

令和5年度 特別研究報告書

対戦ゲームにおける AI プレイヤーの強  
さの適正選択ツールの検討

龍谷大学 理工学部 情報メディア学科

T180471 藤田知佳

指導教員 三好力 教授

## 内容梗概

大抵の対戦ゲームをしていて、喜びを強く感じられる瞬間は自らと同等、もしくは少し格上の相手に勝利した時である。一人で遊ぶ場合、対人でなければその相手は AI プレイヤーになる。しかし、ゲームごとに強さの基準の異なる AI プレイヤーから、利用者にとってふさわしい強さの AI プレイヤーを選ぶことは難しい。しかし、ある一つのゲームに限れば、AI プレイヤー同士の対戦結果を用いることで利用者と AI プレイヤーの一度の対戦結果と比較して相対的な強さを推定し、二度目以降の対戦からは利用者に適した強さの AI プレイヤーを推薦できるのではないかと考えた。

本研究では、ゲームにおいて、AI プレイヤー同士の対戦結果と AI プレイヤーの強さに対応関係が存在していれば、対応関係の式に AI プレイヤーと利用者の一度の対戦結果を代入することで利用者の強さを相対的に類推することが可能であると考え、あるゲームにおいて AI プレイヤー同士の対戦結果と AI プレイヤーの強さには対応関係が存在するという仮説を立て、リバーシのプログラムを用いた実験によって実際に対応関係が存在しているか検証した。

## 目次

第1章 研究の背景と目的 .....	1
1.1 二人零和有限確定完全情報ゲームの例とそれぞれの共通点 .....	2
チャトランガ.....	2
チェス.....	3
将棋.....	4
シャンチー.....	6
囲碁.....	7
オセロ(リバーシ).....	8
マンカラ.....	9
第2章 既存技術 .....	11
2.1 Mini-Max 法.....	11
ゲーム木.....	11
思考プログラムの基本的な考え方.....	12
先読み.....	13
$\alpha\beta$ 法.....	14
2.2 回帰分析.....	16
線形回帰.....	16
第3章 提案手法 .....	17
第4章 実験 .....	18
4.1 実験目的.....	18
4.2 実験概要.....	18
4.3 実験結果.....	19
第5章 考察 .....	20
第6章 まとめ .....	21
謝辞 .....	22
参考文献 .....	23

## 第1章 研究の背景と目的

パソコンや専用の機体で遊ぶことのできる対戦ゲームは、多くの場合自分以外の人間と対戦できるモードとコンピュータープレイヤー(CPU)もしくはAIプレイヤーと対戦できるモードが用意されている。ゲームに用意されているAIプレイヤーにはいくつかの段階に分かれた強さを選べるものや特定の行動を取りやすい戦法を選べるものもある。大抵の対戦ゲームをしていて、喜びを強く感じられる瞬間は自らと同等、もしくは少し格上の相手に勝利した時である。AIプレイヤーと対戦する時、利用者にとってちょうど良い強さのAIプレイヤーを選ぶことは利用者の強さを把握していないと難しい。対戦ゲームにおける強さは簡単に数値化できないからだ。ゲームごとに基準が違うので違うゲームのAIプレイヤーはレベル差が異なるし、同じゲームでもAIプレイヤーに使用されている理論が異なる場合もある。しかし、ある一つのゲームに限れば、AIプレイヤー同士の対戦結果を利用することで、ある強さのAIプレイヤーと利用者の一度の対戦結果をAIプレイヤー同士の対戦結果と比較することで相対的な強さを推定し、二度目以降の対戦からは利用者に適した強さのAIプレイヤーを推薦できるのではないかと考えた。

ゲームと呼ばれるものには色々な種類がある。例えば何人で遊ぶものであるか、ゲームに使用する情報は全て開示されているかどうか、運の要素があるかどうか、ゲームのジャンルは何かなど、種類の分類も基準によって色々なものがある。よく目にする一般的なゲームの種類の分類はアクション、パズル、格闘等のジャンルと呼ばれるものである。

その色々な種類の分類の中に、ゲーム理論において分類される二人零和有限確定完全情報ゲームというものがある。零和とは、プレイヤー間の利害が完全に対立し、一方のプレイヤーが利得を得ると、それと同量の損害が他方のプレイヤーに降りかかることを意味し、有限とは、ゲームが必ず有限の手番で終了することを意味する。また、確定とは、サイコロのようなランダムな要素が存在しないことを言い、完全情報とは全ての情報が両方のプレイヤーに公開されていることを意味する。つまり、二人で遊ぶ、損得が等しい状態で必ず終了するゲームで、かつ運要素がなく情報も全て開示されているものを指す。伝統的なボードゲームの多くがこの分類に属している。この分類のゲームの特徴は、理論上は完全な先読みが可能であり、双方のプレイヤーが最善手をプレイし続ければ、必ず先手必勝か後手必勝か引き分けかが決まるという点である。二人零和有限確定完全情報ゲームの先読みをAIによって行う研究は早くからされてきた。

## 1.1 二人零和有限確定完全情報ゲームの例とそれぞれの共通点

二人零和有限確定完全情報ゲームと呼ばれる分類のゲームにはチェス、将棋、囲碁、シャンチー、オセロ（リバーシ）、マンカラ等がある。例に挙げたゲームは分類の中でも更に共通点でまとめることが出来る。

チェス、将棋、シャンチーの3つはチャトランガというゲームを元に行っている。

### チャトランガ

チャトランガ[1]は、古代インドのボードゲームの一種である。将棋やチェスの起源と考えられている。チャトランガとはサンスクリット語で chatur は4、そして aṅga は部分という意味である。したがって、chatur-aṅga は現在では臣・象・馬・車の4つの戦力のことを指し示しているという説が有力である。アラブ世界のシャトランジの源流でもある。チャトランガは二人制のものと同様に四人制のものも存在した。近年の発掘などの成果により、二人制チャトランガの成立の方が先だったとする説が有力となっている。

歴史的背景により詳しいルールが失われているため、不正確であるが、以下のルールが存在している。

- ・縦横8マスに区切られた盤の上で行う。
- ・四人制では4人が2組になって勝負し、その後は勝った組同士で勝負する。
- ・四人制では4人のプレイヤーが順番に、サイコロを振る。出た目によって定められた列の自軍の駒を1回だけ動かすことができる（後には、サイコロを使わず、自軍の任意の駒を1回だけ動かすことができるようになったと考えられている）。二人制ではサイコロは用いず、任意の駒を動かすことができたと考えられる。
- ・四人制の場合の駒はラージャ（王）、ガジャ（象）またはハスティー（象）、アシュワ（馬）、ラタ（車）またはローカ（船）、パダーティ（歩兵）の5種類で、それぞれ動きが決まっている。プレイヤーごとに赤・緑・黄・黒に色分けされた駒を用いる。
- ・二人制の場合の駒はラージャ（王）、マントリ（臣・大臣）、ガジャ（象）またはハスティー（象）、アシュワ（馬）、ラタ（車）またはローカ（船）、パダーティ（歩兵）6種類である。
- ・歩兵が最前列（いちばん向こうの列）に到達した場合は、歩兵のあった列の駒に昇格することができる。つまり車の前にいる歩兵は車に、馬の前にいる歩兵は馬に昇格する。ただし、歩兵のあった列の駒が既に取られている場合に限る。
- ・王はゲームの中で1度だけ、馬の動きができる。

