

資料

意思決定における前頭葉機能とその障害

—報酬・罰による意思決定のモデル—

増南太志*・佐藤晋治**・前川久男**・宮本信也**

意思決定とは、いくつかの可能な選択肢の中から1つの有利な反応を選ぶ行動である。それには前頭前皮質における目的志向行動が関与していると考えられる。そのため、本論文では、このような意思決定における前頭葉の機能について考察を試みた。前頭前皮質は背外側部と眼窩部で機能的に乖離している。背外側前頭前皮質はワーキングメモリや複雑な認知処理を要する課題に重要であるのに対し、眼窩前頭皮質は過去の報酬・罰の経験に基づいて意思決定を行うのに重要であることが知られている。本論文では、これらの機能が報酬・罰の情報に基づいて行われる処理であることを説明し、報酬・罰による意思決定のプロセスを明確にしたモデルを提案した。

キー・ワード：意思決定 報酬・罰 背外側前頭前皮質 眼窩前頭皮質 意思決定のモデル

I. はじめに

意思決定とは、いくつかの可能な選択肢の中から1つの有利な反応を選ぶ行動である (Damasio, 1994¹²⁾; Damasio, Tranel, & Damasio, 1991¹⁴⁾)。意思決定に関する多くの理論で、動物は行為の結果として得られる報酬とその報酬の生起率を含むいくつかの変数に基づいて意思決定を行っているとは仮定される (Platt & Glimcher, 1999¹¹⁾)。例えば、意思決定の数学的アプローチでは、期待されたゲインに、そのゲインの確率をかけることで各行為の期待値を計算し、最も期待値の高い選択肢を選ぶと考えられている。また、生態学的生物学者や心理学者の意思決定モデルでも、動物が強化の確率と大きさに基づいて選択するモデルを提案している。そのため、適切な意思決定を行うためには、環境情報と記憶情報を統合し、行動

の結果、報酬が得られるかどうかを予測する思考や判断が必要である。プランニングは目的のために、内的情報と外的情報を統合し、自分の行動や思考を調整していくプロセスであり (Das, Naglieri, & Kirby, 1994¹⁷⁾)、意思決定においても重要な機能であると考えられる。また、状況によっては瞬時に判断を行うような意思決定場面があり、例えば、蜜蜂はいくつかの花の中からより好ましい花を即時に決めなければならない (Montague, Dayan, Person, & Sejnowski, 1995³⁸⁾)。このように不完全ながらも迅速な意思決定が必要な場合もある (Rahman, Sahakian, Cardinal, Rogers, & Robbins, 2001⁴²⁾)。このように意思決定にはプランニングを構成する多くの認知機能や報酬として表される情動機能が含まれており、これには前頭葉が関連していると考えられる (Dehaene & Changeux, 2000²⁰⁾; Rahmanら, 2001⁴²⁾)。

ヒトの前頭葉は大脳の中で最大の領域を占め、ほかの動物と比べても著しく発達している。

*筑波大学人間総合科学研究科

**筑波大学心身障害学系

前頭葉では高次の精神活動が行われており、行動の持続、行動の決定、感情の安定などに関与することが知られている。さらに、近年では前頭葉の異なる領域が別個の認知プロセスに関係することが知られており、これらが意思決定にどのような影響を与えるのかについて研究が行われている (Bechara, Damasio, & Damasio, 2000⁴⁾; Rahmanら, 2001⁴²⁾。

そのため、本論文ではこれらの研究を概観し、意思決定における前頭葉の機能について考察する。特に、報酬として現れる情動機能が意思決定には重要であるため、報酬・罰と前頭葉の関係について検討している研究の紹介を行い、報酬・罰により行動や思考がどのように調整され、意思決定が行われるのかについて考察する。

II. 前頭前皮質機能と意思決定

前頭葉の中でも特に思考や判断などの高次精神機能に関与するのは前頭前皮質である。この領域は運動前野と補足運動野、前頭眼野より前方に存在する前頭葉の皮質領域である。この領域は多数の入力情報を受け、出力情報を他の脳領域に送り出しており、大脳の階層ネットワークの中で最高次の立場に立つ、いわば「統合系」としての役割を持つ (澤口, 2000⁴⁷⁾)。ここでは前頭前皮質の機能としてこれまで考えられてきた仮説を紹介し、前頭前皮質が意思決定の場であることを述べる。

前頭前皮質の主要な機能はワーキングメモリであると考えられている。ワーキングメモリは Baddeley (1986¹⁾, 1992²⁾) によって提唱された概念であり、意味のある情報を一時的に保持しながら、目的のためにその情報を統合・処理する機能である。ワーキングメモリは音韻ループ、視空間メモ、中央実行系という3つの要素を持っている。音韻ループは音声情報を一時的に保持し、視空間メモは視覚情報を一時的に保持するプロセスである。そして、中央実行系はこれらの保持された情報を統合し処理する。思考や意思決定は保持された情報を操作し、状況に最も有利な行動を選択する過程であるため、こ

