

問題解決モデルの構築による解法外化を通じた Computational Thinking 促進効果の実験的検討

Experimental Investigation of the Effects of Solution Externalization through Construction of a Problem-Solving Model on Fostering Computational Thinking

小島一晃^{1*} 三輪和久²
Kazuaki Kojima¹ Kazuhisa Miwa²

¹ 帝京大学ラーニングテクノロジー開発室

¹ Learning Technology Laboratory, Teikyo University

² 名古屋大学大学院情報学研究科

² Graduate School of Informatics, Nagoya University

Abstract: Recent educational reserach has paid considerable attention to computational thinking (CT), thought processes involved in formulating problems and their solutions so that the solutions are represented in a form effectively carried out by an information-processing agent. This study proposes an approach to foster CT in curricula for general undergraduate students, in which students construct rule-based computational models of problem solving. We empirically investigated the effects of model construction externalizing a solution in problem-solving. Undergraduate students described knowledge required to solve a problem before/after they constructed models of the problem for a production system. The results indicate that model construction improved student knowledge externalization of the solution in terms of problem decomposition, one aspect of CT.

1 はじめに

近年の教育研究では、Computational Thinking (CT) に注目が集まっている。CT に唯一の明確な定義はないとされるが、「情報処理エージェントが効率的に実行可能な形式で解法が表現されるように、問題と解法を定義する思考過程 [1, 4, 17]」という説明で概ね了承されている。CT は情報分野の専門家に限らず、問題解決一般において誰にとっても重要という認識から、K-12 において CT を育成する教育の探求が広く進められている [4, 8, 17]。CT はプログラミングの副次効果として観察されてきたため [10]、このような教育では主に、初学者向けの平易なビジュアルプログラミング環境などが用いられている [8]。

本研究では、一般大学生を対象とする CT 促進の手法を提案する。CT の用語を提唱した Jeannette M. Wing は、「計算機科学者のように考える」ことを大学初年次に教えることを提言している。そこで、認知科学の領域で人間の認知過程の理解に使用されてきた、ルール

ベースの計算機モデルの構築を学習活動として採用する。モデル構築活動の教育利用は長く議論されてきており [5, 7]、CT の育成においてもモデル構築を採用した例がある [3]。ただし、この例では力学や生態学などの領域を対象としており、科学教育との相乗効果において CT を育成することを目標に掲げている。認知過程を対象としてモデルを構築することには、その過程に潜む暗黙的な仮定に対する気付きや、省察・メタモニタリングの活性化といった効果を持つという指摘がある [6, 14]。我々は先行研究において、認知過程を対象とするルールベースのモデル構築が持つ、いくつかの学習効果を確認している [11, 16]。これらのことから、認知過程、特に問題解決のモデル構築には、学習者が問題解決に対する理解を深め、さらに CT に関するスキルを改善することが期待されると考えられる。

問題解決をルールベースのモデルとして実装するためには、問題を解決する過程、すなわち解法を切り離しが可能な操作に分割し、それぞれの操作が適切に適用される条件を認識した上で、本質的でない情報を削ぎ落として計算機モデルで処理可能な操作として記述し、問題解決の実行手続きを明確にする必要がある。これ

*連絡先：帝京大学ラーニングテクノロジー開発室
栃木県宇都宮市豊郷台 1-1
E-mail: kojima@lt-lab.teikyo-u.ac.jp

ら問題の分割 (decomposition), パターン認識 (pattern recognition), 抽象化 (abstraction), 手続き化 (procedures) は, 多くの研究者が CT を構成する要素に挙げている (たとえば [2, 8, 13]). 我々はこれらのうち, 操作の適用条件の認識について, 問題解決のモデル構築を通じて精緻化が行われることを予備的に検討している [12]. 本研究では特に問題の分割に注目し, 問題解決モデルの構築によって解法を外化することが, CT を促進する効果を持つかを実験的に検討した.

