

バレーボール各国代表チームのレーティング手法 (第 2 報)

小中 英嗣^{a*}

2016 年 6 月 28 日

概要

バレーボールの各国代表チームのランキングである FIVB ランキングは、ランキングポイントの設計が場当たりのであり、その値を実力の定量的評価には活用できない。そこで本研究では、過去の試合結果から各チームの実力 (レーティング) を算出する手法を提案する。ロンドンオリンピックおよびリオデジャネイロオリンピック世界最終予選 1 での実際の得点率と、提案手法により算出したレーティング差から予測される得点率との間に中程度~強い相関があることが分かった。

1 研究背景

本稿ではバレーボール各国代表チームのレーティング手法とその検証を目的とする。

スポーツにおいて、試合結果に基づき選手・チーム間の序列を定めるランキング制度は、大会への参加基準やシード対象選手 (チーム) の選定基準となるなど、その適切な設計が要求される事項である。

全ての選手 (チーム) が等しい回数総当たりする (できる) 場合は、勝利数や勝率がランキングに最も適した指標であることは論を待たない。しかし、多くの選手 (チーム) が参加し、総当たりが不可能な場合に適切に順序を定めることには困難を伴う。

多くのスポーツでは、過去の一定期間の各大会での成績を係数により数値化し、その総計 (ランキングポイント) に基づいたランキングを採用している [1]。ここではこれを加算方式と呼ぶ。バレーボールの各国代表チームのランキングもこの手法により算出されている [2]。この手法では、各チームが自分自身の結果のみと得点算出基準を参照することでランキングポイントを算出でき、この簡便さは利点である。しかし、各大会の係数の設計が適切であるかどうか、またそのポイント差や比が各チームの実力差をどのように反映しているかは明確ではない。

一部のスポーツでは、ポイント交換 (point exchange) と呼ばれる、各対戦結果に基づき対戦チーム間でランキングポイントを総和が変わらないように交換する手法に基づきランキングポイントを算出している。最も有名な例はチェスのイロレーティング (Elo rating)[3] であり、球技ではラグビーがイロレーティングを若干修正した手法を採用している [4]。この手法では、各チームの実力がある期間一定であり、その期間内に十分な対戦数が行われれば、算出されたランキングポイントが実力に相当する値に近づく特徴を持っている。ただし、この算出には対戦時点での両チームのランキングポイントが既知である必要があり、原理的には期間開始時点での全チームのランキングポイントおよび期間内の全対戦の結果を必要とする。

ここで、ランキング (ranking) とレーティング (rating) を定義し、区別することとする。ランキングは

* ^a 名城大学理工学部情報工学科, 名古屋市天白区塩釜口 1-501, konaka@meijo-u.ac.jp

各チーム間の順位を定めることであり、それに対しレーティングは各チームの実力に相当する値を算出することと定義する。レーティングの結果に基づいてランキングを作成することが可能である。

2つのチームが対戦した場合、大きく二つに分けて、

1. それぞれのチームが安定的に持っている技能・実力
2. 当日の調子・運, 相性

の要因が得点や勝敗に影響すると仮定する。本稿では、狭義のレーティングとして「上記の 1. を統計的に算出したもの」と定義する。加算方式のランキングポイントは上記の 1. および 2. の双方を区別せずに反映させる方法であり、それに対してイロレーティングに代表されるポイント交換手法は 2. の影響を排除して 1. のみを推定する、つまり狭義のレーティングを統計的に算出することを意図した手法である。以降本稿で「レーティング」と読んだ場合、「狭義のレーティング」を指すこととする。

バレーボールに関する統計的な研究として、各技能(サービス, レセプション, スパイク, ディグ, ブロック, およびセットなど)や戦略が得点にどのように寄与しているかを調査したものは多数ある(たとえば, [5, 6, 7, 8, 9, 10] など)。しかし、これらの研究には試合動画を利用した各プレーの詳細な分析が必要であり、その調査コストは無視できない。また、状況を細かく分析しすぎるとは説明変数を増やしてその次元を上げてしまうが、活用できるデータ数には上限がある。このようにして「次元の呪い」[11]を引き起こしかねないため、適度に粗い分析が有効であると考えられる。

これら技能の評価に関する研究が非常に多岐にわたるのに対し、バレーボールのチームのレーティングに関する研究は(著者の調査の範囲では)非常に少ない。Massey の方法 [12] に基づき、大学女子バレーボールの勝率を予測したもの [13] や、ビーチバレーに適用したもの [14] などが散見されるのみである。

バレーボールはサービスから始まる一連のプレーが必ずどちらかの得点で終わるという特徴を有する競技である。また、サービスから始まる一連のプレーを 1 試合中に 150 回から 200 回繰り返す。得点は試合進行の最小単位、かつ(総得点が多いほうが勝利するとは限らないが)勝敗に対する主要な原因であり、さらに公式記録に必ず記載されて調査が容易である。この観点から、本研究では各試合、各セットの得点を基本データとし、これに基づく統計的な分析を行う。

本研究では、各チームが得点する確率が、それぞれのチームのレーティングの差により説明できると仮定し、国際試合の結果からその統計的な算出を試みる。得点率の説明モデルにはロジスティック回帰モデルを利用する。対象となる全試合に対する最適化を行うことで、最適なレーティングを算出する。これは試合ごとの逐次更新に基づくポイント交換(イロレーティングなど)に対する明確な利点となる。

提案手法により算出したレーティングに基づき、いくつかの国際大会の結果を予測する。具体的には、

- ロンドンオリンピック
- リオデジャネイロオリンピック世界最終予選 1

の各試合の結果および得点率を、その直近 1 年の主要国際大会の結果から算出したレーティングに基づき予測する。その結果、

- レーティングから予測された得点率と各セットの実際の得点率には中程度の相関があり(相関係数が 0.5 強),
- レーティングから予測された得点率と各試合の実際の得点率には中程度から強い相関がある(相関係数が 0.7 付近)

ことを示す.

2 レーティングの定義と算出方法

2.1 FIVB ランキング

国際バレーボール連盟 (FIVB) はオリンピック, 世界選手権などの主要大会の順位をランキングポイントに換算し, 一定期間の和をそのチームのランキングポイントとし, その値で世界ランキングを定めている [2].

順位に対しどの程度のランキングポイントを付与するか設計により, どのようなチームがランキング上位となるかが異なる. 表1に, 主要国際大会でのランキングポイントを示す.

表1 FIVB Ranking Point System

Standing	Competition name			
	Olympic	World Cup	World Championship	
			Men	Women
1	100	100	100	100
2	90	90	90	90
3	80	80	80	80
4	70	70	70	70
5	50	50	62	58
6	—	40	56	—
7	—	30	50	50
8	—	25	—	—
9	30	5	45	45
10	—	5	—	—
11	20	5	40	40
12	—	5	—	—
13 Tie			36	36
15 Tie			33	33
17 Tie			30	30
21 Tie			25	25

順位決定にトーナメント形式を採用している大会 (オリンピック, 世界選手権) では順位決定戦を行わない場合があり (たとえば, オリンピックでは準々決勝敗退の4チーム間での順位決定戦を行わない), その場合は同順位として同じランキングポイントが付与される.

この表から, 1位から4位までの順位ひとつの差は10点で統一されていることが分かる. しかし, 5位以下でのランキングポイントの設計法には一貫性が認められない. 具体的には, オリンピック, ワールドカップでは4位と5位の差が20ポイントであるのに対し, 世界選手権では8(男子),12(女子)ポイントである. それ以下の順位となると順位間でのポイント差はまた縮まる傾向にある. また,

これに対し, 順位による加算方式を採用している中でも設計に一貫性のあるテニス (ATP ランキングポイン

ト)[15]と比較する。一例としてグランドスラム (主要四大大会) でのランキングポイントを示す。

優勝 : 2000, 準優勝 : 1200, ベスト 4 : 720, ベスト 8 : 360, ベスト 16 : 180,
 ベスト 32 : 90, ベスト 64 : 45, ベスト 128 : 10,
 予選通過 : 25, 予選決勝 : 16, 予選 2 回戦 : 8

ベスト 64 からベスト 4 までは 1 回勝ち抜くごとに 2 倍, それ以降は 5/3 倍となっている。グランドスラム以下の大会 (マスターズ 1000, 500 シリーズ, 250 シリーズ) では優勝者に付与されるランキングポイントは大会名に冠されている値 (1000, 500, 250) でありそれらは均等な比率を保っている。また優勝と準優勝以降の比率も保持されている。テニスのこのランキングポイントシステムは, どこまで勝ち抜いたかを二進数で表現していることとほぼ等価である。したがって, その選手がどの規模の大会でどの程度まで勝ち抜いているかと合計ランキングポイントには強い関係ができて上がる。上位選手に対して主要大会への出場義務があり, トーナメント形式により大会が運営され, ランキングによりシードを決定している方式と一貫して合理的であると評価できる。

