

研究題目
動的安定性と運動能力との係わり
—ジュニアおよびトップの体操選手の倒立安定性—

研究代表者
船渡和男

目次

	要約	2
I	目的	4
II	方法	4
III	結果	9
IV	考察	17
V	結論	20
VI	参考文献	21

研究題目

動的安定性と運動能力との係わり
—ジュニアおよびトップの体操選手の倒立安定性—

研究者名

船渡和男（日本体育大学）
水鳥寿思（徳州会東京本部）
具志堅 幸司（日本体育大学）
立花泰則（徳州会東京本部）
岩噌弘志（関東労災病院）
松尾彰文（国立スポーツ科学センター）

要約

伸腕屈身力倒立（以下、伸肘倒立）は、体操競技において基本的な運動のひとつである。伸肘倒立とは、立位から肘を伸ばした状態で倒立姿勢になる運動である。ゆか、あん馬、つり輪、平行棒、鉄棒など様々な種目で伸肘倒立を用いた運動が要求されている。多くの種目で伸肘倒立を応用した技が要求されており、体操競技において欠かすことのできない構成要素のひとつになっている。本研究では、筆者らが有する伸肘倒立の主観的経験知と安定性に関するバイオメカニクスの数値評価とを合わせて論じることによりスポーツ科学の競技力向上に関する研究に貢献することを目的とした。【方法】男子大学体操競技選手11名は測定動作として閉脚伸肘倒立を行い、伸肘倒立の開始、すなわちつま先の離地から安定した倒立になるまでを分析の対象とした。伸肘倒立の安定とは、つま先の離地から体重移動による重心線を手掌部の圧力中心からの床反力にかにのせることができるか否かによって評価した。分析の対象とした変数は、肩関節角度や股関節角度の違い、身体重心(COM、center of mass)と圧中心(COP、center of pressure)の関係性、モーメントなどとした。【結果および考察】伸肘倒立の熟練者の方が未熟練者と比較して肩関節角度が大きい傾向にあった。

肩関節角度の大きい方が、肩が前へ出ていない伸肘倒立であり、熟練されていると言えた。つま先離地のタイミングから腰が重心に乗り、脚を倒立に向けて伸ばし始めるまでの局面に注目した。股関節角度が小さいほど、脚が重心に近づき、無駄な力を使わずに運動を行う事ができる。熟練者の方が、未熟練者と比較して股関節角度が小さくなる傾向にあった。COP 及び COM の変位では、つま先離地までは COM は COP 上にみられないが、つま先離地時には熟練者はほぼ全員が同じ位置になり、未熟練者は荷重がかかるのに時間を要していた。COM 回りのモーメントは、つま先離地後は被験者間で大きな差は認められなかったが、未熟練者 H.T 及び W.R は大きなモーメントであった。運動がしっかりと重心に乗って安定していないと、倒立までの段階でより多くの力を使っていることが推察できる。

肩関節角度、前腕角度及び股関節角度から、熟練者のほうが未熟練者よりも運動を行なうなかで肩が前方位置することがなく、下肢は重心に近い位置で保持していることが示された。肩関節が前方へ位置してしまうのは、股関節の柔軟性と関係しているのではないかと考えられた。伸肘倒立を始める前の段階では下肢は重心よりも後方にある。下肢が後方に位置したまま運動を行なうと、重心のバランスを取るためには肩を前方へ位置せざるを得なくなってしまう。つまり、肩が前へ出てしまうのは、肩関節の柔らかさだけではないと考えられる。熟練者において、体幹角度 90 度を越えている被験者もいたが、股関節の柔軟性が高くなければ 90 度を越えることはできない。重心に身体を乗せるのに、一番重心から離れている下肢を股関節の柔軟性で体幹に引きつけてくることができれば、肩を前へ出して下肢とのバランスを取る必要がなくなると考えられる。

I 目的

伸肘倒立の安定とは、つま先の離地から体重移動による重心線を手掌部の圧力中心からの床反力にいかにかのせることができるか否かによると考えられる。本研究では、伸肘倒立の開始、すなわちつま先の離地から安定した倒立になるまでを分析の対象とした。その間の肩関節角度や股関節角度の違い、身体重心(COM、center of mass)と圧中心(COP、center of pressure)の関係性、モーメントなどを調べる事により、安定性に関するバイオメカニクスの知見を求める。そして、筆者らが有する伸肘倒立の主観的経験知を合わせて論じることによりスポーツ科学の競技力向上に関する研究に貢献することを目的とした。具体的には本研究の結果から運動を安定させる方法を導き出し、それらを基に伸肘倒立の技術や指導方法を考案し、今後の伸肘倒立の指導につなげていくことを目的とした。

II 方法

1. 被検者

被験者は、男子大学体操競技選手 11 名で行なった。身長 $164.5 \pm 6.6(\text{cm})$ 、体重 $62.6 \pm 6.1(\text{kg})$ 、年齢 19.8 ± 1.5 (歳)である。競技歴は 10.1 ± 3.2 (年)であった(表 1)。競技力については、県大会出場レベルからインカレ個人総合優勝レベルまで様々であったが、被験者の熟練・未熟練は実験前に伸肘倒立の観察を行い、筆者の観点から優劣の分類を行った。

2. 測定手順

測定動作として閉脚伸肘倒立を行った。被験者はフォースプレート(Kistler 社, 9287B, $600 \times 900\text{mm}$)上で伸肘倒立を行い、足部はフォースプレートの外側に置くよう指示した。フォースプレートの中心辺りに手をつき閉脚で伸肘倒立を行い、倒立が安定するまでを 1 試技とし実施させた。各被験者には閉脚伸肘倒立を 2 回実施させた。2 試技のうち安定した閉脚伸肘倒立 1 試技を選んだ。

