

## 逆上がりの遊脚期における振上脚から体幹部へのエネルギー伝達

Energy Transfer from Swing Leg to Trunk during Arm Support Phase of Kicking Pullovers

鴻巣 暁 (東京大学大学院総合文化研究科)

吉岡 伸輔 (東京大学大学院総合文化研究科)

深代 千之 (東京大学大学院総合文化研究科)

### 抄録

逆上がりの遊脚期(支持脚離地から腹部と鉄棒の接触まで)における振上脚大腿部から体幹部へのエネルギー伝達を定量することを目的とした。健康成人男性11名が身長比75%の鉄棒高で行った成功動作を対象に矢状面の動作分析を行い、振上脚股関節の関節力パワー、セグメントトルクパワー、およびそれらの力学的仕事を算出した。遊脚期始終で振上脚大腿部から体幹部へ伝達された力学的エネルギーは0.51 J/kg前後であり、振上脚を除く全身が遊脚期に獲得したエネルギーの38%前後に相当する大きさであった。エネルギー伝達の内訳は0.37 J/kg前後が遊脚期前半の股関節伸展トルク、0.14 J/kg前後が股関節力によるものであった。遊脚期前半に振上脚の向きと股関節速度ベクトルは垂直に近かったことから、伸展トルクは股関節力パワーによるエネルギー伝達にも寄与したと見られる。以上の結果から、踏切時に振上脚を大きく振上げるとともに、振上脚に蓄積された運動エネルギーを遊脚期前半の股関節伸展トルク発揮により体幹部へ伝達する技術が、逆上がりの成功に重要であると示唆される。

### 諸言

逆上がりは鉄棒へ「上がる一回る一下りる」から構成される鉄棒運動の代表的な上がり技である(文部科学省, 2015)。後方支持回転、後方かかえ込み回り、棒下振出しといった後方回転を伴う他の鉄棒種目の基礎であり(國井, 2014; 高橋ほか, 2009)、筋力、握り、回転感覚、支持姿勢など体操競技に重要な要素を養うためのトレーニングとしても利用される(American Sports Education Program and USA Gymnastics, 2009)。日本では小学校の体育教育のカリキュラムとして高い関心を集め(文部科学省, 2008)、技術と指導法の確立が求められてきた。

逆上がりは用いる鉄棒の高さや踏切様式のの違いによって複数のパターンに分類される。その中で最も入門的であり、かつ小学校で取り組まれているのが、片脚の振上げともう一方の脚による床の押しを伴う「片脚振上げ型逆上がり」である(橋爪・高邑, 2005; Turoff, 1991)。逆上がりを成功させるためには全身を上方移動させる力学的エネルギーが必要となるが、このタイプの逆上がりでは助走と踏切によって得る離地の運動エネルギーを遊脚期(支持脚の離地から腹部と鉄棒の接触まで)の上方移動に利用することができる。したがってエネルギー利用の技術とメカニズムを明らかにすることが指導法の確立に重要である。

身体の中で特に大きなエネルギーを担うと考えられる部位は振上脚である。振上脚を勢よく振上げることが逆上がりの成功につながるということは教育現場で広く認識されている(高橋ほか, 2010; 東京学芸大学附属大泉小学校体育部, 2014)。先行研究では成功動作の方が不成功動作よりも振上脚の速度が大きいことや逆上がりへの習熟につれ速度が増加することが報告されている(中村・山本, 1988; 直江ほか, 1989; Fukushima and Yamamoto, 1992)。これらの知見は、踏切時に振上脚を大きく振上げ運動エネルギーを蓄積することが逆上がりの成功に大きく寄与するということを支持する。

離地の振上脚の運動エネルギーが遊脚期に振上脚自体の上方移動に使用されるであろうことは言うまでもないが、他の身体部位、すなわち体幹部や支持脚の上方移動にも利用される可能性がある。つまり、振上脚大腿部から体幹部へ股関節を介してエネルギーが伝達される可能性である。特定の関節やセグメントにエネルギーを生成、蓄積し、これを局面の展開に応じて他の部位に伝達することは、ダイナミックな運動の基本的な方略の1つであるからである(Shimada et al., 2004)。吉澤・大谷(1981)が成人による逆上がりを分析した結果では、振上脚の股関節は

