

# Perceptual contributions to problem solving: Chunk decomposition of Chinese characters

Jing Luo, Kazuhisa Niki, Guenther Knoblich

Brain Research Bulletin 70 (2006) 430–443

## 1 Introduction

- 従来、問題解決は段階的に行われると考えられてきた
  - 初期の問題状態→連続した推論→目標状態
- しかしながら、問題解決は常に段階的に進むとは限らない（Duncker, 1945；Köhler, 1921；Wertheimer, 1959）
- 問題解決中におこる突然の洞察は、問題状況の知覚的な構造の変化により問題解決を導いていることを示唆している
- Ohlsson (1992) は過去の経験が制約となり、バイアスのある目標表象を導くとしている
  - 制約を克服するために、解決者は問題解決が可能な空間に目標表象を変化させる必要がある

### 1.1 Chunk decomposition

- この論文では、問題の表象変化と同様に重要な過程であるチャンク分解に焦点を当てた（Knoblich, Ohlsson, Haider, & Rhenius, 1999）
  - チャンク分解
    - ◇ まとめやすいパターン→他のパターン
  - チャンク
    - ◇ 例：字を見るとき、線の集合ではなく文字全体を見て理解する
- チャンク分解の難易度
  - ルーズなチャンク
    - ◇ 分解要素がそれ自体で意味を持つ場合（"VI"→"V"、"I"）
  - タイトなチャンク
    - ◇ 分解要素がそれ自体で意味を持たない場合（"X"→"/"、"\"）

- また、チャンク分解は分解だけでなく、目標状態に向かうための再編成も重要な点である
  - $X I = III + III$ を正しい式にする場合
    - ◇ "X"→"/"、"\→"V"

## 1.2 Chunk decomposition in Chinese characters

- チャンク分解のプロセスに関しての脳のメカニズムは未だ分かっていない
  - 本研究では、漢字を素材とした課題を利用した脳画像研究を行う
- 漢字は線から構成される部首から成る (図 1a)
  - 線：それ自体では意味を持たない→タイトなチャンク
  - 部首：文字の発音や意味といった情報を持つ→ルーズなチャンク
- 線は部首の下位のチャンクであると捉えられる (図 1b)
- 参加者には2つの漢字に関連する課題が提示された
  - ディスプレイの左右に一文字ずつ提示
- 右の漢字の一部を移動して左の漢字に付ける (図 1c)
  - 2つの新しい漢字が完成するように移動
- 2条件で行った
  - タイトなチャンク分解の条件 (tight chunk decomposition : TCD)
    - ◇ 問題解決には線の分解が必要
  - ルーズなチャンク分解の条件 (loose chunk decomposition : LCD)
    - ◇ 問題解決には部首の分解が必要
- タイトなチャンク分解はルーズなチャンク分解より困難
  - 難易度の違いを克服するため、Luo & Niki (2003) の方法を使用
    - ◇ ヒント提示による外的な問題解決

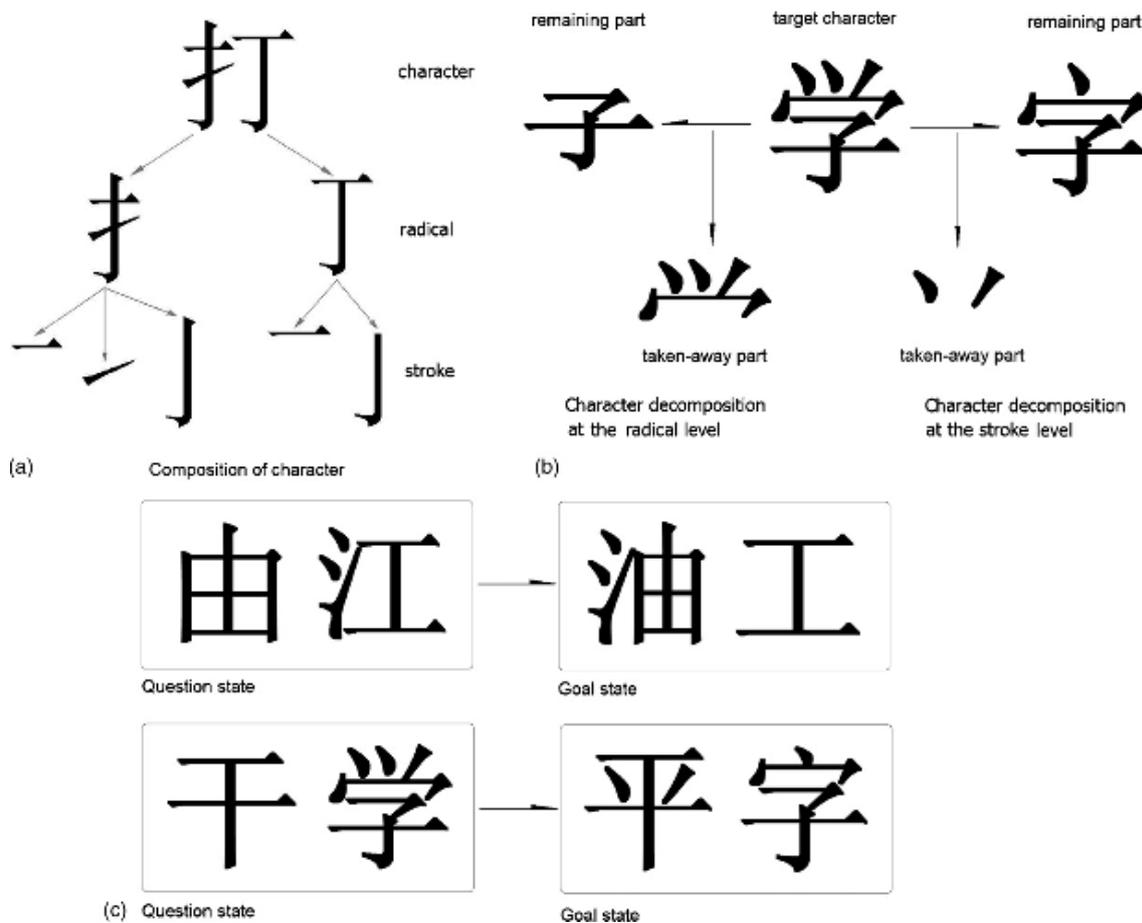


Fig. 1. (a) The composition of Chinese character. (b) Example of two kinds of character decomposition. If subjects are required to take something away from the target character with the remaining part to be a legal/real character, then to take the top radical away (left) will be easier than to take some strokes away (right) for the native readers. (c) The cognitive task of this study.

