

# 麻雀における 他家の手牌の待ち予測

松田真治

2020年2月

電気情報工学科

## 概要

先行研究において、麻雀で相手の状態を推測する場合、相手の晒しているドラの枚数や相手の捨てている牌の種類数などの情報を利用していた。これらの情報は A をした後に B をした、といったような順序を持った情報ではなく、単に A をしたという情報の集合である。

しかし実際に人間が相手の待ち牌を予測する場合、相手の打牌の順序関係から待ち牌を推測することはよくあることである。

そこで本研究では、牌の切られた順序を考慮した捨て牌の表現の仕方を考案し、それを入力として機械学習を行うことで順序を考慮しない場合と比較して f1score を 4.16 % 向上させることに成功した。

また打牌順序を考慮する手法を採用した場合、打牌回数が増えるにつれて利用できる情報量が加速度的に増える事に気づき、待ち牌の予測性能も向上すると推測した。そこで打牌回数が多かった場面に限定して打牌順序を考慮する場合・しない場合で学習を行った場合が場面を限定せずに打牌順序を考慮する場合・しない場合で学習を行った場合と比べてどれほど予測性能が向上するかの比較を行った。結果は打牌順序を考慮する場合が 2.96 % f1score が向上し、考慮しない場合は 2.12 % f1score が向上し、推測と一致した結果がでた。

## 目次

### 1. はじめに

- 1.1 研究背景
- 1.2 研究目的
- 1.3 研究手法
- 1.4 麻雀のルール
- 1.5 麻雀の用語
- 1.6 先行研究

### 2. 捨て牌の打牌順序と待ち牌の予測

- 2.1 捨て牌から他家の待ち牌を予測する際の打牌順序の重要性
- 2.2 手出しとツモ切り

### 3. 麻雀サイト天鳳の牌譜データ

### 4. 牌譜データのベクトル化

- 4.1 打牌にツモ切り・手出しの情報を持たせる重要性
- 4.2 打牌順序を考慮しない捨て牌のベクトル化
- 4.3 打牌順序を考慮する捨て牌のベクトル化
- 4.4 副露（チー）のベクトル化
- 4.5 副露（ポン）のベクトル化
- 4.6 副露（カン）のベクトル化

### 5. 実験手法

- 5.1 実験設定
- 5.2 アンダーサンプリング
- 5.3 実装

### 6. 実験結果と考察

- 6.1 ランダムに予測した場合
- 6.2 捨て牌の打牌順序を考慮しない場合と考慮する場合の比較
- 6.3 打牌回数を 10 回以上に制限した場合における打牌順序を考慮しない場合と考慮する場合の比較
- 6.4 考察

### 7. まとめと今後の課題

参考文献

付録

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

麻雀とは不完全情報ゲームである。将棋や囲碁のようにすべての情報がプレイヤーに開示されている完全情報ゲームと異なり、限られた情報の中から他のプレイヤーの状況を推察しつつ自分に与えられた手の価値の期待値を最大化するような選択を行い続けるゲームある。

例えば将来的には高くなりそうな手をもらった場合でも、他のプレイヤーにスピード感を感じた場合には、自分の手の価値を下げてでも速くあがることを優先したり、自分の手が安く勝負をする価値が低い場合でも、他のプレイヤーにのびのびとしたプレーをさせないように、ときにはブラフを用いてでも他のプレイヤーの足止めを行ったりもする。このように麻雀のような不完全情報ゲームでは自分の都合のみでプレイの選択を行うことは少なく、常に他のプレイヤーの状況を推察しながら臨機応変に立ち回りをすることが重要である。

周りの状況に臨機応変に対応しながら自分の意思決定を行う様は現実世界でいうところの押し引きと非常に類似している。したがって麻雀のような不完全情報ゲームに関する研究を行うことによって、現実で起こる押し引きの絡むような問題を解決する手助けとなる可能性があり、研究の意義は十分にあると言える。

### 1.2 研究目的

本研究の目的はオンライン麻雀サイト天鳳の牌譜を教師データとして学習を行ってモデルを作成し、そのモデルを用いて、押し引きの際に特に重要な要素の一つである他のプレイヤーの待ち牌の予測の性能を評価することである。

### 1.3 研究手法

先行研究[1][2][3][4][5]で、他のプレイヤーの捨て牌から待ち牌の予測を行う際に用いられる情報は、色ごとの捨てられた枚数や捨てられた牌の種類の枚数、手出しの回数、捨てた中張牌の種類数などの情報である。これらの情報は牌が捨てられた順序は考慮されていない。

しかし一般的には、捨て牌から他のプレイヤーの待ち牌の予測を行う際に、相手がどの順序で牌を切ったかという情報は極めて重要なものだと考えられている。そこで本研究では待ち牌予測に捨てられた牌の順序を考慮する手法を提案し、その予測性能を評価した。

### 1.4 麻雀のルール

麻雀のルールについて簡単に説明する。

まず麻雀とは 34 種\*4 枚の合計 136 枚の牌を用いて 4 人のプレイヤーが互いの得点を奪い合うゲームである。

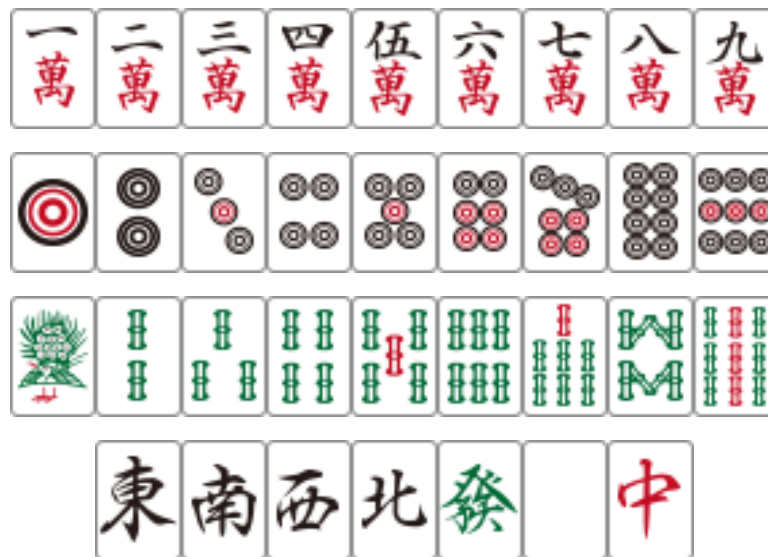


図 1-1. 麻雀牌

麻雀牌は 1~9 の牌からなる数牌と東,南,西,北,白,発,中の 7 種類からなる字牌から構成される。また数牌には萬子（マンズ）、筒子（ピンズ）、索子（ソーズ）といった種類が存在する。図 1 で言えば上の行から順番に萬子の 1~9,筒子の 1~9,索子の 1~9,字牌となっている。



図 1-2. 赤牌

また 5 萬,5 筒,5 索の各 4 枚の内 1 枚は色が赤くなっており、それぞれ赤 5 萬,赤 5 筒,赤 5 索と呼ばれ、まとめて赤牌と呼ばれる。赤牌を持った状態のまま和了することで、貰える点数が増加する。

麻雀の 1 試合は半荘という単位で呼ばれる。半荘は複数の局から成り立っており、最終局が終わった時点での得点の多寡で順位を競う。

局の開始時に各プレイヤーは 13 枚の牌を配られる（配牌）。配牌が終わると、山から 1 枚牌を引くツモという行為と手牌から牌を 1 枚捨てる打牌という行為を行う。このツモと打牌の 1 セットの動きを各プレイヤーが順番に行う。

手持ちの 13 枚にツモってきた牌 1 枚、もしくは手持ちの 13 枚に他家の捨てた牌 1 枚をあわせた 14 枚の牌が特定の形を満たし、かつ役がある場合にプレイヤーは和了（ホーラ）を宣言し、役に準ずる点数を得ることができる。

ツモってきた牌で和了することをツモと呼び、他家の捨てた牌で和了することをロンと呼ぶ。

和了を宣言するための特定の形には3つの種類があり、それぞれ一般形、七対子形、国士無双形と呼ばれる。

以下では最も基本的な一般形についてのみ説明を行う。

一般形とは1雀頭と4面子から構成される形である。

雀頭とは同じ牌2枚によって構成される形である。

面子とは3枚または4枚の牌による特定の組み合わせで、順子、刻子、槓子の3種類が存在する。

順子は種類の同じ連続した牌3枚によって構成される形である。

刻子は同じ牌3枚によって構成される形である。

槓子は同じ牌4枚によって構成される形である。



図 1-3. 雀頭の例



図 1-4. 順子の例

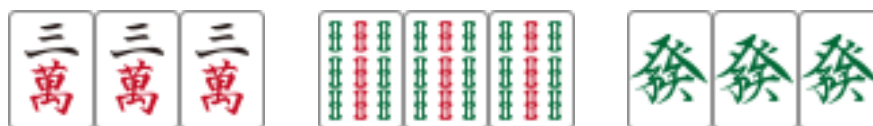


図 1-5. 刻子の例



図 1-6. 槓子の例



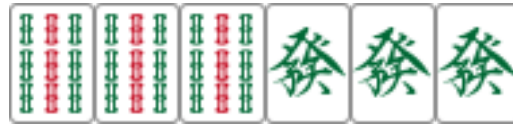


図 1-7. 和了一般形の例

また麻雀には面子を完成させる方法として副露と呼ばれるものがある。副露とは自分の手牌にあと 1 つ牌が揃えば面子が完成するという状況で、かつ他家がその足りない 1 つの牌を捨てた場合に、出来上がった面子を他家に晒すことと引き換えに、その牌を河から拾って面子を完成させることである。

副露にはチーとボンとカンが有る。

チーとは副露して順子の形を作ることであり、これは自分の上家（向かって左側のプレイヤー）の河からしか牌を拾うことができない。

ボンとは副露して刻子の形を作ることであり、全ての他家の河から牌を拾うことができる。

カンとは副露して槓子の形を作ることであり、ボンと同様に全ての他家の河から牌を拾うことができる。またカンは他家の牌を拾わずとも、自分で四枚同じ牌を集めた時点で他家に晒すことができる(暗槓)。厳密に言えば暗槓は副露ではない。

