

あん馬旋回運動のさまざまな実施形態比較

名和 基之^{*1}, 西脇 一字^{*2}, 山脇 恭二^{*3}, 鮎澤 光^{*4}, 村井 昭彦^{*5}, 中村 仁彦^{*6}

Comparison of various forms of performing the double-leg circle on the pommel horse

Motoyuki NAWA^{*1}, Kazuie NISHIWAKI^{*2}, Kyoji YAMAWAKI^{*3}, Ko AYUSAWA^{*4}

Akihiko MURAI^{*5} and Yoshihiko NAKAMURA^{*6}

13-61, Shikanodai Higashi 1-chome, Ikoma city, Nara, 630-0112 Japan

This paper deals with a comparison of three different types of double leg circles performed by three gymnasts. The differences were examined between circumferential speeds, between heights of gravitational center, and between angular velocities of hip rotational motion around the body axis. We obtained three-dimensional position data using 35 markers attached to the gymnast's body and detected muscle activities using 24 sensors. As a result we conclude as follows: (1) In order to perform graceful double leg circles, a quick hip rotational motion is required. (2) This performance is associated with the acceleration of hip rotational motion in advance of the start of the hip rotation. (3) It is suggested that the muscle activities not only of the upper part but also the lower part of the body are required for the performance.

Key Words : Gymnastics, Pommel horse, Double leg circle, Motion analysis

1. 緒 言

あん馬の基本的技術である両脚旋回について、筆者らは2選手の異なる旋回形態3種を比較し、その形態における筋活動度の差異を論じた。⁽¹⁾その後、かかる分野では、優れた実施能力を有する特定の選手を対象とし、両脚旋回においてシミュレーションと実測データを対比し、筋肉の使い方に関して、シミュレーションの有効性を述べた報告がなされている。⁽²⁾また、力学的な観点からの報告としては、藤原らの報告がある。⁽³⁾

筆者らは、今回、両脚旋回において、実施形態（早さ、高さ、切返しのかなし）の異なる3選手を実験にて比較し、それらの形態における共通点と差異点を明らかにした。また、とりわけ、旋回運動において重要な役割を演じる、いわゆる”切返し動作”についての検討を行った。これにより、“切返し”のこなしに関する多様性の理解と、雄大な旋回を実施するにあたっての示唆を得ることができた。

2. 実験装置と方法

実験用のあん馬は、通常の試合で使用されるものを用いた。なお、床からポメル上部までの高さは1200mmである。被験者は、あん馬の両脚旋回運動において、主に”切返し動作”の異なる3選手を対象とした。それぞれをG1、G2、G3選手と呼ぶ。3選手の熟練度は、中程度である。

各選手は両脚旋回を3試技行い、各試技では連続して10回転行っている。解析は、それぞれの選手の3試技

^{*1} 正員、洛翔体操会（〒630-0112 奈良県生駒市鹿ノ台東1丁目13-61）

^{*2} 正員、立命館大学総合科学技術研究機構

^{*3} 岐阜大学 教育学部

^{*4} 東京大学大学院 情報理工学系研究科

^{*5} 正員、東京大学大学院 情報理工学系研究科

^{*6} 正員、東京大学 情報理工学系研究科

E-mail:nawa-moto@kcn.jp

から、良好な実施ができたものを1試技選び、さらにその試技中における10回の旋回のうちでも、その選手の比較的的平均的な実施であると思われるもの1回を代表的に抽出し、解析を行った。

モーションキャプチャの実験では下記の測定点を使用した。

- ・マーカ 35点 (手首、肩、胸、腰、つま先等)
- ・筋電位 24点 (三角筋、大胸筋、僧帽筋、広背筋、上腕三頭筋、上腕二等筋、外腹斜筋、大内転筋、大腿直筋、大腿二頭筋) (それぞれ左右)

マーカは、あん馬上方の周囲に設置された10台のビデオカメラを用い200コマ/秒で撮影した。筋電位測定のサンプリング速度は1kHzであり、ビデオ映像と筋電位測定とは同期している。また、筋活動度は、5ms毎に筋電位を積分した値とし、各筋肉のMVC (最大自発筋収縮値) で規準化した。