### 1.3 Predictions

- チャンク分解が問題表象の変化を引き起こすと考えられる
  - 問題表象の変化は問題要素を記憶する知覚の処理に関連する
    - ✧ しかしながら、知覚のプロセス単独で問題解決が行われることはない
  - 同時に、再編成を行うための実行過程が存在するだろう
- このことから、問題解決において、視覚野の知覚プロセスが前頭前皮質の実行プロセスと同程度の貢献をすると仮定した
- 視覚野における脳の活性化はチャンクのタイプによって異なる
  - 早期視覚領域

- ◇ 意味に関係しない基本的な視覚的特徴（図 2 下部）の処理
- 高次視覚領域
  - ◇ 意味の持つまとまりに関連する複雑な視覚的特徴（図 2 上部）の処理
- ネイティブスピーカーは高次の視覚処理によってチャンクの構成から文字を理解する（図 2 の赤のライン）
- タイトなチャンク分解を行うためには、基本的な線の特徴を無視する必要がある（図 2 の青のライン）
  - 早期視覚野からのインプットの拒絶
- タイトなチャンク分解における脳活動の予測
  - 早期視覚野のネガティブな活性化
  - 高次視覚野のポジティブな活性化
- チャンク分解に関わる実行プロセスに関して、TCD 条件での前頭前皮質の強い活性化を予測する
  - 先行研究では前帯状皮質や左側面部前頭前皮質の活性化が再構築の間に起こっていることを示している (Luo, Niki, & Phillips, 2004; Mai, Luo, et.al. 2004)
- これらの領域は認知的葛藤（問題の既存の解釈 vs. 新しい解釈）の検出や解消に関わっている
  - 前頭前皮質：葛藤の解消
  - 前帯状皮質：葛藤の検出

## 2 Method

### 2.1 Participants

- 14 人の学生が参加（20–27 歳）

### 2.2 Materials and procedure

- 課題は文字の分離と再結合であった
- 参加者は右側の文字のどの部分でも動かすことが可能であると教示された
- 試行は質問 (Q) フェイズ、ヒント提示 (H) フェイズ、解答提示 (S) フェイズの順に行われた（図 3）

- Q フェイズにおいて、問題解決ができた場合、ボタンボックスの右側ボタンを押すように指示された
- H フェイズでは、右側の文字の動かすべき箇所が赤色で表示された
- Q フェイズと同様に H フェイズでも問題解決ができた場合、ボタンボックスのボタンを押すように指示された
- S ステージでは、答えが提示され、参加者はその答えが解であることを理解できたかについて尋ねられた
  - 左側ボタン : yes
  - 右側ボタン : no
- 両条件ともにそれぞれ 30 試行行われた
- トライアル間のレストは 12s であった

### 2.3 FMRI data acquisition

- スキャンはエコープラナー法で 3.0-T MRI 装置(GE 3T Signa)によって行われた
- 画像パラメーターは繰り返し時間 2 s、エコータイム 30m s、フィリップ角 70°、有効視野 20cm×20cm (64×64 メッシュ) であった

### 2.4 FMRI data analysis

- TCD 条件の分析対象
  - Q ステージで問題解決に失敗し、H ステージで解決できた試行
  - ヒント提示時が基準点
- LCD 条件の分析対象
  - Q ステージで問題解決に成功した試行
  - ヒント提示時が基準点
- TCD 条件で十分な解決を行えなかった一人の参加者のデータを除外
- 13 人の参加者の解決試行
  - LCD 条件 : 平均 26.92、SD=2.43
  - TCD 条件 : 平均 13.53、SD=3.09
- 検討を行う活性化の種類
  - ポジティブな活性化

- ◇ TCD と LCD の両方で活性化した領域
- ◇ TCD のみで活性化した領域
- ネガティブな活性化
  - ◇ TCD と LCD の両方で活性化した領域
  - ◇ TCD のみで活性化した領域

### 3 Result

#### 3.1 Behavioral results

- 正答率
  - LCD 条件
    - ◇ Q フェイズ=89.76%、H フェイズ=8.57%、S フェイズ=1.67%
  - TCD 条件
    - ◇ Q フェイズ=26.67%、H フェイズ=45.12%、S フェイズ=28.23%
- 反応時間
  - LCD 条件
    - ◇ Q フェイズ=2.37s (SD=0.57)、H フェイズ=0.86s (SD=0.16)
  - TCD 条件
    - ◇ Q フェイズ=3.88s (SD=1.18)、H フェイズ=2.32s (SD=0.48)
  - H フェイズの比較の検定
    - TCD>LCD (t(12)=11.07, p<.001)

#### 3.2 Imaging results

- Q フェイズの比較
  - TCD>LCD の活性化を示した部位
    1. 右側帯状回(x, y, z=8, -18, 27; BA 23)と左側後帯状回(x, y, z=0,-26, 22; BA 23)
    2. 右側上前頭回(x, y, z = 12, 22, 49; BA 6)、左側内前頭回(x, y, z =-4, 18, 45; BA 8)、右側帯状回(x, y, z = 12, 30, 24; BA 32)
    3. 左側下脳回(x, y, z =-28, -3, 55; BA 6;)、左側上前頭回(x, y, z =-22, 14, 47; BA 6)
  - LCD>TCD の活性化を示した部位はなかった

