

Calculationをプレイするプログラムの評価関数と熟達者の方略との比較

小堀 聡[†] 藤井大輔[†] 中村 孝^{††}

[†]龍谷大学理工学部電子情報学科 ^{††}大阪産業大学工学部情報システム工学科

われわれは、Calculationというカードゲームを題材として、熟達に関する研究を行っている。これまでに収集された実験データを有害度というCalculationをプレイするプログラムの評価関数を用いて解析し、熟達者の方略の特徴を検討した。その結果、有害度は被験者の手の選択の良否を表しており、評価関数として有効であることや、有害度からみて熟達者の選んだ手は優れていることなどが分かった。また、評価関数と熟達者の方略との比較から、熟達者の手には局面全体の判断や長期的な方略が反映され、そのことが高い成功率に結びついていることや、プレイプログラムもそのような評価関数を用いることで成功率が向上することが分かった。

Evaluation Function of Calculation Playing Program and Human Expert Player's Strategy

SATOSHI KOBORI[†], DAISUKE FUJII[†] and TAKASHI NAKAMURA^{††}

[†] Department of Electronics and Informatics, Faculty of Science and Technology, Ryukoku University,
^{††} Department of Information and Systems Engineering, Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University

We have investigated about expertise using a solitaire named Calculation as a task in our study. We analyzed the experimental data of human subjects using an evaluation function of Calculation playing program, and examined a human expert player's strategy by comparison with novice players. As the results, we found that the evaluation function we employed was valid on the grounds that it expressed the goodness or badness of the moves subjects chose. Also we clarified the relation between the evaluation function and the characteristics of the expert player's strategy regarding the reasons of the higher success rate.

1. ま え が き

近年、認知科学の分野において熟達に関する研究が行われ、これまでの研究から、熟達者が速く正確な処理をすることや構造化された多くの知識を持っていることが確認され、さらに、熟達者の特徴や熟達を促す要因などの解明へと発展しつつある¹⁾。

本研究において取り上げているCalculationは、よく知られたトランプの一人遊びゲームであり、パズル型の思考と確率的な予測思考が結びついたゲーム²⁾である。人間の熟達者によるこのゲームの成功率は、場が4列の場合では95%以上であるとされる。

日本では、以前からCalculationをプレイするプログラムの作成が盛んで^{2)~4)}、人間の熟達者にかかなり近い成功率が達成されていたが、長らくそれを越えることはできていなかった。しかし、最近になって経験則を用いずにプレイする手法が提案され、成功率が約99%というプログラムが作成された⁵⁾。

一方、われわれは以前より、Calculationを題材として認知科学的研究を行ってきた。最近の研究では、プレイにおける場札の配置としてのチャンクに着目し、発話データなどから熟達者の方略の特徴を明らかにしてきた⁶⁾。しかし、チャンクと熟達者の方略の具体的な関係については、明らかにできていない。また、被験者（プレイヤー）の手の良否を定量的に評価する方法についても、まだ確立していなかった。

そこで今回の研究では、Calculationをプレイするプログラムの評価関数²⁾を用いて、手の評価を行い、方略を分析することを試みた。その評価関数は、

Calculationの特性を分析した「有害度」という概念を用いたものであるが、具体的なパラメータは、熟達者である提案者自身の経験則に基づくものであり、比較的高い成功率でのプレイを可能としている。

ここでは、これまでに収集された実験データを有害度という評価関数を用いて分析し、熟達者と初心者との比較などを行い、被験者の手の良否を定量的に表現し、評価関数と熟達者の方略との関係を明らかにすることを目的としている。

2. Calculationについて

2.1 Calculationの概要

Calculationはトランプの一人遊びゲームである。場が3列あるいは4列でプレイされるのが一般的であり、本研究では場が4列のものを対象としている。ルールの詳細については、付録で紹介する。

Calculationでは、よく切った山から取り出した札を、ある決められた順序のとおり台に出し、すべての札を出すことができれば成功である。しかし、直接台に出せない場合は、4つの場のどれかに置くことになる。場に置いた札はいずれ台に移すことになるが、一番上の札しか取り出せない。すなわち、この場への置き方が成否を決める鍵となる。

Calculationに関する一般的な解法は、いまだ確立されていない。個人による方略の違いが大きく、熟達者がプレイするとその成功率は95%以上にもなるが、初心者の場合はその成功率はほとんど0%に近い⁴⁾。このことは、Calculationというゲームは、繰り返しプレ

