

Title	お邪魔ぶよを活用した作品的で面白いなぞぶよ問題の生成
Author(s)	青山, 泰志
Citation	
Issue Date	2024-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18874
Rights	
Description	Supervisor: 池田 心, 先端科学技術研究科, 修士(情報科学)

修士論文

お邪魔ぷよを活用した作品的で面白いなぞぷよ問題の生成

青山 泰志

主指導教員 池田 心

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(情報科学)

令和6年3月

Abstract

Artificial intelligence technology (AI technology, AI) has made remarkable progress, and various types of AI have been used in various aspects of our lives. An example is the game field, which has often been used as a good target for AI research because of its clear rules, relatively easy evaluation, and deep involvement with human intellectual curiosity and abilities. For decades, the major goal of game research has been to create AI players that are stronger than humans. With the advent of AlphaZero and the Deep Q-Network, this goal has been achieved in many games.

With such achievements, there has been an increasing need for AI that entertains or teaches human players in recent years. For example, AI players that behave naturally may cause less discomfort to human players and can increase the immersion of the games. Also, AI teachers can help human players improve by providing instructions at a level appropriate to the player. In addition to AI players or teachers, automatic content generation is also needed to create game levels or puzzles that are fun to play and provide practice. Such automatic content generation, like AI players/teachers, will allow human players to enjoy the games and improve their skills.

Furthermore, some content has an aspect that can be considered a kind of art. For example, tsume-shogi (shogi mating problem) is a kind of puzzle using the rules of shogi for one player to play, which enables players to improve their skills while enjoying the game. Many of the puzzles are loved as *works of art* because of various aspects, such as the “beauty of the arrangement on the board,” the “beauty of the checkmate state,” or the “unique trajectory of the pieces.”

In this study, we target *Puyo puzzles*, a single-player version of a famous two-player falling object puzzle game called Puyo Puyo, aiming to create artistic Puyo puzzles. For a Puyo puzzle, the player is given a board and a sequence of *next Puyos* (i.e., the coming Puyos that will fall down) and is asked to find a way to place the next Puyos to satisfy a clear condition such as “completing 3-chain in 2 moves” or “erasing all Puyos in 3 moves.” Elements of real-time and randomness in the original Puyo Puyo are removed in Puyo puzzles. Therefore, players can solve these puzzles slowly and thoughtfully, which not only makes the players enjoy but is also expected to help the players improve their chain-making skills.

Takahashi et al. and Makita et al. conducted research on automatic generation of Puyo puzzles. They also attempted to filter the generated puzzles using estimation models of interestingness and difficulty trained by supervised learning. Such a mechanism enables the extraction of interesting and difficult puzzles.

In this study, we aimed to proceed further in this direction and create artistic Puyo puzzles.

First, we solved 30 Puyo puzzles at levels that can be said to be art in order to investigate the factors of artistic puzzles. As a result, we extracted the following five factors: “the connections are difficult to understand,” “simultaneous erasing is likely to happen,” “the order of the chains is different from what can be imagined on the initial board,” “the Puyos are connected in a way different from that on the initial board,” and “chains with the same color happen in a row.” We also confirmed that, in many cases, it is necessary to utilize *Ojama Puyos* (also called Garbage Puyos, Nuisance Puyos, and Hindrance Puyos) to satisfy the factors of artistic puzzles.

Next, we proposed methods for generating artistic Puyo puzzles. The methods involved generating Ojama Puyos, changing Puyo colors, and filtering for extracting Puyo puzzles of particular factors. Changing Puyo colors is necessary for two of the five factors: “the Puyos are connected in a way different from that on the initial board,” and “chains with the same color happen in a row.” This is because these two factors of artistic puzzles require chains of the same color to happen twice, but existing methods could not generate such puzzles since those methods only generated puzzles whose chains are all of different colors. In addition, we implemented the filters for the two factors. For puzzles that “the Puyos are connected in a way different from that on the initial board,” we stored for each Puyo on the board the order of its chain taking place and then checked whether connected Puyos on the board were erased in separate chains. Similarly, for puzzles that “chains with the same color happen in a row,” we stored for each Puyo on the board the order of its chain taking place and then checked whether chains with the same color happen in the solutions.

Finally, we conducted subjective evaluations on the Puyo puzzles generated using the proposed methods. As a result, we confirmed that the proposed methods were able to generate artistic Puyo puzzles with high frequency. However, the process of generating puzzles took too much time because many puzzles were rejected through the filters. The methods of generating puzzles need to be improved in terms of how to insert Ojama Puyos and normal-colored Puyos.

概要

現在、人工知能技術（AI 技術、AI）の発展は著しく、生活のさまざまなところにさまざまな種類の AI が活用されるようになってきている。その中でもゲーム分野は、ルールが明確で、評価が比較的容易である点や、人間の知的好奇心や知的能力に深く関わる点から、しばしば AI 研究の良い題材として用いられてきた。数十年の間、ゲーム研究の中心的な目的は人間よりも強い AI プレイヤを作成することであった。AlphaZero や Deep Q-Network の登場によって多くのゲームでその目的が達成できるようになっている。

そのため、近年では人間プレイヤを楽しませる AI や人間プレイヤを指導する AI などが求められてきている。自然なふるまいをする AI プレイヤは人間プレイヤに不快感を与えず、ゲームへの没入感を高めることができ、指導 AI ではプレイヤにあったレベルでの指導を行うことによって、人間プレイヤの上達が見込める。また AI プレイヤだけでなく、プレイして楽しいステージやプレイして練習になるステージを作るといった、コンテンツの自動生成なども求められている。前述の AI プレイヤと同様、このコンテンツの自動生成によっても、人間プレイヤは楽しんだり、上達することができる。

さらに、コンテンツには一種の芸術とも言える側面を持つものもある。例えば、詰将棋は将棋のルールを用いた 1 人用のパズルであり、楽しみながら上達することができるコンテンツである。また、「盤上の配置の美しさ」や「詰め上がり図の美しさ」、「ユニークな駒の軌跡」などの趣向を凝らすことによって、“作品”として愛されているものも多い。

そこで、本研究では落ち物パズルゲームとして有名な 2 人対戦ゲームである「ぷよぷよ」をもとに考えられた「なぞぷよ」を題材にして、作品性の高い問題を作ることを目的とする。なぞぷよとは、盤面 1 つと何組かの配ぷよが与えられ、「2 手で 3 連鎖せよ」「3 手で全消しせよ」などのクリア条件を満たすような配ぷよの配置を考える問題である。このなぞぷよでは、本来のぷよぷよにある「リアルタイム性」や「ランダム性」などの要素がない。そのため、プレイヤはゆっくりと考えながら解くことができ、パズルとしての楽しさに加えて、連鎖構成技術の向上も見込める。

このなぞぷよに関して、高橋ら、牧田らは自動で問題を作成するための研究を行った。また、作成された問題に対し、教師あり学習による面白さ、難しさ推定モデルでフィルタリングをする試みを行っている。これにより、「面白い問題」、「難しい問題」の抽出を可能にしている。

本研究では、これをさらに進め、作品性の高い問題を作成することを目指した。

まず、なぞぷよにおける作品性の要素について調べるために、実際に作品性の高い問題を 30 問解いた。結果として、「繋がりが分かりにくい」、「同時消しが発生しやすい」、「初期盤面で想像できる連鎖と違う連鎖の順番をする」、「初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする」、「連鎖をする時に同色の連鎖が続く」の 5 つの要素を抽出することができた。また、これらの作品性を満たすには「お邪魔ぷ

よ」を活用する必要がある場合が多いことも確認できた。

次に、作品性の高い問題を作成するための手法を提案した。これは、「お邪魔ぷよの生成」に加えて、「ぷよの色変更」、また一部作品タイプを抽出するための「フィルタ」である。ぷよの色変更は、本研究で抽出した5つの作品性の内、「初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする」、「連鎖をする時に同色の連鎖が続く」が必要となる。これは、この2つの作品性は正解手順での連鎖時に同じ色が2回消える必要があるが、既存の生成手法で作成される問題では連鎖が全て違う色となっており、既存の生成手法で作成した問題から抽出することができないためである。また、フィルタはこの2つの作品タイプについて実装した。「初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする」問題は、盤上の各ぷよが何連鎖目で消えるかを格納し、盤面で繋がっているぷよが別々の連鎖で消えるかを確認している。同様に、「連鎖をする時に同色の連鎖が続く」問題は、盤上の各ぷよが何連鎖目で消えるかを格納し、正解手順での連鎖時に連続で同じ色が消えているかどうかを確認する。

最後に、提案手法で作成した問題について主観評価を行った。結果としては、高頻度で作品性の高い問題が生成できることを確認できた。しかし、問題を生成する過程で多くの問題をフィルタを通して却下しているため、時間がかかり過ぎてしまっている。問題の生成法について、お邪魔ぷよや色ぷよの挿入方法を工夫する必要がある。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	ぷよぷよとなぞぷよ	3
2.1	ぷよぷよのルール	3
2.1.1	お邪魔ぷよ	4
2.2	なぞぷよ	5
第3章	関連研究	6
3.1	ぷよぷよにおける強い AI プレイヤ	6
3.2	ぷよぷよにおける人間プレイヤの模倣 AI プレイヤ	6
3.3	なぞぷよ問題自動作成法	6
3.4	連鎖構成力向上のための多様で面白いなぞぷよ提供法の提案	7
第4章	作品性の調査	8
4.1	作品タイプ1 繋がりが分かりにくい問題	11
4.2	作品タイプ2 同時消しが発生しやすい問題	12
4.3	作品タイプ3 初期盤面で想像できる連鎖の順番と違う連鎖の順番をする問題	14
4.4	作品タイプ4 初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする問題	16
4.5	作品タイプ5 連鎖をする時に同色の連鎖が続く問題	17
第5章	提案手法	18
5.1	お邪魔ぷよの追加	18
5.1.1	逆向き生成法	18
5.1.2	お邪魔ぷよ生成	20
5.1.3	ぷよの色変更	21
5.2	一部フィルタの導入	21
5.2.1	作品タイプ4	21
5.2.2	作品タイプ5	22
5.3	未実装な生成手法案	22
5.3.1	作品タイプ4	22
5.3.2	作品タイプ5	23

第6章	問題生成・評価	24
6.1	問題生成・評価内容	24
6.2	典型的な生成問題例	28
6.2.1	作品タイプ4の生成問題例	28
6.2.2	作品タイプ5の生成問題例	31
第7章	おわりに	34
付録A	特殊な問題	38
A.1	問題2	38
A.2	問題22	40

目次

2.1	基本的なぷよぷよのルール（プレイヤー1人分のみ表示）	4
2.2	お邪魔ぷよ	5
2.3	なぜぷよ問題例	5
2.4	解答例	5
4.1	問題 2	10
4.2	問題 22	10
4.3	作品タイプ1の問題例	11
4.4	作品タイプ1を満たさない問題例	12
4.5	作品タイプ2の問題例	12
4.6	無駄多連結例	13
4.7	作品タイプ3の問題例	14
4.8	作品タイプ3の失敗例	15
4.9	作品タイプ3の想像例	15
4.10	作品タイプ4の問題例	16
4.11	作品タイプ5の問題例	17
5.1	逆向き生成法	19
5.2	お邪魔ぷよ生成	20
6.1	作品性がある悪い問題	27
6.2	意図と違う作品性がある良い問題	27
6.3	作品タイプ4の良い生成問題例 1	28
6.4	作品タイプ4の良い生成問題例 2	29
6.5	作品タイプ4の悪い生成問題例 1	30
6.6	作品タイプ4の悪い生成問題例 2	30
6.7	作品タイプ5の良い生成問題例 1	31
6.8	作品タイプ5の良い生成問題例 2	32
6.9	作品タイプ5の悪い生成問題例 1	33
6.10	作品タイプ5の悪い生成問題例 2	33
A.1	問題 2	38
A.2	問題 2 失敗例 1	39

A.3	問題 2 失敗例 2	39
A.4	問題 22	40
A.5	問題 22 失敗例	41
A.6	作品性 2	42
A.7	作品性 4	42

表 目 次

4.1	分析した問題の作品タイプ	9
6.1	作品タイプ4の評価	25
6.2	作品タイプ5の評価	26

第1章 はじめに

人工知能技術 (AI 技術, AI) の発展は近年著しく, 生活のさまざまなところにさまざまな種類の AI が活用されるようになってきている. ゲームは, ルールが明確で, 評価が比較的容易で, かつ人間の知的好奇心や知的能力に深く関わることから, しばしば AI 研究の良い題材となっている. 数十年の間, ゲーム研究の中心的な目的は人間よりも強い AI プレイヤを作成することであった. AlphaZero[7] や Deep Q-Network[8] の登場によって多くのゲームでその目的が達成できるようになると並行して, 「人間を楽しませる」「人間に教える」などの目的が注目されるようになってきている.

人間を楽しませたり教えたりするのは, 必ずしも人間と対戦する AI プレイヤの役割とは限らない. プレイして楽しいステージを作る [9], プレイして練習になるステージを作る [10] といった, コンテンツの自動生成 (Procedural Content Generation, PCG) にも, 機械学習や生成 AI などの AI 技術がしばしば使われている. 楽しく練習になるコンテンツを低コストで永続的に提供できれば, プレイヤはそのゲームに定着し, 技術を高めることができる.

さらに, コンテンツの一部は一種の芸術の域にまで高めることができる. 例えば, 2人対戦の将棋に対して, 詰将棋は1人で遊ぶことのできるいわば将棋のミニゲームであって, 楽しむこともできるし練習にも適しているとされる. 一方で, 趣向を凝らした詰将棋問題は“作品”として扱われ, 絵画や音楽, 小説などの他の芸術作品と同様, 数百年の時を経てもなお色褪せず愛されているものも多い. 詰将棋を作品たらしめる要素は, 盤上の配置の美しさ, 詰め上がり図の美しさ, ユニークな駒の軌跡, 難しさ, 不成や中合いといった意外な手など, さまざまである. 本研究では, 2人対戦のぷよぷよ [11] をもとに考えられた「なぞぷよ」 [12] を題材に, 作品性の高い問題を作ることを目的とする.

