体操競技の跳馬における助走速度とその測定方法

藤原 敏行¹⁾ 山本 詠人²⁾ 淵本 隆文¹⁾

Toshiyuki Fujihara¹, Eito Yamamoto² and Takafumi Fuchimoto¹: Run-up velocity in the gymnastics vault and its measurement. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 62: 435-453, December, 2017

Abstract : In gymnastics, the vault run-up velocity is important from a competitive aspect. Relevant data in the literature have been relatively abundant but not well organized. The present review covers previous research on run-up velocity data and discusses its measurement for future research, as well as data utilization in practice. Based on the results of several representative studies, we can confidently state that a highly skilled male gymnast reaches a run-up velocity of over 8.5 m/s. At world-level competitions, the average run-up velocity is approximately 8.2 m/s for male gymnasts. Top-level female gymnasts also reach similar speeds. However, considering the issues related to the measurements used and the validity of the reported data, careful investigation is required, particularly with regard to the last step onto the springboard. We also discuss some difficulties with the use of current systems of velocity measurement, such as motion analysis, laser systems, and photocells, in daily training. In order for run-up velocity data to be measured and utilized in practice, (1) measurements should be performed easily, (2) the data should be more reliable and valid than a subjective evaluation by a coach or a gymnast, (3) feedback should be provided automatically and immediately, and (4) the measurement system should be reasonably affordable.

Key words : speed, kinematics, sprint, approach running

キーワード : スピード, キネマティクス, スプリント, アプローチランニング

1. はじめに

本研究では体操競技の跳馬における助走速度について検討する。跳馬の跳躍技は助走局面、踏切り局面、第1空中局面、着手局面、第2空中局面、着地局面の6つの局面に分けられる。あるいは、助走局面から踏切り局面に移行する最終局面である片足踏切り両足着地（跳躍板上）の1歩を、踏込み局面、または予備踏切り局面として、助走局面と区別している場合もあり、この場

合は7つの局面に分けられることになる (Fig. 1)。いずれにしても、採点は両足が跳躍板を離れた瞬間、つまり第1空中局面から開始され (FIG, 2016a, 2016b)、第2空中局面で如何に難しい運動を巧みに実施できるかということが跳馬の主な評価項目である。しかし、跳馬のパフォーマンスを考察する上で、助走速度は力学的に無視できない重要な要素である。先行研究でも助走速度に関するデータは比較的多いが、それらのデータは目的の異なる多様な研究の中で報告されているものであり、男女差、あるいは技の種類やレベ

1) 大阪体育大学体育学部

〒590-0496 大阪府泉南郡熊取町朝代台 1-1

2) トップスポーツクラブ

〒590-0496 大阪府泉南郡熊取町朝代台 1-1

連絡先 藤原敏行

1. School of Health and Sport Sciences, Osaka University of Health and Sport Sciences

1-1, Asashiro-dai, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0496

2. Top Sports Club

1-1, Asashiro-dai, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0496

Corresponding author fujihara@ouhs.ac.jp

Fig. 1 Phases of vaulting.

ルの違いはもちろん、測定手法や速度の定義自体が異なることもある。従って、助走速度に絞って横断的にデータを解釈しようとする際には注意が必要となる。このような現状において、利用可能なデータ、ならびにそのデータが得られた測定方法やデータ解釈の注意点も含めて整理することは、最終的に現場の競技実践者、および今後それに関係する研究を進めようとする研究者の活動に寄与し得る資料となると思われる。体操競技の科学的研究、特にバイオメカニクス分野の総説論文としては、Brüggemann (1994) が運動の種類を系統的に分類し、それまでの研究成果を概観したものや、Prassas et al. (2006) が振動や回転、着地といった基礎技能の要素、および競技種目ごとに知見をまとめたものがよく知られている。どちらも体操競技全般を広く取り上げたものであるのに対し、本論文では跳馬、さらにその助走局面の速度に限定して、これまでの研究成果について概観し、その測定手法についても論述するところに特徴がある。Fujihara (2016) はこの観点から男子の代表的なデータをまとめたものを一部発表しているが、そこでは紙面の都合上、割愛されているものも多い。それらのデータの追加整理、ならびに測定方法とデータ解釈により深い考察を行うことが、本研究の狙いである。

助走速度はあくまでもパフォーマンスに間接的

に影響する要因の1つであり、跳躍技のパフォーマンス評価に直接関わるものではない。陸上競技や競泳で一定距離を移動する時間を競う種目では、その移動速度はパフォーマンス評価そのものであるのに対し、跳馬では採点競技として審判員がつけた得点でもって順位が競われ、助走はその採点には含まれない (FIG, 2016a, 2016b)。金子 (1974) が、「跳馬技能の最大のポイント」は着手局面であると捉えているように (p.93)、技の成否にはやはり着手局面や踏切り局面の影響の方が重要であるという認識から、助走速度への興味関心がそれほど高くない選手や指導者も珍しくない。着手の機能によって、第2空中局面における複雑な構造をもった運動に繋げるのであるから、着手の成否は当然、技の成否に大きく影響する。そして、着手の準備は直前の第1空中局面および踏切り局面から行われているので、踏切局面の失敗が、着手局面、そして技全体の失敗に繋がることも珍しくない。一般的に、個人の全速力で走れば走るほど、踏込み局面、踏切り局面のコントロールは不安定になりやすく、跳躍としてはむしろ失敗が多くなることもある。つまり、その個人にとって全速力での助走が必ずしも良い跳躍に繋がるとは言えない。また、選手は自分の技能レベルと極端にかけ離れた無謀な大技の練習をしていることはほとんどなく、大概是現在実施可

能な技より1段階あるいは2段階程度難度が高い技に向けて練習をしている。よって、第2空中局面における技能や着手局面での技能が少し改善、習熟されれば、次のレベルの技の習得できると考えやすい。

これらの認識は間違いとは言えない。しかし、跳馬の主要局面に必要な力学的エネルギーは助走局面と踏切り局面によって生み出されることもまた自明である。George (2010) の表現を拝借すれば、

Success in Vaulting requires the “skills” of an advanced tumbler as well as the “running speed” of a champion sprinter! (p.229)

(筆者訳：跳馬で優れた技を行うには熟練したタンブリング選手の技能とトップ短距離選手の疾走速度が求められる。)

のであり、一般的に高度な跳躍技になればなるほど、より大きな力学的エネルギーが必要となる事実を軽視することは賢明ではない。採点規則においては、第2空中局面における身体の左右軸周りの回転(宙返り)や、長軸周りの回転(ひねり)の数が多くなるほど難しい技として、より高い難度点が与えられる。助走局面でより大きな力学的エネルギーを獲得し、それを跳躍に活かすことは、高難度技実施への可能性を拡大することにつながる。速く走ると失敗することが多いから、助走は速くない方が良いと表現する実践者がいるとすれば、誤解を招きやすいと思われる。

実際、助走速度と跳躍パフォーマンスの強い関係性を裏付ける研究は多い(例、Takei, 1988)。中には助走速度と助走の歩数のデータだけで、統計学的には演技得点の9割以上の分散を説明できるという研究データの例(Sands and Cheetham, 1986)もあるほどである。注意すべきは、助走速度だけ高めれば跳馬技能が高まるということではなく、優れた選手は筋力的にも技術的にも、より高い助走速度から踏切りと着手を行える選手であるということである。言い換えれば、どれほど高い助走速度から跳躍を行えるかというのは、単なる疾走能力だけの問題でなく、踏切りや着手の技能とも密接に関わるものと言え

る。だからこそ、トップ選手がどれほどの助走速度でもって跳躍を行っているのか、ある高難度技はどれほどの助走速度から行われているのか、あるいは自分はどれほどの疾走能力を持っていて、跳馬の助走ではどれほどの速度で跳躍を行っているのか等を知することは、選手が各自の技の習得や技能の向上を目指す上で、必要なパフォーマンス評価および技術評価に有効であると考えられる。

これまでの跳馬に関する研究では、助走速度に関するデータは比較的多く報告されているが、情報が整理できていないという現状がある。跳馬は1技で1演技を構成し、その技の局面が明確に区別しやすく、ひねりが含まれる技を除けば、2次元動作分析が行いやすいことから、バイオメカニクスのような自然科学的研究の対象になりやすい(土屋, 2007)。力学的に見れば、跳躍に必要な力学的エネルギーの源は助走局面における身体質量中心(以下、読みやすさを考慮して重心という)に代表される身体全体の並進水平速度であり、それは助走局面で最も重要な力学的変数である。跳馬における全ての跳躍技は助走局面を含むことから、それが研究の主な焦点でなくとも、報告されるデータの一部に助走速度が含まれていることも少なくない。結果的に、助走速度に関するデータは助走局面について分析した研究報告以外にも、様々な資料に散在しており、その速度測定の手法は同じではない。従って、結果の解釈に注意を要するのも事実である。データの実践現場活用においても、あるいは研究の視座においても、これまでに報告されている知見を整理して提示することは有益であると思われる。

