

How Fading Worked Solution Steps Works – A Cognitive Load Perspective

Alexander Renkl, Robert K. Atkinson, and Cornelia S. Große

Introduction

Worked example・・・数学のような，よく構造化された領域において認知スキルの初期獲得に有効
近年の課題：例をベースとした初期学習から問題解決による学習への遷移

筆者らのアプローチ(Renkl et al., 2003)

- ・ 解法のステップの段階的な消去
 - スキル獲得の促進を確認
- どのようなメカニズムが効果的なのかについてはまだ不明瞭

目的：解法の段階的な消去の効果の基礎となるメカニズムの同定

Cognitive load theory (以下，CLT)：Basic assumption

CLTの焦点：ワーキングメモリの制限に対し，どのような教授が効果的かを決定すること
学習に必要な負荷を減らすことが重要

Swellerらによる3つのタイプの負荷 (Sweller et al.,1998)

- ・ *Intrinsic load*
 - 学習者の先行知識に依存する負荷
 - 有用な情報のチャンク，ワーキングメモリを負荷無く使用できるか
学習のタスクにおいては，初心者には難しく，熟達者には簡単といったことがでてる
- ・ *Germane load*
 - 学習に直接関係するメンタルな活動
 - 例．Worked Example による学習の場合・・・Self Explanation
- ・ *Extraneous load*
 - 学習に直接関係しないメンタルな活動
 - 例．お互いに統合することの出来ないテキストと図

重要なこと：Extraneous load を減少させ，Germane load を促進するような方法の探索

Cognitive Load Theory: The worked example effect and its reversal

Worked Example・・・問題の公式，解法のステップ，最終解法を含む例

クラシカルな研究：Worked Example は問題解決，問題・例のペアによる学習よりも有効である

学習プロセスの初期段階における，事前知識の乏しい学習者の2つの流れ

- 領域，タスク固有の解法を適用できず，一般的な問題解決法をしなければならない
- Intrinsic load が高い

これらの流れの中では...一般的に手段・目的分析を使用

頭の中に色々な状態（現在の問題の状態，目標状態，状態間の差異など）を維持しなければならず高負荷

手段・目的分析は問題解決方略よりも有効であるけれども，直接理解の促進をするわけではない

これより

手段・目的分析：extraneous load に費やされ，germane load に使用される領域が少ない

Worked Example：理解のために必要な領域が残っている

例：CLT における重要な役割

問題解決：スキル獲得のより後半のフェーズにおいては有効

Kalyuga, Sweller ら(2001)

リレー回路とプログラミングを対象に異なる段階のスキル獲得の分析

- 初期段階：例による学習が優れるが，優位性は時間と共に消えて行く
- 学習者が領域の十分な経験を持つ：問題を解く方が優れる

これらの研究から，Sweller ら：*expertise reversal effect*

全ての認知負荷の効果についてはないが，その効果は学習者の先行知識と逆転性を持つ

初心者：できる限り負荷を少なく 熟達者：(初心者にとって)負荷がかかるようなものでも大丈夫

Kalyuga の考え

Expertise reversal effect のタイプ・・・redundancy effect

Redundancy effect・・・過剰な情報は学習を阻害（例．テキストと図に同じ情報がある）

過剰な情報の処理 = extraneous load であり，効果は無い

Worked Example による学習・・・熟達化すると，すでに学んだステップは過剰な情報になる

Structuring the transition from example study to problem solving

Expertise reversal effect, redundancy effect の背景に基づき例から問題解決への道を探る
道筋の例

- (1) 完全な例の提示
- (2) 解法のステップの一つが抜けた例の提示
- (3) 隠されるステップの増加
- (4) 完全な問題解決

このような流れ：段階的に問題解決に必要な要素が求められる

学習者は問題に応じて、効果的に負荷を割り振ることができ理解が促進される

これまでに用いられてきた、例・問題のペアの使用

例から問題への突然な切り替えが、徐々に消えていく場合と比較し高負荷な状況を生み出す

Fading procedure の検討

第一段階

現場による検討(Renkl et al. 2002)

ドイツの9年生，2つのクラスルームにおいて，Fading procedure と例・問題ペアの効果の検討

対象：物理（電気）

Fading 条件の方法

完全な例 解法の最後のステップの抜けた例 問題

結果

Near transfer において Fading 条件が有意に正確な解法を多く示したが，Far transfer には差はなし

第二段階

実験室による検討(Renkl et al. 2002)