次に麻雀の役について説明する。役とは和了の形が特定の条件を満たした場合に付加されるもので、基本的に貰える点数はその役の数によって決定される。一般的なルールでは約 48 の役が存在する。

最も基本的な役は立直（リーチ）である。立直とは 1000 点支払い、自分が聴牌していることを他家に宣言することで付加される役である。

他にも 1 種類の数牌のみによって構成される清一色（チンイーソー）や么九牌を手牌に含まない断么九（タンヤオチュー）など様々な役が存在する。

例えば図 1-7 は、雀頭と全ての面子が必ず么九牌を含んでいるので混全帯么九（ホンチャンタイヤオチュー）という役が付加される。

## 1.5 麻雀の用語

**聴牌**（テンパイ） 和了に必要な牌の枚数が 1 枚の状態。

**不聴**（ノーテン） 聴牌していない状態。

**向聴数**（シャンテンスウ） 聴牌に必要な牌の枚数。

**n 向聴**（n シャンテン） 聴牌に必要な牌の枚数が n 枚の状態。

**山** ツモで取ってくる牌が並べられている場所のこと。

**河** 打牌で捨てる牌を並べる場所のこと。

**半荘**（ハンチャン） 1 ゲームの単位。

**局** ゲームの最小単位のこと。複数の局によって半荘が構成される。

**流局** 全てのプレイヤーが和了できずに終局した状態のこと。

**配牌** 局開始時に全プレイヤーに配られる 13 枚の牌のこと。

**手牌** 自分の手となる牌のこと。

**他家** (ターチャ) 自分以外のプレイヤーのこと。

**上家** (カミチャ) 左側のプレイヤーのこと。

**対面** (トイメン) 正面のプレイヤーのこと。

**下家** (シモチャ) 右側のプレイヤーのこと。

**数牌** 1~9 の牌。萬子、筒子、索子の 3 種類が存在する。

**字牌** 数牌でない牌。東南西北白発中の 7 種類が存在する。

**色** 萬子、筒子、索子の種類のこと。一色手とは混一色や清一色などの限られた種類の牌だけで構成した和了に付加される役のことを指す。

**么九牌** (ヤオチュウパイ) 数牌の 1・9 と字牌のこと。

**中張牌** (チュウチャンパイ) 数牌の 2~8 のこと。

**和了** (ホーラ) 手牌を一定の形に揃えて公開すること。他のゲームなどにおける「あがり」に相当する。

**ツモ** ツモした牌で和了すること。

**ロン** 他家の捨てた牌で和了すること。

**副露** 他家の打牌を取得することで面子を完成させること。鳴きと呼ばれることもある。

**待ち牌** 切ると他家にロンされる牌のこと。

**打牌** 牌を河に捨てること。またその牌のこと。捨てる、切る、打つなどとも言う。

**降り** 自分の和了は諦めて、他家にロンされないように安全そうな牌を切ること。

**ダブルロン** 切った牌が同時に 2 人のプレイヤーにロンされること。

**トリプルロン** 切った牌が同時に 3 人のプレイヤーにロンされること。天鳳では認められていない。

## 1.5 先行研究

### 1.5.1 SVR を用いた麻雀における捨て牌の危険度の推定[1]

目的：自分がある牌を捨てようとしているときのその牌の危険度の推定。

評価：人間の予測との一致率。

利用したパラメータ

- ・捨てようとしている牌の種類
- ・捨てようとしている牌と相手の河にある牌の数字の関係
- ・捨てようとしている牌が場に見えている枚数
- ・相手の立直の有無
- ・捨てようとしている牌での順子の作成の可否
- ・捨てようとしている牌が相手の河に存在するか
- ・捨てようとしている牌を 1 巡以内に誰かが捨てているか



- ・捨てようとしている牌を2順以内に誰かが捨てているか

### 1.5.2 麻雀における他家の手牌と街の予測に基づく放銃確率推定[2]

目的：ある局面での各牌の放銃確率の推定。

評価：実測値との比較。

利用したパラメータ

- ・ある色と字牌以外の打牌が最も長く連続した数
- ・ある色と字牌以外の打牌が最も長く連続した数\*最後の手出しがある色か字牌のフラグ
- ・最も長く連続したある色と字牌以外の打牌より前に字牌を切っているかのフラグ
- ・最も長く連続したある色と字牌以外の打牌より前にある色の牌を切っているかのフラグ
- ・捨てた字牌の種類数
- ・捨てたある色の牌の種類数
- ・手出しの回数
- ・他家の立直後に手出しした回数
- ・捨てた么九牌の種類数
- ・捨てた中張牌の種類数

### 1.5.3 ニューラルネットワークを用いた麻雀の捨て牌の危険度推定[3]

1.5.1 の手法にニューラルネットワークを適用したもの。

### 1.5.4 多人数性を分割した教師付き学習による4人麻雀プログラムの実現[4]

目的：ある局面における降りるべきかどうかの分類。

評価：牌譜との適合率。再現率。F 値との比較。

利用したパラメータ

- ・自分の向聴数
- ・自分の七対子聴牌に必要な牌の枚数
- ・自分がリーチしているか
- ・自分が親かどうか
- ・自分の副露数
- ・自分の副露により晒したドラの枚数
- ・自分の持っているドラの枚数
- ・相手がリーチしているか
- ・相手の副露数
- ・相手の副露により見えたドラの枚数
- ・自分が切りたい牌の相手に対する安全度
- ・山の残りの枚数

- ・ 槓子の数
- ・ 捨て牌にあるドラの数

### 1.5.5 麻雀の牌譜からの打ち手の評価関数の学習[5]

目的：ある局面における打牌選択。

評価：牌譜との一致率。

利用したパラメータ

- ・ 自分の門前の手牌
- ・ 自分の門前の手牌 2 枚の組み合わせ
- ・ 自分の門前の手牌 3 枚の組み合わせ
- ・ 自分の無いた牌の構成と状態
- ・ 自分の面子数
- ・ 自分の両面塔子数
- ・ 自分の嵌張塔子数と辺張塔子数の和
- ・ 自分の対子数
- ・ 自分が聴牌しているかどうか
- ・ 自分のドラの枚数
- ・ 自分が親であるかどうか
- ・ 自分がリーチしているかどうか
- ・ 自分が捨てたことのある牌
- ・ 相手の副露の構成と状態
- ・ 相手の副露回数
- ・ 相手の副露に含まれるドラの枚数
- ・ 相手が親であるか
- ・ 相手が立直しているかどうか
- ・ 相手に対する完全安牌
- ・ 筋や壁などによって安全度が高い牌
- ・ 相手の自分との点差
- ・ オーラスかどうか
- ・ 見えていない牌の残り枚数

## 2.捨て牌の打牌順序と待ち牌の予測

### 2.1 捨て牌から他家の待ち牌を予測する際の打牌順序の重要性

捨て牌から他家の待ち牌を読む場合に、打牌順序の情報が重要になる理由について例を用いて簡潔に説明する。

麻雀において数牌は端に近づけば近づくほど面子を作りにくくなる。例えば1を用いて構成できる面子は123,111の2パターンしか無いが、5を用いて構成できる面子は345,456,567,555の4パターンである。つまり1を用いて構成できる面子の数は5を用いて構成できる面子の数の半分しかない。

したがって基本的に聴牌のしやすさ、和了のしやすさの観点から考えると、数牌の利用価値は $1,9 < 2,8 < 3-7$ である。したがって、仮に自分の手牌に1と5の両方があり、かつそれが共に自分の手に不要な牌でいずれ2枚とも捨てる予定だとした場合、ある程度麻雀を勉強している人であれば、打牌の順序は1,5の順になるのが普通である。しかし実際に麻雀を遊んでみると往々にして5,1の順で打牌することがある。この順番に打牌する理由は様々である。例を挙げると、雀頭と全ての面子が么九牌を含んだ時に付加される役である混全帯么九などを狙っていることなどが考えられる。したがって1,5の順で打牌されている場合に比べると5,1の順で打牌されている場合の方がわずかに端に寄っている数牌や字牌の危険度が高く、中に寄っている数牌の危険度は低くなると考えことができる。

このように捨て牌の情報に打牌順序の情報をもたせると推測できる要素が増える。ここで本研究では、捨て牌のデータを、単なる捨て牌の集合で表すのではなく、打牌された順序を織り込む手法を考えた。

### 2.2 手出しとツモ切り

麻雀では牌の切り方に2つのパターンがある。手出しとツモ切りである。手出しとは牌を山からツモした後、もともと手牌にあった牌を切ることである。それに対してツモ切りとは牌を山からツモした後、そのツモした牌をそのまま切ることである。

この2つは似ているようで大きく意味が異なる。

手出しされた牌とは、何らかの理由があって手牌に残していたが、ツモってきた牌の価値がより高かったために切られてしまった牌である。言い換えれば捨て牌にある牌よりは価値が高く、手牌にある牌よりは価値が低い牌である。

一方ツモ切りされた牌とは手牌にある牌よりは価値が低い、捨て牌にある牌より価値が高いとは必ずしも言えない牌である。

上の例では5,1の順で牌を切った場合、端に寄っている数牌や字牌の危険度が増し、中に寄っている牌の危険度は低くなると述べたが、1がツモ切りだった場合、この推測は成立しない。あくまで、この推測は1と5が直接比較された結果、1のほうが手牌に残す価値が高いと考え

られて、5 が捨てられたことが前提となっているためである。例えば 5 を引いて 5 を捨て、1 を引いて 1 を捨てた場合などは当然当てはまらない。

したがって捨て牌の情報に打牌順序の情報を織り込む際には、切られた牌が手出しであるかツモ切りであるかという情報も合わせて織り込むことによって、より待ち牌予測の性能が向上する可能性がある。

