

視覚意識のダイナミズム

(独) 情報通信研究機構 村田 勉

§ 1 はじめに

脳が「意識」を生み出す仕組みを理解することは、脳科学、広くは自然科学にとって大きな課題である。しかし、意識の一般論を展開する前に、その特定の側面に焦点を当てて定量的な研究を行うことが、意識への自然科学的取り組みの方法論を探る上で有効であろうと考えられる。私たちの研究では、意識の視覚的側面、つまり、「見え」が意識にのぼるプロセスの性質と仕組みについて取り組んでいる。

§ 2 視覚意識の自発的交替を引き起こす離散的確率過程

両眼視野闘争や多義図形知覚(以下、知覚闘争と総称)という現象では、物理的な視覚刺激は一定あるいは定常であるにもかかわらず、意識に昇る見え(視覚的意識)が主に2つありそれらが自発的に交替する。このため、知覚的側面から意識を科学的に理解する手がかりとして、近年電気生理学と非侵襲計測法により研究が進められてきた[1,2]。その結果、見えの切替りは視覚情報処理の単一レベルだけで決定されるのではなく、脳の様々なレベルが相互に関わった結果引き起こされるのではないか、という新しい見方が提出されるに至った[3]。一方、これらの現象では見えの切替りの時間インターバルがガンマ分布に従うという経験則が知られている[4]。しかしその精密な調査はなされずにきた。私達は十分な観察時間を確保した心理物理実験により見えの切替りのガンマ分布を定量的に調査し、この分布がポアソン過程とみなせる離散確率過程から生じていることを見出した。このことは、見えの切替りを引き起こすメカニズムが、脳の何らかの離散的状態間の確率的遷移と関係していることを示唆している。これら知覚闘争の研究の進展は、視覚的意識を生み出すメカニズムを脳の特定の局在部位(site)としてだけでなく、システムとしての脳の動的な状態(state)として探索することの重要性を示していると考えられる。

2. 1 心理物理実験 [5,6]

6種類の知覚闘争刺激(図1)を用い、それぞれ約20名の被験者が指接触スイッチで見えの切替りを報告した。観察は6分間を1試行として休憩しながら10試行おこない、計1時間の観察時間とした(平均約700回の切替りが得られた)。被験者、見えごとの累積度数分布にガンマ分布関数を最適フィットさせた。ガンマ分布は下式によりパラメータ α 、 β (ともに正実数)によって与えられるものである:

$$f_{\alpha\beta} = \frac{\beta^\alpha t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha)}.$$

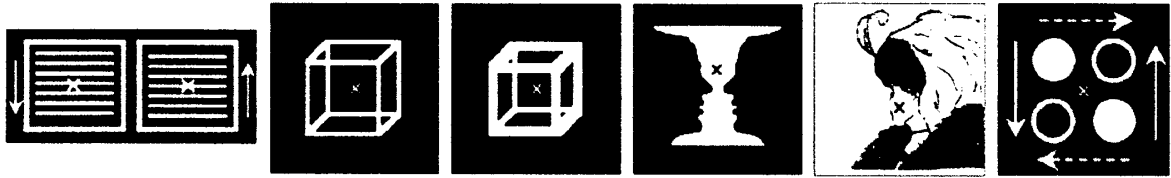


図1 知覚闘争刺激(両眼視野闘争、ネッカーキューブなど)

心理物理実験から得られた切替り時間インターバルに最適フィットさせたガンマ分布のパラメータ α は、見えの種類に対して有意な依存性を示さなかった($p=0.35$)。そこで全刺激をまとめて α のヒストグラムを作成すると、 $\alpha=2, 3, 4$ の自然数のところにクリアなピークが認められた(図2)。

