

電磁ゴニオメータによる肩甲骨から体幹の 三次元動作解析：健常者とパラカヌー選手の比較

広島大学病院	木村浩彰
(共同研究者) 同	坂光徹彦
同	笹代純平
同	平田和彦
同	三上幸夫

Three Dimensional Motion Analysis of Upper Limb and Trunk With an Electromagnetic Tracking Device: Comparison of a Healthy Canoe Athlete and a Para Canoe Athlete

by

Hiroaki Kimura, Tetsuhiko Sakamitsu, Junpei Sasadaï,
Kazuhiko Hirata, Yukio Mikami
Hiroshima University Hospital

ABSTRACT

Motion analysis is an important tool to accurately measure motion during sports activity. Method of motion analysis so far are mainly two-dimensional, So was insufficient. The purpose of this study is to analyze the movement of the upper limbs and trunk of canoe athletes during upper limb elevation or paddling using electromagnetic goniometer (three-dimensional motion analysis equipment). This time, we compared healthy canoe athlete and para canoe athlete on upper limb and trunk movement during paddling with an electromagnetic goniometer. Healthy canoe athlete showed greater upper limb elevation movement, while para canoe athlete tend to have greater scapula motion. Canoe competition requires trunk rotation movement,

para canoe athlete with may be using more scapular motion to compensate for lack of trunk rotation of. Our findings suggest that healthy canoe athlete demonstrate greater trunk motion. Therefore, scapular flexibility and control are necessary in the para canoe athlete who is hard to convey a power by kinetic chain from the trunk like healthy canoe athlete. It was suggested that para canoe athlete receiving different training than healthy canoe athlete.

要 旨

スポーツの現場において動作解析は重要である。今回カヌー競技カヤック種目に必要な上肢挙上動作やパドリング時の上肢・体幹の運動を、電磁ゴニオメータを用いて測定し、健常カヌー選手とパラカヌー選手を比較した。上肢挙上動作では健常カヌー選手が、パドリング動作ではパラカヌー選手が肩甲骨を大きく動かす傾向があった。回旋動作を必要とするカヌー競技において、座位保持困難な体幹機能障害を有するパラカヌー選手は、体幹の回旋は困難で、回旋動作を肩甲骨や上腕骨によって代償していると考えられる。実際に体幹に関しては健常カヌー選手の方が大きく動いている事がわかった。したがって健常カヌー選手のように体幹からの連動によって力を伝えにくいパラカヌー選手においては肩甲骨の柔軟性とコントロールが必要であり、効果的なトレーニング立案のためには健常カヌー選手とは異なった指導が必要である事が示唆された。

諸 言

近年、臨床医学やスポーツの現場において動作解析の必要性が高まっている。これまで動作解析の手法としてはビデオカメラなどの二次元の解析であり、動作解析としては不十分である。そこで赤外線マーカーや磁場を用いた三次元動作解析手法が開発され、上肢や下肢の動作解析は可能となった。しかし、スポーツにおいて重要な皮下に

存在し複雑な動きをする肩甲骨の動作解析は未だ困難である。上肢の運動において肩甲骨上腕関節と肩甲骨胸郭関節は協調して動いている（肩甲骨上腕リズム：Codman；1934年¹⁾）。これまで肩甲骨の動きについては様々な研究が行われてきているが、その複雑さゆえに現在でも正確に計測できているとは言い難い。三次元、動的、非侵襲をすべて満たす測定方法では、電磁ゴニオメータで用いられる acromial method が現在のところ最も有用な測定方法であると考えられている。Konda・Yanai ら²⁾はこのシステムを用いてテニスにおける肩甲骨の運動を詳細に報告している。我々はYanai らの指導により、磁場を用いた電磁ゴニオメータ（POLHEMUS 社製 Liberty）を用いて肩甲骨の三次元動作解析に成功したが、健常者の評価に留まっており、障がい者スポーツへの応用はまだ始まったばかりである。

