

コンピュータブリッジによるカウントシグナル

小林 紀之[†] 小田和 友仁^{††} 上原 貴夫^{††}

ブリッジにおけるプレイは、コントラクトを達成しようとするディクレアラ側と、これを阻止しようとするディフェンダ側に分けて考えられる。ディクレアラのパートナーはダミーとよばれ、最初のカードが出された直後にハンドをテーブル上に開き、以後のプレイはディクレアラが代行する。したがって、ディクレアラは自分たちのハンドを見て、プレイのプランをたてることができる。これに対して、ディフェンダ側は、パートナーのハンドが見えないのでプレイはより難しくなる。そこで、ディフェンダは自分のハンドに関する情報（あるいは自分の意図）を伝えるシグナルによりパートナーと協調をはかる。我々は、先に、ブリッジにおける各プレイヤーをエージェントとしてモデル化する方法を提案した。このエージェントは、他のエージェントのハンドを推論するとともにそのエージェントから見た自分ハンドも推論し、これらのイメージに基づいて行動を決定する。本論文では、このモデルをシグナルに関する判断に応用する。すなわち、自分から見た世界（ディーラー）だけを考えるのではなく、各プレイヤーから見た世界も対象として行動を決定するゲーム木探索アルゴリズムを提案する。これがブリッジにおけるディフェンダのプレイに有効であることを、カウントシグナルを理解するプログラムを実装し、例題による実験で考察する。

Count Signaling Algorithm of Computer Bridge

NORIYUKI KOBAYASHI,[†] TOMOHITO OTAWA^{††} and TAKAO UEHARA^{††}

Defending is harder than declaring in the game of contract bridge. The declarer's advantage is that he controls both his hand and the dummy. Defenders have fewer chances to influence the outcome of the hand than the declarer. So it is important to prepare sufficient information for defenders who must make critical decisions. Defensive signals are the tools to help information exchange between defenders. We have proposed an agent model of the bridge player. In this paper, the defender agents use count signals. In general, the value of a count signal to its partner will outweigh any benefit that declarer can draw from it. However, this will not be the case when it saves declarer a guess in the suit itself. In our signaling algorithm, a defender agent estimates the effects of a signal both to its partner and to declarer, and the agent uses the signal only when the information helps the partner more.

1. はじめに

不完全情報ゲームであるブリッジには、チェスなどの完全情報ゲームとは異なる難しさがある¹⁾。ブリッジにおけるプレイは、コントラクトを達成しようとするディクレアラ側と、これを阻止しようとするディフェンダ側に分けて考えられる。ディクレアラのパートナーはダミーとよばれ、最初のカードが出された直後にハンドをテーブル上に開き、以後のプレイはディクレアラが代行する。したがって、ディクレアラは自分たちのハンドを見て、コントラクトを達成するためのプランをたてることができる。これに対して、ディフェン

ダ側は、ダミーのハンドは見えるが、ディクレアラはもちろん、パートナーのハンドも見えないのでプレイはより難しくなる²⁾。そこで、ディフェンダは自分のハンドに関する情報（あるいは自分の意図）を伝えるシグナルによりパートナーと協調をはかる。

現在のコンピュータブリッジでは、可能性のある多数の世界（ディーラー：4人のプレイヤーに配られたハンド）の各々で完全情報ゲームを解くことにより近似解を求めるモンテカルロシミュレーションが主流である³⁾。そこでは、ディクレアラのために用意したプレイのアルゴリズムをディフェンダにも適用することが多い。この手法では、自分のハンドは他のプレイヤーにも見えている（ベストプレイをする）と考えてカードを選択するので、自分のハンドに関する情報を伝えるシグナルを出す必然性がない。したがって、通常のアルゴリズムとは別に、特定の状況でシグナルを出すよ

[†] 富士通研究所

Fujitsu Laboratories Ltd.

^{††} 東京工科大学

Tokyo University of Technology

うな知識 (プログラム) を組み込む必要がある。

我々は、先に、ブリッジにおける各プレイヤーをエージェントとしてモデル化する方法を提案した^{4),5)}。このエージェントは、他のエージェントのハンドを推論するとともにそのエージェントから見た自分ハンドも推論し、これらのイメージに基づいて行動を決定する。本論文では、このモデルをシグナルに関する判断に応用する。探索を行うときに、自分から見た世界(ディール)だけを生成するのではなく、各プレイヤーに対応したエージェントから見た世界を生成し、これに従って行動を決定するアルゴリズムを提案する。そして、これがブリッジにおけるディフェンダのプレイにおいて有効であることを示す。

2. ディフェンスのシグナル

ディフェンスのシグナルには次の3種類がある⁶⁾。

(1) アティチュードシグナル

基本的には、ハイカードはそのスートの継続要求を示す。

(2) カウントシグナル

基本的には、ハイ・ローの順で出せばそのスートが偶数枚、ロー・ハイの順で出せば奇数枚であることを示す。

(3) スートプリファランスシグナル

基本的には、ハイカードはランクの高いスート、ローカードはランクの低いスートの選好を示す。

アティチュードシグナルを使うか、カウントシグナルを使うか、両方を使い分けるかなどを事前にパートナーと約束し、敵にもその約束を知らせておかなければならない。

コンピュータブリッジに組み込む立場で考えると、カウントシグナルの実装が他に比較して容易である。本論文では(2)のカウントシグナルの実装について述べる。

3. カードプレイのアルゴリズム

見えていないカードの可能な分布(世界)を多数生成し、各世界でダブルダミーブリッジ(4人のハンドを見たうえでのプレイ)のミニマックス値を求め、選ばれた候補の中から全体として良さそうな行動を選ぶ方法が何人かの研究者により提案された。GinsbergのGIBもこの方法をもちいている³⁾。

Ginsbergは、行動の候補の集合を M としたとき、次のようにして1つの行動(次に出すカード)を決定している。

[アルゴリズム1]

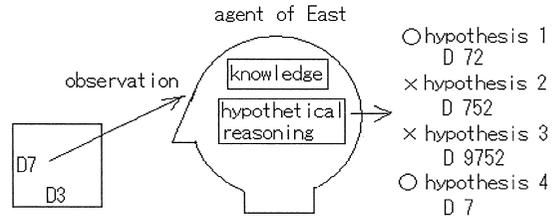


図1 エージェントによる推論
Fig.1 Reasoning by agent.

