

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：34415

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H05493・20K20423

研究課題名（和文）主体的多感覚統合による知覚・認知過程の新しい枠組みの構築

研究課題名（英文）A new framework for perceptual and cognitive processing through active multisensory integration

研究代表者

乾 敏郎（INUI, Toshio）

追手門学院大学・名誉教授

研究者番号：30107015

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では行動実験、質問紙調査、fMRIによる脳活動計測、筋電・心電などの生理計測などを通じて、内受容感覚と外受容感覚、自己受容感覚の統合過程の諸特性を明らかにした。また能動的知覚・認知を形成する原理として、自由エネルギー原理（FEP）を取り上げ、この枠組で多感覚統合過程を合理的に説明できることを明らかにした。これはこれまでにない、全く新しい枠組みであり、内受容感覚を含む多感覚情報の統合メカニズムによって、個人差や様々な疾患系についてもうまく捉えることができることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では内受容感覚と外受容感覚、自己受容感覚の多感覚統合過程を合理的に説明できることを明らかにした。これはこれまでにない、全く新しい枠組みであり、内受容感覚を含む多感覚情報の統合メカニズムによって、個人差や様々な疾患系についてもうまく捉えることができることがわかった。本プロジェクトの成果は、基礎心理学の分野のみならず、AIやロボティクス、バーチャルリアリティなどの工学分野、発達障害等を対象とした臨床医学や特別支援教育、さらには言語、非言語コミュニケーション理論などに貢献できると考える。

研究成果の概要（英文）：We clarified various characteristics of the integration process of interoceptive, exteroceptive and proprioceptive sensations through behavioral experiments, questionnaire surveys, brain activity measurements (using fMRI), and physiological measurements, such as electromyography and electrocardiography. The new free energy principle (FEP) framework successfully explained the integration mechanism of multisensory information. The same framework explained the individual differences and properties of certain disease systems.

研究分野：認知神経科学、認知科学、計算論的神経科学

キーワード：外受容感覚 内受容感覚 異種感覚情報の統合 コミュニケーション機能 自由エネルギー原理

1. 研究開始当初の背景

(1) これまでの多感覚統合による知覚・認知過程の研究は、大多数が外受容感覚の統合のみを扱ってきた。感覚は、外受容感覚、自己受容感覚、内受容感覚の3種類から構成されている。したがって、身体的自己の形成において中心的役割を果たす内受容感覚を中心に対象の知覚・認知の処理過程を明確にする必要がある。脳内では、島において多くの情報が統合される。したがって、内受容感覚を通じて知覚される内部環境の情報と外部環境の情報が統合され、「感覚を持つ自己」を中心として対象が表象されるが、この過程についてはほとんど研究されていない。

(2) 2006年に発表されたFristonの自由エネルギー原理は、知覚、認知、注意、運動、感情、意思決定など、さまざまな脳機能の原理として知られている。自由エネルギー原理では、感覚からそれが生じた原因を推定する Helmholtz の無意識的推論と Friston の能動的推論という2つの推論過程によって、自由エネルギーを最小化していると考えられる。知覚は Helmholtz の無意識的推論によって、その原因を推定し、注意や運動は能動的推論によって、自由エネルギーを最小化することにより、身体の調整を行っていると考えられている。本研究はこのように外受容、自己受容、内受容感覚の統合過程を明らかにし、自由エネルギー原理と呼ばれる新しい観点でモデル化することにより、知覚認知過程をとらえる新しい枠組みを提案する。

2. 研究の目的

これまでの多感覚統合の研究は外受容感覚が対象であった。しかしわれわれの知覚や認知は自己の現在の状態や過去の状態によってその捉え方が大きく異なることが考えられる。したがってあらゆる感覚の基礎に内受容感覚があるのは明らかである。内受容感覚は脳が身体の状態を理解するものであり、身体的自己の基盤となる。このように外部環境を外受容感覚によってのみとらえるだけでなく、このような立場に立ち、個人差が生ずる基本的なメカニズムについても研究を進め、コミュニケーション障害を中心とする疾患系の理解にもつなげる。本研究プロジェクトでは、外受容感覚、内受容感覚、自己受容感覚すべての統合を扱う新しい理論的枠組みの構築を目指す。また自由エネルギー原理 (FEP) が主体的知覚を作る一つの原理であると考えているが、より具体的な脳内機構を明らかにすることも本プロジェクトの目的である。