3. 分析方法

データのサンプリング周波数は、フォースプレートは 1 KHz、カメラは 100fps (DKH 社製、1394)とした。地面からの高さは 1m とし、フォースプ

レートの中心から 7.5m 離れ撮影し、被験者の側方から撮影を行った（図 1）。画像解析にはフレームディアスⅡ（DKH社製）を使用した。マーカ貼付位置は頭頂点、肩峰点、第 12 胸椎、転子点、大腿骨外側上踝、外果点、足先点、上腕骨外側上踝、尺骨茎状突起、第 5 手中手骨頭とした⁴⁾。被験者には画像解析ソフトによるデジタイジングを行いやすくするために反射マーカを貼付した。画像のキャリブレーションについては、重錘に反射マーカを貼付しフォースプレートの中心から左右の 60cm の位置に置き試技前に撮影記録した。

つま先の離地から倒立姿勢が安定になるまでを分析の対象として、以下の分析を行った。

表 1 被験者(n=11)の身体的特性

	身長(cm)	体重(kg)	年齢(年)	競技歴(年)
平均	164.5	62.6	19.8	10.1
標準偏差	6.6	6.1	1.5	3.2

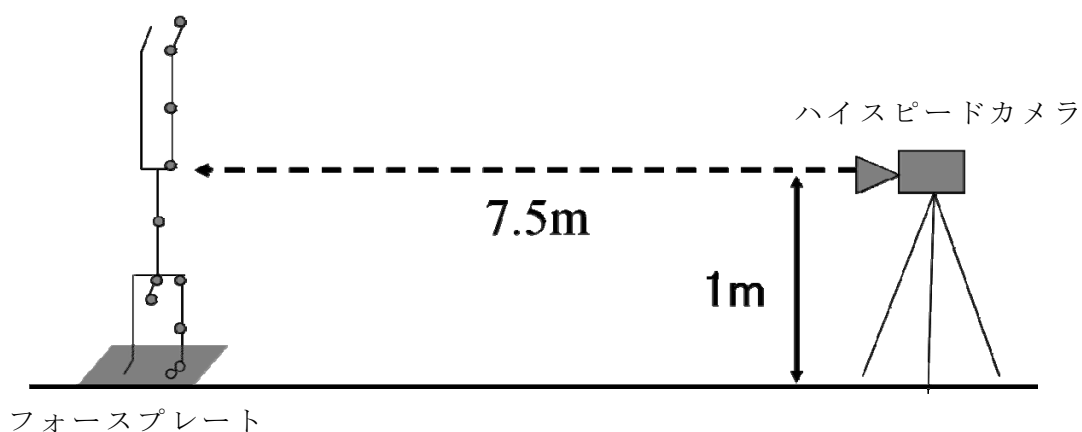


図 1 実験配置図

4 .データ分析

4 - 1 身体重心及び圧力中心

身体重心（以下；COM）はデンプスターモデル⁹⁾によってエクセル（マイクロソフト 2003）を用いて算出した。得られた座標データを使用し、前後方向における身体重心を以下の式によって算出した。

$$\text{COM}_X = (\text{X}_{\text{COM}1} \cdot m_1) + (\text{X}_{\text{COM}2} \cdot m_2) + \dots + (\text{X}_{\text{COM}n} \cdot m_n)$$

ここで、 n は分節番号、 m は n 番目の分節の質量比、 X は前後方向における分節中心の座標位置である。身体重心算出における分節は頭部と頸部、胸部、腹部、上腕部、前腕部、手部、大腿部、下腿部、足部であった。

圧力中心（以下；COP）を、フォースプレートによって以下の式で算出した。

$$\text{COP}_x = (\text{A}_z \times \text{F}_x - \text{M}_y) / \text{F}_z$$

及び

$$\text{COP}_y = (\text{A}_z \times \text{F}_y - \text{M}_x) / \text{F}_z$$

ここで、 A_z はプレート表面からセンサまでの深さ、 M_x は X 軸周りのモーメント、 M_y は Y 軸周りのモーメント、 F_x フォースプレートに働く力の X 方向成分 (N)、 F_y フォースプレートに働く力の Y 方向成分 (N)、 F_z フォースプレートに働く力の Z 方向成分 (N) である。

4 - 2 角度の定義

体分節角度定義：前腕角度は、尺骨形状突起と上腕骨外側上踝を結んだ線と水平面とのなす角度とした。体幹角度は、肩峰点と第 12 胸椎を結んだ線と水平面とのなす角度とした。大腿角度は、転子点と大腿骨外側上踝を結んだ線と水平面とのなす角度とした。全て右水平方向を 0 度とし、反時計回りをプラスとした（図 2）。

関節角度定義：肩関節角度は、肩峰点と上腕骨外側上踝、肩峰点と第 12 胸椎とのなす角度とした。股関節角度は、転子点と第 12 胸椎、転子点と大腿骨外側上踝とのなす角度とした（図 3）。

4 - 3 モーメント

COM回りのモーメント：矢状面における合成床反力、COMとのモーメントアーム、COM回りのモーメントを算出した。COM回りのモーメントは時計回りをマイナス。反時計回りをプラスとした（図5）。

