

注意研究の研究動向：空間的注意のモデル

竹内龍人

日本電信電話株式会社 NTTコミュニケーション科学基礎研究所

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

1. はじめに

視覚的注意と呼ばれる処理機構の目的は、入力される視覚情報を行動の目的に合わせて制御することにある。空間情報の選択的な処理を担う注意は空間的注意 (spatial attention) と呼ばれ、そのメカニズムをモデル化する試みがなされてきた^{1,2)}。空間的注意メカニズムのモデルは、単位時間内に処理される最大情報量 (容量, capacity) に関していかなる仮定を設けるか、という点により二分できる。一つは容量に限界を設ける限界容量モデル (limited-capacity model) であり、注意メカニズムにおける情報処理の制約が限界容量をもたらずと仮定されている。もう一つは処理される情報量に限界を仮定しない無限容量モデル (unlimited-capacity model) であり、全ての情報源は同時に処理されると仮定されている。空間的注意を実験的に調べるパラダイムの代表的なものに、視覚探索と先行手がかり法がある。本稿では、両実験パラダイムからもたらされた知見が、限界容量および無限容量モデルによりいかにして解釈されているかを解説する。

2. 視覚探索

一般的な視覚探索パラダイムでは、被験者は妨害刺激の中から目標刺激を検出する³⁾。妨害刺激と目標刺激が二種類の視覚属性の組み合わせで定義されている結合探索課題の場合、妨害刺激数の増加に伴い目標刺激の検出は困難になる⁴⁾。このような現象をセットサイズ効果 (set-size effect) と呼ぶ。限界容量および無限容量の両モ

デルは、このセットサイズ効果の説明において本質的に異なっている。

2.1 直列処理による限界容量モデル

限界容量モデルには、直列処理を仮定する場合と並列処理を仮定する場合の二種類のモデルがある。直列処理を仮定した限界容量モデルの代表例は Treisman らによる特徴統合理論である^{3,4)}。特徴統合理論に基づくモデルでは処理が階層的に行われる。注意メカニズムの情報処理容量における限界のために、モデルの第2ステージでは画面上に存在する各刺激は直列的に走査される。そのため妨害刺激の増加に伴い目標刺激検出のパフォーマンスが低下し、セットサイズ効果として現れる。類似したモデルの定量化は Bergen and Julesz⁵⁾ や Wolfe ら⁶⁾ により行われている。Bergen and Julesz⁵⁾ によるモデルは短時間呈示された刺激布置における探索の精度、Wolfe ら⁶⁾ によるモデルは探索に要する時間 (反応時間) に対して適用される。

2.2 並列処理による限界容量モデル

限界容量の有無と並列/直列処理は直交する概念である。並列処理を仮定した限界容量モデル⁷⁻⁹⁾ では、視覚系は画面上の全ての刺激を並列的にモニターしており、注意メカニズムは、入力される視覚情報配列から情報を抽出する (sampling)。注意メカニズムによる刺激からの情報抽出の回数は固定されており、それが限界容量を生じさせている。刺激の個数が少ない場合には、その刺激に関して複数回の情報抽出が行われるため処理の質が向上する一方、刺激の個数が多い場合は、情報抽出が画面全体に分散するために処理の質が低下する。セットサイズ効

果はこの処理の質の低下に起因する。

2.3 並列処理による無限容量モデル

信号検出理論 (Signal Detection Theory) に基礎をおく無限容量モデルを SDT モデルと呼ぶ¹⁰⁻¹²⁾。

SDT モデルでは、画面内の刺激数に関わらず処理は並列的に遂行され、限界容量は仮定されない。また各刺激は視覚系内部にノイズをもたらすため、各刺激に対する視覚系の応答は試行毎に変動する。最大の応答を出す刺激が目標刺激として選択されるが、各刺激による内部ノイズのために、妨害刺激は目標刺激を超える応答を出す可能性がある。そのため妨害刺激数の増加とともに、妨害刺激が目標刺激として間違えられる確率が上昇し、セットサイズ効果が生じる。