3. 研究の方法

(1) 外受容感覚と内受容感覚の統合過程

本研究では、他者の表情の観察や音楽聴取時に生ずる内受容感覚の活動を計測し、他者認知やコミュニケーションに与える影響について検討する。内受容感覚の特性として、内受容精度、内受容感度、内受容感覚の主観的自己評価(メタ認知)がある。fMRI 実験によって、脳内ネットワークの同定を行うと同時に各機能と内受容感覚の特性、共感性、身体イメージ懸念などの関係や個人差の原因について研究を行う。これらの実験データに基づき、多感覚統合の脳内メカニズムを明らかにし、自由エネルギー原理に基づくモデルを提案する。

(2) 外受容・自己受容・内受容感覚の統合過程

吃音のメカニズムにおいて、外受容感覚と自己受容感覚、内受容感覚がどのように統合され、これらの機能が実現されているのかを明らかにし、脳内ネットワークモデルを提案し、自由エネルギー原理の枠組で理解することを目指す。

4. 研究成果

(1) 内受容感覚の客観的測定と主観的(メタ認知)測定

心拍カウント課題による内受容感覚の正確さ (accuracy) と心拍弁別課題で独自の方法によって得られた内受容感度 sensitivity を比較したところ、両者の間に有意な正の相関が認められた (Maekawa et al., 2021)。

内受容感覚への気づきの多次元のアセスメント (MAIA) を用いて内受容感覚の自己評価を調べたところ MAIA 得点の高い人は心拍カウント課題の確信度が有意に高かった。また、内受容感度と日本語版身体イメージ懸念質問紙 (J-BICI) 得点の間に弱い正の相関がみられた。内受容感度が高い人が自己身体へのイメージの懸念傾向が高くなっていることが示唆された。

(2) 外受容感覚と内受容感覚に対する処理過程の違い

内受容感覚への注意では両側前頭弁蓋、背側前中部島、中部帯状回などが強く賦活することがわかった。一方で外受容感覚(聴覚)への注意では聴覚野である側頭領域の活動が確認された。さらに内受容感覚の正確さが高い参加者では、右背側前部島の強い賦活が見られた。自由エネルギー原理 (FEP) によると、島皮質の後部領域は内受容性の信号がまず投射される一次内受容皮質

と考えられる一方で、背側前部は内受容性の信号を処理・統合・表象する注意・認知と関連していると考えられる (Haruki & Ogawa, 2021b; 晴木・小川, 2020)。また、心拍カウント課題中の音の妨害刺激による効果を調べた。安静時心拍変動が大きい(すなわち FEP に基づくと心拍に関わる予測信号の精度 precision が低い)と、外受容性の刺激による妨害効果が大きくなった。また、身体の不調を心配しやすい傾向がある人においても、妨害の効果が大きくなることが明らかとなった。これらの結果は、生理的な要因(心拍変動)により成立する比較的低下な予測信号と心理的な要因(内受容感受性)による比較的高次な予測信号の個人差によって、内受容感覚と外受容感覚間の相対的な精度が変化し、その統合過程の個人差を生じさせているという可能性を示唆するものである (Haruki & Ogawa, 2021a)。

(3) 外受容感覚と内受容感覚の統合

音楽聴取中の感動の評定課題を行っている参加者の脳活動を fMRI によって測定するとともに、心拍を測定した。参加者の評定に基づき、感動度-高, 中, 低の 3 群に試行を分け、さらに参加者群を内受容感覚の感度の高群(High-IS 群)では、感動度に伴って心拍数が上昇した(前川ら, 2020)。感動度-高試行において、島皮質に注目した ROI 解析を行った結果、右腹側中部島皮質および、左背側後部島皮質において、内受容高群で低群より有意に強い活動が見られた (Maekawa et al., 2021)。中部、後部島皮質は内受容感覚の入力に関わっていることから、内受容高群においては、音楽に対して生じた生理的变化(ホメオスタティックな予測誤差)が感度良く検出され、感動に繋がっていると考えられる。FEP に基づくと、内受容感覚感度の高い個人は、予測誤差の精度の高い個人に対応していると推定される。

