

ボードゲーム BAO における周期性の解析とモデルチェッカによる検証

稲畑 康博

関西学院大学 大学院 理工学研究科

高橋 和子

関西学院大学 理工学部

概要

ボードゲーム BAO における周期性の解析とモデルチェッカ SPIN を用いた検証について述べる。BAO は 2 人のプレイヤーが複数の穴に入った石を動かしながら取り合うボードゲームである。このゲームはルールが単純で探索空間も比較的狭い一方、1 手の間に盤面が何度も変化するという特徴を持つ。そのためゲーム全体が終了しない状態として千日手以外に 1 手が終了せず周期的な変化を繰り返す場合がある。本稿では、SPIN を利用して周期性を持つ局面と初期配置からそこに至るまでの手筋を検出し、得られた局面を解析することによってその特徴を抽出する。また、局面が周期性を持つために満たすべき条件についても議論する。

Analysis of Cyclic Behavior of Board Game BAO and Its Verification Using Model Checker

Yasuhiro Inahata† Kazuko Takahashi‡

†Graduate School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University

‡School of Science & Technology, Kwansei Gakuin University

Abstract

We describe analysis of cyclic behavior of a board game BAO and its verification using a model checker SPIN. BAO is a board game in which two players are taking seeds in turn by moving them from hole to hole. While the rule is simple and search space is rather small, a state of the board changes many times during one turn. Therefore, when a game does not terminate, the case in which one turn never terminates making a cyclic behavior may occur, other than the case of repetition of moves. In this paper, the board phases that can make a cyclic behavior are detected using SPIN, and their characteristics are extracted. Moreover, the condition for a phase to make a cyclic behavior is discussed.

1 はじめに

BAO はアフリカを中心に古くから行なわれているボードゲームである。一般に Mancala と総称

されることが多いが、地方により呼称が異なりそのヴァリエーションも豊富である [1]。Mancala のルールは複数の穴に入った石を動かしながら取り合うというもので、その石の種類は単一である。石

を動かすルールも簡単なので、オセロやチェスに比べて探索空間は狭い。しかし、人間による先読みは困難である。これは1手の間に盤面全体が複数回更新されることに起因するものであり、他のボードゲームでは見られない特徴である。この特徴のため、ゲーム全体が終了しない状態として手番が交代しながら勝負のつかない千日手以外に、1手が永遠に終了しないような場合が考えられる。

我々は、BAOを実装し、戦略を変えたコンピュータプログラム同士を対戦させて実験をし、戦略の評価を行った[2]。さらにこの実験結果をもとに盤面の変化を解析した結果、特定の局面およびその時に選択される穴によって、1手の間の盤面は周期的な変化を繰り返し停止しないことがわかった*1 [3]。

本稿では、モデルチェッカ SPIN を利用して周期性を持つ局面と初期配置からそこに至るまでの手筋を検出し、得られた局面を2通りに分類し、各々が満たすべき特徴について述べる。また、局面が周期性を持つために満たすべき条件についても議論する。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では、BAOのルールとその特徴を説明する。第3章では、BAOの動きのモデル化について述べ、第4章で、SPINによる検証を行なう。第5章では、出現した周期性の解析をおこない、第6章で議論をする。最後に第7章でまとめを行なう。

2 BAOのルールと特徴

2.1 ルール

BAOは2人のプレイヤーによって行なわれるゲームである*2。盤上には 8×2 個の穴があいており、それぞれ上側(a~h)が先手の陣地、下側(i~p)が後手の陣地となっている。初期配置では図1のように1穴おきに石が4個ずつ置かれている。2人のプレイヤーは交互に自分の陣地にある穴から石を取って動かすことでゲームを進めていく。石の動か

し方は、以下のルールに従う。

1. 自分の陣地の中から石のある穴を選択する。
2. その穴にある石をすべて取り出し、時計回りに1つつつ石を置いていく(取り出した石をすべて置くことを1配りとする)。最後の1つを置く穴の状態によって動きが変化する。
3. 最後の1個を置く穴に石が1つ以上あれば、2を繰り返す。
4. 最後の1個を置く穴に石がなければその穴で終了し、その向かい側の穴にある石を自分の取り分としてボードから取り除く(これで1手が終了する)*3。

