ゲームの核

山本 時代，北 隼人，飯田 弘之

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

概要

ゲーム理論値の概念は，多くのゲームを同じ土俵で評価するという点で画期的である．しかし，プレイヤはゲームの結果だけではなく，過程によって，そのゲームの魅力を感じる．本稿では，先行研究である高貴な不確定性の概念からゲームの核という概念を提案する．また，提案したゲームの核をシミュレーションによって測る方法の模索として，セミランダムプレイによる4×4リバーシの自己対戦を行った．さらに，ゲームの核をはかる方法として，高貴な不確定性の概念に基づく自由度と与えられた自由度の割合を提案.

The Kernel of Games

Tokiyo Yamamoto, Hayato Kita and Hiroyuki Iida
School of Information Science, JAIST

Abstract

The concept of game-theoretical value is epoch-making at the point of evaluating many games in the same level. However, a game often attracts an interest to players with not only the result but also the process. This paper formulates a notion of the kernel of games from the concept of game refinement, stochastic uncertainty and noble uncertainty. We groped for a method of scaling the kernel of game, and performed 4x4-reversi with the semi-random self-play. Moreover, we assumed a relationship between the degree of freedom with each depth the semi-random ply.

1 はじめに

チェスや将棋のような一般的なゲームを想定した場合，プレイヤは強くなると実質的な選択肢は大いに減少する．例えば，将棋では平均選択肢は80前後と言われるが，プロ棋士であれば実質的な選択肢は高々2〜3くらいと予想される．

このことは，プレイヤが実際にゲームをしている探索空間は全体の探索空間に対して非常に小さなものであることを示唆する．その実質的な探索空間はゲームの種類に拠らず，長い歴史を経て洗練淘汰されてきたゲームではほぼ同じようなサイズ，性質ではないだろうかという直観的仮説が思い浮かぶ．

しかし，上述した実質的な探索空間を対象とした研究は皆無と言える．実質的な探索空間を示す概念として，先行研究[2]では高貴な不確定性という概念が提案されている。実質的な探索空間がほどよいサイズのゲームが魅力的であり，またそうなるようにゲームが進化してきたのではないかと予測される。

実質的な探索空間において，ほぼ同レベルのプレイヤ同士がシーソーゲームを行い，均衡状態[1]が終了間際まで継続するときゲームの遊戯性が高まる．このような性質は確定的なゲームだけでなく，ジャンケンのようなストカスティックなゲームでも同様であると考えられる[3]。

本稿では，以上のような研究の背景において，ゲームの核という新たな概念を提案し，ゲームの実質的な探索空間に関する諸性質を検討する最初の試みを提示する。特に，セミランダムプレイ[8]によるプレイヤのモデル化によって，実質的な探索空間を見積もるアプローチを紹介する。

2 確率的な不確定性と高貴な不確定性

2.1 確率的な不確定性

確率的な不確定性とは，ゲームの見かけ上の選択肢による不確定性である．ここで，飯田[2] による着手決定プロセスのモデルを引用する．

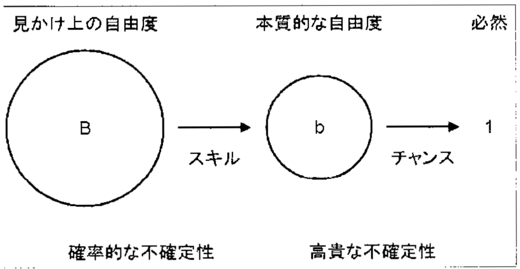

図1: 着手決定のプロセス: 確率的な不確定性と高貴な不確定性

図中の見かけ上の自由度とは，ルールによって算出されたすべての合法手の数である．完全に確率的なゲームでは，見かけ上の自由度と本質的な自由度は一致する．

2.2 高貴な不確定性

ゲームをするときプレイヤは与えられた候補から有望そうな手をいくつか選び，その中から着手すべき指し手1つを選択する．スキルの向上に伴って，一般に，有効そうな候補手の数は少なくなる．しかし，囲碁や将棋のような複雑なゲームでは，名人レベルのプレイヤでも有効そうな候補を常に1つに絞りきれない．これは，どの候補手にも長所と短所があるため，有効な候補手を絞ったとしても上限が存在するためである．

