

第3章 “向社会的” 共感の心理・生物学的メカニズム

野村 理朗 (京都大学)

社会的な動物であるヒトにとって、適応上欠かすことができないコミュニケーションの語源であるラテン語の *communicare* は、「(他者との) 共有」を意味するという点で示唆的である。たしかに、我々は、共有されるさまざまな文脈や事象はもちろん、互いに類似する生物学的構造・機能という共通項に立ち、他者の心情や考えを理解し、これに共感しうる。それは他者の「心」を完全に知ることのできないという制約下の、推論にすぎないプロセスに依拠するものである。しかし、それがある程度有効に機能してきたであろうことは、過去に築かれ、維持されてきた高度な社会に纏わる歴史が物語る。とりわけ向社会的行動を動機づけ、他者への攻撃的行動を抑制するといった心理社会的機能の基盤である共感性 (empathy) (Batson et al., 1995; Eisenberg & Lennon, 1980; Eisenberg, Spinrad, & Sadovsky 2005) は、非言語的な手がかりから言語的記述にいたる外部情報から他者の「心」を実感させ、刻々と変化する他者との関係の認知、これへの働きかけを促す点において、自他の架橋たる心的機能であるといえよう。

近年、共感性の研究という大きなテーマのもとに、心理学諸領域をはじめ、神経科学、近年はゲノム科学 (genomics) などの生命科学が結集し、各々のアプローチからの知見、理説を提示している。なかでも、ヒト脳活動を画像化する神経イメージングの興隆に発する領域横断的なダイナミズムは、共感性を生む心 (脳領域) の鳥瞰図の断片を見出しつつ、一部、ゲノム科学との連関を模索する活況のなかで、生体の階層構造を包括的に論じるさながら萌芽期の様相となってきた。

本章では、こうした動向を背景に、行動-脳-遺伝子という共感性に関わる心理・生物学的メカニズムの階層についての俯瞰を可能なかぎり進める。はじめに共感性の心理、発達の側面に焦点化をし、これが獲得されてゆくプロセスについて概観する。

続いて、脳領域の構造・機能について紹介し、それらがいかにして関わり合いながら共感性を発現するかについて述べる。最後に、共感性の欠如によって生じる衝動的行動の脳内機構と、その機能的調整機構に関わる遺伝子の働きについて取り上げる。

第1節. 共感する心のメカニズム

従来、共感性に関する多くの定義が提唱されており、その個々の立場は以下の三種に大別することができよう。一つは「他者の感情を体験する」という視点に重きを置くアプローチであり、例えば「他者の感情状態と同様の反応がその観察者に生じること」とするメーラビアンとイプスタイン（1972）の定義などがこれに該当する。その一方は、認知的側面を強調する立場、すなわち「他者の感情の中に自分を置き、その視点から他者を理解する」（Goldman, 1993; Hogan, 1969）という視点取得（perspective taking）の概念に相当する定義である。その両者はしばしば概念的に混同されることもあるが、近年は共感性を多次元的に捉える方法論、すなわち共感性を、感情と認知の両要素を含み、複数の因子によって構成されるとする次元のアプローチが主流となっている。例えば、デイビス（1996）による概念的モデル、すなわち共感的関心、個人的苦悩、想像性、視点取得から構成される4因子は広く知られるところだろう。

本章では、上記の概念を包括し、共感性を、運動として外化される向社会的行動を含めた広義のものとして議論する。なお、メンタライジング（mentalizing）すなわち他者の心の理解に関わる「シミュレーション仮説」（simulation theory）や「心の理論仮説」（theory of mind theory）等の代表的な諸理論に関しては第5章を参照されたい。本節では、共感性の心理発達の側面に焦点化し、以下1) 知覚された他者の運動や意図あるいはその感情について自動的に処理をする「早期-発達システム」、および2) 他者の知識や心情を表象しその内容の意識的な理解を可能とする「後期-発達システム」（Saxe, Carey, & Kanwisher, 2004）の二つに大別して概観する。

2. 模倣からはじまる共感性（早期-発達システム）

親しい友人とコミュニケーションをするとき、自然と、身振りや手振りが似たり、あるいは笑みのこぼれるタイミングが同期することもあるだろう。カメレオン効果 (chameleon effect) として知られるこうした模倣は、ひとたびラポールが形成され、対象への共感が高まるほど発現の頻度が上昇するという (Chartrand & Bargh, 1999)。この他者の動作を自らの動作へと映しかえる模倣 (身体模倣、発話模倣、行為模倣など) の機能は、他者への共感によって促され、同時に、他者と同様に自らが体験をするプロセスを担うという点で、さらなる共感行動へと我々を導く装置である。

模倣の原初的な形態は、生まれて間もない新生児より、感覚入力に対する運動反応の同調 (共鳴動作) として観察される。例えば、生後数日齢の新生児においては、養育者の発話に対して、腕や肩、あるいは頭部などがそれと同期して動く (Condon & Sander, 1974)。こうした時間的な同調に加えて、新生児は、他者の動きを模倣することも知られており、養育者が笑顔を示したり、舌を出すなどの動作をするとそれに類似した顔の動きを示す (Meltzoff & Moore, 1977) (図 1)。その模倣の対象は視覚刺激にかぎらず、他児の泣き声につられるようにして泣くという音声模倣の例も報告されている。例えば、10 数時間齢の新生児に対して、泣き声と同じ音量の雑音あるいは音のない無音状態のテープを聞かせるよりも、他児の泣き声のテープを聞かせると泣く回数が多くなるという (Simner, 1971)。こうした新生児模倣 (neonate imitation) の例は、知覚した情報をそのまま生成へと向けて変換するという、特定のモダリティに限定されない生得的機構の存在をうかがわせるものである。

自発的な模倣は、成人においても自動的、無意識的に生じうる。ディンバーグら (2000) は、顔表情の画像を閾下で無意識的に提示すると同時に、被験者の顔面筋電位を計測した。その結果、閾下呈示された怒り表情に対しては怒り表情を形成する皺眉筋 (corrugator supercilli) の活動が、喜び表情の閾下刺激により同じく喜び表情を形成する大頬骨筋 (zygomatic major) の活動が上昇することを見出している。他者の表出感情は、知覚者の意識的な気づきを経ずして、鏡に反映させるようにこれを知覚者に表出させるのである。また、表出された感情は、顔面筋の活動を通して中枢神

