

教育と医療の連携：脳科学研究から教育を考える

— 青年期の行動特性と学習活動 —

荒 卷 恵 子

帝京大学大学院教職研究科

要 約

米国の医師ケーシーらは、2008 年青年期の行動特性を脳の構造や発達から明らかにした研究「青年の脳と危険な意思決定」¹を発表した。青年期には不適切な判断だけでなく、わかっていながら危険を冒す特徴的なリスクテイク行動があり、神経生物学的発達、認知的制御から生起していることを示した。前頭前野が司る認知的制御の促進は、目標指向行動や自己調整力の育成につながり、アクティブ・ラーニングが目指す目標と同じである。危険を冒してまで何かにチャレンジする青年期の特徴的な報酬行動は、チャレンジャーとしての学習者である青年たちの捉え直しを示唆している。本稿では医学的観点から捉えた青年期の特徴を教育学的な観点で捉え直す。

キーワード：青年期 目標指向行動 自己調整力 アクティブ・ラーニング

はじめに

ブロードマンが大腦皮質を 52 の領域に区分し、細胞構築学的脳地図を作ってから、およそ 100 年が経つ。臨床神経心理学が追究してきたこの 100 年の生理解剖学を基礎とする神経科学、いわゆる脳科学の領域は、測定技術の急速な進歩によって脳の細部の構造とその機能を解明してきた。画像解析は、コンピュータ技術が支え、大容量の画像解析を短時間で処理できるようになった。

本稿で取り上げる脳部位の名称は医学専門用語であり、読み上げることに至難であるが、学校教育が医学知識から学ぶことは医療知識のみならず、ヒトの認知構造や学習のメカニズムを捉えることの意義は大きい。特に、近年の学校教育においては、発達障害の様相を呈する児童・生徒は 6.5% を占め、特別支援教育における医学的支援が望まれる。また、学習障害の児童・生徒への支援においては、神経科学が追求してきた学習のメカニズムと教育学が長年蓄積してきた教育方法とを関連させて検討すること

で、ICT などの新しい教育技術を取り入れるためにも重要な視座となると考える。さらに、脳の構造的変化と認知的変化がヒトの発達と学習活動に深い関係があることを考えれば、教育と医療の連携や、医学知識を学校臨床に還元することの意義を発信していくことが必要ではないかと考える。

2008 年米国の医師ケーシーらは「青年の脳と危険な意思決定」の論文を、発達心理学研究ジャーナル『Development Review』に発表した。発達心理学研究ジャーナル『Development Review』は小児科、精神科、神経科学分野で従事する発達心理学研究者向けのジャーナルである。この論文は、2005 年 3 月、ケーシーらが『Annals of the New York Academy of Sciences』に発表した「青年の脳」²の加筆論文である。この論文では、青年期を前期・中期・後期と捉え、前期を 12 歳から 15 歳、中期を 15 歳から 18 歳、後期を 18 歳から 23 歳とし、日本の学校教育制度でいうところの中等教育期と高等教育期の青年たちを対象として、青年期に顕れる衝動性、認知的制御といった行動特性を、神経科学のア

プローチで論じている。この論文の特徴は、医学研究者であるケーシーらが、社会調査から浮き彫りにした青年期の行動特性を、ケーシーらが専門とする脳科学の知見から、他領域の専門家たちに向けて発信していることである。そこで、本稿では、ケーシーらの研究をはじめとする脳科学の研究から、青年期の行動特性を捉え、学習活動との関連について考察する。

1 青年期の行動特性と脳科学

アメリカ国立健康統計センターによると、米国では毎年 13,000 人以上の青少年が亡くなっている。これら死亡の約 70% が自動車事故、不慮の事故、殺人、自殺によることが原因である。2005 年に報告された青少年リスク行動調査 (National Youth Risk Behavior Survey: YRBS) の結果では、無防備な性行為による妊娠や HIV 感染を含む性感染症、違法物や銃刀所持、飲酒運転、シートベルト不装備の自動車運転による交通事故など、青少年の行動が青年期に死亡や病気の可能性を高めていることが示されている³。これらの統計資料は、青年の危険な選択や行動を理解することの重要性を強調している。

青年期の脳の発達に関する先行研究では、青年期の認知的発達は認知的制御と高い相関を示している⁴。さらに、脳の前頭前野の発達との関連^{5,6}や無関係な脳領域^{7,8}など、多くの認知的、神経生物学的仮説から青少年の不適切な選択や行動の理由が推論されてきた。

前頭前野の発達による認知的制御は一般的なパターンとして、小児期から成人期の直線的な発達で示される。一方、アメリカ国立健康統計センターによる調査結果では、青年期の行動特性による、青年期の不適切な行動や死亡率が示すように、非線形変化を表し、前頭前野の機能だけでは、青年期の行動を捉えることはできない。青年期の認知と神経生物学的変化の概念は、青年期が発達過渡期⁹であるというよりはむしろ一過性であり¹⁰、青年期の変化を特徴づける認知および神経回路の発達を解明するこ

とが不可欠である。青年期は、認知や行動のレベルでは認知的制御を欠いた認識不足とリスクテイクを特徴とし、神経生物学的レベルでは、ヒトの脳画像研究と動物実験により、神経機構の衝動制御と危険な意思決定が特徴的であることが示され、ここでも、青年期における明確な神経生物学的知見と神経発達の経路 (trajectories) の特徴が示されている。

青年期の神経発達と神経生物学的モデルは、ラット研究^{9,11}と画像研究^{12,13,14}によりフレームワークが開発されてきた。

従来の研究では青年期の行動の特徴は前頭前野の未発達に関連していると言われてきた。一方で辺縁系皮質下とトップダウン制御領域、トップダウンメカニズムを示した研究では大脳辺縁系 (例えば側坐核) が前頭前野の制御領域よりも早く発達していることが示されている。大脳辺縁系は生物の発達の歴史では、もっとも原始的であり、本能的な行動を司る。一方、前頭前野はヒトの発達が一番大きく、認知的制御を司る機能をもつ。前頭前野を高次、大脳辺縁系を低次で示し、高次である前頭前野から低次である大脳辺縁系への神経伝達の流れをトップダウンメカニズムと呼ぶ。この大脳辺縁系と前頭前野の領域間の機能的結合により、トップダウンメカニズムが示される¹⁵。辺縁系と前頭前野との相対におけるトップダウン制御領域の未発達と非線形な青年期の行動特性モデルによって、青年期の危険行動が明らかになっている¹⁶。画像研究により裏付けされたこのトップダウンメカニズムのモデルは、辺縁系の情動行動と前頭前野の報酬行動の関連^{13,14,15,17}を示している。一方、脳の発達によっては 10 代の青少年たちが長期にわたり不適切な判断と危険行動にさらされる可能性があることも示されている^{14,17}。

つまり、青年期は、原始的な情動を引き起こすとされる脳の中心部の辺縁系の発達と、認知的制御を司る前頭前野の発達とのアンバランスによって、危険行動が生起される可能性があるということである。危険行動を回避させるためには、辺縁系の発達を抑制する必要がある、その相対にある前頭前野の発達を促す必要がある。よって、前頭前野の発達を促すような教育的なアプローチにより、青年期の危