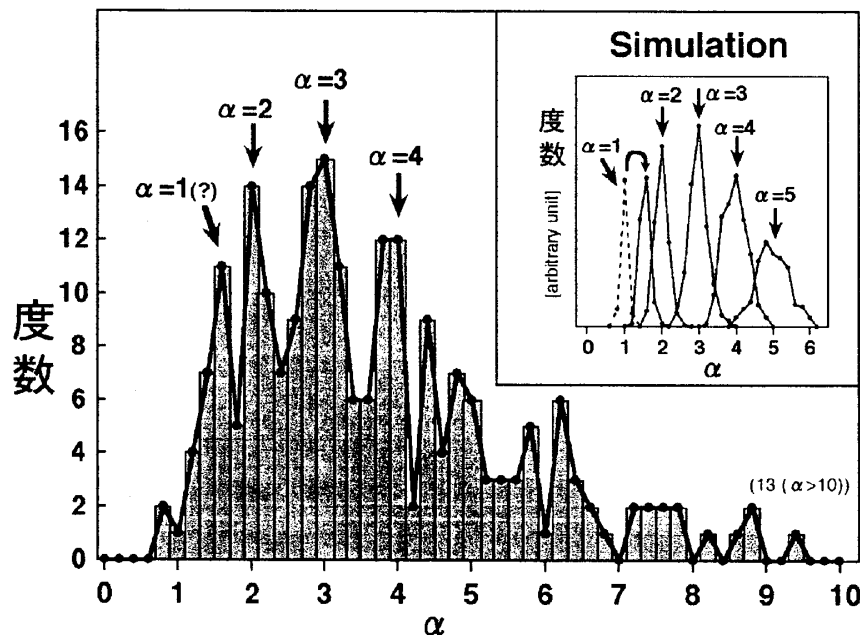


図2 知覚闘争ガンマ分布のパラメータ α

α は本来任意の正実数であるが、自然数をとるときに限り、離散的確率過程(ポアソン過程)において確率事象が α 回起きるまでの所要時間の分布として与えられる。ゆえにこの結果は、意識にのぼる見えが切り替わるまでに α 個の離散的状態の間を確率遷移(速度 β)するプロセスがあることを示している(図3)。この実験結果は、ポアソン過程のモンテカルロシミュレーションの結果ともよい一致を示した。また、シミュレーションにより、 $\alpha=1$ のピークは指報告の反応時間の影響で $\alpha=2$ 側にシフトして現れることがわかった(実験結果と一致)。さらに、単一種類の刺激について約80名の被験者で調査した追加実験により、両眼視野闘争と仮現運動のそれぞれで自然数ピークを確認できた。知覚闘争に影響を与える離散確率事象として眼球サッケードおよびまばたきが考えられるが、これらと見えの切替りの生起

の時間相関を5名の被験者で調べたところ、まばたきによって誘発される切替りは多くて1割程度にとどまることがわかり、サッケード、まばたきは時間分布の形状を決める要因としては小さすぎることがわかった。ゆえに知覚闘争を引き起こす離散的確率過程は脳内でのプロセスであると思われる。

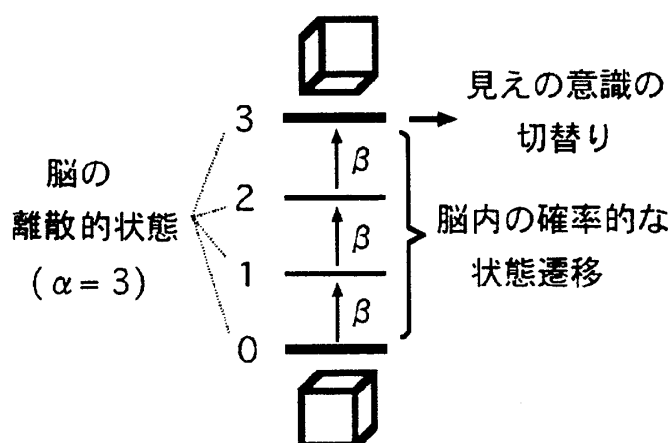


図3 知覚闘争の離散的確率過程

2. 2 知覚闘争の神経基盤に関するfMRI実験 [7]

