

立石賞特別賞の受賞記念講演概要

潜在脳機能

カリフォルニア工科大学 生物・生物工学部／計算神経系 教授 下 條 信 輔

潜在脳機能とは？

ヒト脳の情報処理の「圧倒的大部分」は、本人も言語的に報告できない無意識・無自覚な処理であると考えられる。潜在脳機能というのは、まさしくこうした無意識・無自覚の処理過程を指す（JST.ERATO 下條潜在脳機能プロジェクト, 2004-2009）。

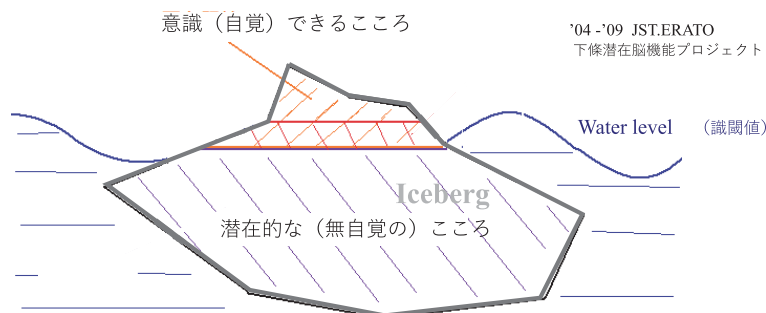
この「圧倒的大部分」とはどれほどなのか、逆に自覚・意識できる「氷山の一角」は何 % ぐらいなのか、それを数値化するのは難しい。が、個々のニューロン（神経細胞）の単位時間毎の情報処理容量、平均シナプス（神経接合）数、脳全体でのニューロンの総数などから、推定することはできる（図1）。

もともと心理学は、こころの科学と呼ばれる。現代社会に固有の精神疾患への対応や、「意識を持つ AI」などが真剣に議論される現在、モノと異なるこころの働きの深い理解は、時代の喫緊の要請となった。ところがいくつかの理由で、心理学や（その現代版である）認知神経科学は、その要請に応えそびれている。特に 19

世紀物理学をモデルとする客観科学を志した実験心理学は、こころの主観的な側面をことさらに切り捨ててしまった。一方でこころの主観的経験を依然として探求の焦点としつつ、他方で最新の科学的な方法論を適用するなどという芸当が、可能だろうか。



この困難なふたつの要請を同時に満たす方策として、「潜在脳機能」に的を絞った研究戦略を考えることができる。一方で、知覚や行動など多くの自覚的な経験は、それに先立つ「潜在的な」過程によってもたらされる。したがってこうした潜在過程を解明することで、主観的な経験の部分への理解が深まるとともに、調節（たとえば治療など）の方途も見えてくる。他方で、潜在過程は客観的な行動指標や神経機構からアプローチする以外にないので、既存の（客観的で可視的な）方法論との相性がいい。



* ひとりの人間の脳には、約1-2千億個のニューロン。それぞれが1-10千のシナプス結合を持つ ($10^{11} \times 10^{3-4} = 10^{14-15}$) → 合計で百~千兆個のシナプス。

* 自覚できる（意識的な）心の機能は、無自覚的な情報処理に支えられている。

図1 潜在脳機能は「氷山の一角」

本稿では以下、筆者自身の研究経歴から事例を拾いつつ、潜在脳機能への学際的なアプローチの方法論と成果を垣間見ていくこととする。

三つのアプローチ

1) 視覚・多感覚の心理物理学

見る、聞くなどヒトの主観的な知覚経験は、それに先立つ潜在的な神経過程によってもたらされる。そこで、この潜在過程に外から操作を加え結果である知覚経験を見ることが、心理物理学 (Psychophysics) の主流の方法とされてきた。ただし終始明確な主観経験を伴わない感覚過程の存在が名指されることも、稀にある。たとえば動物界では 200 種以上で磁気感覚の存在が示されているが、ヒトについては過去に報告があるものの結果が再現できず、疑わしいとされてきた。これに対し筆者を含むカルテックのチームは、課題なしの受動的な状況で、ヒト脳に (実際に日常生活でも起き得る) 磁場の回転を与え、EEG (脳波) を計測し、 α ERD (アルファ波の事象関連非同期) を見出した (Wang, *et al.*, 2019, 図 2)。この α ERD というのは、視覚・聴覚・触覚などで「感覚的検出とそれに向けての注意シフト」の神経学的指標とされる。

