An eye movement study of insight problem solving

GÜNTHER OHLSSON (*Max Planck Institute for Psychological Research, Munich, Germany*)
STELLAN OHLSSON and GARY E. RANEY (*University of Illinois, Chicago, Illinois*)

Memory & Cognition, 2001, 29 (7), 1000-1009

- 漸進的に解に至るような問題がある一方で (e.g., Anderson & Lebiere, 1998; Newell & Simon, 1972)，洞察問題における解答のパターンは特徴的である
  - インパス・Aha!体験 (Metcalfe, 1986) からの飛躍的解決

- インパスから洞察までの流れについては，2 つの方面からアプローチされている (Ohlsson, 1992)
  1. 解くために必要な知識は持っているのに，なぜ行き詰まってしまうのか
  2. どのように妨害因子を取り除き，インパスから解放されるのか

- 1.を説明した理論
  - 機能的固着仮説 (Functional fixedness hypothesis)
    - 一般的な使用法が，なじみのない使用法を妨害 (Duncker, 1945; Keane, 1989)
  - 心的固着仮説 (Mental ruts hypothesis)
    - 誤った経路や同じ経路の繰り返し探索することで，その経路がさらに活性化し (Smith, 1995)，他の経路を探索しなくなる (Simon, 1966)
  - Einstellung hypothesis (Luchins & Luchins, 1959)
    - ある経路が常習的なものになると，それ以上の探索をやめる
- 2.を説明した理論
  - ゲシュタルト理論 (Köhler, 1924, 1925; Wertheimer, 1959)
    - 不安定な知覚野をバランスのとれた状態にしようとする (Ohlsson, 1984a)
  - 自然選択説 (Simonton, 1988, 1995)
    - ある程度ランダムに解答を生成し，それらを進化させる
  - 過去の経験の漸進的変化仮説 (Perkins, 1981; Weisberg, 1986; Weisberg & Alba, 1981)
    - 創造的産物や解は，経験が変化したもの

- ここでは，1.と 2.を包括する理論をさらに展開する (Knoblich, Ohlsson, Haider, & Rhenius, 1999; Ohlsson, 1984b, 1992)
  - インパスの原因
    - 洞察問題は，解に至る可能性の低い心的表象を最初に思い起こさせる
    - その問題表象は，解に至るために十分でない事前知識と作用しあうため，必

要な知識を抑圧・抑制してしまう

- インパスからの解放（表象の変化）
  - 記憶内における注意の分散が変化し，解に至るために必要だが非活性だった知識にアクセスする
  - さっきまで無視されていた重要な知識の登場が，Aha!体験にあたる

- 本研究では，マッチ棒問題を解いているときの眼球運動を測定し，仮説を検証する
  - 注視時間と処理量の間や，見ているものと考えていることの間には強い結び付きがある (Just & Carpenter, 1976; Knoblich & Rhenius, 1995; Rayner, 1978, 1998)

Eye Movements in Match Stick Arithmetic

- 「マッチ棒で形作られたローマ数字の式が提示され，マッチ棒を 1 本動かして正しい式にする」というマッチ棒問題を使用（Figure 1 参照）
  - 要素は，演算結果・等号・被演算子 1・演算子（正符号）・被演算子 2
  - 各要素が独立し，かつ水平に連続しているため，眼球運動を測定しやすい

