第 4 章　予測する脳：その他

ここでは、われわれが様々な局面で予測しながら行動していることを示す事実を挙げてみる。それはすでに広く知られた事実を predictive coding から理解する試みの紹介でもある。「標準理論」、「統一理論」としての predictive coding の一面である。

1．他者の理解

Koster-Hale & Saxe (2013) は心の理論や mentalizing を含む他者の行動や心の理解を predictive coding の枠組みで捉えようとした。そして、生物学的運動や目標指向行動と上側頭溝（STS）、他者の信念や願望と側頭頭頂接合部（TPJ）、人々の安定した性格特性と内側前頭前野（MPFC）の 3 つのレベルで研究の紹介をしている。

他者の動きや目標指向行動と上側頭溝（STS）

STS は顔や身体の動きなどの社会的な刺激の知覚に関係し、損傷や妨害的な磁気刺激は社会的な行為の認知を妨げる（Bonda et al., 1996; Allison et al., 2000; Battelli et al., 2003）。そして、predictive coding は次のように予測する：観察した行為が予測されたものならば STS の反応は減少し、予測しにくいものならば反応は高まる。ただし、STS は運動そのものよりは首尾一貫した、合理的な行為を予測していると考えられる。

Saxe et al. (2004) の実験では、いわゆる occlusion 事態で、歩行者が衝立に隠れ再び現われ見えるようになる。観察者は歩行者の歩行速度で再び現れる時間を推測する。実験では短い occlusion と不自然に長い occlusion を用意した。後者では予測誤差が発生すると考えられる。結果を下に示すが、長い occlusion の条件で、右の STS の活性が高まっていることが分る。かれらは STS が意図的な行為の表象に関係すると考えている（図 4-1）。

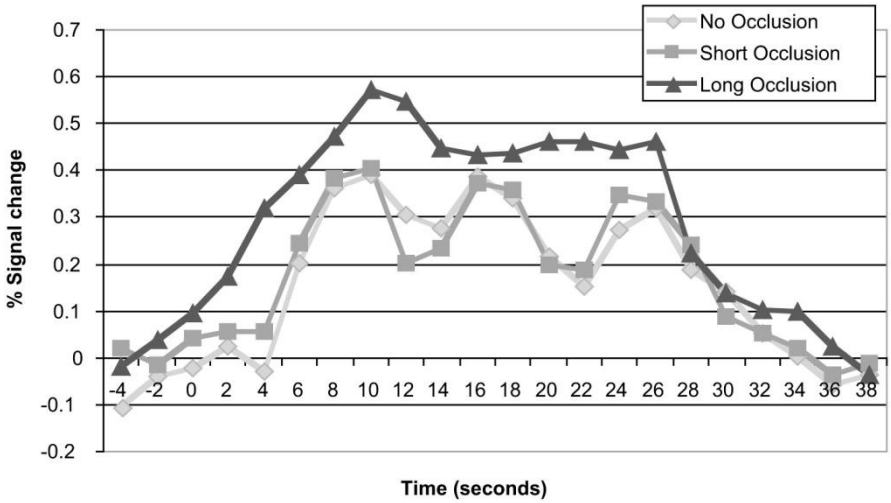

図 4-1. Saxe et al. (2004) の歩行の occlusion の実験結果。不自然な長い occlusion、すなわち大きな予測誤差で右 STS の活性が上がっている。

また、Pelphrey et al. (2004) は卓上のもの（対象）に手を伸ばし掴むという動作を観察した場合、その対象の横の何もない空間に手を伸ばし掴む動作をすると、通常の動作と比較して、右後部 STS が強く活性化した。かれらはこの領域が他者の意図や生物学的運動のコンテクストに鋭敏であると考えている。同様な結果は Brass et al. (2007) の実験でも示された。手が空いているのに、膝で電灯のスイッチを入れる動作で STS は強く活性化した（図 4-2）。

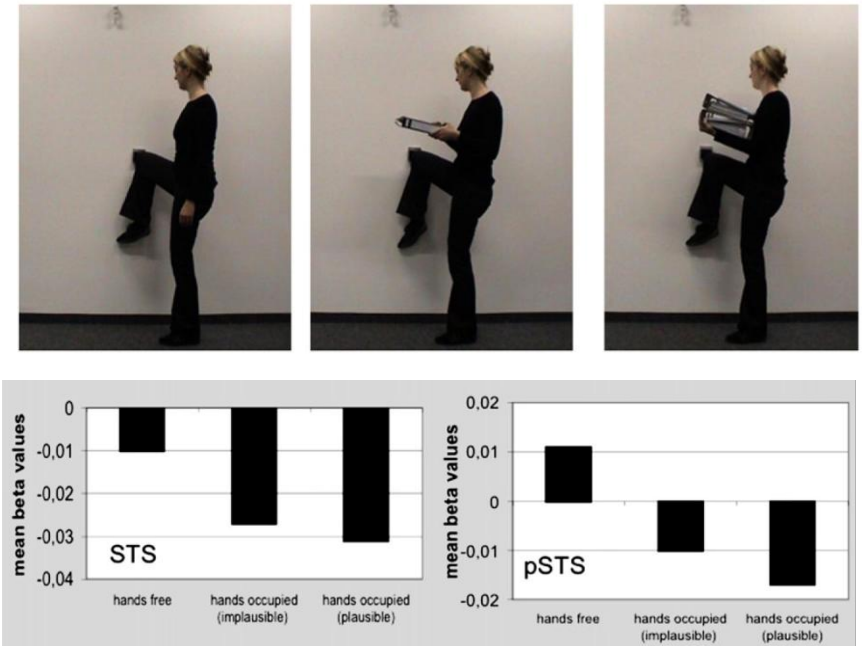

図 4-2. Brass et al. (2007) の実験。手がふさがっているので、膝でスイッチを入れる動作に比べ、手が空いているのに膝を利用する動作では、STS の活性が高い。

他者の信念や願望と側頭頭頂接合部（TPJ）

もっと長いタイム・スケールが関係する予測には、他者の信念や願望に基づくものがある。いわゆる「心の理論」に関係する予測である。TPJ が心の理論に関わることは Saxe & Kanwisher (2003) などが明らかにしてきた。predictive coding では他者の信念や願望が予測に合致しない場合、合致する場合と比較して、TPJ の活性が高くなると予測する。

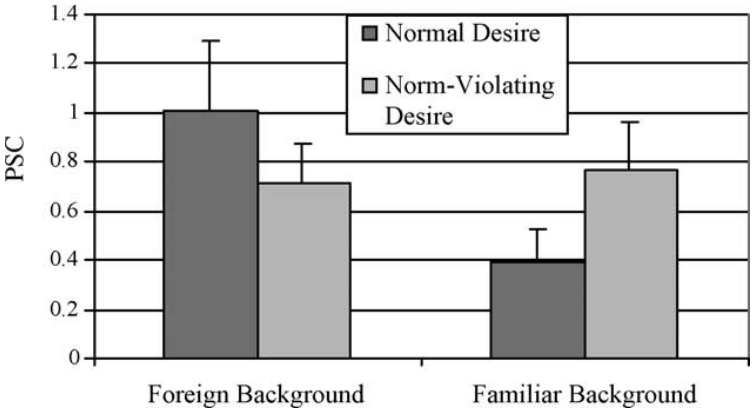

図 4-3. Saxe & Wexler (2005) の実験。左がポリアモリー、右が通常の男性に関する結果。ポリアモリーの男性が妻の浮気を酷いと思う、通常の男性が浮気を楽しいと思う incongruent な条件で、右 TPJ の活性が高い。