[ステップ1] それまでのビッドおよびプレイと矛盾しないようにカードをくばり、ディールの集合 D を作る。

[ステップ2] 各ディール $d \in D$ ごとに、各行動 $m \in M$ を選んだらどのような結果になるかダブルダミーで評価してスコア $s(m, d)$ を計算する。

[ステップ3] $\sum_d s(m, d)$ が最大となるような行動 m を選ぶ。

5章では、このアルゴリズムを基本としてカウントシグナルの解読プログラムを実装する方法と、それをもちいたディフェンダの協調についてのべる。6章では、このアルゴリズムの問題点を指摘し、カウントシグナルを出すべきかどうか自動的に判断するための新しいアルゴリズムについて提案する。

4. エージェントモデル

我々は各プレイヤーを知識と仮説推論機構を持つエージェントとしてモデル化した。ビッドに関する知識はビッドの決定とビッドしたプレイヤーのハンドを推論する両方の目的で使われる⁴⁾。プレイに関する知識は主にハンドの推論に使われる⁵⁾。本論文の実験においては、次章で示すカウントシグナルに関する知識(制約論理プログラム)を追加した(図1)。

エージェントは、それまでのビッドおよびプレイを観察し、それと矛盾しないような仮説として、ディールの集合 D を作ることができる。また、6節のアルゴリズムにおける他のエージェントから見たディールの集合も容易に生成できる。

5. シグナル

5.1 カウントシグナル解読の例

まず、カウントシグナルを解読して正しいプレイを選択する方法を例題で示す(文献7)より引用)。

[例題1] $2NT - 3NT$ というビッドの経過で South がディクレアラとして $3NT$ のコントラクトをプレイすることになった($2NT$ は 20 点-21 点を示す: A を 4 点, K を 3 点, Q を 2 点, J を 1 点と数え、ハン

S 96		Dealer: South
H 754		Vul: NS
D KQJT6		Bidding: South West North East
C 752		2NT Pass 3NT Pass
S J82	W N S	QT43
H KT863	W J2	H J2
D 72	E A84	D A84
C Q96	S	C JT43
	S AK75	
	H A99	
	D 953	
	C AK8	
	Play: West North East South	
	H6 H4 HJ HQ	
	D7 DK D4 D3	
	DQ ?	

図 2 例題 1

Fig. 2 Deal, bidding and play history of Example 1.

ド中の絵札の点数を合計した)。West のハートの 6 のリードに対して East で Jack を出したが、South の Queen にとられた。ディクレアラ (South) はダイヤモンドを出し North から King をプレイしたので、これをとらせたところ、ダイヤモンドの Queen を続けてきた。East は Ace でとるべきか (図 2)。

この例題では、South のダイヤモンドの枚数が 2 枚であれば Ace でとり、3 枚であればとらないのが正解である。

パートナーである West がカウントシグナルを実行した場合に、コンピュータブリッジ (エージェント) が行う推論について考察する。パートナーがハイ・ローと 2 枚のダイヤモンドを出した後は偶数枚であることは明らかであり、問題はない。難しいのは、パートナーが 1 枚目のダイヤモンドしか出していない時点での推論である。

5.2 カウントシグナル解読プログラム

我々は、制約論理プログラム言語 ECLIPSE⁸⁾ をもちいて、図 3 のようなカウントシグナル解読方法を実装した (以下は論理プログラム言語 Prolog を知っている読者のための説明である)。

1 行目は Player (West) が Suit (ダイヤモンド) の Rank (7) のカード ([d, 7]) を出した場合に、Deal が満たすべき制約条件を求めることを示す。ここで、Deal は 52 枚のカードが 4 人のプレイヤーに配られたかどうかを表す (52 × 4 =) 208 個の変数のリストである。各変数は、あるプレイヤーのあるカードに対応し、0 あるいは 1 の値域を持つ (1 は配られたこと、0 は配られなかったことを示す)。2 行目は、シグナルとしては、奇数であることを示す OddSignal または偶数であることを示す EvenSignal があることを示す。ECLIPSE において #\ 是、論理和を表すが、内部では、OddSignal, EvenSignal が 0 あるいは 1 の値域を持つ変数として定義され次のような制約条件が生成される。

$$\text{OddSignal} + \text{EvenSignal} \# \geq 1$$

```

1 read_signal (Player, [Suit, Rank], Deal) :-
2   OddSignal #\ EvenSignal,
3   OddSignal + EvenSignal #= 1,
4   (new_deal (Deal1),
5   hand_of (Player, Deal1, Hand1),
6   cards_of (Suit, Hand1, Cards1),
7   num_of (Cards1, Num1),
8   odd (Num1, NumIsOdd),
9   low (Rank, Cards1, RankIsLow),
10  EvenSignal #\ (NumIsOdd #/\ RankIsLow)
11  ;
12  OddSignal=0),
13  (new_deal (Deal2),
14  hand_of (Player, Deal2, Hand2),
15  cards_of (Suit, Hand2, Cards2),
16  num_of (Cards2, Num2),
17  even (Num2, NumIsEven),
18  high (Rank, Cards2, RankIsHigh),
19  OddSignal #\ (NumIsEven #/\ RankIsHigh)
20  ;
21  EvenSignal=0),
22  Deal1=Deal, Deal2=Deal.

```

図 3 シグナルを解読するプログラム (ECLIPSE 言語)
Fig. 3 ECLIPSE program to read a signal.

ただし、 $A \# \geq B$ は A が B 以上、 $A \# = B$ は A と B が等しいことを表す。3 行目では、実はそれらが排他的であることを示した。4 行目から 11 行目までは、ローカードにより奇数枚のシグナルを出さときの制約条件を生成している。ディールを表現する新しい 208 個の変数のリスト Deal1 を生成し、その中から Player (West) の Suit (ダイヤモンド) に対応する 13 個の変数のリスト Cards1 をとり出している。

$$\text{Cards1} = [\text{XA}, \text{XK}, \text{XQ}, \text{XJ}, \text{XT}, \text{X9}, \text{X8}, \text{X7}, \text{X6}, \text{X5}, \text{X4}, \text{X3}, \text{X2}]$$

とすると、7 行目では

$$\begin{aligned} \text{Num1} \# = & \text{XA} + \text{XK} + \text{XQ} + \text{XJ} + \text{XT} \\ & + \text{X9} + \text{X8} + \text{X7} + \text{X6} + \text{X5} \\ & + \text{X4} + \text{X3} + \text{X2} \end{aligned}$$

という制約条件で West のダイヤモンドの枚数を表す変数 Num1 を定義した。NumIsOdd は、Num1 が奇数であることを表す制約条件式で、具体的には次のように表現した。

$$(\text{Num1} \# \# 2, \text{Num1} \# \# 4, \text{Num1} \# \# 6, \text{Num1} \# \# 8, \text{Num1} \# \# 10, \text{Num1} \# \# 12)$$

ここで、 $A \# \# B$ は A と B が等しくないこと、 (A, B) は A と B の論理積を表す。RankIsLow は、出されたカードの Rank (7) がその Suit (ダイヤモンド) の最下位であることを表す制約条件式で、具体的には次のようになる。

$$\text{X6} + \text{X5} + \text{X4} + \text{X3} + \text{X2} \# = 0$$

10 行目は、「OddSignal ならば NumIsOdd かつ RankIsLow」であることを表現している。すなわち、一般に、 $A \rightarrow B$ を $(\text{not}A) \text{ or } B$ として表現でき、not

(OddSignal) は EvenSignal であることを利用した . 4 行目から 10 行目の間で矛盾が生じて失敗した場合には , 12 行目のように OddSignal である可能性がないことになる .

