

# ‘‘Aha!’’: The Neural Correlates of Verbal Insight Solutions

Lisa Aziz-Zadeh, Jonas T. Kaplan, and Marco Iacoboni

Human Brain Mapping 30:908–916 (2009)

## Introduction

- 問題解決には一般的に 3 つの分類がある (Novick and Sherman, 2003)
  1. 探索
  2. 洞察
  3. 記憶検索
- この中でも洞察解決 (広く “aha moments” と呼ばれる) は他の 2 つの問題解決と全く異なった認知プロセスを経ていると思われる
- 具体的な例としては、アルキメデスの定理を発見したときのアルキメデスの逸話が挙げられる
  - 何日も問題を考えた末に、バスタブで解決方法を思いついたとき、彼はインスピレーションのあまり “エウレカ!” と叫びながら通りを走りまわったと言われている
- この逸話から以下のことがわかる
  - 洞察の瞬間の感情の強烈さ
  - 突然の解の発見
  - 解がゲシュタルト的な質を持っていたこと
  - ユニークで創造的な解であったこと
- ゲシュタルトの観点では、洞察の方略が新規な方法での問題の再構築に関連していることが示唆された
- さらに、この再構築はそれまで無視されてきた情報に注意を向けることで起こる新しい解釈によって生まれると考えられる (Jung-Beeman et al., 2004; Knoblich et al., 1999)
- 一方で、探索方略は問題解決の 4 つの特徴が存在する (Ericsson and Simon, 1984; Newell and Simon, 1972; Polson and Jeffreis, 1982, Novick and Sherman, 2003)
  1. 努力や熟考が必要とされ、主に意識的に行われる
  2. プロセスは問題解決開始から解決まで増加的である
  3. 途中経過はワーキングメモリで利用出来る
  4. 問題解決中での一部の知識の漸進的な蓄積をたどることができる

- 探索方略の解決が行われる問題の典型的な例として、複数桁の掛け算、チェスなどが挙げられる
- 近年の行動実験において、Novick & Sherman (2003) はアナグラム課題が洞察解決と探索解決の両方を産出するユニークな課題であることを示した
  - この問題は短い時間で解決することができる
- また、この問題では洞察方略を使用した場合、探索方略よりも有意に早く解決することができた（それぞれ約 2s と約 4s の解決時間）
- つまり、潜伏時間と自己報告の 2 つから、参加者が特定の試行に使用した方略を確定することができる
- 探索方略と洞察方略の神経系との関わりについては、2 つの可能性がある
  1. 洞察解決が探索解決と異なった脳の領域に関連している可能性
    - 洞察解決に必要な再構築が、探索解決では使用されない前頭前皮質に関連している (Dietrich, 2004)
    - 右脳半球が洞察解決において特別な働きをしている (Leonhard and Brugger, 1998; Mashal et al., 2007; Mendez, 2004; Weinstein and Graves, 2002; Winner, 2000)
  2. 2 つの解決タイプで脳の領域での違いはないが、同じ領域で別のプロセスを経ている可能性 (Atchley et al., 1999; Bogen and Bogen, 1969; Kwong et al., 1992)
    - 大脳半球間のインターコネクティビティや、活性化のタイミング、活性化のパターンの違い
- この研究では、アナグラム課題における洞察解決と探索解決での賦活のパターンの違いや脳の領域の違いについて調査する
- Novick & Sherman のアナグラム課題を使用することで、同じ種類の問題における異なった解決タイプの調査を行うことができた

## Methods

### Participants

- 右利きの 12 人の健康的なボランティアが実験に参加した（男 6 名女 6 名、中央値 26 歳、レンジ 20–40 歳）
- 洞察解決や探索解決が 20% より下回った 2 人の参加者（男 1 名、女 1 名）が分析から除外された

## Stimuli and Task

- 参加者はスキャンを伴わない練習試行の後に、スキャンを伴った 4 回の **functional run** を行った
- アナグラムは Novick & Sherman (2003) が作成したリストを使用した
- 課題の単語は主に名詞で構成されており、異なった 5 文字から成る
  - 例) oxmia=axiom
- 課題の半分は 2 文字の置き換えであり、残りの半分は 3 文字の置き換えであった
- 全てのアナグラムは **magnet-compatible goggles** によって、視覚的に提示された
- 参加者はできるだけ早く、正確に、心のなかでアナグラムを解決するように促された
- 解決できた場合、できるだけ早くボタンを押すように指示された
- アナグラムはボタン押しがあるまでスクリーン上に提示された
- 参加者は 20 秒経ってもアナグラムが解決できなかった場合、ボタンを押すように促された
- ボタン押しがなされた場合、灰色スクリーン提示での 10 秒間のレストが取られた
- 次に、参加者は解を提示され、思いついた答えと一致していたか否かをボタン押しで回答するように指示された
- ボタン押し終了後、1 秒間のレストが与えられた
- 最後に、参加者は問題解決が洞察解決であったか探索解決であったかをボタン押しで回答するように指示された
  - 解がどこからともなく浮かんできた場合は洞察解決であるという説明がされた
- 1 回の **functional run** につきこの手続きが 12 回繰り返された
- 全ての参加者は 48 問のアナグラム解決を試みた