イすることで学習し、成功率も大きく改善されていくということを意味する。

2.2 Calculationに関する研究

Calculationをプレイするプログラムについては、情報処理学会プログラミングシンポジウムのGPCC (Games and Puzzles Competition on Computer) の問題としてこれまで何度か取り上げられ、日本では盛んに作成された。その結果の成功率については、文献5) にまとめられている。

それらのプログラムを大別すると、ルールベースによるものと評価関数を用いて局面評価を行うものがある。前者の代表例が文献3) で紹介されたものであり、簡単なルールで50%以上の成功率を達成している。その手法は、札を場に置く際に将来その札を移す台を、その札の出現した順序から確率を考慮して決定しておくところに特徴がある。われわれもこのプログラムの基本モデルとしての有効性を確認し、さらに、札を移す台の予定を柔軟に変更する改良を加えることで、成功率を62%弱から83%弱へと向上させることができることを明らかにした。一方、後者の代表例は文献2) で紹介されているものであるが、今回の研究で用いる有害度は、そのプログラムにおいて用いられている評価関数である。このプログラムにより、93%強という熟達者にかかなり近い成功率が達成されているが、詳細については後に説明する。

以上のように、これらのプログラムでは一定の成果が示されたが、いずれも経験則に基づくものであるがゆえの限界も指摘されている⁵⁾。すなわち、人間の作成したルールや評価関数を用いた手法は、成功率を上げる際に、ルールや評価関数を調節しつつ大量の試行錯誤を繰り返す必要がある。このため、4列の場合では熟達者に近いレベルまで達しながらも、それ以降の進歩は止まった状態になっている。それに対して、文献5) では、経験則を用いしないでプレイする手法が提案されている。これは、Calculationを単純化したゲームを考え、このゲームの全局面の成功率を完全探索で求めてテーブルを作成し、そのテーブルを用いてCalculationの局面における成功率を見積もる手法である。これにより、場が4列の場合では約99%という人間の熟達者を越える成功率が記録された。

一方、Calculationを題材とした認知科学的研究については、われわれが以前から行っており、それらの結果から以下のようなことを推察している⁶⁾。

- (1) 熟達者の問題解決の過程は、柔軟なチャンクの構成と認識のサイクルを中心としたものである。
- (2) 熟達者の方略の特徴はそのようなサイクルを可能とする知識に由来するものである。
- (3) 熟達者は、情報処理容量などに限界がある中で、手の選択の余地などのゲームの性質を利用して問

題を解決している。

しかしながら、熟達者の利用しているチャンクが方略と具体的にどのように関連し、内的に表現されているかについては、明らかにできていないし、それらをモデル化し、シミュレーションで検証することもできていない。

熟達に関する研究においては、熟達者の特徴を、下位技能の習熟、適切な問題解決のための知識の獲得、適切な評価基準の獲得、という3つの側面から検討していくことが提案されている¹⁾。このうちの適切な評価基準についていえば、Calculationでは手の良否を定量的に評価することが、被験者の方略を分析する上で特に重要であるといえる。なぜならば、場が4列の場合では、成功するための手の選択にはいくらかの余地があり、成功したからといって、すべての手が良かったとは限らないからである。

さらに、このような認知科学的研究の応用として、人間とコンピュータが協調してCalculationという問題を解決するシステムや人間がCalculationの解法を学習する過程をコンピュータが支援するシステムに関しても研究を行っている⁷⁾。人間がCalculationの解法を学習する過程では、不適切な手が含まれていても成功する場合があります。それが学習におけるノイズとなっている可能性もあるので、学習を支援するシステムにおいても、良否を定量的に評価することは重要である。

3. プレイプログラムの評価関数²⁾

3.1 有害度の概念

有害度という概念は、Calculationのゲームとしての特性、言い換えればゲームの「こつ」についての検討をもとにしている。それによると、以下のことがゲームをプレイする上での原則として挙げられている。

