慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	水球競技における得点を考慮したランキング手法の開発とその応用について
Sub Title	A new water polo world ranking system considering the score information
Author	鳥海, 崇(Toriumi, Takashi) 榎本, 至(Enomoto, Itaru)
Publisher	慶應義塾大学体育研究所
Publication year	2020
Jtitle	体育研究所紀要 (Bulletin of the institute of physical education, Keiō university). Vol.59, No.1 (2020. 1) ,p.1- 13
JaLC DOI	
Abstract	In this study, we develop a new water polo world ranking system, and compare it to the ranking published by FINA. The proposed ranking system is calculated using the Elo rating method, based mainly on win-loss information, while also considering score information. In particular, the method based on a sigmoid function showed high accuracy in terms of winning predictions, and a high rank correlation coefficient with the tournament rank. In addition, this method is able to identify possible instances of matches being fixed in order to obtain a higher tournament ranking.
Notes	研究資料
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00135710-00590001-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

研究資料

水球競技における得点を考慮したランキング手法の開発とその応用について

鳥海　崇 *　　榎本　至 **

a new water polo world ranking system considering the score information

Takashi Toriumi[1], Itaru Enomoto[2]

In this study, we develop a new water polo world ranking system, and compare it to the ranking published by FINA. The proposed ranking system is calculated using the Elo rating method, based mainly on win-loss information, while also considering score information. In particular, the method based on a sigmoid function showed high accuracy in terms of winning predictions, and a high rank correlation coefficient with the tournament rank. In addition, this method is able to identify possible instances of matches being fixed in order to obtain a higher tournament ranking.

キーワード：イロレーティング，水球，ランキング
Key words：Elo Rating，water polo，ranking

1．背　　景

近年，様々な競技において選手やチームを対象としたランキングを算出している。有名なランキングとしては，テニスの ATP ランキング（ATP，2019）やサッカーの FIFA ランキング（FIFA，2019）などが挙げられる。これらは観客が観戦の際に参考にするのみならず，特定の大会への参加基準とするものもある。このため，公平かつ正確なランキングの算出方法を確立することは，観客のみならず選手や関係者にとっても重要である。

昔からよく知られたランキング決定方法として，いわゆるリーグ戦と呼ばれる，全チームが同じ回数総当たりする場合における勝利数や勝率が挙げられる。リーグ戦を実施しない場合，適切なランキングを定めることは難しくなるが，この問題を解決するために試合結果の情報を基にした様々な計算手法が考案されている。例えば総当たりと似たような形式として，我が国の大学野球リーグでは全てのチームと２回以上対戦するという勝点制度を採用している。鳥海らはこの勝点制度による順位決定方法には不合理が生じることがあることを示し（鳥海と綿田，2017），また直接対決する機会がほとんどない異なる大学野球リーグに所属するチームをランキング計算手法により比較した（鳥海と綿田，2018）。

Stefani（2011）は様々な競技の国際ランキングの決定手法について調査している。全159種の競技のなかで国際ランキングを制定していない競技が60種ある一方，加算方式と呼ばれる，過去の大会で獲得した順位に応じてポイントを付与し，ある一定期間に獲得したポイントの合計に応じてランキングを作成する競技は84種ある（Stefani，2011）。世界水泳連盟（FINA）においても，五輪や世界選手権の出場権を付与する基準としては使われていないものの，同様の方式で水球の世界ランキングを発表している（FINA，2016）。この手法では自チームの獲得順位とその順位に付与されるポイント数を積み上げていくことでランキングポイントを算出できる。誰にもわかりやすい手法である一方，各チーム間の合計ポイン

＊慶應義塾大学体育研究所専任講師
＊＊鎌倉女子大学教育学部教授
1）Assistant Professor, Institute of Physical Education, Keio University
2）Professor, Faculty of Education, Kamakura Women's University

トの差や比が実力差を定量的に表すためには，各大会・各順位に対する付与ポイント，大会参加条件，大会形式を含めた総合的な設計が不可欠である（小中，2017）。

また，加算方式とは別の方式としてポイント交換方式が挙げられる。これはチェスのイロレーティング（Elo rating）（Elo，1979）に代表されるように，全ての対戦において結果に応じて対戦相手とポイントの一部を交換し，ある時点でのポイントを比較することでランキングを作成する手法である。この手法では１試合ごとにポイントが変化するため常にランキングを更新することができる反面，当該チームに関係のない全ての試合の結果とポイント変化を算出する必要がある。Stefani（2011）によると，ポイント交換方式に基づきランキングポイントを算出している競技は13種であった。球技では女子サッカーで用いられている（FIFA，2019）。

これら加算方式，交換方式の大半は勝敗情報のみを利用しており，得点情報については考慮していない。得点情報を考慮にいれてランキングを作成する方法も考案されている。有名なものではバスケットボール（FIBA，2019）やラグビー（World Rugby，2019），女子サッカー（FIFA，2019）などが挙げられる。しかしながらこれらの方法も原理的にはポイント交換方式を用いているが，様々な条件が付されており，ポイント加算方式と同様に全体を通じた総合的な設計が不可欠となっている。具体的には試合結果の得点差がバスケットボールでは９点差ごとに交換するポイントが変化し，ラグビーでは15点差以上で交換するポイントが1.5倍になる。また，女子サッカーでは０対０から６対12まで各スコアで交換するポイントが一覧表でまとめられている。これは両チームの合計得点がそれほど多くないため，ほぼすべての得点状況を想定しているためである。しかし，例えば水球のように10点程度の得点がある競技を想定する場合，バスケットボールやラグビーのように，恣意的にある点差で区切ってポイント数を変化させるには得点数が少なすぎ，女子サッカーのように全ての得点ケースを一覧表にするには得点数が多すぎるという問題がある。

