

敷き詰めパズルを用いたアンプラグド・プログラミング教材の開発

Development of Unplugged Programming Materials Using Paving Puzzles

右田 正夫
Masao MIGITA
滋賀大学教育学部

山際真知子
Machiko YAMAGIWA
滋賀大学教育学部附属小学校

柳 哲平
Teppei YANAGI
湖南市立水口小学校

<キーワード> 小学校プログラミング教育 アンプラグド・プログラミング 敷き詰めパズル 教材開発

はじめに

2020年度に小学校プログラミング教育が必修化されてから3年が経過し、全国で様々な実践が展開されている(文部科学省, 2020;室伏, 2022)。GIGA スクール構想によって整備された児童のタブレット端末で多様なプログラミング環境が利用できるようになり、コンピュータを用いてプログラミング学習を行う上での利便性は向上しているが、小学校プログラミング教育では特定のプログラミング言語の習熟よりも様々なプログラミング環境において有効な思考、いわゆる「プログラミング的思考」、の育成が重要視されていることもあり、タブレットやPCなどのコンピュータを使わない学習も数多く実施されている。コンピュータを用いたプログラミング学習では、必然的に端末の操作や特定のシステムを利用するスキルが求められるし、バッテリー切れや故障、ネットワーク障害などの問題も起こり得るため、小学校プログラミング教育を進める上で、コンピュータを用いないアンプラグドな学習には一定の存在意義が認められる。また、小学校ではプログラミング以外にも道徳や英語も必修化されたため、プログラミング学習を専門に行う時間の確保が難しいという問題もある。

したがって、様々な教科の授業でアンプラグド教材を用いてプログラミング的思考力の育成を行うことができれば、コンピュータを使用したプログラミング学習を行う上で有益であることはもちろん、教育現場の負担軽減にもつながることが期待できる。小学校でのアンプラグド・プログラミング学習については、『CS Unplugged (コンピュータを使わない情報教育)』(Bell et al., 2015) や『ルビィのぼうけん』(リウカス, 2016) など評判の文献もあるが、前述したような教育現場の状況からは、教科の学習内容に即した教材開発が望まれる(石塚ら, 2013)。そのため、筆者らは、2021年度から、算数科の学習内容にも対応付けられる敷き詰めパズルを用いたアンプラグド教材の開発を行っている。これまでに滋賀大学教育学部附属小学校第5学年と第4学年においてその教材を用いた授業実践を行った。本論文では、教材の概要、および、実践を通じて得られたアンプラグド・プログラミング学習を行うための基礎的な知見について報告する。

教材について

本研究において試作した教材は、合同な五角形を所定の枠内に敷き詰めるパズルである。合同な三角形や四角形による平面の敷き詰めは、算数の教科書で触れていることもあり、児童にとっても身近な問題と考えられる。また、滋賀大学教育学部附属小学校の構内の敷石は大小2種類の形から構成されており、技巧的な敷き詰めに関心を持つ児童も少なからずいるものと期待している(図1)。一般に、合同な五角形による平面の敷き詰めは、三角形や四角形によるものよりも困難な問題である。平面上にすき間なく並べることのできる凸五角形(全ての内角が 180° 未満の五角形)は15種類あることが知られているが(杉本, 2016; Zong, 2020), 本研究ではタイプ4と呼ばれる五角形を採用した(図2)。タイプ4は $C=E=90^\circ$, $a=e$, $c=d$ という条件を満たす五角形で、このタイプの五角形では、4個のピースから1つの六角形(向かい合う辺が平行で長さが等しい平行六辺



図1. 附属小学校構内の敷石。

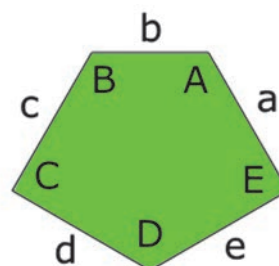


図2. パズルのピースとして使ったタイプ4の五角形。

形)を作り、それを並べることによって平面に敷き詰めることができる。エジプトのカイロ市の敷石にちなんで「カイロ五角形」とも呼ばれる。画家のエッシャーもカイロ五角形の敷き詰めをモチーフにした作品を残しているように、意匠的にも美しい敷き詰めが可能である(谷岡, 2010)。本研究では図2の五角形で $A=B=D=120^\circ$, $C=E=90^\circ$, $a=c=d=e=30\text{mm}$, $b \approx 22\text{mm}$ とした。