原則1：場札を将来どの台に移すか考えるべき。

原則2：先行札の上に後続札を積んではならない。

原則3：もつれは避けよ。

原則4：阻害度の高い場に、順位の高い札を載せるのはよくない。

原則5：阻害度の低い場、特に阻害度0の場をできるかぎり保持せよ。

ただし、ここで用いられている用語は次のように定義されている。

先行札：ある2つの札を将来同じ台に移すとき、先に台に移る方の札

後続札：ある2つの札を将来同じ台に移すとき、後に台に移る方の札

もつれ：ある2つの台に関して、場において、ある台の先行札の上にもう1つの台の後続札があり、もう1つの台の先行札の上にある台の後続札があるという状態

札の阻害度：その札の上に置くとともにつれを生じる札が山に何枚残っているかの枚数

場の阻害度：その場の天札（1番目の札）の阻害度

また、個々の札については、次の用語が用いられている。

コード：場札を将来どの台に移すかを1つ定めるとき、各場札について、額面の数字 g と行き先の台の番号 d の順序対が決まる。それをその場札のコードと呼び、 $g \rightarrow d$ で表す。

順位：額面 g の札は台の列の何枚目に載るかが台ごとに定まっている。コード $g \rightarrow d$ の札に対するその値をその札の順位と呼ぶ。

さて、阻害度が具体的に定義され、上記のような原則を守りながらプレイするとしても問題は残る。手札の取りうる4つのコードのそれぞれの阻害度と4つの場の阻害度の組み合わせから、どのコードと場を選択すべきかについては、理論的な考察がかなり難しいからである。そこで、それらの組み合わせに対して経験的に決定した有害度という評価関数を用いて、コードと場の選択処理を行うようにしている。

3.2 アルゴリズムの基本方針

Calculationをプレイするプログラムでは、以下のようなアルゴリズムの基本方針を採用している。

- (1) 手札を場に移すときには、将来どの台に移すかを確定してしまうことにする。
- (2) 手札が台に移せるときは、該当するコードの札が場になく限り、必ず移す。コードに従って台に移せる場札は直ちに台に移す。
- (3) すべての場札にコードが決まっているので、それをもとに、4つの場について場の阻害度を求め、手札のコードのつけ方4通りに対するコードの阻害度を求め、あらかじめ定めておいた有害度表に従って移すべき場と札のコードを決定する。すなわち、最も有害度が低い手を選択する。

3.3 阻害度と有害度の定義

コードを持つ札に対して、阻害度は次のように再帰的に定義されている。

- (1) コード $g \rightarrow d$ の後続札が場にあるとき、最も近い後続場札の阻害度に「（この両者の順位の差）-1」を加算したものを $g \rightarrow d$ の後続阻害度と定義する。後続札が場に出ていないときは、その札の後続札の枚数を後続阻害度と定義する。
- (2) コード $g \rightarrow d$ の場札が場の一番下にあるときは足元阻害度は0であると定義し、そうでないときはその札のすぐ下に置かれている札の阻害度を $g \rightarrow d$ の足元阻害度と定義する。
- (3) コード $g \rightarrow d$ の場札に対して、その後続阻害度と足元阻害度のうち、大きい方をその札の阻害度と呼ぶ。

ここで、最も近い後続場札とは、コード $g \rightarrow d$ の札が与えられたとき、その札の後続札で場にあるもののうち、一番順位の小さいもののことである。

また、有害度表は表1に示したとおりである。そして、この表から有害度を算出する際に用いる、場の阻害度と札の阻害度は上記の定義をもとにして、次のように算出されるが、場の阻害度には2つの定義が提案されている。

場の阻害度（定義1）：その場の天札の阻害度をいう。ただし、場が空のときは0とする。

場の阻害度（定義2）：その場の列により固定し、場 b （1, 2, 3, 4）の阻害度を $b-1$ とする。

札の阻害度：手札のコードの後続阻害度とする。

さらに、有害度の算出方法として次のような異なる定義が提案されている。

有害度（別定義）：手札がある場に置いたと仮定した場合の、4つの場の阻害度の和を、コードと場の組み合わせによる有害度に加算したものを、その組み合わせの有害度とする。

文献2)では、これらの定義を組み合わせた4つの方法で有害度を算出し、それに基づいてプログラムによるプレイを実行し、成功率を確認している。それらの方法とは、以下のとおりである。

方法1：場の阻害度を天札の阻害度として有害度を算出する。（成功率20%以下）

方法2：場の阻害度を固定して有害度を算出する。（成功率70%強）

方法3：方法1の有害度に4つの場の阻害度の和を加算する。（成功率70%弱）

方法4：方法2の有害度に4つの場の阻害度の和を加算する。（成功率約86%）

4. 解析の方法と結果

4.1 解析の方法

被験者がプレイした実験データについて、各局面において有害度を算出し、実際に選択された手の評価を行う。ただし、具体的には次の条件のもとで行うことになる。

表1 有害度表

		札の阻害度				
		0	1	2	3	4
場の阻害度	0	0	40	41	42	43
	1	41	1	15	25	30
	2	42	7	2	5	29
	3	43	8	6	3	27
	4	44	30	25	10	40

