

内受容感覚の予測的符号化

—福島論文へのコメント—¹⁾

大 平 英 樹

名古屋大学

Predictive coding of interoception: Comments on Fukushima's article

Hideki OHIRA

Nagoya University

Interoception means neural processing and subjective perception of signals from inner body, including organs and autonomic, endocrine, and immune systems. Interoception has been thought to play critical roles in emergence of emotions, decision-making, and mental and physical well-being. Though associations between interoception and dysfunctional mental and physical health such as anxiety and Alexithymia have been reported, the empirical findings are still mixed. This article proposes a computational model of interoception on the basis of the principle of predictive coding, to provide integrated accounts of the findings of interoception and health. Simulations using the model suggested that 1) hypersensitive and inaccurate bodily sensation in anxiety might be rooted in lower precision of bodily signals and exaggerated transmission of bodily signals to the brain, and 2) inaccurate interoception and chronic unpleasant feeling in Alexithymia might be caused by lower precision of bodily signals and dysfunctional communication between the brain and body. Suggestions for future studies on interoception are also discussed.

Key words: interoception, computational model, predictive coding

キーワード：内受容感覚，計算論モデル，予測的符号化

1. はじめに

内受容感覚 (interoception) とは、内臓、自律神経系、内分泌系、免疫系など身体内部の信号に関する脳内処理と、その結果生じる感覚を意味する。内受容感覚は感情の認識 (寺澤・梅田, 2014) や意思決定 (大平, 2017a) に重要な役割を果たしており、心身の健康にも深く関わっていると考えられている (Feldman-Barrett, 2017; Quadt, Critchley, & Garfinkel, 2018)。近年、この問題に関する関心が高まり、発表される論文数が急増している (図1: PubMedによる調査)。また, *Philosophical Transaction Royal Society B* 371 巻 (2016) において, 'Interoception beyond homeostasis: affect,

cognition, and mental health (恒常性を越えた内受容感覚: 感情, 認知, 精神的健康)' と題する特集が組まれ、この問題に関する総説論文が複数収められている。本特集における福島 (2018) の論文 (以後, 「福島論文」と記載する) では、内受容感覚について、その特徴や測定方法から、神経

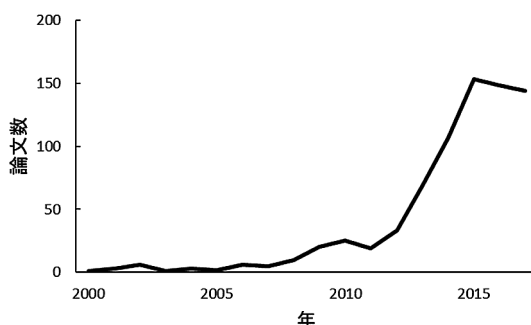


図1 内受容感覚に関する論文出版数の推移
2000年から2017年における1年ごとの論文出版数を, “interoception” をキーワードとして PubMed で検索。

1) 本稿は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B)) 「確率共鳴理論と集合的記憶概念の接続の試み: 身体現象を指標として」 (課題番号 16H03360, 研究代表者: 中村靖子) の成果の一部である。また本稿の草稿について、名古屋大学大学院情報学研究科の片平健太郎准教授、産業技術総合研究所の木村健太博士より有益な示唆を頂いた。記して感謝する。

基盤、感情との関連、心身の健康への影響まで、現在までの膨大な知見を整理した上で包括的な紹介がなされている。この論文により読者は、内受容感覚研究についての有益な「見取り図」を得ることができる。

福島論文では、内受容感覚とさまざまな心身の疾患、不調との関連は複雑であり、単純な関係としては理解できないことが指摘されている。高不安者は内受容感覚が過敏であると言われてきたが (Stewart, Buffett-Jerrott, & Kokaram, 2001)、最近では彼らは自らの身体についてむしろ鈍感で不正確な感覚を経験しているとも主張されている (Farb et al., 2015)。このことは、これまで内受容感覚の検査として用いられてきた心拍カウント課題や心拍検出課題の妥当性にも疑問を投げかけ、それらの課題が何を測っているのかが問われている (Khalsa et al., 2018)。また、自らの感情の自覚に乏しいアレキシサイミア特性を持つ個人は内受容感覚を測定する課題成績が顕著に低い (Herbert & Pollatos, 2012)、彼らは胃腸への刺激や痛みにはむしろ過敏な反応を示し、身体感覚が混乱していると主張されている (Nakao et al., 2002)。これらの問題の理解は精神医学や心身医学において重要な課題である。その探求は翻って、内受容感覚とは何であるか、それにより感情がどのように創発されるのかという心理学にとって根源的な問いにも示唆を与えるに違いない。