離地時に屈曲角速度を持つが、この角速度は遊脚期に急激に低下している。この局面のエネルギー動態は分析されていないが、振上脚の運動エネルギーの急激な低下は、振上脚大腿部から体幹部へ大きなエネルギーが伝達された可能性を支持する。以上を踏まえると、遊脚期における振上脚から体幹部へのエネルギー伝達を定量しメカニズムを解明することが、逆上がりの指導法の確立に大きく資するものと期待される。成功動作を対象に、身体セグメント間のエネルギー伝達を担う関節力パワーとセグメントトルクパワー (Robertson et al., 2013) を分析することがメカニズムの解明に有効であると考えられる。

そこで本研究では、片脚振上げ型逆上がりにおける振上脚大腿部から体幹部へのエネルギー伝達を定量し、メカニズムを明かにすることを目的とした。

## 方法

### 被験者

被験者は逆上がりのできる健常成人男性11名(年齢:  $24.5 \pm 2.0$ 歳, 身長:  $1.72 \pm 0.06$  m, 体重:  $66.3 \pm 6.7$  kg)であった。全員が小学校の体育教育で逆上りを習得していた。本研究は大学院倫理審査委員会の承認の下、被験者から書面による同意を得て実施した。

### 実験手順

実験は実験室に組み立てた鉄棒セットを用いて行った (Konosu et al., 2017)。被験者が握る鉄棒(バー)には競技で使用されるのと同じ太さ、直径2.8 cmのステンレス鋼鉄棒を使用した (International Gymnastics Federation, 2017)。鉄棒の高さは各被験者の身長比75%とした。これは小学校での鉄棒運動に推奨される胸部から肩の高さの1つである (萩谷, 2010; Turoff, 1991)。

逆上がりの練習を交えたウォーミングアップに続き4回の逆上りを実施するよう各被験者に指示した。試技

は順手、裸足で被験者自身のペースで行うものとし、下肢肢位を含む動作中の姿勢については特に指示を与えなかった。疲労防止のため、試行間に1分以上の休憩を設けた。全被験者が全試行で鉄棒への上がりを成功させた。

### データ収集

全試行において、身体特徴点の位置、床反力、鉄棒のひずみを時系列で測定した。赤外線カメラ13台によるモーションキャプチャシステム (MAC3D, Motion Analysis社製) により、被験者の身体特徴点24ヶ所に貼り付けた球マーカーの位置を200 Hzで記録した。マーカーの具体的な貼り付け位置は肩峰、上腕骨外側上顆、尺骨茎状突起、上後腸骨棘、大転子、大腿骨外側上顆、外果、踵骨隆起、第2趾中足骨頭(以上は身体の左右両側に貼り付けた)、頭頂、前頭中央、外後頭隆起、第7頸椎、右側肩甲骨下角、胸骨体中点であった。同様に、鉄棒の両端4ヶ所にもマーカーを貼り付け、位置を記録した。以上のデータを4次の位相ずれのないバターワースローパスフィルタを用いて平滑化した。遮断周波数は残差分析 (Winter, 2009) により7.1-12.6 Hzと決定した。離地時刻の決定のため、支持脚足部に作用する床反力鉛直成分をフォースプレート (9281B, Kistler社製) により2000 Hzで測定した。腹部と鉄棒が接触する時刻を決定するため、鉄棒の両端、支柱内側箇所には貼り付けたひずみゲージ (N11-FA-10-1000-11-VSE1, 昭和測器社製) により、鉄棒の矢状面水平方向のひずみを2000 Hzで測定した (Konosu et al., 2017)。

### 解析区間

遊脚期(支持脚離地から腹部と鉄棒の接触まで)を解析区間とした(図1)。離地は床反力鉛直成分が10 Nを下回った時刻、腹部と鉄棒の接触はゲージ回路出力電圧の2次導関数の極小値時刻とした (Konosu et al., 2017)。