13 行目から 21 行目までは , 同様に , EvenSignal であるための制約条件を生成している .

$$\text{Cards2} = [YA, YK, YQ, YJ, YT, Y9, Y8, Y7, Y6, Y5, Y4, Y3, Y2]$$

とすると ,

$$\begin{aligned} \text{Num2\#} &= YA + YK + YQ + YJ + YT + Y9 \\ &+ Y8 + Y7 + Y6 + Y5 + Y4 + Y3 \\ &+ Y2 \end{aligned}$$

であり , NumIsEven は制約条件

(Num2## 1, Num2## 3, Num2## 5, Num2## 7, Num2## 9, Num2## 11, Num2## 13)

を表す . RankIsHigh は , 出されたカードの Rank (7) がその Suit (ダイヤモンド) の最下位ではないことを表し , 具体的には次のような制約条件式になる .

$$Y6 + Y5 + Y4 + Y3 + Y2\# \geq 1$$

19 行目は , 「 EvenSignal ならば NumIsEven かつ RankIsHigh 」であることを表現している .

22 行目では , 2 つの新しいディールとして生成した Deal1 と Deal2 という変数のリスト (Cards1 と Cards2 はその一部) が , 実は同じものであり , それまでのビッドおよびプレイとも矛盾しないものでなくてはならないことを示している (ビッドおよびプレイからの Deal に対する制約条件生成は read_signal の実行より前に行っている) .

5.3 カウントシグナル解読の実験

[例題 1 の実験]

ここでは , エージェントの推論機構に前記のシグナル解読プログラムを組み込み , 3 章のカードプレイアルゴリズムに従って , East のエージェントによるカード選択の実験を行った . 結果として正しい選択を行ったが , その過程は以下のように分析できる .

[ステップ 1] それまでのビッドおよびプレイと矛盾しないようにカードをくばり , ディールの集合 D を作る .

East の推論の結果に基づき (前記のプログラムをもちいて制約条件を生成し) 無作為に 50 個のディールを生成した . これを調べると , West のダイヤモンドが 2 枚の場合が 45 個 , 1 枚の場合が 5 個であった . 3 枚以上の可能性がないことは , シグナル解読プログラムが制約条件を生成し , 他のビッドやプレイから推論した制約条件と統合した段階で判明している . なぜならば , East のハンドおよびテーブル上のダイヤ

ンドを見れば , 所在が不明なカードは , 9 , 5 , 2 であり , 7 が奇数を示す (最下位) である可能性は 1 枚のときのみである . また , 7 が偶数シグナルで West が 4 枚と仮定すると , South のダイヤモンドが 1 枚となり , South が 2NT とオープニングビッド (各スートの枚数が極端に偏っていないことが必要条件になっているビッド) をしたことと矛盾する (図 1 にエージェントによる推論のイメージを示した) .

[ステップ 2] 各ディール $d \in D$ ごとに , 各行動 $m \in M$ を選んだらどのような結果になるかダブルダミーで評価してスコア $s(m, d)$ を計算する .

以下では , ステップ 1 で生成した 50 個のディールのうちの 8 個 (図 4) を例にして説明をする .

West のダイヤモンドが 2 枚 (South が 3 枚) の場合 , East が 3 回目のダイヤモンドをとれば , North の残りのダイヤモンドはとれなくなる . West が 1 枚ならば South は 4 枚あり , East のプレイによらず North のダイヤモンドは 4 枚とれる . そこで , ダブルダミーでプレイしたときのスコアは次のようになる .

$$\begin{aligned} s(DA, d_1) &= -630, & s(D8, d_1) &= 100, \\ s(DA, d_2) &= -630, & s(D8, d_2) &= 100, \\ s(DA, d_3) &= -630, & s(D8, d_3) &= 100, \\ s(DA, d_4) &= -630, & s(D8, d_4) &= 100, \\ s(DA, d_5) &= -630, & s(D8, d_5) &= 100, \\ s(DA, d_6) &= -660, & s(D8, d_6) &= -600, \\ s(DA, d_7) &= -660, & s(D8, d_7) &= -600, \\ s(DA, d_8) &= 100, & s(D8, d_8) &= 100 \end{aligned}$$

Ace でとらないとコントラクトを作られてしまう場合など , Ace を出した方がよいディールは 50 個中に 3 個あった . ディール d_8 のように South の他のスーツが弱いので (たとえばハートが KQ8) ダイヤモンドの Ace を出しても出さなくてもコントラクトができない場合が 9 個あった . また , どちらを出してもコントラクトを作られてしまう場合が 1 個あった .

[ステップ 3] $\sum_d s(m, d)$ が最大となるような行動 m を選ぶ .

図 4 の 8 個のディールを例に計算方法を示すと , $\sum_d s(DA, d)/8 = -546$, $\sum_d s(D8, d)/8 = -75$ となりダイヤモンドの 8 を出すことが選択される . 無作為に生成した 50 個のディールでは , $\sum_d s(DA, d)/50 = -549$, $\sum_d s(D8, d)/50 = -83$ となりダイヤモンドの 8 を出すことが選択される .

我々の試作プログラムは , ダイヤモンド Queen に 8 で負ける正しいプレイを選択した .

ちなみに , West がシグナルを出さなかったとして , East の推論結果に基づき 50 個のディールを生成する

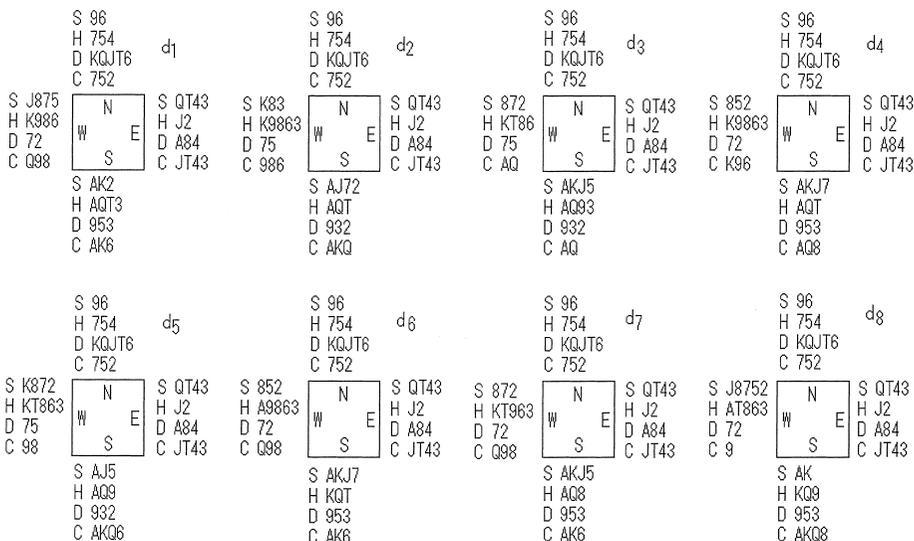


図 4 East から見たディールの集合
Fig. 4 A set of deals generated from standpoint of East.