こうした様々な要因が複雑に入り組んだ問題を扱うひとつの方法は、多様な現象を統一的な視点から描出できるような理論的枠組みを模索することである。そこで本稿では、近年急速に発展してきた、内受容感覚を予測的符号化 (predictive coding) の理論により捉える立場に基づいた計算論モデル (computational model)²⁾を作成して、内受容感覚と心身の健康を結びつける原理を考えたい。

2. 内受容感覚の予測的符号化³⁾

脳は、入力される感覚刺激を予測する内的モデルを構成し、その予測と感覚信号を比較し、両者の差異 (予測誤差: prediction error) の計算に基づいて、知覚を能動的に創発していると考えられている。こうした脳の働きを予測的符号化、あるいは自由エネルギー原理 (free energy principle) と呼ぶ (Friston, 2010)。内的モデルによる知覚の予測は確率分布として表現される。これはベイズ統計学という事前分布にあたる。感覚信号もノイズを伴う確率分布として入力され、予測誤差が計算される。この予測誤差に基づいて、ベイズの定理による更新のように事後分布が計算される。我々が主観的に経験する知覚は、この事後分布、つまり次の時点の事前分布 (予測) が意識されたものだと考えられる。

知覚経験を規定する重要な要因のひとつが、予測や感覚信号の精度 (precision) である。精度は確率分布の分散の逆数として表現される。何度も経験した事象については予測の精度が高く、未知の事象では予測の精度は低い。また、対象に注意を向けることで、感覚信号の精度を上げることができる。予測と感覚信号の平均間の距離が等しくても、予測と感覚信号の精度が同程度であれば主観的な知覚経験は両者の中間的なものになるが、予測の精度が高く感覚信号の精度が低ければ、経験される知覚は予測に大きく依存し、実際の感覚信号とはかけ離れたものになる。

こうした計算が、感覚器官の低次なレベルから脳の連合野における高次なレベルまで階層的に行われていると考えられる。ヒトを含む生体は、そこで検出される予測誤差の和を最小化することで整合的な自己像と世界像を構築し、それらを維持しようと努める。予測誤差を最小化するためには、内的モデルの更新と、外界への働きかけによる感覚信号の積極的な調整 (能動的推論 (active inference)) が行われる。

近年、内受容感覚も、こうした予測的符号化

2) こうしたモデルの呼称や定義にはまだ定見はない (片平, 2018)。一般に確率分布を含む数値モデル (mathematical model) を統計モデル (statistic model) と呼ぶが、本稿ではそれらのうち脳や神経系が行う計算 (情報処理) 過程を模したものを計算論モデル (computational model) と呼ぶこととする。

3) 予測的符号化や自由エネルギー原理に関する日本語の解説としては吉田・田口 (2018) が詳しい。またその内受容感覚への適用については乾 (2018a), 乾 (2018b) が有益で、本稿で言及したStephanら (2016) のモデルにも言及されている。

