

【原著論文】

世界一線級体操競技者と日本人大学生競技者における前転とび前方 かかえ込み2回宙返り（ローチェ）の動作解析

一踏み切り，着手局面に焦点を充て一

中瀬 卓也¹⁾， 柏木 悠²⁾， 袴田 智子³⁾， 畠田 好章¹⁾， 船渡 和男⁴⁾

¹⁾ 日本体育大学コーチング系

²⁾ 専修大学スポーツ研究所

³⁾ 国立スポーツ科学センター

⁴⁾ 日本体育大学体育スポーツ科学系

Biomechanical analysis of Roche vaults take-off in world elite and national collegiate male gymnasts –Focus on board and horse phase–

NAKASE Takuya, KASHIWAGI Yu, HAKAMADA Noriko,
HATAKEDA Yoshiaki and FUNATO Kazuo

Abstract: The purpose of this study was to clarify the difference between World top level (World) and Japanese College gymnast (Japan) in Roche technique. Gymnastics vaultings were taken video using a high-speed camera at 500 fps for World in official competition of JAPAN CUP 2010 as well as for Japan under official competition settings in university gymnasium. Planar DLT methods were used to obtain linear velocities and momentums on COM, segment joint angles and attack angles for on board phase and on horse phase, respectively. No significant differences in all variables obtained between World and Japan during on board phase. Whereas during on horse phase, significant larger loss in horizontal along with larger gain in vertical linear momentums were observed in World Elite compared to Japanese Collegiate Gymnasts. World enabled to get larger vertical COM velocity at take-off on horse phase by keeping larger shoulder flexion angle (smaller attack angle) at horse touch-down as well as keeping vertical position of whole body throughout on horse phase. This study was suggested that the attack angle body position to get more vertical momentum of COM on horse phase is key factor for successful Roche technique.

要旨：本研究の目的は、体操跳馬種目における世界一線級体操競技者及び日本人大学生競技者のローチェの跳躍における技術の違いを明らかにすることを目的とした。公式世界大会2010JAPAN CUPおよび大学の体操競技場での競技会セットの環境下において、跳馬動作のハイスピードビデオ撮影(500 fps)を行った。二次元DLT法を用いて、身体重心に関する並進速度および運動量、各身体角度変化および身体重心のattack angleを、踏み切り局面と着手局面について分析を行った。その結果、踏み切り局面においては、いずれの測定変数も世界一線級体操競技者と日本人大学生競技者の間に有意な差はみられなかった。一方着手局面において、世界一線級体操競技者は日本人大学生競技者より水平成分の有意な運動量の減少に加えて、鉛直成分の有意な運動量の増加が認められた。世界一線級体操競技者の着手局面離手時の大きな鉛直重心速度は、大きな肩関節屈曲角度を維持したまま跳馬に着手しattack angleを小さくすると同時に、着手中全身をより鉛直に近い状態に維持することによってもたらされていることが示唆された。本研究から、ローチェ試技成功の技術は着手局面において、着手時に肩関節屈曲角度を大きくしてattack angleを保ち、鉛直方向の運動量を増大させることが重要となると結論できる。

(Received: October 2, 2020 Accepted: February 12, 2021)

Key words: Gymnastics, Vault Table, Roche, Biomechanical Analysis, On board and horse phase

キーワード：体操競技，跳馬種目，前転とび前方かかえ込み2回宙返り，動作解析，踏み切り・着手局面

1. 緒 言

体操競技男子跳馬における「前転とび前方かかえ込み2回宙返り(以下ローチェ)」は、1979年プレオリンピック・モスクワ大会で、キューバのローチェ選手によって発表された技である。そして1989年版採点規則(日本体操協会, 1989)において初めて正式な技として記載されてから2000年までの間、ローチェは跳馬の跳躍技の中で最高の価値点を与えられていた。2001年版採点規則(日本体操協会, 2001)においては、ローチェをさらに発展させた跳躍技である「前転とび前方かかえ込み2回宙返りひねり(以下ドラグレスク)」が記載され、その後2009年までの間に「前転とび前方屈身2回宙返り(以下ブラニク)」、「前転とび前方屈身2回宙返りひねり(以下リ・セグアン)」など、ローチェを発展させた跳躍が続々と発表されてきた(日本体操協会, 2009)。これらの高難度の前方系跳躍技を習得するために、ローチェはその基本となる重要な技であると考えられる。

2019年10月に開催された第49回世界体操競技選手権予選競技(FIG 2019)の跳馬における跳躍を調査したところ、出場選手205名の中でローチェ23名、ドラグレスク9名、ブラニク3名、リ・セグアン2名の実施数であったことに対し、2019年4月に開催された第73回全日本体操個人総合選手権では、出場選手68名の中でローチェ2名、ブラニク1名の実施数であった。田口ら(2006)は2005年世界選手権と同年全日本選手権における跳馬の演技実施の動向を比較し、世界選手権種目別跳馬決勝でローチェの発展系跳躍が多く発表されていたことに対して全日本選手権決勝ではローチェの実施がなく、日本人競技者の跳馬の競技力が世界各国と比較して低いことを指摘していたが、14年経った現在でも日本人競技者によるローチェの実施数は少ないことがわかる。

日本人競技者による実施数が少ない理由の一つとして、前方に2回以上の宙返りをする技は着地において頸椎などに大きな怪我を負う危険性があるという判断から、日本独自のルールとして30年以上前から中学生適用規則(日本中学校体育連盟体操競技部, 2017)で禁止技に指定されていることによる影響が考えられる。一方で、ローチェの発展系跳躍まで実施できる日本人競技者が少ないことは、体操競技の国際ルールで定めた採点規則が4年に1度変更されることを考えると、近い将来ローチェの発展系跳躍種目が日本の課題となってくる可能性が高い。したがって、世界と日本人競技者のローチェの現状を明らかにすることは日本体操界の強化の一助となると考えられる。