SDT モデルと特徴統合理論の本質的な違いの一つは、妨害刺激が目標刺激として選択される可能性があるか否かという点にある。特徴統合理論では妨害刺激が目標刺激と間違われることはないため、観察者が正答できない場合には、目標刺激が妨害刺激として認知されるというミスのみが生じている。しかしながら SDT モデルでは、各刺激が引き起こす内部ノイズにより、妨害刺激が目標刺激として認知される場合 (フォールスアラーム) がある。

続いて Eckstein ら¹¹⁾ による SDT モデルの実装を紹介する。被験者は目標刺激を含む「画面 1」と妨害刺激のみからなる「画面 2」を継時的に観察し、目標刺激が含まれている画面を回答する (時間的強制二肢選択)。目標刺激と妨害刺激が単独の視覚属性により定義される特徴探索課題では、正答率 P_c は以下のように表される。

$$P_c = P[\max(T, D_{11}, D_{12}, \dots, D_{1n-1}) = x] \\ P[\max(D_{21}, D_{22}, \dots, D_{2n}) < x] \quad (\text{式 1})$$

T は目標刺激 (「画面 1」に存在) がもたらす応答量、 D_{in} は i 番目の画面 ($i = 1$ or 2) に含まれる妨害刺激 ($1 \sim n$) がもたらす応答量である。正答率 P_c は、目標刺激を含む「画面 1」内の刺激がもたらす応答の最大値 x が、妨害刺激のみを含む「画面 2」からの応答を上回る場合の

確率に相当する。各画面からの最大応答量に基づいて目標刺激が決定されるため、最大応答が「画面 2」内の妨害刺激から出た場合には誤答となる。式 (1) はさらに以下のように変形される。

$$P_c(n, d') = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{g(x-d') G^{2n-1}(x) + (n-1)}{g(x) G^{2n-2}(x) G(x-d')} \right] dx \quad (\text{式 2})$$

d' は目標刺激と妨害刺激の弁別の容易さ (discriminability) である。内部ノイズとしてガウシアンノイズを想定する場合、 $g(x-d')$ は目標刺激への応答が x となる正規確率、 $G(x-d')$ は目標刺激への応答が x 以下となる累積正規確率、 $g(x)$ は妨害刺激への応答が x となる正規確率、 $G(x)$ は妨害刺激への応答が x 以下となる累積正規確率である。式 (2) の第 1 項は目標刺激への応答が x をとり、残りの妨害刺激が x 以下となる確率を示す。第 2 項は、「画面 1」に存在する $n-1$ 個の妨害刺激が x の値をとり、目標刺激及び「画面 2」の妨害刺激が x 以下となる確率である。式 (2) が示すように、正答率 P_c は d' と妨害刺激の個数 (n) に依存する。したがって特徴統合理論からの予測と異なり、特徴探索の場合でも、 d' が小さい場合にはセットサイズ効果が現れることになる。実際に視覚探索が d' と n の関数になることは多くの研究で示されている¹⁰⁻¹⁵⁾。また SDT モデルは、結合探索や三重結合探索 (Triple conjunction) といった多次元視覚探索に適用が可能である¹¹⁾。

上記の SDT モデルでは注意に関する仮説が含まれていないが、視覚探索では注意が機能していないということを意味しているわけではない。一般的な視覚探索課題の場合には、目標刺激が既知である。SDT モデルの場合は、モニターすべき視覚メカニズムが注意により制御されると仮定されている。例えば、方位が妨害刺激と異なる目標刺激を探索する課題では、注意メカニズムにより方位検出を担う視覚フィルターの出力がモニターされる。なお視覚探索における空間的注意の機能を調べるために、視覚探索課題に後述する先行手がかり法を組み合わせた手法

が用いられている^{16), 17)}。

3. 先行手がかり法

SDT モデルでは注意の役割が必ずしも明確でない。一般的な視覚探索課題では被験者の注意が実験的に制御されていないため、注意の効果を定量的に実装することが困難だからである。空間的注意を実験的に検討する代表的なパラダイムとして、先行手がかり法 (precuing method) がある。先行手がかり法には様々なバリエーションがあるが、最も基本的な方法では、観察者は二つの場所のどちらかに提示される目標刺激を検出する課題を行う¹⁸⁾。先行手がかり (precue) は目標刺激提示の直前に示される。先行手がかりが有効である場合 (目標刺激が手がかりと同位置に提示される場合) には、先行手がかりが無効である場合 (目標刺激が手がかりと異なる位置に提示される場合) と比べて、正答率や反応時間が向上する。このようなパフォーマンスの向上を先行手がかり効果 (cuing effect) という。視覚探索の場合と同様に、先行手がかり効果の説明のために限界容量、無限容量の両モデルが提案されている。

