

二人零和有限確定完全情報ゲームの考察

笠井 易・齊藤 実

まえがき

最近、私たちの日常生活でコンピュータは既になくなくてはならないものになっている。今やコンピュータとネットワーク回線があれば世界中とインターネットで交信ができ、またアプリケーションソフトとしても各国の言語でワープロが用意されている。さらに表計算ソフトを使うと日常的な計算も簡単に行なうことができる。しかし、30年ほど前は、プログラムを組まないとコンピュータが使えなかったことを最近の学生は知らないかもしれない。

コンピュータの研究を専門にしている人は、コンピュータを人間の脳に近づけたいと考える人も多い。そこでパターン認識、言語解析、人口知能などの研究はかなり以前から行なわれてきた。もっとも身近な人工知能の事例として、コンピュータゲームは誰でも1度は見たことやプレイしたことがあると思う。

コンピュータゲームの種類は多彩であり、1970年代に大流行したスペースインベーダーに代表される「リアルタイムゲーム」、今でも発売日には長蛇の列ができるドラゴンクエスト（通称ドラクエ）のような「RGB（ロールプレイングゲーム）」などがある。今回はゲーム理論の中で、「二人零和有限確定完全情報ゲーム」について考察する。

1. 二人零和有限確定完全情報ゲームの現状

1.1 二人零和有限確定完全情報ゲームとは

まず、用語の説明を行う。

① 二人とは：ゲームを行なうプレイヤーが

必ず2人である。ゲーム上の意思決定をする主体が2人ということであり、コンピュータでも2人以上のグループであっても最終的に意思決定が1つに定まればよい。しかし、3人以上が単独でプレイすることができ、便宜上2人でも行なうことができるゲームは除く。

② 零和とは：プレイをしている全プレイヤーの利得合計が常にゼロ（一定）となる。例えば、勝利を1点、引き分けを0点、敗北を-1点と決めると、いつの時点でも全てプレイヤーで合計点は零点（一定）となる。カジノで行なうゲームなどはその獲得金額を利得と考えても、常にゼロ（一定）とはならない。また、「囚人のジレンマ」のように均衡点が最適点ではないゲームもある。

③ 有限とは：ゲームにおけるプレイヤーの手の組合せが有限であるゲームである。

お互いに無意味な反復はしないこととする。しかし、例えば囲碁では3劫（コウ）という特殊な状態があるがこれは対局者が避けるようにしている。将棋にも千日手、チェスには「スリーフォールド・レピティション」という同じ手順が繰り返す状態については、それぞれルールで有限になるようにしている。

④ 確定とは：プレイ中はゲームに偶然の要素が入り込まない。サイコロやカードを引いてその値をゲームに取り込まない。ただし、ゲームの最初に着手の先後手を決めるために行なう振り駒などは含まない。