このように得点を競うチーム競技の場合，従来のランキング手法では得点情報を無視した Elo レーティング等の計算手法は簡便だが妥当性は低くなり，得点情報を加味すると一定の得点差で交換するポイントを変化させるため，大会形式や得点差など，全体を通じた総合的な設計が必要になる。さらに水球のような10点程度の得点情報を加味した Elo レーティングの計算手法の開発に関する研究はこれまでほとんどなかった。そこで本研究では水球を対象として Elo レーティングに得点情報を加味することで，様々な得点状況に細かく対応できるランキング作成手法を提案する。

なお，本研究におけるランキングとレーティングについては，小中（2017）の定義を用いることとする。つまりランキングは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となる。

ある大会後に算出されるレーティングを考える際，以下の２つの要因が影響すると仮定する。

① 各チームがある一定期間に獲得もしくは損失してきた結果としての技能，実力

② 大会の対戦組み合わせなど制度上，もしくは各試合で生じる不確実性

ここで加算方式のランキングは上記の２つを区別せず，その大会の最終順位からのみ獲得できるポイントを基準に算出する一方，ポイント交換方式のランキングは，それまでの対象期間全ての試合結果から統計的に得られるものであり，また，対戦相手とのレーティング差により交換するレーティング量を決定するため，上記 ② の影響を極力排除している。そのため本研究でのレーティングは主に上記 ① の要因を指す。

最後に，当然のことながらランキング高位のチームが常に勝つとは限らない。それがスポーツの醍醐味である一方，意図的な勝敗操作（無気力試合，意図的な敗戦）の可能性が示唆される事例も指摘されている（泉＆小中，2016）。本研究では水球のリオ五輪の最終予選及び本戦を対象として，予選リーグ後の決勝トーナメント初戦となるたすき掛け戦に向けて，対戦相手の調整のために意図的な勝敗操作が生じる可能性について検討を加える。

２．目　　的

本研究では水球競技を対象として，得点を考慮した Elo レーティングを提案し，この手法を用いて各国のレーティングを算出する。そして FINA による国別ランキングや従来の Elo レーティングによる結果と比較して，本提案手法の有用性について検討する。

次に，本提案手法を用いてリオ五輪最終予選及び本戦における意図的な勝敗操作（無気力試合，意図的な敗戦）が生じる可能性について考察を加える。

3．方　　法

本節ではまず対象とする水球の世界ランキングについて議論し，その後レーティング算出方法を提案する。最後に提案手法を用いた適用事例としてのリオ五輪最終予選と本戦への適用について述べる。

3．1．提案手法によるランキング・レーティングの算出及び他指標との比較

3．1．1．ポイント加算方式

国際水泳連盟（FINA）は五輪，世界選手権などの主要国際大会の順位をランキングポイントに換算し，加算方式として一定期間の合計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（FINA，2019）。各順位に対しランキングポイントをいくつ付与するかの設計により，ランキング上位となるチームが異なる。図１に，主要国際大会の各順位で得られるランキングポイントを示す。五輪や世界選手権といった世界大会でも大会により優勝チームが得られるポイントが異なる。また，下位になるに従って各順位間で得られるポイントの差は小さくなっていくが，この小さくなる割合も各大会，各順位間で一定でなく，一貫性が保たれていない。さらに，下位については一律で同じポイントが与えられるため，勝敗による差異がつきにくい。また，大陸間の実力差もポイントに反映されていない。このように，FINA のランキングポイントの設計には数理的根拠が乏しく，したがって，このランキングポイントによりそのチームの実力を推定し，ランキング化する際の妥当性には大きな疑問が残る。

3．1．2．ポイント交換方式①（Eloレーティングの手法）

ここでは広く用いられている Elo レーティング（Elo，1979）について解説する。チームの成績を示すパラメータ（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，i が勝利する確率 $p_{i,j}$ が次式に従うと仮定する。

$$p_{i,j} = \frac{1}{1+10^{\left(\frac{-r_j-r_i}{H}\right)}} \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

この仮定はロジスティック回帰モデルと呼ばれ，がんの発症率や迷惑メールの出現率など，幅広い分野で利用されている。本研究ではレーティングが正しく設計されていれば，式（1）から得られる勝率で試合結果を予測することが可能となる。ここで H は両チームのレーティング差の影響を定める定数であるが，多くの競技では H＝400 が用いられている（Stefani，2011）。

また，チーム i，j 間の試合結果が

$$s_{i,j} = \begin{cases} 1\ (i\ wins) \\ \frac{1}{2}\ (i\ draws) \\ 0\ (i\ loses) \end{cases} \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

で表されるとしたとき，試合後のレーティングが

$$r'_i = r_i + k(s_{i,j} - p_{i,j}) \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

と更新される。

この方式では，レーティングの算出には試合前の両チームのレーティングが必要である。すなわち，あるチームのレーティングを計算するためには，関与する全チームかつ全期間の対戦結果が必要である。

