

協力ゲーム Hanabi を用いた察するコミュニケーションのモデル構築

Constructing a communication model for inference using the cooperative game Hanabi

桑原涼香¹ 長島一真¹ 森田純哉¹
宮田貫誠² 川越 敦² 大澤博隆³

Ryoka Kuwabara¹ Kazuma Nagashima¹ Junya Morita¹
Kansei Miyata² Atsushi Kawagoe² Hirotaka Osawa³

¹ 静岡大学 ² 筑波大学 ³ 慶応大学

¹ Shizuoka University ² Tsukuba University ³ Keio University

Abstract: In this study, a simulation was performed using the card game “Hanabi”, which is suitable for analyzing cooperative behavior. We built a cognitive model to estimate the intention of others’ actions by accumulating the actions of oneself and others as examples when communication is successful during the game. As a result of a simulation in which two models played a game, it was confirmed that examples were accumulated and used as the trial progressed, and that the game score increased.

1 序論

人間は、直接的な指示がなくともメッセージに内包される意図を推測し、他者との協調を成功させることができる。こういった成功の背後には、他者の意図を心的にモデル化する能力が必要である。認知科学の広い分野において、人間同士のインタラクションを支えるこの種の社会的知能は「心の理論」[7]や「他者モデル」[8]などの概念によって説明されてきた。これらの原理/機構を理解することで、協調作業の支援やコミュニケーションに関わる障害に対する臨床的な応用が導かれると考える。

認知科学において、人間のコミュニケーションに関する研究は、様々なアプローチによって行われている。そのなかでも、計算機モデルを構築することによるシミュレーションは、心の理論や他者モデルなどの言語で説明される現象に対して、分解された処理レベルでの表現を導くという点で有用である。

特に本研究では、意思疎通の背後にある処理として、共通事例の蓄積と活用を想定する。つまり、他者とのコミュニケーションのプロセスを履歴として保持し、その履歴を参照することで他者からのメッセージを解釈し、他者へメッセージを送信することで、コミュニケーションを円滑化できると考える。送信者と受信者が想定する事例に共通点があれば、コミュニケーションに成功し、全く異なる事例を想起すればミスコミュ

ニケーションが発生することになる。

本研究では、上記の処理を課題レベルで具体化するため、協調行動の分析に適した題材である協力ゲーム“Hanabi”を扱う。そのうえで、「共通の経験を蓄積することによる協調の成功」に関わる計算機モデルを構築する。本研究で構築するモデルは、シンボリックな事例の利用とサブシンボリックな事例の運用を含むものであり、既存の認知アーキテクチャ [1] を用いて構築される。構築されたモデルによって、事例の蓄積・活用により、協調に関わるゲーム得点の上昇が見込めることを確認する。

本稿の構成は次の通りである。まず、第2章にて本研究と関連する研究を紹介する。次に、第3章で本研究の扱う課題について紹介し、第4章で作成したモデルについて説明する。第5章と第6章でシミュレーションとその結果を示し、最後にまとめと今後の課題を示す。

2 関連研究

人間による複雑なコミュニケーションを捉えるために、抽象化された状況でのコミュニケーションのプロセスを計測する研究が行われている。その1つの手法が、日常で利用されるコミュニケーションの手段が制限された実験室において、コミュニケーションの生起を観察する実験記号論である [2]。

実験記号論に立つ研究のなかで、金野 [3] は、図形を組み合わせたメッセージを送信しあうことで、グリッドワールドにおける共通の位置で 2 者が待ち合わせをする課題（メッセージ付き協調ゲーム）を考案している。この課題では、待ち合わせの試行を繰り返す中で、意味を有さなかったメッセージに意図がのせられ、協調課題に成功するようになる。このプロセスを事例の蓄積の観点から検討する計算機モデルが構築されている [4]。

森田ら [4] の構築したモデルは、現在の自分の位置、あるいは他者から送信された図形を手がかりとして過去の事例を検索し、検索された事例と同様のメッセージを送信し、グリッドワールドを移動する。この手続きを繰り返し、モデルは相手との協調（待ち合わせ）に成功するようになる。