経系にフィードバックされ、そのパターンに対応した内的感情を生じうるため (Tomkins, 1982)、かくして、個体間の開放系のもと、互いに表出した感情は維持、増幅され、やがて拡散するにいたる。そうした原初的な模倣の発現形態は、脳内に存在する「ミラー・ニューロン」(mirror neuron) という神経細胞群によって担われているという指摘がある (後述)。

3. 感情の分化と理解、制御 (後期-発達システム)

1. 感情の分化と理解

原始反射のメカニズムにより感覚刺激に巻き込まれていた新生児は、外界からの刺激とは独立した行為であるスキーム (scheme) を基本単位として外界に意図的に働きかけられるようになる。環境への働きかけのなかで、自己と環境の分化が進むとともに対象が分化した結果、自動的に巻き込まれていた他者の感情を識別することも可能となる。さらには、自然・社会的環境との相互作用が進むなかで、自己、他者、ならびに第三者 (あるいは物) との間で成立する三項関係の表象も形成されるようになる。例えば、養育者が特定の場所 (壁など) をじっと直視していると、乳児はその視線方向を追った後、ふたたび親の顔へと視線を戻すといった具合である。注意対象を同定し、かつ養育者の意図を確認するかのようなこうした行動は、他者の視線方向を追う模倣の一形態である視線追視 (gaze following) の発展型として、共同注意 (joint attention) と呼ばれる。この共同注視の能力が獲得されることにより、他者に対して対象の存在や位置、あるいは自らの意図を示すことも可能となる。これと同時期に、未知の場面や他者を理解する際に、養育者をはじめとする他者の心情を、例えば、その表情や音声の韻律的特徴などの手がかりから主体的に参照し、自らの行動を調整することも可能となる。この社会的参照 (social referencing) と呼ばれるナイーブな志向性において、他者の承認や拒否といった社会的な手がかりの内在化が促され、文脈に応じて行動を調整しうる自律性が立ち上がるのである。

2. 自己意識的感情と行動の制御

我々は、怒りや恐れあるいは喜びといった一部哺乳類も有するシンプルな感情に加えて、心情の豊穡を深める「誇り」や「罪悪感」、あるいは「恥」といった内省的な感情を体験し、また他者のそれに対して共感しうる。いわば推論にすぎないプロセスをもって、バラエティに富む他者の心的状態について、実感をともなって理解をすることができるのである。この自己意識的感情 (self-conscious emotion) と呼ばれる内省や自己参照の過程で生じる感情 (Lewis, 1992) は、喜びや悲しみなどの生得的とされる基本感情 (basic emotion) とは区別されており、興味深いことに、自己鏡像認知 (mirror self-recognition) の成立時期と前後して生じることが報告されている (Lewis, Sullivan, Stanger, & Wiss, 1989)。

古くはラカン (Lacan, J) の理説にまで遡る「鏡像段階」である。この自己鏡像認知とは、「目の前の鏡に映っている自分が自分であることがわかる」ことであり、自己と他者に関する動きの相補性の差異の自覚がその成立における一つの契機となるのだという (加藤, 1993)。まさに、自己意識的感情は、自他の差異の認識を基礎として自身が対象化されることにおいて生ずる点で、自他を緊密に結ぶ感情、ないしは絡みあった自他表象の関数であると考えることができる。この自己鏡像認知が可能となる時期には、さらに、転んだ痛みから泣きじゃくっている友達を慰めるといった「共感行動」も現われる (Bischof-Kohler, 1991)。泣いている他者を見て、それにつられて自分も泣いてしまうこと。これは共感行動であることに違いはないが、泣いている他者を慰める行動は、分化した自他の認知にもとづくメタな共感性に由来するものである。

こうした他者の視点を、自らのそれと異なるものと認識しうる社会的視点取得 (social perspective taking) 能力は段階的に発達をし、それにともなって自己制御のスキルも熟達化し、確立される。一般的には7、8歳以降より他者の視点に立ち、他者の心的状態を推測しつつ、かつ自らの定める目標へと向けて感情や行動を適切に制御することができるようになっていわれている (Perner & Lang, 1999)。

それでは、こうした共感性に纏わる脳的各領域がいかにかかわりあい、他者への共感を促しているのだろうか。次節では、機能的核磁気共鳴装置 (fMRI: functional

magnetic resonance imaging)、陽電子断層撮影法 (PET: positron emission tomography) などの脳機能イメージング (neuroimaging) を用いた研究知見を概説しつつ、考察を進める。

第2節. 共感性の神経基盤

哲学に端を発し、社会科学や心理学による精錬を経てきた共感性に関する問いに対して、脳という実質の俎上より、新たな知見と方向性が提示されるようになってきた。脳科学の観点より精力的に研究を展開しているシカゴ大学のデセティ (Decety J.) は、共感性は四つのサブシステムから構成されるとし、その神経科学的モデルを提唱した (図 2) (Decety, 2006)。共感性の心理学的モデルと親和性のあるこのモデルは、おもに他者の感情の理解という観点に主眼を置いたものであるが、共感性の操作的定義として有益な視点となりうると思われる。そこで本節においては、同モデルを一つの指針とし、個々の脳領域の構造・機能について概説する。

1. 模倣とミラー・ニューロン

リゾラッティ (Rizzolatti G.) らのイタリアの研究グループは、サルの前運動野 (premotor cortex) に位置する F5 領域に存在するニューロンの単一計測により、他個体の目標志向的な動作の観察、ならびに知覚運動刺激の模倣時に反応するニューロンを発見した (Rizzolatti, Fadiga, Gallese & Fogassi, 1996) (図 3)。これが後に知られるミラー・ニューロンである。そのニューロン群の存在する前運動野 (BA) Broadmann's areas 6) は 1 次運動野 (BA 4)、補足運動野 (BA 8) ならびに大脳基底核 (basal ganglia) と協調しつつ運動系の組織化および制御を行っており、観察学習や模倣学習における中心的な機能を果たす (Carr et al., 2003) (図 4)。

近年、ヒトの神経イメージング研究により、頭頂領野下部に位置する下頭頂小葉 (inferior parietal lobule) (BA 40) にミラー・ニューロンと同様の機能が備わるこ