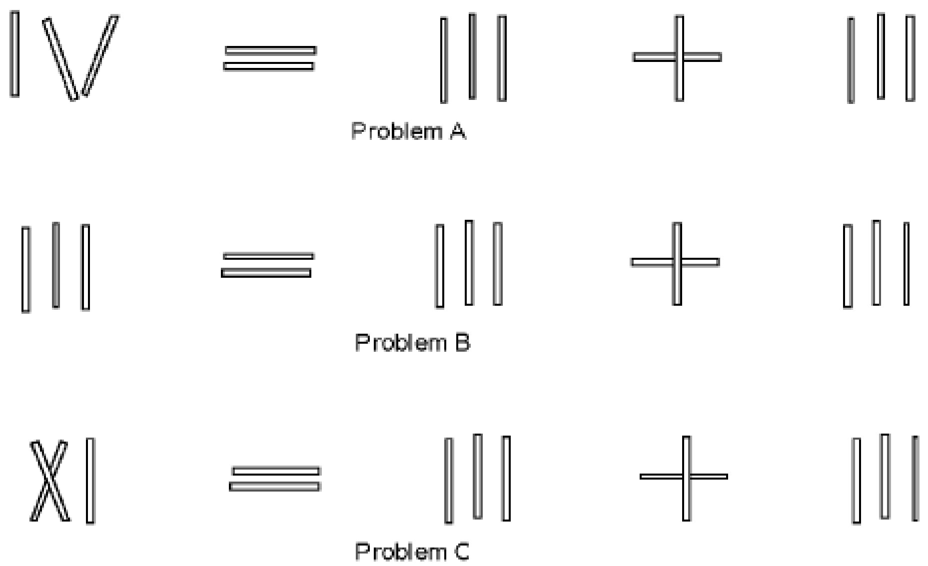

Figure 1. Matchstick arithmetic problems.

- 難易度は Problem A ＜ B　(Knoblich et al., 1999; Knoblich & Wartenberg, 1998)
  - 「被演算子の値は可変だが，演算子は不変」という初期表象のため
- また，Problem A ＜ C　(Knoblich et al., 1999)
  - Problem A における“VI”の“ I ”には意味があるが，C における“X”の“＼”には意味がなく，このチャンクを分離しづらいため

- 3 つの仮説
  1. インパスが注視時間に影響するだろう

- ➢ Problem A より難しい B・C は，平均注視時間が長くなる
- ➢ Problem B・C では，平均注視時間が時間とともに増加する
- ➢ これらのパターンは正答者・誤答者のいずれでも観察できる

2. 「値は可変・演算子は不変」という初期表象が，注意の分配に影響するだろう
   - ➢ どの要素も再符号化の必要があるので，要素間で短期注視時間に差はない
     - ✧ 短期注視は，要素をワーキングメモリに再符号化する役目を負う (Ballard, Hayhoe, Pook, & Rao, 1997)
   - ➢ 制約が緩和されるまでは，値に対する長期注視の割合が大きくなる
     - ✧ 長期注視は，要素を深く処理していることを示す可能性が高い（同上）
3. 初期表象の変化が，注意の分配に影響するだろう
   - ➢ Problem B
     - ✧ 正答者　値の制約が緩和されるため，演算子への注視時間が増加する
     - ✧ 誤答者　値の制約が緩和されず，値への注視割合が長いまま
   - ➢ Problem C
     - ✧ 正答者　“X”が分解されるため，演算結果への注視時間が長くなる
     - ✧ 誤答者　“X”が分解されず，演算結果への注視割合はそのまま

METHOD

Participants

- ローマ数字を知っている学部学生 24 名

Apparatus

- 眼球運動測定には Dr. Bouis Monocular Oculometer を使用
  - マッチ棒問題の視角は水平 12°・垂直 2°
    - ➢ 注視の開始　5 ms 以内に視角が 1/9 未満しか動かなかったら
    - ➢ 跳躍の開始　連続 3 サンプルが，直前の点よりも 1/9 以上離れたら

Procedure, Materials, and Design

- 手続き
  - ローマ数字を正しく認知する練習課題
  - マッチ棒問題のルールと実験手続きの教示
  - キャリブレーション
  - 本課題（使用した問題は Figure 1 の 3 問）
    - ➢ Problem A・B・C は参加者間でランダム順に提示
    - ➢ 1 問につき制限時間 5 分

- ➢ 問題が解けたらできるだけ早くボタンを押して，口頭で答える
  - ✧ 正答　次の問題が提示
  - ✧ 誤答　同じ問題をやり直し

- 次の問題に移る前，誤答した後，1 分以上未回答が続いたときは再キャリブレーション

RESULTS

Solution Frequencies and Solution Times

- Problem A・B・C における 1 分ごとの累積正答者割合 (Figure 2)

