

原著論文

滞空時間に着目したトランポリン競技のスコア分析
Analysis of trampoline competition scores focusing on flight time

横澤俊治¹⁾, 河野由^{1),2)}, 今若太郎^{1),3)}
Toshiharu Yokozawa¹⁾, Yui Kawano^{1),2)}, Taro Imawaka^{1),3)}

Abstract : Although flight time is an important factor in trampoline competitions, the relationship between flight time and competition scores has not been clarified. The purpose of this study was to clarify the factors associated with a high total score in trampoline competitions, with an especial focus on flight time. Data from national competitions of elite athletes (men: 207 trials, women: 187 trials) were included in the study. The flight time for each jump, including the time just before the first skill (T_0), was obtained from the official competition system. T-score assumed from the elements of routine in each trial was simulated by an optimization approach that estimated the mechanical work for each skill to minimize the error in flight time. The difference in actual T-score relative to the simulated T-score was defined as ΔT . The relationships of T_0 and ΔT to scores were analyzed by multiple regression analysis. There was a significant positive correlation between each score and the total score for both men and women, with particularly large correlation coefficients for the E-score and T-score in men, and the D-score in women. T_0 and ΔT alone contributed more than 50% of the total score (excluding penalty and point deductions due to landings) for both men and women, with ΔT making a particularly large contribution. For both men and women, T_0 and ΔT positively contributed to the D-score and T-score. Additionally, ΔT was larger with smaller decreases in the flight time in the first half of the elements. These results indicated that T_0 and ΔT contributed largely to the total score through the D-score and T-score. The large contribution of ΔT to the total score suggests the importance of maintaining flight time by obtaining a large reaction force during take-off in the first half of the elements.

Key words : performance analysis, structure model of sports performance, HDTS system, simulation, elements of routine

キーワード : パフォーマンス分析, パフォーマンス構造モデル, HDTS システム, シミュレーション, 演技構成

¹⁾国立スポーツ科学センター, ²⁾大東文化大学, ³⁾上智大学

¹⁾Japan Institute of Sports Sciences, ²⁾Daito Bunka University, ³⁾Sophia University

E-mail : toshiharu.yokozawa@jpnnsport.go.jp

I. 緒言

トランポリン競技には個人競技、シンクロナイズド競技、団体競技があるが、これまでのオリンピックでは個人競技のみが採用されている。トランポリン個人競技（以下、単にトランポリン競技と呼ぶ）では、連続する10種目の演技における出来栄（Eスコア）、難度（Dスコア）、滞空時間（Tスコア）、着地位置（Hスコア）（以下、上記4スコアを「各スコア」と呼ぶ）の合計点からペナルティーを引いたトータルスコアによって競われる⁴⁾。なお、1種目目は、回転をとまなわないうストレートジャンプを繰り返しながら高さを確保したのちに自身のタイミングで開始される。Eスコアは着地を含む姿勢の維持や安定性に関して減点方式で採点され、Dスコアは各種目の宙返り数、捻回数、姿勢（Pike：えび型、Tuck：抱え型、Straight：伸び型）を審判員が確認することで決まる。TスコアとHスコアについては、トランポリンベッドを支える脚の下4点に設置されるフォースプレートを含むHDTSシステムと呼ば

れる電子採点システムによって機械的に算出される^{3),5)}。

トランポリン競技におけるトータルスコアに焦点を当てた研究は極めて少ない。Heinen and Krepela⁷⁾は、世代ごと性別ごとに競技会の各スコアとトータルスコアとの関係性を統計的に分析し、Eスコア、Dスコア、Tスコアがトータルスコアに関係していたことを報告している。また、新谷ら¹¹⁾は、世界選手権の各スコアを分析し、男子ではEスコア、女子ではTスコアがトータルスコアに強く影響を及ぼしていることを報告している。また、1回1回の滞空時間はTスコアに直接影響するだけでなく、滞空時間が長いことが高難度の技の実施や技の見栄えに影響する可能性が指摘されている^{7),11),12)}。Figure 1は、これらの知見を参考に作成した仮のトランポリン競技のパフォーマンス構造モデルである。このモデルは、衣笠ら⁸⁾の提案する作成手順に沿って、上述の文献だけでなく競技規則や強化スタッフへのヒアリング等にもとづいて作成された。滞空時間を長

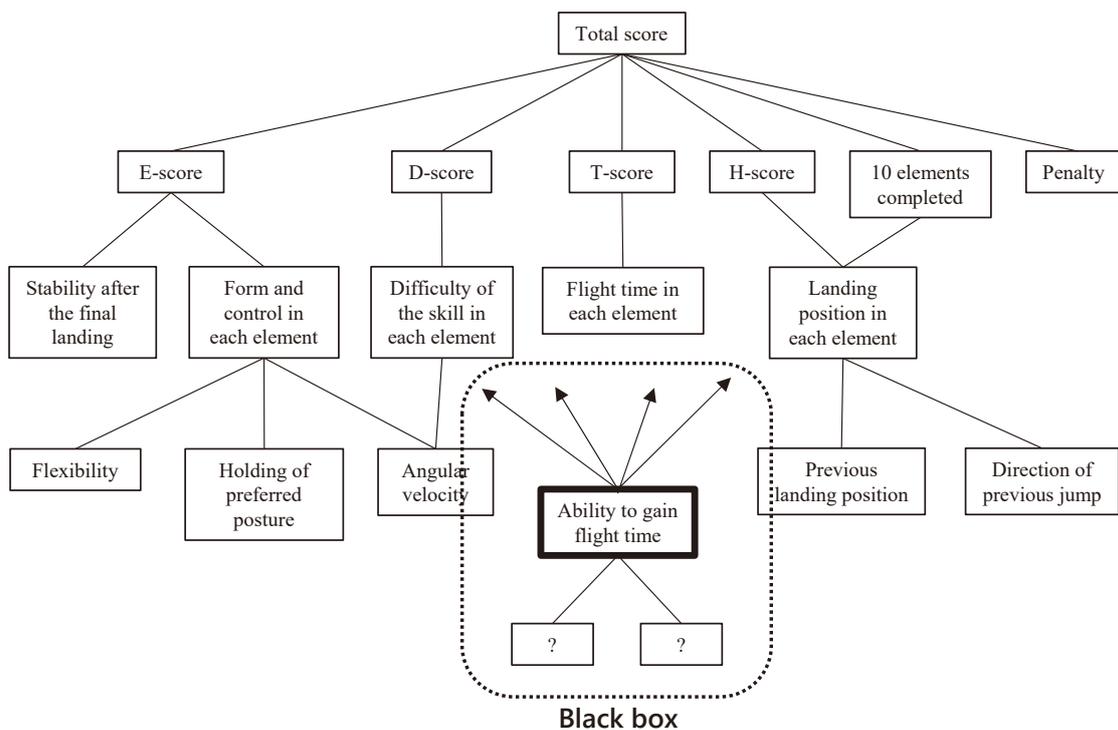


Figure 1. A provisional structure model for trampoline performance.

