

## 〈報告(科学研究費研究成果報告)〉

## 記録系・採点系・格闘技系五輪競技の数学モデリングの研究

廣津 信義

Study on mathematical modeling for Olympic sports in terms of athletics, gymnastics and judo.

Nobuyoshi HIROTSU

## 〈研究成果の概要〉

記録系・採点系・格闘技系五輪競技として、陸上(リレー競技)・体操・柔道を主な対象とし、競技をシステムして捉えて定式化する数学モデリングを行った。リレー競技については、合計タイムの確率分布を算出するモデル、体操については、団体戦での総合得点の確率分布を算出するモデル、柔道については、団体戦でのチーム・選手を相対評価するAHP (Analytic Hierarchy Process) を用いたモデルを作成した。指導者の意見を反映し競技現場で適用可能な数学モデルを提示することができた。

We tried to develop mathematical models for Olympic sports focusing on athletics (relay), gymnastics and judo, by considering the event as a system. We formulated the models to calculate the probability distribution of total time in a relay event, to calculate the probability distribution of team score in team competition of gymnastics, and to evaluate teams and athletes using AHP (Analytic Hierarchy Process) in team completion of judo. We proposed practical models which can be applicable to real competitions by reflecting the view of coaches.

## 〈科学研究費の概要〉

機関番号：32620

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009~2012

課題番号：21510159

研究課題名(和文) 記録系・採点系・格闘技系五輪競技の数学モデリングの研究

研究課題名(英文) Study on mathematical modeling for Olympic sports in terms of athletics, gymnastics and judo.

研究代表者：

廣津信義 (HIROTSU NOBUYOSHI)

順天堂大学・スポーツ健康科学部・准教授

研究者番号：90360726

交付決定額：

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 社会システム工学・安全システム

キーワード：数学モデル, 陸上競技, 体操, 柔道, 剣道, スポーツ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年のITの進展に伴い、スポーツ現場でも各

種のゲーム分析システムが、野球・サッカー・バレーボールなどのボールゲームを主として導入されており、競技自体をシステムとして捉えて定式化するという数学モデリングを試みた研究もなされている。一方、陸上・体操・柔道などの非ボールゲームについては、映像解析や動作分析は進んでいるが、ゲーム分析システムの導入はなされておらず、数学モデリングを試みた研究も少ない。

- (2) スポーツの数学モデリングの研究については、2006年に日本オペレーションズ・リサーチ学会機関誌51巻6号で「スポーツとモデリング」特集が生まれ、2007年にはIMA (The Institute of Mathematics and its Applications) 主催で「Mathematics in Sport」の第1回国際会議が、2009年には第2回国際会議が開催されるという状況であった。
- (3) 2008年の北京五輪ではスポーツ振興基本計画で目標とされたメダル数30個以上が実現できず、世界レベルでの選手層の厚さを考えたとき、新たな視点からの分析による競技サポートが必須といえる。その中で、オペレーションズ・リサーチの立場から数学モデリングによる五輪競技の研究が望まれていると考え、本研究を開始した。

## 2. 研究の目的

- (1) 我々はこれまでボールゲームを対象として、競技をシステムとして捉え、数学モデルを作成することにより戦術決定を支援する研究などを行ってきたが、本研究では、非ボールゲームも支援できるような数学モデルを作成していく。
- (2) 競技としては五輪競技(夏季競技)を主な研究対象とし、具体的には、陸上・体操・柔道に代表される記録系・採点系・格闘技系競技に絞って数学モデリングを進めていく。
- (3) 達成目標としては、競技別に適用可能な手法を検討した後に、選定された数競技について具体的な数学モデルを作成し、競技現場での適用についても検討していく。

