

# グラフに基づく囲碁の静的評価写像系の提案とその検証実験

## Graph based static evaluation map system of the Game of Go

佐藤 真史\*      穴田 浩一†      堤 正義\*  
Masafumi Sato   Koichi Anada   Masayoshi Tsutsumi

### 1 序論

囲碁は、古くからあるボードゲームの中でも、特に解析が難しく、また興味深いものである。その理由として、盤が広く着手の自由度も高いこと、図形的な特徴を基にしたルールであること、常に全体を考慮しなければならないことなどがあげられる。

その解析は、様々な分野を用いて行われており、それらは静的評価と動的評価の2種類に分けることが出来る。動的評価が対象とする局面とその(着手による)派生局面を用いるのに対し、静的評価はその局面そのものからしか情報を得ることが出来ない。一方で、有用な関数が一度出来上がれば先読みなく局面を評価できるため、対局中の計算量を精度を落さず減らすことが出来る。我々は、特に静的評価についての研究をしている。

囲碁の数理モデルや静的評価方法としては、初期のものとしてはD.Benson[1]の集合や写像を用いた局面の表現方法やそれによる石の死活などが考案されている。

その後も様々なアプローチが考えられ、パターンによる組み合わせ理論[2]やポテンシャルを用いたもの[3]、重みつきグラフを用いるCFG[4]などがある。

我々は、その中でも特にグラフによる方法に着目した。碁盤は一見すると、 $x, y$ の2軸を持つ空間のように見えるが、ルール内に上下左右や直線、斜めといったものを用いるものはなく、361個の点が684本の辺でつながっているに過ぎない。また、囲うという考えはグラフ理論における連結そのものであり、囲碁の局面はまさにグラフであると言える。

我々は、佐藤ら[5]で、連による有向辺「接続辺」を用いた囲碁の局面グラフモデル、BW Graph Modelを提案した。これにより、石の連結性を式のみで表現することが出来、また局面の変化をアルゴリズムではなく、数式、漸化式で表現することに成功した。

今回その結果から、BW Graph Modelに用いる演算を利用することで、グラフ的な評価方法を体系化し、局面を点の集合に写す写像の一般形、戦術写像を提案する。戦術写像は写像系であり、一つ一つの写像が交点の持つ特徴の定式化となっている。これにより、交点や着手の持つ特徴を数値化することなく図形そのままの形で扱うことが出来る、グラフ的、汎用的な表現方法が確立できた。

同時に、戦術写像は適切なものを自動的に探すことのできる単純化された一般形と、各演算の組み合わせ方を解析することで特徴を知ることの出来る可読性の2つを併せ持ち、研究者あるいはプログラマが評価関数を用意しなくとも、機械学習により自動的にそれを得る方法を与えることが出来る。

局面や着手からその特徴を取り出すことが出来るこの方法は、評価対象に対し、「どのような特徴を持っているか」を評価する、まったく新しい学習システムとなっている。

本論文ではまず第2節でBW Graph Modelの定義と性質を説明する。続く第3節ではグラフを用いた特徴の表現方法である戦術写像の定義と特徴を説明し、第4節で実際に戦術写像を用いて着手の持つ特徴が表現できることを実験により確認する。

## 2 BW Graph Model

### 2.1 ルールと用語の定義

まず、本稿で用いる用語の説明をする。本稿での囲碁のルールは日本棋院に基づくものとする。

碁盤は通常 $19 \times 19$ 個の交点からなり、各交点は(あるならば)上下左右の直近にある交点と隣接している。本稿ではこれに自分自身を加え、各交点は自分自身および上下左右の交点に点接しているとする。

囲碁では、同色の石がつながっている場合、**連**と呼び、一つの塊として扱う。またその周囲にある空点(石

\*早稲田大学

†早稲田大学高等学院

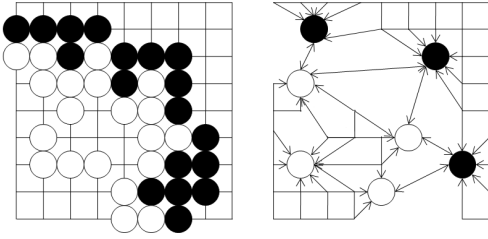


図1: 局面 (左図) と連を1ノードとする表現 (右図)

のない交点)をその連の息と呼ぶ。図1の右は、左の局面の連を1つの点として表した図である。息のない連は取られ、また息を持たない連を作る着手は行えない。自身の石を取られた状態にする着手を自殺手という。

