

Lateral inferior prefrontal cortex and anterior cingulated cortex are engaged at different stages in the solution of insight problems

John R. Anderson, John F. Anderson, Jennifer L. Ferris, Jon M. Fincham, Kwan-Jin Jung

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2009,
vol.106, no.26, 10799-10804

- 認知の神経画像検査の研究は、実験参加者が課題解決を試みたとき、前頭前皮質の中央や側面部が活性化することを示している(Bunge SA & Wallis JD, 2007; Fincham JM & Anderson JR, 2006)
 - しかしながら、未だ前頭前野の正確な役割の統合はされていない
 - この論文ではfMRIを使用し、課題遂行時の2つの要素に焦点を当てて調査を行った
 - 情報の検索……外側下前頭前皮質 (lateral inferior prefrontal cortex: LIPFC)
 - サブゴールのセッティング……前帯状皮質 (anterior cingulated cortex: AC)
 - また、Adaptive Control of Thought-Rational(ACT-R)理論(Anderson JR, et al, 2004; Anderson JR, 2007)によるモデルの予測についても検討を行う
-
- 人間の前頭前皮質は（構造や役割の観点から見て）多くの異なった部位から構成されている(Miller EK & Cohen JD, 2001; Petrides M, 2005)
 - 中でもLIPFCは記憶検索に関連しているとされる(Buckner RL, Kelley WM, Petersen SE, 1999; Cabeza R, Dolcos F, Graham R, Nyberg L, 2002; Fletcher PC, Henson RNA, 2001)
 - 検索の成功が完璧であるほど、検索手がかりが支持されるほど、大きな賦活が起こる
 - LIPFCの活性化には多くの要因が挙げられている
 - 連合の妨害(Sohn MH, et al. 2005)
 - 想起の遅延(Anderson JR, Byrne D, Fincham JM, Gunn P, 2008)
 - 反復(Danker JM, Gunn P, Anderson JR, 2009)
 - 検索された情報が困難な選択を要求するために、このような様々な解釈が起こっていると思われる
 - この論文ではこれらの解釈を解決する報告を行っている

- ACCはサブゴールのセッティングに関与していると考えられる
 - ACCの活動に関するいくつかの理論 (D'Esposito M, et al. 1995; Posner MI, Dehaene S, 1994) でも類似した説明がされている
 - 一方で、ACCの活性化がエラーの検出 (Falkenstein M, Hohnsbein J, Hoorman J, 1995)、葛藤への反応 (Carter CS, et al. 2000)、エラーの公算 (Brown JW, Braver TS, 2005) に関係するとした理論も存在する
 - ACT-Rの理論では、ACCの活性化はサブゴールのセッティングによって起こるものとした
 - さらに、ACCの活性化はサブゴールを変えるタイミングや数に影響するものとした
 - この論文ではACCの活性化がサブゴールのセッティングに起因するかについての検討を行なっている
-
- 認知的な課題では、サブゴールのセッティングを伴う検索の過程が複数の周期を持っていると見なすことができる
 - 問題が $2x-3=5$ の解決であった場合
 - ✧ $5+3=$ というサブゴールのセッティングがなされる
 - ✧ $5+3=8$ の情報検索がなされ、サブゴールが $2x=8$ に変更される
 - このように、現在のサブゴールが検索の必要性を生起させ、その結果、検索された情報がサブゴールを変更するといった過程を1つの周期として数えることができる
 - ACT-Rの理論においては、検索の過程でLIPFCの活性化が起こり、サブゴールの変更においてACCの活性化が起こると考えられる
-
- この論文では検索とゴールの活性化に高い関連がある洞察問題を利用した
 - 最初の実験ではremote-association problem (Mednick SA, 1962; Jung-Beeman M, et al. 2004)を使用した
 - 3つの単語 (pine, crab, sauce) が提示され、この単語に互いに接続できる1つの正解単語 (apple) を探すように求められる (pineapple, crabapple, applesauce)
 - ACT-Rのモデルでは、サブゴールは解の発見のためにセッティングされ、検索モジュールは問題が解決されるまで継続的に行われるものとした
 - ACT-Rは問題解決の間のLIPFCにおける高い活性化だけでなく、問題解決後のACCの高い活性化といったクロスオーバーを予測する
 - このクロスオーバーは解決されない試行では見られないだろうと考えられる