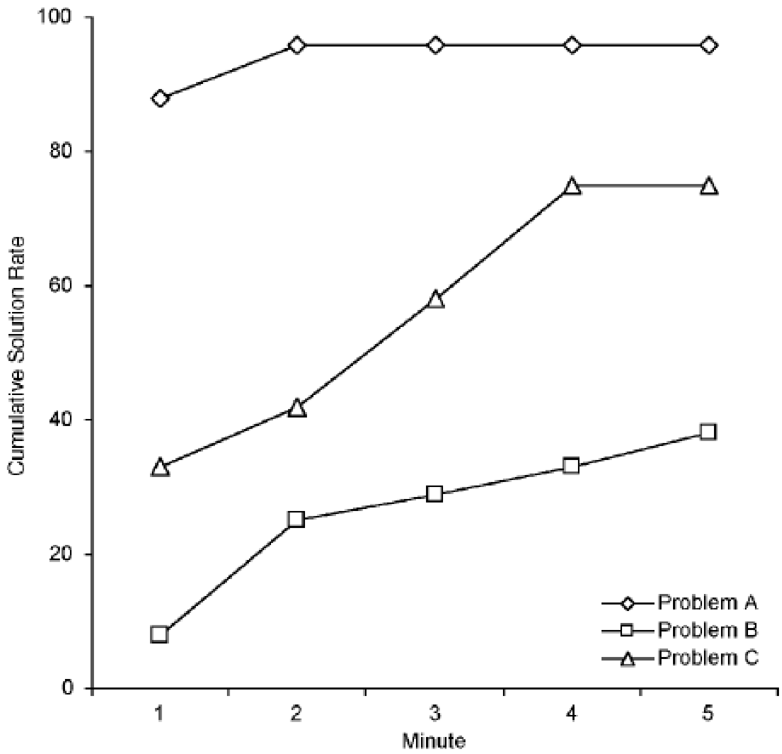

Figure 2. Cumulative solution rates for Problems A, B, and C.

- 各問題間の最終的な（5 分時の）正答者数についての χ^2 検定
  - − Problem B (9 / 24) ＜ C (18 / 24) ＜ A (23 / 24)
    (χ^2 (1) = 4.78, p < .05;　χ^2 (1) = 4.18, p < .05;　χ^2 (1) = 18.38, p < .001)

- Problem A・B・C における解決時間の中央値と上位・下部四分位数[1] (Table 1)
  - − 誤答者は制限時間の 5 分（＝300 s）として計算

[1] 歪度が極度に高いため，検定には中央値と上位・下部四分位数を用いた

Table 1
Solution Times (in Seconds) For Problems A, B, and C

Problem	Mdn	Lower Q	Upper Q
A	22	14	31
B	300	112	300
C	136	42	300

- 各問題間の解答時間についての Single Wilcoxon 検定
  - Problem A ＜ C ＜ B　(T = 22, p < .001; T = 24, p < .05; T = 1, p < .001)

- パフォーマンスは眼球運動を測定しなかった先行研究 (Knoblich et al., 1999) と一致
  - キャリブレーションは課題遂行を妨げない

Eye Movement Data

- 100 ms 以上の注視のみを分析対象
- 注視を中央値で二分（長期注視／短期注視）
- 各問題の解答時間を三等分（Interval 1・Interval 2・Interval 3）

Fixation duration.

- 各 Interval における平均注視時間 (Figure 3)

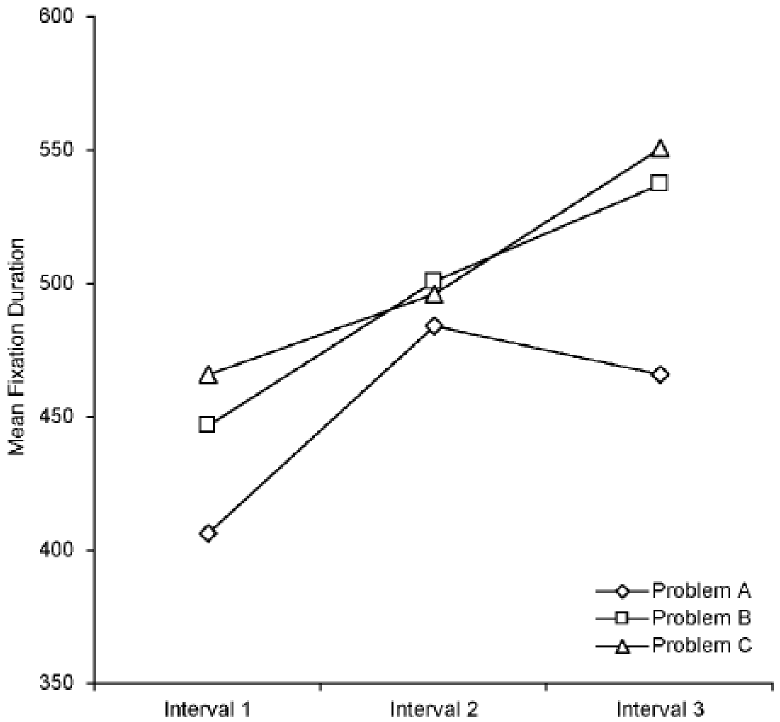

Figure 3. Mean fixation duration across intervals in Problems A, B, and C.