アメリカの大学生において上記と同様の実験を実施

対象：確率

Fading 条件の方法

完全な例 解法の最初のステップが抜けた例 解法のうち2つのステップが抜けた例 問題

（第一段階は後ろから消えていたが，今回は前から消えていた）

結果

第一段階と同様に Near transfer で効果あり，Far transfer で効果なし

さらに，学習過程における間違いの少なさを確認

上記2つの実験において、前方から解法が消える場合（forward procedure）後方から解法が消える場合（backward procedure）の検討を行ったが、これらの間の比較はできないために、次の実験を慣行

第3段階（Renkl et al, 2002）

アメリカの大学生：3条件

条件：例・問題ペア，forward procedure，backward procedure

結果

fading 2条件（forward，backward）の比較

- 学習効果，間違いの総量に差はなし
 - backward条件において学習時間が有意に短かった（学習効果のなかった人を除く）
- backwardが有効であるという結論

fading 2条件と例・問題ペアとの比較

- fading条件はより間違いが少ない
- fading条件はnear transfer，far transfer共に良い結果が得られた
- 事後検定の結果far transferの効果は主としてbackwardの効果だった

これまでの結果：backwardが有効

Theoretical accounts of fading effects

Backward procedureのどの要因に効果があるのかはまだ不明

CLTの観点：十分な情報が与えられてから，学習へ

Backward procedure：学習の最後に問題が存在し，十分なステップの情報を得てから問題に行く

Backward procedureが効果的

しかし... 本当に重要な，どの位置が始めに消えるのかについては全体的に不明瞭

先行研究では，全く同様の問題で前から消すか後ろから消すかにしていたために，位置が効いていたのか，消えるステップが重要なのが分からなかった

どのステップが消えるのかが重要であることを示した研究（Jones and Fleischman,2001；Fleischman and Jones,2001）

CASCADEモデル...例と問題解決による学習の計算機モデル

- ・ インパスが中心的役割
 - インパスは学習者の理解が足りていないことにより生じる
 - インパスは生産的な学習のトリガと仮定

CASCADE モデルの仮定

- ・ 完全な例による学習・・・何度も例を読むことにより Self-Explanation を誘発
- ・ 問題解決による学習・・・Self-explanation による正確な学習の促進を問題解決中のエラーが制限
- ・ 一時的にインパスが生じる，ステップが消された例による学習...ステップに関する Self-explanation が生じ，インパスに打ち勝つ．
知識のチャンクの獲得促進

これより，ポジションが重要なのではなく，消されるステップのタイプが重要と仮定され，シミュレーションがその結果を支持．

これらをもとに考えると，2つの仮説が生じる

CLT の観点：Position が関係する(position hypothesis)

CASCADE の観点：ステップが関係する(specificity hypothesis)

以後，これらの観点を実験により検証する

Experiment1: Position hypothesis and specificity hypothesis

以下の2つの仮説の検証を行う

仮説1：ステップのポジションが効く(position hypothesis)

仮説2：特定のステップが聞く(specificity hypothesis)

Methods

Sample and design

被験者：アメリカの大学生 123 名

実験計画

3 要因 (内 2 要因被験者間，1 要因被験者内)

要因 1：“Faded Principle”・・・消えるルールが complementary rule か multiplication rule

要因 2：“Position” ...forward fading or backward fading (前から消える，後ろから消える)

要因 3：“Tested Principle” ...結果に complementary rule か multiplication rule のどちらが効くか

補足．確率の公式

complementary rule： $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$

例． $P(A)$ = サイコロ 1 個を振り 2 ができる確率， $P(\bar{A})$ ：サイコロを 1 個振って 2 以外が出る確率

multiplication rule： $P(A \cap B) = P(A)P(B | A)$

例．サイコロ 2 個を振る場合

$P(A)$ ：サイコロ 1 が 2 である確率

$P(B)$: サイコロ 2 が 4 である確率 .

