

Neural Correlates of Creativity in Analogical Reasoning

Adam E. Green(Georgetown University), David J. M. Kraemer(University of Pennsylvania)

Jonathan A. Fugelsang(University of Waterloo), Jeremy R. Gray(Yale University),

Kevin N. Dunbar(University of Maryland)

< Journal of Experimental Psychology掲載 >

1 Abstract

- analogical mappingでは脳の前頭極が関与している
- 認知的な研究では意味的距離をanalogical mappingにおける創造性の主な決定要因とみなす
 - (意味的に) より離れた類推は一般的により創造的
- 本研究ではanalogical mappingの意味的距離を変化させる類推生成課題を実施
 - fMRIを用いて類推課題生成中の脳活動を測定
 - 潜在的意味解析から定量的に導き出した尺度を使用

2 Introduction

類推は創造性における重要な認知過程である(Barnett & Ceci, 2002;Boden, 2003; Bowdle & Gentner, 2005; Costello & Keane, 2000;Green, Fugelsang, Kraemer, & Dunbar, 2008; Green, Kraemer,Fuselsang, Gray, & Dunbar, 2010; Holyoak & Thagard, 1995;Mayer, 1999; Sternberg, 1977)

- 創造性は特定の課題の制約に合った、今までにないものの生成
- 創造性の定義は類推を特徴づける2つの主な特徴を備えている
 - 新規性, 制約(constraint)
- 類推 (*blizzard is to snowflake as army is to ?*)
 - 一見, 類似していないように見える状況や表現の間の新規な繋がりを構成
 - [blizzard (吹雪) : snowflake (雪片)] と [army (陸軍) : soldier (兵士)]
 - 特定の制約に適合しなければならない
- 洞察 (ひらめき) によって, 類推と創造性の繋がりは実世界の例によって支持されている
 - August Kekuleは蛇が自らの尻尾を噛むという夢を見た後, ベンゼン環の炭素-炭素を発明
 - James Crockerはホテルの部屋の伸びるシャワーヘッドからハッブル望遠鏡の位置制御機能を発明

- 類推と創造性の関連は一般的ではない
 - ある類推は創造的, ある類推は全く創造的ではない
 - 類推における創造性の主な要因
 - ◇ 意味的特徴が比較的近いか遠いか(Barnett & Ceci, 2002; Boden, 2003; Bowdle & Gentner, 2005; Green et al., 2008, Green et al., 2010; Holyoak & Thagard, 1995)
 - 項目間の意味的距離は創造性の新規性と関連
- 創造的な類推
 - 表面的には類似していない関係表現のより深くにある類似性を表現
 - ◇ [kitten (子猫) :cat (猫)]と[spark (火の粉) :fire (火)]←表面的には類似していない
 - ◇ [kitten:cat]と[puppy (子犬) :dog (犬)]←表面的に類似
 - 項目間の意味的距離の変化が類推における創造性に関連
 - ◇ 意味的距離を定量化可能なパラメータとして実験することによって立証
- 創造的な類推の重要性が一般的に認識されている(Boden, 2003; Dahl & Moreau, 2002; Dunbar & Blanchette, 2001; Holyoak & Thagard, 1995)
 - 類推の脳機能イメージ研究において創造性に直接関連するパラメータの分析はされていない
- 類推解の生成における意味的距離の変化における脳イメージング研究を行った
- 脳イメージング研究
 - 前頭極が類推に関連(Bunge, Wendelken, Badre, & Wagner, 2005; Cho et al., 2009; Geake & Hansen, 2005; Green, Fugelsang, Kraemer, Shamosh, & Dunbar, 2006; Green et al., 2010; Hampshire, Thompson, Duncan, & Owen, 2011; Volle, Gilbert, Benoit, & Burgess, 2010; Wendelken, Nakhabenko, Donohue, Carter, & Bunge, 2008)
 - 特に, 左前頭前野皮質内の限局した部位はmappingの構成要素に関与(Green, Fugelsang, Kraemer, et al., 2006; Green et al., 2010)

3 Method

3.1 Participants

- native English speakers 23人 (男12人, 平均年齢22.2歳, 右利き)
- 倫理委員会の承認を受け, 実験前にインフォームドコンセントをとり同意書に記入

3.2 Stimuli and Procedure

- 参加者はfMRIの稼働中に80の類推トライアルを行った
- 3つの語と1つの?から成る類推問題を見て、類推して?を埋める (Figure1)