### 3.麻雀サイト天鳳の牌譜データ

機械学習による待ち牌予測の性能評価のために、本研究ではオンライン麻雀サイト天鳳の牌譜データを利用した。天鳳とは最大手のオンライン麻雀サイトであり、オンラインで麻雀対戦をすることができる一方、その対戦データは牌譜として記録され、天鳳の開発者によって無償で公開[6]されている。

本研究では天鳳五段以上の実力者のみがプレイできる鳳凰卓の牌譜を性能評価のために利用した。期間は2017年度のもので、ルールは最も一般的なルールである四人打ち、東南戦、赤有り、喰断么九有りのものに限定した。

この条件を満たすXMLファイルの件数は199949であった。また、総和了件数は1670121、10回以上打牌を行っている総和了件数は1092518であった。

天鳳の牌譜はXMLファイルによって特殊な形式で表現されているため、研究で用いるためには解析を行う必要がある。解析については小林聡氏のブログ[7][8][9][10]を参考にした。解析した牌譜から得られる情報を機械学習の入力として扱うためにベクトル化する手法は、次の章で説明している。

牌譜の解析について簡単に説明する。

天鳳の牌譜は拡張子こそXMLであるが、その内容はXMLの仕様に準拠しておらず、実質天鳳の独自構文であると考えて良いものである。

天鳳の牌譜は1つのXMLファイルが1半荘を表している。ゲーム中に起こった事象はタグとその属性に表現によって表現され、事象が起きた順にそのまま並べられている。閉じタグなども存在していない。

<INIT>タグは局の開始を表現し、<AGARI>タグ、<RYUKYOKU>タグはそれぞれ、和了があった場合の情報、和了がなかった場合の情報が表現されている。<AGARI>タグも<RYUKYOKU>タグも共に局の終了を表現するタグでもある。すなわち<INIT>タグから<AGARI>タグまたは<RYUKYOKU>タグまでで一局を表現している。1つのXMLファイルにこの<INIT>タグから<AGARI>タグまたは<RYUKYOKU>タグまでの集合が局数分書かれている。ただしダブロンが生じた場合は<INIT>(途中の情報)<AGARI><AGARI>などの形で表現される。

開局から終局までのツモ情報や打牌情報、副露情報、立直情報などは<INIT>タグ～<AGARI>タグまたは<RYUKYOKU>タグの間に羅列されている。本研究では和了の情報のみを利用するため、<INIT>タグ～<AGARI>タグまでの情報のみを利用した。

本研究で利用したタグについて簡潔に説明する。

まず前提として、天鳳の牌譜では136枚の牌に0~135までの牌番号が振られている。

ツモ情報は<T(牌番号)>, <U(牌番号)>, <V(牌番号)>, <W(牌番号)>の形で表記されている。T,U,V,Wは誰がツモしたかを表現している。

打牌情報は<D(牌番号)>, <E(牌番号)>, <F(牌番号)>, <G(牌番号)>の形で表記されている。同様に D,E,F,G も誰が打牌したのかを表現している。T,U,V,W の表すプレイヤーはそれぞれ DEFG の表すプレイヤーと対応している。

例えば A さんが 0 の牌をツモって 0 の牌を打牌し、その次に B さんが 1 の牌をツモして 2 の牌を打牌した場合は<T0><D0><U1><E2>のように表現される。打牌が手出しだったかツモ切りかなどの情報は牌譜には含まれていないのでツモした牌の牌番号と捨てた牌の牌番号が同値かどうかを比較して、自分で判定を行う必要がある。

和了情報は<AGARI>タグで表現されている。AGARI タグは複数の属性を持つ。本研究で利用したのは和了したプレイヤーが誰かを表す who 属性、和了したときの和了したプレイヤーの手牌を表す tehai 属性、どの牌で和了したかを表す machi 属性、和了したプレイヤーの副露状況を表す m 属性である。

machi 属性はどの牌で和了したかを表現しており、厳密には待ち牌を表現しているわけではない。例えば下図の和了例を見てみる。

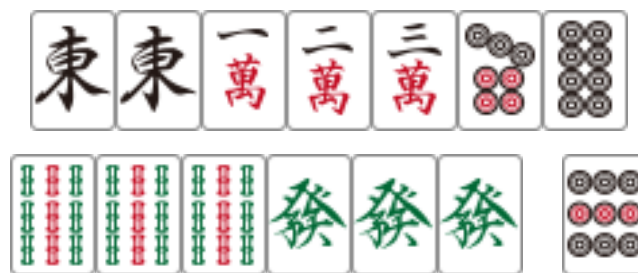


図 3-1. 和了の例

上の例について 9 筒で和了したとする。すると牌譜上の AGARI タグの machi 属性には 9 筒に対応する牌番号が記録される。しかし、実際は 6 筒も待ち牌である。したがって厳密な待ち牌は牌譜に記録されていないため、自分で検出しなければならない。その手順について説明する。

まず tehai 属性から手牌情報を抜き出す。次に machi 属性からどの牌で和了したかを抜き出し、その牌を手牌から消し、和了する一步手前の状態を再現する。次に 34 枚の牌全てについて、1 萬 + 手牌, 2 萬 + 手牌, ..., 西 + 手牌, 北 + 手牌 が和了しているかどうかを判定しする。和了状態ならば手牌に足したその牌は待ち牌である。和了であるかどうかは深さ優先探索などを使えば判定できる。

m 属性では副露を 16bit のを用いて独特な形で表現しているため、詳細は上記の小林氏のブログを参考していただきたい。

## 4. 牌譜データのベクトル化

### 4.1 打牌にツモ切り・手出しの情報を持たせる表現

ツモ切りした牌と手出しした牌を違う牌だとみなすと、牌の種類は合計 74 種類と考えることができる。

したがって以下のような対応をさせることで 0~73 の番号でツモ切り・手出しの情報を持った牌の表現ができる。

表 4-1. 牌と番号の対応付け

| 牌                     | 番号    |
|-----------------------|-------|
| ツモ切り 1 萬~9 萬          | 0~8   |
| ツモ切り 1 筒~9 筒          | 9~17  |
| ツモ切り 1 索~9 索          | 18~26 |
| ツモ切り東、南、西、北           | 27~30 |
| ツモ切り白、発、中             | 31~33 |
| ツモ切り赤 5 萬、赤 5 筒、赤 5 索 | 34~36 |
| 手出し 1 萬~9 萬           | 37~45 |
| 手出し 1 筒~9 筒           | 46~54 |
| 手出し 1 索~9 索           | 55~63 |
| 手出し東、南、西、北            | 64~67 |
| 手出し白、発、中              | 68~70 |
| 手出し赤 5 萬、赤 5 筒、赤 5 索  | 71~73 |

### 4.2 打牌順序を考慮しない捨て牌のベクトル化

打牌順序を考慮しない捨て牌とは、要するに何を切ったかという情報である。4-1 の捨て牌からデータを抽出する事を考える。



図 4-1. 捨て牌例（すべてツモ切りとする）

機械学習の入力ベクトルとして初期値 0 の 74bit の数列を考える。次に捨て牌のそれぞれの牌番号について対応する bit を 1 にする。図 4-1 の場合は 4,11,23,27bit 目の値を 1 にすれば良い。

|        |        |   |         |   |          |   |          |
|--------|--------|---|---------|---|----------|---|----------|
| 0bit 目 | 1bit 目 | ～ | 4 bit 目 | ～ | 11 bit 目 | ～ | 73 bit 目 |
| 0      | 0      | ～ | 1       | ～ | 1        | ～ | 0        |

図 4-2. 打牌順序を考慮しない捨て牌を表すベクトルのイメージ

### 4.3 打牌順序を考慮する捨て牌のベクトル化

順序関係の情報を持った捨て牌のベクトル化について説明する。

簡潔に言えば任意の 2 枚の牌を捨てる順序対について一意に番号を割り当てて表現すれば良い。2 枚の牌の組み合わせは高々  $74 * 74 = 5476$  であるから、予め 2 枚の牌の打牌順序を 0~5475 の番号に対応する方法を決めておけば、任意の打牌の順序関係を表現することができる。

本研究では(先に捨てた牌の牌番号) \* 74 + (後に捨てた牌の牌番号)という式を用いて、打牌された順序を保った 2 枚の牌の対を番号で表現した。

例として図 4-2 の捨て牌から打牌順序を考慮する捨て牌のベクトル化を示す。

はじめに捨て牌からすべての打牌順序を抜き出す。図 4-1 の場合は (ツモ切り 5 萬, ツモ切り 3 筒), (ツモ切り 5 萬, ツモ切り 6 索), (ツモ切り 5 萬, ツモ切り 東), (ツモ切り 3 筒, ツモ切り 6 索), (ツモ切り 3 筒, ツモ切り 東), (ツモ切り 6 索, ツモ切り 東)である。これを牌番号に置き換える。置き換えたものが(4,11),(4,23),(4,27),(11,23),(11,27),(23,27)である。これらの番号の組み合わせを上記の(先に捨てた牌の牌番号) \* 74 + (後に捨てた牌の牌番号)という式に通すとそれぞれ 307,319,323,837,841,1729 となる。

よって入力ベクトルとして初期値 0 の 5476bit の数列を考える。次に上で求めた番号について対応する bit を 1 にする。図 4-1 の場合は 307,319,323,837,841,1729 bit 目の値を 1 にすればよい。

|         |   |           |   |            |   |            |
|---------|---|-----------|---|------------|---|------------|
| 0 bit 目 | ～ | 307 bit 目 | ～ | 1729 bit 目 | ～ | 5475 bit 目 |
| 0       | ～ | 1         | ～ | 1729       | ～ | 0          |

図 4-3. 打牌順序を考慮する捨て牌を表すベクトルのイメージ

このようにすることで、任意の 2 つの牌を切った順序をベクトル化することができ、入力に打牌順序の情報を与えることができる。

### 4.4 副露（チー）のベクトル化

赤牌を含むかどうかで 2 パターン存在する。

どこの牌を鳴いたかで 3 パターン存在する。

副露した牌の中で最小の牌番号をもつ牌の種類で 21 パターン存在する。具体的に説明する。123 チーの場合 1,234 チーの場合 2,...,789 チーの場合 7 のようにチーの場合、最小の牌の番号は 1~7 の 7 種類で、それが萬子、筒子、索子の 3 種類ずつあるので合計 21 種類である。