- 3 (Problem: A / B / C)×3 (Interval: 1 / 2 / 3) の分散分析
  - Problem の主効果あり (*F* (2, 44) = 3.49, *p* < .05)
    - Problem A ＜ B　(*p* < .05)
    - Problem A ＜ C　(*p* < .05)
    - Problem B・C ではよりインパスに陥っていた
  - Interval の主効果あり (*F* (2, 44) = 8.58, *p* < .001)
    - 時間の経過とともに長くなる
  - 交互作用なし (*F* (4, 88) = 1.54, *p* = .20)
- 正答者／誤答者も追加で分析したが，有意差なし

Fixation time on single elements during the initial phase.

- Interval 1 における各要素の注視割合 (Figure 4)
  - もし各要素を等しく注視しているなら，それぞれの注視割合は 20 %

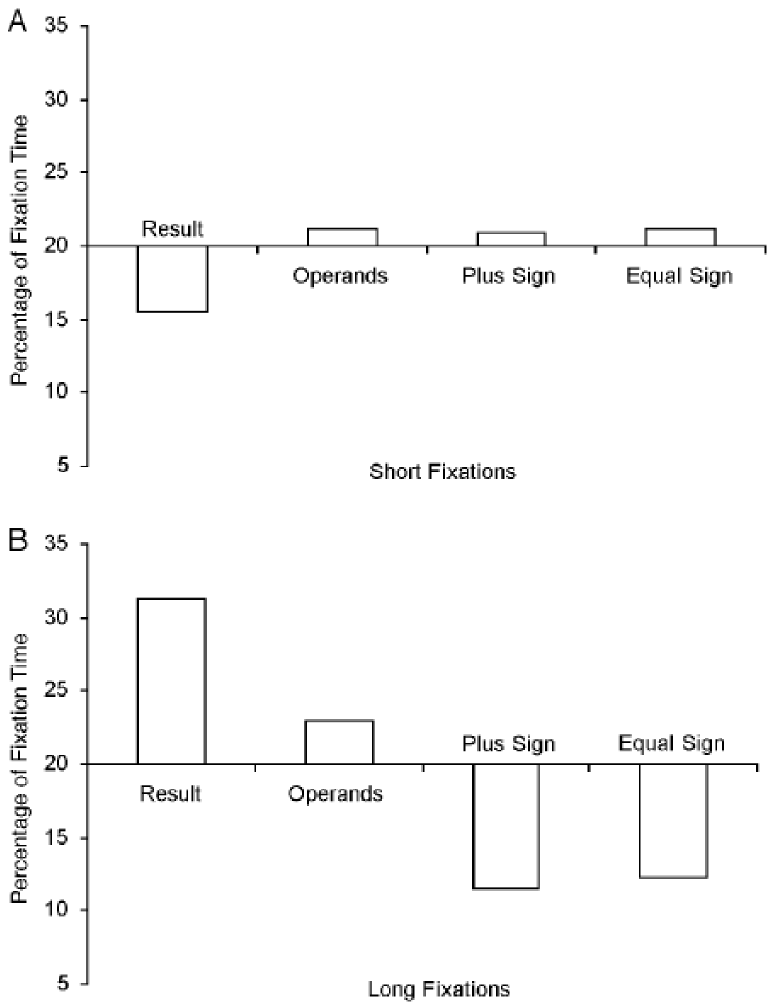

Figure 4. Percentage of fixation time spent on different problem elements during the initial phase of problem solving for short (A) and long (B) fixations.

- 4（要素：演算結果／被演算子／正符号／等号）×3 (Problem: A / B / C) の分散分析
  - 短期注視
    - 要素の主効果あり (F (3, 63) = 2.82, p < .05)
      - 演算結果のみ低い
    - Problem の主効果なし (p = .42)
    - 交互作用なし (p = .26)
  - 長期注視
    - 要素の主効果あり (F (3, 63) = 24.02, p < .001)
      - 演算結果 ＞ 被演算子 (p < .01)
      - 被演算子 ＞ 正符号 (p < .001)
      - 被演算子 ＞ 等号 (p < .001)
    - Problem の主効果なし (p = .42)
    - 交互作用の傾向あり (F (6, 126) = 2.06, p = .06)

- 長期注視は値への偏りがあるが，短期注視割合には偏りがない

Fixation time on crucial elements across intervals.

