［原著論文］

マット運動における伸膝前転のメカニズムに関するバイオメカニクス的研究

小河原慶太＊1・長尾秀行＊2・小西康仁＊3・宮崎彰吾＊4・山田　洋＊1

Study of biomechanics for mechanisms of“Forward roll with straight legs to stand”on the Floor Exercise in Gymnastics

by

Keita Ogawara, Hideyuki Nagao, Yasuhito Konishi,
Shogo Miyazaki and Hiroshi Yamada

Abstract

The purpose of this study was to investigate the mechanisms of forward roll with straight legs to stand in gymnastics using biomechanical methods to develop fundamental coaching knowledge. Twenty-five male subjects participated in this study.

They were divided into three groups：expert, semi-expert, and failure. In this experiment, coordinates of markers attached to participants' bodies and ground reaction force to push by hands were measured.

Results obtained were as follows：

1）The maximum rotation angular velocity of the failure group was smaller than that of the expert and semi-expert groups. This suggests that the maximum rotation angular velocity was an important factor in determining the success or failure of a forward roll with straight legs to stand.

2）Significant positive correlation was found between the hip joint flexion angular velocity and the maximum rotation angular velocity suggesting that rapid hip joint flexion motion was necessary to increase the maximum rotation angular velocity.

3）The impulse acting on the opposite direction and the maximum rotation angular velocity were positively correlated. Thus increasing the impulse acting on the opposite direction resulted in a decrease in the rotation angular velocity.

In conclusion, the present study suggests that it is possible to get a large rotation velocity by not only hip joint flexion but also effective pushing or pressing.

Ⅰ．はじめに

今，体育系大学・学部で教職を目指す学生の多くは器械運動が苦手なようである。学習指導要領によると器械運動の授業では生徒・児童が合理的な技術ポイントを互いに学習し，技術系統に沿っ

＊1　東海大学体育学部体育学科　　＊2　東海大学大学院総合理工学研究科博士課程
＊3　東海大学体育学部非常勤　　＊4　筑波大学大学院人間総合科学研究科博士後期課程



図１　伸膝前転の運動経過と局面構造

て練習を工夫しながら学んで行くことが求められているが，教職を希望する大学生ですら苦手意識が先行し，うわべの指導法を暗記するばかりで，自らその裏付けとなる経験をしたがらない傾向は極めて問題である。こうした事態が続けば，付け焼き刃で教員採用対策の実技課題をクリアするのみで，めでたく教員となったとしても，より良い教育の実践には遠く及ばない。教員養成課程では知識や指導理論の獲得だけではなく，実際に自ら「できる」ことを目指して，科学的知見に基づいた学習をさせることが重要であろう。

本研究ではマット運動の伸膝前転を取り上げる。伸膝前転は「前転の終末局面の形態に変化をもたせたもの」[1)]つまり，膝関節を伸展させたまま前転をして起き上がるという技である。文部科学省の高等学校学習指導要領解説[2)]によれば，伸膝前転はマット運動の回転系接転技群前転グループの“発展技”と位置づけられ，その難易度は高いとされる。

これまでの伸膝前転に関する研究を大別すると３つに分類することができる。まず，第一は伸膝前転の習熟過程に関する研究[3–7)]である。これは主に未習得者の運動経過変化を運動形態学的に捉えて習得前後で比較するなどして考察するものである。次は指導法に関する研究である[8–10)]。これは伸膝前転の習得を目的に補助具や段差・傾斜の利用などを提案し，その方法が指導法や練習法として有効であるかどうかを検証する内容である。最後は伸膝前転の技術の解明に関する研究[11–14)]である。これまでの研究では伸膝前転が出来る者と出来ない者のフォームの分析をして，その技術を解明しようとする研究が多い。

木下は伸膝前転に関して「すでに先行研究により，その技術的構成要素は構造体系論的に詳細に検討されており，伝導技術の重要性や合理的な前屈動作の仕方などが指摘されている。」[7)]と述べているが，先行研究のいずれもが主観的な運動観察に基づく運動学的あるいは運動形態学的な手法を用いることが多く定性的な質的研究にとどまることが多い。

