情報処理学会論文誌　Vol.55　No.11　2336–2343 (Nov. 2014)

一般化三並べの拡張：目標動物の組合せ

八鍬 友貴[1]　本田 耕一[1]　成澤 和志[1,a)]　篠原 歩[1]

受付日 2014年2月21日, 採録日 2014年9月12日

概要：一般化三並べは，Frank Harary によって提案された 2 人完全情報ゲームであり，碁盤目状の盤面に先手後手が交互に石を 1 つずつ置いていき，あらかじめ定められた動物（連結した石で定義される形）を先に作ったプレイヤが勝ちとなるゲームである．本論文は，これを拡張し，目標動物の組を目標とする 4 種類の新たなゲーム（Or，n 細胞 Or，And，NotAnd）を提案する．そしてこれらのゲームにおける性質を解析し，各動物に対して勝ち型と負け型の分類を行う．

キーワード：ポリオミノ，アチーブメントゲーム，一般化三並べ，畳敷き戦略，必勝法，勝ち型，負け型

Extension of Generalized Tic-Tac-Toe: Combinations of Target Polynomioes

Tomoki Yakuwa[1]　Koichi Honda[1]　Kazuyuki Narisawa[1,a)]　Ayumi Shinohara[1]

Received: February 21, 2014, Accepted: September 12, 2014

Abstract: Frank Harary introduced achievement games for polyominoes as generalized Tic-Tac-Toe. Two players alternately mark cells on a board, and the player who first achieves a given polyomino wins. In this paper, we propose four new games: Game Or, Game nCellsOr, Game And and Game NotAnd. The target of each game is a combination of polyominoes. We analyze the proposed games, and decide whether polyominoes are *winners* or *losers*.

Keywords: polyomino, achievement game, generalized Tic-Tac-Toe, pairing strategy, winning strategy, winner, loser

1. はじめに

三並べ[*1]とは，3×3 の盤面上に先手後手が交互に石を 1 つずつ置き，縦，横，または斜めに石を 3 つ並べた方が勝ちというゲームである．三並べでは先手後手が最善手を打つ限り，ゲームの結果が引き分けになることがよく知られている．

Frank Harary によって提案された一般化三並べは，三並べを一般化した 2 人ゲームであり，無限の大きさの碁盤面上に先手後手が交互に石を 1 つずつ置き，あらかじめ定められた動物（正方形の辺どうしで連結した石で定義される形）を，90 度単位の回転と反転を許して先に作ったプレイヤが勝ちという 2 人完全情報ゲームである [1], [2], [3], [4]．この一般化によって，古くから知られているとても簡単なゲームが，数学的な研究の対象となるゲームへと変化した．

一般化三並べでは，石を置くことが自らの不利にはならないことから，もし後手が勝つことができる手順が存在するならば，先手はその手順を後手に対して行うことで必ず勝つことができるため，後手必勝となることはない．そのため，一般化三並べにおいて両プレイヤが最善を尽くしたとき，先手必勝である形を「勝ち型」，無限に続けても決着がつかない形を「負け型」と呼ぶ．個々の動物について，それが勝ち型なのか負け型なのかを分類して証明することが基本的な興味の対象となっている．これまでの研究で，勝ち型は実際に必勝手順を示すことで，負け型は畳敷き戦略などの証明法によって，ほとんどの動物が分類されてき

1　東北大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980–8579, Japan
a)　narisawa@ecei.tohoku.ac.jp

