

## ERATO 下條潜在脳機能プロジェクト事後評価報告書

【研究総括】 下條 信輔 (カリフォルニア工科大学／教授)

【評価委員】 (あいうえお順)

北澤 茂 (委員長：順天堂大学医学部／教授)

瀬川 茂子 (朝日新聞社／記者)

友永 雅己 (京都大学霊長類研究所／准教授)

藤田 一郎 (大阪大学大学院生命機能研究科／教授)

室伏 きみ子 (お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科／教授)

### 評価の概要

ERATO 下條潜在脳機能プロジェクトは、行動や心理過程の背景にある無意識過程の脳機能（潜在脳機能）を認知神経科学的観点から理解することを目指すものである。下條総括の衝撃的な提案「好きなものを選ぶといった意思決定が必ずしも自分の意思によるものだけではなく、脳の中で無意識に決定されたものを自分の意思決定である」と思いこんでいる場合がある一を実証・解明していく。潜在脳機能をより深く知ることは、「感性」すなわち心と脳のもっとも未解明な謎の理解に繋がると共に、人の持つ驚くべき潜在認知能力を引き出す鍵を与えることになるであろう。それゆえ潜在脳機能は今まで重要と知られながらも、方法論の欠如などにより研究が進まなかった分野であった。そこで本構想では近年急速に発展した最新の脳機能イメージング法、計測手法を駆使し、さらに心理物理、行動、脳生理、薬理、情報工学の幅広い分野から多くの優秀な若手研究者を効果的に結集することで、潜在脳機能の解明という脳科学研究のブレークスルーを狙う、きわめて挑戦的なプロジェクトである。

本プロジェクトは5年の研究期間で、開始後にゼロから出発した研究テーマも含め、多くのテーマにおいて成果をあげた。概念であった潜在脳機能について、その実体が明らかになりつつある。これらの成果は、今後より整理した形で情報発信していくことにより、現代の人間観を刷新できるほどのインパクトがあると評価される。

研究体制に関しては、異分野の研究者間のコミュニケーションを促すことに尽力し、おおむね成功した様に見える。講演会、シンポジウムなどの企画実施では、プロジェクト全体の求心力を高める工夫を行い、プロジェクト内外での自由闊達な議論の場を構築できた。非常に多岐にわたる研究の中で、異なるグループから自発的に共同研究が多く生まれてきたことは高く評価される。一方で主体的にグループ間の連携を行えばさらに大きな成果を得られたような印象も受けた。

このように新しい研究領域の立ち上げに始まり、異分野の研究者の集結、そしてそれらが分野融合的な成果の創出へとつながるなど、総合的に今後の発展に期待がもてるものであった。本プロジェクトは戦略目標「教育における課題を踏まえた、人の生涯に亘る学習メカニズムの脳科学等による解明」に資する良好な成果をあげたと評価する。

## 1. 研究プロジェクトの設定および運営

### 1-1. プロジェクトの全体構想

ERATO 下條潜在脳機能プロジェクトは、下條信輔博士（カリフォルニア工科大学教授）を研究総括として、潜在的あるいは無意識下における脳機能を認知神経科学的観点から理解することを目指して、2004年10月に発足した。戦略目標「教育における課題を踏まえた、人の生涯に亘る学習メカニズムの脳科学等による解明」にかなうプロジェクトである。

下條研究総括は、人の意識に上らない潜在的な神経情報処理の重要性を見抜き、「意識しなくても働く脳機能」が意識レベルでの選好などの情動的判断の基礎になっている、という革新的な作業仮説を提案した。本研究プロジェクトは下條研究総括の独創的な作業仮説を検証して潜在脳機能の実態を明らかにすることを目的としたプロジェクトであり、その目的においてすでに独創的かつ挑戦的なプロジェクトであった。

その目的を達成するために、心理物理学と行動計測、脳機能計測、動物電気生理、ニューロフィードバック、BMI、動物神経薬理、情報工学、等の幅広い方法論を組み合わせた学際的なアプローチを採用した。これらの諸分野から、多くの優秀な若手研究者の力を結集した研究チームを組織して、有機的な相互作用を通じて潜在脳機能の実態を明らかにすることを構想した。その意味で本プロジェクトの構想は創造的かつ融合的であった。