$P(A \cap B)$: サイコロ 1 が 2 でかつ , サイコロ 2 が 4 である確率

Learning environment

コンピュータベースの学習環境(Renkl,2002)の一部を使用

問題の領域 : 確率

次の 2 つのアイテムを使用

(1) 3 つのステップからなる例

(2) 2 つのステップは提示され , 1 つは学習者が答えるように求められる例 (条件により 3 ステップの始めか最後)

例の提示法

(1) 完全な例の提示 : マウスでクリックしながらステップを追っていく

(2) 1 つのステップが欠けた例が提示され , 欠けている部分を回答するように求められる
解答のログを取り , 正確な解法がシステムから提示される

問題の例

シャツを作っている会社があります . 作成工程において , 裁縫の間違いが 10% , 色の間違いが 20%それぞれ独立に起こります . 今 , ランダムにシャツを 1 枚取ってきて , それがよい製品である確率は ?

解き方の例 (multiplication rule, addition rule, complementary rule の順で解く場合)

ステップ 1 : 裁縫かつ色が正しくない製品の確率 $= 0.1 * 0.05 = 0.005$

ステップ 2 : 取ってきた製品が正しくない確率 $= 0.1 + 0.05 - 0.005 = 0.145$

ステップ 3 : 良製品の確率 : $= 1 - 0.145 = 0.855$

答え : 8 割 5 分 5 厘

補足

Addition rule : $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$

complementary rule が始めに消える条件 , multiplication rule が最後に消える条件においては , 表面的な特徴 (数字 , オブジェクト) が同一で , 同様の公式を使用する問題を使用

解き方の流れが complementary rule, addition rule, multiplication rule になる
(問題例はなし)

Pretest and post-test

プレテスト

相対的に簡単な確率の問題を使用

問題例．サイコロを振ったときに，2 または 4 が出る確率は？

満点 9 点：ただし，9 で割って 0 ~ 1 に正規化

学習効果

3 タイプの問題：簡単なもの，複雑なもの，学習者が構築するもの

簡単なもの：1 ステップで解けるようなもの

複雑なもの：multiplication rule, complementary rule を適用し複数のステップで解けるもの

学習者が構築するもの：multiplication rule, complementary rule を適用するような問題を学習者が作成

得点基準

簡単なもの，複雑なもの：各 1 点

学習者が構築するもの：問題の質により，1/3, 1/2, 1 点

合計 3 点満点，3 で割って 0 ~ 1 に正規化

Procedure

実験室において個人実験，約 60 分

手続き

- (1) プレテスト
- (2) テキストによる確率の簡単な公式の紹介（確率の定義，上記の 3 つの公式）
- (3) 2 つの例の学習：条件間で操作が異なる
- (4) ポストテスト

Results

プレテスト

score	First step faded		Last step faded	
	Complementary Principle	Multiplication Principle	Complementary Principle	Multiplication Principle
	0.54(0.25)	0.60(0.22)	0.54(0.27)	0.52(0.22)

Faded Principle, Position の主効果，交互作用全てなし

先行知識に差はなし

学習時間

	First step faded		Last step faded	
	Complementary Principle	Multiplication Principle	Complementary Principle	Multiplication Principle
time	11.68(4.86)	9.07(2.74)	11.13(3.73)	8.84(3.14)

Position の主効果，交互作用なし

Faded Principle の主効果：Complementary Principle が消える学習者はより時間をかけていた

ポストテスト

70

ALEXANDER RENKL ET AL.

Table 1. Means and standard deviations (in brackets) of the post-test scores (complementary rule and multiplication rule) in the experimental conditions

	First step faded		Last step faded	
	Faded principle: Complementary	Faded principle: Multiplication	Faded principle: Complementary	Faded principle: Multiplication
Tested principle: Complementary	0.52 (0.28)	0.50 (0.27)	0.56 (0.31)	0.34 (0.21)
Tested principle: Multiplication	0.25 (0.30)	0.43 (0.28)	0.40 (0.33)	0.30 (0.26)

仮説 1 : Position 仮説 = “ Position ” の主効果

“ Position ” の主効果は認められず，Position 仮説は確認されず

仮説 2 : specificity 仮説 = “ Faded Principle ” と “ Tested Principle ” の交互作用

“ Faded Principle ” と “ Tested Principle ” の交互作用が認められた

条件により効果に差

- Complementary の問題・・・Complementary が消えた条件の方が高い
- Multiplication の問題・・・Multiplication が消えた条件の方が高い

“ Faded Principle ” の主効果，“ Position ” と “ Tested Principle ” の交互作用なし

確率の公式は，異なる問題には適応し難い

“ Position ” と “ Faded Principle ” の交互作用

Multiplication-rule が最初に消えた条件と，Complementary-rule が最後に消えた条件の結果が良かった = このことは，位置ではなく，解法の流れが結果に関係してくることを示す