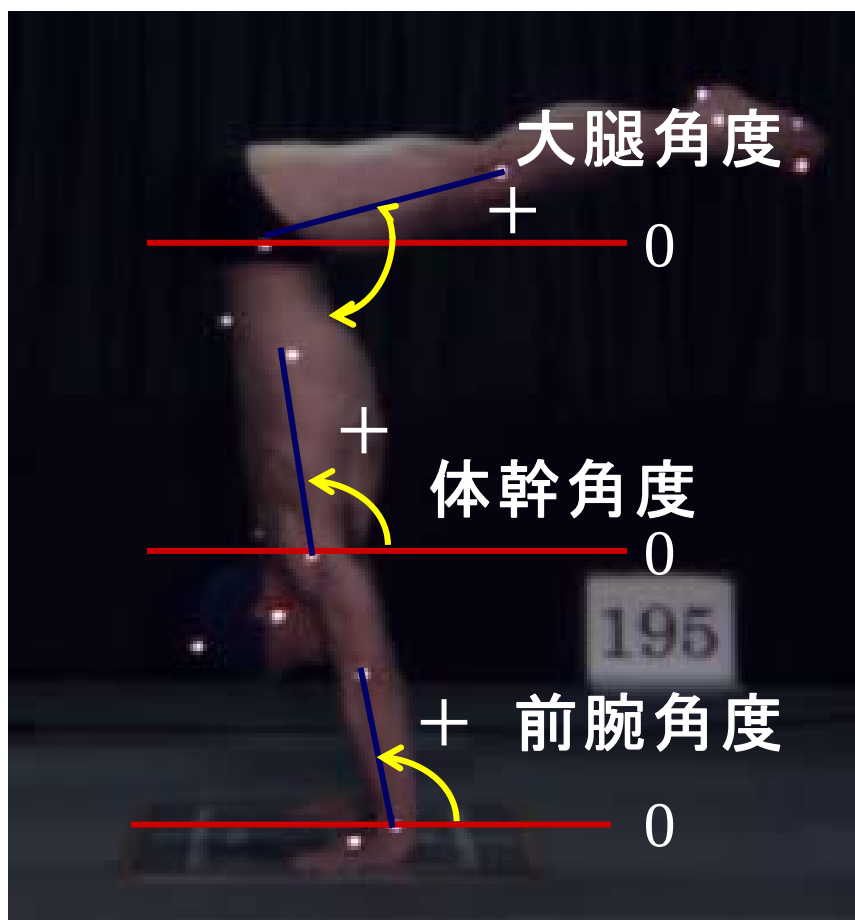


図2 体分節角度の定義



前方(+) ←→ 後方(-)
 原点はフォースプレートの中心

図 3 座標及び関節角度定義

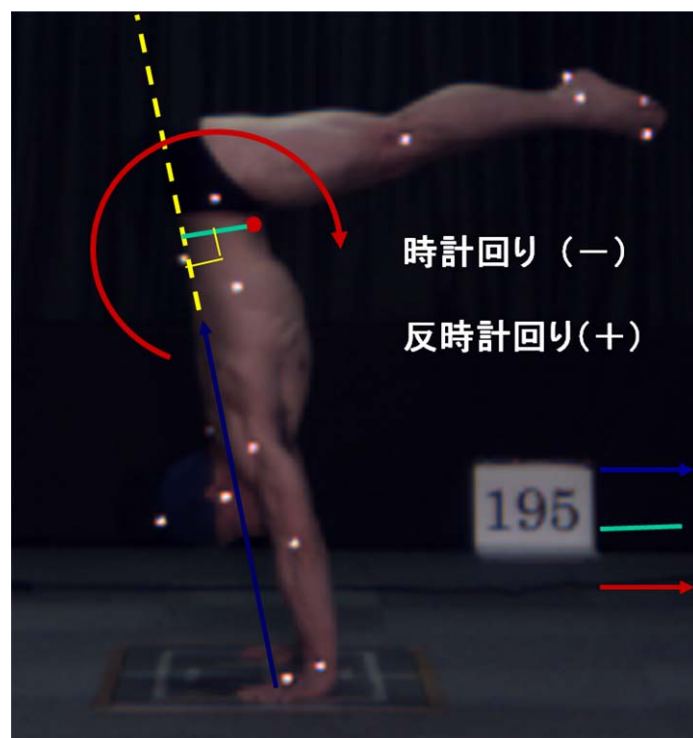


図 4 重心回りのモーメント

III 結果

1 体分節角度

前腕角度及び大腿角度においては、被験者間で大きな差は認められなかった。体幹角度において、熟練者の方が未熟練者と比較して大きくなる傾向にあった。熟練者においては 90 度を越える者もいたが、未熟練者には 90 度を越える者はいなかった。大腿角度においては被験者間で大きな差は認められなかった。

2 関節角度

熟練者の方が未熟練者と比較して肩関節角度が大きい傾向にあった。肩関節角度の大きい方が、肩が前へ出ていない伸肘倒立であり、熟練されていると言える(図 5-1,2)。

つま先離地のタイミングから腰が重心に乗り、脚を倒立に向けて伸ばし始めるまでの局面に注目した。股関節角度が小さいほど、脚が重心に近づき、無駄な力を使わずに運動を行う事ができる。熟練者の方が、未熟練者と比較して股関節角度が小さくなる傾向にあった。

3 COP 及び COM の変位

被験者 11 名分の COP 及び COM の前後方向の変位を図 6 に示す。図 6-1 は未熟練者 5 名分で図 6-2 は熟練者 6 名分の結果である。横軸は時間で縦軸は前後方向の変位である。細い線が COP で太い線が COM である。つま先離地のタイミングを縦の実線で示し、安定した倒立になったタイミングを縦の点線で示す。

つま先離地までは COM は COP 上に見られないが、つま先離地時には熟練者はほぼ全員が同じ位置になり、未熟練者 H.T、M.H、Y.K は荷重が増すのに時間がかかっている。

4 モーメント

被験者 11 名分の COM 回りのモーメントを図 7 に示す。図 7-1 は未熟練者 5 名分で図 7-2 は熟練者 6 名分の結果である。横軸は時間で縦軸はモーメントである。つま先離地のタイミングを縦の実線で示し、倒立姿勢に至ったタイミングを縦の点線で示す。