- ・自分の駒を動かす際、動く先に他のプレイヤーの駒があれば、その駒を取ることができる。駒は取り捨てで、持ち駒の概念はない。
- ・自軍の王を取られたプレイヤーは負けとなる。

## チェス

チェス[2]は、二人で行うボードゲーム、マインドスポーツの一種である。非常に古い歴史を持つゲームであり、様々な媒体を通して盛んである。現在では欧米圏のみならず、全世界 150 か国以上で楽しられている。カードゲームなども含めたゲーム全般においてもブリッジと並んで最も多くプレイされている。チェスの起源には諸説があるが、一般的には古代インドの戦争ゲーム、チャトランガが起源であると言われている。日本においては、同じチャトランガ系統のゲームである将棋の方が遥かに競技人口が多く、両者は基本的なルールが似ていることから、チェスは西洋将棋または国際将棋と訳されることがある。一方で、チェスと将棋はチャトランガが異なるルートで東西に伝播しつつ独自の変遷を遂げたものであるとされ、盤の広さや駒の性能、取った駒の扱いに関するルールの違いなどから、両者は似て非なるゲームであるとも評される。

チェスのルールは以下の通りである。

- ・ゲームは 2 人のプレイヤーにより、縦横 8 マスずつに区切られたチェスボードの上で行われる。
- ・白が先手、黒が後手となる。
- ・白・黒それぞれ 6 種類 16 個の駒を使う。
- ・双方のプレイヤーは、交互に盤上にある自分の駒を 1 回ずつ動かす。パスをすることはできない。
- ・味方の駒の動ける範囲に敵の駒があれば、それを取ることができる。ただしポーンだけは、敵の駒を取れる範囲が通常の移動範囲と異なる。
- ・敵の駒を取った駒は、取られた駒のあったマスへ移動する。

これはポーンも同じだが、ポーン同士によるアンパッサンは例外である。

取られた駒は盤上から取りのぞき、以降そのゲームが終わるまで使用しない。

- ・ナイトと、キャスリング時のキング・ルークを除き、駒は他の駒を飛び越して移動することはできない。
- ・キングは、敵の駒が利いている（直後の手で取られるような）場所には移動することができない。
- ・相手のキングに、自分の駒を利かせて取ろうとする手を「チェック」と呼ぶ。

この状態では、相手側は次の手ですぐにキングの安全を確保しなければならない。

キングが次の手で絶対に逃げられないように追い詰めたチェックのことを「チェックメイト」と呼び、この手を指したプレイヤーの勝ちになる。

・以下の場合はずべて引き分けとなる。

ルール上動かせる駒がなくなったがチェックにはなっていない状態「ステイルメイト」になった場合

どちらもチェックメイトができなくなるほどにコマを失った場合

永久王手など、同一の局面が3回生じる千日手が指摘された場合

## 将棋

将棋[3]は、二人で行うボードゲームの一種である。チェスなどと同じく、古代インドのチャトランガが起源であると考えられている。チェスやシャンチーなどと区別するため日本将棋(にほんしょうぎ)ともいい、特に日本の「本将棋」には「持ち駒」の観念が古くからあることが特徴とされている。これは、諸外国のチェス類似の伝統的ゲームに例のない独特のルールである。持ち駒を利用したチェス派生のゲームが考案されたのは後年のことである。

ゲーム理論の分類では、一般的には二人零和有限確定完全情報ゲームであるとされる。ただしステイルメイトや後述する千日手に関してルールの不備や曖昧さがあり、厳密には二人零和有限確定完全情報ゲームとは言えない。

将棋のルールは以下の通りである。

・ゲームは2人のプレイヤーにより、縦横9マスずつに区切られた将棋盤と将棋駒を用いて行われる。

・それぞれ8種類20個の駒を使う。

・双方のプレイヤーは、交互に盤上にある自分の駒を1回ずつ動かす。パスをすることはできない。

・対局者とは将棋盤を挟んで向かい合って対局することになるが、このとき将棋盤の自分側から3段目までのマス是自陣、相手側から3段目までのマスを敵陣と呼ぶ。

・敵味方の区別は駒の向きで行われる。王将と玉将以外は敵味方共通の駒を用い、先の尖った独特の五角形で向きが存在し、一局を通じて自分の駒と相手の駒は常に向き合う方向に配置される。したがって、駒の向いている方向によって、その駒が現在自分と相手のどちらに属しているかが表される。ほかの将棋に類するゲーム(チェス、シャンチーなど)と違って、駒の色分けは無い。「持ち駒」のルールから、駒が敵味方どちらに属しているかは幾度も変わる事となる。

・盤上の駒は一局を通じて常に1つのマスに入る(シャンチー・囲碁のように線の交点に配置されるわけではない)。1つのマスに複数の駒が存在したり、1つの駒が2つ以上のマスに同時に存在したりすることはない。

・盤上に存在しないマスには移動できない。それぞれの駒の利きも盤上にあるマスの範囲に限られる。

・すでに自分の他のコマが存在するマスには移動できない。相手のコマが存在するマスに移動する場合、相手のコマは必ず自分の「持ち駒」として捕獲することになる。

・桂馬以外の駒は、自分と相手どちらの他の駒も飛び越して移動することができない。飛、角、香などの走り駒は、他のコマの奥にあるマスに移動することもできない。すなわち走り駒の移動範囲と駒の利きは、盤の端のマス・相手の駒があるマス・自分のほかの駒から一つ手前…の中で最も近いマスが限界となる。桂馬は周囲マスの駒に関わらず、あくまで移動先となるマス（先述の駒の動きを参照）に、自分の他のコマが存在していない状態であれば移動できる。

・玉将と相手の走り駒などとの位置関係により、自分の駒を移動させることによって自玉を相手駒の利きにさらすことになる場合には、禁じ手に該当することとなり移動できない。

