

Title	多数決合議チェスによるタイブレークの分析
Author(s)	長束, 薫
Citation	
Issue Date	2015-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/12656">http://hdl.handle.net/10119/12656</a>
Rights	
Description	Supervisor: 飯田弘之, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

# 多数決合議チェスにおけるタイブレークの分析

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科情報科学専攻

長 束 薫

2015 年 3 月

修士論文

# 多数決合議チェスにおけるタイブレークの分析

指導教員 飯田 弘之 教授

審査委員主査 飯田 弘之 教授

審査委員 池田 心 准教授

審査委員 白井 清昭 准教授

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科情報科学専攻

1310050 長束 薫

提出年月: 2015年2月

## 概要

コンピュータチェスの分野において1997年にDeep Blue<sup>®</sup>がGarry Kasparovを破ることで、コンピュータが人間を上回る実力を持つことを示した。コンピュータ将棋においても人間より強い将棋プログラムを作るために研究されつつものの、コンピュータが人間を上回る実力を持つとすることができなかった。しかし伊藤らは2009年の第19回コンピュータ将棋選手権において、合議制による将棋プログラム「文殊」が第3位という成績を残すことで、合議制プログラムの有用性を示した。さらに合議制システムを採用したあから2010が2010年に清水女流王将に勝利し、コンピュータの人間に対する勝利という目標に向けて大きな一歩を刻んだ。そこから合議制システムに関する研究がされつつある。

1985年にAlthöferは合議制の元となった手法である3-Hirnを提案した。そして3-Hirnとコンピュータとの対戦を行った結果、既存のチェスプログラムらと比べてElo ratingが約200高くなった。更にAlthöferは使用したチェスプログラムらに対して3-Hirnが勝率が高くなる一因として、人間と思考プログラムという異なる種類の強さを持ったものが、互いの弱さを補い合うことで強くなったためであると示している。

また佐藤らは合議システムの有用性を数学的モデルを用いて分析した。そして合議システムが有用であるための必要十分条件を提案した。しかしなぜ合議システムが有用であるかにおいて解明へのアプローチの提案はされているものの、解明はされていない。

そこで本研究では、合議システムの有用となっている一因を探求することを目的とし、まず合議システムのプログラムの数によって合議システムの性能にどう影響するのかという検証のため、単一プログラムに対する同一のグループプログラムの合議実験を行った。全プログラム数において合議システムが単一のプログラムに対して勝率は高かったものの、合議時で多数決で決まらない局面において、本来であれば予め決められているリーダーの手を指し手とするが、最多候補数が同数である手からランダムで選ぶ手法を提案した実験では、プログラム数によっては勝率が下がる傾向も見られた。本研究では、合議時の最多候補数が同数である局面をタイブレイクと名付け、タイブレイクに着目した。

単一プログラムに対する同一のグループプログラムの合議実験にて合議システムのタイブレイクを分析したところ、本研究では、タイブレイクが合議システムの有用となっている一因であると明言することはできない。しかし合議プログラムが単一プログラムに対して、勝利、引き分け、敗北した場合のタイブレイク時の評価値を分析したところ、合議システムが単一プログラムに対して勝利した場合、合議システムの評価値が正の値の時、比較的タイブレイクの頻度が多くなる、引き分けた場合、合議システムの評価値が0~200の時、比較的タイブレイクの頻度が多くなる、敗北した場合、合議システムの評価値が負の値の時、比較的タイブレイクの頻度が多くなることが分かった。つまり、合議システムが単一プログラムに対して優勢である場合は評価値も正の値の傾向があり、拮抗している場合は評価値も0付近の傾向があり、劣勢の場合は評価値も負の値の傾向がある。

これは、タイブレークが優勢、拮抗、劣勢のきっかけを示すターニングポイントになっているのではないかと考えた。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	論文の構成	2
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>3</b>
2.1	合議について	3
2.2	3-Hirn	3
2.3	多数決合議	3
2.3.1	多数決合議とは	3
2.3.2	多数決合議における分析	4
2.4	乱数合議	4
2.5	楽観的合議	5
<b>第3章</b>	<b>チェスにおける合議実験</b>	<b>6</b>
3.1	実験環境	6
3.2	単一プログラムに対するグループプログラムの単純多数決合議実験	7
3.2.1	目的	7
3.2.2	実験環境	7
3.2.3	実験結果と考察	8
3.3	単一プログラムに対するグループプログラムの提案合議実験	9
3.3.1	目的	9
3.3.2	実験環境	9
3.3.3	実験結果と考察	10
3.4	リーグ形式における合議実験	11
3.4.1	目的	11
3.4.2	実験環境	12
3.4.3	実験結果と考察	12
3.5	チェスにおける合議実験の考察	13
<b>第4章</b>	<b>タイブ레이크</b>	<b>15</b>
4.1	タイブ레이크とは	15
4.2	分析方法	15

4.3	分析結果 . . . . .	16
4.4	考察 . . . . .	28
第5章	まとめと今後の課題	30

# 目次

3.1	合議システムのプロトコル . . . . .	6
3.2	単体プログラムに対する単純合議システム $S_N$ の勝率 . . . . .	8
3.3	単体プログラムに対する提案合議システム $S_N$ の勝率 . . . . .	11
3.4	リーグ形式による対戦の各プログラムにおけるトータルスコア . . . . .	13
4.1	合議システム $S_N$ におけるタイブレーク率 . . . . .	16
4.2	合議システム $S_3$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	17
4.3	合議システム $S_4$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	17
4.4	合議システム $S_5$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	17
4.5	合議システム $S_6$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	18
4.6	合議システム $S_7$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	18
4.7	合議システム $S_8$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	18
4.8	合議システム $S_9$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	19
4.9	合議システム $S_{10}$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	19
4.10	合議システム $S_{11}$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	19
4.11	合議システム $S_{12}$ のタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	20
4.12	合議システム $S_3$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	20
4.13	合議システム $S_4$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	21
4.14	合議システム $S_5$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	21
4.15	合議システム $S_6$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	21
4.16	合議システム $S_7$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	22
4.17	合議システム $S_8$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	22
4.18	合議システム $S_9$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	22
4.19	合議システム $S_{10}$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	23
4.20	合議システム $S_{11}$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	23
4.21	合議システム $S_{12}$ の多数決時の評価値における頻度 . . . . .	23
4.22	合議システム $S_3$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	24
4.23	合議システム $S_4$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	24
4.24	合議システム $S_5$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	25
4.25	合議システム $S_6$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	25
4.26	合議システム $S_7$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	25
4.27	合議システム $S_8$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . . . .	26



4.28	合議システム $S_9$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . .	26
4.29	合議システム $S_{10}$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . .	26
4.30	合議システム $S_{11}$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . .	27
4.31	合議システム $S_{12}$ の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度 . . .	27

# 表 目 次

1.1	チェス, 将棋の状態空間, 探索空間 . . . . .	1
3.1	リーグ形式による各プログラム数の対戦結果 . . . . .	13

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景

コンピュータチェスの分野において1997年にDeep Blue<sup>®</sup>がGarry Kasparovを破ることで、コンピュータが人間を上回る実力を持つことを示した。コンピュータ将棋においても人間より強い将棋プログラムを作るために研究されつつものの、コンピュータが人間を上回る実力を持つとすることができなかつた。これは表1.1に示す通り、将棋の探索空間がチェスに比べて非常に大きいためである。

表 1.1: チェス, 将棋の状態空間, 探索空間

	状態空間	探索空間
チェス	$10^{47}$	$10^{123}$
将棋	$10^{71}$	$10^{226}$

松原ら [3] は将棋の状態空間, 探索空間が非常に大きい理由として, まず盤のサイズにおいてチェスが  $8 \times 8$  に対して, 将棋は  $9 \times 9$  である。つまり, 可能な着手の数が減っているためである。また将棋には盤上から取り除かれた駒を再利用できるルールがある。このルールにより, 終盤においても可能な着手の数が減少しない。

以上の理由のため, コンピュータの実力が人間を上回ることはできなかつた。しかし伊藤ら [11] は2009年の第19回コンピュータ将棋選手権において, 合議制による将棋プログラム「文殊」が第3位という成績を残すことで, 合議制プログラムの有用性を示した。さらに合議制システムを採用したあから2010が2010年に清水女流王将に勝利し, コンピュータの人間に対する勝利という目標に向けて大きな一歩を刻んだ [18]。そこから合議制システムに関する研究がされつつある。しかしなぜ合議システムが有用であるかにおいて解明へのアプローチの提案はされているものの, 解明はされていない。

本論文では合議システムの有用となっている一因を探求することを目的とする。そのために合議プログラムがなぜ有用であるかを検証するための先行実験として, 同一プログラムによる合議システムの実験を行い, その先行実験を通して多数決合議の有用性の一因となっている仮説について述べ, その仮説を実証するための分析実験を行う。そして分析実験を通して, 合議システムの有用となっている一因について述べる。

## 1.2 論文の構成

本論文の構成は以下のようになっている。

第2章では、関連研究について述べる。最初に合議に関する先行研究について述べる。次に将棋、チェスにおける本研究でも用いられている多数決合議に関する先行研究について述べる。最後に今まで行われてきた合議アルゴリズムの手法として提案されてきた乱数合議、楽観的合議に関する先行研究について述べる。

第3章では、まず合議実験全般に使用した合議プログラムの環境設定について述べる。次に合議プログラムがなぜ有用であるかを検証するための先行実験について述べる。最後に実験全般の考察を行う。

第4章では、まず先行実験を通して多数決合議の有用性の一因となっている仮説について述べる。そしてその仮説を実証するための分析実験について述べる。最後に実験全般の考察を行う。

第5章では、論文の総括と今後の課題について述べる。

## 第2章 関連研究

### 2.1 合議について

グループにおける優位性は1898年、Triplett[10]による実験から検証されつつある。Triplettは、あるタスクの処理において個人での作業効率と他人との競争での作業効率を比較する実験を行った。その結果、個人での作業効率よりも他人との競争での作業効率の方がより良くなることを発見した。