くする能力がTスコアだけでなく、DスコアやEスコアにも影響し得ることが指摘されているが¹¹⁾、具体的にこれらの関係性を明らかにした研究はなく、本研究では滞空時間と各スコアとの関係性について現状ブラックボックスとなっている部分に焦点を当てる。

このように滞空時間の重要性は広く認識されているものの、トランポリン競技における滞空時間を分析した研究としては、トレーニングでしばしば用いられる20回連続のストレートジャンプに関するもの^{1),2)}、ストレートジャンプにおけるトランポリンベッドの沈み距離や上り時間と滞空時間との関係性に関するもの⁹⁾、ウォーミングアップが滞空時間に及ぼす影響を調査したもの⁶⁾がわずかに報告されているのみである。滞空時間に関する研究が少ない理由の一つとして、滞空時間に関して最も入手しやすい情報であるTスコアは、必ずしもトランポリンベッド上で高く跳躍する能力を反映していないことが挙げられる。すなわち、Tスコアはそれ自体がトータルスコアに直接貢献する重要な指標の一つではあるが、技や難度の影響を受けることが指摘されており^{7),11)}、高難度の技を実施することが滞空時間の減少をもたらす可能性がある。したがって、技ごとの滞空時間への影響を考慮した滞空時間の評価方法が必要と考えられる。そこで、各技を実施した際の滞空時間の変化のしかたを考慮し、演技構成からTスコアを予測し、実際のTスコアと予測されたTスコアとの差（以下、 ΔT ）を算出することによって、トータルスコアにつながる演技構成を考慮した滞空時間の評価が可能になると考えられる。また、1種目目直前まではストレートジャンプを実施するが、このストレートジャンプで大きな滞空時間を得ることはトレーニング現場でも重要視されているため^{1),2)}、1種目目直前の滞空時間（以下、 T_0 ）も重要な跳躍パフォーマンスの指標の一つとなる可能性がある。

以上のことから、 T_0 や ΔT を用いて滞空時間と各スコアとの関係を検討することが有効と考えられるが、これまでそのような研究はないようであ

る。そこで本研究の目的は、滞空時間に着目してトランポリン競技において優れたトータルスコアを得るための要因を明らかにすることとした。上述の先行研究をもとに、 T_0 および ΔT がトータルスコア獲得に大きく貢献するという仮説を立てた。

II. 方法

1. データ収集

2022年度と2023年度の全日本年齢別選手権（オープンの部）、世界選手権最終選考会、全日本選手権、ジャパンオープンの計8大会を対象とした。いずれの競技会においてもトランポリン器具（フレーム、スプリング、ベッドを含む）にはUltimate（EUROTRAMP社製）が使用された。対象者は対象競技会期間中に強化選手だった男子16名（身長 1.68 ± 0.04 m、体重 60.0 ± 5.5 kg）、女子11名（身長 1.56 ± 0.04 m、体重 50.5 ± 2.6 kg）とした。予選、決勝等を問わず、対象競技会において対象者が申告通りに10種目を完遂した演技（男子：207演技、女子：187演技）を対象とした。なお、対象競技会の一部に欠場したり、予選落ちしたり、申告通りに演技を完遂できなかった場合があるため、一人あたりの対象試技数は等しくない。日本体操協会を通じて各大会組織委員会に対してHDSデータの取得と使用に関する許可を得るとともに、対象者からは、公式記録ならびにHDSデータの本研究への利用に関する同意を得た。ただし、個人が特定されないよう、平均値を用いることを原則とし、個別のデータの提示については個人の特が不可能なものに限定した。なお、本研究は国立スポーツ科学センター倫理審査委員会の承認を受けて実施された（承認番号2023-007）。

公開されている公式記録から、トータルスコア、Eスコア、Dスコア、Hスコア、Tスコア、ペナルティーを取得した。また、HDSデータからは、 T_0 を含む1回1回の跳躍の滞空時間を取得した。さらに、実施した技の種類については、元トランポリン選手が公式映像をもとに記録した。

2. ΔT の算出

以下の手順によりΔTを算出し、これを滞空時間に関する指標の一つとした。

技ごとに滞空時間の変化のしかたが異なるのは、エネルギー論的に考えると踏切中にトランポリンベッドにした力学的仕事と、真上に跳ぶため以外の力学的エネルギー（主に回転エネルギー）が技によって異なるためと考えられる。そこで、技ごとに踏切中の力学的仕事 W (J/kg) と空中における回転等の力学的エネルギー R (J/kg) を与えた（以下、力学的仕事および力学的エネルギーは全て体重 1 kg あたりの値を指す）。なお、 R は宙返りの回数と空中姿勢（Pike、Tuck、Straight の 3 種）に依存すると考えられることから、計算を簡便にするために宙返りの回数と空中姿勢の組み合わせ（以下、技種別）ごとに R の値を与えることとした。技ごとの W および技種別ごとの R を以下で説明する最適化計算によって算出した。

まず、 i 種目目の踏切時に仮に競技者が踏切中に力学的仕事をしなかった場合のエネルギー減少量、換言すると滞空時間を維持するために必要となる力学的仕事 E_i^{free} (J/kg) は、式 1 のように表すことができる。

$$E_i^{free} = g \cdot (1 - CR) \cdot (height_{i-1} + deflection) \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度 (9.81 m/s²)、 CR はトランポリンベッドの反発係数 (0.865；算出方法は付記 1 に記載)、 $height_{i-1}$ は直前の最高到達点（滞空時間から算出）、 $deflection$ はトランポリンベッドの静的たわみ（男子:0.173±0.011 m、女子:0.154±0.005 m；算出方法は付記 2 に記載）。この E_i^{free} を用いて、踏切前後の跳躍の最高到達時における位置エネルギーの変化量 ΔE_i (J/kg) は、以下のように表すことができる（式 2）。

$$\Delta E_i = W_i + R_{i-1} - R_i - E_i^{free} \quad (2)$$

ここで、 W_i は競技者の踏切動作によって身体重心の力学的エネルギーを変化させた仕事、 R_i は真上に跳躍すること以外に使われた力学的エネル

ギーである。なお、 W_i と R_i は入力変数ではなく、後述の最適化計算によって値が得られるものである。 R_0 は回転をとまなわないジャンプ中なので 0 とした。空中では放物運動となるため、この ΔE_i を用いて i 種目目の推定滞空時間 T_i^{est} (s) を以下のように表すことができる（式 3）。

$$T_i^{est} = \sqrt{(T_{i-1})^2 + 8 \cdot \Delta E_i / g^2} \quad (3)$$

ここで、 T_{i-1} は $i-1$ 種目目の滞空時間である。

続いて、全演技全種目における実際の滞空時間と推定値との誤差の二乗和を最適化計算の目的関数 (J) とし、これが最小となるような技ごとの W と技種別ごとの R を男女ごとに算出した(式 4)。

$$J = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^{10} (T_i - T_i^{est})^2 \right) \quad (4)$$