2.2 レーティング算出方法

前述の通り, FIVB ランキングポイントの設計の意図はあいまいであり, よく設計されている ATP ランキングポイントと比較してもそれは明らかである。したがって, FIVB ランキングポイントによりそのチームの実力を推定し, さらに今後の対戦の勝敗予測などに利用するのは困難である。この問題は, 取得したランキングポイントが少ないチーム間の実力を推定する際には特に顕著に現れる。

そこで本稿では, 試合結果として必ず公式に記載される各セット毎の得点に基づき, 各チームの得点率を推定する手法を提案する。具体的には, 各チーム i の実力を示すパラメータ (今後, これをチーム i のレーティングと呼ぶ) を r_i で示し, チーム i と j が対戦した場合, ひとつのプレイで i が得点する確率 $p_{i,j}$ が次式に従うと仮定する。

$$p_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-(r_i - r_j)}}. \quad (1)$$

この仮定はロジスティック回帰モデルと呼ばれ, チェスのレーティングであるイロレーティング [3] での勝率の仮定や, 項目応答理論 [16, 17] での問題の正答率の仮定などで利用されているものと同じ形式である。大まかな目安として, パラメータ差 0.1 は, パラメータが大きいチームの 1 プレイでの得点率が 0.525 であることに対応する。この場合, パラメータの大きいチームが 1 セット取る (25 点得点する) までに小さいチームは平均で 22.6 点得点していることになる。

2 チームのパラメータ差 $\Delta r = r_i - r_j$ を 0, 0.01, 0.02, \dots , 0.20 と選び, 各プレイ間での得点確率が一定で独立であると仮定し, それぞれ 10^4 回の対戦をシミュレーションした結果を図 1 に示す。実力差が小さいところでは 3-2, 2-3 が多く, $r_i - r_j = 0.05$ では実力が高いチームが 2-3 で敗れる割合が約 12.4% である。

2.2.1 ポイント交換法の欠点

イロレーティング [3] では, 式 (1) の線形変換である

$$p_{i,j} = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-(r_i - r_j)}{400}}} \quad (2)$$

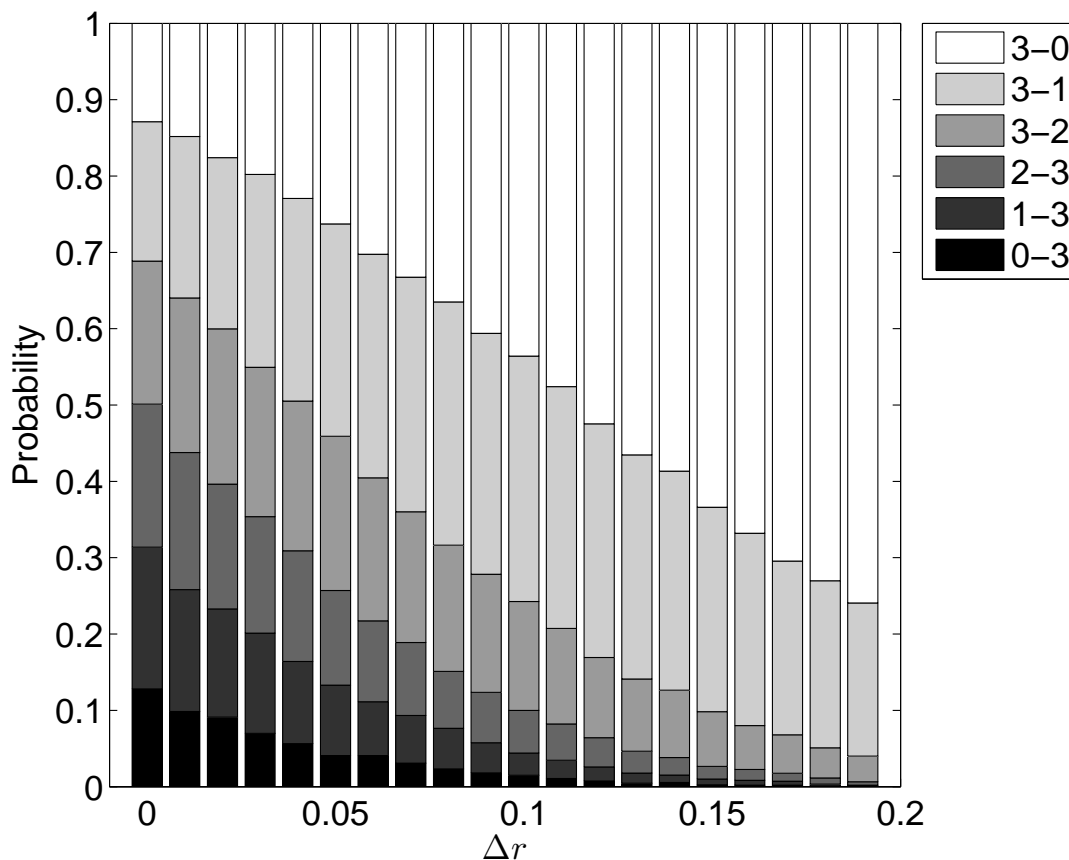


図 1 Won-lost sets probability

により選手 i, j 間の勝率が説明できると仮定している. したがって, レーティングが正しく計算されていれば, その差を利用して試合結果を予測することが可能な方法である*1. ラグビーでは上式を折れ線で近似したものを利用している [4]. このようにしてランキングポイント差を実力差と関連付けているため, 「日本初戦が番狂わせランキングトップ」 [18] のように, ある試合の結果がどの程度の「番狂わせ」であったのかを評価することが可能となっている.

また, 選手 i, j 間の試合結果が

$$s_{i,j} = \begin{cases} 1 & i \text{ win.} \\ 0 & i \text{ lose.} \end{cases} \quad (3)$$

で表されるとしたとき, 試合後のレーティングが

$$r'_i = r_i + K(s_{i,j} - p_{i,j}) \quad (4)$$

と更新される. r_j の更新規則も同様である. 式 (4) は以下のように解釈できる: 勝利したときはレーティングが増加する. これは, 「勝利したのだから試合前のレーティングは過小評価であり, 真のレーティングはより高くあるべきだ」と修正していることに他ならない. 増加量は予測される勝率が高いほど小さい. これは「試

*1 イロレーティングでは, レーティングが 200 高いことは勝率が約 76% であることと対応する.

合前のレーティングから予想される結果が起きているので、レーティングを大きく修正する必要は無い」ということである。敗北したときはこの逆である。

このような方式であるため、レーティングの計算には試合前の両チームのレーティングが必要であり、1チームのレーティングを計算するために、関与する全員(全チーム)の対戦結果が必要である。

式(4)の定数 K はレーティングの更新量を定める定数であり、チェスのプロレベルでは16が利用されている。 K が大きければ直近の対戦の影響が大きく、逆に小さければ過去の影響が大きい。この値の設定により、レーティングの性質が異なる。

r_i の真値が一定であり、対戦が十分な回数実施されれば、式(4)の更新規則により r_i は真値に近づく。しかし、同程度の実力である二者が対戦した場合でも、対戦後に必ずレーティングが変動してしまうため、収束は保障されない*2。

2.2.2 提案手法

前述の、試合ごとのポイント交換手法の欠点は、

- 1試合ごとの結果に対するレーティングの更新量の適切な設定が困難である。
- レーティングの更新が試合ごとであり、レーティングが収束にいたるまでには更新回数が少ない。

とまとめられる。本稿ではこれらの点を克服する手法を提案する。提案手法の概要を以下に述べる。

- 1試合ごとの結果に対するレーティングの更新量(式(4)内の K) を非常に小さくする。
- 対象とする期間の全試合のデータに対し、ランダムに1つのセットを選択して、その得点率に対して式(4)でレーティングを更新する。
- 上記の更新を、全チームのレーティングが収束するまで十分な回数繰り返す。

以下にアルゴリズムを示す。表2に記号の意味を示す。

表2 Notations

N_T	Number of teams
$\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_{N_T})^T$	Rating vector
N_S	Number of sets
$\langle i, j, s_i, s_j \rangle$	Result of one set. Team i and j scored s_i and s_j points in a set. N_S tuples are stored in database.
ϵ_{th}	Threshold value
K	Parameter used in rating update
k	Iteration index
$\mathbf{0}, \mathbf{1}$	Column vector composed of zeros and ones with suitable dimensions
$\ \mathbf{x}\ $	Euclidean norm of vector \mathbf{x}