ローチェの先行研究において、山田ら(1999)はロー

チェの踏み切り局面と着手局面における鉛直速度の獲得に着目し、1998年のワールドカップ決勝鯖江大会においてローチェを実施した4名の競技者をデジタルビデオカメラで撮影して、得られた画像から身体重心位置、速度、身体の傾きを算出し、鉛直速度の増加が踏み切り局面と着手局面の中盤の2回みられる競技者と、踏み切り局面のみに速度増加がみられる競技者の2つの特徴に分かれたことを示している。ローチェ動作は、同様の前転とび技群である「前転とびひねり後方伸身宙返り(クエルボ)」と比較して、跳馬着手局面中の身体重心周りの角運動量の減少が大きいこと、その反面、同局面中の身体重心の鉛直方向の速度が増加していることが示されている。したがって、ローチェの成功には跳馬の離手後の角運動量を犠牲にしても身体が運動する空間の高さを作り出す着手技術が必要であることを示唆している(日本体操協会研究部, 1999)。また、Takei et al. (2003, 2007a)は、2000年に開催されたシドニーオリンピックにおいて高得点を獲得した16名のローチェ跳躍の特徴として、高い跳躍高を獲得することによって着地局面の膝関節伸展リリース動作の準備が早められ、安定した着地を可能にしていることを報告している。更にTakei(2007)は、ローチェの演技得点と運動学、運動力学変数をDeterministic Modelを用いて検討した結果、跳馬離手から着地までの局面における重心高の鉛直及び水平距離と得点の関係性が強いことを報告している。ローチェの跳躍技術において、空中での回転運動も重要であるが、踏み切り板や、跳馬離地時の鉛直成分と水平成分の大きな運動量がパフォーマンスを左右すると考えられる。したがって、多くの先行研究では、ローチェにおける着手局面の重要性が示唆されている。

しかしながら、先行研究の多くは2000年以前のデータを元に発表されているものがほとんどであり、2001年に新型跳馬へ規格変更があった後のローチェに関する学術的研究報告は少ない。高難度の跳躍技であるため、実施できる被験者が少なく、多くのデータを集めることは困難であることがその理由の1つであると考えられる。本研究はその条件を克服し、撮影許可が下りにくい世界一線級競技者が参加した国際的競技会および、ローチェを試技できる大学生競技者からデータ収集が実現できた希少な研究である。2010年以降にローチェの発展系跳躍が採点規則に記載された例がないことから、この10年での技の進化はなく、10年前のデータを用いる価値はあると判断する。新型跳馬に変更されてからは横幅が約3倍に広がり、着手できる表面積が増加した。また、旧型跳馬と比べて跳馬の進行方向から手前の部分が丸みを帯びた形状となり、さらに跳馬の弾力性も増大している。Irwin and David

(2009)は、「前転とび前方かかえ込み宙返り」の旧型跳馬と新型跳馬における跳躍動作の違いを検討した研究において、跳馬の弾力性や形状が変化したことにより、体操競技者の新型跳馬への技術的対応が異なることを報告している。したがって、新型跳馬に変更してからの海外競技者と日本競技者の着手局面における動作を比較検討することは、日本の体操競技の強化において重要な知見が得られると考えられる。そこで本研究は、踏み切り局面と着手局面の動きに注目し、跳躍高と水平距離を高めるための運動量獲得の動作に焦点を絞り、世界一線級の海外競技者および日本人大学生競技者によって発表されたローチェの跳躍における技術の違いを明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 測定手順および分析対象

本研究では、①実際の国際競技会と②試合を想定した体操競技場での試技を対象とした。①の分析対象として2010年7月東京体育館にて開催された国際体操連盟公認体操 JAPAN CUP 2010 の男子団体戦跳馬種目に出場した、北京オリンピックメダリストを含む世界一線級体操競技者（以下 World と示す）5名によるローチェの跳躍を対象に映像撮影を行った。映像撮影には、日本体操協会及び大会運営団体に研究の趣旨を提出し、許可を得た上で実施した。競技会前日の監督会議にて、各国選手団の監督に許可を得た上で、出場競技者の身長、体重、生年月日の個人情報収集した。体操 JAPAN CUP 2010 においては、日本人競技者によるローチェの発表はなく、海外競技者のみが分析対象となった。比較対象として②では、北京オリンピックメダリストを含む日本の一線級大学生競技者が所属する体操競技部の協力のもと、N 大学体操競技場にて日本人大学生競技者（以下 Japan と示す）5名によるローチェの映像撮影を実施した。分析対象とした①、②の試技はすべて Senoh 社製の跳躍板と跳馬を使用した。本研究に参加した10名全ての競技者に予めインフォームドコンセントを行い測定に参加してもらった。大学体操競技部側の被験者については安全面を考慮し、跳馬着地場所にはピット（練習用補助マット）を使用した。また、それぞれの跳躍について日本体操協会公認審判員の資格を有する4名の審判員に、2009年度版採点規則（日本体操協会、2009）に則って採点を実施してもらい、算出された得点を評価とした。本研究の対象となった World と Japan の身体的特徴および、得点を表に示した（Table 1）。体操 JAPAN CUP 2010 において映像撮影を行った World は競技会での試技であったことを踏まえ、Japan も同年のインシーズンに、跳躍1試技のみの実施とする試合形式で撮影

Table 1 Characteristic of physical valuable and performance score.

	Unit	Japan		World		Statistical	
		Mean	SD	Mean	SD	p-value	effective size
Age	yrs	22.5	3.0	22.9	1.9	0.801	-0.17
BH	cm	162.2	4.1	167.2	5.8	0.154	-1.00
BW	kg	57.5	5.6	67.2	5.2	0.022*	-1.79
D-Score		6.60	—	6.60	—	—	—
E-Score		8.85	0.69	9.04	0.56	0.645	-0.30
Total Score		15.45	0.69	15.64	0.56	0.645	-0.30

D-Score : Difficulty Score, E-Score : Execution Score *p<0.05

を実施した。本研究の測定手順は、日本体育大学倫理審査委員会（第010-H31）の許可のもと実施された。

2.2 測定設定

本研究は、ハイスピードカメラ（FASTCAM SA3 Photron 社製）を撮影速度 500 fp, シャッタースピード 1/1000 秒に設定し、跳馬右側方 10 m の観客席に設置し、2次元の動作撮影を行った。映像の撮影範囲は、跳躍板から跳馬がすべて入る 4 m 画角範囲とし、鉛直距離は、競技者が跳馬から離手したときに全身が撮影できるように設定した。画像のキャリブレーション方法に関しては、縦方向に 0.5 m 毎にコントロールポイントが付いた 4 m キャリブレーション持具に重錘を垂らし、試合前、試合後に 1 m 間隔で跳馬手前の走路面について映し込みを行った。Fig. 1 は測定配置図とキャリブレーション方法を示す。