とが確認されている (Ruby & Decety, 2001)。この下頭頂小葉は、目標志向的な動作の観察および模倣時に活性化し (Iacoboni et al., 1999)、自己、あるいは他者の動作を想像するだけで活性化するなど、知覚刺激の有無に関わらず、自他の運動を共通して表象する可能性が示されている。この下頭頂小葉における表象機能において、他者の動作を自己のそれとして自動的に変換され、模倣が促されるのだろう。

なお、視知覚されるあらゆる動きは、おもに運動視の中枢である第5次視覚野 (middle temporal area) (V5/ MT) において処理されるが、他者の意図や心情の手がかりとなる視線の動きを検出したり共同注視をすると、これに加えて上側頭溝 (superior temporal sulcus) が活性化する (Hooker et al., 2003)。この上側頭溝で検出された手がかりは上述した下頭頂葉に出力され、例えば、顔の表情や腕の動きのように知覚対象が生物学的に可動なものである場合において下頭頂葉の活動を起動することから、おそらく、その機能的結合において原初的な社会性が形成されるのかもしれない。

2. 感情への共感と大脳辺縁系

動作や行為に内包される感情的要素が知覚されると、下頭頂小葉や運動前野に加えて、扁桃体 (amygdala)、前部島皮質 (anterior insula)、前頭前野内側部 (medial prefrontal cortex)、前部帯状皮質 (anterior cingulate cortex) (BA 24, 32) が活性化する。例えば、顔表情を知覚すると上記の領域は活性化し、さらにこれを模倣することにおいてその活動は顕著となる (Carr et al., 2003)。模倣という、知覚情報の符号化、および運動情報のプランニングの両者をとまなうプロセスにおいて活動が増大するという事実は、上述の領域が感情の理解と表出の両者に関わることを意味し、シミュレーション仮説を支持する見解の基盤となる。しかし、特定の神経活動により自他の共通表象が担われていることは、必ずしもシミュレーションの実行を意味するものではなく、その解釈には注意を要するものであろう (例えば Saxe, 2005)。

扁桃体は側頭葉内側部の左右に位置し、前頭前野腹内側部、視床下部 (hypothalamus)、および中脳水道灰白質 (periaqueductal gray) などとの神経連絡のもと、入力・知覚

された刺激が自己にとって安全（報酬的）なのか、あるいは脅威なのかについてすばやく評価し、運動反応指令を大脳基底核へ出力する一方、自律神経系や内分泌系の機能を修飾する構造体である。この扁桃体の働きにより、主には怒りや恐怖といったネガティブな基本的感情、弱いながらも幸福感情も検出され、こうした情感を他者とともに共有することが可能となる。こうした扁桃体によって検出される怒りや喜びといった比較的シンプルな感情（基本的感情）に加えて、我々は、「恥」や「罪悪感」などの他者の内省的な感情に対して共感をし、必要とされている行動選択をすることができる。上述の恥や罪悪感などの自己意識的感情をはじめ、他者の意図するユーモア等の速やかな処理を促す中枢が、高次脳領域に位置する前頭前野腹側内部 (ventromedial prefrontal cortex) (BA 10, 11, 13, 14) である (e.g., Moll et al., 2002)。

この前頭前野腹内側部は、ソマティック・マーカー (somatic marker) 仮説において、主に自律神経系 (autonomic nervous system) からフィードバックされるナイーブな身体感覚を表象し、これに基づいて意思決定を導くことが主張されている (Damasio et al., 1991)。本章においての議論は割愛するが、この説においては、同領域が身体反応を表象すると仮定してもなお、それに至るメカニズムが不明であるなどの問題が残る (e.g., Dunn et al., 2006)。しかしながら、少なくとも前頭前野腹側内部を損傷すると、リスクな選択に先立つ自律神経系の活動が低下するとともに、衝動的な意思決定が増え (Rogers, et al., 1999)、あるいは「心の理論」課題の遂行が困難となる (Stone, Baron-Cohen, & Knight, 1998) などの事実から、同領域においてナイーブな内受容感覚と外部環境の認知とが統合され、ここで最適化される意思決定が、共感行動に寄与するものと考えられるだろう。

3. 物理的痛みへの共感と島皮質

これまでに述べてきたように、我々は他者の感情を察することはもちろん、他者に生じる物理・社会的な痛みに対しても、間接的に、実感をともなって理解をすることができる。これを実現する中枢が背側前部帯状皮質、および島皮質である。近年、他

者からの排斥によって生ずる社会的痛み (social pain) に関わる背側前部帯状皮質が注目されている (Eisenberger et al., 2003 等を参照) が、その関与する神経ネットワークは、以下に述べる物理的痛みの処理機構との多くを共有する点で興味深い。

大脳の外側溝深部にある島皮質は、末梢の身体情報を視床 (thalamus)、体性感覚野 (somatic sensory areas) (BA 1, 2, 3)、および背側前部帯状皮質などの各領域を経由して受け取りこれを統合するという、身体情報のメタ表象部位 (Craig, 2003) として機能する点で注目すべきだろう。この他、島皮質は、神経解剖学的に頭頂領野と扁桃体を含む大脳辺縁系、ならびに大脳基底核とを結ぶ経路に位置することから (Augustine, 1996)、いわば「動作と感情との結節点」として、運動領野と協調し、危機的状況への対処行動 (防御、逃避等) のシミュレーション (Decety, 2006) を駆動している可能性も高いと考えられる。

この島皮質の活動は、主観的な痛みの程度と相関する。例えば、身体的な痛みのもとなうであろう日常的な場面 (手、あるいは足をドアに挟む) を目にする場合、視点を対象に帰属をする一人称視点 (first-person perspective) を取得すると、三人称視点 (third-person perspective) と比較して主観的に体験される痛みの強度が上昇するが、島皮質の活動は、まさに前者の一人称視点において顕著となる (Decety & Grezes, 2006)。他方、三人称視点に立つと、対象への共感性が向上する一方で島皮質の活動は低下し、行為の主体感 (Agency) (第2章、第5章を参照) に関与する前頭-側頭連結部 (temporo-parietal junction) の活動が特異的に上昇する (Batson et al., 1997)。このバットソンら (1997) の実験結果は、自己中心性 (egocentrism) を克己して他者視点を取得すると、対象への共感が促され援助行動が発現するという、向社会的行動の発現形態を示唆する点において興味深い。