のように情報の保持と処理を担うワーキングメモリの機能が不可欠であると言えよう。

Goldman-Rakic (1987²⁵⁾) は前頭前皮質の機能をワーキングメモリの概念を用いて説明できることを指摘している。前頭前皮質の中でも特に背外側部がワーキングメモリの中核であるという考えは、ヒトやサルを用いた多くの実験によって支持されている (Bechara, Damasio, Tranel, & Anderson, 1998⁵⁾; Cabeza & Nyberg, 1997⁸⁾; Cohen, Perelstein, Braver, Nystrom, Noll, Jonides, & Smith, 1997¹¹⁾; Fuster, 1997²⁴⁾)。ワーキングメモリの研究によく用いられるのは遅延反応課題である。一般的な遅延反応課題の手続きは、まず被験体に手がかり刺激を呈示し、その後、その刺激を消してから数秒の遅延期間の後、合図とともに、被験体は手がかり刺激が呈示された位置に向かって、記憶に頼って反応する。この課題では、遅延期間の間、手がかり刺激の位置を保持して行動をコントロールするため、空間情報のワーキングメモリが必要である。サルの背外側前頭前皮質を切除すると、この課題においてエラーが増加することを示している (Fuster, 1997²⁴⁾)。また、遅延反応に関係して活性化するニューロンも前頭前皮質で豊富に見つかっている (Funahashi & Kubota, 1994²³⁾; Fuster, 1997²⁴⁾)。ヒトに対しても遅延反応課題により、ワーキングメモリの研究が行われており、PETやfMRIなどの脳画像研究や前頭葉損傷者の研究から、背外側前頭前皮質がワーキングメモリに関与することが示されている (Becharaら, 1998⁵⁾; Cabeza & Nyberg, 1997⁸⁾; Cohenら, 1997¹¹⁾)。これらの研究から、前頭前皮質はワーキングメモリに関わる機能を持つことは明らかである。

しかし、これらの研究では、保持する情報の種類により前頭前皮質内で活性化される領域に微妙な相違が生じたり、左右の半球間で差が生じたり、また、ワーキングメモリに関与する脳領域は前頭前皮質に限局されるわけではなく、処理される情報の種類に応じて様々な脳部位が活性化されることも明らかにされている。例え

ば、視覚刺激を呈示したワーキングメモリでは、右半球の前頭前皮質に加え、右半球の頭頂葉、後頭葉、運動前野が活性化した (Jonides, Smith, Koeppe, Awh, Minoshima, & Mintun, 1993³¹⁾)。また、空間情報のワーキングメモリでは右側の中前頭回であるのに対し、非空間情報のワーキングメモリでは両側の中前頭回および下前頭回が活性化している (McCarthy, Puce, Constable, Krystal, Gore, & Goldman-Rakic, 1996³⁶⁾)。このようなことから、Goldman-Rakic (1996²⁶⁾) は前頭前皮質におけるワーキングメモリの領域特異的モデル (domain-specific model) を提案している。このモデルによると、ワーキングメモリで処理される情報の種類によって、処理が行われる前頭前皮質の部位が異なり、空間的情報や非空間的情報に依存した領域特異的なワーキングメモリモジュールが存在すると考えられている (Goldman-Rakic, 1996²⁶⁾; Levy & Goldman-Rakic, 2000³⁵⁾)。

また、ワーキングメモリに関する他の仮説として、動的オペレーティングシステム仮説がある。この仮説は、澤口 (2000⁴⁷⁾) がワーキングメモリの脳内メカニズムを明らかにするため、前頭前皮質の機能として提唱したものである。この仮説では、前頭前皮質は少なくとも以下のプロセスを含むと考えられる。①意味のある情報の選択 (選択的注意)、②選択結果の保持と操作、③目的的情報 (「答え」) の生成、④「答え」に基づく制御情報の出力、⑤制御結果の評価 (出力結果の回帰的情報)。選択的注意は、記憶情報を含む雑多な情報から意味のある情報を選択する過程であり、ワーキングメモリの容量が限られているため、重要な機能である。そして、その選ばれた情報を保持・操作しつつ、状況に応じた適切な「答え」を生成し、それに基づいて他の脳領域を制御する。さらに、その制御の結果情報に基づき、「答え」や制御の仕方を変えてゆく。澤口 (2000⁴⁷⁾) はこのような過程を前頭前皮質の機能であるとする。この仮説の重要な点は、選択した情報や結果情報に基づいて、目的である「答え」やそれに対する制御の仕方をダ

イナミックに変化させることである。澤口 (2000⁴⁷⁾) は、上記①～⑤の過程に応じて前頭前皮質のニューロン活動が見られることを示している。例えば、状況に応じて意味のある情報を選択し保持することに特異的に関わるニューロン (Iba & Sawaguchi, 1999²⁹⁾, 2000³⁰⁾)、意味のある感覚情報を保持しながら、より抽象的な情報やより精度の高い情報へ統合・変換するニューロン (Kikuchi-Yorioka & Sawaguchi, 1999³²⁾; Sawaguchi & Yamane, 1999⁴⁸⁾)、状況に応じた適切な「答え」を生成するニューロン (Fukushi & Sawaguchi, 1998²²⁾; Hasegawa, Sawaguchi, & Kubota, 1998²⁸⁾) である。また、自分の行った行動の「結果」を符号化するニューロンも見つけられている (澤口, 2000⁴⁷⁾)。