図1のモデルが意図することは，見かけ上の自由度（選択肢Bとせよ）から本質的な自由度（選択肢bとせよ）へとスキルによって候補手を絞ることができるが，本質的な自由度bから最後の1つをもはやスキルでは確信をもって絞りきれない．よって，厳選された見込みある複数候補手の中から1つの手を選ぶとき，チャンスの要素が出て

くる．しかしこのようなチャンスの要素は，スキルに全く依存しない確率的な不確定性と区別し，高貴な不確定性と呼ばれる．

プレイヤのレベルにより，本質的な自由度bの大きさは変化する．プレイヤのレベルに差がなければ，一般に本質的な自由度の大きさは同程度と考えられる．

3 ゲームの核

図1に示した本質的な自由度がプレイヤにとって本当の意味での自由度である。ただし，その中に最善手が含まれているとは限らない．本質的な自由度である，そのプレイヤのスキルによってこれ以上絞れないというというところまで選別され尽くした後で残る見込みある候補手の中から最終的に着手する指し手を決定するプロセスがゲームの醍醐味と言える．

見かけ上の自由度からスキルによって本質的な自由度までに絞るプロセス，そして，ある種のチャンス（それゆえ高貴な不確定性）によって本質的な自由度から着手を決定するプロセスの両方がゲームの面白さの要因であり，特にスキルとチャンスのバランスがゲームの面白さの根本要因である[2)]。

見かけ上の自由度が表面的なゲームであるとすれば，本質的な自由度が実質的なゲームと言える。本研究ではこの概念を「ゲームの核」と表現する。今後，できるだけ具体化して議論できるようにしたい。当然，プレイヤのスキルの違いによって本質的な自由度に差異が生じるので，ゲームの核を検討する場合，様々なレベルのプレイヤを考慮する必要がある．

本稿では，超初心者（ほぼランダムにプレイ）の自由度，および，名人（ほぼ完全プレイ）の自由度に焦点を当て，これら2つの自由度の差または割合によってゲームの核を見積もる方法を検討する．

4.1 ゲームの核のモデル

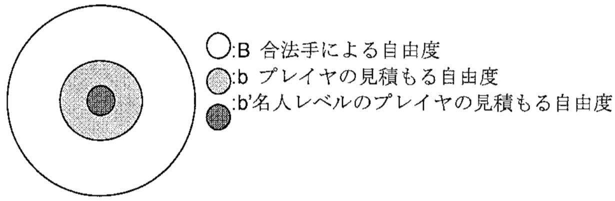

図2: ゲームの核のモデル

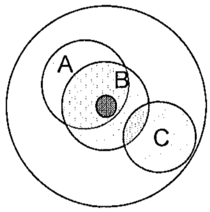

図3: プレイヤによる偏りの例

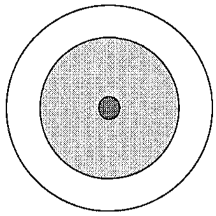

図4: b' が広い例

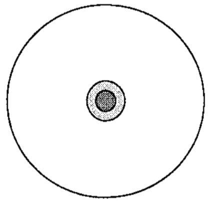

図5: bが狭い例

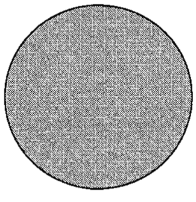

図6: bとBが一致する例

図2では，ゲームの核のモデルの例を示し

た．ここで，Bはルール上の合法手による自由度，bは名人レベルのプレイヤの見積もる自由度，b′は任意のプレイヤの見積もる自由度である．つまり,プレイヤが強ければ強いほどb’は小さくなりbに近づくことになる.また，このモデルでは，Bとbの中心は一致する．

図3では，同じゲームの同じ手番における自由度の絞り方がプレイヤによって異なることを示した．図中の円A，円B，円Cは，それぞれ異なるプレイヤの自由度を示す．図中の円Bの中心は，b’の中心と一致している．それに対し，円Aと円Cの中心はb’の中心とずれている．これは，プレイヤの候補手を絞る戦略のうち，図中の局面おける有効で無い戦略も含むなどの理由で，bに全体の中心が名人レベルの戦略とずれていることを示した．図3の円Aと円Cはそれぞれにずれているが，これにあたる．特に，円Cのようにプレイヤの戦略のずれが著しい場合には，bがb’を含まないケースが出てくる．