この島皮質とともに、よく例に挙げられるのが前頭前野内側部である。ジャクソンら (2006) によると、身体的な痛みのもとなう場面を見ると、島皮質とともに前頭前野内側部が活性化する。その活動は、視点の帰属先がヒトである場合に限り、人工物 (ここではマネキンやロボット) の視点に立つ場合には活動しない (図5)

(Gallagher & Frith, 2003)。島皮質と同様、前頭前野内側部は、取得される視点に応じて異なる活動を示すものであるが、その意味合いは根本的に異なるのでここで確認しておきたい。両領域は、特定のシステムを構成し、そこにおいて連動するものである。しかしながら、自己関連付け課題や心の理論課題時に活動をする前頭前野内側部は一デセティ (2006) のモデルにおいて視点の制御を担う「調整システム」として位置づけられているように一島皮質の活動をトップダウンに調整する。すなわち、ある種の機能分化を伴うものである。

なお、他者の痛みは自らの身体に加えられた物理的な痛みそのものとして感じるものではなく、原則、その源泉は比較的容易に同定されるものである。体性感覚、すなわち皮膚感覚（触覚、圧覚、痛覚、温覚、冷覚）や深部感覚（運動感覚、深部感覚痛）が自らの身体で生じない限り、体性感覚野の関与は限定されている。他方、自らの身体に痛み刺激が加わると、体性感覚野に加えて、後部島皮質における血流量が特異的に上昇する (図 6) など、こうした機構が、痛みの源泉の自他を分かち (Singer et al., 2004)。以上をまとめると、知覚される他者の痛みは、自らに加わる痛みの感覚とは本質的に異なるものであるが、自他に関する痛みを共通表象する「痛み関連領域 (pain network)」の働きにおいて“近似”され、自身の痛みとして実感されるのだろう。

4. 他者との関係と共感性

未知の人物、親しい友人、あるいは競合する相手など、他者との関係性に応じて、対象に作動する共感性は変化する。そうした差異はいかなる脳内機構によって生じているのだろうか。こういった例がある。シンガーら (2004) は 16 組のカップルの協力を得て、まず、カップルのうち 1 名の脳活動を fMRI 計測し、その横にパートナー (恋人あるいは伴侶) を着座させた。実験参加者の目の前にはスクリーンが置かれており、ここに次々に呈示される 2 種いずれかの手がかりに応じて、本人、あるいはパートナーのどちらかの右手の甲に電気刺激が加わる。すると、刺激対象の如何にかかわらず、前部島皮質、前部帯状皮質吻側部の活動が計測され (図 6)、パートナーへの痛み刺激

中のそれらの活性値は、共感性得点 (ECS (empathic concern scale)、BEES (balanced emotional empathy scale) 評定値) との正相関が確認された (ECS ($r=0.62$, $r=0.52$), BEES ($r=0.52$, $r=0.72$), $p < .05$)。共感性の高い個人ほど、パートナーへの痛み刺激時に、前部島皮質から前部帯状皮質にいたる「痛み関連領域」の活動が高まるのである。

これとは逆に、不得手な他者に対して痛みが加わるのを見るといかなる脳活動が生じるのであろうか。同じくシンガーら(2006)のグループがその回答を巧妙に示している。ここではまず、参加者は「経済ゲーム (economic game)」において実験参加者に対して協力的にふるまうパートナーと組む「フェア条件」と、非協力的なパートナーと組む「アンフェア条件」が設けられている。その後、パートナーに対して罰(痛みの伴う電気刺激)が加えられるシーンを実験参加者に見せたところ、フェアなパートナーに関しては、前部島皮質、前部帯状皮質吻側部が活性化した。上述と同様の「痛み関連領域」の活動が確認されたのである。その一方、アンフェア条件のパートナーに対して罰が加えられる場面では、同領域の活動はわずかに上昇する程度であった。その傾向はとくに男性参加者において顕著となると同時に、側座核 (nucleus accumbens) の活動の上昇が確認された。従来、報酬への反応性を示すことで知られる側座核の活性値が「アンフェアなパートナーに対して報復したい」という想いの程度と正相関したのである(図7)。こうした試みを通じて、対象の好悪、あるいは利害に関する社会的価値評価基準で調整される共感性の一端が明らかとなってきた。それではこうした「痛み関連領域」や感情処理に関わる部位は、前頭前野といかにして関わり向社会的行動を発現しているのだろうか。

5. 向社会的行動

我々は、他者の感情や行為を鏡に反映させるようにこれを自ら表出するのみならず、文脈に応じて、自発的にそれを抑制、維持、あるいは強調をすることができる。こうしたメタ共感性、すなわち実行機能に基づく認知および行動は、主に前頭領野の背外

側部 (dorsolateral prefrontal cortex) (BA 8, 9, 46)、腹外側部 (ventrolateral prefrontal cortex) (BA 12, 44, 45, 47) において担われている。それは、後述するように、模倣反射に代表されるような自動的・無意識的なプロセスに対するトップダウン制御の源泉となる。

前頭前野腹外側部の右側は、運動反応の抑制機構に関与することで広く知られる。例えば、運動反応の抑制を要するゴー/ノーゴー (go/no-go) 課題のノーゴー試行中において、同領域の主にブロードマンの 47 野が活動する (e. g., Konishi et al., 1999)。また、近傍のブロードマンの 10 野、11 野を含む眼窩前頭部においては、刺激・反応・結果 (報酬または罰) の随伴性が大局的にモニターされ、行為の報酬価が速やかに更新される (O’Doherty et al., 2003)。同領域を損傷すると長期的な報酬 (future reward) にではなく、目先の報酬 (immediate reward) や罰に行動がガイドされるようになる (Anderson et al., 1999)。あるいは行動反応と報酬ないし罰の随伴性に応じた行動調整がもとめられる逆転学習 (reversal learning) が阻害され (Dias, Robbins & Roberts, 1996)、その結果、衝動性が亢進し、反社会的行動が現れるとされる。

こうした前頭前野腹外側部は、扁桃体と相互抑制的な神経結合を有しており、他者の心情についての精緻な判断を促進する。例えば、複雑で曖昧な表情から感情を読み取る場合、扁桃体において処理・出力された粗い感情情報はおよそノイズとなる。しかるに、曖昧な表情を認知する場合は、社会的文脈の参照、ないしは自身の長期記憶を検索し、これを精妙に判断することが必要となるだろう。こうしたプロセスにおいては、扁桃体の活動は抑制される一方、前頭前野腹外側部の活動が優位となる (Nomura et al., 2003)。逆に、扁桃体の感受性が高まると、外部刺激の評価過程において生じた粗い感情を手掛かりとしたヒューリスティック (heuristic)、すなわち自動的な情報処理が優位となり、大雑把ではあるが速やかな判断が導かれる (Nomura et al., 2004)。