そして、各測定法の特徴や課題についても併せて検討することは、より妥当なデータ解釈と、今後の競技実践や研究目的での測定検討に役立つであろう。複数の異なる方法によって測定されたデータを妥当に解釈するためには、測定方法によって測定データにどのような影響を与える可能性があるのかを理解しなければならない。また、後ほど議論を深めるように、これまでに用いられてきた速度測定の方法では実践現場での活用に課題がある。そのため、競技のトレーニング現場にお

いて、信頼性の高い測定を継続的に行うことによって個人の変化を縦断的に記録、観察したり、そのようなデータを選手間で比較したりすることは、著者らの知る限りほとんど行われていない。それは前述したような力学的観点からの速度の重要性が、一部の実践者には十分に理解されていないか、過小評価されている可能性も否定できない。しかし、おそらくは、その重要性は理解しつつも、測定にかかる人的、施設環境のコストと、情報としての価値認識とのバランスの中で、助走速度は選手あるいは指導者の主観的な評価に頼っているというのが多くの現場の実情ではないだろうか。それぞれの測定方法の特徴と課題を把握することは、今後の研究における測定方法の検討だけでなく、新たな方法の考案に貢献する可能性がある。

一方、そもそも採点競技系スポーツを代表する体操競技の実践現場において、助走速度のような客観的数値の測定は不要だという議論があるかもしれない。しかしながら、筆者らはもし妥当性、信頼性の高い測定値が日常的に簡便かつ安価に、即時的に測定、記録できるシステムがあるならば、それは現場においても利用価値のあるものだと考える。それは、跳躍動作の開始局面において、どのような力学的状況にあるのかを評価することは、その後に続く主要局面の評価をする上で、重要な情報であるからである。King and Yeadon (2004) が、ゆかのタンプリング技で、助走速度が変化すれば最適な踏切動作が変化することを示しているように、跳馬の踏切動作も、その最適な進入角度や関節運動速度は、助走最終局面の速度に左右されるというのは自然な論理であろう。その助走速度を評価するために、主観的感覚的な評価に加え、客観的な数値データが利用できるのであれば、それは実践的にも利用可能性のある情報である。あくまでも主観的感覚よりも妥当性と信頼性が高い測定ができることが大前提であるが、そのような客観的フィードバックは選手内および選手間における技術の分析評価に有効な情報である。一時的単発的な評価に留まらず、信頼性の高い客観的測定値を日常的かつ継続的に測

定して、データを蓄積することは選手個人の縦断的变化をより正確に捉えることにも繋がる。また研究の側面においても、そのようなデータはより実践的で現場に還元しやすいデータとして、価値ある財産となる。

2. 跳馬の助走に関する基本確認事項

跳馬の助走について、確認しておくべき事項がある。まず、跳馬の助走は男女ともに、踏切り側の跳馬の端を起点として25 m までとされており、それを超える助走は減点の対象となる (FIG, 2016a, 2016b)。跳躍板は通常、跳馬の端より0.5 m から1.0 m 程のスペースを持たせて設置するので、長さ1.2 m ある跳躍板 (例、セノー、AJ0700) の跳馬側の端からつま先が0.2 m から0.6 m 辺りの位置に、両足で接地して踏み切るとすれば (Takei et al. 2003)、踏切り位置までの助走距離は23 m から24 m 程である。跳躍板への最終ステップである踏み込み局面は、通常の走動作のストライドよりも大きく、男子で2.3 m から2.8 m 程の距離を要し (Čuk and Karácsony, 2004)、踏み込み局面を助走局面と区別する場合においては、疾走動作としての助走距離はさらに短くなる。また Čuk and Karácsony (2004) によれば、助走開始位置は跳馬から25 m 地点に置かれているマークより1 m 程度跳馬側の地点が平均的である。よって助走に関するこれらの状況を考慮すれば、実際の疾走距離は20 m から21 m 程度と言える。また、跳躍板の前でロングダートを実施して跳馬に背を向けて跳躍板を踏み切る系統の技 (以下、「後ろ向き踏切り系」と略す。Fig. 2) では、そのロングダートを実施するためのホップと呼ばれる予備動作が必要となり、実際の疾走動作を行う助走距離はさらに短くなる。参考数値として、陸上競技の世界トップスプリンターでは、10 m から20 m の10 m 区間平均速度が男子で9.5 m/s、女子で8.8 m/s を越え、20 m から30 m の10 m 区間平均速度では男子で10.5 m/s、女子で9.7 m/s を超える (広川ほか, 2010)。

跳馬の助走と短距離走の大きな違いとしては、

Fig. 2 Take-off phases for handspring type (left), Tsukahara type (center), and Yurchenko-type vaults (right). Note that a Yurchenko-type vault involves with a backward take-off (Modified from Fujihara, 2016).

跳躍板で望ましい踏切動作を行うために、跳躍板の位置に合わせてストライドやピッチを調節しなければならないことが挙げられる (Bradshaw, 2004). このことに関連して、跳馬の助走では踏切板の直前では助走スピードが低下することを報告している研究も少なくない (例, Van der Eb et al., 2012). 走幅跳びや棒高跳びなど、ターゲットに向かっての助走を必要とする他の跳躍種目と同様、助走速度をできる限り低下させずに、踏切りへ移行することは大切な点である。忘れてはならないのは、短距離走ではスタートからゴールまでのすべての局面における速度がパフォーマンス評価、すなわちタイムに直接影響するが、これらの跳躍種目における助走では、跳躍パフォーマンスに直接的に影響するのは最終局面のみであるということである。これも参考数値ではあるが、助走距離に制限がなく 40 m から 50 m 程の助走が一般的に行われる走幅跳では、10.5 m/s という走速度が、8.0 m から 8.2 m の跳躍をするようなトップ選手の助走最高スピードの平均値として報告され、走幅跳の助走速度の 1 つの目標値とされている (小山ら, 2012)。

3. 跳馬助走速度データの整理

3.1 体操競技の指導書にみる助走速度情報

体操競技の指導書を見れば、金子 (1974) の「体操競技のコーチング」では、跳馬の助走スピードは約 8 m/s と記されており、同じく 1970 年代に出版されたエル・アントーノフによる旧ソ連の指導書でも、宙返り系の跳躍では 8 m/s が求め

られると示されている (エル・アントーノフ, 1978). より最近の指導書としては, Arkaev and Suchilin (2004) が示すトップクラスの体操競技選手モデルとして、男子が 20 m 走を 3.0 から 3.1 秒、ラストの 5 m の速度が 7.8 m/s から 8.2 m/s、女子が 20 m 走を 3.2 から 3.3 秒、ラストの 5 m の速度が 7.4 m/s から 7.6 m/s としている。複数の国際大会における跳馬の演技を分析し、多くのキネマティクスデータを報告した Čuk and Karácsony (2004) によれば、男子において中級レベルの跳躍技では 7.5 m/s から 8.5 m/s、上級レベルの跳躍技では 8.5 m/s から 9.5 m/s、第 2 空中局面で 2 回宙返りが必要になる大技では 10 m/s 以上の助走速度を獲得すべきであるとされている。

3.2 研究論文にみる男子の跳躍における助走速度情報

Table 1 は Fujihara (2016) が作成した男子の助走速度に関するデータを跳躍のタイプ別に整理したものに、Brehmer and Naundorf (2011) の研究のような、跳躍タイプを分類していないデータを追加したものである。Brehmer and Naundorf (2011) はドイツ国内の試合と世界選手権やワールドカップを含む複数の国際試合で跳馬の助走速度の測定を行い、最終的に 12 歳から 25 歳の計 246 選手、335 本の跳躍データを年齢別にまとめている。このデータには 2007 年世界選手権のデータが含まれているので、Naundorf et al. (2008) と重複するデータを含む。しかし、測定方法が統一されていることからデータの互換

Table 1 Run-up velocities for the different types of vaults performed by male gymnasts. See Fig. 2 for each type of take-off. The abbreviation “n.a.”, “M.A.”, and “L.S.” indicate “not available”, “motion analysis”, and “laser system”, respectively. The significant digit for each data corresponds to that in the data source (Modified from Fujihara, 2016).