レーティング算出アルゴリズム

*2 チェスでは引き分けがあるため、レーティングが変動しないこともある。しかし、本稿で対象としているバレーボールは必ず勝敗が定まるため、ポイント交換手法ではレーティングは収束しない。

1. $\mathbf{r}^{(0)} = \mathbf{0}$ とし, 収束判定のための $\epsilon_{th} > 0$ を小さな値に設定する. $K > 0$ を定める. 経験上, 10^{-3} かそれ以下の値が望ましい. 繰り返し回数を $k = 0$ とする. N_S セットの結果を保持したデータベースを用意する. 各セットの結果を $\langle i, j, s_i, s_j \rangle$ で示す.
2. データベースの各セットをランダムにソートする.
3. ソートされたデータベースからセットを順に取り出し, これを $\langle i, j, s_i, s_j \rangle$ とする.
4. レーティング r_i および r_j を以下の規則で更新する.

$$p = \frac{1}{1 + e^{-\left(r_i^{(k)} - r_j^{(k)}\right)}}, s = \frac{s_i}{s_i + s_j}, \quad (5)$$

$$r_i^{(k+1)} = r_i^{(k)} + K(s - p), \quad (6)$$

$$r_j^{(k+1)} = r_j^{(k)} + K((1 - s) - (1 - p)). \quad (7)$$

データベース内の全セットに対して上記の更新を行う.

5. $\|\mathbf{r}^{(k+1)} - \mathbf{r}^{(k)}\| < \epsilon_{th}$ が成り立つ場合, $\mathbf{r}^{(k+1)}$ を出力としてアルゴリズムを終了する. そうでない場合 $k \leftarrow k + 1$ としてステップ 2. へ戻る. \square

提案手法では総得点または総失点が 0 のチームのレーティングが $-\infty, +\infty$ に発散するが, 各国代表チーム間の試合でこのようなことは事実上ありえないため, 問題とはならない. また, レーティングは 2 チーム間の差のみに意味がある (間隔尺度である) ため, 分かりやすさのために全体に定数を加減算してもかまわない. たとえば, 得られたレーティングベクトル \mathbf{r} に対し,

$$\mathbf{r} \leftarrow \mathbf{r} - (\max \mathbf{r}) \cdot \mathbf{1} \quad (8)$$

とすれば, レーティングの最上位を必ず 0 とし, そこからの差を表すことができる.

2.3 他の手法との関係および提案手法の拡張

対の比較結果から全体の順位付けを行う他の手法として, Bradley-Terry モデル (BT モデル)[19, 20] が良く知られており, スポーツのレーティングに関する研究も多い.

BT モデルでは, チーム i とチーム j が対戦した場合, i が j に勝利する^{*3}確率 $p_{i,j}$ が各チームのパラメータ $\pi_i, \pi_j > 0$ を用いて

$$p_{i,j} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j} \quad (9)$$

で表すことができると仮定する. この仮定は,

$$p_{i,j} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j} = \frac{1}{1 + \frac{\pi_j}{\pi_i}} = \frac{1}{1 + \exp\left(\log \frac{\pi_j}{\pi_i}\right)} = \frac{1}{1 + \exp(\log \pi_j - \log \pi_i)} \quad (10)$$

と変形できるため,

$$r_i = \log \pi_i \quad (11)$$

の非線形変換により提案手法 (式 1) と等価である.

^{*3} 単位は 1 試合でも 1 プレイでも良い.

これら二つの手法は等価であるが、文献 [1] の調査では、BT モデルに基づくレーティング手法を採用している競技は無く、それに対し提案手法の線形変換であるイロレーティングはいくつかの競技団体に採用されている。

また、項目応答理論 [16, 17] では、項目弁別度 a_i 、項目難易度 b_i 、個人能力パラメータ θ_j を用いて、個人 j が項目 i に正解する確率 $p_{i,j}$ を

$$p_{i,j} = \frac{1}{1 + \exp(-1.7a_j(\theta_i - b_j))} \quad (12)$$

により説明するモデルが採用されることがあり、そのパラメータ推定手法なども広く研究されている。

これをスポーツに拡張すると、大会 k でチーム i とチーム j が対戦した場合、 i が j に勝利する確率 $p_{i,j}$ が

$$p_{i,j} = \frac{1}{1 + \exp(-a_k(r_i - r_j))} \quad (13)$$

で説明されると仮定するモデルを構築することができる。 $a_k > 0$ は大会後との番狂わせの起こりやすさ・起こりにくさを意味するパラメータと解釈できる。

これらの、

- 既存競技での採用状況
- モデルの拡張性とその解釈

の観点から、本研究では (提案手法と等価ではあるが) BT モデルを採用せず、提案手法 (式 1) を採用する。

3 レーティング算出および試合結果予測への適用

本節では、前節で提案したレーティング算出手法により各国代表チームのレーティングを算出する。また、レーティング算出後に開催された国際大会での結果 (各セット、および各試合での得点率) をレーティング差により予測することを試みる。

3.1 使用したデータ

以下のデータを使用した。いずれも予測対象となる大会に対し、1 年以内を目安とし、FIVB 主催大会および各大陸のオリンピック予選の結果に基づきレーティングを算出した。

データセット 1

レーティング算出用データ

- 2011 年ワールドカップバレーボール (女子), 2011 年 11 月
- ロンドンオリンピック ヨーロッパ予選 (女子), 2012 年 5 月
- ロンドンオリンピック 南アメリカ予選 (女子), 2012 年 5 月
- ロンドンオリンピック 北アメリカ予選 (女子), 2012 年 5 月
- ロンドンオリンピック アフリカ予選 (女子), 2012 年 2 月
- ロンドンオリンピック 世界最終予選 (女子), 2012 年 5 月
- 2012 年ワールドグランプリ, 2012 年 6 月—7 月

予測対象データ

- ロンドンオリンピック, 2012年7月—8月

データセット2

レーティング算出用データ

- 2015年ワールドカップバレーボール(女子), 2015年8月—9月
- リオデジャネイロオリンピック ヨーロッパ予選(女子), 2016年1月
- リオデジャネイロオリンピック 南アメリカ予選(女子), 2016年1月
- リオデジャネイロオリンピック 北アメリカ予選(女子), 2016年1月
- リオデジャネイロオリンピック アフリカ予選(女子), 2016年2月

予測対象データ

- リオデジャネイロオリンピック 世界最終予選1(女子), 2016年5月

データセット3

レーティング算出用データ

- 2011年ワールドカップバレーボール(男子), 2011年11月—12月
- ロンドンオリンピック ヨーロッパ予選(男子), 2012年5月
- ロンドンオリンピック 南アメリカ予選(男子), 2012年5月
- ロンドンオリンピック 北アメリカ予選(男子), 2012年5月
- ロンドンオリンピック アフリカ予選(男子), 2012年1月
- ロンドンオリンピック 世界最終予選(男子), 2012年6月
- 2012年ワールドリーグ, 2012年5月—7月

予測対象データ

- ロンドンオリンピック, 2012年7月—8月

データセット4

レーティング算出用データ

- 2015年ワールドリーグ, 2015年5月—7月
- 2015年ワールドカップバレーボール(男子), 2015年9月
- リオデジャネイロオリンピック ヨーロッパ予選(男子), 2016年1月
- リオデジャネイロオリンピック 南アメリカ予選(男子), 2015年10月
- リオデジャネイロオリンピック 北アメリカ予選(男子), 2016年1月
- リオデジャネイロオリンピック アフリカ予選(男子), 2016年1月

予測対象データ

- リオデジャネイロオリンピック 世界最終予選1(男子), 2016年5月

3.2 結果

図2から図9に、それぞれのデータセットで算出したレーティング差と実際の得点率(セットごと、および試合ごと)を示す。表3に、説明変数をレーティング差から予測される得点率(式(1)), 決定変数を実際の得点率(セットごと、および試合ごと)としたときの回帰係数および相関係数を示す。データの特性に基づき、回帰モデルは線形で定数項を含まないものとした。