このように澤口 (2000⁴⁷⁾) は、前頭前皮質の機能として、単純に保持と処理というだけでなく、目的の生成と制御の仕方の変化によるダイナミックなプロセスを仮定している。また、前頭葉の機能を示す概念にプランニングがあり、これは目的にかなうよう、行動的反応だけでなく他の認知処理機能をモニターし調整する認知機能を意味する (Das, Kar, & Parrila, 1996¹⁰⁾; Parrila, 1995⁴⁰⁾)。このように、前頭葉あるいは前頭前皮質の機能を思考や判断のプロセスとして捉える考えもある。前頭前皮質がこれらのプロセスのどこまでを担っているのか、あるいはそれ以上の機能を持つかについては今後さらなる研究が必要とされるが、少なくともこれらのプロセスは意思決定において不可欠である。特に、目的に基づいた処理が行われることに関しては、前頭前皮質において報酬や罰に反応するニューロンが見つかっており (Rosenkilde, Bauer, & Fuster, 1981⁴⁵⁾; Thorpe, Rolls, & Maddison, 1983⁵¹⁾; Watanabe, 1998⁵²⁾)、また、知的には正常でも情動に困難を示す前頭葉損傷者の例があるため (Damasio, 1994¹²⁾; Rolls, Hornak, Wade, & McGrath, 1994⁴⁴⁾)、近年、前頭前皮質と報酬・罰の関係が注目されている。そのため、報酬・罰の情報が前頭前皮質におい

てどのように処理されるのかを検討することは重要である。

このことと関係して、前頭前皮質の背外側前頭前皮質と眼窩前頭皮質は機能的に乖離していることが示されつつある (Damasio, 1994²³); Rollsら, 1994⁴⁴)。背外側前頭前皮質はワーキングメモリや複雑な認知処理を要する課題において重要であるのに対し、眼窩前頭皮質は報酬・罰といった情動的な面との関係が強い。しかし、報酬や罰に対して反応するニューロンは、背外側前頭前皮質でも眼窩前頭皮質でも見つけられており、両部位で報酬・罰の情報が用いられていると思われる。では実際に、これらの部位で、報酬・罰の情報がどのように利用されているのであろうか？ まずは背外側前頭前皮質と報酬・罰の関係について述べている研究を紹介する。

III. 背外側前頭前皮質と報酬・罰

Dehaene and Changeux (2000²⁰) は、行動のプランは前頭前皮質におけるニューロンの集成体の活性化が変動することによって発生し、現在の環境に最も適応した活性化のパターンの選択は報酬信号によって行われると仮定した。また、実際に行動を行う前に、その結果が報酬を得られるものであるかどうかを予測すること (報酬の予測) は、実環境においてリスクを少なくするために重要である。Dehaene and Changeux (2000²⁰) は前頭前皮質では報酬を中心としてこのような目的志向行動のための機能が働いていると考えており、ウィスコンシンカード分類テスト (以下WCST) やロンドン塔テストなどの前頭前皮質の特に背外側前頭前皮質に関連した課題のコンピュータモデルを提案している (Dehaene & Changeux, 1991¹⁸), 1997¹⁹)。以下では、そのメカニズムの例として、WCSTのモデルを示す。

WCST (Milner, 1963³⁷) は全部で 128 枚のカードを分類する課題であり、被験者は実験者の答え (YESかNO) に基づいて分類規則を発見することを求められる。それぞれのカードには、

4種類の図形 (丸, 星, 十字, 三角) から選ばれた1種類の図形が、1~4個描かれ、それが4色 (赤, 緑, 黄, 青) の内の1色を用いて彩色されている。課題の始め、被験者の前に4枚の参照カード (赤の三角が1個のカード, 緑の星が2個のカード, 黄の十字が3個のカード, 青の丸が4個のカード) が置かれる。被験者は128枚の反応カードを、そのカードが示す次元 (形, 数, 色) に従って、4枚の参照カードのいずれかに分類する。例えば、十字の赤が2個のカードを引いたときに、分類規則が形であれば、同じ形の参照カード (すなわち、黄の十字が3個のカード) のところに分類しなければならない。この分類規則は実験者によって決められており、被験者にその規則を直接教えることはしない。被験者が分類した結果に対して 'YES' か 'NO' でのみ返答し、被験者に分類規則を推測させる。被験者は正答した分類規則で次々にカードを分類するよう求められるが、10回連続して正答すると、実験者は被験者に知らせることなく分類規則を変更する。そして、被験者は新しい分類規則を探さなければならない。すなわち、この課題は実験者のフィードバックに従って、分類規則を変更していく課題である。

背外側前頭前皮質損傷者 (Milner, 1963³⁷) や自閉症児 (熊谷, 1984³⁴) はこの課題において、以前の分類基準にこだわり続けるという固執傾向が見られる。背外側前頭前皮質がワーキングメモリに関与することを考えると、WCSTにワーキングメモリが関与していると考えられる。実際、カードを正しく分類するためには、'YES'の返答が得られた分類規則を記憶していくことが必要であらう。しかし、この課題ではワーキングメモリだけでなく、フィードバック情報を用いて不正解の分類規則を抑制し、正しい分類規則を検索あるいは維持するといった処理が必要である。Dehaene and Changeux (1991¹⁸) は、WCSTを遂行するためには、単純に保持と処理というだけでなく、報酬・罰を中心とした処理が必要であることを示している。この研究では、報酬・罰の役割について検

討するため、WCSTのニューラルネットワークモデルを提案している。ニューラルネットワークは、脳のニューロンの活性化の大きさと、ニューロン間のシナプスの連結強度を数式で表現する脳の情報処理モデルである。その特徴として、コンピュータシミュレーションを行うことにより、ニューロンやシナプスの活動を動的に捉えられ、また、モデルのある機能を破壊することにより、様々な障害の状態像を再現することができる。

Dehaene and Changeux (2000²⁰) を参考にして、Fig. 1にWCSTのニューラルネットワークモデルを示す。入力では、反応カードが色、形、数の次元に沿って符号化され、その情報は記憶クラスターの活性化パターンとして短期間貯蔵される。記憶クラスターは、出力に対する現在の意図を示すクラスターを活性化させる。規則符号化クラスターは記憶クラスターから現在の意図クラスターの活性化伝播を調整し、効率的に分類規則を決める役割を持つ。出力の活性化は4枚の参照カードのいずれかに反応カードを置くことを示す。Goユニットが活性化すると、現在の意図の活性化は出力に伝播し、出力クラスターは活性化する。

