

作問による成人の概念理解と学習の転移の調査

Jose P. Mestre: Probing Adults' Conceptual Understanding and Transfer of Learning via Problem Posing, Journal of Applied Developmental Psychology, vol.23, no.1, pp.9-50 (2002).

本稿では、初等物理学コースを終了した高成績の大学生に物理の問題を作成させた、2つの実験を報告する。実験1では、被験者は問題状況（例えば、問題を構築可能な図とともにストーリーライン）を与えられ、指定の概念（例：力学エネルギーの保存、ニュートンの第二法則）で解ける「教科書的な」問題の作成を求められた。実験2では、被験者は「概念シナリオ」（例えば、ある問題に適用可能な原理・概念の記述と、その適用順序）を与えられ、シナリオに合う問題の作成を求められた。実験に続いて行われたインタビューでは、作成した問題が指定された概念または概念シナリオに合うかの説明を被験者に求めた。インタビューから、作問は新しい文脈に知識を転移する能力と同様に、生徒の力学概念の理解を調べる強力な評価ツールであることが示された。大抵の場合、生徒は適切で解決可能な問題を作成したが、概念理解における主要な欠陥を示した。これは、良い初心者であっても、記憶に概念知識を組織化し、問題文脈と手続きを結びつける方法において欠陥があることを示唆する。作問を教育用のツールとして使用する提案を示す。

1 Introduction

- 熟達化
 - 特定領域における学習・訓練に時間・労力を割く
 - 熟達化の特徴
 - :認知スキルの発達段階、知識の組織化・蓄積、問題解決における知識使用等
 - 認知スキル・知識の発達が高パフォーマンスを導く
 - :小認知コストで問題解決に関する知識・手続きの検索
- 転移
 - 学習した知識を異なる領域において柔軟に適用
 - 困難 [Gick, Holyoak 1980]
 - :生徒は数学を物理に活かさないという教員の文句
 - 知識が学習した文脈向きなのが原因？
 - 知識の抽象化を支援することで転移を促進
- 本研究の目的
 - 物理の領域における新学習アプローチを報告
 - :概念知識の柔軟な適用（転移）
 - :物理の知識の組織化と応用（熟達化の特性）
 - 情報統合能力の観点からの成人の概念変化を解明
 - 「作問」を用いた調査
- 本稿の構成
 - 2 節：理論的背景
 - 3 節：認知プロセス調査における作問の有効性
 - 4・5 節：実験
 - 6 節：総合考察

2 Theoretical Background

2.1 Student knowledge, problem solving, and conceptual change

- 熟達化の特徴
 - 25 年超の専門家・初心者比較研究
 - 問題解決における知識の解釈・組織化・適用の違い
 - 成人学習者の概念変化
 - 科学的誤概念の存在、科学概念の理解と融合の阻害
- 知識獲得と組織化
- 「宣言的知識」の獲得
 - 定義・事実・概念の知識 [Anderson 1982; 1983; 1987]
 - 初心者：知識が組織化されていない・知識間の関係がない
 - 専門家：知識が高度に構造化

- チャンクへのコンパイル
 - 文脈・条件・手続きと関連付けして知識を融合
 専門家：小認知コストでの知識検索が可能
 初心者：状況に適用可能な知識の見積りにコストが必要
- 関連する専門家-初心者研究
 - 専門家は物理の解法式をまとめて出す [Larkin 1979]
 - 専門家は短時間で正確に電子回路を再生 [Egan,Schwartz 1979]
 - チェス [de Groot 1965], プログラミング [Ehrlich,Soloway 1984] でも同様の結果

□問題解決

- 問題の解決法の類似性判断
 [Chi,Feltovich,Glaser 1981; Hardiman,Dufresne,Mestre 1989; Hinsley,Hayes,Simon 1977; Schoenhold,Hermann 1982]
 初心者：表層に注目（例：斜面を含む問題同士は似ている）
 専門家：構造・原理・概念に注目
- 解法式の検索
 初心者：与えられた問題の変数を含む方程式を1つ1つ検索・ワーキングメモリに高負荷
 専門家：問題のキューに基づいてチャンクを検索