## Data Analysis

### Behavioral data

- 平均的に参加者は 90% のアナグラムを正解した (range : 68–100)
- 達成されなかったアナグラムは分析から除外した
- 反応時間と自己報告により洞察解決と探索解決を分類した
  - 洞察解決：参加者が洞察解決であると分類し、4s 以下で解決した問題
  - 探索解決：参加者が探索解決であると分類し、4s 以上で解決した問題
- 他の組み合わせは分析から除外した

- 反応時間が（平均から標準偏差が 1.5 離れている）外れ値である試行が分析から除外された
  - それぞれの run で平均 2.8 探索試行と 0.47 洞察試行が除外された
- 洞察解決の平均反応時間は 1.64s (SD=0.62) であり、探索解決は 5.34s (SD=1.01) であった
- 全試行中、洞察解決は 70%、探索解決は 30%であった
- 参加者によって特定のアナグラムの解決の方略は異なっていた

## Imaging data

- 反応に同期した分析は 2 つの実験条件間での反応時間の違いにより不適切である
  - そのため刺激提示に同期した刺激提示後の脳活動のタイムポイントでの変化について検討を行った
- 全ての刺激提示時の BLOD 信号のマップを作成し、全ての時間でのそれぞれの刺激タイプでの信号のマップを平均化した
- t 検定により、刺激提示時の信号と時間の変化による信号が比較された
- 同様に、探索解決と洞察解決の比較も行った
- t 値は z 値に変換された
- 以下の基準で有意な信号の変化を定義した
  1. z 得点が最低 3 つの時点で連続して 2.3 大きい
  2. 最低 10 の空間的に接触しているボクセルがある
  3. クラスタが刺激定時後の 5s を超えても活性化している
- 基準 1 と 2 はその時間のその空間で確実に脳が活性化していることを主張する
- 2.3 の z 得点は約 0.01 の p 値と一致する
- 基準 3 は血流のラグを考慮したためである

## Result

### Aha-Rest

- レストとの比較で洞察解決において活性化した脳の領域を検討した
- 双方の運動前野背面部と補足運動野、右内後頭部上後／溝頭回、双方の島、双方の運動前野腹側、被蓋（ひがい）で活性化のいくつかのピークが見られた

### Search-Rest

- レストとの比較で探索解決中により活性化した脳の領域を検討した

- 双方の上前頭溝と右島で活性化のいくつかのピークが見られた

#### Aha-Search Activations

- 探索解決と洞察解決の比較で脳の領域の活性化を検討した
- 右島、ブローカ野（左 BA45）、双方の角回、右前頭前皮質（BA10、46）、前帯状領域、橋、右側頭極でいくつかの活性化のピークが見られた
- 注意したいことは探索解決と比較して Aha 解決の皮質の活性化が両面か右半球（ブローカ野を除外すると）のどちらか一方であることである（table1）

**TABLE I. Brain areas activated for aha solutions when compared with search solutions**

| Region                   | Hemisphere | BA     | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>z</i> | <i>t</i> | Voxels |
|--------------------------|------------|--------|----------|----------|----------|----------|--------|
| Inferior frontal gyrus   | Left       | 45     | -54      | 20       | 0        | 3.98     | 102    |
| Inf/middle frontal gyrus | Right      | 10, 46 | 40       | 44       | 0        | 4.77     | 534    |
| Anterior cingulate       | Midline    | 32, 24 | -6       | 26       | 44       | 6.08     | 1,513  |
| Insula                   | Right      | 13     | 38       | 12       | -14      | 3.81     | 333    |
| Angular gyrus            | Left       | 39     | -48      | -52      | 24       | 3.97     | 57     |
| Angular gyrus            | Right      | 39     | 58       | -52      | 36       | 3.95     | 309    |
| Temporal pole            | Right      | 38     | 42       | 6        | -40      | 4.57     | 164    |
| Pons                     | Midline    |        | -6       | -20      | -26      | 3.39     | 97     |

Hemisphere (left, right, midline), Brodmann area, and MNI coordinates are listed. The cluster *t* value is the mean value for the given cluster. Number of voxels active in each area is also listed.