またこれまでヒトの感覚知覚研究はひとつの

感覚モダリティに集中し、少数の多感覚 (マルチモダル) 統合の研究も、「ヒトは視覚優位の動物」という前提に立ってそれを再確認するものがほとんどだった。筆者らは「二重フラッシュ (double flash, or illusory flash) 効果」と名付けたイリュージョンを報告し、この前提に反論した (Shams, *et al.*, 2000, 図 3)。またこの効果を網膜疾患による視覚障害者への検査ツールとして適用し、網膜部位毎に選択的な多感覚可塑性を示した (Chan, *et al.*, 2024)。この他最近では、視野の「超周辺視 (X'periphery)」の研究でも、成果を挙げつつある (Shimojo, 2024)。

2) ヒト脳の非侵襲調節

神経科学の動物実験分野とヒト認知神経科学の間には、大きな越えがたい溝があり、これが進歩を妨げている。その原因は主に方法論的なもので、動物実験では侵襲的方法が認められているのに対し、ヒト実験では (てんかん患者の脳深部刺激などごく一部の例外を除き) 認められていない。そこで、健常覚醒状態のヒト脳で、神経機能を刺激、または調節できるかが、有力な方法論的チャレンジとなる。

その一例として筆者らは、視覚情報をカメラから聴覚情報に変換する感覚代行 (Sensory Substitution) 装置を用いて (図 4)、健常者や

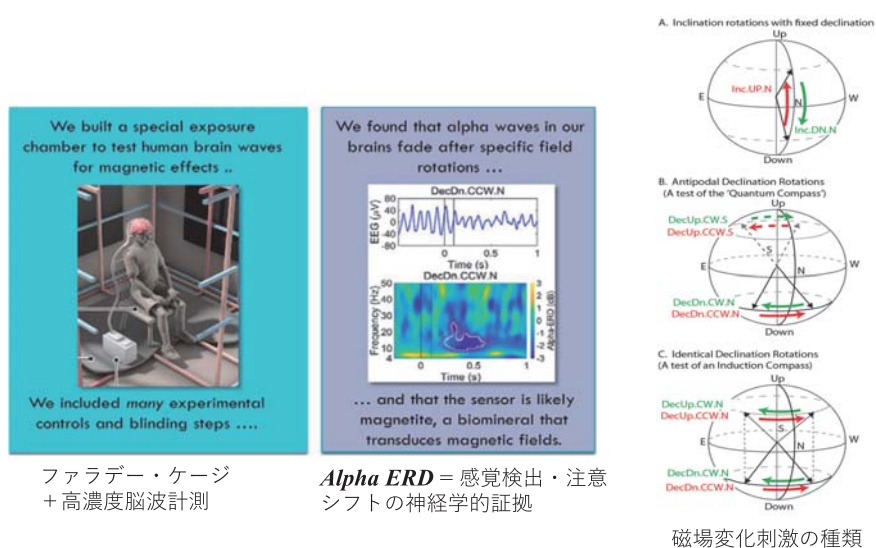
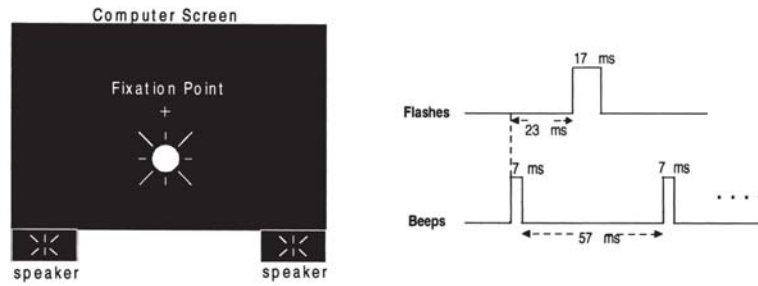


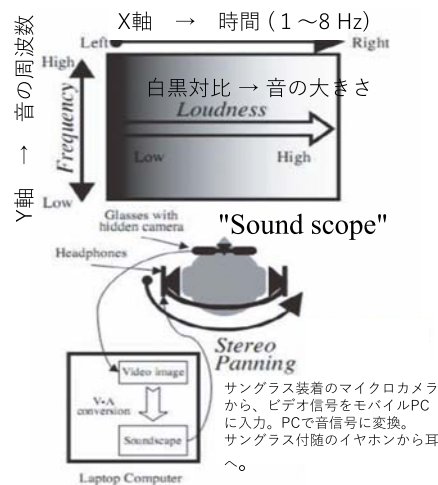
図 2 ヒト潜在磁気感覚 (脳の磁気変化応答)