□学習と推論における誤概念の役割

- 誤概念
 - 経験・観察と予測
 例：重いものは早く落ちる
 - 科学概念の学習を阻害 [Bransford et al. 1999]
 例：「地球は丸い」、パンケーキ型・頂点が平面の球を想像 [Vosniadou,Brewer 1992]
- 誤概念に関する研究
 - 誤概念の指摘 [Helm,Novak 1983; McDermott 1984; Mestre 1991; Novak 1987; Pfunf,Duit 1999]
 - 克服法 [Ambrose,Heron,Vokos,McDermott 1999; Brown,Clement 1989; McDermott,Shaffer 1992; Wosilait et al. 1998]
 - 問題解決における誤概念の役割 (?) は不明

2.2 The transfer of knowledge

- 転移
 - 学習した文脈外に知識を適用する・重要な学習目標
 - 問題解決能力は大抵類似する問題からの小転移の結果
 [Gick,Holyoak 1980; Hayes,Simon 1977; Reed,Dempster,Ettinger 1985; Reed,Ernst,Banerji 1974]
- 知識獲得・熟練 [Klahr,Carver 1988; Littlefield et al. 1988]
 - 暗記ではなく理解しての学習 [Bransford et al. 1988]
 - 以前の学習からの転移は大抵うまくいかない [Bransford et al. 1999]
 :学習中に関連知識は活性化しない、活性化したら転移を促進 [Singley,Anderson 1989]
- 文脈
 - 文脈と強く結びつけて学習すると異文脈への転移が減少
 [Bjork,Richardson-Klavhen 1989; Carraher 1986; Eich 1985; Lave 1988]
 例：数学→物理は転移できても物理→数学は転移できない [Bassok,Holyoak 1989]
 → 数学では一般的な知識、物理では文脈を伴って学ぶ
 例：速度 m/s の問題を給料\$/年の問題に転移できない [Bassok 1990]

2.3 Models of student knowledge and reasoning

- 生徒の推論 [diSessa 1988,1993; Minstrell 1992]
 - 一貫性・理解を欠く
 - 再構築・再組織化・再優先度付けの必要性
- p-prime (phenomenological primitives)[diSessa 1988,1993]
 - 初心者の直感は断片化、一貫性と系統性に欠ける
 例：オームの p-prime (強く押すほど速く進む⇐電圧が多いと電流が多い)

- facet [Minstrell 1993]
 - 生徒は文脈依存・一般的な知識片の両方から解を構築
 - facet に基づく教室での振舞いのフレームワーク
 - (1) facet という知識片で生徒は学習状況に臨む
 - (2) 適用される facet は生徒の知識・問題状況と両者の関連付けに依存
 - (3) 質問の解には最小数の facet が引き出される
 - (4) facet は特殊から一般に適用される
- p-prime と facet
 - p-prime は汎用的, facet は特殊
 - facet は生徒の推論を含む
 - facet は文脈依存の p-prime
 - 教育者の仕事は生徒の facet を解いて理解の織物を編むこと

3 Why Problem Posing?

- 熟達化・認知スキルの発達
 - 一般には与えられた問題の解決を通じて
 - : 専門家が構築した解決可能な良定義問題
 - : ストーリライン (文脈), オブジェクト・イベント (表層的特長), 概念を組み合わせ構築
 - : 作問は概念を適用可能な文脈を広く考慮する必要あり
 - 作問は問題解決より大変
- 科学研究における作問
 - 問題解決と同様に一般的
 - 先駆者の作問が研究を駆動, 問題解決と作問を繰り返す [Dunbar 2000]
 - 作問は知識の構築・再構成において重要, 概念理解において有効
- 数学教育における作問
 - 認知プロセス未解明, 研究例少
 - [Brown, Walter 1993; Leung, Silver 1997; Silver 1994; Silver, Cai 1996]
 - 作問は文脈-概念の相互作用
 - : 両者の関連の調査, 転移の改良に有効
 - : 生徒に facet に気付かせるのに有効
- 本研究における作問
 - 2つの実験において使用
 - : 初心者概念と問題文脈の結びつきの調査
 - 実験 1
 - : 構造化された問題状況を与える
 - 表層的特徴とストーリーライン
 - : 指定の原理で解ける質問の作成を行わせる
 - 実験 2
 - : 「概念シナリオ」を与える
 - 原理と概念を適用する方法と順序
 - : 概念シナリオに合う問題の作成を行わせる
 - 概念を与え, 問題との結びつきを検討