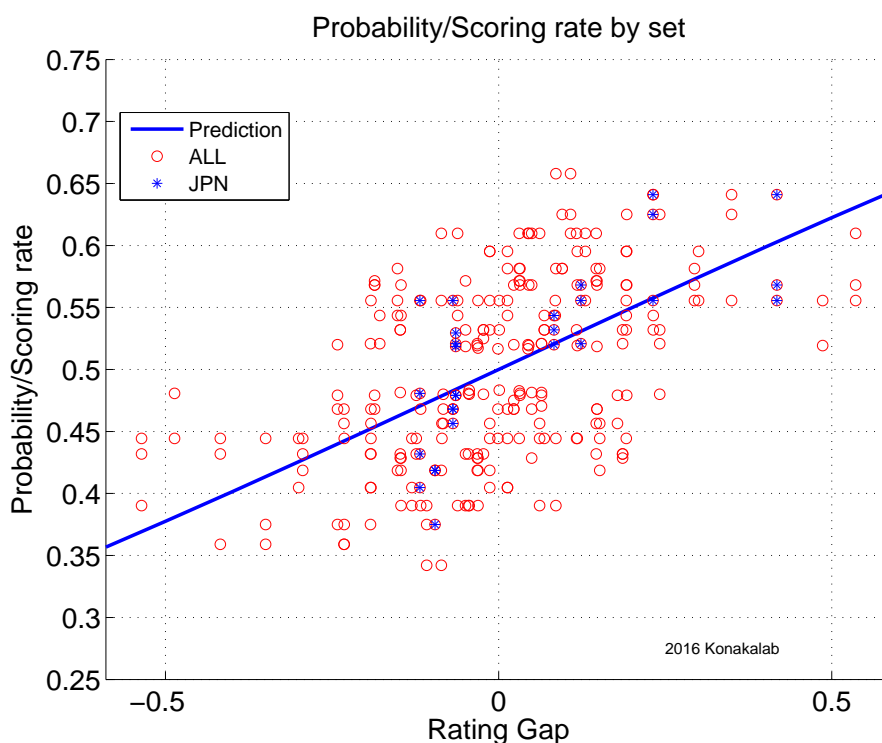


図2 Rate difference and scoring rate in each set (London Olympic 2012, Women)

表3 Regression and correlation coefficients based on proposed rating method

	Regression coefficient		Correlation coefficient	
	by Set	by Game	by Set	by Game
Dataset 1	0.9983	1.0025	0.5110	0.7909
Dataset 2	0.9956	0.9947	0.5549	0.7244
Dataset 3	1.0009	1.0010	0.5313	0.6775
Dataset 4	0.9980	0.9965	0.4764	0.6413

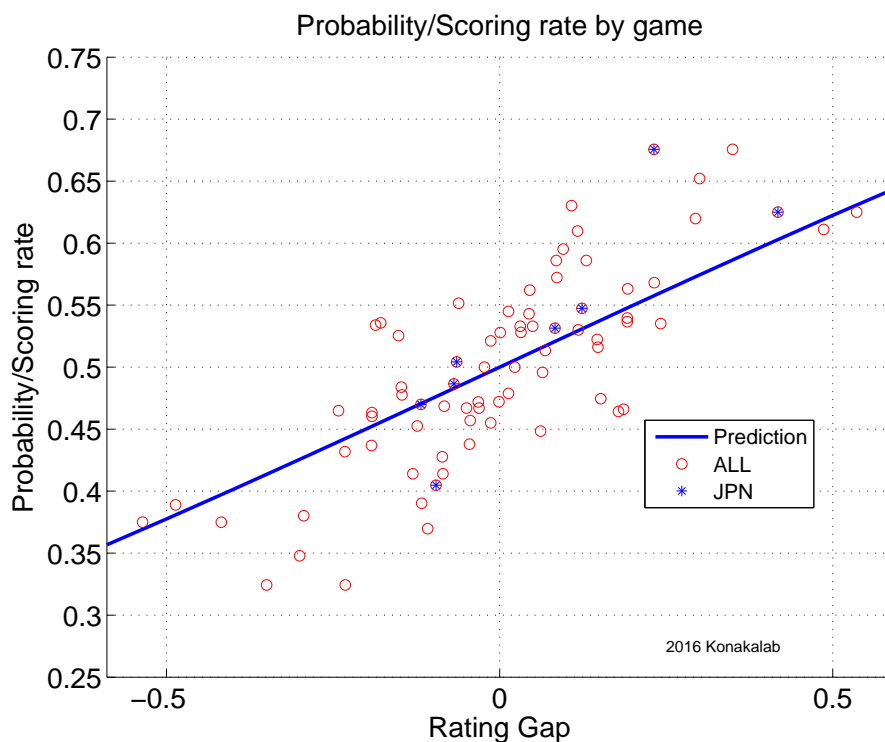


図3 Rate difference and scoring rate in each game (London Olympic 2012, Women)

3.3 考察

いずれの大会でも、参加チーム間のレーティング差は女子では約 0.5 以内、男子では約 0.4 以内に収まっており、女子のレーティング差は男子よりも大きい。これは、女子では実力が均衡した代表チーム数が少ないことや、大陸間での実力差が大きい(最終予選およびオリンピックでは、各大陸から数チームずつ出場する)ことを示している。このような小さなレーティング差では、式 (1) で予測される得点確率(図中実線)はほぼ直線となっているので、レーティング差と予測される得点率の間には線形な依存関係があると仮定しても良い。

表3の結果より、回帰係数はいずれの場合でも1付近であり、レーティング差から予測された得点率が平均的に実際の得点率を示していることが確認できた。また、

- レーティングから予測された得点率と各セットの実際の得点率には中程度の相関があり(相関係数が0.5強)、
- レーティングから予測された得点率と各試合の実際の得点率には中程度から強い相関がある(相関係数が0.7付近)

ことが確認できた。

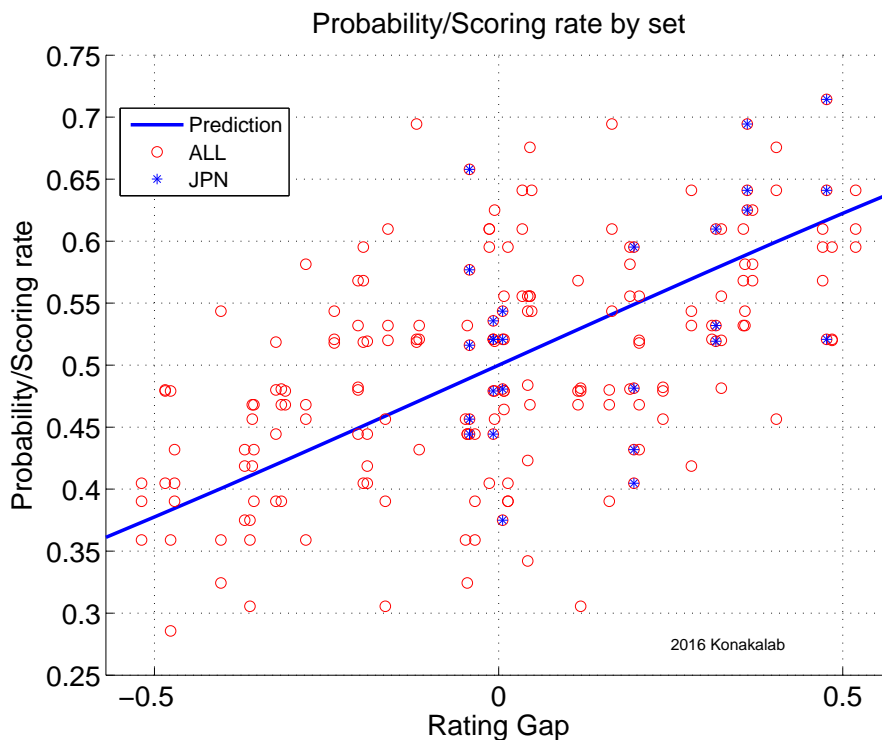


図 4 Rate difference and scoring rate in each set (Rio WOQT 2016, Women)

3.3.1 FIVB ランキングとの比較

データセット 4 で予測対象とした、リオデジャネイロオリンピック世界最終予選 1(男子) の各セットおよび試合の得点率について、横軸を大会開始直前の FIVB ランキング差、または FIVB ランキングポイント差としたものを図 10 から図 13 に示す。

いずれの場合でも、提案するレーティング手法と比べ、分布がまばらになっており、目視で相関を判定するのは難しい。

全てのデータセットに対し、予測対象とした大会での各セットおよび各試合の得点率と、直前の FIVB ランキング差および FIVB ランキングポイント差との相関係数を求めたものを表 4 に示す。ロンドンオリンピック(データセット 1 および 3) については、開催国枠で出場したイギリスの世界ランキングが極端に低く(女子 69 位、男子 92 位)、外れ値となる恐れがあったため、イギリスの試合結果を除外した結果も示す。