- Problem B の正答・誤答における正符号への注視割合の推移 (Figure 5)
- 2（正誤：正答／誤答）×3 (Interval: 1 / 2 / 3) の分散分析
  - 短期注視
    - 主効果・交互作用ともになかったが，コントラスト分析では有意差あり
      - Interval 1・2 において，正答 ＞ 誤答 (F (1, 22) = 7.09, p < .05)
  - 長期注視
    - 正誤の主効果なし (p = .28)
    - Interval の主効果あり (F (2, 44) = 12.35, p < .001)
    - 交互作用あり (F (1, 22) = 7.91, p < .01)
      - 正答は徐々に増加しているが，誤答は Interval 3 でもチャンスレベル以下

- Problem C の正答者・誤答者における演算結果への注視割合の推移 (Figure 6)
- 2（正誤：正答／誤答）×3 (Interval: 1 / 2 / 3) の分散分析
  - 短期注視
    - 正答 ≦ 誤答 (F (1, 21) = 3.09, p = .09)
    - Interval の主効果なし (p = .78)
    - 交互作用なし (p = .87)
  - 長期注視

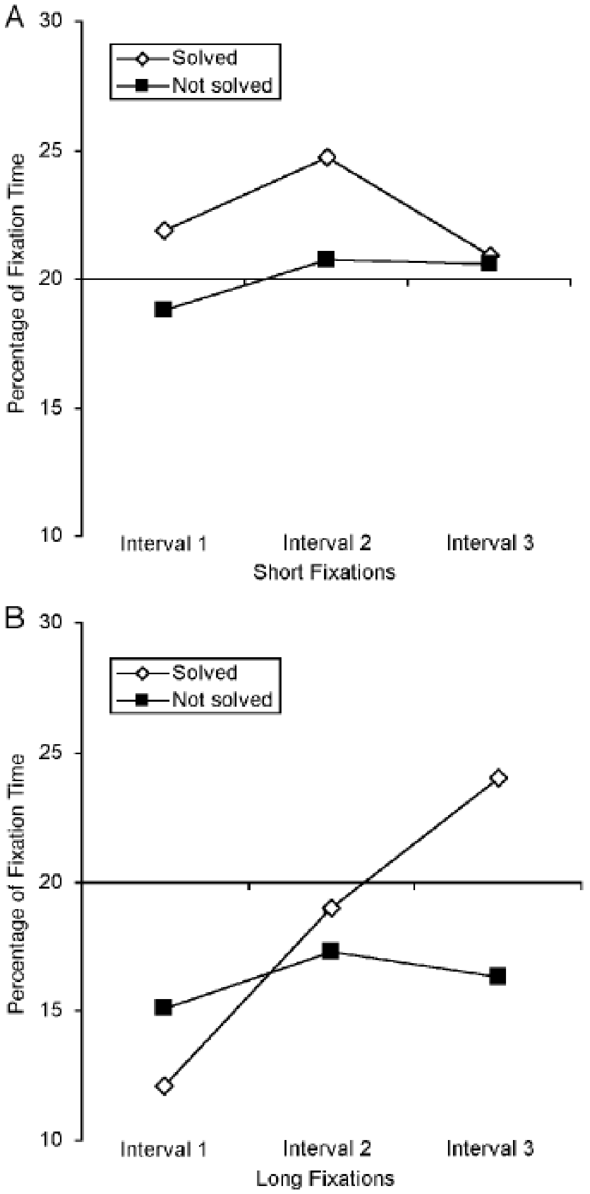

Figure 5. Percentage of fixation time spent on the operators in Problem B across intervals for successful and unsuccessful problem solvers and for short (A) and long (B) fixations.