⑤ 完全情報とは：プレイヤーは自分の手番のとき、相手の行なった選択を全て知ることができる。「ジャンケン」などは自分が

出す時は、まだ相手の手がわからない。相手の手が1部だけ見えているものは不完全情報となる。

1.2 具体例

以上の条件を全て満たすものは「二人零和有限確定完全情報ゲーム」に分類され、具体例は次のようなゲームである。

- ・囲碁、将棋、チェス、チェッカー、オセロ、五目並べ、三目並べなど

これに対し以上の条件を全て満たさないゲームは次のとおりである。

- ・麻雀、バックギャモン、ドミノ、ダイヤモンドゲーム、軍人将棋、双六など

この「二人零和有限確定完全情報ゲーム」は、理論上は完全な先読みが可能であり、両プレイヤーが最善手を打てば、先手が勝つか、後手が

勝つか、引き分けになるかが決まる。

最近ではコンピュータの進歩により、

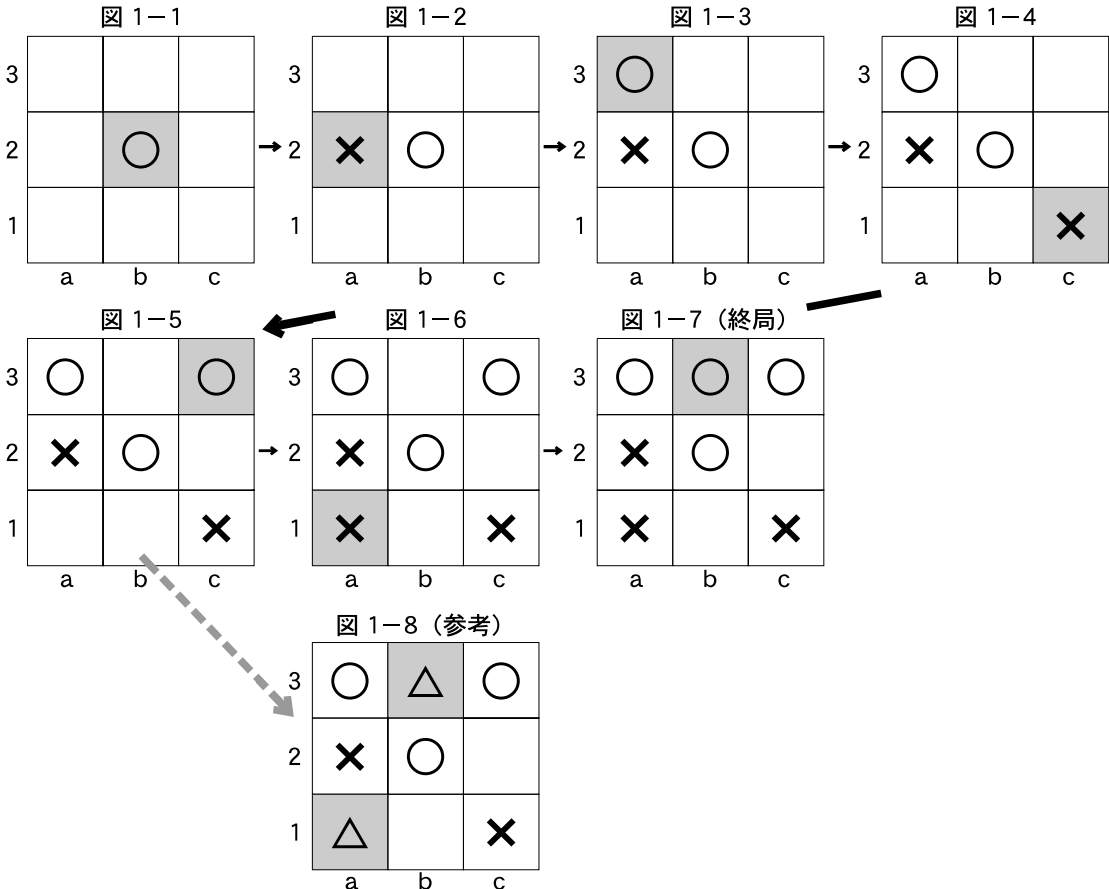
- ・「五目並べ」(連珠ではない)は先手必勝
- ・「チェッカー」、「三目並べ」は必ず引き分けということが判明している。

人間同士で行なう時は、完全な最善手を読み続けることが不可能なので、「五目並べ」や「チェッカー」では両プレイヤーが勝ったり負けたりするので、ゲームとして成り立っている。

それではここでなぜ「三目並べ」は必ず引き分けになるのかを説明する。

(ルール)

三目並べとは、3×3の格子上で2人が交互に「○」と「×」を並べていくゲームである。ビンゴゲームのように、縦・横・斜めのいずれか1列(行)に3個自分のマークを並べると勝ちとなる。



