

学術研究用プラットフォームとしての大戦略系ゲームのルール提案

村山 公志朗 藤木 翼 池田 心

北陸先端科学技術大学院大学
{kosiro_murayama, s1310062, kokolo}@jaist.ac.jp

これまで、チェスや将棋などの古典的な戦略ゲームを題材に様々な研究が行われてきた。一方「一回の手番で複数の駒を動かせる」タイプの戦略ゲームは、広く遊ばれているにも関わらず学術的研究は依然少ない。そこで本稿では、これらの戦略ゲームが持つ要素を列挙・整理したうえで、多くのゲームに共通する基盤的要素を抽出し、チェスや将棋の次に取り組みべきベンチマークを提案、ルールを提示する。さらに、比較的単純なアルゴリズム群同士の比較を通じ、複数の駒の行動順が性能に影響を与えうることを示す。

Proposal of rules for Turn-based-Strategy-games as an academic platform

Koshiro Murayama, Tsubasa Fujiki, Kokolo Ikeda
Japan Advanced Institute of Science and Technology

A lot of research has already been done on classical strategy games like Chess and Shogi. However, academic research is still limited for strategy games where "multiple pieces can be moved in the same turn", even though these games are widely played. First, we list and organize the elements used in these strategy games. Then, we select the base elements common to many of these games, and propose a set of rules that can be used as a new benchmark to extend the research started on Chess and Shogi. By comparing some relatively simple algorithms, we also show that the order of the multiple actions done in one turn has an effect on the efficiency of the algorithms.

1. はじめに

これまで人工知能研究の一分野としてチェス、将棋、囲碁などを題材にして、探索や機械学習などの技術の研究が行われてきた。それらの進歩と、計算機資源の増大に伴い 1997 年に IBM のチェスプログラム、DeepBlue が人間のチャンピオンを破るほどの成果をもたらした。また、コンピュータ将棋においても、ボナンザ法による評価関数の機械学習などのブレイクスルーによりプロ棋士レベルにあり、これらのゲームプログラムはその強さにおいて一般的な人間プレイヤーの相手としてほぼ十分である。

このような背景を踏まえ、次に取り組みべき課題として、チェスや将棋などよりも複雑で、ゲームプログラムが人間と比較して弱く、それゆえに強い対戦プログラムを構築する過程で新しいアルゴリズムの発展が見込めるゲームを対象にしたい。

そこで本稿では、戦略ゲームの新しい研究用プラットフォームを提案することを目的に、それに相応しいゲームの一つとして、**同一手番で複数の駒を動かす**タイプ（複数着手性と呼ぶ）のゲームをとりあげる。“大戦略”シリーズを代表にこのような戦略ゲーム（Turn Based Strategy, TBS）は多様に発展しており、人気

も高い。一方で、その複雑さとベンチマークの不在から、十分な研究は行われておらず、市販ソフトの思考ルーチンの強さは平均的なプレイヤーよりも弱いことが殆どである。本稿では、TBS に登場するさまざまなルールを列挙・整理したうえで、その多くに共通する基盤的要素を抽出し、チェスや将棋の次に取り組みべきベンチマークを提案、そのルールを提示することを目標とする。

2. 既存の戦略ゲーム

大戦略は 1985 年にシステムソフト社より発売された PC ゲームで、正規のシリーズだけでも国内累計売上本数が 80 万本に達し、PC ゲームとしてはかなり多い部類である。チェスや将棋のように、盤面（マップ）上に配置された駒（戦車や戦闘機などの兵器・ユニット）を手番に動かし、それを勝敗条件が満たされるまで繰り返すゲームであるが、複数着手性などさまざまなルールが追加されている。

大戦略はそこから派生したゲームも非常に多い。本章では、古典的戦略ゲームと言える将棋やチェスや大戦略から見た場合に、どのような派生が行われているのか、研究対象として適しているか簡単に考察する。

2. 1 Arimaa

Arimaa[1]は、チェスの盤、駒を使用して遊べる二人対戦用のボードゲームで、チェスと同様の二人零和確定完全情報ゲームであるが、「同一ターン内で4手まで自分の駒を動かすことが可能」という大きな特徴を持つ。合法手数が膨大になるため、ナイーブな木探索アルゴリズムの適用は困難である。

本ゲームは複数着手性のあるゲームの学術的ベンチマークとして利用可能だが、プレイヤー数が少なく棋譜収集や評価が困難という問題もある。

2. 2 Simulation Role Playing (SRPG)