(1) 成功例に限定する

先に述べた局面の評価は、各局面においてすべてのコードが確定している状況においてしか行えない。しかし、ここで解析の対象とする記録データには、被験者が予定と考えたコードがすべて記録されているわけではないので、被験者の意図を直接解析することはできない。そこで、次のように仮定した上で、成功例に限定して評価を行うことにする。

仮定1：実際に場から台に移動させた際のコード（結果としてのコード）を、場に置いた時点でのコードとする。

(2) 手札を場に置く場合に限定する

Calculationのプレイにおいて、手を選択しなければならない局面は、手札を場に置く場合にどの場に置くかの選択以外に、手札が台に出せる場合に台に出すか場に置くかの選択と場札を台に移せる場合に移すかどうかの選択があり（それぞれ出せる台が複数ある場合も含む）、それぞれ成功への鍵として重要である。しかし、前述のプログラムのアルゴリズムにおいては、手札が台に出せる場合は、該当するコードの札が場がない限り必ず出すこととコードに従って台に移せる場札は直ちに移すことを原則とし、手札を場に置く場合にどの場に置くかの選択に最も重点を置いている。この考え方は、実際の人間によるプレイを考えた場合と考えられるので、ここでも手札を場に置く場合に限定して評価を行うことにする。

(3) 4つの算出方法を比較する

プレイプログラムによる成功率からみると、最も成功率が高い方法4が有害度として最も適切な値を算出するように思われるが、プレイプログラムによる成功率が高い有害度の算出方法が、被験者の手の評価にとっても適切であるかどうかは不明である。また、成功率と有害度の算出方法の関係について考察するためにも、前述の4つの方法で有害度を算出して手の評価を行うことにした。ただし、場の阻害度の定義2に関しては、多くの被験者が右端をK（札の阻害度が0の札）の置き場所として使うことが多いので、左右逆に固定する方法を用いることにした。すなわち、次のように定義する。

場の阻害度（定義2'）：その場の列により固定し、場bの阻害度を4-bとする。

さて、実際の評価値としては、以下の2つのものを用いることにした。

(a) 有害度

実際に被験者が選択した手の有害度の値であり、1回のプレイにおける平均値も算出する。

(b) 最小値との差異

選択可能な有害度の中の最小値と実際に被験者が選択した手の有害度の値との差異であり、同様に1回の

プレイにおける平均値も算出する。

最小値との差異を用いる理由は、次のような仮定に基づいている。

仮定2：有害度が適切な評価関数となっているなら、選択可能な有害度の最小値は最善手によって得られることになり、実際に被験者が選択した手の有害度の値との差異が小さいほど、よい手を選んでいることになる。

4.2 実験データ

ここでは、これまでの研究において収集した実験データのうち、1名の熟達者と12名の初心者データの解析の対象として用いることにした。その詳細は以下の通りである。

熟達者1名（大学講師I氏、男性、年齢32歳、

Calculationの成功率は自称95%以上。ただし、プレイ10回中、成功8回^{*}）

初心者12名（大学生、男性6名、女性6名、年齢21歳～23歳、Calculationについては未経験、被験者A～L。20回のプレイの後、熟達者と同じ山札データで10回プレイ。その10回中の成功回数は以下のとおり。A：0回、B：2回、C：4回、D：3回、E：4回、F：1回、G：2回、H：1回、I：3回、J：1回、K：2回、L：2回）

熟達者と初心者を比較するために、両者がプレイした10回のデータ（No.1～No.10）のうち、成功例（No.1、No.4～No.10）のみを用いることにした。

4.3 解析の結果

熟達者の成功例についての結果を表2に、熟達者と初心者の成功例の比較を表3に示した。

これらの表から次のことが分かった。

(1) 熟達者の成功例の間での比較

有害度と最小値との差異の両者に関して、初心者の成功者数が比較的多いNo.1とNo.4では、他の山札データの場合より概して値が大きい。

方法3および方法4では、有害度にあまり大きな差が見られないのに対して、最小値との差異には明確な差が見られる。

(2) 方法1および方法2での熟達者と初心者の比較

山札データNo.1以外では、熟達者の有害度は初心者に比べて小さく、成功者が少ない山札データ（No.5、No.6、No.7、No.9）では、熟達者と初心者の値の差は概して大きい。