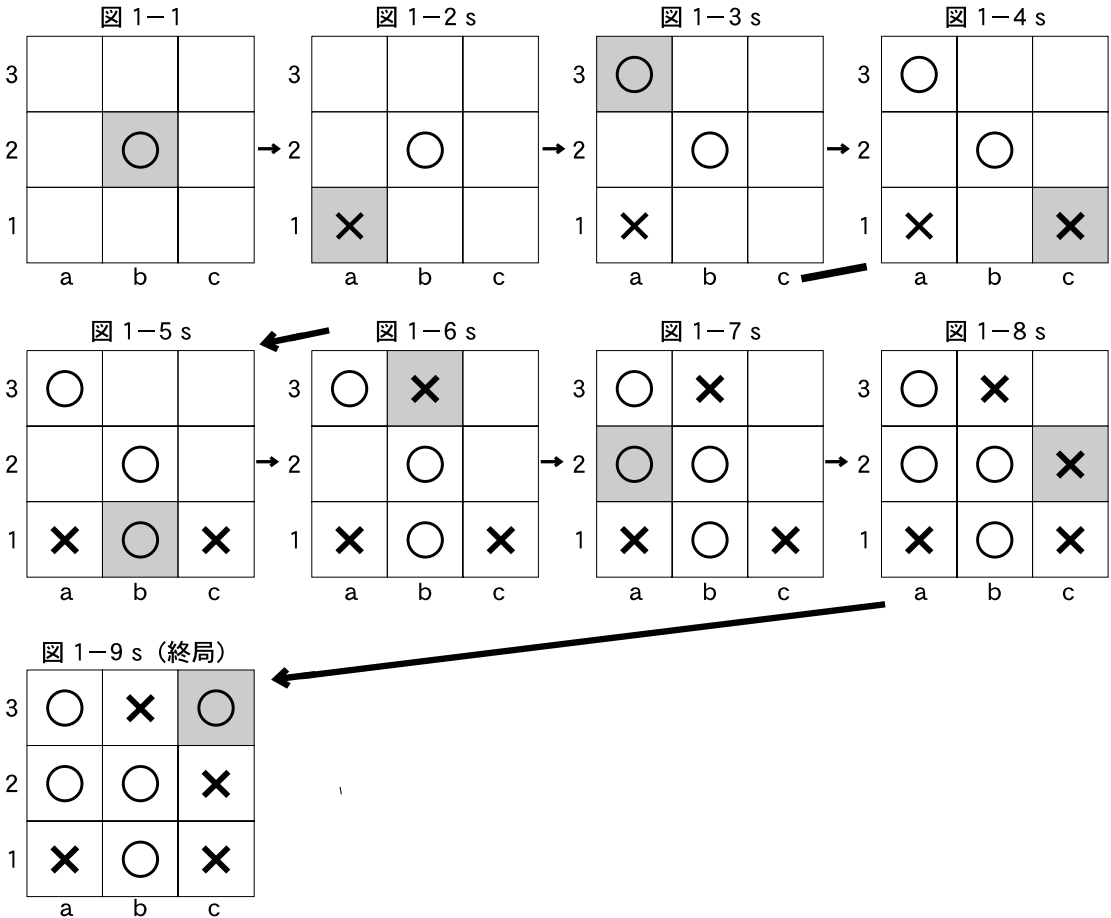
(内容説明)

- ・図1-1：(先手) 一番有利な真ん中に
○・・・b2○
- ・図1-2：(後手) ○の真横に×・・・a2×
- ・図1-3：(先手) 隅に○・・・a3○
- ・図1-4：(後手) ○が2つ並んだので阻止するところに×・・・c1×
- ・図1-5：(先手) 再び隅に○・・・c3○
- ・図1-6：(後手) ○が2つ並んだので阻止するところに×・・・a1×
- ・図1-7：(先手) 3列に三目が並ぶように○・・・b3○

となり先手の勝ち(終局)となった。

この勝負は図1-8(参考)を見ればわかるように、既に図1-5で勝負はついてた。つまり、後手がa1×とすれば先手はb2○で三目が並び、また、後手がb2×とすれば先手はa1○で三目が並ぶことになる。どうしても引き分けになるはずが、先手が勝ってしまったのだろうか？

実は後手が常に最善手を指さなかったからである。図1-2で既に後手は最善手ではなかったのだ。正しくは隅にa1×とすれば引き分けになったのである。(この場合、隅とはa3、c1、c3とも同じ結果になる)



(内容説明)

- ・図1-1：(先手) 一番有利な真ん中に

○・・・b2○

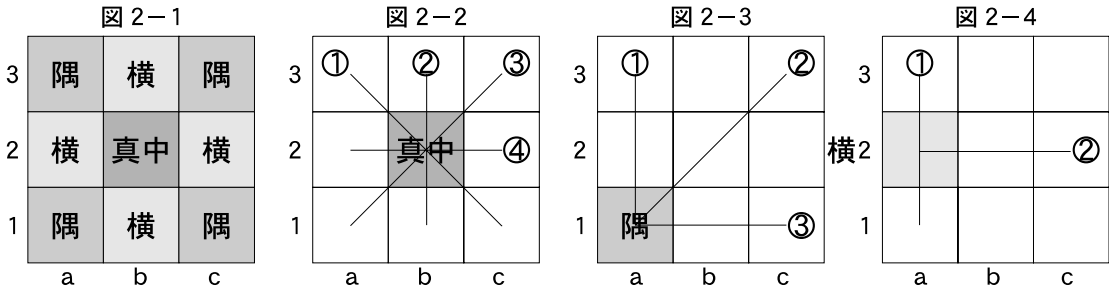
- ・図1-2s：(後手) ○の隅に×・・・a1×

- ・図 1-3 s: (先手) 隅に○・・・a 3○
- ・図 1-4 s: (後手) ○が 2つ並んだので阻止するところに×・・・c 1×
- ・図 1-5 s: (先手) ×が 2つ並んだので阻止するところに○・・・b 1○
- ・図 1-6 s: (後手) ○が 2つ並んだので阻止するところに×・・・b 3×
- ・図 1-7 s: (先手) 二目が並ぶように○・・・a 2○
- ・図 1-8 s: (後手) ○が 2つ並んだので阻止するところに×・・・b 3×
- ・図 1-9 s: (先手) ×が 2つ並んだので阻止するところに○・・・c 3○