手の中の石を最後に置く穴に石が存在する限り1配りを続ける。1手は1配り以上で構成される。1手が終了した段階で、どちらかの陣地に石がすべてなくなった時点でゲームは終了する。残っている石はすべてその陣地のプレイヤーの取り分となる。そして最終的に取った石の数が多いほうが勝ちである。



図1: 初期配置

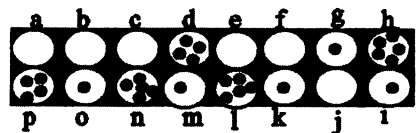


図2: 1手移動(fを選択)

たとえば、初期配置から先手がfを選択すると、fから石を取り $g \rightarrow h \rightarrow i \rightarrow j$ と石を1つつつ置いていく。これで1配りである。jには石が初めからあるので、次にjの石をすべて取り出し(5個)、 $k \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow o$ と続けて石を置いていく。oには石がなかったので、移動はそこで終了し、反対側

*1 本稿では、盤面の状態を表す用語として、1手終了するごとに更新される場合は「局面」、1手の間に変化する場合は「盤面」と記述する。

*2 本稿ではもっとも単純なルールを採用した。

*3 このルールだと、1手が停止しない場合があるが、その場合ゲームでは途中で打ち切る。

(b)にある4個の石を先手の取り分とし、後手に移る(図2)。

もしここで○に石があれば再び○から石を取り出し、時計回りに石を置いていく動作を繰り返すことになる。従って、石を置く動作は何周も繰り返される場合があり、1つの穴の石の数は1手の間に複数回変化する可能性がある。

2.2 特徴

BAOはチェッカーやオセロなどと同様に、二人零和有限確定完全情報ゲームである。その探索空間は比較的小さく、そのためコンピュータに高い処理能力があればゲームの結果は最初の段階でわかってしまう。

また、チェスや将棋に比べ可能手は少ないが、1手で局面が大きく変わり、その影響が盤全体にまで及ぶという特徴がある。このような特徴は他の同種のボードゲームには見られない。1手の間に盤面が大局的に変化してしまい、しかも1つの穴の状態が何度も変化するので、先の局面を人間の手で読むことは困難である。特に石の数が多し序盤戦ではこの傾向は顕著であり、人間同士の勝負では中盤戦までは混沌としたゲーム運びになることが多く、中盤戦での戦略が重要になる。この特徴がBAOのコンピュータ上での実装をやすくしているのと同時に人間同士の対戦をおもしろくする要因の1つになっている。

我々は、BAOを実装して動きを解析した結果、特定の局面のときおよびそのときに選択される穴によって、1手の間に盤面の変化は停止せず周期的な動きをすることがわかった。これは1配りの最後に置く穴に石が1つでも存在する限り石を配る動作が続くために起こるBAOの特徴である。このときの周期は局面によって異なり、石の配置がずれた盤面がその一連の流れの中で出現する。この種の周期的な動きは、約1万局面に対して1回の割合でしか起こらないため、実際のゲームをする上での妨げにはならない。もう1つの周期性として、手番交代しながらも盤上の石の数が減らずゲーム全体の終了に至らない場合いわゆる千日手が考えられる。いずれの場合も初期配置から人間の手で周期性が出現する手

筋を予想することは困難である。

3 モデルチェッカ SPIN

モデルチェッカ SPIN[5]を利用してモデル検査を行なう。

3.1 SPIN

SPINはモデル検査を行なうツールで、主に並行システムの自動検証に用いられる。SPINは単一あるいは複数のプロセスの動きを状態の遷移としてモデル化する。そして状態空間を網羅的・機械的に探索することで、システムが与えられた仕様を満たすかどうか判定する。仕様を満たさない場合、SPINは反例を挙げる。仕様は線形時相論理で記述し、その性質から「悪いことは絶対に起こらない」という safety と「よいことは必ず起こる」という liveness の2種類に大きく分けられる。