・王（玉）と金以外の駒は移動前後のマスが敵陣内だった場合、駒を裏返して「成る」ことを選択できる。

・相手の王将もしくは玉将に、自分の駒を利かせて取ろうとする手を「王手」と呼ぶ。

・どちらかの対局者が以下の状態になった場合には、その対局者の負けとなり、もう一方の対局者の勝ちとなる。

詰み（自玉に王手がかかり、かつ王手放置が確定しており合法的指し手が存在しない）

投了（勝利不可能と判断して負けを認めた）

時間切れ（持ち時間中に手を指せなかった）

反則行為（反則を行ったことを指摘された）

ルール違反（基本ルールに反する動作を行った）

禁じ手（ルールで禁止された手を指した）

連続王手の千日手（相手玉への王手の連続によって千日手が成立した）

相入玉の点数不足（相入玉に対局者同士が合意し、点数計算で基準点数に満たない場合。「24点法」の場合は24点未満）

被入玉宣言（条件を満たした状態で対戦相手が入玉を宣言した）

・以下の状態になった場合には、引き分けとなる。

連続王手以外の千日手（連続王手以外で同一局面が4回現れた場合）

持将棋（相入玉に対局者同士が合意し、点数計算で両者ともに基準点数を満たす場合。「24点法」の場合は両者ともに24点以上）



## シャンチー

シャンチー[4]は、二人で行うボードゲームの一種である。中国及びベトナムにおける伝統的な将棋類であり、中国では国家の正式なスポーツ種目にもなっている。この競技は中国語では「象棋」と呼ぶが、これは中国語でチェス類の一般表現にも使うため、特に区別する際には「中国象棋」と呼ばれる。シャンチーは他の将棋型ゲームと同様、インドのチャトランガを起源とするとされる。

シャンチーのルールは以下の通りである。

- ・ゲームは2人のプレイヤーにより、縦9本・横10本の線の引かれた専用の盤の上で行われる。駒はマスの中ではなく、囲碁のように線の交点に置く。
- ・一方を紅、一方を黒という。時代・地域により違ったこともあるが、現在のルールでは紅が先に指す。
- ・紅・黒それぞれ7種類16個の駒を使う。同じ機能の駒でも紅黒で名前が異なる駒がある。
- ・紅黒が交互に、盤上にある自分の駒を一回ずつ動かす。パスはできない。
- ・自分の駒が動ける交点に相手の駒があるとき、その駒を取って進むことができる（炮を除く）。取られた駒は盤面から除去する。将棋と異なり、取った駒は再利用出来ない。
- ・次に相手の帥・将を取る手を将（ジャン、将棋でいう王手）といい、相手がそれを解消できないこと（日本将棋でいう詰み）を将死（ジャンスー）または殺（シャー）といって勝ちとなる。また相手指し手番で相手がどの駒も動かさないステイルメイト（困斃、クンビー、欠行）にしても勝ちである。ジャンを無視したり、帥・将が自ら相手の駒から取られたりするような動かし方をする（自殺）ことはできない。
- ・王不見王（ワンブーージェンワン）、あるいは対面笑（ドイメンシャオ）や飛将（フェイジャン）。帥と将を直接相対させてはいけないというルールがある。帥と将が同じ列で、その間に他の駒が一つもないような状態にするような手は指すことができない。具体的には帥と将の間に一つだけ存在する自身の駒を動かすことや、帥・将がジャンを避けて動いた結果、相手の将・帥の前に出してしまうことが挙げられる。どの駒を動かしても帥と将が直接相対してしまう状況となった場合、負けとなる。
- ・連続王手の千日手（長将、チャンジャン）は禁じ手であり、ジャンをかけている方は3回同じ局面が出現するまでに手を変えなければならない。ジャン以外の千日手は一方が手を変えなければならない場合と、双方とも手を変えなければ引き分け（和棋、ホーチー）になる場合があり、ルールで細かく定められている。
- ・駒の消耗によって双方が相手を将死にできなくなった場合は引き分けとなる。

また完全に将死にできなくなるほどの損耗でなくとも、相手の致命的ミスがなければ将死が確実にできないなど、対戦者同士の合意により引き分けとする場合もある。

- ・チェスにおける 50 手ルールと同様に、駒をとらないまま紅黒が 50 着（歩）ずつ（紅黒合わせて 100 手）指した場合は引き分けとなる。

上記をまとめると、プレイ人数が二人である点、駒それぞれに専用の動きがある点、特定の駒を取ることが勝利条件である点等が共通点である。

囲碁、オセロ（リバーシ）、マンカラは、上記の 3 つとは違い、同じゲームを基にはいないが、勝利条件がよく似ている。

## 囲碁

囲碁[5][6]は、交互に盤上に石を置いて行き自分の石で囲んだ領域の広さを競う、2 人で行うボードゲームの一種である。単に碁（ご）とも呼ばれる。発祥は中国と考えられており、2000 年以上前から東アジアを中心に親しまれてきた。そうした文化・歴史の中で爛柯等さまざまな別称を持つ。日本でも平安時代から広く親しまれ、枕草子や源氏物語といった古典作品にも数多く登場する。戦国期には武将のたしなみでもあり、庶民にも広く普及した。江戸時代には家元四家を中心としたプロ組織もでき、興隆の時期を迎えた。明治以降も引き続き広く親しまれ、近年ではインターネットを経由して対戦するネット碁も盛んである。日本では駄目、布石、捨て石、定石など、数多くの囲碁用語は日本語の慣用句としても定着している。ルールは、いわゆる日本ルールと中国ルール、中国ルールを元に台湾で考案された計点制ルールなどがある。いずれもゲームの進め方や勝敗の判定に大きな違いはないが、細かい違いはある。

囲碁の日本ルールは以下の通りである。

- ・ゲームは 2 人のプレイヤーにより、縦横 19 本ずつ線の引かれた専用の盤（19 路盤）の上で行われる。縦横が 9 本、13 本、15 本の盤もある。石はマスの中ではなく、線の交点に置く。

- ・黒が先手、白が後手となる。

- ・黒、白の対局者が交互に自分の石を盤上の交互に着手する権利を持つ。着手した石は、取られない限りそこから動かせず、盤上の石が何らかの事情で動いた場合は元の位置に戻して対局を続行する。

- ・相手の石に縦横に隙間なく取り囲まれると、その石は盤上に存在できなくなる。一方の着手により他方の石が盤上に存在できなくなった場合、それらの石はハマとして取りあげる。盤面から取り除いた時点で着手の完了とする。