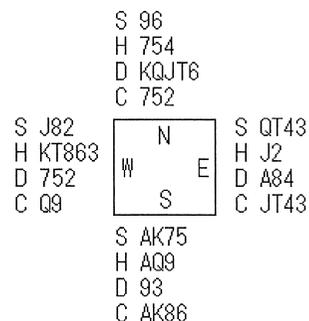


図 5 例題 1 の修正
Fig. 5 Modification of Example 1.

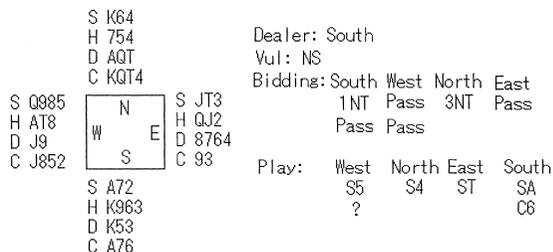


図 6 例題 2
Fig. 6 Deal, bidding and play history of Exemple 2.

と、West が 3 枚の場合が 30 個、2 枚の場合が 17 個、1 枚の場合が 3 個であった。したがって、シグナルをもちいずに 3 章のアルゴリズムを適用すれば、例題 1 に対して正解を出すことはできない。また、例題 1 のディールを図 5 のように変更し、West がダイヤモンドの 2 で奇数シグナルを出したときには、我々の試作プログラムの East は 2 回目のダイヤモンド (Queen) を Ace でとる正しいプレイをした。このとき East の推論結果に基づき 50 個のディールを生成すると、West が 3 枚の場合が 43 個、1 枚の場合が 7 個であった。

6. エージェントモデルに基づくアルゴリズム

6.1 カウントシグナルの発信

カウントシグナルをつねに発信することはコンピュータにとって比較的容易であるが、ディクレアラのプレイを助ける結果になることもある。

[例題 2] 図 6 に示すように、1NT-3NT というビッドの経過で South がディクレアラとして 3NT のコントラクトをプレイすることになった (1NT は 12 点-14 点)。West のスペードの 5 のリードに対して East で 10 (図中では T と表示) を出したが、South の Ace にとられた。ディクレアラ (South) はクラブの 6 を North の King に向かってプレイした。West はカウントシグナルを出すべきか。出さないのが正解である。しかし、3 章のアルゴリズムでは、例題 1 の場合はシグナルを出し、例題 2 の場合はシグナルを出さないような選択はできない。

6.2 アルゴリズムの提案

カウントシグナルを出すべきかどうか自律的に判断するためのアルゴリズムを提案する。

[アルゴリズム 2]

プレイヤー P がとりうる行動の候補の集合を M としたとき、次のようにして 1 つの行動 (次に出すカード) を決定する。

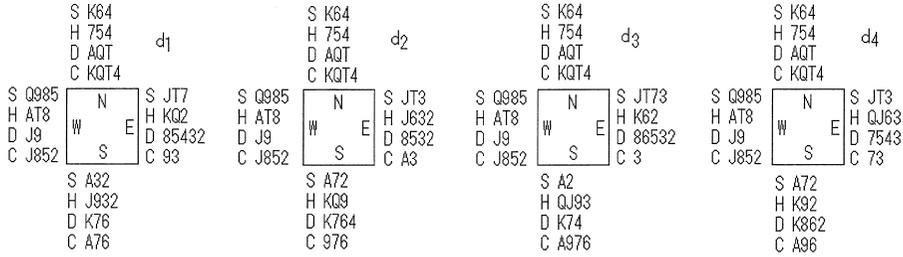


図 7 West から見たディールの集合

Fig. 7 A set of deals generated from standpoint of West.

[ステップ 1] それまでのビッドおよびプレイと矛盾しないようにカードをくばり、プレイヤー P から見たディールの集合 $D(P)$ を作る。

[ステップ 2] 各ディール $d \in D(P)$ ごとに、次の手順で、各行動 $m \in M$ を選んだらどのような結果になるか評価してスコア $s(m, d)$ を計算する。

[ステップ 2-1] 各ディール $d \in D(P)$ ごとに、それまでのビッドおよび m を含むプレイと矛盾しないようにカードをくばり、他の 2 人のプレイヤー A, B の立場から見たディールの集合 $D(A, m, d)$, $D(B, m, d)$ を作る。

[ステップ 2-2] 3 つのディール $d \in D(P)$, $d_a \in D(A, m, d)$, $d_b \in D(B, m, d)$ の組ごとに、行動 $m \in M$ を選んだ結果として得られるスコア $s(m, [d, d_a, d_b])$ をダブルダミーで計算する。ただし、プレイヤー P, A, B はそれぞれディール d, d_a, d_b を仮定して行動を選択するものとする。

[ステップ 2-3] 各ディール $d \in D(P)$ について $[d, d_a, d_b]$ のすべて (n 個) に対する平均値 $\sum s(m, [d, d_a, d_b]) / n$ を求め、これを $s(m, d)$ とする。

[ステップ 3] $\sum_a s(m, d)$ が最大となるような行動 m を選ぶ。

6.3 カウントシグナル発信の実験

例題 2 に、ここで提案したアルゴリズムを適用した場合には次のようになる。

[ステップ 1] West から見たディールの集合 $D(West)$ の例を図 7 に示す。

[ステップ 2] 各ディール $d \in D(West) = \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ ごとに、次の手順で、各行動 $m \in M = \{C8, C2\}$ を選んだらどのような結果になるか評価してスコア $s(m, d)$ を計算する (明らかに損をする SJ と、 $S8$ と同じ偶数シグナルにもちいる $S5$ は説明を簡単にするために省略した)。

[d_1 に関するステップ 2-1] まず、ディール $d_1 \in D(West)$ について、それまでのビッドおよび m を含むプレイと矛盾しないようにカードをくばり、他