Data source	Number of data (vault)	Run-up velocity					Reference
		Mean	S.D.	Max.	Min.	Measurement	
(Forward Take-off: Handspring-type)							
2010 World Championships	76	8.4	0.3	n.a.	n.a.	M.A. (100 Hz, @max velocity, area centre)	Van der Eb, et al. (2012)
2007 World Championships	62	8.39	0.28	9.00	7.59	L.S. (50 Hz) (@5.0—7.0 m)	Naundorf et al. (2008)
1997 World Championships	44	8.19	n.a.	8.90 [†]	n.a.	L.S. (50 Hz) (unknown)	Krug et al. (1998)
1987 Pan American Games	40	7.50	0.51	n.a.	n.a.	M.A. (99.5 Hz, @last-step takeoff, mass centre)	Takei (1990)
1984 Olympics Event Finals	8	7.79	0.13	7.94	7.60	M.A. (100 Hz, @board contact, mass centre)	Dillman et al. (1985)
(Forward Take-off: Tsukahara-type)							
2010 World Championships	212	8.2	0.4	n.a.	n.a.	M.A. (100 Hz, @max velocity, area centre)	Van der Eb, et al. (2012)
2007 World Championships	169	8.23	0.32	9.16	7.31	L.S. (50 Hz) (@5.0—7.0 m)	Naundorf et al. (2008)
1997 World Championships	47	7.86	n.a.	8.90 [†]	n.a.	L.S. (50 Hz) (unknown)	Krug et al. (1998)
1984 Olympics Event Finals	8	7.71	0.16	7.92	7.39	M.A. (100 Hz, @board contact, mass centre)	Dillman et al. (1985)
(Backward Take-off: Yurchenko-type)							
2010 World Championships	52	7.7	0.3	n.a.	n.a.	M.A. (100 Hz, @max velocity, area centre)	Van der Eb, et al. (2012)
2007 World Championships	58	7.36	0.35	8.16	6.31	L.S. (50 Hz) (@8.0—10.0 m)	Naundorf et al. (2008)
1997 World Championships	26	7.35	n.a.	n.a.	n.a.	L.S. (50 Hz) (unknown)	Krug et al. (1998)
(All Types)							
Six competitions held in Germany ^{††}	113 (12—14 yrs.)	7.3	0.2	7.9	6.9	L.S. (50 Hz) Forward take-off (@5.0—7.0 m) Backward take-off (@8.0—10.0 m)	Brehmer and Naundorf (2011) ^{†††}
	135 (15—18 yrs.)	8.0	0.3	9.1	7.4		
	87 (19—25 yrs.)	8.5	0.2	9.2	8.1		
1995 Winter Cup Challenge	21	7.50	0.69	n.a.	n.a.	Photocell (@3.05—6.10 m)	Sands and McNeal (1995)

[†] There is no information about whether the maximal velocity was recorded with a Handspring-type or with a Tsukahara-type vault.

^{††} 1. German Youth Championships 2. German Championships 3. International Junior-Team-Cup in Berlin 4. World Cup in Cottbus 5. World Cup in Stuttgart 6. 2007 World Championships.

^{†††} Naundorf et al. (2008) also included the data from 2007 World Championships.

性がある上、分類が跳躍タイプでなく年齢別にまとめられているところにオリジナリティーがあり、全く異なるデータ解釈が可能となる。その研

究によれば、各年齢においておよそ 0.5 m/s から 1.0 m/s のばらつきがあり、12歳から18歳までは段階的に助走速度の発達が見られる。年齢の増加

に伴う速度値の増加は、最高値では18歳ぐらいまで見られるのに対し、最低値は20歳から21歳頃まで増加しているようにも読み取られ、身体の発育発達時期の個人差を暗示しているとも考えられる。このような年齢別助走速度データ (Brehmer and Naundorf, 2011) は、個別の技ごとに示されたデータと合わせて用いられることで、選手や指導者にとって、より適切な目標設定とパフォーマンス評価に役立つものと思われる。

世界レベルの試合としてはこれまでに1997年、2007年、2010年の世界選手権のデータが報告されており、前向き踏切り系の跳躍では平均で約8.2 m/s から 8.4 m/s の助走速度が示されている。標準偏差が 0.3 m/s から 0.4 m/s であることを考慮すれば、世界レベルの選手の多くは前向き踏切り系の跳躍において、8.0 m/s 以上の助走、速い選手で 8.5 m/s 以上の助走から跳躍を行っていると考えられる (Fujihara, 2016)。Naundorf et al. (2008) による2007年の世界選手権のデータでは、その試合における助走速度の最高値と最小値も示されており、前向き踏切り系の跳躍では 9.0 m/s の助走速度を持った選手もいたようである。

一方で後ろ向き踏切り系の跳躍で報告されている助走速度は、平均で約 7.3 m/s から 7.7 m/s の助走速度であり、前向き踏切り系の技に比べると、速度は低めである。後ろ向き踏切り系の技は踏切前にホップ、ロンダートという予備運動が加わるため、実際の疾走可能距離は短くなる。そして、そのような予備運動から後ろ向きで跳躍が始まる分、前向き踏切り系の踏切りよりも運動構造は複雑で、習得には時間を要すると思われる。しかし、ゆかのロンダートから後転とびの研究 (土屋, 2007) を参考にすれば、跳馬でもロンダートの終末着足局面ではすでに身体重心周りの角運動量が生み出されていることが考えられる。よって、速い助走からホップ、ロンダート、そして後ろ向き踏切りという運動を高い技能レベルで行うことで、高難度の跳躍に必要な運動エネルギーを単なる疾走動作以上に生み出すことがもし可能なのであれば、高い助走速度を得ることが苦

手な選手にとって、後ろ向き踏切り系の跳躍技は競技戦略的に有効な技選択になる可能性がある。すなわち、後ろ向き踏切り系の跳躍技において、報告されている助走速度が低めであることの原因は、助走距離の制限や予備動作の有無といった技の特性に必然的に関わるものとして捉えるべきか、あるいは比較的疾走能力の低い選手が競技戦略的にこの種の技を多く選択しているのかは分からないのである。しかし、同じ後ろ向き踏切り系の跳躍でより高難度の技に挑戦するためには、高い助走速度から踏み切れることが望ましいのは明らかである。

Naundorf et al. (2008) による2007年の世界選手権のデータは、レーザードップラー方式距離計測装置を用いて 50 Hz で測定されたものであり (Naundorf, personal communication, October 22nd, 2015)^{注1)}、前向き踏切り系の跳躍では跳馬の端より 7 m から 5 m、後ろ向き踏切り系の跳躍では 10 m から 8 m の 2 m 区間の平均速度である。この速度算出範囲は、踏込み局面、あるいは後ろ向き跳躍技の予備運動よりも前の単純な疾走動作中の速度であると考えられる。データの数も多く、この測定区間における助走速度のデータとしては妥当性の高いものであると思われる。彼らの研究では、速度変化曲線の典型例も示されており、それによれば助走速度の最大値はこの区間で記録されている。しかし、Fujihara (2016) が指摘するように、跳躍板への踏込み動作では股関節を大きく屈曲した姿勢になることが多く、レーザードップラー方式距離計測装置で腰部の速度を測定している場合には、重心の速度に比べて腰部の速度は過小評価される可能性がある (Fig. 3)。そのことを考慮すれば、踏込み局面前後での速度変化および、最高速度の出現位置に関しては、さらなる研究が望まれる。

Van der Eb et al. (2012) の2010年の世界選手権データも非常に多くのサンプル数をもとにしており、速度測定方法の違いに関わらず、結果的に Naundorf et al. (2008) の報告と近い値を示している。彼らはオリジナルの動作分析ソフトを用いて (Van der Eb et al., 2012)、ビデオ映像の中

Fig. 3 The hip flexion during the last step onto the springboard and the resulting difference among the displacements of the mass center, the laser target (lower back), and the foot (Modified from Fujihara, 2016).

から演技中の選手だけを自動的に抽出し、その輪郭を規定することによって、身体輪郭の面積中心位置から重心位置を推定するという手法で、男子だけでも300を超える跳躍の分析を行っている。コーチや選手への即時的フィードバックを優先的に考えたシステムであり、身体部分の質量分布を考慮しない点で典型的な動作分析手法とは異なる。それでも、世界レベルの選手の前向き跳躍系の技における助走速度が、平均約 8.2 m/s から 8.4 m/s 程度であるということを支持する根拠の 1 つとなるデータである。

1997年の世界選手権におけるパフォーマンスを分析した Krug et al. (1998) の研究は跳馬に関する研究でよく引用されている代表的なデータの 1 つである。速度測定に関してはレーザードップラー方式距離計測装置を用いて測定されたということ以外の詳細は明らかでないが、報告されている数値は助走最高速度の平均値であると推察される。前転とびタイプの助走速度の平均値が約 8.2 m/s で、最も速度の高かった選手で 8.9 m/s というのも、2010年、2007年の世界選手権のデータと近いものである。しかし、同じ前向き跳躍系の技でもツカハラとびタイプの助走速度は、1997年の世界選手権では 8.0 m/s を下回っており、2007年の世界選手権における平均値よりも小さい。このことに関して Naundorf et al. (2008) は、細長い旧型跳馬から現行のテーブル型の新型跳馬への器械規格変更、採点規則の変更、ならびに跳躍技術発展などの影響を指摘している。1984年のオリンピックの種目別決勝時の

データ (Dillman et al., 1985) では前転とび系で平均 7.79 m/s、ツカハラとび系で 7.71 m/s と報告されており、近年の方がより高い助走速度で跳躍を行っている可能性は伺える。但し、Dillman et al. (1985) のデータは映像の動作分析によるもので、跳躍板接地時の重心の速度データであり、助走中の最高速度ではない。Table 1 に示している Van der Eb et al. (2012) の2010年世界選手権のデータは助走中の最高速度（前転とび系で 8.4 ± 0.3 m/s、ツカハラとび系で 8.2 ± 0.4 m/s）であり、同論文内に記述されている踏込み動作直前の足の接地時の速度では前転とび系で 8.2 ± 0.5 m/s、ツカハラとび系で 8.0 ± 0.6 m/s と、やや低い値が報告されている。助走の最終局面および踏込み局面での速度低下は、踏切り動作に向けてのピッチやストライドの調節が関連していると考えられることもできる。Van der Eb et al. (2012) のデータをよく観察すると、最終ステップにおける速度の標準偏差は、最高速度の標準偏差よりも大きく、最高速度よりも最終速度に選手間のばらつきが見られるということは、踏込み局面の技術の重要性を暗示する注目すべき点である。

特定の跳躍技に対する助走速度データとして、Fujihara (2016) は代表的な一部データを紹介しているが、Table 2 はそれに多くのデータを追加整理したものである。Brehmer and Naundorf (2014) は、2011年のヨーロッパ選手権と2007年の世界選手権において実施された高難度技 Lu Yu Fu (難度点5.6; FIG, 2016a) の合計 9 試技を分析している。この研究における助走速度の測

Table 2 Run-up velocities for some specific vaults performed by male gymnasts. The abbreviation “n.a.” and “M.A.” indicate “not available”, and “motion analysis”, respectively. Note that some studies reported both resultant (r) and horizontal (h) velocities. The significant digit for each data corresponds to that in the data source. The names of the vaults are as per The Code of Points (Modified from Fujihara, 2016).