ぷよぷよは, 1991年に発売された2人対戦のアクションパズルゲームである. ルールの詳細は2章で説明するとして, 「連鎖」と呼ばれる状態遷移を起こすことがゲーム性や面白さの核の一つとなっている. 連鎖を起こすためには注意深くぷよを配置しなければならず, そうでなければ予想外の不適切な連鎖が起きたり, 逆に起きなかったりすることも多い. そこで, 特に初級者から中級者にかけては, 適切にぷよを配置して攻撃力の高い連鎖を構築する技術を磨くことが重要になる. 連鎖技術は実戦練習でも磨くことができるが, ぷよぷよが持つリアルタイム性・ランダム性や, 相手プレイヤからの妨害などから, 純粹に連鎖技術のみを練習することは難しい. そこで, 連鎖構成部分だけを切り出した「なぞぷよ」が補助的に

技量向上のために用いられることがある。

なぞぷよは、盤面1つと何組かの配ぷよが与えられ、「2手で3連鎖せよ」「3手で全消しせよ」などの要求を満たすような配ぷよの配置法（解）を見つける問題である。将棋における詰将棋や囲碁における詰碁と同様、簡単なものから難しいものまであり、実戦的な形を持った問題もあれば、実戦には登場しない面白い形を持った問題もある。これらの多く、特に良い作品とされるものは、これまで人手によって作成されてきたと推測する。

一方で、高橋ら [1]、牧田ら [6] は、なぞぷよ問題を自動で作成するための研究を行っている。ランダム生成および逆向き生成と呼ばれる方法で盤面を生成し、「2手で3連鎖せよ」といった要求に合致しているかを確認し、教師あり学習による面白さ推定モデルでフィルタリングを行うといったことがその概要である。しかし、人間がプレイして楽しい問題は一定程度作成されることが分かっているものの、いわゆる作品と呼べるような問題は稀であるという問題点があった。その原因の一つとして、(詰将棋にあるような) 特定の作品性というものが明示的には意識されず、それを感じるができる問題が稀にしか生成されないという課題があると考えられる。

そこで本研究では、なぞぷよの作品性にどのようなものがあるかを実際に高い評価を受けている問題の分析から考察し、ついで、その作品性を満たすために「お邪魔ぷよ」の活用が必要である場合が多いことから、その機能を生成部分に追加した。最後に、作品性のいくつかを実現するための手法を提案し、実際に高頻度で良い問題が生成できることを確認した。

本論文の構成は以下の通りである。1章の導入に続き、2章ではぷよぷよとなぞぷよについて説明する。3章は、ぷよぷよのコンピュータプレイやとなぞぷよ生成についての関連研究を紹介する。4章では高い評価を受けている問題の分析による作品性の分類を行う。5章では実際の生成法を説明し、6章でその結果を示す。7章はまとめである。

第2章 ぷよぷよとなぞぷよ

ぷよぷよとは、テトリスと並ぶ落下型パズルゲームの代表格であり、1991年にコンパイル社が発売し、現在ではセガ社がその権利を保有している。日本国内ではeスポーツとして、JeSUのライセンス認定タイトルでもあり、2018年12月末には第74回国民体育大会「いきいき茨城ゆめ国体」の文化プログラムにて行われる「全国都道府県対抗eスポーツ選手権2019 IBARAKI」の競技タイトルにも選ばれ、eスポーツタイトルとして、また国民的なアクションパズルゲームとして定着させていく動きが強い。競技シーンでのぷよぷよは主に2人で対戦する形式が多く、相手のフィールド（盤面）を攻撃することで打ち負かすことを目的とする。相手のフィールドを攻撃するためには通常、“連鎖”と呼ばれる状況が発生させる必要がある。できるだけ強い連鎖をできるだけ効率良く作ること、敵の連鎖構成を邪魔したりタイミング良く攻撃したりすることなどが本ゲームの醍醐味である。

2.1 ぷよぷよのルール

本節は、参考文献 [6] の2.1節をもとに再構成、一部補記した。

ぷよぷよはJeSUの認定タイトルになるほど著名なゲームだが、本節ではあらためてぷよぷよのルールを簡単に説明する。ぷよぷよには25年以上の歴史があり、シリーズやゲームモードごとに様々なルールが生まれてきたが、ここではそれらにほぼ共通する部分だけを図2.1を用いて述べる。

[プレイ人数] 1人のプレイヤーが1つの盤面を持ち、通常2人でプレイする。相手の盤面には後述する「連鎖」によって攻撃を行うことでのみ干渉することができる。

[盤とマス] 盤は通常横6縦13の2次元格子からなり、下方向に重力を持つ。左右端、上下端に位相的繋がりはない。それぞれのマスには「ぷよ」が1つあるかないかのどちらかの状態しかない。

[ぷよ] ぷよには色があり、最大で5色、通常は4色が存在する。その他に、後述する「お邪魔ぷよ」と呼ばれるものも存在する。

[配ぷよ] プレイヤーには2つのぷよからなる「配ぷよ」が与えられる（図2.1右上）。ぷよの色はそれぞれ概ねランダムに決まっており、2手4個分の色が予告されている。

[着手] プレイヤーは、2つのぷよを回転および左右に移動し、落下させる（図2.1上の☆□）。また、この盤面上には下方向に重力が働くため、ぷよは下へと自動で

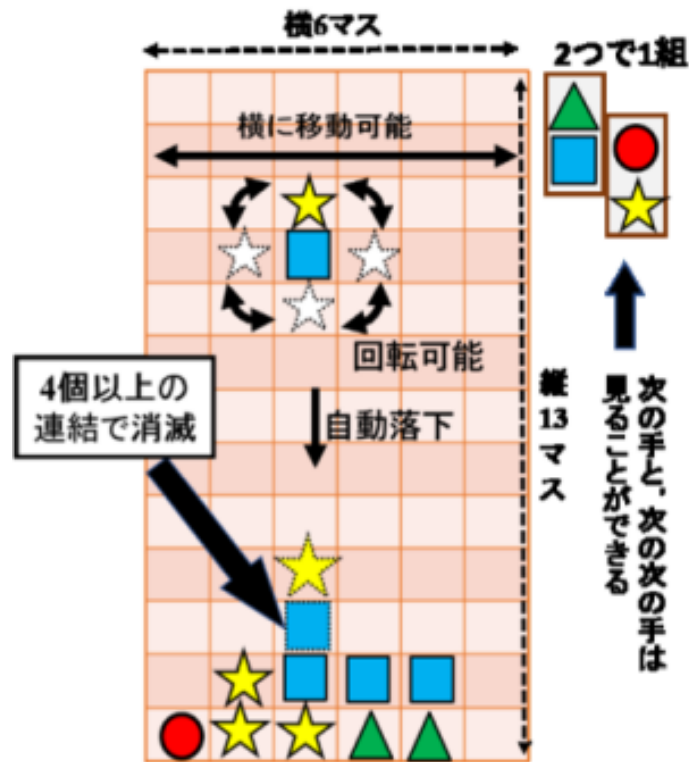


図 2.1: 基本的なぷよぷよのルール (プレイヤー1人分のみ表示)

落下していく。ぷよがこれ以上上下へ落ちることが出来ない場合、その位置に固定される。

[ぷよの消滅] 同色のぷよが4つ以上上下左右に連結すると、そのぷよ集団は消滅する (図 2.1 下の□)。消滅した集団の上にあるぷよは重力に従い落下するが、それにより新たに4つ以上の連結が生じ消滅が起きた場合、これを「連鎖」と呼ぶ。

[攻撃] n 段階の「落下と消滅」が繰り返されたとき、それを n 連鎖と呼ぶ。 n 連鎖を達成すると、およそ n の2乗に比例した数の「お邪魔ぷよ」と呼ばれる特殊なぷよが相手の盤上に落下する。

[相殺] 双方が攻撃を行った場合には攻撃力の大きい方がその差分だけ一方的に相手にお邪魔ぷよを落下させることができる。

[敗北] (主に相手に攻撃され) 配ぷよを置く場所がなくなった場合、負けとなる。

2.1.1 お邪魔ぷよ

ぷよぷよには、「お邪魔ぷよ」と呼ばれる特殊なぷよが存在する。前節で説明した通り、通常の色ぷよは、同色が4つ以上上下左右に連結すると消滅する。しかし、「お邪魔ぷよ」は「お邪魔ぷよ」同士で4つ以上上下左右に連結しても消滅せず、隣接するマスで色ぷよを消した際に、消滅するという特徴がある。

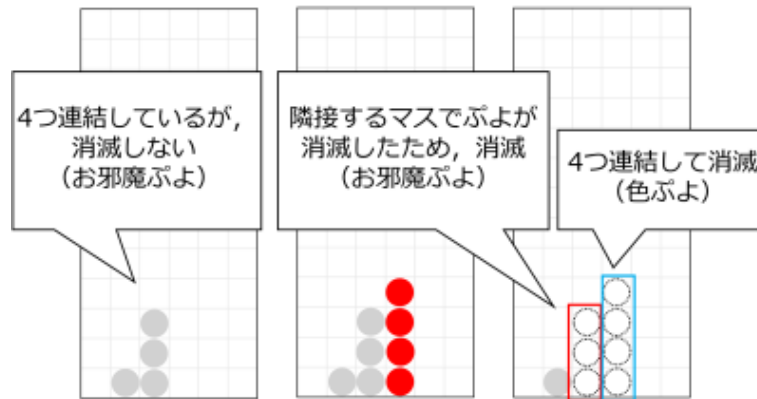


図 2.2: お邪魔ぷよ

2.2 なぞぷよ

本節は、参考文献 [6] の 2.2 節をもとに再構成、一部補記した。

以下の図 2.3 を用いてなぞぷよについて説明する。なぞぷよでは、予めいくつかのぷよが配置された初期盤面（図 2.3 左）と、数手先までを予告する配ぷよが与えられる（図 2.3 右上）。この配ぷよは、対戦モードと異なり、問題ごとに固定されており、かつ 4 手 5 手先まで与えられることも珍しくない。更になぞぷよでは対戦相手がおらず、相手を倒すという目的がない代わりに、その問題ごとに固有のクリア条件（図 2.3 右下）が与えられる。このクリア条件は様々で、「2 手で 3 連鎖すべし」「全てのぷよを消すべし」などが存在する。図 2.4 はクリア条件を満たす解答例の一つである。

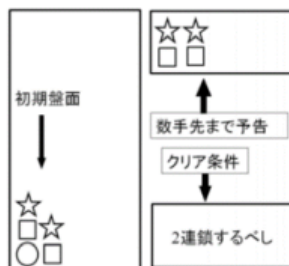


図 2.3: なぞぷよ問題例



図 2.4: 解答例

詰碁や詰将棋などと同じく、なぞぷよの問題は多種多様で、初心者でも容易に解けるものから上級者でも苦労するもの、平凡な手が答えのものから意外な手が答えとなるといった作品性のあるものなどが存在している。

第3章 関連研究

本章は、参考文献 [6] の3章をもとに再構成，一部補記した。

3.1 ぷよぷよにおける強い AI プレイヤ

ぷよぷよには自分が操作可能な手にはランダムな要素がある。そのようなランダム性を考慮しつつ，富沢らは「効率よく連鎖を組む AI プレイヤの作成」を試みた [2]。結果として，連鎖の構成効率が熟練の人間プレイヤに迫るものであったことが確認された [2]。

3.2 ぷよぷよにおける人間プレイヤの模倣 AI プレイヤ

ぷよぷよについて，前節で述べた富沢らの強くするための研究以外に，熟練支援や楽しさの提供を目的とした研究が行われている。一つは隅山らによる「特定のプレイヤの模倣」の試みである [3]。隅山らは，ぷよぷよにおける「あるプレイヤらしさ」が，そのプレイヤが用いる「定石形」に現れると仮定して，ユーザのプレイデータから，特定のユーザの手を再現する試みをしている。定石形とは，効率の良いことが分かっている特定のぷよ群の配列のことである。この結果として，全体的に人間プレイヤのプレイデータ内に現れやすい定石形を再現できていることが分かった。

3.3 なぞぷよ問題自動作成法

前節で述べた隅山らの人を楽しませる AI プレイヤの研究以外に，教育を目的とした研究が行われている。一つは高橋らによる「なぞぷよ問題作成」の試み [1] である。

高橋らは，広瀬ら [4] や山崎ら [5] が用いた逆算法（逆向き生成法）と呼ばれるパズル作成手法をなぞぷよに適用した。また，ランダム生成と呼ばれる手法を加え，2つの手法を用いてなぞぷよ問題の自動作成を行った。また，作成した問題から面白い問題や難しい問題など必要なものを抜き出すために，高橋らはなぞぷよ問題の面白さや難しさの推定を試みた [1]。この推定は，なぞぷよ問題の面白さや

難しさ、役立ち度を人間プレイヤーに5段階の主観評価してもらい、主観評価の結果となぞぷよ問題の特徴量から線形回帰を行い、推定のための回帰式を得た。高橋らはこの回帰式について「ぷよ数が多いほど考えることが多く難しい」、「正式手順が多いほどどうやっても解けるので難しくない」、「連鎖開始場所ができる場所が多いほど迷うので難しい」[1]などと説明している。

3.4 連鎖構成功率向上のための多様で面白いなぞぷよ提供法の提案

前節の研究をさらに進め、牧田らは、個々の人間プレイヤーが面白い、あるいは難しいと思える多様な種類のなぞぷよ問題を提供することを試みた[6]。

牧田らは、高橋らの特徴量に新たに特徴量を加えることで、推定精度の向上を試みた[6]。また、新たに作成した面白さ、難しさ推定モデルを用いることで多様な問題ができることを確認した[6]。牧田らは、「「面白い問題」「難しい問題」などが高確率で抽出できていることが確認できた」、「人間でも作るのが難しいと思われるような名作も含まれている」[6]などと述べている。