## 3. 研究の方法

- (1) 記録系・採点系・格闘技系五輪競技の数学モデリングに際して、競技別に適用可能な手法を検討し、記録系・採点系・格闘技系からそれぞれ1~2競技を調査・選定し、具体的な数学モデルを策定した。数学モデルに基づき各競技に関する実データを取得・解析を行ない、結果を競技現場にフィードバックしつつ補正することで数学モデルを作成していった。
- (2) 適用競技の調査・選定については、各競技の競技システムや戦術などに関する調査を行い、それぞれの競技に適用可能なオペレーションズ・リサーチの手法をまとめて比較することで選定していった。その結果、本研究で詳細な数学モデリングを行う対象として、記録系は陸上競技(リレー競技)を、採点系は体操競技を、格闘技系は柔道競技を選んだ。さらにモデリングとして展開可能な競技として、五輪競技ではないが、リレー競技の一つといえる駅伝競技を、柔道競技と同様な団体戦を行っている剣道競技も研究対象とした。
- (3) 上記の競技の数学モデリングに関する具体的な研究手法について、本節では以下、陸上競技(リレー競技)、体操競技、柔道競技の順に競技別に示す。

### ① 記録系競技：陸上競技(リレー競技)

陸上競技(リレー競技)については、信頼性理論の手法を応用することにより、個人のタイムを確率分布として表現した際のチームとしてのタイムを計算する数学モデルの作成を試みた。仮想データによる分析を予備的に行った後、2012年箱根駅伝の実データを用いて解析した。解析に当たっては、高速フーリエ変換の手法を活用することで計算の高速化を図った。分析結果を現場の指導者に提示し、意見を収集することで、現実を反映できる数学モデルの作成を目指した。

### ② 採点系競技：体操競技

体操の国際大会の団体戦で広く用いられている6-5-4方式(1チーム6選手で、各種目5選手が演

技し、上位4選手の得点の累計を競う方式)に着目し、個々の選手の演技を平均値(競技レベルの高さ)と標準偏差(安定度)にて評価し、正規分布として扱うことで、チームとしての総合得点(団体得点)の確率分布を算出するための数学モデルの作成を試みた。

現場の指導者の意見に基づき、個々の選手の得点分布に関して現実的なパラメータ設定を行い、仮想データでの計算を実施した。また、個々の選手の種目ごとの平均値と標準偏差を説明変数とし、団体得点の期待値を目的変数とした重回帰式にて計算結果を表現することで、選手の平均値と標準偏差の換算を試みた。

さらに数学モデルに基づき感度分析を行うことで、トレーニングにより得点の伸びが見込まれる際、個人の伸びとチームとしての合計点の伸びとの関係について定量化を行った。

### ③ 格闘技系競技：柔道競技

柔道団体戦でのチーム・選手の評価にAHP (Analytic Hierarchy Process) を適用し、直接対戦のないチーム間・選手間の相対評価を行い、総合的な評価を試みた。具体的には、個別の対戦結果(一本、技あり、有効)に重みをつけて、幾何平均法を用いて、チーム・選手の強さを評価した。2005年全国高等学校総合体育大会柔道競技における男子団体戦(先鋒・次鋒・中堅・副将・大将同士の5対戦でチームとしての勝敗が決まる)の試合結果を基にチーム・選手の評価を行い、AHPによる評価結果と、団体戦の成績や強化指定選手の選定との関係について調べ、現場の指導者との討議を通じて、AHPによる選手評価の有用性を検討した。

## 4. 研究成果

(1) 具体的な研究成果の一部を、陸上競技(リレー競技)、体操競技、柔道競技の順に競技別に以下に示す。

### ① 記録系競技：陸上競技(リレー競技)

本研究で作成した数学モデルにより、個々の選手のタイムを任意の分布で表現した際の合計タイムの

計算が可能となった。さらに目標タイムが値として設定された場合と確率分布として設定された場合々々についての目標タイムを達成する確率ならびに最適走順の算出が可能となった。具体的な計算例としては、選手8名を5区間に割り当てる場合について、合計タイムを高速フーリエ変換により計算することで、最適走順ならびに目標タイムの達成確率を求めた。