Skill names (Difficulty value in 2017 Code of Points by FIG)	Data source	Number of data (vault)	Run-up velocity				Reference	
			Mean	S.D.	Max.	Min.		Measurement
Lu Yu Fu (5.6)	2011 European Championships 2007 World Championships	9	8.3	0.2	8.6	8.2	Laser System (50 Hz) (@5.0—7.0 m)	Brehmer and Naundorf (2014)
Yeo 2 (5.6) Dragulescu (5.6) Blanik (5.6) Lu Yu Fu (5.6)	2002 World Championships	4	9.95	0.74	n.a.	n.a.	M.A. (50 Hz) *unknown point	Veličković et al. (2011)
Yeo 2 (5.6)	1998 unknown competition	1	8.8	n.a.	n.a.	n.a.	M.A. (80 Hz)	Zhang and Li (2000)
Roche (5.2)	2002 World Championships	9	8.05 (r) 7.97 (h)	0.30 (r) 0.28 (h)	8.46 (r) 8.35 (h)	7.62 (r) 7.58 (h)	M.A. (50 Hz)	Čuk and Ferkolj (2008) Ferkolj (2010)
Roche (5.2)	2000 World Cup in Ljubljana	9	7.62 (r) 7.58 (h)	0.24 (r) 0.23 (h)	7.93 (r) 7.88 (h)	7.20 (r) 7.15 (h)	M.A. (50 Hz)	Čuk and Ferkolj (2008)
Roche (5.2) (High-scored)	2000 Olympics	16	8.15 (r) 8.12 (h)	0.18 (r) 0.19 (h)	n.a.	n.a.	M.A. (100 Hz)	Takei et al. (2003)
Roche (5.2) (Low-scored)	2000 Olympics	16	8.01 (r) 7.99 (h)	0.25 (r) 0.26 (h)	n.a.	n.a.	M.A. (100 Hz)	Takei et al. (2003)
Yurchenko str. with 2/1 or 5/2 tw. (4.8 or 5.2)	2007 All Japan Championships	12	6.17 (h)	0.28 (h)	n.a.	n.a.	M.A. (240 Hz)	Tsuchiya and Moriizumi (2009)
Cuervo str. (4.0) Kasamatsu str. (4.0) Lou Yun (4.8)	1994 Experiment (a world champion-ship finalist)	4	8.17	0.16	8.33	7.94	Photocell (@1.0—6.0 m) height 1.3 m	Tsumura and Endo (1996)
Tsukahara str. (3.2) Kasamatsu str. (4.0) Kasamatsu str. with 1/2 or 1/1 tw. (4.4 or 4.8)	1994 Experiment (4 college gymnasts)	16	7.69	0.17	8.06	7.46	Photocell (@1.0—6.0 m) height 1.3 m	Tsumura and Endo (1996)
Kasamatsu str. (4.0) Kasamatsu str. with 1/2 tw. (4.4) Hdsp. fwd. & salto fwd. p. (2.8) Hdsp. fwd. & salto fwd. p. with 1/2 tw. (3.2)	2006 World Cup in Maribor	4	8.57	0.23	n.a.	n.a.	Opto-Track (1000 Hz)	Veličković et al. (2011)
Tsukahara str. (3.2)	Experiment (4 college gymnasts)	4	7.18	0.15	7.39	7.06	M.A. (400 Hz)	Motoshima et al. (2014)
Tsukahara str. (3.2)	Experiment Day 1: ① Day 2: ② (2 gymnasts)	① 5 ② 10	①7.65 ②7.97	①0.31 ②0.44	n.a.	n.a.	Photocell (@2.0—6.0 m)	Bradshaw et al. (2010)
Hdsp. fwd. & salto fwd. t. (2.4) (As compulsory)	1988 Olympics	51	7.93 (h)	0.34 (h)	8.51 (h)	7.11 (h)	M.A. (100 Hz)	Takei and Kim (1990)
Hdsp. fwd. & salto fwd. t. (2.4)	1986 USA Gymnastics Championships	41	7.33 (h)	0.46 (h)	8.54 (h)	6.57 (h)	M.A. (101 Hz)	Takei (1988)
Hdsp. fwd. & salto fwd. t. (2.4)	Experiment (4 gymnasts vaulting horse)	20	7.95 (h)	0.27 (h)	n.a.	n.a.	M.A. (50 Hz)	Irwin and Kerwin (2009)
Hdsp. fwd. & salto fwd. t. (2.4)	Experiment (4 gymnasts vaulting table)	20	7.92 (h)	0.27 (h)	n.a.	n.a.	M.A. (50 Hz)	Irwin and Kerwin (2009)
Tsukahara (2.2)	Experiment Day 1: ① Day 2: ② (3 gymnasts)	①20 ②15	①6.94 ②6.82	①0.16 ②0.10	n.a.	n.a.	Photocell (@2.0—6.0 m)	Bradshaw et al. (2010)

定は Table 1 の Naundorf et al. (2008) の研究と同じ方法でなされており、データ解釈においても一定の互換性があると考えられる。2007年の世界選手権におけるツカハラとび系全体の助走速度平均値が 8.23 ± 0.33 m/s (表 1) である中で、Lu Yu Fu を実施した 9 選手の助走速度は 8.3 ± 0.2 m/s であり、特別高い数値を示したわけではなかった (Fujihara, 2016)。

また、Fujihara (2016) は、Veličković et al. (2011) のデータが示す 9.95 ± 0.74 m/s という値に注目し、他の研究データと比べてとりわけ高い値であることを指摘している。これは 2002 年世界選手権での跳馬種目別決勝で実施された 4 本の高難度技、Yeo 2, Dragulescu, Blank, Lu Yu Fu (各難度点 5.6 ; FIG, 2016a) を 2 台のビデオカメラを用いて 50 Hz で撮影し、映像をもとにした 3 次元動作分析から得たデータである。同じ研究内でこれら 4 本の高難度跳躍の比較対象になっているデータがあり、それは 2006 年の Maribor で開催されたワールドカップにおいて、赤外線システム (OPTO-Track Microgate system, 1000 Hz) を用いて得られたミドルクラス選手 2 人のデータである (Table 2)。このシステムでは助走での各ステップにおける接地時間、滞空時間、ストライド、ピッチ、速度等の項目が計測可能であり、この研究では各ステップにおける速度を分析項目として使用している。このミドルクラス選手 2 人のデータは、足の接地点をもとにしたデータであることから、Fig. 3 に示したように、踏込み局面での股関節の大きな屈曲動作が速度を過大評価している可能性がある。実際、その測定において比較的難度の低い跳躍での 8.57 ± 0.23 m/s という値は、Table 1 および Table 2 に示した他の研究データとの比較においても高い数値である。仮に、2002 年のトップクラス選手 4 名の映像分析も助走路上の足の接地位置データをもとに算出された速度であれば、同じように速度が過大評価された可能性があると思われる。論文内にデジタイズ点およびデータ処理や速度算出に関する詳細な記述がなされていない以上、その研究データの妥当性についての検討に