また、重心については、下記のようにして求めた。まず、被験者の身長、体重をもとに、既知の身体部位の質量比を利用して質量分布を概算する。その後、マーカから得られた人体の姿勢情報をもとに逆運動学計算を行い、この結果と上記の質量分布とを用いて逆動力学計算により求めた。

用語と記号

- ・座標系

あん馬の長軸方向をX軸、短軸方向をY軸、鉛直方向をZ軸とし、原点は床面あん馬中央とする。あん馬に向かって右手方向をX軸の正の方向、奥行き方向をY軸の正の方向とする。

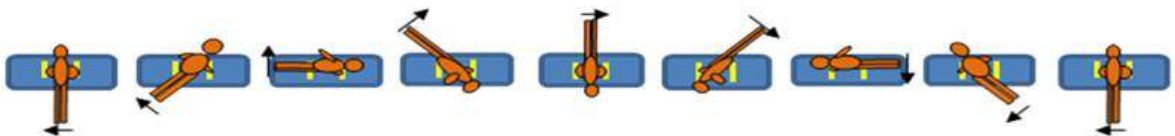
- ・記号 t : 時間[ms]
- U_t : つま先の接線方向速度[m/s]
- θ : 体軸まわりの腰回転角度 (頭の方から見て、反時計方向回転を正の方向とする。) [°]
 $\theta = 0^\circ$ とは、正面支持姿勢に近い状態で、左右の腰の高さの差が0を意味する。
- ω : 体軸周りの腰回転における角速度[°/s]

- ・筋肉名称の接頭辞

Rは被験者自身の右側、Lは左側を示す。

- ・あん馬の旋回局面の呼称は図1に示す記号を用いる。

上段に示したP1～(P1)は、図のようなつま先位置に対応したものである。ここで、P1～P5までを“入り半周”、P5～(P1)までを“抜き半周”と称する。



P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	(P1)
tiptoe position								
a ~ b				c ~ d				
both hand grasp position								
A	B		C		D		(A)	
hip twist angle (θ) position								

Fig.1 Symbols for each phase of circle motion corresponding to various evaluation parameters

また、図1の中段に示した記号は、両手がポメルを把持している区間を表すものである。a～bが正面姿勢での両手把持、c～dが背面姿勢での両手把持を表す。なお、便宜上、P1の下にa～bを、P5の下にc～dを記載したが、その対応が比較的近いだけで、必ずしも正確に対応関係が成り立つものではない。

さらに、また、図1の下段に示した記号(A～(A))は、身体を中心軸すなわち体軸の周りに腰回転角度(θ)が 90° 毎に変化する局面を表す。Aが $\theta = 0^\circ$ 、Cが $\theta = 180^\circ$ であり、いずれも、腰が水平状態となる位置である。また、Bは、 $\theta = 90^\circ$ 、Dは、 $\theta = 270^\circ$ であり、腰が垂直状態になる位置である。この場合も、便宜上、P1、P3、P5、P7、(P1)の下にA、B、C、D、(A)を記載したが、必ずしもそのような対応関係が成り立つものではない。

体操の現場で使われている、いわゆる“切返し”は、その区間が曖昧な面もあるが、ここでは、CからAにいたる区間での腰のひねり動作を”切返し”区間と称する。実際の腰のひねり動作はC以前から連続しているが便宜上そのように定める。この場合、とりわけ、C～Dの区間は、”切返し”の前半部分として重要である。

3. モーションキャプチャによる運動解析

3.1 旋回動作の比較

表1に3人の選手の旋回周期(T)を示す。G3選手が最も早く、ついでG2選手、G1選手の順となっている。G1選手の周期を基準とすると、G2選手は約3%早く、さらにG3選手は約7%早い周期となっている。

図2に、1回の旋回における、3選手の重心の上下移動を示す。データは、いずれも正面向きで、両手を握り始めた状態(a)からの1周分を示している。縦軸は重心の床面からの位置である。それぞれの選手は、多少、腕の長さも異なるが、重心位置の比較の参考として床面から1500mmの位置に線を引いてある。

これから分かるように、G3選手は、他の選手より高い重心位置で、旋回を行っている。3選手ともにc～dの背面支持の状態では速度が遅くなっているが、G3選手は、その程度が小さい状態にとどまっている。

