

可変モーメントアームをもつ振り子モデルによる鉄棒運動の解析

植村隆志* 小金澤鋼一** 加藤達郎*** 田中靖久**** 笠井妙美*****

Motion analysis of the horizontal bar gymnastics by a pendulum model with a variable moment
arm
by

Takashi UEMURA Koichi KOGANEZAWA Tatsuro KATO Yasuhisa TANAKA
Taemi KASAI

Abstract

This paper aims to analyze the gymnastic motion on a horizontal bar. Especially it takes the motion of the Giant swing for Kovacs. A pendulum model that has a variable moment arm is assumed to estimate the torques of each joint during the Giant swing motion. The results are summarized as follows. The forward angular acceleration and the corresponding angular torque are observed, in which Coriolis force takes a dominant effect, which implies subjects control the swing motion by varying the length of the moment arm to exert the Coriolis torque.

I. 目的

近年、体操競技のバイオメカニクスの研究は多数報告されている。しかし、鉄棒運動について、Kinematics データや力学的エネルギー・関節トルクについて検討した研究はなされているが、鉄棒周りのトルクの観点から検討した研究は少ない^{1) 2)}。渋川³⁾は、鉄棒運動の『順手車輪』を、鉄棒を回転軸とした身体合成重心の振り子運動としてとらえ、さらに振り子の長さが可変する‘伸縮する振り子’として、回転軸にかかる力学的エネルギーを算出・検討している。その結果から、鉄棒と身体合成重心間の距離の伸縮が、『順手車輪』を成立させるのに重

要な働きかけであると報告している。また、金子⁴⁾は「鉄棒においては、専ら振り子状の振動運動だけに限られるようになっていったことはいうまでもない。」と述べ、さらに「バーを回転軸にした振り子状の運動経過はその体勢の変化により多彩な技を形づくっていることはここにわざわざ説明するまでもないであろう。」と述べている。これらのことから、鉄棒種目を検討する上では、運動を振り子運動として捉え、トルクの観点から検討することが必要であると考えられる。

以上のことから、本研究は、鉄棒運動に「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」を適用し、トルクを用いて解析することの有用性を検討することを目的とした。

* 東海大学総合経営学部マネジメント学科 特任助教
** 東海大学工学部機械工学科 教授
*** 東海大学体育学部体育学科 教授
**** 東海大学総合経営学部マネジメント学科 特任講師
***** 東海大学阿蘇教養教育センター 特任講師

II. 方法

1. 試技の設定

鉄棒運動の代表として、『順手車輪』を試技とした。しかし、金子⁴⁾は体操競技の特性として「体操競技の世界では、“あふり”が必要不可欠の技術であることは誰も知っていながら、それをあからさまに運動経過に現すのは‘野暮な捌き’として嫌われる。」ことを挙げている。このことから、かつて『順手車輪』が研究されていた時代^{5) 6)}に比べ、より進化した現代の体操競技において『順手車輪』の回転技術を運動経過において見いだすことは困難であると考えられる。そこで本研究では、体操競技の美的価値観によって隠されている回転のための力学的な技術を顕著に表出させるために、『順手車輪』と同じ方向に大きな回転加速が必要とされる『バーを越えながら後方抱え込み2回宙返り懸垂（以下、コバチとする）』の両手放し後の後方宙返りに必要な予備運動に特徴を見い出すことのできる『順手車輪（以下、『コバチの手放し直前の順手車輪』とする。）』について検討した。

2. 「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」の適用について

1) 可変モーメントアームをもつ振り子モデルについて

鉄棒運動を金子⁴⁾は、専ら振り子状の運動であると説明していることから、本試技である『コバチの手放し直前の順手車輪』を、鉄棒を回転軸とした身体合成重心の振り子運動とみなした（図.1-1, 1-2 参照）。本試技を、鉄棒を回転軸とした身体合成重心の振り子運動とみなすことで、角速度・角加速度・鉄棒周りのトルクを算出し、鉄棒運動を詳細に検討出来ると考えた。