険行動を回避できることにつながると考えられる。

前頭前野の発達を促すような教育的アプローチとはどういうことだろうか。前頭前野は報酬行動を認知的制御によって司る。報酬行動は報酬を得ることを期待して起こる行動のことで、やる気や動機づけなどの情動や、学習環境への適応などにも関連した、目標指向行動のことである。例えば、「志望校に合格するために、学習する」「テストでいい成績をとるために、ゲームを我慢する」など、対価を得るために生起する報酬行動を制御する認知のことである。このことを認知的制御と呼ぶ。また、この報酬行動は、「先生に褒められることによって、学習意欲がわく」「学習意欲がわいて、さらに成績が上がり、志望校への合格圏に入る」「先生の一言でその教科が好きになる」など、認知的制御は、情動とも関連して、さらに別の行動を生起させることがわかっている。学習活動では課題の出し方や課題の量などを工夫した授業を行ったり、その動機づけとしての言葉かけや励ましを行うなど、学習者の認知的制御と情動とを上手く作用させることが必要になる。

ケーシーらの研究では、青年期のリスクテイクには、わかっている危険を冒してしまうという行動の顕れもあり、その背景には、認知的制御を司る前頭前野と情動を司る大脳辺縁系との関連があることが示されている。対価を得たいという大脳辺縁系による情動が、いやこれは危険だからやめなさいと認知を制御しようと働く前頭前野の働きを超えてしまうことにより、危険を冒しても対価を得ようとする青年期の危険行動となる。しかし、このことは一方で、青年期の青年たちが危険を顧みない、ある欲望に対して突進する、挑戦する、強い行動力があるということを示している。学校教育の中では、青年期のこうした強い情動により抑えきれない行動に対し、よりハードルの高い課題を与えることで、リスクテイクと同等、もしくはそれ以上の報酬行動に転換してあげることが必要であろう。例えば、青年期には、未知なることを体験させてあげたり、少し高い目標を持たせて挑戦させてあげたり、といったことである。さらに、動機づけや後押ししてあげることで、乗り越えられる行動力を発揮すると考えられる。

2 目標指向行動の発達

認知的発達の基本は、動機づけへの誘因や目標指向のための適切な思考や行動を促進する能力育成である^{18, 19, 20, 21}。

従来の発達心理学研究ではこれらの能力が小児期および青年期を通して発達することが示されてきた^{22, 23, 24, 25}。一部の理論家は認知的発達が精神発達に帰因せず、処理速度や効率の増加に帰因することを主張してきた^{26, 27, 28}。一方で、認知的発達には「阻害」プロセスの構築²⁹があり、例えば、多岐にわたる課題の中から、状況に応じた適切な答えを選ばせるといった干渉課題での「認知抑制」^{20, 30, 31, 32, 33}、自己の衝動を抑え、他者に譲るといった「衝動制御」、自己の目標を状況によって変更したり、新しい目標を見つけるなどの「期待値制御」が目標指向行動では要求され、これらの能力は小児期および青年期全体で発達することが示されてきた。

認知的発達の基本とされる目標指向のための適切な思考や行動を促進する能力とは、近年、学校教育でも注目される児童・生徒の自己調整力や自己制御力（Self-Regulation）を指す。脳科学がその臨床で得てきた認知的発達研究は、学校教育の背景にある学習理論や学校教育制度を生み出し、教育課程においては児童・生徒の認知発達における教科の系統性といったカリキュラム設計に応用され、学校教育に大きく貢献してきた。

青年期の行動のうち、衝動性は小児期と青年期全体では年齢とともに減少する^{14, 18, 20}ことが示され、衝動性を抑える前頭前野の長期的な発達がある¹⁸一方で、個人差により衝動性に違いがあることが示されている。

これらは、我が国の教育課題の一つである特別支援教育において、発達障害を呈した児童・生徒の衝動性につながる知見である。発達障害のうち、ADHD（Attention Deficit Hyperactivity Disorder：注意欠陥多動性障害）や自閉症の児童生徒の衝動性は、年齢とともに減少したり、消失したりする場合がある。また、定型発達の児童・生徒でも、例えば、幼児期に顕れる衝動性が学童期、小学3年生く

らいになると消失する傾向は知見されている。こうした教育臨床で知見される児童・生徒の衝動性の発達とともに消失する行動現象は脳科学では立証されており、個人差による衝動性の違いも知見されている。一方で、新たな知見として、次のような研究も報告される。

認知的発達研究とは対照的に、ヒトの画像研究では衝動性や認知的制御、リスクテイクは、青年期に増加し^{34, 35, 36}、皮質下の報酬回路に関連し、皮質下の活性化（例えば、側坐核）が青年期に顕著に表れる^{12, 13}。報酬回路は人がある行動をとったり、物質を摂取したとき、快楽物質と言われるドーパミンを分泌する神経伝達回路である。例えば、依存性に関する行動、薬物依存症、アルコール依存症、近年ではネット依存症などの行動に関連し、青年期に顕著に表れる。これらの知見は、長期的な線形発達を示す認知的制御システムに関連する一方で、青年期の目標指向行動のために、危険を冒してもチャレンジしようとする選択や行動が表れたり、反対に、青年期の前期（12歳～15歳）には、報酬を求めることややる気のある行動を制御しようとする報酬回路とは異なった経路（trajectories）がある。

従来、発達とともに消失すると言われてきた衝動性の行動は、青年期には再び生起するということである。さらに、青年期の衝動性の行動は、怖いこと、危険なことに関心を寄せる情動と相まって出現する。このことが青年期の危険行動につながる。さらに、やる気を抑制する行動や思っているけど、思いをあえて表さない、考えていることと違うことを表出するといった認知的制御がおきることが示されている。このことは、青年期前期、中学生たちのいじめに対する行動が、わかっているけど抑制してしまったり、考えていることと違うことを言うといった中学生の行動の表出と重なっており、いじめの問題が常に学校教育の中で取り上げられる理由には、こうした青年期の脳の認知的制御と関係していることが医学的知見から示されている。

これらの結果からは、認知と行動のアンバランスをもつ青年期前期にあたる中学生の自己調整力、自己肯定感の育成への課題として、学校教育では改

めて、検討していく必要があるだろう。また、小中連携教育や、中高一貫教育といった教育制度の連携や接続の課題にも、何らかの提案ができる可能性がある。さらに、青年期の行動抑制や認知的制御への教育評価の課題では、本来は十分その知識やスキルがあるにも関わらず、表出しない（表出できないのではなく）生徒たちに対する学習評価は、これまでと同様でいいのかといった命題を投じるだろう。ルーブリックのようなパフォーマンス評価は、生徒たちのもつ本来の知識やスキル、その本質を評価できるのかといった真正の評価に関する課題への示唆もできるだろう。このほかにも、青年期の倫理教育、青年期を育成する教師への教員養成や教師教育の課題にも投石する問いとなっていくと考える。

