Review*, **111**, 757-769.
- van der Velde, F., & de Kamps, M. (2006). Neural blackboard architectures of combinatorial structures in cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, **29**, 37-70.
- Van Overwalle, F. (2007). *Social connectionism: A reader and handbook for simulations*. New York: Psychology Press.
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage*, **30**, 1414-1432.
- Wason, P. C. (1966). Reasoning. In B. M. Foss (Ed.), *New horizons in psychology*. Harmondsworth, UK: Penguin. pp. 135-151.

—— 2009.9.30 受稿, 2009.11.17 受理 ——