- ・自殺手、つまり自ら取り囲まれた状態にする手は禁止である。打つことで反則になる地点を着手禁止点と呼ぶ。ただし、その石を打った時点で相手の石を取ることができる場合は例外である。
- ・自分が打つことによって、相手が打った直前の局面に戻してはならない。お互いが交互に相手の石を取り、無限に続くうる形をコウ（劫）と呼ぶ。これを繰り返すと永遠に対局が終わらないため、同一局面の反復は禁止とされている。
- ・一方の生き石のみの一団に囲まれた空点のことを地と呼ぶ。
- ・地の面積とハマの数の和の大小によって勝敗を争う。形勢判断などでは、この和の数値のことを地というため、たとえば、黒地〇〇目、白地〇〇目などというときは、この和のことを言う。
- ・ただし囲碁の互先では、先番の黒が有利であり、その分のハンディとして「コミ」が設定されている。現在、通常コミは6目半とされており、この分を白地に足して計算する。
- ・以前のルールでは、これ以上は打っても得をする場所がないと双方が認めて合意すると「終局」となり、その後でダメ（打っても得をしない箇所）を埋めて互いの地を数えることとされていたが、平成元年にルールが改定され、ダメしか残っていてもすべてダメを埋めてからでないと終局することができなくなるとされた（インターネット対局では、双方がパスをすることによって終局とするケースが多い）。
- ・対局中に三コウ以上の多元コウ、長生、循環コウが発生し、双方譲らず同型反復となった場合、対局は無勝負扱いとなる。
- ・対局停止後に対局者が発見した有効な着手が勝敗に影響するため終局に合意できない、対局中に盤上の石が移動したまま対局が進行した際に石を元に戻して続行することに対局者が合意できない場合、の2例において「両負け」としてしている。

## オセロ（リバーシ）

オセロ[7]は、2人のプレイヤーが交互に盤面へ石を打ちながら、相手の石を自分の石で挟むことによって自分の石へと換えていき、最終的な盤上の石の個数を競うボードゲームである。ほぼ同様のゲームにリバーシがある。オセロという名称はメガハウスの登録商標であるため、他社からはリバーシとしてほぼ同様のゲームが発売されている。

オセロ（リバーシ）のルールは以下の通りである。

- ・ゲームは2人のプレイヤーにより、縦横8マスずつの正方形のマス目が描かれた緑色の盤上で行われる。
- ・黒が先手、白が後手となる。

- ・オセロの石は、表裏を黒と白に塗り分けた平たい円盤状のものを使用する。
- ・初期配置として、盤面中央の 4 マスに黒石と白石を 2 つずつ置く。右上と左下が黒石、左上と右下が白石になるように互い違いに配置する。
- ・石を打つときは、必ず相手の色の石を 1 つ以上挟むように打たなければならない。挟める石がなければパスとなり、相手の手番になる。
- ・盤上のすべてのマスが石で埋まって空きマスがなくなれば、ゲーム終了(終局)となる。空きマスがあっても、両者ともに挟める石がないときは終局となる。
- ・ゲームが終了したら黒石・白石の数を数え、多いほうが勝ちとなる。同数の場合は、通常の対局では引き分けとなる。
- ・成績は、石数もしくは石差で記録される。空きマスがある場合には、その数が勝者の石数に加算される。

## マンカラ

マンカラ[8]は、アフリカや中近東、東南アジアにかけて古くから遊ばれている、伝統的な一群のゲーム(ボードゲーム)の総称である。

ルールの異なる 100 種以上ものゲームが含まれ、他のボードゲームとは明確に区別される特徴を持つ。西洋で広く知られているマンカラには、カラハ、オワリ、チョンカ、オムウェソ、バオなどという名のものがある。マンカラという言葉は本来一群のゲームの総称だが、アメリカやヨーロッパのゲームメーカーの中にはカラハ(Kalah)のことをマンカラとして説明しているところもある。また、日本のいくつかのウェブサイトでは、マンカラ系のあるひとつのゲームだけをマンカラとして紹介しているところもある。

特に有名なマンカラ・カラハのルールは以下の通りである。

- ・プレイ人数は 2 人。二人零和完全情報ゲームである。
- ・石に敵味方の区別は無い。
- ・ボードは 2 つの列で構成されており、各列には 6 つずつ計 12 の小さな穴(ピット)とそれを挟むように両端に大きな溜め穴がある。各プレイヤーはボードの一方の列を管理する。
- ・開始時に溜め穴以外の各穴に 4 つずつ計 48 の石を入れ、交互に sowing(種蒔き)と呼ばれる方法で石を動かす。これは、自分の穴からどれか一つを選び、その穴にある石を全て手に取り、その石をひとつの穴に 1 個ずつ、隣の穴から反時計回りに順番に入れてゆく動作である。カラハの場合、種蒔きの時は自分の溜め穴にも石を入れる。相手の溜め穴には石を入れない。
- ・種蒔きの最後の穴が自分の溜め穴の場合、もう一度種蒔きを行う。
- ・プレイヤーが最後に置いた種が自分の列の空の穴に着地した場合、そのプレイヤーが最後に置いた石とその穴の対向の相手の列の穴の中の石を全て取り、

自分の溜め穴に置く。

・どちらかの手番で種蒔きができなくなればゲーム終了となる。石が残っているほうのプレイヤーは自分の石をすべて溜め穴に移し、得点とする事ができる。溜め穴により多くの石を集めた方が勝ちとなる。

・基本最初の石の配置は4つずつが多いが、2~6個の場合もある。

上記をまとめると、二人で交互に石を置く（動かす）点や、地や石を多く取った方の勝利である点等が共通点である。さらに、オセロとマンカラに絞ると使う石の総数が固定である点も共通している。

## 第2章 既存技術

### 2.1 Mini-Max 法

ミニマックス法またはミニマックス探索[9]とは、想定される最大の損害が最小になるように決断を行う戦略のことである。将棋、チェス、リバーシなどといった二人零和有限確定完全情報ゲームをコンピュータに思考させるためのアルゴリズムとしても用いられるが、元々はフォン・ノイマンが中心となって数学的に理論化されたゲーム理論において、打ち手を決定する際に適用されるルールの一つである。

#### ゲーム木

完全情報ゲームは、お互いがどの手を打ったかによってどのような局面が出現するかを場合分けしていくことでゲーム展開を樹形図にできる。このように現在の局面から出現するすべての局面の関係をゲーム木[10]と呼ぶ。また、ゲームの最初から指せる全ての手を含んだゲーム木のことを完全ゲーム木と呼ぶ。

ゲーム木は各段階で枝分かれてしていくが、枝分かれの数はプレイヤーの選択肢の数だけあり、ゲーム木を下にたどる（より先を読む）につれ局面（節点）の数は劇的に増加する。

ゲーム木は人工知能で重要であり、最良の手はゲーム木を探索することで得られ、ミニマックス法などのアルゴリズムを使用する。三目並べのゲーム木は小さいので探索も容易だが、チェスなどの完全ゲーム木は大きすぎて全体を探索することができない。その場合は代わりに部分ゲーム木を使う。部分ゲーム木は、一般に現在の盤面から指せる手を時間内に探索できるぶんだけ含んだものである。