一般的に、つま先が離地するまでは COM 回りのモーメントは、時計回りのモーメントであり重心を後方に戻そうとしている事が分かる。つま先離地後は

被験者間で大きな差は認められなかったが、未熟練者 H.T 及び W.R は大きなモーメントを示した。

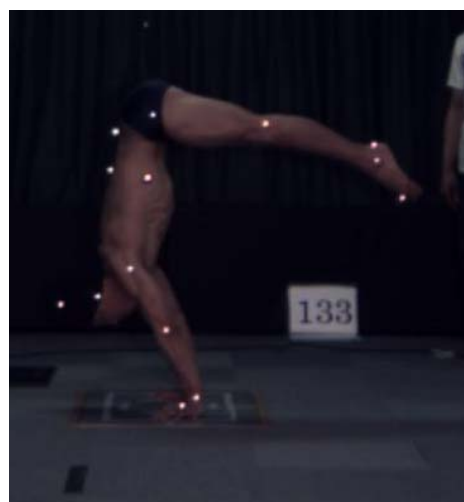
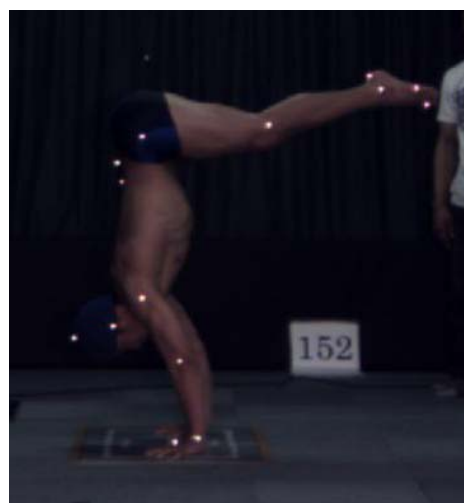


図 5-1 伸肘倒立成否を決定するキーフレームにみる未熟練者の動作

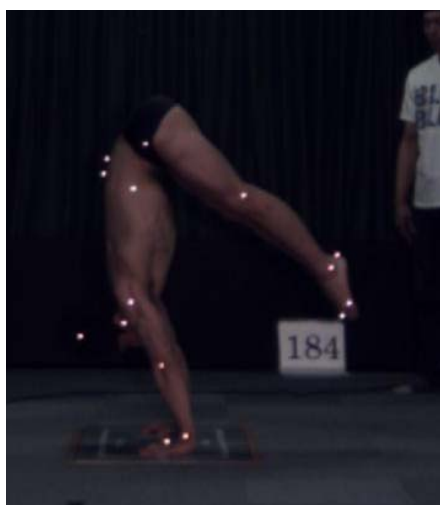
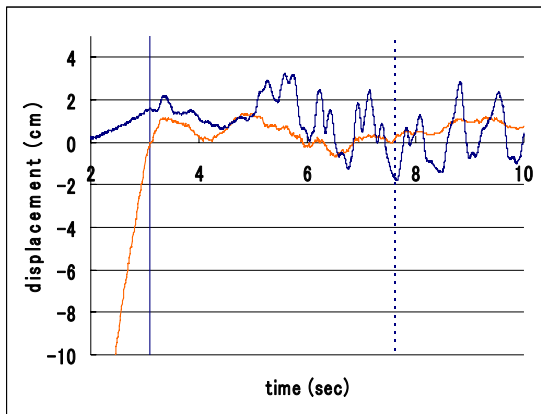
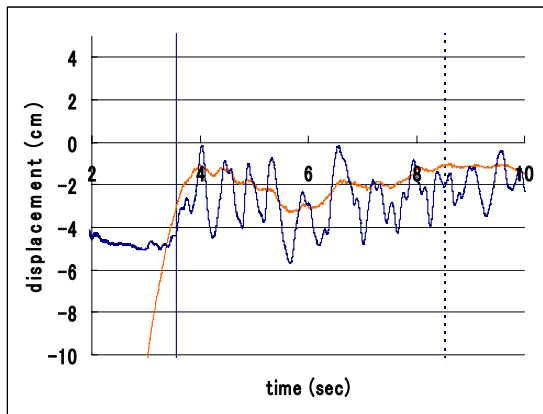