図3に、3人の選手をつま先の動きを水平面に投影した軌跡を示す。G1、G3の選手はG2選手と旋回の回転方向が逆であるが、比較を容易にするため、便宜上、同一の回転方向となるように左右を反転して表示している。

図3において、a～bは、正面姿勢における両手把持の期間を、また、c～dは、背面姿勢における両手把持の期間を示している。この両手把持の区間であるa～b間、およびb～c間の間隔は、G1→G2→G3の順に短くなっている。これは、図2の時間経過を見ても、同じ傾向である。すなわち、スピードが速く、重心位置の高い旋回になるほど、旋回は、片手で実施する運動としての特質を有してくる。

Table 1 Circle period of 3 gymnasts

item gymnast	Period T [ms]	ratio
G1	945	1
G2	920	0.97
G3	880	0.93

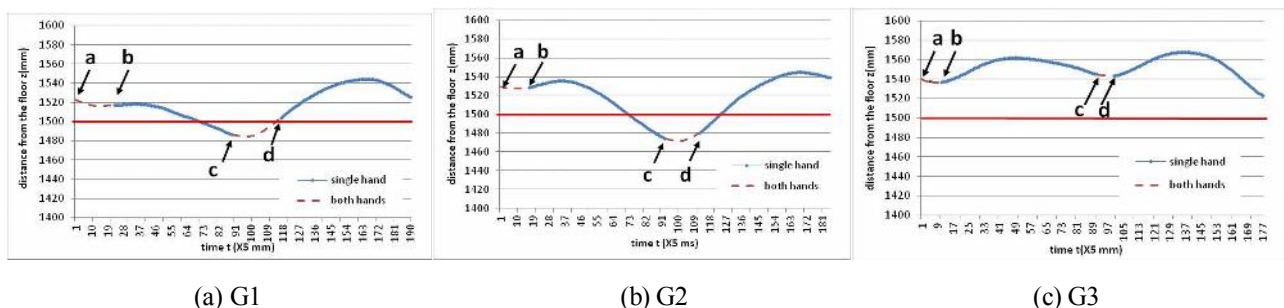
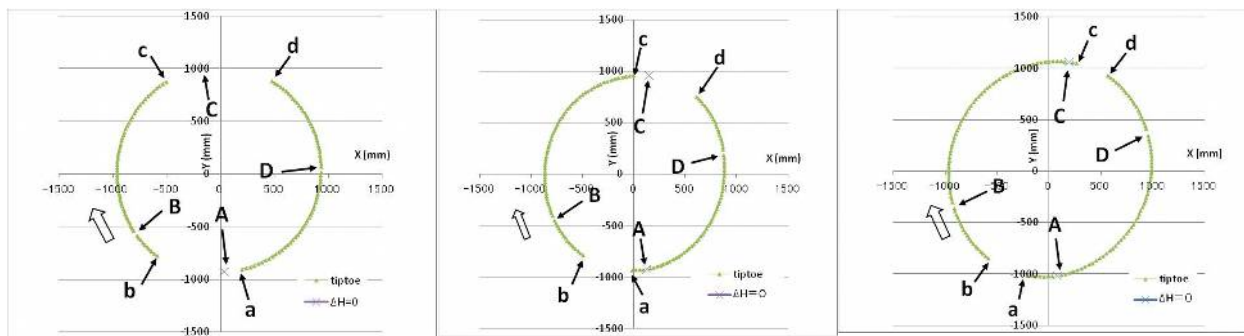


Fig.2 Vertical movement of gravitational center



(a) G1

(b) G2

(c) G3

Fig.3 Trajectories of tiptoe

図3より、a点（正面姿勢で、両手把持を開始する点）は、G1選手→G2選手→G3選手（以降、便宜上G1→G2→G3と表記する。）の順に、旋回の回転方向（時計方向）への位相ずれを生じている。これは、表1に示したようにG1→G2→G3と旋回の周期が短くなり、回転速度が速くなること、また、図2に示したように、重心の位置も、ほぼ、この順に高くなるため、両手把持の状態になるタイミングが必然的に遅くなるためと思われる。すなわち、重心位置が高くなると、片手把持から、両手把持に移る際、ポメルから離れている手の移動距離（＝移動時間）が長くなり、また、旋回の回転速度が早くなると、その間の身体の回転もより進むため、このような状況に至るものと思われる。