2.3 データ処理

撮影された映像は、動作分析ソフト Frame-DIAS system (DKH 社製) を用いて、2 フレーム毎 (250 fps) に競技者の全身の身体分析点 25 点（第3中指節関節、手関節、肘関節、つま先、拇指球、踵骨突起、足関節、膝関節、大転子点、肋骨下端、頭頂、耳珠点、肋骨上縁）のデジタイズ作業を行った。デジタイズ作業をした映像は、コントロールポイントの2次元画像より DLT 法 (Abdel-Aziz and Karara, 1971) によって、身

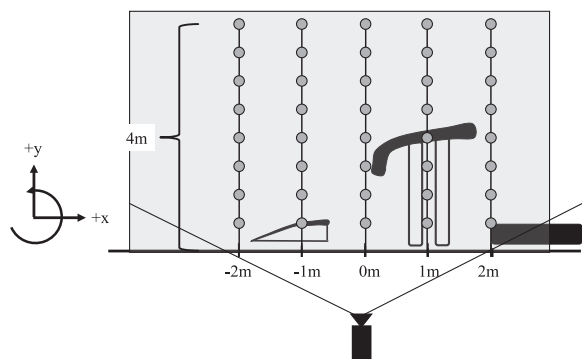


Figure 1 Placement of the calibration poles in the vaulting area location of camera in designated filming area, and x-y coordinate system.

体分析点の2次元実座標値を算出した。2次元座標値算出における標準誤差は、それぞれx方向1.28 cm, y方向1.23 cmであった。得られた座標値は、残差分析(Winter, 2009)によって身体分析点の座標値ごとに最適遮断周波数を決定し、4次のバターワース型ローパスフィルターを用いて平滑化を行った(x座標4-11 Hz, y座標5-10 Hz)。15の体分節から成り立つ剛体リンクセグメントモデルを仮定し、阿江ら(1992)の身体部分慣性係数を用いて平滑化された座標データから体分節質量中心位置および身体合成重心(Centre of mass: 以下, COM)位置を算出した。

2.4 局面分け

本研究は、跳躍板への接地から跳馬から手が離れる離地までを分析対象局面とした(Fig. 2)。局面の定義は、Takei et al. (2003)の報告を参考に跳躍板接地(Board touch down: 以下, Board TD)から跳躍板離地(Board take-off: 以下, Board TO)直前の区間を踏み切り局面(以下, On board phase), Board TOから跳馬接地(Horse touch down: 以下, Horse TD)直前の区間をPre fright phase, Horse TDから跳馬離地(Horse take-off: 以下, Horse TO)直前の区間を着手局面(以下, On horse phase)とした。接地と離地の判断は、ビデオ映像から目視で行った。

2.5 データ分析

2.5.1 各局面時間

撮影されたハイスピードカメラ映像から、500 fpsの時間分解能で跳躍板と跳馬の接地と離地の時刻を読み取り、On board phase, Pre fright phaseおよびOn horse phaseの局面時間を算出した。

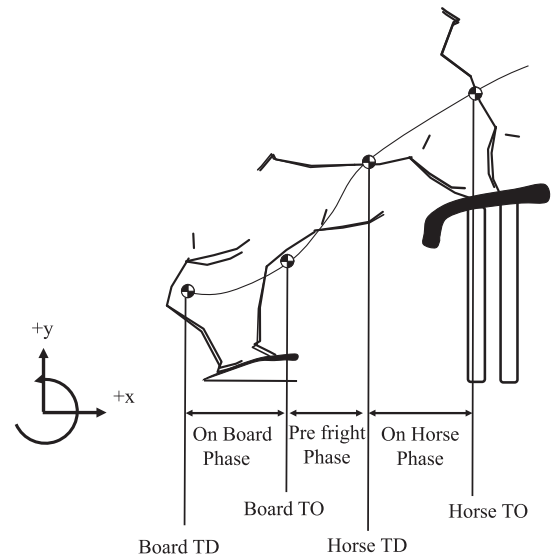


Figure 2 Three phase and four timing of Roche vault consist of approach.

2.5.2 COM 速度

分析局面における, Board TDからHorse TOのCOMの位置座標データを微分処理し, COMの水平成分(以下, COMvx)および鉛直成分(以下, COMvy)の速度を算出した。速度成分の定義は, 水平成分の進行方向を+x, 鉛直方向を+yと定義した。また, On board phaseとOn horse phaseのCOMの速度差を算出した。さらに算出されたCOMの速度ベクトルから4つのタイミングにおける水平面に対するCOM速度ベクトル角度(COMvec)を算出した(Fig. 3)。

2.5.3 運動学的変数

関節角度および角速度は, 下肢3関節と肩関節で算出した。下肢3関節は, 伸展方向を+と定義し, 肩関

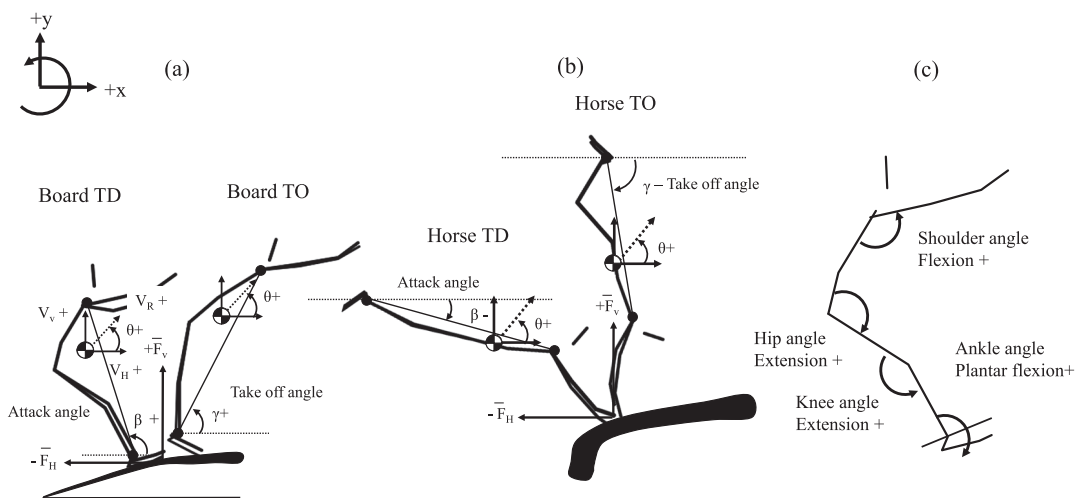


Figure 3 (a, b) Force acting on the gymnast from touch down to take-off on board and horse. Attack and take-off angle relative to horizontal line. (c) Joint angle definition.