*1　三目並べや○×ゲームと呼ばれることもある．

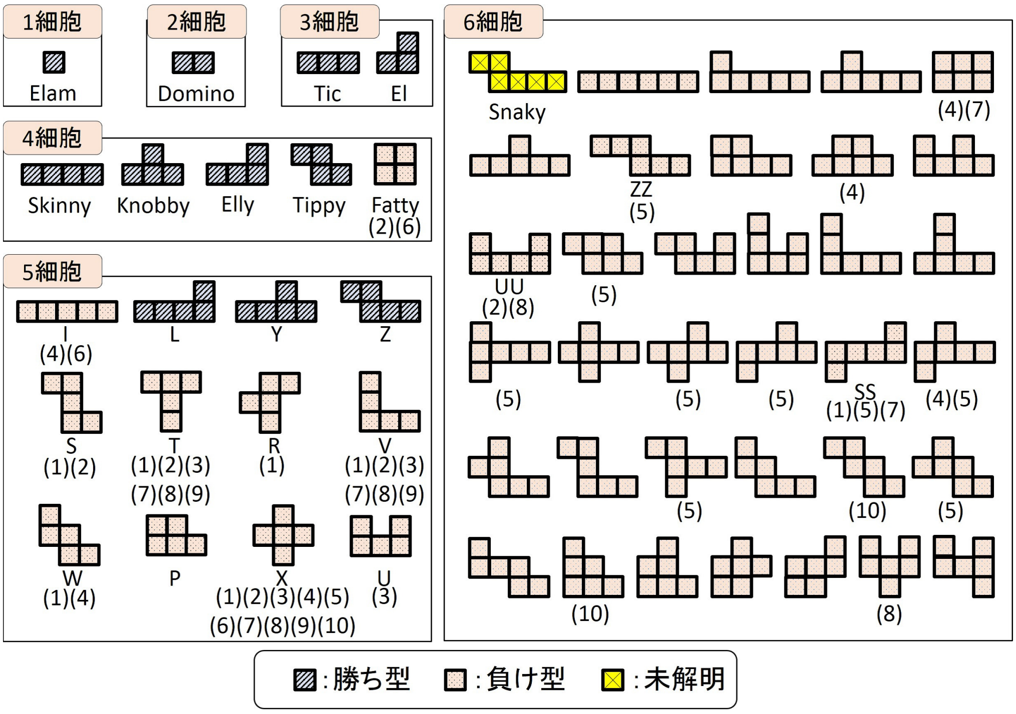


図 1　一般化三並べにおける 1 細胞～6 細胞動物の一覧と勝ち型，負け型の判定結果．動物の下に記載した括弧付きの番号は，図 2 における畳敷きへの対応を表す

Fig. 1　Win-loss standings of polyominoes with 1–6 cells in generalized Tic-Tac-Toe.

たが，6 細胞の Snaky だけはその勝敗が未解明の課題として残されている（図 **1**）．なお，7 細胞以上の動物はすべて負け型である．

一方，一般化三並べに対して，ハンディキャップ [4], [5], [6], [7] や，盤面の形 [3], [8], [9], [10], [11] や，先手が 1 つ，後手が 2 つずつ石を置く [11], [12], [13] や，目標の石の配置 [12] のような様々な拡張が行われた．また，1 手に置く石の個数を一般化した拡張もある [14]．

本研究では，この一般化三並べを，複数の動物の組合せを目標型にするという着眼点で拡張した以下の 4 つのゲームを新たに提案し，その性質の解析と勝敗の分類を行う．

ゲーム Or　単独では負け型になってしまう動物 2 つの組を考え，そのどちらかの動物を作れば勝ちとする．

ゲーム n 細胞 Or　自然数 n に対して，n 細胞からなる動物のうち任意の 1 つを先に作る．

ゲーム And　単独で勝ち型になる動物 2 つの組を考え，ちょうど 1 マスを共有しながらこの 2 つの動物を先に作る．

ゲーム NotAnd　目標動物と禁止動物が与えられたとき，禁止動物を作らずに目標動物を先に作る．

これらの拡張では，これまでの解析結果がそのまま適用できるわけではない．特に，ゲーム NotAnd では禁止動物が導入されているため，これまでの一般化三並べとは大きく異なり，プレイヤが石を置くことが不利に働くこともある．そのため，これまでになかった後手必勝となる手順が存在する可能性がある．

本論文は，予稿 [15], [16] として発表した研究をさらに進め，より多くの動物に対して分類を行ってまとめ直したものである．

2.　一般化三並べ

定義 1（一般化三並べ）．無限の大きさの碁盤面上に，先手後手が交互に石を 1 つずつ置き，目標とする石の配置を，90 度単位の回転と反転を許して，先に作ったプレイヤが勝ちとなるゲームを**一般化三並べ**という．

ここで，目標とする石の配置を**動物**，動物を形成するマスを**細胞**，1 つの動物を形成する細胞の数を**細胞数**という．細胞数や石の連結の仕方によって図 1 のように様々な動物が作られ，その中には Tic や El などの愛称が付けられているものもある．本論文では，すべてのゲームにおいて，目標とする動物は反転したものや 90 度単位で回転したものも同じとみなし，また盤面は無限の大きさとする．以後，慣例に従って，先手の石を黒石●，後手の石を白石○で表す．

一般化三並べの性質として，プレイヤが石を置くことが不利に働くことはないため，もし後手に対する必勝手順が存在するのであれば，先手はその必勝手順を行うことで勝つことができる．つまり，後手には必勝手順が存在せず，動物の形によって先手に必勝手順が存在するか，または勝敗がつかずにゲームが無限に続くかのどちらかであることが知られている [4]．先手に必勝手順が存在する動物を**勝ち型**と呼ぶ．また，勝ち型ではない場合，すなわち後手がうまく防御すれば無限にゲームを続けられる動物を**負け型**