式（3）の定数 k は k 因子（K-factor）と呼ばれ，レー

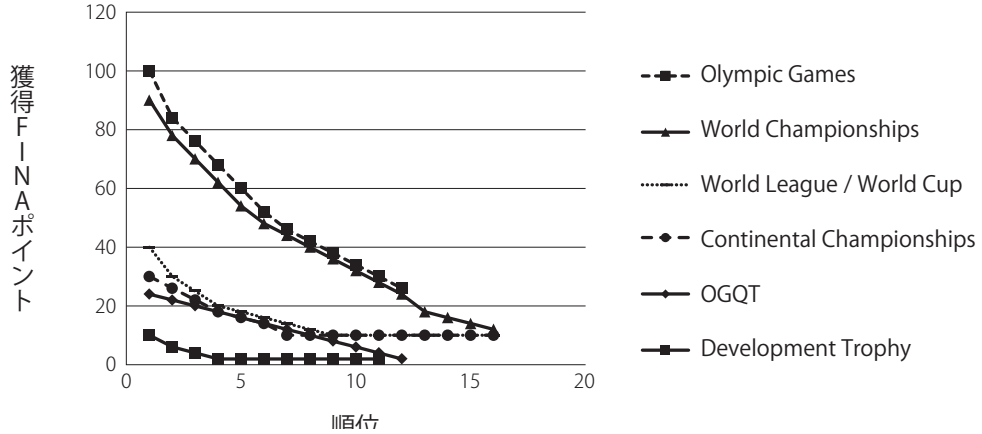


図１．主要国際大会での順位と獲得できるランキングポイントの関係

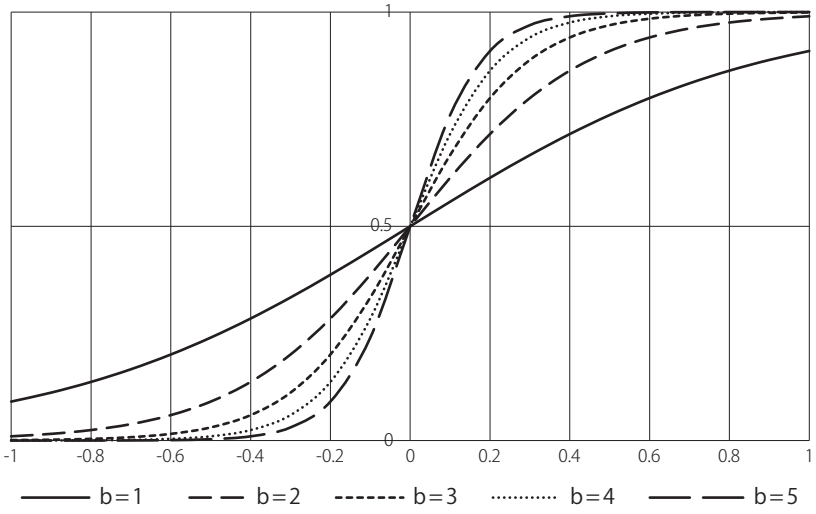


図２．ゲイン（b）の値を変化させた場合のシグモイド関数 $f(x)=\frac{1}{1+10^{-bx}}$

ティングの更新量を定める定数である。この値の設定により，レーティングの性質が変化する。例えばｋが大きすぎれば１回の勝利により大きなレーティング変化を生じさせ，逆に小さすぎれば何回勝利しても小さなレーティング変化しか生じない。チェスのプロレベルでは16が利用されており，Eloレーティングを用いている女子サッカーでは大会の重要度に応じてｋの値を変化させている。

３．１．３．ポイント交換方式②（本研究における提案手法）

Eloレーティングの手法において，レーティング更新の式（3）において，$p_{i,j}$は試合前のレーティング差が試合後のレーティングに与える影響を示しており，$s_{i,j}$は試合結果（勝敗）が試合後のレーティングに与える影響を示している。Eloレーティングのように$s_{i,j}$が勝敗のみでレーティングを算出する場合，水球のような球技で１点差で勝利しても10点差で勝利しても，対戦相手が同じであればレーティングの更新量は同じであり，これはより詳細なレーティングの更新を阻害している可能性がある。このような場合，勝敗だけでなく，得点を考慮することでより適切なレーティングの更新量を算出することができると考えられる。本研究ではこの点を改善する手法として，試合結果が与える影響を示す$s_{i,j}$に対して２つの処理を提案する。

以下に２つの提案手法のそれぞれの概要を以下に述べる。

提案手法①

チームｉ，ｊ間の試合において，チームｉの得点（チームｊの失点）を$a_{i,j}$，チームｊの得点（チームｉの失点）を$a_{j,i}$とする。

ここでチームｉ，ｊ間の試合結果$s_{i,j}$を

$$s_{i,j}=\frac{a_{ij}}{a_{ij}+a_{ji}} \quad \cdots\cdots\cdots（4）$$

とするものである。試合結果を得点の比で記載する手法はバレーボールの取得セット数によるレーティング算出を試みた小中（2017）でも提案されているように，得点などの試合結果をレーティングに算出する際に用いられる手法である。

提案手法②

チームｉ，ｊ間の試合において，チームｉの得失点を$a_{ij}-a_{ji}$として，試合結果$s_{i,j}$を

$$s_{i,j}=\frac{1}{1+10^{-b(a_{ij}-a_{ji})}} \quad \cdots\cdots\cdots（5）$$

とするものである。

ここで以下の式

$$f(x)=\frac{1}{1+10^{-bx}} \quad \cdots\cdots\cdots（6）$$

これはシグモイド関数と呼ばれ，以下のような特徴をもつ単調増加関数である。

$$\lim_{x\to\infty} f(x)=1$$
$$\lim_{x\to-\infty} f(x)=0 \quad \cdots\cdots\cdots（7）$$
$$f(0)=\frac{1}{2}$$

ここでｂをゲインと呼び，図２に示すように，この値

によりチームi，j間の得点差$a_{ij}-a_{ji}$の与える影響が変化し，$s_{i,j}$の値が変化する。

なお，ここでb→∞としたときはEloレーティングと同等になる。つまり本手法はEloレーティングの拡張版ということができる。

提案手法①及び②により決定した$s_{i,j}$に対して，Eloレーティングと同様に

$$p_{i,j}=\frac{1}{1+10^{\left(\frac{-r_j-r_i}{H}\right)}} \quad \cdots\cdots\cdots (8)$$