また、Shaw[6]は一通りの解しか持たないパズルゲームにおいて、個人の問題解決能力とグループとしての問題解決能力を比較する実験を行った。その結果、個人で問題解決を行う時の正答率よりもグループとして問題解決を行う時の正答率の方が高いことが分かった。以上の研究から、グループにおける優位性が立証された。

### 2.2 3-Hirn

1985年にAlthöfer[1]は3-Hirnを提案した。2つの独立したチェスプログラムから候補手を受け取り、ボスと呼ばれる人間が、受け取った候補手の中から指し手を決定するという手法であり、合議制の元となった手法である。3-Hirnではボスが候補手以外の指し手を選択することができないため、2つのチェスプログラムから同一の候補手を受け取った場合、その時点で指し手が決定される。AlthöferはElo ratingがそれぞれ1500である2つのチェスプログラムと自分自身(Elo rating:約1900)をボスとした3-Hirnとコンピュータとの対戦を行った。その結果、使用したチェスプログラムらと比べてElo ratingが約200高くなった。

Althöferは使用したチェスプログラムらに対して3-Hirnが勝率が高くなる一因として、人間と思考プログラムという異なる種類の強さを持ったものが、互いの弱さを補い合うことで強くなったためであると示している。

### 2.3 多数決合議

#### 2.3.1 多数決合議とは

多数決合議とは、複数の思考プログラムの多数決によって指し手を決定する手法である。ただし全てのプログラムにおいて最多候補数が同数の場合、多数決で指し手を決定す

ることができない。そこで予めリーダーとなるプログラムを決めておき、多数決で指し手を決定することができない場合はリーダーの候補手を指し手として決定する。埴ら [17] は、多数決合議を5五将棋で用いることで単体のプログラムよりも勝率が上がることを示した。また小幡ら [4] は、多数決合議を本将棋で用いることで単体のプログラムよりも勝率が上がることを示した。

### 2.3.2 多数決合議における分析

Spoerer ら [8] は Stockfish, TogaII, Bobcat の3つの異なるチェスプログラムによる実験が行われた。この実験では、合議側の3つのチェスプログラムの探索深さを変更し、更にリーダーは3つのチェスプログラムの中でも一番勝率の高い Stockfish を採用した。そして単体の Stockfish と対戦した結果、合議プログラムが有用であることが分かった。更に Spoerer らは合議側の3つのチェスプログラムの強さを等しくするほど、合議側の勝率が上がることを示唆した。また Spoerer ら [9] は同一のプログラムで構成された合議プログラムで単体のプログラムに対して、プログラム数が増えれば増えるほど勝率が上がることを示した。更に Spoerer らは単純多数決合議におけるリーダーの手以外のプログラムの手が次の手として選ばれる確率がプログラム数の大きい合議システムほど高くなり、リーダー以外の手以外の手が選ばれる確率と合議システムの勝率に関係があることを示唆した。

また曾根ら [16] は合議システムのプログラムらの手の別れ方を分析したところ、構成しているプログラム数が大きくなるにつれて、全一致と全不一致の手の別れ方をする確率が単調に低くなる。過半数の手の別れ方をする確率が増減を繰り返すが、全体としては、増加している。しかし同数の手の別れ方をする確率が増減を繰り返すが、全体としては、減少していることを発見した。一般的に全一致と全不一致の手の別れ方をする確率はプログラム数が多くなればなるほど低くなり、また過半数と同数の手の別れ方をする確率はプログラム数が多ければ多いほど、過半数の場合は増加し、同数の場合は減少することは直観的に考察することができるが証明することはできない。

また佐藤ら [5] は合議システムの有用性を数学的モデルを用いて分析した。そして合議システムが有用であるための必要十分条件を提案した。しかしなぜ合議システムが有用であるかにおいて解明へのアプローチの提案はされているものの、解明はされていない。

## 2.4 乱数合議

乱数合議は小幡ら [14] によって提案された手法である。合議を行うためには、異なる思考を持つプログラムが必要とされていた。彼らの研究では、様々なプログラムを合議させることが困難であったため、単一のプログラムの評価関数に乱数を与えることで、同一のプログラムにも関わらず、異なる形勢判断を持つプログラムが生成される。乱数を与える

ため単体プログラムとしては勝率が低くなるものの，合議させることにより勝率が高くなることを示した．

## 2.5 楽観的合議

楽観的合議は合議アルゴリズムの手法の1つとして2009年に杉山ら [15] によって提案された手法である．複数の思考プログラムによる候補手の局面評価値を比べ，最も評価値の高い候補手を指し手とする．ただし，局面評価値が最高であったプログラムの指し手が複数存在する場合，その中からランダムに手を選択する．杉山らは将棋において乱数合議によって生成された複数の Bonanza を用いて実験を行ったところ，オリジナルの Bonanza に対して，大きく勝ち越す結果となった．

また大森ら [12] はチェスにおいて乱数合議によって生成された複数の Crafty を用いて実験を行ったところ，合議側の勝率が最大で60%を超える結果を示した．

# 第3章 チェスにおける合議実験

## 3.1 実験環境

本実験では、岡根谷 [13] が実装した多数決合議実験用ツールを用いる。この多数決合議実験用ツールでは単一のコンピュータ上でプログラムが順に探索を行い、その結果を元に多数決合議を行う。コンピュータは以下のものを用いた。

- CPU: Intel ®Core™i7-2630QM CPU @ 2.00GHz
- メモリ: 8GB

また、本実験ではGUIアプリケーションである「Winboard4.7.3」 [7] を用いる。合議を行う際に通常のコンピュータプログラムを直接利用することができない。各プログラムに任意の局面を与えるると候補手のみを返し、各候補手から合議で次の手を決定し、GUIに送信する。対戦相手も同様のプロセスを行い次の手を返すと、その手が新しい局面として各プログラムに与える (図 3.1)。

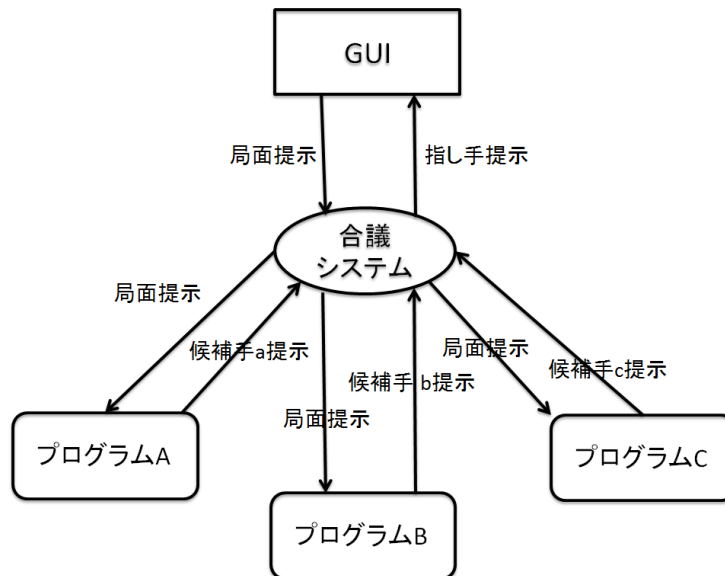


図 3.1: 合議システムのプロトコル



## 3.2 単一プログラムに対するグループプログラムの単純多数決合議実験

### 3.2.1 目的

伊藤 [11] は 2009 年の第 19 回コンピュータ将棋選手権において、単純多数決合議を用いた将棋プログラム「文殊」が第 3 位という成績を残し、単純多数決合議の有用性を示した。しかし、なぜ合議システムが有用であるかにおいては解明へのアプローチの提案はされていないものの、解明はされていない。そこでまず、合議システムのプログラムの数によって合議システムの性能にどう影響するのかという検証を行う。伊藤らによる合議システムのプログラムは乱数合議で生成された異なるプログラムであるものの、元々は同一のプログラムである。また Spoerer ら [9] は同一のプログラムで構成された合議プログラムにおいても有用であることを示している。本実験においても、合議システムのプログラムの数によって合議システムの性能にどう影響するのかという検証を行うため、同一のチェスプログラムから成る合議システムを用いた。

### 3.2.2 実験環境

本実験では「Stockfish-222-sse42-ja-intel」[2] のみのプログラムを用いる。Stockfish-222-sse42-ja-intel の Elo rating は 3163 で、十分に強いと言えるであろう。本実験では同一の Stockfish-222-sse42-ja-intel チェスプログラム  $N$  個から成る単純多数決合議システム  $S_N$  を実装する。その他の設定は以下の通りである。

- 合議システムの探索深さ: 全プログラムにおいて 11
- 合議システムの時間制限: 全プログラム合計で持ち時間 3 時間
- 対戦相手: Stockfish-222-sse42-ja-intel 単体
- 対戦相手の探索深さ : 11
- 対戦相手の時間制限: 持ち時間 3 時間
- 対戦回数: 1000 戦
- オープニングブック: Polyglot opening book を使用

またこの多数決合議は、埜ら [17] が提案した単純多数決を用いる。単純多数決の手順は以下の通りである。

1. 各プログラムによる候補手を得る
2. 各候補手の合計数を算出する
3. 全ての意見 (候補手) の中で最も多かった意見を選ぶ
4. 多数決で決定しない時, 同点の意見の中から予め決めたリーダーの意見を選ぶ

### 3.2.3 実験結果と考察

単体の Stockfish-222-sse42-ja-intel, つまり  $S_1$  に対する合議システム  $S_N (3 \leq n \leq 12)$  のそれぞれの勝率を以下の式で算出する.

$$winning\_rate = \frac{number\_of\_wins + (0.5 \times number\_of\_draws)}{number\_of\_games}$$

合議実験の結果は図 3.2 の通りである.