シミュレーションロールプレイングは戦略ゲームの要素と、RPGの要素（物語性・成長など）を併せ持ったゲームジャンルである。代表的なものとしてFinal Fantasy Tacticsがあり、国内170万本を売り上げており、他にも人気シリーズは多い。ゲームの進化においては、このような特徴・要素の水平伝播は頻繁に生じるが、思考ゲームの学術的ベンチマークとしては付加要素が多すぎるきらいがある。

2. 3 Real Time Strategy

StarCraftやAge of Empireを代表とするリアルタイム戦略ゲーム(RTS)は、PCの性能向上に伴い比較的新しく出来たジャンルである。RTSでは、手番という概念は存在せず、プレイヤー達は駒にそれぞれ任意のタイミングで指示を出す。盤面にも離散化されたマスという概念はない。欧米ではRTSは非常に人気であり、また学術研究も盛んに行われ、国際会議IEEE-CIGでは論文の数割がRTSに対するものである。プログラム開発のためのプラットフォームも公開されており[2]、プログラミングコンテストも頻繁に開催されている[3]。しかし、ルールが複雑・煩雑でまた思考時間がリアルタイム制のために限定されるなど、チェスや将棋からは一足とびになっている感が否めない。

3. 戦略ゲームの構成要素とクラスタ分析

戦略ゲームにはそれぞれルールが定まっており、重要なものからそうでもないものまで、それぞれのゲームの特徴を形作っている。本章では、まずどのような要素が存在するのかを列挙する。そのうえで、多様な戦略ゲームをいくつかのグループに分けるを試みる。

3. 1 戦略ゲームを構成する要素

本節では、“標準的な”戦略ゲームに登場する概念・要素・システムを列挙する。これらが用いられるかどうかはゲームごとに異なる。前半はチェス等にも登場する概念であるが、後半はより発展的な要素である。

- F1 **盤面**. 将棋やチェスのように正方形の地形のほか、蜂の巣状のマス、マスなしなどが用いられる。
- F2 **プレイヤー数**. 2人とは限らない。
- F3 **駒(ユニット)**. 通常、複数種類の駒がある。SRPGなどでは1ユニットが1つのキャラクターのことが多く、それぞれに**個性**がある。
- F4 **着手順**. 交互に1ユニットずつ、交互複数ユニット、交互全ユニット、リアルタイムなどがある。
- F5 **勝利条件**. 相手駒を全て破壊する、特定駒を取る、特定マス・拠点を占領するなど、様々。
- F6 **駒の相性**. じゃんけんのように、駒の間に得手不得手があることが多い。
- F7 **HP (ヒットポイント)**. 1つの駒の体力・健全度を表す指標で、0になると破壊される。以降のルールの一部の前提になっている場合が多い重要なシステムである。
- F8 **攻撃方法**. チェスなどでは相手駒のマスに移動することでその駒を倒せるが、隣接マスから攻撃してHPを減らすタイプのゲームが多い。**遠距離攻撃**や**範囲攻撃**が可能なことも多い。
- F9 **反撃**. 隣接攻撃の場合、攻撃を受けた側も（後手あるいは同時に）攻撃できるシステム。
- F10 **地形**. マスには沼地・森・要塞など、移動や防御に影響を与える種類のものがあることが多い。通常は固定だが、橋をかけたり要塞を構築できる**工事**のシステムがあることもある。また地上と空や海中などを**多層的**に持つものもある。
- F11 **移動**. ユニットの「移動力」を持ち、地形に対する「移動コスト」を払いながら1歩ずつ進むことが多い。自ユニットは通過できることが多く、敵ユニットはできない場合が多い。**Zone of Control (ZoC)**という、敵のそばをすり抜けることもできないルールもある。
- F12 **非対称性**. 初期配置、地形等は必ずしも対称ではなく、有利不利がある場合もある。
- F13 **占領**. マスに都市・工場・飛行場などの機能を持つ種類のものがあり、歩兵など特定ユニットでそれを自軍のものにできるシステム。
- F14 **生産**. 都市からの収入を用い、工場などから新規にユニットを登場させるシステム。

