加速度センサによる漕艇運動の身体動作と活動量の測定[†]

岡田 英史*・中村 好孝*・茅 元 司*・南谷 晴之*

Measurement of Motion and Energy Production During Rowing Using an Accelerometer

Eiji OKADA*, Yoshitaka NAKAMURA*, Motoshi KAYA* and Haruyuki MINAMITANI*

The motion and energy produced by the human body during sport are important factors in estimating athletic ability and in providing useful feedback in training. However, previous methods of measuring body motion and energy production have been too cumbersome to be used in daily training.

In this study, an accelerometer was used to estimate the motion and energy production of the body during rowing. The accelerometer, capable of measuring body acceleration in three dimensions, was worn on the back by an oarsman who carried out simulated rowing movements using a rowing ergometer. The rate of acceleration of the body during rowing showed distinct characteristics from which the body motion could be roughly estimated. The waveform of the acceleration made by a skilled oarsman was remarkably different to that made by a semi-skilled oarsman. Energy production during rowing was estimated by integrating the absolute value of the acceleration. The estimated results agreed well with power production gained from the performance monitor of the rowing ergometer.

Measuring acceleration is a simple and valuable method of estimating motion and energy production during sporting activities. It can also be used in biomechanical and kinesiological investigations.

Key Words: sport measurement, accelerometer, rowing, body motion, energy production

1. 緒 言

身体動作や身体活動量を計測・分析してトレーニングの指標や選手の評価に用いることは、スポーツの競技レベルの向上を図るうえできわめて有効である。たとえば、運動を記録したVTRを利用するフォームの矯正などは、簡便でかつ有効な指導法であり、多くのスポーツに応用されている。しかし、単にVTRを提示する指導法は、指導者の感覚による分析結果を基準にする方法であり、科学的なトレーニングにおいては、より客観化された定量的なデータを基準とした指標から指導・評価を行うことが望ましい。身体動作の評価法は身体の各部位の運動に着目して解析する局所的な評価法と、動作全体の特徴づけを行う総合的な評価法に分類される¹⁾。前者は、関節角度計などのセンサを身体に取り付けて運動を直接計測したり、VTRを利用した画像解析によって標点計

測を行うことで、着目する部位の動作を細かく定量化する。これに対して後者は、身体各部の動きには着目せず、身体動作全体の特徴を表わす指標として身体の重心位置の変化を捉えて解析を行うものである。たとえば、歩行などの運動学的な解析においては、動作の総合的な評価を行う指標としてフォースプラットフォームによって測定された床反力が用いられてきた。床反力からは身体各部の動きを求めることはできないが、歩行の時相、左右の対称性、重心位置の変動などを評価することが可能であるとされている^{1),2)}。一方、身体活動量に関しては、吸気ガス分析から得ることができる酸素摂取量を指標とする測定法が行われている³⁾。しかし、これらの身体動作や活動量の測定法は、一般に装置が大がかりであり、さらに大量なデータを扱うため測定が煩雑になるという難点があるため、日常的な練習に活用することは困難である。

これに対して、近年、加速度計を用いて身体動作や活動量を簡便に測定しようとする試みがなされている。身体動作に関しては、加速度計を身体の重心位置を近似する腰背部に取り付けて歩行中の加速度を測定したところ、加速度波形がフォースプラットフォームで測定された床反力の左右合力波形とよく一致するという結果が得

[†] 第32回計測自動制御学会学術講演会で発表(1993・8)

* 慶應義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉3-14-1

* Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama

(Received January 13, 1994)

(Revised June 6, 1994)

られている⁴⁾。また、身体活動量については、歩行中における加速度計の上下方向に関する出力波形の積分値と呼気ガス分析から推定された消費エネルギーの間に相関が認められたという報告がなされている^{5),6)}。無論、加速度から身体活動量を推定する方法では、等尺性運動のような身体動作を伴わない運動のエネルギーを測定することは不可能である。また、重心の運動はあくまで身体運動の一部にすぎず、加速度計を装着した部位を変動させずに運動を行った場合、加速度の積分値は身体活動量の指標とするには対象となる運動の性質を十分検討する必要がある。しかし、一般にスポーツにおいて問題とされる身体活動量は重心の移動に置き換えられるものがほとんどであると考えられる。したがって、身体加速度を用いた身体活動度の推定法は、歩行運動と同様にスポーツにおける解析にも十分応用できるものと考えられる。スポーツの身体動作や活動量の測定に加速度計を応用することができれば、科学的なトレーニングにおける客観化された定量的なデータを容易に得ることが可能となり、有効な測定手段になるものと考えられる。