したがって  $2 * 3 * 21 = 126$  より全てのチーは適宜 0~125 の番号に対応させることでベクトル化できる。

#### 4.5 副露（ポン）のベクトル化

赤牌を含むかどうかで 2 パターン存在する。

どの牌を鳴いたかで 34 パターン存在する。

したがって  $2 * 34 = 68$  より全てのポンは適宜 0~67 の番号に対応させることでベクトル化できる。

#### 4.6 副露（カン）のベクトル化

カンの種類（暗カン・明カン・加カン）で 3 パターン存在する。

どの牌を鳴いたかで 34 パターン存在する。

したがって  $3 * 34 = 102$  より全てのカンは適宜 0~101 の番号に対応させることでベクトル化できる。

## 5.実験手法

### 5.1 実験設定

和了する一步手前の状態を牌譜から抜き出し、以下の2通りの方法でベクトル化する。

(a1)打牌順序を考慮しない捨て牌 + 副露

(a2)打牌順序を考慮する捨て牌 + 副露

ベクトル化された情報を入力として機械学習を行い、待ち牌の予測性能について評価を行う。

また、N回打牌を行った捨て牌について、打牌順序を考慮しない捨て牌は高々N個の牌の集合であるのに対し、打牌順序を考慮する捨て牌は高々 $\binom{n}{2}$ 個の打牌の順序対の集合である。したがって打牌回数が増えれば増えるほど、打牌順序を考慮する場合の捨て牌の情報量が、打牌順序を考慮しない捨て牌の情報よりも大きくなると推測し、以下の2通りの方法でベクトル化した情報も入力として機械学習を行い、待ち牌の予測性能の向上を比較した。

(b1)打牌順序を考慮しない捨て牌（打牌10回以上） + 副露

(b2)打牌順序を考慮する捨て牌（打牌10回以上） + 副露

### 5.2 アンダーサンプリング

本研究では、ある牌が待ち牌となるサンプルを正例、待ち牌でないサンプルを負例と定義する。

ある牌に着目したとき、全サンプルのうちの正例となるサンプルは1%~10%程度である。そのまま機械学習を行うと、ほとんどの場合において待ち牌ではないと予測するように学習し、accuracy90%以上を達成することができないが意味がない。

そこで学習を行う前に、データの負例の数を正例の数に合わせる事によって、効率の良い学習を進めることができる。この作業はアンダーサンプリングと呼ばれる。

本研究では数牌については正例40000件、負例40000件になるようにサンプリングを行った。字牌については正例がすくなかったため、正例10000件、負例10000件になるようにサンプリングを行った。

またテストで用いるサンプルはアンダーサンプリングを行っていないものの中からランダムに8万件を選んだ。

### 5.3 実装

Chainerで3層ニューラルネットを構築して学習を行った。第1層の入力数は入力次元数、出力数は100。第2層の入力数は100、出力数は100。第3層の入力数は100、出力数は2。最適化関数はAdamを利用した。

エポック数50、バッチサイズ16で学習を行う。

データは70%を訓練データセットとして、30%を検証データセットとして利用する。

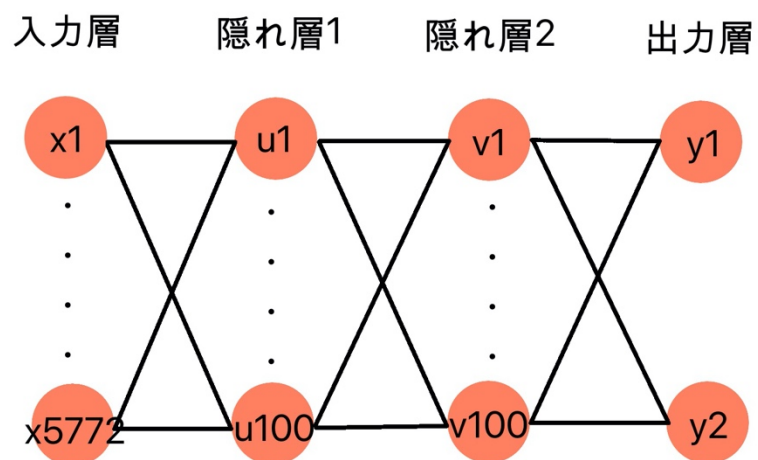


図 5-1. NN イメージ図

## 6. 実験結果と考察

### 6.1 ランダムに予測した場合

比較のためにランダムに待ち牌かどうかを判定した場合の結果を示す。

正例だと判定する割合を  $a$ , サンプルのうちの正例の割合を  $b$  とすると,  $tp$ ,  $fp$ ,  $fn$ ,  $tn$  は以下のようになる。

$$\begin{aligned} tp &= ab \\ fp &= a(1 - b) \\ fn &= (1 - a)b \\ tn &= (1 - a)(1 - b) \end{aligned}$$

よって評価指標 precision, recall, f1score は以下のようになる。

$$\begin{aligned} precision &= \frac{tp}{tp + fp} = b \\ recall &= \frac{tp}{tp + fn} = a \\ f1score &= \frac{2 * precision * recall}{precision + recall} = \frac{2ab}{a + b} \end{aligned}$$

ここで f1score を最大にするような  $a$  を考える。上の式は

$$\frac{2ab}{a + b} = \frac{2b(a + b)}{a + b} - \frac{2b^2}{a + b} = 2b - \frac{2b^2}{a + b}$$

と変形できるので  $a = 1$ 、すなわち全てを正例だと判定した時に、最大の f1score を出すことができる。

各牌について全てを正例だと判定した場合の詳細な結果が付録の表 1 である。

### 6.2 捨て牌の打牌順序を考慮しない場合と考慮する場合の比較

- ・打牌順序を考慮しない捨て牌 + 副露
- ・打牌順序を考慮する捨て牌 + 副露

を入力として、それぞれ学習を行った。打牌情報を考慮しない場合の詳細なデータは付録の表

2、打牌情報を考慮する場合の詳細なデータが付録の表 3 である。

付録の表 2, 表 3 のデータを使って

- ・ランダムに判定した場合と打牌順序を考慮しない場合の f1score の比較

- ・ランダムに判定した場合と打牌順序を考慮する場合の f1score の比較
  - ・打牌順序を考慮しない場合と打牌順序を考慮しない場合の f1score の比較
- をしたものが以下の図である。