となり引き分け（終局）となった。

(補助説明)

- ・図 2-1 より位置的に考えると、1 番最適な位置は真中 (b2) であり、次が隅 (a1、a3、c1、c3) であり、最後が横 (a2、b1、b3、c2) である。
- ・これは図 2-2、図 2-3、図 2-4 を見ると明らかなように、三目の並ぶ可能性が真中は 4 本、隅は 3 本、横は 2 本と少なくなっていることによる。
- ・以上の原理をもとに、全ての場合を調べると常に引き分けになることがわかる。



このように「二人零和有限確定完全情報ゲーム」の研究は、ゲーム理論の初期から行なわれており、特に先読みの研究が注目されていた。最も有名な手法（アルゴリズム）がミニマックス法であり、さらに、これを改良した $\alpha\beta$ 法（アルファ・ベータ法）という手法もある。

2. ゲーム理論

2.1 ミニマックス法

ゲームの世界だけでなく、統計学でもまた情報学でも広く知られている「ミニマックス法」を説明する。ミニマックス法(mini-max)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方法である。これに対し、想定される最小の利益が最大になるように決断を行うマクシミン法(max-mini)もある。

完全情報ゲームは、お互いがどの手を打った

かを場合分けして樹形図の形に表現できる。この図のことを通常「ゲームの木」と言う。ゲームの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枝の数だけあり、ゲームの木を下にたどる（先を読む）につれ局面（節点）の数は級数的に増加する。

同時に、その局面がどの程度自分にとって有利かを正しく評価するために、点数を付けて評価する。相手に勝利するためには、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・数などから有利度を計算した値を「評価値」、計算する関数を「評価関数」と言う。通常、評価関数だけで適切な局面評価を行うことは困難であり、ゲームの木と併用して先読みを行うのがこのミニマックス法である。

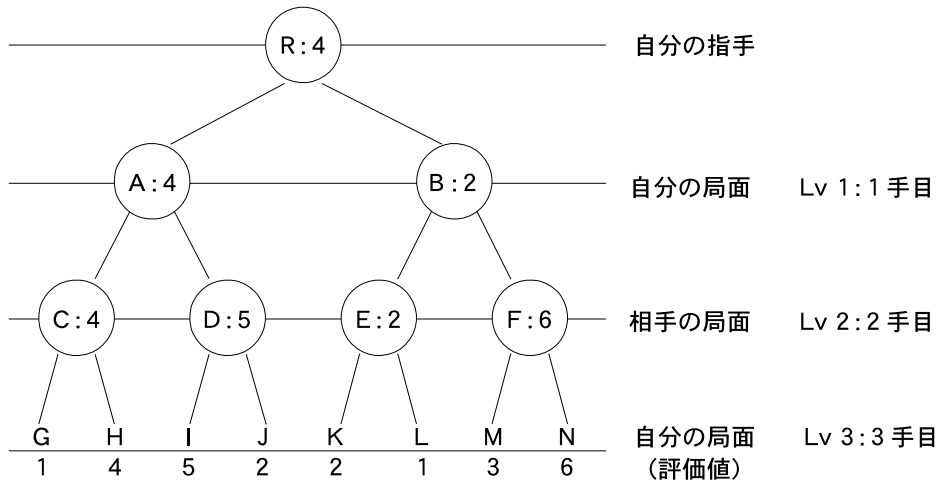


図3-1 ミニマックス法

3手先の自分の局面をゲームの木で探索すると、図3-1 (Lv 3:3 手目) のとおり8通り (G~N) あることがわかる。さらに局面を評価関数で8回計算するとそれぞれの評価値を求めることができる。ここで今、自分の指手をミニマックス法で決定する。

自分の局面 (Lv 3) においては、自分が有利なるようにそれぞれ2組のペアで大きい方を選択する。(C:4, D:5, E:2, F:6)

次に相手の局面 (Lv 2:2 手目) においては、相手は相手が有利なるように、見方を変えると自分が不利なるように (それぞれ2組のペアで

小さい方) 選択する。(A:4, B:2) 最後に、自分の局面 (Lv 1:1 手目) においては、当然自分が有利なるように (大きい方) 選択する。(R = A:4)