勝敗は互いが囲った空点の作る領域、および相手から取った石の数で決まる。空点の作る領域は、石の時と同じく点接で繋がったものを指すが、こちらは連とは呼ばない。本稿では、空点一つも連と呼び、二つの空点が隣あっても、別々の2つの連とみなす(図1右参照)。ある交点  $x$  に対し、交点  $y$  が  $x$  を含む連もしくはその周囲である(連のうち少なくともどれか一つが  $y$  に点接している)とき、 $x$  は  $y$  に接続していると呼ぶことにする。 $x$  が石、 $y$  が空点ならば  $y$  は  $x$  の息である。

BW Graph Model とは、点接と接続という考え方を基に作った辺を用いて、囲碁の局面を表すグラフ、およびその上での演算を定義するものである。

## 2.2 BW Graph Model

BW Graph Model は、囲碁の局面をグラフを用いて先手用、後手用の2つの点の集合と、点接と接続を用いた無向辺と有向辺、2種類の辺で表す。

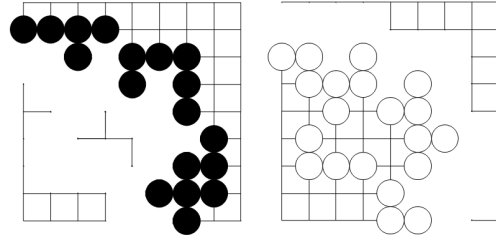
**点集合** 各交点は必ず黒石、白石、空点の3つのうちのどれかの状態なので、3種類の値を取ればよい。しかし、デジタルで処理することを考慮すれば2ビットで表現するのが妥当と考えられる。そこでBW Graph Model では、“空点または黒石である”交点と“空点または白石である”交点の2種類による交点集合  $b$ 、 $w$  で表す。

### 定義

$$b = \{x | x \text{ は空点または黒石である交点} \},$$

$$w = \{x | x \text{ は空点または白石である交点} \}.$$

図2は、図1左の局面を  $b$  と  $w$  に分けたものである。これらは集合であり、集合演算である和  $A \cup B$ 、積

図2:  $b$ (左図) と  $w$ (右図)

$A \cap B$ , 差集合  $A - B$ , を使うことができる。これを用いると黒石の集合 *black*, 白石の集合 *white*, 空点の集合 *empty* はそれぞれ,

$$black = b - w,$$

$$white = w - b,$$

$$empty = b \cap w$$

と表せ、全ての交点は  $b \cup w$ , 補集合  $\bar{A}$  はこれを用い

$$\bar{A} = (b \cup w) - A$$

となる。

**点接辺と接続辺** 辺を定義する前に2種類の二項関係を定義する。一つ目は点関係  $N$  で、2交点  $x, y$  が点接しているとき、 $xNy$  と表すことにする。これは、反射律  $xNx$  と対称律  $xNy \Leftrightarrow yNx$  が成り立つ。

この二項関係を用い、1つ目の辺、点接辺を写像の形で定義する。

### 定義

$$F_0(x) = \{y | xNy\}.$$

2交点  $x$  と  $y$  に対し、 $y \in F_0(x)$  がなりたつとき、またそのときに限り、点接辺  $xy$  が存在する。定義より、 $y \in F_0(x) \Leftrightarrow x \in F_0(y)$  が成り立つため、点接辺は無向辺として、または双方向の有向辺として扱う。また、任意の交点  $x$  に対し  $x \in F_0(x)$  が成り立つので、全ての交点がループ辺(端点が同一の交点の辺)を持つ。

もう一種類の二項関係は連関係  $M$  である。2交点  $x, y$  が同一の点である、もしくは同一の連に含まれるとき、 $xMy$  とする。これは、図1左における2点  $x, y$  が、右の図において同一の点とされることを意味し、このとき交点  $x, y$  は1つの(同一の)連に含まれるとする。

そして接続辺を点接辺と同様に写像で定義する。

### 定義

$$F(x) = \{y | \exists z, xMz, zNy\}.$$

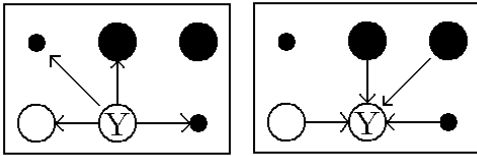


図 3: 交点 Y を始点とする接続辺 (左) と終点とする接続辺 (右)

また逆向きの接続辺も表すため、

$$F^{-1}(x) = \{y | \exists z, yMz, zNx\}$$

とする。接続辺は対称律が成立しない。そのため、接続辺は有向辺となる。図 3 は、 $3 \times 2$  の大きさの局面上での交点 Y の接続辺を示したものである。左図では、Y の左の白石を経由して左上の空点に接続しているが、上、右のどちらも白石ではないため、右上の黒石には接続していない。一方、右上の黒石は 1 つ左の黒石を経由して Y に接続している。よって Y を始点とする接続辺と終点とする接続辺は一致しない。接続辺では、始点側は連単位で考え、終点側は交点単位で考えるという特性を持つ。 $y \in F(x)$  と  $x \in F(y)$  の両方が成り立つとき、 $x$  と  $y$  の間には向きの異なる 2 本の接続辺があることになる。