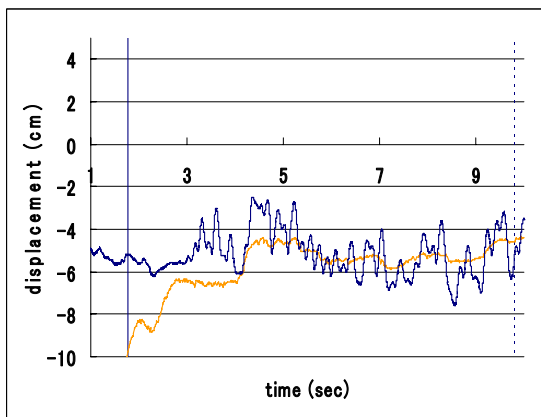
図 5-2 伸肘倒立成否を決定するキーフレームにみる熟練者の動作



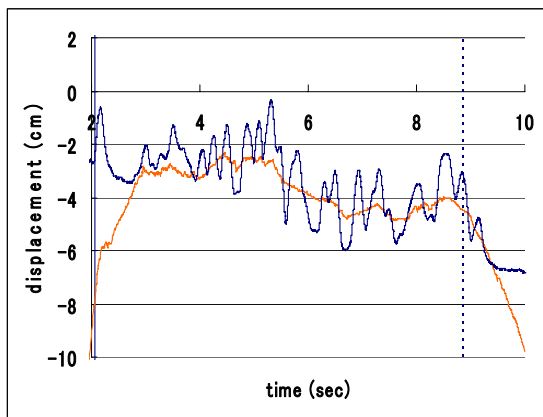
Y. K



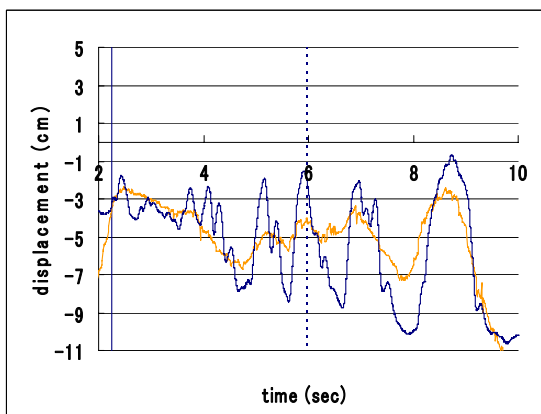
W. A



H. T



M. H



W. R

— COP — つま先離地
— COM - - - 安定倒立

図 6-1 未熟練者 5 名の伸肘倒立開始から安定倒立までの C O P 及び C O M の変位

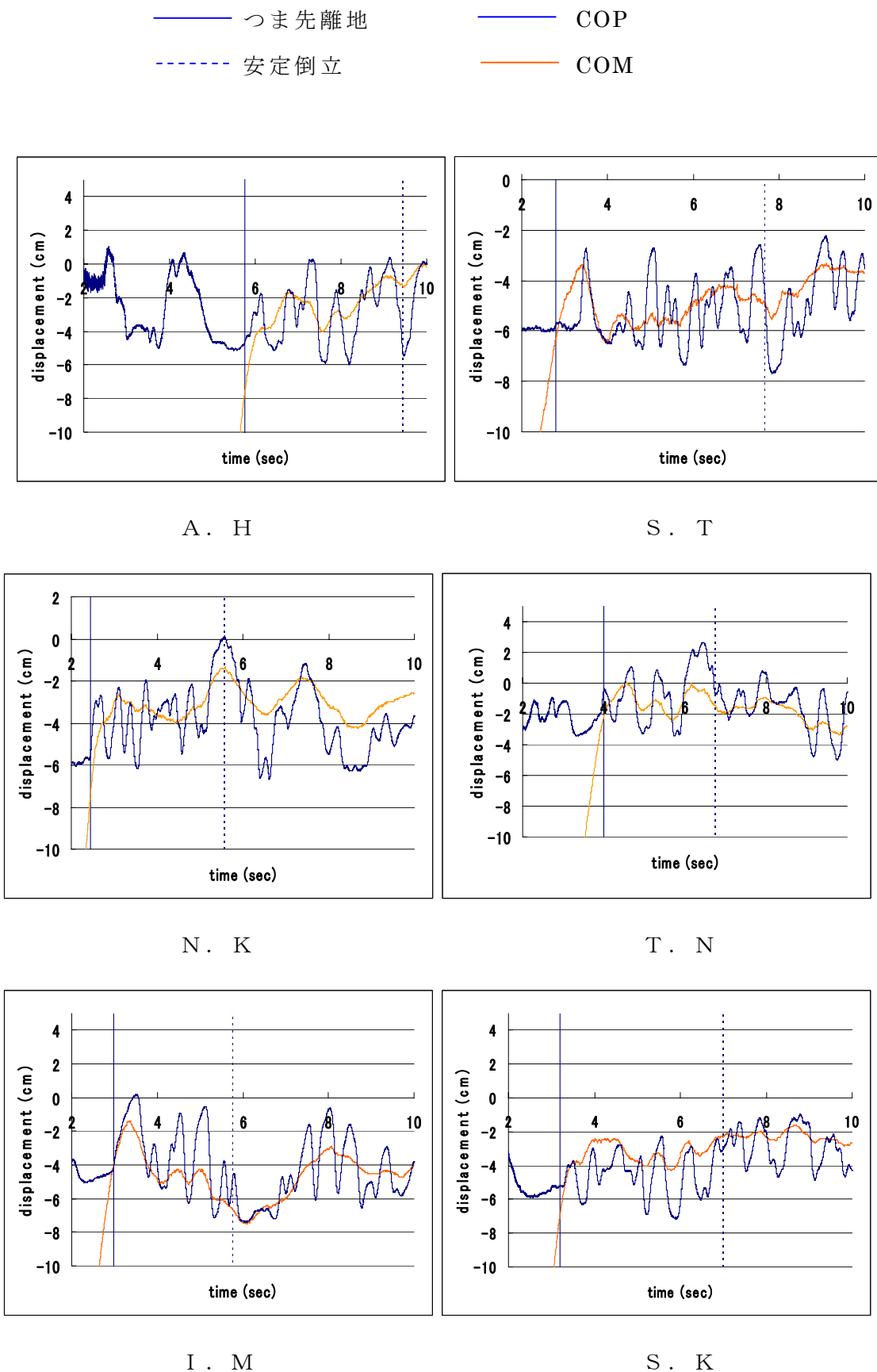
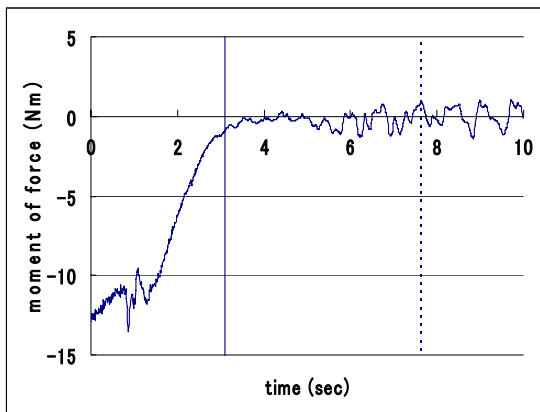
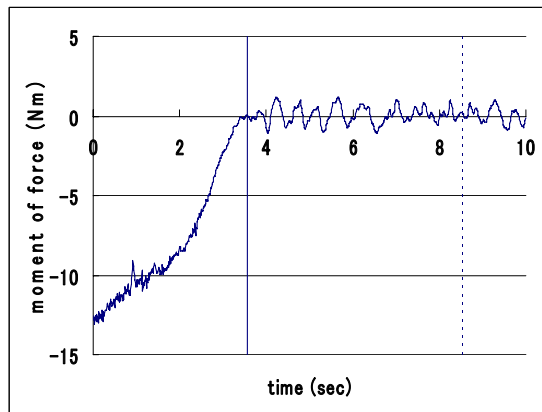


