

Hot and Cool Aspects of Executive Function: Relations in Early Development

Zelazo, P., Qu, L., & Müller, U.

in Schneider, W. et.al. (eds.), *Young Children's Cognitive Development*, 2005.

実行機能 (executive function, EF) は、情動的側面 (hot EF) と純粋に認知的な側面 (cool EF) とに区別することができるだろう。本章では、心の理論 (ToM) と EF についての研究の文脈における、hot EF と cool EF との関係について述べる。我々はこう論じる：ToM とは、EF(主に hot EF) の、特定の内容領域におけるひとつの現れなのである。

1 実行機能の定義，心の理論の定義

1.1 実行機能

1.1.1 (EF についての枠組み)

もともと EF とは 前頭前野の損傷は特異な障害パターンをもたらす。もともと EF とは、これらの障害の基盤において損なわれていると考えられる心理的能力を捉えるために生まれた概念である。すなわち：

- 賢い判断をする能力
- プランを立てる能力
- 不適切な反応を抑制する能力
- ...

Luria に学べ EF のどの側面を強調するかは、研究者によって異なる (作業記憶，抑制，注意，...)。しかしこうした提案はたいてい、EF に関連する現象の全体を捉え切れていない。

いっぽう Luria のアプローチは、EF と関連している過程を単にリスト化したりホモンクルス的能力を実体化したりすることなしに、EF と関連している諸過程の多様性を捉える方法を示唆している。Luria によれば、

- 前頭前野とそのほかの神経システムは、相互作用的な機能システムを構成している。これらのシステムは、下位システムの統合を含んでいる。

† web 公開版。報告：小野 elsur2005[at]v003.vaio.ne.jp

- 下位システムは特定の役割を持ってはいるが、全体から切り離して考えることはできない。

著者らの枠組み Luria に学び、我々は次のような枠組みを提案している (FIG.4.1.)

- EF は機能であり、メカニズムや認知構造ではない。
- 機能とは本質的に、行動の結果によって定義される概念である。
 - EF の場合、「行動の結果」とは熟慮的な問題解決のことである。
- (EF のような) 複雑な機能の特徴づけるといふ課題は、(1) その階層構造を記述し、(2) その下位機能の特徴づけ、(3) 不変な共通の結果を中心としてそれらの下位機能を整理する、といふ課題である。
 - EF の場合、「不変な結果」とは問題を解くということであり、問題を解くという結果を中心として、問題解決のさまざまな機能的側面を整理することができる。

著者らの枠組みの意義 我々の枠組みによって、

- 問題解決の遂行が行き詰まるのはどの段階か、という点をより正確に問うことができる。
 - 典型的な EF 課題であるウィスコンシン・カード分類テスト (WCST) について考えてみよう。ルール変化後に固執が生じたとき、その説明のやりかたは複数ある (新しいプランが形成されなかったから; 新しいプランは形成されたが実行されなかったから)。
- EF の多様な諸側面がともにはたらき、問題解決という高次な機能を実現する様子について、明確にすることができる。
- EF をホモンクルス的能力 (例、Baddeley の中央実行部、Shallice の監督的注意システム) として概念化しなくてすむ。
- EF についての良く定義された指標を示唆してくれる (例、ルール使用の指標。ルール使用は、問題表象、プランニング、評価においては必要とされない)。
- EF の諸側面のうち、干渉への抵抗が必要とされない状況であっても生じるような、鍵となる側面を捉えることができる (目標選択、概念的流暢さ、新奇状況におけるプランニング)。
- EF の諸側面における、より基本的な認知過程 (例、手続き記憶、プライミング、注意の抑圧) の役割に関して、具体的な仮説を形成することができる。

1.1.2 (hot/cool EF)

hot EF と cool EF EF は領域一般的なものであると考えられるが、次の 2 つの側面を区別することができるだろう。

- 比較的 hot な、情動的側面。前頭前野腹側部・内側部 (VM-PFC, 前部帯状回 (ACC) を含む) と関連している。情動・動機づけに関わる諸問題 (たとえば自己や社会的理解の領域における諸問題) において必要とされる。
- より純粋に認知的な、cool な側面。前頭前野背側部 (DL-PFC) と関連している。比較的