また空点または周囲に同色の石を持たない石、つまり一交点からなる連の持つ自身を始点とする接続辺は点接辺と一致し、局面上に、2 つ以上の交点からなる連が一つも無い場合、 $F_0$  と  $F$ 、 $F^{-1}$  は完全に一致する。

$F_0$  は盤の形状にのみ依存し着手により変化せず、また点接する 2 交点は常に互いに接続する。本稿では図で 2 点が向きのない線で結ばれている時、その 2 点は点接し、同時に互いに接続していることを示している。

BW Graph Model では、盤を  $F_0$ 、局面を  $(b, w, F)$  の組で表現する。

### 2.3 着手による局面の変化

次に着手により局面  $(b, w, F)$  がどのように変化するかを説明する。着手により局面が変化するとき、その変化は着手された石の増加と取られた石の減少の 2 つからなる。増える石は着手として与えられるため、まず取られる石を考える。以下では、着手する側を先手側、着手する石を黒石とする。

**石の取り** 接続辺の定義から、石  $x$  から出ている接続辺に、空点に向いているものがない場合にその石は

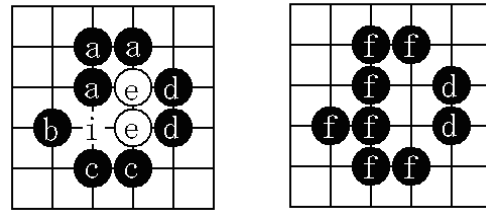


図 4: 石の取り (右図は左図の交点  $i$  へ着手後の局面)

取られた状態にあるといえる。式で表すと、交点  $x$  が

$$|F(x) \cap b \cap w| = 0$$

を満たす時、取られたということになる。ここで  $|\cdot|$  は、その集合の要素の数とする。

**価数演算** しかしこれは石が置かれたあとの局面での話である。石が置かれる前の局面では、まだ少なくとも一つは息を持っており、取られる石の息は着手される空点唯一つである。なぜならば、一度の着手で空点から別の状態に変わる交点は、着手された交点一つのみであり、故に奪われる息は最大で一つだからである。

よって取られる石の条件は、現在息が一つであることと着手に接続していることの 2 つである。このことを表現するために、交点から出ている、または入っている辺の本数、価数に関する演算のひとつ接続始点  $\text{Pre}_n$  を定義する。

#### 定義

$$\text{Pre}_n(A) = \{x | |F(x) \cap A| \geq n\}$$

ここで  $A$  は任意の交点の部分集合である。これは  $A$  に含まれる少なくとも  $n$  個の交点に向けて接続辺を出している交点を得る、交点集合から交点集合への写像である。

これを用いることで、息を一つしか持たない交点は、 $\overline{\text{Pre}_2(b \cap w)}$  と書ける。 $\overline{\text{Pre}_2(b \cap w)}$  に含まれる交点は空点  $b \cap w$  に少なくとも 2 本以上の接続辺を出している。よって、その補集合である  $\overline{\text{Pre}_2(b \cap w)}$  は空点へ向けての接続辺が 1 本以下の交点であるが、ルール上 0 本であることはありえないので正確に 1 つの空点に向けて接続辺を持つ交点である。この集合  $\overline{\text{Pre}_2(b \cap w)}$  を **アタリ集合  $H$**  で表すことにする。

図 4 左では、 $i$  および  $e$  の 3 つの交点はどれも  $i$  という息 1 つしか持たない交点である。このように、このアタリ集合  $H$  は、後一手でとられる石だけでなく、周囲を石に囲まれ、点接する空点が自分以外にない空点も含む。後一手でとられる白石を表すには  $H - b$  を用い、

$$H - b$$

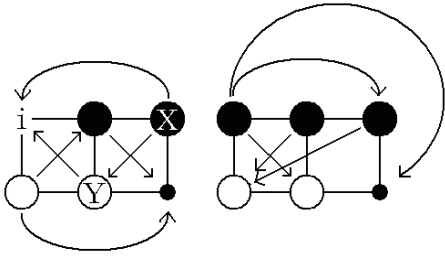


図 5: 着手による接続辺の増加. (右は  $i$  に着手することにより増加した辺のみを示す.)

とすればよく、黒が交点  $i$  に着手した場合、 $i$  が黒石になり、 $F^{-1}(i) \cap H - b$  が空点になる.