ここで、 j は対象演技順、 n は対象演技数（男子では $n=207$ 、女子では $n=187$ ）である。

さらに、 W と R をもとに、その演技構成から予測される滞空時間 T_i^{sim} を式 5 から算出した。

$$T_i^{sim} = \sqrt{(T_{i-1}^{sim})^2 + 8 \cdot \Delta E_i / g^2} \quad (5)$$

式 3 と類似しているが、直前の滞空時間に関して実際の値ではなく、シミュレーション値を用いている点が異なる。なお、 T_0^{sim} には T_0 を適用した。最終的に式 6 によって演技ごとの ΔT （式中ではイタリック）を算出した。

$$\Delta T = T_{score} - \sum_{i=1}^{10} (T_i^{sim}) \quad (6)$$

ここで、 T_{score} は T スコアを示している。

ΔT は、式 6 に示したように実際の T スコアと演技構成から予測された T スコアとの差であり、正の場合には演技構成からの予測よりも高い滞空時間だったことを示し、負の場合には予測よりも低い滞空時間だったことを示している。すなわち、 ΔT は演技構成を考慮した滞空時間の評価指標として算出している。また、上記計算の過程で算出された技ごとの W については、踏切中の力学的仕事であり、その技の滞空時間の得やすさを示しているとも言える。

3. 滞空時間変化量の算出

連続する種目間の滞空時間変化量を T_0 に対する相対値として算出し、例えば3種目目から4種目目の変化量は $T4-T3$ と表記した。また、1種目目直前の滞空時間 (T_0) から1種目目の滞空時間の変化量も同様に算出し、 $T1-T0$ と表記した。滞空時間変化量が負の場合は、滞空時間が減少したことを示している。

4. 統計処理

各変量について Shapiro-Wilk 検定を実施したところ、多くの変量について正規性が認められなかったため、本研究の統計処理ではノンパラメトリック検定を用いた。トータルスコアと各スコアとの関係、2回宙返りの各技の捻り数と W との関係、ならびに連続する種目間の滞空時間変化量と ΔT との関係については、Spearman の順位相関係数を算出した。また、トータルスコア（ペナルティーおよび着地による減点を無視する）および各スコアを目的変数とし、 T_0 と ΔT を説明変数としたロバスト回帰による重回帰分析を行った。

W における男女間の比較には、Wilcoxon の符号付順位検定（2群、対応あり）を用いた。W と R の比較ならびに男子の宙返り数間（2回宙返りと3回宙返りの2群）の比較には Mann-Whitney の U 検定（2群、対応なし）を用いた。一方、女

子の宙返り数間（1回宙返り、2回宙返り、3回宙返りの3群）の比較には Kruskal-Wallis 検定（3群、対応なし）を用いた。また、連続する種目間の滞空時間変化量の差の検定には Friedman 検定（10群、対応あり）を用いた。多重比較には Bonferroni 法を用いた。

有意水準はいずれも 5% とした。なお、ロバスト回帰による重回帰分析には統計解析言語 R (ver. 4.4.0) を用い、それ以外の統計解析には SPSS Statistics (ver. 29、IBM) を用いた。

Ⅲ. 結果

1. トータルスコアと各スコアとの関係

Table 1 はトータルスコア、各スコア、ペナルティーの平均値と標準偏差、ならびにこれらとトータルスコアとの相関係数を示したものである。男女ともに、各スコアとトータルスコアとの間に有意な正の相関関係がみられた。男子では特に E スコアと T スコアのトータルスコアへの相関係数が大きかったのに対し（ともに $r=0.58$, $p<0.01$ ）、女子では D スコアの相関係数が大きかった ($r=0.63$, $p<0.01$)。なお、ペナルティーについては平均値が各スコアと比べて小さく、男子のみトータルスコアとの間に負の相関関係がみられた。

Table 1. The total score and each component score including their Spearman's rank correlation coefficients with the total score (r (Total score)) and Shapiro-Wilk test statistics.

		Total score	E score	D score	H score	T score	Penalty
Male (n=207)	Mean	58.47	15.55	16.94	9.27	16.74	0.01
	S.D.	1.05	0.68	0.68	0.25	0.40	0.07
	Shapiro-Wilk	0.99 *	0.96**	0.93**	0.97**	0.98 *	0.20**
	r (Total score)		0.58**	0.43**	0.44**	0.58**	-0.21**
Female (n=187)	Mean	53.67	15.84	13.27	9.34	15.24	0.02
	S.D.	1.25	0.80	1.29	0.24	0.35	0.07
	Shapiro-Wilk	0.99	0.99	0.96**	0.97**	1.00	0.23**
	r (Total score)		0.29**	0.63**	0.23**	0.27**	0.09

*: $p<0.05$, **: $p<0.01$

2. 技ごとの力学的仕事と力学的エネルギー

Table 2 は、最適化計算の過程で算出された W と R を、性別ごとに複数の選手が実施した技について示したものである。なお、実施した選手が 1 名以下の技については空欄としている。また、技の姿勢、記号、宙返り数、捻り数、難度点も併せて記載した。男女ともに宙返り数が大きい技ほど W が有意に小さかった（いずれも $p < 0.01$ ）。また、演技の大半を占める 2 回宙返りに着目すると、捻り数と W との間に有意な負の相関関係がみられた（男子： $r = -0.80$, $p < 0.01$ 、女子： $r = -0.65$, $p < 0.05$ ）。なお、同じ技であれば男子のほうが女子よりも W が有意に大きかった（ $p < 0.01$ ）。R については、男女ともに W に比べて有意に小さかった（ $p < 0.01$ ）。