ランキング差の算出にはランキングの順位をそのまま使用しているので、相関係数はマイナスになる(ランキング差がマイナスになるほど自分のランキングが高い)。

一部強い相関を示している大会もあるが、いずれも提案手法よりもその絶対値は小さい。データセット 3 とデータセット 3*(イギリスを除外したもの) を比較すると、極端にランキング差およびランキングポイント差の絶対値が大きいデータにより擬似的な相関が導入されていることが分かる。

ランキングまたはランキングポイントに何らかの非線形な変換を施すことにより相関が見かけ上高くなることも考えられるが、相関を高くするように選択された変換に定性的な意味が無い場合もあり、この点でも統計的な意味が明確である提案手法が優位である。

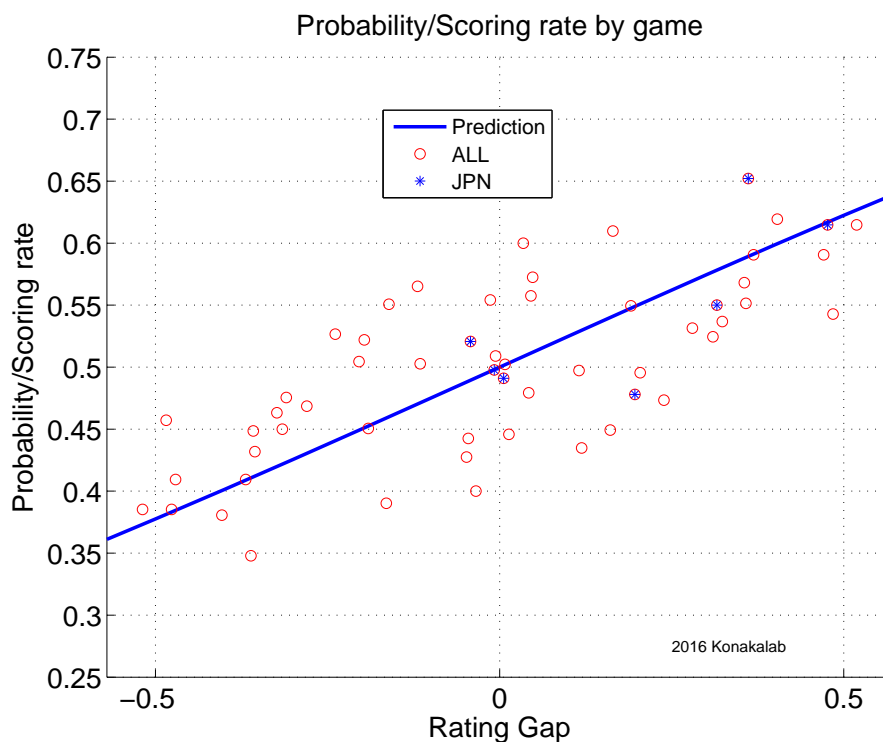


図5 Rate difference and scoring rate in each game (Rio WOQT 2016, Women)

表4 Correlation coefficients: FIVB ranking and scoring rate

	Correlation coefficient			
	FIVB ranking gap		FIVB ranking point gap	
	by Set	by Game	by Set	by Game
Dataset 1	-0.3074	-0.5491	0.4179	0.5983
Dataset 1*	-0.3768	-0.5417	0.3763	0.5267
Dataset 2	-0.5078	-0.6578	0.3658	0.4901
Dataset 3	-0.4789	-0.6105	0.5362	0.7016
Dataset 3*	-0.4587	-0.6331	0.4731	0.6512
Dataset 4	-0.3624	-0.5380	0.3171	0.4641

*: except GBR.

3.4 今後の方針

提案手法に基づくレーティングは得点率との相関が中程度~高いことが分かった。この活用として以下を検討中である。

- リオデジャネイロオリンピックの予測

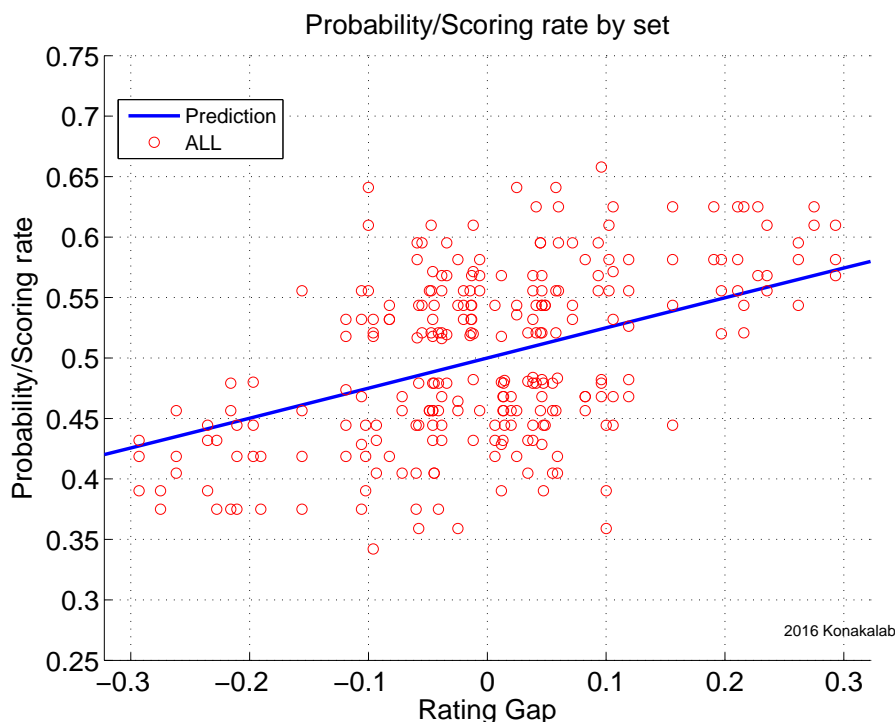


図6 Rate difference and scoring rate in each set (London Olympic 2012, Men)

男女共に世界最終予選も終了しており、リオデジャネイロオリンピックへの出場国およびプール分けも確定している。オリンピック直前のワールドグランプリ(女子)、ワールドリーグ(男子)*4の結果を反映させたレーティングを算出し、リオデジャネイロオリンピックの結果を予測する。

● 予選方式の設計の妥当性の検討

今回世界最終予選の形式が男女共に以下に変更された。

- 世界最終予選1：アジア (FIVB ランキング上位3カ国および開催国(日本))、ヨーロッパ(予選2・3位)、北アメリカ(予選2位)、南アメリカ(予選2位)。このうち4カ国(アジア最上位国とそれを除く3カ国)がオリンピック出場。
- 世界最終予選2：アフリカ(予選2・3位)、北アメリカ(3位)、南アメリカ(3位)。このうち1カ国がオリンピック出場。

この方式では南北アメリカ予選で世界最終予選2を「選択」することでオリンピックへの出場権を獲得しやすくなる可能性がある。この時点で敗退行為を誘発しうる不適切な制度設計であるといえる。さらに、今回提案したレーティング手法により、

- 各大陸間でのレーティング差
- 特定の1試合のみで順位を「選択」できうる状況であったのかを算出し、世界最終予選制度の妥当性について定量的に議論する。

● 各大会の出場枠の男女差について

*4 本稿執筆時点では女子は開催中、男子は開催前。

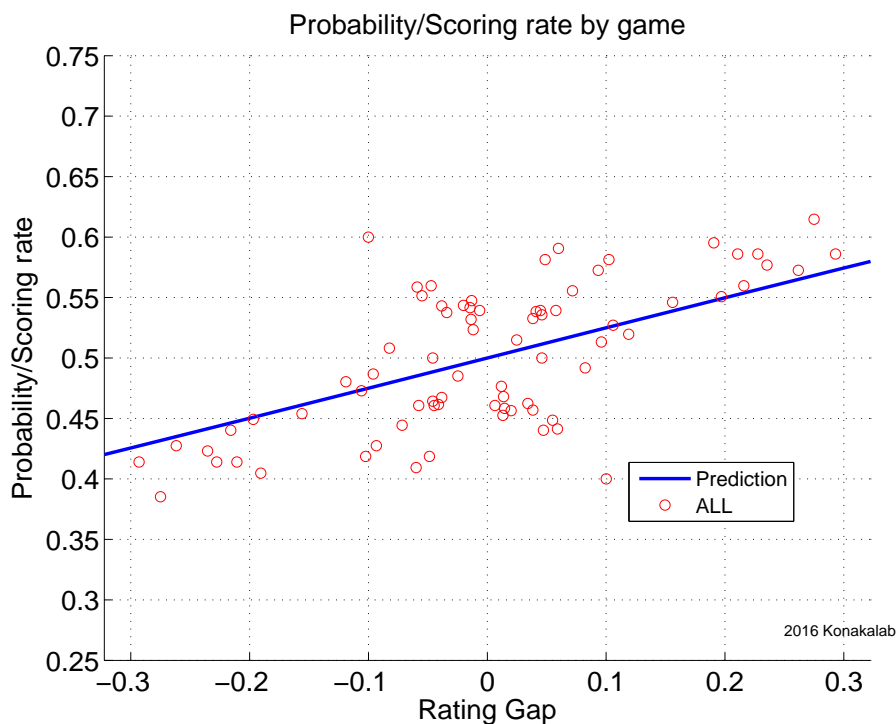


図7 Rate difference and scoring rate in each game (London Olympic 2012, Men)

FIVB 主催の主要大会の出場国数を示す (カッコ内が出場国数).