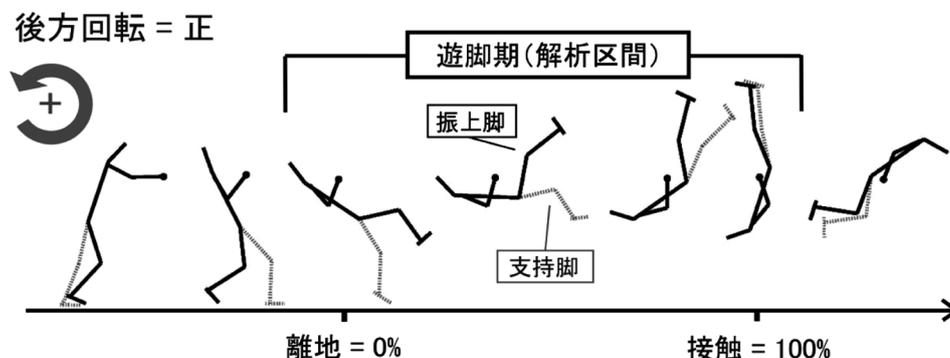


図1 遊脚期および座標系の定義 典型動作を示す。

## 解析

10セグメントの剛体リンクモデル(図1)を用いて矢状面の動作分析を行った。各身体セグメントの慣性パラメータはWinter(2009)の回帰式を用いて算出した。足部セグメントから順に運動方程式を解く逆動力学演算を振上脚に適用することで振上脚股関節の関節力、関節トルクを算出した(Winter, 2009)。振上脚股関節の速度は振上脚大腿セグメントの重心速度と角速度を基に算出した。回転に関する変数は後方回転を正として示した(図1)。

エネルギー伝達量はRobertson et al.(2013)に従い算出した。振上脚股関節トルク $\tau$ (伸展/屈曲をそれぞれ正/負とする)が体幹部および振上脚大腿部へ及ぼすセグメントトルクパワー( $SP_T$ および $SP_L$ )は次式で表される。

$$SP_T = \tau\omega_T \quad (1)$$

$$SP_L = -\tau\omega_L \quad (2)$$

ここで、 $\omega_T$ 、 $\omega_L$ はそれぞれ体幹部と大腿部の角速度(後方回転を正とする)である。これらのセグメントトルクパワーを遊脚期にわたり時間積分することで股関節トルクが体幹部および大腿部になす仕事( $SW_T$ および $SW_L$ )、股関節で発生するエネルギー $E_{G/A}$ が算出される。

$$SW_T = \int SP_T \quad (3)$$

$$SW_L = \int SP_L \quad (4)$$

$$E_{G/A} = SW_T + SW_L \quad (5)$$

ただし $E_{G/A}$ が負の場合、 $-E_{G/A}$ のエネルギーが吸収される。遊脚期をとおして体幹部と大腿部が同方向へ回転した場合、関節トルクにより大腿部から体幹部へエネルギーが伝達されたとし、伝達量 $E_{TS}$ を次式により算出した。

$$E_{TS} = \begin{cases} SW_T & (\text{if } |SW_T| < |SW_L|) \\ -SW_L & (\text{if } |SW_T| > |SW_L|) \end{cases} \quad (6)$$

ただし $E_{TS}$ が負の場合、体幹部から大腿部へ $-E_{TS}$ のエネルギーが伝達されたとした。

振上脚股関節力 $\mathbf{F}$ (体幹部への作用)と関節速度 $\mathbf{v}$ がなす関節力パワー $JP$ は

$$JP = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad (7)$$

で表される。この関節力パワーを遊脚期にわたり時間積分することで関節力による大腿部から体幹部へのエネルギー伝達量 $E_{TJ}$ を算出した。

$$E_{TJ} = \int JP \quad (8)$$

ただし $E_{TJ}$ が負の場合、 $-E_{TJ}$ のエネルギーが体幹部から大腿部へ伝達されたとした。

関節トルク、関節力、パワー、力学的エネルギー、仕事は被験者の体重で除して規格化した。各変数を被験者の平均 $\pm$ 標準偏差で示し、時系列データは遊脚期全体を100%として時間で規格化した。

## 結果

### 身体のエネルギー変化

図2は遊脚期における振上脚(大腿・下腿・足部)、および振上脚を除く全身の位置・運動エネルギーの時系列である。振上脚は離地時に $1.73 \pm 0.25$  J/kgの運動エネルギーを持っていたが、これは遊脚期前半に大きく低下した。遊脚期始終で位置エネルギーは増加したが、エネルギー全体(位置・運動エネルギーの和)は $0.63 \pm 0.29$  J/kg減少した。遊脚期始終で振上脚を除く全身のエネルギーは $1.34 \pm 0.28$  J/kg増加した。