4 Experiment 1: Linking Principles to Problem Contexts

□被験者

- 学部生 (男 4 名)
 - 工学部の計算力学を履修済・同じ授業から・成績 B 以上
 - 実験参加に報酬あり
 - 被験者は以後 S1~S4 と表記

□課題

- 内容 (→ Table 1)
 - 問題状況を用意
 - : 物理オブジェクトの相互作用に関するストーリーライン
 - 指定の原理を使って解ける「教科書的な」作問を依頼
 - 問題状況 2 つ × 原理 2 つ = 4 ペア

- 被験者の文脈間概念適用の調査
 - 2つの状況・概念の調和／不調和ペア
 - :状況1は概念2と、状況2は概念1と調和
 - :不調和ペアは教科書では見かけない組み合わせ

□手続き

- 個人実験・60-70分
 - 各状況-概念のペアごとに10分間可能な限りの数の作問
 - 各ペアの作問後にインタビュー（解き方）
 - 全ペアの作問・インタビュー後に全体インタビュー
 - 作問するペアの順番は被験者ごとにランダム

□結果と考察

- 分析項目
 1. 要求水準を満たす作問を行ったか
 - :「調和」の効果の検証
 2. どのように解決可能な問題を作成したか
 - :インタビューのデータから被験者の理解を勘案して評価 v

□結果1

- 被験者の作問の評価
 - 物理専攻のPhD1名・院生1名による独立評価
 - 評価カテゴリ
 - (1) 作問数
 - (2) 解決可能な作問数
 - (3) 指定の概念で解決可能な作問数
 - (4) インタビューで被験者が指定の概念での解法を正しく説明した作問数
 - (5) 「教科書的」と判断された作問数
 - (6) 指定以上の作問
 - 相違点は評価者間の議論により修正
 - 問題文の文法的な問題は無視 (→ Table 4)
- 作問数 (カテゴリ1)
 - 1人あたり平均19.5 (10~26問)
 - 概念2に対する作問全総計43問 > 概念1 35問
 - 状況1 44問 > 状況2 34問
 - 調和ペア 45問 > 不調和ペア 33問
- 解決可能な作問 (カテゴリ2) の割合 83%
 - 概念2 91% > 概念1 74%
 - 状況1 89% > 状況2 76%
 - 調和ペア 87% > 不調和ペア 79%
- 指定された概念で解決可能な作問 (カテゴリ3) の割合 53%
 - 概念2 63% > 概念1 40%
 - 調和ペア 67% > 不調和ペア 33%
 - 予想通り、熟達・転移の知見と合致
- 「調和」への気付き
 - 4名中2名がインタビュー中で回答
 - :4つの作問課題の中で難しいものがあったか? に対して
- 解法の説明
 - 指定の概念で解決可能な作問 (カテゴリ3) 41問
 - そのうち解法を正しく説明 (カテゴリ4) 26問 (63%)
 - 初心者は解決可能でも原理を説明できないことがある [Chi et al. 1981; Hardiman et al. 1989]
- 教科書的な作問 (カテゴリ5) の割合 49%
 - 少ない
 - 明確な評価基準は設けていない
 - 解決不可能な問題, 指定以上の情報を含む問題があったためか? (問題文の文法的問題は無視して評価)
- 指定以上の作問 (カテゴリ6) の割合
 - 問題状況で与えられた情報以外の情報を加えた作問 26%
 - 状況2 34% > 状況1 15%
 - :摩擦に関する情報賦与が多い

