解説

コンピュータ将棋の来た道

小谷 善行 *

今日、将棋を指すコンピュータシステム、つまりコンピュータ将棋の強さが最も強い人とそれほど違わない強さになったと予測される。このような状況に至った歴史的過程やそこにある技術などを概観する。

将棋以前

まず、将棋というゲームについて振り返ってみよう。将棋は、西洋のチェスやシャンチー（象棋と書く、中国将棋のこと）と起源が同じである。インドでできたチャトランガというゲームがそれらすべての始まりである。最初は4人のゲームであつたがすぐに2人ゲームが生まれた。最初にもう盤が8×8のマス目で、チェスと同じような駒の配置であった。

それがユーラシア大陸全体に伝わり、多種類の将棋系のゲームが生まれた。そうしてユーラシア大陸には今日、微妙に違うたくさんのローカルな将棋の仲間のゲームがあるわけである。

このように多くの人に親しまれるゲームは個人の意思とは独立して時間と場所で変化する。他の多くの文化や言語と同様に、変化しつつ伝播していく。この将棋の仲間と同じような多様性をもつゲーム群にはマンカラ・アワリ・カラーといった石を取るゲームがある。囲碁については表面的ルールはそれほど変異がないが、終局についての細部のローカルなルールの違いがたくさん生じた。

グローバル化に従い、人の言語においては英語が主導的になっているが、将棋の類ではチェスがそれに当たる。残念なことに多くのローカルな将棋類が遊ばれなくなっている。チェスがチェスらしくなった特徴としてはクイーンの動きがある。クイーンつまり将棋でいえば金であるが、これは動きが少ない駒であったこれを飛車と角を合わせた動きをするようにしてダイナミックなゲームが生まれた。

東洋ではまったく別な方向に将棋類が発展した。シャンチーが特徴的になった最大のルールは「包」という駒である。飛車と同じ動きをする駒を捕るときに他の駒を飛び越えなくてははいけない。シャンチーに近い、チャンギという将棋が朝鮮・韓国にある。チャンギの包は捕るときだけでなくただ移動するときにも駒

を飛び越える。

将棋というゲーム

この将棋類のゲームが日本に伝わって将棋になった。将棋がどこから伝わってきたかという問題がある。西(中国)からか、南(東南アジア)からかという論議がある。その将棋類の特徴を比較すると南の方の将棋が日本の将棋に良く似ている。ただ南から直接来たとは簡単にはいえないかもしれない。中国に少しそのまの形に近い将棋があり、それが日本に伝わったのかもしれない。そして中国ではその後「包」の駒や縦横の線の交点に駒を置くこと、また歩が一つ置きにするなど大きく変化したのかもしれない。

将棋は他の将棋類と決定的に違うルールがある。捕った駒が使えることである（こうするには、駒の形も自分と相手とで同じにする必要があった）。そのほか、桂馬と香車が前にしか進めなくなったことと、飛車と角が加わったことが将棋の性質を決めた。ただ、歩の初期位置や銀の動きなど南方系の将棋類の特徴を今も持っている。

将棋についての組織についても江戸時代以来発達してきて、近世になり、次第に強い棋士が上になることができる体制ができあがった。将棋を指す人の人口は1200万人くらいであり、囲碁の3倍はある。日本の代表的思考ゲームになっている（麻雀とコンピュータ・電子ゲームというのがあるが）、プロ棋士は160人くらいを擁する日本将棋連盟がある。アマチュアや詰将棋のコミュニティもある。

コンピュータの歴史とチェス

18-19世紀には計算をする機械がさまざま作られ始めた。ネピアの骨、シッカートの計算機、バベッジの階差機関、解析機関などである。これらは今日の計算機的能力はまったくないものだった。このころチェス人形というものがヨーロッパを興行してまわった。チェスをする機械かと思われたが実際は台のなかに人

* Yoshiyuki KOTANI
東京農工大学工学部情報工学科（前東京農工大学）

が入っていた。

その当時はチェスをする機械は成立し得なかったが、人々がそのような人工知能を夢想していたのが理解される。産業革命でさまざまな機械が活躍し、人工知能の可能性もその延長としてとらえた。