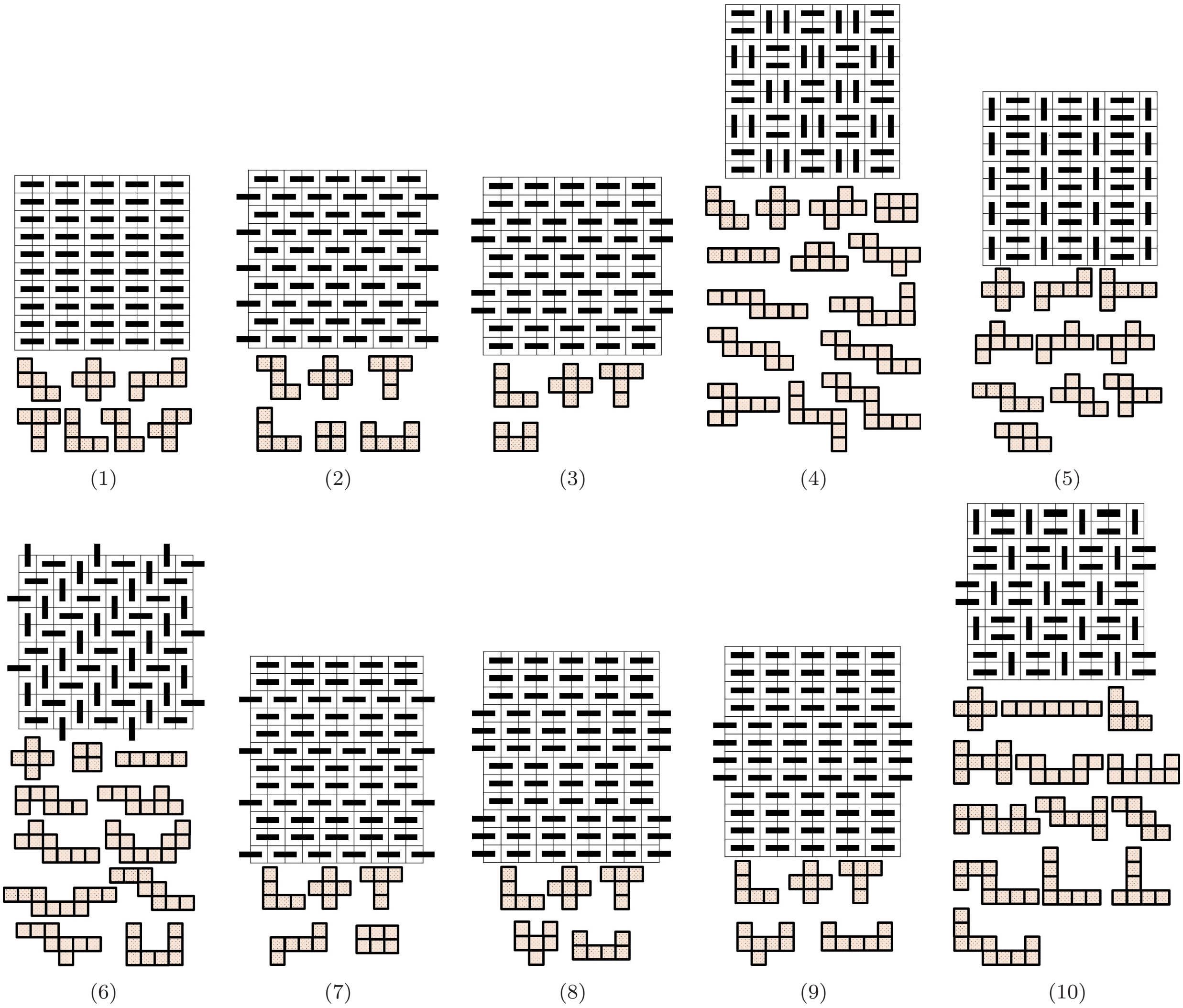


図 2 一般化三並べにおける畳敷きと，それぞれによって負け型であることが示される動物の例
Fig. 2 Pairing strategies and loser polyominoes in generalized Tic-Tac-Toe.

と呼ぶ．

ある動物が勝ち型であることを証明するには，先手の必勝手順を明示的に示せばよく，計算機を用いた探索によって手順を見つける方法が有用である．

負け型を証明する方法として，**畳敷き戦略**を用いた方法が知られている [4]．また，負け型動物を含む動物は負け型であるという性質も利用される．

畳敷き戦略とは，連続した 2 マスを 1 枚の畳に見立てて盤面上に畳を重ならずに隙間なく敷き詰めておき，先手の置いた石に対して後手が同じ畳の他のマスに石を置いていくという防御戦略である．目標動物が盤面のどこにあったとしても必ず 1 枚以上の畳を含むような畳の敷き詰め方が存在するならば，この動物は負け型であることが分かる．

図 2 にいくつかの畳敷きと，それによって負け型であることが判明する動物の例を示す．畳敷き (6)〜(10) は，本研究において計算機による探索で新たに見つけ出したものである．また逆に，図 1 の負け型動物の下に，それを証明するために用いた畳敷きの番号を記述した．なお，他の負け型動物を含んでいることから負け型であることが容易に証明できる動物については，この記述を省略している．