この前頭前野と扁桃体との相互抑制的なダイナミズムにおいて、知覚対象に応じて行動が柔軟に調整されうるのだろう。近年、こうした制御的プロセスに関する知見が

蓄積されており、例えば、感情を喚起するビデオやスライドなどの視聴により喚起された感情を抑制すると、前頭前野背外側部が活性化するとともに、同領域による扁桃体への抑制的作用が生じ (Ochsner, et al., 2002; Ohira, et al., 2006)、逆に、自身に生じた不快感情を維持あるいは増大させるように試みると、左扁桃体が活性化 (Phan, et al., 2005)。この他に、前頭前野外側部の活性化が、身体的苦痛 (Wager et al., 2004)、社会的排斥 (Eisenberger et al., 2003)、不公平な他者・提案の受容 (Nomura, Ogawa, & Nomura, 2010; Tabibnia et al., 2008) などの場面で生ずる物理・心理的な痛み (不快感) が低減される過程に伴うことが示されている。その際、前部帯状皮質や扁桃体の活動が抑制される点においても、これらの報告は概ね共通するものであり、感情の調整機構の屋台骨を示した頑健な知見と考えてもよいだろう。そしてもし、この機構において、自他の心情が文脈に応じて分離・統合されているのであれば、それこそがメタ「共感性」の基盤として、向社会的行動を導くシステムだと考えることができるだろう。さらなる検証が必要となる、興味深い点である。

3 節. 共感の生物学的基盤 — 遺伝子多型性 —

共感性を、これまでに述べてきた脳領域 (システム) 間の相互作用により発現するものと捉えるならば、システム間の情報伝達の仕組みは、解明すべき重要な課題である。我々の心理・生物学的機構は、細胞内外の情報伝達を担う蛋白質をはじめ、そのはたらきを規定する遺伝子によって影響されているためである。

共感・相互対人関係の障害の候補遺伝子の一つにセロトニン神経系の関与が指摘されおり、同神経系の機能不全は、前頭前野腹側部、あるいはミラー・システムの中核ともいべき下頭頂小葉においても見出されている。また、このセロトニン神経系のはたらきは、発達神経における細胞増殖や分化、シナプス (synapse) 形成に欠かせない点において、出生後早期の脳機能形成に着目する必要性を含めて、脳の可塑性、あるいは心的機能の可塑性を考える上での貴重な視点を提供する。そこで本節では、脳

機能に影響を与えるセロトニン神経系伝達物質と遺伝子の作用、および共感性の欠如によって生じるとされる衝動性 (impulsivity) に着目し、共感性の生物学的基盤についての示唆とともに、将来の研究方向を論じる。

1. 遺伝子多型とは

1900年代初頭、イギリスの行動科学者であるゴールトン (Galton, F) によって着手された家系研究や双生児研究、養子研究において、同一環境における遺伝的影響、あるいは同一の遺伝子における環境の影響に関する知見を蓄積してきた (安藤, 2000)。こうした動きに加えて、近年は、ゲノム科学の興隆を受け、ヒト健常を対象とした遺伝子多型 (gene polymorphism) を個体内要因とする研究が進んでいる (Canli & Lesch, 2007; 野村, 2008)。

ヒトの遺伝情報は、X染色体、Y染色体として知られる性別を決定する2種類の性染色体と、22種類の常染色体に記録されている。この遺伝情報は、DNA (デオキシリボ核酸) を構成するアデニン (A)、グアニン (G)、シトシン (C)、チミン (T) という四種類の塩基を基本としており、ヒトを構成する細胞の核のなかには、合計約 30 数億ともいわれる塩基の対が構成されている。遺伝子多型とは、一つの種における個体間に存在するこの塩基配列の違いのことであり、ヒトの場合、0.1%程度の相違があるといわれている。その相違には様々なパターンがあるが、とくに、1カ所のみ別の塩基に置き換わったものを SNP (single nucleotide polymorphism) と呼ぶ。

2. セロトニンと前頭前野腹外側部

セロトニン神経系は、縫線核より大脳皮質、扁桃体、視床下部、小脳などを中心に多領域に投射されており、衝動性は、この中枢神経系におけるセロトニン神経伝達の障害に起因する。そうした関連性は、ヒト、霊長類、齧歯類等において確認されており (e.g., Rogers, et al., 1999)、そのヒト脳内基盤として前頭前野腹外側部の関与が示唆されている。例えば、レイトンら (2001) は、セロトニン生合成のトレーサー

として放射標識 α メチルトリプトファン (α -[11C]methyl-L-tryptophan) を用いた PET 撮像法により、衝動的行動に特徴づけられた境界性人格障害者の、前頭前野腹外側部のセロトニン生合成速度の低下を見出している。シナプス間隙における情報伝達においては、衝動性とセロトニン 2A 受容体との関連性が指摘されている。この受容体は、セロトニンを後シナプスで受け取る蛋白質の一種であり、その働きを同受容体拮抗薬 (M100, 907) を用いて選択的にブロックすると、ラットの運動反応衝動性 (後述) が緩和されるのである (Higgins et al., 2003)。興味深いことに、その機能をコードする遺伝子としてプロモーター領域 (promoter region) に連続したアデニンの塩基配列 (AA) を持つ個人は、アデニンの少ない配列 (AG、あるいは GG) を持つ個人よりも衝動的である可能性がある。たとえば、アルコール依存や、神経性大食症において、AA タイプの個人が多く見出されるなどの臨床知見がある (e. g., Collier et al., 1997)。その一方で、ヒト健常に関する実証研究は少数にとどまり、その関連の有無やメカニズムの多くが不明であった。