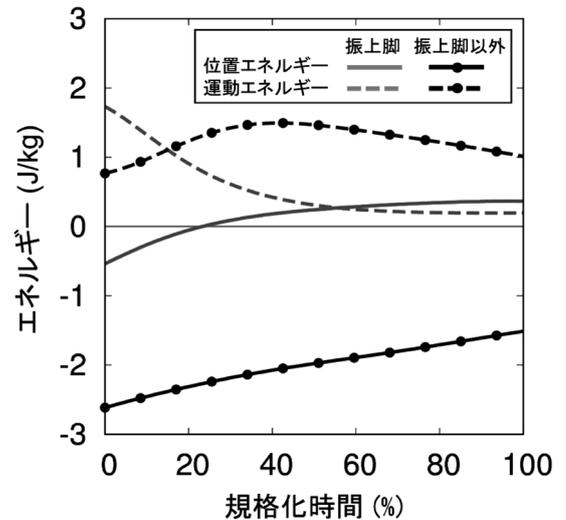


図2 遊脚期における振上脚(大腿・下腿・足部)および振上脚を除く全身のエネルギー変動

位置エネルギーは鉄棒高を基準とする。被験者平均を示す。

### 関節トルクによるエネルギー伝達

振上脚股関節は遊脚期 $32 \pm 16$  %の $0.43 \pm 0.11$  Nm/kgを最大とする伸展トルクを発揮した(図3)。体幹部の角速度は遊脚期を通して200から250 deg/s程度を維持した。振上脚大腿部の角速度は離地時に $511 \pm 46$  deg/sと大きかったが、遊脚期前半に急激に低下し、後半には体幹部と同程度となった。これらトルクと角速度のなすセグ

メントトルクパワーにより振上脚大腿部は $0.53 \pm 0.21$  J/kgのエネルギーを失い、このうち $0.37 \pm 0.17$  J/kgが体幹部へ伝達され、残り $0.16 \pm 0.09$  J/kgが吸収された(図4)。

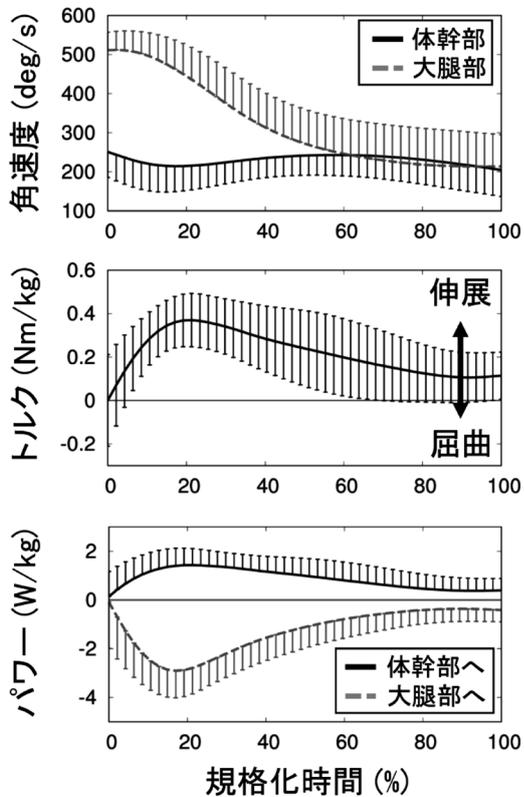


図3 遊脚期における体幹部および振上脚大腿部のセグメント角速度、振上脚股関節トルク、両セグメントへのセグメントトルクパワーの時系列  
被験者平均と標準偏差を示す。

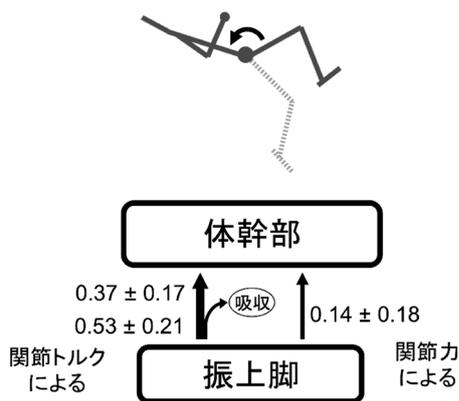


図4 遊脚期における振上脚股関節を介したエネルギー伝達量(J/kg)  
被験者平均と標準偏差を示す。股関節トルクは体幹部と振上脚大腿部にそれぞれ $0.37$ 、 $-0.53$  J/kg前後の仕事をした。すなわち、 $0.37$  J/kg前後のエネルギーが振上脚大腿部から体幹部へ伝達された。また、股関節力により振上脚大腿部から体幹部へ $0.14$  J/kg前後のエネルギーが伝達された。

