

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00505

研究課題名(和文) ゲーム・パズルにおけるオンライン問題と計算複雑さ

研究課題名(英文) Online problems and complexity in games and puzzles

研究代表者

武永 康彦 (Takenaga, Yasuhiko)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：20236491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：オンライン性を持つ落ち物パズルゲームであるぷよぷよを1人ゲームとして扱い、その必勝性について研究を行った。必勝とは、プレイヤーが一定の高さ以上にピースを積み上げることなく、永久にプレイできることをいう。実際のゲームと同様の入力の見込みがある場合とない場合について、ピースの色数と盤面の幅、先読みのできる入力の個数をパラメータとして、プレイヤーが必勝あるいは必敗となる十分条件等を明らかにした。また、その証明手法が他の類似のパズルゲームに応用できることを示した。また、格子上のマッチ棒パズル、対戦型ゲームであるQUIXOについて、その必勝性判定のアルゴリズム、計算複雑さを示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we deal with a falling block puzzle game PuyoPuyo, which has online property, as a single-player game and consider the conditions so that the player can win, that is, the player can keep playing the game forever on the gameboard of a constant height. We have considered both the cases that the lookahead of inputs exists as in the real game and it does not exist. In both cases, we have shown sufficient conditions that the player wins and that the player loses using the number of game pieces, the width of the gameboard and the number of lookaheads as parameters. Also we have shown that the ideas of the proofs can be applied to the other similar games. Also, we have shown algorithms and complexity of the problems to decide if the matchstick puzzles on the grid has a solution and the problem to decide the winner of a two-player game QUIXO.

研究分野：アルゴリズムと計算量

キーワード：ゲーム・パズル アルゴリズム 必勝性 計算量

1. 研究開始当初の背景

ゲームの必勝性については、古くはニム等を初めとして、ある局面が先手必勝であるか後手必勝であるかの解析の研究が広く行われてきた。一方、計算量理論の立場からパズルやゲームの計算複雑さについての研究も行われてきた。パズルやゲームの計算複雑さについては、それらを任意のサイズの盤面でプレイできるように一般化したものについて、任意の局面からの必勝性判定問題の計算量を解明する研究が非常に盛んに行われている。

このような研究の多くでは、遊戯中に必要な全ての情報が与えられるものと考えている。しかし、実際にはあらかじめ全ての情報が与えられていない場合が数多く存在する。このような状況の問題をオンライン問題という。オンライン問題に対するオンラインアルゴリズムでは、その後のどのような場合にもなるべく良い結果を得ることを目指す。オンラインアルゴリズムの研究は盛んに行われているが、ゲーム・パズルに対するアルゴリズムの理論的解析は、テトリスに対する研究などごくわずかしか行われていない。そのため、本研究では、ゲーム・パズルの計算量や戦略、必勝性について、オンライン問題として定式化できるゲームを主な研究対象として扱う。

ゲームの研究においてその有効な戦略を明らかにすることは極めて重要であり、強いコンピュータプレイヤーを作る研究は種々のゲームに対して数多く行われている。一方、必勝性を解析する組合せゲームの理論の研究も行われているが、実際に遊ばれている多くのゲームのようにある程度複雑なルールのゲームを扱うのは困難である。

ある程度複雑なゲームには、ゲームを構成する様々な要素があり、ゲームの複雑さに影響を及ぼしている。どのような要素がゲーム・パズルの複雑さの要因となっているかは十分に研究されていないものが多く、このような要素も含めたゲーム・パズルの計算複雑さ、必勝戦略の研究が重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、ゲームやパズルの計算量や戦略について、オンライン問題として定式化できるゲーム・パズルを中心に研究を行う。これまで研究がほとんど行われていない、あらかじめ全ての入力に関する情報が全て与えられていないゲーム・パズルを、その本来の形のまま戦略や必勝性を考える。

具体的には、主に、テトリスに代表される落ち物パズルゲームの一つとして広く知られるぷよぷよやそれに類するゲームを扱い、その必勝性の解明を目指す。ぷよぷよとは、2個のピースからなる入力が順次与えられ、それを盤面に配置していくゲームである。4個以上の同色のピースが連結したとき、それ

らは消滅する。プレイヤーはピースが積み上がらないように入力を配置し続けることを目的とする。

本研究では、なかでも、盤面のサイズ、ゲームのピースの種類数など、ゲームの様々なパラメータを変えた場合の必勝性を解明することに重点をおいて研究を行う。様々な条件下でのその計算複雑さや必勝戦略の有無を明らかにして、その難しさが何に依存するのかを、いくつかのゲームやパズルについて明らかにする。計算容易な場合に対しては具体的な必勝戦略を示す。先の入力などの情報が全てわかっている場合との比較も行う。