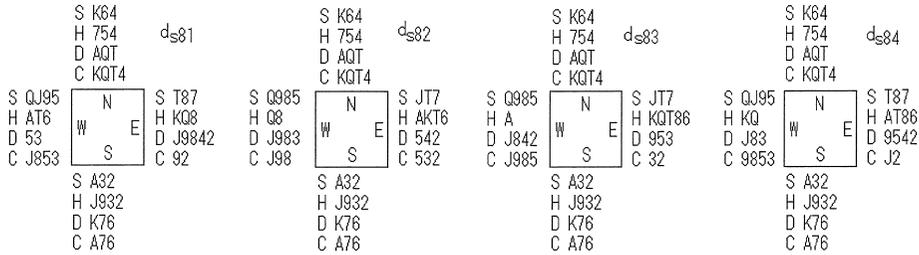
の 2 人のプレイヤーから見たディールを作る。South の立場から見たディールの集合 $D(South, C8, d_1)$, $D(South, C2, d_1)$ の例を図 8 に、East の立場から見たディールの集合 $D(East, C8, d_1)$, $D(East, C2, d_1)$ の例を図 9 に示す。

[$s(C8, [d_1, d_{s81}, d_{e81}])$ に関するステップ 2-2] 3 つのディール $d_1 \in D(West)$, $d_{s81} \in D(South, C8, d_1)$, $d_{e81} \in D(East, C8, d_1)$ について、行動 $C8 \in M$ を選んだ結果として得られるスコア $s(C8, [d_1, d_{s81}, d_{e81}])$ をダブルダミーで計算する。ただし、プレイヤー West, South (ダミーである North の代理を含む), East はそれぞれディール d_1, d_{s81}, d_{e81} を仮定して行動を選択するものとする。図 10 の左半面に示すように、West は d_1 における評価値 (図の 3 段の数値の上段) が最大になる行動を選択し、South は d_{s81} における評価値 (図の 3 段の数値の中段) が最小になる行動、East は d_{e81} における評価値 (図の 3 段の数値の下段) が最大になる行動を選択する。

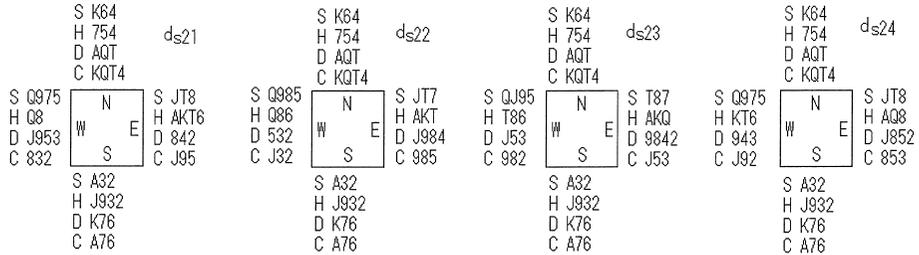
各状態 (節点) で選択権のあるプレイヤーは決まっているので、他のプレイヤーの評価値は選択された行動に従って自動的に決まってしまう。図 10 で $C8$ がプレイされた場合には、South は d_{s81} を仮定して CT のフィネスを選択し、 $s(C8, [d_1, d_{s81}, d_{e81}]) = -600$ となる。

[$s(C2, [d_1, d_{s21}, d_{e21}])$ に関するステップ 2-2] 同様に、3 つのディール $d_1 \in D(West)$, $d_{s21} \in D(South, C2, d_1)$, $d_{e21} \in D(East, C2, d_1)$ について、行動 $C2 \in M$ を選んだ結果として得られるスコア $s(C2, [d_1, d_{s21}, d_{e21}])$ をダブルダミーで計算する。図中の * は、そのディールにはありえない行動に対応し、評価値が定義されないことを示す。選択は定義された評価値の間でなされる。図 10 右半面に示すように、South は d_{s21} を仮定して CA, CK, CQ をとるので、 d_1 では West の CJ がとれ $s(C2, [d_1, d_{s21}, d_{e21}]) = 100$ となる。

[その他に関するステップ 2-2] 同様にして、いくつか

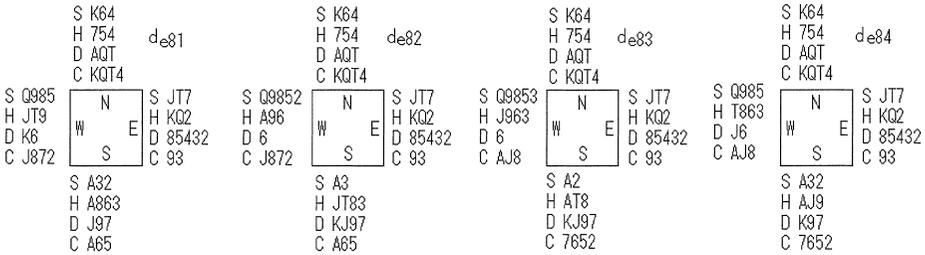


(a) Set $D(\text{South}, C8, d_1)$ generated after West played C8

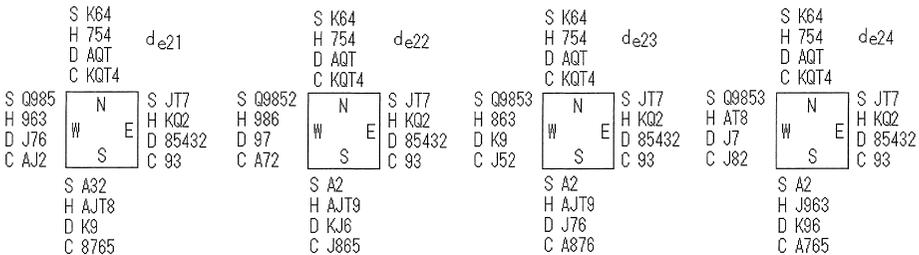


(b) Set $D(\text{South}, C2, d_1)$ generated after West played C2

図 8 South から見たディールの集合 . (a) West がクラブ 8 を出した後 , (b) West がクラブ 2 を出した後
 Fig. 8 Sets of deals generated from standpoint of South (South's hand is the same as that in the deal d_1).



(a) Set $D(\text{East}, C8, d_1)$ generated after West played C8



(b) Set $D(\text{East}, C2, d_1)$ generated after West played C2

図 9 East から見たディールの集合 . (a) West がクラブ 8 を出した後 , (b) West がクラブ 2 を出した後
 Fig. 9 Sets of deals generated from standpoint of East (East's hand is the same as that in the deal d_1).