しかし、現実社会に適用可能な知見を得るためには、上記の検討に比べ、より複雑な状況におけるモデルを構築する必要がある。意図の伝達に一定の困難が存在する状況での検討により、コミュニケーションを実現する処理に関するより高い粒度の知見が得られる。この件に関して、一般に市販されるカードゲームを用いることは、上記のような実験室実験用の課題に比べ、有用なテストベッドになりうる。カードゲームには、明確なルールが存在しつつ、プレイヤーが楽しみ競うための一定程度の複雑さが存在するからである。

協調をプレイヤーに要求するカードゲームとして、Hanabi を用いた研究が存在する。大澤による Hanabi のモデルは、他者行動からの自己推定戦略のような高次の心の理論を含んでいる [6]。このモデルは、確実な情報のみを信頼し、リスクのない合理的な行動をとる決定論的戦略 [6] と比較し、より高い得点を獲得可能なものであることが示されている。また、大澤のモデルは、人と協調するエージェントに実装され、エージェントの振る舞いのバリエーション（リスク志向の個人差、反応時間など）が、協調する人間の受ける印象に影響することを示している [5]。しかし、Hanabi を題材とした研究において、協調に至るプロセスの検討は未だなされていない。そこで、本研究では、上記で述べた共通経験の蓄積を活用することで、Hanabi における協調の成立プロセスをモデル化する。

3 課題

本節では本研究において採用する課題である Hanabi について説明する。この説明を行うなかで、Hanabi におけるコミュニケーションの特質を具体化する。

3.1 Hanabi ルール

3.1.1 構成要素

協力型ゲーム Hanabi は通常 2 から 5 人のプレイヤーで行われ、本研究では 2 人のプレイヤーとし、2 体のモデルによるシミュレーションを行う。構成要素は 50 枚のカード、8 個の青トークン、3 つの赤トークンである。カードは 5 色（白、赤、青、黄、緑）あり、各色について 1 が 3 枚、2 が 2 枚、3 が 2 枚、4 が 2 枚、5 が 1 枚ある。はじめに各プレイヤーへ 5 枚の手札が配布され、残りの手札は山札となる。青トークンは、情報提供を行うことのできる最大数が 8 回に制限されている事を示すカウンタであり、全プレイヤーが共有する。赤トークンは、誤った色あるいは数字を場に出す事で追加されるエラーカウンタである。

3.1.2 ルール概要

本ゲームのゴールは、場に同色のカードを 1 から 5 まで昇順に重ねて異なる 5 色の花火を完成させる事である。ゲーム終了までに可能な限り得点を高く積み上げる事を目指す。ゲーム終了時に場に出ているカードの枚数がそのゲームの合計得点となり、最大 25 点である。

Hanabi のゲーム終了条件は以下の 3 つである。

- 場に誤ったカードを 3 回出した（赤トークンが 3 つ追加された）場合
- 山札が 0 になってから 1 ターンが経過した場合
- 全ての色について 5 まで並べた場合

3.1.3 プレイヤーの行動

各プレイヤーは、各ターンにおいて次の 3 つの行動のうちいずれかを選択する。

1. 相手へのヒント提供 (情報提供)

この行動は青トークンを 1 つ消費し、プレイヤーは相手の持つ手札の色か数字の情報を伝えることができる。伝える色あるいは数字が相手の手札に複数ある場合、その色または数字の手札に該当する全ての手札について情報を伝えなければならない。例えば、図 1 のように相手プレイヤーが左から赤 1、白 2、白 4、緑 3、黄 2 という手札を持ち、2 という数字情報を伝える場合について考える。数字が 2 である 2 枚目と 5 枚目両方の位置を伝えることになり、2 枚目のみ、5 枚目のみという伝え方はできない。青トークンが 0 のときヒントという行動は選択できない。