現在、我々はパラカヌースプリント競技の医学的サポートに従事している。パラカヌースプリント競技のカヤック種目は、2016年に開催されるリオデジャネイロパラリンピックから正式競技として採用される近年急激に成長している競技で、200m という既定された距離の直線コースにてタイムや着順を競う。本競技は現在の国際的なクラス分けの基準では障害の重い順に KL1, KL2, KL3 に分けられる。中でも KL1 は座位保持困難であることが特徴的所見であり、脊髄損傷など体幹機能に障害のある選手が多く、体幹や骨盤のみならず肩甲骨の運動にも破綻を来している

可能性が高い。カヤックのパドルリング動作は下肢、体幹、上肢の各関節における運動連鎖により、パドルに運動エネルギーを伝達することで達成されるとされており³⁾、体幹機能障害のあるKL1の選手ではそれらの運動連鎖が上手く機能していないと考えられる。今回健常カヌー選手とパラカヌー選手の上肢・体幹の運動を、特に肩甲骨に着目して分析することで、パラカヌー選手の動作の特徴を捉え、二次的な傷害を予防するとともにパフォーマンス向上のための効果的なトレーニング指導につなげられる可能性があると考えた。

本研究の目的は、カヌー競技カヤック種目に必要な上肢挙上動作やパドルリング時の肩甲骨から体幹の動作解析を電磁ゴニオメータにより行うことで、健常カヌー選手とパラカヌー選手を比較し、パラカヌーの競技特性や指導上の注意点を明らかにすることである。

1. 方 法

1. 1 対 象

健常カヌー選手（県代表レベル）1名

年齢:24歳, 身長:173cm, 体重:75kg, BMI:25.1

パラカヌー日本代表選手(国際クラス分けKL1)1名

年齢:16歳, 身長:165cm, 体重:48kg, BMI:17.6

なお対象に未成年者が含まれるため、対象のみならず保護者に対しても本研究の目的と内容に関して、文書ならびに口頭で説明し、文書にて同意を得て実施した。

1. 2 測定方法

1. 2. 1 機 器

電磁ゴニオメータ（POLHEMUS 社製 Liberty）（図1）

磁気を利用した三次元位置計測装置で、サンプリング周波数 240Hz で計測可能である。磁気式であるため、光学式や音波式とは違い、物理的な障害物に影響されずにデータをリアルタイムで計

測できる。磁場を発生させるトランスミッター、磁場内でトランスミッターに対する位置・方位を計測するセンサー、先端の位置を特定することができるペン状のスタイラス、そしてこれらを制御するコントロールユニットによって構成された6自由度計測装置である。センサーに対する解剖学的表認点の位置とセンサーの6自由度データから、骨の3次元位置・方位を算出し骨形状モデルに平行移動、回転、スケール変換を与えてアニメーション表示する。



図1 電磁ゴニオメータ（POLHEMUS 社製 Liberty）

1. 2. 2 センサー貼付部位

胸骨（①）、仙骨（②）、左右肩甲骨（③④）、左右上腕骨（⑤⑥）、左右前腕（⑦⑧）の計8カ所（図2）

1. 2. 3 運動学的データ解析（図2）

各セグメントの解剖学的座標系を定義するために、胸郭では、胸骨柄（SN）、剣状突起（XP）、第7頸椎棘突起（C7）、第8胸椎棘突起（T8）の4点を、骨盤では左右上前腸骨棘（RASI, LASI）、恥骨結合（PS）の3点を、左右肩甲骨においては、肩峰外側縁（AA）、肩甲骨内側縁（SP）、肩甲骨下角（IA）の各3点を、左右上腕骨では、上腕骨内側上顆（ME）、上腕骨外側上顆（LE）の各2点、左右前腕では、肘頭（OL）、尺骨茎状突起（US）、橈骨茎状突起（RS）の各3点、合計22ヶ所をスタイラスを用いてデジタイズし、