図1に目標タイムの設定値を変えた際にそれに応じて最適となる走順での合計タイムの平均値と標準偏差、および目標達成の確率の計算結果の一例を示している。

図1では全般的に、目標タイムの設定が緩和されるにつれて、合計タイムの平均と標準偏差の値が共に小さくなるような走順が最適となっていく様子が定量的に示されている。

このような分析結果を、現場の指導者に提示し、意見を収集することで、数学モデルを補正していった。その結果、現実をかなり反映できる数学モデルが作成できたと言える。

なお、この数学モデルを箱根駅伝の分析に応用し、実データを用いた解析を行った結果、シード権獲得や繰り上げスタートに関して、現実を反映した計算結果も得られている。

### ② 採点系競技：体操競技

体操男子団体戦での、個々の選手の演技を平均値と標準偏差にて評価し、正規分布として表現した際の、団体得点の期待値の計算結果を図2に示す。図2では、選手の平均値の設定を一律に $\pm 0.5$ の範囲で変えた際の各選手の得点の分散と団体得点の期待値の計算結果の関係が散布図として示されている。

図2の各点を基に、各選手の得点の平均値( $\mu$ )と分散( $\sigma^2$ )を説明変数、団体得点の期待値( $\bar{T}$ )を目的変数とした重回帰式を求めると

$$\bar{T} = 24.0 \cdot \Delta\mu + 7.0 \cdot \sqrt{\sigma^2} + 340.6$$

となる。これより、個々の選手の平均値と標準偏差については、標準偏差0.1の増加は平均0.03の増加に相当するという換算が可能となり、団体得点の期待値に関して定量的な評価ができるようになった。