節においては、屈曲方向を+と定義した (Fig. 3)。また、各4つのタイミング時の身体の姿勢を評価するために、肩峰点と外踝を結んだ線分と水平線がなす角度を Attack angle と Take-off angle と定義し、それぞれ水平線に対して反時計回りを+として算出した (Takei et al., 2003) (Fig. 3)。

2.5.4 運動力学変数

On board phase と On horse phase の運動量 (Linear momentum, G) および、平均の力 (Average force, \bar{F}) の算出は、先行研究の方法 (Takei, 1988) に従い、以下の式によって求めた。

$$G = \bar{F}t = m(V_{TO} - V_{TD}) \tag{1}$$

$$\bar{F} = m(V_{TO} - V_{TD})/t \tag{2}$$

ここで V_{TO} は離地速度、 V_{TD} は接地速度、 t は接地時間、 m は体重である。また、運動力学の変数は、水平成分の進行方向を +x、鉛直成分の上方向を +y と定義した (Fig. 3)。Average Force は、体重によって正規化して示した。

2.6 統計分析

計測変数は、全て平均値 ± 標準偏差で示した。各局面の算出された変数において World と Japan の比較には、対応なしの t 検定 (ウェルチ法) を用いて差の検定を行った。COM 速度、関節角度、角速度データは、3 次のスプライン関数を用いて、2% 毎に正規化し、2% 毎に World と Japan の対応なしの t 検定 (ウェルチ法) を用いて検定を行った。全ての統計分析は、危険率 5% 水準を有意とした。本研究は、世界一線級体

操競技者を対象としているため、被験者のサンプル数が少ない。そのため World と Japan との差の大きさを検討するために、平均値と標準偏差を用いて差の効果を算出した (Cohen, 1998)。効果量の評価は、±0.2 ~ 0.5 を小、±0.5 ~ 0.8 を中、±0.8 以上を大とした (水本, 竹内, 2008)。

3. 結果

3.1 局面時間

3つの局面時間において全ての局面で Japan は、World より短い局面時間を示したが、両群に統計上有意な差はみられなかった (Table 2)。

3.2 運動学的変数

3.2.1 COM 速度

COMvx は、Board TD に最大速度を示し、その後、Horse TO にかけて減少する傾向を示した。また、Board TD から正規化時間の 80% まで、World は Japan より大きな速度を示し、正規化時間の 78-82% は、World は Japan より統計上有意に高い COMvx を示した ($p < 0.05$, $d = -1.47 \sim -0.70$, Fig. 4)。COMvy は、Board TO 直前で最大速度を示し、Horse TD 後に再増加し、Horse TO に向けて減少がみられた。離手直前の正規化時間 86% 以降は、World と Japan の COM 速度にトレードオフがみられたが、両群に統計上有意な差はみられなかった (COMvx: $p = 0.269 - 0.695$, $d = 0.26 \sim 0.75$, COMvy: $p = 0.252 \sim 0.979$, $d = -0.78 \sim 0.18$)。

3.2.2 COMvec, Attack angle, Take-off angle

Board TD, TO の COMvec は、両群に統計上有意な差はみられなかった。Horse TD の COMvec は、Japan

Table 2 Comparison of kinematic data between World and Japan on four timings.

	Unit	JAPAN		World		Statistical	
		Mean	SD	Mean	SD	p-value	effective size
Phase time	On Board	114	2	118	6	0.203	-0.88
	Pre Fright	103	21	115	20	0.390	-0.58
	On Horse	166	11	167	17	0.862	-0.11
Horizontal	Board TD	7.97	0.37	8.13	0.46	0.551	-0.39
	Board TO	4.41	0.52	5.00	0.34	0.067	-1.34
	Change on Board	-3.56	0.25	-3.13	0.75	0.262	-0.76
	Horse TD	4.92	0.55	5.30	0.41	0.252	-0.78
	Horse TO	3.25	0.37	3.06	0.18	0.346	0.63
	Change on Horse	-1.68	0.60	-2.24	0.37	0.113	1.13
	Board TD	-1.43	0.22	-1.37	0.30	0.720	-0.24
COM velocity	Board TO	4.44	0.18	4.39	0.14	0.641	0.31
	Change on Board	5.87	0.36	5.76	0.31	0.615	0.33
	Horse TD	3.48	0.29	3.19	0.32	0.173	0.95
	Horse TO	3.70	0.22	3.88	0.24	0.252	-0.78
	Change on Horse	0.22	0.27	0.69	0.38	0.055	-1.45
	Board TD	8.10	0.36	8.25	0.47	0.584	-0.36
	Board TO	6.27	0.41	6.66	0.27	0.109	-1.14
Resultant	Change on Board	-1.83	0.18	-1.59	0.66	0.455	-0.50
	Horse TD	6.04	0.52	6.19	0.37	0.599	-0.35
	Horse TO	4.93	0.28	4.95	0.20	0.913	-0.07
	Change on Horse	-1.10	0.35	-1.24	0.41	0.579	0.37

*: $p < 0.05$

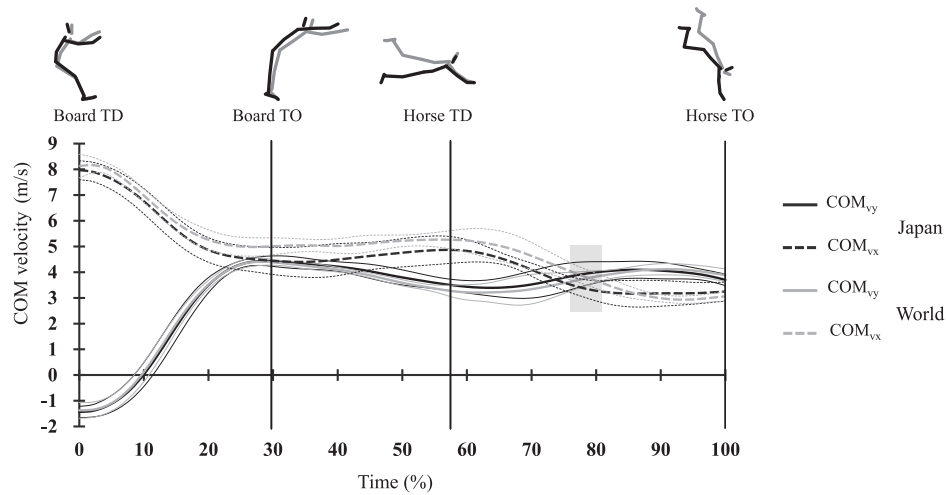


Figure 4 Change of velocity of horizontal and vertical COM from Board TD to Horse TD. Black line indicate Japan, Grey line indicate World. Grey box is a COM_{vy} statistically significant difference between Japan and World ($p < 0.05$). Note: The legend for the figures and tables below is also included. Stick picture is a comparison of between World and Japan.