3. 衝動性とセロトニン 2A 受容体遺伝子

こうした問題に取り組むために筆者ら (Nomura et al., 2006a) は、ヒト健常において次の検討をおこなった。実験課題では、提示される手がかりに応じて、ボタンを押す、あるいはボタンを押さない「ノーゴー反応」が求められる。柔軟かつ速やかな運動反応の制御が求められるこの課題では、反応が正解であった場合には金銭の報酬を与え、間違いに対しては罰として報酬を差し引くことにより、ノーゴー刺激の提示時に思わずボタンを押してしまうという運動反応制御の不全を示す衝動性 (response inhibition impulsivity) を誘発することができる。こうした反応は、我慢をすることよりも、目の前の金銭につられて思わずボタンを押してしまったという点で、上述の衝動性の指標となる (Kindlon, Mezzacappa, & Earls, 1995)。実験の結果、AA タイプの誤答は統計学的に他のタイプよりも多く、そうしたエラーは衝動性に基づく誤答に限定されていることが明らかとなった (図 8)。健常における衝動性という、おそ

らくは分散の小さな個人差に、セロトニン2A受容体遺伝子多型性が寄与する可能性が示されたのである。

次に問題となるのは、こうした行動の差異を発現する中枢神経系の機序である。筆者らは、課題遂行時の脳活動を fMRI により計測し、AA タイプの前頭前野腹外側部の活動はその他のタイプよりも高いことを明らかにした (Nomura et al., 2006b) (図 9)。既に述べたとおり運動反応を制御する際、前頭前野腹外側部が運動前野とともに活動するが (e.g., Konishi et al., 1999)、先の結果より、衝動的反応の制御に必要なパフォーマンスを補うための、AA タイプにおける同領域の補償的活性化という可能性が伺える。これに対し、脳内報酬系、または運動の実行に関わる直接経路 (direct pathway) を形成する視床下部 (hypothalamus)、背側線条体 (dorsal striatum)、内節淡蒼球、側座核 (Cardinal et al., 2001; Zink et al., 2004) 等の諸領域においては AA タイプとそのほかのタイプとの活動の違いは見られなかった。すなわち、AA タイプにおいて衝動的エラーが多発するのは、報酬への感受性、すなわち脳内報酬系の機能に問題があるのではなく、行動の抑制系統の問題に起因するという可能性が示されたのである。

全遺伝情報 (ヒトゲノム) の解読完了が宣言されたのが 2003 年である。当時より、筆者らは、ヒト個体内要因としての遺伝子多型に注目し、心の個人差を解明する上での重要性を一貫して論じてきた (野村, 2003; Nomura & Nomura, 2006; 他)。近年、急増してきたとはいえ、健常一般に関する研究知見は、臨床から提示されるデータと比較して圧倒的に少ない (あくまでも量的な問題である)。ここにおいて、上述した情報処理パラダイムを厳密に駆使することが、今後より一層の意味をなすと思われる。加えて、環境攪乱入力とされる化学的環境をはじめ、心理社会的環境からの入力によっても刻々と変化する生体への影響、とりわけゲノムそれ自体の変異以外において環境因が遺伝子の発現に及ぼす「エピジェネシス」(epigenesis) の機構に留意する必要があるだろう。

4 節. 最後に

「われわれの心は他者の鏡である」。ヒュームの言説 (Hume, 1880/1990) を待つまでもなく、共感性は、密接に関わりあう自他の表象に支えられ、我々の内にふと立ち上がる。そうした共感性の表現様式について、本章においては、その発達の過程とともに、基盤となる生体の階層構造について概観してきた。

共感性に纏わる学際的研究テーマは、検討すべき問題にあふれたフロンティアである。すでに述べたとおり、それぞれの階層を対象とする個別の研究課題は着実に成果を挙げつつある。しかしながら、それらの双方向性のメカニズムについては不明な点が多く、我々のより一層の努力を要する。とくに、共感的なサポートは抑うつ遺伝的脆弱性を緩和する方向で作用をするように (Kaufman et al., 2004)、今後は「エピジェネシス」を包括した取組みが期待されるところである。それは、厳密な実験統制を伴う情報処理パラダイムと、大規模なコホート、およびゲノム科学との相補的なアプローチが不可欠となる大きな課題だろう。

こうした新しい科学的潮流のもとで、今、あらためて、共感性の在り方、ひいては遺伝と環境 (nature or nurture) のかかわり方が問われており、それは挑戦すべき新たな難問として、我々を奮い立たせるのである。

- Anderson, S. W., Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1999). Impairment of social and moral behavior related to early damage in human prefrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 2, 1032-1037.
- 安藤寿康 (2000). 心はどのように遺伝するかー双生児が語る新しい遺伝観 講談社ブルーバックス.
- Augustine, J. R. (1996). Circuitry and functional aspects of the insular lobes in primates including humans. *Brain Research Review*, 2, 229-294.
- Batson, C. D., Sager, K., Garst, E., Kang, M., Rubchinsky, K., & Dawson, K. (1997). Is empathy-induced helping due to self-other merging? *Journal of Personality and Social Psychology*, 73, 495-509.
- Batson, C., Turk, C., Shaw, L., & Klein, T. (1995). Information function of empathic emotion: Learning that we value the others welfare. *Journal of Personality and Social Psychology*, 68, 300-313.
- Bischof-Kohler, D. (1991). The development of empathy in infants. In M. E. Lamb & H. Keller (Eds.), *Infant development: Perspectives from German-speaking countries* (pp.1-33). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Canli T., Lesch, K. P. (2007). Long story short: the serotonin transporter in emotion regulation and social cognition. *Nature Neuroscience*, 10, 1103-1109.
- Cardinal, R. N., Pennicott, D. R., Sugathapala, C. L., Robbins, T. W. & Everitt, B. J. (2001). Impulsive choice induced in rats by lesions of the nucleus accumbens core. *Science*, 292, 2499-2501.
- Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M. C., Mazziotta, J. C., & Lenzi, G. L. (2003). Neural mechanisms of empathy in humans: a relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100, 5497-5502.
- Chartrand, T. L., & Bargh, J. A. (1999). The chameleon effect: the perception-behavior link and social interaction. *Journal of Personality and Social Psychology*, 71,

464-478.