2 方法

名古屋大学で開講された認知科学の授業において, 学生に問題解決のモデルを構築させた. ほとんどの学生はプログラミングの授業を受講した経験を持っていたが, 情報工学の専門的な訓練は受けていない.

2.1 手続きと材料

2回の授業において, 学生にモデルを構築させた. モデル構築の環境には, 先述の先行研究でも使用された DoCoPro[15] を用いた. DoCoPro は, 初学者用に開発されたプロダクションシステムである. 図 1 に, DoCoPro の画面を示す. 図の左のフレームにあるワーキングメモリに問題の表現を, 右のルールエディタに if-then 形式のルールを入力することでモデルを作成し, 上のコントローラでモデルに推論を実行させる. また, DoCoPro には教科書も備わっており, ブロックを組み立てる簡単な問題を例に, プロダクションシステムとモデル構築について学ぶことができる.



図 1: DoCoPro の画面の一部.

1 回目の授業では, 教員による座学解説と教科書の一部から, 学生にプロダクションシステムのルールにつ

いて学習させ, 実際に 1 つのルールを作成させた. その後, Monkey & Banana 問題の改変版である「Robot & Banana 問題」を学生に提示した. 図 2 に, Robot & Banana 問題の初期状態と目標状態を示す. 学生には事前テストとして, 初期状態から目標状態に到達させるためにロボットに与える知識を if-then ルールの形式で記述させた. その際, 図 2 とともに, 下記のような情報を与えた.

部屋の場所は, 水平方向の 3 箇所「窓側 (window), 中央 (center), 扉側 (door)」×垂直方向の 2 箇所「高い (high), 低い (low)」の 6 箇所に区切られています. 初期状態のロボットの場所は扉側の低い場所, 箱は窓側の低い場所, バナナの場所は中央の高い場所にあります. したがって, ワーキングメモリにおいて初期状態は (robot door low) (box window low) (banana center high) と表現できます.

ロボットにバナナを回収させるためには, ロボットをバナナと同じ場所に移動させます. ロボットは箱に乗ることで, 高い場所に移動することができます. ロボットは, 箱を移動させることもできます.

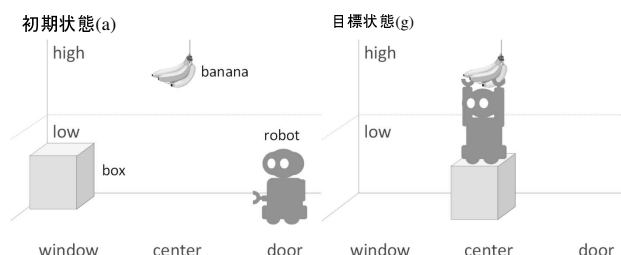


図 2: 初期状態と目標状態.

テストでは, 各ルールの条件と操作を紙に自然言語の文章で記述させた. また, 様々な状況に対応できるように, 一般的なルールを考えることを求めた. その後, 2 回目の授業までの 2 週間の間に, 各自で DoCoPro の教科書の学習を完了させるよう指示した.

2 回目の授業では, 学生に DoCoPro で Robot & Banana 問題のモデルを作成させた. その際, なるべく汎用的なルールを作成すること, ならびに, 順序をどのように変更しても適切に動作するモデルとすることを求めた. DoCoPro で作成される Robot & Banana 問題のモデルの例を, 付録 A に示した. その後, 事後テストとして再度ロボットに与える知識を記述させた.