Table 3 Comparison of COM velocity angle, Attack angle and take-off angle at TD and TO.

	Unit	JAPAN		World		Statistical	
		Mean	SD	Mean	SD	p-value	effective size
COMvec	Board TD	-10.2	1.6	-9.6	2.0	0.574	-0.37
	Board TO	45.3	3.5	42.1	3.6	0.181	0.93
	Horse TD	35.4	3.4	31.5	3.8	0.122	1.09
	Horse TO	48.8	3.8	52.7	3.0	0.105	-1.16
Attack angle	deg(β)	108.1	1.8	107.1	2.5	0.495	0.453
Take-off angle	deg(γ)	64.1	3.8	62.9	3.2	0.616	0.331
		4.5	9.3	-3.3	9.6	0.229	0.824
		-60.6	11.6	-75.4	11.8	0.081	1.261

が World より大きな角度を示したが、統計上有意な差がみられなかった ($p=0.122$, $d=1.09$)。Horse TO においては、World が Japan より大きな COMvec を示したが、有意な差はみられなかった ($p=0.105$, $d=-1.16$, Table 3)。

Board TD, TO の Attack angle と Take-off angle は、両群に統計上有意な差はみられなかった。一方で、Horse TD の Attack angle においては、Japan は、 4.5 ± 9.3 deg に対して、World は、 -3.3 ± 9.6 deg のマイナス値を示したが両群に統計上有意な差はみられなかった ($p=0.229$, $d=0.824$, Table 3)。Horse TO の Take-off angle は、World が Japan より鉛直方向に大きな角度を示した。

3.2.3 関節角度および角速度

肩関節角度の Horse TD 以降の 72–80% 正規化時間において、Japan は、World より大きな角度を示し、統計上有意な差がみられた ($p < 0.05$, $d=-1.56 \sim -1.43$, Fig. 5-a)。股関節、膝関節、足関節においては、両群に統計上の有意な差はみられなかった。肩関節角速度においては、正規化時間の 62–70% で World より Japan が統計上有意に高い角速度を示し ($p < 0.05$, $d=-2.51 \sim -1.71$, Fig. 6-a)、正規化時間の 86–90% では、Japan が

統計上有意に高い屈曲角速度を示した ($p < 0.05$, $d=1.15 \sim 1.56$, Fig. 6-a)。股関節角度においては、正規化時間の 66–74% において、Japan は World より低い伸展角速度を示した ($p < 0.05$, $d=-2.07 \sim -1.51$, Fig. 6-b)。膝関節角速度においては、正規化時間 66–68% で Japan は World より高い屈曲角速度を示したが ($p < 0.05$, $d=-1.64 \sim -1.52$, Fig. 6-c)、一方正規化時間 94–100% で Japan は World より低い屈曲角速度を示した ($p < 0.05$, $d=1.66 \sim 3.04$, Fig. 6-c)。

3.3 運動量と平均の力

On board phase の鉛直成分の運動量は、World が Japan より大きな値を示したが、統計上有意な差はみられなかった ($p=0.056$, $d=-1.41$, Table 4)。一方で On horse phase においては、両者間に統計上有意差がみられ、水平成分の運動量の平均値は、World が Japan よりマイナスの値が大きくなり (F_x : $p=0.042$, $d=1.53$, Table 4)、鉛直成分においては、World が Japan より大きな値を示した (F_y : $p=0.025$, $d=-1.74$, Table 4)。平均の力においては、On board phase で水平、鉛直の両成分とも Japan が World より大きな値を示したが、両群に統計上有意な差はみられなかった (F_x : $p=0.242$, $d=-0.80$, F_y : $p=0.325$, $d=-1.74$, Table 4)。On horse phase

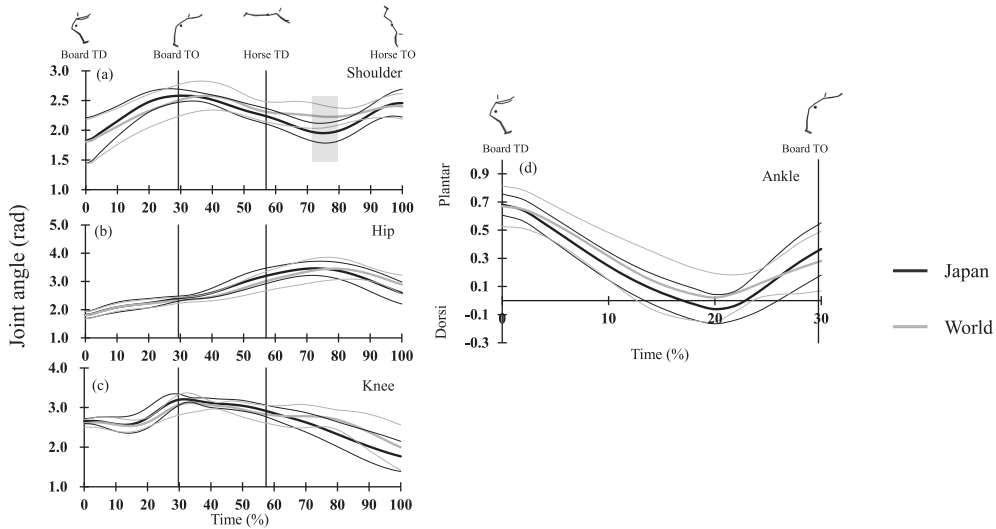


Figure 5 Comparison of upper and lower extremity joint angle between Japan and World gymnasts from Board TD to Horse TO (mean ± SD). Ankle joint is indicated during on board phase. Grey box indicated significant difference between World and Japan.