- figure1 は時系列でのこれらのエリアの活性化を示している
- 3つのパターンが見られることがわかる
  1. 探索解決と洞察解決の両方で活性化した場合、洞察解決の方が強く活性化している
    - ✧ 右島、前帯状領域、左 BA45
  2. 洞察解決だけで活性化した領域は探索解決で活性化しなかったか、非活性化した領域である
    - ✧ 右前頭前皮質、橋
  3. 探索解決で非活性化した領域は、洞察解決では弱い活性化しか示さない
    - ✧ 右の側頭極、両側の角回
- また、figure1 からわかるように、タイムポイントの前半部分で探索解決と洞察解決は特徴的な違いを見せた
- この領域をさらに 2 つに分類した
  1. Aha の早い活性化（血流ラグを含まない問題提示後の 0–2.5s）
    - ✧ 右島、左 BA45（言語プロセスに関わる領域）
  2. Aha の遅い活性化（血流ラグを含まない問題定時後の 3–5.5s）

☆ 両側の角回、右の側頭極、橋、前帯状領域、右前頭前皮質

#### Search-Aha Activations

- 洞察解決よりも探索解決が活性化したボクセルはなかった

#### Discussion

- この研究では、洞察解決に関わる脳の領域だけでなく、これらの領域に関わるプロセスの理解にも焦点を当てた
- さらに、領域と時間経過の活性化の両方のデータを理解することを試みた
- 橋は優先的な興味の対象ではないので、この領域の活性化についての議論は控える

#### 洞察解決での早い両側の島の活性化

- 洞察解決において、島はレスト（両側）と探索解決（右）との両方の比較で同程度の活性化が見られた
- さらに、問題解決の早い段階で、探索解決は左島の活性化しか見られなかったにも関わらず、洞察解決では両側の島の活性化が見られた
- 島の活性化は島が言語プロセスに関わっていること（Ackermann & Riecker, 2004 ; Blank et al, 2002）や、他の解決プロセスの要素に影響していることを示している
- 一般的に左脳半球は言語や分析のプロセスに関わっていると考えられており、一方で右脳半球はゲシュタルトで全体的なプロセスに関わっていると考えられる（Berman et al, 2003 ; Zaidel et al, 1990）
- 洞察経験の定義の 1 つとして解決がゲシュタルトのように現れると感ずることが挙げられる
  - warmth : 洞察では解までの距離が増加しない
- 洞察解決でのみ右島の活性化が見られたことから、右脳半球は解決時のゲシュタルトに対して重要な要素であると考えられる
- しかしながら、重要なのは主に左島が活性化した探索解決とは違って、洞察解決では両側の島が活性化していた点である
- これは右脳半球が単独でゲシュタルトに関わっていたわけではなく、左脳半球と右脳半球の連続したプロセスであったということである
- 創造性が右脳半球単独での機能であるという議論（Finkelstein et al., 1991; Miller et al., 1996, 1998, 2000; Murai et al., 1998; Rotenberg, 1994）と、両方の脳半球の相互作用が創造的な洞察に関わっているという議論（Atchley et

al., 1999; Bogen and Bogen, 1969; Kwong et al., 1992) がある

- この研究は後者を支持する結果であった

#### 前頭葉の解決時間に関連する活性化

- 創造性や洞察における前頭葉前皮質の役割はすでによく議論されている
- レビューにおいて Dietrich は前頭葉前皮質が情報の新規な結合を認識することを議論している
- さらに、腹内側前頭葉前皮質はメタ認知的な役割に関連していると議論している
- この研究では、洞察解決が右腹面前頭葉の活性化を示していた
  - さらに、右腹面前頭葉は問題解決の遅い部分で活性化することを示している
- この結果は右腹面前頭葉が洞察解決でのメタ認知的な役割を果たしているという仮説を支持していると考えられる

#### 前帯状領域

- 前帯状領域が探索解決と比較して洞察解決で活性化することがわかった
- 前帯状領域は葛藤のモニタリングとリンクしており、専門的な課題の情報処理を増加させる (Botvinick et al, 1999 ; Carter et al, 1998 ; Scheffers et al, 1996)
- 近年、ACC の活性化が古い認知モデルと新しい認知モデルの間の対立したモニタリングに関連しているといった議論がある
- また、ACC が PFC のエグゼクティブコントロールの必要性の評価やそのような PFC のコントロールの交代について共同して働いている可能性がある」と記述している (Dreher and Berman, 2002; Garavan et al., 2002; Gehring and Knight, 2000; Tomaiuolo et al., 1999; Turken and Swick, 1999)
- この研究の結果は、この領域の活性化が ACC の注意の焦点化、モニタリング、エグゼクティブコントロールに関連するタイトなネットワークの一部であり、洞察プロセスの必要な要素である可能性を示唆している