このモデルの特徴である規則符号化クラスターは、それぞれがひとつの次元(色、形、数)

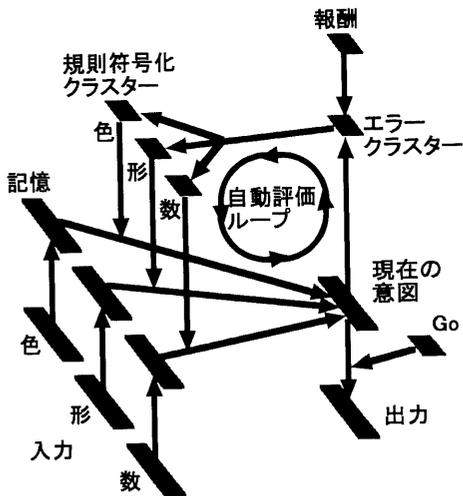


Fig. 1 WCSTのモデル (Dehaene & Changeux, 2000²⁰)を参考)

に対応しており、記憶クラスターと現在の意図クラスターの間にある、特定の次元に対する連結を調整する。課題の中で、適切な分類規則を探すために、規則符号化クラスターはランダムに自発的活性化をする。この課題では、出力結果が正しければ、正の報酬によりエラークラスターは活性化しないが、正しくなければ、負の報酬により、エラークラスターが活性化する。そして、このエラークラスターは、規則符号化クラスターを抑制し、別の規則符号化クラスターが自発的に活性化する。このようにして、モデルは、正しい規則が発見され、エラークラスターが活性化しなくなる(すなわち、正の報酬が得られる)まで、規則符号化クラスターは分類規則を検索するのである。また、Dehaene and Changeux (1991¹⁸)はWCSTのモデル化の過程で、自動評価ループの重要性を指摘している。自動評価ループは、過去の経験により、現在の意図で活性化したクラスターがエラーになるかどうかを予測する(すなわち、報酬の予測)ものであり、モデルは出力を行う前に内的に評価を行うことができる。このように報酬信号によって分類規則を検索し、その規則に従った行動の調整を行い、報酬の予測によって行動の結果を評価することにより、モデルはWCSTを遂行することができる。しかし、この報酬信号の機能が低下し、エラークラスターへの入力弱まると、コンピュータシミュレーションの結果では、モデルはフィードバックに従って分類規則を変えることができなくなり、背外側前頭前皮質損傷者や自閉症児者に見られる固執傾向を示す。

WCSTのモデルにおける報酬の特徴はロンドン塔テストにも応用されている (Dehaene & Changeux, 1997¹⁹)。ロンドン塔テストは、問題解決のために操作の系列を実行し、評価・修正を行っていくため、よりプランニングが必要な課題であり、報酬ユニットあるいは報酬ユニットからの投射を受けるプランユニットの機能を低下させることで前頭前皮質損傷者の遂行パターンが再現されている。これらのモデルでは、

規則符号化クラスターやプランユニットがエラーを検出したときに適切な規則やプランを検索するために活性化することを示している。背外側前頭前皮質や前部帯状回では、このようなエラー処理を行う活動が見つけられており (Carter, Braver, Barch, Botvinich, Noll, & Cohen, 1998¹⁰); Dehaene, Posner, & Tucker, 1994²¹); Niki & Watanabe, 1979⁹⁹); fMRIを用いたWCSTの研究では、規則を検索するときに背外側前頭前皮質のニューロンが活性化することを報告している (Konishi, Nakajima, Uchida, Kameyama, Nakahara, Sekihara, & Miyashita, 1998³³)。そのため、モデルにおける行動の規則・プランを発生する場合は背外側前頭前皮質に対応すると考えられる。

これらのモデルは、報酬・罰によって適切な行動のプランを発生し、そのプランに応じて行動の調整を行い、報酬・罰の予測による行動の結果の評価を行うことで目的志向行動が理論的に可能であることを示している。また、行動のプランを発生する場合は背外側前頭前皮質に対応すると考えられる。

IV. 眼窩前頭皮質と報酬・罰

ヒトでの損傷研究やサルでの破壊実験によると、眼窩前頭皮質は情動・動機づけ機能に関与している (Damasio, 1994¹²); Fuster, 1997²⁴)。解剖学的にも、眼窩前頭皮質は情動の表出や評価に関わりが深い扁桃体からの入力を受け (Carmichael & Price, 1995⁹)、自律神経や内分泌の中枢と言われる視床下部の制御を行っている (Haber, Kunishio, Mizobuchi, & Lynd-Balta, 1995²⁷)。そのため、眼窩前頭皮質を損傷すると情動に関わる機能が障害され、しばしば日常において不適切な行動を示す。

眼窩前頭皮質損傷例については、最も有名なフィニアス・ゲージの症例以来、多くの研究が行われてきた (Bechara, Damasio, Damasio, & Anderson, 1994³); Damasio, Grabowski, Frank, Galaburda, & Damasio, 1994¹⁵); Saver & Damasio, 1991⁴⁶)。眼窩前頭皮質損傷

者では知能や社会的知識は正常であり、背外側前頭前皮質損傷者に見られるような認知的な困難は見られないにもかかわらず、意思決定能力の障害や社会的行動異常が認められる (Damasio, 1994¹²); Rollsら, 1994⁴⁴)。以下では、眼窩前頭皮質の機能を検証する課題や、その結果を説明するための仮説について述べていく。