また、その過程において、同種の様々なゲーム・パズルに適用可能なオンラインアルゴリズムの設計・解析手法、必勝性の証明手法の開発を行う。計算機による探索でプレイヤーの必勝性を判定するための手法についても研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 1人ゲームとしてのぷよぷよの必勝性
ぷよぷよについては、プレイヤーが一定の高さの盤面で、どのような入力が与えられても永久にゲームを続けられる場合、プレイヤーの必勝であるとする。次の入力は、プレイヤーが現在の入力を盤面に設置した後、その盤面に基づいて与えられるものであり、入力を与える存在と、プレイヤーとの2人ゲームであるとみなすことができる。

① まず、入力の先読みがない場合について、研究代表者の予備的研究のうち、プレイヤーが必勝となる条件の証明について、問題の性質をとらえたより明快な証明が可能であると考えられたため、その証明の改良を行うことにより、このような問題に対する証明手法を明確にする。

② ピースの色数と盤面の幅を与えたとき、必ずプレイヤーの必勝、必敗のいずれかになるが、まだそのいずれになるかが不明な範囲が多いため、これらの解明を目指す。そのため、まずは未解明の場合のうち、色数や幅が非常に小さい場合から検討を行う。その手法のひとつとして、計算機を用いた探索を行う。探索手法を提案し、どの程度の条件まで探索で結果が得られるか実験を行う。また、理論的解析によりプレイヤー必勝か否かの証明を行い、証明手法の確立を目指す。

③ 実際のゲームでは、プレイヤーは操作中のピースだけでなく、次に落下してくるピースの種類を知ることができる。このような「先読み」が可能になれば、プレイヤーはより有効な戦略を立てることが可能になると考えられる。

先読みの数を任意の個数に変化させた場合、その個数も新たなパラメータとして、先読みのない場合と同様にプレイヤーの必勝、または必敗となる条件を理論的に解明する。色数や幅の小さい場合については、先読みによりプレイヤーの必勝となる場合があるか、具体

的な戦略を総当たりで検討する。

④ 他の落ち物パズル・ゲームについても、ぷよぷよを対象として得られた証明手法を基にして、必勝性の解析が行えるかどうかを検討する。

(2) トリックテイキングゲームに分類されるカードゲームについて、獲得したトリック数を競うのではなく、得点を持つカードの獲得を目指すタイプのゲームについて、実際のゲームのルールを扱いやすい形に簡略化し、その必勝性の解析を行う。

(3) その他の種々のゲーム・パズルの必勝性判定の計算量を明らかにする研究を行う。

4. 研究成果

(1) オンライン性を持つ落ち物パズルゲームであるぷよぷよ等を1人ゲームとして扱い、その必勝性について研究を行った。ここで必勝とは、プレーヤが一定の高さ以上にピースを積み上げることなく、永久にプレイできることをいう。

これらのゲームの難しさは、ピースの色数と盤面の幅の2つのパラメータに依存するため、プレーヤが必勝あるいは必敗となるための色数と盤面の幅の条件について研究を行った。

① 先読みの存在しないぷよぷよにおいて、色数が k の場合にプレーヤが必勝となるために十分な盤面の幅が $k(k-1)/2+1$ となることを研究代表者らが本研究着手前に明らかにしていたが、従来の証明の大幅な改良を行った。この証明では、一連のゲームの進行のうち、必ず特定の条件を満たす高さが定数で抑えられる局面に戻ることを示しており、これにより証明手法が明確にされたと考えられる。

② 先読みの無い場合について、これまで必勝性が未解明である色数が3、盤面の幅が2の場合について、与えられた高さ以内でプレーヤが必勝になるか否かを計算機による探索で判定する手法を提案し実装を行ったが、探索を実行可能な範囲の高さでは必勝とならないという結果が得られた。この結果は高さの制限がない場合にプレーヤが必敗となることを意味しないため、プレーヤが必敗となることを探索により示す手法が得られなしか検討することが必要である。

③ 実際のゲームと同様に、入力を先読みできる場合のぷよぷよの必勝性について研究を行った。先読みとは落下中の入力以外にその後の入力をプレーヤが知ることができるもので、プレーヤは先読みを考慮してより有利にゲームを進めることが出来ると考えられる。先読みの個数を変化させたとき、どの程度必勝戦略に影響を与えるかについて研