計算機の成立は20世紀中葉を待たなければならなかった。1940年代からプログラムすることのできる計算機械が作られ始めた。ENIAC, SSEM, EDSAC, EDVACなどを経てフォン・ノイマン型計算機というもの確立した。ストアッドプログラミング方式という言い方もある。汎用のアルゴリズムを機械のなかに保持することができ、アルゴリズムとデータを同一の記憶領域にもつものである。

その当初から人々はもうコンピュータにチェスをさせることを考え始めた。シャノンやチューリングの論文が今に伝えられている。そして、紙の上に書かれたアルゴリズムと、初心者の婦人との対戦が行われたりした。紙に書かれたものであってもアルゴリズムという考えで操作すれば一種のコンピュータと考えることができる。アルゴリズムのなかには、最大最小戦略や評価関数といえるものがもうあらわれていた。

そのあと、1960～1980年代にコンピュータチェスは毎年ほぼ一定の割合で、どんどん強くなった。 $\alpha\beta$ 枝刈、トランスポジションテーブル、反復深化、そのたいろいろなヒューリスティックスの技術が生まれた。結局並列コンピュータチェスマシンDeep Blue がグランドマスター Gary Kasparov を1997年に破って、一つのエポックを迎えることになった。

コンピュータ将棋の歴史

コンピュータ将棋はコンピュータチェスに比べてだいぶ遅く始まった。1950年代、1960年代、遅れていた理由は、おもに国が先進国として成熟していなかったということだろう。初期の詰将棋プログラムを経て、1970年代中ごろになると最初のコンピュータ将棋プログラムが作られた。FORTRANで書かれた滝澤武信のプログラム、LISPで書かれた小谷善行のプログラムがあった。大阪大学のシステムもあった。

1980年代になるとコンピュータ将棋ソフトがたくさん作られ販売された。PC98, FM-7, MSXなどのパソコンと、ファミコンなどであった。強さは10級くらいと思われた。筆者らは1986年にコンピュータ将棋協会を設立した。1986年から1987年にかけては週刊読売で8個の市販ソフト同士でリーグ戦の連載があった。

1990年にはアマチュア2-3級の強さになったと思われる。またこの年には第1回のコンピュータ将棋選

手権が開かれた。これはそののち毎年続くことになる。1990年ころからいろいろな学術的な活動が始動した。代表的なのがGPW(ゲームプログラミングワークショップ)、CGコンファレンス、情報処理学会GI研究会などである。筆者らは1990年に初のコンピュータ将棋の本を書いた。1994年にはコンピュータチェス(D. Levi and M. Newborn)という本を翻訳した。

また1990年代には詰将棋を解くアルゴリズム(詰め探索という)の研究が進展し、1997年には、最長の詰将棋マイクロコスモスをコンピュータが解いた。その手数は1519手である。1999年には詰め探索アルゴリズムの df-pn が発表され、この方面の研究がほぼ完成した。

2000年には実現確率探索という探索深さをコントロールする方法が考案された。2005年にはアマチュア5段くらいになり、もう一般の将棋ファンはコンピュータ将棋に勝てなくなった。2006年には保木邦仁による評価関数学習法(いわゆるBonanza 法と呼ばれる)が発表された。2007年になるとコンピュータ将棋の強さはプロ棋士の強さの範囲に入っていることが確認された(平均よりは下)。2009年にはプロ棋士の平均の強さになったと思われる。

2012年にはプロ棋士とコンピュータ将棋の対局イベントが行われた。今日まで3回行われているがどれもコンピュータ将棋側の勝利となった。筆者の測定によると2014年、コンピュータ将棋の強さはプロ棋士トップに近づいている。1年ほどのうちに両者の強さが同じになると予測された。

コンピュータ将棋は、かつては人間がすべてプログラミングして作るのが普通だったが、たくさんのデータを使った学習、統計、知識獲得を行ってここまで強くなった。

コンピュータ将棋の基本アルゴリズム

まず基本的なコンピュータ将棋のアルゴリズムを述べよう。これは多くはコンピュータチェスで開発されたものである。ただ、そのまま将棋に移したのでなくそれなりの工夫が多く入っている。

コンピュータ将棋では $\alpha-\beta$ 探索($\alpha\beta$ 枝刈によるゲーム木探索)を行って指し手を先読みし、最善手を決める。これは最大最小戦略を計算するのと等価な計算をするものだが無駄な部分を計算しないというものであり、基本中の基本である。一言で言うと、 $\max(3, \min(2, X))$ という式の値は、Xの如何によらず3であるので、Xの部分を計算しない。