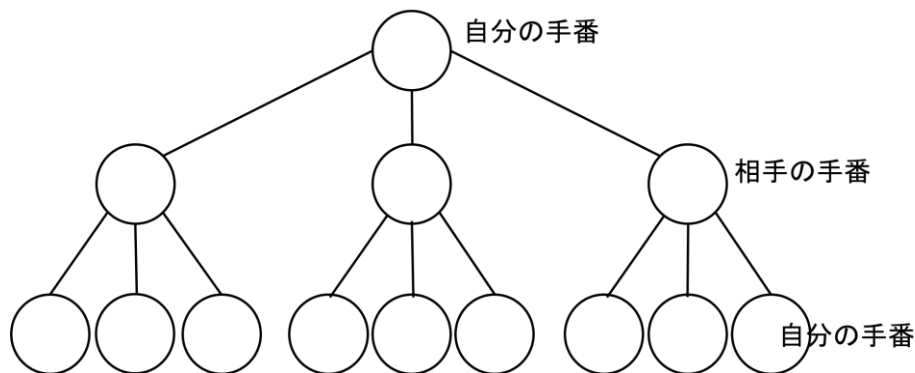


図1:ゲーム木

完全ゲーム木があれば、ゲームを解くことができる。つまり、その解に従って打っていけば、負けないことを保証できる。そのアルゴリズムは再帰的に以下のように説明できる。

- ・最終盤面でプレイヤー1 が勝つ盤面とプレイヤー2 が勝つ盤面を色分けし、引き分けになる盤面を第三の色にする。

- ・1 つ前の手（盤面）を見る。そのレベルの盤面になる手を自分の手とする。そのとき相手が勝つ盤面が子ノードとして 1 つでも存在する場合、このノードを相手の色に塗る。直下の子ノードの色が全て同じなら、このノードも同じ色に塗る。そうでない場合は引き分けの色に塗る。

- ・以上を順次上に向かって繰り返し、全てのノードを色分けする。根ノードがどの色になるかで、このゲームの性質が決まる。

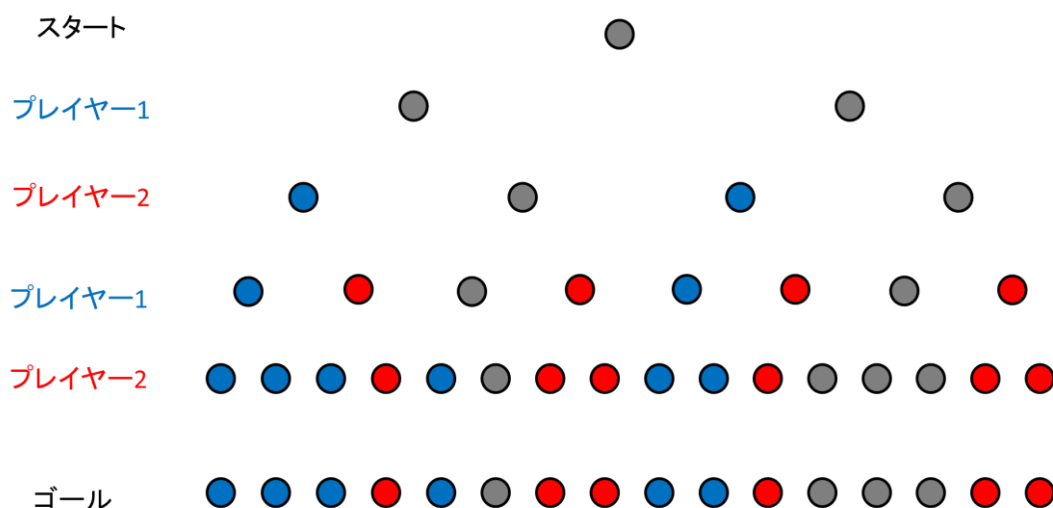


図 2:完全に色分けしたゲーム木の例

### 思考プログラムの基本的な考え方

思考プログラムの基本は、局面がどの程度自分にとって有利か点数を付ける（評価する）ことである。局面の有利度を適切に評価することができれば、自分の打てる手のうち、最も評価の高い局面を出現させるような手を選択すればよいことになる。

局面に置かれている駒の位置・数などだけから算出した評価値を静的評価値、算出する関数を静的評価関数と呼ぶ。「静的」とはここでは先読みをしていないことを意味する。通常、静的評価関数だけで適切な局面評価を行うことは困難である。そのため、先読みを実現するのがこのミニマックス法である。

## 先読み

先を読んだ上で、ある局面がどの程度有利であるかを評価するには、以下の考え方を用いればよい。

読みたい局面が相手の番であれば、その局面の次に出現するすべての局面のうち最も悪い（不利な）、つまり相手にとって最も有利な（評価値が最小）手を相手は打ってくるはずである。そこで、次に出現するすべての局面の評価値の最小値を局面の評価値にすればよい。

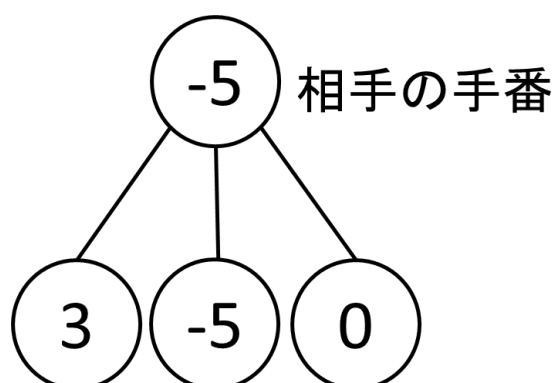


図 3：相手の手番の先読み

読みたい局面が自分の番であれば、その局面の次に出現するすべての局面のうち最も良い評価（評価値が最大）の手を打つことができる。そこで、次に出現するすべての局面の評価値の最大値を局面の評価値にすればよい。

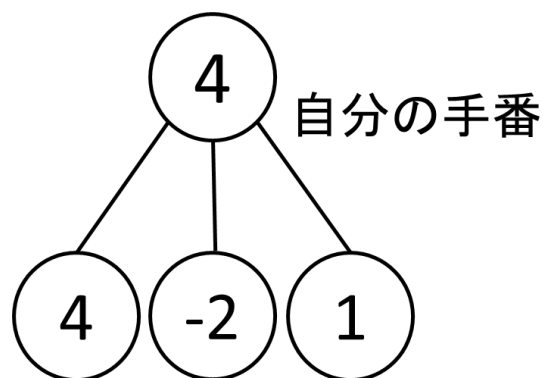


図 4：自分の手番の先読み

相手番の局面の評価値を求めるには、次に出現するすべての局面（自分番）の評価値を求めればよいので、その自分番の評価値を求めるには・・・、と再帰的にゲーム木を展開していくことで求めることができる。