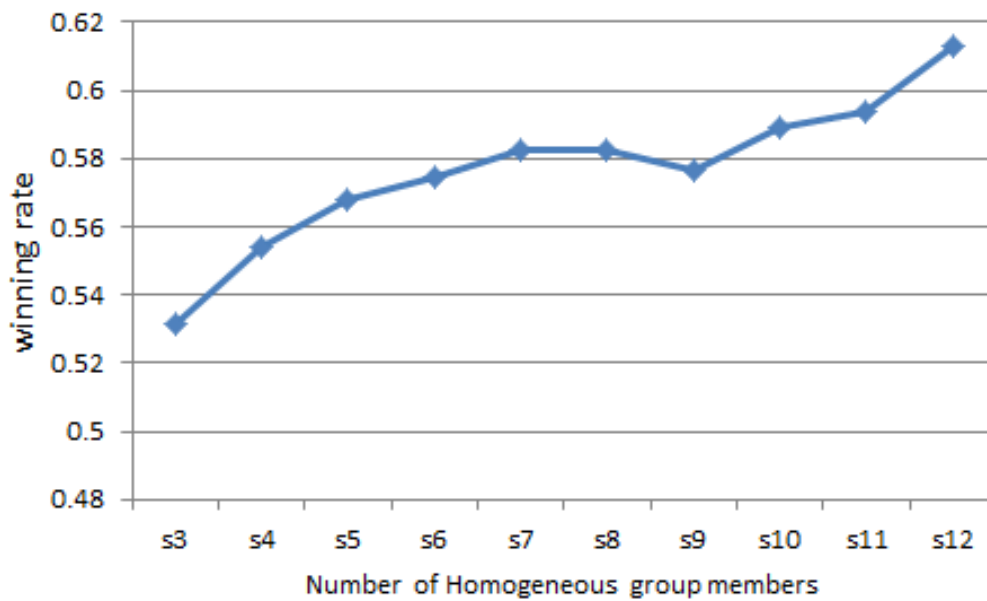


図 3.2: 単体プログラムに対する単純合議システム  $S_N$  の勝率

図 3.2 より，合議システムが構成している全てのプログラムの数において単体プログラムに対して勝ち越す結果となった．しかし曾根ら [16] の実験から，これらの結果は誤差の影響も考えられるため，合議システムが構成しているプログラムの数と勝率の関係に何らかの示唆することは出来ない．

### 3.3 単一プログラムに対するグループプログラムの提案合議実験

#### 3.3.1 目的

単一プログラムに対するグループプログラムの単純多数決合議実験では単純多数決合議を用いた．伊藤ら [11] は単純多数決合議の有用性を示した．しかし合議システムが有用であるかにおいては解明へのアプローチの提案はされているものの，解明はされていない．さて単純多数決合議の手順に以下のものがある．

#### 4. 多数決で決定しない時，同点の意見の中から予め決めたリーダーの意見を選ぶ

一般に，合議で意見が分かれた場合様々な手法で解決に導くであろう．例えば，意見が分かれた案の中で再投票を行う，意見が分かれた案の中で第三者がランダムに選ぶことで解決に導くであろう．そこでその手法の中でも意見が分かれた案の中で第三者がランダムに選ぶという手法を取り入れた多数決を用いて，単一プログラムに対するグループプログラムの提案合議実験を行う．つまり，多数決合議の手順を以下のように変更する．

#### 4. 多数決で決定しない時，同点の意見の中からランダムで選ぶ

また本実験においても，合議システムのプログラムの数によって合議システムの性能にどう影響するののかという検証を行うため，同一のチェスプログラムから成る合議システムを用いた．

#### 3.3.2 実験環境

本実験においても「Stockfish-222-sse42-ja-intel」 [2] のみのプログラムを用いる．また同一の Stockfish-222-sse42-ja-intel チェスプログラム  $N$  個から成る提案多数決合議システム  $S_N$  を用いる．その他の設定は以下の通りである．

- 合議システムの探索深さ: 全プログラムにおいて 11
- 合議システムの時間制限: 全プログラム合計で持ち時間 3 時間

- 対戦相手: Stockfish-222-sse42-ja-intel 単体
- 対戦相手の探索深さ : 11
- 対戦相手の時間制限: 持ち時間 3 時間
- 対戦回数: 1000 戦
- オープニングブック: Polyglot opening book を使用

またこの多数決合議は、以下の手順で行う。

1. 各プログラムによる候補手を得る
2. 各候補手の合計数を算出する
3. 全ての意見 (候補手) の中で最も多かった意見を選ぶ
4. 多数決で決定しない時、同点の意見の中からランダムで選ぶ

### 3.3.3 実験結果と考察

単体の Stockfish-222-sse42-ja-intel, つまり  $S_1$  に対する合議システム  $S_N (3 \leq n \leq 12)$  のそれぞれの勝率を単純多数決合議実験と同様の式で算出する。  
合議実験の結果は図 3.3 の通りである。

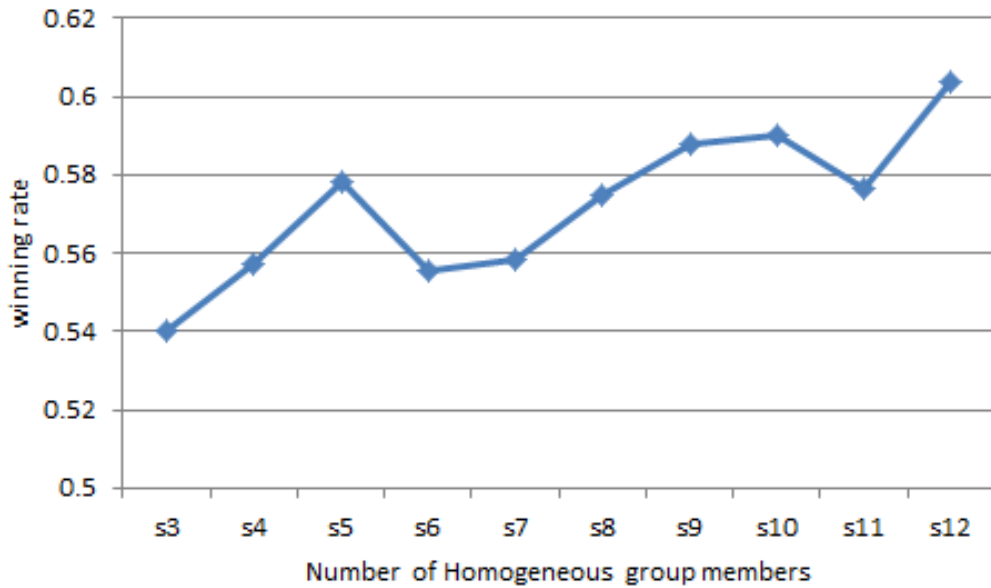


図 3.3: 単体プログラムに対する提案合議システム  $S_N$  の勝率

図 3.3 より，合議システムが構成している全てのプログラムの数において単体プログラムに対して勝ち越す結果となった．しかし曾根ら [16] の実験から，これらの結果は誤差の影響も考えられるため，合議システムが構成しているプログラムの数と勝率に何らかの関係を示唆することは出来ない．

単一プログラムに対するグループプログラムの単純合議実験，そして単一プログラムに対するグループプログラムの提案合議実験においてもプログラム数によって増減は繰り返すものの，全体としては勝率は高くなっていく傾向にある．しかし，これらの結果は誤差の影響も考えられるが，今回の合議実験において単純合議実験と比較して勝率が低くなっている箇所も見られる．しかしどちらの合議実験においても全体としては勝率が高くなっていく傾向にあるため，今回の合議実験と単純合議実験が同じ傾向にあると考察する．

## 3.4 リーグ形式における合議実験

### 3.4.1 目的

単一プログラムに対するグループプログラムの単純多数決合議実験，単一プログラムに対するグループプログラムの提案合議実験では，誤差の影響を考慮すると，合議システムが構成しているプログラムの数と勝率の関係に何らかの示唆をすることは出来なかった．そこで，単一のプログラムに対する合議実験ではなく，グループ同士の合議実験を行うことで，合議システムのプログラムの数によって合議システムの性能にどう影響するのかと

いう検証を行う。本実験においても、同一のチェスプログラムから成る合議システムを用いた。

### 3.4.2 実験環境

本実験においても「Stockfish-222-sse42-ja-intel」[2]のみのプログラムを用い、同一のStockfish-222-sse42-ja-intel チェスプログラム  $N$  個から成る単純多数決合議システム  $S_N$  を実装する。単純多数決合議実験と提案合議実験では、単純多数決合議システム  $S_N$  ( $3 \leq n \leq 12$ ) を用いたが、本実験では、メモリの関係上、単純多数決合議システム  $S_N$  ( $3 \leq n \leq 7$ ) を用いる。その他の設定は以下の通りである。

- 合議システムの探索深さ: 全プログラムにおいて 11
- 合議システムの時間制限: 全プログラム合計で持ち時間 3 時間
- 対戦相手: Stockfish-222-sse42-ja-intel チェスプログラム  $N$  個から成る単純多数決合議システム  $S_N$
- 対戦相手の探索深さ: 全プログラムにおいて 11
- 対戦相手の時間制限: 全プログラム合計で持ち時間 3 時間
- 対戦回数: 1000 戦 (先手, 後手 500 戦ずつ)
- オープニングブック: Polyglot opening book を使用

またこの多数決合議において、埜ら [17] が提案した単純多数決を用いる。

### 3.4.3 実験結果と考察

Stockfish-222-sse42-ja-intel チェスプログラム  $n$  個から成る単純多数決合議システムに対する合議システム  $S_n$  ( $3 \leq n \leq 7$ ) のそれぞれの勝率を単純多数決合議実験と同様の式で算出した。