本プロジェクトにおいて特徴的なのは、現実問題を研究の対象にする手法である。感性や情動に基づく意思や好みの決定という現実の世界で重要なテーマに対して、既存の基礎研究の成果を応用しようとするのがいわゆる **translational research** である。しかし通常は、基礎研究の設定が現実世界の問題を十分に反映しない例が多く、成功例は少ない。対照的に、本プロジェクトでは、現実問題から基礎研究へアプローチする **inverse translational research** を指向した。すなわち、現実の世界で生々しく行われている感性や情動に基づく意思や好みの決定の中から、最も重要かつ面白いと思われる局面を切り出し、その風味を失わないまま研究の対象にする、通常とは逆の方向に研究を展開した。この姿勢は本研究の独創性、創造性の源となっており、高く評価される点である。

以上に述べた様に、本プロジェクトは実社会への応用を見据えた上で、潜在脳機能の実態を、心理学、工学、薬理学、脳機能イメージングなどの方法を多角的かつ有機的に組み合わせることにより解明しようとすることを構想しており、ERATO で推進するに相応しい、独創的かつ壮大な構想であったと評価できる。

### 1-2. プロジェクトの枠組みや研究体制、および研究活動の状況

プロジェクトの全体構想は、意思決定研究グループ・潜在聴覚処理研究グループ・潜在感覚運動研究グループ・嗜癖行動研究グループの4つのグループにより推進された。これらの研究体制のうち、意思決定グループはカリフォルニア工科大学および東京大学先端科学技術研究センターに、残る3つのグループは、NTT 厚木研究開発センターに構築された。研究総括はアメリカを拠点としたが、日本と米国を頻繁に往復する、また遠隔会議を積極的に行うなどの努力により、研究拠点が離れているという物理的に不利な状況の解消に務めた。総括のこの類まれなリーダーシップの下、専門を

異にする意欲的な中堅・若手研究者が集結し、自由でインタラクティブな環境づくりに成功した。研究プロジェクトの設定および運営に関しては、的確かつ効果的なものであったと十分に評価される。

潜在脳機能という研究手法の確立されていない独自のテーマに取り組むことは挑戦的であったが、的確な問題設定を行うことに成功し、複数のテーマで興味深い成果が得られた。また、多岐に亘る研究テーマを同時に推進したことで、相互作用の中から新たなテーマも見えてきた。ゼロから立ち上げたテーマにおいても興味深いデータが得られるなど、当初の目的通り研究は良好に進捗し、今後は成果のさらなる発展が期待される。また、成果の発展とともに、広報活動も今後の重要な課題となるであろう。

〔研究プロジェクトの設定および運営〕 a (的確かつ効果的であった)

〔研究活動の状況〕 a (良好な研究展開を示した)

## 2. 研究成果

### 2-1. 意思決定研究グループ

本グループでは、視線追跡や瞳孔径計測などの心理物理学的な実験手法、及びfMRI、MEG、EEG等による脳活動データ測定手法、動物神経生理学的手法などを複合的に用いることにより、潜在的認知過程の脳のメカニズムの理解を目指した。

下條総括は『サブリミナルマインド』等の著書の中で「人間の意思決定が、新奇性や親近性のような比較的単純な事柄で左右され、時間的には意思決定の後で選好の理由付けが行われる場合があるだろう」と提唱してきた。本グループの研究では、この洞察を裏付ける多くの事例を見出すと共に、意思決定後に選好理由の後付けをする事を示す証拠を得た。選好の自覚的決定以前に行われている潜在脳の働きについては、新奇性／親近性という一見相反する2つの要素が、相互排他的ではなく相補的にかかわっているという証拠を得ると共に、プレディクティブ（予測的）／ポストディクティブ（理由の後付け）という2つの過程も相補的に関わることを明らかにした。

新奇性と親近性が人の選好判断に与える影響は特に興味深い。人の顔は見れば見るほど好きになる（親近性が優位）。一方、山などの風景は見れば見るほど好感度が低下する（新奇性が優位）。この結果は、提示する対象に応じて選好基準が変わる可能性を示唆している。対象物にかかわらず、初めは親近性が好まれ、やがて馴化して新奇性選好に転じるとする排他的な予測とは大きく異なる。