は限界がある。それでも、このような可能性を指摘しておくことは、今後の研究における測定および報告データの解釈において、有益であると思われる。

前転とび系の高難度技としては、Roche (難度点 5.2 ; FIG, 2016a) が複数の研究において分析されている。Čuk and Ferkolj (2008) の研究では、新型跳馬が用いられた 2002 年世界選手権で実施された 9 跳躍と、旧型跳馬が用いられていた 2000 年世界選手権で実施された 9 跳躍がキネマティクスの的に分析され、跳躍板接地時の重心速度がそれぞれ 8.05 ± 0.30 m/s と 7.62 ± 0.24 m/s であった。前転とび系高難度技の助走速度としては、比較的低い値に感じられる。これらの値は 50 Hz で撮影された 2 台のビデオカメラ映像の 3 次元動作分析によって得られたものなので、固定した遮断周波数で平滑処理を行った場合、データの歪みが影響している可能性は否定できない (Knudson and Bahamonde, 2001 ; Nunome et al., 2006)。2000 年オリンピックで実施された Roche は Takei et al. (2003) によって 100 Hz で分析されており、高得点群の 16 跳躍の助走速度は 8.15 ± 0.18 m/s、低得点群の 16 跳躍で 8.01 ± 0.25 m/s であった。これらのデータも同様に平滑処理の影響を含む可能性があるが、100 Hz での分析なので 50 Hz での分析に比べればその影響は少ないと考えられる。前転とび系高難度技として、Yeo 2 (難度点 5.6 ; FIG, 2016a) が Zhang and Li (2000) によって動作分析の対象となっており、その跳躍板接地時の助走速度は 8.8 m/s と報告されている。試合における 1 試技の分析とはいえ、高難度技における高い助走速度の必要性を示す一事例と言える。

Roche と同じく、前転とび前方宙返り (難度点 2.4 ; FIG, 2016a) は身体長軸周りのひねり回転を含まない技であり、矢状面内の回転を 2 次元的に分析することで技の主要素を捉えることができるため、研究対象になりやすい。この跳躍技は 1988 年オリンピックにおいて男子の規定演技として採用されており、参加者 51 名の前転とび前方宙返りが Takei and Kim (1990) によって

分析されている (Table 2). 100 Hz の映像動作分析の結果, 跳躍板接地時における重心の水平速度は 7.93 ± 0.34 m/s であり, 最高値で 8.51 m/s であった. また, Takei (1988) は 1986 年に開催されたアメリカ国内の試合においても同様の分析を行っており, 平均値として 7.33 ± 0.46 m/s, 最高値として 8.54 m/s を報告している. 国内試合ではあっても参加者にはオリンピック出場レベルのエリート選手も含まれていることから, 最高値は国際大会のデータと同程度, 平均値あるいは最低値で 1988 年オリンピックのデータ (Takei and Kim, 1990) よりも低い値となり, 競技レベルと助走速度の関係を示しているとも読み取れる. また, Irwin and Kerwin (2009) が新型跳馬と旧型跳馬における前転とび前方宙返りの実施を実験的に比較した報告では, 跳躍板接地時における重心の水平速度はそれぞれ 7.95 ± 0.27 m/s と 7.92 ± 0.27 m/s であった. この研究において跳馬の形状の違いによる助走速度の差は見られなかったが, 同じ技を研究対象としている Takei and Kim (1990) や Takei (1988) の研究との比較において, 1980 年代に比べて助走速度が向上している傾向にあるということが示された.

男子においては後ろ向き踏切り系の跳躍技に関する研究が少ない中で, 土屋・森泉 (2009) は全日本選手権における 12 名分の跳躍の動作分析を行っている. 彼らの研究結果によれば, 跳躍板接地時の重心水平速度は 6.17 ± 0.28 m/s であり, 前向き踏切り系の跳躍技で同レベルの価値点をもつ跳躍技に比べて, 明らかに低い値であった. この研究では分析範囲が跳躍板接地以降であり, 踏切前のホップやロンダートは分析の対象となっておらず, 跳躍板接地前の重心速度変化は明らかでない. 女子選手を対象とした研究ではあるものの, Bradshaw et al. (2010) の研究データを参考にすれば, 後ろ向き踏切り系の跳躍技における重心水平速度は, 跳躍板接地辺り (0–2 m) ではその前の区間 (2–6 m) から平均で 1.5 m/s 以上減少している. よって, 土屋・森泉 (2009) の研究対象となった 12 選手においても, 最高速度 (Van der Eb et al., 2012) や 8 m から 10 m

区間平均速度 (Naundorf et al., 2008) を推定するとすれば, 7.5 m/s 以上の速度を持っていたと考えることも妥当であると思われる.

Table 2 には競技会におけるデータだけでなく, ある跳躍技を実験的に分析した報告も含まれている. 津村・遠藤 (1996) が行った実験では, 1994 年世界選手権種目別跳馬入賞者 1 名と大学生レベル 4 名を対象に, 助走に関わるデータが詳細に報告されている. その内, 跳馬の 6 m 前から 1 m 前までの 5 m 区間の平均速度は, 世界レベル選手が 8.17 ± 0.16 m/s であったのに対し, 大学選手では 7.69 ± 0.17 m/s であり, 高いレベルの跳躍を目指す上での助走速度の重要性を支持する結果となっている. また, Bradshaw et al. (2010) の研究では共通の被験者が, かかえ込みツカハラとび (難度点 2.2 ; FIG, 2016a) を行う場合と, より高難度な伸身ツカハラとび (難度点 3.2 ; FIG, 2016a) を行う場合における助走速度の違いを見ることができる. 結果として, 同じ選手が難度の異なる跳躍技を行う際, より高難度な跳躍技はより高い助走速度で行われることをデータで示している.

Table 2 には含まれていないが, 特定の跳躍技に対するデータとして, Atiković and Smajlović (2011) は 64 種類にもおよぶ跳躍技の跳躍板接地時の重心速度を報告している. その測定方法に関する詳細は論文内では明らかではなく, 著者との直接の連絡においても, 複数の世界大会でのデータと多くの先行研究から集められたデータであるということしか掴めなかった (Atiković, personal communication, November 1st, 2015)^{注1)}. Fujihara (2016) は彼らの研究における跳躍板接地時の重心速度を, 跳躍技ごとに難度点との関係でプロットした図を作成しているが, それに後ろ向き踏切り系の技のデータを加え, より最新版の採点規則 (FIG, 2016a) の難度点を反映させたものが Fig. 4 である. 後ろ向き踏切り系の技は同じ難度点レベルの前向き踏切り系の技よりも低い助走速度であること, また前向き踏切り系の技ほどでなくとも助走速度と跳躍技の難度, つまり難度点の高さに正の相関関係が

Fig. 4 Relationship between run-up velocity and difficulty value based on the data reported by Atiković and Smajlović (2011). (Modified from Fujihara, 2016).

あることがわかる。前向き踏切り系の技では跳躍技の難度と助走速度の大きさの相関は非常に強い。彼らのデータによれば、最近のトップ選手が実施するような難度点5.2以上の前向き踏切り系の高難度技に求められる助走速度は8.5 m/sから9.0 m/s以上であると示されている。とりわけ、難度点が5.6のBlanikで10.0 m/s、ZimmermanとDragulescuで10.5 m/s、難度点が6.0のRe Se Gwang 2では10.9 m/sという非常に高い助走速度が報告されていることは注目すべき点である。しかしながら、実質20 m程の助走しかできない跳馬の助走で、速度が10 m/sを越えるという報告は興味深いものであると同時に、その妥当性、信頼性の検証も含めて、さらなる研究が望まれよう。

第2空中局面で2回宙返りを含むような大技では10 m/s以上の助走速度が必要だと提唱しているČuk and Karácsony (2004)の著書では、2002年にデブレツェンで開催された世界選手権における男子6選手の各ステップにおける助走速度が示されている。先述のVeličković et al. (2011)の研究と一部データを共有していると見られるが、ドラグレスク選手、リ選手、ブラニク選手の3選手は、最終ステップにおいて10 m/s近く、あるいはそれ以上の助走速度に達している。Veličković et al. (2011)が指摘するように、その3選手とも最終ステップの1歩前（踏み直

前）では8 m/s台であり、最終ステップ（踏み直局面）での加速が著しい。踏み直動作に入る最後の片足踏切りは跳馬の端から4 m前後の位置から行われることが平均的である。つまり、跳馬から5—7 mの2 m間の速度を分析対象としているNaundorf et al. (2008)の研究データは、最終ステップの1歩前の速度に近いと考えられる。Naundorf et al. (2008)は、助走速度変化の典型例を示すとともに、この5 mから7 m区間に最高速度が表れると報告しているが、Fig. 3で説明されるようにレーザードップラー方式距離計測装置を用いた測定では踏み直動作中の速度は大きな股関節屈曲のために過小評価されている可能性がある（Fujihara, 2016）。報告されている5—7 mの2 m区間の速度データとしては報告値の妥当性は高いと思われる一方、最終ステップ（踏み直局面）時の速度が低く算出されたために5—7 m区間で最高速度が表れるという結果になった可能性も検討すべきだと考えられる。従って、助走の最終局面から踏み直局面における重心の速度変化をより丁寧に分析し、測定方法の違いによるデータへの影響、および優れた踏切り動作に繋がる踏み直技術を解明するような研究が望まれる。特にそれらの局面で10 m/s以上の速度が報告されているような世界トップ選手を対象としたさらなる研究が有益となるであろう。

3.3 女子の跳躍における助走速度データ

Table 3 は女子の助走速度に関するデータを踏切りの種類で分類してまとめたものである．Table 1 にある男子のものと同様，世界レベルの

試合としては2007年，1997年の世界選手権，そして1984年のオリンピック種目別選手権のデータが報告されている．2007年の世界選手権では前向き踏切り系で平均 7.5 m/s から 7.8 m/s 程度

Table 3 Run-up velocities for the different types of vaults performed by female gymnasts. See Fig. 2 for each type of take-off. The abbreviation “n.a.”, “M.A.”, and “L.S.” indicate “not available”, “motion analysis”, and “laser system”, respectively. The significant digit for each data corresponds to that in the data source.