一般化三並べでは，Snaky と呼ばれる 6 細胞動物だけが未解決問題として残されている．既存研究で，Snaky はどのような畳敷き戦略を用いても負け型にならない [17] が，先手の置けるマスがすでに置かれた先手の石の 4 近傍に限定されると負け型になること [18]，一方，置き石を 1 つ許して先手にハンディキャップを与えると勝ち型になること [5], [6], [7] が示されている．

3. ゲーム Or

ここでは，一般化三並べでは負け型となる動物の組合せに着目した新たなゲームを提案する．

定義 2（ゲーム Or）．無限大の大きさの碁盤面上に，先手後手が 1 つずつ石を置いていき，2 つの動物からなる**動物組**のいずれか 1 つの動物を，90 度単位の回転と反転を許して，先に作ったプレイヤが勝ちとなるゲームを**ゲーム Or** という．

情報処理学会論文誌　Vol.55　No.11　2336–2343 (Nov. 2014)

表 1　ゲーム Or における型判定の一覧
Table 1　Win-loss standings in Game Or.

ゲーム OR													
	×	×	○	○	×	×	×	○	×	×	○	○	○
		×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○
			×	×	×	×	×	○	×	○	×	○	○
				×	×	×	×	○	○	○	×	○	○
					×	×	×	×	×	×	×	×	△
						×	×	×	○	×	×	○	○
							×	×	△	×	×	○	○
								×	○	○	○	○	○
									×	△	△	△	△
										×	○	○	△
											×	×	△
												×	△
													△

○ …勝ち型
× …負け型
△ …未解明

ここで，単独で勝ち型となる動物を組み合わせた動物組は自明に勝ち型となる．また，負け型を含む動物は負け型であり，細胞数の増加とともに無数に存在するので，本研究では最小単位の負け型のみの組合せを考えることにする．

本研究で提案したゲーム Or に関して，**表 1** に示す結果を得た．91 種類の動物組のうち，31 種類が勝ち型，50 種類が負け型であることが確認できた．

負け型は，動物組の各動物に共通な畳敷きを見つけることで証明できる．そのような共通の畳敷きが存在すれば，どのように動物を配置してもどちらも必ず 1 枚以上の畳を含むので，後手は両方の動物を同時に防ぐことができる．

勝ち型の証明は実際に必勝手順を示すことで行う．ただし，必勝手順は複数存在するため，以降の議論では対称性を考慮して冗長な手順を省き，代表的な手順となるものだけを記すことにする．

先手・後手の初手

後手の初手は，先手初手の置いた石に対して盤面を斜め方向に 4 分割した領域の 1 つの中のたかだか 1 カ所に置くとする（**図 3** (1) 参照）．さらにここでは，後手は考慮する領域のすべてに石を置くものとして証明を与えている．

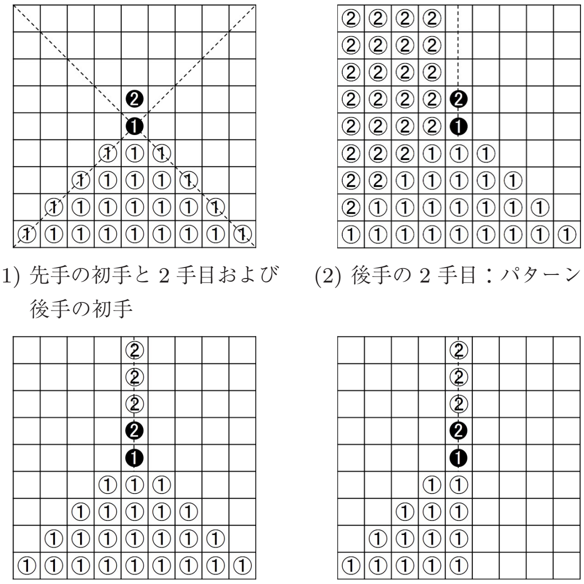
先手・後手の 2 手目

先手 2 手目を，後手初手の領域の正反対側で先手初手の石と連結するように置く（図 3 (1) 参照）．後手の 2 手目の石の置き方は，対称性から以下の 2 つの場合が考えられる．

パターン A　図 3 (2) に示すように，先手の石の延長線で盤面を 2 分割し，左側の領域に置くとする．

パターン B　図 3 (3) に示すように，先手黒石の延長線上の領域に置くとする．

なお，パターン B では 2 手目終了時の盤面においても対称性が維持されているので，後手初手の石が置かれた領域をさらにしぼって，図 3 (4) のように盤面の左側半分に石があるものとして証明を進めても一般性を失わない．



(1) 先手の初手と 2 手目および後手の初手　(2) 後手の 2 手目：パターン A
(3) 後手の 2 手目：パターン B　(4) 後手の 2 手目：パターン B 対称性

図 3　ゲーム Or における勝ち型証明のための先手・後手の初手終了時と 2 手目終了時の盤面．黒石は先手，白石は後手，石の中の数字は何手目に打つかを表す
Fig. 3　Boards after opening and second moves for winning strategy in Game Or.