同様の位相ずれは、c点（背面姿勢で、両手把持を開始する点）においても生じている。これも上記と同じ理由によるものと思われる。

したがって、スピードが速く、重心位置の高い旋回になるほど、正面姿勢、背面姿勢を問わず、両手把持を開始する位置は、旋回の回転方向にずれることになる。

3・2 切返し動作の比較

3・2・1 つま先軌跡における切返しの位置

次に、頭部と足先を結ぶ方向の体軸の回転に伴う“切返し”について考える。“切返し”における腰のひねり動作状況を、図3にA、B、C、Dの記号で表示している。A、B、C、Dは、左右の腰の高さの差（ $\Delta H =$ （左腰の高さ）－（右腰の高さ））の値に対応する位置を示しており、A、Cは、それぞれ、正面姿勢、背面姿勢において、 $\Delta H = 0$ 、すなわち、腰が水平になる状態を示している。また、Bは ΔH の値が最大になる位置、Dは、 ΔH の値が最小になる位置である。いずれも、腰が床面に対して、直角になる位置で、Bは左の腰が上側、Dは、右の腰が上側の状態である。

まず、腰が水平状態（ $\Delta H = 0$ ）になる、A点（正面姿勢）については、3選手ともに、ほぼP1点（正面姿勢におけるつま先の位置）近傍で変わらない。

同じく腰が水平状態（ $\Delta H = 0$ ）になるC点（背面姿勢）については、P5点（背面姿勢におけるつま先の位置）からG1、G2→G3の順で回転方向への若干のずれが生じている。この位相ずれは、上述したのと同様の理由であると思われる。また、B点（ ΔH が最大）については、G1→G2→G3の順で、回転方向への顕著なずれが認められる。これも、上述したのと同じ理由によるものである。

しかしながら、D点（ ΔH が最小）については、G1→G2→G3の順で回転方向と逆の方向へずれている。これは、B、C点の傾向と反対の方向であり、大きく異なる点である。D点は腰が背面姿勢で水平状態にあるC点から、再び正面姿勢で水平状態になるA点にいたるいわゆる”切返し”における、姿勢としての中点である。

今、G1選手のD点を基準にして考えると、G2選手は、意識的にこれよりも前の位置で、腰のひねりを実施しようとしており、G3選手はさらにこれよりも前の位置で、腰のひねりを実施しようとしているということになる。D点の前の点であるC点がG1、G2→G3の順で回転方向へずれていることを考えると、CとDの位置

関係は、G 1→G 2→G 3の順に一層接近していることになる。この部分は、いわゆる”切返し”（CからAに至る間）の前半における重要な局面であり、この間の身のこなしが重要になると思われる。

3・2・2 つま先速度との関係

図4はつま先の速度変化を示したものである。ピークは、いずれも、両手把持(正面姿勢、背面姿勢) 近傍であり、腰が水平状態になるA、C点近傍である。しかし、詳細にみると、ピークはG 1→G 2→G 3の順に、徐々に両手把持区間 a～b (正面姿勢)、あるいは、c～d (背面姿勢) から前方に移動しており、G 3選手にいたっては、この区間から外れたところに位置している。

“切返し”に関連して考察すると、C～Dが“切返し”の前半部分であるが、この区間では、3選手ともに減速域となっている。つま先位置の回転(身体全体の回転)でいえば、“切返し”に入るまでに加速は完了しているということになる。この傾向はG 1→G 2→G 3の順に早くなっており、G 3選手では、C点(腰が水平)よりもかなり早めに、加速が完了している。

なお、増速の開始は、3選手ともに、B、D(腰が垂直)の位置となっている。

3・2・3 体軸回転の時間的变化

これまでの章では、腰のひねりを空間情報としてとらえて検討を加えたが、次に、時間的变化に対しての比較検討を行う。

旋回運動は、つま先が円運動をして1周する間に、体軸の周りに一回転する運動である。今、身体が正面姿勢をとる位置からの体軸周りの角度を θ とした時の θ の時間変化を調べた。なお、つま先の円運動の回転方向と体軸まわりの回転方向とは、反対方向になる。