図4では，プレイヤの有効な候補手の見積もり具合が甘い例を示した．この場合，プレイヤが有効な手を選択する確率は低くなる．

弱いプレイヤでは，有望な手を選ばないことがある．このことを，図4を用いて説明すると,有効な手を有望であると判断しているが，他のあまり有効では無い手と同等に扱っている．このため，実際に有効な手を選ぶ確率が低くなってしまう．そして，図3の円Aは，戦略のずれによって，有効な候補手を選ぶ確率が低くなっている．円Cに至っては，戦略に著しいずれがあり，有効な手を見落としているため，有効な候補手が選ばれることも無くなる．

図5は，戦略の有効性が高く，ルール上の候補手からかなり厳選して候補を選ぶこのとのできるプレイヤの例である．

強いプレイヤは，図5のようにその局面での有望な候補手を効率よく見積もる．この場合，図4の例とは対照的に先読みの対象となる局面も少なくなり，深く探索ができると推測できる．

次に，ゲームにおける運の要素が，このモデルにおいてどのように表現できるか説明する．

図6では，単純な確率的な不確定性のみによるゲームを表現した．例えば，初めて会ったの人とジャンケンをするとき，グー，チョキ，パーのどの手を出せば勝てるかということは,普通は分からない．よって，どのプレイヤにおいても，有望である手は，ルールによって与えられた手と一致すると考えられる．つまり，bの大きさは，プレイヤのスキルだけではなく，ゲームの持つ運の要素によっても大きくなる．

5 ゲームの核とセミランダムプレイ

De Groot ら [4,5]は認知科学的な方法でチェス・プレイヤを対象として，本質的な自由度に相当する見込みある候補手の数を測定した．強いプレイヤの場合，見込みある候補手の数は平均 2 未満であると報告している．また，囲碁 [6] や将棋 [7]においても，アイカメラや発話プロトコル分析によって，アマチュアからトップクラスのプレイヤを対象に部分的な実験を行っている．

しかし,そのような手法には，コストの問題やプレイヤを確保することの難しさなどがあり，気軽にゲームの核を測るわけにはいかない．また，平安将棋のようにすでに絶滅してしまってもうプレイヤがいないゲームやアマゾンのような新しいゲームでは，強いプレイヤ自体が存在しないため，強いプレイヤのゲームの核を測ることはできない．そこで我々はセミランダムプレイと呼ばれる手法を用いたシミュレーションを提案する．セミランダムプレイについては 5.1 節で説明する．セミランダムプレイでは非常に強いプレイヤを作ることは難しいが，少なくとも強さの段階は作ることができ，実装の簡便さという利点がある．

5.1 セミランダムプレイ

セミランダムプレイは，梶原ら[8] によって提案された，探索の深さに基づくプレイヤのモデルである．セミランダムプレイでは評価関数を使用せず，各局面での着手は，以下の条件で決定される．

設定された深さまで探索を行う．

1. 探索結果から自分が勝つ可能性のある選択肢を見つけた場合，その選択肢の中の1つを着手とする．
2. 自分の勝つ手が無く，かつ，自分が負ける可能性のある選択肢を見つけた場合，それを防ぐ手を選択する．
3. 探索結果の中に勝つ手も負ける手も無ければ，合法手の中から1つをランダムに選択する．

1～3 の各条件で複数の手が存在する場合，ランダムに着手を選択する．

5.3 シミュレーションの方法

本節では，セミランダムプレイによる自由度をプレイヤの見積もる自由度b，つまり，ゲームの核と見立てて測定を行った．この手法では先読みの深さを強さの指標として用いる．先読みの深さがnのときのbのことをb_nと表現する．そして,b0，b4，b8，b12でのセミランダムプレイにおける自由度の値が同じ手数のとき，どれだけ違うかをみる．

また，実際の合法手全てBと比べ，どれだけb_nが小さくなるかというゲームの特性を示す指標としてb_n/Bの値も同時に示す．これは今後の課題であるが，b_nやb_n/Bの値によってゲームの特性を評価し，ゲームの分類を行うことも考えている．