として計算し，試合後のレーティングを

$$r'_i=r_i+k(s_{i,j}-p_{i,j}) \quad \cdots\cdots\cdots (9)$$

により算出する。

3．1．4．計算の流れ

本研究ではEloレーティング，提案手法①，提案手法②のそれぞれ3つの手法において，以下の流れでパラメータを測定した。

i．各チームのレーティング初期値を1500とし，またk，H，bをパラメータとして調査対象期間中の全ての試合結果からチームのレーティングを算出する。

ii．それぞれの試合において，試合前のレーティング高位のチームが勝利する確率qが最も高くなるようなk，H，bの値を求める。kとHに関しては1から1024まで1ずつ，bに関しては0.001から1まで0.001ずつ変化させて確率qを求めた。

なお，以下のような場合はqの算出から除外した。

・試合前のレーティングが等しい場合（$r_i=r_j$）

・試合後の得点が等しい（同点）場合（$a_{i,j}=a_{j,i}$）

3．1．5．調査対象期間，大会

2012年ロンドン五輪以降，2016年リオ五輪までのFINAおよび各大陸水泳連盟主催の各種国際大会の結果を対象とした（全20大会，計749試合）。表1に対象となった国際大会の分類と実施年及び試合数を示す。

3．1．6．本提案手法の適用事例として，リオ五輪最終予選および本戦での事例の検討

リオ五輪最終予選及び本戦を事例として，それぞれの手法用いて実際の試合結果と各チームのレーティングと

表1．2012年ロンドン五輪後から2016年リオ五輪までの主要国際大会

No.	実施年	大会分類	試合数
1	2012	Asian Championships	28
2	2013	American Championships	10
3	2013	Development Trophy	30
4	2013	World League	56
5	2013	World Championships	44
6	2013	Asian Championships	14
7	2014	World League	66
8	2014	European Championships	44
9	2014	World Cup	24
10	2014	Asian Championships	16
11	2015	American Championships	5
12	2015	Development Trophy	25
13	2015	World League	94
14	2015	American Championships	20
15	2015	World Championships	48
16	2015	Asian Championships	10
17	2016	European Championships	56
18	2016	Olympic Games Qualification Tournament	42
19	2016	World League	75
20	2016	Olympic Games	42
		合計	749

を比較する。それぞれの大会の概要は以下の通りである。

リオ五輪最終予選は2016年４月３日から４月10日までイタリアのトリエステで実施された。この大会の上位４チームにリオ五輪への出場権が与えられる。参加国12チームを６チームずつ２グループに分け，それぞれのグループで総当たり戦を実施してグループ内の順位を決定する。その後，両グループ上位４チームずつで相手グループとのたすき掛け戦から始まる決勝トーナメントを実施する。このたすき掛け戦での勝利は上位４チームの確定，すなわちリオ五輪の出場権獲得を意味するため，出場各チームにとって最も重要な目標ともいえる。そのため，たすき掛け戦の対戦相手を操作する目的でグループ予選最終日に試合結果の操作が発生する可能性が考えられる。表２にグループ予選最終日試合前の勝点表を示す。

リオ五輪は2016年８月６日から20日までブラジルのリオデジャネイロにて行われた。最終予選と同様の形式で出場12か国を６チームずつ２グループに分け，それぞれ総当たりの予選リーグを実施してグループ内の順位を決定する。その後は両グループ上位４チームずつで相手グループとのたすき掛け戦から始まる決勝トーナメントを実施する。ここでもこのたすき掛け戦に勝利することで最終順位が大きく変動するため，グループ予選最終日に試合結果の操作が発生する可能性が考えられる。表３にグループ予選最終日試合前の勝点表を示す。

両大会における，たすき掛け戦を前にした予選リーグ最終戦を中心に，対戦チーム同士のレーティング差とその試合結果について調べた。

表２．リオ五輪最終予選のグループ予選最終日，試合前の勝点表

グループ A	国名	勝	分	負	勝点
1	HUN	3	1	0	7
2	CAN	2	2	0	6
2	FRA	3	0	1	6
4	ROM	1	1	2	3
5	RUS	1	0	3	2
6	SVK	0	0	4	0

グループ B	国名	勝	分	負	勝点	得失点
1	ITA	3	0	1	6	＋35
1	NED	3	0	1	6	0
1	ESP	3	0	1	6	＋18
4	GER	1	1	2	3	＋13
5	KAZ	1	1	2	3	－９
6	RSA	0	0	4	0	－57

表３．リオ五輪のグループ予選最終日，試合前の勝点表

グループ予選最終日（2016/８/14）試合前の勝点表

グループ A	国名	勝	分	負	勝点
1	GRE	2	2	0	6
1	BRA	3	0	1	6
3	HUN	1	3	0	5
4	SRB	1	2	1	4
5	AUS	1	1	2	3
6	JPN	0	0	4	0

グループ B	国名	勝	分	負	勝点
1	ESP	3	0	1	6
1	CRO	3	0	1	6
1	ITA	3	0	1	6
4	MNE	2	0	2	4
5	USA	1	0	3	2
6	FRA	0	0	4	0

４．結　　果

３つの手法を用いて q と H，k の関係性を調べた結果の一例として提案手法①による結果を等高線図として図３に示す。Elo レーティングや提案手法②も同様の傾向で，おおまかに H ＜ k の領域で q が最大値を取っていることが確認できた。

次に H＝300，400，500のそれぞれにおいて，k と q の関係を調べた。その一例として提案手法①による結果を図４に示す。H と k がそれぞれ H＝400，262＜ k ＜268及び，H＝500，319＜ k ＜337において q が最大値 q＝77.1% を取っていることが確認できた。