- F15 **練度・経験値・レベル**. 攻撃行動などの経験を積むことでユニット性能が向上するシステム.
- F16 **弾数**. 特定の攻撃手段は計何回までしか使えないといった限定を設けるシステム.
- F17 **補給, 補充**. 都市等で, 損耗した HP や弾数を回復させるシステム.
- F18 **索敵**. 自ユニットや自軍施設の周囲特定マスしか敵ユニットの存在が確認できないシステム. 不完全情報ゲームになるため, アルゴリズムの作成難度に影響が大きい要素である.
- F19 **ランダム性**. 攻撃が一定の確率で当たらなかったり, HP に与える損害が上下したりするシステム. 状態遷移が不確定になるため, 思考アルゴリズムの作成に影響が出うる.
- F20 **指揮官**. 複数の近隣ユニットに影響を与えたり, 特殊能力を持つ存在のシステム.
- F21 **合流, 分散**. 複数のユニットが同じマスに集まって HP や弾数を合算したり, その逆を行うシステム.
- F22 **内政**. 都市からの収入を使って, 生産力を上げる, 新種ユニットを開発するなどができるシステム. 長期的な戦略が必要となる.
- F23 **陣形, 包囲効果, 支援効果**. 戦闘時の周囲の状況により, 攻撃力等に変化が出るシステム.
- F24 **戦略爆撃**. 敵の都市などの施設を爆撃し機能を低下させるシステム.
- F25 **天候, 季節, 時刻**. 夜は視界が落ちる, 雨が続きと平地が沼地になるなどさまざまな状況が場合によって変化するシステム.

3. 2 クラスタ分析

この数十年で非常に多くの戦略ゲームが提案・発売されたが, それらを「XはYの発展形」「XはYとZの合体」のように関係づけて進化の様相を探ることは困難である. 本節では, 代表的な戦略ゲームをクラスタ分析することで, それらがどのようにグループ化され, どのような近さにあるのかを見ることにする.

図1は, (恣意的に選んだ, ただしそれなりに著名な) 17の戦略ゲームと, 4章で提案する「基盤ルール」を持つ戦略ゲームを, Rを用いてクラスタ分析し, 2次元上に表現したものである. 分析に用いた特徴量は, 駒の固有性(F3), 複数着手性(F4), リアルタイム性(F4), 相性(F6), HP(F7), 地形(F10), 地形の多層性(F10), ZoC(F11), 占領(F13), 生産(F14), レベル(F15), 索敵(F18), 内政(F22)である.

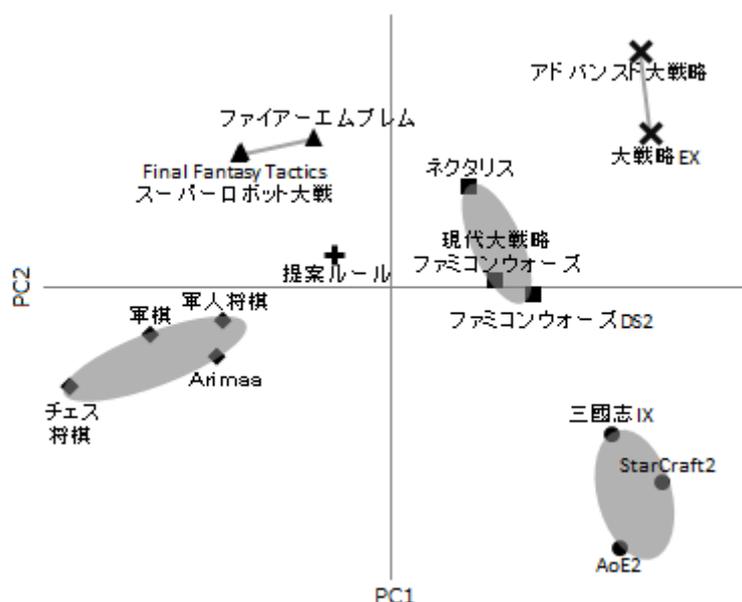


図1: クラスタ分析の結果

この結果から, 以下のようなことが見て取れる.

- Arimaa は複数着手性があり, 軍人将棋や軍棋には不完全情報性や相性があるため, 将棋やチェスに比べ現代的なゲームに近い位置にある.
- 中心付近に大戦略・ファミコンウォーズなど, 基本形に近いと思われるゲームが位置する.
- ファイアーエムブレム等の SRPG は基本形から一部要素 (生産等) が単純化され古典的ゲームに近づく一方, ユニットの固有性が追加され, 枝分かれした位置にある.
- アドバンスド大戦略・大戦略 EX などは基本形から索敵や地形の多層性など高度な要素を加えた発展的位置にある.
- 三国志, StarCraft などは, 内政やリアルタイム性など別の高度な要素を加えた発展的位置にある.

次章で述べる提案ルールは, 古典的なゲームや Arimaa から見て, 現代的なゲームへの入り口付近にあり, 次に取り組むべきベンチマークとして好ましい位置にあると考える.