- 解を生成したらボタンを押す
- 正解の単語は次の画面で？の代わりに画面に登場し、参加者が生成した語が現れた語と同じかまたは近いか判断
- 項目間の意味的距離の値は潜在的意味解析で算出
 - 潜在的な意味解析アプリケーション(<http://lsa.colorado.edu>)
 - 値はパラメトリック分析で用いた
- 84人の独立した評価者が創造性に対して全ての類推刺激を7段階評価
 - この類推解はどの程度創造的か？
 - 1=創造性が最も低い, 7=創造性が最も高い
- 評価者は難易度も評価
 - この類推解はどの程度難しいか？
 - 1=最も難しくない, 7=最も難しい
- これらの評価値をその後のfMRI分析のためのパラメトリック回帰として使用
- 意味的距離が大きいかほど類推的な創造性は大きくなると予想
 - 予想と一致し意味的距離と創造性の平均評価に相関あり($r=.92, p<.001$)
 - 意味的距離と難易度の平均評価に相関あり($r=.39, p<.001$)
- 刺激の統制
 - 同じ基準語を使用
 - 比較的距離が短い…左[blindness : sight], 右[deafness:?]
 - 比較的距離が長い…左[blindness : sight], 右[povertry:?]
- 提示刺激の順番
 - 同じ基準語のペアを持つ2つの刺激が連続して提示されない
 - 上の条件を満たし,ランダムで表示
- 90%以上の評価者が了解した類推項目を使用

3.3 fMRI Data Acquisition and Analysis

- データは1.5テスラのスキャナーで採取
- 機能的画像データはSPM99(統計ソフト)における、一般線形モデルを用いて分析
- コントラスト画像は、条件間と、各条件とベースライン間の比較のために、voxelwise t contrast 分析を介する
- トライアル開始からボタンを押す(解生成)までの時間を解生成事象としてモデル化
- パラメトリック分析
 - 創造性評価に対する難易度評価, 意味的距離の関係を分析

4 Result

4.1 Behavioral Findings

- 応答の精度…正解したトライアルの割合
 - 応答の精度は $91.75\% \pm 4.93$
 - 応答の精度と意味適距離の値にはわずかに相関あり ($r = -.22, p = .05$)
- エラートライアルは分析から除外
 - エラートライアル…生成した解が正解のワードと同じでない,類似していないもの
- 応答時間…刺激提示から解生成時のボタンを押すまでの時間
 - 平均応答時間は $5,662 \text{ ms} \pm 645 \text{ ms} (SE = 68 \text{ ms})$
 - 応答時間は意味的距離と相関あり ($r = .35, p = .002$)

4.2 fMRI Findings

- 類推解生成中に前頭極が意味的距離の増加に伴って活性化(Figure 2)
- 意味的距離とROI内で正の変調を実証($t(22) = 6.81, \text{SVC } p = .05$)
- 評価された創造性と前頭極ROI内で正の変調を実証($t(22) = 6.85, \text{SVC } p = .05$)
- 難易度を統制するため, 応答時間, 精度から難易度を評価した
- Generation task > Rest (Figure 3)
 - 前頭極皮質とSTGにおける活動だけでなく, 全帯状回, 左の腹部前頭野を含む, 複雑な言葉の推論に関連した領域が明らかになった

5 Discussion

- 類推は解を生成する創造性に焦点を合わせることができる
- 類推解生成中の意味的距離と左前頭極皮質の活動に関連がある
- 以前に analogical mapping に関与していることを示した前頭極 ROI 内 (Green, Fugelsang, Kraemer, et al., 2006; Green et al., 2010) で、有意な予測因子であることを証明
- 課題の難易度ではなく analogical mapping の意味的距離がROI内の活動を変調する

5.1 Role of Frontopolar Cortex in Analogical Reasoning(類推における前頭極皮質の役割)

- 前頭極皮質は創造的な類推において重要な役割を果たしている (情報の統合に特化している)
 - 類推に寄与する他の部位と比較して, 前頭極皮質は優先的に類推の relational integration component として採用される

- 本研究では前頭極皮質に焦点を当てた
 - しかしながら、パラメトリック分析ではいくつかの脳領域の活動が明らかになった
 - 複数の脳領域が創造的な推論に寄与することはほぼ確実である
 - パラメトリック分析による STG(superior temporal gyrus (上側頭回)) の出現は、この領域が創造的な推論に関与している有力な候補であることを示す
- STG は単一の語の理解と関連して、優先的に文章や物語を理解（読んだり聞いたり）するのに必要とされる
- 洞察問題解決の「なるほど」と思う瞬間に、STG の活動が上昇している(Jung-Beeman et al., 2004)
 - STG の活動は創造性と意味的距離が遠い類推と関連しているかもしれない
- 本研究では、STG の活動は前頭極皮質よりも早くピークに達している(figure 4)
 - この知見は前頭極皮質の方が STG よりも潜伏時間が長いという先行研究に一致している(Crone et al., 2009)
 - このことから、STG は言語理解機能に携わっているであろう