つまり、双方が最善手を選択すると、自分は $A \Rightarrow C \Rightarrow H$ の手順で必ず勝利することができる。ここで、さらに能率的な探索方法である α β 法を説明する。

2.2 α β 法 (アルファ・ベータ法)

α β 法を使うと次のような不要な枝をカット (枝刈り) することができる。

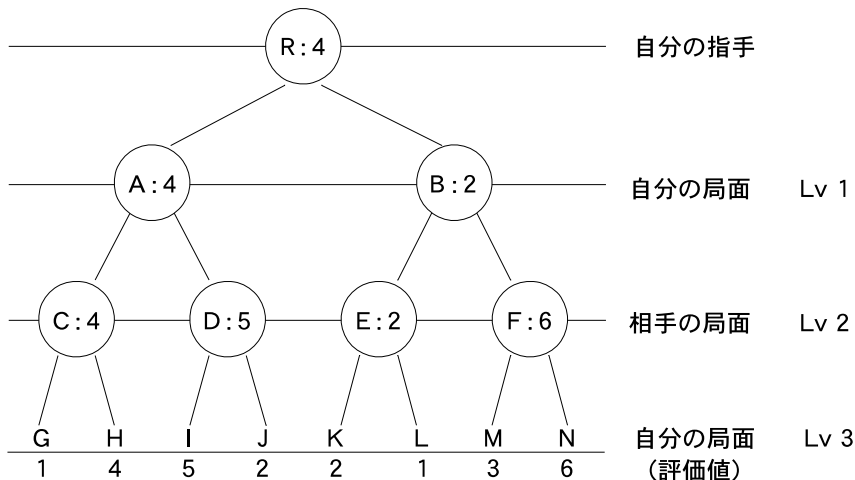


図3-2 α ・ β 法

ミニマックス法のLv 3で評価関数を使い8回計算した部分が、図3-1より $\alpha\beta$ 法を使う

とLv 3で5回計算して同じ結果であることが分かる。これには次のような理論が働いている。

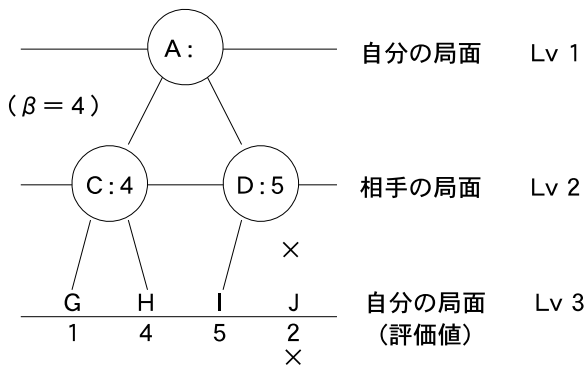


図3-3 β カット

Lv 2において、相手はC点での評価値が4であることが分かる。引き続きD点の値を計算していきI点が5であることが分かる、この時点で、D点はC点での評価値4より大きいことが判明するので次のJ点の計算を打ち切

る。このような枝刈りを β カットといい、このとき基準になる値を β 値 ($\beta=4$) という。すなわち、 β カットとは β 値よりも大きい値はすべてカットすることである。さらに次の図から、

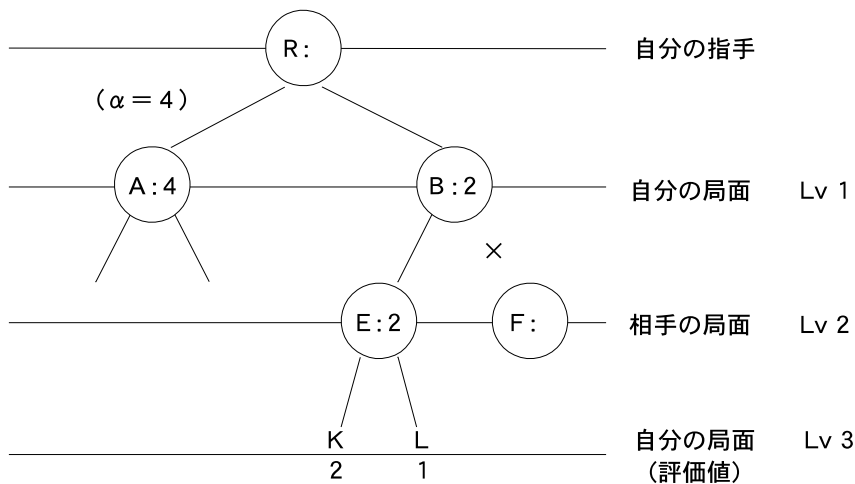


図3-4 α カット

Lv 1において、自分はA点での評価値が4であることが分かっている。引き続きB点の値を計算してE点の評価値が2であることが分かる。この時点で、F点はE点での評価値2より小さいことが判明（当然A点4よりも小さい）するので、計算を打ち切る。このような枝刈りを α カットといい、このとき基準にな