3.1 限界容量モデル

限界容量モデルでは、先行手がかりが示す空間位置に注意資源が集中的に配分される。その結果、手がかりが示した場所における処理が向上し、先行手がかり効果へとつながる。先行手がかり効果をもたらす空間的注意は、信号増幅 (signal enhancement) およびノイズ除去 (noise exclusion) という二つの機能を持つことが指摘されている¹⁸⁾。Lu and Doshier^{19, 20)} はこれらの空間的注意の機能を定量化するモデルを提案している。

Lu and Doshier^{19, 20)} による実験では、ノイズ解析の理論²¹⁾ に基づき、刺激に加えた外部ノイズの強さと先行手がかりの効果の関係を推定した。Lu and Doshier^{19, 20)} によるモデルでは、信号増幅機能とは、空間的注意により検出器 (目標刺激の検出を担う視覚フィルタ) のゲインが上昇することである。このモデルからは、外部ノイ

ズ量が小さい時に先行手がかりの効果が強まることが予測される。フィルタのゲイン上昇に伴って外部ノイズの効果も強まり、先行手がかりによる注意の効果を相殺してしまうからである。またノイズ除去機能とは、注意によりフィルタの同調関数が変調され、目標刺激に対してフィルタの形状が最適化されることである。このモデルからは、外部ノイズ量が大きい時に、先行手がかりの効果により強くなることが予測される。フィルタの形状が目標刺激に同調することにより、外部ノイズが効率的に除外されるからである。Lu and Doshier^{19, 20)} はこれらの予測を実験的に確認している。なおこのモデルでは注意は提示されている刺激自体の処理に関与しており、次章で述べる外部ノイズ削減モデル (external noise reduction model) とは異なっている。

3.2 無限容量モデル

先行手がかりの効果の説明する無限容量モデルは、前章で記した SDT モデルとはほぼ同型であり、注意メカニズムが処理する情報容量に制限がない^{16, 22, 23)}。無限容量モデルでは、内部ノイズにより各位置からもたらされる応答は変動しており、先行する手がかりが示す位置と示さない位置における刺激の表現に差はない。先行手がかりにより誘導される注意は純粋に空間選択的なメカニズムとして働き、視覚システムがモニターすべき領域 (目標刺激が提示される可能性がある領域) 面積を減らす。このような空間的な不確定性 (spatial uncertainty) の減少は先行手がかりの効果として現れる。これらのモデルは外部ノイズ削減モデルとも呼ばれている。

無限容量モデルでは注意は選択的なメカニズムであり、目標刺激の信号強度を増幅するような機能を持たない。限界容量モデルと無限容量モデルを比較する際に、実際に刺激信号の増幅が現象として観察されるか否かが論点の一つになってきた。目標刺激のみが画面上に存在する場合には先行手がかりの効果弱いことから、信号増幅機能に関して疑問がもたれてきたが²⁴⁾、特に閾値近辺のコントラストを持つ刺激検出の際に、信号増幅が生じている可能性が最近の研

究で指摘されている²⁵⁾。

4. まとめ

空間的な注意のメカニズムのモデルは、注意資源の容量という点から限界容量モデルと無限容量モデルに二分される。一般的な視覚探索課題に関してはSDTモデルの方が説明力が強く、特徴統合理論^{3,4)}に代表される複雑な注意メカニズムを仮定する必要はないという指摘がある¹⁰⁻¹²⁾。視覚探索は本質的に目標刺激の検出課題であることから、一般的な刺激検出のモデルとして用いられている信号検出理論が視覚探索に適用できることは妥当であると考えられる。一方、空間的注意が明示的に操作されている先行手がかり課題からの知見は、注意メカニズムが単なる空間選択機能を超えて信号増幅やノイズ除去機能を担っている可能性を示している¹⁹⁾。