$\text{Pre}_n$  と同様に、逆向きの接続辺、および点接辺に対し、接続終点  $\text{Suc}_n$ , 点接  $\text{Adj}_n$  を

$$\text{Suc}_n(A) = \{x \mid |F^{-1}(x) \cap A| \geq n\},$$

$$\text{Adj}_n(A) = \{x \mid |F_0(x) \cap A| \geq n\}$$

と定義しておく. また定義より、

$$F(x) = \text{Suc}_1(\{x\}),$$

$$F^{-1}(x) = \text{Pre}_1(\{x\}),$$

$$F_0(x) = \text{Adj}_1(\{x\})$$

である.

**着手による変化** 石単位での変化が記述できたので、続いて連単位の変化、接続辺の変化を考える. 着手により変化する連として、着手した交点を含む新しい連、及び取られる連がある.

まず先手の着手  $i$  により増える新しい連  $a^b(i)$  は、 $i$  が接続される黒石の連  $\text{Pre}_1(\{i\}) - w$  と  $i$  自身で作られるため、

$$a^b(i) = (\text{Pre}_1(\{i\}) - w) \cup \{i\}$$

と書ける.

図 5 左での  $a^b(i)$  は上部の 3 つの交点である. 右図の矢印は、左図の交点  $i$  に着手することで増える接続辺を表したもので、どれも  $a^b(i)$  から出ているのが分かる. また  $i$  からの新しい接続辺は、交点  $X$  がもともと接続している交点へ出ており、 $X$  からのものは  $i$  の接続している交点へとなっている. つまり増えた接続辺は全て  $a^b(i)$  から  $F(i) \cup F(X)$  へ出ている. 着手後の接続辺を  $F'$  とすると、石が取られない場合は、

$$F'(x) = \begin{cases} \text{Suc}_1(a^b(i)) & x \in a^b(i) \\ F(x) & x \in \text{その他} \end{cases}$$

となる.

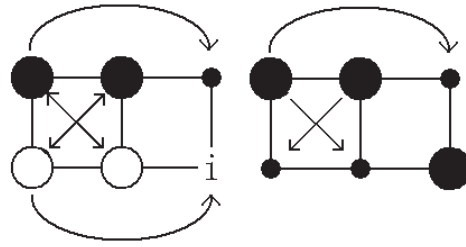


図 6: 石が取られることによる接続辺の消失

**石の取りによる変化** 図 6 の矢印は石が取られる前(左)と取られた後(右)の接続を表している. 消失した接続辺は、取られた石(左図における白石)から出ているもののみで、また点接かつ双方向の接続を示す無矢印辺はなくなることが分かる. 石が取られるとは、連であった複数の交点が個々の空点に分解されるということであり、取られた石それぞれを始点とする接続辺が点接辺と重なるものを除きなくなることの意味する.

着手  $i$  により取られる石  $d^b(i)$  は、前述したとおり

$$d^b = \text{Pre}_1(\{i\}) \cap H - b$$

と書ける.  $d^b(i)$  から出ている接続辺は全て  $\text{Suc}_1(d^b(i))$  へのものであるが、それらのうち、 $\text{Adj}_1(d^b(i))$  を除く  $\text{Suc}_1(d^b(i)) - \text{Adj}_1(d^b(i))$  が失われる. このことは、取られた石からの接続辺が  $F_0$  となることを意味する.

以上より、着手前の局面を  $(b, w, F)$ , 着手後の局面を  $(b', w', F')$  としたとき、

$$b' = b \cup d^b(i)$$

$$w' = w - a^b(i)$$

$$F'(x) = \begin{cases} \text{Suc}_1(a^b(i)) & x \in a^b(i) \\ F_0(x) & x \in d^b(i) \\ F(x) & x \in \text{その他} \end{cases}$$

と書ける. 白の手番では、 $b$  と  $w$  を交換すればよい.

**グラフとしての連結性**  $F$  は、実際には  $b, w$  および  $F_0$  から導ける情報である. 石の置いてある各交点において、その周囲の同色の石に一步步つ広がっていくような計算を行うことで導出でき、その歩数は交点の総数を超えない. しかし、 $F$  の変化は本モデルを用いれば、上述の通り再帰的な計算を行うことなく表せ、同時に連という囲碁において重要な情報を担うものである.

よって、これらの演算はグラフを扱う際によく用いられる連結性の確認が必要なく、計算が容易であり、また解析する際に逆像、つまり手順をさかのぼるような計算もしやすくなる. BW Graph Model は、連の変化

をこの漸化式という形で表すことにより、無向辺  $F_0$  と有向辺  $F$  を持つ  $b, w$  という2つの点集合にまたがったグラフを用いて解析する手法である。

しかし空点の作る領域に対しては、このような連結性の確認を必要としない計算方法は存在しない。何故ならば連は常に拡大し、失われる際は  $F_0$  に初期化されるのに対し、空点の作る領域は常に切断されていくからである。連結領域内に石が打たれた場合、それ以外の2点が切断されたかどうかは、経路の探索なしには確認できない。