Rollsらは刺激—報酬に関連づける能力について検証するため、逆転弁別学習課題と消去課題を用いている (Rolls, 2000⁴³); Rollsら, 1994⁴⁴)。逆転弁別学習課題では、2つの異なる刺激がタッチスクリーンに呈示され、被験者は画面に触れることでそのいずれかを選択する。正しい方を選択すれば得点が得られ(報酬)、不正解であれば得点が失われる(罰)。10試行中9回の正反応が達成基準であり、一度基準に達すると、刺激—報酬・罰の関係が逆転する。すなわち、前に正解だった刺激は不正解となり、不正解だった刺激は正解となる。消去課題では、ほとんどの手続きは逆転弁別学習課題と同じであるが、達成基準に達した後は、いずれの刺激を選択しても不正解であり、選択することを拒否した場合が正反応となる。眼窩前頭皮質損傷者は、刺激と報酬・罰の随伴性が変化したということ言語的に報告できるにも関わらず、正しい刺激を選択することができず、両課題で成績低下を示した。それに対し、背外側前頭前皮質に限局した損傷者や前頭葉以外の脳損傷者ではこれらの課題の成績低下は認められなかった。そのため、Rolls (2000⁴³) は眼窩前頭皮質が環境刺激と強化の関連づけを評価することに重要な役割を果たしていると論じた。

Damasioは眼窩前頭皮質損傷者の行動異常を説明するために、ソマティックマーカー仮説を提唱した (Damasio, 1996¹³)。この仮説では、ある状況下で我々が意思決定をする際、過去の報酬あるいは罰の経験によって引き出されたマーカーが、我々の取り得る行動の選択範囲を制限すると考えられている。このマーカーは状況に応じた情動反応を呼び起こし、体性感覚と

密接に関係することから、ソマティックマーカーと呼ばれる。この機能により、行動の帰結が「良い」「悪い」といった価値判断と結び付けられ、複雑な状況下でも推論や意思決定が効率的で迅速なものとなる。眼窩前頭皮質損傷者では、この機能の障害があるために、意思決定が効率的に行われず、長期的に不利益をもたらす行動をとってしまうと考えられる。次に、ソマティックマーカー仮説を実証する研究を以下に示す。

Becharaら(1994³⁾)は眼窩前頭皮質損傷者の行動障害を直接的に捉えるため、またソマティックマーカー仮説を実証するために、ギャンプリング課題を提案した。ギャンプリング課題は日常の意思決定場面に近づけられた神経心理学的検査である。この課題では、被験者は“A、B、C、D”と名づけられた4つのカードデッキの前に座り、カードを選択する。カードを1枚選択するたびに被験者は報酬が与えられる。しかし、ときどき報酬の後に罰金が与えられる。この報酬と罰金はそれぞれのデッキに対応して決められている。AとBのデッキからカードを引くと、報酬として100ドルが与えられ、CとDから引くと50ドルが与えられる。しかし、AとBのデッキは罰金が多く、選択し続けると、最終的にはマイナスになる不利なデッキである。それに対し、CとDは罰金が少なく、選択し続けると、最終的にはプラスになる有利なデッキである。すなわち、被験者は即時に与えられる報酬とその後に与えられる罰金の関係性を評価しつつ、有利なデッキを選択することになる。

健常者やワーキングメモリ課題で困難を示す背外側前頭前皮質損傷者では、試行を重ねるにつれ徐々に有利なデッキを選択するようになり、その傾向は試行の後半で特に認められる。それに対し、眼窩前頭皮質損傷者では、不利なデッキを選択する回数が多く、後半になってもその傾向は強い(Becharaら, 1998³⁾)。すなわち、毎回即時に与えられる報酬に基づいて選択し続ける。Becharaらはギャンプリング課題の際に生理指標として皮膚コンダクタンス反応(以下

SCR)をとっている(Bechara, Damasio, Tranel, & Damasio, 1997⁶⁾)。SCRは自律神経反応を反映しており、情動的内容を含む刺激に対する反応としてとられたものである。健常者では不利なデッキを選択するときに罰を予測する予期的SCRが現れるのに対し、眼窩前頭皮質損傷者では予期的SCRはほとんど認められない。また、この実験では、10試行毎に課題の内容に関する言語報告を被験者に求めており、何人かの眼窩前頭皮質損傷者はどのデッキが有利でどのデッキが不利であるかを正確に答えることができる。それにも関わらず、彼らは不利なデッキを選択し続けた。

このような眼窩前頭皮質損傷者の遂行パターンに対し、いくつかの可能性が挙げられる。①報酬に対して感度が強すぎる、②罰に対して感度が低い、③報酬であろうと罰であろうと、一般的に将来の結果に対して感度が低い。これらの可能性を検証するため、ギャンプリング課題の変形版が提案されている(Bechara, Tranel, & Damasio, 2000⁷⁾)。変形版ギャンプリング課題では、報酬と罰の順序が入れ替わっており、毎回即時に罰金が与えられ、ときどき遅延後の報酬が与えられる課題となる。この課題では、有利なデッキは、即時の罰金が大いだが、遅延後の報酬も大きいため、最終的にはプラスになり、不利なデッキは、即時の罰金は小さいが、遅延後の報酬も小さいため、最終的にはマイナスになる。もし、眼窩前頭皮質損傷者が報酬に対して感度が強い、あるいは罰に対して感度が低いのであれば、変形版ギャンプリング課題では遅延後の報酬に従った選択をするため、有利なデッキを選択しやすくなると思われる。しかし、この課題でも、眼窩前頭皮質損傷者は健常者と比較して、不利なデッキを選択する回数が多かった。そのため、彼らは報酬に対して過敏、あるいは罰に対して感度が低いというわけではなく、報酬でも罰でも一般的に将来の結果に対して感度が低く、即時の結果に従った意思決定を行っていると考えられる(Becharaら, 2000⁷⁾)。