関節力によるエネルギー伝達

股関節力、関節の速度、関節力パワーを図5および6に示す。関節力は離地の $5.59 \pm 0.86$  N/kgを最大とし、遊脚期40%前後にかけて急激に低下し、その後1 N/kg程度を維持した。関節速度は離地の $3.20 \pm 0.32$  m/sを最大とし、遊脚期後半には1 m/s程度であった。関節力(体幹部への作用)と関節速度のなす角の余弦は遊脚期前半に正值、後半には被験者平均で負値を示した。股関節力と速度のなす関節力パワーにより、遊脚期を通して $0.14 \pm 0.18$  J/kgのエネルギーが振上脚大腿部から体幹部へ伝達された(図4)。

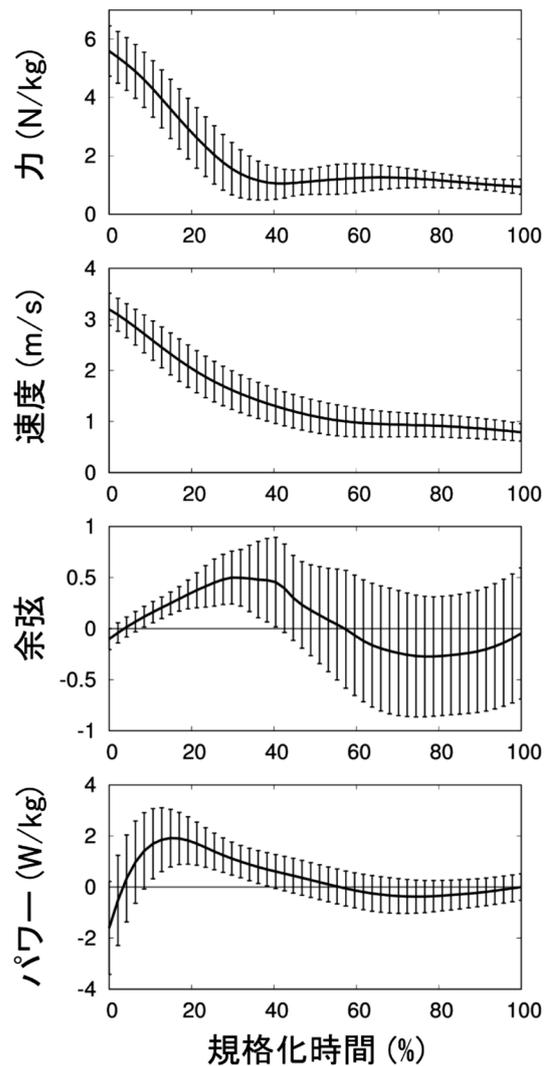


図5 遊脚期における振上脚股関節力(体幹部への作用)、関節速度、それらベクトルのなす角の余弦、および関節力パワーの時系列  
被験者平均と標準偏差を示す。

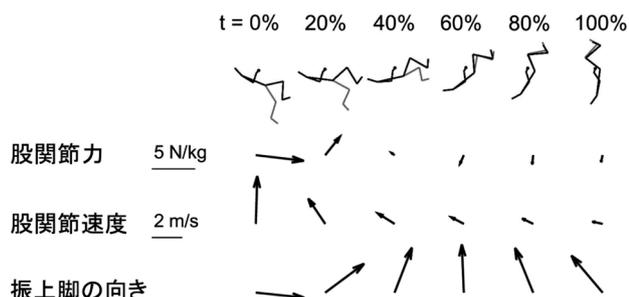


図6 遊脚期における振上脚股関節力（体幹部への作用）ベクトル，股関節速度ベクトル，振上脚の向き（振上脚股関節から振上脚重心へ向かうベクトル）

被験者平均を示す。

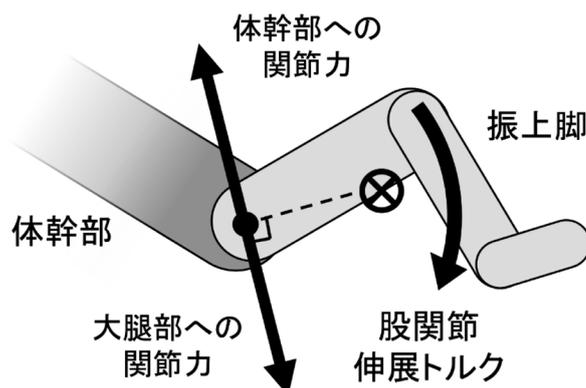


図7 股関節伸展トルクが股関節力に寄与するメカニズム

## 考察

本研究では、逆上がりにおける振上脚股関節を介したエネルギー伝達を定量し、そのメカニズムを明らかにすることを目的とした。遊脚期をととして股関節トルクにより0.37 J/kg前後、股関節力により0.14 J/kg前後のエネルギーが振上脚大腿部から体幹部へ伝達された。これらの合計値0.51 J/kgは振上脚を除く全身が遊脚期に獲得したエネルギー（1.34 J/kg）の38%に相当する。したがって、踏切時に股関節屈曲トルクや股関節力によって振上脚に大きな仕事をなすだけでなく、振上脚に蓄積したエネルギーを離地後体幹部に伝達する技術が逆上がりの成功に重要である。

セグメントトルクパワーが関節力パワーよりもエネルギー伝達に大きく貢献したことから、離地後の股関節伸展トルクの発揮がエネルギー伝達のための重要な技術となる。離地時に大きな差のあった体幹部と大腿部の角速度が遊脚期後半には一致したことから（図3）、伸展トルクは体幹部に対する振上脚の角速度を低下させる役割を果たしたと考えられる。すなわち、離地の股関節屈曲角速度に抗するように伸展トルクを発揮し、遊脚期中盤までにこの屈曲を停止させるのが技の成功に適した技術であると考えられる。