- Collier, D. A., Arranz, M. J., Li, T., Mupita, D., Brown, N., & Treasure, J. (1997). Association between 5-HT gene promoter polymorphism and anorexia nervosa. *Lancet*, 350, 412.
- Condon, W. S., & Sander, L. W. (1974). Neonate movement is synchronized with adult speech: interactional participation and language acquisition. *Science*, 183, 99-101.
- Craig, A. D. (2003). Interoception: The sense of the physiological condition of the body. *Current Opinion in Neurobiology*, 13, 500-505.
- Damasio, A. R., Tranel, D., & Damasio, H. C. (1991). Somatic markers and the guidance of behavior: theory and preliminary testing. In: Levin, H. S., Eisenberg, H. M., and Benton, L. B., (eds.), *Frontal lobe function and dysfunction*. New York: Oxford University Press.
- Davis, M. H. (1996). *Empathy a Social Psychological Approach*. Boulder: Westview Press.
- Decety, J. (2006). Human empathy. *Japanese Journal of Neuropsychology*, 22, 11-33.
- Decety, J & Grezes, J. (2006). The power of simulation: imagining one's own and other's behavior. *Brain Research*, 1079, 4-14.
- Dias, R., Robbins, T. W., & Roberts, A. C. (1996). Dissociation in prefrontal cortex of affective and attentional shifts. *Nature*, 380, 69-72.
- Dimberg, U., Thunberg, M., & Elmehed, K. (2000). Unconscious facial reactions to emotional facial expressions. *Psychological Science*, 11, 86-89.
- Dunn, D., Dalgleish, T., & Lawrence, A. D. (2006). The somatic marker hypothesis: A critical evaluation. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 30, 239-271.
- Eisenberg, N. & Lennon, R. (1980). Altruism and the Assessment of Empathy in the Preschool Years. *Child Development*, 51, 552-557.

- Eisenberg, N., Spinrad, T. L., & Sadovsky, A. (2005). Empathy-related responding in children. In *Handbook of Moral Development*. Killen, M. and Smetana, J.G., Eds. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah. pp. 517-549.
- Eisenberger, N., Lieberman, M., & Williamson, K. D. (2003). Does rejection hurt? An fMRI study of social exclusion. *Science*, 302, 290-292.
- Gallagher, H. L., & Frith, C. D. (2003). Functional. imaging of theory of mind. *Trends in Cognitive. Sciences*, 7, 77-83.
- Goldman, A. I. (1993). Ethics and cognitive science. *Ethics*, 103, 337-360.
- Higgins, G. A., Enderlin, M., Haman, M., & Fletcher, P. J. (2003). The 5-HT_{2A} receptor antagonist M100,907 attenuates motor and 'impulsive-type' behaviours produced by NMDA receptor antagonism. *Psychopharmacology*, 170, 309-319
- Hogan, R. (1969). Development of empathy scale. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 33,307-316.
- Hooker, C. I., Paller, K. A., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., Mesulam, M. M., & Reber, P. J. (2003). Brain networks for analyzing eye gaze. *Cognitive Brain Research*, 17, 406-418.
- Hume, D. A. (1990). *A treatise of human nature*. Oxford: Clarendon Press. (Original work published 1880).
- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286, 2526-2528.
- Jackson, P. L., Brunet, E., Meltzoff, A. N., & Decety, J. (2006). Empathy examined through the neural mechanisms involved in imagining how I feel versus how you feel pain. *Neuropsychologia*, 44, 752-761.
- 加藤義信 (1993). 身体イメージ 児童心理学の進歩 pp.62-87 金子書房.
- Kaufman, J., Yang, B. Z., Douglas-Palumberi, H., Houshyar, S., Lipschitz, D., Krystal, J. H., & Gelernter, J. (2004). Social supports and serotonin transporter gene

- moderate depression in maltreated children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, 17316-17321.
- Kindlon, D., Mezzacappa, E., & Earls, F. (1995). Psychometric properties of impulsivity measures: Temporal stability, validity and factor structure. *Journal of Child Psychological Psychiatry*, 36, 645-661.
- Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Kikyo, H., Kameyama, M., & Miyashita, Y. (1999). Common inhibitory mechanism in human inferior prefrontal cortex revealed by event-related functional MRI. *Brain*, 122, 981-991.
- Leyton, M., Okazawa, H., Diksic, M., Paris, J., Rosa, P., Mzengeza, S., Young, S. N., Blier, P., & Benkelfat, C. (2001). Brain regional α -[11C]methyl-L-tryptophan trapping in impulsive subjects with borderline personality disorder. *American Journal of Psychiatry*, 158, 775-782.
- Lewis, M. (1992). *Shame: The exposed self*. New York: Free Press.
- Lewis, M., Sullivan, M. W., Stanger, C., & Weiss, M. (1989). Self development and self-conscious emotions. *Child Development*, 60, 146-156.
- Mehrabian, A., & Epstein, N. (1972). A measure of emotional empathy. *Journal of Personality*, 40, 525-545.
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, 198, 75-78.
- Moll, J., de Oliveira-Souza, R., Eslinger, P. J., Bramati, I. E., Mourao-Miranda, J., Andreiuolo, P. A., & Pessoa, L. (2002). The neural correlates of moral sensitivity: A functional magnetic resonance imaging investigation of basic and moral emotions. *The Journal of Neuroscience*, 22, 2730-2736.
- 野村理朗 (2003). 認知神経科学によりヒトの情動行動を読む 和光純薬時報, 71 (1), 16-17.
- 野村理朗 (2008). 神経科学の観点から —感情と行動, 脳, 遺伝子の連関について— 感

情心理学研究, 16, 143-155.

Nomura, M., Iidaka, T., Kakehi, K., Tsukiura, T., Hasegawa, T., Maeda, Y., & Matsue, Y.

(2003). Frontal lobe networks for effective processing of ambiguously expressed emotions in humans. *Neuroscience Letters*, 348, 113-116.

Nomura M, Kusumi I, Kaneko M, Masui T, Daiguji M, Ueno T, Koyama T, & Nomura Y.

(2006a). Involvement of a polymorphism in the 5-HT_{2A} receptor gene in impulsive behavior. *Psychopharmacology*, 187, 30-35.

Nomura M, Kondo H, & Kashino M. (2006b). Association between polymorphism in the

5-HT_{2A} receptor gene and neural activation in the human prefrontal cortex during Go/No-go task. *Presented at Human Brain Mapping 2006 Meeting*. Florence, Italy.

Nomura, M., & Nomura Y. (2006). Psychological, neuroimaging and biochemical

studies on functional association between impulsive behavior and the 5-HT_{2A} receptor gene polymorphism in humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1086, 134-143.

Nomura, M., Ohira, H., Haneda, K., Iidaka, T., Sadato, N., Okada, T., & Yonekura, Y.