➤ 実験1

➤ 方法

☆ 被験者

- 18–32歳で構成される（平均年齢は23.2歳）ピッツバーグ州に住む20人の右利きの人間（女性は12名）が参加した

☆ 手続き

- 参加者は共通して接続できる1つの単語が存在する3つのヒント単語を提示された
 - ヒント単語がprint, berry, birdならば、blueが答えとなる (blueprint, blueberry, bluebird)
- 問題解決には30秒の時間が与えられた
- 正解が思いついた場合
 - できるだけ早くデータグローブのボタンを押すように教示された
 - データグローブのボタン押しが行われた場合、その直後に解答が提示された
 - 解答の単語を読むための時間が5秒間与えられた
 - その後、問題を解決したときに洞察があったかどうかをスクリーンで尋ねられ、その問いに答えるための時間が5秒間与えられた
 - ☆ Yes→人差し指のボタン押し
 - ☆ No→中指のボタン押し
 - 洞察についての解答が終わった後、9.5-11.5秒（スキャン開始位置を調整するため2秒の幅があった）、注視点が提示され、新しい試行が始まった
- 正解が思いつかなかった場合
 - 5秒間、ターゲット単語がスクリーンで提示された
 - ターゲット単語の提示がすると次のヒント単語が提示される前に、11秒間注視点が提示された
- 参加者は教示を受け、structural scanの間に20回の練習試行を行った
- 参加者は9–10minのブロックにわかれた63問の問題を解いた
- 実験で使用した83問の問題と解はBowden & Jung-Beeman(2003)が作った144問からランダムに選ばれた

◇ 装置

- Simens社製の3T Allegra Svanterを使用した
- 撮影法
 - 撮像シーケンスはgradient echo法
 - 2秒の繰り返し時間
 - 30msのエコー時間
 - 70° のフィリップアングル
 - 20cmの有効視野
 - 64×64のマトリクス
 - 3.2mmのスライス厚
 - 繰り返し時間ごとに34枚のスライス枚数

➤ 結果

- ◇ 解決までの平均時間は12秒であった
- ◇ Response-Lockedな分析を行った（11スキャン）
 - 反応時のスキャンを0スキャン
 - それ以前の5スキャン（10秒）とそれ以後の5スキャン（10秒）に焦点を当てた
- ◇ 解決試行と比較するためのベースラインが未解決試行から定められた
- ◇ 図1はLIPFCとACCの反応をベースラインと解決試行で比較したものである
- ◇ パターンは2つの領域で大きく異なっていた
- ◇ ACCとLIPFCに小さな相関（ $r=0.56$ ）が見られた
- ◇ 3要因の分散分析を領域の要因（LIPFCとACC）と時間（解決の前と後、－6秒から0秒vs4秒から10秒）と条件（ベースラインと解決試行）を行ったところ、二次の交互作用が見られた（ $F(1,19)=52.80;p<.0001$ ）

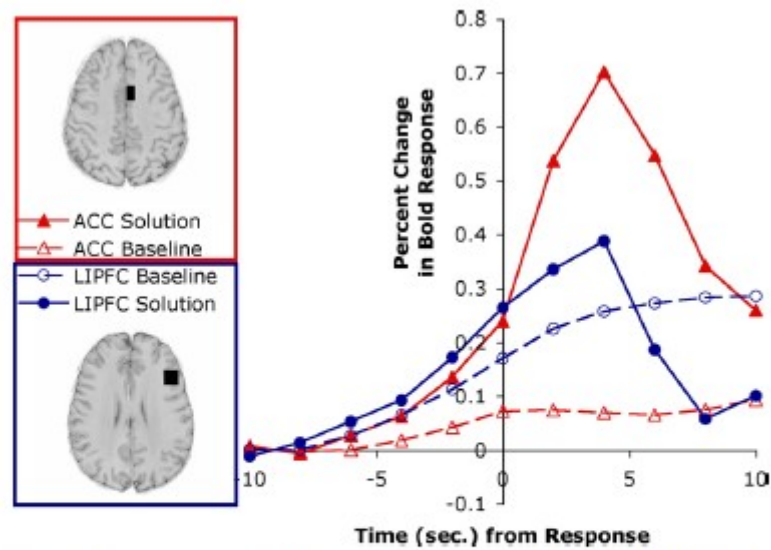


Fig. 1. Response-locked BOLD signal in experiment 1 for the left LIPFC and the left ACC. The ACC region is a $9 \times 16 \times 13\text{-mm}^3$ region centered at $-6, 10, 39$ in Talairach coordinates involving Brodmann's area (BA) 24 and 32. The LIPFC is a $16 \times 16 \times 13\text{-mm}^3$ region centered at $-42, 23, 24$ in Talairach coordinates involving BA 9 and 46.