また，提案手法②による，H＝400の際のqとk，bの関係を等高線として図5に示す。100＜k＜400の領域でqが最大値を取っていることが確認できた。

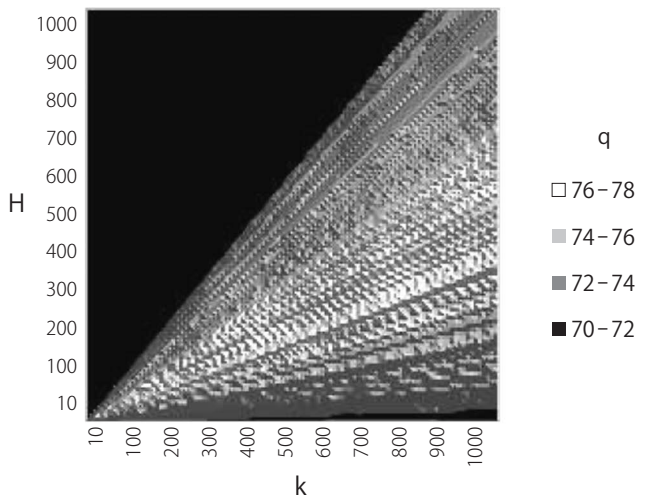
最後に提案手法②による，H＝400，k＝190の際のqとbの関係を図6に示す。

0.133＜b＜0.142においてqが最大値q＝79.5%を取ることがわかった。

また，調査対象期間中に実施された各大会の順位と，それぞれのチームのレーティングの順位との相関を調べる目的で，スピアマンの順位相関係数及びケンドールの順位相関係数をそれぞれ求め，全20大会から得られたそれぞれの結果の平均値を算出した。これらの結果と各手法におけるqの最大値を表4にまとめた。各手法におけるqの最大値はEloレーティングがq＝75.9%，提案手法①がq＝77.1%，提案手法②がq＝79.5%であった。また，各大会前のFINAランキングを基に同様のqを求めるとq＝76.9%となった。スピアマンの順位相関係数は提案手法②の0.914が最も高く，続いてEloレーティングの0.853，提案手法①の0.825の順となった。また，FINAランキングから同様の順位相関係数を求めると0.752となった。また，ケンドール順位相関係数は提案手法②の0.840が最も高く，続いてEloレーティングの0.746，提案手法①の0.714の順となった。また，FINAランキングから同様の順位相関係数を求めると0.633となった。

本提案手法②を用いて計算した，リオ五輪最終予選のグループ予選最終日の結果とレーティングを表5に，そしてFRA-CANのように8点差となった対戦とその時のレーティング差を表6に示す。全42試合中，FRA-CANのレーティング差29.4というのは5番目に小さなレーティング差であった。表7に決勝トーナメントの結果と最終レーティングを示す。結果としてたすき掛け戦ではFRAがNEDに12対11で勝利してリオ五輪出場を獲得した一方，CANはESPに7対8で敗れ，リオ五輪出場を逃している。なお，大会後の各チームのレーティングを見ても，FRAが1508，CANが1647であり，リオ五輪出場のFRAの方が不出場のCANよりも低位であった。

同様にリオ五輪のグループ予選最終日の結果とレーティングを表8に，そしてCRO-FRAのようにレーティング低位のチームが勝利（いわゆる番狂わせ）した中で，レーティング差が大きい上位10試合を表9に示す。当該試合が上位から4番目にレーティング差の大きい試合であった。表10にリオ五輪の決勝トーナメントの結果と最終レーティングを示す。CROがFRAに敗れたことで，たすき掛け戦で対決しなかったCROとSRBがそれぞれ順当に勝ち上り，決勝戦で対戦した結果，SRBが11対7で勝利して優勝，CROが準優勝となった。



表示は黒色から白色まで4段階に分けられており（70%＜q＜72%では黒色，72%＜q＜74%では濃灰色，74%＜q＜76%では淡灰色，76%＜q＜78%では白色），確率qが高くなるにつれて黒色から白色へと変化する。図の左上部（H＞kの領域）では70%＜q＜72%，右下部（H＜kの領域）では72%＜qとなっており，特に直接H＝0.4kの周辺で76%＜q＜78%の領域があることがわかる。

図3．提案手法①における，定数kとHを変化させたときの確率（q）の等高線図

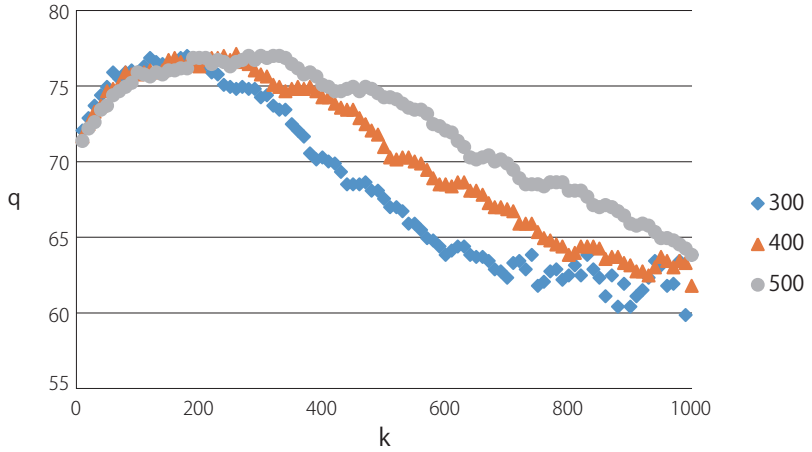
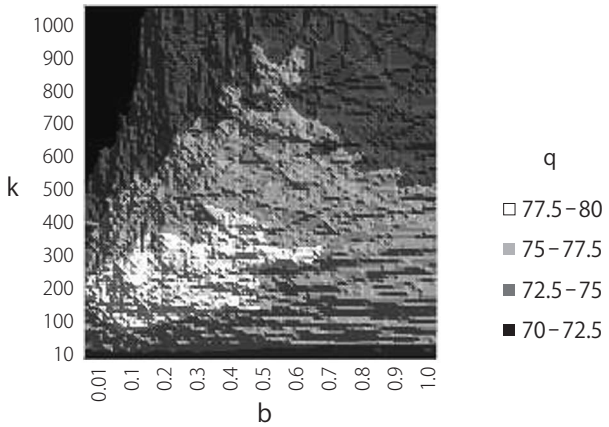