合議実験の結果は次の通りである。

表 3.1: リーグ形式による各プログラム数の対戦結果

	$S_7$	$S_6$	$S_5$	$S_4$	$S_3$	$S_1$	Total
$S_7$		501	515	512.5	540.5	584	2653
$S_6$	499		519.5	512.5	539.5	572	2642.5
$S_5$	485	480.5		504	531	574.5	2575
$S_4$	487.5	487.5	496		517	568.5	2556.5
$S_3$	459.5	460.5	469	483		540.5	2412.5
$S_1$	416	428	425.5	431.5	459.5		2160.5

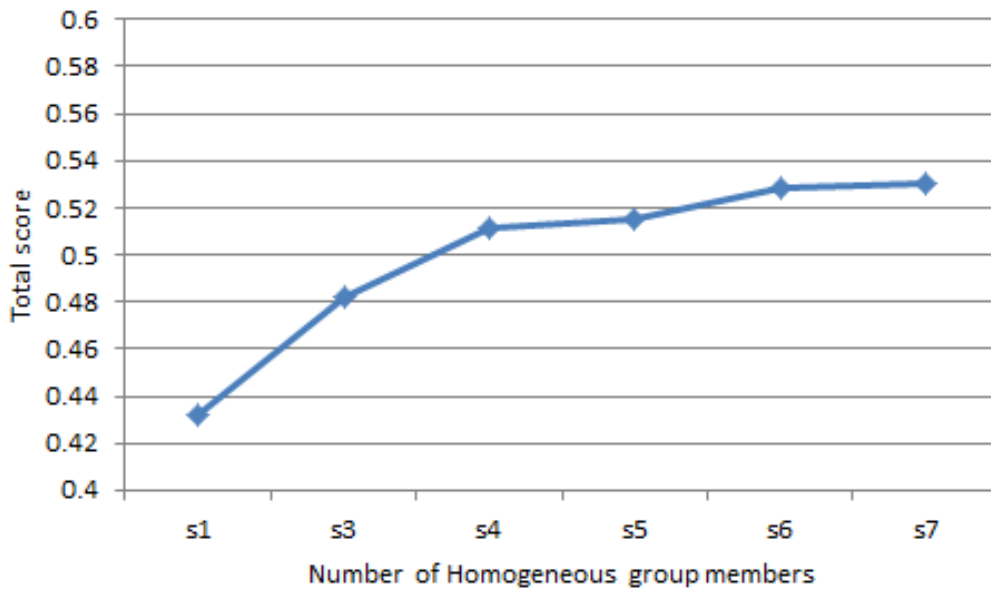


図 3.4: リーグ形式による対戦の各プログラムにおけるトータルスコア

表 3.1 から構成されているプログラム数がより大きい合議システムがプログラム数がより小さい合議システムに対して勝ち越す結果となっている。また図 3.4 では、表 3.1 の各プログラム数におけるトータルスコアから全試合数である 5000 で割った値をトータルスコアとした結果である。これらから、プログラム数が大きい合議システムほどプログラム数が小さい合議システムに対して勝ち越す結果となっているのが分かる。

### 3.5 チェスにおける合議実験の考察

単純多数決合議実験，提案合議実験，そしてリーグ形式における合議実験においてプログラム数の大きい合議システムはプログラム数の小さい合議システムに対して勝率が高い傾向にあることが分かる。しかし，提案合議実験では全プログラム数において合議シス

テムが単一のプログラムに対して勝率は高かったものの、プログラム数によっては勝率が下がる傾向が見られた。誤差の影響を考慮しても、勝率が下がっている箇所が多く見られる。そこで単純多数決合議と提案合議との唯一異なる点である合議時の最多候補数が同数の手の別れ方をする局面に着目する。



## 第4章 タイブ레이크

### 4.1 タイブ레이크とは

本研究において、単純多数決合議時のプログラムの手の別れ方が多数決でない局面を「タイブ레이크」と定義する。例えば、構成されているプログラム数が4つの場合、プログラムの手の別れ方は(4), (3,1), (2,2), (2,1,1), (1,1,1,1)となる。(4), (3,1), (2,1,1)は多数決で決められる場合であるが、(2,2), (1,1,1,1)は最多候補数が同数であるため、指し手を一つに決めることができない。そこで単純多数決合議実験とリーグ形式における合議実験では、最多候補数が同数の場合はあらかじめ決定されているリーダーの手を指し手としていた。また提案合議実験では、最多候補数が同数の場合はランダムで指し手を決定していた。その結果、全ての実験においてプログラム数の大きい合議システムはプログラム数の小さい合議システムに対して勝率が高い傾向にある。しかし、提案合議実験では全プログラム数において合議システムが単一のプログラムに対して勝率は高かったものの、プログラム数によっては勝率が下がる傾向が見られた。そこで単純多数決合議と提案合議との唯一異なる点である合議時の最多候補数が同数の手の別れ方をする局面の数が合議システムの有用性の一因になっているのではないかと考察する。そこで単純多数決合議実験においてタイブ레이크の数を集計する。

### 4.2 分析方法

単純多数決合議実験において、合議システム内のプログラムの投票時で、タイブ레이크の手を集計し、全試合におけるタイブ레이크率を下式の通りに算出する。

$$tiebreak\_rate = \frac{number\_of\_tiebreak}{number\_of\_moves}$$

次に単純多数決合議実験において、タイブ레이크発生時の全プログラムにおける平均評価値を集計する。これは合議システムがどういう局面評価値の時に、タイブ레이크が起こり得るのかを調べるためである。

また単純多数決合議実験において、多数決時の全プログラムにおける平均評価値を集計する。これはタイブ레이크以外の局面での評価値の推移を調べるためである。

そして単純多数決合議実験において、合議システムが勝利、引き分け、敗北した場合のタイブ레이크時の評価値を集計する。これは合議システムが勝利、引き分け、敗北した場合におけるタイブ레이크時の評価値の推移を調べるためである。

### 4.3 分析結果

単一プログラムに対するグループプログラムの単純多数決合議実験における合議システムのタイブレイク率を図 4.1 に示す.

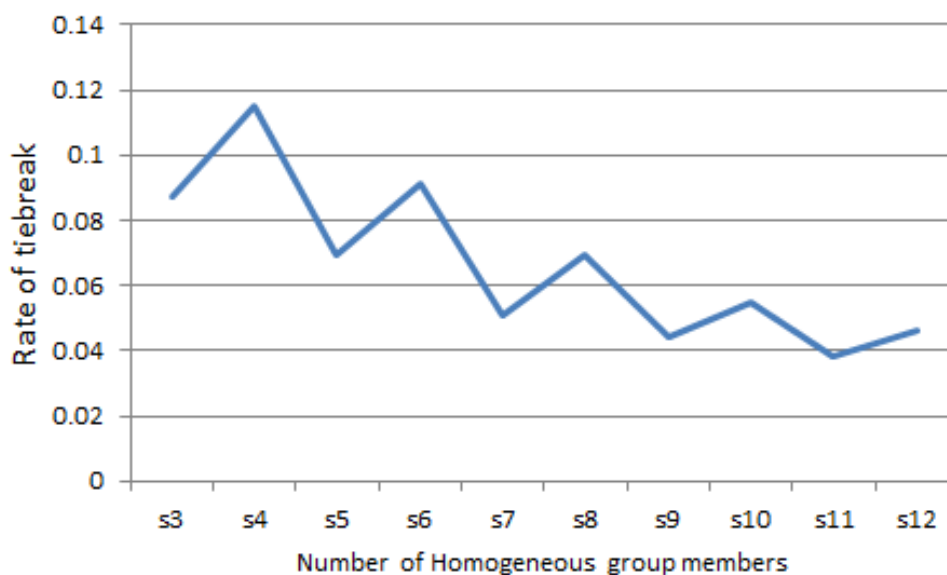


図 4.1: 合議システム  $S_N$  におけるタイブレイク率

図 4.1 では, 合議システムの各プログラム数における全試合のタイブレイク率を示す. プログラム数が偶数の場合増加し, 奇数の場合減少するが全体としては減少していることが分かる.

次にタイブレイク発生時の各プログラムにおける評価値の分析結果をそれぞれ図 4.2~図 4.11 に示す.