3 脳科学における科学的根拠

最近の青年期の脳の発達研究は、脳画像の方法論の進歩に基づいている。核磁気共鳴画像（MRI）は脳の構造サイズ及び形状を測定するために使用される。拡散テンソル画像法（DTI）は白質の線維構造（神経索）を可視化する、機能的核磁気共鳴画像法（fMRI）は脳活動パターンを測定するために使用される。皮質と皮質下領域の発達モデルは、DTIとfMRIにより測定され、構造的および機能的に解明されている。

1) ヒトの脳の発達とMRI研究

解剖学と機能的MRI研究³⁷から脳の大きさは6歳で成人サイズの約90%となることが分かっている。また、脳の灰白質（gray matter）と白質（white matter）は、青年期を通して動的な変化があり、最近のMRI研究からは灰白質の体積は年齢と逆U字のパターンを有することが示され、体積のピークは、10歳から12歳と言われている^{38, 39, 40, 41}。一般に、主要な機能を補完する運動野および感覚野などの領域は早期に発達し、主要な機能の統合である高次連合野（higher-order association areas）は後期に発達する^{38, 40}。MRI研究では、大脳皮質の灰白質損傷事例から、はじめに一次体性感覚野・一

次運動野 (primary sensorimotor areas)、その後前頭前皮質背外側部 (dorsolateral prefrontal cortices) と側頭皮質 (lateral temporal cortices) が生起している³⁸。これは、ヒト以外の霊長類や臨床解剖実験から前頭前皮質が最後に発達する脳領域であることと一致し^{42, 43}、前頭前野の役割である認知的制御は、最後に発達していく。さらに灰白質と対照に白質体積の発達は、ほぼ線形に成人期まで増加する³⁸。これらの変化は、おそらく、神経伝導とのコミュニケーションを強化する物質オリゴデンドロサイトによって軸索 (axons) の髄鞘形成 (myelination) に影響を及ぼしているとされる。また、青年期の前期 (12～15歳) から後期 (18～23歳) までの、最も大きな脳の構造変化は、皮質下領域 (subcortical regions) の大脳基底核 (basal ganglia) 内に特定し⁴⁴、特に男性において顕著であること⁴⁵が説明されている。大脳基底核は、脳の中心部に位置し、大脳皮質と視床、脳幹を結びつけている神経核の集まりで、原始的な脳とも呼ばれる。大脳基底核は情動を司り、運動調節、認知的機能、情動、動機づけや学習などの機能を担っている。大脳基底核の本能的な脳領域の発達が、青年期に顕れることが示され、さらに、女性よりも男性のほうが顕著であるとされる。

大脳基底核や前頭前野の領域内体積の発達の变化 (例えば、シナプス刈り込み、髄鞘形成) は、発達過程において、より高い認知的制御と一致し、発達と学習により前頭前野と皮質下の領域間の接続強化を可能にする。これらの構造的変化と認知的変化の相関に関する研究は、神経心理学による前頭葉の構造的発達と認知テストを用いた認知的発達から検討されてきた³⁹。また、MRI 研究による連合野の解明は、前頭前皮質と大脳基底核の領域の認知的制御や容量の測定を可能にし⁴⁶、これらの知見は、認知的変化が脳の構造的変化に関連し、皮質下 (大脳基底核) ならびに皮質 (例えば、前頭前皮質) の発達の重要性を強調していることが示唆されている。

MRI 研究はヒトの脳の発達、構造的発達における知見に多く貢献してきた。構造的発達から検討された認知的変化を知ることで、学校教育における学

習のねらいや指導方法の意義を考察することができる。例えば、灰白質の体積がピークとなる10歳から12歳は、小学4年生から6年生までの時期であり、記憶の貯蔵されるニューロンの細胞体の増殖が一機に進む。この時期にどのような学習のねらいや学習活動が有効だろうか。小学校高学年の段階では、基礎基本の知識習得による学習活動により、インプットされることによる情報処理が脳内で活性する。より多くの知識の受容とその処理ができる時期でもある。一方、成人期にかけて成長を続ける白質における髄鞘形成では、その形成が、経験や環境によって違うことが明らかになっている⁴⁷。このことから、小児期、青年期、成人期にかけては、経験的学習活動によって、情報を統合したり、情報を表出したり、情報を伝達するといった情報処理が脳内の活性には重要であることが示唆されている。また、白質の構造的変化は、灰白質と異なり、成人期にかけた長いスパンの中で発達することから、初等教育から中等教育、さらに高等教育といった、児童期から青年期までの系統的な学習活動の中で、より高次の学習活動を検討していく必要がある。このことは、生涯にわたり脳が発達していることを意味しており、人間が学び続ける意義が示唆されているともいえよう。

2) ヒトの脳の発達と DTI 研究

MRI の形態測定学研究では、皮質接続 (cortical connections) が皮質の過剰なシナプス形成の排除を調整し、発達と学習 (experience) に関連する接続を強化することを示唆している。DTI の MRI 技術による脳画像研究の進歩は、認知能力の向上と神経索 (fiber tracts) の発達との関連について特定の白質回路の役割を解明している。具体的には、DTI 研究により小児期の前頭前野白質の発達と認知的制御を司る連合野 (associations) の関連が示されている。ある研究⁴⁸では前頭前野白質の発達は明らかに前頭前野の神経索と相関しており、fMRI 研究とも一致して小児ではこれらの領域に成人と異なる発達が見られた。

同様に前頭—大脳基底核—後頭の神経索の白質は成人になっても発達し続けることが知見されて

いる⁴⁹。一方、GO/NOGO タスクにみられる衝動制御は前頭前皮質と大脳基底核間にしか見られない。DTI 研究では神経索測定が発達と関連していること、さらに、認知能力を有する特定の神経索の特異性として、特定の経路に分離されること⁴⁸、認知能力と関連すること⁴⁷が示されている。これらの知見は、脳画像研究によって神経索の重要性が強調され、認知的発達神経基質（neural substrates）における発達に伴う変化は領域だけでなく、神経回路の変化にも関連することが明らかにされている。

DTI 研究は脳内の白質線維の方向による水の拡散のしやすさの違いを計測することによって、神経索と呼ばれるシナプス形成がどのように発達しているか、さらに脳内の部位間の関連性や伝達の強さを明らかにした技術である。これらの知見を、学校教育における学習活動や認知能力の向上に転嫁して考えると、例えば、前頭前野の働きには、記憶を保持したり、計画的なものごとをすすめたり、方略や見通しをもつ実行機能がある。この前頭前野の働きを活性化することを考えると、集中させるための教材を提示する、記憶力を高めるために教具の工夫をするなどがあるだろう。また、実行機能を高めるために、目標設定したり、計画的に道筋を立てたり、計画を調整したり、といった自己調整力を高める学習活動を取り入れるなど授業の工夫が求められるだろう。