- 次に、TCD 条件と LCD 条件の H フェイズでの比較に焦点を当てる
- 視覚領域、前頭前皮質、頭頂部の 3 箇所活性化について検討した

### 3.3 Activation in visual areas

- 視覚領域の比較
  - LCD 条件より TCD 条件でポジティブな活性化を示した箇所 (図 5 の左側のコラムと表 1)
    - ◇ 左側下後頭回 (BA18) と両半球の内側後頭回 (BA18、19)
  - LCD 条件と TCD 条件の両方でポジティブな活性化を示した箇所 (図 5 の左から 2 つ目のコラムと表 2)
    - ◇ 左側下後頭回 (BA18)
    - ◇ 両半球の内側後頭回 (BA18、19) では活性化は見られず
  - 従って、両半球の内側後頭回は TCD 条件のみで活性化し、左側下後頭回は両条件で活性化していたことがわかる
  
  - LCD 条件より TCD 条件でネガティブな活性化を示した箇所 (図 5 の右から 2 つ目のコラムと表 3)
    - ◇ 両半球の楔状葉 (BA18)
  - LCD 条件と TCD 条件の両方でネガティブな活性化を示した箇所 (図 5 の右側のコラムと表 4)
    - ◇ 両半球の楔状葉 (BA18) の上記と違う部分 (表 3、4 の比較)
  - 表 5 にクラスター内のピークのボクセルを示した
    - ◇ 両側の楔状葉 (BA18、17) と舌状回 (BA18、17) が文字の分解の瞬間にネガティブな活性化を示している

### 3.4 Activation in prefrontal cortex

- 前頭前皮質の比較
  - LCD 条件より TCD 条件でポジティブに活性化した箇所
    - ◇ 両半球の内側前頭回、両半球の下前頭回、両半球の上前頭回が活性化していた (図 6、表 1、2)
  - LCD 条件と TCD 条件の両方でポジティブに活性化した箇所

- ◇ 前頭前皮質の大部分が LCD 条件でも同等のポジティブな反応を示していた (図 6)
- 左側上前頭回や右側内前頭回の周囲は共通して活性化していた (図 6b、e)
- 内側前頭前皮質における活性化は TCD 条件でより前方の範囲に拡大していた (図 6g)
- TCD 条件のみでポジティブな活性化をしている箇所が、右側前頭回の比較的小さな領域で発見された (図 6h、i)
- ネガティブな活性化の比較では大きな差は見られなかった

### 3.5 Activation in parietal areas

- 頭頂部の比較した
  - 右側楔前部 (BA7)、右側内頭頂小葉 (BA7)、右側上回 (BA40)、左側縁上回 (BA40)、左前楔前部 (BA31) が活性化した
  - これらの領域の多くは LCD 条件でもポジティブな活性化を示した (図 7、表 1、2)
  - 両側楔前部 (BA7) と右側上頭頂小葉 (BA7) は TCD 条件でのみポジティブな反応を示した

## 4 Discussion

- 本研究はチャンク分解における認知と脳のメカニズムについて検討した
- 行動データ
  - ルーズなチャンク分解よりタイトなチャンク分解の解決が難しい
    - ◇ 先行研究の結果 (Knoblich, Ohlsson, Haider, & Rhenius, 1999) と一致
- 脳のメカニズム
  - 知覚プロセスと実行プロセスの両方のチャンク分解への関与
    - ◇ Q フェイズでの活性化
      - TCD 条件で左側上頭回や内側前頭回が強く活性化
      - 解に到達しない分解に関連していると考えられる
    - ◇ H フェイズでの活性化
      - 視覚、前部、頭頂領域と広い範囲で活性化を示した

- これらの活性化の TCD 条件と LCD 条件の比較は、チャンク分解のタイプによる異なった認知処理の過程を示している

#### 4.1 Visual contributions to chunk decomposition

- よりタイトなチャンクを分解する場合の仮説
  - 意味のあるパターンに関連している高次な視覚野の活性化
  - 無意味パターンに関連する早期視覚野のネガティブな活性化
    - ◇ これは早期視覚野から送られる無意味パターンに関する情報を高次視覚野が拒絶するためであると考えられる
- 高次視覚野の数カ所は TCD 条件でよりポジティブな活性化
  - 左側下後頭回 (BA18) : TCD 条件、LCD 条件で活性化
  - 両側内後頭回 (BA18、19) : TCD 条件のみ活性化
- 一方、両側楔状葉 (BA18、17) や舌状回 (BA18、17) は TCD 条件でよりネガティブな活性化
  - これはチャンク分解の瞬間に早期視覚野の活性化が減少したことを示す
- 左側下後頭回 (BA18) におけるポジティブな活性化
  - Uchida et al (1999) の実験
    - ◇ 実在の文字と架空の文字の比較
      - 実在の文字の場合、左側下後頭回が活性化
    - ◇ しかしながら、この結果は既存の文字の視覚的処理に対して敏感な領域を示しているに過ぎない
  - 追加的に LCD 条件の H フェイズと S フェイズの比較を行った
    - ◇ 左側下後頭回が文字に類似した刺激の処理に関わっていた場合
      - H フェイズと S フェイズの活性化は同程度
    - ◇ 結果は H フェイズでより活性化 (図 8)
  - 従って、チャンク分解における左側下後頭回の役割は、文字の知覚や刺激の再配列に関わっていると考えられる
- 左側内後頭回 (BA19)、右側内後頭回 (BA19、18) のポジティブな活性化
  - Kuo et al(2004)の実験

- ◇ 実在の漢字と漢字に類似した視覚パターン
  - 無意味パターンで両側の内後頭回が活性化
- ◇ この領域は視覚パターンの線のレベルでの詳細な分析を行っている
- 線レベルの文字の分解が両側の内後頭回で処理されていると考えられる
- 両側楔状葉（BA18、17）と舌状回（BA18、17）のネガティブな活性化
  - チャンク分解の瞬間の早期視覚野の活性化の減少を示していると考えられる

#### 4.2 Executive contributions to chunk decomposition

- 前部のネットワークがチャンク分解における問題表象の再構築に関わるといふ予測を行った
  - TCD 条件でより強い両側内前頭回、下前頭回の活性化を示したことと一致した
    - ◇ この活性化は既存の解釈と新しい解釈の葛藤の検出に影響していると考えられる
  - 予測されていた左側側面部前頭前皮質の活性化も見られた
    - ◇ 先行研究（Luo, Niki, & Phillips, 2004）と比較して、より上部、前部に拡散して位置していた
    - ◇ この領域は問題を妨害する要素を抑制する形での葛藤の解決を行っていると考えられる
- 今回の結果から、前面部と視覚領域の間の相互作用についての堅固な結論をだすことはできない
  - しかしながら、内側や側面部の前頭前皮質の活性化が、視覚野における処理の形を変化させるといった推測は可能である
    - ◇ グループ化された知覚→新しい形状にするための基礎的な知覚