図5において、横軸は、経過時間(t)をそれぞれの選手の周期(T)で規準化した無次元化時間であり、縦軸は体軸周りの回転角度である。

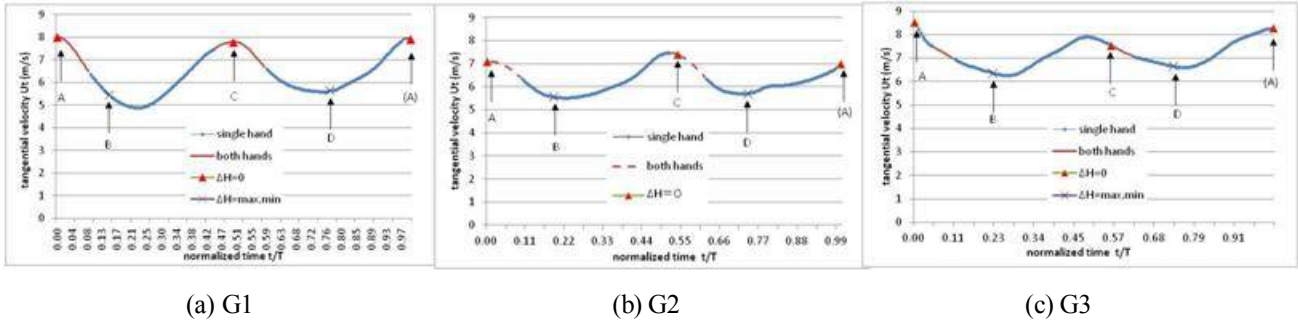


Fig.4 Tangential velocity of tiptoe on horizontal plane

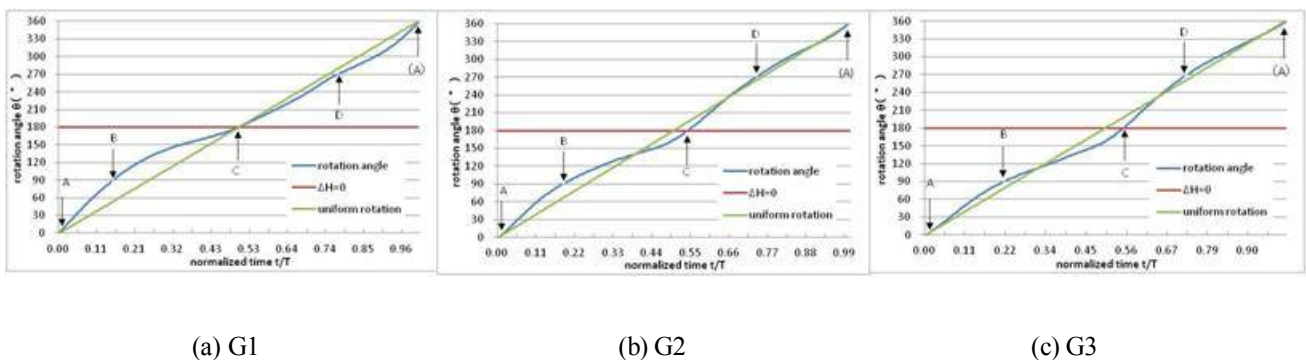


Fig.5 Time history of rotation angle around body axis

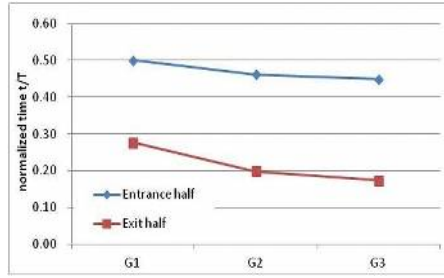


Fig.6 Time required between different two phases

図中に示した直線は、等速度回転としたときのものである。いずれの選手も等速度回転ではなく、時間軸に対して角度の増加、減少勾配を有している。G1選手では概略的に見て、増加減少が2回、G2、G3選手においては、3回生じている。