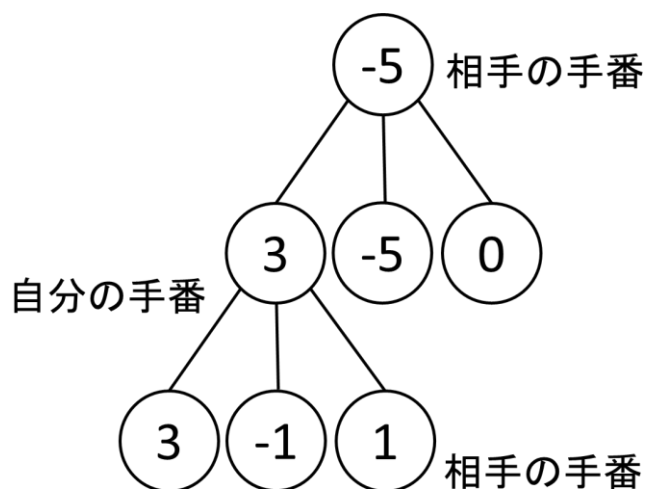


図 5：ゲーム木の展開

何手先まで読むかによって、その深さまで展開したところでは静的評価関数を用いることで探索を打ち切ることができる。前述したように、ゲーム木は深くなるにつれ局面数が爆発的に増える。そのため、ある程度以上の深さまで先読みをしようとする、実用的な時間では難しくなってくる。

通常は有限の深さまで読むことで打ち切るが、ゲーム終了まで読めばゲームの勝敗を完全に読み切った上で、最善の手を打つことができる。終盤の読みや詰め将棋の解答などは完全読みが行われる（長手数詰め将棋の解答では完全読みを行わないこともある）。リバーシのように勝敗だけでなく石差も問題となるゲームでは、勝敗のみを読み切ることを必勝読み、石差まで読み切ることを完全読みと区別する。

必勝読みでは、各局面の評価値は「勝ち」か「負け」の2通りに限定される。この場合、自分の手番の局面は、次の局面に「一つでも勝ち」があれば(自分はその局面を選択すればよいので)勝ちが決定し、相手の手番の局面は、次の局面が「すべて勝ち」なら(相手には負けを阻止する選択肢がないので)勝ちが決定する。これらは各局面の評価値の論理和 (OR)、論理積 (AND) とったものであることから、それぞれ OR ノード、AND ノードと呼ばれる。このように評価値が勝敗のみで表されるゲーム木は、特に AND/OR 木と呼ばれる。

### $\alpha$ $\beta$ 法

ミニマックス法はすべての局面に対してしらみつぶしに探索を行うため、実際には読む必要のない(評価しなくても支障がない)手も読むことになり探索効率が悪い。これを改善したアルゴリズムとして  $\alpha$   $\beta$  法[11][12]がある。 $\alpha$   $\beta$  法は、読む必要のない手を打ち切ることで高速化を図っている。実際のゲームプログ

ラムでは $\alpha$   $\beta$ 法をさらに応用したアルゴリズムが用いられることが多い。

探索の必要のない手を打ち切る手法として、 $\alpha$ カットと $\beta$ カットがある。

$\alpha$ カットとは、評価値が最大のものを選ぶ過程において、既に出現した評価値よりも小さいノードが出現した時点でそのノードを探索対象から外してしまう手法のことである。

$\beta$ カットとは、評価値が最小のものを選ぶ過程において、既に出現した評価値よりも大きいノードが出現した時点でそのノードを探索対象から外してしまう手法のことである。

自分の最善手を選びたいとき、つまり自分の利益を最大に、相手の利益を最小にしたいときに、ゲーム木の自分のノードに対して $\alpha$ カットを、相手のノードに対して $\beta$ カットを行ってからミニマックス法と同じように計算する手法を $\alpha$   $\beta$ 法と呼ぶ。

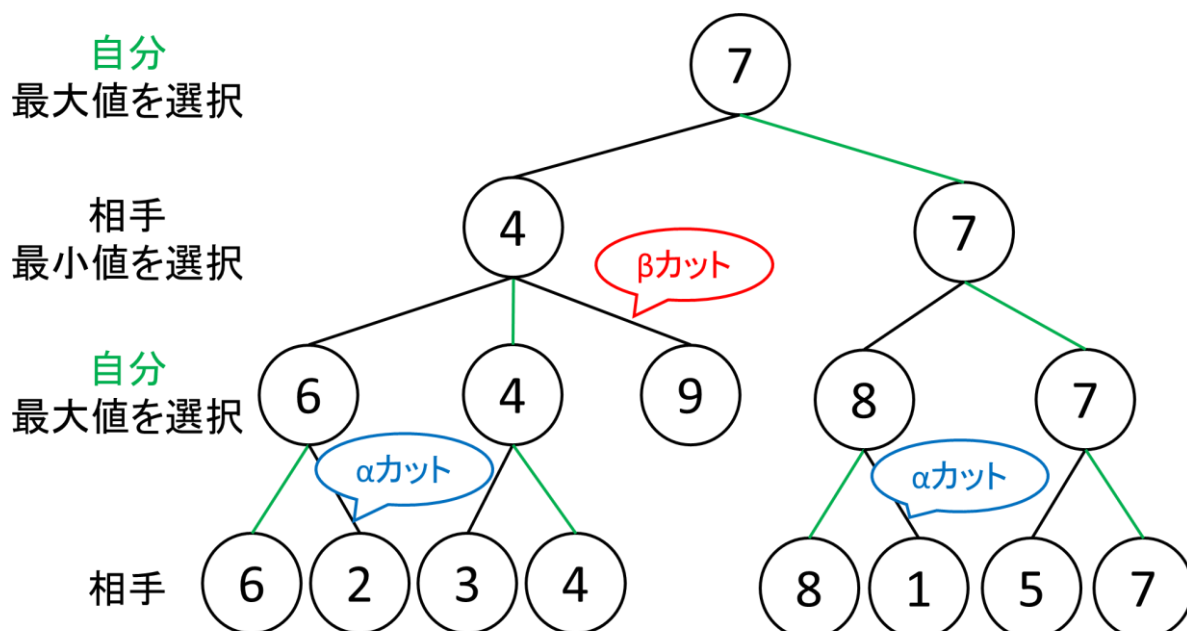


図6:  $\alpha$   $\beta$ 法のイメージ図

## 2.2 回帰分析

回帰は統計学において、データが連続値の場合に  $Y = f(X)$  というモデル（「定量的な関係の構造」）を当てはめる手法である。言い換えると、連続尺度の従属変数（目的変数） $Y$ と独立変数（説明変数） $X$ の関係をモデル化することを指す。 $X$ が1次元の場合は単回帰と呼ばれ、 $X$ が2次元以上の場合は重回帰と呼ばれる。 $Y$ が離散の場合は分類となる。