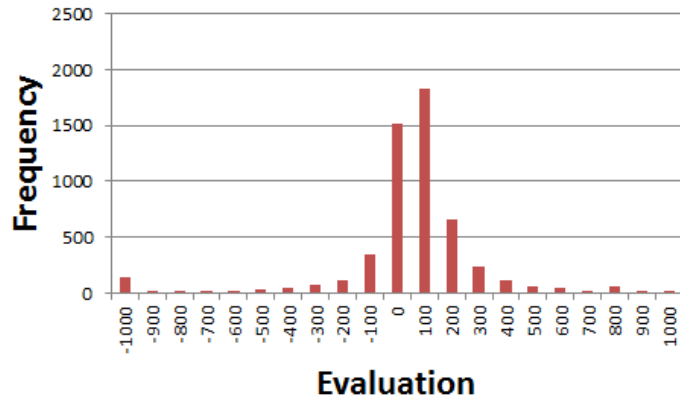


図 4.2: 合議システム  $S_3$  のタイブレーク時の評価値における頻度

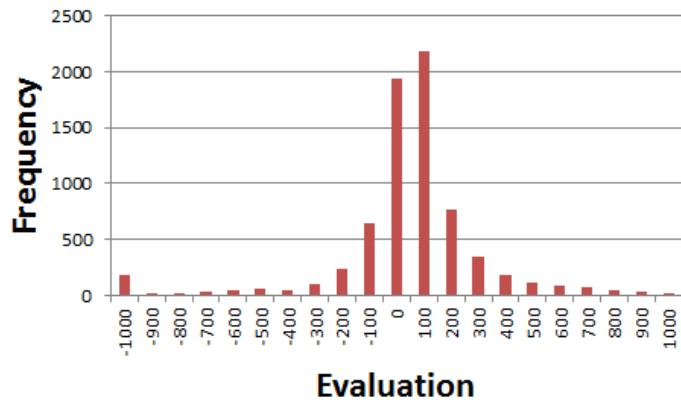


図 4.3: 合議システム  $S_4$  のタイブレーク時の評価値における頻度

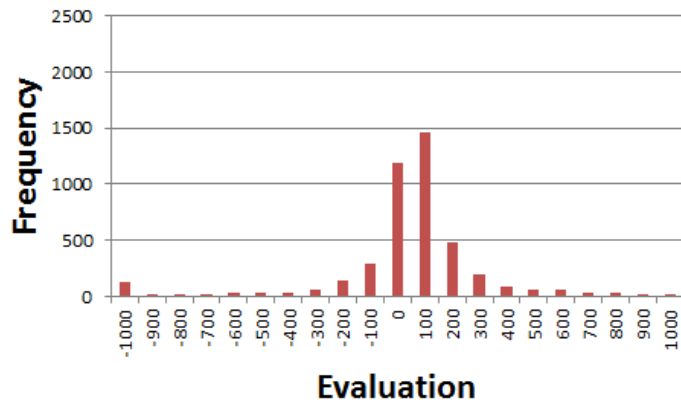


図 4.4: 合議システム  $S_5$  のタイブレーク時の評価値における頻度

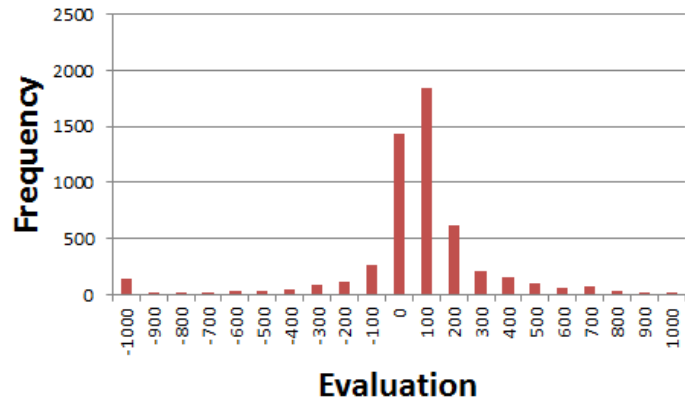


図 4.5: 合議システム  $S_6$  のタイブレーク時の評価値における頻度

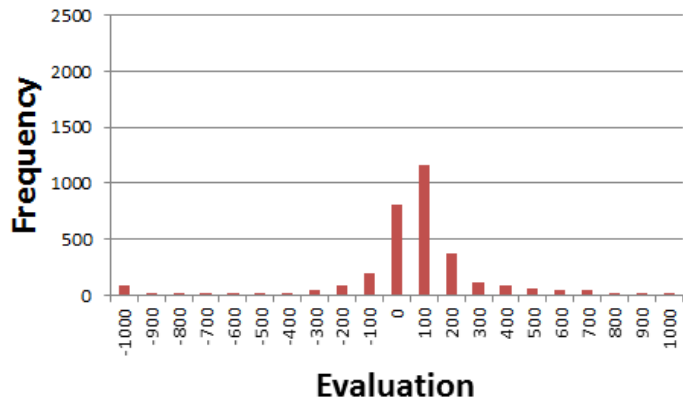


図 4.6: 合議システム  $S_7$  のタイブレーク時の評価値における頻度

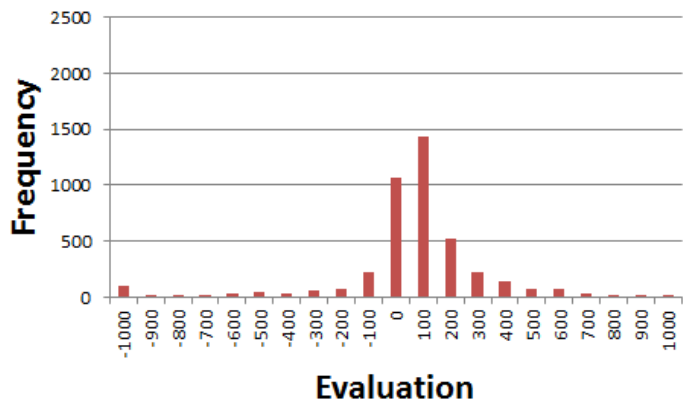


図 4.7: 合議システム  $S_8$  のタイブレーク時の評価値における頻度

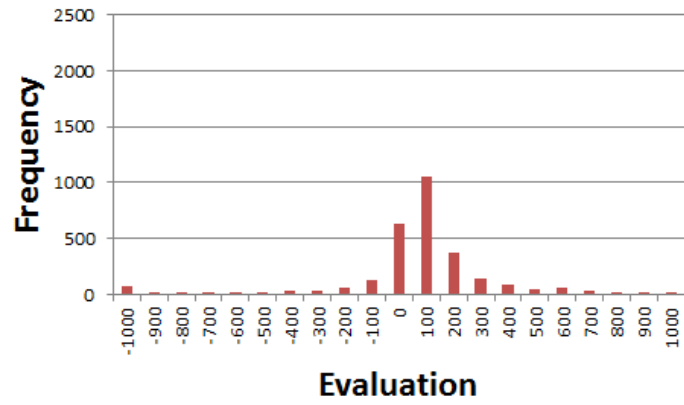


図 4.8: 合議システム  $S_9$  のタイブレーク時の評価値における頻度

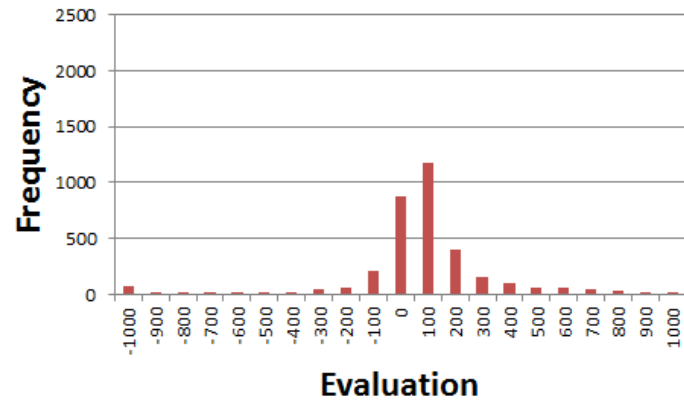


図 4.9: 合議システム  $S_{10}$  のタイブレーク時の評価値における頻度

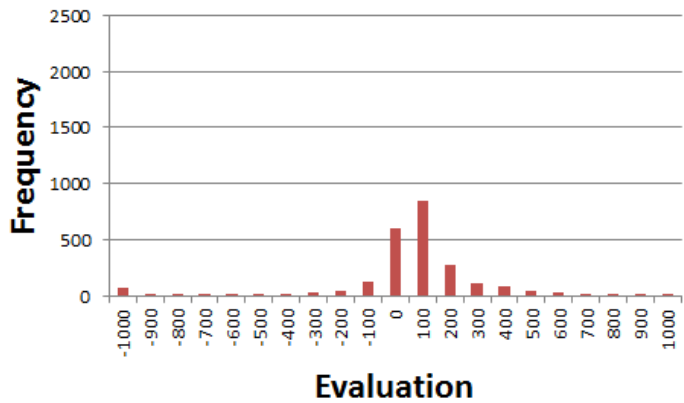


図 4.10: 合議システム  $S_{11}$  のタイブレーク時の評価値における頻度

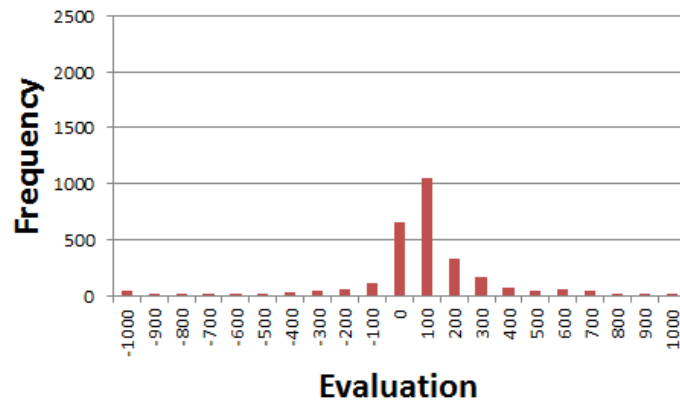


図 4.11: 合議システム  $S_{12}$  のタイブレイク時の評価値における頻度

図 4.2～図 4.11 では、全プログラム数において評価値が 0～200 の時、比較的頻度が多くなることが分かる。

次に多数決時の各プログラムにおける評価値の分析結果をそれぞれ図 4.12～図 4.21 に示す。

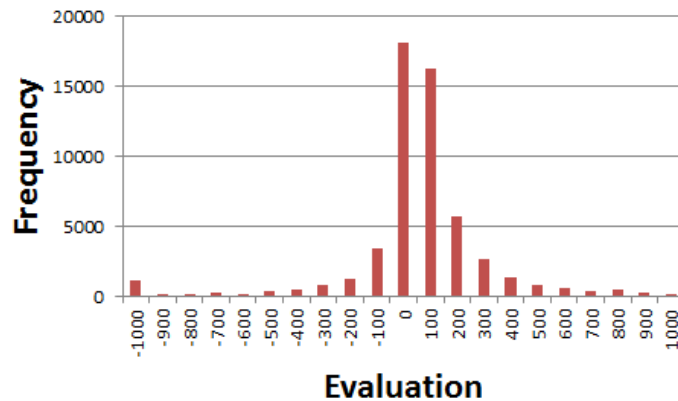