3. 滞空時間に関する変量

Figure 2 は、それぞれの演技構成から予測された滞空時間と実際の滞空時間を、同一大会決勝の典型例 2 名について例示したものである。横軸が 0 の時の値は T_0 に相当する。なお、 T_0 は Sub. A が 1.94 s、Sub. B が 1.98 s であり、 ΔT は Sub. A が 0.51 s、Sub. B が -0.77 s であった。Sub. A は 2 種目目から実際の滞空時間がその演技構成から予測された滞空時間を上回っており、その結果 ΔT は正の値を示していた。一方、Sub. B は T_0 が大きかったものの 2 種目目からの滞空時間が予測された値を下回っており、その結果 ΔT は負の値を示していた。

Table 3 は、 T_0 、 ΔT の平均値と標準偏差、ならびにトータルスコア（ペナルティーと着地の減点を除く）を目的変数とした重回帰分析の結果を示したものである。重回帰分析の結果、男女ともに自由度調整寄与率（以下、単に寄与率と言う）が 0.5 以上であり、 T_0 および ΔT がトータルスコアに有意に関係していた（ $p < 0.01$ ）。また、目的変数への影響の強さを反映する標準化偏回帰係数は、男女ともに T_0 よりも ΔT のほうが大きかった。なお、 T_0 と ΔT の VIF は男女ともに 1.03 未満であり、多重共線性はないと判断できる。

Table 4 は、 T_0 、 ΔT と各スコアとの重回帰分析の結果を示したものである。E スコア（着地による減点を除く）に対しては、男子では有意ではなく、女子では寄与率が 0.180 で T_0 、 ΔT ともに有意に関係していた（ $p < 0.01$ ）。ただし、女子における T_0 は E スコアに対して負の貢献をしていた。D スコアに対しては、男子では寄与率が 0.219、女子では寄与率が 0.300 であり、男女ともに T_0 および ΔT が有意に関係していた（ $p < 0.01$ ）。なお、D スコアに対する標準化偏回帰係数を見ると、女子では T_0 が ΔT よりも大きかった。H スコアについては、男女ともに有意な関係性が認められなかった。T スコアに対しては、男子では寄与率が 0.754、女子では寄与率が 0.607 であり、男女ともに T_0 および ΔT が有意に関係していた（ $p < 0.01$ ）。また、T スコアに対する標準化偏回帰係数は、男女ともに ΔT が T_0 よりも大きかった。

Table 5 は、連続する種目間の滞空時間変化量、ならびにそれらと ΔT との相関係数を示したものである。男女ともに $T1-T0$ が最も小さかった（1 種目目において最も大きく滞空時間が減少していた）。また、 $T4-T3$ 、 $T6-T5$ 、 $T8-T7$ が他の種目間と比較して有意に大きかった。男子では $T1-T0$ 、 $T2-T1$ 、 $T4-T3$ 、女子では $T1-T0$ 、 $T2-T1$ 、 $T3-T2$ 、 $T6-T5$ と ΔT との間に有意な正の相関関係がみられた（女子 $T1-T0$ は $p < 0.05$ 、それ以外は $p < 0.01$ ）。

IV. 考察

本研究の結果、男子では特に E スコアと T スコアのトータルスコアへの相関係数が大きく、女子では D スコアの相関係数が大きいことが示された（Table 1）。また、重回帰分析の結果、男女ともに T_0 と ΔT がトータルスコア、D スコア、T スコアに対して有意に関係していたことが明らかになった（Table 3、Table 4）。 T_0 および ΔT がトータルスコアに寄与するという仮説は支持され、特に ΔT がトータルスコアと T スコアに対して大きく寄与していた。本研究で得られた結果を踏まえると、パフォーマンス構造モデルは Figure 3 のように修正できるだろう。この図では、 T_0 と ΔT が

Table 2. Estimated mechanical work (W) for each skill and estimated mechanical energy (R) for each skill type with various statistics.

Skill	Position	Symbol [†]	Summer-sault	Twist	Difficulty [‡]	W (J/kg)	
						Male	Female
Rudy out Triffis	Pike	12--3<	Triple	3/2	2.2	1.47	
Full in Half out Triffis	Pike	122-1<	Triple	3/2	2.2	0.00	
Half in Half out Triffis	Pike	121-1<	Triple	1	2.1	3.19	
Half out Triffis	Pike	12--1<	Triple	1/2	2.0	1.93	0.89
Double in Double out	Straight	844/	Double	4	2.0	2.61	
Half in Half out Triffis	Tuck	121-1○	Triple	1	1.8	4.51	
Full in Double-full out	Straight	824/	Double	3	1.8	2.74	
Half out Triffis	Tuck	12--1○	Triple	1/2	1.7	3.43	2.12
Full in Rudy out	Straight	823/	Double	5/2	1.7	2.92	
Randy out	Pike	8-5<	Double	5/2	1.7	3.91	
Rudy in half out	Pike	831<	Double	2	1.6	4.21	
Half in Rudy out	Pike	813<	Double	2	1.6	4.18	2.61
Full in Full out	Straight	822/	Double	2	1.6	3.18	0.36
Rudy out	Pike	8-3<	Double	3/2	1.5	3.87	2.19
Full in Half out	Pike	821<	Double	3/2	1.5	3.53	2.28
Full in Full out	Tuck	822○	Double	2	1.4	3.52	2.41
Half in Half out	Pike	811<	Double	1	1.4	4.82	3.57
Half in Rudy out	Tuck	813○	Double	2	1.4		3.09
Half out	Pike	8-1<	Double	1/2	1.3	4.27	2.96
Rudy out	Tuck	8-3○	Double	3/2	1.3		2.22
Full in Half out	Tuck	821○	Double	3/2	1.3		2.20
Double back	Pike	8--<	Double	0	1.2		4.11
Half in Half out	Tuck	811○	Double	1	1.2	4.87	4.22
Half out	Tuck	8-1○	Double	1/2	1.1		3.13
Double back	Tuck	8--○	Double	0	1.0		4.04
Back or front somersault	Pike	4-<	Single	0	0.6		4.30
Back or front somersault	Straight	4-/	Single	0	0.6		3.70
Barani	Straight	41/	Single	1/2	0.6		3.01
Back or front somersault	Tuck	4-○	Single	0	0.5		4.11
Shapiro-Wilk statistics						0.97	0.89
						R (J/kg)	
	Position	Symbol	Summer-sault			Male	Female
	Pike	12<	Triple			1.22	1.36
	Tuck	12○	Triple			1.24	1.55
	Pike	8<	Double			1.17	1.34
	Tuck	8○	Double			0.43	1.12
	Straight	8/	Double			1.32	0.65
	Pike	4<	Single				0.93
	Tuck	4○	Single				0.32
	Straight	4/	Single				0.27
Shapiro-Wilk statistics						0.69**	0.90
Targets for comparison	Statistical test			Statistics		Male	Female
Summersault & W	Mann-Whitney's U test for Male			Statistic Z		-14.26**	256**
	Kruskal-Wallis test for Female			Statistic H			
Twist & W	Spearman's rank correlation			r		-0.80**	-0.65 *
Gender & W	Wilcoxon signed-rank test			Statistic Z		-2.80**	
W & R	Mann-Whitney's U test			Statistic Z		-3.02**	-3.51**

[†]The Symbol column shows, from left to right, represents the somersaults (1 per 90 degrees), the twists per somersault (1 per half twist), and the positions (Pike: <, Tuck: ○, Straight: /).