◇ 解決試行におけるLIPFCとACCの賦活

- 反応前のLIPFCの賦活はACCと差はなかった ($t(19)=0.91$)
- 反応後ではLIPFCのほうがACCより小さかった ($t(19)=-5.28, p<.001$)
 - 解の発見による検索の停止→LIPFCの活動の減少
 - 解の発見によるサブゴールの変化→ACCの活動の増加

◇ 未解決試行におけるLIPFCとACCの賦活

- LIPFCの賦活は常にACCの賦活よりも大きかった
 - 反応前、 $t(19)=2.93, p<.001$
 - 反応後、 $t(19)=5.15, p<.001$
- 未解決試行の場合、解の探索が持続して行われているためだと考えられる

➤ 実験1まとめ

- ◇ 全ての分析で仮説を支持していた
- ◇ 解決試行の反応前には有意差が見られなかったが、実験2では見られるだろう

➤ 実験2

- 実験1におけるLIPFCとACCの違いは仮説を頑健に支持した
- しかしながら、ACT-Rの理論ではこれらの2領域のエフェクトについて、より質的な予測を行なっている
 - ✧ 実験1のデータでは反応時間の変化がしやすいため、ACT-Rの予測を確認することは困難であった
 - ✧ 解の算出の直後に反応が行われることが、活性化に影響している可能性もある
- このような問題点を改善するため、実験2のデザインは反応の瞬間に関してよりタイトな切り分けを行い、問題の解決と反応による活性化を区別した

➤ 方法

- ✧ 被験者
- ✧ 19歳から30歳（平均は22.4歳）の20人の右利きのピッツバーグ州の人間（女性10人）が実験に参加した
- ✧ 課題
 - 問題は虫食い単語と手がかりの単語で構成された
 - 虫食い単語が”-a-a-a”だった場合、答えは”Canada”となり手がかり単語は”ホッケー”であった
- ✧ 手続き
 - 被験者は5－11文字の穴あきの単語を提示された
 - 約半分の文字がハイフンで隠されていた
 - 一文字目は常に隠されていた
 - 被験者は単語を読み、単語を特定する時間を10秒間与えられた
 - この10秒で答えがわかった場合、データグローブのボタンを押して解決スクリーンに進んだ
 - この最初の10秒間で解決された問題は分析から除外した
 - 次に、穴あきの単語とその単語に関する手がかりの単語が10秒間提示された
 - 10秒後、被験者は正解がわかったかどうかを尋ねられた
 - 回答時間は2秒間であった
 - 回答が終わった後、解がわかったかどうかに関わらず、解決スクリーンに移行した
 - 解決スクリーンでは正解単語の一文字目を5つの項目から選ぶように指示された
 - 回答はデータグローブのボタン押しで行われた

- ◇ 選択肢1だと親指のボタン、選択肢2だと人差し指のボタンというように回答を行った
 - 選択に与えられた時間は2秒であった
 - 最後に被験者に反応のフィードバックと正解単語が提示された
 - 6秒間の提示後に次の問題に移った
 - 問題は68問でランダムに提示された
 - Structural scanの間、被験者は5項目の選択の仕方の練習と10試行の練習問題が与えられた
 - スキャンのパラメータは実験1と同様であった
- 結果
 - ◇ 約32%の問題が最初のインターバルで解決された
 - 解決時間の平均は2.98秒であった
 - 90パーセンタイル値は5.43秒であり、95パーセンタイル値は6.72秒であった
 - ◇ このことから、分析に使用したデータでは、2つ目のインターバルの序盤において最も多くの解決が起こっていると考えられる
 - ◇ 問題の38%で手がかり単語の提示による解決が起こり、そのうちの90%が実験者の意図した解決を行っていた
 - ◇ 分析では実験者の意図した選択をしたものと解決できなかったものを比較した
 - ◇ 図2はLIPFCとACCにおける賦活である
 - ◇ LIPFCとACCの相関は0.32と小さかった
 - ◇ 解の生成前と生成後の賦活の比較
 - 生成前の賦活→1秒と3秒のスキャン
 - 生成後の賦活→7秒と9秒のスキャン
 - ◇ 3要因の分散分析を領域の要因（LIPFCとACC）、時間（解決の前と後）、条件（解決試行とベースライン）で行ったところ、3要因の交互作用が見られた（ $F(1,19)=15.26, p<.001$ ）
 - 実験1の結果に非常に類似している