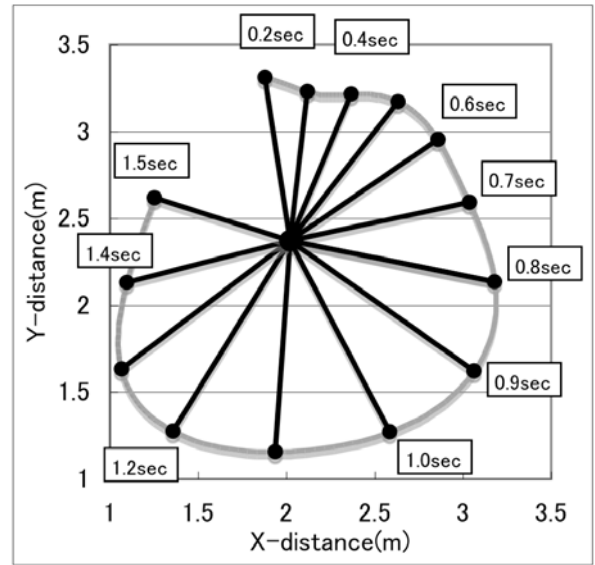


図.1-1 重心の軌跡図

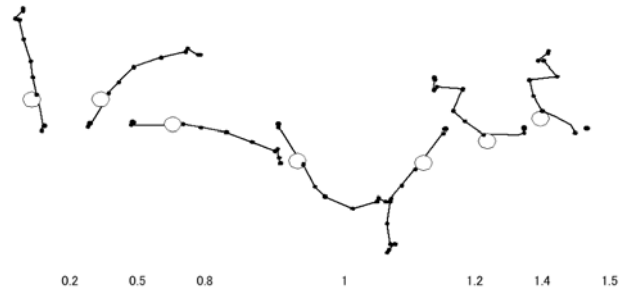
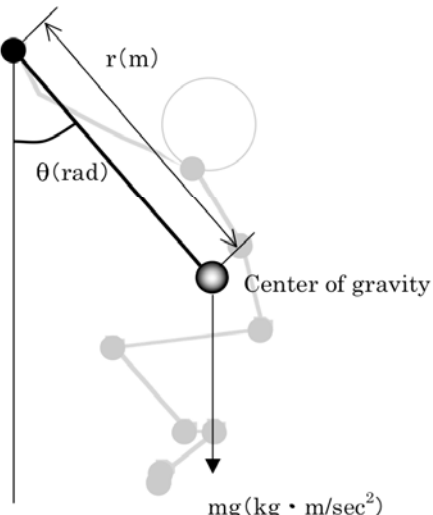


図.1-2 試技のスティックピクチャー

本試技では、試技者によって各関節角度を変化させることができる。これが試技者による働きかけであり、『順手車輪』を回転させようとする努力であると考えられた。それに伴い、回転軸から身体合成重心までの距離も変化する（図.1-1 参照）ため、試技を「単振り子」ではなく、「可変モーメントアームをもつ振り子」とみなした。また、金子⁴⁾は体操競技の技には“胸ふくみ”という‘背中をまるめ、胸をへこます動作’が見られると述べている。この動作により、胴体部分の部分長が変化するものと考えられるため、慣性モーメントは変化するものと捉えた。

2) Kinematics データ及びトルクの算出について
身体を 14 セグメントの剛体リンクモデルとして扱い、下記の値を代入した（図.2 参照）。また、関節角度の定義については以下の通りとした（図.3 参

照)。トルクについては、『コバチの手放し直前の順手車輪』を身体の振子運動とみなし、「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」を適用したため、「ラグランジアンの方法」を用いて算出した。算出式、及び代入した値については以下の通りである。



Moment of inertia : $I(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$

$$= \sum_{n=1}^{14} I_n = \sum_{n=1}^{14} m_n \cdot r g_n^2$$

$n_1 = \text{Head}$
$n_2 = \text{Trunk}$
$n_3 = \text{Rhand}$
$n_4 = \text{Rforearm}$
$n_5 = \text{Rupperarm}$
$n_6 = \text{Lhand}$
$n_7 = \text{Lforearm}$
$n_8 = \text{Lupperarm}$
$n_9 = \text{Rupperleg}$
$n_{10} = \text{Rlowerleg}$
$n_{11} = \text{Rfoot}$
$n_{12} = \text{Lupperleg}$
$n_{13} = \text{Llowerleg}$
$n_{14} = \text{Lfoot}$