この探索を、読みの深さをだんだん深くしながら繰り返す。これを反復深化(iterative deepeningという)。

これにより、より深い探索のための手の並べ替え情報を作り出す。これはトランスポジションテーブルに情報が保持される。また反復深化は思考時間のコントロールに使う。1手深くなるごとに数倍の時間がかかるので、反復深化をしてもほとんど時間の無駄にならない。

トランスポジションテーブル(transposition table)とは、探索の際に、同じ局面を再計算しないようにする手法 またはそのためのデータのテーブルのことである。将棋では探索中に同じ局面が現れることが多い。たとえば、手順A-B-Cと手順C-B-Aのあとの局面は同じである。また手順A(成り)-B(それを取る)と手順A(不成)-B(それを取る)のあとの局面も同じである。トランスポジションテーブルには、キャッシュの考え方をもとにハッシュテーブルを使う。ただ、普通のハッシュと異なり、データが衝突しても、別の場所に保持することは普通ない。衝突したら無視する・上書きする・浅い局面を優先、などとする。中のデータには、局面の評価値、深さ、「真値・上限・下限」、局面に対する最善手などを格納する。

探索においては、最善手を先に調べれば後の手は刈りやすい。そのためにより最善手らしい手を先に持ってくる。これを手の並べ替え(move ordering)という。どの情報を使って行かかが重要だが、

- ・トランスポジションテーブル中の値(反復深化の直前の反復で格納されている)
- ・軽い(速い)評価関数
- ・1手読みの結果
- ・駒取り・王手優先のヒューリスティックス

などがある。手生成のときと同時に行う方法もある。

探索の末端に近い方で、静けさ探索(quiescence search)あるいは捕獲探索(capture search)と呼ばれる探索を行う。両者は同じような意味で、次のような手だけを探索する：取る手、取りから逃げる手、ときには当りの手、両当りの手、王手など。歩の価値が低いので、歩を捕る手は安いので、ここから除外することもある。木探索の末端ではさらに限定し、直前の手の駒を取る手だけを調べることもある。

基本的なゲーム木探索では、一定の深さまで先読みしてそこで末端になる。実際には人間がするように、ゲーム木のなかである部分は深く、ある部分は浅く読む。それを行うアルゴリズムが拡張(extension)と枝刈り(pruning)である。コンピュータの能力が低いころ、前向き枝刈りがよく使われていた。可能手リストから、並び替えの下位の手を除外するものである。と

きおり悪手を指す欠点があり使われなくなった。

今日では基本的には全幅探索という考えで行う。すなわち、可能手はすべて先読みする。ただし、拡張と枝刈りによって先読みの深さが深くなったり浅くなったりする。拡張には、王手の先を深く読む王手拡張、評価が急変したときに深く読むシンギュラー拡張などがある。短い枝刈りには、razoring, futility pruning, prob cut, late move reduction, null move reduction などがある。こうした技法を使うと、探索木の末端が深くなったり浅くなったりしてぎざぎざした形状になる。

実現確率探索

ここまでで述べたコンピュータ将棋のアルゴリズムはおもにコンピュータチェスで開発されたものである。それをコンピュータ将棋に適用している。ここからはコンピュータ将棋独自に発展したアルゴリズムや手法を述べよう。まず実現確率探索というものを紹介する。

探索とは基本的には、「ある局面を深さDで探索する」という作業をするのに対し、その中で「その子局面を深さD-1で探索することを繰り返す」という形で再帰呼び出ししている。こうするとゲーム木は末端がみな同じ深さになる。

ここで再帰呼び出しするごとに1ずつ深さを減らす。このところを、都合に応じてある数(小数点付き)で深さを減らすと、それでも探索木の末端は深くなったり浅くなったりしてぎざぎざする。

これを、データに基づいて木拡張するのが実現確率探索(Realization probability search)である。鶴岡慶雅他が設計し、激指システムに導入した。歴史的にみるとどんな手をより深く読むかという観点でさまざまな研究がバックグラウンドとしてあったが、それをすっきり理論化した。