テレビコマーシャルを題材とした選好の調査を行った結果、新奇性／親近性という一見相反する2つの要素は、実は相互排他的ではなく独立して選好結果に影響を与えするという結果が得られ、排他予測が成立しないことが改めて示された。

また、提示コンテンツを「ウエディングドレス」という男性・女性で興味の程度が分かると考えられる視覚刺激を用いて調査を行ったところ、その興味の程度からポストディクティブなスキームによる意思決定（対象に興味を持つ被験者は刺激入力直後に選好が行われ、その後理由付けがなされる）と、プレディクティブなスキームによる意思決定（対象に興味がない被験者は刺激を強く受けた方を選好する）という2つの意思決定過程が観察された。これらは潜在脳機能の多様性、複雑性を象徴する結果である。

また、tDCS（経頭蓋直流電気刺激法）による足指の握力上昇という現象を見出した。効果が一過性であること、作用機序に不明な点も多いことから臨床応用に関しては萌芽的段階ではあるが、神経障害や加齢に伴う運動・認知機能低下の回復など、実社会への応用が期待できる。

潜在脳機能の基本的な2軸（新奇性／親近性、プレディクティブ／ポストディクティブ）の発見に加え、多岐にわたるテーマについて、本プロジェクト期間中に萌芽的な成果を得ることが出来た。実験手法の確立に至っていないテーマに対しても果敢に挑戦し、学術的にも社会的にも大きなインパクトを生み出したことは極めて高く評価できる。

## 2-2. 潜在聴覚処理研究グループ

聴覚情報は情動に密接に関連しており、視覚と同様に社会的な認知や行動の礎となっている。本グループでは、音声コミュニケーションや音楽などの聴覚情報の処理時における潜在的な脳情報処理のメカニズムを解明すべく、大きく分けて3つの研究テーマを推進した。

- (1) 聴覚における知覚意識形成メカニズムの解明
- (2) 音に対する選好形成メカニズムの解明
- (3) 音声コミュニケーションにおける共感メカニズムの解明

### (1) 聴覚における知覚意識形成メカニズムの解明

知覚意識の形成メカニズムを解明するために、感覚器に与えられる刺激の物理特性と、意識にのぼる知覚内容とを乖離させる実験パラダイム、具体的には音脈分凝に着目し、新しい知見を得た。音脈分凝においては、高低2種類の音を交互に発生させる（LHL\_LHL\_...；\_は無音区間を表す）ことにより、被験者には一連の交互の音（LHL\_LHL\_...）として認識したり、高低2種類の音（L\_L\_L\_L\_...とH\_\_H\_\_...）として認識したりするという、同じ音列を違った認識でとらえる現象の解明を目指した。この二つの知覚認識が長時間の刺激によって、前者と後者で認識の遷移が起こること、そしてその遷移時には視覚野もしくは視床が活動することを解明した。また、遺伝子多型解析の結果、ドーパミン関連酵素の発現パターンとこの知覚遷移の頻度が相関することも明らかにした。

### (2) 音に対する選好形成メカニズムの解明

音に対する選好形成メカニズムに関して予測符号化の観点からアプローチした。親近性と新奇性をそれぞれ事象の生起確率  $P$  と  $-\log P$  で表し、その積  $-P \log P$  が魅力度と相関を持つ、すなわち選好基準を定量化しているというモデル化は興味深い。意思決定グループが明らかにした親近性と新奇性という二項を統合するモデルとして注目される。この作業仮説は情報理論に登場する情報量そのものが選好を表すというモデルであり、機械的な尺度としての情報量に生物学的な意義を与える画期的なものである。

### (3) 音声コミュニケーションにおける共感メカニズムの解明

音声コミュニケーションにおける音の韻律や声質、さらに身振りが感情を伝達する仕組みについては、「感情の運動理論」（聴取者は、自分が感情を声に変換するときの音声器官の運動モデルを逆に用いることによって、聴取した声からそこに込められ

た他人の感情を解釈するとする考え方)を提唱し、実験による検証を進めた。

例えば音声をリアルタイムで変調し、発声者にフィードバックさせることにより自己の感情認知に影響を与えようとする研究テーマは、本グループと意思決定グループのもつ異なる背景や能力がうまく融合された興味深いものである。音声のリアルタイム変調により発声者に対して **negative** な情動を誘導することに成功した。