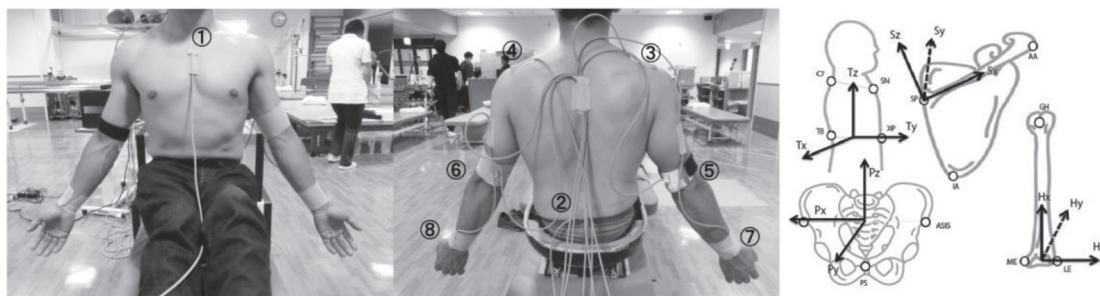


図2 センサー貼付部位および運動学的データ解析 (Kondaら²⁾ 一部改変)

各セグメントに固定されたセンサーに対する三次元座標値として記録した。また左右肩甲骨上腕関節中心 (GH) は、上肢下垂位から肩甲骨上腕関節を中心として、上肢が小さい弧を描くような運動を行っている際の瞬時らせん軸を 30Hz で繰り返し算出し、それらの Pivot point として推定した。

Konda ら²⁾ の方法を参考に、電磁ゴニオメータにより計測されたデータをパーソナルコンピュータに取り込み、独自に開発されたソフトウェアを用いて、デジタイズによって計測された解剖学的ランドマークの座標値から各セグメントに固定された解剖学的座標系を定義した。そして、各セグメントの解剖学的座標系から、オイラー角およびカーダン角を用いて、基準座標系に対する各セグメントの方位、各セグメント間の方位を算出した。

1. 2. 4 試技 1

対象を安静座位とし、上肢下垂位から 6 秒間で挙上、最大挙上位で 3 秒間停止、その後 6 秒間で下垂するよう指示した。上肢挙上動作は開始肢位

を前腕中間位、肘伸展位、肩内転 0° とし、矢状面上で両側同時に行った。純粋な肩関節の屈曲運動となるように鏡を設置し、視覚的なフィードバックを行うこととした。数度練習させたあとに、計 5 回測定した。

試技 2：普段抵抗を感じる程度のゴム抵抗を加えたバドリング動作を 15 パドル行わせることとした。ゴム抵抗を決めるため数度練習をしたあとに、計 3 回行わせた。なお、パラカヌー選手に関しては普段競技に使用している体幹保持装置を使用して行うこととした。

1. 2. 5 計測項目

試技 1：右肩甲骨の内旋角度・上方回旋角度・後方傾斜角度 (図 3)、右肩甲骨上腕関節の挙上角度とし、それぞれの変化量の平均値を分析に用いた。

試技 2：骨盤に対する胸郭の回旋角度・側屈角度・伸展角度 (図 3)、右肩甲骨の内旋角度・上方回旋角度・後方傾斜角度、右肩甲骨上腕関節の挙上角度とし、右肩甲骨上腕関節最大挙上位から 1 パ

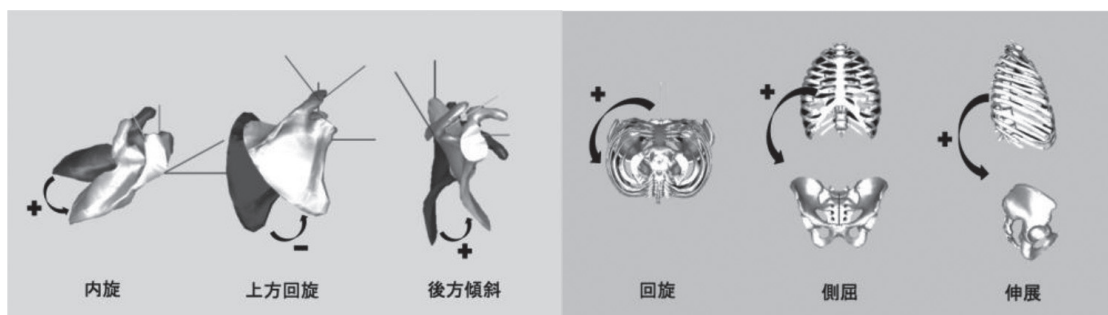


図3 肩甲骨・体幹の各動作

ドル中のそれぞれの変化量として 15 パドルの中間 3 回の平均値を分析に用いた。

2. 結 果

2. 1 上肢前方挙上時の肩甲骨・上腕骨の運動

2. 1. 1 右肩甲骨内旋角度・上方回旋角度・後方傾斜角度 (図 4)