熟達者の最小値との差異は、概して初心者に比べて小さく、成功者が少ない山札データ（No.5、No.6、No.7、No.9）では、特に方法2での熟達者と初心者の値の差が概して大きい。

^{*} 熟達者にしては成功率が低いように思えるが、これまでの実績からいって同氏は間違いなく熟達者である。実験の際に発話プロトコルを取ったことが影響したようだ。

(3) 方法3および方法4での熟達者と初心者の比較

有害度については、あまり大きな差が見られない。

最小値との差異については、方法3のNo.4以外では、概して熟達者の値は初心者に比べて小さく、成功者が少ない山札データ（No.5, No.6, No.7, No.9）では、熟達者と初心者の値の差が大きい。

5. 考 察

5.1 有害度についての考察

(1) 有害度の算出方法の比較

まず、4つの場の阻害度の和を加算する方法（方法3と方法4）を、それを行わない方法（方法1と方法2）と比べるならば、熟達者の成功例の間でも初心者との比較においても、有害度には差が現れにくくなるが、逆に最小値との差異の値の違いが明確になることが明らかになった。つまり、仮定2の考え方に基づくなら、4つの場の阻害度の和を加算することで、より明確に手の良否を表現できるようになり、評価関数としてより適切になったということになる。これは、現在の手札をそれぞれの場に置いたと仮定した場合を考慮し、局面全体の判断を評価に加えたことによる効果と考えられる。

次に、場の阻害度を固定して算出する方法（方法2と方法4）において、初心者に比べて熟達者での最小値との差異が小さい値を示していることは、同様に仮定2に基づくなら、熟達者と初心者の手の良否の違いを示していることになる。

しかしながら、これは場の阻害度を固定して算出する方法での「固定の方法」が、より熟達者の方略に適合していることを意味していると考えられる。なぜならば、定義2'の方法を用いると、場の右端に手札の阻害度が0の札（Kやそれに続くQ、Jなど）が集まり、阻害度0の状態が保持されるが、これは熟達者によく見られるプレイのモデルであるからである。

これを確認してみたところ、熟達者においては、1

つの例外を除き、すべて右端をKおよびそれに続く札のために用いていた。それに対して、初心者では、ほとんどの被験者がKを特定の場の列に集めることはしておらず、熟達者と同様に右端に集めていたのが被験者Dだけで、被験者Iは逆側の左端に集めていた。

そこで、固定の方法を左右逆にして、つまり、定義2の方法を用いて被験者Iと熟達者の有害度を算出してみたところ、表4に示すように、有害度および最小値との差異は、ともに被験者Iでは小さくなり、熟達者では大きくなった。したがって、場の阻害度を固定して算出する方法による有害度を評価関数に用いる場合は、その被験者の方略に適合したモデルによる方法を採用していないと、適切な数値を示さないことになるといえる。

一方、場の阻害度を天札の阻害度として有害度を算出する方法（方法1と方法3）では、柔軟に場の阻害度を算出しており、特定の方略との相性の良否は見られないと考えられる。

(2) 山札データの難易度と有害度の関係

まず、考察に当たって次のような仮定をおいた。

仮定3：多くの初心者が成功している山札データは難易度が低く、逆に成功者が少ないものは難易度が高い。

もし仮定3が正しいとすれば、初心者の成功者が少ない山札データにおいて、熟達者での有害度と最小値との差異が小さいということは、難易度が高い山札データにおいて、熟達者での有害度は相対的に低いということの意味し、仮定2から考えると熟達者の手の適切さを示すことになる。

逆に、多くの初心者が成功していて難易度が低いと考えられる山札データにおいて、熟達者での有害度や最小値との差異が比較的大きく、初心者との差が小さいということは、難易度の低い山札データでは成功に至る手の選択にいくらかの余地があることに関連して、次のような2つの理由が考えられる。