図において、A~Cは、入り半周、C~(A)は、抜き半周である。また、C~Dは、抜き半周の前半部分である。

これらの区間の所要時間をグラフにしたのが、図6である。図6において、抜き半周(C~A)の所要時間は、G1→G2→G3の順に短くなっている。また、抜き半周の前半部分である”切返し”前半(C~D)の所要時間は同じ順に短くなっており、その減少の傾向は、抜き半周(C~A)全体の減少傾向より著しい。

これは、図3で示したC~D間の動作を時間的な観点から定量的に把握したものである。G1→G2→G3の順に、回転速度が速くなり、重心も上方へ移動するという条件のもとでは、C~D間の区間が短縮傾向となるのは、既にみたとおりであるが、それに加えて、図6に示したように、より短時間でこの区間(切返し前半)を推移しなければならないということが分かる。

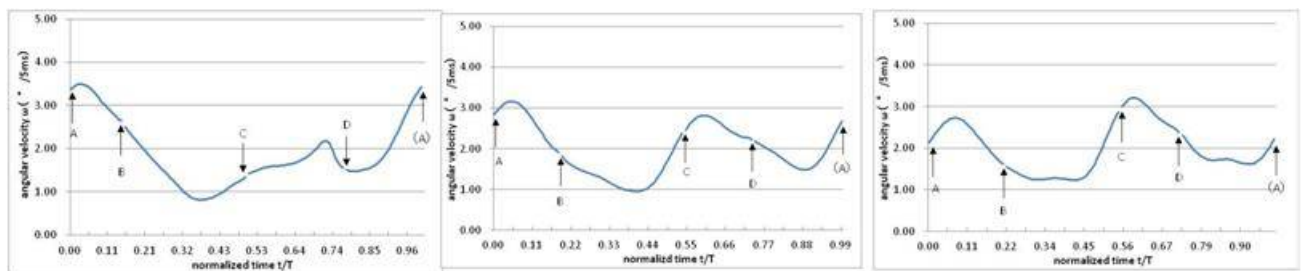
3・2・4 体軸回転の角速度変化

図5の角度の時間差分をとり、体軸周りの回転角速度(ω)を調べたのが、図6である。図6において、横軸は前項と同様の無次元化時間、縦軸は体軸周りの回転角速度である。

3選手を比較すると、いずれの場合も程度の差こそあれ、2か所のピークと2か所のボトムを有している。ただ、G1選手の場合は、後半のピークは他の選手ほど顕著ではない。G2、G3選手は、顕著なピークとボトムを有し、G2選手では前半のピークが後半より高いが、G3選手では、この傾向が反対になっている。

3選手ともに、A~Bの間でピーク、B~C間でボトム、その後、C~D間でピーク、D~A間でボトムということになる。すなわち回転1周のうちに、腰は、体軸のまわりに1回転するが、その間、体軸周りの回転角速度に関して、2回の加速と、2回の減速が行われる。この2回の加速域は、ともに、A、またはCから始まるのではなく、それよりも早い時期から始まり、その結果、A、Cの少し後にピークに達することになる。