また、自閉症スペクトラム症候群の幼児は、定型発達の幼児に比べ、対面での単純な手遊びにおけるパートナーとの動作の同期性が低い傾向があることが分かった。統計的に信頼できるデータとするためにはさらなるサンプル収集が必要であるが、このような感覚運動系のパートナー間協調がコミュニケーションに果たす役割を更に解明することで、自閉症などのコミュニケーション障がいの改善法の開発につながる成果が期待される。本テーマは **CREST** 研究課題において発展的に継承することとなり、今後の研究展開が期待される。

### 2-3. 潜在感覚運動研究グループ

本グループは、人間の運動における潜在的で高速かつ自動の感覚運動プログラミングとその制御過程を解明し、加えて感覚運動制御と知覚のインタラクションを新たな視点で整理することにより、その脳内メカニズムの全貌を明らかにすることを目的として、研究を展開した。特に視覚/体性感覚から運動指令生成に至る情報処理過程を心理物理学、電気生理学、脳機能イメージング、計算論的モデリングなどの複合的アプローチを用いて解析し、そのメカニズムに迫った。

精緻な心理物理、行動実験に基づいて、視覚運動刺激により手の到達運動中に無意識に引き起こされる応答の特性を分析する視覚運動誘導性腕運動 (**MFR**) の研究は、同様の視覚刺激により引き起こされる眼球の運動 (**OFR**) や、運動知覚との類似性や差異を明らかにした優れた研究である。若者と高齢者を対象としての比較実験を実施し、予想外の結果が得られた。またさまざまな生理学的計測法を用いてその神経基盤の解明を進めつつあり、大脳皮質が関わる視覚-運動制御のメカニズムの理解に貢献することが期待される。また視覚運動刺激により、外力によって腕が引っ張られる錯覚を生じる現象を見出している。誘発される腕の応答は自己が生成した運動であるにもかかわらず、潜在的な情報処理の過程で生じた運動の誤差の原因を「意識」は外界に求めることを示した点が極めて興味深い。これは自己と他者を区別する情報処理の問題と密接に関係するものであり、本研究も本プロジェクトの主要テーマの一つである自由意思、或いは自己の主体とは何かという本質的なテーマに、新しい切り口を与えるものとして今後の発展が大いに期待される。

停止したエスカレータに乗り込む時に誰もが感じる「変な感じ」「違和感」という身近な体験の背景で起きている姿勢制御、運動制御を明らかにした。「エスカレータに乗り込む」という文脈情報が潜在的に運動制御と知覚にも影響を与える仕組みを明らかにする興味深い研究であった。文脈情報を顕在化させるプロセスについても興味を持たれた。一般社会にもアピールするテーマとして注目され、今後より一般的な問題の枠組みに広がることを期待したい。

実験における測定が精緻・厳密に行われている分、テーマや目的が明確であり、プロジェクト内で担う役割を十分に達成できたと評価できる。さらに行動実験だけでなく生理学的、生物学的検証を行うことで脳情報処理に対する理解が深まると期待される。脳障害による影響の理解・対策、効率的なリハビリ回復法、運動学習・訓練法の開発など、研究成果の社会への直接的な還元も期待される。一方で、本研究グルー

プに関しては、性急な応用展開よりもむしろ基礎研究の推進が長期的にはさらに大きな社会貢献につながるものと思われる。

#### 2-4. 嗜癖行動研究グループ

嗜癖とは、有害であることを知りながら賭博や浪費、薬物摂取を止めることができなくなった精神及び身体の状態を示す言葉である。本研究グループは、嗜癖の脳内機構を探ることを目標として行動学、薬理学および生理学的手法を動物に適用して研究を行った。本研究グループの研究内容は、一見、潜在脳機能との関係はやや薄いようにも思われるが、嗜癖に陥った人の説明はおおむねポストディクティブであるので、嗜癖の背景には潜在脳機能があると考えられるのも適切であろう。また、ドーパミン受容体誘導が嗜癖的に報酬を求める目標達成行動の引き金となっているとする仮説は、下條プロジェクトの中心テーマである選好行動の基礎的神経メカニズムの解明に直結している。