□結果 2

- 被験者の概念知識の組織化・使用
 - インタビューデータからの分析
 - 先行研究の同様の結果
:初心者知識は断片化・関連付けに欠ける
- 事例
 - S2 の状況 1-概念 1 の作問
 1. 糸の張力を求めよ
 2. 大きい物体の加速度を求めよ
 3. 物体 1 と物体 2 の重さの比と加速度の関係を示せ
 4. 2 つの物質の重さが等しい時、加速度を求めよ
(指定の概念で解決可能・教科書的な問題・指定以上の情報を含まない)
 - S2 の解法説明・正解を述べつつ誤概念が含まれていた
- 直感 対 数学に基づく推論
 - 問題 1・解を mg と回答 (正解は $\frac{Mmg}{M+m}$)
 - 問題 4・被験者の解法式から算出される加速度は g
 - 自由落下と同じにはなりそうもないという直感
→ インタビュー中に矛盾に気付く
- 理解なしの推論
 - 誤概念だらけの説明あり
:等速運動中の物体を加速運動中とみなす 等
- 正しい推論の事例もあり

5 Experiment 2: Posing Problems from Concept Scenarios

- 実験 1
 - 文脈・原理を指定
 - 被験者の問題文脈と原理の結びつけに注目
- 実験 2
 - 原理のみを指定
 - 文脈は被験者が選択

□被験者

- 学部生 (男 3 名・女 1 名)
 - 実験参加に報酬あり
 - S5~S8 と表記

□課題

- 内容 (→ Table 5)
 - 概念シナリオを用意
:ある問題に適用する原理・その適用順序
 - 概念シナリオに合う「教科書的な」作問を依頼

□手続き

- 個人実験・60-70 分
 - 概念シナリオ 1 つごとに 15 分間可能な限りの数の作問
 - 各シナリオの作問後にインタビュー (概念シナリオとの合致)
 - 全シナリオの作問・インタビュー後に全体インタビュー

□結果と考察

- 分析項目
 1. 実験 1 と同様のカテゴリによる分析
 2. 作問された問題状況のタイプ分析
 3. インタビューの分析

□結果 1

- 被験者の作問の評価
 - 物理専攻の PhD1 名・院生 1 名による独立評価
 - 評価カテゴリ
 - (1) 作問数 (2) 解決可能な作問数 (3) 概念シナリオに合う作問数
 - (4) インタビューで被験者が概念シナリオとの合致を正しく説明した作問数
 - (5) 「教科書的」と判断された作問数 (6) 情報不足の作問
 - (→ Table 7)
- 作問数 (カテゴリ 1)
 - 1 人あたり 11.25 問 (7~16 問)
- 解決可能な作問 (カテゴリ 2) の割合
 - シナリオ 1・2 63% > シナリオ 3 29%
 - :シナリオ 3 は概念の組み合わせが多い
 - 実験 2 全体で 53% < 実験 1 83%
 - :状況が指定されない作問のほうが難しい
- シナリオに合う作問 (カテゴリ 3) の割合 47%
 - シナリオ 2 69% > シナリオ 1 38%, シナリオ 3 31%
 - :単純でも Newton の第二法則は難しい?
- シナリオとの合致の説明
 - シナリオと合致する作問 (カテゴリ 3) 21 問
 - そのうち合致を正しく説明 (カテゴリ 4) 15 問 (71%)
 - シナリオ 2 で 9 問/15 問, エネルギーの保存をまあまあ理解
- 教科書的な作問 (カテゴリ 5) の割合 44%
 - シナリオ 2 56% > シナリオ 1 50%, シナリオ 3 23%
- 情報不足の作問 (カテゴリ 6) の割合 33%
 - 課題の性質から予測通り
 - 指定以上の情報を含む作問は 1 問のみ

□結果 2

- 物理原理と問題文脈の関連付けの評価
 - 特徴の分析・適切かどうかの評価
- 概念シナリオ 1 から
 - 4 名中 3 名が典型的な文脈 (教科書や講義によく登場)
 - :滑車を通して繋がった 2 つの物体, エレベータ, 車の牽引 等
 - シナリオに合致しない作問あり
 - :加速度でなく張力を求める 等
 - 頻出でない文脈の作問あり
 - :衝突の問題, ただし解決不可能でシナリオに合致しない
- 概念シナリオ 2・3 から
 - 重力が関係する文脈
 - S5 のみバネの問題を作成, ただし情報不足