視覚的意識の切替りの脳内メカニズムの手がかりを得るため、知覚闘争と相関する脳の活動を調べるfMRI(機能的磁気共鳴画像法)実験を行った。撮像はシーメンス Vision (1.5 T)により行い、被験者3名に対して、視覚刺激(両眼視野闘争、ルビンの顔と盃、ネッカーキューブ、仮現運動)はパソコンで作成したものをプロジェクタで提示した(視角約5度)。両眼視野闘争は赤緑フィルタのメガネを用いた。知覚闘争(rivalry)条件では、被験者は見えの切替りをボタン押しにより報告する。このタイミングの記録を使って、一義図形を交互に切り替えて提示する再現(replay)条件を行った(知覚闘争条件: 自発的な見えの切替り、再現条件: 刺激切替えによる受動的切替り)。解析はSPM99を用いた。

提示した4種類の闘争刺激について共通に、下記の部位で再現条件と比べて知覚闘争条件で有意な賦活が見られた: 第1次視覚野(BA17)、高次視覚野(BA18/19)、頭頂間溝(IPS)、上頭頂小葉(SPL, BA7)、下頭頂小葉(IPL, BA40)、運動前野背側部(BA6)、運動前野腹側部及び前頭弁蓋(BA6/9/44)、前頭前野腹外側部(BA10)。これらの活動部位は、単一被験者・多課題、および多被験者・多課題のconjunctionでほぼ同じだった(BA10の活動は被験者間で半球優位性の違いが見られたが、conjunctionの結果には反映されなかった)。このことは、異なる種類の知覚闘争に共通の神経基盤が存在し、視覚野、頭頂葉、前頭葉を含む広域ネットワークであることを示唆している。

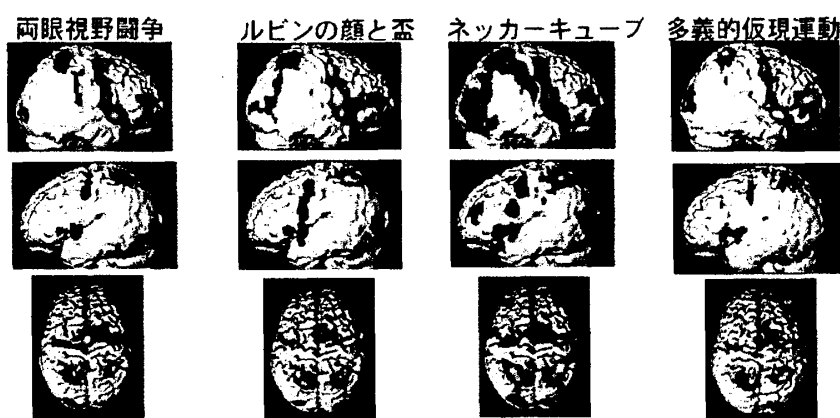


図4 自発的切替りと 관련된賦活部位(同一被験者)

§ 3 隠し絵知覚速度と脳の認知的温度

知覚闘争は、同じ刺激を見たときに2つの異なる「見え」が意識上で自発的に交替する現象であるが、意識される「見え」が無意味な状態から意味のある状態へと遷移する現象も知られている。図5に示すような隠し絵は、ある対象の画像を二値化してわかりにくくしたものである。色や詳細な構造の情報が大量に失われるため、コンピュータの画像認識にとっては困難な課題となる。ところが、人間は数秒から数分の観察によって正解を見つけることができる。この現象は、ボトムアップ処理だけでは解答に到達できないため、対象に関する「仮説」を用いてトップダウン的に画像を解釈するプロセスであると考えられている [8, 9]。しかし、「隠れた対象がわかる前に、いかにしてその対象の適切な「仮説」を作れるのか」という循環論法的な問題が生じる。