- オリンピック (12)
- 世界選手権 (24)
- ワールドカップ (12)
- ワールドリーグ, ワールドグランプリ (28)

これらの大会では男女の出場国数が同一である。

男女の開催国数を同一にすべきという規則は無い。表5にオリンピックで開催されている団体球技でのオリンピックおよび主要な国際大会での出場国数を示す。団体のみの種目を示し、個人・団体双方が開催されている(卓球など)は含んでいない。

全体の傾向として、女子の大会は男子よりも後に創設され、参加チーム数は同じか男子よりも少ない。これは、女性へのスポーツの普及が男性よりも後であったことや、文化的な制約によるところが大きい。また、(男子の大会であっても)参加国数を増やすと実力の劣るチームが参加することとなり、実力差のありすぎる試合が増えて大会の価値を貶めかねないとの懸念は競技を限らず広くある。

本研究では、男子・女子それぞれでのレーティングの分布を見ることにより、適切な参加チーム数を定量的に議論する。

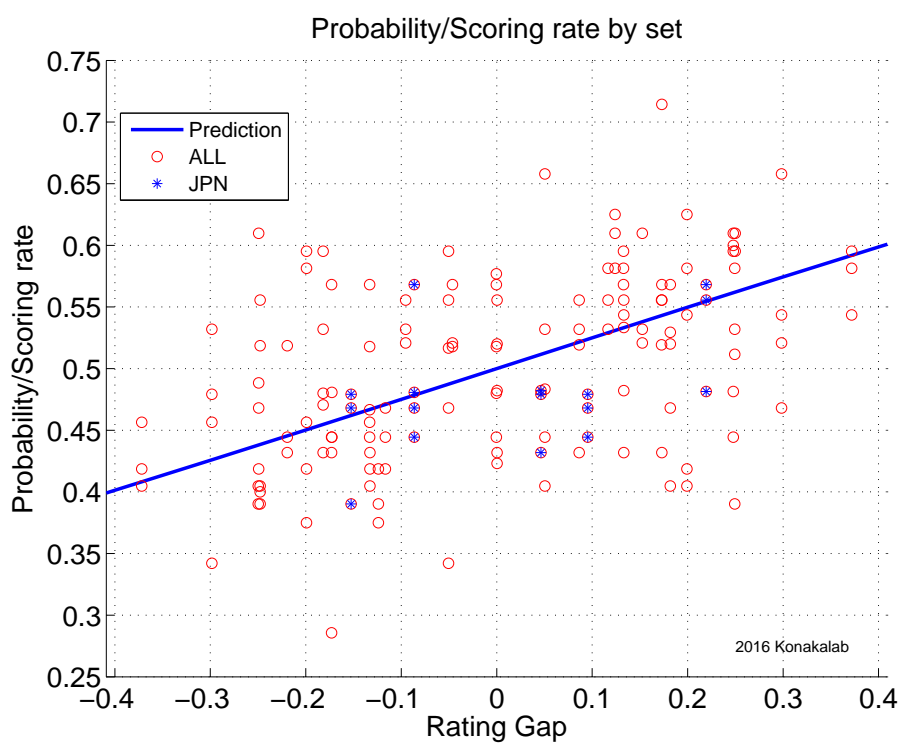


図 8 Rate difference and scoring rate in each set (Rio WOQT 2016, Men)

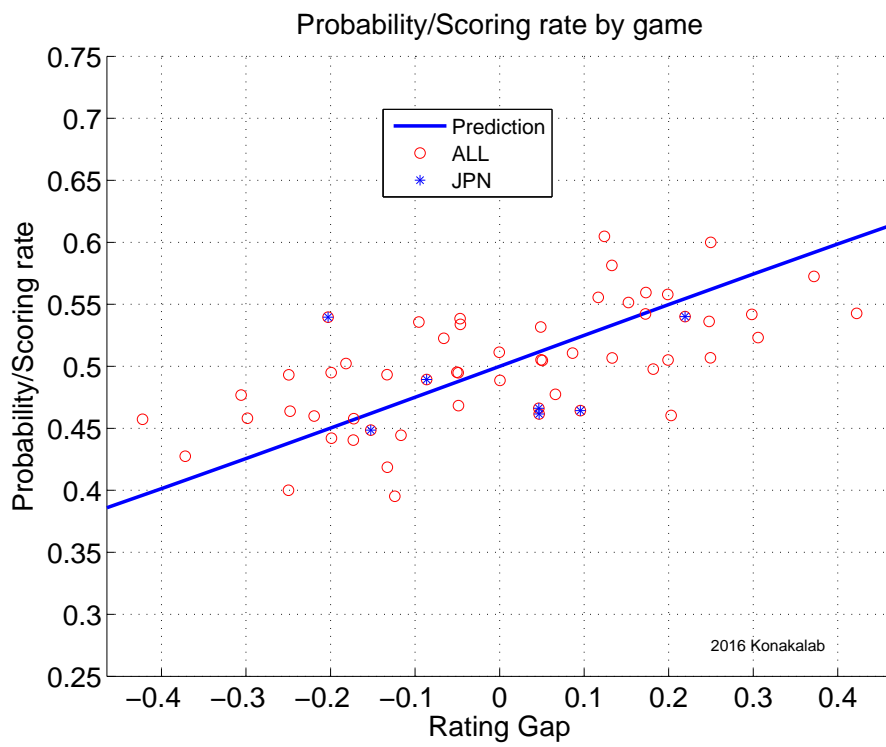


図 9 Rate difference and scoring rate in each game (Rio WOQT 2016, Men)

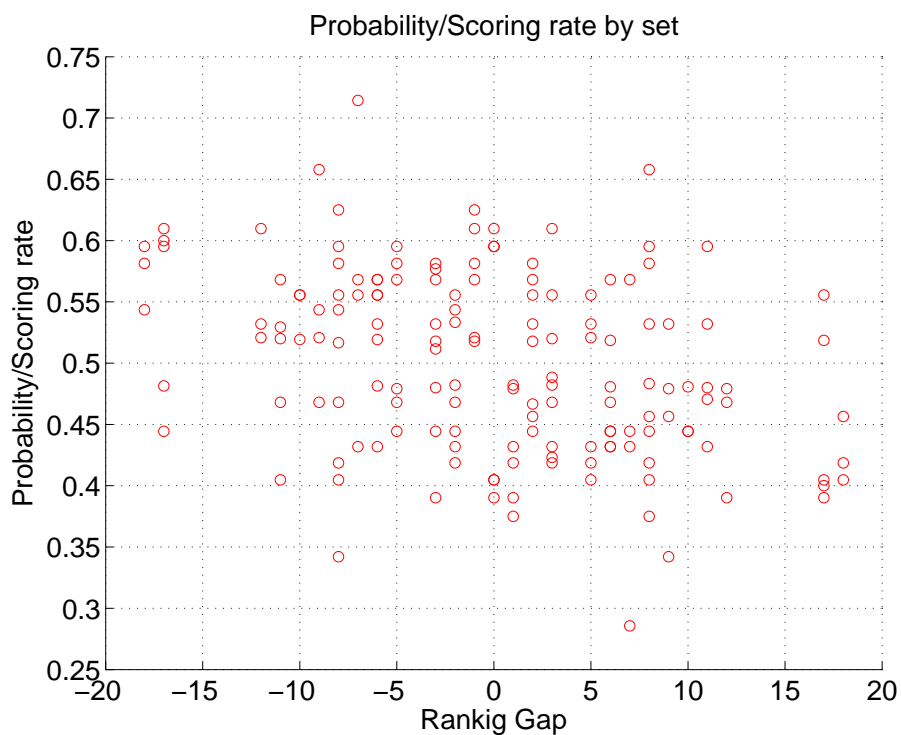


図 10 FIVB ranking difference and scoring rate in each set (Rio WOQT 2016, Men)