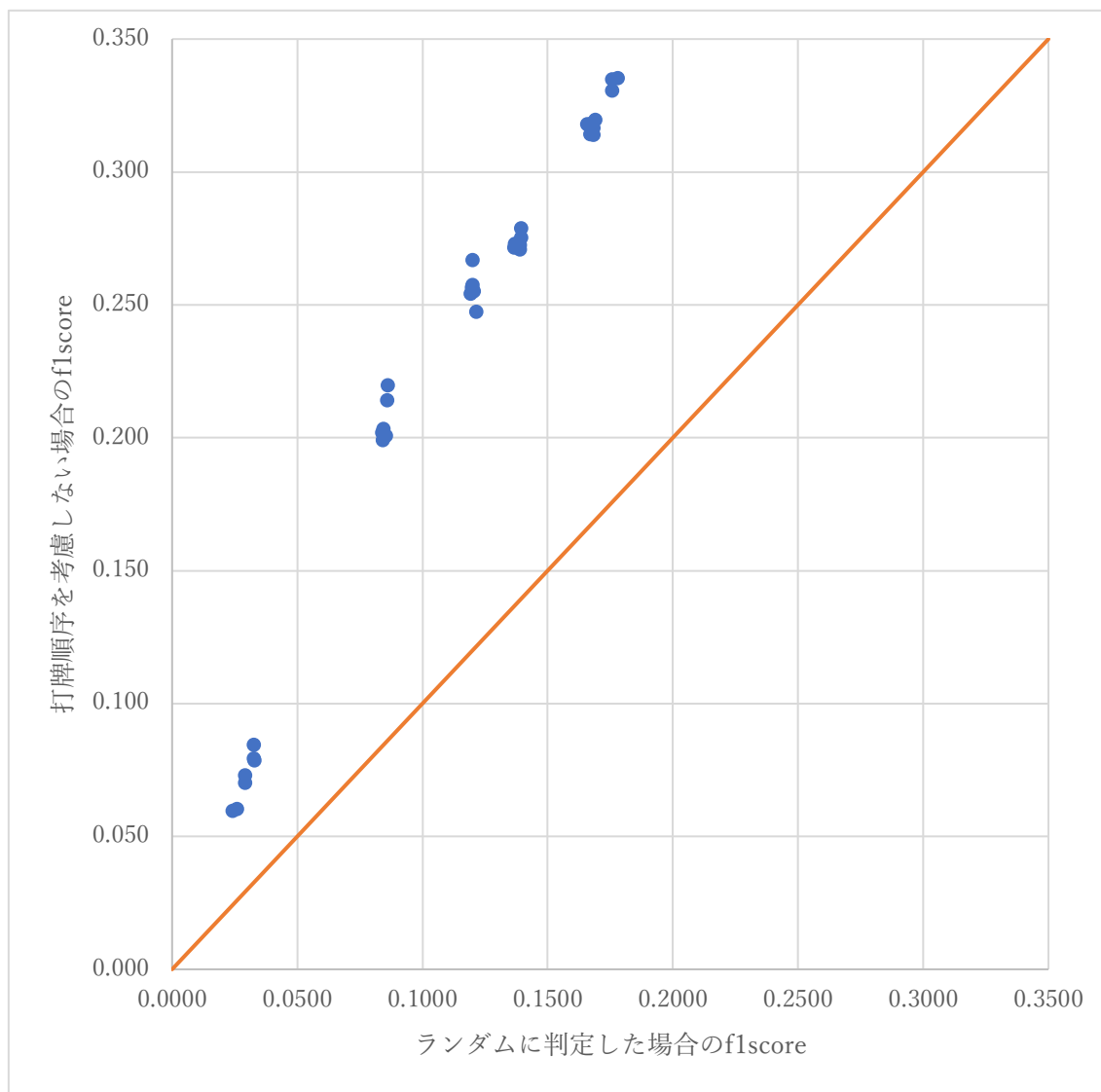


図 6-1. ランダムに判定した場合と打牌順序を考慮しない場合の f1score の比較

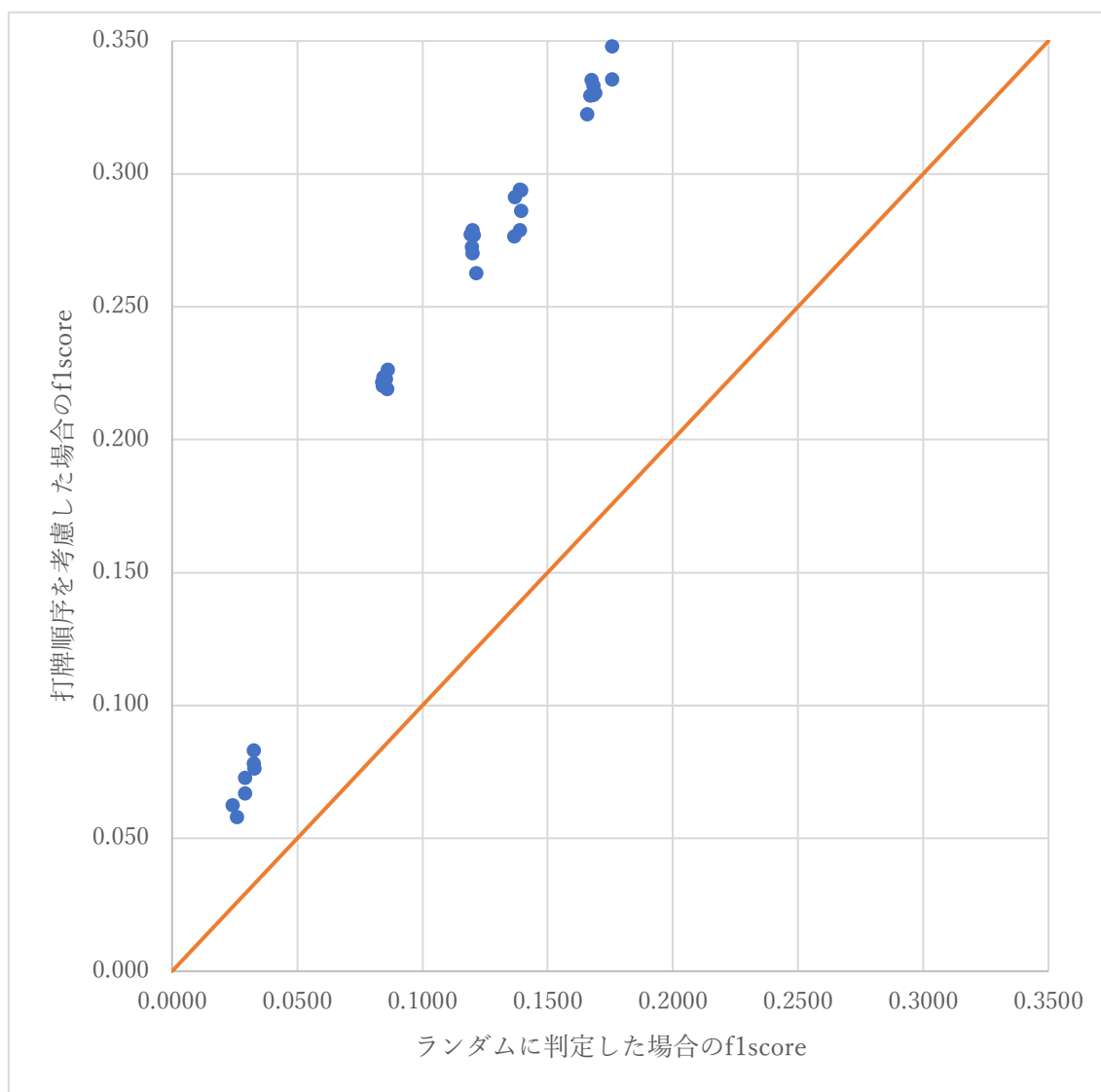


図 6-2. ランダムに判定した場合と打牌順序を考慮する場合の f1score の比較

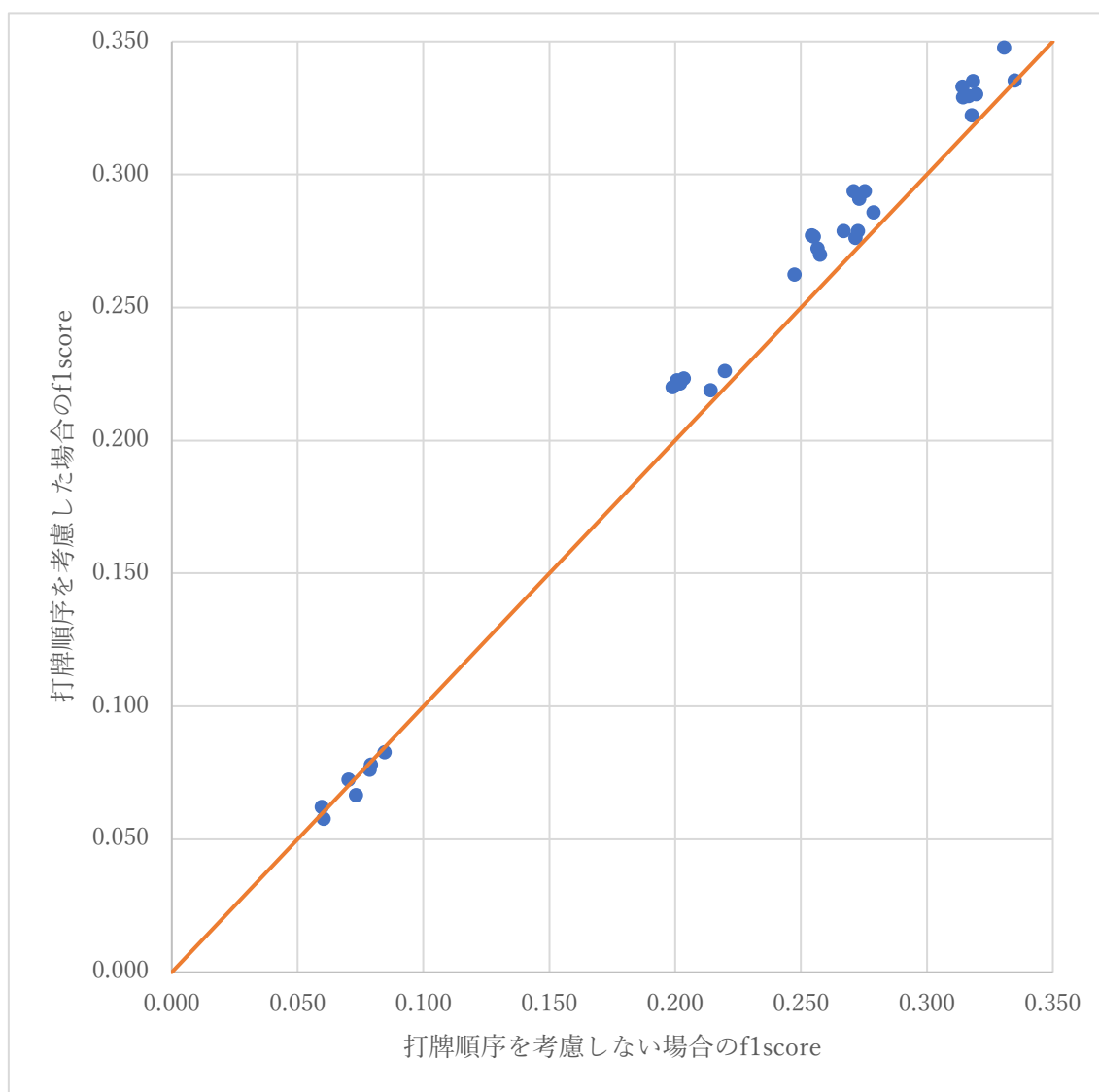


図 6-3. 打牌順序を考慮しない場合と打牌順序を考慮する場合の f1score の比較

図 6-1 からランダムに判定する場合と打牌順序を考慮しない場合では全ての牌において打牌順序を考慮しない場合の方が待ち牌予測の精度が高くなることが分かった。

図 6-2 から、ランダムに判定する場合と打牌順序を考慮する場合では全ての牌において打牌順序を考慮する場合の方が待ち牌予測の精度が高くなることが分かった。

また付録の表 2, 表 3, 図 6-3 から打牌順序を考慮しない場合と打牌順序を考慮する場合を比較すると、南、北、白、発、中の 5 種類の牌においては打牌順序を考慮しない場合の方が待ち牌予測の精度が高いが、平均では打牌順序を考慮する場合の方が 4.16 % f1score が向上した。