カイロ五角形をパズルのピースとして使用するにあたって、難易度の設定が問題となる。4個のピースから六角形を構成すればよいことを知らない人にとっては、平面の敷き詰めはそれほど容易ではない。大学生が10個ほどのピースを敷き詰める課題を10分以内に達成できないことも珍しくない。図形をすき間ができないように並べるには、ある点に集まる角の内角が合計 360° でなければならないが、本研究の使用した五角形のピースでは、その条件を満たすような角の組み合わせが多く、3個または4個のピースから構成されるすき間のない形状が必ずしも平面の敷き詰めにつながるとは限らない。図3には、そうした形状のうちの4種類を示している。これらのうち、(a)と(c)は平面の敷き詰めの一部になり得るが、(b)と(d)ではすぐに行き詰ってしまう。そのため、小学生のための教材とするには何らかの制限を設けて難易度を下げることが必要である。そこで、パズルを16ピースからなるものとした。その完成形の輪郭に沿って引かれた枠線の形を図4に示す。この枠線には図3(a)の形が4つ入るようになっているが、「4個1組」であると意識されることを意図して、4種の色を用いて各色4個ずつのピースを用意した。

ピースの作成においては、ベクター画像編集ソフトウェアのInkscapeを用いて2次元形状の設計を行い、3次元CADソフトウェアの123D Designで5mmの厚みをもたせて3次元データ化し、3DプリンタMUTOH MF-2200Dで出力した。パズルのピースは厚紙で作ることも可能だが、ある程度の厚みがないと隣のピースと重なりやすくなる。そのような心配をなくすため、3Dプリンタによって厚めのピースを作成することにした。

授業実践の方法

試作した教材を用いて、滋賀大学教育学部附属小学校の第5学年と第4学年の各1学級で授業実践を行った。

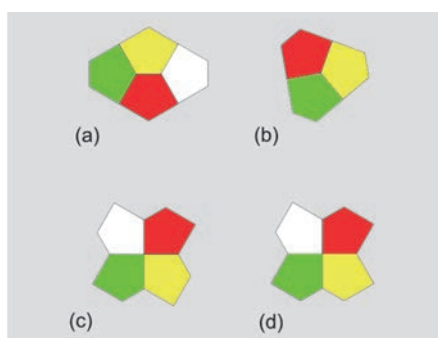


図3. 複数個のピースで構成される形状。

授業時間はどちらも45分で、3名または4名からなる9つのグループが、各々1つのパズルを完成させるものとした。パズル完成後、解法について振り返りを行った。

第5学年 2022年1月13日実施

教師は児童に「わくの中に16このピースをならべてみよう」という指示を行った。この指示については、同じ文言がパズルの台紙(枠線の印刷されたB4サイズの紙)にも印刷されている。また、開始から完成までの所要時間を計測するように、更には、完成までの過程で「どういう手順で考えたのか」について、ノートに書き留めるかタブレットで動画を撮影することで記録するように指示した。パズルの後、各グループが「問題を解くヒントになること」について発表した。

第4学年 2023年3月14日実施

教師からの指示は「できるだけ早くすき間なくしきつめよう」というものであった。完成までの所要時間は児童がタイマーで計測した。また、パズルの開始から完成までの過程を教員が動画で記録した。パズルの後の振り返りでは、解法について児童が気付いたことの共有を行った。また、後述するようにパズルの課題が早く終わったこともあり、振り返りの後、各グループでパズルのピースを使って作品を作る活動が行われた。

結果

パズルの敷き詰め方について

第5学年と第4学年の実践の結果、パズルに取り組んだ各グループの所要時間には、学年間で有意な差が見られた。両学年とも9グループのうち8グループの所要時間が記録できていたが、それらについて比較したところ、第5学年の所要時間は 322.8 ± 75.3 秒 ($n=8$)、第4学年の所要時間は 198.0 ± 102.3 秒 ($n=8$) で、第4学年の方が有意に短かった(Mann-Whitney's U-test, $P=0.0157$)。第5学年の算数科では多角形の角度について学習していることもあり、第5学年の児童は基本的に第4学年の児童よりも多角形に関して高度な知識をもっているはずであるが、なぜパズルを完成させるまでの所要時間が長くなるのか、児童が記録した動画からその理由を探ることにした。