また、G1、G2選手と比べたときのG3選手の特徴の一つは、ボトムで下がりきることなく、一定の値(定速度)を維持していることである。

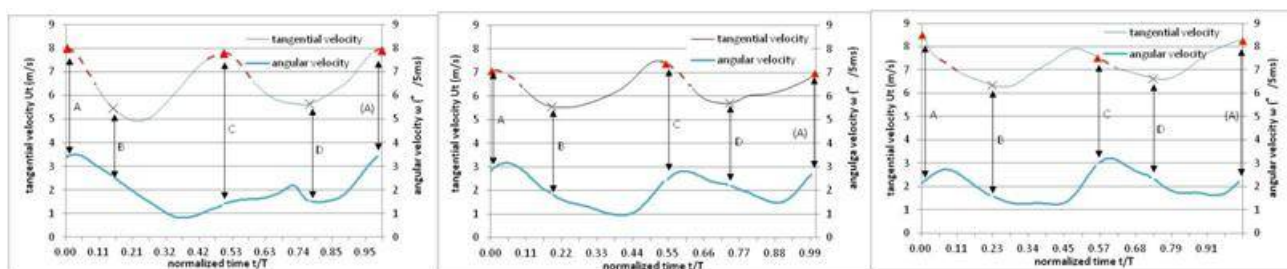


(a) G1

(b) G2

(c) G3

Fig.7 Time history of angular velocity around body axis



(a) G1

(b) G2

(c) G3

Fig.8 Time history of tiptoe velocity and angular velocity around body axis

“切返し”の前半は、C～Dの区間であるが、体軸回転の加速はそれ以前から始まっており、この部分を含めた評価が必要となる。この加速の勾配に関しては、G1選手は緩やかであるが、G2、G3選手は、急であり、G1選手よりも意識的に体軸周りにローリングを行っているとも考えられる。また、さらにその前の状態までさかのぼると、G2選手とG3選手にも差があり、G2選手は、一旦、ボトムにまで落ちたのち体軸の加速が行われるが、G3選手はボトムのような状態に落ちることなく、一定速度を維持した状態で、加速に転じている。

このように見えてくると、単にC～Dの区間だけでなく、そこに至る経過も含めた“切返し”のこなしには多様なこなし方のあることがわかる。G3選手が、3選手の中では、早く、重心位置の高い旋回をしているため、この選手の“切返し”のこなしは、雄大な旋回を実施するにあたっての示唆を与えるものと思われる。

先に述べた、つま先の速度と、体軸回転の角速度の関係を見るために、両者を同じグラフに示したものが、図8である。これにより、いずれの選手においても、つま先の加速が先行し、その後、体軸回転の加速が行われるという順序になっていることが分かる。

4. “切返し”における筋活動度

図9に、3選手の“切返し”の部分（C～(A)）における筋活動度の時系列推移を示す。X軸は時間軸であり、各選手ともに、左端がC点（背面姿勢で腰が水平）に対応し、右端が（A）点（正面姿勢で腰が水平）に対応する。また、中間に示した縦線はD点（腰が垂直）に対応する。縦軸は筋活動度を示している。

“切返し”は図1において、C点から（A）点に至る区間であり、左手支持が主体になるため、左側筋肉に着目し、そのデータを図9に示している。なお、図1と逆方向の旋回を実施しているG1、G3選手については、G2選手とは、筋肉の使い方が逆になるため、右側筋肉のデータを示している。

また、ここに示したデータは、測定したデータのうち、筋活動度のピークが0.5以上のものを抽出している。

まず、C～（A）に至る全体的な傾向は、下記のような内容になる。

G1選手：全体として、筋活動度のレベルが低く、筋肉の使用は主に前半（C～D）部分である。

G2選手：筋活動度のレベルは高く、多くの筋肉を使用しており、その、大半は前半（C～D）部分である。

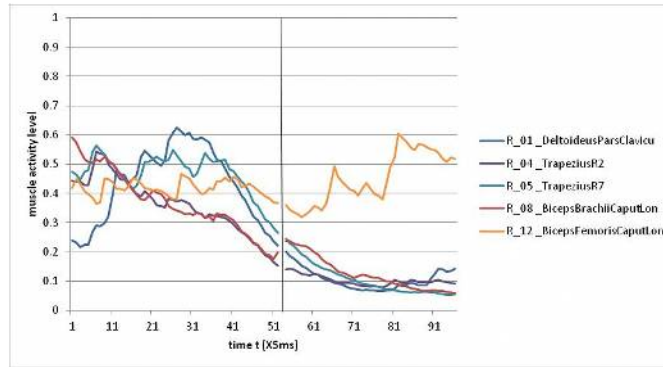
G3選手：G2選手ほどの筋活動度レベルのピーク値を上げることは、していないが、全期間にわたり、筋活動度を落としきることなく維持している。また、“切返し”前半から、後半にかけて、さまざまな筋肉を連続的に使用している。