Discussion

CLT に基づいた Position 仮説：確認されず

CASCADE モデルに基づいた specificity 仮説：確認

CASCADE モデルの仮定：ステップの消滅がインパスを導きそこから，self-explanation が導かれる (impasse-triggered learning events)

実験 1 ではこのことを確かめられる実験デザインではなかったために，実験 2 へ

Experiment2: Impasse-triggered learning events

実験 2：より直接的な分析：プロトコル分析

以下の仮説を検証

(1) backward fading の効果の検討

間違いの数，Near transfer，Far transfer による検討

(2) 例・問題ペアは，Fading と比較し，インパスが増加

学習者に対する要求の増加

(3) Fading 条件は，より生産的であり，非生産的な impasse-triggered learning events が少ない

Methods

Renkl(2002)の実験 2，3 と同様の手続きを取る

Sample and design

被験者

アメリカの大学生 50 名

条件

“ Backward Fading ” 対 “ Example-Problem Pairs ” 各 25 名

技術的問題から 1 名を分析から除外

素材...実験的に操作

両条件ともに，2 セットの確率の問題を解く

それぞれのセットは，同様の問題構造を持つが表面的な特徴が異なるもの

同様の公式を使用するが，カバーストーリー，使用されている数字が異なる

Fading Group

始めのタスク：完全な Worked Example

2 つめのタスク：解法のステップの 1 つ除かれたもの

3 つめのタスク：解法のステップの 2 つが除かれたもの

4 つめのタスク：完全な問題解決型（解法のステップは存在せず，自分で解く問題）

Example-problem group

始めのタスク：完全な Worked Example

2 つめのタスク：完全な問題解決型

3 つめのタスク：完全な Worked Example

4 つめのタスク：完全な問題解決型

両条件の例ともに，1 2 のステップがあり，1 2 が省略された例であった

Learning environment

Renkl(2002)の実験 2 , 3 と同様のコンピュータベースの学習環境

対象領域：確率

例 / 問題の提示法：実験 1 と同様

Pretest and post-test

プレテスト

実験 1 と同様の問題，同様の得点方法

9 点満点，0 ~ 1 に正規化

ポストテスト

Near transfer , Far transfer の問題が各 6 問

Near transfer : 学習フェーズと同様の解法，同様の表面構造を持つ問題 .

Far transfer : 問題構造，表面構造共に異なる問題

得点方法

全ての問題は 3 ステップで解ける問題であることから，正確なステップに各 1 点の 1 8 点満点

Pretest と同様に 0 ~ 1 に正規化

Procedure

約 7 5 分の個人実験

1 5 秒以上の沈黙で実験者が “ 話続けて下さい ” と発話を促す

(1) プレテスト

(2) 学習フェーズ (“ Backward Fading ” 対 “ Example-Problem Pairs ”)

(3) ポストテスト

Analysis of example processing/thinking aloud data

例の処理という観点から，Renkl(1997)に従い以下のような7つのカテゴリに分類

- (1) Impasse
理解に苦しんでいるのを示す発話
例．このステップ理解できない…
- (2) Principle-based explanations
確率の公式に関する発話
例．これ multiplication rule を使うんだ…
- (3) Subgoals
サブゴールに関する発話
例．このステップでは，色のエラーがわかれば次のやつが解ける…
- (4) Goal-operator combinations
ゴールとオペレータに関する発話
例．この確率は，この掛け算で求められる…
- (5) Anticipative reasoning
次のステップに関する発話
例．欠陥のあるシャツの割合は $1 / 50$ だ (これは次のステップ)
- (6) Elaboration of problem situation
問題状況に関する発話
例．一個ボールを取ると，全体のボールの個数は一個減る
- (7) Noticing coherence
一貫性に関する発話
例．これってさっきの問題と同様…

先行研究 (例．Renkl,1997) と比較し，上記 (2) ~ (7) の発話は非常に少なかった ((2) ~ (7) の順で平均 0.06 , 0.43 , 0.02 , 0.84 , 1.96 , 0.10) ために全体で統合 self-explanation として統合

また，上記のようなより深い処理を捕えることが目標だったが…非常に少ない発話だったために，Hausmann and Chi (2002) に基づき次のような表面的な処理のカテゴリを追加 これらのスコアを superficial processing として統合

- (8) Re-Reading
問題や解法のステップの繰り返し
- (9) Paraphrasing
問題や解法のステップを公式から (少し) 変化して繰り返す
- (10) Mechanical calculation rules
“ここは掛け算”，“始めにこれを足して”といった機械的な発話
- (11) Solution of a step
解法のステップの数字を単に述べたもの

2人の評定者により分類，一致係数=0.69．相異点については話し合いにおいてカテゴリを選択

Results

Pre-analysis

プレテスト，学習時間において，条件間に差は認められなかった

Learning outcomes and error rates

76

ALEXANDER RENKL ET AL.