Saxe & Wexler (2005) は実験参加者に、通常（一夫一婦制）の男性とポリアモリー（複数恋愛）の男性について説明した後に、奥さんが浮気をした時に酷いと思うか、楽しいと思うかを紹介した。参加者は信念、主義から、通常の男性は奥さんの浮気を酷いと思い、ポリアモリーの男性は楽しいと思うと予測する。このような congruent な反応に比べ、その逆の incongruent な反応では右 TPJ の活性が高かった（図 4-3）。

アメリカの民主党、共和党は独自の主張や政策がある。Cloutier et al. (2011) はそれに合致する congruent な主張や政策と合致しない incongruent な主張や政策に対する実験参加者の反応を検討した。その結果、predictive coding が予測するように、予測誤差が大きい incongruent な政策で、両側の TPJ、内側の前頭前野で congruent な政策に比べ大きな活性が見られた。

モラル判断では加害者の意図性が問題になる（Koster-Hale et al., 2013）。例えば、被害者のピーナッツ・アレルギーを知らずに料理にピーナッツを入れた場合と、知っていて入れた場合では、加害者の行為に対する判断が異なってくる。この実験では fMRI データに decoding が適用されたが、右 TPJ で意図性の有無の decoding が可能だった。すなわち、この領域が意図の有無で反応が異なっていた（図 4-4）。

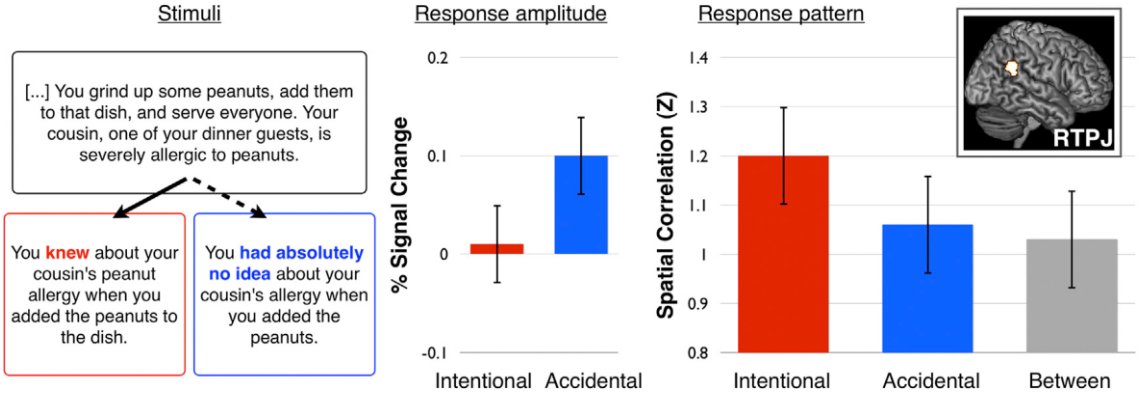

図 4-4. Koster-Hale et al. (2013) の RTPJ での結果（Koster-Hale & Saxe, 2013 より）。意図なしの方が活性が強い（中央）が、decoding では意図ありの方が安定した反応が見られた。これは第 1 章の Kok et al. (2012) の結果に対応する。

他者の好みや性格と内側前頭前野（MPFC）

Behrens et al. (2008) はゲームで答えをアドバイスする忠告者を導入した。アドバイスはある時は実験参加者の選択にプラスに働き、ある時は逆に働くようになっていた。この場合、忠告者（アドバイス）に関する prediction error が発生する。fMRI による計測では、背内側前頭前野（右の側頭頭頂接合部/上側頭溝、中側頭回でも）で、アドバイスに関する prediction error と正の相関をする活性が見られた。

上の Cloutier et al. (2011) は政党に関するものだったが、個人の立場、主張に関する研

究がある。Mitchell et al. (2006) はリベラル、コンサーバティブな考えの持ち主が、それぞれリベラル、コンサーバティブな他者に対応した時の脳の活性を検討すると、自己と異なる立場に対して、自己と同じ立場と比べて、背内側前頭前野で活性が高かった（図 4-5）。

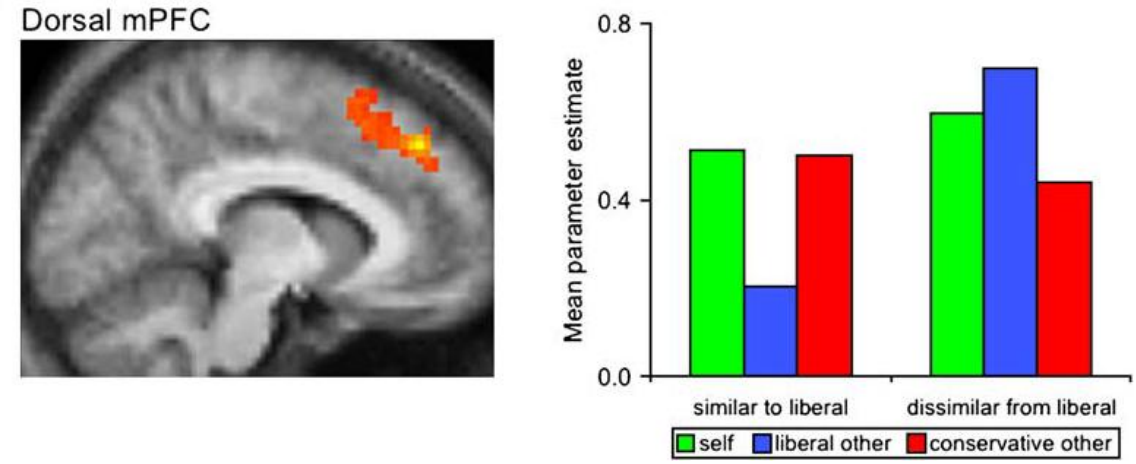

図 4-5. 棒グラフの左はリベラル、右はコンサーバティブな人の自己、リベラル、コンサーバティブな他者に対する背内側前頭前野（左図）の活性。自己の立場と似た他者よりも異なる他者で活性が強い。Mitchell et al. (2006) より。

Mende-Siedlecki et al. (2013) は顔と 5 つの行動を対にして実験参加者に提示した。行動はすべて positive なものと、すべて negative なもの、最初の 3 つは positive (negative) 後の 2 つは negative (positive) の 3 条件あった。この前後で変化する条件では prediction error が発生する。背内側前頭前野では行動が一定の条件では初めの 3 つに比べ、後半の 2 つの行動で活性が低下したが、行動が変化する条件では、活性が上昇した。prediction error に対する反応と考えられる（図 4-6）。