股関節伸展トルクは関節力パワーによるエネルギー伝達にも寄与したと見られ、そのメカニズムは以下のとおりである。振上脚の質量が全身質量に対して小さいとすると、振上脚股関節伸展トルクの発揮により股関節を軸とした振上脚の前方回転が加速する（図7）。このとき振上脚は、振上脚の向き（振上脚股関節から振上脚重心へ向かうベクトル）と垂直な方向へ加速する。すなわち、体幹部は振上脚と垂直な関節力を大腿部に加え、その反作用を受けることになる。図6には、遊脚期全体にわたる振上脚の向きと股関節速度ベクトルを示している。遊脚期前半は、

関節速度が大きいうえ、その向きが振上脚の向きと垂直に近い。したがって、このタイミングで股関節伸展トルクを発揮すれば関節速度と同方向の関節力が生成され、大きなエネルギーが大腿部から体幹部へと伝達される。実際に、伸展トルクがピークに達し、関節速度と関節力の向きが近づいたのもこの遊脚期前半であった（図3, 5, 6）。以上を踏まえると、遊脚期前半の股関節伸展トルクの発揮は、セグメントトルクパワーだけでなく関節力パワーによるエネルギー伝達にも寄与したと考えられる。

股関節伸展トルクの発揮による大腿部から体幹部へのエネルギー伝達は鉄棒運動に普遍的な現象であると見られる。例えば蹴上がりでは、後振り局面（身体重心が水平前方に最も大きく振れた時点から鉄棒真下を通過するまで）後半に両股関節が伸展トルクを発揮し（山田ほか、2003）、下肢のエネルギー減少と体幹部のエネルギー増加が観察される（山田ほか、2001）。この局面で股関節は後方速度を持ち、下肢はそれと垂直な鉛直上向きに近い状態であることから、伸展トルクは上述と同様のメカニズムによって関節力パワーによる大きなエネルギーを大腿部から体幹部へ伝達していると推察される。また、後方車輪における上昇局面でも伸展トルクが発揮される（Tsuchiya et al., 2004）。このとき、体幹部と大腿部の両者が後方回転していることから、セグメントトルクパワーによる大きなエネルギーが大腿部から体幹部へ伝達されていると推察される。いずれの運動でも、股関節伸展トルクが発揮される直前に屈曲トルクが発揮され、屈曲角度・角速度が獲得されている。これらは逆上がりにおける振上脚の振上げに対応するものと見られる。以上を踏まえると、股関節屈曲トルクの発揮により下肢に大きな運動・位置エネルギーを生成し、その後の伸展トルクの発揮によりこのエネルギーを体幹部に伝達する技術が、多くの鉄棒種目の成功に重要であると考えられる。逆上がりは、初歩的な技な