2.2 分析

事前・事後テストにおける学生の回答は, いくつかの if-then ルールから成るモデルである. 分析では, 学生

のモデルに含まれる操作を評価した。Robot & Banana 問題を解く最良の操作系列は、下記の通りである。

ロボットが箱まで移動 ロボットの水平位置を箱と同値に更新

ロボットが箱を運ぶ ロボットと箱の水平位置をバナナと同値に更新

ロボットが箱に乗る ロボットの垂直位置を high に更新

ロボットがバナナを回収 終了

この評価では、どの操作がどのようにルールに配置されているかに基づき、下記7つの特徴のそれぞれを含むか否かをチェックした。

規範分割 4つの異なるルールに上記4つの操作が含まれるモデルである。なお、推論を終了するだけの機能的なルールを別途設けることは自然であるため、4つ目の操作を「バナナを回収」と「(推論を)終了」の2つに分割して異なるルールに含めた場合も、規範分割であるとみなした。

拡張操作 モデルを適切に拡張できる操作を含むモデルである。具体的には、「ロボットが箱から降りる」と「ロボットが (low にある) バナナに移動する」のいずれか、あるいは両方を含む。

余剰分割 抽出すべきでない操作を含むモデルである。具体的には、「ロボットが箱を持つ」と「ロボットが箱を置く」のいずれか、あるいは両方を含む。これらは必ず「ロボットが箱を運ぶ」の前後に付随して実行される操作であるため、切り離して独立させることは適切でない。

操作欠落 最良の操作系列に含まれる1つ以上の操作が欠落したモデルである。

不良統合 最良の操作系列に含まれる1つ以上の操作に、異なる操作を組み合わせたルールを含むモデルである。この特徴を持つモデルでは、たとえば「ロボットが箱を取りに行く」と「ロボットが箱をバナナの下に運ぶ」の2つの操作を持つようなルールがある。

不良分割 最良の操作系列に含まれる1つの操作が、複数のルールに重複して含まれるモデルである。たとえば、「ロボットが箱まで移動」を「(箱が window にある時) ロボットが window に移動」と「(箱が center にある時) ロボットが center に移動」に分割している。

非妥当操作 問題条件に違反した操作や、解釈できない操作を含むモデルである。違反の具体例のひとつは、箱が自分で移動し、ロボットが箱を箱ぶことなくバナナまで到達できるモデルであり、これは提示された問題の条件に合致しない。ほかの例として、目標状態を直接記述する操作だけが書かれたルールがあり、問題解決の過程を生成できないモデルもあった。

規範分割は、適切なモデル記述に成功したとみなすことができる。また、余剰分割、操作欠落、不良統合、不良分割、非妥当操作の5つは、パラメータを変更した初期状態から目標状態に到達できない可能性が生じるため、失敗と考えられる。

なお、上記7つの特徴は独立して評価されたが、規範分割と5つの失敗は排他的な関係にある。拡張操作は規範分割、5つの失敗のいずれとも共存可能で、5つの失敗も互いに共存可能である。学生の回答例を、付録Bに示した。

3 結果と考察

授業には90名の学生が参加したが、そのうち事前・事後テストと DoCoPro で作成したモデルの全てを提出した84名のデータを分析した。図3は、事前・事後テストそれぞれにおいて、7つの特徴のうちの各々を含む回答の割合を示している。図に示されるように、事前テストでは規範分割が少なく、余剰分割、操作欠落、不良統合、非妥当操作が多くなっている。一方事後テストでは規範分割が増加し、操作欠落と非妥当操作が減少している。