図2 代入した要素

$$(mr^2 + I)\ddot{\theta} + (2mr\dot{r} + I)\dot{\theta} + mgr\sin\theta = 0$$

m = 質量及び身体部分質量

I = 慣性モーメント

θ = 振幅

r = 身体合成重心から回転軸までの距離

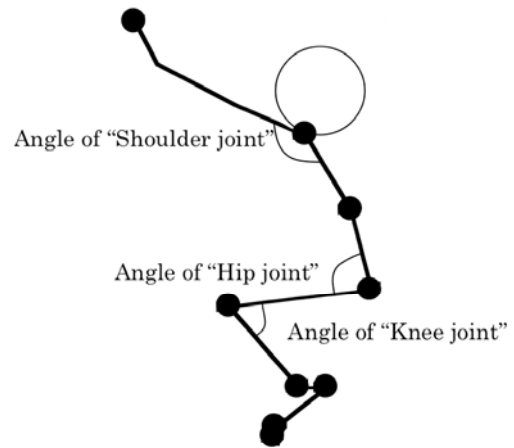


図3 関節角度の定義

この式の左辺の各項がそれぞれ、「慣性トルク」「コリオリのトルク+慣性モーメントが変化することによって生じるトルク」「重力トルク」を表し、右辺は回転軸周りに生じるトルクが0であることを示す。本研究において「慣性モーメントが変化することによって生じるトルク」は値が小さかったため、考察対象から除外した。なお、本研究における正の値のトルクは、反・回転方向を示す。

3) 映像の採取について

熟練した体操競技男子選手1名(21歳、体操競技歴15年間)の『コバチの手放し直前の順手車輪』の動作を解析対象とした。数回の試技を矢状面からビデオカメラ(SONY社製)を用いてFrame Rate 30 frame/sec、Shutter Speed 1/1000secで撮影し、その中から、難度の成立が認められ、姿勢欠点が少なく、高さも表現されていると評価された1試技を選出した。なお、試技の評価に際しては、日本体操協会公認第二種男子審判員資格保持者に行わせた。得られた映像は二次元ビデオ動作解析システム

(Frame-DIAS II、DKH社製)を用いて2次元座標を算出した。算出された2次元座標値は、バターワース型デジタルフィルタBryant:6Hzを用いて平滑化した。

III. 結果及び考察

1. Kinematics データによる検討

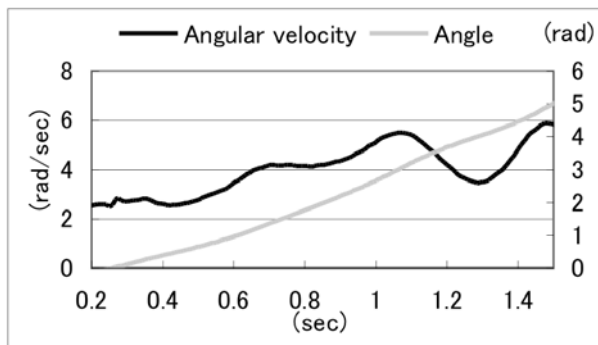


図4 試技の角速度

『コバチの手放し直前の順手車輪』における角速度の様相から、身体合成重心が棒上から真下に至る間に (0.2～1.1sec) 角速度が緩やかに増加していることが見て取れる (図.4 参照)。また、その後角速度が急激に減少するものの、最終的には大きい値で空中に飛び出していることが見て取れる (1.3～1.5sec)。身体合成重心が真下を通過するまで角速度が増加し、通過後は減少するという現象は、重力によって加・減速しているものと推測される。しかし、飛び出す直前の角速度の増加は、振り子状の運動としては不自然である。角速度の様相と身体各部の関節角度の様相を比較すると、角速度が急激に増加する時期 (1.2～1.5sec) に各関節角度が急激に減少している (図.5 参照)。これらのことから、関節角度