がらこの技術の習得に役立つ、優れた教材であると結論付けられる。

#### 文献

- ① American Sports Education Program and USA Gymnastics (2009) Coaching youth gymnastics. Human Kinetics: Champaign, pp. 163-176.
- ② Fukushima, M. and Yamamoto, H. (1992) Biomechanics of teaching for hip pullover exercise in physical education class. In Proceedings of the 10th International Symposium on Biomechanics in Sports, p. 227.
- ③ 萩谷高史 (2010) 鉄棒運動早わかり. 小学館: 東京, pp. 42-43.
- ④ International Gymnastics Federation (2017) Apparatus norms. <http://www.fig-gymnastics.com/site/rules/app-norms>, (accessed 2018-02-07).
- ⑤ Konosu, A., Yoshioka, S., and Fukashiro, S. (2017) Upper Limb Joint Torques during Performances of Kicking Puloovers. International Journal of Sport and Health Science, 15: 137-144.
- ⑥ 文部科学省 (2015) 器械運動指導の手引. 東洋館出版社: 東京, pp. 134-140.
- ⑦ 中村哲・山本博男 (1988) 小学校の鉄棒運動におけるバイオメカニクス的研究: 低鉄棒での逆上がり. 日本体育学会大会号, 39B: 750.
- ⑧ 直江義弘・元達郎・山本博男 (1989) 小学校体育におけるプールを利用した逆上がり指導のバイオメカニクスの研究. 日本体育学会大会号, 40B: 843.
- ⑨ Robertson, G., Caldwell, G., Hamill, J., Kamen, G., and Whittlesey, S. (2013) Research methods in biomechanics (2nd ed.). Human Kinetics: Champaign, pp. 131-149.
- ⑩ Shimada, K., Ae, M., Fujii, N., Kawamura, T., and Takashi, K. (2004) The mechanical energy flows between body segments during baseball pitching. Japanese Journal of Biomechanics in Sports Exercise, 8 (1): 12-26.
- ⑪ 高橋健夫・藤井喜一・松本格之祐 (2009) 新しい鉄棒運動の授業づくり. 大修館書店: 東京.
- ⑫ 高橋健夫・松本格之祐・尾縣貢・高木英樹 (2010) すべての子どもが必ずできる体育の基本. 学研教育みらい: 東京, pp. 56-63.
- ⑬ 東京学芸大学附属大泉小学校体育部 (2014) 運動がみるみる得意になる体育の教科書. 実業之日本社: 東京, pp. 78-81.
- ⑭ Tsuchiya, J., Murata, K., and Fukunaga, T. (2004) Kinetic analysis of backward giant swing on parallel bars. International journal of sport and health science, 2: 211-221.
- ⑮ Turoff, F. (1991) Artistic gymnastics. Wm. C. Brown Publishers: Dubuque, pp. 318-319.
- ⑯ Winter, D. A. (2009) Biomechanics and motor control of human movement (4th ed.). Wiley: New York.
- ⑰ 山田哲・阿江通良・藤井範久 (2001) 力学的エネルギーからみたけ上がりの習得過程. 日本体育学会大会号, 52: 348.
- ⑱ 山田哲・阿江通良・藤井範久 (2003) け上がりの習得過程における肩および股関節トルクの変化. バイオメカニクス研究, 7 (1): 43-53.
- ⑲ 吉澤正尹・大谷光雄 (1981) さか上がりの筋電図的研究. 日本体育学会大会号, 32: 456.

---

#### 連絡責任者

住所: 〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1

駒場キャンパス9号館 身体運動科学研究室

氏名: 鴻巣 暁

電話番号: 03-5454-7635

E-mail: konosu@idaten.c.u-tokyo.ac.jp