3) 行動と脳の発達と fMRI 研究

MRI と DTI による構造測定の変化は、発達過程の行動変化について示され、さらに fMRI は構造－機能の関連性による直接的なアプローチとして、脳および行動の変化を測定することができる。fMRI は脳の発達における機能的変化を測定し、発達科学の分野に大きな可能性を与えた。青年期の行動の解釈を明確にするための手段でもある fMRI は、先に述べたように、前頭前皮質の発達が、意思決定や認知的制御など高い認知能力の発達に重要な役割を果たしている^{21, 45}。fMRI 研究では神経生物学的基礎に GO/ NOGO タスク（フランカー課題、ストループ課題を含む）の能力評価を用いてきた^{50, 51, 52}。これらの研究により、タスク実行するとき小児は成人

と異なり、より拡散した前頭前野領域を司ることが示されている。また、タスク実行と相関していない領域は、年齢とともに活性が減少し、認知能力と相関するタスク実行の中心にある脳領域内の活性パターンはより焦点化され、年齢により微調整されていることが明らかにされている。このパターンは、横断研究⁷および縦断研究⁸での検討もされてきた。脳画像研究は決定的な発達の变化（例えば、樹枝状分岐、シナプス刈り込み）のメカニズムを特徴づけることはできないが、これらの知見は、シナプスの発達、刈り込み、突出といった脳の領域が一定期間を超え長期にわたる変化があることを示唆している^{6, 7, 20, 45, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59}。

fMRI 研究は、青年期の認知的制御や衝動性の欠如、危険な選択や行動が、脳のどの部位の機能により生起するかを解明してきた。これらの研究は、衝動抑制を、GO/NOGO タスクのような認知的制御タスクによって測定する。認知的制御タスクとは、被験者に促進課題（GO）と抑制課題（NOGO）を与え、被験者は状況により選択することが求められる。例えば、黄色いランプがいたらゲームができ、青いランプがいたらゲームができないなどの課題のタスクである。このタスクによって、脳内のどの部位が活性されるかを fMRI によって測定する。結果、衝動抑制は、小児期および青年期全体の発達の線形パターンで示されることがわかった。つまり、成長するにつれて、衝動性を抑えることができるということである。一方、最近の脳画像研究では、青年期のリスクテイクについて報酬回路による研究がはじまっている^{12, 60, 61}。これらの研究は、主に側坐核の領域に焦点が当てられ、青年期の認知的制御や衝動性、リスクテイクが前頭前野のトップダウン制御領域に関連するというよりむしろ、この領域が大脳基底核の報酬回路の一部であることを示している。リスクテイク行動に対する金銭的意思決定のタスク（ギャンブル課題）では、成人期に比べて青年期は前頭前野腹側部の活性が少ないことが最近の報告では示されている⁶²。

最近の fMRI 研究からの青年期の脳における実証的証拠は、神経生物学的モデルに基づいて、青年期

前期 (12歳～15歳) の変化が青年期の過渡的な推移とする研究¹³、報酬関連の学習と行動に關与する脳の領域に焦点を当てた青年期の行動と神経反応を調べた研究^{63, 64, 65}がある。一方、成人期の画像との比較研究^{66, 67, 68}や中毒研究^{69, 70}、ラット研究^{9, 11}、前述の画像研究¹²などは、トップダウンの前頭前野制御領域について、青年期では側坐核の誇張された活性化を示すであろうという仮説を立て、成人期に向かう青年期の前頭前野と大脳辺縁皮質下領域の間の遅延機能の接続性を示している。最近の研究は、これらの領域のトップダウン制御の欠如にあるメカニズムから青年期の行動特性を明らかにしようとしている¹⁵。

ラット研究⁷¹や画像研究¹²では、青年期に報酬を強化する側坐核の活性を示唆している。青年期は小児期や成人期に比べて、報酬を予測した側坐核の誇張された反応が示されている。一方、小児期および青年期両方とも成人期より前頭前野制御領域における発達の低い反応も示されている。これらの知見は、青年期の発達過程に観察された衝動的かつ危険な行動は、側坐核の活性の増強の関連性が根底にあり、前頭前野制御領域と、大脳辺縁皮質下領域での異なる発達の経路があることを示唆している。

MRI研究とDTI研究が脳の構造を明らかにしたのに対し、fMRI研究は、タスク実行するとき活性する脳内の場所を特定し、脳の機能を明らかにした。fMRI研究は、報酬、衝動性、リスクテイク行動が、脳内のどの部位に変化をもたらすかを検討してきた。特に、前頭前皮質の発達に関連したと考えられてきた報酬回路を、皮質下領域 (例えば、側坐核) の発達で検討してきた功績は高い。結果、ケーシーらの神経生物学的モデルは、青年期の脳には危険への意思決定や衝動的な行動の増加があることを明らかにし、さらにその意思決定が、長期的というよりも、直近の対価を得るための青年期の偏った行動制御にあることを示唆している。つまり青年期においての衝動性やリスクテイク行動は、長期的な視点をもった上での危険を冒した行動というよりはむしろ、目の前の対価のために、危険を冒すことを明らかにしている。さらに近年のfMRI研究では、青

年期の行動を、脳内の活性する部位に、前頭前野と皮質下領域 (例えば、側坐核) の2つの領域の機能に関連した検討がされている。別の研究では、小児期から成人期における青年期が線形な発達にありながら、特異的な変化が脳内に現れ、これらがどのような発達の変化や影響があるかを示している。ここでは、発達による前頭前皮質下領域の血流増加はfMRI研究によって報告されている^{21, 57, 72}。典型的なこれらの知見は、前頭前野と皮質下の領域発達との間の不均衡ではなく、未発達な前頭前野領域の観点で解釈される。しかし異なる文脈⁷³では、適切な行動を誘導するための前頭前野領域の発達は、未発達な前頭前野でも将来、リスク選択を防ぐことができるかどうか、危険行動を回避するかどうかに依拠して研究され、側坐核の報酬行動としての原始的、本能的な行動との関連は検討されていない。このパターンでは、危険行動への意思決定が長期的な対価となり、皮質および皮質下で示した研究とも一致していた⁷⁴。さらに、側坐核の活性は、その後のリスクテイク行動と相関したことがfMRIで示されている³³。青年期は、小児期または成人期に比べて、未発達な前頭前野腹側部 (ventral prefrontal cortex) で前頭前野機構の影響が少なく、その結果、確実に活性された報酬領域 (例えば、側坐核) を示し、眼窩前頭皮質の報酬領域における側坐核からの相対評価では十分なトップダウン制御は示されなかった。

一方、報酬行動の研究では、7歳から29歳までを対象にして報酬課題を与え、報酬行動において、脳の中心部に位置する大脳辺縁系にある側坐核 (nucleus accumbens) と前頭前野に位置する眼窩前頭皮質 (orbital frontal cortex) の活性をfMRIによって測定した。結果、側坐核 (nucleus accumbens) と眼窩前頭皮質 (orbital frontal cortex) の報酬成果の期待における活性の局在とこれらの領域における活性の程度は、長期におよぶ発達が示された。ここで示されたのは、衝動性やリスクテイクなどを検討する報酬課題に対して、小児期から成人期まで側坐核、眼窩前頭皮質いずれの活性も発達とともに減少しており、特に眼窩前頭皮質とは相関が示された。一方で側坐核の活性は、青年期まで続き、その後成