プロジェクト開始後に動物飼育および実験環境を立ち上げたため、各種手続きに時間を要し、十分な研究期間が取れなかったきらいはある。しかしながら、そのような研究環境の中でもいくつかの興味深い現象が発見された。たとえばコカイン投与と連合した場所を選好するという条件付けを行ったラットの海馬では、その場所へ侵入するに先だってシータ波の振幅が増大することが発見された。また、コカイン中毒が海馬というよりもむしろ扁桃体のドーパミンレセプターの発現に依存していることを示唆するデータが特に注目された。これらの興味深い発見を手がかりとして、今後の研究の発展と精密化に期待したい。

当初の計画から派生したラットの超音波発声の分析の研究は、これまで困難であったラットの情動表出の分析や、その実験的操作に道を開く可能性があるものとして今後の発展が大いに期待される。この研究は潜在聴覚グループと共同でなされたものであり、本プロジェクトの融合的な側面が現われたものとして高く評価できる。

人の潜在脳機能というプロジェクト全体のテーマに貢献するためには、報酬探索の神経機構を徹底的に解明して人の行動に演繹できる成果を出すことが必要となる。今後研究を進展させることで麻薬患者への介入法などに対する示唆を得られるものと期待される。

#### 2-5. その他海外の研究チームとの取組み

上記研究の他に本プロジェクトでは海外のチームと連携して、研究を推進した。プロジェクト全体の課題と密接に関係し、かつそれを発展させ得るテーマについて、それぞれのテーマを探求するに相応しい専門性をもつ研究者達との研究に取り組んだ。ボストン大、MGH グループとの共同研究は、潜在学習の仕組みに迫る興味深い成果を挙げた。またクリスチャン・シャイアー博士のデコード・マーケティング社とは、テレビコマーシャルの効果などを脳科学に基づいて評価しており、実社会を実験場にする試みとして非常に興味深く、また、社会的なインパクトという面においても注目される。「ニューロ・エコノミクス」というキーワードは、近年の脳科学分野でも市民権を得つつあり、世界中での取組みを目にすることが多いが、上記研究が有する独自性や卓見性が何であるかを世に知らしめていくことが今後重要であると考えられる。

- 〔研究成果（科学技術的側面）〕 a （成果として良好である）  
 〔研究成果（産業・社会的側面）〕 a （成果として良好である）

### 3. 総合所見

本プロジェクトでは、多岐に渡るそれぞれのテーマにおいて、今後の発展が見込まれる成果を生み出すことができた。最近注目を集める社会神経科学の研究のひとつの方向性を示したと言える。選択、判断といった重要な社会行動に結びつく脳機能の解明に多角的な方法論を駆使して、実質的な成果を挙げた。さらに実社会のマーケティングなどを視野に入れた研究を展開したことも、大きな成果である。マーケティングのみならず、広告、司法などの社会的側面においても、直接的な影響を及ぼし得るであろう。

また、多くの研究の「種」を探索したことも高く評価できる。「種」の育成にも一層注力できれば、さらにインパクトの高い成果が研究期間中に挙げられた可能性も指摘できよう。しかし未成熟な「種」は今後の発展が期待できるということも意味するので、プロジェクトに参加した若手研究者の今後の活躍に特に期待したい。これら若手研究者が国民の税金から多額の資金を提供され、研究を支援されたという自覚を持ち、高い見識を持って研究を継続し発展させていくことが望まれる。

先に述べたとおり、本研究で得られた知見は、情報産業、マスコミ、教育界、司法領域など、社会に広範かつ多大なインパクトをもたらす可能性を秘めている。同時に、これらの知見は「ポップ化」「疑似科学化」する危険性もはらんでいる。これらの社会的な影響を考えると、社会全体を対象とした効果的、かつ適切な情報発信が今後の課題となるであろう。

これらを総合的に判断し、ERATO 下條潜在脳機能プロジェクトは戦略目標「教育における課題を踏まえた、人の生涯に亘る学習メカニズムの脳科学等による解明」に資する良好な成果を挙げたと評価する。

- 〔総合評価〕 A （戦略目標の達成に資する成果が得られた）

以上