上肢前方挙上時の肩甲骨内旋角度は健常カヌー選手で最大 36.7° 、最小 26.6° であり変化量は 10.1° 、パラカヌー選手で最大 34.0° 、最小 22.8° であり、変化量は 11.2° であった。

上方回旋角度は健常カヌー選手で最大 22.5° 、最小 -5.3° であり、変化量は 27.8° 、パラカヌー選手で最大 12.9° 、最小 -5.7° であり、変化量は 18.6° であった。

後方傾斜角度は健常カヌー選手で最大 8.9° 、最小 -10.1° であり変化量は 19.0° 、パラカヌー選手で最大 7.6° 、最小 -7.2° であり、変化量は 14.8° であった。

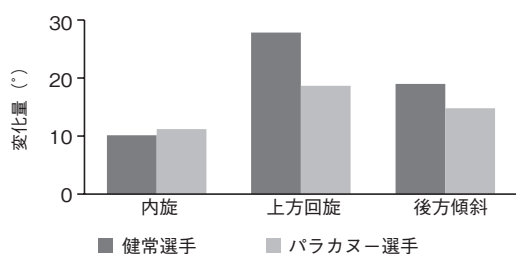


図4 上肢前方挙上時の肩甲骨の各運動における変化量

2. 1. 2 右肩甲上腕関節挙上角度 (図 5)

右上肢前方挙上時の右肩甲上腕関節挙上角度は、健常カヌー選手で最大 -8.2° 、最小 -120.6°

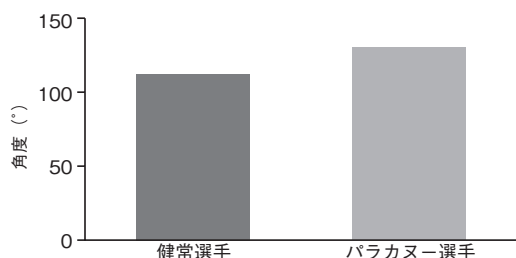


図5 右上肢前方挙上時の右肩甲上腕関節挙上角度

で変化量は 112.4° 、パラカヌー選手で最大 -1.4° 、最小 -131.6° で変化量は 130.2° であった。

2. 2 パドリング動作時の体幹・肩甲骨・上腕骨の運動

2. 2. 1 パドリング動作時の骨盤に対する胸郭の回旋角度・側屈角度・後傾角度 (図 6)