回帰分析[13]は、この回帰を用いてデータを分析する手法である。一般的なモデルとして使用されるのは  $Y = AX + B$  という形式の線形回帰である。回帰分析では、独立変数と従属変数の関係を統計的手法によって推計する。例えば、経済学では国民所得（ $X$ ）で説明される消費（ $Y$ ）を表す消費関数が  $Y = aX + b$  というモデルで表されるとすると、 $Y$ が従属変数、 $X$ が独立変数に対応する。そして  $a$ 、 $b$  といった係数（パラメータ）を推定する。最も基本的な手法は線形回帰であるが、非線形モデルを用いる非線形回帰も存在する。

### 線形回帰

線形回帰[14]とは、統計学において、説明変数（独立変数とも呼ばれる）に対して目的変数（従属変数、または反応変数とも呼ばれる）が線形またはそれに近い値で表される状態である。線形回帰は回帰分析の一形態であり、非線形回帰と対比される。また線形回帰のうち、説明変数が1つの場合を単純線形回帰、2つ以上の場合を重回帰と呼ばれる。線形回帰では、データから推定される線形予測関数を利用して関係性をモデル化する。このモデルは通常「線形モデル」と呼ばれ、説明変数に対する目的変数の条件付き期待値はアフィン写像で与えられる。

線形回帰が非線形回帰に比べて用いられる頻度が高いのは、未知のパラメータが線形に依存するモデルの方が、パラメータが非線形に依存するモデルよりもフィッティングが容易であり、推定値の統計的性質を決定しやすいためである。線形回帰が扱う範囲は、予測変数の値を与えられた応答の条件付き確率分布に限られ、全ての変数の同時確率分布は多変量解析の領域に属する。

線形回帰の主な用途は、予測、予想、またはエラーの削減を目的とすることと、説明変数の変動に起因する応答変数の変動を説明することであり、これによって各説明変数が応答と全く線形関係を持たないかどうかを判断したり、説明変数のどのサブセットに応答に関する冗長な情報が含まれているかを特定したりできる。

### 第3章 提案手法

あるゲームにおいて、AI プレイヤー同士の対戦結果と AI プレイヤーの強さに対応関係が存在していれば、AI プレイヤーと利用者の一度の対戦結果を照らし合わせて利用者の強さを相対的に類推することが可能である。

よって、ゲームごとに導出したその対応関係を表す式やデータベースを集めたツールを作成することを提案する。ツールにどのゲームかを指定したのち、AI プレイヤーの強さと、それに対応している対戦結果のデータを入力することで、そのゲームにおける対応関係と照らし合わせて相対的に利用者の強さを推定し、例えば今回の AI プレイヤーより 2 つ上の強さにしてはどうか、と次回の対戦に適した AI プレイヤーの強さの推薦を出力するようにしたい。

対応関係さえ存在していれば、どんなゲームでも一度 AI プレイヤーと対戦すれば次回以降適した強さの AI プレイヤーを提案できると考えた。しかし、そもそもの対応関係がなければただの理想でしかないので、今回はあるゲームにおいて AI プレイヤー同士の対戦結果と AI プレイヤーの強さに対応関係があるという仮説を実験によって検証する。

## 第4章 実験

本章では実験目的、実験概要、実験結果について述べる。

### 4.1 実験目的

ゲームにおいて、AI プレイヤー同士の対戦結果と AI プレイヤーの強さには対応関係があるという仮説を検証することを目的とする。

### 4.2 実験概要

github で公開されている MiniMax 法を使用したリバーシのプログラム[15]を使用して、AI プレイヤー同士の対戦データを取る。それぞれの AI プレイヤーは一方を挑戦者、他方を対戦相手とし、対戦データは、お互いの探索木の深さ、全体の石の数、お互いの石の数、全体の手数、挑戦者が先手か後手か、挑戦者の勝敗の 8 項目を集める。集めた 8 項目を利用して対戦結果と強さに何らかの対応関係があるかを分析する。

今回の対戦データは、AI プレイヤーの探索木の深さを 1, 3, 5, 7, 9 の 5 段階とし、すべての組み合わせに対して 10 回ずつ対戦を行い結果を得た。しかし、今回使用したプログラムにランダム性が無かったため、同じ組み合わせの場合何度対戦させても同じ結果がかえってきたため、AI プレイヤーの区別なく総当たりした  $5 \times 5 = 25$  通りの対戦結果を、例えば先手の深さ 1 後手の深さ 1、勝者が先手のデータから、挑戦者が先手つまり挑戦者が勝者のデータと挑戦者が後手つまり挑戦者が敗者のデータを得るように、挑戦者が先手の場合と後手の場合で区別することで、50 データを得た。また、得られたデータから挑戦者と対戦相手の探索木の深さの差や石の数の差を計算し、データに加えた。

表 1: 今回の対戦データの一部

挑戦者の探索木の深さ	対戦相手の探索木の深さ	全体の石の数	黒の石の数	白の石の数	全体の手数	挑戦者の先手後手(黒1, 白0)	挑戦者の勝敗(負け0, 引分1, 勝ち2)	探索木の深さの差(挑戦者-対戦相手)	獲得した石の数の差(挑戦者-対戦相手)
1	1	64	23	41	60	1	0	0	-18
1	1	64	23	41	60	0	2	0	18
1	5	64	18	46	60	1	0	-4	-28
1	5	64	60	4	60	0	0	-4	-56