### 6.3 打牌回数を 10 回以上に制限した場合における打牌順序を考慮しない場合と考慮する場合の比較

- ・打牌順序を考慮しない捨て牌（打牌 10 回以上） + 副露
- ・打牌順序を考慮する捨て牌（打牌 10 回以上） + 副露

を入力として、それぞれ学習を行った。打牌情報を考慮しない場合の詳細なデータは付録の表 4、打牌情報を考慮する場合の詳細なデータが付録の表 5 である。

付録の表 4,表 5 から

- ・打牌順序を考慮しない場合（打牌回数の制限なし）と打牌順序を考慮しない場合（打牌回数 10 回以上）の比較

- ・打牌順序を考慮する場合（打牌回数の制限なし）と打牌順序を考慮する場合（打牌回数 10 回以上）の比較

をまとめたものが以下の図である。



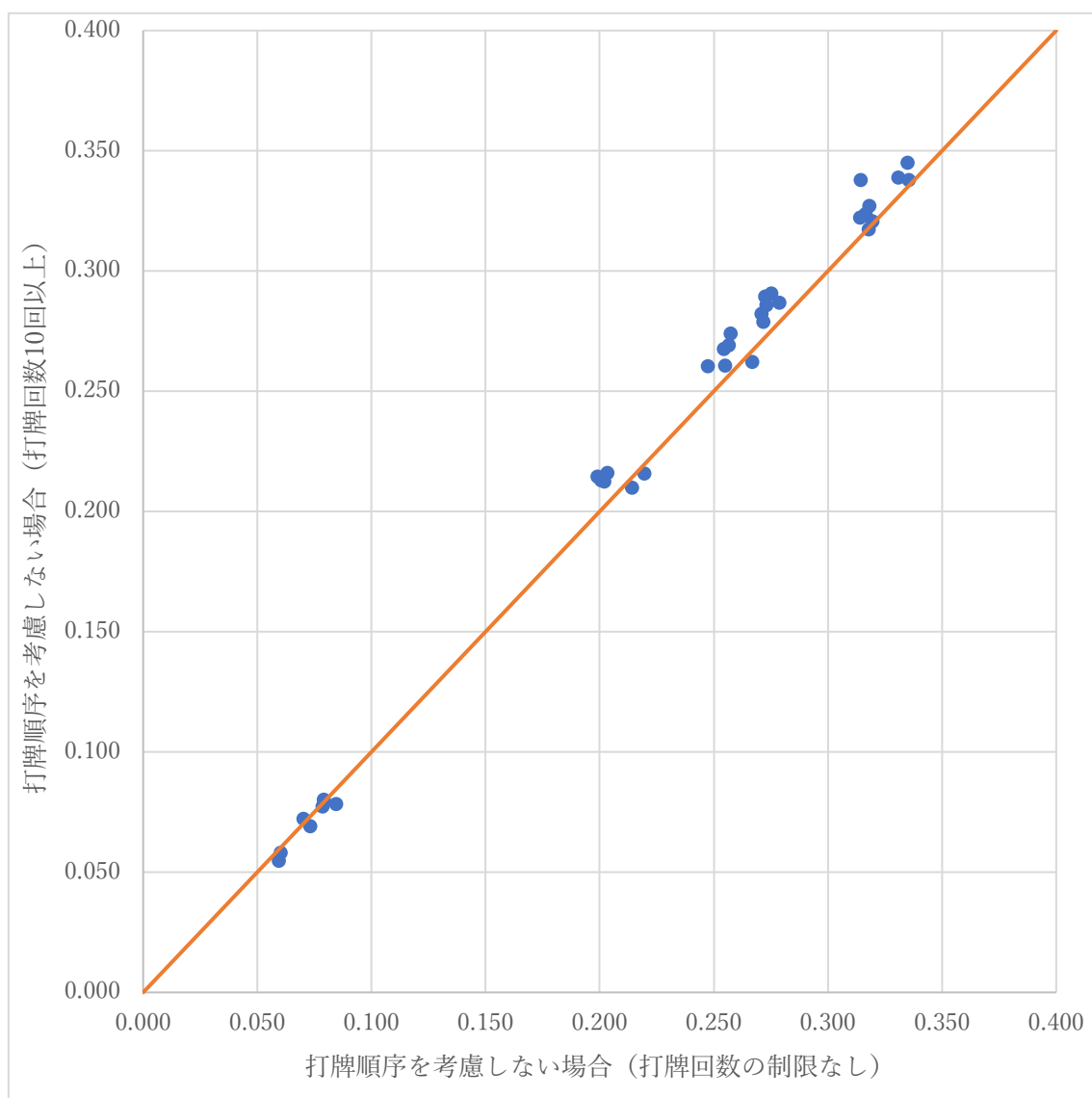


図 6-4 打牌順序を考慮しない場合（打牌回数の制限なし）と  
打牌順序を考慮しない場合（打牌回数 10 回以上）の f1score の比較

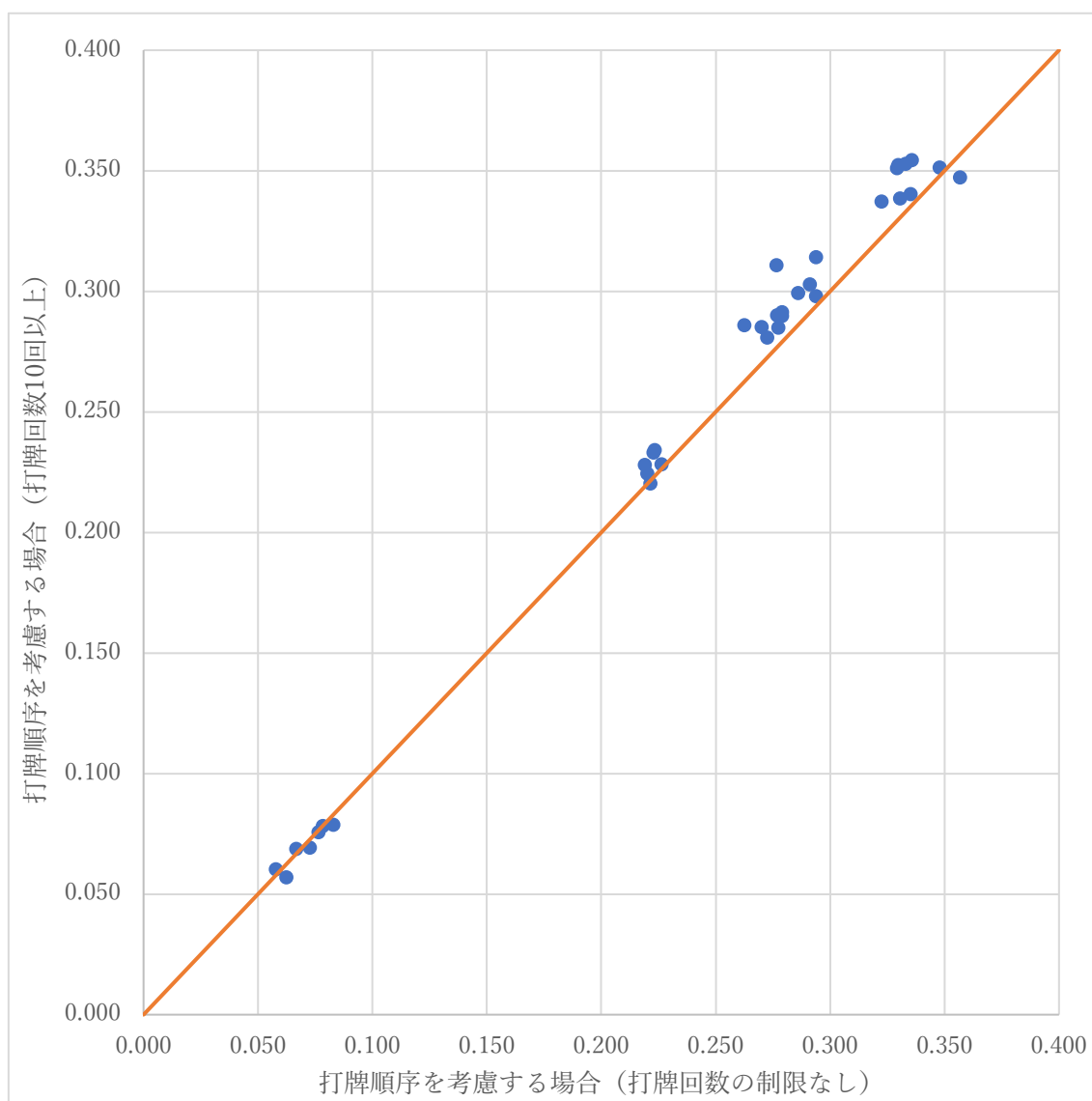


図 6-5 打牌順序を考慮する場合（打牌回数の制限なし）と  
打牌順序を考慮しない場合（打牌回数 10 回以上）の f1score の比較

打牌順序を考慮しない場合、打牌回数を 10 回以上に制限すると、打牌回数を制限しない場合と比較して、2 萬、9 筒、1 筒、4 索、南、西、北、白、中の 9 種類の牌については f1score が下がった。平均すると 2.12 % f1score が向上した。

打牌順序を考慮する場合、打牌回数を 10 回以上に制限すると、打牌回数の制限をしない場合と比較して、5 萬、9 筒、東、西、白、中の 5 種類の牌については f1score が下がった。平均すると 2.96 % f1score が向上した。