抽象的で脱文脈化された問題によって誘発される。

hot/cool の区別への支持 hot EF と cool EF についてのこの特徴づけは、VM-PFC の機能についての近年のいくつかの提案と整合している。

- Rolls: VM-PFC, とくに前頭葉眼窩皮質 (OFC) は, 強化に応じて刺激の値を柔軟に表現するために必要だ。
- Damasio: VM-PFC は, 情動反応と具体的シナリオとの間の, 学習された連合を処理するために必要だ。この処理は, 意思決定において重要な役割を持っている。(ソマティック・マーカー仮説)

hot EF の研究: ギャンブリング 近年では, cool EF だけではなく hot EF も注目されるようになり, 便利な指標がたくさん開発されている (ギャンブリング, リスキーな意思決定, フィードバックからの推測 ...)。

そのひとつに, アイオワ・ギャンブリング・テストがある。この課題は認知的流暢さ・反応の反転・抽象的で未来志向的な情報を用いた反応を必要とするのだが, それらの機能を有意味な報酬と損失という文脈で測定しているという点で, hot EF の指標であるといえる。

- カードに, 報酬額と損失額の組み合わせが書いてある。
 - － 報酬額, 損失額の順で書かれている
- 試行: 4 つのデッキから 1 枚を選ぶ。
 - － 実は, 4 つのデッキのうち 2 つは利益デッキ (平均してプラスになるデッキ), 残りの 2 つが不利益デッキ (平均してマイナスになるデッキ) である。
 - － 利益デッキの報酬額は 50, 不利益デッキの報酬額は 100 である (i.e., 一見すると不利益デッキのほうが儲かるように見える)。
 - － 損失額は予想がつかない。
- 試行の繰り返しを通じて, できるだけ多くの額を稼ぐように教示。

この課題を使った研究では,

- Bechara, Tranel, Damasio, & Anderson(1994): 健常者は, 最初は不利益デッキを選ぶが, 次第に利益デッキを選ぶようになる。VM-PFC 損傷患者は, 不利益デッキを選び続ける。
- 患者群は, 知的能力が低いとはいえない。
- 同様の障害が, 病的ギャンブラー, 薬物乱用者においてもみられる。

hot EF の研究: 社会的推論 さらに, VM-PFC 損傷患者は

- 社会的問題 (例, 他者の感情と行動を推論し, どう返答すればよいかを決定する) において障害を示す
 - － 顔の表情が認識できない

- 物語の登場人物に感情を割り当てることができない
- 対人行動において障害を示す
 - フィニアス・ゲージの事例 ... 事故で前頭前野腹内側部を損傷，衝動的・攻撃的な性格になった
 - 財政上の判断において悲劇的な失敗をする
 - 個人的関係を維持できない
- 子どもの発達における障害
 - 道徳的判断の障害
 - 視点取得ができない
 - 暴力・犯罪の履歴を持つことが多い

social/nonsocial と hot/cool social な問題/nonsocial な問題という区別は本質的でない。たとえば，WCST のような抽象的問題でも，他者によって与えられたりする。

いっぽう，情動・動機づけの制御が必要な問題/そうでない問題という区別は，神経解剖学的にも課題分析的にも意味がある。

- VM-PFC は大脳辺縁系と密接につながっているが，DL-PFC は間接的にしかつながっていない。
- 消去，対象反転，ギャンプリングといった VM-PFC の指標は，刺激の情動的重要性に対する評価の改訂を必要とする。

1.1.3 (EF の発達と認知的複雑性)

認知的複雑性・統制理論 hot/cool EF の指標は，発達のレベルにあわせて整理する必要がある。発達のレベルを規定する重要な要因のひとつに，その課題が求める認知過程の複雑性がある。

我々の認知的複雑性・統制理論 (CCC) は，EF とその発達についての理論であり，課題の複雑性の重要さを強調している。

- 課題の複雑性は，子どものルール体系の階層構造によって定義される。
- EF における発達の变化は，「問題解決時に子どもが形成・使用できるルールは最大でどこまで複雑か」という点の発達の变化によって決まる。
- 上記「最大でどこまで複雑か」の発達の变化は，「子どもが表象している規則について，子どもがどこまで省察できるか」という程度の発達の变化によって決まる。