### 4.3 実験結果

集めたデータを Excel のグラフを用いて分析した。図 7 はリバーシの探索木の深さの差と石差の関連性を示している。

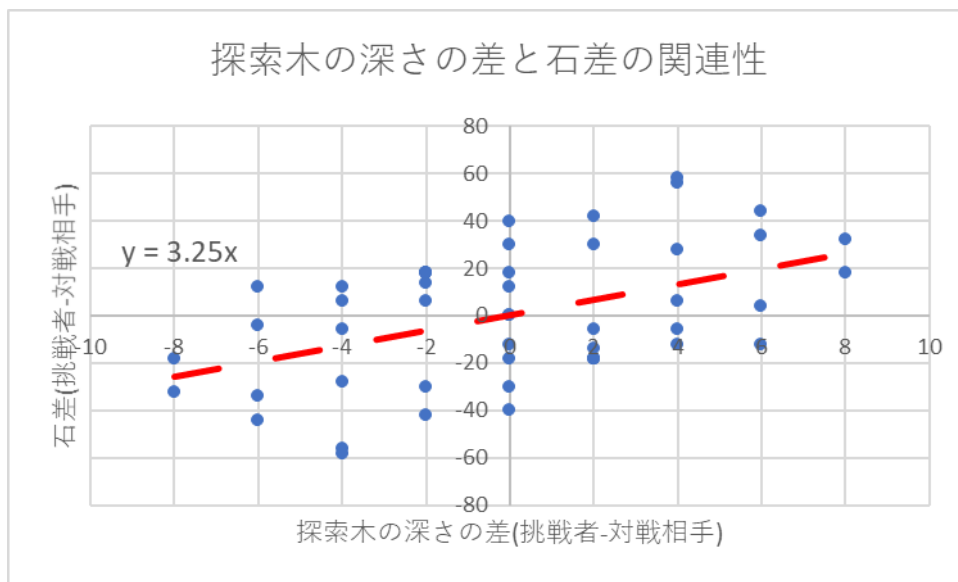


図 7: リバーシの探索木の深さの差と石差の関連性

横軸は探索木の深さの差、縦軸はお互いの石の数の差を表している。横軸の値が大きいかほど挑戦者が対戦相手よりも相対的に強く、縦軸の値が大きいかほど挑戦者が対戦相手より多く石を取っていることが分かる。赤い破線は線形近似である。横軸を $x$ 、縦軸を $y$ とすると、今回のデータからは回帰方程式 $y = 3.25x$ が得られた。このグラフを見ると、探索木の深さの差とお互いの石の数の差は正比例していると言える。

## 第5章 考察

実験結果を見ると、今回使用したリバーシのプログラムにおいては、探索木の深さの差と石の数の差に正比例の対応関係があることが分かった。また、近似ではあるが回帰方程式を導くことができた。これにより、AI プレイヤーとの強さの差が分からなくとも、対戦データから AI プレイヤーとの石の数の差や AI プレイヤーの強さは導く事ができるので、AI プレイヤーと利用者の対戦結果から導かれた値を回帰方程式に代入することで利用者の強さを推定できるであろうことが分かった。

また、今回強さの差と対応関係にあった石の数の差は、リバーシにおいては勝利条件であるため、似た勝利条件を持つゲームであれば対戦結果の内お互いの石の数と AI プレイヤーの強さのデータを集めることで回帰方程式を導くことができるだろうと推定できる。さらに、勝利条件に関わるパラメータが数値化できるゲームにおいては、AI プレイヤーの強さの差は勝利条件に関わるパラメータと対応関係があるという仮説を立てることができる。

しかし、将棋やチェス等、王を取ることが勝利条件のゲームでは今回の方法が使えないため、石の数の差ではない別のパラメータを探す必要がある。

今後の課題としては、今回の実験によって新たに立てた、あるゲームにおいて AI プレイヤーの強さの差は勝利条件に関わるパラメータと対応関係があるという仮説を検証すること、また将棋やチェスのような勝利条件を直接パラメータとして数値化することの難しいゲームにおいて対戦結果と AI プレイヤーの強さに対応関係があるかどうかを検証することを挙げる。

## 第6章 まとめ

世の中に溢れている対戦ゲームにはほとんどの物にコンピュータープレイヤーもしくはAIプレイヤーが実装されている。大抵の対戦ゲームをしていて、喜びを強く感じられる瞬間は自らと同等、もしくは少し格上の相手に勝利した時であるが、ゲームを遊ぶ際に自分に適した強さの対戦相手を選ぶのは難しい。しかし、あるゲームにおいてAIプレイヤー同士の対戦結果とその強さに対応関係があれば、一度だけのAIプレイヤーとの対戦結果で利用者の強さを相対的に推定できるのではないかと考えた。実際に対応関係があるかはわからないため、例として勝利条件のわかりやすいリバーシの対戦データを集めて分析することにした。

分析の結果、リバーシにおいては、探索木の深さの差とお互いの石の数の差の間に正比例の相関関係があることがわかった。また、探索木の深さの差と相関関係にあったのは勝利条件に関わるパラメータであるため、強さの差と勝利条件に関わるパラメータは何らかの対応関係がある可能性があるかと推測できた。しかし、将棋やチェス等、王を取ることが勝利条件のゲームでは今回の方法が使えないため、石の数の差ではない別のパラメータを探す必要がある。

今後の課題としては、今回の実験により新たに立てたあるゲームにおいてAIプレイヤーの強さの差は勝利条件に関わるパラメータと対応関係があるという仮説の検証や、勝利条件に関わるパラメータを対戦結果のデータとして直接取ることのできないゲームにおいての対応関係の検証が挙げられる。



## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なご迷惑をおかけし、また多くのご指導を頂いた三好力教授に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] チャトランガ - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%81%E3%83%A3%E3%83%88%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AC>
- [2] チェス - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%81%E3%82%A7%E3%82%B9>
- [3] 将棋 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%86%E6%A3%8B>
- [4] シャンチー - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%B3%E3%83%81%E3%83%BC>
- [5] 囲碁 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%B2%E7%A2%81>
- [6] 楽しい囲碁入門 | 囲碁学習・普及活動 | 囲碁の日本棋院  
<https://www.nihonkiin.or.jp/teach/lesson/>
- [7] オセロ (ボードゲーム) - Wikipedia  
[https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%82%BB%E3%83%AD\\_\(%E3%83%9C%E3%83%BC%E3%83%89%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%83%A0\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%82%BB%E3%83%AD_(%E3%83%9C%E3%83%BC%E3%83%89%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%83%A0))
- [8] マンカラ - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%83%B3%E3%82%AB%E3%83%A9>
- [9] ミニマックス法 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9F%E3%83%8B%E3%83%9E%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%B9%E6%B3%95>
- [10] ゲーム木 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%83%A0%E6%9C%A8>
- [11] アルファ・ベータ法 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BB%E3%83%99%E3%83%BC%E3%82%BF%E6%B3%95>
- [12]  $\alpha$   $\beta$  法とは - 【AI・機械学習用語集】  
<https://zero2one.jp/ai-word/alpha-beta-pruning/>
- [13] 回帰分析 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E5%B8%B0%E5%88%86%E6%9E%90>
- [14] 線形回帰 - Wikipedia  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E5%BD%A2%E5%9B%9E%E5%B8%B0>
- [15] Github - arminkz/Reversi Artificial intelligence of the Reversi /

Othello

<https://github.com/arminkz/Reversi>

[16] 「マンカラ ポケット」を App Store で

<https://apps.apple.com/jp/app/%E3%83%9E%E3%83%B3%E3%82%AB%E3%83%A9-%E3%83%9D%E3%82%B1%E3%83%83%E3%83%88/id1530773607>

[17] マンカラ ポケット - Google Play のアプリ

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.atelierKUON.mankara>

a