伸膝前転は図１に示すような運動経過を示し，「頭越え局面」，「背面の接触局面」，「立ち上がり局面」の三局面からなる[15)]。本間はこの三局面のうち主要課題である伸膝での「立ち上がり局面」が重要であると述べている[15)]。

さらに金子[16)]は離れた脚が頭を越える「頭越え局面」までに腰角を広げる“脚の投げ出し技術”が前転の回転加速を得るために必要であり，その後の「背面の接触局面」では腰角を広げたまま背部を順次接触させ，脚がマットに着く直前に急激なブレーキをかける“伝導技術”，そして「立ち上がり局面」では前方への回転エネルギーを上方へ切り換える“立ち上がり技術”が必要であると述べている。つまり，伸膝前転では立ち上がり局面の立ち上がろうとする“勢い”をいかに獲得するかが極めて重要な運動課題といえる。

また，立ち上がろうとする“勢い”を獲得するもう一つの手段に手押し動作がある。これは足の着床前後の時点で両手をマットに着き，突き放すように身体を上前方に押し上げる動作のことである。一般の指導書などではこの“手の着き（突き）方”を技のポイントと指摘することも多い[17–20)]が，実際に手がマットを押す際の床反力を計測した研究は見あたらない。

そこで，本研究ではバイオメカニクス的手法を用いてマット運動の伸膝前転のメカニズムを解明し，指導上の基礎的知見を得ることを目的とした。

Ⅱ．方法

1．被験者

被験者は体育系学部に所属する健康な男性大学生 25 名であった。運動経過において終始完全な膝関節の伸展が認められ，その後直立姿勢になれた 9 名を熟練群，運動経過において終始膝関節の伸展が認められたものの，立ち上がり局面の回転不足により直立姿勢に至らず，惜しくも立ち上がることをできなかった者 6 名を未熟練群とした。また，前転中の膝関節伸展位が明確でなく，起き上がることがまったく出来なかった者 10 名を不成立群とした。なお，群分けの判定においては体操競技経験 10 年以上で日本体操協会公認審判員経験者 3 名が行った。この群分けされた被験者の年齢，身長及，体重の他，柔軟性の標準的な評価テストである長座体前屈[21]の成績には群間に有意な差は認められなかった（表 1）。

被験者には実験に先立って研究目的，実験内容，データの取り扱いなどを説明し，自らの意思によっていつでも中止できることを伝え，口頭および書面にて協力の同意を得た。なお，本研究は東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の承認を得た。

2．実験課題

本研究の被験者は体育系学部の学生であったことから，伸膝前転が“膝を伸ばしたまま前転し，起き上がる。”という運動課題であることを全員が理解していたため，実験前に示範や助言などは一切行わなかった。被験者には助走などの予備動作を用いずに，静止した直立姿勢からその場にしゃがみ込みながら前方に着手し，その後は出来る限り膝関節を伸展させたまま前転し，直立姿勢になるように指示をした。なお，実施に際しては一般的な 10 分程度の準備運動後に文部科学省新体力テストに準拠して長座体前屈の測定をし，その後，伸膝前転を 5 回程度練習させてから計測を行った。

表 1　被験者のプロフィール

技の成否	熟練群 n＝9 成　立	未熟練群 n＝6 不成立	不成立群 n＝10 不成立
年齢[歳]	21.9±1.69	22.2±0.41	21.5±1.51
身長[m]	1.70±0.05	1.71±0.04	1.74±0.03
体重[kg]	62.1±5.13	62.7±3.12	65.1±7.40
長座体前屈[m]	0.55±0.07	0.45±0.05	0.47±0.07

平均値 ±SD

3．測定方法

1）動作の計測

動作の計測には，光学式モーションキャプチャシステム（Mac3D, Motion Analysis 社製）を用いて行った。撮影の際には光学式赤外線カメラ（Raptor-E，1,280×1,024 pixel，130 万画素）を 8 台使用し，フレームレートは 200 fps，シャッタースピードは 1/1000 s で撮影した。被験者の身体表面および着衣に直径 12 mm の反射マーカーを図 2 のように計 42 個を貼付した。

2）床反力の計測

伸膝前転時の着手位置に左右 1 台ずつフォースプレート（FP6090-15 および FP4060-15，Bertec 社製）を設置し床反力を計測した。なお，フォースプレートからのデータは A/D 変換装置を介して，モーションキャプチャシステムと同期し，サ