この研究では、お邪魔ぷよを活用した問題の生成を行っていない。お邪魔ぷよを活用することでより多様な問題が作成できると考えている。

第4章 作品性の調査

1章で述べた通り，本研究では，なぞぷよの作品性にどのようなものがあるかを実際に高い評価を受けている問題をもとに分析し，考察を行った。

問題は，なぞぷよ傑作選 [13] から選出し，実際に解いてみて良い問題と感じた30問で分析を行った。これらの問題は，それぞれ実戦であまり出ないような特殊な消え方や置き方をしている点が，高い評価を受けていると言える。

分析の結果，以下の5つの作品性を抽出した。

作品タイプ1 つながりが分かりにくい問題

作品タイプ2 同時消しが発生しやすい問題

作品タイプ3 初期盤面で想像できる連鎖の順番と違う連鎖の順番をする問題

作品タイプ4 初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする問題

作品タイプ5 連鎖をする時に同色の連鎖が続く問題

今回分析を行った30問については，特殊なもの（条件が全てのぷよを消すべしであった問題2）を除き，全てこの作品性を1つ，もしくは複数満たしている。今回分析した問題についてそれぞれ満たしている作品性を表4.1に示す。

表 4.1: 分析した問題の作品タイプ

	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4	タイプ5
問題 1	-	-	○	-	-
問題 2	-	-	-	-	-
問題 3	-	-	-	○	-
問題 4	-	-	-	-	○
問題 5	-	-	-	○	○
問題 6	-	-	○	○	-
問題 7	○	○	-	-	○
問題 8	○	-	-	-	-
問題 9	-	○	-	-	-
問題 10	-	-	○	-	-
問題 11	-	-	-	-	○
問題 12	-	-	○	-	○
問題 13	-	-	○	-	○
問題 14	-	○	-	-	-
問題 15	-	-	○	-	-
問題 16	-	-	○	-	-
問題 17	-	○	-	-	○
問題 18	○	-	-	-	○
問題 19	-	-	○	-	○
問題 20	-	○	-	-	-
問題 21	-	○	-	○	○
問題 22	-	○	○	○	○
問題 23	-	-	-	○	-
問題 24	-	○	-	-	-
問題 25	○	-	○	-	-
問題 26	-	○	○	-	○
問題 27	-	○	-	-	○
問題 28	-	○	-	○	○
問題 29	-	○	-	○	○
問題 30	-	○	-	○	○

分析を行った30問の内、特に特殊であった2問（いずれの作品性も満たさなかった問題2と4つの作品性を満たした問題22）をそれぞれ図4.1、図4.2に示す。

【3連鎖&ぷよ全て消すべし】

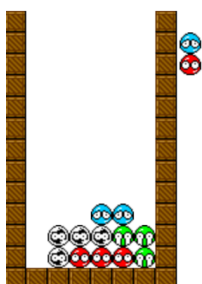


図 4.1: 問題 2

【黄ぷよ全て消すべし】

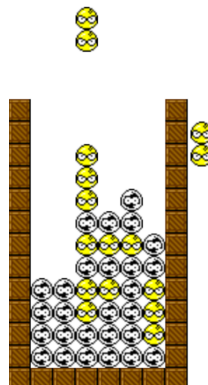


図 4.2: 問題 22

問題2は、上記で述べた通り、連鎖の条件に加えて「ぷよを全て消すべし」という条件がある。この条件により、色ぷよだけでなくお邪魔ぷよも全て消す必要がある点でこの問題は特殊である。そのため、この問題は全てのぷよを消すために工夫が必要な面白い問題とはいえるが、やや例外的なので本研究の対象とはしない。なお、付録A.1に、この問題の正解と失敗例の解説を付記しておく。

また問題22は、「黄ぷよ全て消すべし」という条件である。問題（図4.2）を見て分かる通り、盤面が黄ぷよとお邪魔ぷよのみであり、連鎖の条件もないという点でこの問題はやや特殊である。なお、付録A.2に、この問題の正解と失敗例、なぜ作品性2~5があるのかの解説を付記しておく。

4.1 作品タイプ1 繋がりが分かりにくい問題

初期盤面で他の同色のぷよと繋がっていないぷよ（以下、孤立ぷよ）が多く、連鎖が起きそうにない、どう連鎖するのか分からない問題を作品タイプ1としている。作品タイプ1の問題の一例として以下の問題（図4.3）がある。問題の解答例、1連鎖目、2連鎖目の消え方をそれぞれ図4.3の解答例、1連鎖目、2連鎖目に示す。ここで孤立ぷよとは、図4.3の初期盤面の右から3列目にある青ぷよのようなぷよを指す。

【3連鎖するべし】

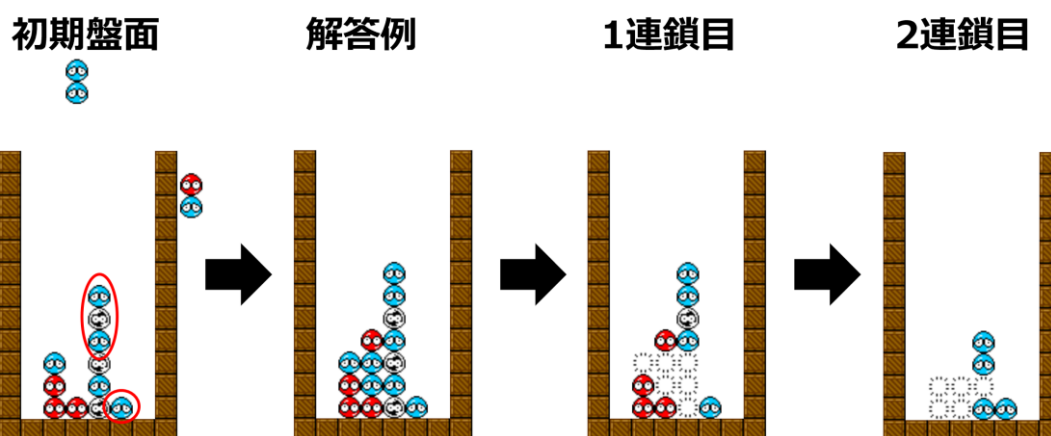


図 4.3: 作品タイプ1の問題例

この問題は、初期盤面（図4.3一番左）の右から3列目に青の孤立ぷよが多く存在しており、それらの青ぷよが配ぷよや盤面上の同色のぷよとどう繋がって消えるかが、分かりにくくなっている。この問題は、青ぷよ、赤ぷよ、青ぷよの順番で繋がっていき、お邪魔ぷよや段差を利用して、最初は繋がっていなかった青ぷよ（図4.3で赤丸で囲ったぷよ）が3連鎖目として繋がって消える。このように、初期盤面で連鎖時に繋がるぷよが分かりにくい問題が作品タイプ1にあたる。

この作品タイプ1は、上記で述べた通り、初期盤面での孤立ぷよの数に加えて、どう繋がるか分かりにくいという点を考慮しなければならない。人間にとっての繋がりの分かりにくさはなかなか数値化が難しい。例えば、図4.4の問題を見てほしい。この問題は、図4.3の問題より多い孤立ぷよが存在している。しかし、これは定型連鎖として有名な、カギ積みと呼ばれる連鎖[14]に近く、中級者レベルのプレイヤーであれば繋がりが分かりにくいとは言えない。

【3連鎖するべし】

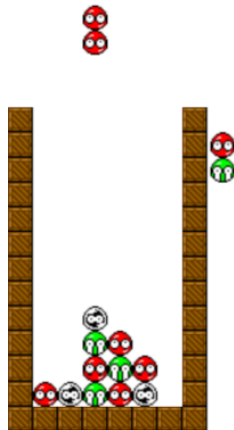


図 4.4: 作品タイプ1 を満たさない問題例

4.2 作品タイプ2 同時消しが発生しやすい問題

初期盤面で同色のぷよや他の同色のぷよと繋がっているぷよが多く、同時消し [15] や必要のない多連結（5個以上の同色のぷよが繋がる）が発生してしまいそうな問題を作品タイプ2としている。作品タイプ2の問題の一例として以下の問題（図 4.5）がある。問題の解答例，1連鎖目，2連鎖目の消え方をそれぞれ図 4.5の解答例，1連鎖目，2連鎖目に示す。ここで必要のない多連結とは、本来4個のぷよが繋がるところを5個以上のぷよが繋がることを指す（以下、無駄多連結）。

【3連鎖するべし】

初期盤面



解答例

1連鎖目

2連鎖目

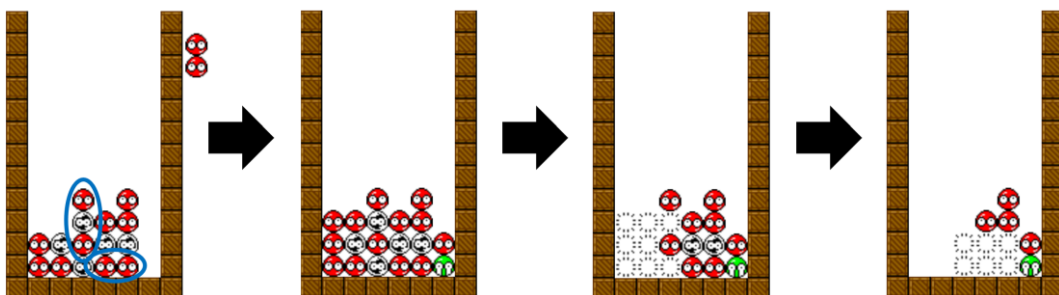


図 4.5: 作品タイプ2 の問題例

無駄多連結の例として図 4.6 を挙げる．問題（図 4.6 真ん中）に対して，それぞれ別の置き方をしたものが解答例（図 4.6 左）と多連結例（図 4.6 右）である．それぞれ 1 連鎖した後の残りのぷよ（図 4.6 で赤丸で囲ったぷよ）を見ると分かる通り，多連結例ではぷよが 3 つしか残らないため，クリア条件を満たすことが出来ない．このようなクリア条件を満たすことが出来なくなるような多連結が無駄多連結である．

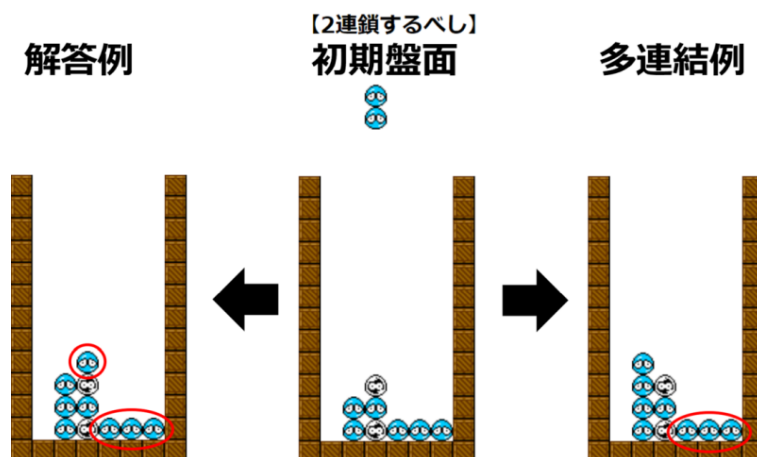


図 4.6: 無駄多連結例

図 4.5 の問題は，初期盤面（図 4.5 左）に多くの赤ぷよが存在しており，また他の同色のぷよと繋がっているぷよが多いため，同時消しや無駄多連結が発生しやすくなっている¹．この問題は，お邪魔ぷよを活用することによって，赤ぷよで 3 連鎖をしている．特に 2 連鎖目がお邪魔ぷよを活用した消え方をしており，図 4.5 の青丸で囲った 3 群 4 個のぷよが 2 連鎖めとして繋がって消える²．このような同時消しや無駄多連結が発生しやすい問題が作品タイプ 2 にあたる．

この作品タイプ 2 は，上記で述べた通り，同色のぷよの個数や同色のぷよと繋がっている組の個数に加えて，同時消しや無駄多連結が発生しやすいという点を考慮しなければならない．全ての配ぷよの置き方（2 手の場合は， 22^2 通り）から，同時消しや多連結の回数を取得することは可能である．しかし，人間にとっての同時消しや多連結の発生しやすさは，単に全通りの置き方での回数だけで決まるものではなく，実際の盤面での同色のぷよ同士の距離や位置関係も関係してくるため，こちらも数値化が難しいといった課題がある．

¹なお，この問題は作品タイプ 1 で述べたような孤立ぷよが存在しているが，同色の 2 つ以上繋がっているぷよが多く，配ぷよを置いた時に連鎖が発生しやすいという点で作品タイプ 1 ではない．

²なお，左から 3 列目のお邪魔ぷよを 2 つとも消すことは大事であり，そうでなければ同時消し 2 連鎖となってしまふ．

4.3 作品タイプ3 初期盤面で想像できる連鎖の順番と違う連鎖の順番をする問題

初期盤面で連鎖が繋がりそうな形が出来ているが、その形とは違う形で連鎖が消える問題を作品タイプ3としている。初期盤面で連鎖が繋がりそうな形とは、GTR[17]や階段積み[18]といったいわゆる定型と呼ばれる積み方に近い形をしている積み方のことである。作品タイプ3の問題の一例として以下の問題（図4.7）がある。問題の解答例、1連鎖目、2連鎖目の消え方をそれぞれ図4.7の解答例、1連鎖目、2連鎖目に示す。