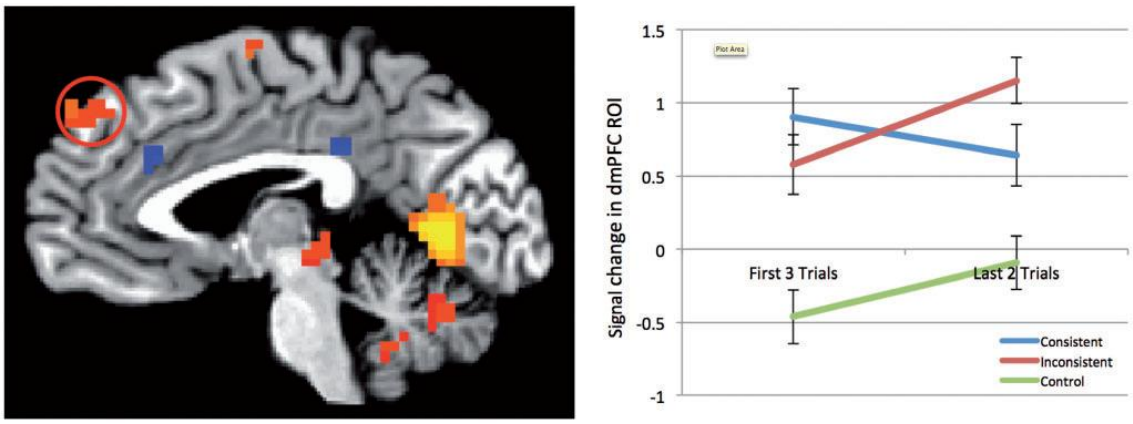

図 4-6. 背内側前頭前野（赤丸の部分）では、行動が変わらぬ条件では活性が低下し、変わる条件では活性が上昇した。Mende-Siedlecki et al. (2013)より。

2．自己

ゴム手袋の錯覚

自己に関して predictive coding が問題にするのは、ゴム手袋の錯覚 rubber hand illusion（RHI, Botovinick & Cohen, 1998）や類似した複数の感覚刺激によって生じる錯覚である(Ehrsson et al., 2007; Apps et al., 2015 など)。RHI は次のような錯覚である。実験参加者はゴム手袋に触覚刺激が与えられるのをみる。一方、自分の手にも同期して触覚刺激が与えられるが、それをみることはできない。このような状況で触覚刺激を繰り返すと、ゴム手袋を自分の手のように感じる錯覚が生じる（図 4-7）。一方、自分の手に関しては所有感が弱まる。RHI や関連する錯覚の重要性は、身体の表象といえども可塑的で、更新される対象であることを示した点にある。

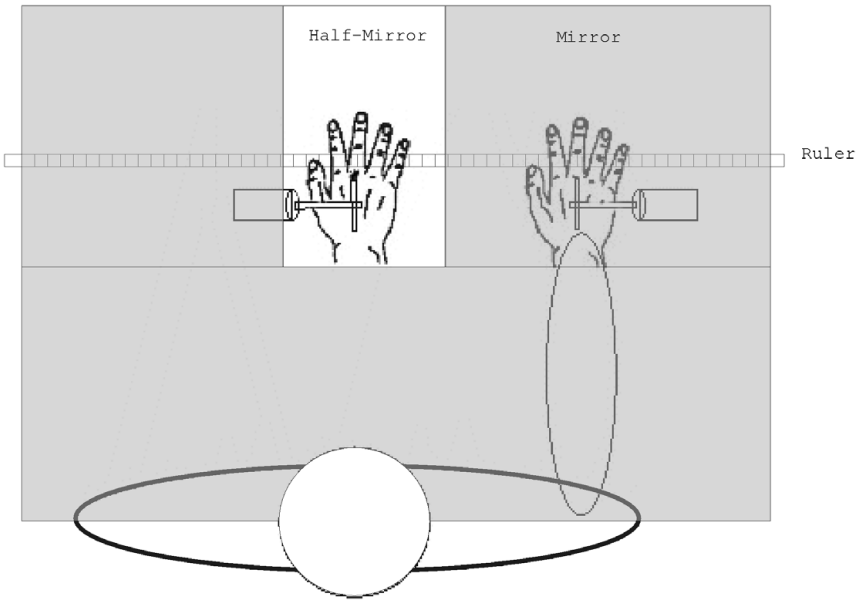

図 4-7.
ゴム手袋の錯覚の実験の一例。Costantini & Haggard (2007) より

Predictive coding による RHI の説明

これまでの RHI の説明は次のようなものだった。すなわち、視覚と触覚による刺激は、視覚による捕捉 capture によって、自己の表象に変化を引き起こし、また、視覚的な補足に従って身体の枠組みが更新される。これに対して、predictive coding では一つの感覚系における bottom-up の予期せぬ surprising な事象を、もう一方の感覚系からの情報をより高次の多感覚ノードで統合し、top-down 的に説明することを基本にしている（Apps & Tsakiris, 2014）。Bayes 流の最適な推定である。自分の手が見えない状態で、ゴム手袋に与えられる触覚刺激と自分の手に与えられるそれが同期することは surprising である。ま

た、ゴム手袋へのタッチがタッチの感覚を生み出すのも surprising だろう。これらの surprising は多感覚領域からの top-down 効果により説明される。また、知覚学習が働き、身体（腕）の表象を更新する。その結果、ゴム手袋が自分の手であるように変化することにより surprising でなくなる（Apps & Tsakiris, 2014）。図 4-8 は RHI で錯覚が生じる前の surprising な入力を受けている状態である。左が体性感覚系（一次、二次の体性感覚野、S1, S2）、右が視覚系（一次視覚野 V1 と有線領外身体領域 EBA）で、上が多感覚領野（右の頭頂側頭接合部 rTPJ、運動前野 PMC、前部島皮質 AI）である。赤い矢印が surprising な bottom-up な入力、緑の矢印が錯覚を説明するようになる top-down の出力である（ただし、この図ではまだ explain away できていない）。