Table 2. Means and standard deviations (in brackets) of the pretest, the learning time, the near transfer performance, the far transfer performance, errors during learning, and the impasse-triggered learning events in the experimental conditions

	Fading	Example-problem pairs
Pretest	0.47 (0.20)	0.56 (0.31)
Learning time	31.52 (7.26)	30.28 (11.27)
Near transfer	0.48 (0.35)	0.40 (0.33)
Far transfer	0.37 (0.22)	0.27 (0.26)
Errors during learning	0.36 (0.25)	0.57 (0.29)
Impasse followed by self-explanations	0.56 (1.08)	0.29 (0.62)
Impasse followed by superficial processing	3.84 (3.54)	3.54 (3.23)
Impasse: "Ignored"	1.36 (1.29)	2.25 (1.59)

Near transfer , Far transfer において , Fading 条件が有意に成績が高い

Near transfer : $F(1,47)=4.55, p = 0.038$

Far transfer : $F(1,47)=9.22, p = 0.004$

また , Fading 条件は有意に間違いが少ない

Errors during learning : $F(1,48)=7.42, p = 0.009$

これらの結果

Renkl et al(2002)と同様の結果であり , Fading の効果の確認

Impasse

仮説：例・問題条件は例から問題に移ったときにインパスが強固に向上

FADING WORKED STEPS

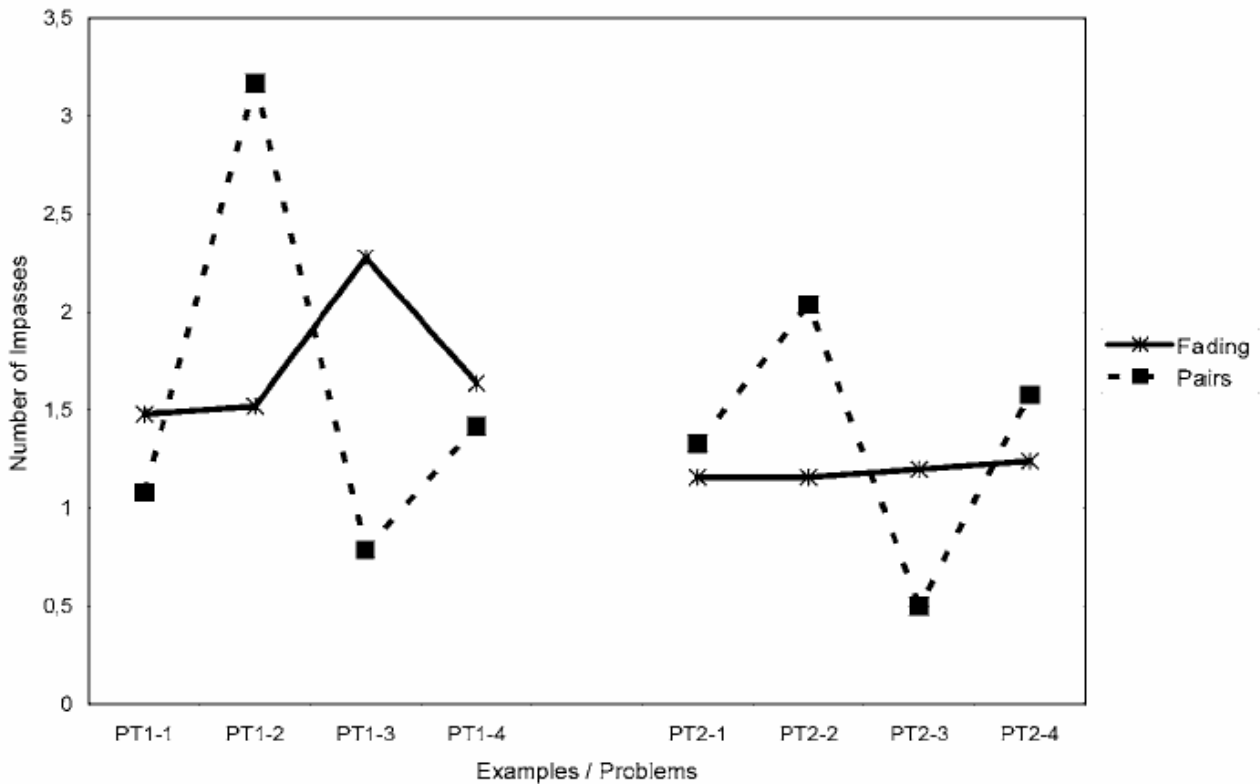


Figure 1. Impasses as a function of faded step.

補足 .

問題のタイプ / タスク

PT1-1 ~ PT1-4

Fading 条件

PT1-1 : 完全な Worked Example

PT1-2 : 解法のステップの 1 つ除かれたもの

PT1-3 : 解法のステップの 2 つが除かれたもの

PT1-4 : 完全な問題解決型 (解法のステップは存在せず , 自分で解く問題)

例・問題解決条件

PT1-1 : 完全な Worked Example

PT1-2 : 完全な問題解決問題

PT1-3 : 完全な Worked Example

PT1-4 : 完全な問題解決問題

例・問題条件

完全な Worked Example と完全な問題解決問題の間にインパスの数に有意差が認められた。

($t(23) = 4.84, p < .001$)

仮説から，Fading 条件はインパスの数のスムーズな向上が期待

PT1-1 から PT1-2 へは微増 PT1-2 から PT1-3 へは鋭い向上．これはステップの消え方による結果

条件間の違いを調べるために分散分析を行った結果