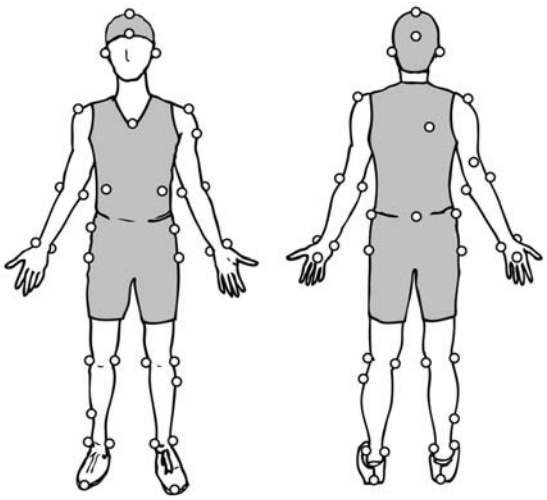

図 2　反射マーカー貼付位置

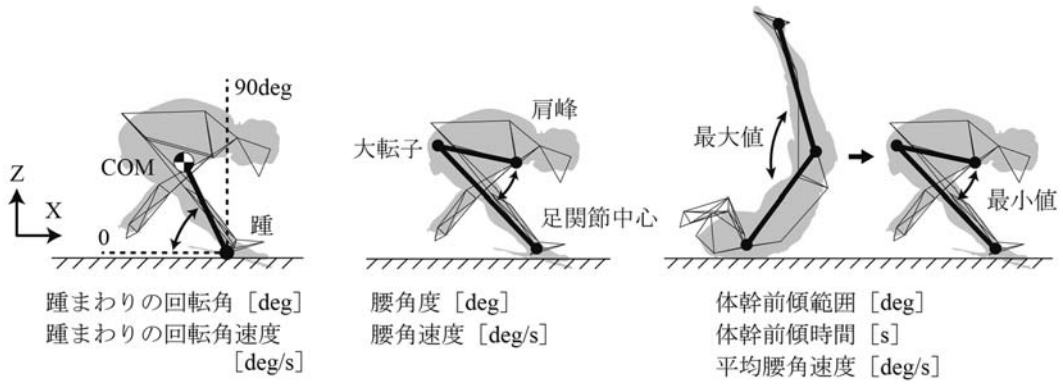

図 3　角度定義とキネマティクス分析項目

表 2　タイミングの定義

項 目	定　義
足離床	つま先速度が 0.1m/s 以上になった時点
踵着床	踵位置が 0.01m 未満の高さになった時点
手着床	床反力鉛直成分が 1.0N 以上になった時点
手離床	床反力鉛直成分が 1.0N 以上になった時点
動作終了	踵位置と身体合成重心位置の線分が地面に対して直角となった時点

ンプリング周波数 1000 Hz で記録した。

4. 分析方法

計測した身体計測点の 3 次元位置座標データをもとに阿江ら[22]の身体部分慣性係数を用いて身体合成重心位置を求めた。また，算出した運動学的データと床反力データから伸膝前転中に出現する動作時点を表 2 のよう定義して求めた。分析範囲は足離床時点から動作終了時点とした。なお，各データは Butterworth Low pass Filter（位置座標：cut-off 8-11 Hz，床反力：cut-off 20 Hz）を用いて平滑化した。

5. 分析項目

モーションキャプチャシステムから得られた運動学的データから図 3 のように関節角度を定義し，キネマティクス分析項目とした。具体的には踵－身体合成重心の線分と水平軸の成す角を「踵まわりの回転角（deg)」とし，その角速度が「踵まわりの回転角速度（deg/s)」である。足関節中心位置-大転子および大転子-肩峰の各線分の成す角を「腰角度（deg)」とし，その角速度が「腰角速度（deg/s)」である。また，前転中の腰角度の最大値（最大腰角度）から最小値（最小腰角度）に至るまでの可動範囲を「体幹前傾範囲（deg)」，腰角度の最大値から最小値に至るまでの所要時間を「体幹前傾時間（s)」，体幹前傾範囲を体幹前傾時間で除して「平均腰角速度（deg/s)」を算出した。