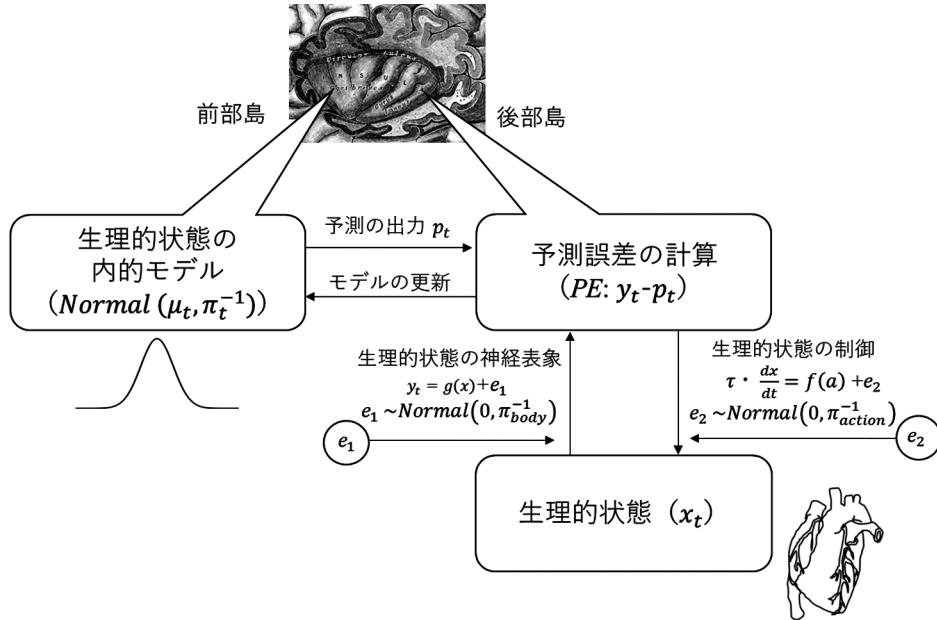


図2 予測的符号化に基づく内受容感覚の計算論モデル
 $Normal$: 正規分布, PE : 予測誤差, e : 正規分布で表現されるノイズ。

により成立していると主張されるようになった (Seth, 2013)。生体は恒常性 (homeostasis) を保って生命を維持するために、身体状態を適切に制御する必要がある。そのために脳は、身体の望ましい目標状態を表象し、その目標を実現するための内的モデルを構築している。そのモデルにより、状況に応じて血圧、血糖値、ホルモンの濃度、免疫機能に関わるサイトカインの濃度などのセットポイントが予測として出力される。そこに身体からの信号が入力されると、予測と照合され、予測誤差が検出される。生体は、この予測誤差を最小化することで身体状態を制御しようと努める。

主観的に経験される内受容感覚は、こうした計算の過程が意識されたものだと考えられる。例えば、腸の蠕動運動は、通常は意識されることはほとんどない。これは普段は、内的モデルによる予測と実際の運動の予測誤差がわずかであるからである。しかし腸に感染が生じて炎症が起これば、予測誤差は増大し、我々は違和感や痛みとしてそれを知覚する。すると腸への注意により感覚信号の分布の精度が上がり、知覚はより鋭敏になる。

3. 内受容感覚の計算論モデル

このような予測的符号化の原理に基づいて内受容感覚の振る舞いを計算論モデルとして実装した例は、筆者の知る限り Stephan et al. (2016) の研究のみである。ただし彼らの論文では、モデルを構成する関数が明示されていない箇所が複数存在する。そこで本稿では、Stephan et al. (2016) の研究に基づきつつも、これを翻案、補足することで、内受容感覚のモデル化を試みる。図2は、このモデルの構成を表している。

ある生理的状態 (x)、例えば血圧の内的モデルを考える。この内的モデルは正規分布による確率分布で表現されているとし、ある時点 t におけるその平均値を μ_t 、分散を π_t^{-1} (π は精度で分散の逆数) とする。平均値 μ_t は、この時点における血圧の目標値であるセットポイントとなる⁴⁾。本稿のモデルでは、この確率分布からサンプリングす

4) 脳が実際に血圧のセットポイントを定めて制御しているということは、循環器学では長い間議論されているが、その詳細なメカニズムはいまだ不明である (Nishida et al., 2012)。一方、末梢における血圧制御は詳細なメカニズムが検討されており、その動態を説明する数理モデルも提案されている (吉野ら, 2004)。

ることで、この時点における血圧の予測 p_t が出力されると考える。Stephan et al. (2016) のモデルはベイズ推論モデルであり、確率分布の平均値 μ_t がある関数で神経的に表象された $g(x)$ を予測として扱っている。しかし、内受容感覚の予測の実体は島 (insula) の前部などの脳の予測領域におけるニューロン群活動パターンであり、微小時間におけるその特定のニューロン群活動が身体信号を受容する脳領域のニューロン群活動を制約すると考え、上記のように表現することとした。

一方、この時点における実際の生理的状態 (血圧) を x_t と表す。この値は関数 $g(x)$ により脳に伝えられる。この時ノイズ e_t が加わると考え、それを平均 0、分散 π_{body}^{-1} (ここでも π は精度であり分散の逆数で、個人に特有の定数であるとする) の正規分布で表す。こうして、この時点における生理的状態の脳における神経表象 y_t が形成される。生理的状態を脳に伝えて表象する関数としてはいくつか考えられるが、おそらく上限・下限がありその中間領域で感度が最大となること、増加と減少を自然に表現するために原点 (0, 0) を通るものが便利であることを考慮し、本稿では双曲線関数を採用する。すなわち、

$$g(x) = \tanh(\beta_1 \cdot x),$$

ここで、 β_1 はこの関数の傾きを定める定数であり、本稿では常に 1 とする⁵⁾。

このようにして出力された予測 p_t と生理的状態の神経表象 y_t が照合され、予測誤差 $y_t - p_t$ が計算される。予測的符号化の原理は、この予測誤差を縮小しようと働く。まず次の時点、 $t+1$ における内的モデルの平均と精度 (分散の逆数) が、ベイズの定理により次のように更新される。

$$\text{平均値} : \mu_{t+1} = \mu_t + w_1 \cdot \frac{\pi_{body}}{\pi_t + \pi_{body}} \cdot (y_t - p_t),$$

$$\text{精度}^6) : \pi_{t+1} = \frac{\pi_t + \pi_{body}}{\pi_t \cdot \pi_{body}},$$