#### 探索解決での角回と側頭極の非活性化

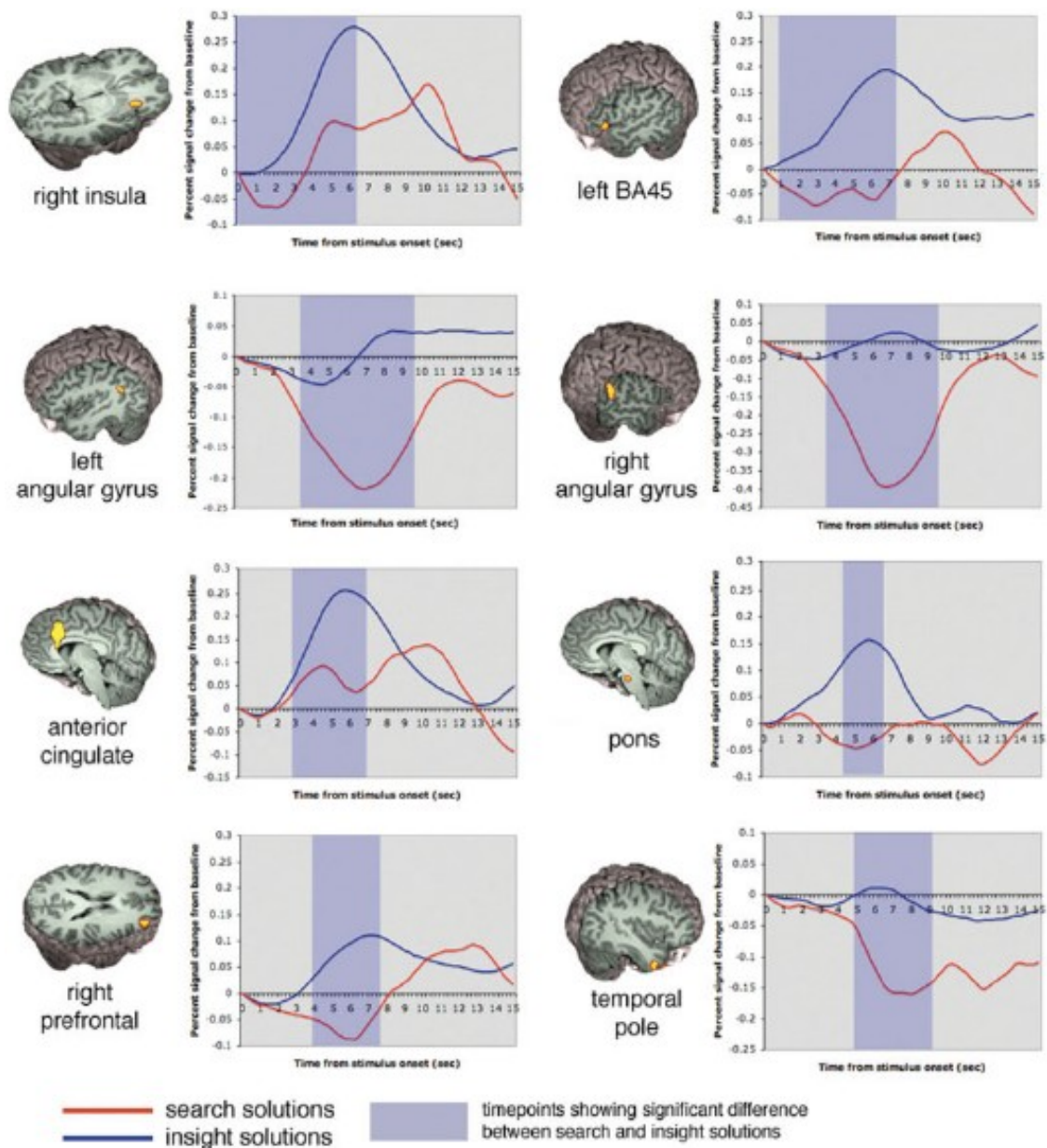
- 右の側頭極と両側の角回が洞察解決で弱い活性化を示し、探索解決で強い非活性化を示していることがわかった
  - 角回：聴覚における短期の言語記憶のプロセス
  - 右の側頭極：慣用句的なセンテンスの処理

- この領域はアナグラム解決に関係のない機能に関わる部分であり、この領域の非活性化が洞察解決と比べて探索解決に時間がかかることに影響しているかもしれない

## Conclusion

- この研究で得られたデータは、脳の領域のネットワークが探索解決時と比較して、洞察解決時においてより活性化したことを示した
  - 一方で、探索解決時に洞察解決より活性化した領域は存在しなかった
- また、洞察解決の処理に両方の脳半球が利用されていることは重要な要素であると考えられる
- 加えて、前帯状領域の活性化を伴う右前頭葉の活性化が洞察解決のメタ認知的な結合に重要であり、さらにこれには解決のモニタリングや注意が含まれることを示した





**Figure 1.**

Brain areas that were more activated during insight solutions when compared with search solutions, along with their time series graphs (blue). These graphs also depict the time series response of these areas during search solutions (red). The time points showing significant differences between insight and search solutions are highlighted in dark blue.