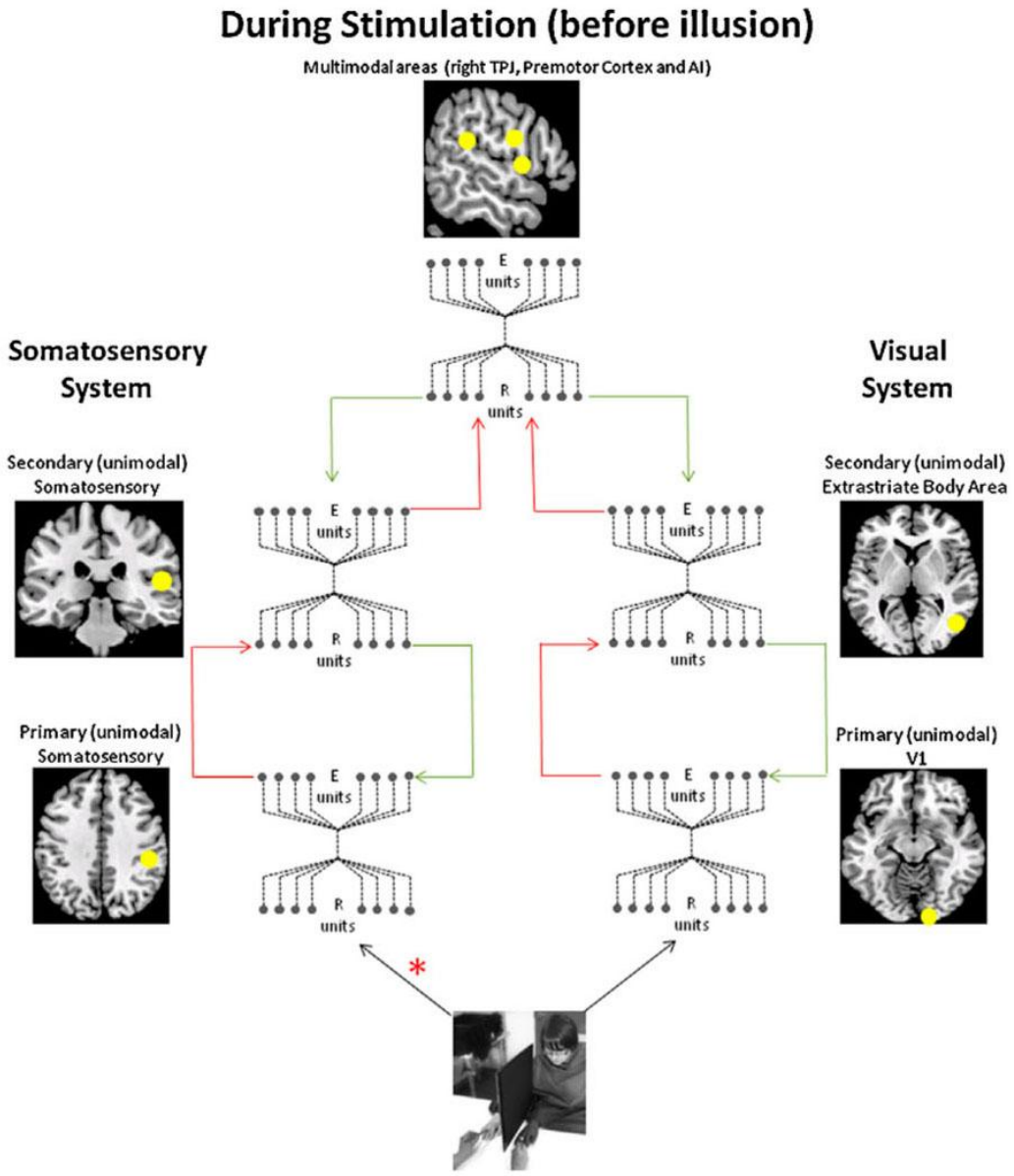

図 4-8. RHI 生起の途中経過の説明（Apps & Tsakiris, 2014 より）。

RHI の脳研究

しかし、Apps & Tsakiris (2014) によると、論文が発表された時点では、predictive coding の立場から RHI と脳の関係を直接検討した研究はない。その後の発展も含め、これらを含む脳領域と RHI との関係を紹介するとともに、predictive coding の説明の可能性を考えてみたい。年代順にたどってみる。最初の RHI の脳画像研究は Ehrsson et al. (2004, 2006) のものである。かれらは手の向き (congruent, incongruent) と触覚刺激のタイミング (同期、非同期) の 4 条件を設け、RHI に関連する脳領域を検討した。かれらはサルの研究から、多感覚 multisensory の領域、頭頂葉や腹側運動前野が RHI に関係すると予想した。当然、congruent で同期の条件で RHI が最も生じやすい。fMRI の結果は両側の腹側運動前野 PMC が RHI で活性が上昇した。この PMC の活動は錯覚の程度と正の相関を示した。RHI の開始との関係では、開始前と比較して、左の PMC が開始後に大きな活性を示した。右の小脳でも PMC と同様の活性がみられた。また、左頭頂皮質（頭頂間溝 IPS）でも RHI と関連した活性がみられた。かれらは RHI が生じる前の活性も捉えている。これは図 4-8 に対応する時期である。それによると、両側の頭頂間溝、両側の背側運動前野、補足運動野 SMA、左小脳、左被殻、左腹側視床で活性がみられた。これらは高まった prediction error やそれを説明しようとする top-down の活動に関係する可能性があるが、predictive coding から予想される感覚皮質での活性は見られていない。

Tsakiris et al. (2007) も類似した条件を設け、RHI を PET で研究した。かれらはゴム手袋の方へ自分の手が移動すると感じる現象 proprioceptive drift を錯覚の指標としている。かれらは右の後部島皮質、右の前頭弁蓋部で錯覚と正に相関する活性をみた。一方、対側の体性感覚皮質の活性は錯覚と負に相関した。かれらは PMC で RHI に関係する活性をみていない。実験手続きや RHI の出現時期、脳の計測法の違いが関係すると考えている。体性感覚野の結果についての predictive coding からの解釈の可能性は後で述べる。

Guterstam et al. (2013) の実験は、ゴム手袋がない empty space の条件でも錯覚が生じ、関係する脳領域は Ehrsson らのそれと一致した。撹乱的な磁気刺激 TMS の研究が二つあ

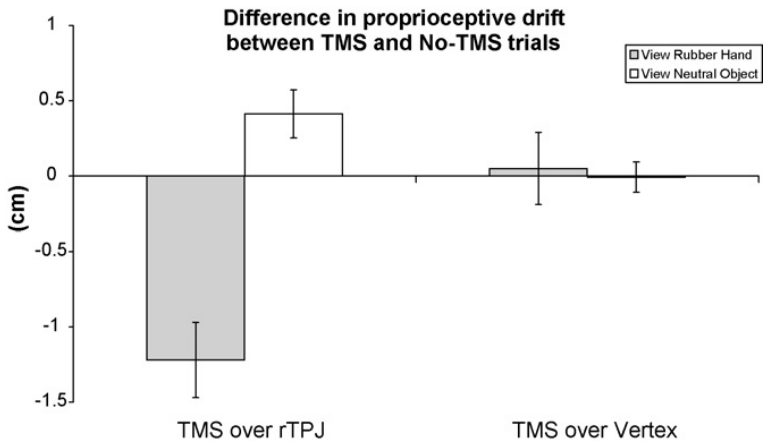

図 4-9. Tsakiris et al. (2008) の TMS を rTPJ に与えた実験の結果。縦軸は TMS 条件と No-TMS 条件の比較で、値がマイナスは RHI が減少していることを示す。灰色のバーはゴム手袋、白バーは中性の物体。

り、右頭頂側頭接合部 rTPJ（Tsakiris et al., 2008、図 4-9）と下頭頂小葉 IPL（Kammers et al., 2008）に与えられた TMS は RHI を弱めた。これらの領域が RHI に関与することを示し、脳機能画像研究とも整合的だが、predictive coding との関連は不明である。