着手を、駒種、駒を取るかどうか、王手かななどで分類しておく。その各分類について、「可能手として存在したときそれを指す確率」(つまり手の指しやすさ)を、多量の棋譜から求めておく。この確率を実現確率という。

現在局面から先読みの先までの手順のなかの着手についてこの確率を掛け合わせたものを考える。この値がある小さい一定値を下回ったらそこを末端とする。

実際には、現在深さから1引いて再帰呼び出しする部分を、現在深さからlog(子局面への着手の実現確率)を引く。

将棋の評価関数

評価関数とは、局面に対してその有利不利さを計算する関数のことである。基本的には駒の価値をベースにしている。駒の価値は盤上の位置や、王との位置関係で変化するが、そのようなものが表現されて評価関数の値になる。持ち駒の価値も重要である。評価関数は、高速に計算することが必要であり、速度と正確さはトレードオフの関係にある。

20世紀の間は評価関数を人間が手で作るのが主流であった。そのうち、保木によるBonanza法をはじめとして、学習的に評価関数を作ることが進歩した。保木がこれで2006年コンピュータ将棋選手権に登場して優勝した。多数のパラメータ(数万以上)を同時に学習させることに成功したのである。

学習パラメータは、複数の駒の位置関係に対して与える重みである。特に王と他の駒との位置関係を使う。パラメータは、c言語などの配列の表現で書くと、weight [駒種][駒の位置][王の位置]というような形と思えばよい。評価関数の値は、局面中に存在する駒の位置関係の総和である。

これ以前の評価関数パラメータ学習法は、多くは、TD(temporal difference)学習で、親子局面間の学習であった。新しく成功したのが、兄弟局面間の学習である。学習で使うデータには、多量のプロの棋譜データを使った(今日では、システムが十分強くなったので自己対局のデータを使うこともある)。

方法としては、プロが指した局面の評価値を高く、指さなかった局面の評価値を低くする方向にパラメータを変更する。パラメータの数が著しく多いので、かつては成功するとは思われなかった。

金の価値が高くなる傾向・角の価値が低くなる傾向などの面白い現象も見られた。保木は2009年にプログラムを公開し、新しい参加者や多くの研究者に影響を与えた。今日では4個の駒の関係を学習するシステムまで現れている。

序盤では駒組が大事であり、過去には駒組みメカニズムがさまざまに研究されていた。しかし今日では、こうして作られた良質な評価関数により、自然に駒組みされるようになったということもある。

終盤の処理と詰め探索

コンピュータチェスには終盤データベースというものがある。チェスでは取った駒を再利用しないので、多くの場合終盤では駒が少なくなる。駒がない局面から逆算して、駒の少ない局面すべての勝ち負けの値を計算してデータベースにする。この技法をレトログレード(retrograde analysis)という。

しかし将棋では終盤でも駒が減らないのでこれができない。その代わりに詰め探索が大きい役割を持つ。詰め探索は普通の探索のなかに組み込まれる。これにより終盤が非常に強くなる。

詰め探索は、通常の探索のなかから、ルート局面や浅い局面にあるとき、呼び出される。詰め探索は、最大最小探索でなく、AND/OR探索(真偽値を評価値とする探索)である。

可能手として扱うのは、攻め方は王手だけ、守り方は王手を守る手だけである。答えは真偽値で、真の意味は「詰め手順が見つかった(攻め方の勝ち)」で、偽の意味は「詰め手順が見つからない」である。両方の王に対してそれぞれ詰め探索がある。

詰め探索の研究には、1990年ころからの長い歴史がある。最初は単純な深さ優先探索で、広がり優先探索も行われた。なにを先に読むかで、さまざまなヒューリスティックスが提案された。

詰め探索は、背尾による効果的なアルゴリズム(1998)で大きく発展した。それは多くの長い手数詰将棋を解いた。共謀数という考え(のちに証明数と呼ばれる)を用いていた。

その後証明数探索がいろいろ出現した。証明数に、さらにそれと双対な反証数を加えた。最良優先探索によるもの、PDS法、長井歩によるdf-pn(深さ優先証明数探索, depth-first proof number search)(1999)がある。

証明数と反証数について説明する。今日の証明数探索は攻め方と守り方が対称なのが普通である。その意味は次の通り

局面の証明数:

その局面が真であることを証明するのに必要な局面数

局面の反証数:

その局面が偽であることを証明するのに必要な局面数

証明数探索は、もっとも証明するのが楽と思われる局面(つまり証明数や反証数が小さい局面である)から先に探索する。

端的にいうと、証明数(pn)と反証数(dn)は次のようになる。

真とわかっている局面:

$pn=0, dn=\infty$

偽とわかっている局面:

$pn=\infty, dn=0$

新しく訪問した局面：

pn=1, dn=1

途中の局面：

pn = 子局面の反証数の最小値

dn = 子局面の証明数の合計

詰め探索は詰将棋を解くことにも使われる。詰め手順(詰将棋の答え)生成のモジュールを詰め探索に加えることでそのシステムになる。詰め探索の技術が進歩してくるとほとんどの有名詰将棋が解かれるようになった。最長の詰将棋、橋本孝治によるミクロコスモス1519手詰が解かれた。また数百の古典詰将棋を解いた結果、数十の誤り(余詰、不詰)を発見した。

並列計算

ムーアの法則で言われるように、コンピュータは年々指数的に計算速度が高まってきていた。しかし近年個々のCPU単位では速度は頭打ちになってきている。一つのコンピュータのなかに多くのCPUを入れたり複数コンピュータを動かしたりする、並列処理が進んで、それ全体ではムーアの法則が成り立つ。

ところが、コンピュータ将棋の並列計算は大変むずかしい問題である。強いコンピュータ将棋はすべて並列計算を行っている。しかし全体の速度の合計に比べれば、本当はそれほど強くなっていない。ざっくり言って、台数の平方根の力しかない。

合議という並列計算方式もある。複数コンピュータによる着手の投票をする。合議はさらに台数に対する伸びは少ない。

コンピュータ将棋の性質

こうして作成されたコンピュータ将棋は人間と比べるとかなり異様である。コンピュータ将棋の性質を分析してみよう。

コンピュータの思考はすべて探索と評価に基づく。探索は枝分かれの繰り返しによる先読みであり、人間の思考にくらべてコンピュータ将棋の先読みの枝分かれが多い。平均的な枝分かれの枝数は、コンピュータは3～5であるのに対して人間はほとんど一本道である。

評価は、駒価値ベースの評価値の大小による選択である。コンピュータは人間的思考ができない。対比(似た局面・手順・駒を比較すること)はコンピュータはほとんどできない。一度読んで良かった手を先に読む程度である(ヒストリーヒューリスティックなど)。類似局面を取りまとめて把握すること(チャンキング)がほとんどできない。手順のチャンキング(手順をひ

とまとまりと認識して一瞬に理解すること)もほとんどできない。

枝分かれの性質からいえることは、持ち時間が短い場合は、圧倒的にコンピュータが強いが、思考時間が増えてもそれほど強くないことである。枝分かれが多い局面がコンピュータは苦手である。枝分かれが少ないと、コンピュータは深く読めてしまう。コンピュータは詰め・中盤の取り合いに強い。

コンピュータは長い手順で有利になる状況がわからない。ずっとあとに意味が出るような着手が不得意である。コンピュータの読みの末端が地平線といわれるものである。コンピュータはそこまではよくわかるが、そこから先はまったく理解していない。

詰め探索は速い。20～30手の詰めはほとんど読むのでその局面を人は避けるべきだ。ただし、コンピュータ将棋がそうするのは現在局面に対してである。現在局面ではたくさん詰め探索を読む。しかし通常手で数手先以降は詰探索しない可能性が高い。

定跡はたいいてい、多量の棋譜データ(数万局～)から作った定跡を搭載している。その場の戦略を入れることもあり(開発者が入れる)。最近の新定跡は入っていないかもしれない。過去データにない局面は、コンピュータ将棋は思考する。似た局面でも少しでも違っていればそうなる。知識が上回っているかどうかが重要である。

同じ局面ではやはり同じ手を指しやすい。乱数が含まれているので絶対同じ手とは限らないが、同じ手の確率は高い。

入玉については、学習の棋譜が少ないため、コンピュータ将棋は非常に不得意である。開発者の多くは認識しているので改良が進むことはあるだろう。人間が入玉で勝つというのは重要な戦略だろう。