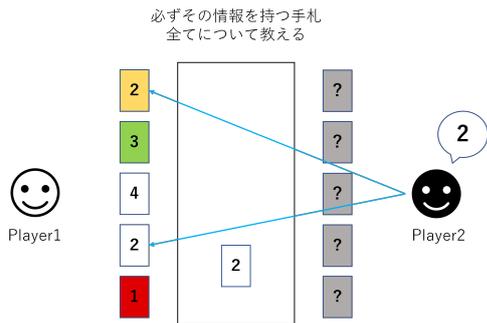


図 1: 相手へのヒント提供

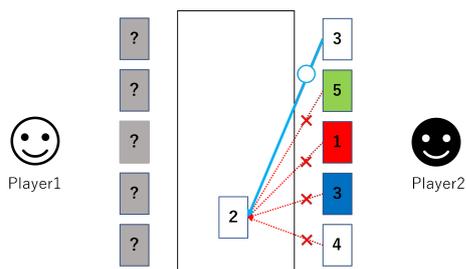


図 2: 手札のプレイ

2. 手札のプレイ

この行動は自分の手札 1 枚を場に出すものである。既存の同色の花火より 1 つ大きい数字をそこに重ねた場合は成功である。但し、完成させることができるのは 1 つの色につき 1 つの花火のみであり、既に 1 から 5 まで積みあがっている色の手札を出すことはできない。場の花火を積み上げることに繋がらない手札を出した場合は失敗となり、赤トークンが 1 つ追加される。例えば、図 2 のように場に白の花火が 1 から 2 までの数字で構成されている場合、白 3 を出せば成功、白 4 や青 3 をだせば失敗となる。失敗時に出したカードは破棄され、ゲーム終了まで使用されない。プレイ後は山札から 1 枚引いて手札に加える。

3. 手札の破棄

この行動は自分の手札から 1 枚を選んで破棄し、青トークンを 1 つ回復するものである。最大数を超える青トークンを戻す事はできない。

3.2 Hanabi におけるコミュニケーション

本研究では、Hanabi におけるコミュニケーションとして、ヒントとプレイの一連のやり取りを想定する。Hanabi におけるヒントは、色や数字の情報を明確にするだけでなく、確実に出すことができるとは限らないものの、出すことを示唆するために利用することも可能である。例えば、プレイヤー 1 がプレイヤー 2 に「2

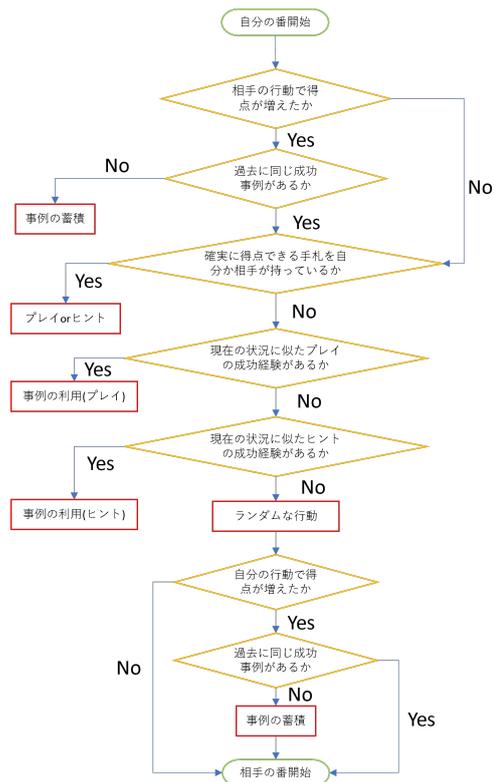


図 3: 各プレイヤーのターンにおけるフローチャート

枚目は青」というヒントを与え、プレイヤー 2 が 2 枚目の手札の数字が分からない状態でプレイして、成功するなどのケースである。このような不確実な状況下でのヒントがプレイの成功を導いた場合、その経験は将来の類似の場面でも再利用され、ゲームの得点を上昇させる一因となると期待できる。