表2 熟達者の成功例の有害度および最小値との差異の平均値

データ 番号	方法1		方法2		方法3		方法4		初心者の 成功者数
	有害度	最小値との 差異	有害度	最小値との 差異	有害度	最小値との 差異	有害度	最小値との 差異	
1	27.1	11.6	24.7	18.3	34.6	7.9	26.0	14.8	5
4	22.5	11.9	19.3	14.8	31.8	15.2	21.7	14.9	6
5	17.3	12.3	12.8	11.2	34.1	4.3	20.9	9.7	4
6	13.9	11.0	9.0	8.2	34.4	3.9	21.1	8.3	3
7	13.8	11.6	10.9	10.1	34.4	3.9	22.1	7.8	2
8	16.0	12.2	15.3	13.0	35.1	5.5	23.5	11.3	0
9	21.0	10.7	18.3	13.6	32.9	6.1	21.3	9.4	4
10	14.4	10.5	10.0	7.4	33.7	7.1	22.0	9.1	0

表3 熟達者と初心者の成功例の有害度および最小値との差異の平均値の比較

データ番号 ／被験者		方法 1		方法 2		方法 3		方法 4	
		有害度	最小値との 差異	有害度	最小値との 差異	有害度	最小値との 差異	有害度	最小値との 差異
1	熟達者	27.1	11.6	24.7	18.3	34.6	7.9	26.0	14.8
	B	26.5	14.3	26.8	22.3	32.9	8.0	29.3	17.2
	C	25.9	11.9	23.3	18.2	32.5	8.6	26.0	18.2
	E	23.1	11.8	22.3	16.5	28.8	8.7	23.4	14.7
	G	20.9	12.0	25.1	21.7	33.0	5.5	28.8	17.1
	I	22.3	12.4	24.3	21.7	31.7	4.3	28.1	17.3
4	熟達者	22.5	11.9	19.3	14.8	31.8	15.2	21.7	14.9
	D	26.3	11.9	20.3	14.8	29.5	9.4	21.3	14.1
	E	27.3	14.5	25.1	18.1	34.0	12.3	26.1	17.7
	F	24.4	17.5	21.6	17.7	29.8	10.2	22.6	16.2
	H	28.5	15.9	25.8	20.2	33.3	14.4	27.4	17.8
	I	24.2	14.0	26.6	21.6	31.7	5.8	29.0	20.0
	J	23.8	9.7	24.4	17.8	30.6	8.2	28.6	19.1
5	熟達者	17.3	12.3	12.8	11.2	34.1	4.3	20.9	9.7
	C	24.4	15.5	23.1	20.1	33.6	6.0	26.2	13.4
	D	23.1	13.1	16.8	12.9	32.1	5.9	22.0	11.1
	G	27.2	14.7	24.7	21.4	32.8	6.9	26.3	15.7
	L	22.0	13.5	19.4	16.4	33.6	10.9	23.4	15.7
6	熟達者	13.9	11.0	9.0	8.2	34.4	3.9	21.1	8.3
	C	23.0	12.4	19.8	17.5	34.2	7.4	25.4	14.5
	E	19.9	14.5	21.7	18.8	32.3	9.3	26.8	18.3
	I	23.8	12.3	26.6	23.0	34.7	9.5	29.7	20.7
7	熟達者	13.8	11.6	10.9	10.1	34.4	3.9	22.1	7.8
	B	22.3	15.3	25.0	22.8	34.0	9.5	26.8	16.8
	K	22.1	11.8	19.1	16.7	32.8	7.9	24.1	16.4
9	熟達者	21.0	10.7	18.3	13.6	32.9	6.1	21.3	9.4
	C	28.1	12.6	26.8	20.0	33.5	9.3	30.0	19.7
	D	24.7	12.5	20.4	14.4	35.0	7.5	23.2	10.5
	K	25.6	11.1	28.7	22.3	33.3	7.2	30.9	19.1
	L	26.0	14.7	24.5	17.4	35.6	5.8	26.0	14.9

1つは、良好な手がいくつか選択できる場合に、それらの手のすべてに低い有害度が与えられていない可能性がある。つまり、手の良否が完全に有害度に反映されておらず、良好な手なのに有害度が大きくなってしまう場合が原因となる。（ただし、このことはプログラムによるブレイの成否とは別の問題であろう。）

また、もう1つは仮定1に関わる問題であるが、熟達者が場に置いた時点で想定していたコードとは異なるコードで場札が移された場合が多いという原因であ

る。その場合、場札が台に移された際のコードにより有害度が求められるので、値が大きくなってしまいう可能性がある。

以上の2つについて確認するためには、記録データや発話データを詳細に検討してみる必要がある。

難易度については定量的に評価する方法を見いだしていないので、これらの議論は仮定に基づくものに過ぎないが、逆に有害度により難易度を評価できる可能性もあるであろう。

表4 方法4とその左右逆の
有害度および最小値との差異の平均値の比較

データ番号 ／被験者		方法4		方法4（左右逆）	
		有害度	最小値と の差異	有害度	最小値と の差異
1	熟達者	26.0	14.8	30.1	18.9
	I	28.1	17.3	19.5	8.8
4	熟達者	21.7	14.9	26.2	19.4
	I	29.0	20.0	20.9	11.9
6	熟達者	21.1	8.3	31.7	18.9
	I	29.7	20.7	25.1	16.1