このことから、BW Graph Model では、空点の領域(地)の計算は、必要に応じて各空点を空点を通して広げていくなど、一般的な方法を用いて確認する方法を取る。

## 2.4 着手可能点

最後に、着手が可能でない交点とそうでない交点、自殺手の分類を行う。囲碁ではそれ以外に打てない交点としてコウがあるが今回は省略する。

着手  $i$  が自殺手であるということは、 $a^b(i)$  が息を持たない、つまり着手前の局面で  $\text{Pre}_1(a^b(i))$  に含まれる空点が  $i$  だけ1つということである。これは  $i$  がアタリの空点、かつ周囲にある黒石も全てアタリであるような交点と言い換えられ、黒にとって自殺手となる交点は、アタリでない黒石、空点のどちらにも隣り合わない交点  $\overline{\text{Adj}_1(b-H)}$  (のうち空点) と表せる。

図4では、白の場合であるが交点  $i$  は白にとっての自殺手である。アタリ状態にある交点は空点  $i$  と白石  $e$  であり、 $i$  は、周囲にアタリ状態でない黒以外  $w$  の交点を持たない空点のため、 $\overline{\text{Adj}_1(w-H)}$  に含まれ、白にとっての自殺手であると分かる。

ただし、 $\overline{\text{Adj}_1(b-H)}$  の交点であっても打てる場合がある。それは、同時に相手の石も取れ、結果として周囲に空点が発生する場合である。相手の石を取る着手が自殺手であることはない。なぜならば、打った石は必ず取られた石のあった交点に隣接しており、それは空点になるからである。白石を取れる空点は  $\text{Adj}_1(H-b)$  に含まれる。

よって先手の打てる交点は、空点  $b \cap w$  であることを絶対条件とし、 $b-H$  または  $H-w$  に隣接していれば良く、黒の着手可能な交点  $r^b$  は、

$$r^b = (b \cap w) \cap \text{Adj}_1(b \oplus H)$$

という形で、次の局面を確認することなく定義するこ

とが出来た。ここで  $\oplus$  は排他的論理和で、

$$A \oplus B = (A - B) \cup (B - A)$$

である。今後、着手といった場合はこの式に基づいて選んだものとする。

## 2.5 局面の変化をあらわす漸化式

以上をまとめると、碁盤を  $F_0$ 、局面を  $(b, w, F)$  で表し、この局面における先手、後手が着手可能な交点は、それぞれ

$$r^b = (b \cap w) \cap F_0(b \oplus H),$$

$$r^w = (b \cap w) \cap F_0(w \oplus H)$$

と書け、着手  $i$  (上記の集合から選んだ交点) により変化した後の局面  $(b', w', F')$  は、

$$b' = \begin{cases} b \cup d^b(i) & \text{先手番} \\ b - a^b(i) & \text{後手番} \end{cases},$$

$$w' = \begin{cases} w - a^b(i) & \text{先手番} \\ w \cup d^b(i) & \text{後手番} \end{cases},$$

$$F'(x) = \begin{cases} F(x) \cup F(a^b(i)) & x \in a^b(i) \\ F_0(x) & x \in d^b(i) \\ F(x) & x \in \text{その他} \end{cases}$$

と表せることが分かる。ここで、

$$H = \overline{\text{Pre}_2(b \cap w)},$$

$$a^b(i) = \begin{cases} (\text{Pre}_1(\{i\}) - w) \cup \{i\} & \text{先手番} \\ (\text{Pre}_1(\{i\}) - b) \cup \{i\} & \text{後手番} \end{cases},$$

$$d^b(i) = \begin{cases} (\text{Pre}_1(\{i\}) \cap H) - b & \text{先手番} \\ (\text{Pre}_1(\{i\}) \cap H) - w & \text{後手番} \end{cases}$$

である。

## 3 戦術写像

以上により、BW Graph Model が、囲碁の局面および着手による変化を、アルゴリズムを含むことなく、式として表現できることが言えた。その際用いた変数、演算子は、次のもので構成された。

**集合演算** 和  $\cup$ , 積  $\cap$ , 差  $-$ , 補集合  $\bar{\phantom{x}}$

**価数演算** 接続始点  $\text{Pre}_n$ , 接続終点  $\text{Suc}_n$ , 点接  $\text{Adj}_n$

これらを、いくつかの交点集合を元に交点集合を作る演算かということによって分類すると、

**1 項演算** 補集合  $\bar{\cdot}$ , 接続始点  $Pre_n$ , 接続終点  $Suc_n$ , 点接  $Adj_n$

**2 項演算** 和  $\cup$ , 積  $\cap$ , 差  $-$

となる. さらに,  $b$  および  $w$  も局面から直接交点集合をとりだす演算と思えば,

**0 項演算** 黒空集合  $b$ , 白空集合  $w$

といえる. アタリ集合  $H$  や着手可能点  $r^b, r^w$  など上記の演算を組み合わせて作られた 0 項演算である.