#### 4.3 Other contributions to chunk decomposition

- 左脳半球のネットワークに注目した洞察解決研究（Luo, Niki, & Phillips, 2004 など）と比較して、文字の分解における堅固な右脳半球の活性化が見られた
  - 両側の頭頂部の活性化（BA7）と共に、右側の側面部前頭前皮質が活性

化したことは視空間処理を要求する問題解決でよく観察される (Goel, Buchel, Frith, & Dolan, 2000 ; Dehaene, Spelke, Pinel, Stanescu, & Tsivkin, 1999)

◇ これらの活性化は文字の分解の視空間的な処理に起因していると考えられる

- 文字の分解時の左側縁上回の活性化も観察された
  - この領域は、上部、下部の頭頂小葉や上側面回を含む左側頭頭頂のネットワークの一部
    - ◇ 先行研究 (Lee et al., 2004) はこのネットワークが漢字の正しい綴りや音韻的な処理において重要な役割を行っていることを示している
  - この領域の活性化は解だと考えられる視覚パターンの音韻的なチェックに関わり、正しい解が発見できたかの判断の手助けをしていると考えられる

## 5 Conclusion

- この研究では内側、側面の前頭回が問題表象の変化や再構築に関連するといった言語的な問題解決の領域で獲得された証拠を拡張した
- また、視覚処理が表象変化に対する重要な情報を供給している可能性を示唆した

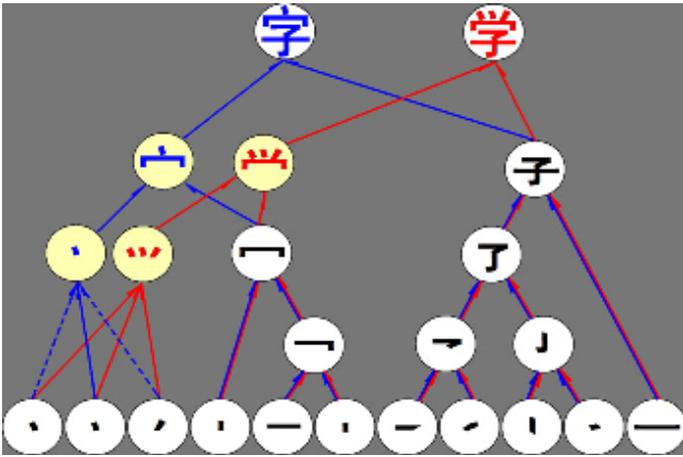


Fig. 2. The assumed hierarchical processing of a Chinese character.

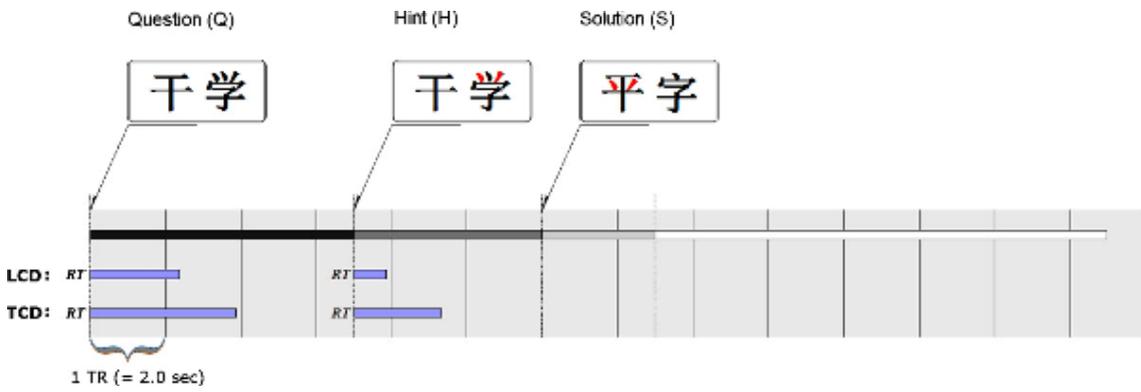


Fig. 3. The sequence of stimulus. The blue bars show the average response time (RT) of LCD and TCD trials in the Q and H phases.

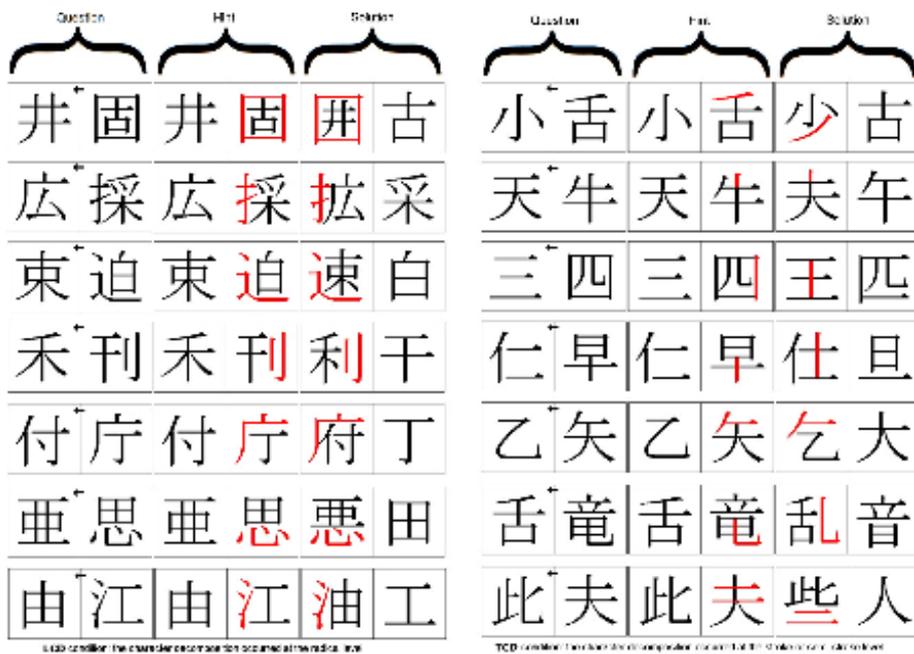


Fig. 4. Examples of the LCD and TCD items.