4. 基盤ルールの提案

ここまで, 多様な戦略ゲームとそれらを構成する要素について紹介し, チェスや将棋を源流とした関係性を見るためのクラスタ分析を行ってきた. 本章では, 学術用のベンチマークとして適したゲームを提案するために, 多くの戦略的ゲームに共通する「基盤ルール」を定めることを目的とする.

4. 1 設計目標

ゲームを研究対象にするとき、その研究用の統一的なプラットフォームが入手可能であるかどうかは大きな関心事であり、健全で再現可能な論文作成のためにも重要である。本節では、設計目標として、ルールおよびプラットフォームに求められうる要求項目を挙げる。R3 や R6 など必須ではない項目も含まれるが、これらを意識してルール設計・プラットフォーム設計を行う。

- R1. ルールが明確に厳密に定義されている。
- R2. 多くのゲームに共通する要素を持ち、少ないゲームにしかない要素は持たずにコンパクトである。
- R3. より高度な要素を含むルールセットへの拡張可能性を考慮している。
- R4. プレイして楽しく、人による評価や人同士の棋譜の収集が望める。
- R5. 既存のゲームに似ており、とっつきやすい。
- R6. 既存の市販ゲームでアルゴリズムを比較できる。
- R7. 評価のために、一試合に長大な時間を要さない。
- R8. ルールや GUI, 連続実験環境が実装されたプラットフォームが公開されている。思考ルーチンだけをいじることができるようツールが揃っている。
- R9. 人間対プログラム, 人間対人間, プログラム対プログラムの対戦ができるサーバがある。

4. 2 設計方針

ルール設計に関する中心的な要請は、前節 R2 と R4、面白さを損なわず本質を失わない程度に、できるだけ簡素化することである。我々は、前節 R5 と R6、既存ゲームとの親和性の要請を踏まえ、シリーズを重ねすでにルールがかなり洗練されている任天堂社の“ファミコンウォーズ DS2 Advance Wars Days Of Ruin”(FWDS2) を基本に、そこから高度あるいは瑣末な要素を削っていく方向でルールを設計することにする。なおこのソフトはオプション選択やマップ作成機能を持ち、提案するルールがごく一部を除いて再現可能である。

FWDS2 は、3. 1 節で述べた要素で言うと、四角形の盤(F1)、2人(F2)、複数種類の駒(F3)という意味でチェス等と似ているが、複数着手性(F4)を初め、F5 から F21 までの全ての要素を含んでおり、大きく異なる。

我々は 3. 2 節のクラスタ分析に用いた 17 つ以外にも多くの戦略ゲームを分析し、FWDS2 の持つ要素を大まかに以下の 4 グループに分類した。

- G1: 殆どの戦略ゲームにある、必須のもの。複数着手性(F4)、相性(F6)、HP(F7)、隣接と遠隔の攻撃(F8)、移動(F11)。
- G2: 多くのゲームにあり、必須であるとは言えないが残しても良いと思われるもの。さまざまな勝利条件(F5)、反撃(F9)、地形(F10)、非対称性(F12)。
- G3: 多くのゲームにあるが、高度であるので拡張性を考慮しつつ初期ルールセットに含めないもの。占領(F13)、生産(F14)、弾数(F16)、補給・補充(F17)、索敵(F18)、ランダム性(F19)。
- G4: 一部のゲームのみにあるか、瑣末であり、考慮しないもの。レベル(F15)、指揮官(F20)、合流(F21)。

なおこれ以外に、FWDS2 が持たず、提案ルールにも含めないものとして、ZoC(F11)、リアルタイム性(F4)、分散(F21)、内政(F22)、陣形(F23)などがある。

G3 に含まれるうち「生産」「占領」は初代大戦略を初め多くの戦略ゲームに存在する、かつ思考ルーチンにも大きな影響を与える要素であるが、チェス等との類似性と、できるだけ単純さのため、ここでは廃した。一方 G2 は廃しても良いのだが、思考ルーチンに与える影響が小さいこと、多くの人間プレイヤーがこれらに慣れていることから残すこととした。

ルールの詳細は次節で述べるが、3. 2 節に書いたように、チェス・将棋・Arimaa などとも比較的近く、複雑な戦略ゲームへの橋渡しになるような部分のルールセットになっていると考えている。

4. 3 具体的なルール

前節の設計方針に従い、本節では、さらにユニットのパラメータ等のゲームを構成する具体的な項目について、F1～F11 の各要素ごとに示す。F12～F25 の要素は用いない。