る値を α 値 ($\alpha=4$) という。すなわち、 α カットとは α 値よりも小さい値はすべてカットすることである。

以上のように $\alpha\beta$ 法を使うことにより、実際のゲームでは評価関数の計算がかなり軽減されることが分かる。

3. コンピュータ将棋の考察

3.1 コンピュータ対人間

1996年にIBMのチェスゲーム専用のコンピュータである「ディープ・ブルー」が、世界チェスチャンピオンのガルリ・カスパロフと対戦し、1つのゲームとしては初めて勝利を収めた。ただし、これは6戦中の1勝に過ぎず、全体ではカスパロフの3勝1敗2引き分けであった。しかし、翌1997年にディープ・ブルーは、2勝1敗3引き分けとカスパロフ相手に勝利した。このニュースは、世界のチェスファンのみならず、人工知能の研究者にも大きな衝撃と希望を与えた。

将棋界にも最近、コンピュータ将棋の実力が急激にアップしたという情報が入った。2007年3月にボナンザ(Bonanza)というコンピュータソフトと、将棋界の7大タイトルの1つである竜王というタイトルをもつ渡辺竜王との公開対局(平手)が行われた。コンピュータはタイトルホルダー相手に健闘し、終盤の読み違いがきっかけとなって敗れはしたものの高い評価を受けた。また、2008年5月の第18回世界コンピュータ将棋選手権エキシビジョンマッチにおいて、コンピュータ将棋選手権優勝ソフトがアマ名人を、準優勝ソフトが朝日アマ名人をそれぞれ破るという快挙を成し遂げた。彼らは、プロ相手に幾度も勝利を挙げている超強豪である。コンピュータがプロ棋士(日本将棋連盟)に勝利したことはまだないが、勝利する日もそうと遠くないのではないかと予想される。

第2節で3目並べを説明したがこのゲームで勝負がつくのは、高々9手目(3×3)である。これに対して升目だけ比較するとオセロとチェスは64(8×8)、将棋は81(9×9)、囲碁は361(交点:19×19)である。

また、ゲーム中の考える局面数はオセロが10の60乗、チェスが10の120乗、将棋が10

の220乗であるのに対し、囲碁は10の360乗であるといわれている。チェスはコンピュータが世界チャンピオンを破り、将棋でもプロの実力に接近しつつあるのに対して、コンピュータ囲碁ソフトの進歩が遅れているのは、この局面数が圧倒的に多いことによる。

このような状況の中、最近著しく進歩している「コンピュータ将棋」について以下に考察する。

3.2 コンピュータ将棋の問題点

将棋とチェスは同一の祖先(インド古代のチャトランガが起源)を持つゲームである。チェスと比較した場合、将棋は取った駒を持ち駒として再使用できるというゲーム特性から指し手の選択肢が格段に多いため、チェスと比べはるかに高度なプログラムが必要とされる。将棋は第1節で説明した「二人零和有限確定完全情報ゲーム」であるので、両プレイヤーが最善手を指せば、先手が勝つか、後手が勝つか、引き分けになるか必ず判明する。「二人零和有限確定完全情報ゲーム」ならば、全てのゲームにこのことが成り立つことは既に証明されている。

すなわち、将棋は指す前から理論的に結論が出ているのである。小林秀雄著の「考えるヒント」には、『2人の神様が将棋を指すのだが、神様なので将棋では先手後手どちらが勝つかわかっていて、そこで先手後手を決めるために振り駒をするのだが、その振り駒の結果も神様なのでわかっている』と記されている。今やこの話が現実となっても不思議なことではない。そうなった時、普通の人間が行なう将棋は、お互いに必ずミスを犯すので存続するだろうが、プロ棋士がどのような立場になるのかは全く予想がつかない。