これらを組み合わせて作られた局面  $(b, w, F)$  から交点集合への写像を, **戦術写像**と呼ぶこととする. 0 項演算は, 戦術写像の要素として使うことが出来ると同時に, それ自身が 1 つの戦術写像である.

また戦術写像は, ひとつひとつが交点の持つ特徴と対応する. 例えば  $b$  とは, 局面から白石でない交点からなる集合への写像である. これは, 戦術写像  $b$  は局面から”黒石または空点”という特徴を持つ交点を取り出す写像といえる. また,  $b \cap w$  は空点という特徴,  $H$  はあと一手で取られる石と周囲を石に囲まれた空点を取り出す写像といえる.

このことから, 戦術写像を用いると「着手することにした交点の持つ特徴」や「打つ理由となった石の持つ特徴」などを表すことで, 数値によらないグラフベースの特徴表現, 静的評価が可能であることが分かる.

### 3.1 距離, 座標への対応

戦術写像はグラフを基礎としており, 上下左右といった方向を用いないため, 「左上から右に 5 歩, 左に 4 歩の位置」や, 「ある石の右に 3 歩進んだ空点」といった横軸と縦軸による座標を用いた表現は出来ない.

盤上の 4 隅および端は, その周囲の交点, 点接する交点の数の違いで他と区別でき, それぞれ

$$4 \text{ 隅の交点} = \overline{Adj_4(b \cup w)}$$

$$\text{端の交点} = \overline{Adj_5(b \cup w)}$$

と書ける (4 隅も端の 1 つとして考える) が, 他の特徴を用いない限り, 互いを区別することはない. (図 7 参照)

また, ある交点  $x$  からの位置関係を表すには, 例えば隣は  $Adj_1(\{x\})$  と表せるが, このとき, どちら方向に隣り合っているかは, やはり石の配置関係や端からの距離といった他の違いを必要とする. 例えば, ある交点  $x$  の周囲の交点のうち白石に点接しないものならば

$$Adj_1(\{x\}) - Adj_1(\bar{b})$$

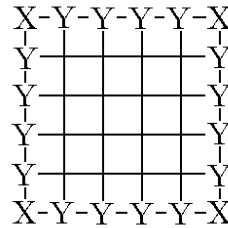


図 7: 隅と端 ( $X$  が隅,  $X, Y$  ともに端)

のように表される.

**xy 座標** 石がない最初の局面では隅, 端, 及びそこから距離以外で交点を区別する特徴はない. 「左上から右に 5 歩, 左に 4 歩の位置」の場合, 戦術写像では, 「いずれかの隅からどちらかの方向に 5 歩, もう一方に 4 歩」となり, 該当する交点は 8 つ存在する. これは実際に 4 つの隅およびそこからの 2 方向に差異がないため, 区別する必要がないからである. このことは石が置かれても同様であり, 囲碁の盤は回転, 反転に対して不変である. (将棋は左右の反転は出来るが, 上下反転すれば駒の所有者も交換され, 回転は出来ない.)

BW Graph Model では,  $xy$  座標に相当する表現として, 最も近い端からの距離と最も近い隅からの距離を用いることが出来る. 4 隅いずれかからの位置が  $(n, m)$  である交点 (図 8) は,

$$\begin{aligned} & (Adj_1^{n+m}(\overline{Adj_4(X)}) - Adj_1^{n+m-1}(\overline{Adj_4(X)})) \\ & \cap (Adj_1^l(\overline{Adj_3(X)}) - Adj_1^{l-1}(\overline{Adj_3(X)})) \end{aligned}$$

と表せる. ここで,  $l, X, Adj_n^m$  は,

$$l = \min(n, m),$$

$$X = b \cup w,$$

$$Adj_n^0(\cdot) = Adj_n(\cdot),$$

$$Adj_n^m(\cdot) = Adj_n(Adj_n^{m-1}(\cdot))$$

とした. これらを用いることで, 布石によく用いられる星, 三々といった  $xy$  座標に基づく交点を表すことが出来る.

BW Graph Model 及び戦術写像に用いられる演算は, 最大でも連を通してひとつ隣の交点までしか参照しない. そのため, 基点となる交点と得たい特徴を持つ交点が離れていた場合, その数に応じて演算が増える. これは, 次で定義する深度と密接な関係にある.