Press et al. (2008) は RHI の事象関連電位 ERP 研究を行っている。RHI の訓練を行い、その後のテストで与えられる触覚刺激に対する誘発反応を調べた。ゴム手袋とゴムの物体をみる二つの群があり（hand, object）、それぞれ訓練は手（右、左）、視覚-触覚刺激（同期、非同期）の条件がある。また、テストでは訓練で使用した手、反対の手（compatible, incompatible）に触覚刺激が与えられ、ERP が計測された。その結果、同期刺激条件では第 2 次体性感覚野 S2 の活動を反映すると考えられている N140 の振幅が Cz, C3, C4 のチャンネルで非同期条件よりも大きかった。この結果は hand, object 両群でみられた。S2 では対象（hand/object）を区別していないようだ。一方、200ms-450ms の間では positive な波形がみられたが、hand 群の同期条件でテストの手（compatible と incompatible）の条件に差があり、compatible の方が振幅が小さかった。非同期条件ではその差は見られなかった。Object 群では両方の手の条件に同様の方向の差がみられたが、同期、非同期条件間には差がなかった。この遅い成分に関して、すでにある身体像が絡む体性感覚的な注意に関係すると考えられた。これらの初期、後期の ERP 成分は predictive coding における surprising や top-down の説明に関係する可能性がある。特に、後期の成分は explaining away に関係するかもしれないが、この実験は訓練が終わった 後の ERP 実験で、且つ RHI のデータとの関連が不明である。また、体性感覚性の ERP 反応と考えられるが、発生源は明確でない。

Zeller et al. (2011) は脳卒中の患者で RHI の実験を行った。RHI が生じなかった患者は島皮質などの近傍の白質に障害があった。健常者でこの領域の線維連絡を tractography で辿ると、腹側運動前野、前頭弁蓋部、さらには前頭葉、頭頂葉、大脳基底核、小脳と結びついていた。Ehrsson らの結果を補強するデータである。

Gentile et al. (2013) は RHI の論文ではない。参加者がみるのは自分の手の 3D 的な映像である。ただし実験条件は RHI のそれと類似している。視覚、触覚、自己受容感覚の統合と自己の身体の所有感の関係を検討した。不一致は視覚と触覚、さらに自己受容感覚で起こる。視覚と触覚が時間的（1.25 s）にずれ、また、空間的（人差し指と手の甲）に異なる。また、自己受容刺激のずれに関しては、映像の手はテーブル上にあるのに、実際の手はひっこめられた状態にある。所有感に関しては、質問紙と映像の手に加えられる危害の予期（包丁）に対する皮膚伝導反応 SCR で測定した。その結果、視覚と触覚が一致する条件では、RHI 実験と同じように、腹側運動前野、頭頂間溝、右小脳、縁上回、有線領外身体領域 EBA を含む外側後頭皮質 LOC が高い活性を示した。そして、左頭頂間溝を seed とした機能結合の分析では、一致条件でこれらの領域の結合が高まっていた。自己受容感覚に関してもほぼ同様の結果だった。そして、これら 3 つの感覚野一致条件では、大きな SCR の反応がみられた。ナイフに対して左前部帯状回、右前部島皮質、右運動前野、右脳で高い

活性がみられた。また、腹側、背側の運動前野、右の LOC の活性と SCR が正の相関を示した。これらの結果から、ちょうど RHI と逆の結論で、多感覚の統合が弱まると、自己の身体の所有感が弱まると結論した。

Limanowski et al. (2014) は fMRI で RHI と脳の関係を検討した。比較は視覚と触覚刺激の同期、非同期である。かれらは対側の EBA と両側の AI で同期条件で高い活性をみた（図 4-10）。そして、EBA の活性は RHI の程度と正の相関をしていた。なお、機能結合の研究では、RHI 中に S1 は EBA と強い結合を、EBA は側頭－頭頂の多感覚領域と結びつきが強いことを示した。同じグループの Wold et al. (2014) は、EBA の機能を更新させる磁気刺激 TMS 後に、同期条件で RHI が増加するのをみた。単一のモダリティの領域も RHI で活性が高まる。

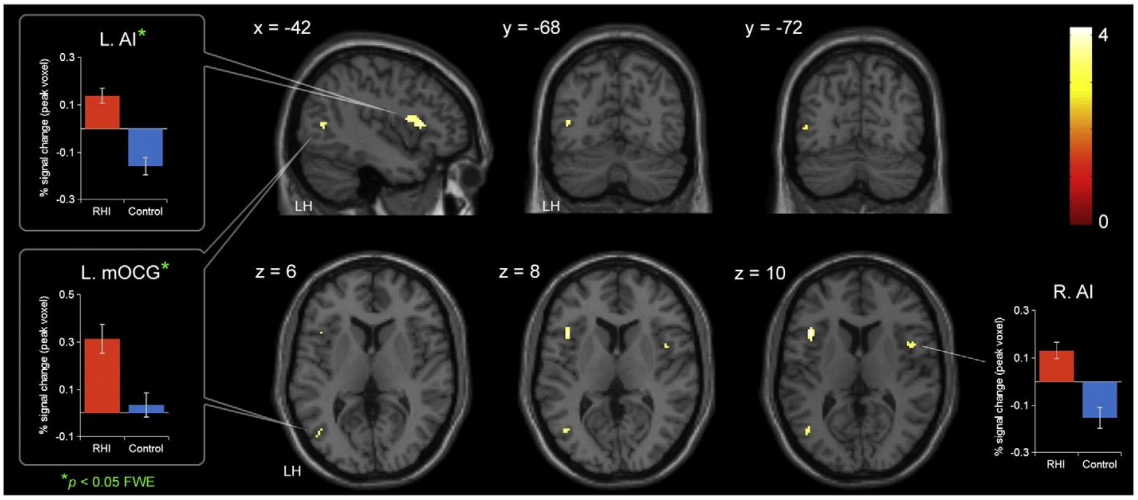

図 4-10. Limanowski et al. (2014) の結果。AI は前部島皮質、mOCG は EBA が含まれる領域で、赤い棒グラフは RHI の条件、青はコントロール。

自分の顔に与えられる触覚刺激に同期させて他者の顔の同じ部位に触覚刺激を与えるのをみると、他者の顔が自分の顔のように思えてくる錯覚がある。Apps et al. (2015) は右の TPJ、右の IPS、右の下後頭回 IOG（特に後頭顔領域 OFA）が、最も錯覚が起きやすい同じ顔部位、同期した触覚刺激で活性化した。脳内視覚系で OFA は EBA と同じレベルと考えられるが、Limanowski et al. (2014) に対応する結果になった。Apps らは unimodal の感覚領野と多感覚領野とのインタラクションの重要性を強調している。このインタラクションについて、predictive coding は仮説を提案しているのだが、それはまだ証明されていない。Limanowski & Blankenburg (2015) は RHI 実験で、腹側運動前野、頭頂間溝 IPS、EBA を含む外側頭頭側頭皮質 LOC の活性を確認し、これらの領域間の機能結合を検討した。その結果、錯覚時にはこれらの領域間の機能結合が増大したが、方向性に関しては、LOC や第 2 次体性感覚野から IPS への結合性が増大した。かれらはこれを predictive