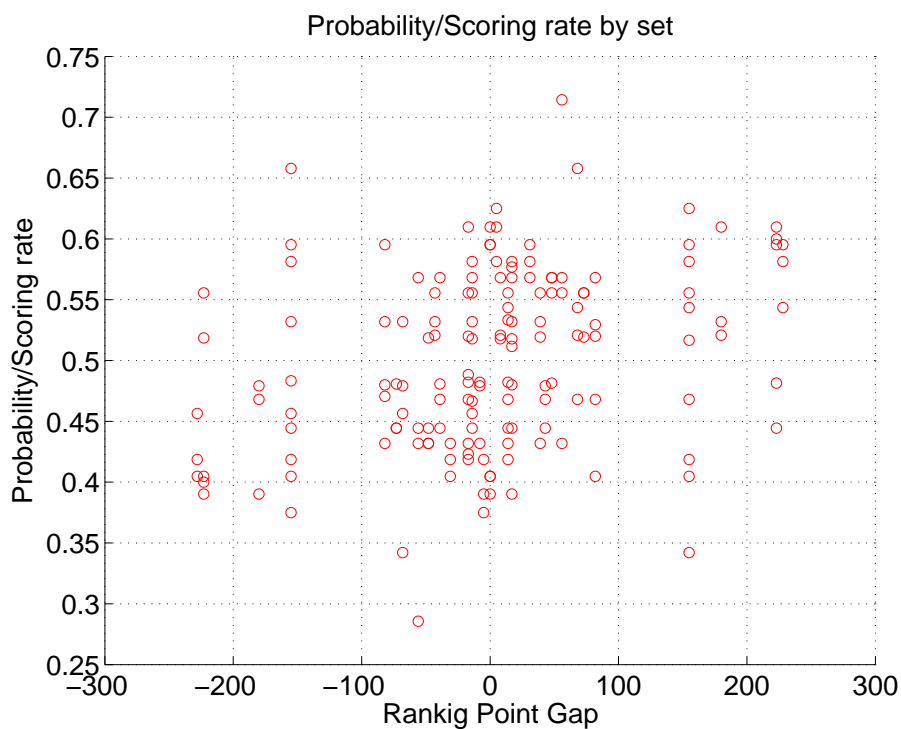


図 11 FIVB ranking point difference and scoring rate in each set (Rio WOQT 2016, Men)

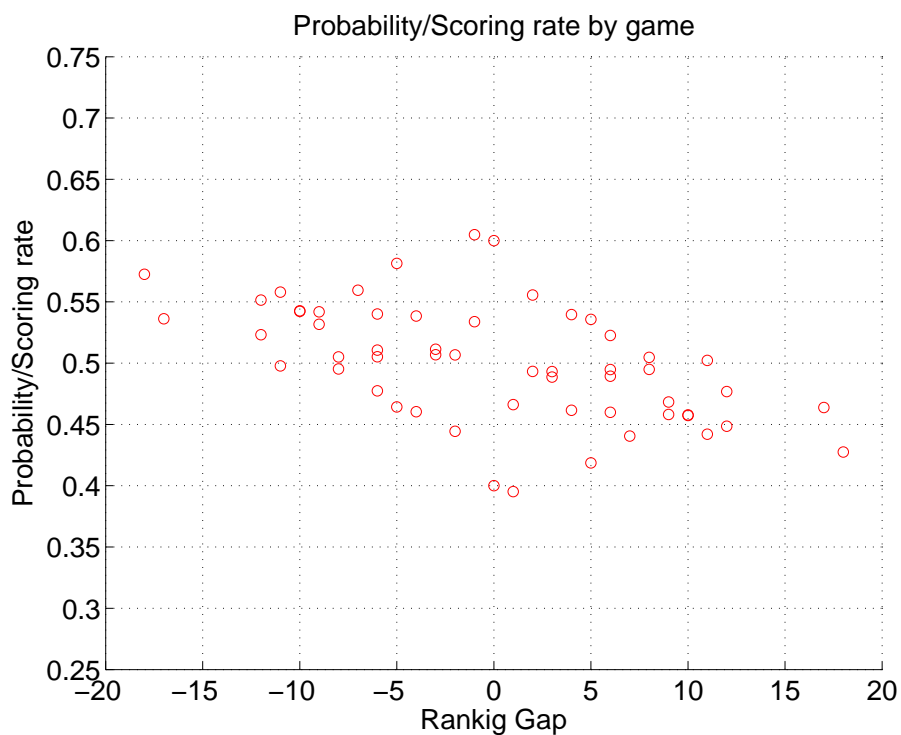


図 12 FIVB ranking difference and scoring rate in each game (Rio WOQT 2016, Men)

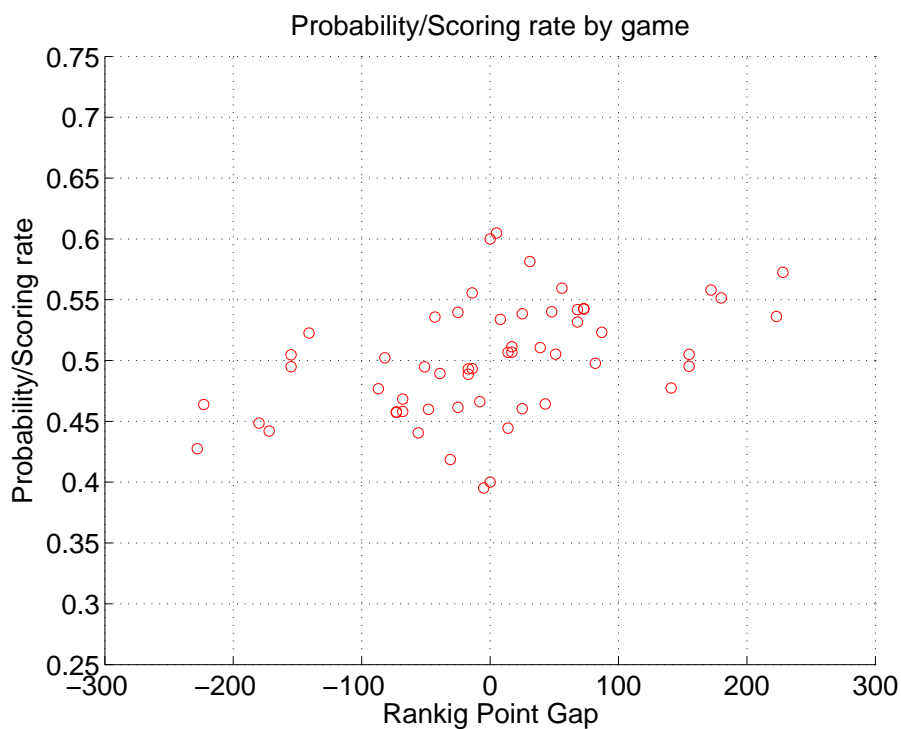


図 13 FIVB ranking point difference and scoring rate in each game (Rio WOQT 2016, Men)

表 5 Numer of teams

Competition name		Teams	
		Men	Women
Basketball	FIBA Basketball World Cup	24	
Basketball	FIBA Women's Basketball World Cup		16
Basketball	2016 Summer Olympics	12	12
Hockey	Hockey World Cup	12	12
Hockey	2016 Summer Olympics	12	12
Football	FIFA World Cup	32	
Football	FIFA Women's World Cup		24
Football	2016 Summer Olympics	16	12
Handball	World Men's Handball Championship	24	
Handball	World Women's Handball Championship		24
Handball	2016 Summer Olympics	12	12
Rugby (sevens)	Rugby World Cup Sevens	24	16
Rugby (sevens)	2016 Summer Olympics	12	12
Ice Hockey	IIHF Ice Hockey World Championships	16	
Ice Hockey	IIHF Ice Hockey Women's World Championship		8
Ice Hockey	2014 Winter Olympics	12	8
Curling	World Curling Championships	12	
Curling	World Women's Curling Championship		12
Curling	2014 Winter Olympics	10	10

付録 A 各データセットで算出したレーティング

各データセットで算出したレーティングを示す。国名は IOC の 3 文字コード [21] を使用している。

表 6 Rating: Dataset 1 (just before London Olympic Games, Women)