人期に消失することが示された。

これらのことから、次章では青年期の社会性から考察する。

4 青年期の社会性の進化

青年期は、小児期から成人期への移行期間である。青年期は、性的成熟の始まり⁷⁵と、生物学的にも定義することができる。青年期は漠然とした時間経過の中で大人に遷移していく時期である⁹。進化的に言えば、青年期には、独立性のスキルが必要である一方、有害な状況、例えば、損傷、うつ病、不安、薬物使用や依存症の可能性が増加する。また、家族の保護から離れ、成長を促すための時期でもある⁷⁶。自立を促す行動のために、リスクテイク行動へのピア指向、リスクを伴う行為に仲間とともに向かう意識といった社会的相互作用を強化していくことが、生物学的な種間においても言及され、社会心理学的要因が危険行動のための青年期に影響を与えている。また、危険への行動は未発達な自己調整力の育成と同時に新奇性への感覚を求める生物学的な行動との不均衡な状態像となっている⁷⁷。これらの神経生物学的データは、大脳辺縁系と制御の二つのシステムの発達から示唆されている。

具体的には、ホルモン分泌は異性を求める青年の行動や、同時に仲間と危険に立ち向かうことや、家族や故郷の仲間のもとを去り、危険性の高い行為もいとわない冒険心といった、この発達のパターンが青年期における進化の特徴であることが示唆されている。青年期を親と同居し、生活依存し、その後の人生でのパートナーの選択を無期限に延長できる今日の社会に生きる青年は、進化論的には不適切と判断することができるのである。

新奇性を追究し、さらにリスクテイクのための青年期の行動は、種を超える価値がある。同じ世代の仲間を探す一方で、青年期を援助しようとする両親との戦いは、ラット、ヒト以外の霊長類および一部の鳥類を含む他の種にも見られる⁹。成人期への移行の中で、青年期初期のラットは新奇性を求める行動の増加を示す¹¹。これらの神経化学的証拠は、皮

質と皮質下のドーパミンシステム間の青年期の脳のバランスに顕れ、青年期の皮質ドーパミンレベルが高く表れることが示されている⁹。青年期を経た成人期には、同様に長期化するドーパミン作動性神経衰弱が起こり、ヒト以外の霊長類の前頭前野にも同様に示され⁷⁸、リスクテイクの種間の存在が示されている。

5 リスクテイクの個人差

衝動制御やリスクテイクの個人差は心理学研究で確認されている⁷⁹。伝統的個人差の事例の一つとして、社会性、認知、発達心理学の文献には、「満足の遅延」がある⁸⁰。「満足の遅延」は、3～4歳の幼児期を評価したマシュマロ課題⁸¹で示される。幼児の観察からは、幼児期は衝動を制御する能力が他の成長期より優れており、また個人差も顕著に表れ、このバイアスは幼児期に検出できることを示唆している⁷⁹。また、衝動制御は少年期と青年期を通して表出することが示されている⁸²。

青年期の行動は繰り返し衝動的で危険なように特徴づけられており^{76, 83}、画像研究では異なる神経生物学的基質及びこれらの行動のための異なる発達の経路を示している。具体的には、青年期の衝動性は前頭前皮質腹側の発達と関連しており¹⁸、また、衝動性と年齢との間には負の相関がある³⁴。これとは対照的に、リスクテイクは側坐核の活性の増加^{33, 34, 35}や青年期に誇張されることが示されている^{12, 13}。このように小児期以降、より大きなリスクテイクであることが予測される青年期の行動とその選択は、衝動性や前頭前野の長期的な発達過程だけでは説明できない。衝動性に関する研究結果からは、特定の青年が、他よりも大きな危険にさらされる理由に、神経基盤の変化を示しており、さらに青年期の行動は小児期と成人期とは異なるリスクテイクがあることを示している。

では、何が最適な意思決定と行動の個人差を説明するのだろうか。複数の理論家は、報酬処理に関与するドーパミンの報酬経路とも呼ばれる中脳辺縁系経路 (mesolimbic circuitry) が、危険な行動の根

底にあると仮定している。このような皮質下の領域における報酬回路でのドーパミン関連遺伝子と対立遺伝子変異の個人差から、危険な行為を犯してしまう傾向との関連が示されている⁸⁴。ギャンブル課題でも、危険な選択をする直前の行動では、側坐核の活性が増大することが示されている^{33, 34, 35}。青年期の活動は、小児期や成人期に比べて報酬行動に、より活性する側坐核を示している^{12, 13}。

リスクテイクの個人差の研究¹⁴は、小児期7歳から成人期29歳までを対象として、ギャンブル課題をfMRIにより測定して行われた。その結果、発達過程の全体で、側坐核の活動と危険な行動に従事する可能性との間に正の相関があった。さらに、危険行動を予測する正または負の影響において、個人間の違いがあることがわかった。ネガティブな結果につながるような危険行動を予測する個人は、報酬を与えるための側坐核の活性があることが示された。この関連付けは、成人期は可能な限り危険行動の結果を予測することができることにも牽引された。一方、衝動性は年齢とともに、側坐核の活動とは関連しなかった。これらの知見から、青年期における衝動性は、個人の発達の変化に起因して危険な行動を引き起こす傾向があることを示唆している。

青年期は、小児期と成人期と関連して側坐核の増強活性を示している。側坐核の活性はポジティブな危険行動に正の相関を示し、ネガティブな危険行動には負の相関を示している。

これらのデータから、青年期がリスクの高い選択をしやすいリスクテイカーであることを示唆している⁸⁵。また、一部の青年たちからはマイナス思考のために潜在的なリスクテイクを受け止め、危険な行動をすることが他の青年たちより多いことが示されている。発達集団におけるリスクテイクと報酬処理に関連する複雑な脳の行動との関係性は、個々のばらつきを考慮することの重要性が強調される。また、これらの個人の発達の違いは、物質依存に関連したリスクテイク、そして最終的に中毒への脆弱性を説明するものである。

6 総合考察

2008年発達心理学研究ジャーナル『Development Review』に発表された、米国の医師ケーシーらの研究は、米国で大きな社会的問題となっている青年たちの危険行動に対して、青年期の脳のメカニズムとの関連からその原因を明らかにし、社会に向けて発信され話題となった。近年、脳科学はコンピュータなどの画像解析技術に後押しされて、エビデンスの高い臨床となり、その成果を広く社会に発信することで、ますます注目される領域となっている。脳の構造的変化と認知的変化がヒトの発達や行動、情動に深い関係があることを考えると、学校教育においても、脳の学習メカニズムを理解し、学習活動に転換していくことは価値があるだろう。帝京大学教職大学院の教育が目指す「教育と医療の連携」や、医学知識を学校臨床に還元したり、発信していくことの意義は大きい。