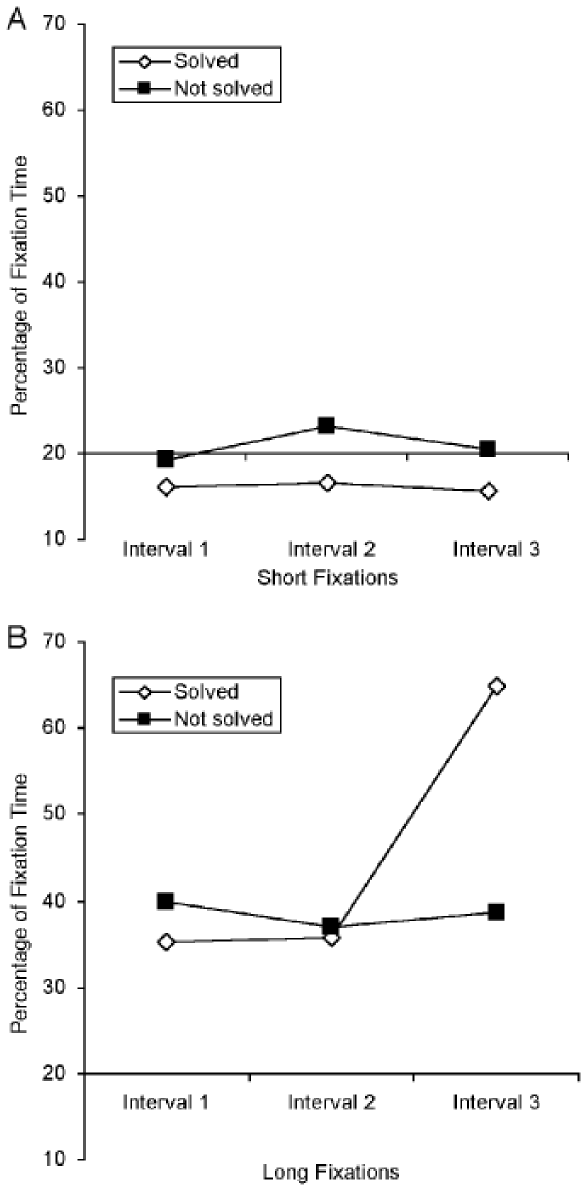

Figure 6. Percentage of fixation time spent on the result in Problem C across intervals for successful and unsuccessful problem solvers and for short (A) and long (B) fixations.

- 正誤の主効果なし (p = .33)
- Interval の主効果あり (F (2, 42) = 5.31, p < .01)
- 交互作用あり (F (2, 42) = 5.08, p = .05)
  - Interval 3 で正答が急激に増加する

DISCUSSION

- 本実験では，洞察問題の仮説から導かれた 3 つの仮説を検証した

1. インパスが深くなるほど，跳躍が少なくなり，注視時間が長くなる
   - ➢ 難易度の高い Problem B・C では観察され，低い A では観察されず (Figure 3)
2. 「値は可変・演算子は不変」という初期表象のため，値に注意が分配される
   - ➢ Interval 1 で，深い処理を表す長期注視が値に対して向けられていた (Figure 4)
3. 問題表象の変化により，注意の分配が変化する
   - ➢ 正答者は Interval 3 において，Problem B では正符号への，C では演算結果への注視時間が誤答者より長かった (Figure 5, 6)

- この 3 つの結果をすべて説明できる仮説は他にはない
  - 機能的固着仮説・心的固着仮説・Einstellung hypothesis は，注意分配の変化からインパス解放の流れを説明していない
  - ゲシュタルト理論・自然選択説・過去の経験の漸進的変化仮説は，正答者のみに注意分配の変化が起こることを説明していない

- 今回の結果から，マッチ棒問題を解くときに何が起こっているのかが推測できる
  - このフォーマットは，「値は可変の要素，等号と演算子は不変の要素，ローマ数字は分離不可の要素」という心的表象を形成する
    - ➢ その結果，インパスへとつながる
  - この初期表象を破棄できたとき，注意分配と処理が変化する
    - ➢ するとインパスから解放され，解がすぐに見つかる

- 一方で，Kaplan & Simon (1990) は，チェッカーボード問題において，インパスには初期表象の不完全性が影響し，制約の緩和には不変の値が重要であるとしている
  - しかし，マッチ棒問題や 9 点問題で不変の値が何を指すのかは不明
- 私たちは，不完全というよりむしろ不適切であるという仮説を支持しているが，まだまだ議論する余地がある
  - 眼球運動測定を用いれば，表象変化の仕組みに関する多くの仮説を検証することができるだろう