[‡]Difficulty: The larger this value, the more difficult it is.

*: p<0.05, **: p<0.01

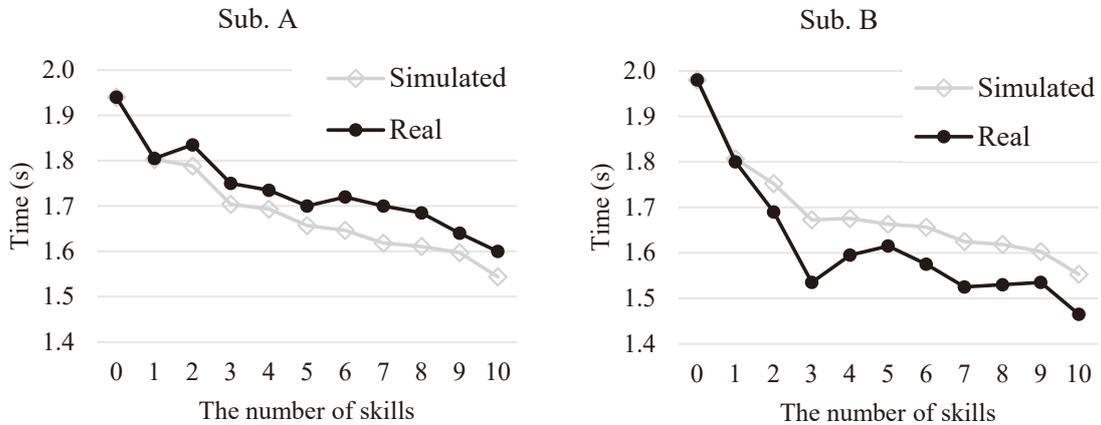


Figure 2. Examples of simulated and real flight times during ten skills. The number of skills “0” indicates the flight time just before the first element (T_0).

Table 3. Flight time just before the first element (T_0) and difference in actual T-score relative to the T-score assumed from the skills of routine (ΔT), including Shapiro-Wilk statistics and the results of multiple regression analysis using robust regression with the total score (excluding penalty and landing deduction) as objective variable.

	Male (n=207)						
	Mean (s)	S.D.	Shapiro-Wilk	Simple correlation coefficient	Multiple regression		
					Coefficient	Standard partial regression coefficient	
T_0	1.95	0.04	0.98 *	0.36**	9.97	0.39**	
ΔT	0.00	0.35	0.97**	0.63**	1.82	0.68**	
Intercept					39.19	-	
VIF					1.02		
R^2					0.571**		
R^2 : DOF adjusted					0.567**		
	Female (n=187)						
T_0	1.77	0.03	0.98 *	0.38**	13.69	0.34**	
ΔT	0.01	0.31	0.96**	0.55**	2.40	0.60**	
Intercept					29.63	-	
VIF					1.03		
R^2					0.577**		
R^2 : DOF adjusted					0.572**		

** : $p < 0.01$

VIF: Variance inflation factor

ら構成される滞空時間を得る能力は、Tスコアに対してだけでなくDスコアにも貢献し、間接的にトータルスコアにつながっていることを示している。

本研究の新たな試みとして、 ΔT を滞空時間の指標の一つとしたことが挙げられる。 ΔT を算出する上で設けた主な仮定は、①真上に跳ぶこと以外に使われた力学的エネルギーは宙返りの回数と

Table 4. The results of multiple regression analyses using robust regression with T_0 and ΔT as dependent variables and each component score as objective variable. T_0 indicates the flight time just before the first element, and ΔT indicates the difference in actual T-score relative to the T-score assumed from the skills of routine.

		Male (n=207)		Female (n=187)	
		Coefficient	Standard partial regression coefficient	Coefficient	Standard partial regression coefficient
E score except for landing deduction	T_0			-7.54	-0.41**
	ΔT			0.78	0.43**
	Intercept			29.20	-
	VIF			1.00	
	R^2			0.188**	
	R^2 : DOF adjusted			0.180**	
D score	T_0	5.82	0.31**	20.31	0.49**
	ΔT	0.60	0.31**	0.93	0.22**
	Intercept	5.66	-	-22.58	-
	VIF	1.02		1.14	
	R^2	0.227**		0.308**	
	R^2 : DOF adjusted	0.219**		0.300**	
H score	T_0				
	ΔT				
	Intercept				
	VIF				
	R^2				
	R^2 : DOF adjusted				
T score	T_0	3.23	0.30**	1.95	0.17**
	ΔT	0.95	0.84**	0.83	0.74**
	Intercept	10.40	-	11.80	-
	VIF	1.01		1.51	
	R^2	0.756**		0.612**	
	R^2 : DOF adjusted	0.754**		0.607**	

** : $p < 0.01$

VIF: Variance inflation factor

空中姿勢 (Pike、Tuck、Straight の 3 種) のみに依存する、②ある技を実施する際の直前の滞空時間はトランポリンベッドにする力学的仕事に影響しないという 2 点である。言い換えると、 ΔT の算出過程にあたって考慮していない点として、①宙返りの回数と空中姿勢以外の要素 (水平方向の移動や捻り数等の相違) が R に及ぼす影響、②

ある技の W に対する直前の滞空時間の影響の 2 点が挙げられる。仮にこの 2 点が本研究に致命的な影響を及ぼしていたとしたら、技による力学的仕事の大小関係や同じ技における男女間の力学的仕事の大小関係が力学的に想定される状況と異なっていたら。しかし、これらを統計的に調査した結果、宙返り数が多い技ほど W が有意に

Table 5. Relative value of the flight time change with respect to T_0 and their Spearman's rank correlation coefficient with ΔT ($r(\Delta T)$). T_0 indicates the flight time just before the first element, and ΔT indicates the difference in actual T-score relative to the T-score assumed from the skills of routine.