ケーシーらの研究では、中等教育段階にあたる青年期前期・中期の青年たちの様々な知見が報告されている。例えば、この時期の男子が、本能的な情動への認知的制御において、課題をもち、個人によってはネガティブな思考が大きな危険行動に及ぼすことが示されていた。認知的制御とは自己調整力であり、青年期には認知的制御と情動のアンバランスによって、危険行動が生起することがわかった。自己調整力の育成、つまり認知的制御を促進することは、近年、学校現場で話題となっているアクティブ・ラーニングが目指すところの目標と同じである。前頭前野が司る認知的制御を促進することによって、目標指向行動が起こり、自らで目標を設定したり、その目標に向かって、挑戦していくという自己調整力をもつ青年を育成していくことができる。

また、青年期には危険を冒してまで何かにチャレンジするという報酬行動が、危険行動として生起してしまうこともわかった。この報酬行動が、危険の先の対価を求めるものではなく、より高いハードルの先の対価に向かう行動となるように、青年たちのもつチャレンジ精神を後押ししてあげられるような学校教育の中での活動や取り組みを考えることが大

切だろう。

青年期前期にあたる、12歳から15歳の中学生段階には、やる気を抑制する行動や、少し臆病になるという行動抑制、思っているけど、思いをあえて表さない、考えていることと違うことを表出するといった認知的制御が示された。これは、中学生たちのいじめに対する行動を示唆するものであり、わかっているけど抑制してしまったり、考えていることと違うことを言ってしまうといった中学生の行動の表出につながっている。こうした青年期前期、中学生の行動特性の脳のメカニズムを、教育的実践に落として検討していくことも必要であろう。

7歳の小児期から29歳の成人期までの脳の認知的変化と構造的変化を検討したケーシーらの研究からは、初等教育におけるアクティブ・ラーニングと、中等教育におけるアクティブ・ラーニング、さらに高等教育におけるアクティブ・ラーニングには、その学習の目的に違いが必要であることも示唆されていると考える。初等教育におけるアクティブ・ラーニングでは知識習得を目的とした学習を中心として、中等教育や高等教育の青年期におけるアクティブ・ラーニングでは知識活用を目的とした学習を中心として探究的な体験型学習やディベートやディスカッションなどの学習活動への取り組みが考えられるだろう。

脳科学からの学習活動へのアプローチはまだまだ始まったばかりの研究領域である。ケーシーらの研究にもあるように、青年たち一人一人の脳は同じものは一つもなく、個人によっては個別対応の指導法も必要である。また、青年期のピア行動研究からの知見にもあるように、青年期の協働性への指向は、種の特徴でもあり、仲間とやっつけようとする協働性を、学校教育の学習場面や学級指導場面で取り組むことや、指導法の工夫も必要になるのだろう。脳科学の知見は、今、学校教育で取り組むべき方向性を示唆してくれているものとも考える。

最後に、ケーシーらの研究から、医学は医学臨床から得た知見を、社会に発信し、貢献していこうとしている学問領域であることを改めて知り得たと考える。だからこそ、私たち人間社会は医学に支えら

れている意識があるし、医師の社会的地位が高くなっていくのではないだろうか。教育学を反芻してみれば、教育学は医学にある学問領域のアカデミックポリシーをもっと学ぶべきかもしれない。そこには、教育臨床が向き合う子供たちの変化やその事象を、より科学的に捉え、社会に発信していくことが必要で、そのために、教育に何が求められるのか、学校教育は社会に何を発信していくのか、さらに教師はどのような実践をしていくべきなのかを、今よりもさらに深く探究していくことが必要なのだろう。

こうした真理を追究していく科学として教育学と医学の知見によるところの「教育と医療との連携」が、未来の教育のために、未来の子供たちを育むために、重要な役割を担っており、連携から生まれる新たな真理を社会に発信していくことが求められるのだろう。

参考文献

1. 岩田誠・河村満（編）社会活動と脳—行動の原点を探る，医学書院，2008
2. 岸本英爾・宮森孝史・山鳥重，神経心理学と画像診断，朝倉書店，1988
3. 栗原まな，小児の高次脳機能障害，診断と治療社，2008
4. ケヴィン・シルバー（訳）苧坂直行・苧坂満里子，心の神経性学入門，新曜社，2005
5. ジョン・スターリング（訳）苧坂直行・苧坂満里子，大脳皮質と心，新曜社，2005
6. 福田正人（編）こころと脳の科学，こころの科学，150 記念号，日本評論社，2010
7. 村上郁也（編）イラストレクチャー認知神経科学，オーム社，2010
8. 八木文雄，神経心理学，放送大学教育振興会，2006
9. 山内兄人，脳の人間科学，コロナ社，2003
10. 山鳥重，知・情・意の神経心理学，青灯社，2008

註

- 1 Casey BJ, Getz S, Galvan A. The adolescent brain and risky decisions. *Development Review* 2008; 28 (1): 62–77.
- 2 Casey BJ, Rebecca M. Jonesa, and Todd A. Hare., *The Adolescent Brain*, Ann N Y Acad Sci. 2008 March; 1124: 111–126.
- 3 Eaton LK, Kinchen S, Ross J, Hawkins J, Harris WA, Lowry R, et al. Youth risk behavior surveillance —United States, 2005, surveillance summaries. *Morbidity and Mortality Weekly Report* 2006; 55: 1–108.
- 4 Yurgelun-Todd D. Emotional and cognitive changes during adolescence. *Current Opinion in Neurobiology* 2007; 17: 251–257.
- 5 Rubia K, Overmeyer S, Taylor E, Brammer M, Williams SC, Simmons A, et al. Functional frontalisation with age: Mapping neurodevelopmental trajectories with fMRI. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 2000; 24: 13–19.
- 6 Tamm L, Menon V, Reiss AL. Maturation of brain function associated with response inhibition. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* 2002; 41: 1231–1238.
- 7 Brown TT, Lugar HM, Coalson RS, Miezin FM, Petersen SE, Schlaggar BL. Developmental changes in human cerebral functional organization for word generation. *Cerebral Cortex* 2005; 15: 275–290.
- 8 Durston S, Davidson MC, Tottenham N, Galvan A, Spicer J, Fossella J, et al. A shift from diffuse to focal cortical activity with development. *Developmental Science* 2006; 1: 18–20.
- 9 Spear LP. The adolescent brain and age-related behavioral manifestations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 2000; 24: 417–463.
- 10 Casey BJ, Tottenham N, Liston C, Durston S. Imaging the developing brain: What have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Science* 2005; 9: 104–110.
- 11 Laviola G, Adriani W, Terranova ML, Gerra G. Psychobiological risk factors for vulnerability to psychostimulants in human adolescents and animal models. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 1999; 23: 993–1010.
- 12 Ernst M, Nelson EE, Jazbec S, McClure EB, Monk CS, Leibenluft E, et al. Amygdala and nucleus accumbens in responses to receipt and omission of gains in adults and adolescents. *Neuroimage* 2005; 25: 1279–1291.
- 13 Galvan A, Hare TA, Parra CE, Penn J, Voss H, Glover G, et al. Earlier development of the accumbens relative to orbitofrontal cortex might underlie risk-taking behavior in adolescents. *Journal of Neuroscience* 2006; 26: 6885–6892.
- 14 Galvan A, Hare T, Voss H, Glover G, Casey BJ. Risk-taking and the adolescent brain: Who is at risk? *Developmental Science* 2007; 10: F8–F14.
- 15 Hare TA, Voss HU, Glover GH, Casey BJ. The adolescent brain and potential risk for anxiety and depression. 2007a Submitted for publication
- 16 Reyna VF, Farley F. Risk and rationality in adolescent decision making: Implications for theory, practice, and public policy. *Psychological Science in the Public Interest* 2006; 7: 1–44.
- 17 Hare TA, Voss HU, Glover GH, Casey BJ. Competition between prefrontal and subcortical limbic systems underlie emotional reactivity during adolescence. 2007b Submitted for publication
- 18 Casey BJ, Galvan A, Hare TA. Changes in cerebral functional organization during cognitive development. *Current Opinion in Neurobiology* 2005; 15: 239–244.
- 19 Casey BJ, Thomas KM, Welsh TF, Badgaiyan RD, Eccard CH, Jennings JR, et al. Dissociation of response conflict, attentional selection, and expectancy with functional magnetic resonance imaging. *Proceedings of the National Academy of Science* 2000b; 97: 8728–8733.
- 20 Casey BJ, Thomas KM, Davidson MC, Kunz K,