RUS	0.5358	1	NED	0.2432	16	CAN	0.0231	31		
USA	0.5264	2	ARG	0.2072	17	EGY	0.0147	32		
BRA	0.5129	3	PER	0.2011	18	GBR	0.0000	33		
ITA	0.4862	4	PUR	0.1871	19	FRA	-0.0611	34		
CHN	0.4814	5	ALG	0.1860	20	SVK	-0.1297	35	SEY	-0.5120 46
TUR	0.4807	6	ROM	0.1832	21	UKR	-0.1299	36	DEN	-0.5145 47
POL	0.4546	7	BUL	0.1533	22	AUT	-0.1931	37	POR	-0.5326 48
GER	0.4440	8	TPE	0.1451	23	MEX	-0.2062	38	SWE	-0.5717 49
JPN	0.4174	9	KEN	0.1380	24	HUN	-0.3008	39	CHI	-0.6675 50
THA	0.4165	10	AZE	0.0768	25	ISR	-0.3298	40	HON	-0.7034 51
SRB	0.3957	11	CRO	0.0427	26	GRE	-0.4024	41	GEO	-1.2756 52
CUB	0.3775	12	ESP	0.0377	27	CRC	-0.4241	42		
KOR	0.3342	13	CZE	0.0256	28	BIH	-0.4341	43		
DOM	0.2939	14	VEN	0.0246	29	TTO	-0.4431	44		
BEL	0.2503	15	COL	0.0244	30	URU	-0.4896	45		

参考文献

- [1] Stefani Ray. The methodology of officially recognized international sports rating systems. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 7(4), 2011.
- [2] FIVB. FIVB volleyball world rankings. <http://www.fivb.org/en/volleyball/Rankings.asp>. referred in 2016/6/14.
- [3] Arpad E. Elo. *Ratings of Chess Players Past and Present*. HarperCollins Distribution Services, hardcover edition, 1979.
- [4] World Rugby. Rankings explanation. <http://www.worldrugby.org/rankings/explanation>. referred in 2016/6/14.
- [5] Han Joo Eom and Robert W. Schutz. Statistical analyses of volleyball team performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 63(1):11–18, 1992. PMID: 1574656.
- [6] Eleni Zetou, Athanasios Moustakidis, Nikolaos Tsigilis, and Andromahi Komninakidou. Does effectiveness of skill in complex i predict win in men’s olympic volleyball games? *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 3(4), 2007.
- [7] Lindsay W. Florence, Gilbert W. Fellingham and Pat R. Vehrs, and Nina P. Mortensen. Skill evaluation in women’s volleyball. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 4(2), 2008.
- [8] Rui Manuel Araújo, José Castro, Rui Marcelino, and Isabel R Mesquita. Relationship between the opponent block and the hitter in elite male volleyball. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 6(4), 2010.

表 7 Rating: Dataset 2 (just before Rio WOQT, Women)

BRA	0.6283	1	PUR	0.1418	16			
CHN	0.5605	2	BUL	0.0839	17			
USA	0.4890	3	DOM	0.0455	18			
SRB	0.4334	4	CAN	0.0407	19			
RUS	0.4096	5	ARG	0.0197	20			
NED	0.4035	6	KAZ	0.0000	21	ALG	-0.6819	31
GER	0.3825	7	CRO	-0.0466	22	CHI	-0.6979	32
THA	0.3691	8	CUB	-0.0693	23	BOT	-0.9086	33
JPN	0.3613	9	PER	-0.1154	24	UGA	-0.9653	34
ITA	0.3555	10	KEN	-0.1893	25			
TUR	0.2556	11	VEN	-0.2251	26			
BEL	0.2306	12	COL	-0.2584	27			
CZE	0.1880	13	CMR	-0.4104	28			
POL	0.1879	14	EGY	-0.5134	29			
KOR	0.1647	15	TUN	-0.6698	30			

- [9] Marco Ferrante and Giovanni Fonseca. On the winning probabilities and mean durations of volleyball. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 10(2), 2014.
- [10] Tristan Burton and Scott Powers. A linear model for estimating optimal service error fraction in volleyball. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 11(2), 2015.
- [11] Piotr Indyk and Rajeev Motwani. Approximate nearest neighbors: towards removing the curse of dimensionality. In *Proceedings of the thirtieth annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 604–613. ACM, 1998.
- [12] Ken Massey. Massey rating. <http://www.masseyratings.com/>. referred in 2016/6/14.
- [13] Hope McIlwain Elizabeth Knapper. Predicting wins and losses: A volleyball case study. *The College Mathematics Journal*, 46(5):352–358, 2015.
- [14] Sam Glasson, Brian Jeremieczyk, and Stephen R. Clarke. Simulation of women’s beach volleyball tournaments. *Australian Society for Operations Research*, 20(2):2–7, 2001.
- [15] ATP World Tour. Rankings FAQ. <http://www.atpworldtour.com/en/rankings/rankings-faq>. referred in 2016/6/14.
- [16] R. Hambleton. *Fundamentals of Item Response Theory (Measurement Methods for the Social Science)*. Sage Publications, Incorporated, new. edition, 9 1991.
- [17] R. J. de Ayala. *The Theory and Practice of Item Response Theory (Methodology in the Social Sciences)*. Guilford Pr, 1 edition, 12 2008.
- [18] World Rugby. World rankings confirm Japan’s victory as biggest shock. <http://www.rugbyworldcup.com/news/111746>, 10 2015. referred in 2016/6/14.
- [19] L. L. Kupper P. V. Rao. Ties in paired-comparison experiments: A generalization of the bradley-terry model. *Journal of the American Statistical Association*, 62(317):194–204, 1967.
- [20] Roger R. Davidson. On extending the bradley-terry model to accommodate ties in paired comparison experiments. *Journal of the American Statistical Association*, 65(329):317–328, 1970.
- [21] International Olympic Committee. List of all national olympic committees in IOC protocol order. <https://stillmed.olympic.org/media/Document%20Library/OlympicOrg/Documents/National-Olympic->

表8 Rating: Dataset 3 (just befor London Olympic Games, Men)

GER	0.3141	1	IRI	0.1628	16	GBR	0.0000	31			
POL	0.3100	2	SVK	0.1408	17	GRE	-0.0176	32			
BRA	0.3010	3	LAT	0.1279	18	NED	-0.0378	33	AUT	-0.1541	46
FRA	0.2678	4	FIN	0.1224	19	HUN	-0.0432	34	ISR	-0.1655	47
USA	0.2669	5	KOR	0.1073	20	PUR	-0.0482	35	COL	-0.2412	48
RUS	0.2551	6	JPN	0.1056	21	VEN	-0.0537	36	MKD	-0.2463	49
BEL	0.2541	7	CHN	0.1017	22	CMR	-0.0576	37	DOM	-0.3046	50
ITA	0.2523	8	EGY	0.0949	23	PAK	-0.0589	38	CHI	-0.3101	51
CZE	0.2420	9	POR	0.0758	24	UKR	-0.0807	39	BIH	-0.3218	52
CUB	0.2373	10	ESP	0.0654	25	MNE	-0.0955	40	TOT	-0.3786	53
AUS	0.2276	11	SLO	0.0496	26	DEN	-0.1075	41	GHA	-0.4402	54
BUL	0.2140	12	EST	0.0430	27	ALG	-0.1134	42	CRC	-0.4905	55
ARG	0.2076	13	TUN	0.0391	28	ROM	-0.1307	43	GEO	-0.7895	56
SRB	0.1952	14	TUR	0.0183	29	CRO	-0.1331	44			
CAN	0.1632	15	IND	0.0043	30	MEX	-0.1465	45			

Committees/List-of-National-Olympic-Committees-in-IOC-Protocol-Order.pdf. referred in 2016/6/15.

表 9 Rating: Dataset 4 (just before Rio WOQT, Men)

FRA	0.3044	1	BUL	0.0624	16		
BRA	0.3044	2	CZE	0.0612	17		
GER	0.3018	3	CAN	0.0549	18		
USA	0.2764	4	AUS	0.0549	19	VEN	-0.1180 31
POL	0.2542	5	NED	0.0503	20	CHI	-0.1581 32
SRB	0.2176	6	CUB	0.0145	21	PUR	-0.1585 33
ITA	0.2152	7	EGY	0.0084	22	KAZ	-0.1740 34
IRI	0.1871	8	ESP	0.0081	23	MEX	-0.1874 35
RUS	0.1734	9	CHN	0.0060	24	CMR	-0.2662 36
ARG	0.1621	10	GRE	-0.0200	25	COL	-0.2954 37
JPN	0.1013	11	SVK	-0.0472	26	CGO	-0.3238 38
BEL	0.0976	12	ALG	-0.0631	27	COD	-0.4898 39
TUR	0.0871	13	FIN	-0.0699	28	NGR	-0.5468 40
MNE	0.0662	14	POR	-0.1014	29		
KOR	0.0632	15	TUN	-0.1132	30		