5.2 4×4 リバーシ

4x4リバーシは縦横4 マスずつの盤を用いて2人でプレイする．使用する石は両面が白と黒になっており，先手プレイヤは黒い面，後手プレイヤは白い面で石を打つ．

リバーシでは，石を打つとき，縦・横・ななめ方向に相手色の石を自色で挟み，挟んだ石を自色に返すことができる．石を打つときは，1 枚でも返せるマスにしか打てない．打てるマスがない場合はパスとなり，パスの回数に制限はない．打つ場所が両者ともなくなった時点でゲーム終了となる．ゲーム終了時点で自色の多いプレイヤの勝ちとなる．

実験では，探索の深さを0，4，8，12，16 と変えて，セミランダムプレイによる4 × 4盤のリバーシの自己対戦を行った．このとき対戦するプレイヤの探索の深さは同じとした．自由度はセミランダムプレイのアルゴリズムにしたがって計測した．

また，明らかに直ぐにゲームが終わってしまうゲームを混ぜてしまうと過程を評価することに不都合であるため，残りマスが6つ以上あるものを初期局面として使用した．

5.3 実験の結果

実際にシミュレーションを行った例を4×4リバーシを題材に示す．また,使用した初期配置は図14に対応している．

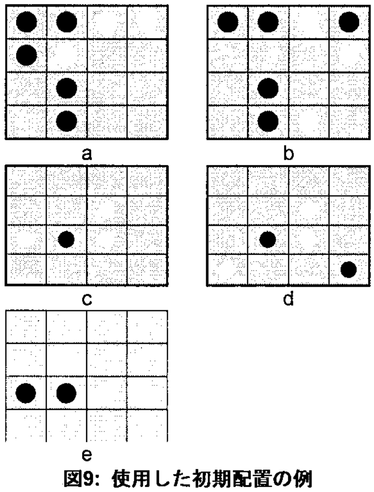

図9: 使用した初期配置の例

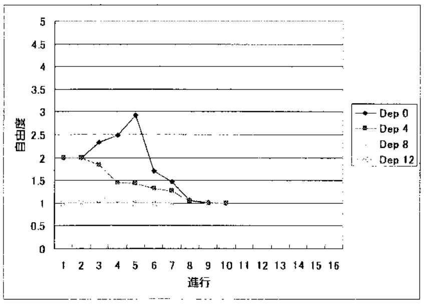

図10:初期配置aを使用した例

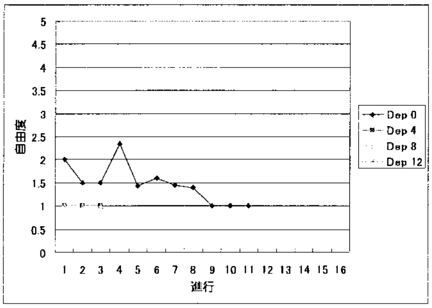

図11: 初期配置bを使用した例

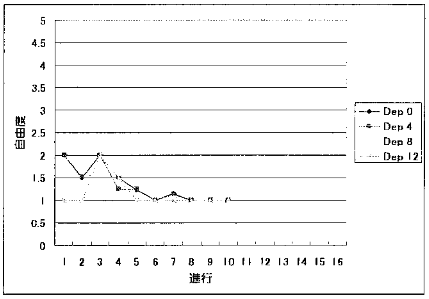

図12: 初期配置cを使用した例

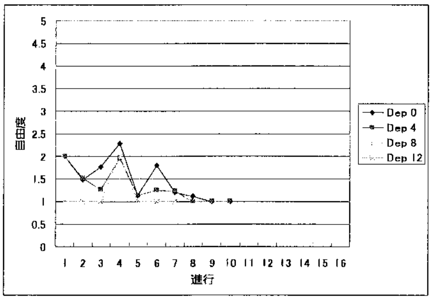

図13: 初期配置dを使用した例

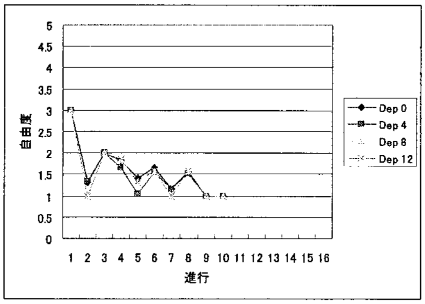

図14: 初期配置eを使用した例

表1: 各初期配置におけるb_{12}/B

図番号	b_{12}/B
10	0.799
11	0.678
12	0.858
13	0.772
14	0.960

5.4 実験の考察

各グラフにおいて,b_0よりb_i(i=4,8,12)が小さい値をとっていることが共通している.