- Franzen PL. Dissociating striatal and hippocampal function developmentally with a stimulus-response compatibility task. *Journal of Neuroscience* 2002a; 22: 8647–8652.
- 21 Casey BJ, Tottenham N, Fossella J. Clinical, imaging, lesion and genetic approaches toward a model of cognitive control. *Developmental Psychobiology* 2002b; 40: 237–254.
- 22 Case R. Validation of a neo-Piagetian capacity construct. *Journal of Experimental Child Psychology* 1972; 14: 287–302.
- Case, R. *Intellectual development: Birth to adulthood*. New York: Academic Press; 1985.
- 23 Flavell JH, Feach DR, Chinsky JM. Spontaneous verbal rehearsal in a memory task as a function of age. *Child Development* 1966; 37: 283–299.
- 24 Keating DP, Bobbitt BL. Individual and developmental differences in cognitive processing components of mental ability. *Child Development* 1978; 49: 155–167.
- 25 Pascual-Leone JA. A mathematical model for transition in Piaget’s developmental stages. *Acta Psychologica* 1970; 32: 301–345.
- 26 Case, R. *Intellectual development: Birth to adulthood*. New York: Academic Press; 1985.
- 27 Bjorkland, DF. The role of conceptual knowledge in the development of organization in children’s memory. In: Brainerd, CJ.; Pressley, M., editors. *Basic processes in memory development: Progress in cognitive development research*. New York: Springer-Verlag; 1985. p.103-142.
- 28 Bjorkland DF. How age changes in knowledge base contribute to the development of children’s memory: An interpretive review. *Developmental Review* 1987; 7: 93–130.
- 29 Harnishfeger, KK.; Bjorkland, F. The ontogeny of inhibition mechanisms: A renewed approach to cognitive development. In: Howe, ML.; Pasnek, R., editors. *Emerging themes in cognitive development*. 1. New York: Springer-Verlag; 1993. p.28-49.
- 30 Brainerd CJ, Reyna VF. Memory independence and memory interference in cognitive development. *Psychological Review* 1993; 100: 42–67.
- 31 Dempster, FN. Resistance to interference: Developmental changes in a basic processing mechanism. In: Howe, ML.; Pasnak, R., editors. *Emerging themes in cognitive development Volume 1: Foundations*. New York: Springer; 1993. p.3-27.
- 32 Diamond A. Development of the ability to use recall to guide action, as indicated by infants’ performance on AB. *Child Development* 1985; 56: 868–883.
- 33 Munakata Y, Yerys BE. All together now: When dissociations between knowledge and action disappear. *Psychological Science* 2001; 12: 335–337.
- 34 Kuhnen CM, Knutson B. The neural basis of financial risk taking. *Neuron* 2005; 47: 763–770.
- 35 Matthews SC, Simmons AN, Lane SD, Paulus MP. Selective activation of the nucleus accumbens during risk-taking decision making. *Neuroreport* 2004; 15: 2123–2127.
- 36 Montague PR, Berns GS. Neural economics and the biological substrates of valuation. *Neuron* 2002; 36: 265–284.
- 37 Durston S, Hulshoff Pol HE, Casey BJ, Giedd JN, Buitelaar JK, van Engeland H. Anatomical MRI of the developing human brain: What have we learned? *Journal of American Academy of Child Adolescent Psychiatry* 2001; 40: 1012–1020.
- 38 Giedd JN. Structural magnetic resonance imaging of the adolescent brain. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2004; 1021: 77–85.
- 39 Gogtay N, Giedd JN, Lusk L, Hayashi KM, Greenstein D, Vaituzis AC, et al. Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2004; 101: 8174–8179.
- 40 Sowell ER, Peterson BS, Thompson PM, Welcome SE, Henkenius AL, Toga AW. Mapping cortical

- change across the human life span. *Nature Neuroscience* 2003; 6: 309–315.
- 41 Sowell ER, Thompson PM, Toga AW. Mapping changes in the human cortex throughout the span of life. *Neuroscientist* 2004; 10: 372–392.
- 42 Bourgeois JP, Goldman-Rakic PS, Rakic P. Synaptogenesis in the prefrontal cortex of rhesus monkeys. *Cerebral Cortex* 1994; 4: 78–96.
- 43 Huttenlocher PR. Synaptic density in human frontal cortex—Developmental changes and effects of aging. *Brain Research* 1979; 163: 195–205.
- 44 Sowell ER, Thompson PM, Holmes CJ, Jernigan TL, Toga AW. In vivo evidence for post-adolescent brain maturation in frontal and striatal regions. *Nature Neuroscience* 1999; 2: 859–861.
- 45 Giedd JN, Snell JW, Lange N, Rajapakse JC, Casey BJ, Kozuch PL, et al. Quantitative magnetic resonance imaging of human brain development: Ages 4–18. *Cerebral Cortex* 1996; 6: 551–560.
- 46 Casey BJ, Trainor RJ, Orendi JL, Schubert AB, Nystrom LE, Giedd JN, et al. A developmental functional MRI study of prefrontal activation during performance of a go-no-go task. *Journal of Cognitive Neuroscience* 1997; 9: 835–847.
- 47 Fields RD. White matter in learning, cognition and psychiatric disorders. *Trends Neurosci.* 2008; 31(7): 361–370.
- 48 Nagy Z, Westerberg H, Klingberg T. Maturation of white matter is associated with the development of cognitive functions during childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2004; 16: 1227–1233.
- 49 Liston C, Watts R, Tottenham N, Davidson MC, Niogi S, Ulug AM, et al. Frontostriatal microstructure modulates efficient recruitment of cognitive control. *Cerebral Cortex* 2005; 16: 553–560.
- 50 Casey BJ, Castellanos FX, Giedd JN, Marsh WL, Hamburger SD, Schubert AB. Implication of right frontostriatal circuitry in response inhibition and attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* 1997; 36: 374–383.
- 51 Casey BJ, Giedd JN, Thomas KM. Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology* 2000a; 54: 241–257.
- 52 Durston S, Davidson MC, Thomas KM, Worden MS, Tottenham N, Martinez A, et al. Parametric manipulation of conflict and response competition using rapid mixed-trial event-related fMRI. *Neuroimage* 2003; 20: 2135–2141.
- 53 Bunge SA, Dudukovic NM, Thomason ME, Vaidya CJ, Gabrieli JD. Immature frontal lobe contributions to cognitive control in children: Evidence from fMRI. *Neuron* 2002; 33: 301–311.
- 54 Crone E, Donohue S, Honomichl R, Wendelken C, Bunge S. Brain regions mediating flexible rule use during development. *Journal of Neuroscience* 2006; 26: 11239–11247.
- 55 Luna B, Thulborn KR, Munoz DP, Merriam EP, Garver KE, Minshew NJ, et al. Maturation of widely distributed brain function subserves cognitive development. *Neuroimage* 2001; 13: 786–793.
- 56 Moses P, Roe K, Buxton RB, Wong EC, Frank LR, Stiles J. Functional MRI of global and local processing in children. *Neuroimage* 2002; 16: 415–424.
- 57 Schlaggar BL, Brown TT, Lugar HM, Visscher KM, Miezin FM, Petersen SE. Functional neuroanatomical differences between adults and school-age children in the processing of single words. *Science* 2002; 296: 1476–1479.
- 58 Thomas KM, Hunt RH, Vizueta N, Sommer T, Durston S, Yang Y, et al. Evidence of developmental differences in implicit sequence learning: An FMRI study of children and adults. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2004; 16: 1339–1351.
- 59 Turkeltaub PE, Gareau L, Flowers DL, Zeffiro TA, Eden GF. Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience* 2003; 6: 767–773.