	Male (n=207)				Female (n=187)			
	Mean (%)	S.D.	Significant difference	$r(\Delta T)$	Mean (%)	S.D.	Significant difference	$r(\Delta T)$
1) T1-T0	-7.2	1.3	2,3,4,5,6,7,8,9,10	0.36**	-6.7	1.8	2,3,4,5,6,7,8,9,10	0.15 *
2) T2-T1	-1.7	1.9	1,3,4,6,7,8,10	0.40**	-0.9	1.5	1,3,4,5,6,7,8,9,10	0.43**
3) T3-T2	-3.7	1.6	1,2,4,5,6,7,8,9,10	0.06	-3.7	1.3	1,2,4,5,6,7,8,9	0.24**
4) T4-T3	-0.4	1.8	1,2,3,5,9,10	0.21**	0.1	1.7	1,2,3,5,7,9,10	0.05
5) T5-T4	-1.7	1.5	1,3,4,6,7,8,10	-0.07	-2.9	1.3	1,2,3,4,6,7,8,9,10	-0.01
6) T6-T5	-0.6	1.6	1,2,3,5,9,10	0.10	-0.1	1.8	1,2,3,5,7,9,10	0.33**
7) T7-T6	-1.0	1.5	1,2,3,5,8,9,10	0.03	-2.0	1.4	1,2,3,4,5,6,8,10	-0.01
8) T8-T7	-0.3	1.8	1,2,3,5,7,9,10	-0.07	0.4	1.5	1,2,3,5,7,9,10	-0.02
9) T9-T8	-1.5	1.3	1,3,4,6,7,8,10	0.10	-1.6	1.3	1,2,3,4,5,6,8,10	-0.08
10) T10-T9	-2.6	1.7	1,2,3,4,5,6,7,8,9	0.08	-3.6	1.8	1,2,4,5,6,7,8,9	-0.12

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

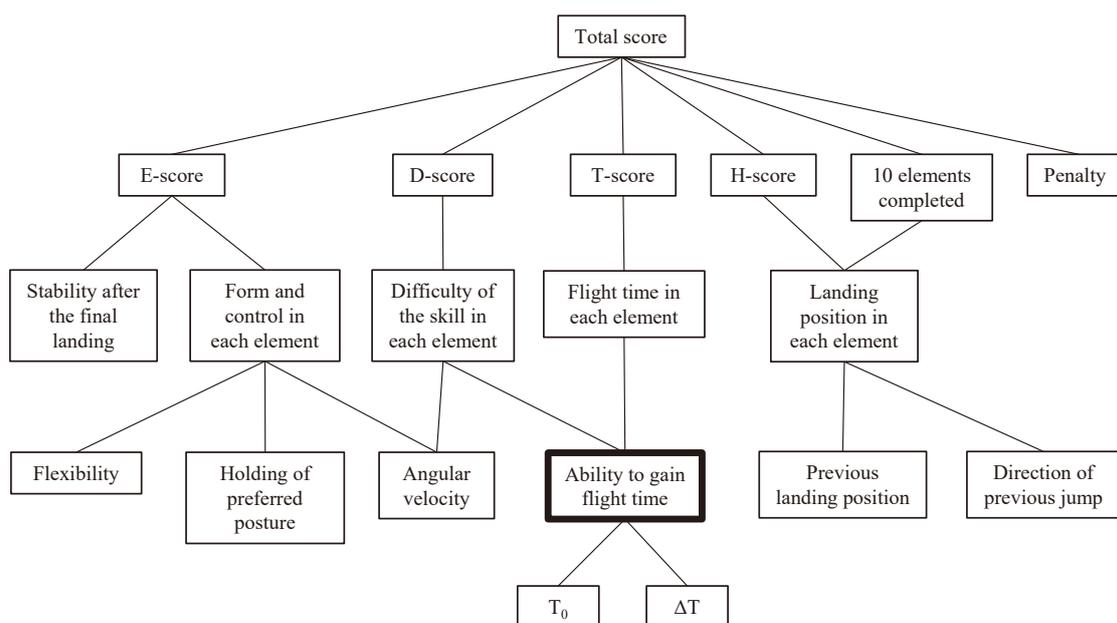


Figure 3. A modified structure model for trampoline performance.

T_0 indicates the flight time just before the first skill, and ΔT indicates the difference in actual T-score relative to the T-score assumed from the skills of routine.

小さく、同じ宙返り数であれば捻り数が多い技ほど W が有意に小さく、さらに同じ技であれば男子のほうが女子よりも W が有意に大きかった (Table 2)。これらの統計結果は、回転を多く生むほど滞空時間を維持するための力学的仕事が減少しやすかったことや、男子のほうが女子よりも体重あたりの力学的仕事が大きかったことを示して

おり、いずれも理にかなった結果と考えられる。なお、 R は W に比べて値が小さく、 ΔT への影響は大きくなかったと考えられる。以上のことから、本研究における ΔT の算出方法に致命的な問題はなかったと考えられる。

男女ともに、各スコアとトータルスコアとの間に有意な正の相関関係がみられ、男子では特に E

スコアとTスコア、女子では特にDスコアの相関係数が大きかったことから (Table 1)、これらのスコアを高めることが特に重要と考えられる。ただし、世界選手権を対象とした先行研究¹¹⁾において男子ではEスコア、女子ではTスコアがトータルスコアに強く影響を及ぼしていることが報告されており、トータルスコアに対する各スコアの関係の強さは、対象とする集団の競技水準等によって変わることには注意が必要である。

本研究では、パフォーマンスに影響する可能性のある滞空時間関連の変量として、 T_0 と ΔT の2つを算出し、トータルスコアや各スコアとの関係性を検討した。その結果、男女ともにこの2変量のみでトータルスコアを50%以上説明でき、 ΔT の影響が特に大きいことが分かった (Table 3)。さらに、DスコアとTスコアに対して、 T_0 および ΔT が有意に関係しており、Tスコアに対しては ΔT の影響が特に大きかった (Table 4)。これらの結果から、滞空時間を確保した状態で1種目目を開始すること、ならびに演技中の滞空時間を演技構成から予測される値よりも大きくすることが、高難度の技を実施することやTスコアを高めることにつながり、優れたトータルスコアを得るために重要であると考えられる。女子については T_0 のDスコアへの影響が大きかったことから、より長い滞空時間を確保して演技に入ることが難度の高い技の実施を可能にしていると推察できる。ただし、女子では T_0 がEスコアに対して負の貢献をしていた。これは、過度に滞空時間が長い状態で1種目目の演技に入ると、減点の少ない演技が困難になりやすいことを示しているかもしれない。しかし、 T_0 がTスコアやDスコアに貢献していることを考慮すると、大きな T_0 でもEスコアを下げないような空中姿勢の制御が課題であると考えられる。一方、 T_0 と ΔT はHスコアに対する有意な相関関係が認められなかった。滞空時間が十分確保できていない場合に水平に大きく移動してしまうといった可能性も予想できたが、少なくとも本研究の対象範囲においてそのような傾向は見られなかった。