3.2 BAOの記述

まずBAOの動きを記述する。そのため次のようなモデルを考えたい。盤上の石とその動きを管理するプロセス board と、手番を管理するプロセス manager を用意し、これらの中で通信を行なう。managerは選択する穴の位置の情報を送信し、boardは受けとった情報からルールに従って穴に存在する石の数を1配り分変化させた後、managerにメッセージを送信する。このときmanagerは1手が終了していなければ配り終えた位置から再び始めるようなメッセージをboardに送信し、1手が終了していれば、手番を交代して選択する穴の位置をboardに送信する。以上の手順を繰り返すいずれかの陣地のすべての穴に石がなくなればboardは終了メッセージを出す。

3.3 仕様

初期配置は与えられたものと固定し、仕様として「必ずいつかは終了局面になる」すなわち「必ずいつかはどちらか片方の陣地のすべての穴が0になる(仕様1)」を与えて検証を行った。そして反例をあげるといって終了しない手筋を検出した。検出される反例として手番が交代しないものと、千日手になるものの2種類が考えられるが、仕様を「手番の交代が起こる」すなわち「必ずいつかは手番の交代

を告げるメッセージが manager に送られる (仕様 2)」と書くと、前者のみが反例として得られる。

4 実験

上記の仕様で盤上の穴の数が 4×2 と 8×2 の 2 通りの場合について実験を行い、以下の結果を得た。

SPIN は仕様を満たさない反例が複数ある場合、それらすべてを表示する機能をもつが、対象となるモデルが大きすぎるとこの機能は働かない。したがって、ここでは 1 つずつ反例を発見しては、その局面に至らないことを仕様に加えることで、別の反例を発見させた。そして反例があがらなくなれば、周期性をもつ局面で初期配置から到達可能なものが全ての発見できたことになる。しかしながら、反例の数が多くなると計算量の問題でうまくいかない場合があった。

4.1 4×2 穴の場合

仕様 1 を与えて検証を行うと、17 通りの反例が得られた。また、仕様 2 を与えて検証を行うとこの中の 12 種類が反例として得られた。すなわち、この 12 種類は手番を交代せずに終了局面に至らないものであり、残りの 5 種類は千日手である。

なお、もっとも早く現れるものは手番交代せずに周期的に変化するもので初期配置から 8 手目で出現する。

4.2 8×2 穴の場合

仕様 1 を与えて検証を行うと、いくつかの反例が得られたが、反例の数が多すぎてすべてを発見させることはできなかった。また、仕様 2 を与えて検証を行うと計算は終了しなかった。

得られた反例としては、たとえば初期配置から 47 手目で出現する千日手があり、62 手目に 47 手目の局面と同じものが出現する。このことから、BAO の千日手は手番交代するとすぐに同じ局面が現れるような単純なものではなく、先手後手両者が盤面の石の総数が減らないような手を何回か行った後に現れることがわかる。

5 解析

実験の結果得られた周期性をもつ局面について、解析を行う。

5.1 準備

各穴に対して、先手側の端から時計回りに a, b, c, ..., h という名前をつけ、そこに存在する石の数を $\alpha_a, \dots, \alpha_h$ とする。このとき盤面 S を、

$$S = (\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c, \alpha_d, \alpha_e, \alpha_f, \alpha_g, \alpha_h) \\ (\alpha_a \sim \alpha_h \text{ は } 0 \text{ または正の整数})$$

で表す。たとえば図 3 の初期配置 S_0 は

$$S_0 = (0, 4, 0, 4, 0, 4, 0, 4)$$

と表せる。

盤面 S, S' をそれぞれ

$$S = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8) \\ S' = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8)$$

$(\alpha_s, \beta_t (1 \leq s, t \leq 8))$ は 0 または正の整数

とする。S, S' が以下の関係にあるとき、S' を S から t ずれた盤面と呼ぶ。

$\forall i; 1 \leq i \leq 8$ に対し $\exists t; 0 \leq t \leq 7,$

$$\alpha_i = \begin{cases} \beta_{i+t} & (\text{if } i+t < 8) \\ \beta_{i+t-8} & (\text{if } i+t \geq 8) \end{cases}$$