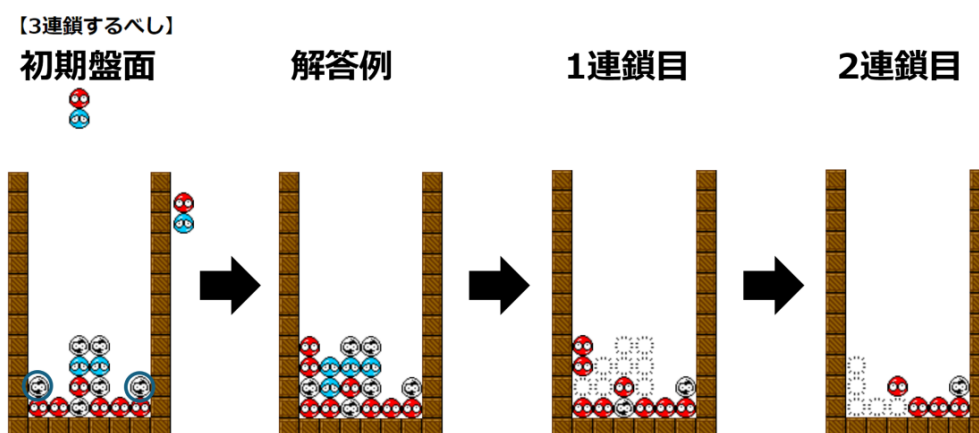


図 4.7: 作品タイプ3の問題例

この問題は、初期盤面（図4.7左）において、青ぷよ、右の赤ぷよ、左の赤ぷよの順番で連鎖が繋がるように想像できる（図4.8）。初期盤面で青丸で囲った左側のお邪魔ぷよによって、同時消しを防いでおり、右側のお邪魔ぷよによって、2連鎖目が右から始まるように見える。しかし、実際は中央の青ぷよから始まり、左の赤ぷよと右の赤ぷよと連鎖が繋がって消える。このような初期盤面で想像できる連鎖の順番と違う連鎖の順番をする問題が作品タイプ3にあたる。

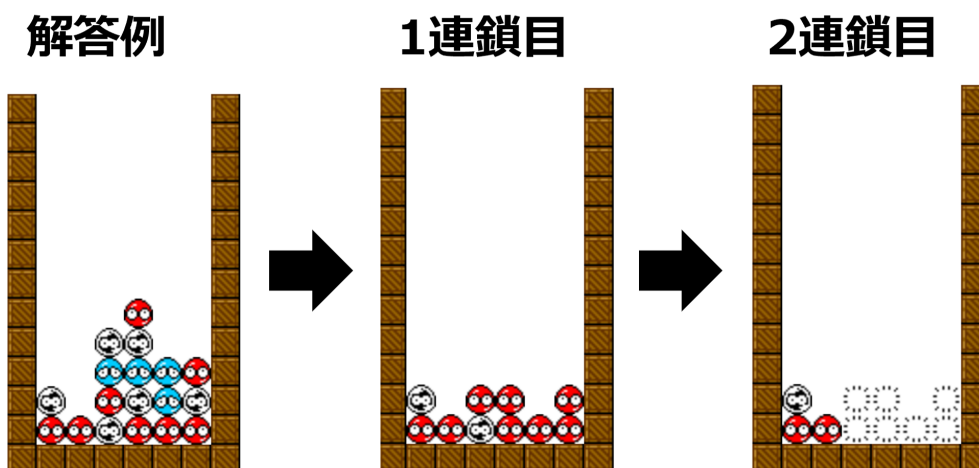


図 4.8: 作品タイプ3の失敗例

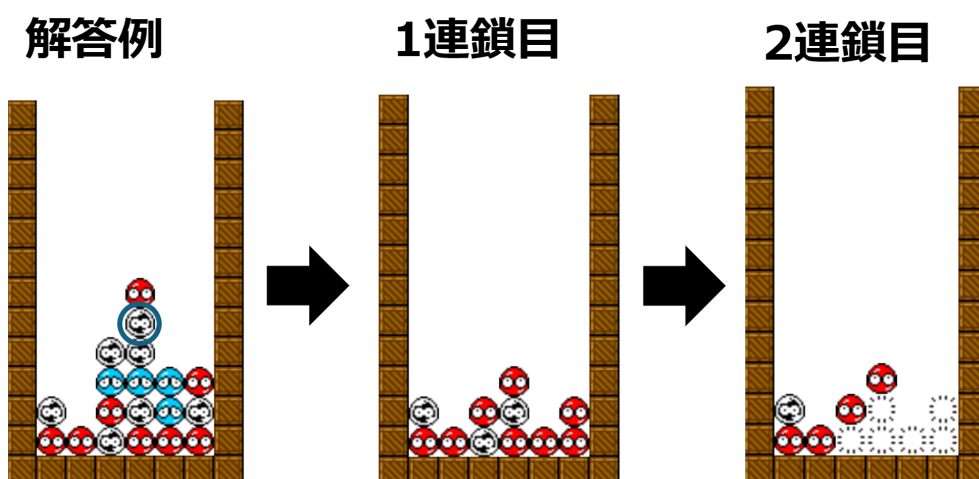


図 4.9: 作品タイプ3の想像例

図 4.8 は中央のお邪魔ぶよが消えてしまうため、2連鎖目で多連結消しとなる失敗例であるが、実際に図 4.9 の初期盤面の青丸で囲ったお邪魔ぶよがあれば、多連結消しがなくなるためこれは3連鎖する。

この作品タイプ3は、上記で述べた通り、初期盤面で想像できる連鎖があるという点を考慮しなければならない。前述のGTRや階段積みに近い積み方をしているというのがこの作品タイプではあるが、人間にとっての想像できる連鎖というのはその人の技量やプレイスタイル³にも大きく関係している。このことから、単に定型連鎖の形の類似度を検出するといった手法ではうまくいかない場合が多く、こちらも数値化が難しいといった課題がある。

³通常、ぶよぶよはGTRや階段積みといった定型連鎖をもとに連鎖を組んでいくプレイヤーが多いが、中には不定形連鎖と呼ばれる連鎖を好むプレイヤーもいる。

4.4 作品タイプ4 初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする問題

初期盤面で繋がっている消えやすそうなぷよが、正解手順での連鎖（以下、正解連鎖）時には他の同色のぷよと別々に繋がって消える問題を作品タイプ4としている。作品タイプ4の問題の一例として以下の問題（図4.10）がある。問題の解答例、1連鎖目、2連鎖目の消え方をそれぞれ図4.10の解答例、1連鎖目、2連鎖目に示す。

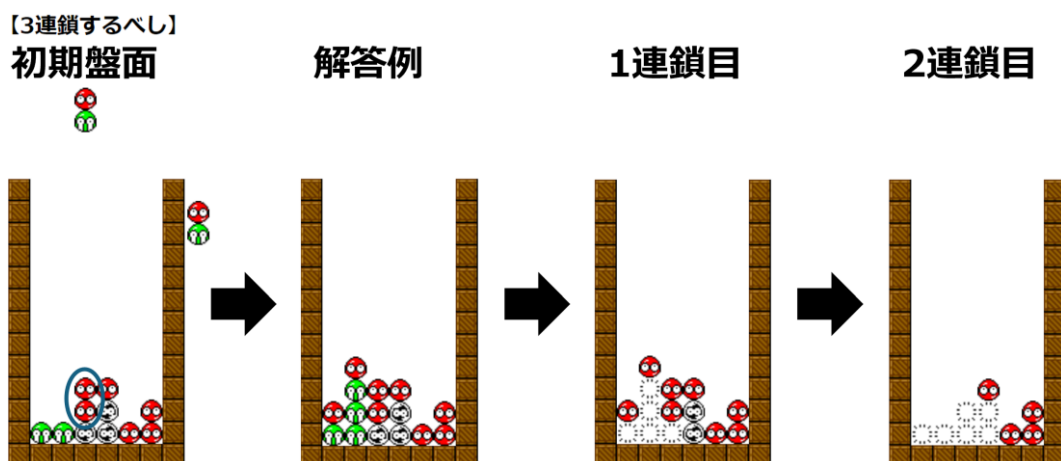


図 4.10: 作品タイプ4の問題例

この問題は、初期盤面中央の赤ぷよが青丸で囲ったぷよと囲っていないぷよで別々に消える。初期盤面では、右と中央にそれぞれ赤ぷよが3つずつ繋がっている。そのため、それらのぷよがまとまって消えるように感じるが、実際はお邪魔ぷよを活用して青丸で囲ったぷよが2連鎖目、囲っていないぷよが3連鎖目として別々に繋がって消える。このように、初期盤面で繋がっているが、正解連鎖時には別のぷよと繋がって消えるぷよ（以下、スプリットぷよ）の問題が作品タイプ4にあたる。

この作品タイプ4は、正解連鎖で1つの色が2回以上消えることやスプリットぷよがあるかどうかというところから抽出できると考えられる。なお、後述する既存の生成手法では、2手3連鎖を作る際に全て別の色で生成するようになっているが、作品タイプ4は前述の通り、1つの色が2回以上消える必要がある。そのため、問題生成時に色変更も行っている。詳細は、5.1.3項で述べる。

4.5 作品タイプ5 連鎖をする時に同色の連鎖が続く問題

正解連鎖時に同色の連鎖が続く（以下、同色連続消し）問題を作品タイプ5としている。作品タイプ5の問題の一例として以下の問題（図 4.11）がある。問題の解答例、1連鎖目、2連鎖目の消え方をそれぞれ図 4.11 の解答例、1連鎖目、2連鎖目に示す。

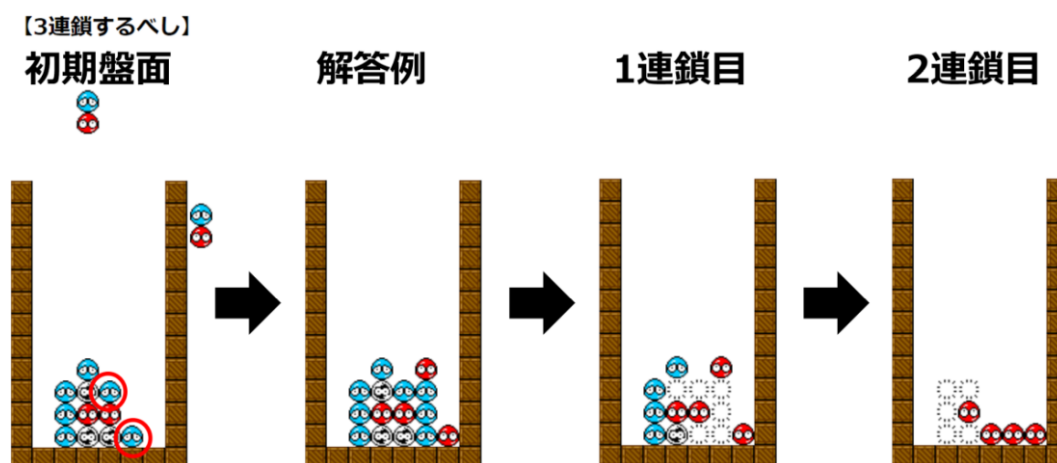


図 4.11: 作品タイプ5の問題例

この問題は、初期盤面の赤丸で囲った青ぷよ、赤丸で囲っていない青ぷよ、赤ぷよの順番で消える。通常お邪魔ぷよを介さないぷよぷよで連鎖を行う際には、同色連続消しが起こることは少なく（本来、別々に消えて欲しいぷよが繋がる「暴発」[16]が発生しやすいため）、別の色ぷよが挟まることが多い。しかし、この問題ではお邪魔ぷよを活用することによって、同色連続消しを起こすことが出来る。このようなお邪魔ぷよを活用した同色連続消し問題が作品タイプ5にあたる。

この作品タイプ5は、単純に正解連鎖で同じ色のぷよの連鎖が2回以上続くというところから抽出できると考えられる。なお、作品タイプ5も作品タイプ4と同様に、1つの色が2回以上消える必要がある。そのため、問題生成時に色変更も行っている。詳細は、5.1.3項で述べる。

第5章 提案手法

本章では，提案手法について述べる．本研究では，先行研究 [6] をさらに進め，作品性を満たすための機能の拡張を行った．まず，お邪魔ぷよを生成する機能について説明をし (5.1 節)，次に5つの作品性のうちいくつかを実装するためのフィルタについて説明する (5.2 節)．

5.1 お邪魔ぷよの追加

本研究では，1章で述べた通り，4章で抽出した作品性を満たすために「お邪魔ぷよ」の活用が必要である場合が多いことから，お邪魔ぷよを生成する機能を生成部分に追加した．生成部分は [6] の逆向き生成法を利用している．

5.1.1 逆向き生成法

本項は，参考文献 [6] の 4.2.2 項をもとに再構成，一部補記した．

逆向き生成法とは，最終連鎖盤面を最初に作ってから，徐々に問題盤面へと逆向きに近づけていく方法のことである [1]．2手3連鎖問題における具体的な手順の概略を図 5.1 を用いて説明する．ぷよぷよでは，同じ色のぷよが4つ以上接続すると消える．もし4つのみに限定すれば，その消える際の形はテトロミノの回転対称数 19 通りである．

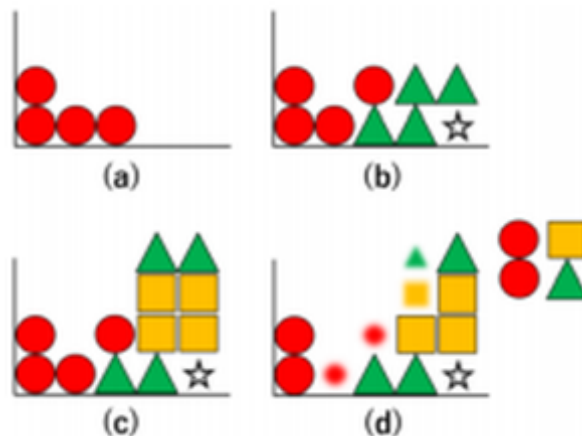


図 5.1: 逆向き生成法

- (a) まず、最後に消える 4 つのぷよを 19 通りの中からランダムに選び、盤上のランダムな場所に配置する (図 5.1a).
- (b) 続いて、2 番目に消える 4 つのぷよを同様ランダムに選び、先ほど置いたぷよ (○) を “一部押し上げるように” 挿入する (図 5.1b). なお、19 通りの中にはぷよが宙に浮いてしまうような場合もあるので、その場合は別の色のぷよを使って下を支える (図 5.1b の☆).
- (c) 最初に消える 4 つのぷよを 19 通りの中からランダムに選び、2 番目に消えるぷよ (△) を一部押し上げるように挿入する (図 5.1c). これで、□から始まる 3 連鎖が構成できる.
- (d) 盤上から 2 組 4 個のぷよを取り除いて、配ぷよとする (図 5.1d). その際、各組は着手として置けるように取り除かなければならない. つまり、埋まっている場所や、左右に 2 つ以上離れた場所からは取り除いてはいけない. また、配ぷよの 2 手目には、必ず最初に消えるぷよ (□) を含めなければならない.
- (e) 最後に、与えられた盤面と配ぷよで深さ 2 の全幅探索を行い、「2 手 3 連鎖ができること」「4 連鎖以上にはならないこと」「1 手目で 3 連鎖にならないこと」「初期盤面で 4 つ以上繋がっているぷよがないこと」などをチェックする. 失敗していれば (a) に戻る.