ここで w_1 は予測誤差によりどれ程内的モデルの平均値を更新するかを規定する変数であり、個人間でも個人内でも変動すると考える⁷⁾。これは身体から脳への信号連絡の強度を表している。また、内的モデルの平均値を更新する際に、内的モ

デルと生理的状態の精度比 $\frac{\pi_{body}}{\pi_t + \pi_{body}}$ が乗じられている。

同時に、予測誤差を縮小するために、生理的状態に働きかけてこれを変更しようとする行為 (action: a) が発動される。血圧の場合は、心拍出量、心拍率、末梢血管系などの変更がこれにあたる。この行為の効果量を定める関数も先行研究 (Stephan et al. 2016) では明示されていないが、神経を介する情報伝達なので、やはり双曲線関数で表現することとする。ここでも予測と生理的状態の精度比を乗じて、次のように規定する。

$$f(a) = \tanh\left(w_2 \cdot \frac{\pi_t}{\pi_t + \pi_{body}} \cdot \beta_2 \cdot -(y_t - p_t)\right),$$

予測誤差による更新の効果が内的モデルとは逆になることに注意して欲しい。また、精度比の分子が内的モデルの際とは異なり、効果の方向が逆になる。ここで w_2 は予測誤差によりどれ程生理的状態に働かせるかを規定する変数であり、脳から身体への信号連絡の強度を表している。 β_2 はこの関数の傾きを定める定数である (常に 1 とする)。この行為の生理的状態への影響にもノイズ e_2 を伴うと考え、それを平均 0、分散 π_{action}^{-1} の正規分布で表す。生理的状態は、この行為により一定の時間遅れを伴って連続的に変化すると考えて次のように表現する。ここでもさまざまな関数を考えることができるが、本稿では単純な一次遅れ成

5) β_1 , β_2 などのパラメータは、本稿のモデルには冗長であるかもしれない。実際これらはいずれも定数 1 としていたので無くてもよい。またパラメータの多さはデータをモデルにフィットさせる場合には不利に働く。しかし将来の拡張などを考慮し、考えるパラメータは入れておくこととする。

6) Stephan ら (2016) の論文では内的モデル精度の更新は、 $\pi_{t+1} = \pi_t + \pi_{data}$ と規定されているが (π_{data} は本稿のモデルでの π_{body} と同じ)、この場合、内的モデルの精度は時間と共に単調増加することになる。身体状態 x が不変だとすれば、時間と共に推定精度は高まると考えるのは妥当であるが、ここでは身体状態 x はノイズを伴い常に変動すると考えているので現実的ではない。そこで本稿では、通常のベイズ則での精度の更新の形に変更している。この場合、内的モデルの精度は π_t と π_{body} の関係により一定の値に収束する。

7) 計算論的精神医学におけるベイズ推論モデルでは、個人差や精神疾患の特徴は内的モデルと感覚信号の精度比により表現される。Stephan ら (2016) のモデルでもそうになっている。本モデルの w_1 , w_2 というパラメータは脳と身体の生物学的な信号連絡強度あるいは効率を表現しようとしているが、こうしたパラメータの導入は一般的なベイズ推論の枠組みからの逸脱を意味し、その妥当性は議論されねばならない。

分のみを含む関数を用いる⁸⁾。

$$\tau \cdot \frac{dx}{dt} = f(a) + e_2,$$

τ は時間遅れを規定する時定数であり、本稿では常に5とする。

こうした内受容感覚の予測の生成と、身体信号との照合による予測誤差の計算が脳のどこで行われるかについては諸説あるが、本稿ではFeldman-Barrett and Simmons (2015)に基づいて、前者は島 (insula) の前部、後者は島の後部で担われていると考える (図2: 島の解剖学的・機能的特徴の詳細については、大平 (2017b) を参照)。

4. シミュレーションからの示唆

この計算論モデルによるシミュレーションを行って、内受容感覚の反応とそれによる生理的状態の制御の動態を検討していこう。図3は、典型的な反応と制御を示す個人の例である。内的モデルと生理的状態の精度は共に比較的高く ($\pi_i=10$, $\pi_{body}=100$)、脳と身体の間接強度は適度に維持されているものとする ($w_1=0.1$, $w_2=0.5$)。また本稿では末梢身体における器質的異常は考慮しないので、生理的状態の制御に関する精度は十分に高いレベルに固定する ($\pi_{action}=1000$)。