図5の写真に見られるように、動画に記録されているのはパズルの状態と児童の手の動きであり、音声から

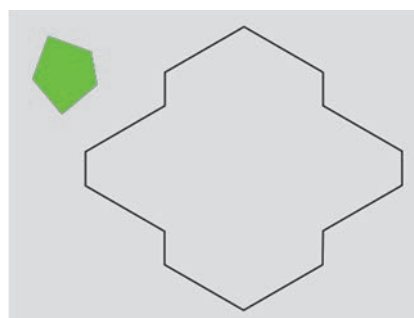
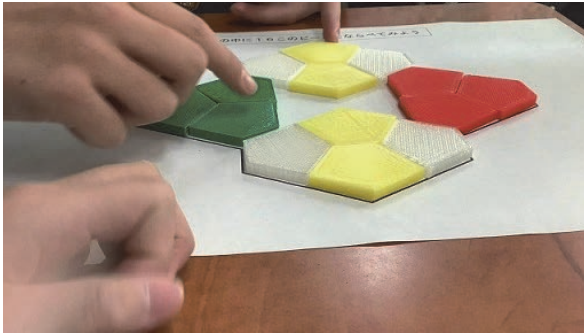


図4. パズルのピースと枠線。

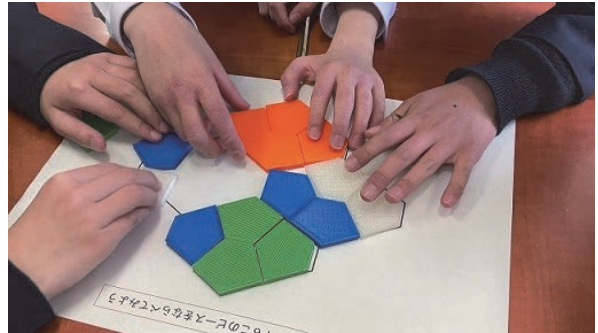
発話した個人を厳密に特定することは不可能であるため、分析においてはグループとしてどのようなことを考えていたかを推察するための手がかりとした。

図6に、334秒でパズルを完成させたグループの開始後から83秒までの経過を示した。開始後32秒までに、

4個のピースによって平行六辺形が作られている(図6(a))。その他のピースも正しく置かれており、ここまでは完成へと至る正しい手順を踏んでいると言える。ただし、「6個目に置かれた緑のピースの位置には(全体として左右対称になるように)赤いピースが置かれるべき



(a)



(b)

図5. パズルに取り組む様子。写真はそれぞれ第5学年(a)と第4学年(b)のグループで、本報告での分析の対象とした動画から切り出したものである。

	経過時間(秒)	パズルの状態	子供の発話と行為
(a)	32		発話:(6個目に緑のピースが置かれた後で)これ赤色もあるで 発話:どうでもいい
(b)	35		
(c)	37		
(d)	39		
(e)	59		
(f)	83		発話:無理や 発話:やり直す? 発話:やり直そか (一斉に手が伸び、並べたピースを崩す)

図6. 第5学年の児童によるパズルの過程。(a)のピース上に書かれた数字はそのピースが置かれた順番を示す。行為については括弧内に表記している。

だ」という主張にも聞こえる「これ赤色もあるで」という発話に対して、「どうでもいい」という応答があり、グループ内で方針が統一されていないことが窺える。その後、35 秒時点で置かれた緑のピースによって鋭角のすき間ができてしまい、そのままでは完成させることができなくなる (図 6 (b))。他の児童がもう一つの平行六辺形を完成させるが (図 6 (c, d)), 59 秒の時点で 3 個のピースからなる六角形 (図 3 (b) の形状) が作られ、その後 83 秒までに赤いピースによって同じ形状がもう