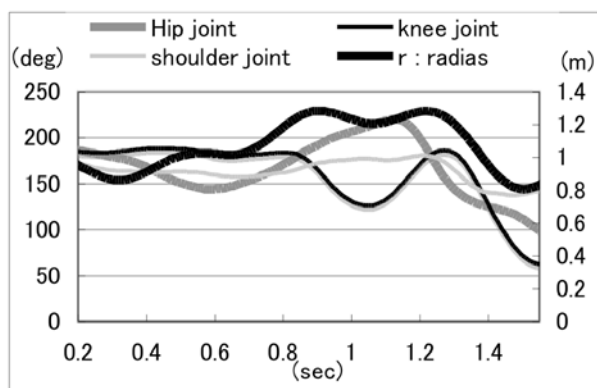


図.5 「身体合成重心と回転軸までの距離」と各関節角度の変化

を減少させることが、角速度の増加に関与をしてい

ると考えられる。

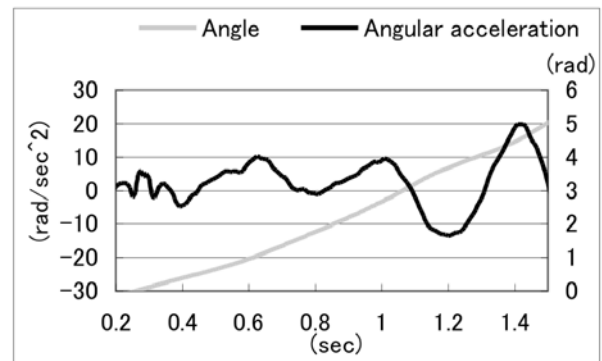


図6 試技の角加速度

一方、角加速度のグラフ (図.6 参照) から、棒上から真下に至る間は、常に回転方向に加速していることが見て取れる。しかし、振り子状の単純な運動であれば、ほぼ等加速度運動になるはずである。試技では角加速度の値に波があることから、真下を通過するまでも試技者によって回転を減速させる働きかけがあったと考えられる。この時期の各関節角度の様相については様々であるが、身体合成重心と回転軸 (鉄棒) までの距離が増加していることが見て取れる (図.5 参照)。したがって、身体合成重心と回転軸までの距離の増加が、回転を減速させることに関与していると考えられる。

真下を通過した直後 (1.1sec) の負の角加速度と、飛び出す直前の正の角加速度の増加については、前述の角速度で得られた結果と同様の考察が導き出される。

以上のことから、『コバチの手放し直前の順手車輪』において、試技者は単に振り子状の運動をしているだけではなく、各関節角度の増減、及び身体合成重心と回転軸までの距離の増減によって角速度・角加速度を操作していると考えられる。