(2004). Functional association of the amygdala and ventral prefrontal cortex during cognitive evaluation of facial expressions primed by masked angry faces: An event-related fMRI study. *Neuroimage*, 21, 352-363.

Nomura, Y., Ogawa, T., Nomura, M. (2010). Perspective taking associated with social relationships: A NIRS study. *Neuroreport*, 21, 1100-1105.

Ochsner, K. N., Bunge, S. A., Gross, J. J., & Gabrieli, J. D. E. (2002). Rethinking

feelings: An fMRI study of the cognitive regulation of emotion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 1215-1229.

O'Doherty, J., Critchley, H., Deichmann, R., & Dolan, R. J. (2003). Dissociating valence

of outcome from behavioral control in human orbital and ventral prefrontal

- cortices. *The Journal of Neuroscience*, 23, 7931-7939.
- Ohira, H., Nomura, M., Ichikawa, N., Isowa, T., Iidaka, T., Sato, A., Fukuyama, S., Nakajima, T., & Yamada, J. (2006). Association of neural and physiological responses during voluntary emotion suppression. *NeuroImage*, 29, 721-733.
- Perner, J., & Lang, B. (1999). Development of theory of mind and executive control. *Trends in Cognitive Science*, 3, 337-344.
- Phan, K. L., Fitzgerald, D. A., Nathan, P. J., Moore, G. J., Uhde, T. W., & Tancer, M. E. (2005). Neural substrates for voluntary suppression of negative affect: a functional magnetic resonance study. *Biological Psychiatry*, 57, 210-219.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3, 131-141.
- Rogers, R. D., Everitt, B. J., Baldacchino, A., Blachshaw, A. J., Swainson R., Wynne, K., Baker, N. B., Hunter, J., Casey, T, Booker, E., London, M., Deakin, J. F., Sahakian, B. J., & Robbins, T. W. (1999). Dissociable deficits in the decision-making cognition of chronic amphetamine abusers, opiate abusers, patients with focal damage to prefrontal cortex, and tryptophan-depleted normal volunteers: Evidence for monoaminergic mechanisms. *Neuropsychopharmacology*, 20, 322-339.
- Ruby, P., & Decety, J. (2001). Effect of subjective perspective taking during simulation of action: A PET investigation of agency. *Nature Neuroscience*, 4, 546-550.
- Saxe, R. (2005). Against simulation: the argument from error. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 174-179.
- Saxe, R., Carey, S., & Kanwisher, N. U. (2004). Understanding other minds: Linking developmental psychology and functional neuroimaging. *Annual Review of Psychology*. 55, 87-124.
- Simner, M. L. (1971). Newborn's response to the cry of another infant. *Developmental*

Psychology, 5, 136-150.

Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J., Kaube, H., Dolan, R. J., & Frith, C. D. (2004).

Empathy for pain involves the affective but not the sensory components of pain.

Science, 303, 1157-1161.

Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J. P., Stephan, K. E., Dolan, R. J., & Frith, C. D.

(2006). Empathic neural responses are modulated by the perceived fairness of others. *Nature*, 439, 466-469.

Stone, V. E., Baron-Cohen, S., & Knight, R. T. (1998). Frontal lobe contributions to theory of mind. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 640-656.

Tabibnia, G., Satpute, A. B., & Lieberman, M. D. (2008). The sunny side of fairness: fairness preference activates reward circuitry (and disregarding unfairness activates self-control circuitry). *Psychological Science*, 19, 339-347.

Tomkins, S. S. (1982). 'Affect Theory', in P. Eckman, W.V. Friesen & P. Ellsworth (eds), *Emotion in the Human Face*, 2nd edn, pp. 353-395. Cambridge.

Wager, T. D., Rilling, J., Smith, E. E., Sokolik, A., Casey, K., Kosslyn, S. M., Davidson, R.J., Rose, R. M., & Cohen, J. D. (2004). Placebo-induced changes in fMRI in the anticipation and experience of pain. *Science*, 303, 1162-1167.

Zink, C. F., Pagnoni, G., Martin-Skurski, M. E., Chappelow, J. C., & Berns, G. S. (2004). Human striatal response to monetary reward depends on saliency. *Neuron*, 42, 509-517.

図のキャプション

図 1 養育者に対する新生児模倣 (Meltzoff & Moore, 1977)

図 2 共感性の神経基盤に関するモデル (Decety, 2006 を元に筆者が作成)

図 3 前頭前野と動作観察 (Gallese et al., 1996)

サルに上図のような場面をみせると、それに対応をした下図の神経活動が生じる。小さい物を取ろうとしている手をみると活動をするが、これを道具（ここではピンセット）でつまもうとしても神経が活動をしない。

図 4 顔表情の観察、および模倣時に活性化をする運動前野と1次運動野 (Carr et al., 2003 より改編)

図 5 視点取得時の前頭前野内側部の活動 (Jackson et al., 2006 b より改編)

脳を前方から見、中央部を切り開いて内側を見る。

図 6 自己への痛み刺激により活性化された島皮質、前部帯状皮質、ならびに2次大成感覚野 (Singer et al., 2004 より改編)

脳を前方から見、中央部を切り開いて内側を見る。

図 7 アンフェアなプレーヤーへの痛み刺激時の報酬関連脳部位の活動 (Singer et al., 2006 より改編)

図 8 衝動的エラーとセロトニン2A受容体遺伝子多型性との関連性 (Nomura et al., 2006 a)

正解が得られた場合は報酬が、不正解であっても罰が伴わない RR (reward-only) 条件、2) ゴー/ノーゴーの各反応において正解であっても無報酬、不正解であった場合には罰が伴う PP (punishment-only) 条件、3) Go 反応において正解が得られた場合に報酬が、4) Nogo 反応において不正解の場合に罰が伴いその他の回答においては報酬・罰のいずれも伴わない RP (reward-punishment) 条件、RP 条件と逆のパターンの PR (punishment-reward) の各条件の結果。において、衝動性との関連のあるエラー (CER) においてのみ遺伝子多型のタイプの差異が確認された。

図9 セロトニン 2A 受容体遺伝子多型による脳活動の差異 (Nomura et al, 2006 b)

アデニンを2つ持つ個人 (A/A タイプ) は、アデニンの少ないタイプ (A/G, G/G タイプ) を持つ個人に比べて Nogo 反応時の右腹側前頭前野の活動が低かった。