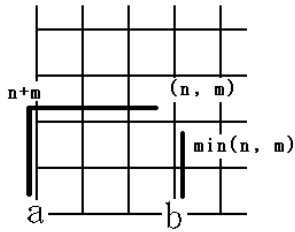


図 8: 隅と端からの距離による表現

### 3.2 戦術写像の一般形

戦術写像を式で正しく定義するため、局面から交点集合への写像系  $\mathcal{F}$  と交点集合への 1, 2 項演算子の集合  $\mathcal{G}$  により、以下の形で定義する。  $n$  は自然数とする。

**定義**

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_1 &= \{b, w\}, \\ \mathcal{G}_1 &= \{\bar{\cdot}, \text{Pre}_{1\sim 5}, \text{Suc}_{1\sim 5}, \text{Adj}_{1\sim 5}\}, \\ \mathcal{G}_2 &= \{\cup, \cap, -\}, \\ \mathcal{F}_{n+1}^1 &= \{g^1(f) | g^1 \in \mathcal{G}_1, f \in \mathcal{F}_n\}, \\ \mathcal{F}_{n+1}^2 &= \{g^2(f_1, f_2) | g^2 \in \mathcal{G}_2, f_1, f_2 \in \mathcal{F}_n\}, \\ \mathcal{F}_{n+1} &= \mathcal{F}_{n+1}^1 \cup \mathcal{F}_{n+1}^2.\end{aligned}$$

$\mathcal{F}_n$  を深度  $n$  以下の戦術写像と呼び、 $\mathcal{F}_\infty$  を戦術写像と呼ぶことにする。

深度は、その戦術写像の複雑さや基点と特徴間の距離の指標となる。用いる演算の量が増えれば当然、計算量が多いものになるが、ここでは、例として合成と距離に関する次の 2 つの評価方法を提案する。

**特徴の合成**  $f \in \mathcal{F}_\infty$  が  $f_1, f_2 \in \mathcal{F}_\infty$  を用いて、

$$f = f_1 \cap f_2$$

と表せたとする。このとき、戦術写像は特徴と対応しているので、特徴  $f$  は「特徴  $f_1$  と特徴  $f_2$  を兼ね備えている」特徴であるとも言え、 $f$  を  $f_1$  と  $f_2$  の合成とする。例えば、

$$f = (f_1 \cap f_2) \cap (f_3 \cap f_4)$$

ならば、 $f$  は  $f_1$  から  $f_4$  までの合成といえる。このことから、着手や石の特徴を解析する際には、論理積  $\cap$  を基準に分解することで、いくつの特徴により特徴付けられているかを知ることが出来る。

**距離の判定** 例えば「黒石の隣の交点」という特徴は  $\text{Adj}_1(b-w)$  と表せる。「 $\bigcirc\bigcirc$ の隣」のようにある交点を基準としたその周囲を意味する特徴の場合、必ずその距離に応じた数の  $\text{Pre}_n, \text{Suc}_n, \text{Adj}_n$  のどれかが

用いられる。それ以外の演算は、前述の論理積  $\cap$  のように複数の特徴の合成や反転などであり、基準交点からの距離は変わらない。また用いられる際も

$$f = \text{Adj}_n(f_1) \cap \text{Adj}_m(f_2)$$

のような並列なものではなく、

$$f = \text{Adj}_n(g(\text{Adj}_m(f_1)))$$

のように直列につながる。この数を見ることで、その特徴の「視野範囲」を知ることが出来、深度はその上限でもある。

### 3.3 解析の観点からの応用

複数の特徴を用いている場合や範囲のある特徴に対応する場合、戦術写像は前述のように特徴的な形をする。このことは、意図した特徴の戦術写像を構築する方法だけでなく、逆に戦術写像が得られたときにどの程度の視野範囲の特徴をいくつ使っているかを調べることも可能であると言うことを意味する。

さらに戦術写像は定義の仕方から二分木の構造をしており、また深度を指定すればパターン数が有限になるためランダムに生成していくことが出来、特定の意図に沿ったものをコンピュータに自動的に探索させることが可能である。

これらのことは、局面とその特徴が不明である交点集合 (例えば棋譜や詰め碁のような局面と着手の組) が与えられたとき、局面をその集合に写す戦術写像を得ることで、その集合の特徴を特定できることを意味する。

次では、戦術写像の表現能力が実際の対局の着手を特定できるだけの表現力があるか、またあるならば、どの程度の深度を用意する必要があるかを実験により確認する。

## 4 戦術写像の有効性及び深度の調査

今回、実際の対局で着手された交点を戦術写像で特定できるか、またその際にどの程度の深度が必要かを調べた。その目的は、BW Graph Model で提示した演算だけで着手された交点とそうでない交点を区別することができるのかということと、区別できるならばどの程度の距離、深度の戦術写像が必要になるかということの確認である。