究を行い、先読みの個数が m である場合にプレーヤが必敗となるピースの色数と盤面の幅の条件を明らかにした。

具体的には、盤面の幅を w とした場合、プレーヤが必敗となるために十分な色数が、盤面の幅 w 、先読みの数 m に対して、 $w=1$ なら2色、 $w=2$ または3なら $w+2m+2$ 色、 $w \geq 4$ なら $w+2m+(2m+2) \lfloor (w-1)/3 \rfloor + 2$ 色となることを示した。この結果は、先読みなしの場合についても従来の結果を改良している。また、盤面の幅が2で、先読みが1個の場合については、先述の条件から得られるより1色少ない5色で必敗となることを示した。

先読みなしではプレーヤが必敗であるが、十分な数の先読みが存在すれば必勝となるケースは今のところ示せていない。しかし、先読みがない場合にプレーヤ必勝か必敗かが現時点で不明であるケースにおいて、十分な先読みがある場合プレーヤの必勝となることを、具体的な必勝戦略を示すことにより明らかにした。

④ 他の落ち物パズルゲームとして、コラムスとばにつくボンバーの2種類のゲームを取り上げ、ぷよぷよに対する証明で用いた手法を応用することにより、必勝および必敗となる条件をそれぞれ示した。たとえば、コラムスの場合、ピースの色数が k であれば、プレーヤ必勝となるために十分な盤面の幅が $k(k-1)^2/2$ (k が6以上の場合) となることを示した。この幅が k の3乗のオーダーとなるのは、ぷよぷよと異なりコラムスの入力に3個のピースからなることによる。

これらの研究により、ぷよぷよを対象とした研究により得られた証明手法が他のゲームにも応用可能であることを示した。

(2) トリックテイキングゲームに分類されるカードゲームについて、獲得したトリック数を競うのではなく、得点を持つカードの獲得を目指すタイプのゲームについて解析を行った。カードの数値の大きいものから何枚かを得点札とし、2人のプレーヤがなるべく多くの得点札を獲得することを目指すものとする。このゲームはトリック数を競うゲームである Whist の一般化であるとみなせる。本研究では、Whist の解析で用いられた手法を応用して、先手後手の優位性、手札の大小による優位性について研究を行い、一定の条件のもとで、手札の得点札は大きいほど、非得点札は小さいほど有利であることなどを示した。

(3) ゲーム・パズルの計算複雑さについて、以下の研究を行った。

① マッチ棒パズルについて、マッチ棒の配置を正方格子の辺上に限定し、指定された本数のマッチ棒を移動して目的の盤面を得るゲームを扱った。

第一に、指定された盤面を作成することを目的とする場合、盤面を文字列で符号化して誤りあり文字列マッチングのアルゴリズムを用いることにより、単純な総当たりより効率的なアルゴリズムを提案した。

第二に、指定された数の正方形を作ることを目的とする場合を考えた。任意のサイズの正方形を個数に含め、移動後にどのマッチ棒もいずれかの正方形に属する必要がある場合、NP 完全であることを証明した。また、盤面の幅が定数であれば、多項式時間で解くことが出来ることも示した。

② QUIXO とは、5 マス×5 マスの格子状にピースが配置され、格子の端のピースを取って自分のマークにし、そのピースで列を押すことにより、自分のマークのピースを 5 個並べることが目的とした 2 人対戦型のボードゲームである。本研究では、盤面のサイズを一般化した QUIXO において、与えられた局面から先手必勝であるかを判定する問題が指数時間完全であることを証明した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Yasuhiko Takenaga and Yo Shimada, Strategies for Single-Player PuyoPuyo, ICGA Journal, 査読有, Vol. 39, 2017, pp. 87-101, DOI:10.3233/ICG-160001.

[学会発表] (計 7 件)

① Yasuhiko Takenaga, Shohei Mishiba and Haruka Sugiyama, Matchstick Puzzles on a Grid, The 20th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games, 2017.

② Yasuhiko Takenaga, Masaki Katsuno and Hushan Quan, On Winning Strategies for Tetris Type Games, The 20th Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, 2017.

③ 三柴翔平、武永康彦、一般化 QUIXO の計算複雑さ、電子情報通信学会総合大会、2017.

④ 勝野誠基、武永康彦、一人用落ち物パズルゲームの必勝性、電子情報通信学会総合大会、2017.

⑤ 全虎山、武永康彦、先読みありの 1 人ぶよぶよの必勝性、電子情報通信学会総合大会、2017.

⑥ 三柴翔平、武永康彦、杉山晴香、格子上のマッチ棒パズル、組合せゲーム・パズル第 12 回研究集会、2017.

⑦ 金広尚平、武永康彦、得点札を持つ二人トリックテイキングゲームの解析、電子情報通信学会総合大会、2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武永 康彦 (TAKENAGA, Yasuhiko)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
准教授
研究者番号：20236491