5.1.2 お邪魔ぷよ生成

上記で述べた通り，逆向き生成法では最後に消えるぷよから順番に，消える形と消える場所をランダムに決定して配置していく．お邪魔ぷよ生成は，この逆向き生成法で1組のぷよを生成するごとに行っていく．生成した4つのぷよそれぞれに対して，上下左右にランダムでお邪魔ぷよを生成するか決定する（生成するお邪魔ぷよは最大で4*4の16通り）．具体的な手順の概略を図5.2を用いて説明する．

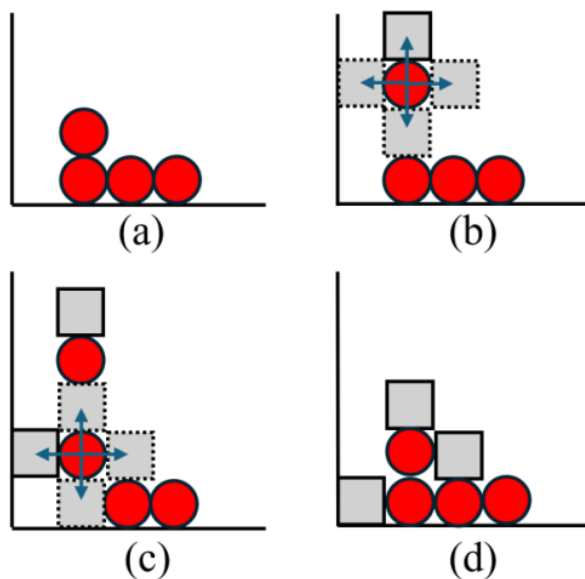


図 5.2: お邪魔ぷよ生成

- (a) まず，逆向き生成法で1組のぷよを生成する（図5.2a）．
- (b) 続いて，(a)で生成したぷよ1つに対して上下左右にお邪魔ぷよを生成するかどうかをそれぞれランダムで決定する（図5.2b）．
- (c) (b)を(a)で生成した残りのぷよに対しても同様に行う．図5.2cは，(b)で行ったぷよとは別のぷよで(b)の操作を行っている様子である．
- (d) お邪魔ぷよを実際に盤上に配置する（図5.2d）．この時お邪魔ぷよが空中に生成される場合があるが，下に何もなければ落下する．

これによって発火ができなくなるような配置になってしまうこともあるが，それらは5.1.1項の手順(e)で検出するのでよいものとした．より効率的な追加法については今後の課題である．

5.1.3 ぷよの色変更

逆向き生成法のオリジナル論文では、ぷよの色について特段の言及はなく、実際、1, 2, 3連鎖目では違う色のぷよが消えていた。しかし、本研究で提唱する作品タイプ4や5では、2連鎖目と3連鎖目などが同じ色であることが望ましい。そこで、お邪魔ぷよ生成に加えもう一つの拡張として、5.1.1項の手順(e)の直前に一定の確率でぷよの色を変更し、かつ重複を許すこととした。

なおこれにより、適当に作った問題では3連鎖が生じない（いわゆる暴発）あるいは初期盤面にぷよが4つ以上接続するような好ましくない事象も比較的高い割合で発生してしまう。この点も5.1.1項の手順(e)でチェックする必要がある。

5.2 一部フィルタの導入

一般に、特定の個性を持ったコンテンツを作成するためには、「そのような個性が出やすいように生成アルゴリズムを工夫する」、「生成された問題に対しそのような個性があるか検査し、合格したもののみをユーザに提供する」という2つのアプローチのどちらかまたは両方が用いられる。5.1.3項で述べたぷよの色変更は前者にあたるが、これだけでは得られた問題が作品性4や5を満たすとは限らない。そのため、作品タイプ4, 5それぞれの要件を満たしているかの検査（フィルタリング）も行うことにする。作品タイプ1から3についてもこのようなフィルタを作成したかったが、定量的な評価が困難な部分もあり、本稿では作品タイプ4, 5のみにとどめた。

5.2.1 作品タイプ4

作品タイプ4は4.4節で述べたように正解連鎖で1つの色が2回以上消えることやスプリットぷよがあるかどうかというところから抽出できると考えられる。以下に、作成したフィルタの具体的な手順を示す。なお、作成したフィルタは2手3連鎖の問題に限定している。そのため、一般的には2連鎖目, 3連鎖目が同色になるとは限らないが、本稿では2連鎖目, 3連鎖目が同色となる¹。

1. まず、逆向き生成法でなぞぷよ問題を生成する。この際、2連鎖目と3連鎖目が同じ色になるように色変更を行う。
2. 続いて、生成したぷよなぞぷよ問題に対して、各ぷよが何連鎖目で消えるかを格納する（連鎖では、複数のぷよの組が消える可能性もある）。

¹作品タイプ4は盤面で繋がっているぷよが別々に消える問題である。つまり、1連鎖目の時点では繋がっているため、3連鎖の問題の場合、同色のぷよが消えるタイミングは2連鎖目, 3連鎖目に限定される。4連鎖以上の問題の場合はこれに限定されない。

3. 2連鎖目で消えるぷよと、3連鎖目で消えるぷよが、発火時の盤面で繋がっている場所があるか確認する。
4. 3. で繋がっているぷよが見つかるまで、1. から3. を繰り返す。

5.2.2 作品タイプ5

作品タイプ5は4.5節で述べたように正解連鎖で同じ色のぷよの連鎖が2回以上続くというところから抽出できると考えられる。以下に、作成したフィルタの具体的な手順を示す。

1. まず、逆向き生成法でなぞぷよ問題を生成する。
2. 続いて、生成したぷよなぞぷよ問題に対して、各連鎖で消える色を格納する（連鎖では、複数のぷよの組が消える可能性もある）。
3. 1連鎖目と2連鎖目および、2連鎖目と3連鎖目で消える色が同じかどうか確認する。
4. 3. で消える色が同じになるまで1. から3. を繰り返す。

5.3 未実装な生成手法案

本稿では、逆向き生成法で生成した問題に対して、フィルタを用いて作品タイプ4、5であるかを検査して抽出した。一方で、今回実装できなかったが、5.2節で述べたように、「生成アルゴリズムを工夫する」ことで作品性を満たす問題を抽出することもできる。そこで、本節ではその場合の作品タイプ4、5のそれぞれの生成手法について述べる。簡単のため、2手3連鎖の問題で考える。

5.3.1 作品タイプ4

作品タイプ4は、5.2.1項の脚注で述べたように、1連鎖目は別の色、2連鎖目、3連鎖目は同じ色のぷよが消える。これを逆向き生成法²で実際に考えてみる。

まず、3連鎖目に消えるぷよを配置する。これは、どこに置いても支障はないため、ランダムに配置する。次に、2連鎖目に消えるぷよを配置する。これは3連鎖目に消えるぷよと同色であるため、「3連鎖目に消えるぷよと繋がらない、かつ3連鎖目に消えるぷよを一部押し上げるように」挿入する。最後に、1連鎖目に消えるぷよを配置する。この際、「2連鎖目と3連鎖目で消えるぷよが一部繋がり、かつ4つ以上繋がらないように」挿入することで、作品タイプ4の問題が作成できる。

²5.1.1項で説明したように、逆向き生成法は「3連鎖目に消えるぷよ」、「2連鎖目に消えるぷよ」、「1連鎖目に消えるぷよ」という順番で問題を作成していく生成法である。

5.3.2 作品タイプ5

作品タイプ5は、連鎖をする時に同色の連鎖が続くため、「1, 2連鎖目が同色」, 「2, 3連鎖目が同色」のいずれか、もしくは両方を満たしている必要がある。これも同様に逆向き生成法で考えてみる。前者と後者はどちらも作品タイプ5ではあるが、生成の際に考えるべきことが多少異なるため、別々に述べていく。

「1, 2連鎖目が同色」の場合について考える。まず、3連鎖目に消えるぷよを配置する。これはどこに置いても支障がないためランダムに配置する。次に、2連鎖目に消えるぷよを配置する。これも先ほど同様、一部押し上げるように挿入さえすればどこに置いても支障がない。最後に1連鎖目に消えるぷよを配置する。これは2連鎖目に消えるぷよと同色であるため、「2連鎖目に消えるぷよと繋がらないように、かつ2連鎖目に消えるぷよを一部押し上げるように」挿入することで作成できる。

同様に「2, 3連鎖目が同色」の場合についても考える。まず、3連鎖目に消えるぷよを配置する。これはどこに置いても支障がないためランダムに配置する。次に、2連鎖目に消えるぷよを配置する。これは3連鎖目に消えるぷよと同色のため、「3連鎖目に消えるぷよと繋がらないように、かつ3連鎖目に消えるぷよを一部押し上げるように」挿入する。最後に1連鎖目に消えるぷよを配置する。その際、「一部押し上げた際に、2連鎖目と3連鎖目のぷよが4つ以上繋がらないように」挿入することで作成できる。

最後に、「1, 2, 3連鎖目が同色」の場合については、2連鎖目, 1連鎖目に消えるぷよを配置する際に、「盤面にある連鎖で消えるぷよと繋がらないように一部押し上げ、かつ押し上げた際に4つ以上繋がらないように」挿入することで作成できる。

第6章 問題生成・評価

本章では、実際に5章で提案した手法で問題を生成し、作品性の高い問題が生成出来ているか主観評価を行った。まず、問題生成と評価内容、結果について説明する(6.1節)。次に、各作品タイプごとの典型例について説明する(6.2節)。

6.1 問題生成・評価内容

本節では、問題生成や評価の内容について実際に図を交えながら説明する。

本稿では、5.2節でフィルタを導入した作品タイプ4, 5の問題を生成した。このフィルタを用いて逆向き生成法でそれぞれ20問ずつ問題を生成し、これらに対して主観評価を行った。

評価は、「作品性があるか」、「良い問題か悪い問題か」、「難しさ」の3項目を用いて行う。まず、「作品性があるか」は言葉通り、問題が生成時にフィルタリングした作品タイプの要件を満たしているかを評価している。次に、「良い問題か悪い問題か」について説明する。ここで言うなぞぷよの良い問題とは、意外な手や意外な消え方をする問題のことである。この良い問題は4章で述べたように、基本的になんらかの作品性を持っているが、反対に作品性をもっている問題が良い問題とは限らない(図6.1)。また、作品性に関しても作品タイプ4, 5で作成した問題が別の作品性を持つ場合もある(図6.2)。そのため、作品性とは別に「良い問題か悪い問題か」という項目を追加し、評価した。

最後に、「難しさ」について説明する。前述の通り、本稿では主観評価を行っているが、可能な限り客観的な指標とするため、基準を設けた。「難しさ」は5段階で評価しており、「1: ぷよの繋がりが分かりやすく、配ぷよの置き方も単純」、「2: ぷよの繋がりが少し分かりにくい、配ぷよの置き方は単純」、「3: 配ぷよを少し工夫しておく必要があるが、あくまで実践レベルに近い」、「4: すこし特殊な置き方が必要であり、どう置けばいいか分かりにくい」、「5: 4よりぷよがばらばらであったり、繋がりにくくなっている、時間がかかる」という基準の元行った。以下に、実際に生成した全問題の評価表を示す。

表 6.1: 作品タイプ 4 の評価

	作品性があるか	良い問題か悪い問題か	難しさ
問題 1	○	良い問題	4
問題 2	×	良い問題	4
問題 3	○	良い問題	3
問題 4	○	良い問題	2
問題 5	○	悪い問題	2
問題 6	×	悪い問題	1
問題 7	○	悪い問題	2
問題 8	○	良い問題	2
問題 9	×	悪い問題	2
問題 10	○	良い問題	4
問題 11	×	良い問題	3
問題 12	×	悪い問題	2
問題 13	×	良い問題	3
問題 14	×	悪い問題	1
問題 15	×	悪い問題	2
問題 16	○	良い問題	4
問題 17	○	悪い問題	2
問題 18	×	良い問題	3
問題 19	○	良い問題	3
問題 20	×	良い問題	3

作品タイプ 4 のフィルタを用いて生成した問題 20 問の内、作品性がある問題は 10 問，良い問題は 12 問，難しさの平均は 2.6 となった。

表 6.2: 作品タイプ5の評価

	作品性があるか	良い問題か悪い問題か	難しさ
問題 1	○	良い問題	2
問題 2	○	良い問題	2
問題 3	○	良い問題	3
問題 4	○	良い問題	2
問題 5	○	良い問題	2
問題 6	○	良い問題	3
問題 7	○	良い問題	2
問題 8	○	良い問題	4
問題 9	○	良い問題	2
問題 10	○	良い問題	3
問題 11	○	良い問題	2
問題 12	○	良い問題	5
問題 13	○	良い問題	3
問題 14	○	良い問題	2
問題 15	○	悪い問題	1
問題 16	○	良い問題	3
問題 17	×	悪い問題	2
問題 18	○	悪い問題	1
問題 19	○	良い問題	3
問題 20	○	良い問題	3