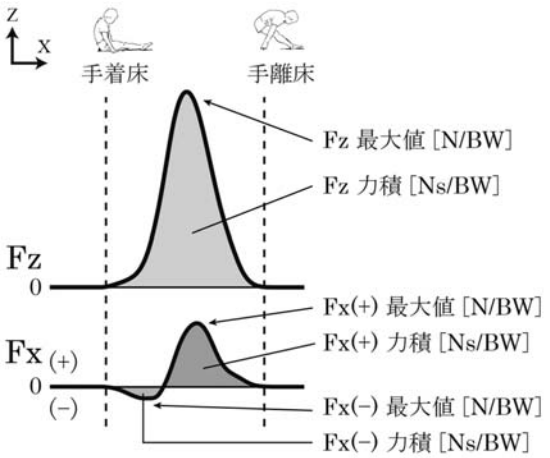

図 4　キネティクス分析項目の定義

また，床反力データはキネティクス分析項目として図 4 に示すように左右の手が地面を押す際の体重あたりの最大値（N/BW，左右平均値)，力積（Ns/BW，左右平均値）を求めた。鉛直方向の力を Fz，水平方向の力を Fx とした。Fx にお

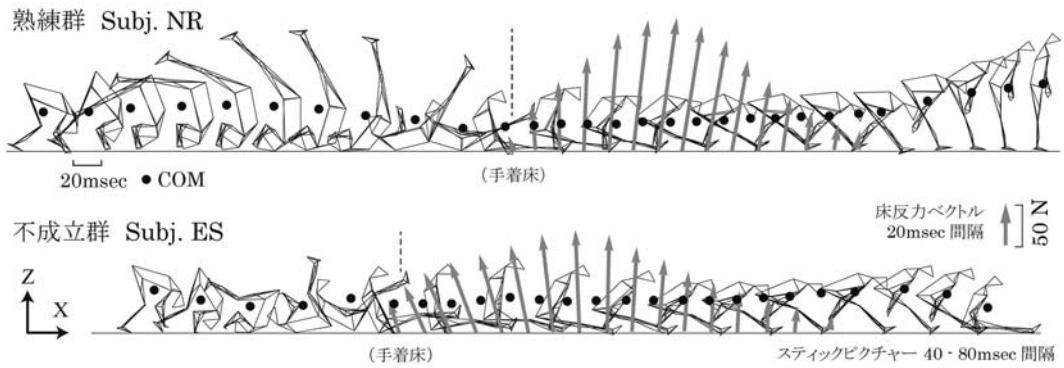

図 5　伸膝前転のスティックピクチャーと床反力ベクトル（代表例）

いては前転の進行方向を正の値 Fx(+)，反対方向を負の値を Fx(-)とした。

6. 統計処理

群間の平均値の比較においては一元配置分散分析を行い，有意差が認められた場合は bonferroni 法による多重比較検定を行った。また，相関分析においてはピアソンの相関係数を算出した。なお，有意水準は 5%とし，統計解析プログラム R（3.0.2）を用いて行った。

Ⅲ．結果

図 5 は実験によって得られてデータをもとに作成した運動経過のスティックピクチャーと床反力ベクトル（左右の平均値）の典型例である。

図 6 は伸膝前転の立ち上がり局面に生じた最大の踵まわり回転角速度（以下，最大回転角速度）の分散分析結果である。熟練群，未熟練群および不成立群の三群間に有意な差が認められた（$p<0.05$）。また，多重比較検定の結果，熟練群と未熟練群に有意差は認められないものの，不成立群とその他の群には 5%水準で有意差が認められた。つまり，不成立群の最大回転角速度は熟練群，未熟練群に比べて低いことが明らかになった。

次に，図 7 は立ち上がり局面に生じた踵まわりの最大回転角速度と胸腰部の前屈と股関節の屈曲に関するキネマティクス分析項目との相関分析結果（n＝25）である。最大腰角度，体幹前傾範囲，体幹前傾時間と踵まわりの最大回転角速度の間に