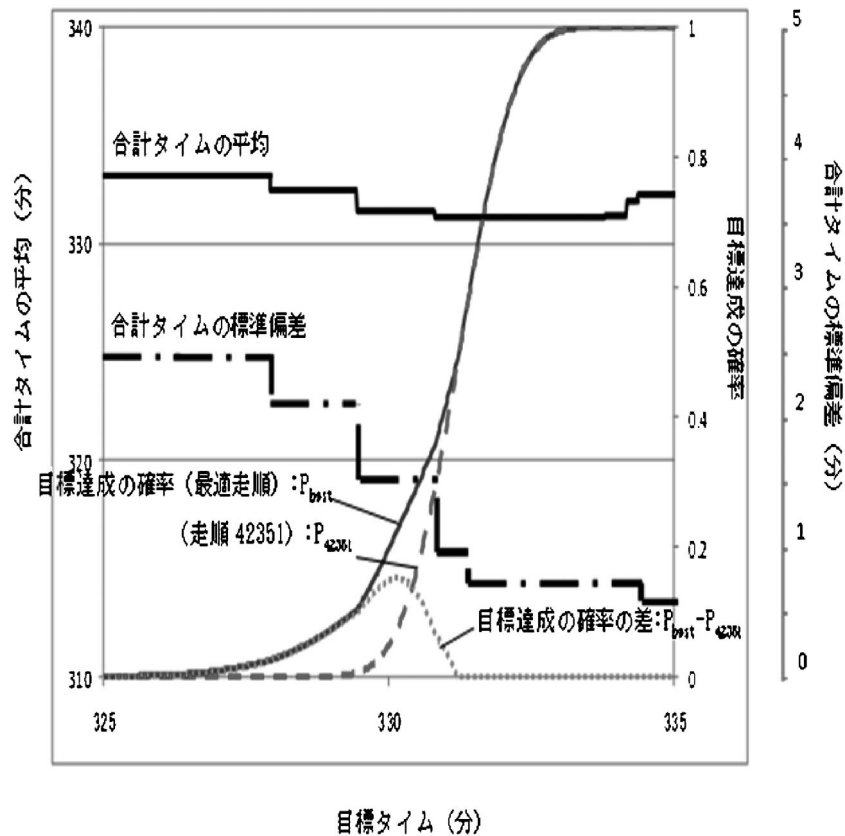


図1 目標タイムにおける最適走順での合計タイムの平均と標準偏差, および目標達成の確率

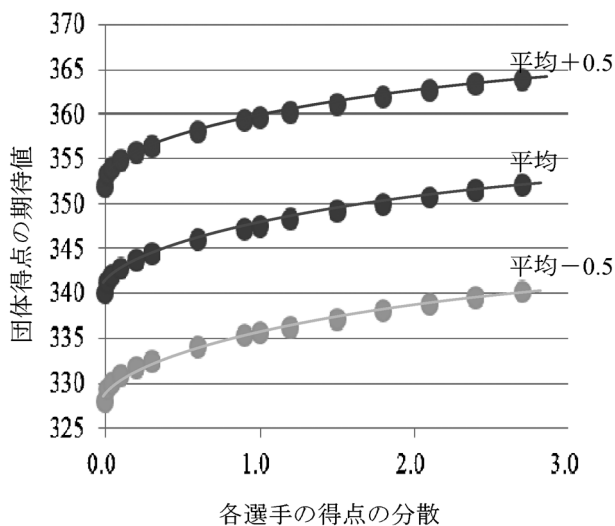


図2 各選手の得点の分散と団体得点の期待値の関係

さらに、本稿では詳述しないが、感度分析により個人得点の伸びと団体得点の伸びとの関係の定量化も試みた。これらの計算により、団体得点の期待値を最大化するような選手選定の方法を示しただけで

なく、オールラウンダーを養成するよりも専門種目に特化した方がチームとしては有利になるという結果も示された。

### ③ 格闘技系競技：柔道競技

男子団体戦の試合結果を基に AHP にてチームや選手の強さを推定し、選手配置別に順位づけを行った結果を表1に示す。表1では団体戦でのチームの順位と選手配置別での個人順位との関係が示されており、チームの順位(団体順位)は優勝チームが1位、準優勝が2位、準決勝敗退が3位、準々決勝敗退が5位というように順位付けしており、個人順位は団体戦での勝ち方を考慮して算出した AHP 評価による配置別の順位となっている。

表1より、結果的にトーナメントで早々に敗退してしまい団体順位としては低くなっているチームの中にも個人順位が AHP としては高く評価されている選手がいることがわかる。すなわち、実際には対戦しないチーム・選手の強さの相対評価が可能とな

表1 団体戦での団体順位(トーナメントでのチームとしての順位)と選手配置別での個人順位(AHPによる順位)との関係

団体順位	先鋒	次鋒	中堅	副将	大将
1	1	39	2	11	2
2	12	2	47	1	21
3	18	4	7	44	6
3	39	18	36	9	13
5	2	35	13	7	23
5	28	6	29	3	26
5	30	11	17	43	9
5	34	46	21	17	18
9	5	27	4	50	8
9	14	43	19	24	5
9	23	12	49	4	7
9	11	50	26	12	1
9	26	14	27	25	37
9	25	33	31	6	47
9	21	19	32	36	41
9	51	13	30	18	44
17	50	10	8	35	28
18	9	17	9	16	16
18	6	3	50	2	35
18	4	39	11	21	3
18	32	9	3	39	17
18	41	26	13	42	36
18	15	22	15	48	14
18	8	51	14	15	4
18	22	15	39	14	20
18	44	5	48	10	22
18	19	41	10	31	39
18	13	43	28	32	12
18	37	33	18	22	31
18	19	23	38	34	38
18	38	7	44	20	40
18	40	30	20	26	50
18	29	36	37	36	41
18	36	16	46	19	45
35	27	1	42	5	48
35	2	42	24	28	29
35	17	47	23	29	10
35	42	24	16	27	27
35	15	32	4	51	14
35	30	45	12	40	18
35	46	38	13	46	43
35	43	25	22	41	32
35	7	49	33	45	24
35	48	8	40	22	51
35	23	29	51	13	34
35	47	21	34	38	33
35	45	31	41	8	45
35	49	20	44	30	30
35	10	48	25	33	11
35	34	37	35	47	25
35	33	28	43	49	49

り、早々に敗退したチームからも、競技力が高いと評価することが可能となったと言える。このようなAHPによる選手評価はタレント発掘の面からの競技サポートが可能となるという点で、有用であると考えている。