ソマティックマーカー仮説によると、健常者では過去の報酬・罰の経験により、不利なデッキを選択する際に情動的な警戒信号が働き、そのカードを選択することを避けるが、眼窩前頭皮質損傷者では、この機能に障害があるため、不利なデッキを選択し続けてしまうと考えられる。この情動的な警戒信号は罰に対する予測反応として捉えることができる。Suri and Schultz (1999⁴⁹), 2001⁵⁰) はサルの遅延反応課題の学習過程において、遅延期間中に後で与えられる報酬を予測するため、現在から将来までの結果を含めた報酬の予測が必要であると考えており、このような予測反応を眼窩前頭皮質のニューロンと対応づけている。このように、眼窩前頭皮質は過去の報酬・罰の経験に基づいて、報酬・罰の予測を行うのに重要な皮質であると考えられる。特に、ギャンブリング課題のようにどの選択肢も報酬と罰を持ち、正解・不正解が明確ではない課題では、報酬・罰の系列を学習しなければならないため、眼窩前頭皮質のニューロンが十分に働かなければならない。そのため、この皮質の損傷があると、報酬・罰の系列に関する学習が十分に行われず、結果が曖昧なギャンブリング課題では困難を示すと考えられる。

VI. 報酬・罰による意思決定のモデル

以上述べてきたように、意思決定には、行動のプランに基づいた行動の調整、および行動の結果の評価と、過去の報酬・罰の経験によって報酬・罰の系列を学習し、予測を行うことが必要である。この内、行動のプランの発生は背外側前頭前皮質、報酬・罰の予測は眼窩前頭皮質でそれぞれ行われ、問題解決や日常場面において適切な意思決定を行うためには、この両方がうまく機能していなければならないと考えられる。Dehaene and Changeux (1991¹⁸), 1997¹⁹) のモデルでは、報酬・罰による行動のプランの発生、プランに応じた行動の調整、行動の結果の予測により、WCSTやロンドン塔テストなどの複雑な認知処理を要する課題における目的志

向的行動を説明している。しかし、報酬・罰については情動との関連が強い眼窩前頭皮質の機能を考慮する必要があるため、本稿では眼窩前頭皮質の機能を加えた報酬・罰による意思決定のモデルを提案する (Fig. 2)。Dehaene and Changeux (1991¹⁸), 1997¹⁹) のモデルでは、行動は背外側前頭前皮質におけるプランの働きによって選択される。しかし、眼窩前頭皮質損傷者と異なり、背外側前頭前皮質損傷者はギャンブリング課題で有利なデッキを選択する回数が多いため、プランの働きに障害があっても、この課題では適切な行動選択が行われなければならないと考えられる。また、ソマティックマーカー仮説では、眼窩前頭皮質が状況に応じた情動反応を呼び起こし、迅速な意思決定に寄与する (Damasio, 1996¹³) ため、プランの働きによる計画的な行動をとるよりも、眼窩前頭皮質によって行動の選択が行われる場合があると考えられる。これらのことから、本モデルにおける行動の選択は、プランだけでなく眼窩前頭皮質における報酬・罰の予測の影響を受けることによって行われる。また、WCSTやロンドン塔テストのモデルでは、行動の後に与えられる、そのときどきの報酬・罰が、プランのコントロールを行うが、本モデルでは、行動の後に与えられる報酬・罰だけでなく、それまで受けてきた報酬・罰の経験を含む報酬・罰の系列が眼窩前頭皮質において学習され、それによってプランや行動のコントロールが行われる。そのため、このモデルは、報酬・罰の系列の学習が必要なギャンブリング課題で、眼窩前頭皮質損傷者が

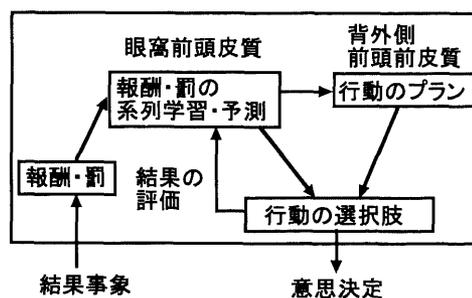


Fig. 2 意思決定のモデル

成績低下を示すという結果が説明できる。

このように、本稿の意思決定モデルは、眼窩前頭皮質における報酬・罰の系列学習および報酬・罰の予測によるプランや行動の選択といった機能が重要である。このモデルはギャンブリング課題における眼窩前頭皮質損傷者の結果を説明できることが前提であるため、その結果が本当に生じ得るかを確認しなければならない。そのため、今後の課題として、本モデルのような報酬・罰の系列を学習するモデルを用いて、コンピュータシミュレーションによって、眼窩前頭皮質損傷者の結果を再現する必要がある。また、報酬・罰の系列の学習過程におけるどのような障害が眼窩前頭皮質損傷者の結果に対応するのかを調べることも重要であろう。