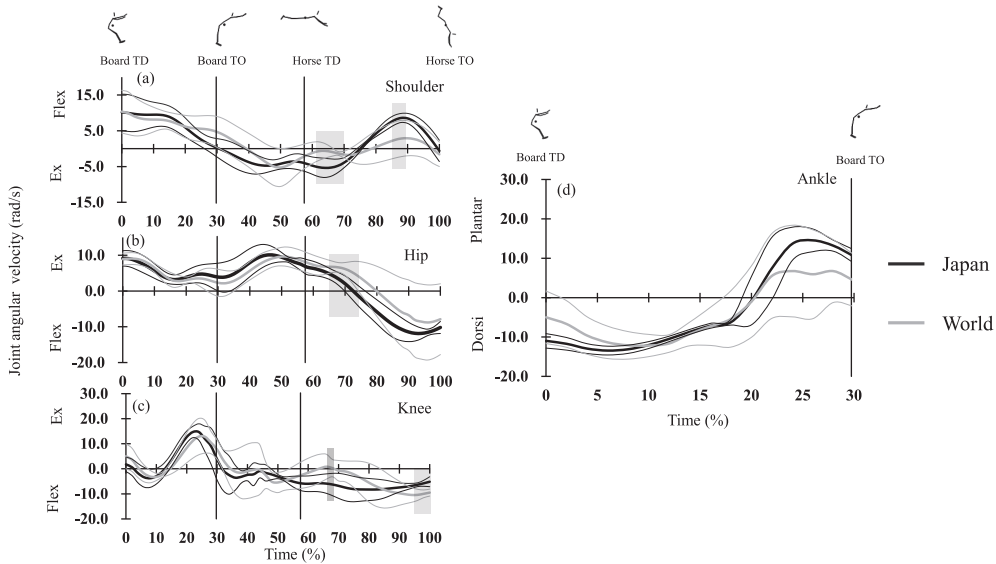


Figure 6 Comparison of upper and lower extremity joint angular velocity between World and Japan gymnasts from Board TD to Horse TO (mean ± SD). Ankle joint is indicated during on board phase. Grey box indicated significant difference between Japan and World.

Table 4 Comparison of kinetics data between World and Japan on Board and Horse phases.

		Unit	JAPAN		World		Statistical	
			Mean	SD	Mean	SD	p-value	effective size
Liner momentum	On Board phase	Fx	-203.8	17.9	-209.9	52.6	0.812	0.16
		Fy	394.1	32.0	455.0	51.8	0.056	-1.41
	On Horse phase	Fx	-97.8	38.4	-150.7	30.5	0.042*	1.53
		Fy	70.7	20.9	114.1	28.4	0.025*	-1.74
Average Force	On Board phase	Fx	-3.2	0.2	-2.7	0.8	0.242	-0.80
		Fy	6.1	0.3	5.8	0.5	0.325	-1.74
	On Horse phase	Fx	-1.0	0.4	-1.4	0.3	0.174	0.95
		Fy	0.8	0.2	1.0	0.3	0.108	-1.15

*:p<0.05

の平均の力は、WorldがJapanより大きな値を示したが、統計上有意な差はみられなかった (Fx: p=0.174, d=0.95, Fy: p=0.108, d=-1.15, Table 4)。

4. 考 察

本研究は、WorldおよびJapanによって発表されたローチェの跳躍における、踏み切り局面から着手局面

にかけての運動学的変数から技術の特徴を明らかにすることを目的とした。これまでにローチェに関する多くの研究が報告されているが、その多くが2000年以前のルール改正と旧型跳馬による報告である。本研究は、新型跳馬を用い且つルール改正以降の世界一線級および日本人大学生競技者のデータであり、これまでの先行研究との比較によりローチェの技術の新たな知見が得られると考えられた。本研究の考察では、跳躍高と跳躍距離の運動量を生成する On board phase と On horse phase に焦点を充て議論を進める。

4.1 On board phase

On board phase の COM 速度は、鉛直成分において両群に有意な差はみられなかった。一方で水平成分においては、統計的有意差はみられなかったが Board TD から Board TO まで終始、World が Japan より大きな水平速度を維持した。また、On board phase 中の水平成分の速度減少は、World の値が $-3.13 \pm 0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ と Japan の $-3.56 \pm 0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ より低い値を示し ($p=0.262$, $d=-0.76$)、Board TO 時の水平成分の速度は、Japan が $4.41 \pm 0.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、World が $5.0 \pm 0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ であった ($p=0.067$, $d=-1.34$)。1988年ソウルオリンピックの高スコアの跳躍は、Board TD の水平成分、鉛直成分の速度が明らかに低スコアの跳躍より大きい傾向を示したが (Takei, 1991a ; Takei, 1991b)、一方で2000年のシドニーオリンピックの高スコアの跳躍においては、水平成分の速度のみスコアの差がみられたことが報告されている。しかし、高スコア跳躍の On board phase における鉛直成分の速度減少は小さく、Board TO の速度が低スコアの跳躍より大きいことが示されている (Takei et al., 2003)。以上のことから、本研究の World の On board phase における COM 速度の結果は、山田ら (1999) や Takei et al. (2003) の高スコア跳躍時の COM 速度の結果を支持すると共に、跳馬器具の違いは影響せず、ローチェの高スコアを得るために必要な速度が示されたと考えられる。

跳馬スコアに関係する力学的要因は、離地後の回転や捻りに関係する角運動量と、COM の高さや水平距離に関係する並進運動量の2つの要因に分けられている (Prassas et al., 2006)。その根本的な運動量となるエネルギーは助走速度であり、如何に助走で得た運動量を踏み切り板で鉛直方向と回転運動へ変換できるかが重要となる。On board phase の鉛直成分および水平成分の運動量は、両群に統計上有意な差はみられなかった。また、この時の運動学的変数を見ると、上肢下肢の関節角度、Attack angle および Take-off angle においても同様な値を示し、両群間に差がなかった。Takei et al. (2003) の報告においても本研究と同様に

On board phase の運動量は、得点によって差はみられなかった。したがって、本研究の結果から World と Japan における On board phase の技術の差はないと考えられ、ローチェの実施において踏み切り局面の技術の差の影響は低いことが示された。