coding の考えに従い、感覚系から多感覚の統合領域へ上行する予測誤差に対応すると考えている。

Zeller et al. (2015) は predictive coding に基づく RHI の ERP 研究である。Friston も共著者になっている。3 条件あり、触覚刺激が実際の手、見えない実際の手とプラスチックの手の同じ部位（congruent）、異なる部位（incongruent）に与えられる。2 番目が通常の RHI の手続きである。左右の手で実験を行ったが、右手（利き手、左脳）でより明確な結果が得られた。結果は非常に早い（約 50ms）negative の成分が中心溝の前後、上頭頂小葉、下頭頂小葉から記録され、congruent, すなわち RHI が生じる条件で振幅が小さかった。また、同様の潜時で中心溝の後部、下頭頂小葉から incongruent の方で振幅が大きい positive な波が記録された。RHI におけるこの抑制的な現象を predictive coding では次のように説明する。実験事態では 2 つの仮説が考えられる。一つは、見える手は自分の手ではなく、その手と自分の手に同期して触覚刺激が与えられている、という仮説。もう一つは、見えそして感じる手は自分の手である、という仮説。前者の仮説はありそうもなく、後者の方が単純である。しかし、手の位置を知らせる自己受容情報は後者の錯覚の仮説と一致しない。これらの不一致は自己受容や触覚刺激入力を不確実にし、精度 precision を下げる。Predictive coding 説では、自己受容や触覚入力の予測誤差を下げ、top-down の予測に影響を与えないようにすると考える。これにより、体性感覚やそれに関連する下頭頂小葉（もっと限定的に、一次体性感覚野と前部頭頂間溝領域）の活性が低下する。この結果は、PET による Tsakiris et al. (2007) の結果や、RHI で自己の手の所有感が減少するという多くの報告と整合的である。今後、predictive coding による説明の妥当性の検討には、RHI が生起していく過程など多くの研究が期待される。

3．情動

情動に関しても、predictive coding による理解がある（Seth, 2013）。図 4-11 は運動

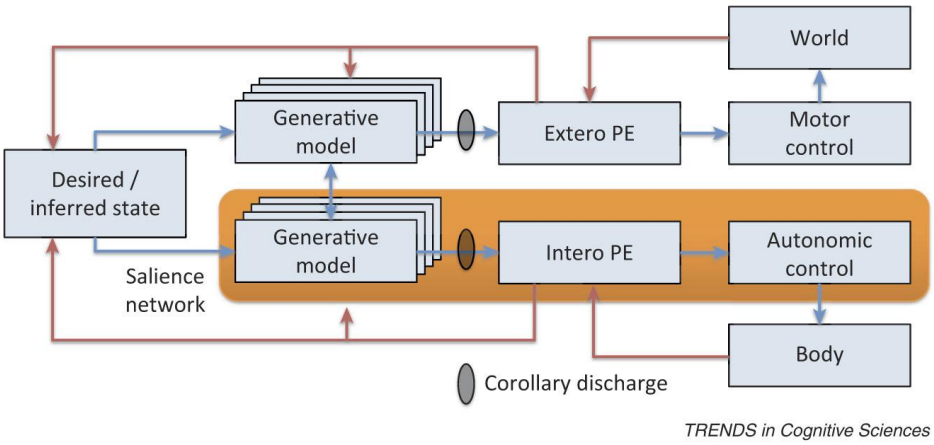

図 4-11. Seth, 2013 による内受容感覚の推論のモデル。運動系と対応。

系に対応させた内受容感覚系の推論についてのモデル。Generative model が top-down 的に推論、予測を行い、身体の実際の自律神経反応との間の予測誤差 PE に基づいて推論、予測を修正する。実際の神経系は図 4-12 のようになっていると思われる。 このような考え

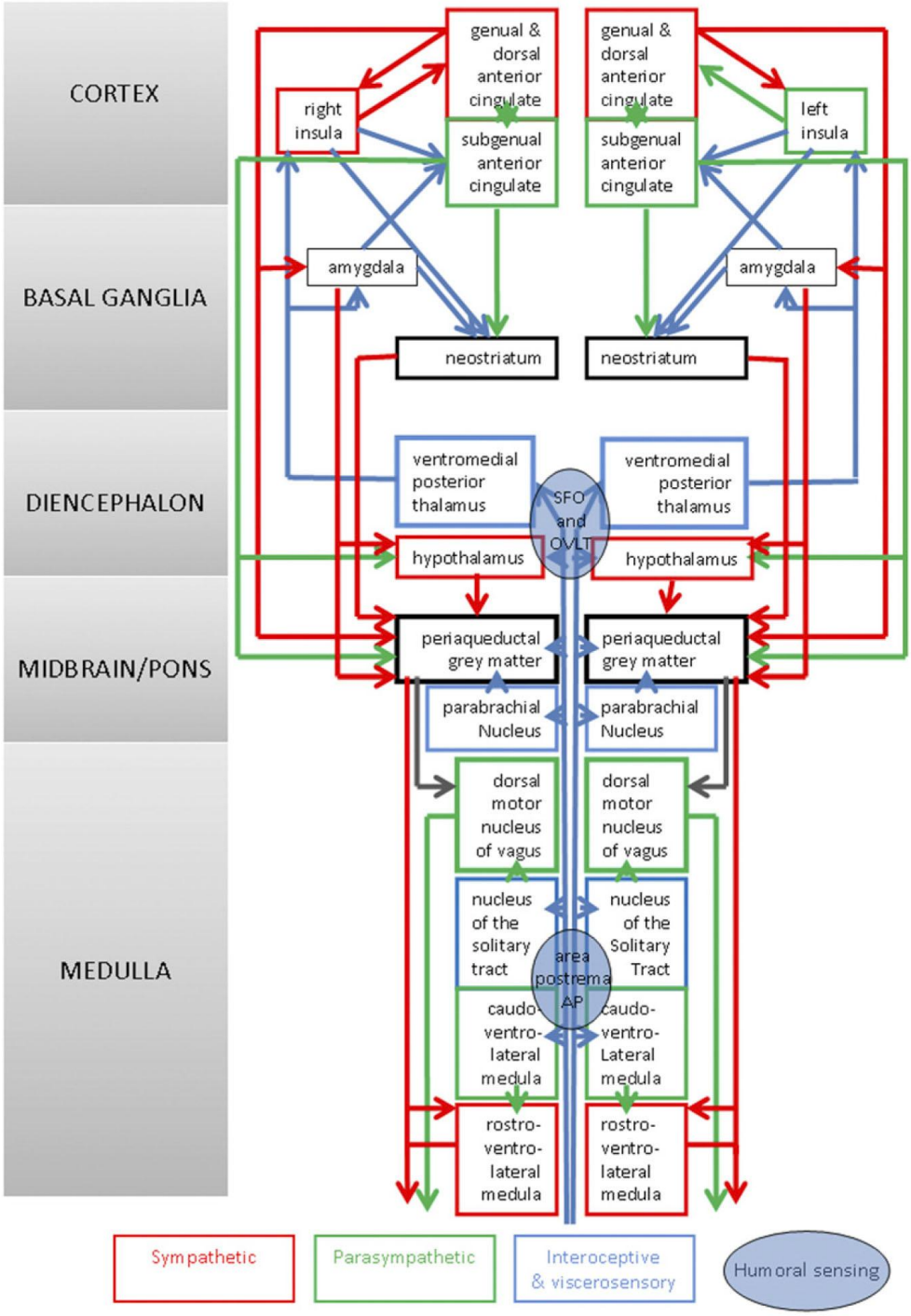

図 4-12. Critchley & Harrison (2013) による自律神経系の上行路と下降路のモデル。青が内受容、内蔵系、赤が交感神経系、緑が副交感神経系、楕円は体液感知。