VII. まとめ

本稿では、意思決定における背外側前頭前皮質と眼窩前頭皮質の機能について検討し、報酬・罰による意思決定モデルを提案した。このモデルが眼窩前頭皮質の機能を説明できるかを確認する必要があるため、モデルにおける報酬・罰の系列学習をコンピュータシミュレーションによって再現し、ギャンブリング課題における眼窩前頭皮質損傷者の結果が生じ得るかを確認する必要があると考えられた。また、眼窩前頭皮質損傷者は逆転弁別学習課題で成績低下を示すことが示されているため (Rolls, 2000⁴³⁾; Rollsら, 1994⁴⁴⁾、ギャンブリング課題の場合と同じ障害によってこの課題の成績低下も示されなければならない。そして、同時にWCSTやロンドン塔テストでは影響を受けないといったことを説明できることも重要である。そのようなコンピュータシミュレーションによる理論的研究を行うことにより、モデルはさらに洗練されたものとなるだろう。

文献

- 1) Baddeley, A. (1986) Working memory. Oxford University Press, Oxford.
- 2) Baddeley, A. (1992) Working memory. Sci-

ence, 255, 556-559.

- 3) Bechara, A., Damasio, A. R., Damasio, H., & Anderson, S. W. (1994) Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition*, 50, 7-15.
- 4) Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A. R. (2000) Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral Cortex*, 10, 295-307.
- 5) Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Anderson, S. W. (1998) Dissociation of working memory from decision making within the human prefrontal cortex. *The Journal of Neuroscience*, 18(1), 428-437.
- 6) Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1997) Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy. *Science*, 275, 1293-1295.
- 7) Bechara, A., Tranel, D., & Damasio, H. (2000) Characterization of the decision-making deficit of patients with ventromedial prefrontal cortex lesions. *Brain*, 123, 2189-2202.
- 8) Cabeza, R. & Nyberg, L. (1997) Imaging cognition: An empirical review of PET studies with normal subjects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 1-26.
- 9) Carmichael, S. T. & Price, J. L. (1995) Sensory and premotor connections of the orbital and medial prefrontal cortex of macaque monkeys. *The Journal of Comparative Neurology*, 363, 642-664.
- 10) Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998) Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747-749.
- 11) Cohen, J. D., Perelstein, W. M., Braver, T. S., Nystrom, L. E., Noll, D. C., Jonides, J., & Smith, E. E. (1997) Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386, 604-608.
- 12) Damasio, A. R. (1994) Descartes' error: emotion, reason, and the human brain. New

- York, Grosset/Putnam.
- 13) Damasio, A. R. (1996) The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 351, 1413–1420.
 - 14) Damasio, A. R., Tranel, D., & Damasio, H. (1991) Somatic markers and the guidance of behavior: Theory and preliminary testing. In H. S. Levin, H. M. Eisenberg, & A. L. Benton. (Eds.), *Frontal lobe function and dysfunction*. Oxford University Press, New York, 217–229.
 - 15) Damasio, H., Grabowski, T., Frank, R., Galaburda, A. M., & Damasio, A. R. (1994) The return of Phineas Gage: Clues about the brain from the skull of a famous patient. *Science*, 264, 1102–1105.
 - 16) Das, J. P., Kar, B. C., & Parrila, R. K. (1996) *Cognitive planning: The psychological basis of intelligent behavior*. New Delhi: Sage Publications.
 - 17) Das, J. P., Naglieri, J. A., & Kirby, J. R. (1994) *Assessment of Cognitive Processes*. Needham Heights, MA: Allyn and Bacon.
 - 18) Dehaene, S. & Changeux, J. P. (1991) The Wisconsin Card Sorting Test: theoretical analysis and modeling in a neuronal network. *Cerebral Cortex*, 1, 62–79.
 - 19) Dehaene, S. & Changeux, J. P. (1997) A hierarchical neuronal network for planning behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94, 13293–13298.
 - 20) Dehaene, S. & Changeux, J. P. (2000) Reward-dependent learning in neuronal networks for planning and decision making. In H. B. M. Uylings, C. G. Van Eden, J. P. C. De Bruin, M. G. P. Feenstra, & C. M. A. Pennartz. (Eds.), *Cognition, Emotion and Autonomic Responses: The Integrative Role of the Prefrontal Cortex and Limbic Structures*. Elsevier, 217–229.
 - 21) Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994) Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303–305.
 - 22) Fukushi, T. & Sawaguchi, T. (1998) Visually responsive neuronal activity associated with movement parameters in the monkey prefrontal cortex. *Abstracts–Society for Neuroscience*, 24, 257.14.
 - 23) Funahashi, S. & Kubota, K. (1994) Working memory and prefrontal cortex. *Neuroscience Research*, 21: 1–11.
 - 24) Fuster, J. M. (1997) *The prefrontal cortex*. Raven Press, New York.
 - 25) Goldman-Rakic, P. S. (1987) Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational memory. In F. Plum. (Ed.), *Handbook of physiology. The nervous system. Higher functions of the brain: Section 1, Vol. 5*. American Physiological Society, Bethesda, Maryland, 373–417.
 - 26) Goldman-Rakic, P. S. (1996) The prefrontal landscape: implications of functional architecture for understanding human mentation and the central executive. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 351, 1445–1453.
 - 27) Haber, S. N., Kunishio, K., Mizobuchi, M., & Lynd-Balta, E. (1995) The orbital and medial prefrontal circuit through the primate basal ganglia. *The Journal of Neuroscience*, 15, 4851–4867.
 - 28) Hasegawa, R., Sawaguchi, T., & Kubota, K. (1998) Monkey prefrontal neuronal activity coding the forthcoming saccade in an oculomotor delayed matching-to-sample task. *Journal of Neurophysiology*, 79, 322–333.
 - 29) Iba, M. & Sawaguchi, T. (1999) Visuospatial mnemonic coding associated with submodality-independent visual selective attention in the monkey prefrontal cortex. *Abstracts–Society for Neuroscience*, 25, 865.15.
 - 30) Iba, M. & Sawaguchi, T. (2000) Pop-out