2. 「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」により算出されたトルクの検討

試技中のスティックピクチャーと、重力トルク・

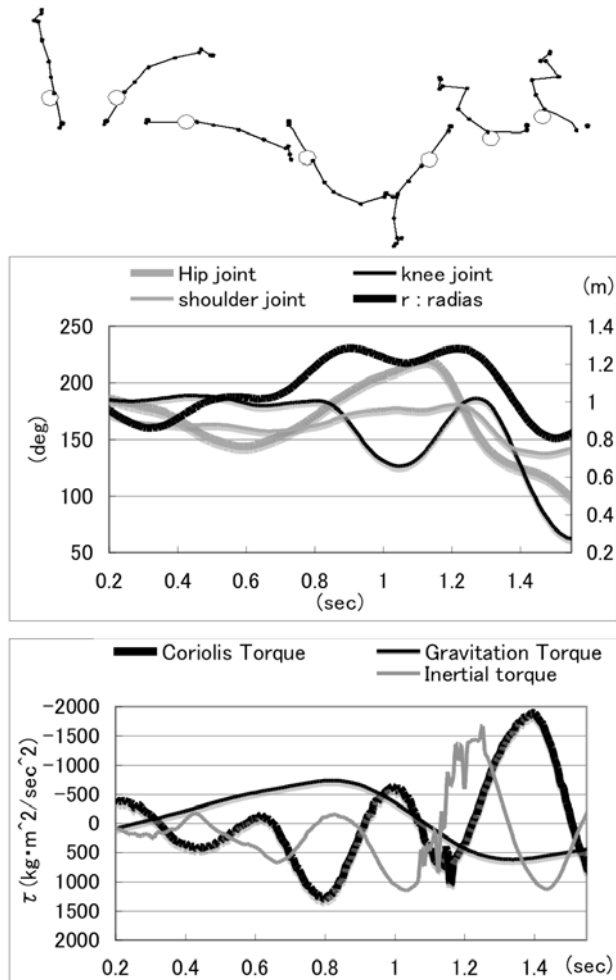


図7「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」により算出されたトルクの消長

慣性トルク・コリオリのトルクの様相を図に示した(図.7 参照)。重力トルクは、単純な振り子運動の場合と同様に、試技者が真下を通過する前後(1.1sec)で回転方向から反・回転方向に切り替わっている。慣性トルクは角加速度と反対方向に発生するトルクである。角加速度は真下に至るまでは(1.1sec)回転方向を示し、真下を通過した後に反・回転方向を示し、再び(1.3sec)回転方向を示している。一方、慣性トルクは真下に至るまでは(1.1sec)反・回転方向を示し、真下を通過した後に回転方向を示し、再び(1.3sec)反・回転方向を示している。しかし、この二つのトルクが試技者の操作し得ないトルクであることは、算出式からも明らかである(Ⅱ-2-2)算出式参照)。試技者が唯一操作できる

のは、身体合成重心と回転軸(鉄棒)までの距離、すなわち振り子の長さのみである。コリオリのトルクは、振り子の長さの変化に左右されるため、コリオリのトルクから試技者の働きかけを検討した。

コリオリのトルクの様相から以下のような点が見て取れた。①重力トルクが最も回転方向に大きい時期にコリオリのトルクは反・回転方向に大きく発生している。②飛び出す直前、つまり重力トルクが大きく反・回転方向に発生している時期に、コリオリのトルクは回転方向に大きく発生している。これらの現象を、以下のように考察した。

3. 「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」により算出されたトルクによる『コバチの手放し直前の順手車輪』の検討

本試技において、真上から真下にかけての間(0.2～1.1sec)は、身体合成重心と回転軸までの距離が緩やかに増加している(図.7 参照)。これにより、コリオリのトルクが、同時期に反・回転方向に発生している。渋川³⁾は‘力学的エネルギーによる検討’を用いて、身体が鉄棒から振り下ろされる時期に身体を伸ばすことで、真下を通過する際の支持力を減らすことができると報告している。この報告と同様の結果が得られたと考えられる。また、この現象は重力トルクが最も大きい時期に鉄棒から離されてしまわないために必要な働きかけであると考えられる。これらのことから、試技者によって支持力を減らすための働きかけを、「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」による解析により捉えられたと考えられる。

本試技を「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」として検討した結果、単なる振り子運動としては不自然な角速度・角加速度が回転方向に大きく発生している時期(1.2～1.5sec)が見られた。この

時期に、各関節角度が急激に減少し、「回転軸から身体合成重心までの距離」も急激に短縮している（図7 参照）。同時に、コリオリのトルクが回転方向に大きく発生していることが見て取れる。懸垂姿勢において、肩関節を伸展し、股・膝関節を屈曲することは、「回転軸から身体合成重心までの距離」の短縮を意味することから、各関節角度の減少が起きると共に、「回転軸から身体合成重心までの距離」の急激な短縮が起きていると考えられる。また、トルクの算出式（Ⅱ-2-2）算出式参照）から、振り子の長さの急激な短縮（負の速度）によって、コリオリのトルクを回転方向（負のトルク）へ発生させることが見て取れる。つまり、関節角度の急激な減少による振り子の長さの短縮が、回転方向へのコリオリのトルクを発生させ、同時に、『順手車輪』を回転させるための角速度・角加速度が発生していると考えられる。このコリオリのトルクの発生は、手放し後に後方宙返りを行い、鉄棒を跳び越すのに十分な回転力を得るためのものであると考えられる。このことは、渋川³⁾の‘力学的エネルギーによる検討’において「振り上げるときには、鉄棒から身体合成重心までの距離を縮めることによって、エネルギーを増す」という報告と同様の結果が得られたと考えられる。