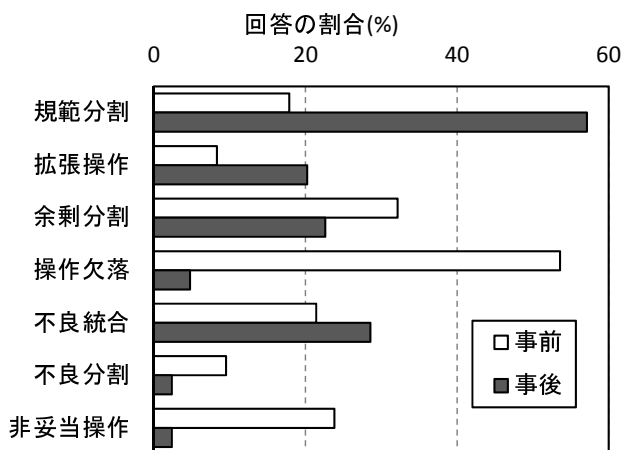


図3: 事前・事後テストにおける各特徴を持つ回答の割合。

χ^2 検定により各特徴を持つ・持たない回答の数を事前・事後テスト間で比較したところ、規範分割 ($\chi^2(1) =$

26.01, $p < .01$), 拡張操作 ($\chi^2(1) = 3.94, p < .05$), 操作欠落 ($\chi^2(1) = 46.10, p < .01$), 非妥当操作 ($\chi^2(1) = 15.12, p < .01$) で有意差が認められた. 余剰分割 ($\chi^2(1) = 1.47, n.s.$), 不良統合 ($\chi^2(1) = 0.79, n.s.$), 不良分割 ($\chi^2(1) = 2.66, n.s.$) では差が認められなかった.

図3が示すように, 事前テストでは解法が適切に分割されなかったり, 操作が欠落したり適切でないなど, 学生は Robot & Banana 問題の解決に必要な知識を適切に表現していなかった. そして, プロダクションシステムでのモデル構築を経験したことで, 事後テストでは適切な表現が増えた. このことから, 問題解決モデルの構築による解法の外化が問題の分割を改善すること, ひいては, CT を促進する効果を持つことが示唆される.

事前テストでは, 多くの学生の回答で操作欠落が観察された. 欠落していた操作の大半は終了 (ロボットがバナナを回収) や, ロボットが箱を運ぶ操作のうちロボットの水平位置更新が欠けたもの¹であった. これらのような操作は, 人間の問題解決においては暗黙的であると考えられる. しかし, モデルの構築においては, これらが欠けると推論が正しく行われなかったり, 推論がエラーで停止するなど, 誤りに対するフィードバックが得られる. このようなフィードバックが, 事後テストの回答を改善したものと考えられる.

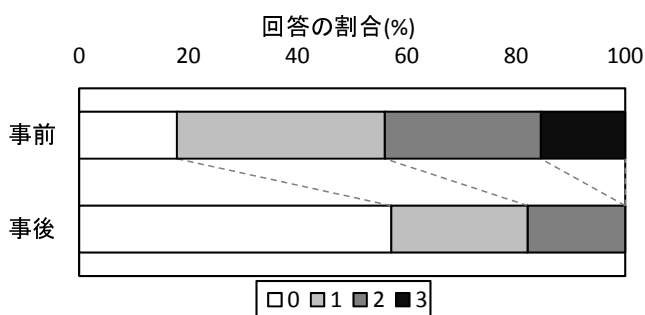


図4: 事前・事後テストにおける失敗の特徴数毎の回答の割合.

5つの失敗の特徴は互いに共存可能であるが, 1つの回答に含まれていた失敗の特徴の数は最大で3であった. 図4は, 事前・事後テストそれぞれにおける, 失敗の特徴数毎の回答の割合を示している. なお, 失敗が0であることは, 規範分割であることと同義である. 事前と比べて事後で0の回答が増えたことは, 図3において規範分割が増えたことと同じであるが, 各回答が持つ失敗の特徴数も全体的に減少している. 事前テストで失敗の特徴を1つ以上含む回答をした学生のうち,

¹テストの回答に使用された用紙には, ルールに if 節, then 節のほか, 名前を書く欄が設けられてた. ロボットが箱を運ぶことを示唆する名前が記述されているが, then 節に『箱がバナナの下にある』が成り立つ』というような情報のみが記述されたルールが, これに相当する.

73.9%は事後テストの回答における数が減少していた. この結果から, 事後テストで失敗の特徴を含む回答をしていても, 部分的には改善されていたことが読み取れる.