4 モデル

事例の蓄積と活用が協調の成功に貢献するかを検討するため、Hanabi を遂行するモデルを一般的な認知アーキテクチャである ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational [1]) を用いて構築した。ACT-R は 2 節に述べた事例の活用に関わる認知モデル [4] で利用されており、先行研究に即したモデルを構築するために有用と考えた。

本研究で構築したモデルの処理の流れを図 3 に示す。このフローチャートは Hanabi に関する過去のモデル [6] をベースとしつつ、事例の蓄積と活用に関わる処理を含めたものとなっている。本節の残りの部分にて、モデルによって蓄積される事例およびその活用を説明する。

4.1 事例の蓄積

フローチャート（図3）に示す通り、自分あるいは相手がプレイを成功させて得点を取得した場合に事例は蓄積される。フローチャートの上部では、相手の直前の行動が得点に結びついたか否かを判別する。また、フローチャートの下部では、自分の行動が得点に結びついたか否かを判別する。これらの判別に当てはまり、かつそのときの状況と同一の状況での成功がそれ以前になかった場合に、新たな成功経験を両プレイヤーは記憶する。

いずれの状況においても、成功事例に含められる情報は、

- 場の状態
- 自分の手札の情報
- 相手の手札の情報
- 直前にプレイした手札
- そのプレイを導いたヒント
- 残り枚数

で構成される。これらの例を、図4、図5、図6、図7に示した。

場の状態は、白、赤、緑、青、黄の5色に対して、それぞれの花火がどの数字まで場に出ているかを示す。図4では緑が場に3まで出されており、他の色はまだ場に出されていないことを示している。

自分の手札の情報は、現在自分が認識している自分の手札の色と数字の情報を示す。図5において、自分が認識していない色や数字は黒くマスクされている。

相手の手札の情報は、自身から見える相手の手札の情報と相手が認識している相手の手札の情報から構成される。図6の上段2つは自身の見ているカードの状態であり、下段2段は相手が認識している宛位のカードの状態である。下段では、上段2段のうち自分がヒントを与えていないカードの状態がマスクされている。

直前にプレイした手札の情報は、成功時にプレイした手札の色と数字の組み合わせにより示される。プレイを導いたヒントは、ヒントの対象となった手札によって明らかになった色、もしくはヒントにより明らかになった数字を意味する。図7は、図4、図5、図6に示される場や手札の状態において、自分が得点した場合と相手がプレイした場合のそれぞれにおけるプレイした手札とヒントの例を示している。

残り枚数の情報は、成功時に未知となっている25種類の各カードの枚数を指す。具体的には、まだ色と数字の双方が明かされていない手札、あるいは山札にある手札の合計である。これらは、図8に示す通り最初

W	R	G	B	Y
0	0	3	0	0

図4: 場の情報の例

1	2	3	4	5
		G	Y	R
2			2	

図5: 自分の手札の例

に設定された枚数から既知の手札の枚数を引くことで求まる。既知の手札は、プレイされて場に既出の手札、破棄された手札、相手の持つ手札、自分の手札のうち相手から受けたヒントで色と数字ともに判明している手札の4つで構成される。

自分が得点した場合に関しては、図4より「場に青が出ていない」状態であることが既知であると考えられる。その際に、相手からのヒントにより「1枚目と2枚目が青」であるということが既知となる状況を想定する。図7は、この状況で、自分は2枚目の数字が明らかでなくても、青を場に出してほしいという意図だと推測してプレイし、実際に青1が場に出て成功となったことを示している。

相手がプレイして得点した場合は、相手がプレイする直前に自分が与えたヒントが成功経験として記憶される。図6より、「3枚目が緑」であること、図4より、「場に黄が出ていない」状態であることが既知である。そして、自分が「1枚目と3枚目が1」であるというヒントを伝えることで、図7のように相手の1枚目と3枚目の数字が1となる。この状態のときに、相手は1枚目の色が明らかでなくても、緑以外の1の手札を場