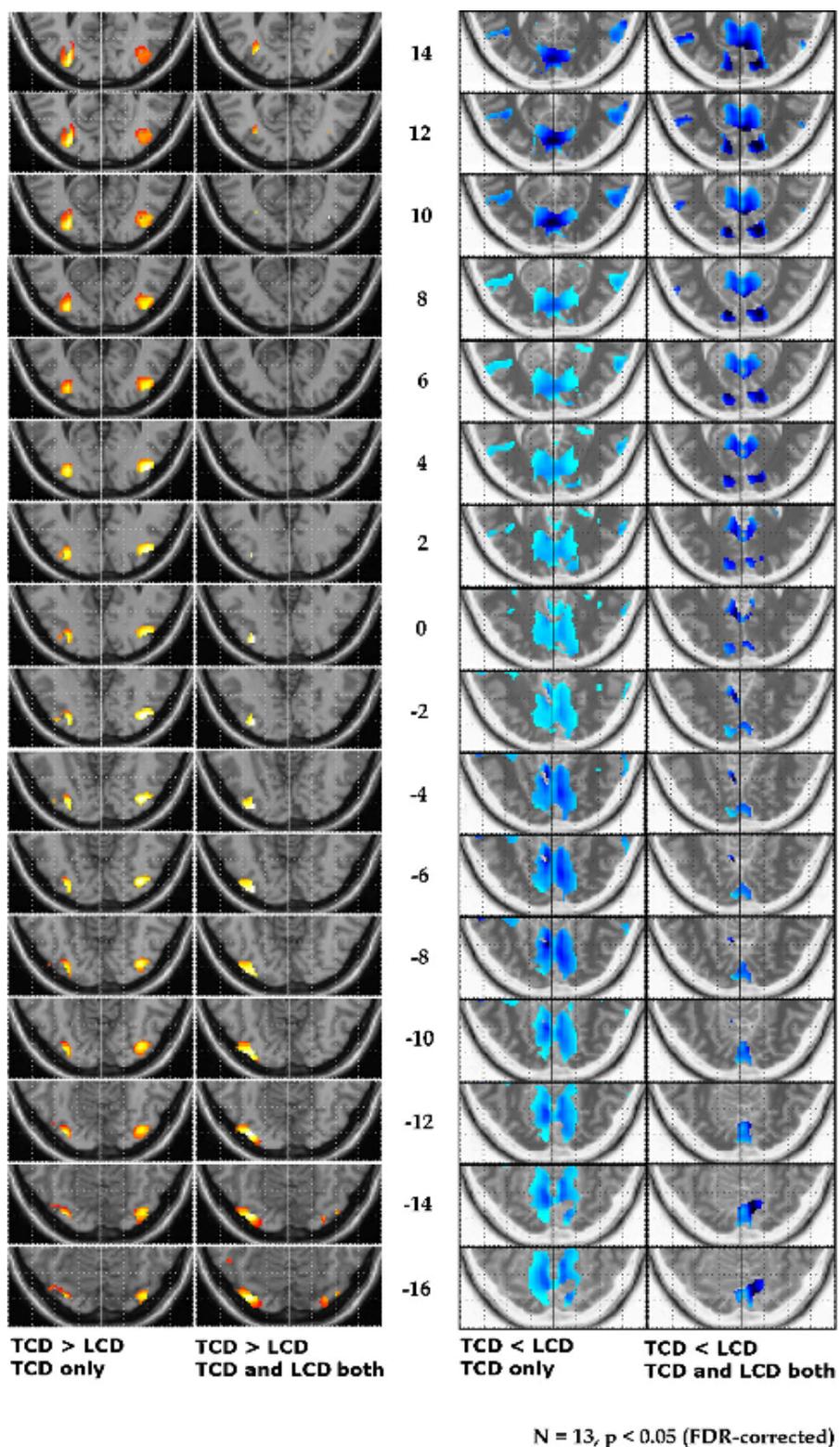


Fig. 5. The transient visual activation in the moment chunk decomposition. “TCD only” means these areas were only positively (the two left-side columns) or negatively (the two right-side columns) activated in TCD trials. The “TCD and LCD both” means these areas were positively (the two left-side columns) or negatively (the two right-side columns) activated in both TCD and LCD trials.

Table 1

List of areas that showed stronger activation in TCD than in LCD, all of the reported areas were positively activated in both LCD and TCD

Cluster, $K_E$	Voxel					MNI coordinates			Talairach coordinates			Area	Range
	$p(\text{FEW-cor})$	$p(\text{FDR-cor})$	$T$	$=Z$	$p(\text{unc})$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$		
171	0.000	0.000	14.6	5.84	0.000	-28	-88	14	-28	-85	17	Left middle occipital gyrus, BA 19	3
	0.000	0.000	11.96	5.45	0.000	-26	-80	14	-26	-77	17	Left middle occipital gyrus, BA 19	5
167	0.000	0.000	11.33	5.34	0.000	46	32	20	46	32	17	Right middle frontal gyrus, BA 46	3
176	0.001	0.000	10.16	5.12	0.000	38	-86	6	38	-83	10	Right middle occipital gyrus, BA 19	1
	0.011	0.000	7.81	4.57	0.000	34	-86	-6	34	-84	-1	Right middle occipital gyrus, BA 18	3
80	0.003	0.000	9.30	4.94	0.000	-48	28	20	-48	28	17	Left inferior frontal gyrus, BA 46	1
	0.011	0.000	7.79	4.57	0.000	-42	28	26	-42	28	23	Left middle frontal gyrus, BA 46	5
483	0.003	0.000	9.04	4.88	0.000	-6	-26	-34	-6	-27	-27	Brain stem	
	0.003	0.000	9.04	4.88	0.000	-8	-14	-24	-8	-15	-19	Brain stem	
	0.006	0.000	8.38	4.72	0.000	4	-24	-32	4	-25	-26	Brain stem	
110	0.004	0.000	8.91	4.85	0.000	-46	40	6	-46	39	4	Left inferior frontal gyrus, BA 46	5
84	0.004	0.000	8.85	4.84	0.000	36	28	-12	36	27	-11	Right inferior frontal gyrus, BA 47	3
	0.029	0.000	6.87	4.30	0.000	38	34	-20	38	32	-18	Right inferior frontal gyrus, BA 47	7
62	0.004	0.000	8.72	4.81	0.000	-46	8	40	-46	10	36	Left middle frontal gyrus, BA 9	3
	0.009	0.000	7.99	4.62	0.000	-50	16	34	-50	17	30	Left middle frontal gyrus, BA 9	3
	0.025	0.000	7.03	4.35	0.000	-58	16	26	-57	17	23	Left inferior frontal gyrus, BA 9	3
56	0.011	0.000	7.83	4.58	0.000	-26	-2	50	-26	0	46	Left middle frontal gyrus, BA 6	1
183	0.011	0.000	7.79	4.57	0.000	-2	18	54	-2	20	49	Left superior frontal gyrus, BA 8	1
	0.026	0.000	6.98	4.33	0.000	8	28	40	8	29	35	Right medial frontal gyrus, BA 6	1