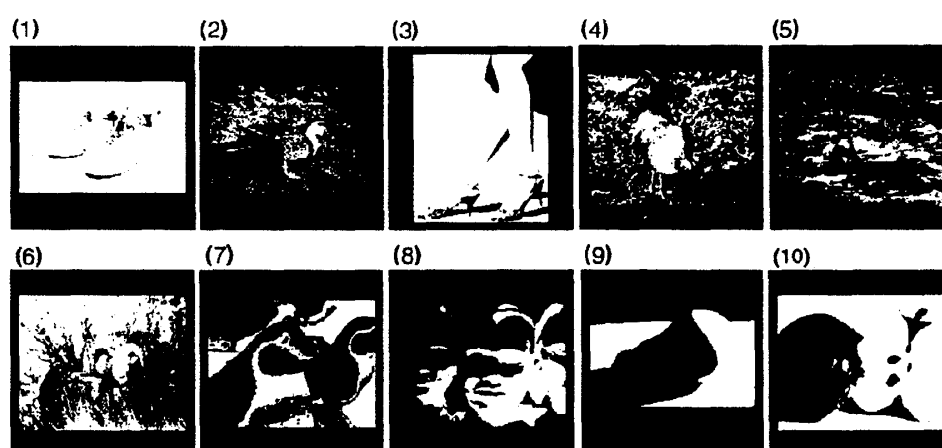


図5: 実験で使った隠し絵の例。

本研究では、知覚的循環問題の解決のてがかりを見出すことを目指し、隠し絵の知覚所要時間の定量的関係を調べた。すべてオリジナルに作成した隠し絵を使用することにより、被験者の事前知識を

除いた。実験の結果、隠し絵と被験者はそれぞれ固有の「難度」と「能力スコア」が定義できること、そしてこの2つのパラメータによって平均知覚所要時間が決まるが、その関係式は化学反応のアレニウスの式と同形になることがわかった。化学反応との相同性から、隠し絵知覚ではランダムな神経活動が重要な役割を果たしており、対象の知覚を担う神経セルアセンブリのランダム活動が一定水準を超えると「仮説」として機能する、と仮定すると実験式を導出できることがわかった。この理論によると、個人の能力スコアはランダムな神経活動の平均的度合いを反映し、個人の脳(視覚系)の「認知的温度」を実験的に定義する方法を提供できる。

被験者は健常視覚を有する大学生・院生計91名(21.6±1.7歳、女性33名)で、謝金を支給した。カラー画像素材を適当な閾値設定で二値化することにより、隠し絵90枚を作成した。実験は防音暗室内で行い、刺激はパソコンによりモニタ上に提示した(視角(長辺)10度、白輝度40cd/m²)。刺激提示後、被験者は何か意味のある対象が見えたと思ったら所定のキーをすばやく押し、この反応時間を記録した。キー押しの瞬間に刺激は消えてしまうが、それから口頭で何が見えたのかを実験者に報告した。正解のときは次の刺激へ進むが、正解でなければ再度同じ隠し絵を提示して観察を続けた。正解するまでの提示時間は合計30秒を上限時間とし、オーバーしたときは正解しなくても次の刺激へ進んだ。隠し絵に描かれた対象は、動植物、乗り物、建物、風景、人間などであり、その固有名詞(例:キリン)がわからなくても、報告の内容が一致していれば正解とした(例:首が長いアフリカ草原にいる動物)。隠し絵の実験終了後、そのカラー原画像(計90枚)について隠し絵と同様の実験を行った。

隠し絵化したことによる知覚所要時間の増加を調べるため、隠し絵の反応時間からカラー原図の反応時間を引き算し、これを探索時間(search time) t と呼ぶ。各隠し絵について被験者91名から得られた探索時間の対数 $\log t$ の累積度数分布は、正規分布によくフィットすることがわかった(図6a)。また、90枚の隠し絵の正規分布の平均と分散は、1次関係式に従うことがわかった(図6b)。これらから、隠し絵探索時間(対数)の分布は平均値という1つのパラメータのみで決まることになり、平均値により隠し絵の難度 m を定義することができた。