5.2 Relating Semantic Distance to Creativity (創造性と意味的距離の関連)

- 予想と一致して analogical mapping における創造性の主観評価は意味的距離と相関あり
- 得られた知見が過去の研究成果と一致
 - 意味的距離が analogical mapping における創造性の主要な決定要因となる
- 主観評価としての創造性が前頭極皮質の ROI 内での有意なモジュレータ (変調器)
- 奇抜なアイデアは、これらが使用可能で課題の制約を満たしている場合に限り真に創造的(Mayer,1999)
 - 意味的に遠いアイデアが一般的に奇抜
 - しかし、必ずしも適切でないため創造性を特徴づけるのには不十分
 - このパラダイムにおける解の生成は定義された推論課題の制約の範囲内
 - このパラダイムにおける創出は創造課題の妥当性を満たしている

5.3 Dissociating Semantic Distance From Difficulty (難易度から意味的距離の解離)

- 本結果では、意味的距離が創造性に関連していることを支持する
- 意味的距離が神経レベルで課題の難易度から解離している
- 応答時間、精度、難易度評価はROIでの活動とは無関係 (先行研究から)

5.4 Generating Solutions Via Creative Analogy (創造的類推による解の生成)

- 過去の脳ベースの類推研究での評価を調査
 - C が D であるように、A が B であるというのは真ですか？偽ですか？

- 管理が容易
- **analogical mapping** とそのサブプロセスの神経的なメカニズムに非常に有益
- しかし、これらの類推は（少なくともあからさまには）何か新しいものの生成には関与しない
- 新しいものの生成は創造性の基本的な要素(Mayer, 1999)
- 類推の脳イメージング研究では、A が B なら C なら？という型であった(Wendelken et al., 2008)
 - 類推のパラメータとして創造性を調査せず
- 本研究では類推における脳ベースでの創造性の調査である

6 Conclusions

- 意味的距離を操作することによって、類推における創造性関連因子を研究するための新たなパラダイムが示された
- 我々が得たデータは、創造的な類推で意味的に遠い解の生成を支持している神経メカニズムとして前頭極の活動の増加を暗示する

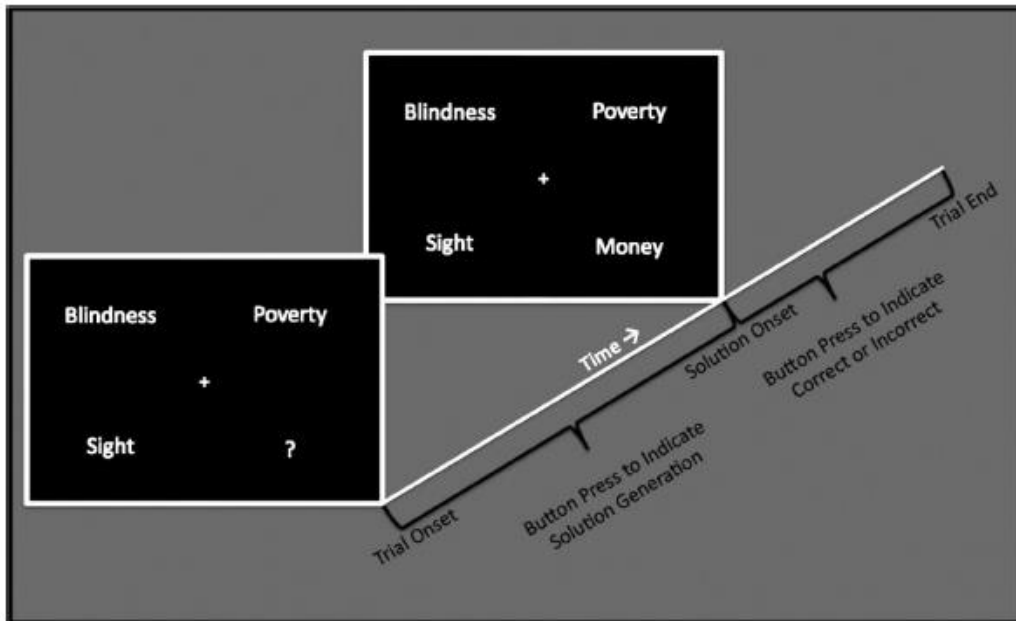


Figure 1. Generation task. The figure displays an example analogy trial presented to participants during functional magnetic resonance imaging.