寒い冬のある日、この個人は心理学の実験に参加するために実験室に向かっていた。図3①の時点で実験室に到着すると、暖かい室温に曝露されたことで血圧が低下した。これを表現するために、モデルの生理的状態に-0.4をインパルス入力する。この時大きな予測誤差が生じるが、内的モデルによる制御によって低下した血圧は回復していく。それと共に内的モデルのセットポイントも下方修正される。この個人が主観的に経験するのは、この予測の「変化」であり、これによって自らの血圧は低下したことが感じられる。その後

の予測誤差の縮小は新たな環境への馴化過程を意味し、予測誤差が0に近づくと予測は変化しなくなり、身体の状態は意識されなくなっていく。図3②の時点で実験操作として急性ストレスが負荷された。これに対処するため脳の高次領域は、+0.6をインパルス入力することで内的モデルを変更し、血圧のセットポイントを引き上げた (アロスタシス (allostasis))。これに応じて、血圧は一

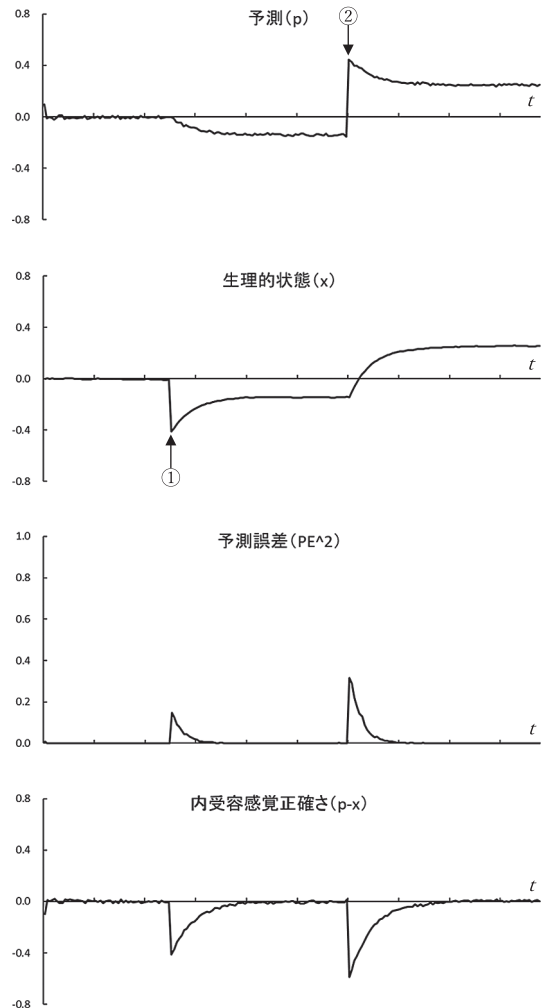


図3 典型的な内受容感覚の反応と予測のシミュレーション

生理的状態は血圧を表すものとする。①の時点で外的刺激 (暖かい室温など) により血圧が低下したことを示す。②の時点で、急性ストレス負荷などによりトップダウン的な血圧セットポイントの変更が行われたことを示す。①、②の事象により予測誤差が計算され、それを縮小するように、内的モデルによる予測値の変更と血圧の制御が行われる。

8) 本稿のモデルでは、血圧は比較的速やかに制御がなされると考えて、不応期を表す「むだ時間」は導入していない。内分泌系などの生理的状態の表現では「むだ時間」をパラメータ化して導入する方がよいと思われる。また二次遅れ系を導入しパラメータを適当に設定すると、生理的状態の振動現象が生じる。こうした振動や、そこにノイズが加わることで生じる確率共鳴 (stochastic resonance) が、本文最後で述べた生理的状態の「相転移」の再現に有効かもしれない (大平, 2015 も参照)。

定の時間遅れを伴って上昇していく。ここでも最終的には予測誤差が0になるように制御がなされ、この状況が変わらない限りはそれが維持される。

予測的符号化の原理から考えれば、個人は自身自身の生理的状態（この場合は血圧）の真値を経験することはできない。この個人が自身の血圧として知覚するのは、その予測の「変化」である。また、この計算論モデルの観点からは、心拍カウント課題や心拍検出課題で測定される内受容感覚の正確さ（interoceptive accuracy）とは、知覚される予測（ p ）と、心電計などで計測される実際の生理的状態（ x ）の差の逆数であると解釈することができる（予測誤差は、予測（ p ）と生理的状態の神経表象（ y ）との差なので、これとは関連するが異なる）。図3に示される典型的な個人では p と x はよく対応しているの、測定される内受容感覚の正確さは高いことになる。