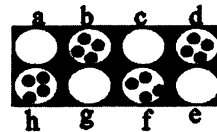


図 3: 4×2 初期配置 S_0

$S_1 = S$ とし、盤面 $S_i (i = 1, 2, \dots)$ から 1 配りの後を盤面 S_{i+1} とすると、1 配りごとの盤面の変化を表す列 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots$ が一意的に決まる。石が 0 個の穴で配り終わった盤面が S_n のとき、反対側の石を自分の取り分として 1 手が終了して手番が交代する。このときの 1 手は $n-1$ 配りで構成される。石が 0 個の穴で配り終わらなければ手番の交代は行われず、列 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots$ は無限列になる。

たとえば初期配置 S_0 において、穴 d を選択するとき、盤面は以下のように $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow \dots \rightarrow S_7$ と変化し、6 配りで 1 手が終了する。盤面 S_0 における右側の文字はその盤面で次に選択する穴を表す。

$$\begin{aligned} S_0 &= (0, 4, 0, 4, 0, 4, 0, 4) & d \\ S_1 &= (0, 4, 0, 0, 1, 5, 1, 5) & h \\ &\vdots \\ S_6 &= (0, 6, 2, 1, 0, 6, 0, 1) & c \\ S_7 &= (0, 6, 0, 2, 1, 6, 0, 1) & (e \text{ で停止}) \end{aligned}$$

局面 S で穴 x ($x = a, b, \dots, h$) を選択することで 1 配り目が始まり、1 配りごとに $S_1 (= S) \rightarrow S_2 \rightarrow \dots$ と盤面が変化するとき、 S_i ($i \geq 2$) で初めて S からいくつかずれた盤面が現れたとする。このとき $S_1 (= S) \rightarrow S_2 \rightarrow \dots \rightarrow S_i$ をループと呼ぶ。また S から S_i までの間に穴 x に石を配る回数をこのループの周期、 S_1 をループの開始盤面、そのとき選択する穴をループの開始位置と呼ぶ。

5.2 ループの解析

ループは、周期 0 のものと周期 1 以上のもので異なる性質をもつ。

5.2.1 周期 0 のループ

周期 0 のループでは、盤面 S_1 から 1 配りで達した盤面 S_2 が S_1 からいくつかずれた盤面になる。

図 4 では盤面 $L1_1$ から a を選択することで 1 配り目が始まる。 a から石を 3 つすべて取り出し、 $b \rightarrow c \rightarrow d$ と石を置いていくと、 d に石を置いた段階で手の中の石は無くなるので、これで 1 配りが終了し、盤面は $L1_2$ になる。このとき、 $L1_2$ は $L1_1$ から 3 つずれた盤面であり、周期は 0 である。

$$\begin{aligned} L1_1 &= (3, 1, 0, 2, 1, 0, 2, 1) & a \\ L1_2 &= (0, 2, 1, 3, 1, 0, 2, 1) & d \\ &\vdots \end{aligned}$$

一般に穴の数が m 個、ループの開始位置に存在する石の数が n 個の時に 1 配りでループになる開

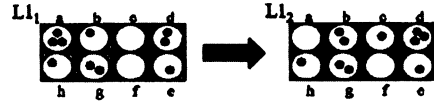


図 4: 周期 0 のループ

始盤面を考えると以下の 2 通りのパターンがあり、いずれも 1 配りで n 個ずれた盤面になる。

(1) パターン 1

ループの開始盤面は $(n, 0, 1, \dots, n-1)$, $m = n+1$ となる。この盤面を $S = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ として形式的に記述すると α_i ($1 \leq i \leq m$) は以下のようになる。

$$\alpha_i = \begin{cases} n & (i=1) \\ i-2 & (i \geq 2) \end{cases}$$

穴数が 4×2 のとき、このパターンの開始盤面は

$$S = (7, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

となる。しかし盤面 S に存在する石の総数は初期配置における石の総数を超えているので、初期配置からこの盤面に至ることはない。

(2) パターン 2

ループの開始盤面は $(n, n-2, n-3, \dots, 1, 0, n-1, n-2, \dots, 1, 0, \dots, n-1, n-2, \dots, 1)$, $m = kn-1$ ($k \geq 2$) となる。この盤面を $S = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ として形式的に記述すると α_i ($1 \leq i \leq m$) は以下のようになる。ただし、 $p \geq 1, q \geq 2$ 。