先手・後手の 3 手目以降

先手の 3 手目以降は，それぞれの動物組に対してリーチ[*2]もしくは必勝パターンに帰着させる手順で打つ．必勝パターンとは，そこから後手が最善をつくしても，先手が最善をつくせば先手の勝ちとなる石の配置である．たとえば，リーチとなるマスを複数含む配置は必勝パターンである．なお一般に，後手の防御戦略として，先手のリーチを防ぎながら同時に逆にリーチをかけることで試合の主導権を取り返す戦略が有効であるが，ここではそのことも考慮に入れたうえでの先手必勝となる手順を示した．

図 4 に Fatty と W を目標動物組とするときの必勝パターン盤面と必勝パターンを示す．この必勝パターン盤面は図 3 (4) のパターン B から直接作ることができる．

4.　ゲーム n 細胞 Or

ここでは，6 細胞以上の動物も含めたゲーム Or の拡張として，細胞数が n である n 細胞動物すべてを 1 つの組とした新たなゲームを提案する．

定義 3（ゲーム n 細胞 Or）．無限大の大きさの碁盤面上に，先手後手が 1 つずつ石を置いていき，任意の n 細胞動物のうちいずれか 1 つを，90 度単位の回転と反転を許して，先に作ったプレイヤが勝ちとなるゲームを**ゲーム n 細胞 Or**という．

ゲーム n 細胞 Or は，n 個の石からなる連結成分を先に

[*2] 本来は麻雀の用語であるが，ここではビンゴゲームで使われるように，あと 1 手で勝ちとなる状態をリーチと呼ぶ．

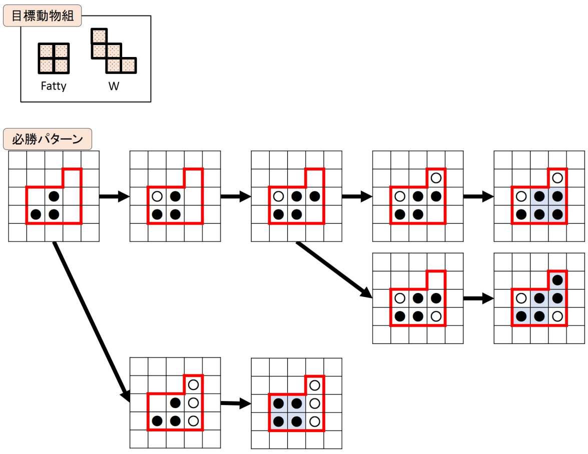


図 4 Fatty と W を動物組とするゲーム Or での必勝パターンとその後の必勝手順

Fig. 4 Winning pattern and strategy in Game Or for polyomino pair Fatty and W.

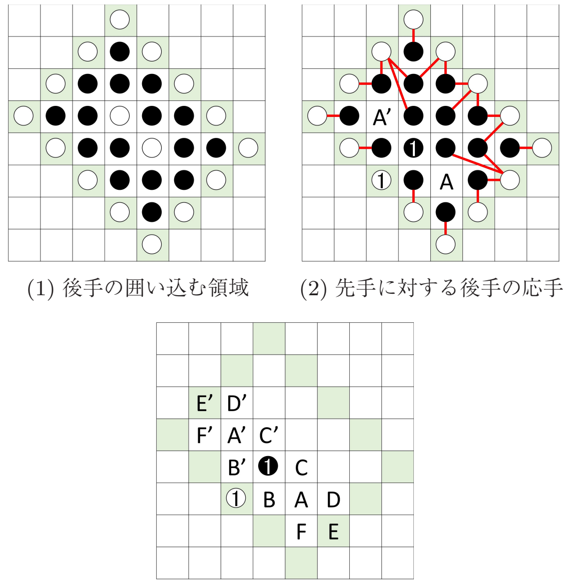
作るゲームとみなすこともでき，細胞数 n に対して一意に勝ち型か，負け型かが決まる．

後手の防御策として，n より少ない石で先手の石を取り囲むように置いていかなければならない．しかし，任意の 11 細胞以下の動物を同数の石で囲い込むことはできず，12 細胞動物になって初めて同数以下の石で囲い込めることが知られている [19]．よって，$n < 12$ では勝ち型になる．

負け型を証明するうえで，ゲーム Or に対して行ったように，n 細胞動物すべてに共通する畳敷きを見つけることは困難であるため，ここでは「先手が黒石を置けるマスをすでに置かれた先手黒石の上下左右の 4 近傍に限定する」という制限（**4 近傍制限**）を加えて考察する．