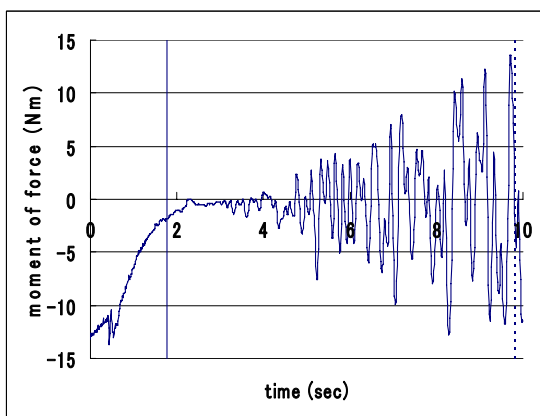
図 6-2 熟練者 6 名の伸肘倒立から安定倒立までの C O P 及び C O M の変位



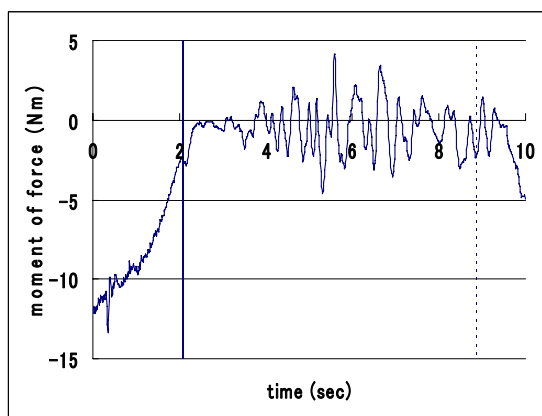
Y. K



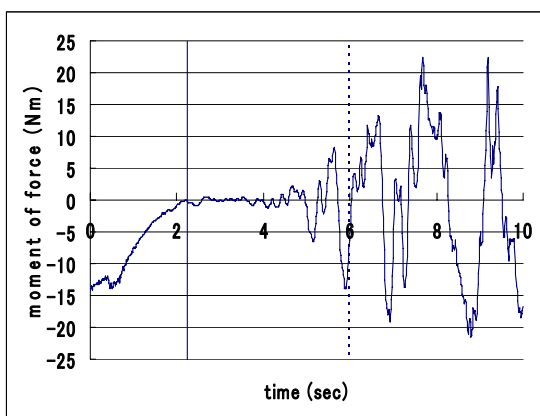
W. A



H. T



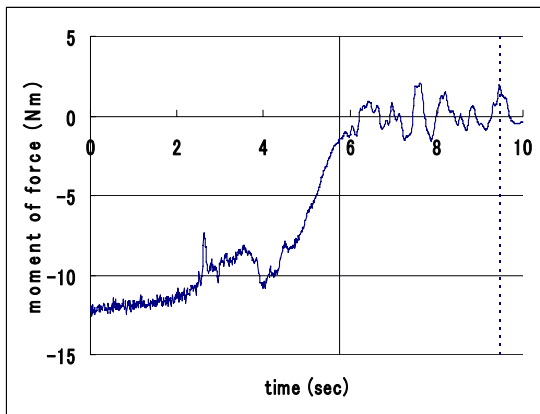
M. H



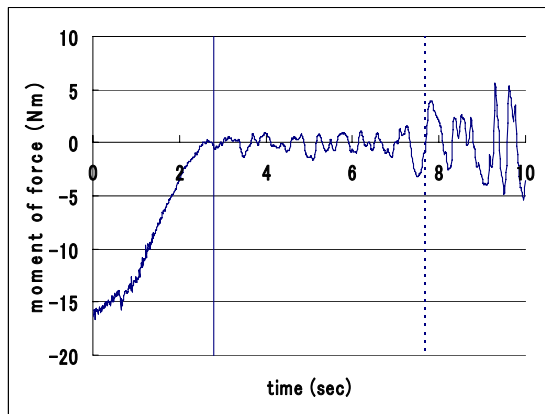
W. R

—— つま先離地
 - - - 安定倒立

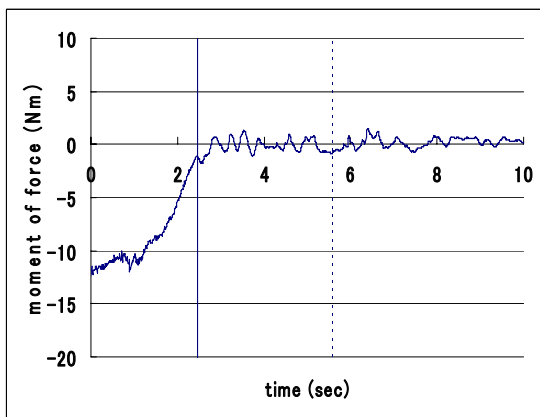
図 7-1 未熟練者 5 名の伸肘倒立開始から安定倒立までの COM 回りのモーメントの変化