当初の予想通り、打牌順序を考慮する場合の方が f1score の伸びが良くなっている。

打牌回数を 10 回以上に制限した場合における、打牌順序を考慮しない場合と打牌順序を考慮する場合の f1score の比較が下図である。

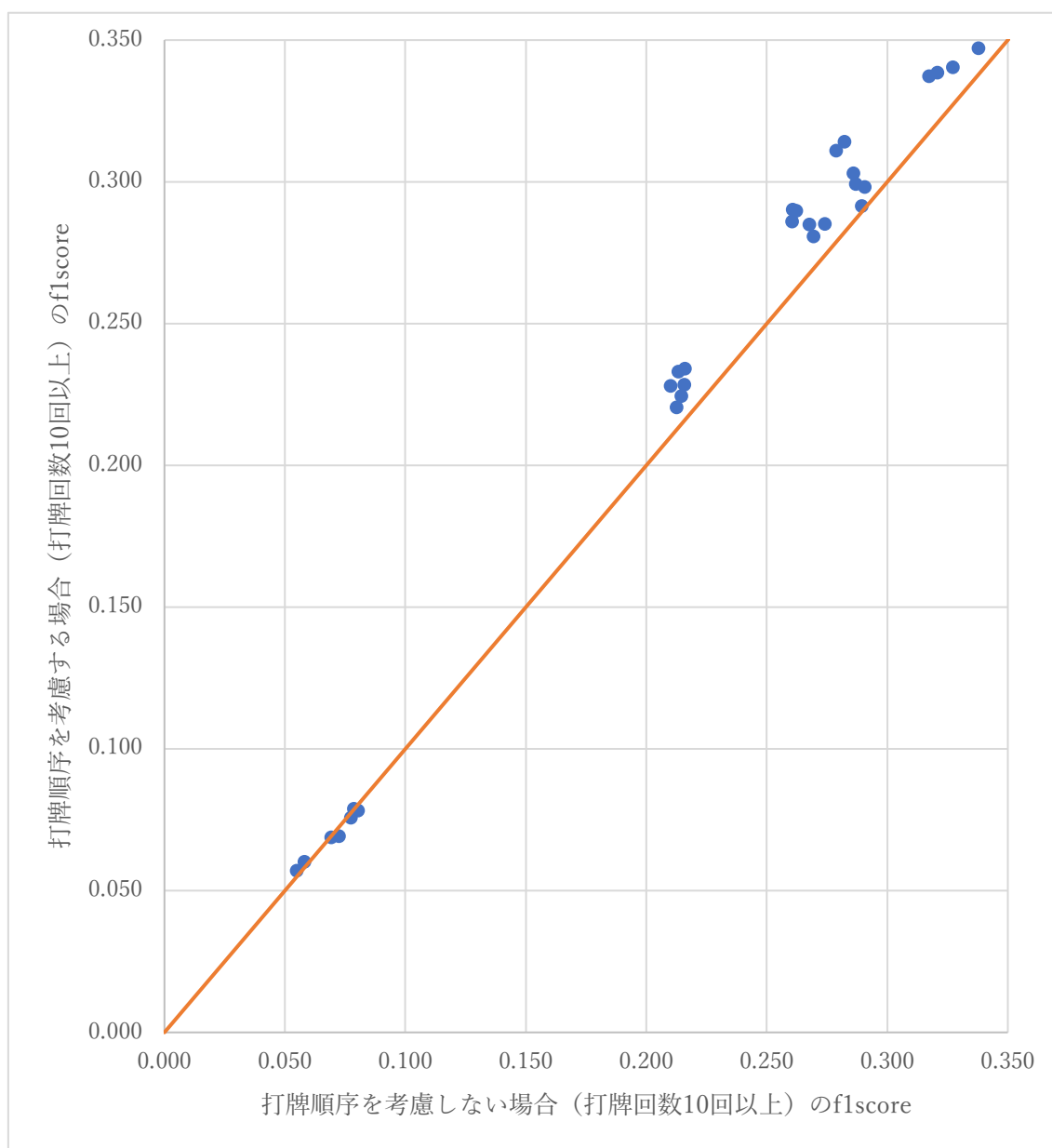


図 6.6 打牌順序を考慮しない場合（打牌回数 10 回以上）と  
打牌順序を考慮する場合（打牌回数 10 回以上）の f1score の比較

打牌順序を考慮しない場合（打牌回数 10 回以上）と比較して、打牌順序を考慮する場合（打牌回数 10 回以上）は、東、南、西、白、発の 5 種類の牌については f1score が下がった。平均すると 5.01 % f1score が向上した。

## 6.4 考察

打牌の順序を考慮する捨て牌を入力として機械学習を行えば、考慮しない場合を入力として学習した場合と比較して飛躍的に良い待ち牌予測の精度が出ると考えて実験を行ったが、実際は平均で見ると 4.16 % f1score が向上したばかりであった。

この原因としては、捨て牌の打牌のすべての順序関係を拾ってしまうことによって、ノイズとなるような情報も拾っていることなどが考えられる。例えば第 1 打と第 16 打の打牌の关系到重要な情報が含まれることは殆どない。

また打牌順序を考慮することによっては予測精度が下がっている牌があった。打牌回数を制限しない場合は南、北、白、発、中の予測精度が下がり、打牌回数を 10 回以上に制限した場合は東、南、西、白、発の予測精度が下がった。

予測精度が下がった牌は全て字牌である。これは直感的には理解のできる結果である。字牌は数牌と違い順子を作ることが出来ず、人間の場合でも待ちの予測がしにくい牌だからである。

また打牌の制限をしない場合の予測精度から打牌の回数を 10 回以上にするという制限を設けた場合の予測精度の上昇幅は、打牌の順序を考慮する場合の方が考慮しない場合よりも大きくなると予想していたが、牌の番号によっては予測の精度が下がっているものもあった。

この原因は打牌の回数を 10 回以上に制限することで、上記にあげたようなノイズとなるような情報も拾いやすくなっているからなどが考えられる。

## 7. まとめと今後の課題

学習に用いる捨て牌情報について、打牌の順序を考慮することで、打牌の順序を考慮しない場合と比較して、待ち牌の予測の f1score が平均 4.16 %が向上した。

打牌の順序関係を考慮しない場合、打牌の回数を 10 回以上に制限すると、打牌の回数を制限していないときと比較して、待ち牌予測の f1score が 2.12 % 向上した。

打牌の順序関係を考慮する場合、打牌の回数を 10 回以上に制限すると、打牌の回数を制限していないときと比較して、待ち牌予測の f1score が 2.96%向上した。

したがって打牌回数を制限したことによる f1score の上昇幅は、打牌順序を考慮する場合の方が考慮しない場合と比較して大きかった。

今後の課題としては、打牌の順序を考慮した捨て牌の情報に重み付けを行う手法の発案がある。

例えば、以下のような要素を考えることができる。

- ・打牌された間隔が長い場合は、情報の重みを小さくする。逆に間隔が短い場合は重みを大きくする。
- ・序盤の打牌の情報より終盤の捨て牌の情報の重みを大きくする。
- ・牌譜で直接表記されていない情報（ドラ、安牌）などの情報を重み付けに利用する。

## 参考文献

- [1] 我妻敦,原田将旗,森田一,古宮嘉那子,小谷善行. SVR を用いた麻雀における捨て牌危険度の推定. 報告ゲーム情報学(GI), Vol. 2014-GI-31, No. 12, pp. 1-3, 2014-03-10
- [2] 栗田萌,保木邦仁. 麻雀における他家の手牌と待ちの予測に基づく放銃確率推定. 報告ゲーム情報学(GI), Vol. 2017-GI-38, No. 5, pp. 1-8, 2017-07-08
- [3] 矢ノ口裕貴,篠埜功. ニューラルネットワークを用いた麻雀の捨て牌危険度推定. 第 79 回全国大会講演論文集, Vol. 2017, No. 1, pp. 469-470, 2017-03-16
- [4] 水上直紀,中張遼太郎,浦晃,三輪誠,鶴岡慶雅,近山隆. 多人数性を分割した教師付き学習による 4 人麻雀プログラムの実現. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 11, pp. 2410-2420, 2014-11-15
- [5] 北川竜平,三輪誠,近山隆. 麻雀の牌譜からの打ち手評価関数の学習. ゲームプログラミングワークショップ 2007 論文集, Vol. 2007, No. 12, pp. 76-83, 2007-11-09
- [6] オンライン対戦麻雀 天鳳 / ログ, <https://tenhou.net/sc/raw/>
- [7] 天鳳の牌譜を解析する(1),  
<https://blog.kobalab.net/entry/20170225/1488036549>
- [8] 天鳳の牌譜を解析する(2),  
<https://blog.kobalab.net/entry/20170228/1488294993>
- [9] 天鳳の牌譜を解析する(3),  
<https://blog.kobalab.net/entry/20170312/1489315432>
- [10] 天鳳の牌譜を解析する(4),  
<https://blog.kobalab.net/entry/20170720/1500479235>

## 付録

表 1. 全て正例だと判定したときの評価

| 牌   | 正例の割合  | precision | recall | f1score |
|-----|--------|-----------|--------|---------|
| 1 萬 | 0.0446 | 0.0446    | 1.0000 | 0.0854  |
| 2 萬 | 0.0638 | 0.0638    | 1.0000 | 0.1200  |
| 3 萬 | 0.0749 | 0.0749    | 1.0000 | 0.1393  |
| 4 萬 | 0.0923 | 0.0923    | 1.0000 | 0.1690  |
| 5 萬 | 0.0977 | 0.0977    | 1.0000 | 0.1780  |
| 6 萬 | 0.0914 | 0.0914    | 1.0000 | 0.1675  |
| 7 萬 | 0.0746 | 0.0746    | 1.0000 | 0.1389  |
| 8 萬 | 0.0646 | 0.0646    | 1.0000 | 0.1213  |
| 9 萬 | 0.0450 | 0.0450    | 1.0000 | 0.0861  |
| 1 筒 | 0.0448 | 0.0448    | 1.0000 | 0.0857  |
| 2 筒 | 0.0641 | 0.0641    | 1.0000 | 0.1204  |
| 3 筒 | 0.0749 | 0.0749    | 1.0000 | 0.1393  |
| 4 筒 | 0.0918 | 0.0918    | 1.0000 | 0.1682  |
| 5 筒 | 0.0963 | 0.0963    | 1.0000 | 0.1757  |
| 6 筒 | 0.0917 | 0.0917    | 1.0000 | 0.1681  |
| 7 筒 | 0.0745 | 0.0745    | 1.0000 | 0.1387  |
| 8 筒 | 0.0634 | 0.0634    | 1.0000 | 0.1192  |
| 9 筒 | 0.0437 | 0.0437    | 1.0000 | 0.0838  |
| 1 索 | 0.0439 | 0.0439    | 1.0000 | 0.0841  |
| 2 索 | 0.0638 | 0.0638    | 1.0000 | 0.1199  |
| 3 索 | 0.0732 | 0.0732    | 1.0000 | 0.1365  |
| 4 索 | 0.0904 | 0.0904    | 1.0000 | 0.1657  |
| 5 索 | 0.0962 | 0.0962    | 1.0000 | 0.1756  |
| 6 索 | 0.0910 | 0.0910    | 1.0000 | 0.1668  |
| 7 索 | 0.0735 | 0.0735    | 1.0000 | 0.1369  |
| 8 索 | 0.0636 | 0.0636    | 1.0000 | 0.1195  |
| 9 索 | 0.0440 | 0.0440    | 1.0000 | 0.0843  |
| 東   | 0.0147 | 0.0147    | 1.0000 | 0.0290  |
| 南   | 0.0147 | 0.0147    | 1.0000 | 0.0290  |
| 西   | 0.0122 | 0.0122    | 1.0000 | 0.0242  |
| 北   | 0.0130 | 0.0130    | 1.0000 | 0.0257  |

|   |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 白 | 0.0166 | 0.0166 | 1.0000 | 0.0327 |
| 発 | 0.0165 | 0.0165 | 1.0000 | 0.0325 |
| 中 | 0.0166 | 0.0166 | 1.0000 | 0.0326 |