の組合せについて評価する (図 11).

$$s(C8, [d_1, d_{s82}, d_{e82}]) = -600$$

$$s(C2, [d_1, d_{s22}, d_{e22}]) = -600$$

$$s(C8, [d_1, d_{s83}, d_{e83}]) = -600$$

$$s(C2, [d_1, d_{s23}, d_{e23}]) = 100$$

$$s(C8, [d_1, d_{s84}, d_{e84}]) = -600$$

$$s(C2, [d_1, d_{s24}, d_{e24}]) = -600$$

[d_1 に関するステップ 2-3]

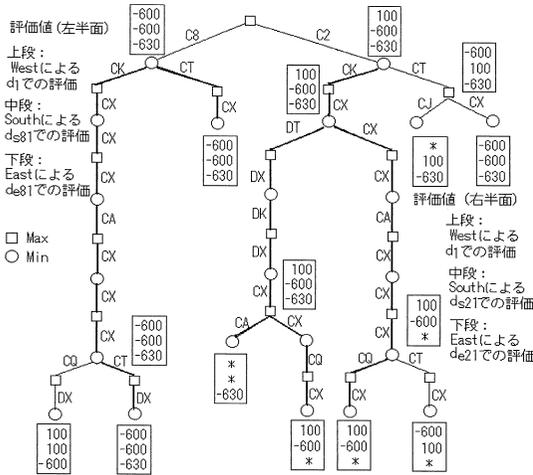


図 10 ゲーム木探索における評価
Fig. 10 An example of evaluation.

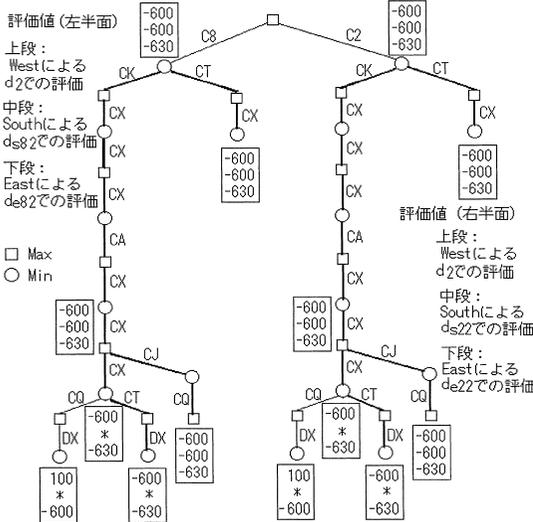


図 11 ゲーム木探索における評価の例
Fig. 11 Another example of evaluation.

$$\begin{aligned}
 s(C8, d_1) &= \{s(C8, [d_1, d_{s81}, d_{e81}]) \\
 &\quad + s(C8, [d_1, d_{s82}, d_{e82}]) \\
 &\quad + s(C8, [d_1, d_{s83}, d_{e83}]) \\
 &\quad + s(C8, [d_1, d_{s84}, d_{e84}])\}/4 \\
 &= (-600 - 600 - 600 - 600)/4 \\
 &= -600 \\
 s(C2, d_1) &= \{s(C2, [d_1, d_{s21}, d_{e21}]) \\
 &\quad + s(C2, [d_1, d_{s22}, d_{e22}]) \\
 &\quad + s(C2, [d_1, d_{s23}, d_{e23}]) \\
 &\quad + s(C2, [d_1, d_{s24}, d_{e24}])\}/4 \\
 &= (100 - 600 + 100 - 600)/4 \\
 &= -250
 \end{aligned}$$

[その他に関するステップ 2-3]

$$\begin{aligned}
 s(C8, d_2) &= (100 - 600 - 600 - 600)/4 = -425 \\
 s(C2, d_2) &= (100 + 100 - 600 + 100)/4 = -75 \\
 s(C8, d_3) &= (-600 - 600 - 600 - 600)/4 = -600 \\
 s(C2, d_3) &= (-600 - 600 - 600 - 600)/4 = -600 \\
 s(C8, d_4) &= (-630 - 630 - 630 - 630)/4 = -630 \\
 s(C2, d_4) &= (-600 + 100 + 100 - 600)/4 = -250
 \end{aligned}$$

[ステップ 3]

$$\begin{aligned}
 \sum_d s(C8, d) &= -600 - 425 - 600 - 630 = -2255 \\
 \sum_d s(C2, d) &= -250 - 75 - 600 - 250 = -1175
 \end{aligned}$$

よって C2 を出すことを選択することになる。

6.4 考 察

例題 2 において West が C2 を出すことは、結果的に敵である South と味方の East をだます (ディセプティブ) プレイを実行したことになる。この場合は、それによる敵の被害の方が大きいと評価されたわけである。例題 1 に提案したアルゴリズムを適用した場合には、West は正しいシグナルを出すことを選択する。それは、味方の利益の方が大きいと評価されるからである。例題 2 において、引き続き West が C2, North が CK を出したときの East のプレイはどうであるか。提案したアルゴリズムで評価した場合、騙されている East は C3 を選ぶという正しい結論を出せない (ディールのサンプルによって結果が安定しない)。ただし、West がシグナルを出していないかもしれないと仮定すれば、East も C3 を選ぶようになる。すなわち、同じトリックにおいて 4 人目のプレイヤーがシグナルを出すべきかどうか判断する場合には、2 人目のプレイヤーがシグナルを出していないと仮定してアルゴリズムを適用するのが実際的である (シグナル以外の選択については 2 人目のプレイヤーが正しいシグナル出していると考えて行動する)。

7. アルゴリズムの比較

元にしたプログラム A, カウントシグナル解読機能を実装したプログラム B, カウントシグナルを自律的に判断して発信する機能を実装したプログラム C の比較を行った。

7.1 プレイの比較

[実験 1] 文献 6) のカウントシグナルに関する例題 (本論文で対象外としたトランプやディスカード時のシグナル 8 題をのぞくすべて) について実験した結果を表 1 に示す。

A および B については、次の一手が正解である場

表 1 桜井恒夫⁶⁾の例題に対する実験結果

Table 1 Experimental results for problems by T. Sakurai.