さらに、AHPによる評価によると、先鋒・中堅・大将の強いチームは団体順位が高くなる傾向があることが判明し、団体戦でどのように選手を配置すべきかという戦術に関する問題についても今後AHPが適用可能ではないかという感触を得るなど、柔道競技に関するAHPの有用性が現場の指導者に受け入れられたと考えている。

(2) 以上は、研究成果の一部であるが、詳細は第5節に列挙した文献を参照されたい。なお、箱根駅伝や剣道についても本研究で得られた数学モデリングを展開することでいくつかの研究成果が得られている。

(3) 今回構築した数学モデルは他競技にも比較的容易に展開可能であると思われる。例えば、リレー競技については、競泳についても展開でき、体操競技については、新体操などの採点競技にも展開できると考えられる。柔道のAHPによる選手評価は、剣道のみならずレスリングやボクシングなど格闘技系競技に広く展開できると言える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)  
〔雑誌論文〕(計7件)

- ① 廣津信義, 仲村 明, 金子今朝秋, 箱根駅伝におけるシード権獲得と繰り上げスタートに関する確率計算, 順天堂スポーツ健康科学研究, 査読有, 3巻, 2012, 199-208.
- ② 廣津信義, 仲村 明, 金子今朝秋, 箱根駅伝予選会での予選通過に関する確率計算, オペレーションズ・リサーチ, 査読無, 57巻, 2012, 5-10.
- ③ 廣津信義, 仲村 明, 金子今朝秋, リレー競技の走者の選定に関する数理的手法—タイムの予想分布を任意に想定した際の目標達成確率の計算方法—, 順天堂スポーツ健康科学研究, 査読有, 3

巻, 2011, 9-18.

- ④ N. Hirose, M. Nakamura, N. Hirotsu, M. Yoshimura, M. Suganami, N. Maekawa, Evaluation of Individual and Team Judo Strengths Using AHP Technique and Team Competition Data, Journal of Quantitative Analysis in Sports, 査読有, 6巻4号. 2010, Article 2.
- ⑤ 岩切公治, 中村 充, 廣瀬伸良, 廣津信義, 剣道団体試合の戦力評価に関する研究—AHPを利用した配置別評価を利用して—, 身体運動文化研究, 査読有, 16巻, 2010, 37-46.
- ⑥ 岩切公治, 中村 充, 廣瀬伸良, 廣津信義, AHPを利用した剣道団体戦力評価の試み, 国際武道大学研究紀要, 査読有, 25巻, 2010, 85-91.
- ⑦ 廣瀬伸良, 中村 充, 廣津信義, 菅波盛雄, 石井兼輔, 渋谷恒男, 前川直也, 柔道競技における団体試合の競技特性—勝敗決定位置からの検討—, 講道館柔道科学研究会紀要, 査読有, 12巻, 2009, 87-94.

[学会発表] (計4件)

- ① 廣津信義, 原田睦巳, 加納 實, 体操男子団体戦における競技方式の数学モデリング—個人得点を正規分布で表現した際の団体得点の分布計算とその応用—, 第64回日本体育学会, 2013年8月, 立命館大学(草津)発表予定.

- ② 廣津信義, 加納 實, Mathematical Modelling of Team Competition in Artistic Gymnastics, 2013年日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会, 2013年3月6日, 東京大学(東京).
- ③ 廣津信義, 仲村 明, 金子今朝秋, 箱根駅伝での予選通過とシード権獲得に関する確率計算, 2012年日本OR学会春季研究発表会, 2012年3月28日, 防衛大学校(横須賀).
- ④ 廣津信義, 箱根駅伝予選会における予選通過タイムの確率計算の方法, 2010年日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 2010年9月17日, コラッセふくしま(福島).

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
廣津信義 (HIROTSU NOBUYOSHI)  
順天堂大学・スポーツ健康科学部・先任准教授  
研究者番号: 90360726
- (2) 研究分担者 なし
- (3) 連携研究者  
宮地 力 (MIYAJI CHIKARA)  
独立行政法人日本スポーツ振興センター・国立スポーツ科学センター・スポーツ科学研究部・副主任研究員  
研究者番号: 20157647