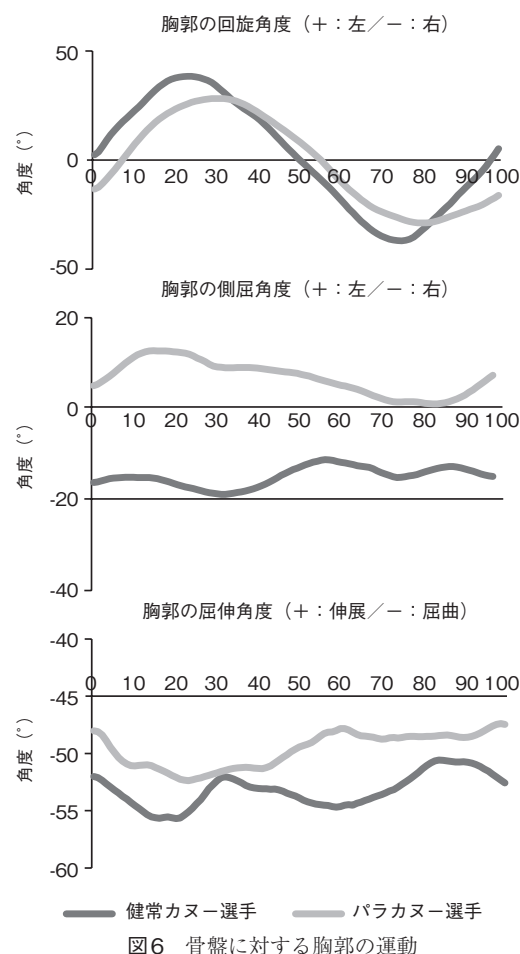


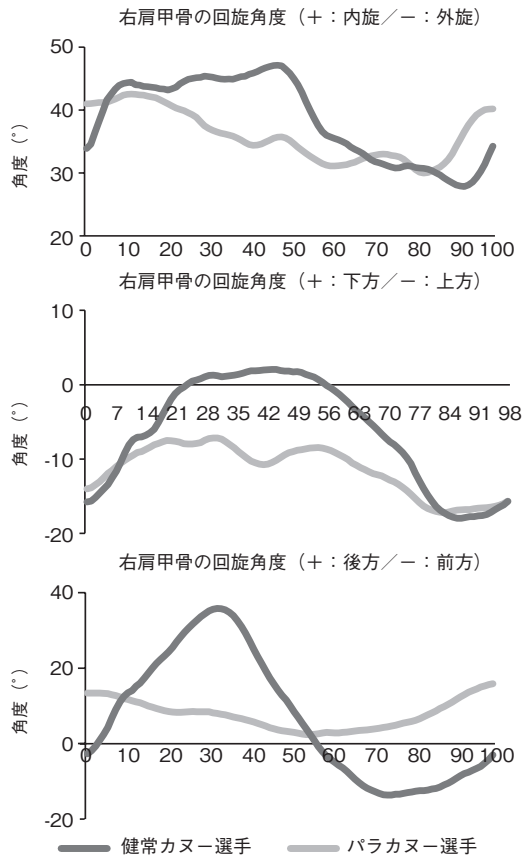
図6 骨盤に対する胸郭の運動

パドリング動作時の骨盤に対する胸郭の回旋角度は健常カヌー選手で最大 38.4° 、最小 -36.9° で変化量は 75.3° 、パラカヌー選手で最大 28.3° 、最小 -28.8° で変化量は 57.1° であった。

側屈角度は健常カヌー選手で最大 12.7° 、最小 1.0° で変化量は 11.7° 、パラカヌー選手で最大 -11.4° 、最小 -19.0° で変化量は 7.6° であった。

伸展角度は健常カヌー選手で最大 -50.6° 、最小 -55.7° で変化量は 5.1° 、パラカヌー選手で最大 -47.4° 、最小 -52.4° で変化量は 5.0° であった。

2. 2. 2 右肩甲骨の内外旋角度・上下方回旋角度・前後方傾斜角度 (図 7)

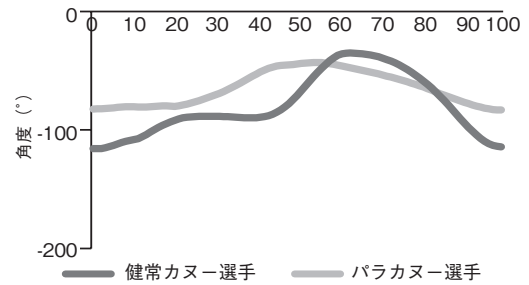


パドリング動作時の胸郭に対する右肩甲骨の内外旋角度は健常カヌー選手で最大 42.5° 、最小 30.0° で変化量は 12.5° 、パラカヌー選手で最大 47.1° 、最小 27.8° で変化量は 19.3° であった。

上下方回旋角度は健常カヌー選手で最大 -7.2° 、最小 -17.2° で変化量は 10.0° 、パラカヌー選手で最大 2.0° 、最小 -18.0° で変化量は 20.0° であった。

前後方傾斜角度は健常カヌー選手で最大 15.9° 、最小 2.4° で変化量は 13.5° 、パラカヌー選手で最大 35.8° 、最小 -13.6° で変化量は 49.4° であった。

2. 2. 3 右肩甲骨上腕関節挙上角度 (図 8)



パドリング動作時の右肩甲骨上腕関節挙上角度は健常カヌー選手で最大 -43.0° 、最小 -83.2° で変化量は 40.2° 、パラカヌー選手は最大 -35.1° 、最小 -115.8° で変化量は 80.7° であった。