インパスの数：条件間に差はなし ($F < 1$)

ポジションの主効果 ($F(3,45) = 4.41, p < 0.008$)，条件とポジション間の交互作用が認められる ($F(3,45) = 7.87, p < .001$)

条件により，インパスのパターンが異なる = 仮説を確認

Impasse-triggered learning events

インパスの数について条件間に差は認められなかったが詳細をしてみる

先に述べたように Fading 条件はより生産的なプロセスが期待される

Impasse-triggered learning events の結果

- ・ Self-explanations：条件間に差はなし
- ・ Superficial processing：条件間に差はなし
- ・ Ignored：条件間に差が認められる

また，Ignored impasse と Near transfer，Far transfer との相関を見ると，双方に負の相関が認められる (Near transfer： $r = -0.35, p < 0.013$ ，Far transfer： $r = -0.36, p < 0.012$)

Ignored impasse は学習に不利益

これらの結果から

Fading が生産的でより impasse-triggered learning events が少ないという仮説は，非生産的な学習イベントのみで確認された。

Discussion

実験結果から

backward fading の効果：Near transfer，Far transfer，エラー数の違い

例の処理という観点からの分析

- ・ Fading 条件は例・問題条件と同程度の処理
- ・ しかし，例・問題条件は例から問題への急激な変化がエラー率を増大させる

インパスの後に何が起きているのかを見てみると

例・問題条件はインパスの後に更なる処理は行われていない

このことが、学習効果を制限しており、この結果は CASCADE モデルから予測されるものであった

関連研究と比較し、非常に少ない self-explanation の割合

本研究の結果から Fading がより生産的な学習状況を増やすとはいえず、よりアクティブな self-explainer やよりアクティブなプロセスが必要となる条件における更なる検討が必要だろう

General discussion

最近の研究結果(Atkinson, Renkl, Merrill, in press)と同様に fading の効果を確認

CLT に基づいた仮説：ステップの位置が関係していることは確認されなかった

CASCADE モデルに基づく仮説：どの例が消えるのかが重要ということを確認

これらの結果は教育デザインの決定になにをもたらすのか？

(1) Worked Example はよく構造化された領域に適したものである

本研究の一般化は数学等の領域に限定されるだろう

(2) どのように例を消していくのか？ということではなく、領域に適した形でどのタイプのステップまたは、公式を消していくのかということを考えなければならない

CLT にどのような示唆を与えるか？

実験 1 の結果：fading の効果は単に redundant な情報の減少によるものではなく、特定の例の処理が効果的であることを示す

実験 2 の結果：例・問題条件は非生産的な学習環境を作り出し、これが過負荷を生むことの示唆

さらなる CLT の研究が必要ですね