Ex. No.	A:No Signal	B:Always	C:Sometimes	Note
70	x	○	○	SP
71	○	○	○	
72	○	○	○	
73	x	○	○	
74	x	x	x	SP
75	x	○	○	SP
76	x	x	○	SP
77	○	○	○	SP
78	○	○	○	
79	x	○	○	
80	x	x	○	SP
81	x	x	x (Result○)	SP
82	○	○	x (Result○)	SP
83	x	○	○	
84	○	○	○	
85	○	○	○	
86				Out of scope
87				Out of scope
88	○	○	○	
89	○	○	○	
90	x	x	○	
91	x	○	○	
92	x	○	○	
93	○	○	○	
94	x	x	○	
95	○	○	○	
96-101				Out of scope

合, 不正解の場合 x をつけた。C については (すべてカウントシグナルが有効な例なので) カウントシグナルを出すべきと判断した場合, 出すべきでないとして判断した場合 x とした。

この実験では, A が なのに B が x のものはなく, 逆に A が x なのに B が のもの 7 題 (約 3 分の 1) あり, カウントシグナルの解読によって, より正確に次の一手を選択できることが分かった。B が正解を得られなかった場合は 6 題あるが, そのうち 4 題は本プログラムには実装していないスーツプリファレンスシグナルがカウントシグナルの直後に出されている (備考欄に SP で示した) 例題なので, B の機能では正解を得ることが難しい。プログラム C は, 3 題でカウントシグナルを出さない方が良いと判断した。そのうち, 例題 74 はシグナルを出しても B が正解を出せなかった問題であり, スーツプリファレンスシグナルがないとパートナーのハンドが正しく推論できないと思われる。また, 例題 81, 82 はカウントシグナルを出さなかったが, パートナのプログラム B は次の一手に正解を出した。

[実験 2] カウントシグナルを出すべきでない場合の例題は文献にはほとんど見当たらない。ランダムに生成したハンドの中から我々が選んだいくつかの例題についてテストし, その範囲では合格した。付録に例題とテスト結果を示す。

表 2 ブルーリボン杯ハンドデータによる実験結果

Table 2 Experimental results for hand data of Blue Ribbon Cup.

Board No.	Contract	Points of X	Points of Y	Y-X	IMP of Y
Blue1-14	3N by W	-50	-400	-350	-8
15		-430	-400	30	1
16		-150	-180	-30	-1
18		-420	50	470	10
Blue2- 1	4H by S	-50	420	470	10
4	4S by E	100	200	100	3
10	3N by E	-660	-630	30	1
23	3N by S	660	630	-30	-1
25	3N by W	-690	-660	30	1
					Total 16

[実験 3] JCBL の 1990 年度のブルーリボン杯のハンドデータ (52 ボード) を使って, 自分はカウントシグナルを出さないが敵のカウントシグナルは解読するプログラムからなるチーム X と, カウントシグナルを出しパートナーのカウントシグナルを解読するプログラム Y の対戦をシュミレーションした。43 ボードは双方同じ結果であり, 表 2 に示した 9 ボードで異なる結果が出た。勝敗を左右するような点差が出たのは付録に示す 3 つの場合であった。Blue-1-14 (付録例題 5) では, シグナルを出さないチーム X, Blue-1-18 (付録例題 6) および Blue-2-1 (付録例題 7) では, シグナルを出すチーム Y が良い結果を得, 合計では Y の勝利に終わった。別途, カウントシグナルを自律的に判断して発信する機能を実装したプログラム C が上記 3 つの場合にどうするか実験した。Blue-1-14 では, クラブ 76 の 2 枚を 6 から出すことによりディクレアラの判断を誤らせることに成功した。Blue-2-1 では, クラブの枚数に関してシグナルを出すことを選択し, パートナが正しいディフェンスをすることを可能とした。Blue-1-18 は, 正しいシグナルを出せばよいハンドであったが, 両ディフェンダはスペード 843 から 8 を出し, スペード QJ75 から 5 を出すことを選択した。ところがこのうそのシグナルを信じたディフェンスも結果的に成功した。

7.2 計算時間

この実験に用いた試作プログラム A と B は Eclipse で実装し, アルファベータカットオフを用いている。次の一手の選択に数 10 秒かけた。カウントシグナル解読はゲーム木探索に比較すればほとんど時間がかからないので, A と B の実行時間はほぼ同じである。これに対して, プログラム C はシグナルを出すべきかどうかの判断に約 5 分かけた。これは提案したアルゴリズムには単純なアルファベータカットオフが適用できないためゲーム木探索に時間がかかるためである。

なお, 本アルゴリズムに適用できるカットオフは現在研究中であり, また, パーティションサーチをした

C 言語版，並列処理の適用⁹⁾ などにより実用化する予定である。

8. おわりに

コンピュータブリッジにカウントシグナルを実装する方法について述べた。制約論理プログラム言語をもちればカウントシグナルを理解するプログラムを比較的容易に作ることができる。シグナルを出すべき場合として，ディクレアラのリードに対する 2 人目と 4 人目，味方のリードに対する 3 人目を候補とした。そして，シグナルが味方の利益になるか敵の利益になるか評価して実行するアルゴリズムを提案した。

よく知られたモンテカルロシミュレーションによる方法を基本としたが，この方法で不完全情報ゲームをシミュレーションする場合の問題点は Frank¹⁾ により指摘されている。本論文では，自分から見た世界(ディーラー)だけを考えるのではなく，各プレイヤーから見た世界も対象として行動を決定すべきことを主張したかったので，基本手法の欠点はがまんし，本質的に異なる点のみを追加するという方針をとった。また，本論文では，カウントシグナルを出すべきかどうかを自律的に判断することを対象としたが，このアルゴリズムがより一般的な場合にも適用できることを念頭において設計した。我々は先にディセプティブプレイを可能にするために，2 人のプレイヤーから見たゲーム木の評価を提案した⁵⁾。本論文では，より一般的に(ダミー以外の)3 人のプレイヤーから見たゲーム木の評価を導入し，敵だけでなく味方とのコミュニケーションの効果を計算に入れた。

実際のハンドを用いたプログラムによる模擬試合の結果からも自律的な判断が有効であることが分かった。

当初，うそのシグナルに敵だけでなく味方もだまされて，最良手を逃すことが予想された。しかし，実験した範囲では，多くの場合シグナルのいかんによらず結果が決まった。そして，シグナルのいかんが勝敗を分ける場合に，本手法は味方が最良手を選ぶのを助ける(あるいは敵が最良手を選ぶのを妨げる)結果となった。

人間との試合でどの程度有効かはさらに研究を要する。現在，わずかな評価値のちがいでうそのシグナルを出す場合もあるが，パートナーとの信頼関係あるいは敵に対するディセプティブプレイの効果に関して検討したうえで，閾値の設計を行う必要がある。