一つ作られ、中央の空いたスペースに残り 2 個のピースを置くのは不可能であることが全員によって認識された (図 6 (f))。白と黄色のピースで作られた上下 2 つの平行六辺形は残しておいても良かったのであるが、並べられたピースを全て取り除いて最初からやり直すことが選択された。パズルを最初からやり直す過程では、図 7 のような形状も試されているが、そこでは、「ここにはまらへん」という言葉に表れているように、ピースがはまらないスペース (鋭角のすき間) ができてしまった

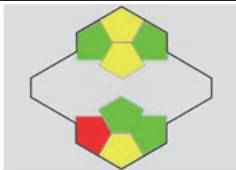
経過時間 (秒)	パズルの状態	子供の発話
173		発話：これはあかんなあ 発話：これ、どっちにしるいけへん 発話：ここにはまらへん

図 7. やり直しの過程で作られた形状。平行六辺形ではない形が試されるが、「ここにはまらへん」という発話に表されるように、ピースを置くことのできないスペースができてしまうことが確認されている。

	経過時間 (秒)	パズルの状態	子供の発話と行為
(a)	303		
(b)	311		発話：あ、ちょっといい？ここ、こうやってはめない？ (中央左側に白いピースを置く)
(c)	314		発話：あつ、あつ、あつ、あつ 発話：いけた、いけた
(d)	324		発話：(右側のすき間について) 入れない (その後、下側の赤いピースの向きが直される)
(e)	333		(間違っって置かれたピースの向きが直されることで作られたスペースに赤いピースが置かれる)
(f)	334		(最後の白いピースが置かれて完成)

図 8. 完成へと至る過程。中央部のスペースが 2 個の白いピースによって埋められた時点 (c) で「完成できる」という見通しを得られたことが窺える。

ことが認識されている。

最終的にパズルの完成へと至る過程を図 8 に示す。図 8 (a) の前の、開始後 270 秒を過ぎた頃から、上側の平行六辺形が作られ始めた。図 8 (a) に示した 303 秒の時点で、上下 2 つの平行六辺形が完成しているが、その時にはまだ、「4 個のピースからなるその形を 4 つ作ればよい」という認識までは全員で共有できていないように見える。しかし、中央の狭くなっている箇所白いピースを置けるということが発見される(図 8(b, c))。発話からは、その時の驚きや喜びが読み取れる。そして、残りのスペースが限定され、赤いピースは正しく置かれていく(間違った向きに置かれたピースもすぐに修正された)(図 8 (d, e))。最終的にパズルが完成したのは開始から 334 秒後で、第 5 学年の平均より若干長い時間を要していた(図 8 (f))。他のグループについては全過程を記録した動画がないため、このグループのように最初の状態に戻ってやり直すことを他のグループも複数回行っていただろうかとは不明である。しかし、時間をかけることで「上手いかない事例」の蓄積ができた可能性は高いと考えられる。このことのプログラミング学習における意味については後で論じたい。

第 4 学年の過程については、教師が撮影したグループの動画から、以下のようなことがわかった。

このグループの完成までの所要時間は 263 秒であり、第 4 学年の平均所要時間よりも 65 秒長かかっていた。開始後 209 秒までに平行六辺形が上下 2 つ完成しており、左側にも 1 個のピース(青色)の向きが間違っていることを除けば、概ね正しい方向に向かっているように見える(図 9 (a))。その後、231 秒時点で、1 人の

児童が、向きがおかしいことを指摘し、それを直すことによって「全部同じ形」に全員が気付いている(図 9(b))。その後、30 秒ほどかかってはいるが、4 個のピースを使ってどのような形を作ればよいか理解した上で完成に至ったことが見て取れる(図 9 (c))。

こうした観察から、本実践のパズルにおいては、上下 2 つ、あるいは上下どちらか 1 つ、の平行六辺形は比較的早い段階で作られやすいが、いくつの平行六辺形ができた時点で「全体が 4 つの平行六辺形できている」ということに気付くか(あるいはそのような仮説を立てるか)が、完成までの時間を左右するのではないかと考えられる。