3. 考 察

3. 1 上肢前方挙上時の肩甲骨・上腕骨の運動

スポーツを行う上で、上肢の挙上動作は多くの場面で求められる動きであり、元来、上肢挙上における肩甲骨運動は上方回旋が重要視されていた^{4,5)}。しかし、近年は肩甲骨上方回旋以外の運動の重要性も明らかになっており、特に後方傾斜の重要性が報告されている⁶⁾。

本研究では、上肢挙上時の肩甲骨運動に関して、上方回旋、後方傾斜、内旋を分析に用いた。内旋は胸郭に沿った肩甲骨の外転運動を示す指標となり、上方回旋に伴う運動として重要であると考えた。健常カヌー選手とパラカヌー選手との比較において、肩甲骨ではどのパラメータも健常カヌー選手の方が大きな値となった。三次元で計測した矢状面上での挙上では肩甲骨上腕リズムは 2.4:1 という報告があるが⁷⁾、健常カヌー選手は 4:1、パラカヌー選手は 7:1 となり、異なる値となった。しかし、同じ電磁ゴニオメータを用いた動的な評価で 4.3:1 であったとする報告もあり⁴⁾、健常カヌー選手の結果は類似したものであった。パラカヌー選手の上肢挙上動作が肩甲骨上腕関節に偏った理由としては、対象は国際クラス分けて KL1 と

いう座位保持困難な障害を持つ選手であることが挙げられる。上肢挙上動作においては、肩甲骨上方回旋には僧帽筋上部と下部、および前鋸筋の収縮が必要である⁸⁾。また、内旋や後方傾斜にも前鋸筋が関与する。一方、前方傾斜には三角筋前部、上腕二頭筋が関与する。体幹機能障害の選手においては、僧帽筋下部、前鋸筋の収縮低下により上方回旋や後方傾斜が十分起こらず、挙上角度が肩甲骨上腕関節の運動に偏る結果となったと推察できる。

3. 2 パドリング動作時の体幹・肩甲骨・上腕骨の運動

パドリング動作について、日本トップレベルの選手は水上で重心を制御しながら体幹を回旋させるスキルを有しているという報告⁹⁾や、前方への推進力を得るための重要な要素として骨盤を含めた体幹の回旋運動を挙げている報告³⁾があり、体幹の回旋動作は重要である。

体幹の運動について、健常カヌー選手はパラカヌー選手に比べて、左右回旋角度および側屈角度は高い値となり、屈伸角度は同程度の値であった。座位保持困難なパラカヌー選手の体幹の運動が、健常カヌー選手と比べて少ないことは容易に想像できるが、それぞれのパラメータを時系列でみると差があった左右回旋角度と側屈角度で異なる動きをしていることがわかる。まず左右回旋角度について、我々の仮説は体幹機能障害があり、座位保持困難であれば体幹回旋は少なく肩甲骨や上腕骨による代償動作が顕著に出ると考えていた。しかし、骨盤に対する胸郭の回旋角度の変化量は健常カヌー選手が75.3°、パラカヌー選手で57.1°と18.2°、左右に9.1°ずつの差しかなかった。今回の回旋角度は骨盤に対する胸郭の角度であり、骨盤を固定していなかった健常カヌー選手は骨盤も連動して回旋しており、差としての値が低くなったと考えられる。また、図6が示す通り、

パラカヌー選手の回旋角度のpeakのタイミングが健常カヌー選手に比べて遅いことは体幹主導で回旋している健常カヌー選手と上肢の振りに伴って体幹が回旋してくるパラカヌー選手の差と考えられ、角度としては近い値であったとしても全く異なる運動であると考えられる。また、側屈角度については健常カヌー選手は左右のpeakが明らかなのに対して、パラカヌー選手のは明確ではない。パラカヌー選手はバランスが取りにくく、パドリング動作の間できるだけ正中位を保とうとする。その結果、意図的に体幹を動かしている健常カヌー選手に比べて不安定でpeakがはっきりしない軌跡を描くと考えられる。