ΔT はDスコアやTスコアを通じてトータルスコアに大きく貢献していた。 ΔT は、実際のTスコアと演技構成から予測されたTスコアとの差であり、演技構成を考慮した滞空時間の評価指標として算出している。一般に演技中の滞空時間は徐々に減少していた (Figure 2)。演技中に滞空時間が減少するのは、踏切中に回転のモーメントを生み出す必要があるために、演技前のストレートジャンプと比べてトランポリンベッドを下方に押す力が低下し、トランポリンベッドから大きな反力を得られなくなっていることが一因と考えられる。すなわち、 ΔT が大きかった演技では、各技を実施する際に他の対象者と比較してより大きな反力を得ることによって滞空時間を維持していたと考えることができる。したがって、本研究の結果は、各種目の踏切中に大きな反力を得ることが特に重要であることを示していると考えられる。滞空時間と踏切動作との関係については解明されていない点が多いが⁹⁾、安定した跳躍のためには股関節、膝関節の伸展による踏切動作にともなってトランポリンベッドを下方に沈めて大きな反力を得ることが重要であることが指摘されている¹⁰⁾。安定した跳躍という表現には着地位置の安定だけでなく、高い跳躍という意味も含まれていると解釈できる^{10), 12)}。これらのことから、各種目の踏切中に股関節、膝関節の伸展動作をともなう大きな反力の獲得が重要であると考えられる。そして、トランポリンベッド上のストレートジャンプで大きな滞空時間を得る能力だけでなく、踏切中に回転のモーメントを生み出す際にもトランポリンベッド下方への力を大きく作用させられるような下肢の伸展動作の習得が重要であると考えられる。

連続する種目間の滞空時間変化量を見ると、男女ともに1種目目 ($T1-T0$) において最も大きく滞空時間が減少し、前半種目における滞空時間の減少が小さい演技ほど ΔT が大きかった (Table 5)。これらのことから、1種目目をはじめとする前半種目において滞空時間の減少を抑えることが ΔT を大きくすることに寄与すると考えられる。また、

4、6、8種目目では滞空時間の減少が小さく、滞空時間変化量が正の値を示す場合もあった。対象演技全てにおいて奇数種目目は前方宙返り、偶数種目目は後方宙返りを実施していたことから、踏切中に後方回転のモーメントを生む場合のほうが前方回転のモーメントを生む場合と比べてトランポリンベッド下方への力を作用させやすい可能性があると考えられる。今後、反力やモーメントと姿勢との関係についてバイオメカニクスの分析することによってその根拠が示せると考えられる。

本研究の手法を用いることによって、個々の演技について演技構成を考慮した滞空時間に関する評価が可能になると考えられる。Figure 2の典型例については、Sub. Aであれば1回1回の跳躍で演技構成の割に滞空時間を維持できているが、 T_0 を高めることが課題である可能性がある。一方Sub. Bでは、 T_0 が大きく、トランポリンベッド上で大きな滞空時間を得る能力は高いと考えられるものの、2種目目や3種目目の跳躍においてトランポリンベッド下方に大きな力を作用させることができなかつたため、4種目目以降も低い滞空時間が続いたと読み取れる。

本研究で得られた知見は、日本の男女強化選手内のトータルスコア獲得のための各変量の関係性から得られたものである。したがって、世界トップレベルの海外選手の優位性やジュニア期とシニア期との比較では異なる関係性が得られる可能性がある。しかし、本研究で提案した各変量を活用して同様に検証することは可能と考えられる。したがって、世界トップレベルの選手の特徴やジュニア選手について調査することが今後の課題である。さらに、本研究によって各種目の踏切中に大きな反力を得ることの重要性が示されたが、その具体的な技術は明らかになっていない。HDTSシステムでは踏切時の反力データも得られるため、大きな反力を得るためのトランポリンベッドの踏み方を検討することも重要な課題である。

V. まとめ

本研究では、滞空時間に着目し、トランポリン競技において優れたトータルスコアを得るための要因を明らかにすることを目的とした。この目的を達成するために、1種目目直前の滞空時間 (T_0) と実際のTスコアと演技構成から予測されたTスコアとの差 (ΔT ; 演技構成を考慮した滞空時間の評価指標) を算出し、各スコアとの関係を検討した。本研究で得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- ① 男女ともに、各スコアとトータルスコアとの間に有意な正の相関関係がみられ、男子ではEスコアとTスコア、女子ではDスコアの相関係数が特に大きかった。
- ② 男女ともに T_0 と ΔT のみでトータルスコア (ペナルティーと着地による減点を除く) を50%以上説明でき、特に ΔT の貢献が大きかった。
- ③ 男女ともに、 T_0 と ΔT はDスコアとTスコアに対して正の相関関係がみられた。また、Tスコアに対しては ΔT の影響が特に大きかった。
- ④ 男子では1、2、4種目目、女子では1、2、3、6種目目における滞空時間の減少が小さい演技ほど ΔT が大きかった。

以上のことから、 T_0 と ΔT はDスコアやTスコアを通じてトータルスコアに大きく寄与することが示された。また、 ΔT のトータルスコアへの貢献が大きく、特に前半種目の踏切中に大きな反力を得て滞空時間を維持することの重要性が示唆された。

謝辞

本研究は、公益財団法人日本体操協会のトランポリン強化スタッフのデータ取得への御協力、技名の取得、御助言、ならびに国内競技会における大会組織委員会のHDTSデータ取得に関する御協力のもので行われた。ここに記して感謝の意を表します。

本論文に関連し、開示すべき利益相反関連事項はない。

付記1 反発係数の推定について

トランポリンベッドの反発係数を直接計測することが困難だったため、本研究では文献4で示されている公式のトランポリンベッドの基準値を参考に求めた (Standard Specification: Trampolines における Table 1)。