このように進歩してきているコンピュータ将棋であるが、まだまだ多くの問題点をかかえている。そこで代表的な問題点について考えるこ

とにする。

①水平線効果

コンピュータ将棋では、何手先まで思考すればいいのか不明である。あるプログラムはN手先まで読んで「好手」と判断して指したが、N+1手先に相手の上手い切り返しがあり、先ほど指した手は「最善手」ではなかった。最高N手先までに設定しても、N+1手先は読めない。このことを「水平線までは見えてもその先は見えない」ことにたとえて、水平線効果（フレーム問題）と言う。

最近のコンピュータ将棋の進歩は、コンピュータのハード（機械そのもの）の飛躍的進歩による。将棋の終局手数は平均200手以下であるが、ゲーム中の考える局面数は10の220乗と、現在の最高のコンピュータを持ってしても最後まで解析することはできない。また、ハードと一体となり進歩してきたのがソフト（アルゴリズム）も進化中である。全ての局面数を計算する計算量は非常に膨大であるが、この条件は無限ではなく有限である以上、いつの日かこの水平線効果をなくし、「二人零和有限確定完全情報ゲーム」の結論まで出す可能性がある。私も自分の棋力はなかなか上達しないが、せめてコンピュータ将棋がプロ棋士に勝つことは確認したいと思っている。しかし、「二人零和有限確定完全情報ゲーム」としての最終的結論が出るには、まだまだとてつもなく長い年月がかかるので確認できないのは止むを得ない。

②評価関数

コンピュータ将棋での「有利」の判定は難しい。最終的に玉を詰ませられることが目的であるが、途中の段階でその有利度を数値化することが難しいのである。たとえば、手数の損得、駒の損得や働き、玉形（守りの駒組）

の堅さなどについて、それぞれプログラム作成者の標準にもとづき、数値化して評価している。この評価でコンピュータ将棋の強さが決まってくる。

コンピュータは人間ではないので直感や感覚がない。したがって、コンピュータ自体が有利なのかは数値化しておかなければならない。ここで問題なのが進行中のゲームを正確に評価する関数（評価関数）の設定である。これまでは将棋の定石（昔から最善手とされている手の集合体）やプロ棋士など人間の直感や感覚を利用して設定してきた。これからも絶対に正しいという評価関数を作ることは不可能であろう。対戦を数千回数万回して、全勝ならばかなり正解値に近いと判断できるかもしれない。実際に、コンピュータ将棋のソフト作成者たちも、数多くの試合（実験）を繰り返し行ないその都度改良している。また、最近ではコンピュータ自体が学習機能（機械学習）を持っているので対戦を繰り返すことで、自動的にプログラムを改良している。

③探索

コンピュータが最善手を探索するには、主に次のような方法がある。

- 全幅探索・・・ある局面で指すことが可能な手をしらみつぶしに読む方法。
- 選択的探索・・・大局観（ある局面を見てすぐに形勢判断ができ、直感的に最善手がわかる）の条件から絞り込んだ手だけを読む方法。

コンピュータが人間より優れている点は、膨大な記憶力と高速の計算力にある。記憶力では、現在残っている棋譜（将棋の指し手順の記録）について、プロ棋士をはじめ評価の高いものを全て記憶できる。それを整理してデータベース化することで、プログラム作成時や対戦時に有効に活用できる。また、計算

力では人間とは掛け離れたスピードを持っており、最善手を計算するには人間よりはるかに多くのゲームの木を探索できる。探索数やスピードでは人間より優っているにもかかわらず、まだプロ棋士には勝てないのは、質的部分が劣っているからである。つまり、明らかに無駄な手を数多く探索しているからである。逆にプロ棋士は直感や大局観が優れており、最善手に近い数手を短時間で深く読むことができるので、コンピュータに勝利できるのである。それでもコンピュータは、これまでは「選択的探索」を用いることで人間に近づき、効率的に探索することで時間的短縮も計ってきた。「選択的探索」の例としては、第2節で説明した $\alpha\beta$ 法もその1つである。

1990年の第1回世界コンピュータ将棋選手権から毎年強いソフトが次々と現れた。当初はアマチュア初段がやっとと言われ、次はアマ県代表クラスと進歩を重ねていった。2005年にはついにプロ棋士もイベントで負けそうになるほどで、日本将棋連盟が全棋士に無断で公の場でのコンピュータ将棋との対戦を禁止したのである。

翌2006年にコンピュータ将棋界に大きな革命が起こったのである。それは、初出場の「ボナンザ(Bonanza)」が第16回世界コンピュータ将棋選手権に優勝したのである。しかも関係者を驚かせたのは、探索には「選択的探索」ではなく、原始的で能率の悪いと言われてきた「全幅探索」を使っている点である。なぜ、ほとんどコンピュータ将棋界では使われなかった、この「全幅探索」で優勝したのであろうか？