$$\alpha_i = \begin{cases} n & (i=1) \\ n-1 & (i=qn-n+1) \\ n-2 & (i=pn-n+2) \\ & \vdots \\ 2 & (i=pn-2) \\ 1 & (i=pn-1) \\ 0 & (i=pn) \end{cases}$$

パターン 2 の開始盤面

$$S_1 = (n, n-2, n-3, \dots, 1, 0, n-1, n-2, \dots, 1, 0, n-1, \dots, 1)$$

はもっとも左端を選択して石を 1 配りすると盤面

$$S_2 = (0, n-1, n-2, \dots, 2, 1, n, n-2, \dots, 1, 0, n-1, \dots, 1)$$

となる。 S_2 は S_1 から n 個ずれた盤面である。

表 2 にパターン 2 を満たす盤面をいくつか示す。

表 1: 周期 0 のループ (パターン 2)

開始位置 の石の数	$k = 2$ の時の盤面	穴の数
2	(2,0,1)	3,5,7,9,...
3	(3,1,0,2,1)	5,8,11,...
4	(4,2,1,0,3,2,1)	7,11,15,...
5	(5,3,2,1,0,4,3,2,1)	9,14,19,...

図 4 はパターン 2 の盤面である。この表から 4×2 ではパターン 2 のループは 1 種類しか現れないことがわかる。実験結果から得られた 12 種類のループの中でもこのパターン 2 の盤面のみが周期 0 のものとして出現しており、初期配置から到達可能なことがわかる。

5.2.2 周期 1 以上のループ

盤上の穴が 4×2 のとき初期配置から到達可能なループのうち周期が 1 以上のループ 11 種類を解析して、それらの特性を抽出する。

図 5 は盤面の石の総数が 7 で周期 1 のループの例である。開始盤面を $L2_1$ すると、 $L2_1 \rightarrow \dots \rightarrow L2_5$ のように 4 配りの後 $L2_1$ から 1 ずれた盤面が現れる。右側の文字は配りはじめの穴を示す。

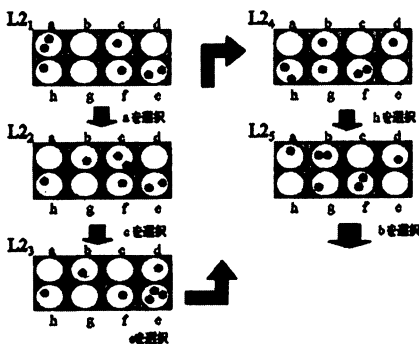


図 5: 周期 1 のループ

$$L2_1 = (2, 0, 1, 0, 2, 1, 0, 1) \quad a$$

$$L2_2 = (0, 1, 2, 0, 2, 1, 0, 1) \quad c$$

$$L2_3 = (0, 1, 0, 1, 3, 1, 0, 1) \quad e$$

$$L2_4 = (0, 1, 0, 1, 0, 2, 1, 2) \quad h$$

$$L2_5 = (1, 2, 0, 1, 0, 2, 1, 0) \quad b$$

⋮

盤上の穴の数が $2n$ とする。開始盤面が L_1 である周期 1 以上のループ $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_k$ において、各配りの配りはじめの穴を最も左側になるようにずらした列 $L'_1 \rightarrow L'_2 \rightarrow \dots \rightarrow L'_k$ を考える。このとき以下の条件を満たす L'_i ($1 \leq i \leq k$) が存在する。

条件 (LOOP)

盤面 S を

$$S = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{2n})$$

($\alpha_1, \dots, \alpha_{2n}$ は 0 または正の整数)