【F1 (盤面)】

将棋盤などと同じ、四角形マスからなる二次元の盤面を用いる。縦サイズ、横サイズは特に指定しない。

【F2 (プレイヤー数)】

2人ゲームとする。

【F3 (駒, ユニット)】

戦闘機(F)、攻撃機(A)、戦車(T)、対空戦車(R)、歩兵(I)、自走砲(U)の 6 種類の駒(ユニット)を用いる。F と A は航空ユニット、他は地上ユニットである。

【マップ】

将棋等では常に同じ盤面サイズ・駒の初期配置を用いるのに比べ、戦略ゲームでは通常、特徴の異なる複数の設定を用い、プレイ時にそれを選ぶ。一つの盤面サイズ、それぞれのマス、地形、用いる駒の種類と数と初期配置の組合せを「マップ」と呼ぶ。これらには非対称性(F12)が導入されていることも多い。図2はマップの一例で、Tの右隣は森を表すマークでrの左隣は山を表すマーク、何もなければ草原である。

T	森	森	森	森	t
R	山			山	r
A	森			森	a
U	森			森	u

図2：マップの例

【F4 (着手順)】

各手番では、プレイヤーは**全てのユニットを1回ずつ自由な順番で選んで**行動させることができる。全てのユニットを行動させると、相手の手番となる。両者がそれぞれ手番を終えるまでを1ターンと呼ぶ。

ユニットが1回にできる行動は、「移動のみ行う」「移動して隣接攻撃する」「(隣接・遠距離)攻撃のみ行う」「何もしない」の4つである。

【F5 (勝利条件)】

いずれかのチームのユニットが全滅した場合、ユニットが盤上に存在しているチームの勝利となる。ターン数に上限を設け、その上限以内に全滅条件を満たさない場合の判定条件は別途定める。

【F6 (ユニット相性)】

攻撃側ユニットと防御側ユニットの組合せにより、攻撃の効果の係数が表1のように異なる。総合的な計算式は後述する。FとRは航空ユニットを得意とし、A、T、Uは地上ユニットを得意とする。Uのみ間接攻撃が可能である。Iは壁役のユニットである。

表1：ユニット相性

	防御側 A	F	R	I	T	U
攻撃側 A	0	0	85	115	105	105
F	65	55	0	0	0	0
R	70	70	45	105	15	50
I	0	0	3	55	5	10
T	0	0	75	75	55	70
U	0	0	65	90	60	75

【F7 (HP)】

各ユニットは1から10のHPを持つ。攻撃を受けることでHPは減少し、0になるとその駒は盤上から取り除かれる。

【F8 (攻撃)・F9 (反撃)】

U以外の各ユニットは、移動前あるいは移動後に、敵ユニットと隣接した状態でのみそのユニットに攻撃ができる。攻撃を受けた側は、HPが1以上残っていれば、反撃ができる。Uは、移動前のみ、マンハッタン距離で2以上3以内の敵ユニットに対して一方的に(反撃されることなしに)攻撃ができる。

【F10 (地形)】

今後拡張して行くことを念頭におきながらも、現時点では、山、海、森、草原、道路の5種類の地形を用いる。地形は、防御効果と移動コストに影響を与える。以下にその表を示す。

表2：防御効果

防御側	山	森	草原	道路	海
A, F	0	0	0	0	0
R, I, T, U	0.4	0.3	0.1	0	0

表3：移動コスト

	山	森	草原	道路	海
A, F	1	1	1	1	1
R, T, U	∞	2	1	1	∞
I	2	1	1	1	∞

【攻撃の効果】

攻撃の結果どれだけ相手のHPを減らせるか(ダメージ)は、攻撃側防御側の現在のHP、表1の相性、表2の防御側地形の防御効果によって以下の式で定まる。ランダム性(F19)は導入しない。

$$\text{効果} = \frac{\text{相性} \times \text{攻撃側 HP}}{10 + \text{防御効果} \times \text{防御側 HP}}$$

【F11 (移動)】

各ユニットは表4の移動力を持つ。ユニットは上下左右に1マスずつ、地形に対する移動コストを消費しながら移動できる。移動力を使い切る必要はない。移動時に自ユニットのいるマスを一時的に通過することはできるが、敵ユニットがいるマスを通することはできない。

図3はTの移動可能範囲を表した例であり、例えば左上隅の草原には味方のAユニットをすり抜けて

到達できるが、T の 3 マス右の草原には敵の a ユニットのすり抜ける必要があり、到達できない。森は移動コスト 2 を消費するため、右上隅や右下隅にも到達できない。