図４．提案手法①における，H=300，400，500 のときの定数 k と確率（q）との関係



表示は黒色から白書まで４段階に分けられており（70%＜q＜72.5%では黒色，72.5%＜q＜75%では濃灰色，75%＜q＜77.5%では淡灰色，77.5%＜q＜80%では白色），確率 q が高くなるにつれて黒色から白色へと変化する。図の左端上部のみ70%＜q＜72.5%の領域があり，100＜k＜400かつ0.1＜b＜0.5に77.5%＜q＜80%の領域がある。

図５．提案手法②における，定数 k とゲイン（b）を変化させたときの確率（q）の等高線図（H＝400）

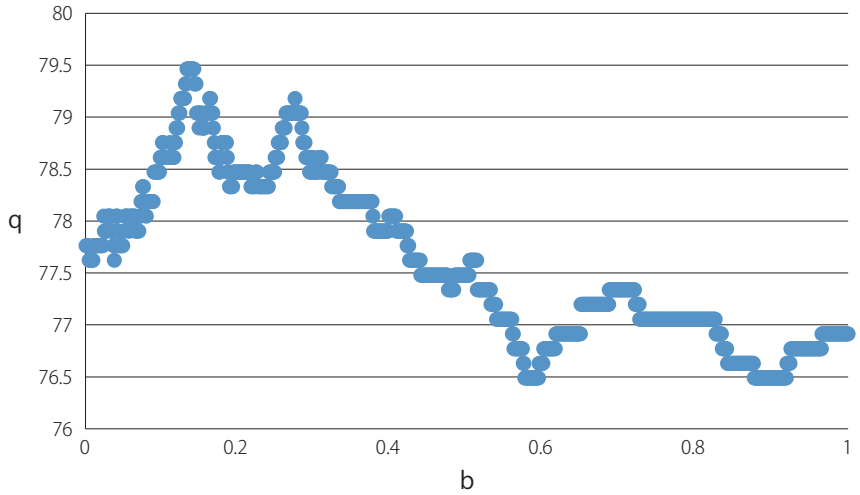


図６．提案手法②における H＝400，k＝190 でのゲイン（b）と確率（q）の関係

表４．調査対象期間の国際大会大会における，各種ランキング手法の確率（q），及び大会後の順位との順位相関係数の平均（s：スピアマン，τ：ケンドール）

	確率	順位相関係数	
	q	s	τ
Elo レーティング	75.9	0.853	0.746
提案手法 ①	77.1	0.825	0.714
提案手法 ②	79.5	0.914	0.840
FINA ランキング	76.9	0.752	0.633

表５．リオ五輪最終予選のグループ予選最終日，試合の結果と試合後の勝点表

2016/ 4 / 7	13:50	FRA（1576）	5-13	CAN（1606）
	15:10	HUN（1753）	16-7	SVK（1481）
	16:30	RUS（1534）	8-8	ROM（1547）
	17:50	ESP（1720）	16-4	KAZ（1514）
	19:10	NED（1530）	17-7	RSA（1277）
	20:30	ITA（1728）	12-6	GER（1500）

グループ A	国名	勝	分	負	勝点
1	HUN	4	1	0	9
2	CAN	3	2	0	8
3	FRA	3	0	2	6
4	ROM	1	2	2	4
5	RUS	1	1	3	3
6	SVK	0	0	5	0

グループ B	国名	勝	分	負	勝点	得失点
1	ITA	4	0	1	8	＋41
2	NED	4	0	1	8	＋10
3	ESP	4	0	1	8	＋30
4	GER	1	1	3	3	＋７
5	KAZ	1	1	3	3	－21
6	RSA	0	0	5	0	－67

勝点が同じ場合，直接対決の勝点，直接対決の得失点の順に比較

グループ B：① 直接対決の勝点は，ITA，NED，EPS が 2 で並ぶ

② 直接対決の得失点は ITA が＋５で１位

③ NED と ESP の直接対決の勝ち点は NED が 2，ESP が 0

表６．調査対象期間の国際大会において８点差がついた試合と提案手法 ② によるその時のレート差（僅差上位10試合）

No.	実施日	対戦国A	対戦国B	レートA	レートB	レート差	得点A	得点B	点差
1	2012/11/19	HKG	THA	1500	1500	0.0	4	12	8
2	2013/ 1 /31	ARG	CAN	1528	1536	7.6	6	14	8
3	2013/10/ 3	SIN	CHN	1450	1467	16.6	8	0	8
4	2013/ 5 / 8	TUN	PER	1414	1394	20.2	10	2	8
5	2016/ 4 / 7	FRA	CAN	1576	1605	29.4	5	13	8
6	2014/ 9 /30	JPN	KOR	1511	1474	36.6	13	5	8
7	2016/ 8 / 8	JPN	BRA	1571	1623	51.5	8	16	8
8	2016/ 1 /20	MLT	SVK	1398	1458	59.6	9	17	8
9	2013/ 5 / 9	PRI	RSA	1521	1459	62.4	14	6	8
10	2016/ 6 /21	GRE	JPN	1556	1618	62.6	15	7	8

表７．リオ五輪最終予選の決勝トーナメントの結果

たすき掛け戦（準々決勝；勝利チームはリオ五輪出場権獲得）				
2016/４/８	16:00	HUN（B1）	8-7	GER（A4）
	17:30	CAN（B2）	7-8	ESP（A3）
	19:00	FRA（B3）	12-11	NED（A2）
	20:30	ROM（B4）	7-8	ITA（A1）