↓

総括: 初心者は概念を狭い文脈としか関連付けない (転移の先行研究と合致)
- 概念シナリオ 3 から
 - 被験者が受講した講義で使われた文脈 (衝突)
 - 概念は特定の問題文脈をトリガーする

□結果 3

- 被験者の推論の分析
 - インタビューデータからの分析
 - シナリオ 2 はわりと理解, シナリオ 1・3 は理解のレベルが低い
- 手続き的知識が不十分
 - 適切な作問をするも, 原理適用方法の説明が不十分

- 表層的・深層的な概念理解
 - 概念シナリオと合致しない作問
 - 初心者は表層的な情報を利用 [Chi et al. 1981]
- 概念シナリオとの全体的／断片的合致
 - 被験者の合致の説明は概念が断片的

General Discussion and Instructional Implications

□認知的調査ツールとしての作問

- 作問による調査・作問の有効性の確認
 - 柔軟な概念知識の適用（転移）
 - 知識の組織化と適用（熟達化の特徴たる宣言的・手続き的知識）
- 被験者の推論の理解
 - 自分で作った問題を適切に説明できないケースを確認
 - 作問だけからは判明できない知見
→ 作問だけでは多数の生徒の評価は無理
- 作問による解明
 - (a) 熟達化
:宣言的知識使用と断片化・一貫性
 - (b) 知識の転移
:概念と問題文脈の結びつけ
 - (c) 生徒の使う推論
:問題は知識不足／不完全な知識／知識適用／手続き的知識？

□作問による知識・問題解決スキルの調査

- 熟達化・問題解決研究と一貫した結果
 - 高パフォーマンスの初心者は多くの宣言的知識を示した
 - 使用されない概念知識があった
:例・バネ、講義で登場
- 高度な認知スキル能力の不足
 - 例・概念と問題状況の結びつけ
:実験 1・調和の操作の影響
 - 関連研究でも同様の結果 [Touger et al. 1995]
- 手続き的知識の適用の困難さ
 - インタビューでの説明において不適切

□作問による転移の学習

- 転移の要素
 - 初期学習・学習した文脈・先行学習
 - 初心者の知識は柔軟な転移が可能なレベルではない
:実験 1・調和の検討
:実験 2・被験者の出した問題文脈
- 先行学習の役割
 - 直感と科学的概念との矛盾
 - 多くの誤概念を示しながらも解決可能な作問に成功

□作問による生徒の推論の学習

- 生徒の概念の断片化
 - [duSessa 1988,1993; Minstrell 1992] を支持する結果

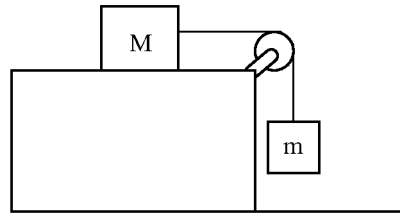
□教育への示唆

- 正しい概念理解
 - 誤概念からの出発・再構築 [Clement 1993; duSessa 1993; Minstrell 1992]
- 概念理解の診断ツールとしての作問
 - 例・協調での作問課題、クラス全体での出題と議論

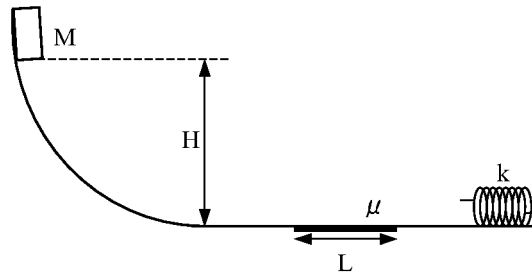
Table 1: 問題状況と指定の原理, 被験者への教示

□問題状況

- 滑らかな水平面上にある物体Mが、2つ目の物質mと軽い糸で、軽く摩擦のない滑車を通じて繋がれている。今、この糸が静止状態からゆっくりと放された。



- 右図のように、滑らかな局面上の高さHにある物質Mが、静止状態からゆっくりと放された。水平面には、長さがL、摩擦係数が μ の荒い面の区間がある。終端には係数kのバネが壁に繋がっている。