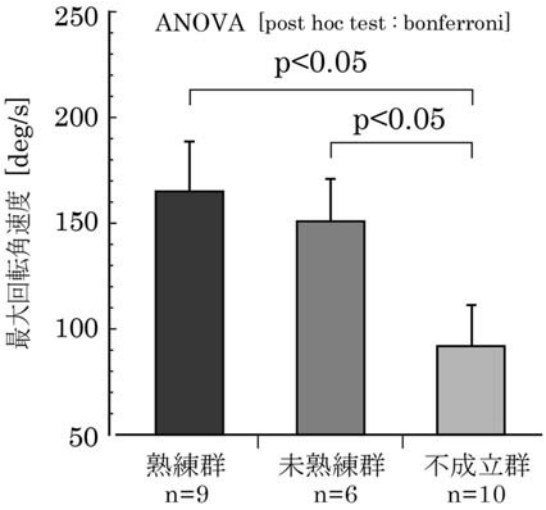

図 6　踵まわりの最大回転角速度

は有意な相関関係は認められないものの，最小腰角度（$r=-0.39$，$p<0.05$）と踵まわりの最大回転角速度の間には負の相関関係，最大腰角速度（$r=0.44$，$p<0.05$），平均腰角速度（$r=0.54$，$p<0.05$）と踵まわりの最大回転角速度の間には正の相関関係が認められた。

図 8 には手で床を押す際に生じた床反力データから求めたキネティクス分析項目と踵まわりの最大回転角速度との相関分析結果（n＝25）を示した。その結果，鉛直方向の体重あたりの Fz 最大値（左右平均）とその力積には相関関係は認められなかった。しかし，水平方向の力のうち，着床前半に生じる進行方向とは逆への力である体重あ