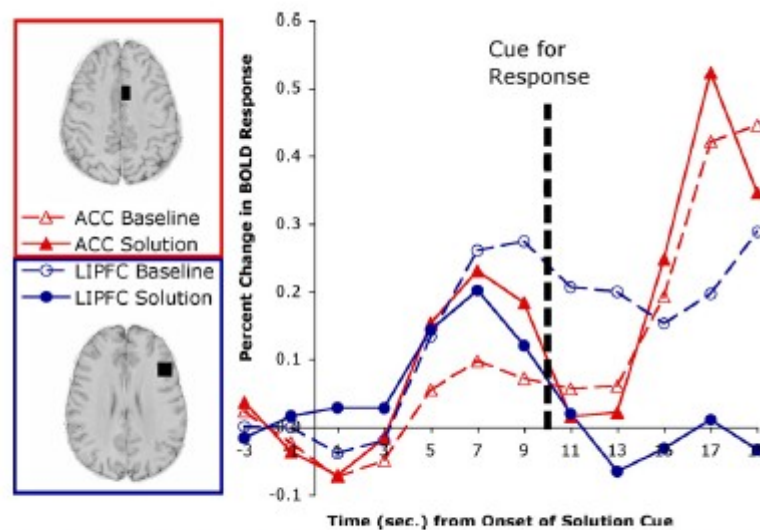


Fig. 2. Stimulus-locked BOLD signal in experiment 2 for the left LIPFC and the left ACC.

- ◇ 解決試行のLIPFCとACCの賦活の比較
 - 解決前はLIPFCの賦活はACCの賦活より有意に大きかった ($t(19)=2.21, p<.05$)
 - 解決後に関してはACCの賦活がLIPFCの賦活よりも大きかったが、有意な差は見られなかった ($t(19)=-1.08$)
 - この結果も実験1と類似しているが、有意差の有無に関しては逆転していた
- ◇ 未解決試行のLIPFCとACCの賦活の比較
 - 全体を通してLIPFCの賦活がACCの賦活より大きかった
 - 片方では有意であり、もう片方では有意ではなかった (前: $t(19)=1.18$, 後: $t(19)=3.04$)
- ◇ この2つの結果はACT-Rのモデルの仮説と一致していた
 - 解への到達→新しいサブゴールのセッティング→ACCの活性化
 - 解への到達の失敗=解の検索の継続→LIPFCの持続した賦活

➤ 課題のモデル

- 図3はACT-Rのモデルが問題を解決したときのトレースと、問題を解決しなかったトレースを比較したものである
- 図の時間は上から下に流れている

- クリティカルキュー（例えば問題”a-a-a”におけるホッケー）の提示を開始とし、フィードバックの処理の終了までを図示している
- 実験で得られたデータから、解決試行では2.5秒で解を発見すると仮定した
- 未解決試行では解の探索は7秒で打ち切られると仮定した
- 未解決試行では解に関する質問がされた場合、解の検索を再開すると仮定した
- 解の発見がなされたとき、ボタン押しやフィードバックに関連する新たなサブゴールが設定される