図4は不安が高い個人の反応と制御を表す。福島論文で記述されているように、高不安の個人は、自らの身体に過敏である反面、身体からの信号はノイズが多く不正確だと考えられている（Stewart et al., 2001；Farb et al. 2015）。これを再現するために、図3の典型的個人の他のパラメータ値を維持した上で、身体から脳への伝達強度を大きくし（ $w_1=0.8$ ）、また身体信号のノイズを表す精度を低下させた（ $\pi_{body}=7$ ）。生理的状態（血圧）はゆらぎが増すものの、その反応性は維持されていることがわかる。一方で、強調された身体ノイズにより常に大きな予測誤差が生じ、その結果、内的モデルが出力する予測の値は常に揺れ動き極めて不安定になる。これはまさに不安（定）の姿であり、この予測の「変化」により、体や心がザワザワした感じを経験するのかもしれない。この高不安の個人では、予測（ p ）と生理的状態（ x ）の差の平均値は0近傍にある。つまり、心拍カウント課題などの成績は平均的には良好に保たれるものの、その分散が大きい。これが、不安と内受容感覚正確さの関係を混乱したものになっているのかもしれない。

アレキシサイミアでは、おそらく不安と同じように身体信号のノイズが大きい上に、脳と身体の連絡が著しく低下していると考えられる。これを再現するために、高不安者のパラメータ値を維持

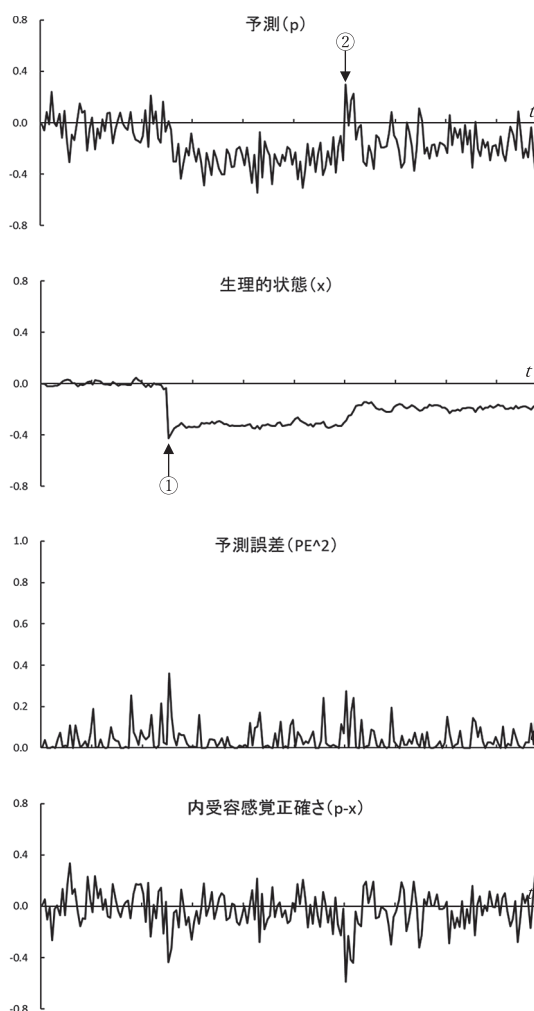


図4 高不安者における内受容感覚の反応と予測のシミュレーション

生理的状態のノイズを強め、予測誤差による内的モデル更新への伝達強度を強めることにより高不安者の状態を再現。内的モデルによる予測が不安定になり、常に大きな予測誤差が生じている。

した上で、脳から身体、身体から脳の双方の伝達強度を低下させた（ $w_1=0.05$, $w_2=0.05$ ）（図5）。生理的状態の恒常性は保たれ安定しているが、内的モデルによる制御を欠いているので反応性に乏しい。内的モデルによる予測は不安と同様に高い身体ノイズのために非常に不安定で過敏であり、これが身体感覚の増強と慢性的な不快感情を生むのかもしれない。さらに、認知によるトップダウン的な入力となされ内的モデルのセットポイントが更新された際に特に大きな予測誤差が生じ、しかし生理的状態は制御されないで結果として予測