作品タイプ5のフィルタを用いて生成した問題20問の内、作品性がある問題は19問、良い問題は17問、難しさの平均は2.5となった。

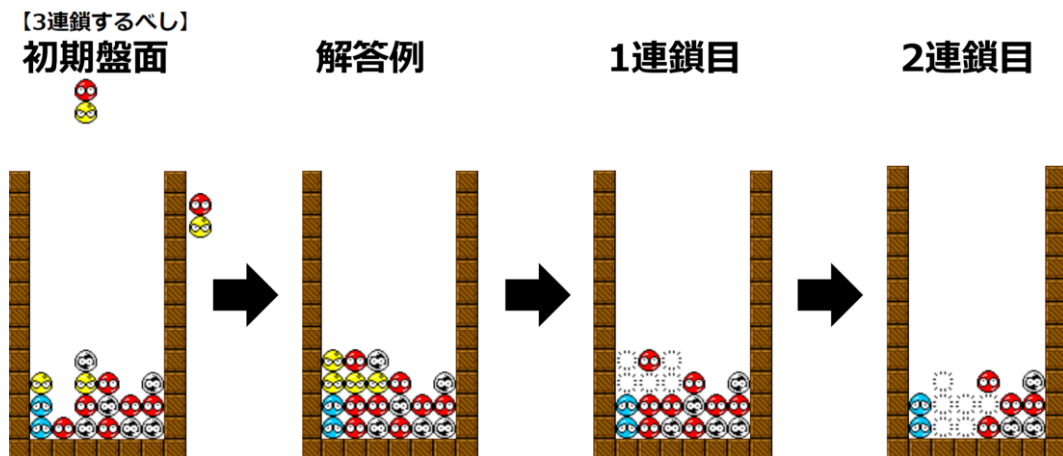


図 6.1: 作品性がある悪い問題

図 6.1 は、「作品性がある悪い問題」の例である。これは、作品タイプ 5 の問題として生成された問題である。図 6.1 の消え方を見てもらえれば分かる通り、2 連鎖目、3 連鎖目が赤ぷよの同色連続消しとなっているため、作品タイプ 5 を満たしている。しかし、そもそも黄ぷよを消すために配ぷよが盤面左側に置かなければいけない点や、3 連鎖目の赤ぷよの繋がりが分かりやすいという点で正解手順の置き方が分かりやすい点で悪い問題と言える。

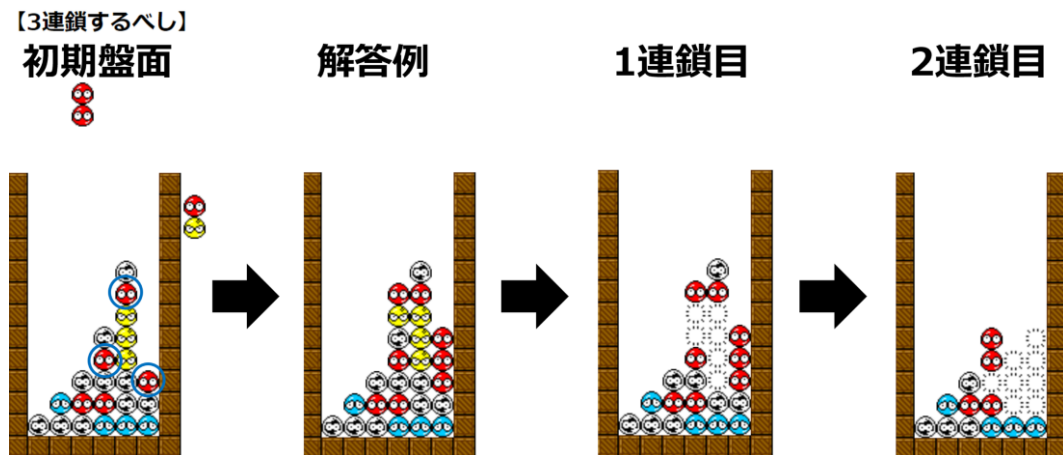


図 6.2: 意図と違う作品性がある良い問題

図 6.2 は、「意図と違う作品性がある良い問題」の例である。これは、作品タイプ 4 の問題として生成された問題であるが、作品タイプ 4 の作品性はない。しかし、図 6.2 初期盤面で青丸で囲ったぷよがどう繋がるか分かりにくい点と 2 連鎖目、3 連鎖目で同色連続消しがあるという点で作品タイプ 1,5 のある良い問題と言える。

6.2 典型的な生成問題例

本節では、生成した問題の典型的な良い問題、悪い問題の例を紹介する。

6.2.1 作品タイプ4の生成問題例

本項では、作品タイプ4の典型的な生成問題例を紹介する。
まず、典型的な良い生成問題例（図6.3, 6.4）を紹介する。

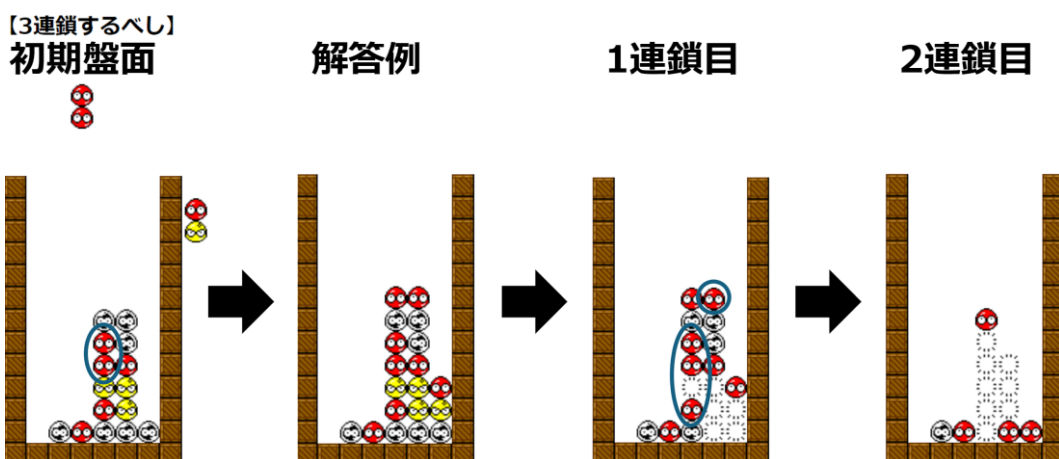


図 6.3: 作品タイプ4の良い生成問題例1

この問題は、初期盤面（図6.3一番左）中段の青丸で囲ったぷよと囲っていないぷよがそれぞれ2連鎖目、3連鎖目として消える。お邪魔ぷよを活用して上手く2連鎖目と3連鎖目が繋がらないようにしている点で良い問題と言える。なお、2連鎖目に消えるぷよは1連鎖目（図6.3右から2個目）の青丸で囲ったぷよとなっている。

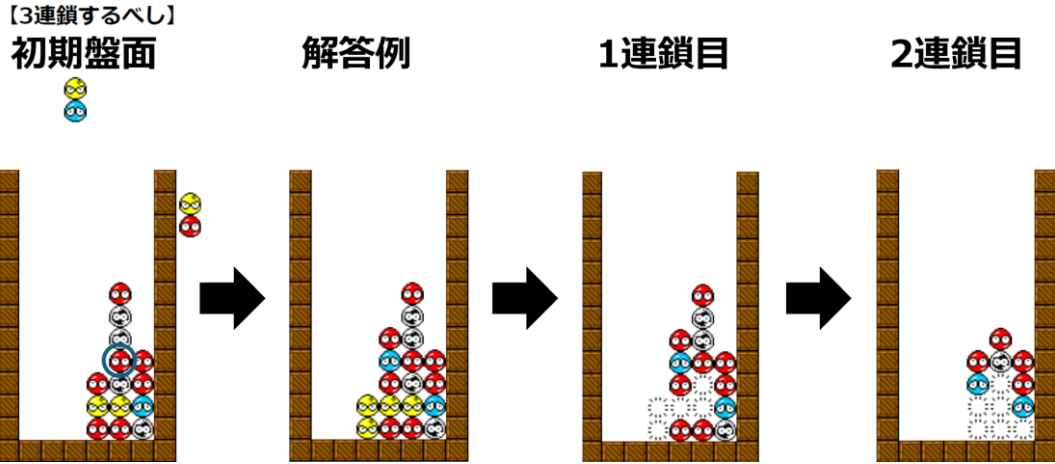


図 6.4: 作品タイプ4の良い生成問題例2

この問題は、初期盤面（図6.4一番左）で青丸で囲ったぷよと囲っていないぷよがそれぞれ2連鎖目、3連鎖目として消える。1連鎖目、2連鎖目は比較的繋がり方が分かりやすいが、3連鎖目がどう繋がるかが分かりにくくなっている。お邪魔ぷよが2つあることで2連鎖目との多連結消しを防ぎつつ、3連鎖目がうまく繋がっており、一見繋がらなそうなぷよが繋がる点で良い問題と言える。また、配ぷよ1つ目の組みの青ぷよを右から3列目に置くことで、赤ぷよが多連結消しにならないようにおく必要もある。

次に、典型的な悪い生成問題例（図 6.5, 6.6）を紹介する。

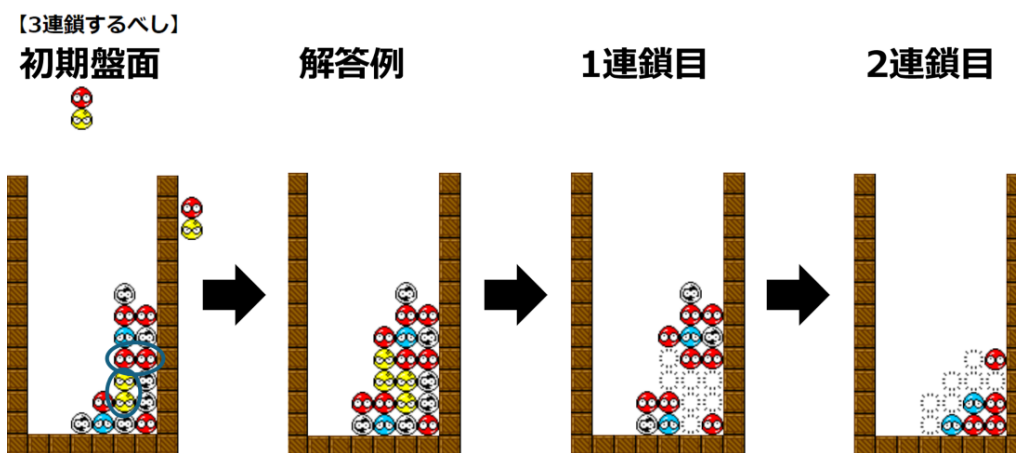


図 6.5: 作品タイプ 4 の悪い生成問題例 1

この問題は、上段の赤 2 つがスプリットぷよとなっている点や赤ぷよがばらばらになっており、繋がりにくそうな点で良い問題に見える。しかし、実際は青丸で囲った赤ぷよと黄ぷよの組みのどちらでもクリア条件を満たせるため、ある程度適当に置いても正解してしまう点で悪い問題と言える。これは、解答が複数ある時、2 色のぷよが 1 連鎖目の候補になる問題を却下することで改善できるのではないかと考えられる。

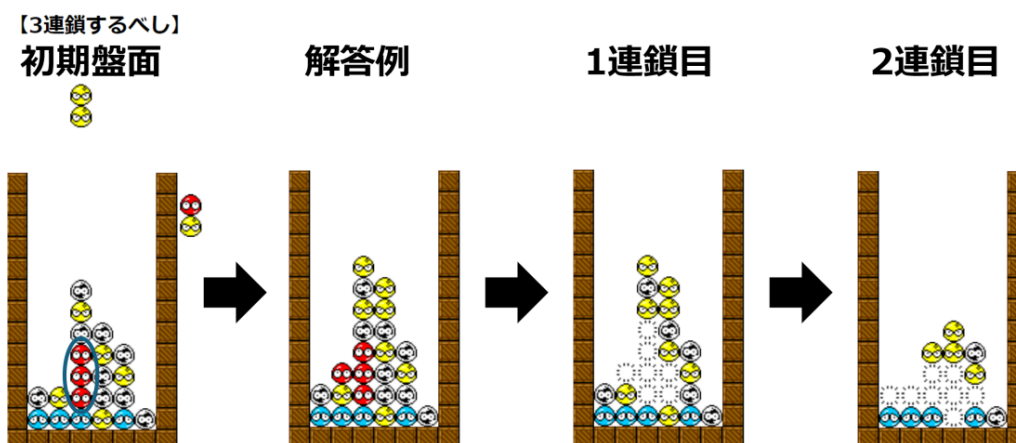


図 6.6: 作品タイプ 4 の悪い生成問題例 2

この問題は、初期盤面（図 6.6 一番左）で赤ぷよが 3 つ繋がってしまっており、かつ 1 連鎖分しかないため、赤ぷよの繋がりが分かりやすい。また、3 連鎖目は青ぷよを活用して上手く繋げているが、消え方がカギ積み近く分かりやすい点で悪い問題と言える。これは、スプリットぷよ以外の色（1 連鎖目に消える色）のぷよが 3 つ繋がる問題を却下することで改善できるのではないかと考えられる。