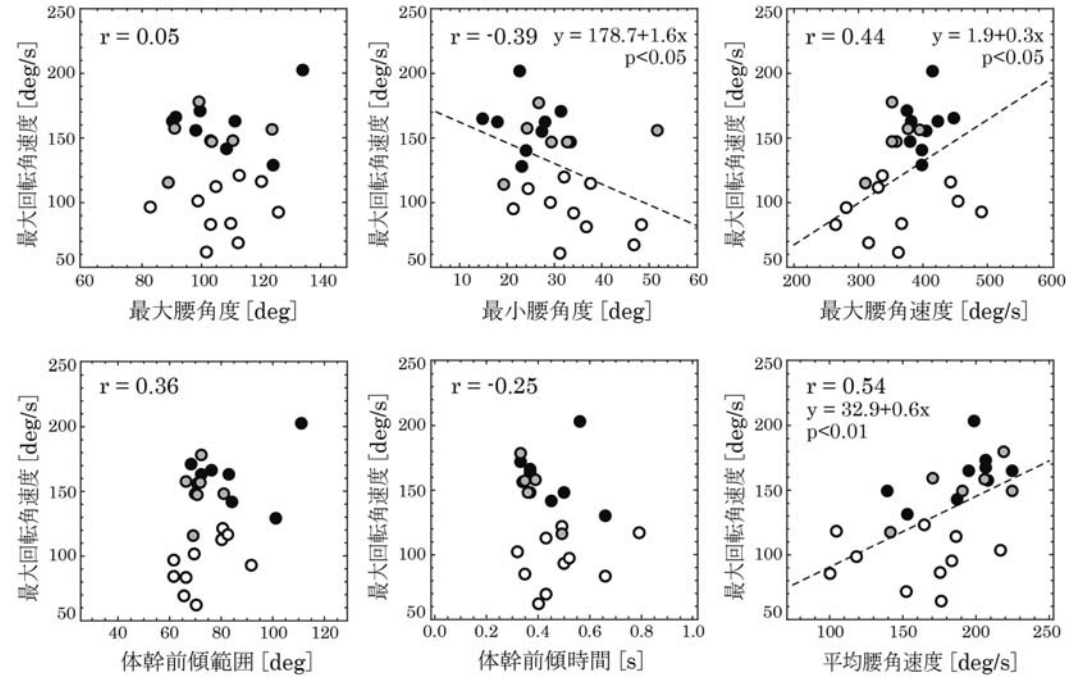

図 7　キネマティクス分析項目と踵まわりの最大回転角速度の関係

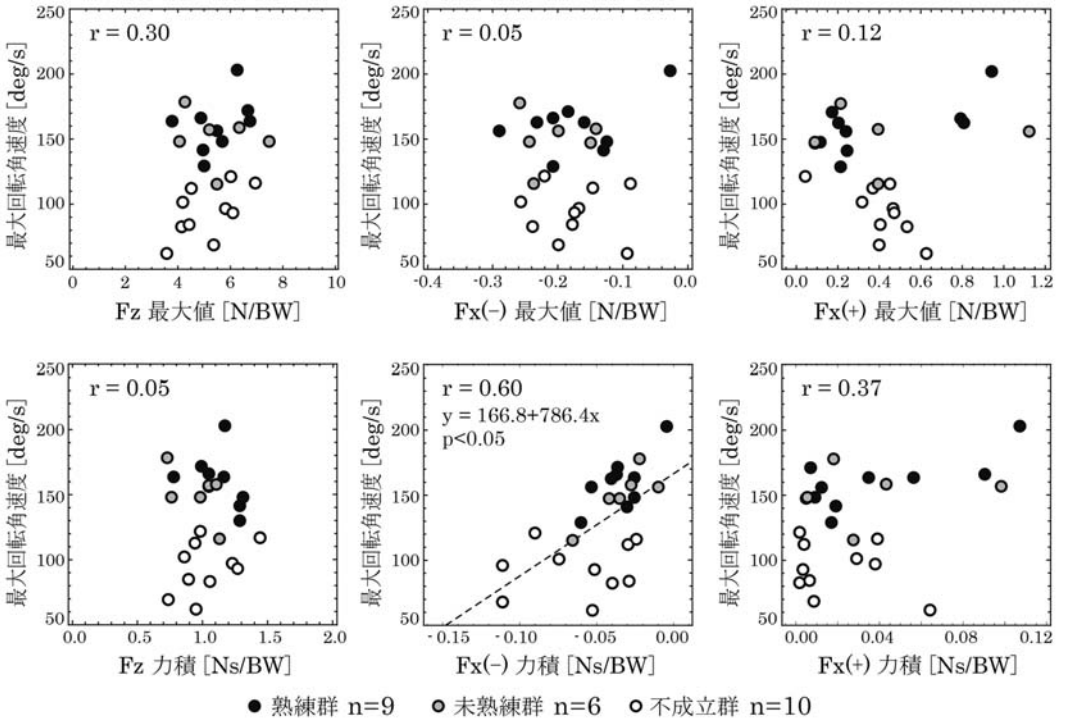

図 8　　キネティクス分析項目と踵まわりの最大回転角速度の関係

たりの Fx(−)の力積と踵まわりの最大回転角速度の間には有意な相関関係が認められた（r＝0.60，p＜0.05）。

Ⅳ．考察

1. 立ち上がり局面における踵まわりの最大回転角速度について

伸膝前転の立ち上がり局面では前転の前半部分で獲得した“勢い”を低下させずに立ち上がる“勢い”に変換することが重要である。本研究では立ち上がるために必要な“勢い”を踵まわりの回転角速度の最大値として求めたところ，不成立群の踵まわりの最大回転角速度は熟練群，未熟練群に比べて有意に低いことが明らかになった。このことから，伸膝前転の熟練者あるいは成功には至らなかったが技がほぼ完成しているような未熟練者が，伸膝前転を成立させるための条件として，充分な踵まわりの回転角速度を有していたと言える。すなわち，最大回転角速度の大きさが伸膝前転の成否を決定づける要因にひとつであり，この踵まわりの最大回転角速度をいかに獲得するかが極めて重要な習得のポイントであることが示唆された。そこで，次にこの踵まわりの最大回転角速度の獲得に影響を与える動作等について相関分析を用いて検討を試みた。

2. 腰部の前屈動作と踵まわりの最大回転角速度の関係について

伸膝前転では多くの先行研究で指摘されているように，合理的な胸腰部の動きと連動した股関節の伸展・屈曲の仕方が成否を決定づけることが明らかになっている。つまり，前転開始から頭越え局面までの胸腰部と股関節の伸展動作のあと，タイミングよく胸腰部を前屈させ，同時に股関節を屈曲させる必要がある。本研究では時間経過にともなう形態的な変化ではなく，前転開始から動作終了時点までの間の胸腰部の前屈と股関節の屈曲に関するキネマティクスデータと伸膝前転の成否を決定づける踵まわりの最大回転角速度との相関分析を試みた。その結果，相関関係が認められなかった項目は最大腰角度，体幹前傾時間及び体幹前傾範囲であった。これは単に腰を大きく伸ばせば良い訳でもないこと，曲げる際の所要時間や可動域が回転角速度の獲得にあまり影響していなかったことが明らかになった。