視聴覚刺激（左）と、時間パラメータ（右）の例。単発の視覚刺激（フラッシュ）に二つの音を伴わせると、ダブルフラッシュの知覚が生じる。

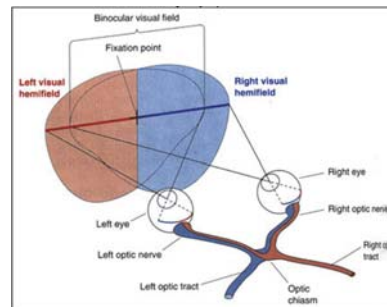
図3 多重フラッシュ・イリュージョン

vOICE (Peter Meijer, 1990s)



視覚皮質への視野投射

(トポグラフィカル・マッピング)



→感覚代行訓練により、聴覚入力でもこの視覚投射に従う機能マップが得られるか？（覚神経可塑性の証拠）

図4 感覚代行

後天盲人を訓練し、(1) 形の恒常性の成立 (Stiles & Shimojo, 2015a), (2) テクスチャ (きめ) 模様の知覚がメタ (超) モデルに容易で、訓練を要しないこと (Stiles & Shimojo, 2015b), (3) 感覚神経可塑性の (患者間) 多様性などを示した。これらの結果は訓練後の知覚が聴覚でも視覚でもない、いわば「第三のクオリア (= 感覚経験の絶対的な質)」であることを示唆する。この例のように、ヒト本来の豊かな神経可塑性をテクノロジーで補完する方向が、非侵襲的調節の観点からも有効である。

また脳磁気直接刺激 (Transcranial Magnetic Stimulation) を用いた研究では、後頭視覚皮質への単発刺激で「人工盲点 (スコトーマ)」を (Kamitani & Shimojo, 1999, 図5右下), 双発刺激で直前に瞬間提示した視覚像の「再現

(リプレイ)」などを (Liao, *et al.*, 2013, 同左下) 示した。これらは、「脳-こころ関係」そのものの客観的で計量的な現象学の可能性を示す。

この他、脳直流電気刺激 (Transcranial Direct Current Stimulation) で、前頭部から皮質下深部の報酬系 (腹側中脳) を活性化したり (Chib, *et al.*, 2013), fMRI 信号に基づくニューロフィードバックで運動皮質の活動と刺激反応時間を調節することにも、成功している (Bray, *et al.*, 2007)。

3) 意思決定・報酬系・社会脳

高次認知機能の神経科学では、一方で「意思決定」の神経機構を理解することが大きな潮流となっている。他方では「社会脳」すなわち社会行動の神経学的理解がトレンドとなっている。これらの結節する地点で筆者らは、顔を自由観

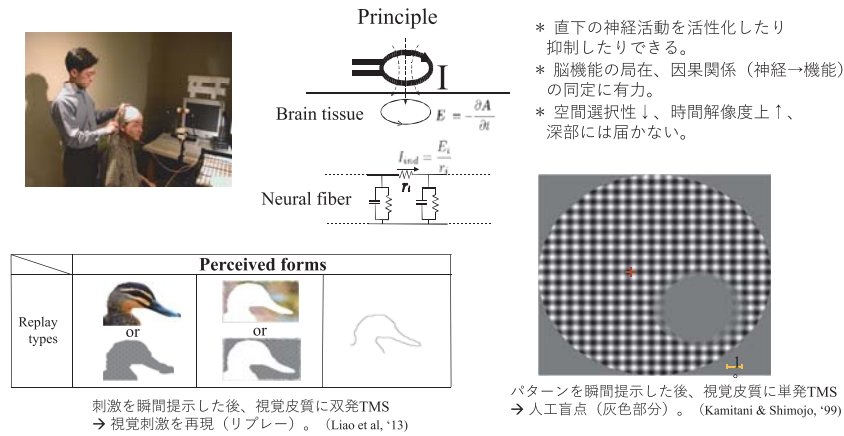


図5 脳磁気刺激 (TMS)