Data source	Number of data (vault)	Run-up velocity					Reference
		Mean	S.D.	Max.	Min.	Measurement	
(Forward Take-off: Handspring-type)							
2007 World Championships	51	7.74	0.30	8.37	7.12	L.S. (50 Hz) (@5.0—7.0 m)	Naundorf et al. (2008)
1999 U.S. Championships	30	7.28	0.39	7.91	6.48	Radar gun (20 Hz)	Sands (2000)
1997 World Championships	66	7.30	n.a.	7.90 [†]	n.a.	L.S. (50 Hz) (unknown)	Krug et al. (1998)
1987 Pan American Games	24	6.75	0.34	7.25	5.92	M.A. (99.5 Hz, @last-step takeoff, mass centre)	Takei (1990)
1984 Olympics Event Finals	5	7.10	0.18	7.26	6.83	M.A. (50 Hz, @board contact, mass centre)	Nelson et al. (1985)
(Forward Take-off: Tsukahara-type)							
2007 World Championships	27	7.54	0.39	8.34	6.95	L.S. (50 Hz) (@5.0—7.0 m)	Naundorf et al. (2008)
1999 U.S. Championships	10	7.36	0.34	7.87	6.48	Radar gun (20 Hz)	Sands (2000)
1997 World Championships	10	7.28	n.a.	7.90 [†]	n.a.	L.S. (50 Hz) (unknown)	Krug et al. (1998)
1985 American Classic	10	7.25	0.25	7.49	6.80	M.A. (60 Hz, @peak velocity, head)	Sands and Cheetham (1986)
1984 Olympics Event Finals	7	6.83	0.78	7.76	5.30	M.A. (50 Hz, @board contact, mass centre)	Nelson et al. (1985)
(Backward Take-off: Yurchenko-type)							
2007 World Championships	175	7.30	0.30	7.92	6.42	L.S. (50 Hz) (@8.0—10.0 m)	Naundorf et al. (2008)
2006 Italian Championships for Clubs	14	5.27	0.58	6.03	4.39	M.A. (100 Hz, @board contact, mass centre)	Penitente et al. (2007)
1999 U.S. Championships	67	7.21	0.40	7.75	5.99	Radar gun (20 Hz)	Sands (2000)
1997 World Championships	84	6.98	n.a.	n.a.	n.a.	L.S. (50 Hz) (unknown)	Krug et al. (1998)
1984 Olympics Event Finals	4	5.33	0.20	5.50	5.11	M.A. (50 Hz, @board contact, mass centre)	Nelson et al. (1985)
(Backward Take-off: Round-off and 1/2 turn on the table)							
2007 World Championships	19	7.60	0.25	8.01	6.88	L.S. (50 Hz) (@8.0—10.0 m)	Naundorf et al. (2008)

[†] There is no information about whether the maximal velocity was recorded with a Handspring-type or with a Tsukahara-type vault.

であり、標準偏差を考慮すれば速い選手では 8.0 m/s を越える。実際その試合での最高値は 8.37 m/s であり、これは男子レベルの助走速度と言えるであろう。女子で 8.0 m/s を越える助走速度が報告されているのは、この 2007 年の世界選手権が初めてであり、跳馬における助走速度は 1990 年代に比べて向上していると考えられる。この要因としては、跳馬の形状変更による安全性の向上やトレーニング方法の改善、助走速度の重要性理解が広まったことなどが関係していると思われる。

また、後ろ向き踏切り系の跳躍技は前向き踏切り系のどちらよりも助走速度は低いということは、女子にも言えるようである。先に述べたように、後ろ向き踏切り系では踏切り前にホップ、ロンダートという予備動作を伴うことから、疾走動作とは異なる加速および重心周りの角運動量を生み出す可能性を秘めており、疾走能力で劣る選手にとっては競技戦略的に有効な技選択となり得る。女子は後ろ向き踏切り系の実施が前向き踏切り系の実施よりも明らかに多く、Naundorf et al.

(2008) が指摘するように、2007 年の世界選手権では後ろ向き踏切り系の技に限り、男子と女子の助走速度値にはほとんど差がない。疾走能力自体の性差を考慮すれば、後ろ向き踏切り系の跳躍技では女子の方が実施頻度も高く、最大疾走速度に近い速度でホップおよびロンダートに移行する技術が比較的洗練されていると考えられるのではないか。換言すれば、男子は女子に比べてこの種の技の技術レベルが全体として成熟しておらず、もっと高い助走速度から後ろ向き踏切り系跳躍技を行えるというトレーナビリティを示しているのではないだろうか。

個々の跳躍技に関するデータに目を向ければ、Table 2 の男子に関するデータよりも女子に関する先行研究が不足する点は否めない。しかし、後ろ向き踏切り系の跳躍技に関するデータが多く報告されているところに女子の特徴がある (Table 4)。Nelson et al. (1985) や Kwon et al. (1990) の研究によれば (Table 3 と Table 4)、1984 年と 1988 年のオリンピックにおける後ろ向き踏切り系の跳躍技は、高難度技でも 5 m/s 台前半の

Table 4 Run-up velocities for some specific vaults performed by female gymnasts. The abbreviation “n.a.” and “M.A.” indicate “not available”, and “motion analysis”, respectively. The significant digit for each data corresponds to that in the data source. The names of vaults are as per The Code of Points. The second and sixth rows have exactly the same values of velocity as shown in the original source.

Skill names (Difficulty value in 2017 Code of Points by FIG)	Data source	Number of data (vault)	Run-up velocity					Reference
			Mean	S.D.	Max.	Min.	Measurement	
Yurchenko stretched with 1/1 twist (4.6)	1988 Olympics Team Finals	10	5.26	0.16	n.a.	n.a.	M.A. (100 Hz)	Kwon et al. (1990)
Yurchenko stretched with 1/1 twist (4.6)	Experiment Day 1: ① Day 2: ② (2 gymnasts)	①10 ② 6	①6.75 ②6.70	①0.38 ②0.42	n.a.	n.a.	Photocell (@2.0—6.0 m)	Bradshaw et al. (2010)
Yurchenko stretched (4.0)	1988 Olympics Team Finals	10	5.03	0.32	n.a.	n.a.	M.A. (100 Hz)	Kwon et al. (1990)
Yurchenko stretched (4.0)	Experiment Day 1: ① Day 2: ② (2 gymnasts)	①7 ②7	①6.86 ②6.83	①0.07 ②0.58	n.a.	n.a.	Photocell (@2.0—6.0 m)	Bradshaw et al. (2010)
Yurchenko piked (3.5)	Experiment Day 1: ① Day 2: ② (2 gymnasts)	①9 ②7	①6.34 ②6.38	①0.33 ②0.18	n.a.	n.a.	Photocell (@2.0—6.0 m)	Bradshaw et al. (2010)
Yurchenko (3.3)	Experiment Day 1: ① Day 2: ② (2 gymnasts)	① 5 ②10	①6.75 ②6.70	①0.38 ②0.42	n.a.	n.a.	Photocell (@2.0—6.0 m)	Bradshaw et al. (2010)

助走速度であった。1980年代にはオリンピックレベルでさえ助走速度が 6.0 m/s にも達していないというデータは、この系統の技における踏切りから着手に至るまでの技術の繊細さを表しているかもしれない。跳馬の規格が変更になる2002年以前は、女子の競技は細長い跳馬を横向きに設置して行われており、着手面の奥行きが狭さと、着手局面での失敗のリスクは、助走速度を抑える傾向に影響していたものと思われる。そして、跳馬規格が変更になり着手面が増大した近年では、技術レベルの向上も伴って、後ろ向き踏切り系の跳躍技における助走速度向上は目覚ましいと言える。最近ではダイナミックな跳躍をする女子選手が増加しており、跳躍技と助走速度の関係において、近年の状況をより正確に把握するための研究が必要である。

4. 助走速度の測定に関する考察

4.1 これまでの測定方法とデータ解釈における留意点

これまでに報告されている研究における速度測定は、映像をもとにした動作分析、レーザードップラー方式距離計測装置の利用、光電管システムの利用の3種類の方法に大別できる (Fujihara, 2016)。これらのうち動作分析では、重心速度を計算するのが最も一般的であり、身体全体の移動速度という観点からすれば、それは妥当性の高い分析項目と考えられる。しかし、研究によっては異なる身体部位の速度を報告しているケース(例, Sands and Cheetham, 1986)もあるので、データ解釈の際には注意が必要である。また、レンズの歪み、映像解像度の限界、デジタイズの誤差、データの平滑に伴う誤差および身体部分慣性係数と重心算出に関わる誤差など、映像の分析過程に混入する誤差には留意しなければならない。特に、踏切り直前や跳躍板接地の瞬間における動作あるいは重心の速度等を分析する場合には、適切なカメラスピードによる撮影と、衝撃による大きな加速度を考慮した適切なデータ処理がなされなければ、位置データやそれを基に算出されるキネ