 $N=13$ ;  $p<0.05$  (FEW-corrected);  $K_E > 50$ . No GM means no gray matter is found in the  $7 \times 7 \times 7$  mm cube range.

Table 2

List of areas that showed stronger activation in TCD than in LCD, these areas were positively activated in TCD but not in LCD

Cluster, $K_E$	Voxel					MNI coordinates			Talairach coordinates			Area	Range
	$p(\text{FEW-cor})$	$p(\text{FDR-cor})$	$T$	$=Z$	$p(\text{unc})$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$		
171	0.000	0.000	14.6	5.84	0.000	-28	-88	14	-28	-85	17	Left middle occipital gyrus, BA 19	3
	0.000	0.000	11.96	5.45	0.000	-26	-80	14	-26	-77	17	Left middle occipital gyrus, BA 19	5
167	0.000	0.000	11.33	5.34	0.000	46	32	20	46	32	17	Right middle frontal gyrus, BA 46	3
176	0.001	0.000	10.16	5.12	0.000	38	-86	6	38	-83	10	Right middle occipital gyrus, BA 19	1
	0.011	0.000	7.81	4.57	0.000	34	-86	-6	34	-84	-1	Right middle occipital gyrus, BA 18	3
80	0.003	0.000	9.30	4.94	0.000	-48	28	20	-48	28	17	Left inferior frontal gyrus, BA 46	1
	0.011	0.000	7.79	4.57	0.000	-42	28	26	-42	28	23	Left middle frontal gyrus, BA 46	5
483	0.003	0.000	9.04	4.88	0.000	-6	-26	-34	-6	-27	-27	Brain stem	
	0.003	0.000	9.04	4.88	0.000	-8	-14	-24	-8	-15	-19	Brain stem	
	0.006	0.000	8.38	4.72	0.000	4	-24	-32	4	-25	-26	Brain stem	
110	0.004	0.000	8.91	4.85	0.000	-46	40	6	-46	39	4	Left inferior frontal gyrus, BA 46	5
84	0.004	0.000	8.85	4.84	0.000	36	28	-12	36	27	-11	Right inferior frontal gyrus, BA 47	3
	0.029	0.000	6.87	4.30	0.000	38	34	-20	38	32	-18	Right inferior frontal gyrus, BA 47	7
62	0.004	0.000	8.72	4.81	0.000	-46	8	40	-46	10	36	Left middle frontal gyrus, BA 9	3
	0.009	0.000	7.99	4.62	0.000	-50	16	34	-50	17	30	Left middle frontal gyrus, BA 9	3
	0.025	0.000	7.03	4.35	0.000	-58	16	26	-57	17	23	Left inferior frontal gyrus, BA 9	3
56	0.011	0.000	7.83	4.58	0.000	-26	-2	50	-26	0	46	Left middle frontal gyrus, BA 6	1
183	0.011	0.000	7.79	4.57	0.000	-2	18	54	-2	20	49	Left superior frontal gyrus, BA 8	1
	0.026	0.000	6.98	4.33	0.000	8	28	40	8	29	35	Right medial frontal gyrus, BA 6	1

 $N=13$ ;  $p<0.05$  (FEW-corrected);  $K_E > 50$ .

Table 3

List of areas that showed stronger activation in LCD than in TCD, all of the areas were negatively activated in both LCD and TCD

Cluster, $K_{\text{E}}$	Voxel					MNI coordinates			Talairach coordinates			Area	Range
	$p(\text{FEW-cor})$	$p(\text{FDR-cor})$	$T$	$=Z$	$p(\text{unc})$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$		
77	0.000	0.000	10.3	5.15	0.000	44	-18	40	44	-16	38	Right precentral gyrus, BA 4	1
	0.010	0.001	6.89	4.30	0.000	38	-22	44	38	-19	41	Right precentral gyrus, BA 4	1
	0.022	0.001	6.19	4.07	0.000	46	-14	28	46	-12	26	No GM	
98	0.007	0.001	7.18	4.39	0.000	52	-12	-4	51	-12	-3	Right superior temporal gyrus, BA 22	5
	0.013	0.001	6.67	4.24	0.000	40	-16	12	40	-15	12	Right insula, BA 13	3
	0.045	0.001	5.60	3.86	0.000	56	-6	8	55	-5	8	Right precentral gyrus, BA 6	3
61	0.011	0.001	6.82	4.28	0.000	10	-22	44	10	-19	41	Right cingulate gyrus, BA 24	5
	0.036	0.001	5.79	3.93	0.000	12	-30	44	12	-27	42	Right cingulate gyrus, BA 31	3
70	0.011	0.001	6.82	4.28	0.000	16	-88	12	16	-85	15	Right cuneus, BA 18	1
57	0.015	0.001	6.56	4.20	0.000	2	-76	12	2	-73	15	Right cuneus, BA 18	3

N = 13;  $p < 0.05$  (FEW-corrected);  $K_{\text{E}} > 50$ . No GM means no gray matter is found in the  $7 \times 7 \times 7$  mm cube range.