準決勝				
2016/４/９	19:00	HUN	15-9	FRA
	20:30	ESP	5-6	ITA
決勝				
2016/４/10	17:50	HUN	10-8	ITA

順位	国名	レーティング
１位	HUN	1747
２位	ITA	1699
３位	ESP	1726
４位	FRA	1508
５位	NED	1583
６位	CAN	1647
７位	ROU	1548
８位	GER	1519
９位	RUS	1537
10位	KAZ	1492
11位	SVK	1474
12位	RSA	1266

表８．リオ五輪のグループ予選最終日，試合結果と試合後の勝点表

グループ予選最終日（2016/８/14）の結果

2016/８/14	12:50	MNE（1751）	9-9	ESP（1544）
	14:10	AUS（1670）	12-7	GRE（1777）
	15:30	USA（1665）	10-7	ITA（1681）
	16:50	FRA（1538）	9-8	CRO（1725）
	19:30	SRB（1754）	12-8	JPN（1527）
	20:50	BRA（1649）	6-10	HUN（1764）

グループ予選最終日（2016/８/14）試合後の勝点表

グループＡ	国名	勝	分	負	勝点
1	HUN	2	3	0	7
2	GRE	2	2	1	6
3	BRA	3	0	2	6
4	SRB	2	2	1	6
5	AUS	2	1	2	5
6	JPN	0	0	5	0

グループＢ	国名	勝	分	負	勝点
1	ESP	3	1	1	7
2	CRO	3	0	2	6
3	ITA	3	0	2	6
4	MNE	2	1	2	5
5	USA	2	0	3	4
6	FRA	1	0	4	2

勝点が同じ場合，直接対決の勝点，直接対決の得失点の順に比較

グループＡ：直接対決の勝点，GRE が３，BRA が２，SRB が１

グループＢ：直接対決の勝点，CRO が２，ITA が０

表９．調査対象期間の国際大会においてレート下位のチームが勝った試合と，提案手法 ② によるその時のレート差（レート差上位10試合）

No.	実施日	対戦国A	対戦国B	レートA	レートB	レート差	得点A	得点B
1	2016/ 4 / 3	ESP	NED	1731	1423	308.5	5	7
2	2014/ 2 /15	RUS	ROU	1634	1391	243.3	7	13
3	2016/ 1 /15	GRE	RUS	1753	1514	239.2	8	9
4	2016/ 8 /14	CRO	FRA	1725	1539	186.6	8	9
5	2015/ 7 / 8	ECU	ARG	1463	1283	179.6	8	21
6	2016/ 8 /10	SRB	BRA	1802	1623	179.3	5	6
7	2015/12/16	IRI	JPN	1729	1552	177.0	2	23
8	2015/ 2 / 2	FRA	TUR	1478	1309	168.6	7	9
9	2013/ 6 /16	CHN	SRB	1731	1572	159.0	5	13
10	2016/ 6 /22	ITA	GRE	1778	1626	152.6	4	15

表10．リオ五輪の決勝トーナメントの結果

たすき掛け戦（準々決勝）				
2016/ 8 /16	11:00	HUN（B1）	11-13	MNE（A4）
	12:20	BRA（B3）	6-10	CRO（A2）
	15:10	GRE（B2）	5-9	ITA（A3）
	16:30	SRB（B4）	10-7	ESP（A1）

準決勝				
2016/ 8 /18	12:20	CRO	12-8	MNE
	16:30	SRB	10-8	ITA
決勝				
2016/ 8 /20	17:50	SRB	11-7	CRO

順位	国名	レーティング
1 位	SRB	1807
2 位	CRO	1724
3 位	ITA	1723
4 位	MNE	1694
5 位	HUN	1774
6 位	GRE	1693
7 位	ESP	1673
8 位	BRA	1599
9 位	AUS	1737
10位	USA	1698
11位	FRA	1588
12位	JPN	1536

5．考　　察

5．1．結果の妥当性について

表４の結果より，対戦前に算出したレーティングを比較し，高位のレーティングを有するチームが勝利する確率 q は提案手法 ② が79.5% であり，提案手法 ① の77.1% や Elo レーティングの75.9% よりも高値であった。また，各大会の実際の順位と比較すると，提案手法 ② は強い相関（$s = 0.914$，$\tau = 0.840$）があり，Elo レーティング及び提案手法 ① は中程度の相関（$s = 0.853$，$\tau = 0.746$ 及び $s = 0.825$，$\tau = 0.714$）があることが確認できた。これらの結果より，特に提案手法 ② に基づくレーティングは各チームの実力を適切に評価し，その後の試合結果をある程度予測できることが示された。

5．2．FINA ランキング，他競技のランキングとの比較

提案手法 ① 及び ② と FINA のランキングから算出した結果を比較すると，提案手法 ② は q および順位相関係数のどちらにおいても FINA のランキングよりもよい結果が得られた。なお，q に関しては FINA ランキングが提案手法 ① と同等であり，Elo レーティングより高くなった一方，順位相関係数に関しては FINA のランキングが最も相関が低くなった。

Stefani（2011）ではサッカー（FIFA2010　ワールドカップ），バスケットボール（FIBA2010　ワールドカップ），テニス（2006～2010のグランドスラム）のそれぞれの国際大会における q について算出している。それによると，サッカーで q＝48%，バスケットボールで q＝69%，テニスの男子で q＝78%，女子で q＝77% であった。本研究では最も高い提案手法 ② で q＝79.5% であり，最も低い Elo レーティングで q＝75.9% であった。異なる競技間での q の値の直接比較はできないが，大まかな大小関係からも本研究の結果が試合結果をある程度予測できることが示された。