とする。

- α_1 は 3 以上の奇数である
- $\alpha_2, \alpha_4, \dots, \alpha_{2n-2}$ はすべて奇数である
- $\alpha_3, \alpha_5, \dots, \alpha_{2n-1}$ はすべて偶数である
- α_{2n} は盤上の石の総数が奇数のときは α_1 未満の奇数であり、偶数のときは α_1 以上の偶数である

盤上の穴が 4×2 のとき、石の総数が奇数のループは 8 通り、偶数のものは 3 通りある。

$L2_1 \rightarrow \dots \rightarrow L2_5$ においては $L2'_3 = (3, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$ がこの条件を満たす盤面になる。これは 4×2 のときのループで石の総数が最少の場合である。

盤上の穴の数が $2n$ とする。 $n < 4$ ならば条件 (LOOP) はループを形成するための必要十分条件になるが、 $n \geq 5$ ならば必要条件であるが十分条件ではない。すなわち条件 (LOOP) を満たさないループが存在する。

図 6 にそのような盤面を示す。この盤面を $L3_1$ とし、 a を選択して配り始めると以下のように盤面が変化し、 $L3_5$ で $L3_1$ から 1 つずれた盤面が現

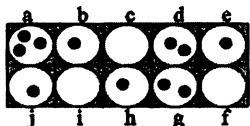


図 6: 条件 (LOOP) を満たさない開始盤面

れる.

$$\begin{aligned}
 L3_1 &= (3, 1, 0, 2, 1, 0, 2, 1, 0, 1) & a \\
 L3_2 &= (0, 2, 1, 3, 1, 0, 2, 1, 0, 1) & d \\
 L3_3 &= (0, 2, 1, 0, 2, 1, 3, 1, 0, 1) & g \\
 L3_4 &= (0, 2, 1, 0, 2, 1, 0, 2, 1, 2) & j \\
 L3_5 &= (1, 3, 1, 0, 2, 1, 0, 2, 1, 0) & b \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

このループは条件 (LOOP) を満たさない.

$n \geq 5$ の場合はこのような盤面も存在するため初期配置から到達可能なループの数は飛躍的に増大する.

5.2.3 周期 1 以上のループにおける周期とずれの関係

盤上の穴が 4×2 で周期 1 以上でループになる場合, そのループの周期とずれの間に興味深い関係が見られる.

盤面 $L4_1 = (5, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$ を開始盤面とするループは以下のようになり, 周期 3 で 3 個ずれる.

$$\begin{aligned}
 L4_1 &= (5, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1) & a \\
 L4_2 &= (0, 2, 1, 2, 1, 2, 0, 1) & f \\
 &\vdots \\
 L4_{11} &= (1, 2, 0, 4, 1, 0, 1, 0) & b \\
 L4_{12} &= (1, 0, 1, 5, 1, 0, 1, 0) & d \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

盤面 $L5_1 = (3, 1, 2, 3, 0, 1, 0, 1)$ を開始盤面とするループは以下のようになり, 周期 10 で 1 個ずれる.

$$\begin{aligned}
 L5_1 &= (3, 1, 2, 3, 0, 1, 0, 1) & a \\
 L5_2 &= (0, 2, 3, 4, 0, 1, 0, 1) & f
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\vdots \\
 L5_{30} &= (0, 2, 1, 2, 3, 0, 1, 2) & h \\
 L5_{31} &= (1, 3, 1, 2, 3, 0, 1, 0) & d \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

実験結果の解析により, どのループにおいてもそのずれが n のとき周期は $n + 9 \times k$ となる ($k = 0, 1, \dots$) ことが判明した. したがって周期と穴数が互いに素であれば, (周期 \times 穴数) だけまわって初めてループの開始盤面と完全に一致するものが現れる.

6 議論

6.1 Mancala の研究

Mancala 一般に関する研究は主にゲームプログラミングの分野で行われているが, それらの主題は戦略や序盤戦における表の利用についてであり [6][7], 動きに関する理論的解析を行ったものはほとんどない. Mancala の 1 つ Awari の動きに対して数学的解析を行った研究もあるが [6], 道具だとして不十分である. 本稿では BAO の性質の理論的解析を行い, 特に周期性に関して議論した.