使用する棋譜は、「第 31 期名人戦第 2 局 黒 張栩名人 対 白 高尾神路本因坊 白中押し勝ち」を用いた。計

最低深度	2	3	4	5	6	7以上
局面数	23	142	29	7	1	8

表 1: 各局面における着手の特定に必要な最低深度

210 手の対局であり、黒番白番を問わず各局面において、次に打たれた着手の位置を特定できるかを調べた。

また距離の判定がしやすくなるように戦術写像の定義に用いた演算以外に、

**0 項演算**  $b-w$ ,  $w-b$ ,  $b \cap w$ ,  $\overline{\text{Pre}_2(b \cap w)}$

**1 項演算**  $\overline{\text{Pre}_n(\cdot)}$ ,  $\overline{\text{Suc}_n(\cdot)}$ ,  $\overline{\text{Adj}_n(\cdot)}$

も 1 つの演算として用いた。距離以外の理由で深度が増えることを防ぐのが目的である。

そして、確認方法であるが、今回の実験では実行時間などに関する予備実験から最大深度を 6 とし、 $\mathcal{F}_6$  の中からランダムで抽出した戦術写像のうち、対象の着手の持つ特徴であるもののみを残し、それらの合成が着手の特定に至るか、または十分な量の戦術写像を試すまで試行することとした。1 局面ごとの最大試行回数は一般的な PC で最大 (見つからなかった場合) 1 時間程度かかる量として、400000 回とした。

#### 実験結果

実験の結果が表 1 である。最も多いのは深度 3、次いで 4 と 2 であり、6 以上必要なものは 5% 以下であった。尚、初手は対角線上でなかったため、BW Graph Model では同一とする別の 7 つの交点が存在し、8 つにまで特定するのに必要な深度を計測、深度 5 以下の戦術写像 3 つを合成して特定できることが確認できた。

深度 7 以上の戦術写像が必要であった局面 8 つに着目すると、初手を打つ石の無い局面を 1 番目とした時、2, 3, 5, 9, 11, 17, 18, 32 番目であった。またどのような交点と区別がつかなかったかを見ると、周囲 4 歩以内の石と端までの距離、色、数が一致する交点が候補に挙がっており、ほとんどが 2, 3 個にまで絞り込むことが出来ていた。それより多いものは 2, 3 番目の局面で、候補の数は石の無い隅の数の 2 倍である 6 個、4 個となっていた。

このことから深度 6 の戦術写像の視野範囲はおおよそ 4 歩であること、およびそれだけあれば、序盤の周囲に石がほとんど無い場所 (囲碁用語で大場と呼ばれる) への着手を除き、特定できるということが確認できた。また、大場への着手も戦略的な観点から見てほぼ同一の位置と言え、序盤～終盤を問わず、任意の局面に対し使用出来ることが確認できた。

## 5 まとめ

BW Graph Model の特長は、上下左右や xy 座標という本来囲碁では必要のない情報を取り除けることと、接続辺により連結性の確認をすることなく、連を考慮した局面の変化を表すことの出来ることである。

そして、その演算を用いて作った評価写像の一般系である戦術写像は、検証実験によりその表現力が局面、着手の特徴を表すのに十分な汎用性を持つ写像体系であることも確認できた。また同時に写像の自動構築システムの性能も確認することが出来た。戦術写像及びその自動生成システムを用いれば、評価関数をデータから直接かつ自動的に生成することが出来る。

局面や着手からその特徴を取り出すことが出来るこの方法は、手筋や定石のようにパターン化されていなかったデータの特徴の抽出およびそれによる類別や、パターンマッチング用のデータを写像にすることによるメタルール化やデータの圧縮、さらには 1 人の棋士のデータを集め、その棋風を解析するなど多岐にわたる応用が考えられる。

今後は、様々な棋譜や詰め碁、定石集などの特徴を収集し、それらの解析をすることで、局面や着手の分類や判別、評価方法を確立していく。またそれに伴い、適切な戦術写像をより早く構築できる自動生成システムの開発も行っていく。

## 参考文献

- [1] Benson, D. B.: Life in the Game of Go, *Information Sciences*, Vol. 10, pp. 17–29 (1976).
- [2] Berlekamp, E. and Wolfe, D.: *Mathematical Go: Chilling Gets the Last Point*, A K Peters Ltd, Natick, MA (1994).
- [3] Tajima, M. and Sanechika, N.: Estimating the Possible Omission Number for Groups in Go by the Number of n-th Dame, Vol. 1558, pp. 265–281 (1999).
- [4] Graepel, T., Goutrie, M., Kruger, M. and Herbrich, R.: Learning on Graphs in the Game of Go, *Proceedings of the Ninth International Conference on Artificial Neural Networks*, pp. 347–352 (2001).
- [5] 佐藤真史, 堤正義: 囲碁における数学的構造の解析, 日本応用数理学会 2008 年度年会, 東京大学柏キャンパス, 日本応用数理学会, pp. 343–344 (2008).