謝辞 Eclipse の使用を許可して下さった Imperial College の PARC に感謝いたします。

参考文献

- 1) Frank, I.: *Search and planning under incomplete information: A study using Bridge card play*, Springer-Verlag in the Distinguished Dissertations Series (1998).
- 2) 上原貴夫：コンピュータブリッジ，人工知能学会誌，Vol.16, No.3, pp.385-392 (2001).
- 3) Ginsberg, M.L.: GIB: Steps toward an expert-level bridge-playing program, *IJCAI-99* (1999).
- 4) 安藤剛寿，小林紀之，上原貴夫：コンピュータブリッジのビッドにおける協調と競合，電子情報通信学会論文誌，Vol.J83-D-I, No.7, pp.759-769 (2000).
- 5) 小林紀之，上原貴夫：コンピュータブリッジによるディセプティブプレイ，情報処理学会論文誌，Vol.43, No.10, pp.3056-3063 (2002).
- 6) 桜井恒夫：ディフェンスのシグナルとカードプレイ，*エスアイビー・アクセス* (1998).
- 7) Bird, D. and Smith, M.: *Defensive Signaling*, Master Point Press, Toront (2001).
- 8) Eclipse. <http://www.icparc.ic.ac.uk/eclipse/>
- 9) 小田和友仁，上原貴夫：不完全情報ゲームにおける並列処理，情報処理学会ゲーム情報学研究会 (2003).
- 10) GIB. <http://www.gibware.com/>
- 11) MicroBridge. <http://www.threeweb.ad.jp/~mcbridge/>

付 録

A.1 自律的にシグナルを発信する実験

この実験では，本論文で提案した手法のプログラム C でディフェンダのシグナルを決定し，市販のコンピュータブリッジでディクレアラのプレイを行った。[例題 3] 図 12 に示すようにディクレアラの C6 に対して West が奇数枚なのに偶数のシグナルを出した。ディクレアラは North から K を出し，East も奇数枚なのに偶数のシグナルを出した。ここで，ディクレアラはダイヤモンドのフィネスをして結局ダウンした。

S AKQ6		S 52			
H 8		H KJT974			
D 9764		D J3			
C KT98		C A74			
S JT87		S 943			
H 62		H AQ53			
D K852		D AQT			
C J53		C Q62			

		Dealer: West			
		Vul: EW			
		Bidding: South	West	North	East
			Pass	1D	2H
			3NT	Pass	Pass
		Play:	West	North	East
			H6	H8	H9
			C6	<u>C5</u>	CK
					<u>C7</u>

図 12 例題 3

Fig. 12 Deal, bidding and play history of Example 3.

S AKQ6 H 8 D 9764 C KT98		Dealer: East Vul: EW Bidding: South West North East										
S JT87 H 62 D K852 C J53	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td></td><td>N</td><td></td></tr> <tr><td>W</td><td></td><td>E</td></tr> <tr><td></td><td>S</td><td></td></tr> </table>		N		W		E		S		S 52 H KJT974 D J3 C A74	1C 1H 1S 1NT Pass 3NT Pass Pass Pass
	N											
W		E										
	S											
S 943 H AQ53 D AQT C Q62		Play: West North East South H3 H7 H9 HJ D6 D5 DJ <u>D2</u> CK <u>C5</u> C9 <u>C6</u>										

図 13 例題 4

Fig. 13 Deal, bidding and play history of Example 4.

3NT by West		S QJT63 H Q952 D 4 C Q32		Dealer: East Vul: EW Bidding: South West North East										
S 84 H 7 D A9853 C KJT85	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td></td><td>N</td><td></td></tr> <tr><td>W</td><td></td><td>E</td></tr> <tr><td></td><td>S</td><td></td></tr> </table>		N		W		E		S		S A92 H AK643 D Q6 C A94	Pass 1NT Pass 1H Pass 3NT Pass 2NT Pass Pass Pass		
	N													
W		E												
	S													
S K75 H JT8 D KJT72 C 76		Play: North East South West SQ S2 S5 S4 S3 SA SK S8 C9 <u>C6</u> CK C2												

図 14 例題 5

Fig. 14 Deal, bidding and play history of Example 5.

4H by East		S QJ75 H 654 D 3 C Q8765		Dealer: East Vul: NS Bidding: South West North East										
S KT962 H T7 D 7542 C J3	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td></td><td>N</td><td></td></tr> <tr><td>W</td><td></td><td>E</td></tr> <tr><td></td><td>S</td><td></td></tr> </table>		N		W		E		S		S A H KQJ982 D AT8 C AT9	2D Pass Pass 1H Pass 4H Pass 3H Pass Pass Pass		
	N													
W		E												
	S													
S 843 H A3 D KQJ96 C K42		Play: South West North East DK D2 D3 DA <u>S8</u> S2 <u>S5</u> SA												

図 15 例題 6

Fig. 15 Deal, bidding and play history of Example 6.

4H by South		S A875 H A72 D QJ52 C T9		Dealer: North Vul: Neither Bidding: South West North East										
S JT6 H T95 D A943 C Q74	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td></td><td>N</td><td></td></tr> <tr><td>W</td><td></td><td>E</td></tr> <tr><td></td><td>S</td><td></td></tr> </table>		N		W		E		S		S Q93 H Q6 D KT86 C KJ83	1H Pass 1S Pass 2S Pass 3H Pass 4H Pass Pass Pass		
	N													
W		E												
	S													
S K42 H KJ843 D 7 C A652		Play: West North East South SJ S5 S3 SK C4 CT C8 C6												

図 16 例題 7

Fig. 16 Deal, bidding and play history of Example 7.

た．ここで，ディクレアラはクラブを続けずスペードを出して結局ダウンした．通常のシグナルを出した場合は，クラブを続けて 4 メイクした．

A.2 ブルーリボン杯

[例題 5] (図 14)

[例題 6] (図 15)

[例題 7] (図 16)

(平成 15 年 9 月 10 日受付)

(平成 16 年 4 月 5 日採録)



小林 紀之 (正会員)

1975 年生．1998 年東京工科大学工学部情報工学科卒業．2003 年同大学大学院博士後期課程満期退学．同年 (株)富士通研究所入社．現在に至る．ナレッジマネジメントの研究に従事．電子情報通信学会会員．



小田和友仁 (学生会員)

1979 年生．2002 年東京工科大学工学部情報工学科卒業の後，同大学大学院博士課程進学．2004 年現在，博士後期課程 1 年目にあたる．ゲームプログラミングを題材に並列処理の研究に従事．



上原 貴夫 (正会員)

1942 年生．1965 年早稲田大学理工学部電気通信学科卒業．1970 年同大学大学院博士課程修了．工学博士．同年 (株)富士通研究所入社．1994 年東京工科大学工学部情報工学科教授，2004 年同大学コンピュータサイエンス学部教授，現在に至る．その間，1977 年より 1 年間 Stanford 大学客員研究員．CAD，人工知能，ゲームプログラミング等の研究に従事．人工知能学会，電子情報通信学会，日本ソフトウェア科学会，日本コントラクトブリッジ連盟各会員．

通常のシグナル (C3) を出した場合は，North が CT を出し，クラブを続けて 4 メイクした．

[例題 4] 図 13 に示すようにディクレアラのダイヤモンドのフィネスに East は偶数枚なのに D2 を出し，CK に対して奇数枚なのに偶数のシグナルを出した．West もクラブが奇数枚なのに偶数のシグナルを出し