- independent target selection in the monkey dorsolateral prefrontal cortex. *Neuroscience Research. Supplement*, 25, P-135.
- 31) Jonides, J., Smith, E. E., Koeppel, R. A., Awh, E., Minoshima, S., & Mintun, M. A. (1993) Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature*, 363, 623-625.
- 32) Kikuchi-Yorioka, Y. & Sawaguchi, T. (1999) Temporal neuronal processes for visuo-, audio- and "abstract" spatial memory in the monkey prefrontal cortex. *Abstracts-Society for Neuroscience*, 25, 355.5.
- 33) Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Kameyama, M., Nakahara, K., Sekihara, K., & Miyashita, Y. (1998) Transient activation of inferior prefrontal cortex during cognitive set shifting. *Nature Neuroscience*, 1, 80-84.
- 34) 熊谷高幸 (1984) 自閉症児のカード分類反応—前頭葉機能障害仮説の検討—. *特殊教育学研究*, 21(4), 17-23.
- 35) Levy, R. & Goldman-Rakic, P. S. (2000) Segregation of working memory functions within the dorsolateral prefrontal cortex. *Experimental Brain Research*, 133, 23-32.
- 36) McCarthy, G., Puce, A., Constable, R. T., Krystal, J. H., Gore, J. C., & Goldman-Rakic, P. (1996) Activation of human prefrontal cortex during spatial and non-spatial working memory tasks measured by functional MRI. *Cerebral Cortex*, 6, 600-611.
- 37) Milner, B. (1963) Effects of brain lesions on card sorting. *Archives of Neurology*, 9, 90-100.
- 38) Montague, P. R., Dayan, P., Person, C., & Sejnowski, T. (1995) Bee foraging in uncertain environments using predictive hebbian learning. *Nature*, 377 : 725-728.
- 39) Niki, H. & Watanabe, M. (1979) Prefrontal and cingulate unit activity during timing behavior in the monkey. *Brain Research*, 171, 213-224.
- 40) Parrila, R. K. (1995) Vygotskian views on language and planning in children. *School Psychology International*, 16, 167-183.
- 41) Platt, M. L. & Glimcher, P. W. (1999) Neural correlates of decision variables in parietal cortex. *Nature*, 400(15), 233-238.
- 42) Rahman, S., Sahakian, B. J., Cardinal, R. N., Rogers, R. D., & Robbins, T. W. (2001) Decision making and neuropsychiatry. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 5(6), 271-277.
- 43) Rolls, E. T. (2000) The orbitofrontal cortex and reward. *Cerebral Cortex*, 10, 284-294.
- 44) Rolls, E. T., Hornak, J., Wade, D., & McGrath, J. (1994) Emotion-related learning in patients with social and emotional changes associated with frontal lobe damage. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 57, 1518-1524.
- 45) Rosenkilde, C. E., Bauer, R. H., & Fuster, J. M. (1981) Single cell activity in ventral prefrontal cortex of behaving monkeys. *Brain Research*, 209, 375-394.
- 46) Saver, J. L. & Damasio, A. R. (1991) Preserved access and processing of social knowledge in a patient with acquired sociopathy due to ventromedial frontal damage. *Neuropsychologia*, 29, 1241-1249.
- 47) 澤口俊之 (2000) 前頭前野のワーキングメモリ：動的オペレーティングシステム仮説. *神経研究の進歩*, 44(6), 929-936.
- 48) Sawaguchi, T. & Yamane, I. (1999) Properties of delay-period neuronal activity in the monkey dorsolateral prefrontal cortex during a spatial delayed matching-to-sample task. *Journal of Neurophysiology*, 82, 2070-2080.
- 49) Suri, R. E. & Schultz, W. (1999) A neural network model with dopamine-like reinforcement signal that learns a spatial delayed response task. *Neuroscience*, 91(3), 871-890.
- 50) Suri, R. E. & Schultz, W. (2001) Temporal difference model reproduces anticipatory neural activity. *Neural Computation*, 13, 841-862.
- 51) Thorpe, S. J., Rolls, E. T., & Maddison, S.

- (1983) The orbitofrontal cortex: Neuronal activity in the behaving monkey. *Experimental Brain Research*, 49, 93-115.
- 52) Watanabe, M. (1998) Cognitive and motivational operations in primate prefrontal neurons. *Reviews in the Neurosciences*, 9, 225-241.

**Frontal Lobe Function and Dysfunction in Decision-Making :
A Model of Decision-Making by Reward and Penalty**

**Taiji Masunami, Shinji Sato, Hisao Maekawa,
and Shin-ya Miyamoto**

Decision-making is the behavior to select an advantageous response from among available options. We think that goal-directed behavior in prefrontal cortex is involved in this ability. For this reason, this article attempted to discuss about frontal lobe function in decision-making. Prefrontal cortex functionally divides into dorsolateral prefrontal and orbitofrontal parts. It is known that dorsolateral prefrontal cortex plays a role in tasks which require working memory and complex cognitive processing, whereas orbitofrontal cortex makes a decision on the basis of experience of past reward and penalty. This article explained that these functions are processed on the basis of information of reward and penalty, and we proposed a model of clarifying decision-making process by reward and penalty.

Key Words : decision-making, reward and penalty, dorsolateral prefrontal cortex, orbitofrontal cortex, model of decision making