文 献

- 1) 熊田孝恒：視覚的注意。日本視覚学会(編)：視覚情報処理ハンドブック。朝倉書店、459-463, 2000。
- 2) 横澤一彦：視覚的注意。日本視覚学会(編)：視覚情報処理ハンドブック。朝倉書店、468-472, 2000。
- 3) 横澤一彦, 熊田孝恒：視覚探索—現象とプロセス。認知科学, 3, 119-138, 1996。
- 4) A. M. Treisman and G. Gelade: A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136, 1980.
- 5) J. Bergen and B. Julesz: Parallel versus serial processing in rapid pattern discrimination. *Nature*, 303, 696-698, 1983.
- 6) J. M. Wolfe, K. R. Cave and S. L. Franzel: Guided search: An alternative to the feature integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 419-433, 1989.
- 7) M. L. Shaw: Identifying attentional and decision-making components in information processing. R. Nickerson (ed.): *Attention and Performance VII*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 277-296, 1980.
- 8) J. Palmer, C. T. Ames and D. T. Lindsey: Measuring the effect of attention on simple visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 108-130, 1993.
- 9) E. T. Davis, T. Shikano, S. A. Peterson and R. K. Michel: Divided attention and visual search for simple versus complex features. *Vision Research*, 43, 2213-2232, 2003.
- 10) J. Palmer, P. Verghese and M. Pavel: The psychophysics of visual search. *Vision Research*, 40, 1227-1268, 2000.
- 11) M. P. Eckstein, J. P. Thomas, J. Palmer and S. S. Shimozaki: A signal detection model predicts the effects of set size on visual search accuracy for feature, conjunction, triple conjunction and disjunction displays. *Perception and Psychophysics*, 62, 425-451, 2000.
- 12) P. Verghese: Visual search and attention: A signal detection theory approach. *Neuron*, 31, 523-535, 2000.
- 13) J. Duncan and G. W. Humphreys: Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 96, 433-458, 1989.
- 14) P. Verghese and K. Nakayama: Stimulus discriminability in visual search. *Vision Research*, 34, 2453-2467, 1994.
- 15) K. R. Dobkins and R. G. Bosworth: Effects of set-size and selective spatial attention on motion processing. *Vision Research*, 41, 1501-1517, 2001.
- 16) R. A. Kinchla, Z. Chen and D. Evert: Precue effects in visual search: data or resource limited? *Perception and Psychophysics*, 57, 441-450, 1995.
- 17) M. Carrasco and B. McElree: Covert attention accelerates the rate of visual information processing. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 98, 5363-5367, 2001.
- 18) M. I. Posner: Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25, 1980.
- 19) Z.-L. Lu and B. A. Doshier: External noise distinguishes attention mechanisms. *Vision Research*, 38, 1183-1198, 1998.

- 20) Z. -L. Lu and B. A. Doshier: Spatial attention: Different mechanisms for central and peripheral temporal precues? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **26**, 1534-1548, 2000.
- 21) A. J. Ahumada and A. B. Watson: Equivalent-noise model for contrast detection and discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*, **2**, 1133-1139. 1985.
- 22) G. Sperling and B. A. Doshier: Strategy optimization in human information processing. *K. R. Boff, L. Kaufman and J. P. Thomas (eds.): Handbook of perception and human performance: Volume 1. Sensory processes and perception*. New York: John Wiley and Sons, 1-65, 1986.
- 23) S. S. Shimozaki, M. P. Eckstein and C. K. Abbey: Comparison of two weighted integration models for the cueing task: linear and likelihood. *Journal of Vision*, **3**, 209-229, 2003.
- 24) L. Shiu and H. Pashler: Negligible effect of spatial precuing on identification of single digits. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **20**, 1037-1054, 1994.
- 25) M. Carrasco, C. Penpeci-Talgar and M. P. Eckstein: Spatial covert attention increases contrast sensitivity along the CSF: Support for signal enhancement. *Vision Research*, **40**, 1203-1215, 2000.