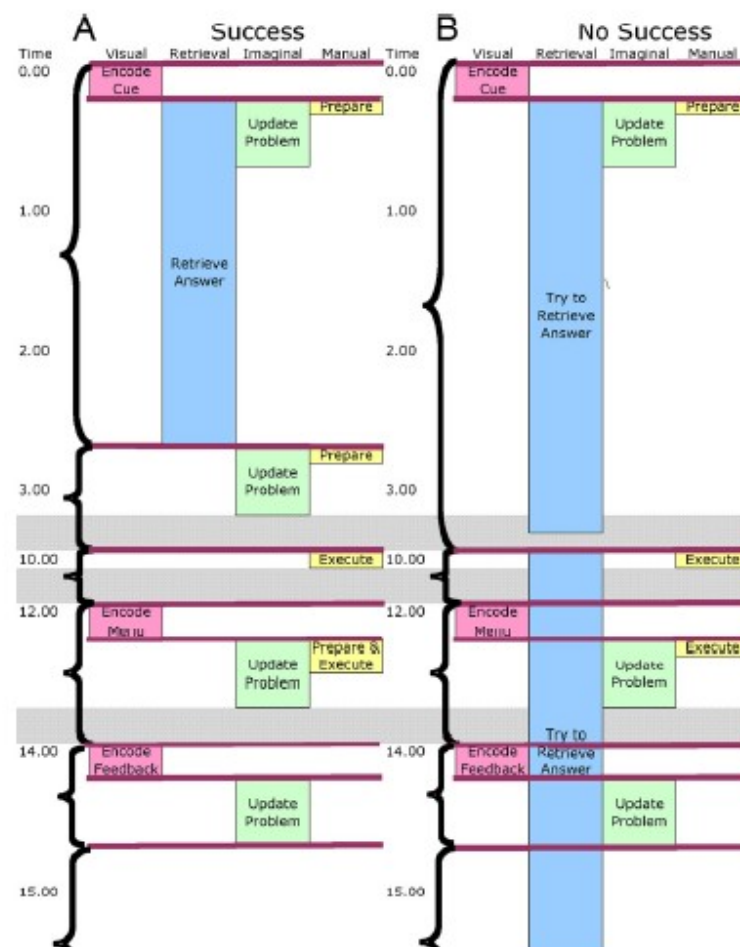


Fig. 3. Engagement of the modules in the ACT-R model for experiment 2. (A) Success. (B) No success. Time is given in seconds. Lengths of boxes (for visual, retrieval, imaginal, and manual modules) reflect approximate times the modules are engaged. The horizontal lines represent the firing of production rules. Brackets indicate subtasks of activity controlled by a setting of a goal. Gray bars indicate compressed periods of time.

- 図4はLIPFCとACCの活性化を予測したものである
- 図2の行動データとの相関は非常に強かった ($r=0.929$)

- モデルの予測は解決試行において、反応のキュー提示後にACCの賦活がLIPFCより大きくなることを示した

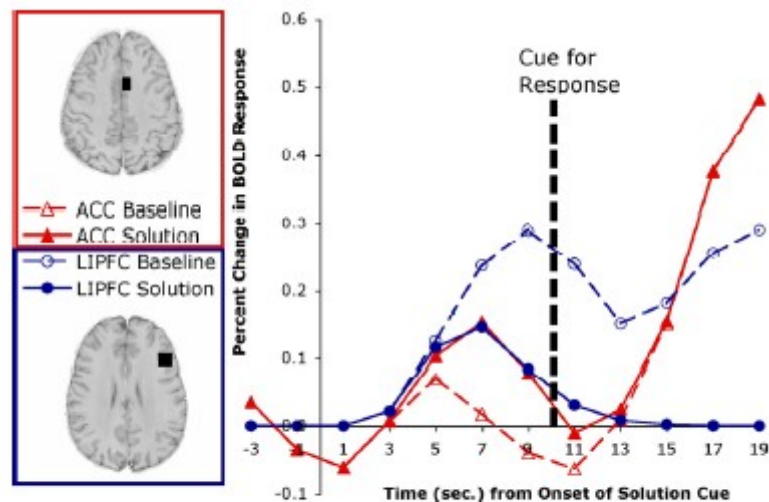


Fig. 4. Predictions for the LIPFC and ACC activity in experiment 2 based on the module engagement in Fig. 3. Compare with data in Fig. 2.

- 考察
 - 2つの実験でLIPFCとACCの異なった反応が見られた
 - ✧ LIPFCの賦活は解の探索が行われているときに起こり、解が生成された直後に減衰した
 - ✧ ACCの賦活は解決のプロセスに影響を受けており、解法の検索の増加により大きくなった
 - 実験2においては、ACCのパターンが反応の生起においても起こることが示された
 - ✧ 解の発見と反応はこのような研究では一般的に非常に近い距離で行われる処理であるが、その2つの区分けした点で重要な手法であると言える
 - 序論の議論では、LIPFCの役割は主に選択的な解釈を支援しているというものだった
 - ✧ この解釈が正しいならば、LIPFCの賦活は課題の制限時間内で起こり続けるだろう
 - ✧ しかしながら、活性化は解が発見できなかった間だけで起こっていた
 - 2つの実験で、ACCが問題を解決したときにより活性化することがわかった
 - ✧ この事実はACCの活性化がエラーに関係するといった理論に反対する