図 3：枠で囲まれたマスが T の移動可能範囲

表 4：ユニット移動力

	A	F	R	I	T	U
移動力	7	9	6	3	6	5

4. 4 プラットフォームの機能

前節で提案したルールを実装した研究開発用のプラットフォームを公開することで、ベンチマークとして本ゲームを共有、研究を比較することができるようになる。ただし、本稿で提案したルールはあくまで暫定的なものであり、多くの研究者によって議論、改善されていくべきものである。そのため、プラットフォームの機能も段階的に拡張していく予定である。

プロジェクトのページは研究室 Web ページ <http://www.jaist.ac.jp/is/labs/ikeda-lab/tbs/> に仮設しており、ルールの議論やプラットフォームの最新版のダウンロードができるようになっている。プラットフォームは C# で構築し、本稿執筆時点での機能は以下の通りである。ルールが定まっていき次第、通信対戦機能や自動対戦サーバなどを公開予定である。

- ・ ルール部分と思考ルーチンの分離。思考ルーチンは、盤面を与えられ、行動可能な 1 ユニットを選んでその行動を指定する。
- ・ 人間とプログラムが対戦できる機能
- ・ マップを選択する機能
- ・ プログラム同士を対戦させる、また評価実験用に複数のマップを連続で高速に対戦させる機能
- ・ 着手を棋譜として保存し、読み込み・再生する機能

5. 駒を動かす順番の重要性

本稿で提案した基盤ルールは、参考にした FWDS2 に比べれば多くの要素が削られたかなり単純なものであるが、それでも将棋などと比べれば複雑であり、将棋などに使われる手法 ($\alpha\beta$ 探索など) をそのまま適用することは難しい。特に、全ての駒を自由な順番

で動かせるという点はアルゴリズムに大きく影響を与える部分である。市販ソフトの思考ルーチンの中には、自由な順番で動かせるにも関わらず「順番を固定してそれぞれの駒が最善と思う行動を取る」(と推測される動きをする) ものも多く、人間の平均的プレイヤーに比べ弱く、知的に見えない場合が多い。

本章では、複数着手性を扱う 4 つの典型的で単純なアプローチを紹介し、どのような状況でそれらに違いが出るのかを比較、考察する。さらに、それによって強さに影響が出ることを実験を通して示す。

以下に、本章で用いる記号の意味を説明する。

u : 一つのユニット。

s : 盤面の状態。ユニット、地形、HP、手番、どのユニットが行動済みかなどの情報も含む。

a : 一つの行動。移動、攻撃、移動後攻撃など。

$A(s)$: 状態 s における全ての取りうる行動の集合。

$A(s, u)$: 状態 s でユニット u が取り得る行動の集合。

$A\#(s) \subset A(s)$: 行動のうち、攻撃行動。

$A\#(s, u) \subset A(s, u)$: ユニット u の攻撃行動。

$s'(s, a)$: 状態 s で行動 a を取った場合の次状態。

$f(s, a) \in \mathbb{R}$: ユニットの攻撃行動評価関数。

5. 1 行動評価関数

ある状態や、ある行動を評価することはゲームの思考ルーチンではしばしば用いられる。評価対象が状態 s なのか行動 a なのかは場合による。例えば、将棋では状態評価関数が、囲碁では行動評価関数が頻繁に用いられる。

本稿では、単純な攻撃行動評価関数と単純な移動ルーチンによって行動順や行動内容を定める 4 つの手法を紹介し、その特徴を比較することで、行動順の重要性を示す。

攻撃評価関数は、自分のユニット u_1 が敵のユニット u_2 を攻撃できる場合に以下の式で定めた。

$$f(u_1, u_2) = (\text{攻撃ダメージ} \times u_2 \text{ の価値}) - (\text{反撃ダメージ} \times u_1 \text{ の価値}) \quad \text{ただし}$$

u_1 の価値 = $10 + \text{自ユニットの残り HP}$

u_2 の価値 = $10 + \text{行動済み自ユニットへの予想最大ダメージ}$

5. 2 手法 1, 手法 2 とその比較

同じ行動評価関数・移動ルーチンを用いても、行動の順番の定め方によってその動作は変わる。本節では、最も単純な 2 つの手法を紹介し、典型的な局面でどのような行動の違いが出るのかを説明する。

【手法 1：ランダム選択】

1. 未行動ユニット u をランダムに選ぶ.
2. u が攻撃可能なら、最善評価値の行動を選択する.

$$a^* = \operatorname{argmax}_{a \in A\#(s,u)} f(s,a)$$
3. u が攻撃不可能なら、移動ルーチンに従う.
 移動ルーチンは、自分が最もダメージを与える相手に近づくだけの単純なものである.