表 2. 打牌順序を考慮しない場合の評価

| 牌   | precision | recall | f1score |
|-----|-----------|--------|---------|
| 1 萬 | 0.114     | 0.838  | 0.201   |
| 2 萬 | 0.161     | 0.786  | 0.267   |
| 3 萬 | 0.167     | 0.782  | 0.275   |
| 4 萬 | 0.201     | 0.778  | 0.319   |
| 5 萬 | 0.212     | 0.794  | 0.335   |
| 6 萬 | 0.199     | 0.796  | 0.318   |
| 7 萬 | 0.166     | 0.756  | 0.272   |
| 8 萬 | 0.146     | 0.796  | 0.247   |
| 9 萬 | 0.127     | 0.817  | 0.220   |
| 1 筒 | 0.123     | 0.806  | 0.214   |
| 2 筒 | 0.152     | 0.777  | 0.255   |
| 3 筒 | 0.170     | 0.762  | 0.279   |
| 4 筒 | 0.199     | 0.777  | 0.316   |
| 5 筒 | 0.214     | 0.766  | 0.335   |
| 6 筒 | 0.198     | 0.764  | 0.314   |
| 7 筒 | 0.164     | 0.774  | 0.271   |
| 8 筒 | 0.151     | 0.797  | 0.254   |
| 9 筒 | 0.116     | 0.792  | 0.202   |
| 1 索 | 0.113     | 0.826  | 0.199   |
| 2 索 | 0.153     | 0.802  | 0.257   |
| 3 索 | 0.164     | 0.786  | 0.272   |
| 4 索 | 0.201     | 0.764  | 0.318   |
| 5 索 | 0.211     | 0.765  | 0.331   |
| 6 索 | 0.196     | 0.799  | 0.314   |
| 7 索 | 0.166     | 0.770  | 0.273   |
| 8 索 | 0.153     | 0.803  | 0.257   |
| 9 索 | 0.116     | 0.828  | 0.203   |
| 東   | 0.037     | 0.839  | 0.070   |
| 南   | 0.038     | 0.845  | 0.073   |



|   |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|
| 西 | 0.031 | 0.836 | 0.059 |
| 北 | 0.031 | 0.828 | 0.060 |
| 白 | 0.041 | 0.828 | 0.079 |
| 発 | 0.042 | 0.827 | 0.079 |
| 中 | 0.045 | 0.808 | 0.084 |

表 3. 打牌順序を考慮する場合の評価

| 牌   | precision | recall | f1score |
|-----|-----------|--------|---------|
| 1 萬 | 0.129     | 0.828  | 0.223   |
| 2 萬 | 0.168     | 0.829  | 0.279   |
| 3 萬 | 0.180     | 0.796  | 0.294   |
| 4 萬 | 0.209     | 0.786  | 0.330   |
| 5 萬 | 0.231     | 0.778  | 0.357   |
| 6 萬 | 0.212     | 0.794  | 0.335   |
| 7 萬 | 0.168     | 0.813  | 0.279   |
| 8 萬 | 0.156     | 0.829  | 0.262   |
| 9 萬 | 0.131     | 0.843  | 0.226   |
| 1 筒 | 0.126     | 0.843  | 0.219   |
| 2 筒 | 0.167     | 0.820  | 0.277   |
| 3 筒 | 0.174     | 0.799  | 0.286   |
| 4 筒 | 0.208     | 0.794  | 0.330   |
| 5 筒 | 0.212     | 0.803  | 0.336   |
| 6 筒 | 0.211     | 0.795  | 0.333   |
| 7 筒 | 0.181     | 0.786  | 0.294   |
| 8 筒 | 0.167     | 0.811  | 0.277   |
| 9 筒 | 0.128     | 0.825  | 0.221   |
| 1 索 | 0.126     | 0.849  | 0.220   |
| 2 索 | 0.161     | 0.828  | 0.270   |
| 3 索 | 0.167     | 0.805  | 0.276   |
| 4 索 | 0.201     | 0.811  | 0.322   |
| 5 索 | 0.224     | 0.783  | 0.348   |
| 6 索 | 0.206     | 0.821  | 0.329   |
| 7 索 | 0.179     | 0.780  | 0.291   |
| 8 索 | 0.163     | 0.817  | 0.272   |
| 9 索 | 0.128     | 0.852  | 0.223   |

|   |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|
| 東 | 0.038 | 0.864 | 0.073 |
| 南 | 0.035 | 0.865 | 0.067 |
| 西 | 0.032 | 0.857 | 0.062 |
| 北 | 0.030 | 0.876 | 0.058 |
| 白 | 0.040 | 0.853 | 0.076 |
| 発 | 0.041 | 0.862 | 0.078 |
| 中 | 0.044 | 0.855 | 0.083 |

表 4 打牌順序を考慮しない場合（打牌回数 10 回以上）の評価

| 牌   | precision | recall | f1score |
|-----|-----------|--------|---------|
| 1 萬 | 0.122     | 0.826  | 0.213   |
| 2 萬 | 0.156     | 0.811  | 0.262   |
| 3 萬 | 0.178     | 0.788  | 0.291   |
| 4 萬 | 0.201     | 0.798  | 0.321   |
| 5 萬 | 0.216     | 0.774  | 0.338   |
| 6 萬 | 0.208     | 0.769  | 0.327   |
| 7 萬 | 0.179     | 0.753  | 0.289   |
| 8 萬 | 0.155     | 0.816  | 0.260   |
| 9 萬 | 0.124     | 0.812  | 0.216   |
| 1 筒 | 0.121     | 0.814  | 0.210   |
| 2 筒 | 0.155     | 0.807  | 0.261   |
| 3 筒 | 0.175     | 0.804  | 0.287   |
| 4 筒 | 0.204     | 0.777  | 0.324   |
| 5 筒 | 0.223     | 0.762  | 0.345   |
| 6 筒 | 0.203     | 0.775  | 0.322   |
| 7 筒 | 0.172     | 0.791  | 0.282   |
| 8 筒 | 0.162     | 0.770  | 0.268   |
| 9 筒 | 0.122     | 0.811  | 0.212   |
| 1 索 | 0.123     | 0.834  | 0.214   |
| 2 索 | 0.165     | 0.800  | 0.274   |
| 3 索 | 0.169     | 0.788  | 0.279   |
| 4 索 | 0.197     | 0.807  | 0.317   |
| 5 索 | 0.216     | 0.788  | 0.339   |
| 6 索 | 0.216     | 0.769  | 0.338   |
| 7 索 | 0.174     | 0.796  | 0.286   |

|     |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|
| 8 索 | 0.162 | 0.791 | 0.269 |
| 9 索 | 0.124 | 0.834 | 0.216 |
| 東   | 0.038 | 0.802 | 0.072 |
| 南   | 0.036 | 0.827 | 0.069 |
| 西   | 0.028 | 0.838 | 0.055 |
| 北   | 0.030 | 0.850 | 0.058 |
| 白   | 0.040 | 0.862 | 0.077 |
| 発   | 0.042 | 0.852 | 0.080 |
| 中   | 0.041 | 0.877 | 0.078 |

表 5 打牌順序を考慮する場合（打牌回数 10 回以上）の評価

| 牌   | precision | recall | f1score |
|-----|-----------|--------|---------|
| 1 萬 | 0.135     | 0.842  | 0.233   |
| 2 萬 | 0.176     | 0.816  | 0.290   |
| 3 萬 | 0.182     | 0.827  | 0.298   |
| 4 萬 | 0.213     | 0.821  | 0.339   |
| 5 萬 | 0.220     | 0.818  | 0.347   |
| 6 萬 | 0.215     | 0.811  | 0.340   |
| 7 萬 | 0.177     | 0.821  | 0.291   |
| 8 萬 | 0.174     | 0.804  | 0.286   |
| 9 萬 | 0.132     | 0.842  | 0.228   |
| 1 筒 | 0.132     | 0.832  | 0.228   |
| 2 筒 | 0.176     | 0.815  | 0.290   |
| 3 筒 | 0.183     | 0.821  | 0.299   |
| 4 筒 | 0.227     | 0.781  | 0.352   |
| 5 筒 | 0.228     | 0.801  | 0.354   |
| 6 筒 | 0.228     | 0.778  | 0.353   |
| 7 筒 | 0.197     | 0.778  | 0.314   |
| 8 筒 | 0.173     | 0.810  | 0.285   |
| 9 筒 | 0.126     | 0.866  | 0.220   |
| 1 索 | 0.129     | 0.871  | 0.225   |
| 2 索 | 0.173     | 0.822  | 0.285   |
| 3 索 | 0.194     | 0.789  | 0.311   |
| 4 索 | 0.212     | 0.825  | 0.337   |
| 5 索 | 0.225     | 0.800  | 0.351   |

|     |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|
| 6 索 | 0.225 | 0.794 | 0.351 |
| 7 索 | 0.188 | 0.787 | 0.303 |
| 8 索 | 0.169 | 0.836 | 0.281 |
| 9 索 | 0.136 | 0.851 | 0.234 |
| 東   | 0.036 | 0.869 | 0.069 |
| 南   | 0.036 | 0.856 | 0.069 |
| 西   | 0.029 | 0.849 | 0.057 |
| 北   | 0.031 | 0.881 | 0.060 |
| 白   | 0.040 | 0.878 | 0.076 |
| 癸   | 0.041 | 0.884 | 0.078 |
| 中   | 0.041 | 0.874 | 0.079 |