6.2 SPIN による検証

モデルチェッカは主として並行システムの検証を目的としており, 並行性をもたないシステムに対する強力なチェッカはない. BAO では各穴やプレーヤをプロセス, 穴の選択や石の動きをプロセス間の通信とみなすことで並行システムとしてとらえると非常に都合がよいが, これらが同時に動くことはないので特に並行システムとして検証を行う必要はない. モデルチェッカが比較的簡単に使えること, 動作や仕様の記述と相性がよいことから本研究では SPIN を利用した.

ループの周期とずれの関係から単純な全探索プログラムで盤面の一致やループの周期を検出するのは時間的にも空間的にも計算量が非常に多くなる. 本研究ではモデルチェッカを使うことで大幅に計算量を削減し, 正しい解が得られたことが保証された.

特に盤上の穴の数が 8×2 のとき、千日手になる手筋は人手ではもちろん、単純な全探索プログラムを使っても発見することは困難であり、本研究でもモデルチェッカを利用することで初めて発見することができた。

7 まとめ

ボードゲーム BAO について、モデルチェッカ SPIN を利用して 1 手が停止せず周期性を持つような局面と初期配置からそこに至るまでの手筋を検出した。モデルチェッカを利用することで、単純な全探索では発見しにくいループを検出することができた。また、その周期性に関して解析を行い周期性を持つ局面の満たす条件を示した。この条件は穴の数に依存するものと依存しないものがある。

人間による先読みの困難さ、規則性をもつループの出現可能性、さらに、石の配置が 1 個ちがうだけでその盤面の変化は劇的に異なるという事実、などが BAO をゲームとして興味深いものになっている。

今回は主に 4×2 穴の場合の解析を行ったが、 8×2 穴の場合のループはさらに別の条件を満たすと考えられるので、今後はそれについても検討していく予定である。

謝辞

モデルチェッカについては産業技術総合研究所高橋孝一氏の助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- [1] Larry Russ: *The Complete Mancala Games Book*, Marlow & Company (1995).
- [2] 稲畑 康博, 高橋 和子: ボードゲーム BAO の対戦戦略の評価と解析, 情報科学技術フォーラム (FIT), (2003)
- [3] 稲畑 康博, 高橋 和子: ボードゲーム BAO の CCS による記述と解析, 第 48 回プログラミング研究会資料 (PRO-2003-5), (2004)
- [4] 松原 仁: 最近のゲームプログラミング研究の動向, 人工知能学会誌, Vol.10, No.6, pp.835-

845, (1995).

- [5] Gerard J Holzman: *The SPIN Model Checker Primer and Reference Manual*, Addison Wesley, (2000).
- [6] Van der Goot, Roen: Awari Retrograde Analysis, *Proceedings of CG2000*, pp.87-95, (2001).
- [7] Jeroen Donker and Jos Uiterwijk: Programming Bao, *Seventh Computer Olympiad: Computer-Games Workshop Proceedings*. (Ed. J.W.H.M. Uiterwijk). *Technical Reports in Computer Science, CS 02-03. IKAT, Department of Computer Science, Universiteit Maastricht, Maastricht*, (2002).
- [8] 松原 仁, 竹内 郁雄 編: ゲームプログラミング, 共立出版, (1998).
- [9] <http://ist.ksc.kwansei.ac.jp/~ktaka/LABO/BAO/>

付録 A 4×2 の盤面で出現するループ

表 2: 周期 1 以上でループになる盤面 (左端を開始位置とする)

盤面例	周期	ずれ
(3,1,0,1,0,1,0,1)	1	1
(3,1,0,1,0,3,0,1)	2	2
(3,1,0,3,0,1,0,1)	2	2
(5,1,0,1,0,1,0,1)	3	3
(3,1,0,3,0,3,0,1)	4	4
(5,1,0,1,0,3,0,1)	6	6
(5,1,0,3,0,1,0,1)	10	1
(7,1,0,1,0,3,0,1)	30	3
(3,1,0,1,0,1,0,4)	2	2
(3,1,0,3,0,1,0,4)	2	2
(3,3,0,1,0,1,0,4)	9	0