3.3 コンピュータ将棋の進歩

ボナンザは、今までコンピュータ将棋に関係のなかった、日米の大学で化学の研究をされている「保木さん」が作ったプログラムである。

実は作成当初、作者がコンピュータ将棋をよく知らなかったことが幸いしたのである。

保木さんは、まずコンピュータチェスの論文を参考にしたのである。コンピュータチェスは、チェス名人に勝つほど強いソフトであるが、実は「全幅探索」を使用していたのである。この方法は例えば、第1節のミニマックス法を全ての局面で使うことを意味している。一見非能率のようであるが、現在のコンピュータ速度は急激に速くなったので、思ったほど問題にならなかった。しかも「全幅探索」を使うことで、水平線効果の対策にもなった。

つまり、「選択的探索」で枝刈りした部分に、局面が進むにつれて実は最善手または最善手に近い手が潜んでいる場合が考えられる。これを再度掘り出すことができるのが、「全幅探索」であった。

それ以外にも、将棋の棋譜をできるだけ集め巨大なデータベースのもと研究開発を行なったこと、「評価関数」を独自で作成したこと、数多くの対戦を行い「機械学習」をさせたことなどによる。また保木さんの専門である化学の「制御理論」も取り入れている。このように、コンピュータ将棋とは全く違う分野の知識や理論が活用され成果を挙げている。

日本のコンピュータ将棋ソフト開発は、初期は個人で、現在ではグループや大学の研究室も人工知能研究の一貫として取り組んでいる。アメリカのチェスゲーム専用のコンピュータである「ディープ・ブルー」は、IBMという企業がチェス専用のハードと、チェス用コンピュータソフト開発のために優秀な人材を集めて開発したそうである。日本において、これからコンピュータ将棋のソフトが飛躍的に進歩するためには、多くの研究費用も必要であり、また人口知能における有力な企業の参入も期待したい。そして、いつの日か将棋の必勝法が見つかり、最終的には「二人零和有限確定完全情報ゲー

ム」としての結論が見つかることを心より切望している。

最後に、コンピュータを将棋に利用して既に成功した例として、「詰め将棋」（どうやって玉を詰ませるかを解く将棋）の解析がある。詰め将棋と言う将棋の終盤についての解析は非常に進んでおり、ほとんどの詰め将棋の問題をコンピュータは解くことができる。これは、玉を詰ます手数が、実践の将棋より少なく、また使う駒数や升目も少ないので、ここで触れた問題はほとんど発生しないためである。

おわりに

今回のコンピュータ将棋の進歩は、人工知能の進歩を意味しているものと考えられる。このプログラムの開発過程は、現在の情報学や経営学にもある教訓を投げかけている。

今まで、数学など理論的に証明されて事象は除いて、経験的に無駄だと思われてきた事象や手法などの中に、実は私達にまだまだ有益なものが潜んでいるということである。人はこれまででは慣習的な生活の中で「常識」を生み出し、その中でルールに従って生きることによって穏やかに生きることができる。

通常の生活では、「常識」は人間社会の秩序と平和を維持するためには重要なものである。しかし、学問の世界では、この「常識」以外の場所に意外な発見や宝物が潜んでいるのではないか。これからも新しい知識や情報を習得して、新しい経営戦略を考えて行く過程で、時には既存概念からはなれたところで考えることも必要であると考えられる。

また、ポナンザの作者の専門である化学の知識や理論が、今回のプログラムの改良と進歩に大きく貢献した。このように広い視野で新しい学問や技術を取り入れることは、その分野にも大きな刺激と進歩を与えたことになる。このことは、逆に考えると、このような新たなゲーム

理論や人工知能の手法は、今後、その分野で利用されるだけでなく、まったく別の分野でも有効に活用できる可能性があるものと考えられる。

参考文献

- (1)「ポナンザ VS 勝負脳—最強将棋ソフトは人間を超えるか」（角川 one テーマ 21）保木邦仁、渡辺明。
- (2)「コンピュータ将棋の進歩」（共立出版）松原 仁。
- (3)「考えるヒント」（文春文庫）小林秀雄。
- (4)「フリー百科辞典：Wikipedia」（人工知能）、（コンピュータ将棋）ほか。
- (5)「ロジカルな将棋入門」（ちくまライブラリー）、野崎昭弘。
- (6)「コンピュータ将棋の新しい波」、情報処理学会誌、Vol.50, No.9, pp.866-894(2009)