定理 1. 任意の $n \geq 17$ に対して，4 近傍制限のもとでゲーム n 細胞 Or は負け型である．

証明. 後手は，**図 5** の (1) のように，先手の黒石を 17 個以上連結させないで囲い込めることを示す．まず，先手黒石の初手に対して，後手初手は，斜めに隣接したマス ① に白石を置く．後手の 2 手目以降，図 5 (2) に示す応手を続ける．畳敷き戦略と同様に，先手が置いた黒石と線で結ばれたマスへ後手は白石を置いていく．なお 1 つの黒石に対して 2 本の線が延びているものもあるが，どちらを選んでもよく，応手を続ける過程でその対応が減っていく．対応するすべてのマスにすでに白石が置かれている場合には，領域内の任意の場所に置けばよい．なお先手がマス A に黒石を置くときは，4 近傍制限により，図 5 (3) のマス B または C の少なくとも一方に黒石がすでに置かれているはずである．黒石が B のみ，または B と C の両方に置かれているときは，後手は E に白石を置く．一方，C のみに黒石が置かれているときは，後手は F に白石を置く．この応手により，図 5 (1) で想定している防御壁を破られることなく囲い込みができる．先手が A’ に黒石を置いたときの応手も同様である． □



(1) 後手の囲い込む領域　(2) 先手に対する後手の応手

(3) 先手 A に対する後手の分岐

図 5 ゲーム n 細胞 Or における後手の手順

Fig. 5 White player’s strategy in Game nCellsOr.

ゲーム n 細胞 Or は，本質的には後手が先手を囲い込めるかどうかを問うものである．類似したゲームに The Angel Problem [20], [21] がある．先手の Angel が上下左右斜めの 8 方向へ *power* マス移動して逃げるのを，後手の Devil が 1 つずつ石を追加して追い込むもので，Angel が動けなくなれば Devil の勝ち，逃げ続けられれば Angel の勝ちである．たとえば $power = 1$ のとき，33×33 の盤面があれば Devil の勝ちであることが知られている [20]．このゲームでは，Devil は Angel が移動した後のマスにも石を置いていくことができ，最終的には Angel がいる 1 マスのみを囲い込めばよいが，ゲーム n 細胞 Or では，Angel の軌跡すべてを囲い込まなければならないという点が大きく異なる．

5. ゲーム And

定義 4（ゲーム And）．無限の大きさの碁盤面上に，先手後手が 1 つずつ石を置いていき，2 つの動物からなる動物組の両方の動物を 90 度単位の回転および反転して先に作ったプレイヤが勝ちとなるゲームを**ゲーム And**という．ただし，この 2 つの動物は，ちょうど 1 マスだけを共有して作らなければならないものとする．

単独で負け型となる動物が動物組の中に 1 つでも含まれていると，その負け型は畳敷き戦略で防御できるため，ゲーム And においてその動物組は自明に負け型となる．よってここでは勝ち型どうしの組合せだけを考える．

ゲーム And の例として，Domino と Knobby を目標動物組とする場合を考えよう（**図 6**）．この 2 つの動物を，回転や反転を許しながらちょうど 1 マス共有するように重ねてできる形は，動物 Y，R，P，T，X と対応する．すな

情報処理学会論文誌　Vol.55　No.11　2336–2343 (Nov. 2014)

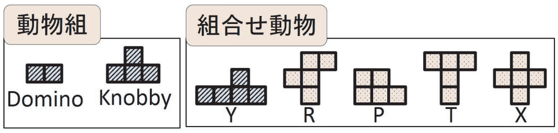


図 6　Domino と Knobby を 1 マス共有しながら重ねて得られる 5 種類の組合せ動物

Fig. 6　Combined polyominoes by overlapping Domino and Knobby with sharing 1 cell.

表 2　ゲーム AND における動物組の型判定の一覧

Table 2　Win-loss standings in Game AND.

ゲーム AND											
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			○	○	○	○	○	○	○	○	○
				○	○	○	○	○	○	○	○
					×	○	△	△	△	△	△
						△	△	△	△	△	△
							△	△	△	△	△
								△	△	△	△
									△	△	△
										×	△
											×

○ … 勝ち型
× … 負け型
△ … 未解明

わちこのゲーム AND は，この 5 種類の組合せ動物を目標とするゲーム OR に帰着できる．動物 Y は単独で勝ち型（図 1）なので，動物組 (Domino, Knobby) はゲーム AND において勝ち型である（**表 2** の 2 行 3 列目）と結論づけられる．このように，目標動物組の各動物を組み合わせてできる m 種類の組合せ動物の中に 1 つでも単独の勝ち型が含まれていれば，その動物組はゲーム AND において勝ち型となることが分かる．また，m 種類の組合せ動物がどれも単独では負け型であっても，ゲーム OR の結果（表 1）の中で勝ち型として現れる動物組が含まれる場合には，ゲーム AND において勝ち型であることが分かる．たとえば，動物組 (Tic, Tic) の勝敗は，4 つの組合せ動物 I，T，V，X を目標とするゲーム OR に帰着され，これらはいずれも単独では勝ち型ではない（図 1）が，そのうちの 2 つの組合せ (T, I) はゲーム OR において勝ち組である（表 1 の 6 行 9 列目）．よって (Tic, Tic) はゲーム AND において勝ち型である（表 2 の 3 行 3 列目）．