4.2 On horse phase

On horse phase における本研究の World と Japan の顕著な違いは運動量にみられ、World が水平成分と鉛直成分ともに大きな値を示し、統計上有意差がみられた部分となった (Fx: $p=0.042$, $d=1.53$, Fy: $p=0.025$, $d=-1.74$)。この局面での体重あたりの Average Force は、On board phase とは異なり World が Japan より大きい傾向を示していたため (Fx: $p=0.174$, $d=0.95$, Fy: $p=0.108$, $d=-1.15$)、運動量の差が単に両群の体重差に依存していないことがわかる。Takei et al. (2003) の報告では、得点の差に鉛直成分の運動量の差はみられず、一方で水平成分では低スコアの競技者が高い値を示し、本研究と異なる結果であった。本研究においては World が水平成分と鉛直成分ともに Japan より大きな運動量を獲得していたことは注目すべき結果である (Table 4)。先行研究において On horse phase の運動量は、跳躍高や着地距離に関係し、演技スコアに大きく影響するが (Takei, 1988 ; Takei, 1991a ; Takei et al., 2000)、その一方で、回転運動に関係する角運動量は、得点への影響が少なく (Takei et al., 2003)、跳馬種目において如何に着手局面で並進運動量に関係する速度を高められるかがローチェ実施において重要な要素であることが示唆される。本研究における運動量を構成する COM の速度をみてみると、Horse TD から World が Japan より大きな速度を示し、特に、正規化時間の 78-82% は、World は Japan より統計上有意に高い COMvx を示し ($p<0.05$, $d=-1.47 \sim -0.70$, Fig. 4)、正規化時間 88% 以降は Japan が World より高い速度を示した ($p=0.269 \sim 0.968$, $d=0.26 \sim 0.75$, Fig. 4)。一方で鉛直成分の速度は、Japan が World より高い値を示し、88% 以降は World が Japan より高い速度を示す傾向がみられた。この局面の速度変化をみると、World は Japan より大きな水平成分速度の減速傾向がみられ ($p=0.113$, $d=1.13$, Table 2)、一方で鉛直成分速度では、トレードオフがみられた ($p=0.055$, $d=-1.45$, Fig. 4)。On horse phase における本研究の COM の速度変化を Takei et al. (2003) の報告と比較してみると、Horse TD, TO の鉛直成分の速度の結果は同等の値を示していたが、水平成分において本研究の結果は低い値を示し、且つ World の Horse TD から Horse TO の速度変化は先行研究より大きな値を示した。On horse phase の運動量の結果において、先行研究と異なる結果が得られた原

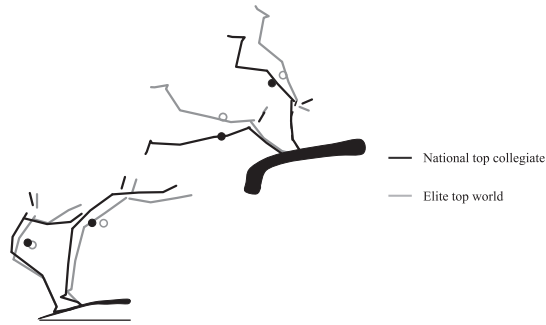


Figure 7 Comparison of stick pictures obtained between an elite top world and a national top collegiate gymnasts at Board TD / TO and Horse TD / TO. Each circle indicates center of mass of the subject.

因の1つ目には、跳馬器具の違いが考えられた。新型跳馬は、跳馬面に傾斜角度がついているため、Horse TDのCOMの減速幅が大きくなったと考えられる。

加えてOn horse phaseではWorldとJapanの着手技術の違いが指摘できる。本研究のWorldとJapanのHorse TDの着手のAttack angleをみるとWorldは、平均 -3.3 ± 9.6 degに対してJapanは、 4.5 ± 9.3 degであり($p=0.229, d=0.824$)、また、離手のHorse TOのTake-off angleは、Worldがより鉛直方向に大きな角度を示した($p=0.081, d=1.261$)。この角度の違いは、本研究の最も高スコアのWorldの競技者($n=1$)とJapanのトップ競技者($n=1$)のスティックピクチャーにも顕著にみられている(Fig. 7)。また、Attack angle姿勢の違いは、運動量だけでなく回転運動への影響も考えられた。WorldのAttack angle姿勢は、手部を着力点と仮定すると跳馬からの反力ベクトルがCOMよりも低い位置に作用することによって、進行方向の時計周りにCOMへ効率的なモーメント発生させている姿勢であると推測されるが、JapanのAttack angle姿勢は、その逆の反時計回りのモーメントを発生させる非効率的姿勢であると推察された。したがって、Horse TDのAttack angle姿勢は、跳馬から大きな運動量の獲得のための重要な技術であると本研究は示唆する。

WorldのOn horse phaseにおける動作の特徴として、大きな肩関節屈曲角度を一定に保ち続けることは、全身の慣性モーメントを大きくすることに繋がり(Takei et al., 2003)、Horse TO後の角運動量を獲得するために重要であることが推測される。また、66-74%正規化時間において大きな股関節の伸展角速度($p<0.05, d=-2.07 \sim -1.51$, Fig. 6-b)を発揮することは、COM周りの回転運動に効率的な時計周りのモーメントを発生させる1要因になると考えられた。更にWorldの動作の特徴として膝関節屈曲角速度にみられた。これらは両群のかかえ込み姿勢へ移行するタイミ

ングが影響している結果であり、Worldのかかえ込み姿勢への移行が遅いことを表している。Worldの着手動作は、膝関節屈曲のタイミングを遅らせ、慣性モーメントが大きな姿勢から回転に入ることで、Japanより大きな角運動量の獲得が期待できる反面、かかえ込み姿勢への移行に強い体幹の筋力が必要となることが考えられる。対症的にJapanは、Horse TD後に肩関節伸展動作を直ちに行い(Fig. 5-a)、Horse TO時に股関節と膝関節の屈曲を大きくしておくことで(Fig. 7)、跳馬離手後の早い段階でかかえ込み姿勢を作ることが可能となり、その姿勢変換を容易にしていることが考えられる。しかしながらその動作は、慣性モーメントを小さくすることで、姿勢変換しやすい利点はあるが、その一方でCOMの大きな鉛直及び水平距離を生成する運動量を獲得することは困難になると考えられる。ローチェの高得点の要因として、跳馬離手後のCOMの大きな鉛直及び水平距離は、早い段階でかかえ込み姿勢を解除して着地準備に入ることを可能とし、着地の成功に多いに影響する(Takei et al., 2003; Takei et al., 2007; Takei, 2007)。以上のことから、Japanは回転運動依存型であり、Worldは、跳躍移動距離依存型であると特徴づけられる。