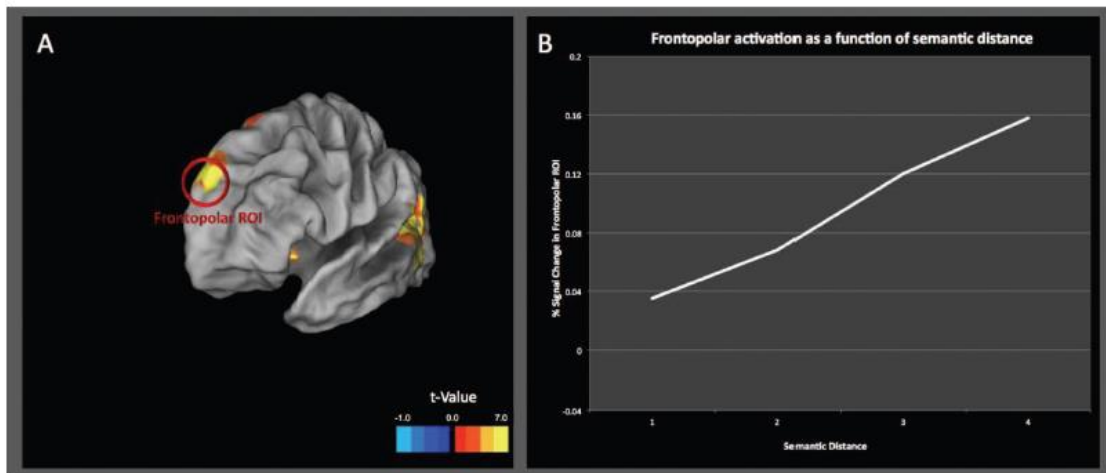


Figure 2. Neural response to semantic distance in analogical solution generation. A. Brain activity (orange) shown on an inflated cortical rendering of the left hemisphere; parametric analysis revealed regions that exhibited stronger activation for more semantically distant analogies. B. Signal change (y-axis) in the frontopolar region of interest increases as a function of increasing semantic distance (x-axis).

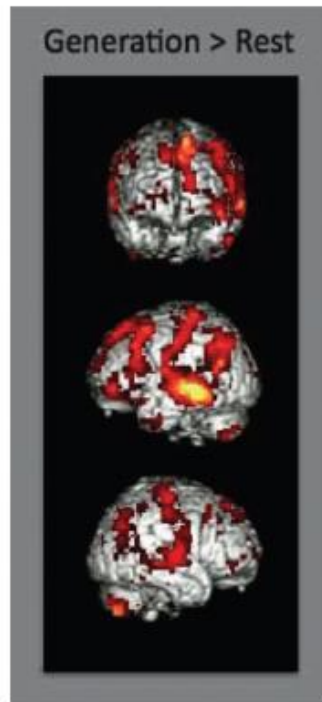


Figure 3. Exploratory whole-brain generation task > rest contrast.

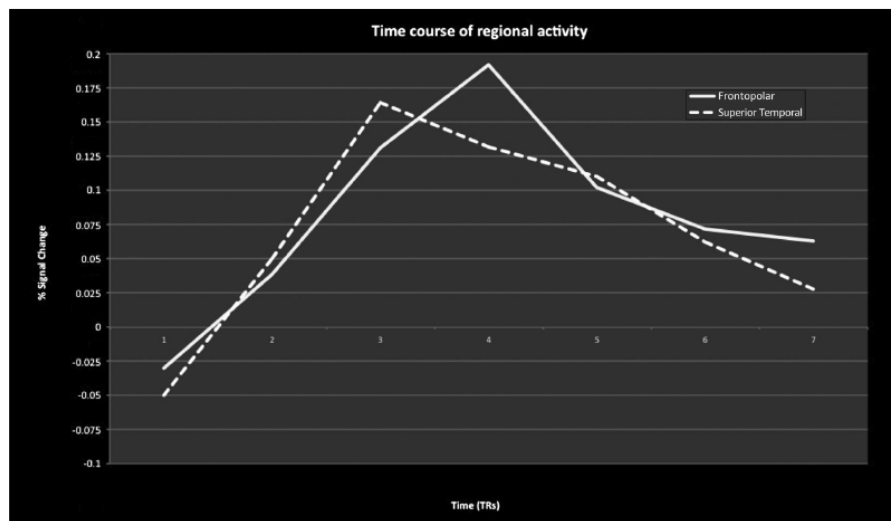


Figure 4. Regional activation time courses. Activation time courses in frontopolar cortex and superior temporal gyrus during generation in the analogy task.