一方，最小腰角度（r＝−0.39，p＜0.05）に負の相関関係が認められたことは腰部の前屈の程度が弱いほど，踵まわりの回転角速度が得られないことを示していた。また，同様に相関関係が認められた最大腰角速度（r＝0.44，p＜0.05），平均腰角速度（r＝0.54，p＜0.05）はどちらも胸腰部の前屈と股関節の屈曲の速さの項目であり，前屈・屈曲動作が素早いほど大きな踵まわりの回転角速度が得られていたこと，特に平均腰角速は，最大腰角速度よりも相関係数の値が大きく，その相関関係の程度は強いことが推察でき，このことは伸膝前転では狭い範囲で瞬間的に素早く胸腰部の前屈と股関節を屈曲させることよりも，一連の動作を広い可動範囲で素早く完了させることが重要である可能性が示唆された。

3. 手押し動作による床反力と踵まわりの最大回転角速度の関係について

立ち上がり局面の手押し動作によって生じた床反力から求めたキネティクスデータと伸膝前転の成否を決定づける踵まわりの最大回転角速度との相関分析を試みたところ，床反力のうち，鉛直方向の体重あたりの Fz 最大値（左右平均）とその力積には相関関係は認められなかった。これは熟練度に関わらず床反力の鉛直方向成分は身体を回転させるための踵まわりの最大回転角速度の獲得にあまり影響していないことを示す結果となった。

次に水平方向の力のうち，手の着床前半に生じる進行方向とは逆への力である Fx(−)の最小値には有意な相関が見られなかったが，その Fx(−)の力積と最大回転角速度の間には有意な相関関係が認められた（r＝0.60，p＜0.05）。これは Fz の力積に比べて極めて小さな値ではあるが，進行方向とは逆への力積が大きいほど，前方へのブレーキとなって最大回転角速度の獲得を妨げていることが伺えた。また，この Fx(−)が消失後，着床後半に生じる進行方向への力である Fx(+)の最大値とその力積には有意な相関関係が認められなかった。これはもちろん Fx(+)が技の成立

に不要であった訳ではなく，あくまでも最大回転角速度への影響が少なかったと考えるのが妥当であろう。

以上のことから，手押し動作による床反力と最大回転角速度の相関分析から伸膝前転ではただ単に床を手で強く押すという動作だけでなく，回転を邪魔しない効果的な手の着き方，押し方がある可能性が示唆された。また，従来からの言われてきた指導上のポイントである「前屈と同時に手を大腿部横のマットに着き，押し放す。」[19]というような言葉だけでは不十分であり，床反力の経時的変化，着手位置等をさらに詳しく分析して合理的な手押し動作に関するさらなる知見の獲得が課題となった。

Ⅴ．まとめ

本研究ではマット運動の伸膝前転のメカニズムを解明し，指導上の基礎的知見を得ることを目的に，伸膝前転が成立するための力学的要因を含む諸要因についてバイオメカニクス的手法を用いて実験を行った。

本研究では算出した伸膝前転の立ち上がり時に生じる踵まわりの最の回転角速度（踵と身体合成重心を結ぶ線分と水平軸の成す角の回転速度）を伸膝前転の成否を決定しうる変数として，胸腰部の前屈と股関節の屈曲動作に関するキネマティクスデータ，手押し動作のキネティクスデータとの相関分析を行った。得られた結果は以下の通りである。

1．踵まわりの最大回転角速度は熟練群，未熟練群および不成立群の三群間に有意な差が認められ（$p<0.05$），不成立群の踵まわりの最大回転角速度は熟練群，未熟練群に比べて低いことが明らかになった（$p<0.05$）。しかがって，踵まわりの最大回転角速度は伸膝前転の成否を決定づける重要な要因であることが示唆された。