Table 4

List of areas that showed stronger activation in LCD than in TCD, these areas were negatively activated in TCD but not in LCD

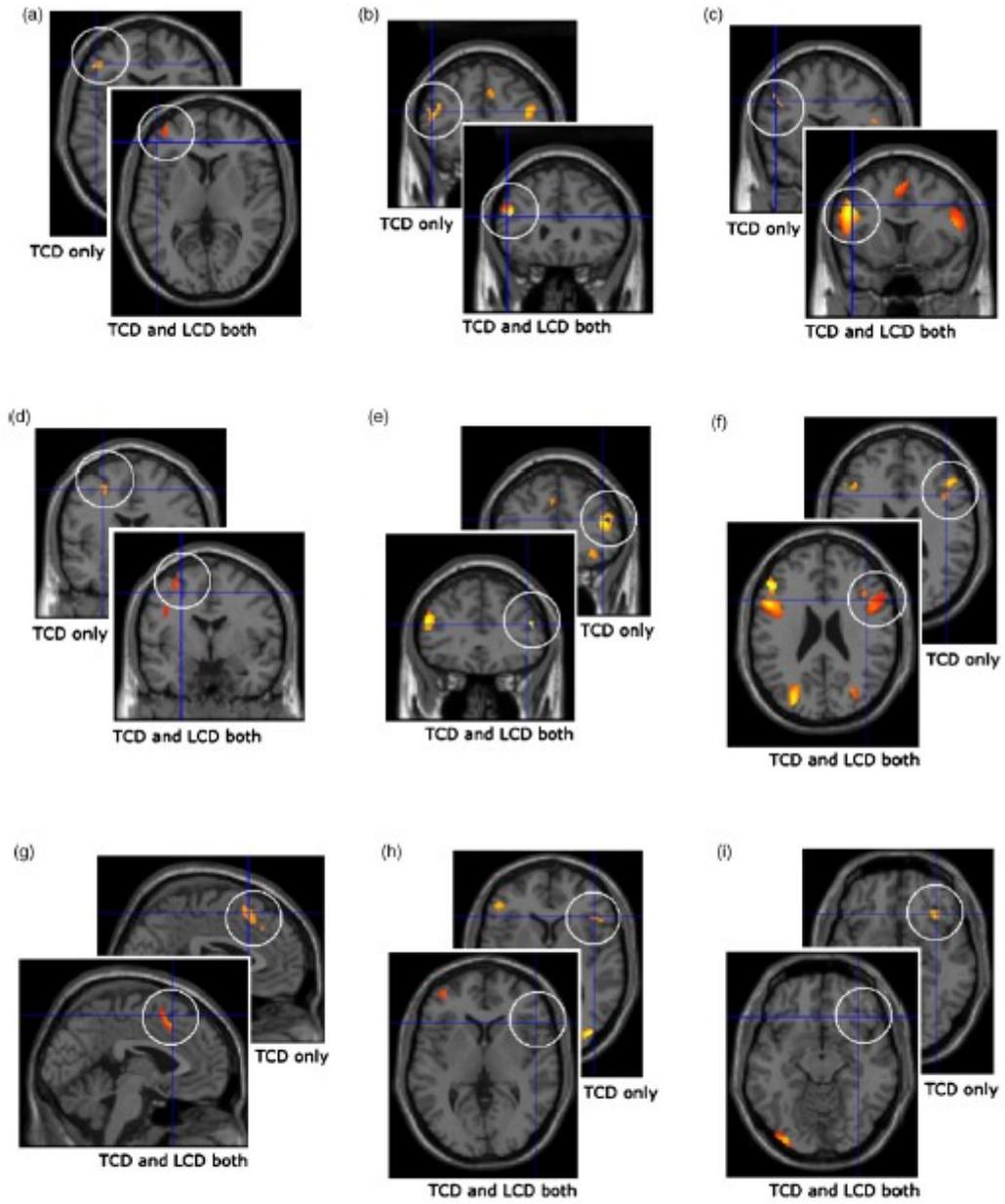
Cluster, $K_{\text{E}}$	Voxel					MNI coordinates			Talairach coordinates			Area	Range
	$p(\text{FEW-cor})$	$p(\text{FDR-cor})$	$T$	$=Z$	$p(\text{unc})$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$		
647	0.000	0.000	14.35	5.8	0.000	64	-14	4	63	-13	4	Right superior temporal gyrus, BA 22	3
	0.000	0.000	12.75	5.58	0.000	54	4	-14	53	3	-12	Right middle temporal gyrus, BA 21	1
	0.003	0.000	9.62	5.01	0.000	62	-6	8	61	-5	8	Right superior temporal gyrus, BA 22	1
70	0.001	0.000	11.2	5.32	0.000	46	-16	46	46	-13	43	Right precentral gyrus, BA 4	1
	0.005	0.000	9.14	4.90	0.000	-62	-10	0	-61	-10	0	Left superior temporal gyrus, BA 22	1
317	0.006	0.000	8.94	4.86	0.000	-60	-26	8	-59	-25	9	Left superior temporal gyrus, BA 41	5
	0.008	0.000	8.62	4.78	0.000	-60	-8	10	-59	-7	10	Left precentral gyrus, BA 43	1
95	0.008	0.000	8.63	4.79	0.000	-48	-14	12	-48	-13	12	Left precentral gyrus, BA 13	1
	0.019	0.000	7.70	4.54	0.000	-46	-14	26	-46	-12	25	No GM	
	0.027	0.000	7.34	4.44	0.000	-38	-18	34	-38	-16	32	No GM	
84	0.011	0.000	8.27	4.69	0.000	0	-84	12	0	-81	15	Left cuneus, BA 18	3
63	0.012	0.000	8.14	4.66	0.000	48	-12	24	48	-11	23	No GM	

N = 13;  $p < 0.05$  (FEW-corrected);  $K_{\text{E}} > 50$ . No GM means no gray matter is found in the  $7 \times 7 \times 7$  mm cube range.