【手法 2：最良単独行動】

1. 攻撃可能なユニットがあれば、それら全ての攻撃行動のうち、最善評価値の行動を選択する.

$$a^* = \operatorname{argmax}_{a \in A\#(s)} f(s,a)$$
2. 行動可能なユニットがなければ、適当な順番で移動ルーチンに従う.

平均的な攻撃行動数を B , 平均的なユニット数を U とすると、手法 1 で行動を決めるための計算量は $O(B)$, 手法 2 は全てのユニットの行動を調べる必要があるため $O(BU)$ でありコストが高い。しかし、次に示すように手法 1 よりも手法 2 のほうが良い行動が取れる場合がある。

A8			t10
	T8		

図 4：手法 1 と手法 2 の違いが出る例

図 4 は、味方に HP8 の攻撃機 (A8 と表記), HP8 の戦車 (T8 と表記), それらの攻撃可能範囲に敵の HP8 の戦車 (t8 と表記) がいるような、盤面の一部を示している。A8 から t10 への攻撃は反撃を受けない分、T8 から t10 への攻撃よりも評価値が高い。

手法 2 を用いると、常にまず評価値の高い A8 から t10 への攻撃が行われ、HP を 2 に減らしたあと、T8 が攻撃してユニットを破壊することができる。

一方手法 1 を用いると、最初のランダム選択で T8 が行動ユニットとして選ばれてしまうと、T8 から t10 への攻撃が行われ、HP を 4 減らす (t6 にする) ものの、3 の反撃を受けてしまう。続いて A8 が t6 を破壊できるが、手法 2 の場合よりは望ましくない結果となる。

5. 3 手法 3 とその意義

手法 2 は手法 1 よりは優れるが、あくまである一つのユニットにとっての最善行動を取っているだけであり、「ユニットを動かす順番」を考慮しているわけではない。本節では、これを考慮する手法 3 を紹介し、手法 2 ではうまくいかないが手法 3 ではうまくいくような典型例を示す。

くいくような典型例を示す。

【手法 3：ユニットペアの合計評価】

1. 攻撃可能ユニットが 1 以下の場合は手法 2 に従う
2. 1 番目に攻撃するユニット $u1$ を選ぶ.
3. 評価値最大の行動 $a1 = \operatorname{argmax}_{a \in A\#(s,u1)} f(s,a)$ を定め、その遷移先 $s1 = s'(s,a1)$ を求める.
4. $s1$ における評価値の最大値 $\max_{a \in A\#(s2)} f(s2,a)$ を求め、3 の評価値と合算し $v(u1)$ と書く.
5. $v(u)$ が最大となる u を選び、評価値最大の行動を取る.

図 5 は、味方に対空戦車 R10 と戦闘機 F6, 敵に対空戦車 r5 と攻撃機 a7 がいるような、盤面の一部を示している。R10 からは r5 と a7, F6 からは a7 のみに有効な攻撃が可能である。

手法 2 を用いると、与えるダメージが最も大きい R10 から a7 への攻撃が最も高い評価値を持つため、これが選択され、a7 が破壊される。その場合 F6 は何もできない。

一方手法 3 を用いると、R10 が a7 を攻撃したあと F6 が何もできないケースと、F6 が a7 を攻撃したあと R10 が r5 を攻撃するケースが比較される。評価値の合計は後者のほうが高いため、お互いに得意な相手を分担して攻撃するような後者を選ぶことができる。

R10			r5
F6			a7

図 5：手法 2 と手法 3 で違いが出る例

ただし、手法 3 は全ての 1 つめのユニットに対し、遷移後の状態で全ての行動を調べるため、計算量 $O(BU^2)$ であり、手法 2 よりさらにコストは大きい。なお手法 3 は 2 つのユニットのペアを扱っているが、これは任意の数のユニットの順に拡張できる。

5. 4 手法 4 とその意義

手法 3 は手法 2 より優れるが、1 つめのユニットが評価値最大の手しか調べないため、「次のとても嬉しい行動のための少し我慢する行動」が発見できないという問題点がある。本節では、これを解決する手法 4 を紹介し、差が生じる典型例を示す。

【手法 4：行動ペアの合計評価】

1. 攻撃可能ユニットが 1 以下の場合は手法 2 に従う
2. 1 番目に攻撃するユニット $u1$ とその行動 $a1 \in A\#(s,u1)$ を選び、 $f(s,a1)$ を評価する.
3. その遷移先 $s1 = s'(s,a1)$ を求める.