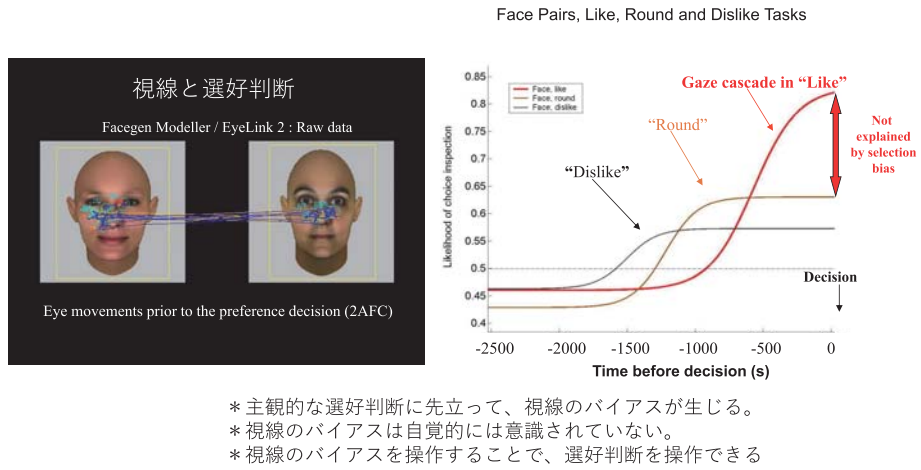


図6 視線のカスケード効果

A. 身体運動の「潜在的な」同期と、 B. ゲームにおけるチームフロー C. 脳間の同期

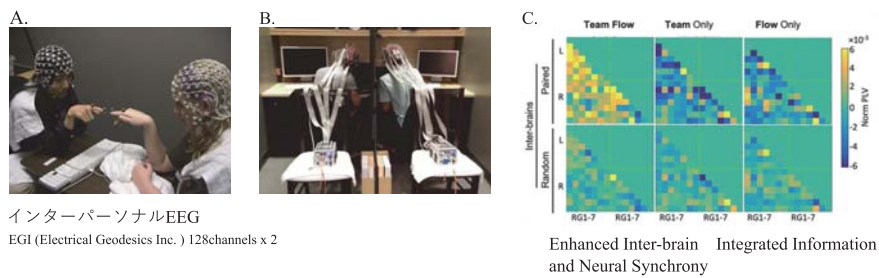


図7 身体、脳、同期と、チームフロー

察し選好判断する課題で、「視線のカスケード効果」を示した (Shimojo, *et al.*, 2003, 図6)。視線のカスケード効果とは、判断者が「こちらの顔がより魅力的」と自覚的に判断する以前に、視線が選ぶ方に偏る現象を指す。また逆に視線を操作することで、選好判断にある程度バイアスをかけることができる。さらに同じパラダイ

ムを視線ではなく瞳孔反応にも適用し、同様の「瞳孔のカスケード効果」を示した (Liao & Shimojo, 2020)。「人は好きだから見るのか、見るから好きになるのか?」という問いに対して、「その双方」とまとめることができる。

また筆者らは早くから身体と脳活動の同期、またそれのもたらす心理効果に着目してきた

(Yun, *et al.*, 2012; 図 7A)。その延長で、スポーツやゲーム、マーケティングなど実社会でも注目を集めている「フロー（ゾーン）」に、意識の変性状態という観点から関心を持った。特にソロフローと峻別されるチームフローについて、その信頼できる客観的（＝行動的・神経学的）指標を開発するとともに、神経機構を同定した（Shehata, *et al.*, 2018, 図 7B, C）。とりわけチームフローにおいても、ふたりのプレーヤーの脳活動の間に、部分的な同期が生じていることを見出した。この事例も、1) 主観をいかにして客観的に研究するか、2) 意識の顕在的な過程に、潜在的な過程からいかにアプローチできるか、という筆者ら元来のモチベーションを、一応満足させたと考えている。

今後への期待～「逆応用科学」の視点から

私たちは今や、同時代的にパンデミックを目撃し、戦争を目の当たりにし、AIによる大きな変化に巻き込まれようとしている。今こそ逆に人間の、とりわけ人間のこころの深く多角的な理解が求められているが、心理学、認知神経科学をはじめとする人間諸科学はとかく象牙の塔にこもりがちに見える。急速に変化する社会からの要請に応えきれていない。そうした中で、筆者は基礎科学とも応用科学とも異なる「逆応用科学（Inverse Translational Sciences）」を提唱してきた（下條, 2019）。

これまで科学と世の中の関係は、基礎科学→応用科学という形で理解されてきた。たとえば癌の生物学の「基礎」知見が、やがて患者の治療に「応用」されるというのは、その好例といえる。これに対して「逆応用科学」では、問題意識を（先行論文ではなく）実社会の人間のニーズから採る。が、研究はあくまで研究室で基礎科学の方法で行われる。そしてそのアウトプットは（すでにわかりやすい入口を逆に辿って）応用され実社会に返される。すなわち、実社会のニーズ→基礎科学→（応用科学→）実社会、といった流れとなる。