6.2.2 作品タイプ5の生成問題例

本項では、作品タイプ5の典型的な生成問題例を紹介する。
まず、典型的な良い生成問題例（図6.7, 6.8）を紹介する。

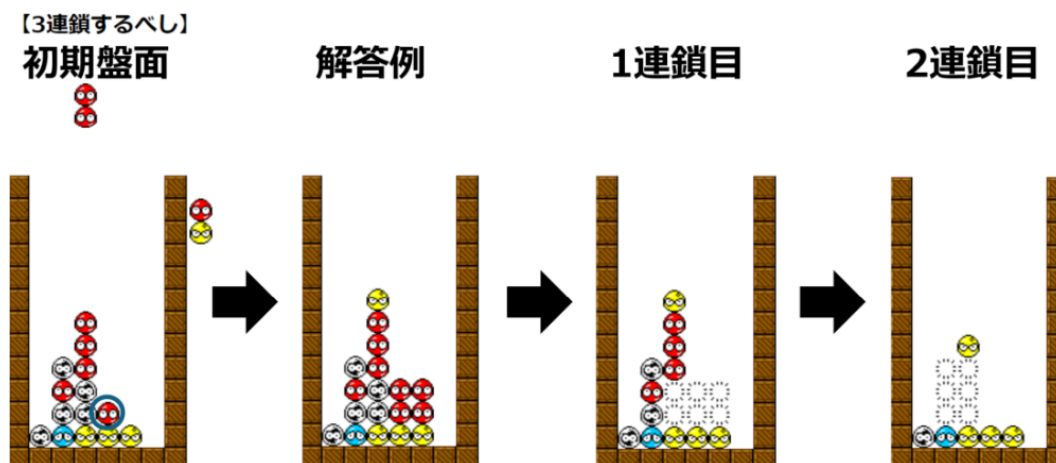


図 6.7: 作品タイプ5の良い生成問題例 1

この問題は、初期盤面（図6.7一番左）の青丸で囲ったぷよを含む1連鎖目によって2連鎖目以降が繋がって消える問題である。連鎖の消え方自体はシンプルだが、黄ぷよからも連鎖が繋がりそうであり、1連鎖目が分かりにくい点で良い問題と言える。

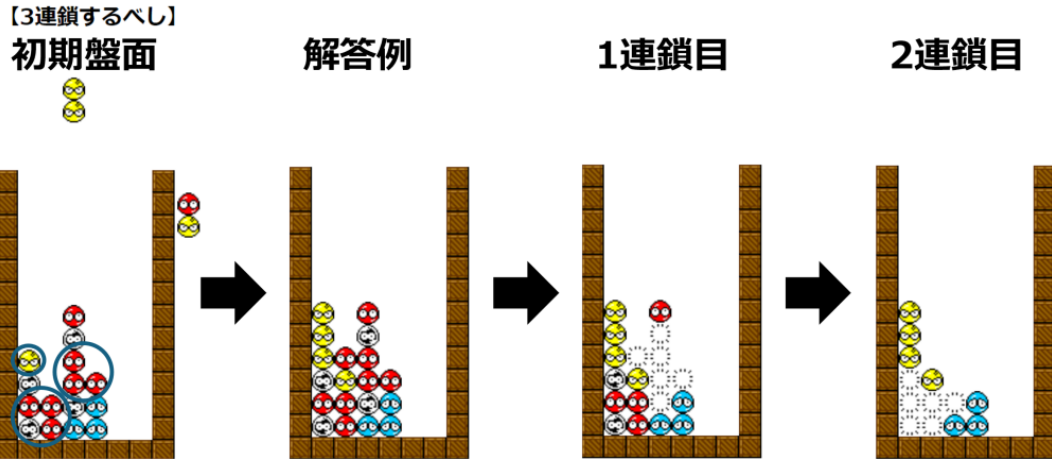


図 6.8: 作品タイプ 5 の良い生成問題例 2

この問題は、初期盤面（図 6.8 一番左）の中段の赤ぷよから連鎖が繋がる問題である。青丸で囲った 3 組のぷよがいずれも 1 連鎖目の候補となっており、かつ正解手順が 1 通りしかないため、1 連鎖目が分かりにくい点で良い問題と言える。また、この問題は赤ぷよが多く、無駄多連結消しや同時消しが発生しやすい点で作品タイプ 2 でもある。

次に、典型的な悪い生成問題例（図 6.9, 6.10）を紹介する。

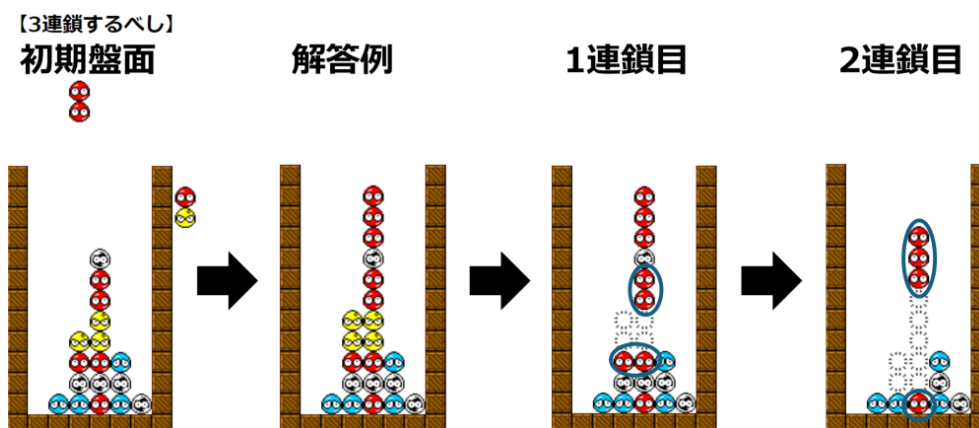


図 6.9: 作品タイプ5の悪い生成問題例 1

この問題は、黄ぷよ、赤ぷよ、赤ぷよの順番で連鎖が繋がるが、消え方が単純で分かりやすい点で悪い問題と言える。この分かりやすさの原因は盤上の一部ぷよが高すぎるからではないかと考える。図 6.9 の解答例を見てほしい。明らかに高く詰みあがっているぷよがある。この高いぷよ群によって、単純な落下で消える連鎖が多く、分かりやすくなっていると考えられる。また、図 6.9 の 1 連鎖目、2 連鎖目で青丸で囲ったぷよがお邪魔ぷよを挟んで単純に積みあがっている点も分かりやすさの理由であろう。そのため、盤面の高さに 4 つ分（1 連鎖分）の差があるか、もしくは 1 列に連鎖に関するぷよの総数（3 連鎖であれば 4×3 の 12 個）の半分以上のぷよが存在する場合却下することで改善できるのではないかと考えられる。

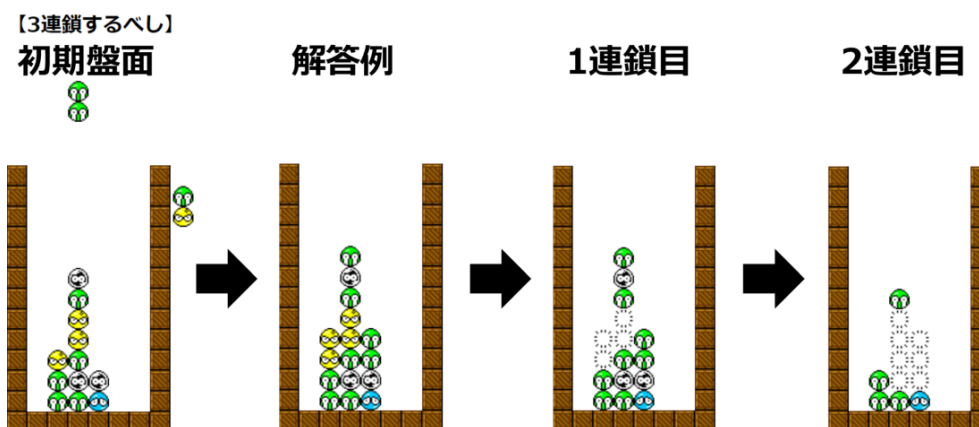


図 6.10: 作品タイプ5の悪い生成問題例 2

この問題は、正解手順での連鎖が 2 通り、片方は作品タイプ 5 を満たしていない消し方であるという点で悪い問題と言える。これは、単純に正解手順での連鎖が複数ある時、一つでも作品タイプを満たさない消し方があれば却下することで改善できるのではないかと考えられる。

第7章 おわりに

本研究では、人気パズルゲームぷよぷよをもとに考えられた“なぞぷよ”における作品性の高い問題を作ることを目的に、いくつかの作品性を実現するための手法を提案した。

まず、なぞぷよにおける作品性について明らかにするために、実際に高い評価を受けている問題30問を解き、作品性の抽出を行った。結果として、「繋がりが分かりにくい」、「同時消しが発生しやすい」、「初期盤面で想像できる連鎖と違う連鎖の順番をする」、「初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする」、「連鎖をする時に同色の連鎖が続く」の5つの作品性を抽出することができた。

次に、作品性の高い問題を作成するための手法を提案した。これは、「お邪魔ぷよの生成」、「ぷよの色変更」、一部作品タイプを抽出するための「フィルタ」である。「お邪魔ぷよの生成」は、調査を行ったなぞぷよ問題の多くで実際に使われており、作品性を満たすために「お邪魔ぷよ」が必要な場合が多いため導入した。「ぷよの色変更」は、抽出した作品性の内、「初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする」、「連鎖をする時に同色の連鎖が続く」における正解手順での連鎖時に同じ色が2回消える必要があるが、既存の生成手法では連鎖が全て違う色で作成されてしまい、この2つの作品タイプを抽出することができないため導入した。これに合わせ、フィルタもこの2つを抽出するものを実装した。「初期盤面とはちがうぷよの繋がり方をする」問題は、盤上の各ぷよが何連鎖目で消えるかを格納し、盤面で繋がっているぷよが別々の連鎖で消えるかを確認している。同様に、「連鎖をする時に同色の連鎖が続く」問題は、盤上の各ぷよが何連鎖目で消えるかを格納し、正解手順での連鎖時に連続で同じ色が消えているかどうかを確認する。

提案した手法で実際に2つの作品タイプの問題を20問ずつ生成したところ、高頻度で作品性の高い問題が生成できることを確認できた。特に、作品タイプ5については、20問の内、作品性がある問題19問、良い問題17問という結果を得られた。これらの結果から、提案手法によって、作品性の高い問題の抽出ができることが分かった。

現時点では、抽出した作品性5つの内2つではあるが、作品性の高い問題が生成できることが確認できた。また、作品性の高い問題の生成における「お邪魔ぷよ」の有効性も確認できた。本研究は、なぞぷよにおける良い問題の生成に関する研究の進歩に貢献できると考える。

今後の展望としては、今回実装できなかった残りの3つの作品タイプの「フィルタ」や逆向き生成法の生成アルゴリズムを工夫して作品性を満たす生成手法を実

装し、より多くの作品性の高い問題を生成できるようにしたいと考えている。加えて、また、本稿では、評価が主観評価のみとなってしまったが、被験者実験を行うことで客観的に作品性の高い問題が生成出来ているかといった検証を行う必要があると考えている。

参考文献

- [1] 高橋竜太郎, 池田心. 連鎖構成力向上のためのぷよぷよの問題作成, 情報処理学会 第 39 回ゲーム情報学 (GI) 研究発表会 (2018).
- [2] 富沢大介, 池田心. 落下型パズルゲームの定石形配置法とぷよぷよへの適用, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.11, pp.2560-2570, 2012-11.
- [3] 隅山淳一郎, 橋山智訓, 田野俊一. ぷよぷよにおける人間のプレイデータの特徴量抽出, 31st Fuzzy System Symposium (2015).
- [4] 広瀬正幸, 伊藤琢巳, 松原仁. 逆算法による詰将棋の自動創作, 第 18 回ゲームプログラミングワークショップ, 2013-11.
- [5] 山崎隆介, Reijer Grimbergen. 連鎖型パズルゲームにおけるパズル問題の自動創作, 第 18 回ゲームプログラミングワークショップ, 2013-11.
- [6] 牧田光平, 池田心. 連鎖構成力向上のための多様で面白いなぞぷよ提供法の提案, 情報処理学会 第 41 回ゲーム情報学 (GI) 研究報告, Vol.2019-GI-41, pp.1-8, 2019.
- [7] David Silver, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Matthew Lai, Arthur Guez, Marc Lanctot, Laurent Sifre, Dhharshan Kumaran, Thore Graepel, et al. Mastering chess and shogi by self-play with a general reinforcement learning algorithm. arXiv preprint arXiv:1712.01815, 2017.
- [8] Volodymyr Mnih, Koray Kavukcuoglu, David Silver, Alex Graves, Ioannis Antonoglou, Daan Wiersma, Martin Riedmiller. Playing Atari with Deep Reinforcement Learning. NIPS Deep Learning Workshop, 2013.
- [9] Barbara De Kegel, Mads Haahr, Procedural Puzzle Generation: A Survey, IEEE Transactions on Games, Vol.12(1), pp.21-40, 2020.
- [10] Yubin Liang, Wanxiang Li and Kokoro Ikeda, Procedural Content Generation of Rhythm Games Using Deep Learning Methods, International Conference on Entertainment Computing (ICEC) & Joint Conference on Serious Games (JCSG), pp.134-145, Arequipa, Perú, 12th November 2019.