図 4.12: 合議システム  $S_3$  の多数決時の評価値における頻度

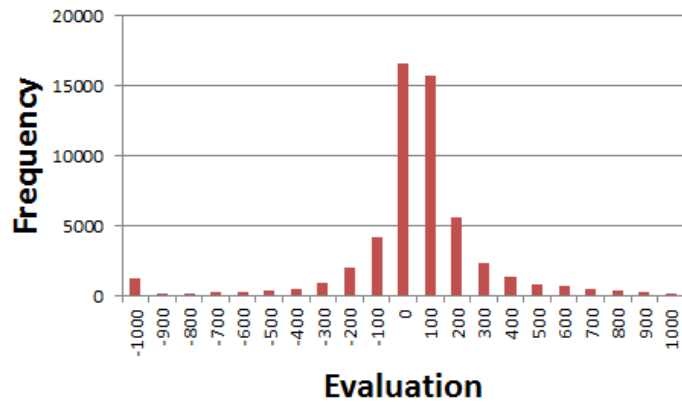


図 4.13: 合議システム  $S_4$  の多数決時の評価値における頻度

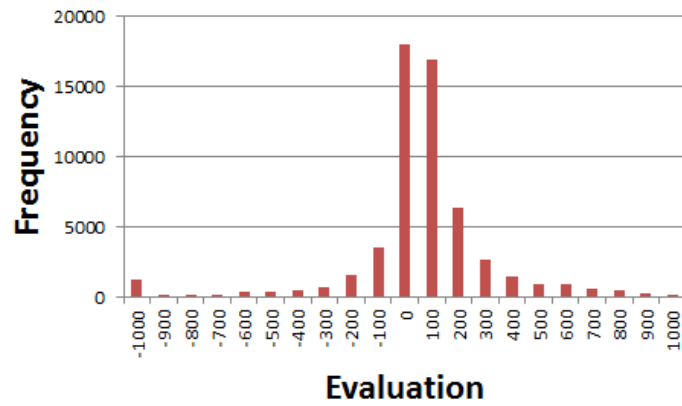


図 4.14: 合議システム  $S_5$  の多数決時の評価値における頻度

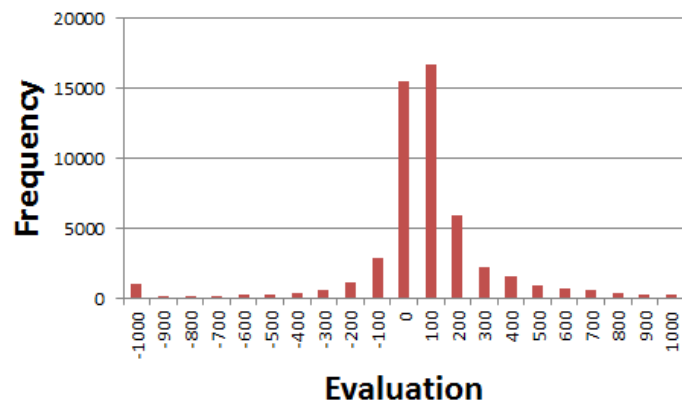


図 4.15: 合議システム  $S_6$  の多数決時の評価値における頻度

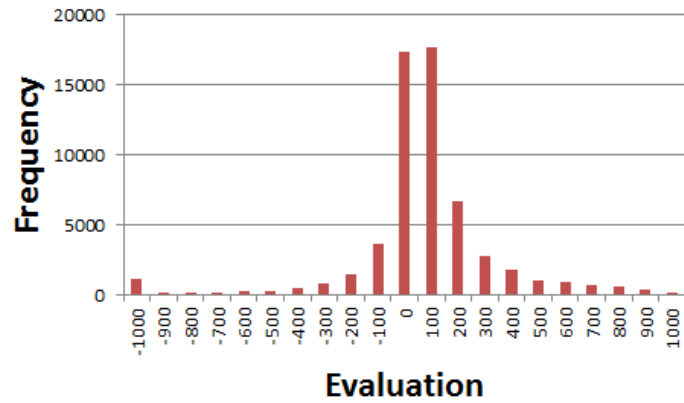


図 4.16: 合議システム  $S_7$  の多数決時の評価値における頻度

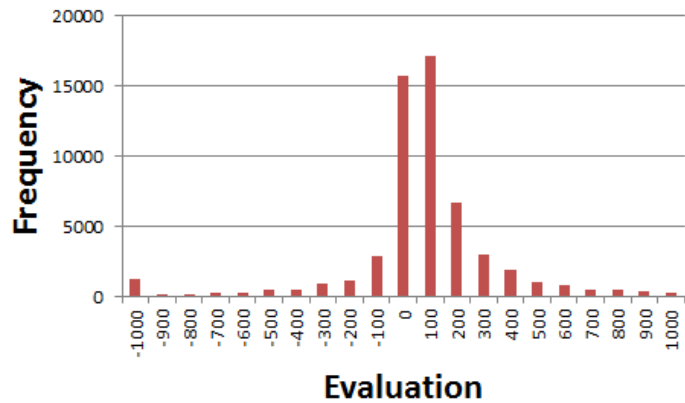


図 4.17: 合議システム  $S_8$  の多数決時の評価値における頻度

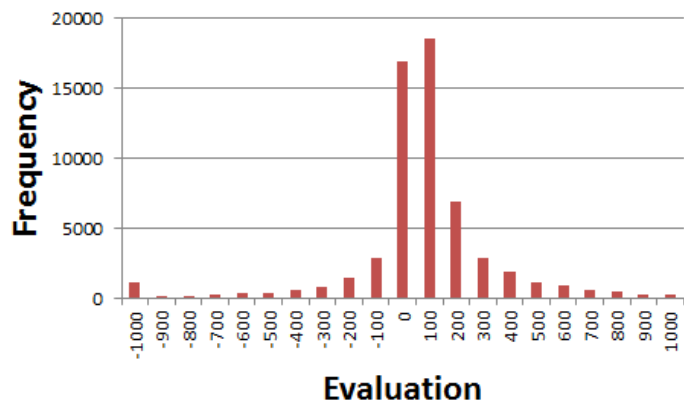


図 4.18: 合議システム  $S_9$  の多数決時の評価値における頻度



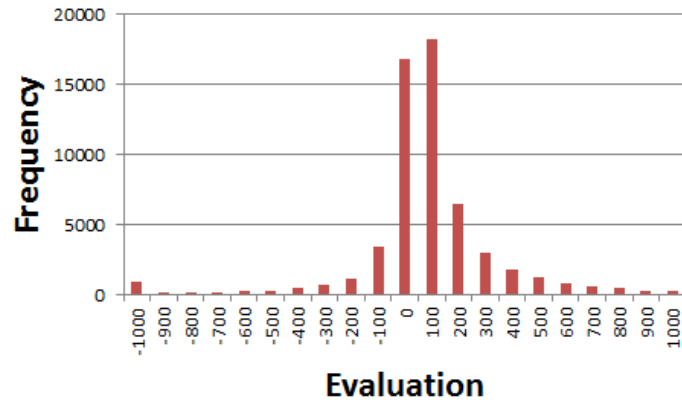


図 4.19: 合議システム  $S_{10}$  の多数決時の評価値における頻度

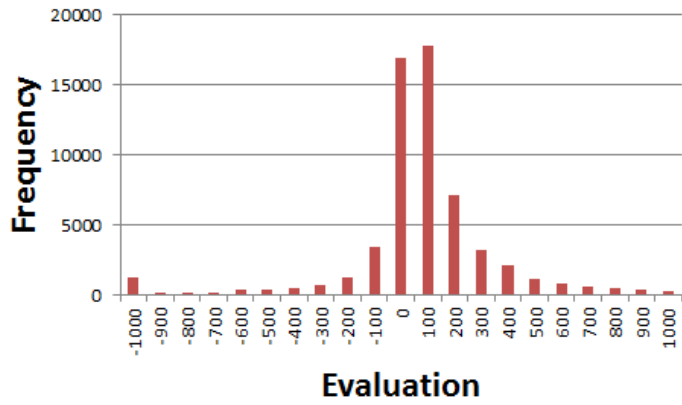


図 4.20: 合議システム  $S_{11}$  の多数決時の評価値における頻度

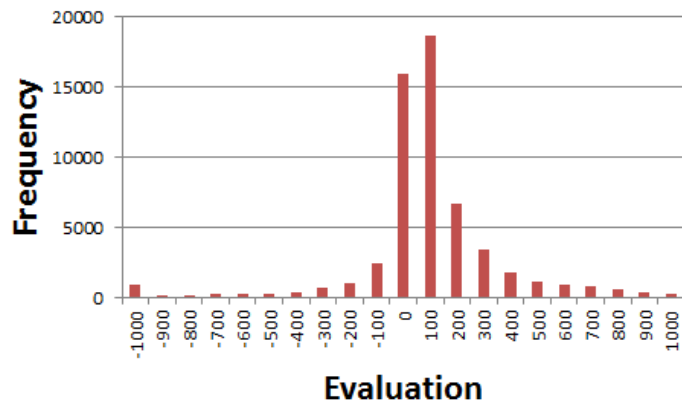


図 4.21: 合議システム  $S_{12}$  の多数決時の評価値における頻度

図 4.12～図 4.21 においても全プログラム数において評価値が 0～200 の時，比較的頻度が多くなることが分かる。

最後に勝利，引き分け，敗北した場合のタイブレーク時の評価値をそれぞれ図 4.22～図 4.31 に示す。

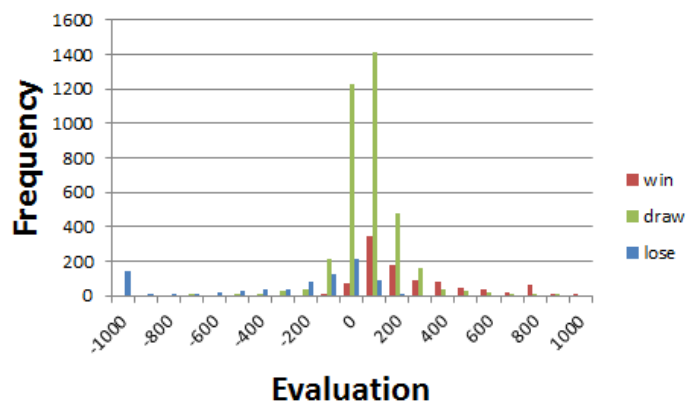


図 4.22: 合議システム  $S_3$  の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度