1	2	3	4	5
Y	R	G	Y	R
1	2	1	3	4
	R	G		
			3	4

図6: 相手の手札の例

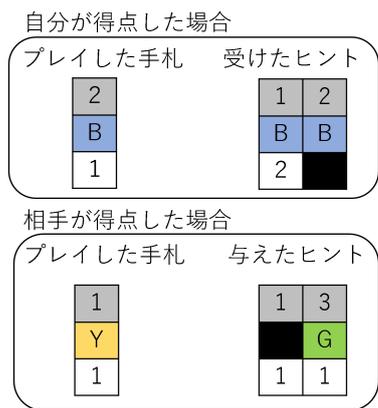


図 7: 成功時のプレイとヒントの例

	W	R	B	Y	G
1	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2
5	1	1	1	1	1

既知の枚数を引く

図 8: 残り枚数

に出してほしいという意図だと推測してプレイし、実際に黄 1 が場に出て成功となったことを示している。

4.2 事例の活用

図 3 に示す通り、自分あるいは相手が確実に得点できる手札を持っていなかった場合に事例は活用される。まず、現在の状況で自分がプレイして得点した事例（プレイ経験）を検索し、検索に成功すればその事例に即したプレイを行う。失敗すれば、自分がヒントを与えて相手が得点した事例（ヒント経験）を検索する。検索に成功すればその事例に即したヒントを与える。

事例を検索する際に参照する情報（検索クエリ）は、自分のプレイで成功した場合と、自分のヒントによって相手がプレイで成功した場合で異なる。自分のプレイで得点した事例を検索する場合は、場の状態、自分の手札の情報、直近の相手からのヒントの情報、残り枚数が必要となる。一方、相手のプレイで得点した事例を検索する場合は、場の状態、相手の手札の情報、残り枚数が必要となる。

検索クエリと蓄積された事例とのマッチングを考える際に、本研究では完全一致によらず、類似に基づく手法を採用した。場の状態および手札の状態を組み合わせた事例のパターンは膨大であり、完全一致の事例を活用することが極めて困難だからである。

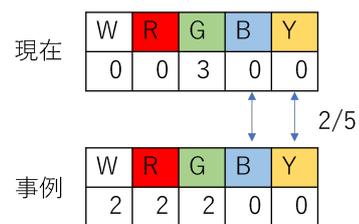


図 9: 場の類似

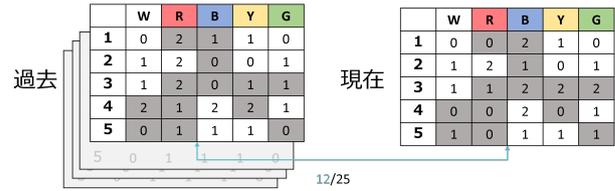


図 10: 残り枚数の類似

類似の計算は、場と残り枚数および手札で異なる手法を採用した。図 9 は場の状態の類似を説明するものである。蓄積された成功事例の場の状態（白 2, 赤 2, 緑 2, 青 0, 黄 0）と、現在の場の状態（白 0, 赤 0, 緑 3, 青 0, 黄 0）で数字のマッチする色の数をカウントする。図 10 は残り枚数の類似を示すものであり、25 種類の各カードを対象に蓄積された成功事例の残り枚数と現在の残り枚数が一致する数をカウントする。手札の類似では、図 11 に示すように、類似の計算に先立ち、手札の属性（色と数字）ごとに頻度ベクトルを計算する。色と数字それぞれの頻度ベクトルからコサイン類似度を計算する。これらの類似を ACT-R の機能を利用することで合計し、検索クエリ全体（プレイ経験活用の場合は相手のヒントとの一致を含む）との適合を、蓄積されたすべての事例に対して計算する。その結果、最も高い適合となった事例でなされた行動をそのターンにて実行する。