5．3．試合前のレーティング差と試合結果について

5．3．1．リオ五輪最終予選について

表 5 のグループ予選最終日は，第 4 ～ 6 試合となるグループ B はそれぞれの対戦においてレーティングが大きく離れており，対戦結果及びグループ内順位の予想がほぼつく状態であった。その一方で第 1 試合のグループ A の FRA 対 CAN はレーティング差が29.4と非常に拮抗しており，接戦が予想された。ただし，この試合に勝つとグループ A 2 位となり，その後のたすき掛け戦でグループ B 3 位の ESP（レーティング1700）との対戦が，負けるとグループ A 3 位となりグループ B 2 位の NED（同1532）との対戦が予想された。このように予選最終日に負けた方がその後の大事な試合でレーティングの低い相手との対戦が予想される状況となった。結果的に表 5 のようにこの試合は FRA が 5 対13の 8 点差で敗北した。

ここで表 6 から，この試合は 8 点差がついた対戦の中で 5 番目に小さなレーティング差であった。そしてこの試合よりもレーティング差が小さい試合というのは，調査開始から 1 年以内の各チームのレーティング差が小さい試合のみであった。これらのことから，レーティング差が小さい試合にも関わらず 8 点差という大差で敗れたということは，FRA があえて敗北を選ぶ無気力試合を行った可能性がうかがえる。

5．3．2．リオ五輪について

表 8 のグループ予選最終日は，SRB（1754）のグループ A 4 位が濃厚であった。グループ B の予選最終試合は CRO 対 FRA であった。ここで CRO が勝つとグループ B 1 位となり，たすき掛け戦でグループ A の 4 位である SRB もしくは HUN（1764）との対戦が予定されていた。結果として CRO 対 FRA の試合は CRO が 8 対 9 で敗北し，CRO がグループ B の 2 位となった。ここで表 8 からこの試合前のレーティングは CRO が1725で FRA が1539であり，レーティング差が186.6であった。そして表 9 から，この試合は 4 番目に大きな番狂わせの試合であった。これらのことから，レーティングが十分に高い CRO がたすき掛け戦で SRB との対戦を意図的に避ける目的で FRA に敗北した可能性がうかがえる。表 8 のグループ予選最終日の試合結果と試合後の勝点表から，結局 SRB がグループ A の 4 位，CRO がグループ B の 2 位となり，両チームのたすき掛け戦での直接対決は回避され，表10のように結果として SRB が優勝，CRO が準優勝となった。

このように本手法を用いて対戦チームのレーティングを比較することで，無気力な試合や意図的に試合に敗れたと考えられる現象が確認できた。これは各チームが大会において高い順位を目指すあまり，たすき掛け戦の対戦相手を操作する目的で，予選リーグ最終戦間近にあえて敗北を選ぶ，もしくは無気力な試合をすると疑われる事例として挙げられる。

このような事例がもし本当に行われていたとしたならば，レーティングの正確性を低下させる要因になりうるものであるだけなでなく，そもそもスポーツの品位を貶める行為である。このような事態を避けるためにも今後，現状の対戦方式を採用している FINA ルールの見直しをすることが重要になるだろう。

6．まとめ

得点情報を加味した Elo レーティングを用いて各チームのレーティングを算出することで水球の世界ランキングを作成し，FINA が発表しているランキングと比較した。提案手法 ② については FINA のランキングよりも勝利予想確率（q）も大会順位との順位相関係数についても高値であった。また，本手法を用いることで大会上位を目指しての意図的な敗戦や無気力試合の可能性について言及することができた。

参考文献

1．ATP Rankings,
https://www.atptour.com/en/rankings, accessed 2019/8/31
2．Elo, Arpad E. The rating of chessplayers, past and present. Arco Pub., 1978.
3．FIBA World Ranking Presented by NIKE
https://www.fiba.basketball/rankingmen,
accessed 2019/8/31
4．The FIFA Coca-Cola World Ranking
https://www.fifa.com/fifa-world-ranking,
accessed 2019/8/31
5．FINA BY LAWS BL9.4 Water Polo Tournaments at Olympic Games and World Championships, 34-50,
accessed 2019/8/31
https://www.fina.org/sites/default/files/fina_by_laws_-_16032018_new.pdf, accessed 2019/8/31
6．FINA Water Polo World Ranking 2012-2016
https://www.fina.org/sites/default/files/general/fina_water_polo_world_ranking_2012-2016_4.pdf,
accessed 2019/8/31
7．FINA WATER POLO WORLD RANKING MEN POINTS SCORE
https://www.fina.org/sites/default/files/general/points_tables.pdf, accessed 2019/8/31
8．泉武志，小中英嗣．“J1リーグ2ステージ＋ポストシーズン制度の統計的分析．” 日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌 59.（2016）：21-37.
9．小中英嗣．“バレーボール各国代表チームのレーティング手法の提案および結果予測・大会形式評価への応用．” 統計数理 65. 2（2017）：251-269.
10. Stefani, Ray. “The methodology of officially recognized international sports rating systems.” Journal of Quantitative Analysis in Sports 7. 4（2011）.
11. 鳥海崇，綿田博人．“東京六大学野球リーグ戦において勝敗結果から計算する優勝チームと勝点・勝率との比較研究．” 慶應義塾大学体育研究所紀要 56. 1（2017）：45-53.
12. 鳥海崇，綿田博人．“東京六大学野球リーグ及び東都大学野球リーグを含めた各大学野球連盟における過去30シーズンの平均競技力の比較研究．” 慶應義塾大学体育研究所紀要 57. 1（2018）：43-56.
13. World Rugby（2019）Ranking Explanation,
https://www.world.rugby/rankings/explanation,
accessed 2019/8/31

（受付：2019年9月11日，受理：2019年11月12日）