ルールの階層構造 CCC によれば，

- ルールとは，自己に向けられた無音の発話によってアドホックに決まるものである。例，「ポストをみつけたら，この手紙を投函しなければ」

- 子どもがこのルールについて省察できるとしよう。そのとき子どもは、このルールをより高次のルールの中に埋め込むことができる。例、「もし5時よりも前でかつポストをみつけたら、この手紙を投函しなければ、もしそうでないなら、郵便局に直接行かなければ」

Fig.4.2 はルールの階層性を示している。

- ルール・システムが複雑であれば、行為に際してのルール選択も柔軟になり、柔軟な反応が可能になる。
- ルールの埋め込みが増大するためには、論理的にいて、低次のルールについての省察の増大が必要である。
- 課題の複雑性は、「問題を解決する際に子どもが形成するルール・システムにおいて埋め込みが生じる程度」として測定される。
- あるルール・システムを持っているが対立するルール・システムのせいでそれを選択できない、ということもある (i.e., 知識を持っていることとその使用との解離が生じる)。これはより複雑なルール・システムへの統合によって解決する。

複雑性と hot/cool EF CCC 理論は、hot EF にも cool EF にも適用される。

CCC 理論によれば、同じレベルの複雑性を持つ hot EF 指標と cool EF 指標は、関連しているはずである。

Table 4.1 は、子どもの年齢別に、特徴的な EF エラーを引き起こす指標を示している。これらの指標の多くは cool EF の指標だが、一部の指標 (道徳性判断、ギャンプリング) は hot EF の指標である。ただし、cool EF と hot EF は一緒に働くものであり、ある課題を cool EF によって解いたり hot EF によって解いたりすることもあり得る。

1.2 心の理論

ToM 研究の多くは 3-5 歳児を扱っている。しかし ToM の発達には、乳児期の終わりから成人に至るまで続く。ToM もまた、課題の複雑性のスペクトラムにおいて広がりを見せる現象である。

心的状態についての推論の形成・使用は、動的かつ統合的な過程であり、作業記憶における推論の維持、注意を方略的に活性化ないし抑制すること、他者の視点について考えようという動機づけ、などをも含んでいる。そこには少なくとも 4 つのステップが含まれている：

- その状況において、自分とは異なる視点を持っている人がいるかもしれないと気が付くこと。
- 他者の心的状態を決定するための推論の階層をつくること。
- 環境の変化、他者の行動の変化を追跡すること。
- 心的状態の推論に基づき、起こりそうな行動を演繹すること。

これらのプロセスは素早く遂行されなければならないし、認知的資源が必要であろう。

いっぽう、実験室でのテストは比較的単純である。そのため、たとえばアスペルガー症候群の患者は、実験室では通常の成績を示すのに、社会的な問題解決では欠損を示すことがある。

2 心の理論と実行機能との間の関係

自閉症児の研究 ToM と EF との関係について最初に言及されたのは、おそらくは自閉症の研究の文脈であった。

- Russel et.al.(1994): ToM の指標のひとつである方略的欺瞞において自閉症児は困難を示すが、この困難は欺瞞そのものの困難ではなく、EF における困難である。
- Ozonoff, et.al.(1991): 高機能自閉症児は ToM 課題にも EF 課題にも障害がみられる。

健常児の研究 健常児の研究でも、ToM と EF の関係が研究されている。

- Frye et.al.(1995) : ToM 課題の成績は、埋め込まれた if-if-then ルールを用いた推論の能力 (Dimensional Change Card Sorting 課題で測定) と相関する。
- ほかにさまざまな EF 指標を用いた研究がある。メタ分析でも強い関係が示されている。
- Carson&Moses(2001): ToM 課題成績の重回帰分析。年齢・性・IQなどを統制すると、作業記憶課題成績の効果は消えるが、EF 課題成績の効果は残る。