表情から感情を推論する課題において心拍追跡精度の高い人ほど他者の中立表情を不快な表情として捉えており(前川ら, 2019)、怒り感情においても小さな表情の変化に感情の変化を強く感じていることが予想された。内受容感覚は身体化シミュレーションによる身体状態の変化を知覚する感覚であると考えられるが、内受容感覚に優れる人は、わずかな変化をより大きな身体状態の変化としてとらえていると考えられる。実験の結果では、心拍追跡精度と確信度の個人内相関係数が高い参加者ほど、中立表情付近で測定された表情の識別感度が有意に高かった。つまり、確信度を正しく評価できている参加者が内受容精度が高く、表情識別感度が高いのである。また他者感情の推定に生理変化が先行するという身体化シミュレーション仮説が支持された。さらに顔表情のイメージ変換課題において内受容感覚感度の高い個人は内受容感覚のダイナミックレンジが広く、内受容感覚の変化がより詳細に表象されているため、より精度よくイメージを生成できたと考えられる(前川ら, 2021)。

(4) FEP による精度制御 precision control の役割とその疾患

FEP の枠組みで二者間のコミュニケーションのモデルが提案されている(乾・阪口, 2021 参照)。そこでは他者の次の発話を予測するように学習を進めるのであるが、発話時には一般の随意運動と同様、聴覚フィードバック(AF)の予測誤差の精度が低下するように制御され(感覚減衰、乾・阪口(2020))、AF は遮断されているとされている。しかし、吃音者・非吃音者で遅延 AF に順応した際の自己発話の遅れを判断する実験では、吃音者は非吃音者より順応の影響を強く受けることが明らかとなった (Iimura et al. 2019)。また、その遅れ判断の精度の悪さと吃音の重症度に有意な相関があることが示された。一方、周波数変調 AF に対する順応では、吃音者・非吃音者でその効果に差がないことが明らかとなった (Iimura et al. 2020)。以上の結果は、吃音者における AF への依存性は自己発話タイミングを表象するレベルで生じており、その精度が悪くなるとより強い順応効果と吃音の重症度がもたらされることを示唆している。