使用されている主な筋肉とその使われ方は、下記のようなになる。

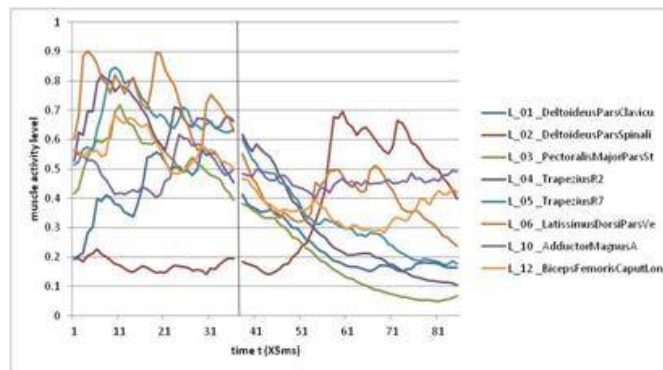
G1選手：三角筋（鎖骨部）が主体的である。

G2選手：広背筋、僧帽筋（中部、下部）が主に使われている。D～Aで立ちあがってる顕著な筋は三角筋（脊椎部）である。

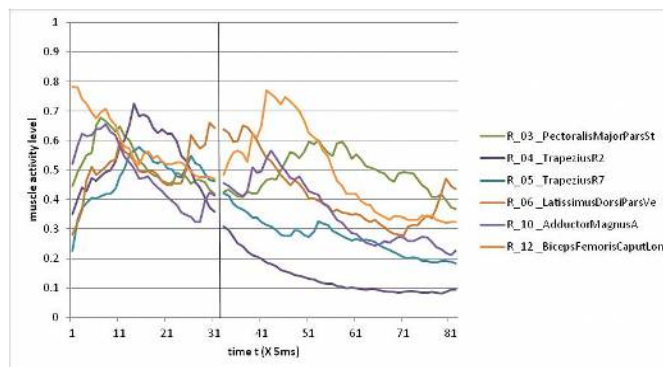
G3選手：大腿二頭筋、大内転筋、大胸筋、僧帽筋（中部、下部）、広背筋が次々と立ち上がっている。



(a) G1



(b) G2



(c) G3

Fig.9 Time history of muscle activity levels in phase C ~ (A)

3. 2. 4項で、3選手は3者3様の“切返し”のこなしをしていることが、データを通して明らかになったが、それに対応するかの様に、筋肉の使い方もさまざまであることがわかる。ただ、G1、G2選手が、比較的上半身の筋肉に比重が置かれているのに対し、G3選手は、下半身にも比重が置かれている。これは体幹の締めにも関係があることであるかも知れない。また、3. 2. 4項で述べた体軸周りの回転にも関与していると思われる。

5. 結論

両脚旋回の実施形態（早さ、重心の高さ、“切返し”のこなし）の異なる3選手についての解析を行い以下の結論を得た。

- (1) 早くて、重心の高い旋回は、両手把持期間が短くなり、より片手運動に近い実施形態となる。

- (2) この運動を実施するためには、腰を水平状態から垂直状態に変化させる“切返し”前半における短い回転区間での短時間におけるひねり動作が必要とされる。
- (3) 上記の動作は、“切返し”に先行する体軸まわりの回転の加速により促される。
- (4) この加速を実現するためには、上半身の筋肉のみならず、下半身の筋肉の活動が必要と思われる。

謝 辞

本報告のあん馬の旋回運動解明に関する研究は、二つ目の公表ではありますが、これは、体操界への貢献という強い思いを抱いてこの取組みの端緒を作って頂いた元岡山県立短期大学教授 敬後藤清志氏によるところが非常に大きいものであります。生前、並々ならぬご尽力を頂きましたことに心より感謝申し上げます。

実験に際しましては、データ測定に熱心にご協力頂いた東京大学 中村・高野研究室の皆様方に厚く感謝致します。また、実験機材のあん馬につきましては、快くご都合をつけて頂いた東京大学体操部 真船文隆部長を始め、関係部員の方々に厚くお御礼申し上げます。

文 献

- (1) 名和基之, 西脇 一字, 中村 仁彦, 池上洋介, 鮎澤 光, 後藤清志, 後藤大輔, “あん馬運動の解析”, 日本機械学会 スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011 講演論文集, (2011), pp. 494-499.
- (2) Jing - guang Qian, Yang Su, Ya - wei Song, Ye Qiang, Songning Zhang, “A Comparison of a Multi - body Model and 3D Kinematics and EMG of Double-leg on Pommel Horse”, *Journal of Human Kinetics*, Vol. 31, (2012), pp. 45-53.
- (3) 藤原敏行, 淵本隆文, “あん馬における両足旋回の構造と技術に関する力学的分析、バイオメカニクス研究, Vol .10、No.1(2006), pp. 27-41.