5 シミュレーション

前節で示したモデル 2 体で Hanabi のシミュレーションを行った。このシミュレーションのなかで、事例を

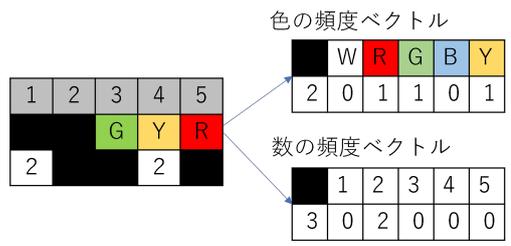


図 11: 手札の類似に利用する頻度ベクトル

蓄積する試行を重ねることでの得点の増加を確認する。また、ルールセットの異なる複数のモデルを用意し、これらのモデルで共通の結果が見られるのかを確認する。ここでのモデルは異なる個人と対応していると考える。

5.1 手続き

このシミュレーションでは、ゲーム終了までを1試行とし、連続した100試行を20回行った。シミュレーション結果から、1から100の各試行における20回分の平均得点を計算し、試行を重ねることによる学習過程を観察した。なお、個人差を考慮して検討するため、手札の破棄に関するルールの組み合わせを変えて試行した3つのモデルによる結果を示す。Hanabiにおいて、プレイヤーが確実に破棄してよいカードの定義として以下の2つが考えられる。

- 既に場に出ている (得点以下)
- 持っている手札に色と数字が全く同じものが複数枚ある (重複)

例えば、図12のような場の状況では、黄4まで得点が積み上がっているためプレイヤー1の持つ黄2の手札は不要となる。同様に、青1が既出のためプレイヤー2の青1は不要である。このように得点以下の不要な手札を破棄することにより、得点に繋がる手札を山札から引く可能性を上げることができる。また、プレイヤー1が黄2を2枚持っていた場合はそのどちらかを破棄してよい。したがってシミュレーションを行った3つモデルの仕様は以下ようになる。

- モデル1** 得点以下の手札を破棄するルールを有する、
- モデル2** 得点以下の手札を破棄するルール、重複手札を破棄するルールを有する。
- モデル3** 得点以下の手札を破棄するルール、重複手札を破棄するルール、相手が持つ得点以下の手札のヒントを与えるルールを有する。

実際の行動選択において各ルールは競合している。しかし、上記のなかではモデル3が最も多くの場面で手札を破棄ことができ、モデル2、モデル1の順に破棄する頻度が減少する。

5.2 結果

図13に結果を示す。図の横軸は試行回数、縦軸は20回分の平均得点である。

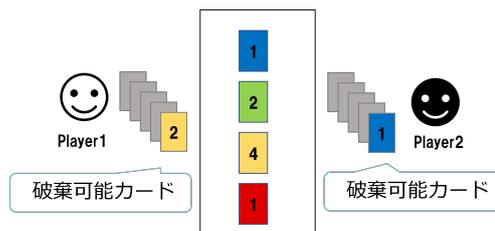


図 12: 破棄可能カードの例

- **モデル1**
100試行をまとめた平均は10.581点となる。また、ゲームの試行による得点の上昇の傾向を確かめるために試行と得点の相関を計算したところ、ピアソンの積率相関係数は0.29となった。
- **モデル2**
100試行をまとめた平均は10.44点となる。また、ゲームの試行による得点の上昇の傾向を確かめるために試行と得点の相関を計算したところ、ピアソンの積率相関係数は0.42となった。はじめの20試行の平均得点は10点に満たないが、中盤になると10.4点を超え、後半は10.7点程度となっている。
- **モデル3**
100試行をまとめた平均は9.17点となる。また、ゲームの試行による得点の上昇の傾向を確かめるために試行と得点の相関を計算したところ、ピアソンの積率相関係数は0.31となった。他の2つと比較して平均得点が低下した。

同じく連続した100試行を20回行ったシミュレーションにおいて、大澤のモデル[6]の平均得点(決定論的戦略モデル14.53点、自己推定戦略15.85点)や人間同士[5]の平均得点のデータ(17.61点)と比較して低い得点となっている点は課題である。

一方で、試行を経るごとに得点の上昇と正の相関があることがわかる。共通経験の蓄積・活用が導いた結果であるとは断定できないにせよ、事例の蓄積・活用が協調成功に貢献している可能性が示唆された。