- 60 Bjork JM, Knutson B, Fong GW, Caggiano DM, Bennett SM, Hommer DW. Incentive-elicited brain activation in adolescents: Similarities and differences from young adults. *Journal of Neuroscience* 2004; 24: 1793–1802.
- 61 May JC, Delgado MR, Dahl RE, Stenger VA, Ryan ND, Fiez JA, et al. Event-related functional magnetic resonance imaging of reward-related brain circuitry in children and adolescents. *Biological Psychiatry* 2004; 55: 359–366.
- 62 Eshel N, Nelson EE, Blair RJ, Pine DS, Ernst M. Neural substrates of choice selection in adults and adolescents: Development of the ventrolateral prefrontal and anterior cingulate cortices. *Neuropsychologia* 2007; 45: 1270–1279.
- 63 Hikosaka K, Watanabe M. Delay activity of orbital and lateral prefrontal neurons of the monkey varying with different rewards. *Cerebral Cortex* 2000; 10: 263–271.
- 64 Pecina S, Cagniard B, Berridge KC, Aldridge JW, Zhuang X. Hyperdopaminergic mutant mice have higher “wanting” but not “liking” for sweet rewards. *Journal of Neuroscience* 2003; 23: 9395–9402.
- 65 Schultz W. Behavioral theories and the neurophysiology of reward. *Annual Reviews of Psychology* 2006; 57: 87–115.
- 66 Knutson B, Adams CM, Fong GW, Hommer D. Anticipation of increasing monetary reward selectively recruits nucleus accumbens. *Journal of Neuroscience* 2001; 21: RC159.
- 67 O’Doherty J, Kringelbach ML, Rolls ET, Hornak J, Andrews C. Abstract reward and punishment representations in the human orbitofrontal cortex. *Nature Neurosci* 2001; 4: 95–102.
- 68 Zald DH, Boileau I, El-Dearedy W, Gunn R, McGlone F, Dichter GS, et al. Dopamine transmission in the human striatum during monetary reward tasks. *Journal of Neuroscience* 2004; 24: 4105–4112.
- 69 Hyman SE, Malenka RC. Addiction and the brain: The neurobiology of compulsion and its persistence. *Nature Reviews Neuroscience* 2001; 2: 695–703.
- 70 Volkow ND, Li TK. Drug addiction: The neurobiology of behaviour gone awry. *Nature Reviews Neuroscience* 2004; 5: 963–970.
- 71 Laviola G, Macri S, Morley-Fletcher S, Adriani W. Abstract risk-taking behavior in adolescent mice: Psychobiological determinants and early epigenetic influence. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 2003; 27: 19–31.
- 72 Monk CS, McClure EB, Nelson EE, Zarah E, Bilder RM, Leibenluft E, et al. Adolescent immaturity in attention-related brain engagement to emotional facial expressions. *Neuroimage* 2003; 20: 420–428.
- 73 Miller EK, Cohen JD. An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience* 2001; 24: 167–202.
- 74 McClure SM, Laibson DI, Loewenstein G, Cohen JD. Separate neural systems value immediate monetary rewards. *Science* 2004; 306: 503–507.
- 75 Graber, JA., Brooks-Gunn, J. Puberty. In: Blechman, EA.; Brownell, KD., editors. *Behavioral medicine and women a comprehensive handbook*. New York, NY: Guilford Press; 1998. p.51-58.
- 76 Kelley AE, Schochet T, Landry C. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2004; 1021: 27–32.
- Knutson B, Adams CM, Fong GW, Hommer D. Anticipation of increasing monetary reward selectively recruits nucleus accumbens. *Journal of Neuroscience* 2001; 21: RC159.
- 77 Steinberg L. Risk-taking in adolescence: What changes, and why? *Annals of the New York Academy of Sciences* 2004; 1021: 51–58.
- 78 Rosenberg DR, Lewis DA. Postnatal maturation of the dopaminergic innervation of monkey prefrontal and motor cortices: A tyrosine hydroxylase immunohistochemical analysis. *The Journal of Comparative Neurology* 1995; 358: 383–400.

- 79 Benthin A, Slovic P, Severson H. A psychometric study of adolescent risk perception. *Journal of Adolescence* 1993; 16: 153–168.
- 80 Mischel W, Shoda Y, Rodriguez MI. Delay of gratification in children. *Science* 1989; 244: 933–938.
- 81 目の前のマシュマロを我慢したら、さらに与えることを幼児に示し、自制心やセルフコントロールを測るテスト
- 82 Eigsti IM, Zayas V, Mischel W, Shoda Y, Ayduk O, Dadlani MB, et al. Predicting cognitive control from preschool to late adolescence and young adulthood. *Psychological Science* 2006; 17: 478–484
- 83 Steinberg L. Risk-taking in adolescence: New perspectives from brain and behavioral science. *Current Directions in Psychological Science* 2007; 16: 55–59.
- 84 O’Doherty J, Reward representations and reward-related learning in the human brain: Insights from neuroimaging. *Current Opinions in Neurobiology* 2004; 14: 769–776.
- 85 Gardener M, Steinberg L. Peer influence on risk taking, risk preference, and risky decision making in adolescence and adulthood: An experimental study. *Developmental Psychology* 2005; 41: 625–635.