2．胸腰部の前屈と股関節の屈曲動作に関するキネマティクス分析項目と踵まわりの最大回転角速度との相関分析の結果，最小腰角度（$r=-0.39$，$p<0.05$）には負の相関関係，最大腰角速度（$r=0.44$，$p<0.05$），平均腰角速度（$r=0.54$，$p<0.05$）には正の相関関係が認められ，胸腰部の素早い前屈動作が踵まわりの最大回転角速度を高めるために必要であることが考えられた。

3．手押し動作の床反力データから求めたキネティクス分析項目と踵まわりの最大回転角速度との相関分析の結果，水平方向の力のうち，着床前半に生じる進行方向とは逆への力である Fx(-)の力積に有意な相関関係が認められた（$r=0.60$，$p<0.05$）。つまり，進行方向とは逆の方向の力積が大きいことによって回転のブレーキとなり，踵まわりの回転角速度の獲得を妨げていることが考えられた。

以上のことから，成否を決定づける重要な要因である踵まわりの回転角速度を獲得するためには，胸腰部や股関節の使い方だけでなく，効果的な手の着き方や押し方が存在することが示唆された。

本研究は JSPS 科研費 24650374 の助成を受けたものである。

参考・引用文献

1）金子明友（1974）体操競技のコーチング，大修館書店，pp.299-300.

2）文部科学省（2009）高等学校学習指導要領解説 保健体育編・体育編，東山書房，p.33.

3）藤墳規明・小沢教子・池上康男・松井秀治（1975）伸膝前転の習熟過程に関する身体運動学的研究：6. キネシオロジーに関する研究，日本体育学会大会号，26，p.370.

4）小沢教子・藤墳規明・山崎良比古・宇津野年一（1977）伸膝前転の習熟過程に関する研究：練習曲線について，日本体育学会大会号，28，p.328.

5）藤墳規明・小沢教子・池上康夫・宇津野年一（1978）伸膝前転の身体運動学的研究-1-技術分析，体育の科学，28（12），pp.899-903.

6）藤墳規明・小沢教子・池上康夫・宇津野年一（1979）伸膝前転の身体運動学的研究-2-練習曲線，体育の科学，29（1），pp.53-56.

7）木下英俊（2005）マット運動における伸膝前転の習得過程に関する一考察，体操競技・器被運動研究，13，pp.29-40.

8）川島俊明（1967）伸膝前転の指導に関する研究，体育学研究．11，p.232.
9）平橋優介（2009）マット運動における伸膝前転の技術指導に関する実証的研究，愛知教育大学保健体育講座研究紀要，34，pp.53-57.
10）佐藤友樹・加納 實（2011）マット運動における「伸膝前転」の指導に関する研究，順天堂スポーツ健康科学研究，3（1），pp.48-52.
11）古谷嘉邦・野口泰博・有吉正博（1977）体育実技指導に関する運動技術の分析的研究 その1：マット運動の前転および伸膝前転について，東海大学紀要，7，pp.150-172.
12）大石寿明・太田昌秀（1993）マット運動における「伸膝前転」の技術に関する一考察，日本体育学会大会号，44B，p.660.
13）小林和弘・加賀 勝（2003）マット運動における伸膝前転の運動学的研究，日本体育学会大会号，54，p.555.
14）山本博男・松井一洋・鈴木孝佳・牛津安未・湯浅真梨也（2010）マット運動における伸膝前転の動作解析，金沢大学人間社会学域学校教育学類教育実践研究，36，pp.41-45.
15）本間二三雄（1979）伸膝前転の問題性，東京学芸大学紀要（第5部門），31，pp.265-278.
16）金子明友（1982）教師のための器械運動指導法シリーズ マット運動，大修館書店，p.54.
17）高橋健夫・三木四郎・長野淳次郎・三上 肇（1982）器械運動の授業づくり，大修館書店，pp.36-39
18）日本体育大学体操競技研究室（1997）器械運動授業ノート，アイオーエム，p.26.
19）三木四郎・加藤澤男・尾西奈美・本村清人（2006）中・高校 器械運動の授業づくり，大修館書店，p.155.
20）堀江健二・小林幸子・尾西奈美・津端謙太（2007）器械運動，文化書房博文社，p.50.
21）文部省（2000）新体力テスト―有意義な活用のために―，ぎょうせい，p.100.
22）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，pp.23-33.