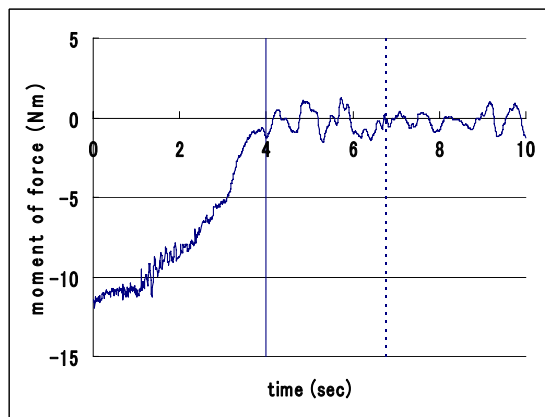
A. H



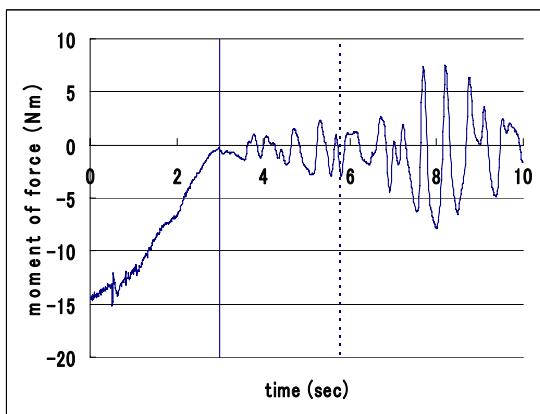
S. T



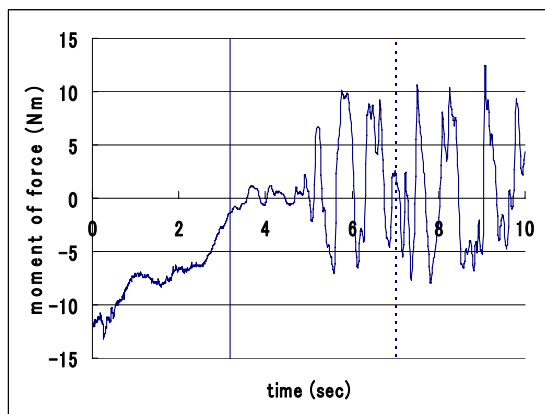
N. K



T. N



I. M



S. K

—— つま先離地
 - - - - 安定倒立

図 7-2 熟練者 6 名の伸肘倒立開始から安定倒立までの COM 回りのモーメントの変化

IV 考察

肩関節角度、前腕角度及び股関節角度から、熟練者のほうが未熟練者よりも運動を行なうなかで肩が前方位置することがなく、下肢は重心に近い位置で保持していた。熟練者は、つま先離地時にCOMがCOP上に重なってくるのはこのためであろう。なお、肩関節角度と体幹角度は熟練者のほうが、角度が大きく、股関節角度は角度が小さな値を示した。

COP 及び COM の変位において、多くの被験者ではつま先が離地するまで COM は COP 上に見られないが、つま先が離地すると COM は COP のほぼ上に位置する事になる(図 6)。これは、つま先が離地すると手の平のみで体を支えバランスを保ちながら倒立姿勢になろうとするためであろうと考えられる。

モーメントアーム及び COP と COM の変位の結果から、つま先離地後において COP は COM の前後を移動し、モーメントアームも前後に移動し微妙な調整を行いながらバランスを保っていた。COM 回りのモーメントにおいては、つま先離地までは前方方向に移動している重心を後方に戻すモーメントを発生させながらつま先離地に至っていた(図 7)。また、つま先が離地してからは前後の両方にモーメントを発生させながら、微調整を行い伸肘倒立から倒立へと移行していると考えられる。

倒立姿勢は直立姿勢と比較して、安定性に欠けると考えられるが、倒立姿勢と比較して伸肘倒立はより大きな力が必要とされ、バランスを保つ事も難しいのではないと思われる。

伸肘倒立においても、手関節トルクはCOMの動揺に対して重要な役割を持ち、伸肘倒立は直立姿勢と比較して安定性にかけると考えられる。また、伸肘倒立においても肘関節の屈曲によってバランスを取る被験者が見られた。金子(1977)は、伸肘倒立において柔軟性が最も重要だと述べている。肩関節角度を大きく保持し、下肢を身体重心の近い位置に保持する事は柔軟性が求められる。よって柔軟性は、伸肘倒立において重要な要素のひとつであると考えられる。

一方肩関節が前方へ位置してしまうのは、股関節の柔軟性と関係しているのではないかと考えられる。伸肘倒立を始める前の段階では下肢は重心よりも後方にある。下肢が後方に位置したまま運動を行なうと、重心のバランスを取る

ためには肩を前方へ位置せざるを得なくなってしまう。つまり、肩が前へ出てしまうのは、肩関節の柔らかさだけではないと考えられる。熟練者において、体幹角度 90 度を越えている被験者もいたが、股関節の柔軟性が高くなければ 90 度を越えることはできない。重心に身体を乗せるのに、一番重心から離れている下肢を股関節の柔軟性で体幹に引きつけてくることができれば、肩を前へ出して下肢とのバランスを取る必要がなくなると考えられる。