科学の専門性を支える社会制度、高等教育をはじめとする教育システム、医療や工学応用などを実社会へと還元する機構などが、すべてこの逆応用科学を念頭に組み替えられなくてはならない。今回の授賞がささやかでも、その力となれば喜ばしい。

〔引用文献〕

- Bray, S., Shimojo, S. and O'Doherty, J. Direct instrumental conditioning of neural activity using fMRI derived reward feedback, *Journal of Neuroscience*, 27 (28): 7498-7507, 2007.
- Chan, A, et al, Vision Without Photoreceptors: Cross-modal Perception Within the Blind Spots. Vision Sciences Society Annual Meeting, St. Pete Beach, Florida, May 2004.
- Chib, V. S., Yun, K., Takahashi, H., Shimojo, S. Noninvasive Remote Activation of the Ventral Mid-brain by Transcranial Direct Current Stimulation of Prefrontal Cortex. *Translational Psychiatry*, 3, e268, 1-9.
doi: 10.1038/tp.2013.44, 2013.
- JSTERATO 下條潜在脳機能プロジェクト
https://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/sib_PJ.html
- Kamitani, Y. and Shimojo, S. Manifestation of scotomas created by transcranial magnetic stimulation of human visual cortex. *Nature Neuroscience*, 2, 767-771, 1999.
doi: 10.1038/11245
- Liao, H-I, Wu, D-A, Halelamien, N. & Shimojo, S. Cortical stimulation consolidates and reactivates visual experience: Neural plasticity from magnetic entrainment of visual activity. *Sci. Reports*, 3: 2228.
doi: 10.1038/srep02228, 2013.
- Liao, Hsin-I, Kashino, M., and Shimojo, S. Transient pupil constriction reflects and affects facial attractiveness, *under review. Journal of Cognitive Neuroscience*.
doi: 10.1101/2020.04.02.021436, 2020.
- Shams, L., Kamitani, Y. and Shimojo, S. What you see is what you hear. *Nature*, 408, 788, 2000.
- Shehata, M., Cheng, M., Leung, A., Tsuchiya, N., Wu, D-A, Tseng, C., Nakauchi, S. and Shimojo, S. Team flow is a unique brain state associated with enhanced information integration and neural synchrony. *eNeuro*, v8 (5).
doi: 10.1523/ENEURO.0133-21.2021. PMID: 3460780

4. 2021.
- Shimojo, S., Simion, C., Shimojo, E., et al. Gaze bias both reflects and influences preference. *Nature Neuroscience*, 6, 1317–1322, 2003.
- Shimojo, S. *X' (extreme) Periphery* - Where the brain needs help. The 16th Asian Pacific Conference on Vision, Keynote, Nat. Univ. Singapore, Singapore, July 10–12, 2024.
- 下條信輔. 潜在認知の次元. 有斐閣, 2019.
- Stiles, N.R.B., Zheng, Y. and Shimojo, S. Length and orientation constancy learning in 2-dimensions with auditory sensory substitution: the importance of self-initiated movement. *Front. Psychol.* 6: 842. doi: 10.3389/fpsyg.2015.00842, 2015a.
- Stiles, N.R.B. and Shimojo, S. Auditory sensory substitution is intuitive and automatic with texture stimuli. *Scientific Reports*, 5: 15628. DOI: 10.1038/srep15628. 2015b.
- Stiles, N. R. B. and Shimojo, S. Sensory Substitution and a Third Kind of “Qualia.” In Johan Wagemans (ed.), *The Oxford Handbook of Perceptual Organization*, Chap. 43, Oxford University Press, 2014. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199686858.01.0001>
- Wang, C., Hilburn, I., Wu, D-A., Mizuhara, Y., Cousté, C., Abrahams, J., Bernstein, S., Matani, A., Shimojo, S. and Kirschvink, J. Transduction of the geomagnetic field as evidenced from Alpha- band activity in the human brain. *eNEURO*, 2019 (#eN-NWR-0483-18), 2019. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0483-18.2019>
- Yun, K., Watanabe, K., & Shimojo, S. Interpersonal body and neural synchronization as a marker of implicit social interaction. *Sci. Reports*, 2, 959, 1–8. doi: 10.1038/srep009592012, 2012.