は James-Lange 説に源があり、appraisal theory に発展した。すなわち、情動的な経験は生理的変化と認知的な appraisal の結合によって決まると考える。すなわち、認知的、top-down 的な要素が含まれる。

では predictive coding の考えは、脳との関連で情動をどのように考えているのだろうか。Seth (2013) はこの図 4-12 の前部島皮質 anterior insula の役割を重視している。島皮質の前部が有害刺激の予期に関係することは知られている（有害刺激そのものはより後方で受容される。Ploghaus et al., 1999; Lovero et al., 2009 など）。Seymour et al. (2004) は連続する 2 つの手掛かり刺激（条件刺激）と強弱 2 つの有害刺激（無条件刺激）を用いた条件づけの研究で、予期（予測）と予測誤差に対応する反応を右前部島皮質に見出した。これらの結果は、無論、predictive coding の考えを直接的に証明するものではない。今後、より密接な理論の予測と対応する脳の活動の検討が望まれる。

４．文の理解

恐らく、predictive coding の考えが最も理解しやすいのは言語の領域と思われる。他者の談話を聞いていて、単語を白紙の状態で受容してからそれを解釈していたら、とても間に合わない。話題の文脈の中で、われわれはさまざまな予測を行いながら、話を聞いている。無論、それは書かれた文の理解でも起こるし、文の生成面にも現われる。すなわち、ワープロで文を書いている時のタイプミスに、文の先にある母音や子音がでてきてしまうことはしばしば経験するところである。

以下は Miyake et al. (1994) の多義語の実験である。かれらは moving window paradigm で次の文章を提示した。すなわち、反応により一つの単語が提示され消えていく。文 1), 2) では boxer が多義語で拳闘家とも犬のボクサーともとれる。文は途中までは同じで、それに続く下線部分が異なる。この部分を曖昧解除句という。

1) Since Ken really liked the boxer, he took a bus to the nearest <u>sports arena to see the match.</u>

2) Since Ken really liked the boxer, he took a bus to the nearest <u>pet store to buy the animal.</u>

一般に、boxer という単語をみた時、人は犬よりも拳闘家を思い浮かべる傾向が強い。したがって、2)の文を読んだとき、曖昧解除語 pet でそれまでの boxer や文の理解を変える必要がある。それは prediction error への反応と考えられ、反応時間の増加として捉えられる。この実験はリーディング・スパンの実験だが、われわれが先をみながら、予測をしながら

文を理解していることを示す実験でもある。

Clos et al. (2014) は degraded な文（談話）の遅延見本合わせ課題で、見本文 prior, reference の影響を検討している。見本がテスト文 target とマッチしていれば、課題の成績が上がるが、ミスマッチでは成績は上がらない。この研究は fMRI に記録も行っており、マッチの条件では左の中側頭回、角回に活性がみられ、これらの領域が意味の抽出に関係すると考えられている。一方、後者のミスマッチの条件では左の下前頭回（Broca 野）が活性化し、それは decode できない degraded な文に意味ある情報を探し求めることに関係すると考えられた。

著者らはこれらの脳活動を predictive coding の立場から解釈し、左の角回、中側頭回は prediction に重要で、下位の聴覚処理の領域に prediction を送る可能性を考えている。また、角回が top-down 的に中側頭回に prediction を送ることも考えている。一方、Broca 野に関しては prediction error に関係するかもしれないと考えている。さらに、prediction error は別のところで発生し、Broca 野は prediction の更新に関係する可能性なども考えている。著者らも述べているように、これらが唯一の解釈でもなく、さらに predictive coding の立場からの研究が必要である。

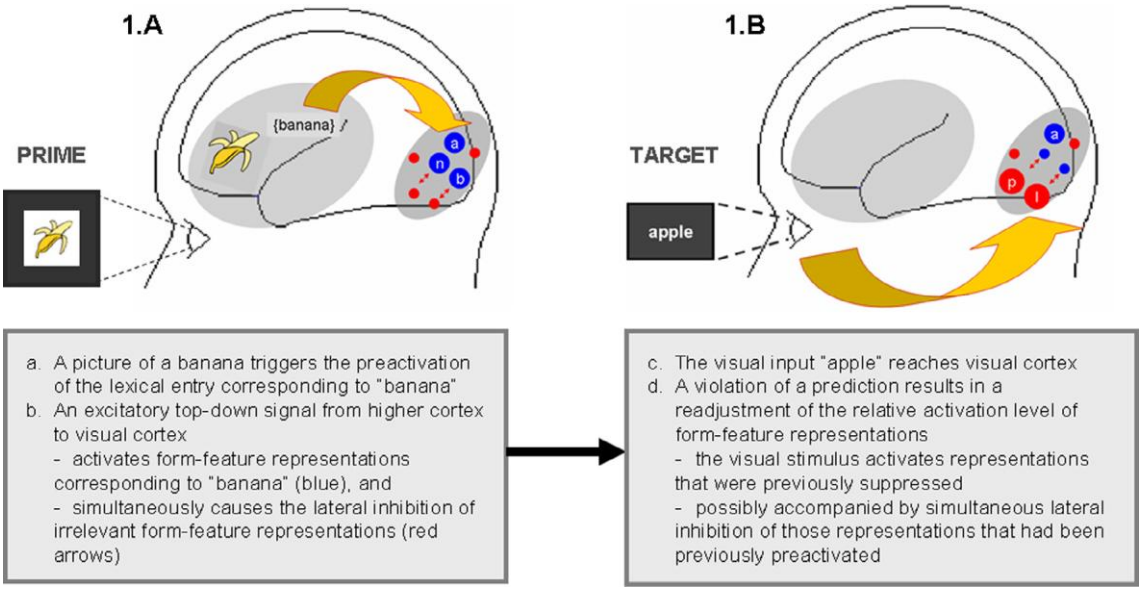

図 4-13. Dikker & Pylkkänen (2013) の予測と不一致についての仮説。

Dikker & Pylkkänen (2013) は脳磁図 MEG で、top-down 的に prediction が働くことを示した。この実験では、prime として絵が target として単語が提示される。prime には特定の単語を予測させるもの（例えば、リンゴ、+PRED）や予測できないもの（例えば、買物袋、－PRED）がある。prime と target の間には一致 MATCH と不一致 MISMATCH の