具体的には、トランポリンベッドから 4.000 m の高さから 60 kg のテスト球を落下させた際の 1 回目跳ね返り時のたわみや跳ね返り高の基準範囲 (それぞれ $0.940 \leq x \leq 1.010$ m、 $3.310 \leq x \leq 3.560$ m) が提示されている⁴⁾。本研究では、跳ね返り高の基準範囲の中央値 (3.435 m) をもとに、反発係数 $0.865 (= (\text{跳ね返り高} + \text{静的たわみ}) / (\text{落下地点} + \text{静的たわみ}))$ を得た。なお、静的たわみは付記2の予測式に質量 60 kg を代入して得られた 0.173 m とした。

公式トランポリンベッドの落下試験に基準範囲が設けられているように、トランポリンベッドによって跳ね返りやすさが多少異なる可能性がある。本研究では基準範囲の中央値から反発係数と静的たわみを推定したが、本研究の手法や知見を活用する際にはこれらの推定値に誤差が含まれている可能性に留意する必要がある。

付記2 静的たわみの推定について

静的たわみの大きさは対象者の体重に依存すると思われる。そこで、体重と静的たわみとの関係性を調査し、得られた関係式を用いて競技者ごとの静的たわみを推定した。

静的たわみ推定のための対象者は成人男女計 18 名 (体重 62.6 ± 10.4 kg) とした。トランポリン器具には、本研究の対象競技会と同様に Ultimate (EUROTRAMP 社製) を用いた。対象者一人ずつトランポリンベッドの中央で 10 秒間静止立位姿勢を維持させ、側方からデジタルビデオカメラ (HC-W870、Panasonic 社製) で撮影した。

トランポリンベッドの最下点を毎秒 1 コマにつき Frame-DIAS VI (DKH 社製) を用いてデジタル化した。10 秒間の最下点の座標値の平均値から実長換算して静的たわみを求め、体重に対する予測式を作成した。その結果、静的たわみ (m) = $0.00204 \times \text{体重 (kg)} + 0.0508$ ($r=0.960$, $p<0.01$) という予測式を得た (Figure 4)。最終的に、個々の競技者の体重をこの予測式に代入することによって静的たわみを算出した。

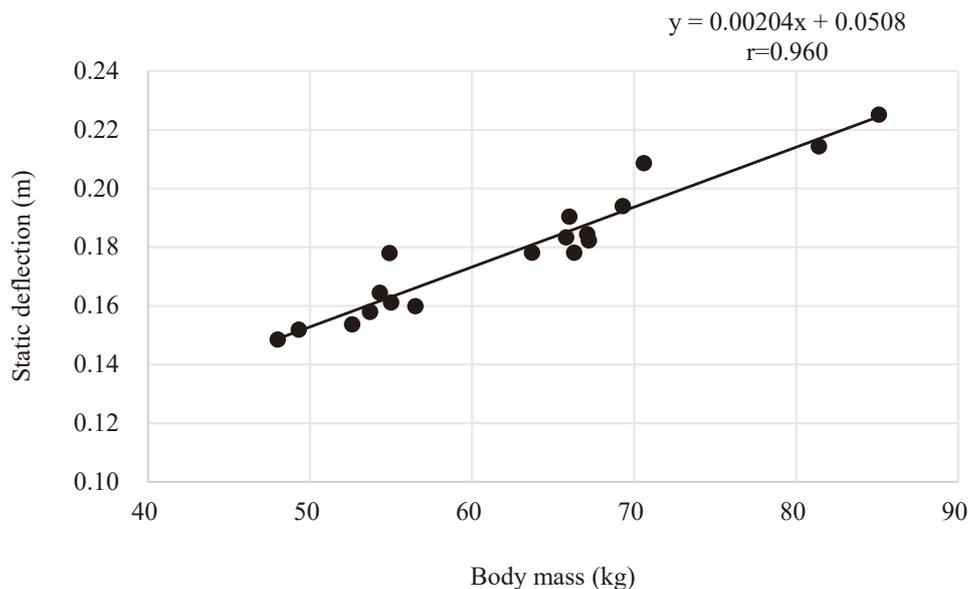


Figure 4. Relationship between the static deflection and body mass.

文献

- 1) Dyas N, Green DJ, Thomas K, Howatson G. Reliability and characterisation of the 20-maximum trampoline jump test. *Isokinet Exerc Sci*, 29(2): 131-137, 2021.
- 2) Dyas N, Green D, Thomas K, Matthew E, Howatson G. The physical determinants of maximal jumping time of flight in elite trampolining. *Eur J Sport Sci*, 23(12): 2283-2290, 2023.
- 3) Fédération Internationale de Gymnastique (FIG). 2022-2024 Code of Points Trampoline Gymnastics. https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en_TRA%20CoP%202022-2024.pdf (2024年2月23日)
- 4) Fédération Internationale de Gymnastique (FIG). FIG International Gymnastics Federation Standard Specification for Trampolines TRA-Trampoline. https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en_Apparatus%20Norms%20IV%20Testing%20procedures.pdf (2024年2月23日)
- 5) Ferger K, Hackbarth M, Mylo MD, Müller C, Zentgraf K. Measuring temporal and spatial accuracy in trampolining. *Sport Eng*, 22(18): 1-7, 2019.
- 6) Harden M, Earnest CP. The Effect of warm-up modalities on trampoline flight time performance. *Cent Eur J Sport Sci Med*, 10(2): 33-43, 2015.
- 7) Heinen T, Krepela F. Evaluating routines in trampoline gymnastics. *Sci Gymnast J*, 8(3): 229-238, 2016.
- 8) 衣笠泰介, 横澤俊治, 中西智也, 袴田智子, 窪康之. 競技パフォーマンス構造モデルに関する文献レビュー及び科学的サポートに効果的な競技パフォーマンス構造モデル構築の在り方の検討. *Journal of High Performance Sport*, 11: 106-116, 2023.
- 9) 松島正知. トランポリンベッドの沈み距離と上り時間からみたトランポリンの跳躍の踏切の傾向について. *スポーツパフォーマンス研究*, 13: 382-391, 2021.
- 10) 松島正知, 矢野澄雄. トランポリンのジャンプとリバウンドジャンプとの沈み局面での違いについて. *運動とスポーツの科学*, 23(2): 133-138, 2018.
- 11) 新谷昂, 山崎博和, 杉田正明. トランポリン競技における世界と日本の獲得点数からみた強化戦略. *体育学研究*, 67: 103-112, 2022.
- 12) 上山容弘, 淵本隆文. トランポリンの踏切動作. *体育の科学*, 57(7): 516-520, 2007.