一方，負け型の証明は，m 個の組合せ動物すべてに共通する畳敷きを示すことによる．(Skinny, Skinny) と (Y, Y)，および (Z, Z) の 3 つが負け型の動物組として確認できた．その際，(Skinny, Skinny) の証明に用いた畳敷きは図 2 の (10) であり，この畳敷きは本研究で計算機を用いて見つけたものである．

このような考察によって結果を表 2 にまとめる．単独で勝ち型である動物どうしの動物組 66 組のうち，39 組が勝ち型，3 組が負け型であるという結果を得た．

表 3　ゲーム NOTAND における動物の型判定の一覧

Table 3　Win-loss standings in Game NOTAND.

ゲーム NOTAND		禁止動物										
目標動物		×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
		×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○
		×	×	×	△	×	○	△	△	△	△	△
		×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	○
		×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	○
		×	×	○	×	○	○	○	×	○	○	○
		×	×	×	×	×	×	△	△	×	△	△
		×	×	×	×	×	×	×	△	△	×	△
		×	×	×	×	○	×	△	×	○	○	×

6.　ゲーム NOTAND

本章では，作ると負けになる「禁止動物」を導入した拡張を提案する．これは，連珠における禁手に着想を得たものである．連珠における禁手は先手のみに適用されるが，ここでは先手後手ともに同じ禁止動物を定めるものとする．

定義 5（ゲーム NOTAND）．無限大の大きさの碁盤面上に，先手後手が 1 つずつ石を置いていき，禁止動物を作らずに（目標動物と同時に作ることも禁止し，禁止動物を作ったプレイヤは負けとする），目標とする動物を，90 度単位の回転と反転を許して，先に作ったプレイヤが勝ちとなるゲームを**ゲーム NOTAND**という．

禁止動物を導入した場合，これまでのゲームにおける「石を置くことが自らの不利にはならない」という前提が崩れ，後手必勝となる場合が存在する．たとえば，禁止動物が 1 細胞動物の場合（**表 3** の 1 列目），先手が初手をどこにおいても負けとなることから後手必勝である．2 細胞以上の禁止動物が目標動物に完全に含まれている場合は，先手後手ともに禁止動物を作る前に目標動物を作ることは不可能であり，勝つことができない．すなわちどちらにも必勝手順は存在せず，引き分けとなる．したがって，このゲームにおける勝敗判定は，(1) 先手が目標動物を作って勝つ，(2) 先手が禁止動物を作って負ける，(3) 後手が目標動物を作って勝つ，(4) 後手が禁止動物を作って負ける，(5) 無限に続いて引き分けとなる，の 5 つが考えられ，これらをまとめると (1) または (4) のとき先手勝ち，(2) または (3) のときは後手勝ち，(5) のときは引き分けである．しかしながら，本論文で後手勝ちになる具体的な例として得られているのは上述の禁止動物が 1 細胞動物で (2) に該当する場合のみである．そこで，これまでと同様に，引き分けと後手勝ちをあわせて「負け型」に分類する．以後，目標動物，禁止動物ともに単独で勝ち型の動物の組合せについて，ゲーム NOTAND における勝敗を考察する．

まず，目標動物 A と禁止動物 B の組がゲーム NOTAND において勝ち型となるための十分条件を考えよう．B の任

意の 1 細胞を削った形（連結していない形も含める）が，すべて A を含むことが確かめられれば，禁止動物 B ができる前に必ず目標動物 A ができることが保証される．よってこの組は勝ち型であると結論づけられる．

一方，禁止動物 B が目標動物 A に含まれる場合，もしくは $A = B$ のときは，自明に負け型となる．また，目標動物 B と禁止動物 A が共通な畳敷きで防ぐことができれば，後手は禁止動物を作らずに先手を防ぐことが可能である．当然，それらの目標動物と禁止動物を入れ替えた場合についても負け型である．

このような考察に基づいて，単独では勝ち型となる動物どうしの組合せ 121 通りについて調べた結果，そのうちの 58 組の勝ち型と，49 組の負け型が判明した（表 3）．

7. まとめ

本論文では，Frank Harary が提案した一般化三並べを拡張した，ゲーム Or，ゲーム n 細胞 Or，ゲーム And，ゲーム NotAnd という 4 種類の新しいゲームを提案し，各ゲームにおいて勝ち型，負け型の判定を行った．