条件がある。上の図 4-13 は+PRED で MISMATCH の例である。この図は著者らの仮説で、バナナの絵が top-down 的に視覚野の単語 banana の要素を活性化させる（1.A）。右の 1.B は target として単語 apple が提示された、すなわち、MISMATCH が起きた時の脳の活動についての仮説である。

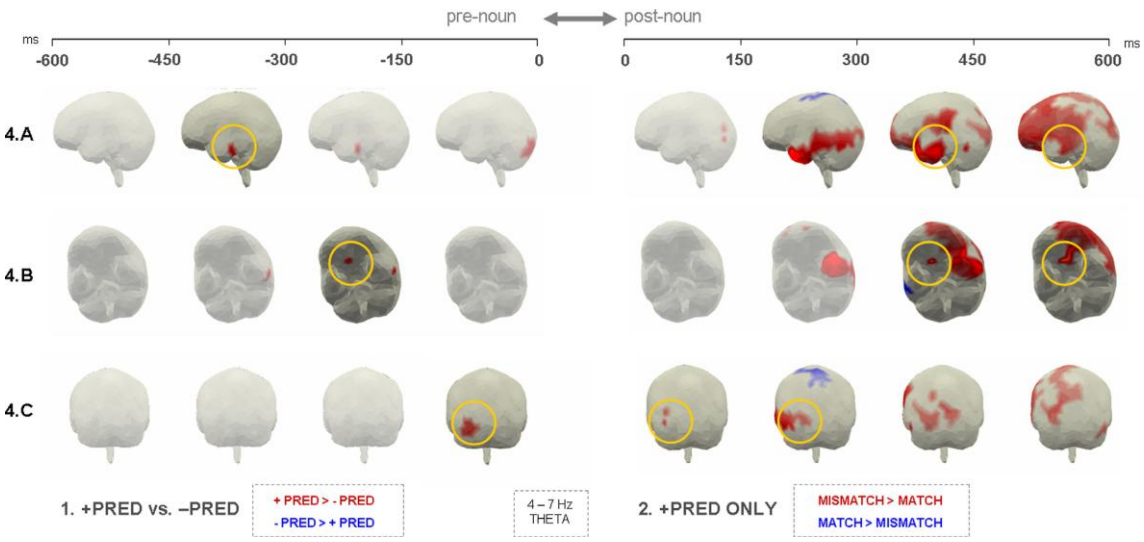

図 4-14. Dikker & Pylkkänen (2013)の MEG（4-7 Hz, theta）の結果。詳細は本文参照。

図 4-14 に結果を示す。左が prime 提示期の target 提示前で、+PRED>－PRED の反応（赤。逆の活性は見当たらない）。右が target 提示後の主に MISMATCH>MATCH（赤）、MATCH>MISMATCH（青）にたいする反応である。黄色の円は、4.A は左中側頭皮質（語彙アクセスに関係）、4.B は腹内側前頭前野（top-down 処理に関係）、4.C は視覚野（予測された語形要素の予期的活性に関係）である。target 提示前にはこの順番で活性が起こっている。一方、MISMATCH, すなわち、prediction error では視覚野が真っ先に活性化し、その後に腹内側前頭前野、中側頭皮質が活性化している。この prediction と prediction error の時間経過は predictive coding の考えに合致するが、さらに研究が必要だろう。

この章で『予測する脳』を終了する。全体を通して、predictive coding の理論が多くの領域に適用されていることはご理解いただけたと思っている。ただ、脳に関しては研究が遅れており、多くの研究者を十分に納得させる状況にはない。その点も分っていただけたと思う。その意味で、これからに期待できるし、楽しみでもある。各章のいろいろな意味での統一が十分でなく、内容、デキがバラバラだったことをお詫びします。

引用文献

Allison, T. et al. (2000) TICS, 4:267-278.

Apps, M.J.A. et al. (2015) CC, 25:46-55.

Apps, M.J.A. & Tsakiris, M. (2014) NSBBR, 41:85-97.

Battelli, L. et al. (2003) Neuropsychologia, 41:1808-1816.

Behrens, T.E.J. et al. (2008) Nature, 456:245-249.

Bonda, E. et al. (1996) JNS, 16:3737-3744.

Botovinick, M. & Cohen, J. (1998) Nature, 391:756.

Brass, M. et al. (2007) CB, 17:2117-2121.

Clos, M. et al. (2014) HBM, 35:61-74.

Cloutier, J. et al. (2011) Neuroimage, 57:583-588.

Costantini, M. & Haggard, P. (2007) CoCo., 16:229-240.

Critchley, H.D. & Harrison, N.A. (2013) Neuron, 77:624-638.

Dikker, S. & Pylkkänen, L. (2013) BL, 127:55-64.

Ehrsson, H.H. et al. (2004) Science, 305:875-877.

Ehrsson, H.H. et al. (2006) JNS, 25:10564-10573.

Ehrsson, H.H, et al. (2007) PNAS, 104:9828-9833.

Gentile, G. et al. (2013) JNS, 33:13350-13366.

Guterstam, A. et al. (2013) JCNS, 25:1078-1099.

Kammers, M.P.M. et al. (2008) JCNS, 21:1311-1320.

Koster-Hale, J. et al. (2013) PNAS, 110:5648-5653.

Koster-Hale, J. & Saxe, R. (2013) Neuron, 79:836-848.

Limanowski, J. & Blankenburg, F. (2015) HBM, 36:2284-2304.

Limanowski, J. et al. (2014) Neuroimage, 86:514-524.

Lovero, K.L. et al. (2009) Neuroimage, 45:976-983.

Mende-Siedlecki, P. et al. (2013) SCANS, 8:623-631.

Mitchell, J.P. et al. (2006) Neuron, 50:655-663.

Miyake, A. et al. (1994) JML, 33:175-202.

Pelphrey, K.A. et al. (2004) JCNS, 16:1706-1716.

Ploghaus, A. et al. (1999) Science, 284:1979-1981.

Press, C. et al. (2008) JCNS, 20:312-323.

Saxe, R. et al. (2004) Neuropsychologia, 42:1435-1446.

Saxe, R. & Kanwisher, N. (2003) Neuroimage, 19:1835-1842.

Saxe, R. & Wexler, A. (2005) Neuropsychologia, 43:1391-1399.

Seth, A.K. (2013) TICS, 17:565-573.

Seymour, B. et al. (2004) Nature, 429:664-667.
Tsakiris, M. et al. (2007) CC, 17:2235-2244.
Tsakiris, M. et al. (2008) Neuropsychologia, 46:3014-3018.
Zeller, D. et al. (2011) JNS, 31:4852-4857.
Zeller, D. et al. (2015) JCNS, 27:573-582.

雑誌の略称

BL: Brain and Language
CB: Current Biology
CC: Cerebral Cortex
CoCo: Consciousness and Cognition
HBM: Human Brain Mapping
JCNS: Journal of Cognitive Neuroscience
JML: Journal of Memory and Language
JNS: Journal of Neuroscience
NSBBR: Neuroscience and Biobehavioral Reviews
PNAS: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America
SCANS: Social Cognitive and Affective Neuroscience
TICS: Trends in Cognitive Sciences
TINS: Trends in Neurosciences