股関節を重心に近い位置に引きつけるには柔軟性が必要と考えられるが、つま先が離地した後、骨盤を前方へ移動させる動作も必要になるのではないかと。骨盤を前方へスライドさせるとは、腸腰筋、腹直筋、内外腹斜筋及び脊柱起立筋群の体幹部を固定及び保持しながら骨盤前傾を行なう動きである。この動作により、重心から遠い足先をできるだけ重心に近い位置へ移動することができる。いわゆる出っ尻りの状態である。熟練者のなかにはこの姿勢になっているものが複数人見られた。そのため、この姿勢になると、体幹角度が 90 度より大きくなる。

骨盤を前方へ移動するためには柔軟性以外に何が必要だろうか。骨盤を前方へ移動するためには股関節を屈曲した状態を下肢が地面から離地してからも保持しなければならない。この運動を行うためには、股関節や腹筋回りの保持するための筋力が必要になってくると考えられる。そして、骨盤を前方へ移動させる動きを習得する必要がある。具体的な方法として、股関節の柔軟性が高い事が前提であるが、下肢を地面につけたまま大腿部と腹部をつけた状態でハムストリングスのストレッチをしながら股関節を前へ移動させる意識練習が必要であろう。次に、肩が前へ倒れないように壁に向かって伸肘倒立を行ない、下肢が離地した状態で大腿部と腹部が離れないように骨盤を移動させるトレーニングが良いのではないかと。下肢が離地した状態になると熟練者でなければ肩が前へ出てしまい、その分下肢が離れてしまう為、壁に肩をつけた状態にすることで骨盤を移動させるというトレーニングが可能になるだろう。

次にもうひとつのポイントである、肩の動作に注目したい。これまで、股関節の柔軟性や骨盤の動きが肩を前へ出さないとならない状態にしていると述べてきたが、肩関節自体の柔軟性や動かし方も重要になっている。

肩関節が開かなければ、いくら下肢を近くに寄せてきたとしても肩に重心を

乗せることが出来ず、前方へ倒れてしまうだろう。肩関節が開くとは、肩関節が最大屈曲することである。肩に重心が乗ると関節の上に体重が乗り、筋力はあまり使わずに済むが、肩がしっかりと開いて入っていない状態だと、腕の筋力で体重を支えなくてはならない。結果として体力も消耗してしまうし、減点の対象にもなってしまう。つまり、肩関節がスムーズに開くようにストレッチをする必要がある。そして、ただ肩関節が開くようにストレッチをするのではなく、肩関節に重心が乗ることを意識しながらストレッチをしなければならない。未熟練者において肩関節に乗っていると見られる人が非常に少なかった。

肩関節を開きながら乗せる動作を身につけるために、ストレッチの際に肩甲骨を開いて行なうことにより肩に重心が乗ることを感じられるであろう。肩甲骨を開いて行なうとは、肩関節を最大屈曲した状態で、前鋸筋の収縮による肩甲骨の前方引き出し及び下方回旋及び外転の動作のことである。方法として、平行棒などのバーを持って肩を開いていき、肩甲骨を開きながらバーを押し返すと肩関節に乗っていることが感じられるだろう。肩関節の柔軟性が低かったり、普段から肩に乗せる倒立をしていないと、バーを押しにくかったり、このような楽な運動でもすぐに肩が疲れてしまう。だが、肩関節が柔らかくなってきた肩甲骨もスムーズに動かすことができるようになってくると、力強くバーを押し返すことができるようになってくるだろう。この運動は伸肘倒立だけでなく、倒立の姿勢の改善にもつながってくるだろう。次に、伸肘倒立に持ち込む姿勢になり、肩関節を開いて重心に乗せる意識練習を行なう。肩に乗せる感覚がわかってきたら、下肢を重心に引きつけることを意識しながら離地していくと、徐々に良い姿勢の伸肘倒立が成り立っていくものと思われる。

V 結論

伸肘倒立が得意な選手は、肩関節角度や体幹角度が大きく、股関節角度が小さい位置で保持されていることが示された。また、重心が圧中心に早いタイミングで重なり、安定していることも示された。これにより COM 回りのモーメントも乱れが少なく、無駄な力を使っていないことが示唆された。

本研究結果から、伸肘倒立を安定させるためには、股関節及び肩関節の柔軟性と同時に、ストレッチした状態を保持及び、移動させる筋力や動作が必要であると考えられる。すなわち、下肢を重心に乗せるために、大腿部と腹部が離れないように保持しながら股関節の骨盤を前へ移動させる。また、肩甲骨を開くことで肩関節角度を広げ、肩関節上に体重を乗せることが、指導上重要であることが示唆された。

VI 参考文献

- 1) David.G. K and Grant.T: Strategies for maintaining a handstand in the anterior-posterior direction. Med. Sci. Sports. Exerc., 33(7), 1182-1188(2001).
- 2) 伊達 秀: 体操の基本姿勢「白樺のポーズ」について. 研究部報, 79, 29-35(1997).
- 3) 伊達 秀: 体操の基本姿勢「白樺のポーズ」についてⅡ. 研究部報, 80, 25-33(1998).
- 4) 藤田恒太郎: 生態観察, 南山堂, 215-219, (1976) .
- 5) 金子明友: 体操競技教本 v 床運動 (男・女) 編, 不昧堂出版, 217-223(1977).
- 6) 日本体操協会研究部: 身体を自在に操る能力について. 研究部報, 77, 29-33(1996).
- 7) 日本体操協会審判委員会男子審判部: 体操競技採点規則, 男子 2006 年度版, 日本体操協会, (2006).
- 8) Semyon M. Slobounov and Karl M. Newell: Postural dynamics in upright and inverted stance. J. Appl. Biomech., 12, 185-196(1996).
- 9) W.T.Dempster: Space requirements of the seated operator, WADC Technical report , 55-159(1955) .
- 10) 行本 浩人: ジュニア期に必要な姿勢づくり 1, 研究部報, 83(1999).