(3) 熟達者と初心者との比較

概して熟達者での有害度および最小値との差異は、初心者でのそれに比べて小さいことが明らかになった。このことは、仮定2を持ち出すまでもなく、熟達者の選んだ手が優れていることを示しているであろう。

一方、初心者は成功しているにも関わらず、有害度や最小値との差異の値が熟達者に比べて大きいことは、初心者の手には有害度の大きなものも含まれていることを示していると考えられる。Calculationというゲームの性質上、不適切な手がいくらか選択されていても、運次第では成功する場合もあるからである。

5.2 総合的な検討

(1) 評価関数としての有害度

先に考察したとおり、4つのうちのいずれの算出方法を用いるにしても、有害度は概して被験者の手の選択の良否を表しており、評価関数として有効であるといえる。このことは、阻害度や有害度という考え方が、Calculationというゲームの性質やそれに対して取るべき方略を詳細に分析した結果に基づくものであることによる。特に、阻害度を低い値で保持すべきだという考え方が重要な鍵となっていると考えられる。

しかしながら、有害度の数値自体は、プログラムがCalculationをプレイする際にコード（場札の行き先）と場の列を決めるために用いる相対的な数値にすぎず、経験則に基づいた主観的な数値であり、この数値を理論的に決定したり、評価したりする方法は提案されていない。

したがって、有害度をより適切な評価関数とするためには、パラメータ（有害度の数値）を何らかの方法で調整する必要がある。もしそれが実現できれば、Calculationをプレイするプログラムの成功率の向上にも貢献することになるであろう。

(2) 有害度による手の評価方法

被験者が有害度の低い、良好な手を選び続けられれば、全体として有害度の平均値は小さくなるはずである

が、1回のプレイ全体を平均した値ではあまり大きな違いが現れていない。このことは、山札データの並び方の影響もあり、各局面においてどの場に置いてもあり有害度の数値に違いがない場合がいくらか含まれているためと考えられる。また、阻害度の和を加えた有害度では、さらにプレイ間の違いが相対的に小さくなってしまっている。

そこで、仮定2として提案したとおり、選択可能な有害度の中の最小値と実際に被験者が選択した手の有害度の値との差異を用いると、明確な違いが見られるので、手の評価としてはより適当であるといえる。

また、先の考察結果から判断すると、有害度を算出する4つの方法の中では、場の阻害度を固定せず天札の阻害度を用いていることと4つの場の阻害度の和を加算することから考えて、方法3がより適切であると判断される。実際に、方法3での最小値との差異の数値は、熟達者も初心者も相対的に小さく、かつ、熟達者と初心者との違いが明確に示されている。

(3) 有害度の算出方法とプレイプログラムの成功率

文献2)で示された4つのプレイプログラムによる成功率の数値の大小は、被験者の手の良否の評価の適切さの比較結果とは一致せず、プレイプログラムの成功率が高い有害度の算出方法が、被験者の手の評価にとっても適切であるとは限らないことが示された。

このことは、Calculationのプレイを成功させるためには、局面ごとの手の評価関数として有害度が適切な値を示すことが必要なだけでなく、他にもプレイの成否を左右する要因があることによると考えられる。プレイプログラムの成功率が最も高かった方法4は、先に述べたとおり、場の列を使い分ける熟達者の方略のモデルになっており、このことが成功率の高さに関係しているといえる。すなわち、成功のためには局面ごとの手の評価に加えて（あるいは、手の評価を多少犠牲にしても）、場の列の使い分けのような、より長期的な方略が必要であることを示しており、方法4では、そのような方略がある程度有害度の算出に反映されていたと考えられる。