しかし,図10では全体的にb_i(i=4,8,12)の値に差があるのに対して，図11のb_i(i=4,8,12)はほぼ同じ値をとっている.

また図10と図13の**b_{12} / B**の値はほぼ同じである．しかし，途中経過を比較すると，図13では決まった差し手がありそうであるのに対し，図10では終わりまでb_i(i=4,8,12)は，深さの大きい順に小さい値をとっており，単純なb_i(i=4,8,12)の差も大きそうである.

図12では,**b_{12} / B**の値が図10と同じくらい小さい．しかし，図12ではb_iの差は3手目以降ほとんど無い．この理由として，ゲームの長さが短いことが挙げられる．つまり，図12はゲームの長さが短い割には，b_iの変化が大きかったといえる．これは図13ではさらに顕著に現れ**b_{max} / B**の値は0.772となっている.

反対に図14では，各手番でのb_iの値に差はほとんど無く，**b_{max} / B**の値も1.0に近い値を示している.

また,チェスの平均自由度Bは約36と言われている．そして,認知科学的な方法における名人プレイヤのbは2以下であるという．するとb_{max} / Bの値は，0.033となる．このことから，多くのゲームでb_{max} / Bの値をとったとき0~1.0の間の広い範囲に分布することが期待できる．

しかし，4×4リバーシは，空きマスの数からも分かるように,ゲームの長さがとても短い．よって，長い手数のゲームについても同様の実験を行い，b_{max} / Bの値をはかり調査する必要がある．

また，チェスについてb_{max} / Bの値を測定できれば,セミランダムプレイがゲームの核を測定する方法として適切であるか判断ができることが推測できる．

6.まとめと今後の課題

本論文では，高貴な不確定性の概念に基づいてゲームの核という概念を提案した．すなわち，プレイヤの強さによって変わる本質的な自由度の概念である．このような概念を考慮することによってゲームの評価につながることを期待する．

また，ゲームの核を定量的に，かつ，簡便に測る方法としてセミランダムプレイによるシミュレーションを提案した．セミランダムプレイによって非常に強いプレイヤを作ることは難しいが，段階的な強さは表現可能であるし，プレイヤがなかなかいないようなマイナーなゲームについても評価可能であるところが利点である．

今後の課題としては，提案したシミュレーションによって様々なゲームを評価することが挙げられる．また，本論文で提案したセミランダムプレイによるシミュレーションの他の方法も模索したい．いずれにせよ，様々なゲームについてゲームの核を測定し，ゲームの核のサイズによるゲームの分類を目指す．

参考文献

1) 飯田：ゲームの均衡，情報処理学会ゲーム情報学研究会 研究報告書GI-12, pp.25-32 (2004).

2) 飯田：芸術心理学の新しいかたち，第2章 名人の心理，誠信書房(2005).

3) 柏木，飯田: ゲームの洗練法－ジャンケンを題材として，技術報告，情報処理学会ゲーム情報学研究会 研究報告書GI-10, pp.9-13 (2003).

4) A. D. de Groot: *thought and choice in chess,* Mouton Publishers (1965).

5) A. de Groot and F. Gobed: *Perception and Memory in Chess,* van Gorcum (1996).

6) Y. Sato and A. Yoshikawa: The Difference of Knowledge for Solving Tsume-Go Problem According to the Skill, Game Programming Workshop, pp.87-95 (1997).

7) 伊藤，松原，グリンベルゲン：将棋の認知科学的研究(1) -記憶実験からの考察-，情報処理学会誌， Vol.43, No.10, pp.2998–3011 (2002).

8) Y. Kajihara, M. Sakuta, and H. Iida: Semi-Random Play in Game Playing , Proceeding of JICAST '99, pp205-208 (1999).

9) 北，飯田: 先手の有利性と初期局面での自由度，ゲームプログラミングワークショップ2006, pp.183-186 (2006).