最近のコンピュータ対人間の対戦

コンピュータ将棋の最近の状況にもどらう。2012年1月人間とプロ棋士の対戦が行われた。人間側は故米長邦雄(日本将棋連盟前会長)で、コンピュータはボンクラーズ(伊藤英紀開発)これは善戦にもかかわらずコンピュータ側が勝利した。このコンピュータ対人間の対戦は電王戦と名付けられた。第2回電王戦は2013年春に行われ、5対5の対戦である。プロ棋士側は若手を中心にした体制であった。結局コンピュータ側からみて3勝1敗1引き分けになった。引分けは入玉持将棋で駒数判定になって生じた。

2014年の第3回電王戦ではコンピュータが4勝1敗になった。このときは棋士は中堅から上位にかけてのメンバーであった。企画側が用意したマシンおよ

び、対局するコンピュータ将棋ソフトが棋士にあらかじめ貸与されていた。そのような条件でもこの結果になった。

コンピュータ将棋の強さ測定

筆者は以前から対局結果だけを用いてコンピュータ将棋の強さを推定してきている。2007年にコンピュータ将棋とプロ棋士の強さの関係をレーティングをつかって推測した。両者の対戦が少ないということがあった。日本将棋連盟が基本的にコンピュータ将棋との対局を禁じた(十分なスポンサーのもとに公式にするのは可だが)ためである。

おもにアマチュアとの対戦を介して推測した。勝敗の数値だけを用いてレーティングを算出した。2007年にはコンピュータ将棋のもっとも強いもの(当時は棚瀬将棋)は、「プロ棋士の平均ー標準偏差」前後であった。これは人数で20%のプロ棋士よりは強い。女子プロよりは強いが、アマのトップよりは弱い。そのあと2009年にコンピュータ将棋がプロ棋士の平均の強さを超えたと考えられる。

また、その後の測定で、2013年にA級の中位くらい、2014年には人間のトップ(羽生善治四冠)の少し下に至った。2015年にはコンピュータ将棋が人間を越えてもおかしくはない(2014年現在でも越えている可能性はある)。

コンピュータ将棋の今後

こうしてコンピュータ将棋はほとんど人間のトップの強さに近づいた。可能ならこの頂上対戦を企画してほしいものだ。今としてはもう勝敗にこだわることはない。ただ頂上対局の状況はなかなか困難であるよう

に見受けられる。電王戦のイベントはもう一度行われ、そののちには、人間とコンピュータによる協力による棋戦に移行すると報道されている。

コンピュータ将棋がこれで終わるわけではない。課題がいろいろある。そのコンピュータと人間の協力でどれくらい強くなれるかというのもそれである。

コンピュータで詰将棋を作る研究がある。しかしまだ30手程までのものが作られているにすぎない。100手を越える詰将棋をコンピュータで作るのは大きな挑戦課題である。

将棋を解くということはまったく不可能である。解くとは、スタート局面での勝ち負けを求めることである。小さな将棋でこれを行うことも意義がある。3×3や3×4の盤のミニ将棋は解ける。動物将棋という3×4の将棋ゲームも解かれた。一方、今日ではまだ55将棋(ミニ将棋のなかで広く楽しまれているものの一つで、5×5の盤を使う)でも解くのは困難である。そのあたりはよい研究課題である。

参 考 文 献

- [1] 小谷善行, コンピュータ将棋の進展と電王戦, 数学セミナー, 日本評論社, Vol.8, (2013)
- [2] 小谷善行, コンピュータ将棋の棋力の客観的分析ー人間のトップに到達したか?, 情報処理, 55 (8): 851-852 (2014).

(2014年8月30日 受付)

[問い合わせ先]

〒184-8588 小金井市中町2-24-16

東京農工大学工学部情報工学科

小谷 善行

E-mail: kotani@cc.tuat.ac.jp

著 者 紹 介

こたに よしゆき
小谷 善行 [非会員]

東京農工大学名誉教授, 工学博士。
1949年, 兵庫県生まれ。東京大学工学部計数工学科卒業。専門は人工知能, 自然言語処理, 学習, ゲーム等。情報処理学会フェロー。パズル懇話会会長。コンピュータ将棋協会副会長。テンソルコンサルティング技術顧問。著書に「コンピュータ将棋の頭脳」, 「脳力が目覚める最強のパズル」, 「ゲーム計算メカニズム」等。