□指定の原理

- Newton の第二法則: $\vec{F}_{net} = M\vec{a}$
- 仕事-エネルギーの関係式, または力学エネルギーの保存

□被験者への教示

この実験は1時間かかります。ここでは、物理の問題の作問を行っていただきます。問題状況と物理概念が指定されますので、その状況を使い、選択した概念を適用して解ける問題を作ってください。問題を解く必要はありません。物理学の教科書に載っている問題のような問題を作ってください。その後、実験についての質問をします。

4つの異なる問題を作成します。1つにつき10分以内に、できるだけ多くの「教科書的な」問題を作成して下さい。

不明瞭なことがあれば、実験者に質問して下さい。

Table 5: 概念シナリオと被験者への教示

□概念シナリオ1:

Newton の第二法則 (例えば $F = Ma$) を物体の加速度を求めるのに適用する

□概念シナリオ2:

力学エネルギーが保存され、位置エネルギーが減少し、運動エネルギーが増加する。

□概念シナリオ3:

力学エネルギーが保存され、運動量の保存、位置エネルギーが増加して運動エネルギーが減少する力学エネルギーの保存と続く。

□被験者への教示

この実験は1時間かかります。ここでは、物理の問題の作問を行っていただきます。概念シナリオ (ある問題に適用する概念系列とその適用順序) を示しますので、その概念シナリオに合う、教科書的な問題を作ってください。問題を解く必要はありません。物理学の教科書に載っている問題のような問題を作ってください。その後、実験についての質問をします。

3つの異なる概念シナリオを作成します。1つにつき15分以内に、できるだけ多くの「教科書的な」問題を作成して下さい。

不明瞭なことがあれば、実験者に質問して下さい。

Table 4: 作問の評価・実験 1

カテゴリ	状況 1-概念 2 (調和)	状況 1-概念 1 (不調和)	状況 2-概念 2 (不調和)	状況 2-概念 1 (調和)	計
S1					
(1)	3	2	2	3	10
(2)	3	2	1	3	9
(3)	3	2	1	3	9
(4)	3	2	0	3	8
(5)	1	1	0	0	2
(6)	2	1	1	1	5
S2					
(1)	5	4	8	6	23
(2)	5	3	6	5	19
(3)	5	3	1	5	14
(4)	0	3	1	4	8
(5)	5	3	6	5	19
(6)	0	0	0	0	0
S3					
(1)	6	4	3	6	19
(2)	1	2	2	6	11
(3)	0	0	0	6	6
(4)	0	0	0	1	1
(5)	0	0	0	2	2
(6)	1	1	2	2	6
S4					
(1)	4	6	4	12	26
(2)	4	6	4	12	26
(3)	3	3	1	5	12
(4)	0	3	1	5	9
(5)	3	5	1	6	15
(6)	0	0	3	6	9
全被験者					
(1)	18	16	17	27	78
(2)	13	13	13	26	65
(3)	11	8	3	19	41
(4)	3	8	2	13	26
(5)	9	9	7	13	38
(6)	3	2	6	9	20

Table 7: 作問の評価・実験 2

カテゴリ	シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3	計
S5				
(1)	3	4	3	10
(2)	3	2	0	5
(3)	2	2	0	4
(4)	1	1	0	2
(5)	3	0	0	3
(6)	0	2	3	5
S6				
(1)	2	2	3	7
(2)	2	2	1	5
(3)	2	2	0	4
(4)	2	2	0	4
(5)	2	2	0	4
(6)	0	0	2	2
S7				
(1)	7	5	4	16
(2)	1	5	3	9
(3)	1	4	3	8
(4)	0	3	2	5
(5)	0	5	3	8
(6)	3	0	0	3
S8				
(1)	4	5	3	12
(2)	4	1	0	5
(3)	1	3	1	5
(4)	1	3	0	4
(5)	3	2	0	5
(6)	0	3	2	5
全被験者				
(1)	16	16	13	45
(2)	10	10	4	24
(3)	6	11	4	21
(4)	4	9	2	15
(5)	8	9	3	20
(6)	3	5	7	15