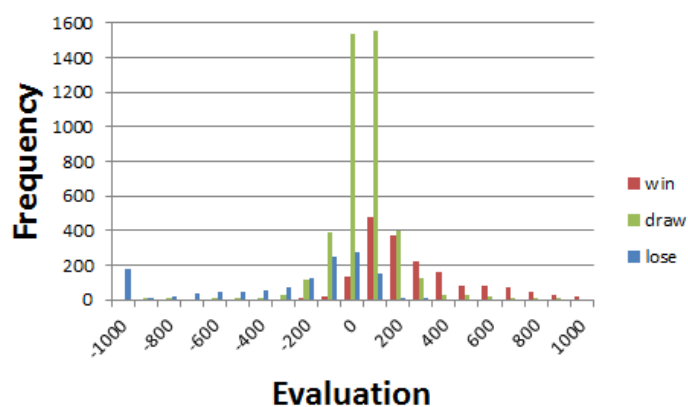


図 4.23: 合議システム  $S_4$  の結果別によるタイブレーク時の評価値における頻度

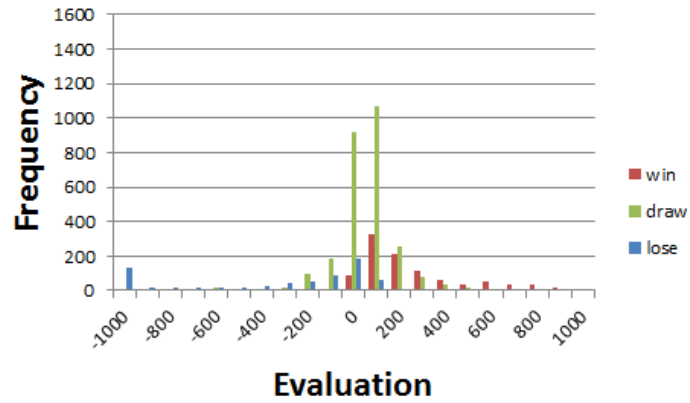


図 4.24: 合議システム  $S_5$  の結果別によるタイブレイク時の評価値における頻度

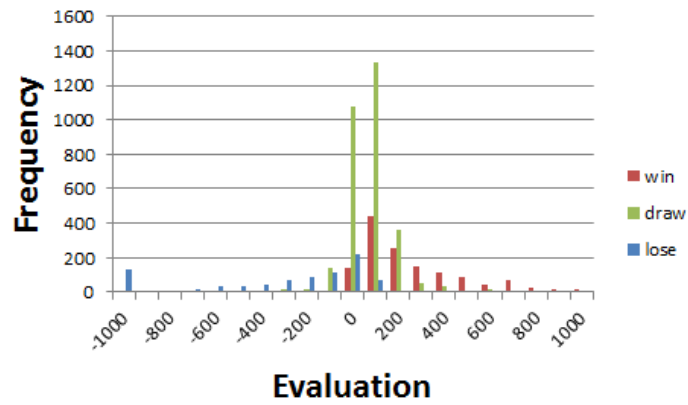


図 4.25: 合議システム  $S_6$  の結果別によるタイブレイク時の評価値における頻度

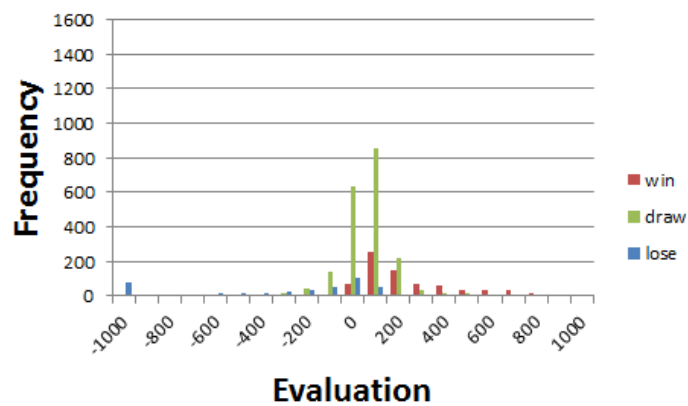


図 4.26: 合議システム  $S_7$  の結果別によるタイブレイク時の評価値における頻度

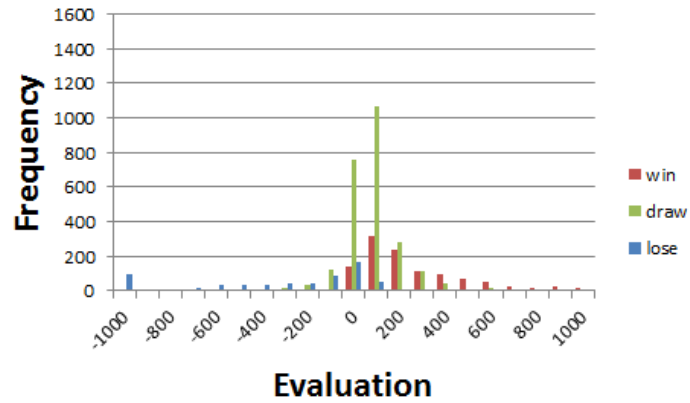


図 4.27: 合議システム  $S_8$  の結果別によるタイブレイク時の評価値における頻度

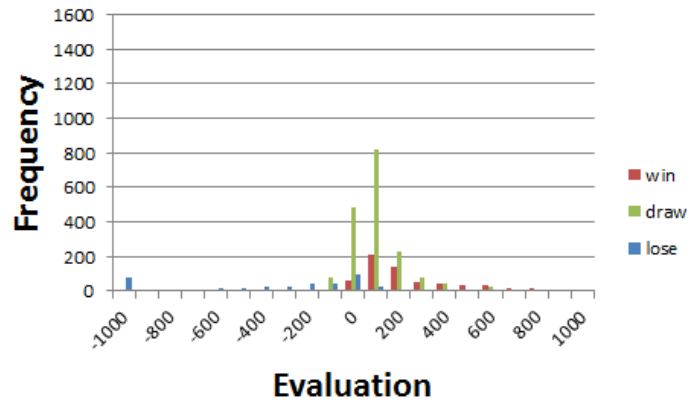


図 4.28: 合議システム  $S_9$  の結果別によるタイブレイク時の評価値における頻度

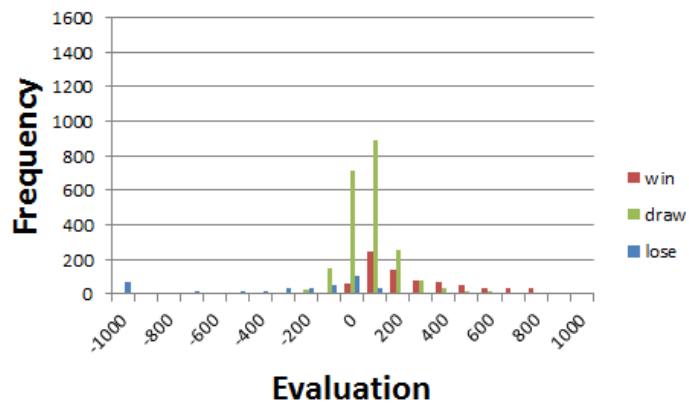


図 4.29: 合議システム  $S_{10}$  の結果別によるタイブレイク時の評価値における頻度

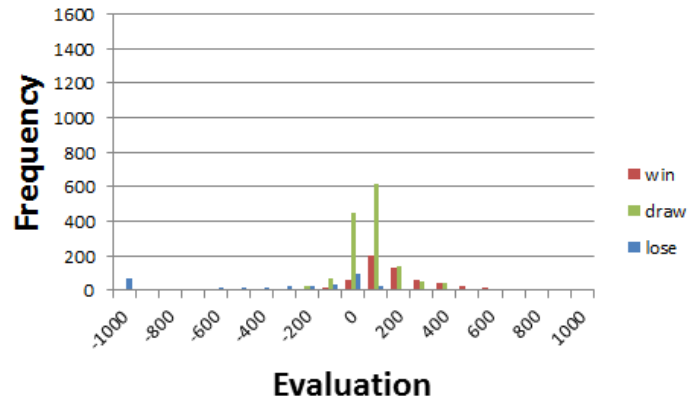


図 4.30: 合議システム  $S_{11}$  の結果別によるタイブレイク時の評価値における頻度

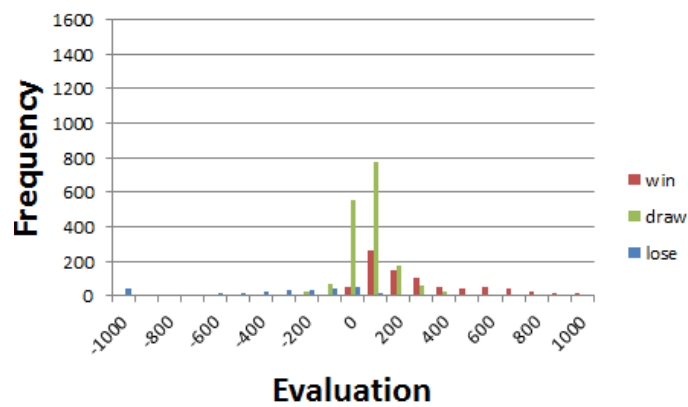


図 4.31: 合議システム  $S_{12}$  の結果別によるタイブレイク時の評価値における頻度

図 4.22～図 4.31 では、勝利した場合、全プログラム数において評価値が正の値の時、比較的頻度が多くなる、引き分けた場合、全プログラム数において評価値が 0～200 の時、比較的頻度が多くなる、敗北した場合、全プログラム数において評価値が負の値の時、比較的頻度が多くなる。