4.3 本研究の指導への活用と今後の課題

本研究では、WorldとJapanそれぞれのローチェの特徴を示したが、どちらのローチェでも着地を成功させることができれば高得点を獲得することは可能であると考えられる。その一方で、より安定した実施や、ローチェの発展技を実施していくためには跳馬離手後の運動量について検討する必要性があった。本研究におけるWorldとJapanの動作は、運動量で定量化してみると両者の間に違いがみられ、Worldが離手後に鉛直および水平方向の並進運動あるいは回転運動の仕事量が大きくなる可能性を示唆している。そのポイントをFig. 6のHipから推論することができる。

本研究で得られたWorldの動作の特徴の中で、特に運動量に影響を及ぼしているのは跳馬着手時のAttack angleと下肢の反り上げ動作であることが考えられるため、着手局面前から跳馬離手に向けて肩関節角度を維持しながら脚を上方向に反り上げるように指導していくことが重要であると考えられる。Worldの特徴である跳馬着手局面で膝関節の屈曲角度を遅らせ、より鉛直方向に近い姿勢で離手することで大きな運動量を獲得する技術の場合、空中でのかかえ込み姿勢への変換が困難になることが予想されるため、より素早くかかえ込み姿勢へ変換するための体幹トレーニングも必要であることが示唆された。

本研究の限界として、体操競技男子跳馬種目のロー

チェ動作について World 及び Japan における検討を行ったが、対象となるローチェの跳躍を実施できる被験者の数が少ないため、明確な統計的有意が得られていない点は考慮しなければならない。しかしながら、近年の目まぐるしいルール改正や新型跳馬器具を用いた海外の一流競技者と日本人競技者を比較した報告はみられず、一流競技者のデータから定量的に特徴を示すことは、強化現場において重要であると考えられる。今後、本研究によって得られた World と Japan それぞれの特徴が、着手局面後の角運動量や実際の跳躍高に及ぼす影響についての検討課題が必要となる。

5. 結 論

体操競技男子跳馬種目のローチェ演技について、World 及び Japan における試技において高速度ビデオ撮影を行い、動作分析を行った結果、以下の結論が導き出された。

- ・踏み切り局面においては、両者の踏み切り技術に大きな差はみられなかった。
- ・着手局面において World は、Japan より大きな運動量を獲得していた。このためには、大きな肩関節屈曲角度を維持したまま肩峰点より下肢が高い姿勢で跳馬に着手し、股関節の伸展角速度増加後に膝関節の屈曲角速度発揮のタイミングを遅らせることによって、全身をより鉛直方向に近い状態で離手させる着手技術が必要であることが示された。
- ・Japan の着手技術は、回転運動依存型であり、一方で World は、跳躍移動距離依存型であると特徴づけられた。

6. 文 献

Abdel-Aziz, Y. I. and Karara, H. M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the symposium on Close-range photogrammetry*: 1-18.

阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志 (1992) 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム*, 11: 23-33.

Cohen, J. (1998) *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.) Lawrence Erlbaum.

Federation international de gymnastique (2019) FIG World championship replay: 2019 Artistic Gymnastics Men's Vault Final. <https://www.youtube.com/watch?v=6tU4Hz0IqvM>

Irwin, G. and Kerwin, D. G. (2009) The influence of the vaulting table on the handspring front somersault. *Sports Biomech*, 8(2): 114-128.

水本篤, 竹内理 (2008) 研究論文における効果量の報告のために一基礎的概念と注意. *英語教育研究*, 31: 57-66.

日本中学校体育連盟体操競技部. (2017) 2017 年度版 中学校男子適用規則.

Prassas, S., Kwon, Y. H. and Sands, W. A. (2006) Biomechanical research in artistic gymnastics: a review. *Sports Biomech*, 5(2): 261-291.

Takei, Y. (1988) Techniques Used in Performing Hand-spring and Salto Forward Tucked in Gymnastic Vaulting, 4(3): 260-281.

Takei, Y. (1991a) Comparison of Blocking and Postflight Techniques of Male Gymnasts Performing the 1988 Olympic Compulsory Vault. 7(4): 371-391.

Takei, Y. (1991b) A Comparison of Techniques Used in Performing the Men's Compulsory Gymnastic Vault at the 1988 Olympics, 7(1): 54-75.

Takei, Y. (1998) Three-Dimensional Analysis of Hand-spring with Full Turn Vault: Deterministic Model, Coaches' Beliefs, and Judges' Scores, 14(2): 190-210.

Takei, Y., Blucker, E. P., Nohara, H. and Yamashita, N. (2000) The Hecht vault performed at the 1995 World Gymnastics Championships: deterministic model and judges' scores. *J Sports Sci*, 18(11): 849-863.

Takei, Y., Dunn, J. H. and Blucker, E. (2003) Techniques used in high-scoring and low-scoring 'Roche' vaults performed by elite male gymnasts. *Sports Biomech*, 2(2): 141-162.

Takei, Y., Dunn, J. H. and Blucker, E. P. (2007) Somersaulting techniques used in high-scoring and low-scoring Roche vaults performed by male Olympic gymnasts. *J Sports Sci*, 25(6): 673-685.

Takei, Y. (2007) The roche vault performed by elite gymnasts: somersaulting technique, deterministic model, and judges' scores. *J Appl Biomech*, 23(1): 1-11.

田口晴康, 豊村伊一郎, 柳浩二郎 (2006) 体操競技における男子跳馬の世界的動向について --メルボルン世界選手権大会を中心に. *福岡大学スポーツ科学研究*, 36(2): 1-13.

Winter, D. A. (2009) *Biomechanics and motor control of human movement*. 4th. ed. John Wiley & Sons.

山田哲, 阿江通良, 藤井範久, 渡部裕人, 土屋純 (1999) 前転とび前方かかえ込み2回宙返りの踏み切り局面と着手局面の関係. *日本体育学会大会号*, 50: 739.

(財)日本体操協会. (1989) 日本体操協会: 採点規則男子 1989 年版.

(財)日本体操協会 体操競技委員会研究部 (1999) 男子跳馬における前転とび前方かかえ込み2回宙返り(ローチェ)の技術について. *日本体操協会研究部報第 82 号*, 55-58.

(財)日本体操協会. (2001) 日本体操協会: 採点規則男子 2001 年版.

(財)日本体操協会. (2009) 日本体操協会: 採点規則男子 2009 年版.

〈連絡先〉

著者名: 中瀬卓也
住 所: 神奈川県横浜市青葉区鴨志田町 1221-1
所 属: 日本体育大学コーチング系
E-mail アドレス: nakase@nittai.ac.jp