次に肩甲骨の運動(図7)についてだが、内外旋角度、上下方回旋角度、前後方傾斜角度のいずれにおいてもパラカヌー選手が高い値となった。胸郭に対する肩甲骨の運動を評価しているため、より体幹の運動が大きい健常カヌー選手に比べて、パラカヌー選手は上肢による代償によってパフォーマンスを維持しようとしていると考えられる。しかし、健常カヌー選手においても肩甲骨の運動は行われており、体幹から上肢への運動が重要であることが示唆された。

肩甲骨に対する上腕骨の運動については、挙上角度に大きな差がみられ、それにより変化量でもパラカヌー選手が高い値となり、肩甲骨同様、体幹機能不全の代償として上腕骨を過剰に動かしていると考えられた。また、図7と図8において上腕骨最大挙上時の肩甲骨の前後方傾斜角度をみると肩甲骨が前方に傾斜している時に最大挙上していることがわかる。肩痛を訴える患者は後方傾斜が減少しているという報告¹⁰⁾があることなどからも傷害の予防という観点から、注意が必要であると考えられる。したがって、パラカヌー選手の内、特にKL1の選手に関しては体幹機能を代償する肩甲骨、上腕骨の可動域を十分に確保し、自由に動かせる機能と上腕骨へスムーズに力

を伝える運動性を重視したトレーニングが必要になると考える。

4. まとめ

電磁ゴニオメータによる三次元動作解析装置を用いて健常カヌー選手とパラカヌー選手の体幹から肩甲骨、上腕骨の運動を測定し比較した。肩甲骨以遠に関しては上肢挙上動作では健常カヌー選手が、パドリング動作ではパラカヌー選手が大きく動く傾向にあった。体幹はパドリング動作において健常カヌー選手の方が大きく動くことがわかった。パラカヌー選手は体幹機能の代償動作として上肢帯を利用しており、傷害予防の観点からも異なる指導が必要であることが示唆された。

謝 辞

本研究に助成頂いた公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究実施にあたり多大なご協力を頂いた早稲田大学科学院 矢内利政教授に厚く御礼申し上げますとともに、本研究に快く参加して下さいました被験者の皆様に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Codman E.A., The shoulder., Thomas Todd, Boston., pp.32-64(1934)
- 2) Konda S., Yanai T., Sakurai S., Scapular rotation to attain the peak shoulder external rotation in tennis serve. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **42**: 1745-1753(2010)
- 3) 宮崎茂明., 帖佐悦男., 他., カヤック動作におけるパドリング時の骨盤動作解析., *臨床バイオメカニクス.*, **35**: 297-302(2014)
- 4) McQuade K.J., Smidt G.L., Dynamic scapulohumeral rhythm: the effects of external resistance during elevation of the arm in the scapular plane., *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, **27**(2) :125-133(1998)
- 5) Kon Y., Nishinaka N., Gamada K., Tsutsui H., Banks S.A., The influence of handheld weight on the scapulohumeral rhythm., *Journal of Shoulder and Elbow Surgery.*, **17**(6) : 943-946(2008)
- 6) Kibler W.B., Sciascia A., Current concepts: scapular dyskinesis., *British Journal of Sports Medicine.*, **44**(5) : 300-305(2010)
- 7) Ludewig P.M., Phadke V., Braman J.P., Hassett D.R., Cieminski C.J., LaPrade R.F., Motion of the Shoulder Complex During Multiplanar Humeral Elevation. *Journal of Bone and Joint Surgery-American.*, **91A**(2) : 378-389(2009)
- 8) Bagg S.D., Forrest W.J., A biomechanical analysis of scapular rotation during arm abduction in the scapular plane., *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation.*, **67**(6) : 238-245(1988)
- 9) 粕山達也., 都築和久., 塩沢寛治., カヌースプリント日本トップレベル選手と高校生選手のストローク動作の比較および傷害発生要因の検討., *スポーツ傷害.*, **19**:22-23(2014)
- 10) Lukasiewicz A.C., McClure P., Michener L., Pratt N., Sennett B., Comparison of 3-dimensional scapular position and orientation between subjects with and without shoulder impingement., *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy.*, **29**(10) : 574-586(1999)