神経生理学的証拠

- 脳画像研究：ToM 推論は前頭前野内側部 (特に傍帯状回 (8 野・9 野) と ACC) を活性化させる。これらの領域は、条件つき反応を必要とする EF 課題でも活性化する。
 - Happé&Frith(1996): アスペルガー症候群の成人は、心的状態を含む物語を理解する際に (8 野・9 野ではなく)9 野・10 野を活性化させる。推論のしかたが健常者とはちがうらしい。
- 脳画像研究：心的状態の理解には右 VM-PFC が重要。
- 脳損傷研究：VM-PFC 損傷患者は、複雑な社会的状況の理解が困難。左右は関係ない。また DL-PFC 損傷は関係ない。

ToM と EF の関係: Perner ら Perner et.al.(1999) によれば,ToM は EF の不可欠な一部である。

- 4 歳頃に、メタ表象 (表象の意義とその指示対象である状況についての明確な理解) が生じる。
- メタ表象の発生によって、目立つ刺激によって活性化される不正確な行為を抑制できるようになる。
- 子どもの ToM の変化は、メタ表象の発生とともに生じる。

ToM と EF の関係: 著者ら CCC 理論に従えば, ToM と EF は, どちらも生涯発達現象である。

- 4 歳頃に生じる ToM の変化は, 「もしあなたが私に尋ねているのなら, キャンディの場所は B だよ, でももしあなたがマキシについて尋ねているのなら, キャンディの場所は A だよ」という高次なルールを形成・使用する能力の発生によって生じる。
 - 自分の過去の誤った信念について推論する課題では, 時間的視点について, 上記と同様の高次なルールを形成・使用する能力が必要になる。
 - Gopnick&Astington(1988): 扉の閉まったおもちゃの家のなかには, 「さっきは」リンゴがあったけれども「いまは」人形がいる, という判断だけならば 3 歳児でも正答する。この課題はスマーティ課題に似ているが, 単一の次元のなかでの推論しか必要としない。
- ToM 推論は心的状態に関する概念の維持・操作を必要とするが, 心的状態についての概念を獲得するためには, EF があるレベルまで発達していることが必要である (例, 誤信念という概念のためには複数の視点を取る能力が必要)。すなわち, ToM はある内容領域においてあらわれた EF のひとつの姿にすぎない。
 - より具体的にいえば, ToM とは, 自己と社会的理解という内容領域においてあらわれた, hot EF の姿である。

hot EF の発達と cool EF の発達 hot EF の発達と cool EF の発達を比較した研究は少ない。

- Hongwanishklu, et.al.(in press): hot EF 課題 (子ども向けギャンプリング課題; 満足先送り課題) と cool EF 課題 (空間的 WM 課題, DCCS 課題) の発達研究。空間的 WM 課題は DCCS・ギャンプリングと相関。精神年齢と相関したのは cool EF のみ。
 - 著者ら: 複雑度が同程度である hot EF 課題と cool EF 課題を比較。
 - hot 課題...(1) 「赤こぐまは小さなお皿から食べるのが好きです。大きなお皿だと食べ過ぎちゃうからです。お母さん熊は赤こぐまが小さなお皿が好きだと知っています。赤こぐまがやってきましたよ。お母さん熊は赤こぐまにどのお皿でごはんをあげるかな?」
 - (2) 「おばあちゃん熊は赤こぐまが小さなお皿が好きだと知りません。おばあちゃん熊は, 熊は自分の色の皿が好きだと思っています。おばあちゃん熊は赤こぐまにどのお皿でごはんをあげるかな?」
 - cool 課題...(1) 「お母さん熊が行っているゲームにおいては, 小さな熊は小さな皿をとる。」... 後略
- 成績は同程度であった。

3 結論

ToM とはまさに、自己と社会的理解という内容領域において現れる EF なのである。ToM が EF をもたらしたり、EF が ToM をもたらすのではない。

ToM と EF は、共通の認知的基盤と神経システムに依存している。それらのメカニズム (たとえば、複雑なルールの形成・使用)、それらの神経構造 (たとえば、相互作用的に働く前頭前野の諸領域) は、幅広い年齢域を通じて発達し続ける。

おわり