(p) と生理的状態 (x) の差は顕著に拡大する。もしこの状態で心拍カウント課題などを行えば、その成績は極端に低下するであろう。

このような計算論モデルによるシミュレーションは、既存の研究知見の説明だけでなく、将来の研究方略についても示唆を提供しうる。例えば、従来のような一時点での相関だけでなく時間間隔をあけて複数回課題を課し、その成績の個人内信頼性を検討することで、図4に示された高不安者の内受容感覚の不安定さを検出できるかもしれない。その際に、快-不快の主観的感情を一定時間連続的に評定させ、同時に心拍などの生理的状態を連続測定することで、その間の時間遅れを伴う対応（交差相関 (cross correlation), 変化エントロピー (transfer entropy), グレンジャー因果 (Granger causality) などの統計量により推定可能だろう) や、その変動性を評価することも有益であろう。図5に示されるように、アレキシサイミアにおける内受容感覚の低下は、従来のような安静状態における検討だけでなく、急性ストレスなどで負荷をかけた状態でいっそう顕著になる可能性がある。この際、冷水昇圧などの身体的負荷（身体→脳の方向の影響）と、時間圧を伴う暗算などの認知的負荷（脳→身体の方

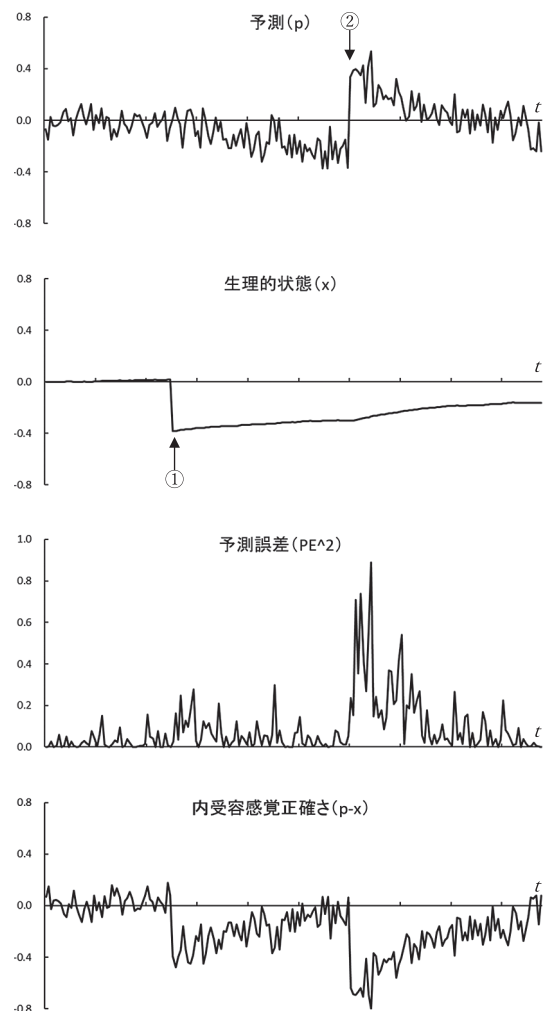


図5 アレキシサイミアにおける内受容感覚の反応と予測のシミュレーション

高不安者の状態から、さらに予測誤差による内的モデルの更新と生理的状態の制御への伝達関数を弱めることでアレキシサイミアを再現。脳による制御を欠き生理的状態の反応性が鈍麻している。常に大きな予測誤差が生じると共に、内受容感覚の正確さも低下する。

5. おわりに

本稿で提唱した計算論モデルは、あまたある可能性のひとつであり、内受容感覚の特性を説明できるモデルは他にも複数存在するであろう。また、本稿で検討を試みたのは、内受容感覚と不安・アレキシサイミアの関係のうちの一部に過ぎず、予測的符号化の原理によって、内受容感覚にまつわる広範な現象をどこまで説明できるかは未知である。それでも、予測的符号化は脳の機能に関する統一原理として魅力的であるし、そこから発想される計算論モデルは、複雑な研究知見を整

理し、将来の研究において検証可能な仮説を導出するために有益である⁹⁾。

最後に、これまでの内受容感覚研究と、本稿で提唱した計算論モデルの、重要な制約を指摘して

9) 『心理学評論』61巻1号では「統計革命」と題する特集が組まれている。そこで竹澤(2018)は、心理学が対象とするような複雑な現象は、自然言語による分析には限界があり厳密で緻密な数理モデルの導入が重要であると主張している。本稿で扱った内受容感覚も、そうした現象の一例であると思われる。