振り返りについて

パズルの活動の後、パズルを完成させるために児童が気づいたことについての振り返りが行われた。表 1 の内容は教員が児童の発言をまとめたものと、グループ代表者の発表の動画(第 5 学年)や児童のノート(パズルの台紙に書かれたもの、第 4 学年)に基づいて構成した。どちらの学年でも、枠線に沿ってピースの位置と向きを決めやすい所から置いていくことや、4 個のピースから平行六辺形を作り、同じものを 4 つ作ることで完成させられることへの気づきがあったことがわかる。また、完成形が全体として左右対称であることが(おそらく、上下対称であることも)気付かれている。なお、第 4 学年の 1 人の児童が「あいている所がとてもするどくならないようにする」と、鋭角のスペースを作らないことがパズルを完成させるために重要であることを指摘していた。

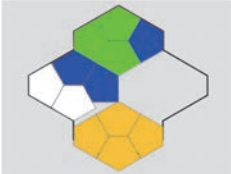
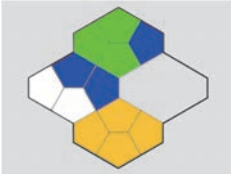
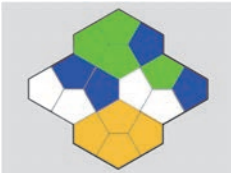
	経過時間(秒)	パズルの状態	子供の発話
(a)	209		(中央付近の青いピースの向きが違っており、そのため、オレンジ色のピースからなる平行六辺形が枠線からはみ出している)
(b)	231		発話：えーこれ変 発話：じゃあこれ、こう(中央の青いピースを置き直す) 発話：全部同じ形なんやな 発話：確かに
(c)	263		発話：いけてるやん

図 9. 第 4 学年の児童によるパズル完成前の過程。中央付近のピースが置き直されることで、平行六辺形を 4 つ作ればよいことが気付かれている。

表 1. 児童による振り返り。教師が児童の発言に基づいてまとめることによりクラス内で共有された。括弧内は筆者による補足。

第 5 学年	第 4 学年
<p>発表により共有されたこと</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全てのピースが同じ形をしている ・パズル全体は四つの形（平行六辺形）からできているため、その形を作ればよい ・端の形が決まっている（パズルの置き方を限定するような形をしている）ので、端から攻める（そうやって残りのピースの数を減らしていく） ・上下・左右の対象を使う 	<p>まとめとして板書で共有されたこと</p> <ul style="list-style-type: none"> ・左右対称に作る ・4 個一組の同じ形を作る ・同じ長さの辺を見つけて合わせる <p>児童のノート（抜粋）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・4人で同じ形を作って線に合うようにしきつめた. ・ピースと紙（枠線）で同じ形の所を合わせていく ・まわりのわくからしきつめる ・あいている所がとともするどくならないようにする ・一つずつ向きを回してしきつめる

おわりに

敷き詰めパズルをアンプラグド・プログラミング学習の教材として用いるためには、振り返りの際にパズルの攻略法をプログラミング的思考の観点から整理することが重要である。『ルビィのぼうけん』（リウカス、2016）では、「プログラマーらしい考え方」として

- パターンを見つける
- ループを使う

などのポイントが挙げられている。本研究において、パターンは4個のピースからなる平行六辺形、ループはそれを4回繰り返して作ることに相当する。これらのポイントを理解する上では、同様のコンセプトからなる複数のパズルを体験しておくことが望ましい。筆者らは、本研究で紹介したパズルの他にタイプ3の五角形（ガードナー、1981；杉本、2016；Zong, 2020）を使ったパズルも作成している（図 10）。タイプ3は図 10 (a)において $A=C=D=120^\circ$, $a=b$, $d=c+e$ によって定められる五角形で、3個のピースを組み合わせると正六角形が作れることによって平面の敷き詰めが可能である。図 10 (b)のパズルでは12個のピースを使うが、 $c \neq e$ ではピースに表裏の違いができるため、 c と e の値の設定によって難易度の調整が可能である（ $c=e$ とすると易しくなる）。このパズルをカイロ五角形のパズルと併用することで、パターンとループの考え方がより定着しやすくな

るものと期待される。例えば、学習グループをタイプ3のパズルとタイプ4のパズルに取り組むものに分け、各タイプについて得られた解法を比較検討して共通点を見出すという活動が考えられるだろう。