マティクスデータの歪みに繋がる (Knudson and Bahamonde, 2001; Nunome et al., 2006)。

1996年にドイツで開発されたLaveg (JENOPTIK社)に代表されるレーザードップラー方式距離計測装置は、疾走速度の測定に広く用いられている。この装置では、一定の時間間隔で発信されたレーザー光が対象物に反射して戻ってくるまでの時間をもとに、装置と対象物の距離を算出している。疾走者の後方から腰部辺りにレーザー光が当たるように狙いを定めて測定するので、運動者を物理的に制限する必要はなく、適切な装置の設置場所と測定員さえ確保できれば、競技の妨げとならないように測定が可能であり、実際に競技会での測定にも用いられている。しかし、助走速度としては最も重要な踏込み局面における速度測定に関して、データの妥当性と信頼性において課題が残ることは前述の通りである。サンプリング周波数は通常 50 Hz か 100 Hz で、機器によって異なる。高橋ほか (2010) の研究データによれば、15 m から 115 m の間にある固定対象物におけるレーザードップラー方式距離計測装置の距離測定の精度は非常に高い。しかし、金高 (1999) が指摘するように、実際に運動者の速度測定を行えば、疾走中の接地、離地に伴う速度の増減だけでなく、ノイズもデータには含まれるため、データ処理が重要である。高橋ほか (2010) は対象の移動速度によって最適な遮断周波数も異なることを報告しており、レーザードップラー方式距離計測装置を用いたデータ収集および同装置から得られたデータの解釈において、このようなデータ処理の影響があることを忘れてはならない。

速度測定のもう1つの方法は、光電管システムの使用である。一定間隔で配置された光電管システムを通過する時間を計測し、その区間の平均速度を算出するものである。動作分析やレーザードップラー方式距離計測装置に比べると瞬間的な速度の計測には向いていないが、区間ごとの平均速度を比較的簡便に計測できることから、よく用いられている。データ解釈の際には、どの区間の平均速度なのかを理解することが重要である。また、機器の設置、特に高さに関しては、身体のだ

の部分が光電管システムを通過（レーザー光を遮断）するかがデータに影響することは留意すべきであろう。Microgate 社製の Opto-track あるいは OptoJump と呼ばれるシステムは長い走路の両側、接地面の近くに多数の光電管を配置し、疾走中の接地時間、滞空時間、ストライド、ピッチ、速度などを高いサンプリング周波数で計測できる。この場合、各ステップの接地位置とその移動時間がデータの元になっていることから、姿勢変化が大きく、接地位置に対する重心の相対位置が大きく変化する局面などでは、データ解釈に注意を要すると思われる。

4.2 今後の研究とより実践的な測定に向けての展望

本研究では助走速度に関する知見を整理してきたが、そのほとんどは横断的な研究である。一時的単発的な評価に留まらず、信頼性の高い客観的測定値を日常的に継続して蓄積することは、選手個人の縦断的变化をより正確に捉えることに繋がり、より実践的で価値あるデータが蓄積されることにもなる。そのためには、如何に日常的に測定、記録、活用できるシステムを実現するかが課題となる。

前セクションにおいて3つの代表的な速度測定方法を記述したが、どれも十分に実用的であるとは言えない。まず、ビデオ映像動作分析では、デジタイズを含むデータ処理に多大な時間と労力を必要とする。当然、即時フィードバックも現在のところ不可能である。データの妥当性を少し妥協して、重心速度を諦めれば、比較的簡便に2次元映像分析が利用できるプログラム（例、Dartfish, MediaBlend）があるが、それでもトレーニング現場で選手および指導者が日常的にそれを利用するには手間と時間がかかる。選手が通常練習中における1回1回の試行において、トレーニングのペースを崩すことなくデータを参照することは難しい。専属の測定員が常駐し迅速に処理を行ってくれるというのはあまり現実的ではない。また、モーションキャプチャシステムで多くのマーカーの貼付が必要となるものは問題外で

ある。

Van der Eb et al. (2012) が開発したシステムは、2次元映像から選手の身体の輪郭を自動認識し、映像上におけるその面積中心位置を重心位置と推定することで、速度だけでなく様々な力学的変量を自動算出し、即時フィードバックを可能としている。一般的な映像動作分析に比べれば、身体部分の質量分布を考慮しない点で、その分データの正確性は低下することが考えられるが、現場利用を重視したプログラムとして可能性を秘めていると思われる。しかし、基本的には映像をもとにした2次元分析であることから、カメラの配置や撮影される映像の質は、データの質に直結する非常に重要な因子となる。2次元分析を行う映像としては、カメラと被写体の距離は大きくして撮影することが望ましい。実験的環境ではなく、日常トレーニング環境での測定を考えれば、カメラを遠くに配置すればするほど、測定とは無関係なヒトやモノが映像に入りやすく、このプログラムに利用できるような映像を撮影することが困難となる。多くの選手が同時に活動している環境ではなおさらである。

映像分析に比べてデータ処理がシンプルで、短時間でのフィードバックが可能であるレーザードップラー方式距離計測装置でも、最も重大な課題は測定員が必要ということであろう。機材の常設と、その測定およびデータ提示に専念するスタッフを常置できる環境においてのみ、日常トレーニングでの活用可能性が生まれると思われる。繰り返しになるが、そのような環境は一般的な体操競技実践現場では現実的でない。

一方、光電管システムはその簡便性と引き換えにデータの妥当性で妥協しなければならない。光電管システムは助走路の両側に少し余分なスペースがとれば機材の設置、および自動測定が可能である。また、最近は電光掲示板を付属システムとしてタイムはもちろん、光電管セットの間隔距離を設定しておくことで速度を即時フィードバックすることを可能にしているシステムもある（例 Microgate 社）。光電管セットと電光掲示板は無線で接続されており、最低必要な機材は光電管セ

ットが2組,そして電光掲示板のみである。それぞれ充電式バッテリー駆動で電源の配線も不要であることから,機材設置は非常にシンプルで,データ表示の即時性と視認性の良さは現場活用の可能性を十分にアピールするものである。ただ,光電管システムは,瞬間速度の測定において,信頼性および妥当性の高いデータを得ることが困難である。特に,踏込み局面における助走最終速度の測定となれば,その間の身体姿勢変化や動作の個人差によって,データ測定がより難しいものとなる。Optotrackのように助走路に沿って光電管が密に配置されることが施設の,経済的に可能であれば,日常トレーニング現場における測定としてはより高い可能性を秘めているかもしれない。それでも,踏込み局面における大きな股関節屈曲動作は,その局面における速度データ測定値の妥当性を低下させることは,考慮しなければならない。

助走速度の日常的測定およびそのデータの実践的活用に向けて,必要な条件は何か。まず,取り扱いの簡便さは非常に重要な条件であり,これがクリアされない限り,実践者が実践のために日常的に利用することにはほぼ至らないと思われる。常設可能か少なくとも持ち運びやセッティングが容易な機材が利用されるべきである。また,測定データの妥当性および信頼性は少なくとも実践者の主観的感覚精度よりも確実に高くなければならない。これよりも低い精度での測定,データのフィードバックは無意味であるだけでなく,主観的感覚を狂わせることに繋がるであろう。さらに,データの自動処理は当然とした上で,解釈が容易でシンプルな形でもって即時的にフィードバックされることが望ましい。そして,最終的には耐久性やランニングコストも含めた費用の問題であろう。少なくともこれらの条件を現場に普及できるレベルで満たす測定システムはまだ存在しないが,近年の目覚ましいテクノロジーの進歩はこれまでにない測定の可能性を広げていることも確かである。

5. ま と め

本研究において跳馬の助走速度データを含む科学的研究を広く概観したところ,男子に関してはFujihara (2016) が報告しているように,トップ選手で8.5 m/s以上,世界レベルの大会では平均でも8.2 m/s以上であると考えられる。また,本稿では女子についてのデータも整理され,トップ選手では男子の国際平均レベルと近い速度に達している選手がいる報告も見られた。しかし,これらの多くのデータは踏込み局面直前のデータであり,跳躍に最も影響すると思われる踏込み局面での速度に関しては,さらに慎重な研究が必要であると考えられる。踏込み局面ではそこまでの疾走動作には見られない大きな姿勢変化を伴うことから,測定方法によっては速度の過大評価および過小評価の可能性が議論され,実際その局面での加速や減速は非常に重要な因子であるにも関わらず,関連情報は十分でなかった。結果として,比較的豊富だと思われた跳馬の助走速度においても,決定的なデータが蓄積されているとは言えず,さらなる研究の必要性が浮き彫りとなった。