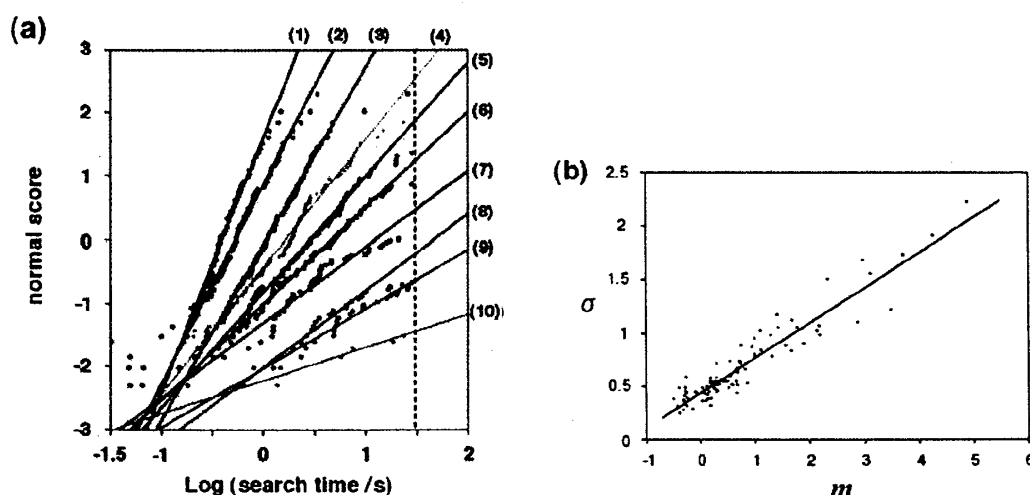


図6: (a) 対数探索時間の正規確率プロット(図5と共通な10枚の隠し絵の例)。決定係数 $r^2 = 0.97$ (平均)。 (b) 90枚の隠し絵の平均 m と標準偏差 σ ($\sigma = Am + B$; $A = 0.328$, $B = 0.439$; $r^2 = 0.89$)。

各被験者の成績を、隠し絵の正規分布における正規スコア (z スコア) によって評価した。

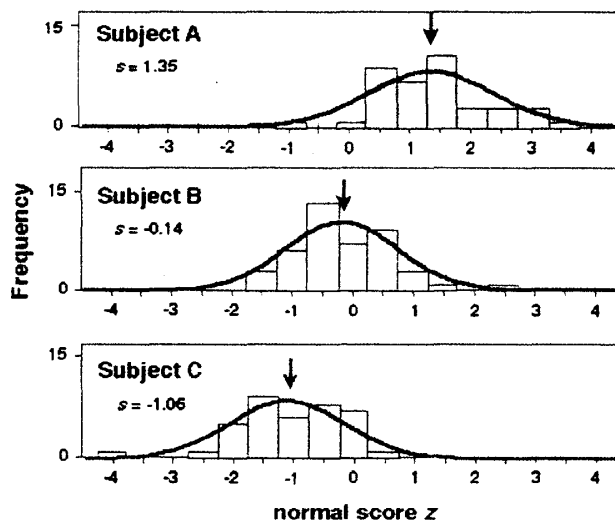


図7: 被験者3名の z スコア分布。矢印は平均(能力スコア) s を示す。

図7に示すように、各被験者における z スコアの分布はほぼ正規分布し、その平均値 (s と表記) は個人間で有意な差が認められた $p < 10^{-5}$ 。 s のまわりの z スコアの分布は偶然変動によると思われ、試行ごとに用いた隠し絵の難度 m との相関は低かった ($cc = 0.09$ (平均))。したがって、この s 値によって、その被験者の隠し絵知覚能力を定義できる。

以上の結果から、隠し絵探索時間 $\log t$ の平均値、隠し絵の難度 m 、個人の能力 s の間には次のような関係式が成り立つことがわかった:

$$s = -\frac{\log t - m}{\sigma} = -\frac{\log t - m}{Am + B} \quad (1)$$

ここで (2) の変数変換を施すと、隠し絵知覚速度の式 (3) が得られる:

$$M = \left(m + \frac{B}{A} \right) \times \ln 10, \quad S = \frac{1}{1 - As} \quad (2)$$

$$t^{-1} = C \exp\left(-\frac{M}{S}\right) \quad (3)$$

式(3)は化学反応速度論の有名なアレニウスの式 [10] と同形であり、その活性化エネルギー(エネルギー障壁) ΔE および絶対温度 kT に対して、難度 M および能力 S が対応している。