Table 5

The list of negative visual activities in chunk decomposition

$p(\text{FEW-cor})$	$p(\text{FDR-cor})$	$T$	$=Z$	$p(\text{unc})$	MNI coordinates			Talairach coordinates			Area	Range
LCD > TCD, negatively activated in both LCD and TCD												
0.011	0.001	6.82	4.28	0.000	16	-88	12	16	-85	15	Right cuneus, BA 18	1
0.015	0.001	6.56	4.20	0.000	2	-76	12	2	-73	15	Right cuneus, BA 18	3
0.027	0.001	6.02	4.01	0.000	12	-82	-18	12	-80	-11	Right lingual gyrus, BA 18	3
0.193	0.001	4.44	3.35	0.000	6	-84	-10	6	-82	-4	Right lingual gyrus, BA 18	1
0.298	0.002	4.08	3.17	0.001	4	-88	-2	4	-85	2	Right lingual gyrus, BA 17	3
0.34	0.002	3.96	3.11	0.001	10	-94	-2	10	-91	3	Right cuneus, BA 17	1
LCD > TCD, only negatively activated in TCD but not LCD												
0.011	0.000	8.27	4.69	0.000	0	-84	12	0	-81	15	Left cuneus, BA 18	3
0.077	0.000	6.36	4.13	0.000	12	-84	-18	12	-82	-11	Right lingual gyrus, BA 18	3
0.115	0.000	5.99	4.00	0.000	-6	-70	0	-6	-68	3	Left lingual gyrus, BA 18	3
0.149	0.000	5.76	3.91	0.000	10	-82	-12	10	-80	-6	Right lingual gyrus, BA 18	3
0.47	0.001	4.65	3.45	0.000	-12	-94	16	-12	-90	19	Left cuneus, BA 18	3
0.521	0.001	4.53	3.39	0.000	12	-96	12	12	-92	16	Right middle occipital gyrus, BA 18	1
0.596	0.001	4.37	3.32	0.000	10	-100	-4	10	-97	1	Right cuneus, BA 17	1



**N = 13, p < 0.05 (FEW-corrected)**

Fig. 6. The frontal activation in chunk decomposition. "TCD only" means these areas were only positively activated in TCD trials. The "TCD and LCD both" means these areas were positively activated in both TCD and LCD trials. The blue cross marks the exact location of the peak voxel in cluster. (a) Left inferior frontal gyrus ( $x, y, z = -46, 40, 6$ ); (b) left inferior frontal gyrus ( $x, y, z = -48, 28, 20$ ); (c) left middle frontal gyrus ( $x, y, z = -46, 12, 36$ ); (d) left middle frontal gyrus ( $x, y, z = -26, -2, 50$ ); (e) right middle frontal gyrus ( $x, y, z = -46, 32, 20$ ); (f) right middle frontal gyrus ( $x, y, z = 42, 16, 24$ ); (g) left superior frontal gyrus ( $x, y, z = -2, 18, 54$ ); (h) right inferior frontal gyrus ( $x, y, z = 44, 28, 4$ ); (i) right inferior frontal gyrus ( $x, y, z = 36, 28, -12$ ).

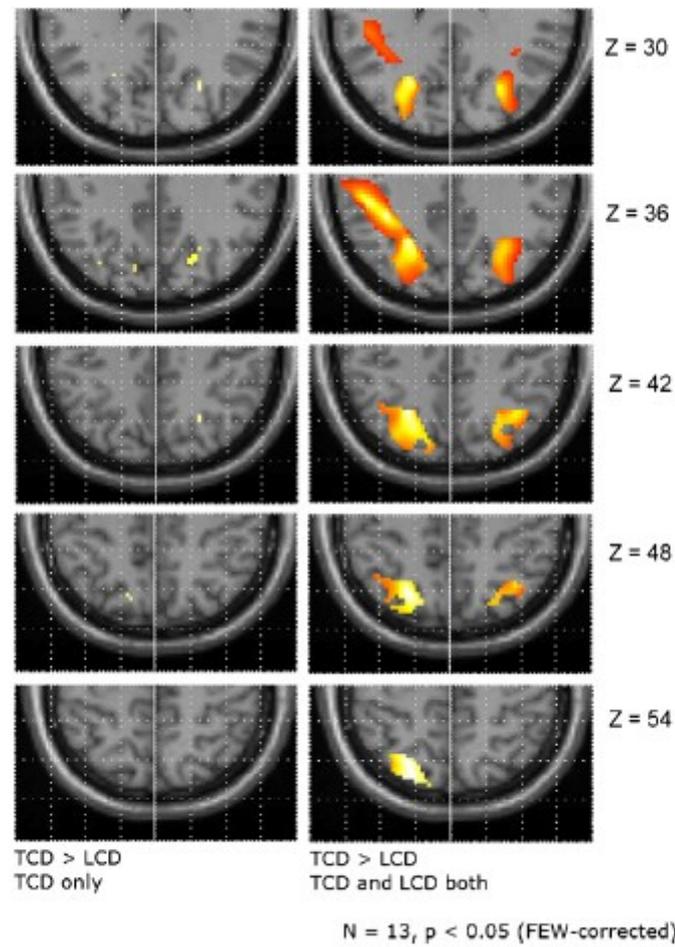
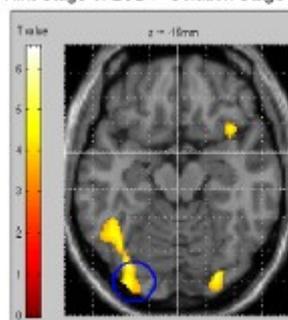


Fig. 7. The parietal activation in chunk decomposition. "TCD only" means these areas were only positively activated in TCD trials. The "TCD and LCD both" means these areas were positively activated in both TCD and LCD trials.

*Hint Stage of LCD > Solution Stage of LCD*



N = 14, p < 0.05 (FDR-corrected, random-effect analysis)

Fig. 8. The activation in inferior occipital gyri shown in the contrast of LCD in H phase minus LCD in S phase. The blue circle marked the activation located in left inferior occipital gyrus.