一方で, 余剰分割と不良統合に限ると, モデルの構築による改善が観察されなかった. 学生が DoCoPro で作成したモデルには, 初期状態から目標状態に到達できないなど, 必ずしも適切に構築されていないものが一定数見られた. DoCoPro でのモデル構築では, 学生に対する支援は特に行われていない. そのため, いわば学習活動として適切でないモデル構築活動が行われた可能性が考えられる. このことから, 学習活動として適切なモデル構築をガイドする支援の必要性が示唆される.

4 むすび

本研究では, 一般大学生を対象とする CT 促進の手法として, ルールベースの問題解決モデルの構築を学習活動として採用することを提案した. そして, 特に問題の分割に注目し, 問題解決モデルの構築によって解法を外化することが, CT を促進する効果を持つことを実験的に検討した. 本研究の重要な課題は, 問題解決モデルの構築が適切な学習活動となるような支援の設計・実現と, モデル構築を支援することが CT 促進の効果を高めるかを検討することである.

付録 A DoCoPro で作成されるモデルの例

```
name: move to box
if:
- (robot ?x low)
- (box ?y low)
- (banana ?z high)
- (*test-not-equal ?x ?y)
then:
- (*delete (robot ?x low))
- (*deposit (robot ?y low))

name: carry box
if:
- (robot ?x low)
- (?z ?x low)
- (banana ?y high)
- (*test-not-equal ?x ?y)
then:
- (*delete (robot ?x low))
```

```

- (*deposit (robot ?y low))
- (*delete (?z ?x low))
- (*deposit (?z ?y low))

name: ride on box
if:
- (robot ?x low)
- (box ?x low)
- (banana ?x high)
then:
- (*delete (robot ?x low))
- (*deposit (robot ?x high))

name: finish
if:
- (robot ?y ?z)
- (banana ?y ?z)
then:
- (*halt)

```

付録 B 学生の回答の例

規範分割と拡張操作の特徴を持つ回答

```

name: ロボットが動く
if:
  ロボットが  $x$  にいる
  箱が  $y$  にある
   $x \neq y$ 
then:
  ロボットは  $x$  から  $y$  に動く

name: 箱をロボットが動かす
if:
  箱が  $x$  にある
  ロボットが  $x$  にいる
  バナナが  $y$  の高い位置にある
   $x \neq y$ 
then:
  ロボットと箱は  $x$  から  $y$  へ動く

name: 登る
if:
  箱が  $x$  にある
  ロボットが  $x$  にいる
  バナナが  $x$  の高い位置にある
then:
  ロボットは  $x$  の高い位置へ動く

name: 降りる
if:
  ロボットが  $x$  の高い位置にいる

```

```

箱が  $x$  にある
バナナが  $y$  の高い位置にある
 $x \neq y$ 

```

```

then:
  ロボットは  $x$  の低い位置へ動く

```

```

name: 終了
if:
  ロボットが  $x$  の高い位置にある
  バナナが  $x$  の高い位置にある
  箱は  $x$  にある

```

```

then:
  推論終了

```

余剰分割, 不良統合の特徴を持つ回答

```

name: lift
if:
  ロボットがなにもつかんでいない
  box  $x$  が low 上にあつて
  box  $x$  上に何ものついていない

```

```

then:
  ロボットは box  $x$  の場所へ移動
  ロボットは box  $x$  をつかむ

```

```

name: put
if:
  ロボットが box  $x$  をつかんでいる

```

```

then:
  ロボットは banana と同じ水平方向に移動して
  ロボットは box  $x$  をおく

```

```

name: get
if:
  box  $x$  が banana と同じ水平位置にある

```

```

then:
  ロボットは box  $x$  の場所へ移動
  ロボットは box  $x$  に乗る
  ロボットは banana をつかむ

```

不良統合, 不良分割の特徴を持つ回答

```

name: box_window
if:
  box が window にある
then:
  windows に移動し, box を banana のところへ, box
  に乗る

```

```

name: box_center
if:
  box が center にある
then:
  center に移動し, box を banana のところへ, box

```

に乗る

name: box_door

if:

box が door にある

then:

door に移動し, box を banana のところへ, box
に乗る

name: On_box

if:

box に乗っている

then:

バナナを回収する

参考文献

- [1] Aho, A. V.: Computation and Computational Thinking. *The Computer Journal*, Vol. 55, No. 7, pp. 832–835 (2012)
- [2] Barr, V., Stephenson, C.: Bringing Computational Thinking to K-12: What is Involved and What is the Role of the Computer Science Education Community?, *ACM Inroads*, Vol. 2, No. 1, pp. 48–54 (2011)
- [3] Basu, S., Dickes, A. C., Kinnebrew, J. S., Sengupta, P., Biswas, G.: CTSiM: A Computational Thinking Environment for Learning Science through Simulation and Modeling. *Proceedings of 5th CSEDEU*, pp. 369–378 (2013)
- [4] Brennan, K., Resnick, M.: New Frameworks for Studying and Assessing the Development of Computational Thinking, *AERA Annual Meeting* (2012)
- [5] Clement, J.: Model Based Learning as a Key Research Area for Science Education, *International Journal of Science Education*, Vol. 22, No. 9, pp. 1041–1053 (2000)
- [6] Fum, D., Del Missier, F., Stocco, A.: The Cognitive Modeling of Human Behavior: Why a Model is (Sometimes) Better than 10,000 Words, *Cognitive Systems Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 135–142 (2007)
- [7] Gilbert, J. K.: Models and Modelling: Routes to more Authentic Science Education, *International Journal of Science and Mathematics Education*, Vol. 2, No. 2, pp. 115–130 (2004)
- [8] Grover, S., Pea, R.: Computational Thinking in K-12: A Review of the State of the Field. *Educational Researcher*, Vol. 42, No. 1, pp. 38–43 (2013)
- [9] Harrison, A. G., Treagust, D. F.: Modelling in Science Lessons: Are There Better Ways to Learn with Models, *School Science and Mathematics*, Vol. 98, No. 8, pp. 420–479 (1998)
- [10] Howland, K., Good, J., Nicholson, K.: Language-Based Support for Computational Thinking. *IEEE Symposium on VL/HCC 2009*, pp. 147–150 (2009)
- [11] 神崎奈奈, 三輪和久, 寺井仁, 小島一晃, 中池竜一, 森田純哉, 齋藤ひとみ: 認知モデル作成による認知情報処理の理解を促す大学授業の実践と評価, *人工知能学会論文誌*, Vol. 30, No. 3, pp. 536–546 (2015)
- [12] Kojima, K., Miwa, K.: Preliminary Study on Fostering Computational Thinking by Constructing a Cognitive Model, *Workshop Proceedings of 25th ICCE*, pp. 265–270 (2018)
- [13] Krauss, J., Prottzman, K.: *Computational Thinking and Coding for Every Student: The Teacher's Getting-Started Guide*, Corwin, CA (2017)
- [14] Miwa, K., Morita, J., Nakaike, R., Terai, H.: Learning through Intermediate Problems in Creating Cognitive Models, *Interactive Learning Environments*, Vol. 22, No. 3, pp. 326–350 (2014)
- [15] 中池竜一, 三輪和久, 森田純哉, 寺井仁: 認知科学の入門的授業に供する Web-based プロダクションシステムの開発, *人工知能学会論文誌*, Vol. 26, No. 5, pp. 536–546 (2011)
- [16] 齋藤ひとみ, 三輪和久, 神崎奈奈, 寺井仁, 中池竜一, 小島一晃, 森田純哉: 理論に基づく実験結果の解釈の支援 -認知科学の授業実践におけるモデル構築の効果に関する検討, *人工知能学会論文誌*, Vol. 30, No. 3, pp. 547–558 (2015)
- [17] Yadav, A., Mayfield, C., Zhou, N., Hambrusch, S., Korb, J. T.: Computational Thinking in Elementary and Secondary Teacher Education, *ACM Transactions on Computing Education*, Vol. 14, No. 1 (2014)