4. s_1 における評価値の最大値 $\max_{a \in A\#(s_2)} f(s_2, a)$ を求め、3 の評価値と合算し $v(u_1, a_1)$ と書く。
5. $v(u, a)$ が最大となる u を選び、行動 a を取る。

図 6 は、自軍に HP10 の戦車が 2 つ (T10A, T10B) あり、敵に HP4, 6 の戦車と自走砲 u_{10} がある盤面の一部を示している。 u_{10} は倒したいユニットであるが、 t_4 を破壊してからでないと攻撃できない点が重要である。

このとき、手法 3 を使うと、どちらのユニットを 1 つめに選んでも、最大評価値である t_6 を攻撃することを 1 つめの行動としてしまい、次には t_4 しか攻撃できない (合計 10 ダメージしか与えられない)。

手法 4 であれば、T10A が t_4 を攻撃、T10B が t_4 を攻撃、T10A が t_6 を攻撃、T10B が t_6 を攻撃する 4 つのパターンが全て調べられ、例えば T10A が t_4 を攻撃すれば続いて T10B が u_{10} を攻撃できるため、合計 12 ダメージ与える組合せが発見・選択できるということになる。

手法 4 の計算量は $O(B^2U^2)$ で手法 3 よりもさらに大きい。任意の個数の行動ペアにも拡張できるが、ナイーブな実装では計算量の爆発を生じる。

T10B		t_4	u_{10}
T10A		t_6	

図 6 : 手法 3 と手法 4 で違いが出る例

5. 5 対戦実験

本節では、手法 1, 2, 4 を実装したプログラム同士の対戦実験を行った結果を示す。

【実験条件】

- 合計対戦回数は各 1000 回とし、100 戦ごとに手番を、200 戦ごとに地形を入れ替える。
- 盤面のサイズは 15×10 とし、F, R, A, T の 4 種をそれぞれ 2 機ずつ (後手番にはハンデとして F, T は 3 機ずつ) 配置する。
- 全滅条件の他、最大ターン数を 30 に設定し超過した場合は残りのユニットの HP で勝敗判定する。
- 対戦ごとに、先手後手それぞれの半数のユニットを HP10, 残りを HP8 に設定する。また、各対戦で全てのユニット位置をランダムに 1 マスずらす。アルゴリズムにランダム要素が含まれない場合に差が出にくくなることへの措置である。

【実験結果】

手法 1, 2, 4 それぞれのプログラムを設定した条件で対戦させたところ、表 5 のような結果になった。

表 5 : 3 つの手法の対戦結果 (勝数)

手法	1	2	4
1	—	237	215
2	763	—	453
4	785	547	—

【考察】

表 5 の結果から、手法 2 は 1 より強く、さらに手法 4 は 2 や 1 よりも強いことが見てとれる。このことは、ユニットの行動順が重要であるからだと言えよう。

6. まとめと今後の課題

戦略ゲームはチェス・将棋など単純なものから StarCraft など複雑なものまで様々に愛好されているが、その中間的な複雑さを持つゲームに対する学術研究はあまり行われていない。その原因の一つは研究用の統一ルールや統一プラットフォームの不在である。本稿ではその状況を打破すべく、数多くの戦略ゲームの要素を分析したうえで基盤的要素を抽出し、ルールの提案を行った。さらに、チェスや将棋との大きな違いである複数着手性について、4 つの段階的なアルゴリズムを紹介し、どのような状況で差が生じるのかを例を示したうえで性能比較を行った。

今後は、多くの方々の意見を取り入れながらルールを洗練させ、プラットフォームの公開・改善により、戦略ゲーム研究を盛んにしていきたい。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 若手 B 研究「共進化を用いたライバル的存在となりうるゲーム AI の構成」の助成を得て行われた。

参考文献 :

- [1] Arimaa homepage, <http://arimaa.com/arimaa/>
- [2] BWAPI, <https://code.google.com/p/bwapi/>
- [3] IEEE-CIG Competitions <http://geneura.ugr.es/cig2012/competitions.html>
- [4] Thomas Kozelk, “Method of MCTS and the game Arimaa” „Master’s Thesis, 2009
- [5] Maurice Bergsma, Piter Spronck, “Adaptive Spatial Reasoning for Turn-based-Strategy Games”, Proceedings of the Fourth Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference, 2008