また、金子⁴⁾は回転加速のために重要であると指摘している“あふり”という技術を「腰の曲げ伸ばし、肩の脱力と肩角度を狭めること」と表し、これらが力学的には回転方向のコリオリのトルクを得ることを目標とした動作であることが推察された。

4. 「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」の有用性について

先の結果及び考察から、「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」を適用し、トルクを検討する

ことで、『コバチの手放し直前の順手車輪』の現象を捉え、逆ダイナミックスにより試技者の働きかけを捉えられたと考えられる。また、金子⁴⁾が述べている“あふり”という術語の力学的な意味を捉えることが出来た。

V. まとめ

本研究は、鉄棒運動に「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」を適用し、トルクを用いて解析することの有用性を検討することを目的とした。

鉄棒運動の『コバチの手放し直前の順手車輪』を試技とした。試技において熟練した体操競技選手1名を試技者とした。試技を数回行わせ、それらを矢状面からビデオカメラで撮影した。二次元動作解析を行い、Kinematics データを算出した。また、『コバチの手放し直前の順手車輪』を、鉄棒を回転軸とした身体合成重心の振り運動とみなし、「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」を適用し、‘ラグランジアンの方法’を用いてトルクを算出した。算出式は以下の通りである。

$$(mr^2 + I)\ddot{\theta} + (2mr\dot{r} + \dot{I})\dot{\theta} + mgr\sin\theta = 0$$

m＝質量及び身体部分質量

r＝身体合成重心及び部分重心から回転軸までの距離

I＝慣性モーメント

θ ＝振幅

その結果、以下のような知見が得られた。

①飛び出す直前に大きな角速度・角加速度が発生していた。同時期に、身体合成重心と回転軸までの距離と、関節角度の減少がみられた。②飛び出す直前に、回転方向へ大きなコリオリのトルクを発生させていた。同時期に、身体合成重心と回転軸までの距離と、関節角度の減少がみられた。③コリオリのトルクの発生機序から関節角度の急激な減少による振り子の長さの短縮が、回転方向へのコリオリの

トルクを発生させ、同時に、『順手車輪』を回転させるための角速度・角加速度が発生していると考えられた。④これらが過去の知見と一致した。

以上のことから、「可変モーメントアームをもつ振り子モデル」を適用し、トルクを検討することで、『コバチの手放し直前の順手車輪』の現象を捉え、逆ダイナミックスにより試技者の働きかけを捉えられることが示唆された。

VI. 引用・参考文献

- 1) 松井秀治, 体操のバイオメカニクス, 体育の科学 vol.29 No.11, p775-779, 杏林書院, 1979
- 2) 山田哲ら, 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 Vol.7, No.1 (2003), p 43～53, 2003
- 3) 渋川侃二, 現代保健体育学大系 6 運動力学 p125-p131, 大修館書店, 1969.10.10
- 4) 金子明友, 体操競技のコーチング, 大修館書店, 1974.5.20
- 5) 山下謙智 高木公三郎 岡本勉, 鉄棒運動における順手車輪の筋電図学的研究, 体育学研究 第15巻 第2号, 日本体育学会, 1971
- 6) 池上康男, バイオメカニクスからみた動作の評価, 体育の科学 vol.53 No.1, p4-8, 杏林書院, 1979
- 7) 植村隆志 加藤達郎 小金澤鋼一, 〈後方浮き支持回転倒立〉におけるトルクの消長, 東海大学スポーツ医科学雑誌 第19号 (2007) p17～21, 東海大学スポーツ医科学研究所, 2007