『ルビィのぼうけん』では「デバッグ」にも触れられている。「あるルールに従って行動したところ意図した結果が得られなかった」という場合には、そのルールを修正する「デバッグ」をしなければならない。本研究のパズルにおいては、ピースを置く際のルールが「2 辺の向きを合わせる」あるいは「3 辺の向きを合わせる」であるときに、図 6 (b)に見られたような鋭角のすき間ができてしまうことがある。実践において複数の児童が気付いていたように、辺の向きを合わせるだけでなく、「鋭角のすき間ができないようにルールを修正する」ことの重要性も振り返りにおいて共有されなければならない。その点、結果において紹介した第5学年のグループでは、鋭角のすき間を作ることを複数回繰り返すことで、少なくともグループ内では「デバッグ」への動機付けが共有されようとしていたのではないだろうか。

最後に、本研究では積極的に取り扱わなかった点であるが、本来、プログラミングの学習教材としては、特定の問題解決だけでなく、学習者が見つけた「パターン」を使って新たなものを生み出す創造的な活動へとつなげられることも重要であろう。「パターンを利用してより大きな作品を作る」、このことはパパート（1981）が著書『マインドストーム』の中で、プログラミングを通じ

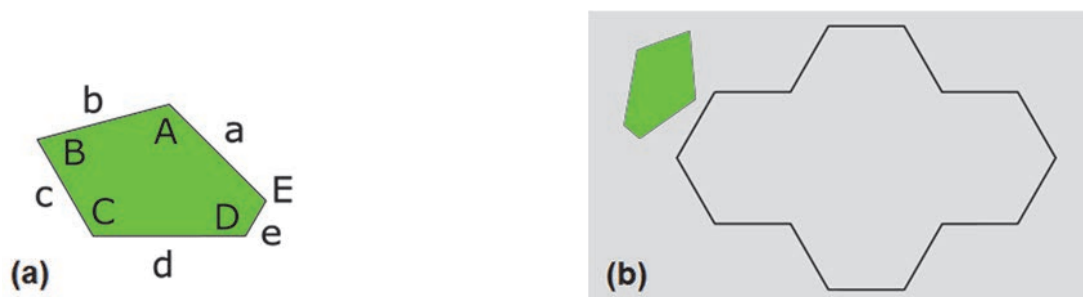


図 10. タイプ3の五角形(a)と、それをピースとした敷き詰めパズル(b)。12個のピースで枠線内を敷き詰めることができる。

た学びの可能性として特に強調していたことである。本研究においても、第4学年の実践の中で、パズルが終わった後の時間を利用して作った作品では、図3(b)のような平面の敷き詰めに使えないパターンも利用されていた。このような点に児童の創造性の一端が垣間見られ、教材開発において『パターン』を使った正解に囚われ過ぎることへの注意を促されたようにも感じた。

謝辞

本研究の一部は2021年度学長裁量経費「小学校プログラミング事業」の助成を受けて実施された。

参考文献

- T. Bell, I. H. Witten, and M. Fellows (2015) CS Unplugged, https://classic.csunplugged.org/documents/books/english/CSUnplugged_OS_2015_v3.1.pdf
- マーチン・ガードナー (一松信 訳) (1981) 数学ゲームⅢ, 日本経済新聞社.
- 石塚丈晴, 兼宗進, 堀田龍也 (2013) アンプラグドコンピュータサイエンスの学習活動と小学校教科書との対応, 情報処理学会論文誌, 54 (1), 24-32.
- リンダ・リウカス (鳥井雪 訳) (2016) ルビィのぼうけん こんにちは! プログラミング, 翔泳社.
- 文部科学省 (2020) 小学校プログラミング教育の手引 (第三版).
- 室伏春樹 (2022) 小学校プログラミング教育の現状分析と課題, 静岡大学教育実践総合センター紀要, 32, 119-126.
- シーモア・パパート (奥村貴世子 訳) (1982) マインドストーム 子ども, コンピューター, そして強力なアイデア, 未来社.
- 杉本晃久 (2016) 平面タイル張り可能な凸五角形, 数学セミナー, 55 (1), 44-48.
- 谷岡一郎 (2010) エッシャーとペンローズ・タイル, PHP 研究所.
- C. Zong (2020) Can you pave the plane with identical tiles?, *Notices of the American Mathematical Society*, 67 (5), 635-646.