6 分析

上記の結果をもとに、事例の蓄積・活用による効果を検討する分析を行った。

6.1 事例活用による得点成功率の算出

ここでは、蓄積された事例を類似の場面で再度活用することでどの程度得点に結びついたのかを検討する。

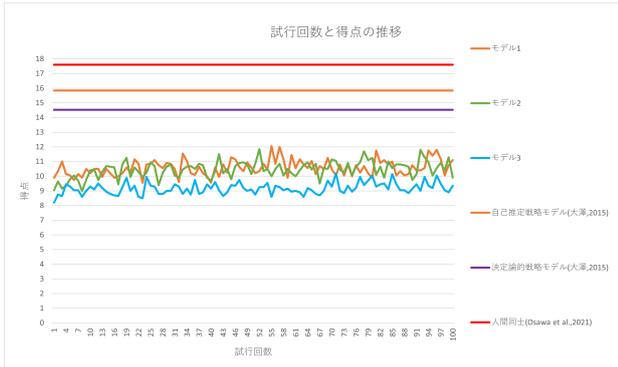


図 13: シミュレーション結果

得点成功率は、連続した 100 試行において事例を活用した回数(得点に繋がったものと繋がらなかったものを足し合わせたもの)を分母とし、そのうち得点に繋がったものの割合を算出する。また、それら 20 回分の平均成功率を算出する。以下 2 種類のそれぞれについて算出結果を述べる。

- 自分がプレイして得点した事例 (プレイ経験)
- 自分がヒントを与えて相手が得点した事例 (ヒント経験)

まず、プレイ経験の活用成功とは、事例を活用して自分がプレイをした際に得点出来たものを指す。このカウント数を対象に成功率を算出したところ、20 回の平均は 49.5 % となった。最低得点率は 36 %、最高得点率は 73 % 程度であった。

次に、ヒント経験の活用成功とは、事例を活用して自分がヒントを与え、相手が得点出来たものを指す。このカウント数を対象に成功率を同様に算出すると、20 回の平均は 9 % となった。最低得点率は 7 %、最高得点率は 12 % 程度であった。

プレイ経験に関する結果から、曖昧な条件下であっても約 5 割の成功率で事例の活用が有効である可能性が示唆された。ただし、Hanabi においては赤トークン 3 つでゲームが終了してしまうことを考えれば、5 割の成功率といっても、リスクを伴うものであるといえる。なお、今回のモデルにおいては、ランダムに手札をプレイする振る舞いは含まれていない。そのため、シミュレーション全体での得点成功率は、ほぼ 100 % である。また、今回の分析対象となった 100 試行 20 回のシミュレーションにおいて、赤トークンが 3 枚たまることによってゲームが終了することはなかった。その意味では、事例活用における類似度の基準をより弱くしたシミュレーションも有効であると考えられる。

ヒント事例に関する結果については、ヒントの機能がプレイを促すものに限らないことを考えれば、この結

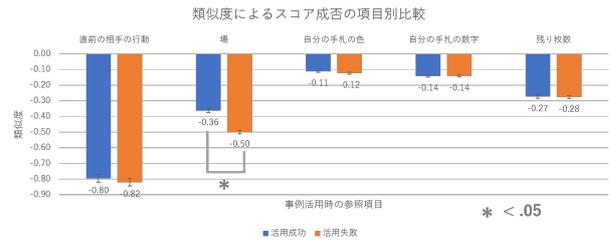


図 14: プレイ事例の類似度項目別比較



図 15: ヒント事例の類似度項目別比較

果について直接評価をすることも困難である。活用成功率を評価するための基準を今後検討する必要がある。

6.2 参照項目別の効果検討

ここでは、活用事例のどの参照項目が有効に働いて得点に結びついているのかを検討する。どの事例を活用するのかは、複数の項目の類似度を総合することで決定される。100 試行 20 回分のシミュレーションで活用された事例に対して、得点に結びついた事例とそうでない事例のそれぞれについて類似度の平均を算出し、項目別に示した。