一般に化学反応では、反応分子のランダム運動によって分子間でエネルギーが分配される結果、 ΔE を超えるエネルギーをもつ分子の割合がアレニウスの式の指数部分で与えられる。この相同性に

に基づき、隠し絵知覚の仕組みを以下のように仮定してみる：高次視覚皮質における特定の神経セルアセンブリ（細胞集団）の賦活が、ある対象の知覚に対応するものとする。セルアセンブリは自発的でランダムな神経活動を含むが、それのみではどのセルアセンブリも賦活化できない。しかしボトムアップ的に引き起こされた神経活動とマッチすれば賦活のための閾値を超えることができるものとする。与えられる情報が劣化しているほど、要求される閾値も高くなる。これらの仮定の結果、ランダム活動のレベルがこの閾値に達する確率としてアレニウス型の速度式を導出できる。このスキームでは、自発的活動度の平均は能力スコア S で表現されるが、アレニウス式の絶対温度に対応するため、 S は個人の脳（視覚系）の認知的温度 (cognitive temperature) と見なすことができる。この研究により、知覚におけるトップダウン効果の源泉が、脳の自発的活動である可能性が示された。

§ 4 まとめ

知覚闘争と隠し絵知覚の研究から、知覚的コンテンツが意識にのぼる過程では、脳の確率的な仕組みが重要な役割を果たしていることが示された。また、fMRI 実験の結果から、脳の広域的ネットワークが関与している可能性が示された。脳は本来は膨大な自由度を有するシステムであるが、その確率的な挙動を柔軟で創造的な特性を発揮するために活かしている可能性が考えられる。しかしその確率的なゆらぎ活動をそのまま意識化すると認識は不安定となり、自然界での生存にはかえって有害となるかもしれない。そのため、意識にのぼらせるコンテンツは自由度を低減させて（状態を離散化することに対応）ある程度の時間的安定性を持たせているのかもしれない。意識を理解するためには、脳ネットワークにおけるシステム論的、状態論的な観点が必要になると思われる。

参考文献

- [1] N.K.Logothetis, "Single units and conscious vision", *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* **353**, pp.1801–1818, 1998.
- [2] E.D.Lumer, K.J.Friston and G. Rees, "Neural correlates of perceptual rivalry in the human brain", *Science* **280**, pp.1930–1934, 1998.
- [3] R.Blake and N.K.Logothetis, "Visual competition", *Nat Rev Neurosci* **3**, pp.13–23, 2002.
- [4] W.J.M.Levelt, "Note on the distribution of dominance times in binocular rivalry", *Br J Psychol* **58**, pp.143–145, 1967.
- [5] T.Murata, N.Matsui, S.Miyauchi, Y.Kakita, T.Yanagida, "Discrete stochastic process underlying perceptual rivalry", *NeuroReport* **14**, 1347–1352, 2003.
- [6] 村田 勉, 柳田敏雄, "視覚的意識のゆらぎの背後にある脳の量子的状態と確率ダイナミクス", 日本神経回路学会誌 **8**, pp.139–146, 2001.

- [7] H.C.Tanabe, T.Murata, T.Holroyd, S.Hayashi, S.Miyauchi, T.Yanagida, "Covariation of activity in multiple cortical areas associated with perceptual rivalry as revealed by fMRI", Society for Neuroscience 32nd Annual Meeting Abstracts, 2002.
- [8] S. Ullman, "High Level Vision" (MIT Press, Cambridge), 1996.
- [9] R. J. Dolan et al. "How the brain learns to see objects and faces in an impoverished context." Nature **389**: 596–599, 1997.
- [10] P. Atkins and J. de Paula, "Physical Chemistry (7th ed)" (Freeman, New York), 2001.
- [11] T. Murata, T. Hamada, T. Yanagida, "Random neural activation in hidden figure perception." Society for Neuroscience: Abstract, No.16.3, 2005.
- [12] T. Murata et al. "Arrhenius-type kinetics of emergent perception: random basis of top-down effect. " (再投稿準備中).