Iimura et al (2019) では、吃音者において AF への時間的な予測精度が悪くなっていることが示唆された。そこで、遅延 AF への順応をカルマンフィルターとして定式化し、予測信号と感覚信号の統合過程と順応効果のモデル化を行った(朝倉ら, 2022)。このモデルから吃音者で AF に対する予測精度が悪くなっていることが示された。また、吃音の重症度が AF に対する予測精度の悪さと正の相関があること、および遅れ判断の閾値(判断基準)と負の相関があることが明らかとなった。FEP の枠組みからは、予測精度が悪くなると AF への依存性が高くなるとともに発話の自己主体感が低下することが示唆される。また、遅れ判断の閾値の低下は、自己の発話タイミングが予測より遅れていると判断する知覚バイアスが大きくなることを意味することから、予測誤差と同様に発話の自己主体感の低下を示唆するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Haruki Yusuke, Ogawa Kenji	4. 巻 -
2. 論文標題 Role of anatomical insular subdivisions in interoception: Interoceptive attention and accuracy have dissociable substrates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Neuroscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ejn.15157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Iimura Daichi, Asakura Nobuhiko, Sasaoka Takafumi, Inui Toshio	4. 巻 41
2. 論文標題 Assessing sensorimotor integration in adults who stutter by a behavioral task using perceptual adaptation of frequency-altered auditory feedback	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 780 ~ 783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.41.780	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 朝倉 暢彦	4. 巻 73
2. 論文標題 データ科学的手法によるヒト認知機能の統計モデリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 生産と技術	6. 最初と最後の頁 22 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Iimura Daichi, Asakura Nobuhiko, Sasaoka Takafumi, Inui Toshio	4. 巻 10
2. 論文標題 Abnormal Sensorimotor Integration in Adults Who Stutter: A Behavioral Study by Adaptation of Delayed Auditory Feedback	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpsyg.2019.02440	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 乾 敏郎	4. 巻 73
2. 論文標題 特集 意識 .理論的アプローチ 自由エネルギー原理-内受容感覚に基づく意識の神経基盤	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 生体の科学	6. 最初と最後の頁 70~74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11477/mf.2425201468	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maekawa Toru, Sasaoka Takafumi, Inui Toshio, Yamawaki Shigeto	4. 巻 2021.12.05.471331
2. 論文標題 Interceptive sensitivity modulates heart rate and insula activity when listening to music	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/2021.12.05.471331	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Haruki Yusuke, Ogawa Kenji	4. 巻 -
2. 論文標題 Disrupted interoception by auditory distractor: Difficulty inferring the internal bodily states?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PsyArXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.31234/osf.io/2t754	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 朝倉暢彦・笹岡貴史・小川健二・乾敏郎	4. 巻 121
2. 論文標題 遅延聴覚フィードバック順応のカルマンフィルターモデル	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 133-137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 乾 敏郎	4. 巻 45
2. 論文標題 [招待講演] 知覚・行動・コミュニケーションの計算理論 ~ 自由エネルギー原理とは何か ~	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 前川亮, 笹岡貴史, 乾敏郎
2. 発表標題 内受容感覚の個人差と音楽聴取時の心拍変動の関係
3. 学会等名 日本心理学会第84回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 晴木祐助, 小川健二
2. 発表標題 心-身-脳の関係を探る: 内受容感覚の神経基盤にかかわる基礎的検討
3. 学会等名 北海道大学第6回部局横断シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川亮, 笹岡貴史, 乾敏郎
2. 発表標題 内受容感覚の個人差が表情変化の予測の正確さにおよぼす影響
3. 学会等名 日本心理学会第85回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 晴木祐助, 小川健二
2. 発表標題 Viscerotopy in the anterior insula? Multivoxel pattern analysis study for explicit interoception
3. 学会等名 第5回ヒト脳イメージング研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 乾 敏郎、阪口 豊	4. 発行年 2020年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 150
3. 書名 脳の大統一理論	

1. 著者名 乾 敏郎、阪口 豊	4. 発行年 2021年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 162
3. 書名 自由エネルギー原理入門：知覚・行動・コミュニケーションの計算理論	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>「講演」 乾 敏郎 (2019) 脳型処理の基本原理と個性を生み出すメカニズム. けいはんなR&Dイノベーションコンソーシアム総会 (2019.11.11 大阪) 乾 敏郎 (2019) 知覚から思考までの基本機構を明らかにする自由エネルギー原理. 国立生理学研究所シンポジウム2019認知神経科学の先端「脳の理論から身体・世界へ」(2019.9.2 岡崎) 朝倉 暢彦 (2020) データサイエンスと意思決定. 機械学習・データ科学 金沢ミニキャンプ (2020.10.30 金沢) 朝倉 暢彦 (2020) データサイエンスリテラシー. データサイエンス・セキュリティ入門講座ミニキャンプ (2020.12.20 広島) 朝倉 暢彦 (2021) ベイズ統計理論に基づくヒト認知機能の数値モデリングと統計解析. 微分方程式とデータサイエンス研究会 (2022.12.6 金沢)</p> <p>「Webページ」 乾 敏郎 (2021) 視覚順逆変換モデル. 脳科学辞典. https://bsd.neuroinf.jp/wiki/%E8%A6%96%E8%A6%9A%E7%B3%BB%E3%81%AE%E9%A0%86%E9%80%86%E5%A4%89%E6%8F%9B%E3%83%A2%E3%83%87%E3%83%AB</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小川 健二 (OGAWA Kenji) (50586021)	北海道大学・文学研究院・准教授 (10101)	
研究分担者	笹岡 貴史 (SASAOKA Takafumi) (60367456)	広島大学・脳・こころ・感性科学研究センター・准教授 (15401)	
研究分担者	朝倉 暢彦 (ASAKURA Nobuhiko) (70308584)	大阪大学・数理・データ科学教育研究センター・特任准教授 (常勤) (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関