図 14 はプレイ事例、図 15 はヒント事例に関わる結果を示している。これらの図において、類似度は-1 から 0 の範囲で表される。-1 に近いほど活用時とマッチした事例の項目内容が異なることを示し、0 に近いほどよく類似していることを示す。図から、プレイ事例における場の情報は、活用成功時のほうが、失敗時に比べて類似したものとなっている。

以上より、Hanabi 課題の遂行にあたって現状より得点を上昇させる要素として、場の情報に重みづけをするという方針が考えられる。また、事例の活用にはその際に考慮する項目によって活用の成否に影響する可能性も考えられる。これらの項目に対して、動的に重み付けを変更する処理を加えることで、事例活用の効果を高めることができる可能性がある。

7 結論

本研究では、意図伝達の背後にある処理として、事例の蓄積・活用を想定し、2プレイヤーによる Hanabi のモデルを構築した。構築したモデルは Hanabi におけるヒントとプレイの関係をコミュニケーションとして扱い、成功した事例における場や手札の情報を事例として蓄えた。さらに、複雑な状況での事例の活用を可能にするために、事例の類似計算を実装した。このような工夫を行なうことにより、モデルは試行を重ねることによるゲーム得点の増加を達成した。

本研究で構築したモデルは、事例の蓄積によるコミュニケーションの成立に関する過去の研究 [4] に比べ、複雑な状況を扱っている。また、Hanabi に関する過去のモデル [6] とも異なり、協調の成功に至るまでのプロセスを扱っている。これらの先行研究をベースとしつつ、それらを融合する試みの中で、場や手札に関する類似度の計算などの新たな仕組みの開発につながった。

今後、本研究で見いだされた課題を解決する改良が必要である。特に、現状のモデルの平均点は先行研究のものとは比べて低いものとなっている。モデルのコミュニケーションの不足を埋め、他者の意図を察するコミュニケーションに近づけるために、シミュレーション結果の分析から見いだされた課題（類似の基準の調整、より有効な項目への類似の重みづけ）を踏まえた改良が有効と考えられる。こういった検討により、モデルの完成度を高めることで、人間によるゲームプロセスのシミュレーション、さらには人間と協調するモデルの構築につなげていくことができる。

参考文献

- [1] J. R. Anderson. *How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe*. Oxford Press, 2007.
- [2] Bruno Galantucci. Experimental semiotics: A new approach for studying communication as a form of joint action. *Topics in Cognitive Science*, Vol. 1, No. 2, pp. 393–410, 2009.
- [3] 金野武司, 森田純哉, 橋本敬. 言語的コミュニケーションシステムの創発に関する実験的アプローチ. *計測と制御*, Vol. 53, No. 9, pp. 801–807, 2016.
- [4] 森田純哉, 金野武司, 奥田次郎, 鮫島和行, 李冠宏, 藤原正幸, 橋本敬. 協調的コミュニケーションを成立させる認知的要因-認知アーキテクチャによるシミュレーション. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 20, No. 4, pp. 435–446, 2018.
- [5] Hirotaka Osawa, Atsushi Kawagoe, Eisuke Sato, and Takuya Kato. Emergence of cooperative impression with self-estimation, thinking time, and concordance of risk sensitivity in playing hanabi. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 8, p. 658348, 2021.
- [6] 大澤博隆. 協力ゲーム hanabi におけるエージェント間の協調行動の分析. *人工知能学会全国大会論文集 第 29 回 (2015)*, pp. 1F23–1F23. 一般社団法人人工知能学会, 2015.
- [7] David Premack and Guy Woodruff. Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and brain sciences*, Vol. 1, No. 4, pp. 515–526, 1978.
- [8] 植田一博. 『認知的インタラクションデザイン学』の展望: 時間的な要素を組み込んだインタラクション・モデルの構築を目指して. *認知科学*, Vol. 24, No. 2, pp. 220–233, 2016.