## 4.4 考察

図 4.2～図 4.11 では、全プログラム数において評価値が 0～200 の時、比較的頻度が多くなることが分かる。この評価値はタイブレーク発生時の合議プログラムの平均評価値であるため、単一プログラムに対して、Stockfish-222-sse42-ja-intel にとって合議システムが拮抗している状況で、タイブレークが発生し易いと一見考えられる。しかし図 4.12～図 4.21 においても、全プログラム数において評価値が 0～200 の時、比較的頻度が多くなることが分かる。これは単純にチェスが引き分けの多いゲームであることから、Stockfish-222-sse42-ja-intel にとって合議システムが拮抗している中で推移している。このため図 4.2～図 4.11, また図 4.12～図 4.21 では、全プログラム数において評価値が 0～200 の時、比較的頻度が多くなると考察できる。

図 4.22～図 4.31 では、合議システムが単一プログラムに対して勝利した場合、全プログラム数において評価値が正の値の時、比較的頻度が多くなる、引き分けた場合、全プログラム数において評価値が 0～200 の時、比較的頻度が多くなる、敗北した場合、全プログラム数において評価値が負の値の時、比較的頻度が多くなる。これも図 4.2～図 4.11, また図 4.12～図 4.21 と同様にこれは単純にチェスが引き分けの多いゲームであることから、Stockfish-222-sse42-ja-intel にとって合議システムが拮抗している中で推移している。そのため勝利、引き分け、敗北した場合のすべてにおいて、評価値が 0～200 の時、比較的頻度が多くなることが分かる。また勝利した場合において、評価値が正の値の時、比較的頻度が多くなることが分かる。これは単純にその試合が合議システムにとって勝利した試合であることから、Stockfish-222-sse42-ja-intel にとって合議システムの評価値が正の値をとる中で推移している。また敗北した場合において、評価値が負の値の時、比較的頻度が多くなることが分かる。これは単純にその試合が合議システムにとって敗北した試合であることから、Stockfish-222-sse42-ja-intel にとって合議システムの評価値が負の値をとる中で推移している。

図 4.1 では、全プログラムにおける合議システムのタイブレーク率が、プログラム数が偶数の場合増加し、奇数の場合減少する、また全体としては減少していることが分かる。これは単純に、合議システムを構成しているプログラムらが全て同一のプログラムであるため、プログラム数が増えれば増えるほど意見が分かれにくいためだと考えられる。

以上から本実験では、タイブレークが合議システムの有用となっている一因であると明言することはできない。しかし図 4.22～図 4.31 では、合議システムが単一プログラムに対して勝利した場合、合議システムの評価値が正の値の時、比較的頻度が多くなる、引き分けた場合、合議システムの評価値が 0～200 の時、比較的頻度が多くなる、敗北した場

合，合議システムの評価値が負の値の時，比較的頻度が多くなることが分かる．つまり，合議システムが単一プログラムに対して優勢である場合は評価値も正の値の傾向があり，拮抗している場合は評価値も0付近の傾向があり，劣勢の場合は評価値も負の値の傾向がある．これは，タイブレークが優勢，拮抗，劣勢のきっかけを示すターニングポイントになっているのではないかと考える．

## 第5章 まとめと今後の課題

単純多数決合議システムは有用であるものの、なぜ合議システムが有用であるかにおいては解明へのアプローチの提案はされているものの、解明はされていない。そこで本論文では、合議システムの有用となっている一因を探求することを目的とし、まず合議システムのプログラムの数によって合議システムの性能にどう影響するのかという検証のため、単一プログラムに対する同一のグループプログラムの単純多数決合議実験、提案合議実験、リーグ形式における合議実験を行った。単純多数決合議実験、提案合議実験、そしてリーグ形式における合議実験においてプログラム数の大きい合議システムはプログラム数の小さい合議システムに対して勝率が高い傾向にあることが分かった。しかし、提案合議実験では全プログラム数において合議システムが単一のプログラムに対して勝率は高かったものの、プログラム数によっては勝率が下がる傾向が見られた。誤差の影響を考慮しても、勝率が下がっている箇所が多く見られる。そこで単純多数決合議と提案合議との唯一異なる点である合議時の最多候補数が同数の手の別れ方をする局面をタイブレイクと名付け、タイブレイクに着目した。

単一プログラムに対するグループプログラムの単純多数決合議実験、提案合議実験、リーグ形式における合議実験にて合議システムのタイブレイクを分析したところ、本論文では、タイブレイクが合議システムの有用となっている一因であると明言することはできない。しかし勝利、引き分け、敗北した場合のタイブレイク時の評価値を分析したところ、合議システムが単一プログラムに対して勝利した場合、合議システムの評価値が正の値の時、比較的頻度が多くなる、引き分けた場合、合議システムの評価値が0~200の時、比較的頻度が多くなる、敗北した場合、合議システムの評価値が負の値の時、比較的頻度が多くなることが分かる。つまり、合議システムが単一プログラムに対して優勢である場合は評価値も正の値の傾向があり、拮抗している場合は評価値も0付近の傾向があり、劣勢の場合は評価値も負の値の傾向がある。これは、タイブレイクが優勢、拮抗、劣勢のきっかけを示すターニングポイントになっているのではないかと考える。

そのため、今後は単一プログラムに対するグループプログラムの単純多数決合議実験だけでなく、多数決合議実験やリーグ形式における合議実験においてもタイブレイクの分析を行いたい。本実験では、単純多数決合議実験のみにおけるタイブレイクの検証を行った。しかし、タイブレイクが合議システムの有用となっている一因であると明言することはできなかった。これらの結果は誤差の影響も考えられるためとも考察できる。そのため、多数決合議実験やリーグ形式における合議実験においてもタイブレイクの分析を行いたい。また単純多数決合議実験、提案合議実験、リーグ形式における合議実験において、



合議システムの平均評価値をより詳細に分析したい。本実験では、単純多数決合議実験における合議システムの平均評価値をヒストグラムを用いて分析した。しかし、単純多数決合議実験における分析ではタイブレークが合議システムの有用となっている一因であると明言することはできなかった。そこで特定の評価値の区間に限定してヒストグラムで分析したい。例えば、評価値が0~200の区間内の評価値を、ヒストグラムで分析する。そしてタイブレーク時に合議システム内のプログラムに再投票をさせる設定での合議実験も行いたい。仮にタイブレークが優勢、拮抗、劣勢のきっかけを示すターニングポイントになっているならば、タイブレーク時に合議システム内のプログラムに再投票をさせる設定で行うとどのような挙動になるのかを分析したいためである。

# 謝辞

本研究を進めるに当たりご指導をして頂いた飯田弘之教授，池田心准教授に深い感謝の意を表します。また共同で研究を進めた曾根彰吾氏をはじめとする飯田・池田研究室の方々に感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Althöfer I., Improved game play by multiple computer hints., *Theoretical Computer Science*, 313:315-324, 2004.
- [2] Daylen Yang, Stockfish Chess,, <http://stockfishchess.org/download/> (2015年2月現在)
- [3] Matsubara, H., Iida, H., Grimbergen, R., Chess, Shogi, Go, natural developments in game research, *ICCA J* 19(2), pp.103–112, 1996.
- [4] Obata, T., Sugiyama, T., Hoki, K., Ito, T., Consultation Algorithm for Computer Shogi: Move Decisions by Majority, 'Computers and Games' Springer,pp.156-165.(2010).
- [5] Sato, Y., Cincotti, A., Iida, H., An analysis of voting algorithm in games, In *Computer Games Workshop*, at European Conference on Artificial Intelligence (ECAI), pp.102-113 (2012)
- [6] Shaw M. E., Comparison of Individuals and Small Groups in the Rational Solution of Complex Problems, *American Journal of psychology*, 44, pp.491-504(1932).
- [7] Softonic Internacional S.A., WinBoard, <http://winboard.en.softonic.com> (2015年2月現在).
- [8] Spoerer, K, T. Okaneyya, T. Ikeda, K. and Iida, H., Further Investigations of 3-Member Simple Majority Voting for Chess, 8th International Conference (CG 2013), pp.199-207, 2014.
- [9] Spoerer, K, T. Sirivichayakul, T. and Iida, H., Homogeneous Group Performance in Chess, 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI 2013), pp.1272-1276, 2013.
- [10] Triplett, N., The dynamogenic factors in pacemaking and competition, *American Journal of psychology* 9, pp.507-533(1897).
- [11] 伊藤毅志, 合議アルゴリズム「文殊」単純多数決で勝率を上げる新技術, *情報処理*, Vol.50, No.9, Sep. 2009, pp.887-894

- [12] 大森誠也, 保木 邦仁, 伊藤毅志, チェスプログラムを用いた合議アルゴリズムの効果の検証, 情報処理学会ゲーム情報学研究会, 26-5 (2011).
- [13] 岡根谷 敏久, チェスを題材とした合議システムに関する研究, 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文 (2013).
- [14] 小幡 拓弥, 埜 雅織, 伊藤毅志, 思考ゲームによる合議アルゴリズム～単純多数決の有効性について～, 情報処理学会ゲーム情報学研究会報告, 2009-GI-22 No.2(2009).
- [15] 杉山 卓弥, 小幡 拓弥, 斎藤 博昭, 保木 邦仁, 伊藤毅志, 将棋における合議アルゴリズムー局面評価値に基づいた指し手の選択, 第14回ゲームプログラミングワークショップ, pp.59-65. 2009.
- [16] 曾根彰吾, 長束薫, 由井菌隆也, 飯田弘之, 同一チェスプログラムグループによる合議制における投票結果の分散パターンの調査, ゲームプログラミングワークショップ2014 論文集, pp.75-81(2014).
- [17] 埜雅織, 伊藤毅志, 思考アルゴリズムにおける最適合議システム, 第3回エンターテイメントと認知科学シンポジウム, pp.72-75(2009).
- [18] 保木邦仁, 金子知適, 横山大作, 小幡拓弥, 山下宏, あから 2010 勝利への道: 2. あから 2010 のシステム設計と操作概要, 情報処理 Vol.52, No.2, pp.162-169. 2011.