一般化三並べにおける Snaky 同様，本研究で提案したゲームには未解明の動物が多数存在する．これらの動物について解析していくことが今後の課題である．

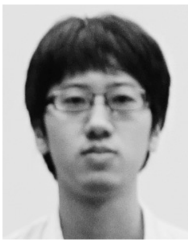
謝辞 本研究は，JSPS 科研費 23300051 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] Harary, F.: Achievement and avoidance games for graphs, *Proc. Conference on Graph Theory*, Vol.62, pp.111–119 (1982).
[2] Harary, F.: Achieving the skinny animal, *Eureka*, Vol.42, pp.8–14 (1982).
[3] Harary, F. and Harborth, H.: Achievement and avoidance games with triangular animals, *Recreational Math*, Vol.18, pp.110–115 (1986).
[4] 伊藤大雄：パズル・ゲームで楽しむ数学：娯楽数学の世界，森北出版 (2010).
[5] Ito, H. and Miyagawa, H.: Snaky is a winner with one handicap, *Proc. 8th Hellenic European Conference on Computer Mathematics and Its Applications* (*HERCMA 2007*), pp.25–26 (2007).
[6] Halupczok, I. and Schlage-Puchta, J.-C.: Achieving snaky, *Electronic Journal of Combinatorial Number Theory*, Vol.7 (2007).
[7] Sieben, N.: Proof trees for weak achievement games, *Acta Cybernetica*, Vol.16, No.4, pp.579–585 (2004).
[8] Bode, J.-P. and Harborth, H.: *Achievement games on Platonic solids*, Institute für Mathematik, Techn. Univ. (1997).
[9] Bode, J.-P and Harborth, H.: Hexagonal polyomino achievement, *Discrete Mathematics*, Vol.212, No.1, pp.5–18 (2000).
[10] Bode, J.-P. and Harborth, H.: *Triangle polyomino set achievement*, Institute für Mathematik, Techn. Univ. (2001).
[11] Sieben, N.: Hexagonal polyomino weak $(1, 2)$-achievement games, *Electronic Journal of Combinatorial Number Theory*, Vol.8 (2008).
[12] Sieben, N.: Wild polyomino weak $(1, 2)$-achievement games, *Geombinatorics*, Vol.13, No.4, pp.180–185 (2004).
[13] Fisher, E. and Sieben, N.: Rectangular polyomino set weak $(1, 2)$-achievement games, *Theoretical Computer Science*, Vol.409, No.3, pp.333–340 (2008).
[14] ディプタラマ，成澤和志，篠原 歩：一般化三並べの拡張：一手 p 石，第 18 回ゲームプログラミングワークショップ，pp.19–26 (2013).
[15] 八鍬友貴，本田耕一，篠原 歩：一般化三並べの変種：負け型のペアは勝てるのか？，第 14 回ゲームプログラミングワークショップ，pp.35–42 (2009).
[16] 本田耕一，八鍬友貴，成澤和志，篠原 歩：一般化三並べの拡張：禁止動物の導入，第 13 回ゲームプログラミングワークショップ，pp.94–100 (2010).
[17] Harborth, H. and Seemann, M.: *Snaky is a paving winner*, Institute für Mathematik, Techn. Univ. (1996).
[18] Harborth, H. and Seemann, M.: *Snaky is an edge-to-edge loser*, Institute für Mathematik, Techn. Univ. (1996).
[19] Sieben, N.: Polyominoes with minimum site-perimeter and full set achievement games, *European Journal of Combinatorics*, Vol.29, No.1, pp.108–117 (2008).
[20] Berlekamp, E.R., Conway, J.H. and Guy, R.K.: *Winning Ways for your mathematical plays, volume 2: Games in Particular*, Academic Press (1982).
[21] Conway, J.H.: The angel problem, *Games of No Chance*, Vol.29, pp.3–12 (1996).

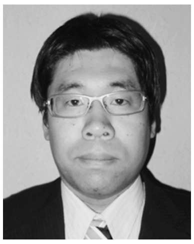
八鍬 友貴

2008 年東北大学工学部電気情報・物理工学科卒業，2010 年同大学大学院情報科学研究科博士課程前期課程修了．現在，本田技研工業株式会社に勤務．



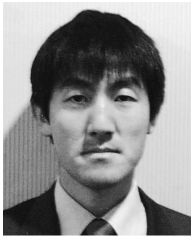
本田 耕一

2009 年東北大学工学部電気情報・物理工学科卒業，2011 年同大学大学院情報科学研究科博士課程前期課程修了．現在，アドソル日進株式会社に勤務．



成澤 和志　（正会員）

東北大学大学院情報科学研究科助教．2005 年九州大学理学部物理学科卒業，2007 年同大学大学院システム情報科学府情報理学修士課程修了，2010 年同博士後期課程を修了し博士（理学）を取得．2010 年より現職．文字列処理，データ構造，アルゴリズム，ゲーム情報学の研究に従事．



篠原 歩　（正会員）

東北大学大学院情報科学研究科教授．1988 年九州大学理学部数学科卒業，1990 年同大学大学院総合理工学研究科情報システム学専攻修士課程修了．1994 年博士（理学）．九州大学理学部附属基礎情報学研究施設助手・助教授，同大学大学院システム情報科学研究科助教授を経て 2005 年より現職．機械学習，文字列処理，データ圧縮，アルゴリズムと計算量の研究に従事．