これまでの速度測定は,映像をもとにした動作分析,レーザードップラー方式距離計測装置の利用,光電管システムの利用の3種類の方法に大別され,本論ではそれぞれの測定法やそこから得られたデータの解釈における注意点が議論された。また,今後より日常的な測定が可能になることで,これまでになされていない縦断的な研究や,より実践的なデータ活用が期待され,そのためには少なくとも主観的感覚よりも高い妥当性と信頼性を持ったデータが,簡便かつ安価に,測定できるシステムが必要であると考えられる。

注

注1) APAスタイルにおいて,Personal communicationは文献リストには含まない。

文 献

Arkaev, L. I. and Suchilin, N. G. (2004) Gymnastics:

- how to create champions. Meyer & Meyer Sport: Oxford.
- Atiković, A. and Smajlović, N. (2011) Relation between vault difficulty values and biomechanical parameters in men's artistic gymnastics. *Sci. Gymnastics J.*, 3(3): 91-105.
- Bradshaw, E. (2004) Target-directed running in gymnastics: a preliminary exploration of vaulting. *Sports Biomech.*, 3(1): 125-144.
- Bradshaw, E., Hume, P., Calton, M., and Aisbett, B. (2010) Reliability and variability of day-to-day vault training measures in artistic gymnastics. *Sports Biomech.*, 9(2): 79-97.
- Brehmer, S. and Naundorf, F. (2011) Age-related development of run-up velocity on vault. *Sci. Gymnastics J.*, 3(3): 19-27.
- Brehmer, S. and Naundorf, F. (2014) Key parameters of the 2nd flightphase of the Tsukahara with salto backward piked. *Proceeding of the 32nd International Conference of Biomechanics in Sports*, Johnson City, TN.
- Bruggemann, G. P. (1994) Biomechanics of gymnastic techniques. In: Nelson, R. and Zatzorsky, V. (eds.) *Sports Sci. Review (Vol. 3). Human Kinetics: Champaign, IL*, pp.79-120.
- Čuk, I. and Karácsony, I. (2004) *Vaults: methods, ideas, curiosities, history*. University of Ljubljana and Hungarian Gymnastics Federation: Ljubljana.
- Čuk, I. and Ferkolj, S. M. (2008) Changes in technique of handspring double salto forward tucked performed on horse and vaulting table. *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis*, 13: 20-30.
- Dillman, C. J., Cheatham, P. J., and Smith, S. L. (1985) A kinematic analysis of men's Olympic long horse vaulting. *Int. J. Sport Biomech.*, 1(2): 96-110.
- Ferkolj, M. (2010) A kinematic analysis of the handspring double salto forward tucked on a new style of vaulting table. *Sci. Gymnastics J.*, 2(1): 35-48.
- FIG: International Gymnastics Federation. (2016a) 2017 Code of Points FIG Men's Technical Committee (ed.) Retrieved from http://www.fig-gymnastics.com/publicdir/rules/files/mag/CoP_MAG_2017-2020_ICI-e.pdf
- FIG: International Gymnastics Federation. (2016b) 2017 Code of Points FIG Women's Technical Committee (ed.) Retrieved from http://www.fig-gymnastics.com/publicdir/rules/files/wag/CoP_WAG_2017-2020_ICI-e.pdf
- Fujihara, T. (2016) Revisiting run-up velocity in gymnastics vaulting. *Proceeding of the 34th International Conference of Biomechanics in Sports*, Tsukuba, Japan.
- George, G. S. (2010) *Championship gymnastics: biomechanical techniques for shaping winners*. Designs for Wellness Press: Carlsbad, CA, p.229.
- 広川龍太郎・松尾彰文・柳谷登志雄・土江寛裕・杉田正明 (2010) 男子100 m 決勝進出者5名の予選から決勝におけるレースパターン分析. 世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術 (pp. 18-23). 財団法人日本陸上競技連盟: 東京.
- Irwin, G. and Kerwin, D. G. (2009) The influence of the vaulting table on the handspring front somersault. *Sports Biomech.*, 8(2): 114-128.
- エル・アントーノフ: 小野耕三訳 (1978) ソ連体操トレーニングシリーズ⑥女子跳馬. ベースボールマガジン社: 東京, p.10.
- 金子明友 (1974) *体操競技のコーチング*. 大修館書店: 東京.
- 金高宏文 (1999) レーザー速度測定器を用いた疾走速度測定におけるデータ処理の検討. 鹿屋体育大学学術研究紀要, 22: 99-108.
- King, M. A. and Yeadon, M. R. (2004) Maximising somersault rotation in tumbling. *J. Biomech.*, 37(4), 471.
- Knudson, D. and Bahamonde, R. (2001) Effect of endpoint conditions on position and velocity near impact in tennis. *J. Sports Sci.*, 19(11): 839-844.
- 小山宏之・村木有也・柴山一仁・清水 悠・荻山 靖 (2012) 競技会における一流男女走幅跳および三段跳選手の助走スピード分析. 陸上競技研究紀要, 8: 46-64.
- Krug, J., Knoll, K., Kothe, T., and Zocher, H.-D. (1998) Running approach velocity and energy transformation in difficult vaults in gymnastics. *Proceeding of the 16th International Symposium on Biomechanics in Sports*, Konstanz, Germany.
- Kwon, Y. H., Fortney, V. L., and Shin, I. S. (1990). 3-D analysis of Yurchenko vaults performed by female gymnasts during the 1988 Seoul Olympic Games. *Int. J. Sport Biomech.*, 6(2): 157-176.
- 本嶋良恵・北川淳一・前田 明 (2014) 跳馬において踏切位置の手前に障害物を置くことで踏切動作を改善させられるか?. スポーツパフォーマンス研究, 6: 233-244.

- Naundorf, F., Brehmer, S., Knoll, K., Bronst, A., and Wagner, R. (2008) Development of the velocity for vault runs in artistic gymnastics for the last decade. Proceeding of the 26th International Conference on Biomechanics in Sports, Seoul, Korea.
- Nelson, R. C., Gross, T. S., and Street, G. M. (1985) Vaults performed by female Olympic gymnasts: a biomechanical profile. *Int. J. Sport Biomech.*, 1(2): 111-121.
- Nunome, H., Lake, M., Georgakis, A., and Stergioulas, L. K. (2006) Impact phase kinematics of instep kicking in soccer. *J. Sports Sci.*, 24(1): 11-22.
- Penitente, G., Merni, F., Fantozzi, S., and Perretta, N. (2007) Kinematics of the springboard phase in Yurchenko-style vaults. Proceeding of at the 25th International Symposium on Biomechanics in Sports, Ouro Preto, Brazil.
- Prassas, S., Kwon, Y. H., and Sands, W. A. (2006) Biomechanical research in artistic gymnastics: A review. *Sports Biomech.*, 5(2): 261-291.
- Sands, W. A. (2000) Vault run speeds: 1999 John Hancock U.S. Gymnastics Championships women. *Technique*, 20(4): 5-7.
- Sands, W. A. and Cheetham, P. J. (1986) Velocity of the vault run: Junior elite female gymnasts. *Technique*, 6: 10-14.
- Sands, W. A. and McNeal, J. R. (1995) The relationship of vault run speeds and flight duration to score. *Technique*, 15(5): 8-10.
- 高橋流星・小川幸三・船渡和男 (2010) レーザードップラー方式距離計測装置によって得られた歩行運動の移動距離と速度の正確性及び妥当性. 日本体育大学紀要, 40(1): 35-42.
- Takei, Y. (1988) Techniques used in performing handspring and salto forward tucked in gymnastic vaulting. *Int. J. Sport Biomech.*, 4(3): 260-281.
- Takei, Y. (1990) Techniques used by elite women gymnasts performing the handspring vault at the 1987 Pan American Games. *Int. J. Sport Biomech.*, 6(1): 29-55.
- 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. and Kim, E. J. (1990) Techniques used in performing the handspring and salto forward tucked vault at the 1988 Olympic Games. *Int. J. Sport Biomech.*, 6(2): 111-138.
- 土屋 純 (2007) 体操競技における身体動作のバイオメカニクスの分析. 早稲田大学大学院人間科学研究科博士学位論文.
- 土屋 純・森泉貴博 (2009) 男子跳馬における Yurchenko とびのバイオメカニクスの特徴とそのコーチングへの提言. *スポーツ科学研究*, 6: 69-78.
- 津村二郎・遠藤幸一 (1996) 男子跳馬における助走の特徴. *日本体育学会大会号* (47): 510.
- Van der Eb, J., Filius, M., Rougoor, G., CVan Niel, C., de Water, J., Coolen, B., and de Koning, H. (2012) Optimal velocity profiles for vault. Proceeding of the 30th International Society of Biomechanics in Sports. Melbourne.
- Veličković, S., Petkovic, D., and Petkovic, E. (2011) A case study about differences in characteristics of the run-up approach on the vault between top-class and middle-class gymnasts. *Sci. Gymnastics J.*, 3(1): 25-34.
- Zhang, X. and Li, W. (2000) Biomechanics analysis of forward handspring and salto stretched with 5/2 twist in vaulting. Proceeding of the 18th International Symposium on Biomechanics in Sports, Hong Kong, China.

(2016年11月24日受付)
(2017年 8 月22日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2017/9/21