逆に、有害度の算出方法としては、場の阻害度を固定せず天札の阻害度を用いる方が、局面ごとの手に対しては柔軟な評価ができるといえる。

(4) 熟達者の方略のモデル化と有害度

これまでのわれわれの研究により、Calculationの熟達者の方略の特徴は、場札の配置としての柔軟なチャンクの構成と認識にあると推察している。それに対して、阻害度や有害度という考え方はチャンクという考え方となじまないが、阻害度を0に保持するような場への置き方を選択すれば、結果的にチャンクが構成されることになるだろうし、逆に、人間のプレイにおいてチャンクを構成する際には、局面によっては阻害度

に相当するものを意識している場合もあるであろう。

人間がCalculationをプレイする際の認知過程には、直観的な判断と論理的な分析があると考えられるが、有害度はこのうちの直観的な判断に対応するものとしてモデル化できる可能性があり、チャンクに基づくモデルが論理的な分析に対応するものとすれば、これら2つは相補的な関係にあるといえる。

熟達者において最小値との差異が比較的小さな値に保たれているのは、有害度というものに関してどのような認知過程が関連し、どのように方略に反映された結果なのかについては、発話データなどからさらに検討する必要がある。

6. むすび

本研究では、有害度というCalculationをプレイするプログラムの評価関数を用いて実験データを解析した。その結果として、評価関数と熟達者の方略との比較から、熟達者の手には局面全体の判断や長期的な方略が反映され、そのことが高い成功率に結びついていることや、プレイプログラムもそのような評価関数を用いることで成功率が向上することが分かった。

しかしながら、本研究では、手札を場に置いた場合にしか手の評価を行っていないので、手札を直接台に置いた場合や場札を台に移動させることができる場合にも手の評価を行わなければならない。また、各局面での個々の有害度について、発話データなどから検討する必要もある。

謝 辞 東海大学理学部花澤正純教授には、有害度の算出方法についての質問にお答えいただきました。また、有害度の算出のプログラムは龍谷大学理工学部4年阪田剛史君に卒業研究の一環として取り組んでもらいました。それぞれに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 波多野諄余編：認知心理学5 発達と学習，pp.11～36，東京大学出版会（1996）
- 2) 花澤正純：カリキュレーション（計算），bit別冊ゲームプログラミング，pp.109～117，共立出版社（1997）
- 3) SYSTEM5：計算について（続），数学セミナー，Vol.24，No.7，pp.53～57（1985）
- 4) 石畑 清：カルキュレーションのアルゴリズム，Computer Today，1993/9 No.57，pp.40～44（1993）
- 5) 田中哲朗：経験則を用いないカルキュレーションのプレイ，ゲームプログラミングワークショップ'99情報処理学会シンポジウム論文集，Vol.99，No.14，pp.76～83（1999）

- 6) S. Kobori, N. Yamakawa, D. Fujii, T. Nakamura: Chunks and Problem Solving Processes in an Expert's Play in a Card Game, Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Science, pp.669～672（1999）
- 7) 中村 孝，藤井大輔，小堀 聡：カードゲームにおける熟達支援システムの提案—熟達者の問題解決過程の分析から—，ゲームプログラミングワークショップ'99情報処理学会シンポジウム論文集，Vol.99，No.14，pp.97～100（1999）

付 録

Calculationのルールや名称にはいくつかの変種があるが、本研究で採用したものは以下のとおりである。

- ・ 1組52枚のトランプを用いる。ハートやスペードなどの区別はしない。したがって、A，2，3，…，Kがそれぞれ4枚ずつとなる。
- ・ 山札をよく切って1枚ずつ取り出して手札とし，下に示したような4列の台札の列を下から積み上げていき，完成させることが，このゲームのゴールである。
- ・ これらの数字の列は，左から順に1，2，3，4の倍数になっており，14以上は13で割った余りの数で代用している。それぞれの列では，一番下の数字から順番通りにしか置くことはできない。
- ・ これらの列をうまく完成させるために，場札の列を4列使うことができる。ただし，一番最後に置いた場札から順番にしか取り出すことはできない。
- ・ 取り出した手札は，台札の列の置ける場所に置くか，場札のいずれかの列に置くことができる。手札をどこかに置いた後で，次の手札を取り出す前なら，場札を台札の置ける場所へ移動させることができる。
- ・ 最終的に52枚の札をすべて台札の列に置くことができれば，成功ということになる。それ以外は失敗である。

K	K	K	K
Q	J	10	9
J	9	7	5
10	7	4	A
9	5	A	10
8	3	J	6
7	A	8	2
6	Q	5	J
5	10	2	7
4	8	Q	3
3	6	9	Q
2	4	6	8
A	2	3	4

台への出し方