- [11] ”SEGA -ぷよぷよポータルサイト-”, 株式会社セガゲームス. 2024-01-15. <https://puyo.sega.jp/portal/index.html>. (2024/01/20 アクセス) .
- [12] ”なぞぷよのご紹介”, S E G A バーチャルコンソール公式 Web サイト. 2015-08-19. <https://vc.sega.jp/3ds/nazopuyo/>. (2024/01/20 アクセス)
- [13] ”なぞぷよ傑作選”, ふよぷよキャンプ. 2022-10-17. <https://puyo-camp.jp/posts/81250>. (2024/01/19 アクセス)
- [14] ”「カギ積み」を組んでみよう”, ふよぷよキャンプ. 2018-11-19. <https://puyo-camp.jp/posts/68976>. (2024/01/20 アクセス)
- [15] ”マルチ (同時消し)”, ふよブロ! 【ぷよぷよ連鎖他・総合攻略サイト】. 2020-12-08. <https://puyo-euphonic.com/puyo-word-multiple>. (2024/01/21 アクセス)
- [16] ”暴発”, ふよブロ! 【ぷよぷよ連鎖他・総合攻略サイト】. 2020-11-12. <https://puyo-euphonic.com/puyo-word-outburst-2>. (2024/01/24 アクセス)
- [17] ”9割の人が使う形「GTR」のつくり方”, ふよぷよキャンプ. 2023-06-01. <https://puyo-camp.jp/posts/169779>. (2024/01/30 アクセス)
- [18] ”「階段積み」を組んでみよう”, ふよぷよキャンプ. 2018-11-19. <https://puyo-camp.jp/posts/68975>. (2024/01/30 アクセス)

付録A 特殊な問題

本付録では、4章で特殊な問題の例として挙げた問題2、問題22についての解説を述べる。

A.1 問題2

問題2の正解と失敗例について述べる。

まず、問題2の初期盤面、問題の解答例、1連鎖目、2連鎖目の消え方を図A.1にそれぞれ示す。

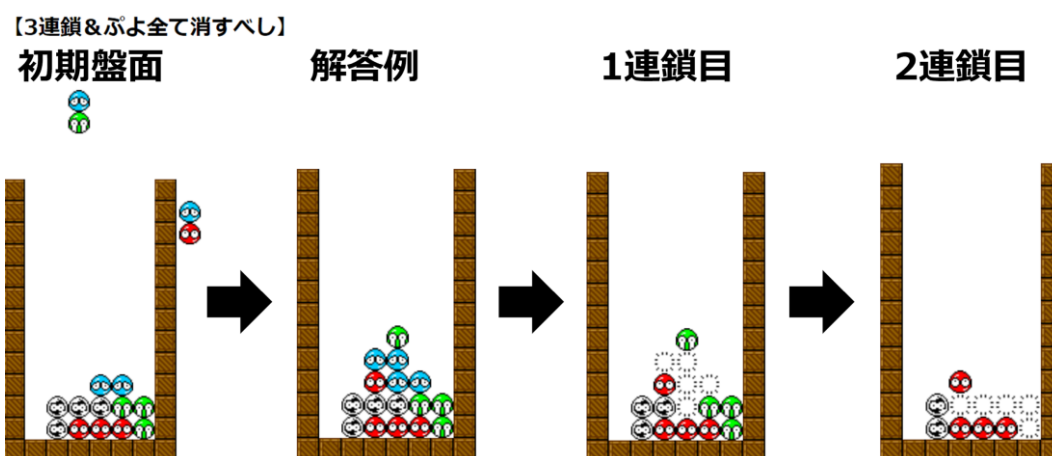


図 A.1: 問題2

この問題は、青ぶよ、緑ぶよ、赤ぶよの順に消える。この順に消えることさえ分かれば3連鎖すること自体は簡単である。しかし、クリア条件が特殊で「3連鎖&ぶよ全て消すべし」となっており、色ぶよだけでなくお邪魔ぶよも消さなければいけない。そのため、クリア条件を満たすために工夫する必要がある問題である。

次に、この問題の失敗例を図 A.2, A.3 に示す.

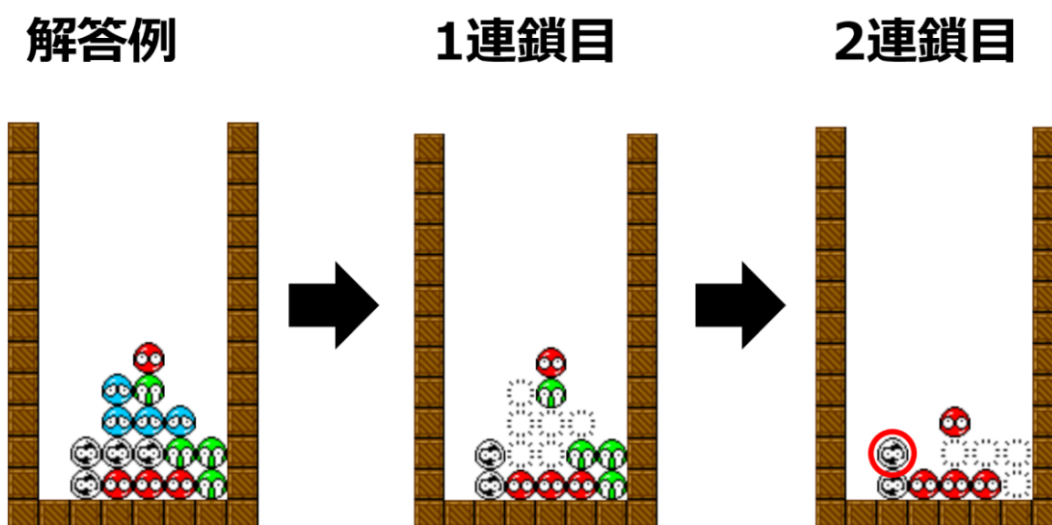


図 A.2: 問題 2 失敗例 1

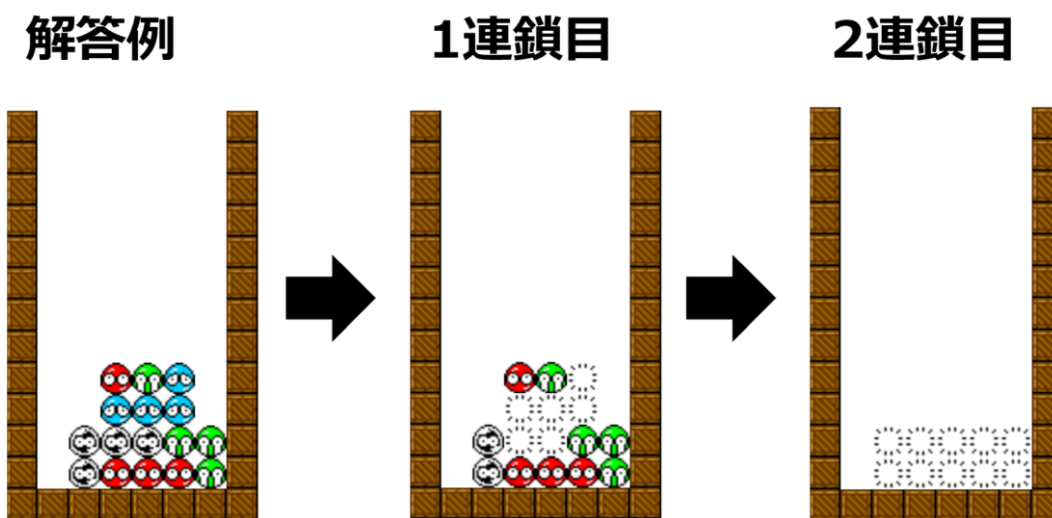


図 A.3: 問題 2 失敗例 2

図 A.2 は、クリア条件「3連鎖」のみを達成した置き方である。2連鎖目の赤丸で囲ったお邪魔ぶよが消えないため失敗となっている。また、図 A.3 は、クリア条件「ぶよ全て消す」を達成した置き方である。2連鎖目で全て消えてしまうため、3連鎖できておらずこちらも失敗となっている。

A.2 問題22

問題22の正解と失敗例に加えて、作品性2~5があるのかについて述べる。

まず、問題22の初期盤面、問題の解答例、1連鎖目、2連鎖目、3連鎖目の消え方を図A.4にそれぞれ示す。

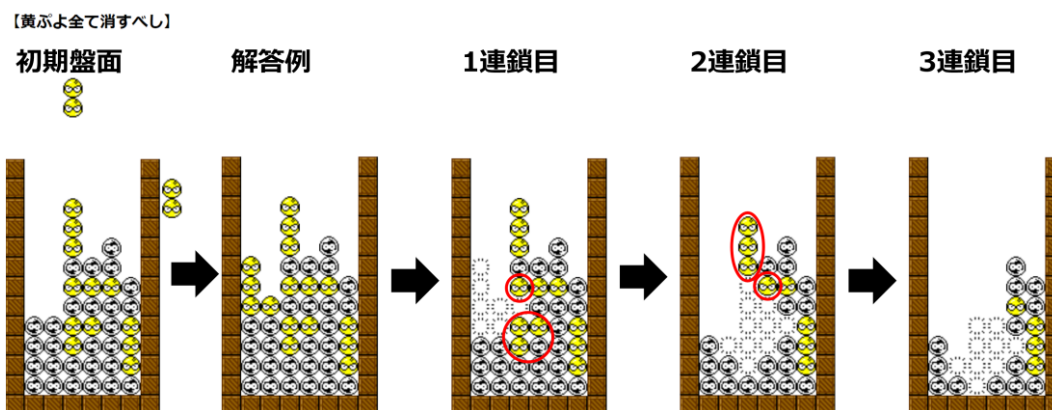


図 A.4: 問題22

この問題は、盤面が黄ぷよとお邪魔ぷよのみの問題である。お邪魔ぷよを上手く使っており、黄ぷよが多連結消ししないように連鎖が繋がっている点で良い問題と言える。また、クリア条件はここまで紹介した他の問題とは違い、「黄ぷよを全て消すべし」となっており、正解手順での連鎖が何連鎖なのか分からなくなっている。これに加えて、1連鎖目で消えるぷよが全て配ぷよとなっている点も特殊だと言える。

次に、この問題の失敗例を図 A.5 に示す。

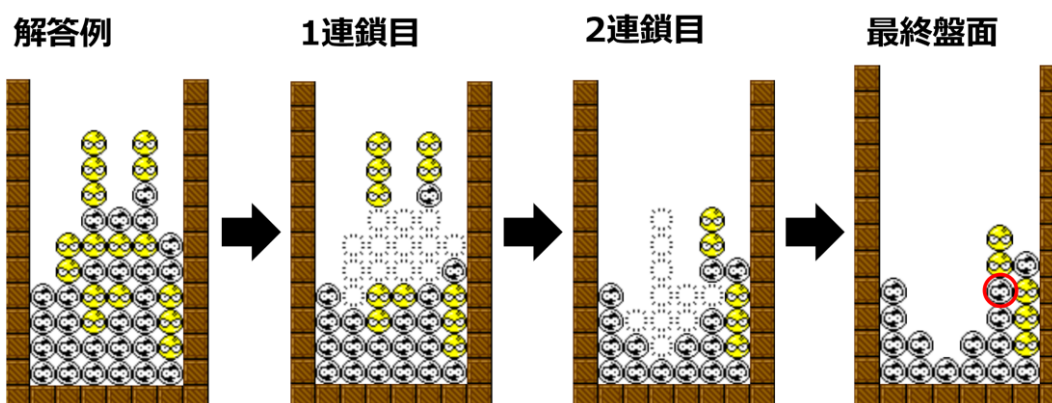


図 A.5: 問題 22 失敗例

この失敗例では、黄ぷよの3連鎖でクリア条件を満たそうとした置き方の例である。一見すると、この問題はこの失敗例のように消せるようにも見える。実際、最終盤面（図 A.5 一番右）を見てもらえれば分かる通り、赤丸で囲ったぷよが無ければ黄ぷよの3連鎖となり、全ての黄ぷよを消せるのである。

最後に、作品性 2~5 があるのかについて述べる。

まず、作品性 2 を満たしている点について述べる。前述の通り、この問題は盤面が黄ぷよとお邪魔ぷよのみの問題となっている。また、初期盤面（図 A.4 一番左）を見てもらえれば分かる通り、3 つ繋がっているぷよが 4 つも盤上に存在する。このことから、作品性 2 を満たしていると言える。さらに、これに加えて図 A.7 に赤丸で示した通り、盤面の 1 連鎖目の候補が 3 つ繋がったぷよとなっている。この問題のクリア条件が「4 連鎖するべし」であれば、黄ぷよの総数が 16 個であるため、盤面の状態でそのまま繋げないことが分かる。しかし、クリア条件が「黄ぷよを消すべし」であるため、このまま繋がるように思ってしまい、結果として無駄多連結消しが起こってしまう。

次に、作品性 4 を満たしている点について述べる。この問題は正解手順での連鎖（図 A.4）で同色のぷよが 2 回以上消えている。また、図 A.7 で赤丸で囲ったぷよが左から、それぞれ 2 連鎖目、4 連鎖目、4 連鎖目として消えるスプリットぷよになっている。

最後に、作品性 3, 5 を満たしている点について述べる。作品性 3 に関しては、失敗例（図 A.5）で述べたように、一見すると、3 連鎖の問題に見えるため満たしている。また、作品性 5 に関しては、正解例（図 A.4）を見てもらえれば同色連続消しがあることは自明である。

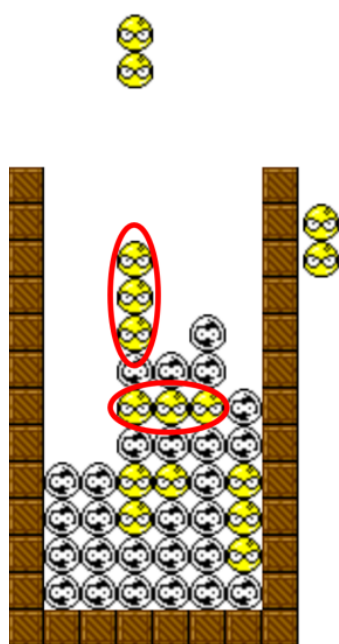


図 A.6: 作品性 2

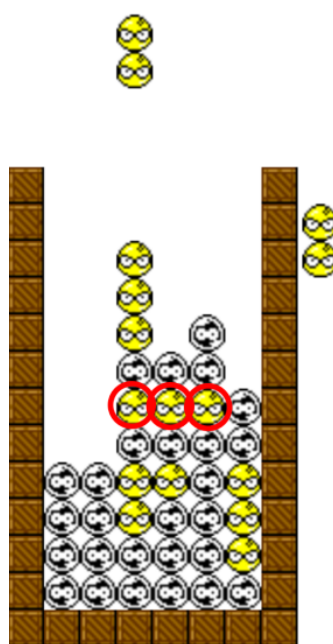


図 A.7: 作品性 4