おこう。福島論文で紹介された諸研究や本モデルは、連続的に変化するどちらかといえば静的な内受容感覚の現象を扱っている。それに対応するのは、まさにコア・アフェクト (core affect: Russell & Feldman-Barrett, 1999) のような、我々の意識の基盤を為すような感情の流れである。これは福島論文が指摘するように、気分と呼ばれる感情現象に近い。しかし我々はしばしば、感情の爆発や、衝動に突き動かされた意思決定や行動の変容を経験する。おそらくそうした激しく非連続的な「相転移」ともいえる感情現象においても、強い内受容感覚が伴うであろうし、そこでも内受容感覚が重要な役割を果たしていると想像できる。そうした現象についてはほとんど実証的検討がなされていないし、現状の計算論モデルでの再現も困難である。しかし今後、人間をより深く理解するためには、そうしたダイナミックな感情が、身体からの信号により如何に創発されるのかが問われるべきであろう。

引用文献

- Farb, N., Daubenmier, J., Price, C. J., Gard, T., Kerr, C., Dunn, B. D., ... Mehling, W. E. (2015). Interoception, contemplative practice, and health. *Frontiers in Psychology*, 6, 763.
- Feldman-Barrett, L. (2017). The theory of constructed emotion: an active inference account of interoception and categorization. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12, 1–23.
- Feldman-Barrett, L., & Simmons, W. K. (2015). Interoceptive predictions in the brain. *Nature Review Neuroscience*, 16, 419–429.
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Review Neuroscience*, 11, 127–138.
- 福島宏器 (2018) 身体を通して感情を知る—内受容感覚の感情科学— 心理学評論 (掲載巻, ページを記載)
- Herbert, B. M., & Pollatos, O. (2012). The body in the Mind: On the relationship between interoception and embodiment. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 692–704.
- 乾 敏郎 (2018a) 知覚・認知・運動・感情・意思決定をつなぐ自由エネルギー原理 日本神経回路学会誌, 25, 123–134.
- 乾 敏郎 (2018b) 感情とはそもそも何なのか：現代科学で読み解く感情のしくみと障害 ミネルヴァ書房.
- 片平健太郎 (2018) 行動データの計算論モデリング—強化学習モデルを例として— オーム社.
- Khala, S. S., Adolphs, R., Cameron, O. G., Critchley, H. D., Davenport, P. W., Feinstein, J. S., ... Zucker, N. (2018). Interoception and mental health: A road map. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 3, 501–513.
- Nakao, M., Bersky, A. J., Kumano, H., & Kuboki, T. (2002). Relationship between somatosensory amplification and alexithymia in a Japanese psychosomatic clinic. *Psychosomatics*, 43, 55–60.
- Nishida, Y., Tandai-Hiruma, M., Kemuriyama, T., & Hagiwara, K. (2012). Long-term blood pressure control: is there a set-point in the brain? *Journal of Physiological Sciences*, 62, 147–161.
- 大平英樹 (2015) 意思決定という虚構 中村靖子 (編) 虚構の形而上学—「あること」と「ないこと」のあいだで (pp. 317–360) 春風社.
- 大平英樹 (2017a) 予測的符号化・内受容感覚・感情エモーションスタディーズ, 3, 2–12.
- 大平英樹 (2017b) 内受容感覚に基づく行動の制御 *BRAIN and NERVE*, 69, 383–395.
- Quadt, L., Critchley, H. D., & Garfinkel, S. N. (2018). The neurobiology of interoception in health and disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1428, 112–128.
- Russell, J. A., & Feldman-Barrett, L. (1999). Core affect, prototypical emotional episodes, and other things called emotion: dissecting the elephant. *Journal of Personality and Social Psychology*, 76, 805–819.
- Seth, A. K. (2013). Interoceptive inference, emotion, and the embodied self. *Trends in Cognitive Sciences*, 17, 565–573.
- Stephan, K. E., Manjaly, Z. M., Mathys, C. D., Weber, L. A. E., Paliwal, S., Gard, T., ... Petzschner, F. H. (2016). Allostatic self-efficacy: A metacognitive theory of dyshomeostasis-induced fatigue and depression. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 550.
- Stewart, S. H., Buffett-Jerrott, S. E., & Kokaram, R. (2001). Heartbeat awareness and heart rate reactivity in anxiety sensitivity: A further investigation. *Journal of Anxiety Disorders*, 15, 535–553.
- 竹澤正哲 (2018) 心理学におけるモデリングの必要性 心理学評論, 61, 42–54.
- 寺澤悠理・梅田 聡 (2014) 内受容感覚と感情をつなぐ心理・神経メカニズム 心理学評論, 57, 49–66.
- 吉田正俊・田口 茂 (2018) 自由エネルギー原理と視覚的意識 日本神経回路学会誌, 25, 53–70.
- 吉野公三・元重朋子・荒木 勉・松岡克典 (2004) 精神課題ストレスに対する心臓血管系の生理応答を再現する離散型数値モデル 生体医工学, 42, 290–299.