本研究では、測定を行うスポーツの種目として漕艇運動を取りあげ、身体に装着した加速度計の出力波形から、身体動作や身体活動量に関して得られる有効な情報について検討を行った。これらの結果から、スポーツにおける計測に対して加速度計を利用する可能性を確かめた。

2. 漕艇運動と身体加速度

本研究で加速度計を用いて身体動作や活動量の解析を行う漕艇運動について説明する。漕艇運動は、オールのブレードを水中に入れて支点とし、漕手がオールとハンドルを引く力をクラッチ(オールの留め具)を介してボートに伝達することでボートの推進力とする運動である。漕艇運動における一連の動作を **Photo. 1** に示す。漕手はボートの進行方向に対して後向きに座っている。このとき、ストレッチャーと呼ばれるボートに取り付けられた靴を履くことによって、足部はボートに固定される。漕手が座るシートは前後に移動するようになっている。漕手は膝を曲げ、上体を前傾させ、腕を伸べて、オールのハンドルが最も前方に位置する状態でオールのブレードを水中に入れる(キャッチ)。漕手は脚、上体、腕の力でハンドルを引き、ブレードから水に作用した力の反作用を推進力としてボートを進める(バックワード)。膝が伸びきり、上体が後傾し、腕が曲った状態でブレードを水中から抜く(フィニッシュ)。再びキャッチの状態に戻るため、漕手はオールを空中に出したまま腕を伸ばし、上体を前傾させ、膝を曲げることで、身体を前方へ移動

Photo. 1 Body motion during rowing

する(フォワード)。漕艇運動は、このようにしてキャッチ、バックワード、フィニッシュ、フォワードという一連の動作を、より速い艇速を維持するように繰り返す。

1 分間に漕ぐ回数のことをピッチという。

漕艇運動において、トレーニングの目標設定や競技能力の評価に用いられる指標としては、以下のようなことが挙げられる⁷⁾。

- 1) 身体が発揮することができるエネルギー量およびその持続性。
- 2) 漕艇運動に関与する身体各部(脚、上体、腕)の動作の組み合わせ方(漕法)。それによって身体各部が発揮したエネルギーがオールのハンドルへ伝達される効率。
- 3) ハンドルへ伝えられたエネルギーがブレードを介して水へ伝達され、ボートの推進力となるときの効率(オールの深さ、キャッチやファイナルの巧拙)。
- 4) 漕手間のユニフォーミティー(各漕手の発揮したエネルギーが相殺されることなく艇の推進に寄与しているか否か)。

加速度計を用いて測定が行えるのは身体運動の総合的な評価であることから、加速度計を利用する測定法で検討が行える可能性があるのは、これらのうち身体活動量に係る 1) と身体動作に係る 2) の 2 項目である。

まず、身体各部の動作の組み合わせ方について考えると、漕艇運動は脚、上体、腕の動作が合成された運動として表現される。一般の漕法では、瞬発力がありかつ強力な脚力をキャッチ直後に用いることでボートを急速に加速させる。上体のあおりは瞬発力はないが強力なので、パッ

クワード中盤で上体をあおることにより、脚が伸びることで身体速度が低下することを補い、さらにボートを加速する。腕は力はないが瞬発力に優れているので、十分加速されたバックワードの後半部分で用いることになる。このように、漕艇運動における身体各部の動作には時相の差が見られる。しかし、単に、脚、上体、腕の順番にばらばらに身体を動かしたのでは、身体各部が発揮したエネルギーを有効にオールへ伝えることはできない。つまり、漕艇運動においては、脚、上体、腕の動作の組合せのタイミングを適切にとることが、身体が発揮したエネルギーを最も効率よくオールへ伝えるうえで重要となる。よって、これらの身体各部位の動作に起因する身体加速度の変化を捉えることができれば、漕艇運動における脚、上体、腕の連係動作に対する評価が可能になるものと考えられる。そこで、本研究では画像解析による標点計測から得られた漕艇運動時における身体各部の動作と加速度計の出力波形を比較することによって、漕艇運動中の身体各部の動作が身体加速度から評価できるかどうかを検討する。

つぎに、身体活動量についてであるが、歩行運動においては上下方向の加速度 a を(1)式に示すように積分して、運動強度を考慮した身体活動量の指標としている⁹⁾。

$$G = \int a \, dt \quad (1)$$

本研究においても、この加速度積分値が漕艇運動中の身体活動量の指標になるかどうか検討する。ただし、漕艇運動はシートに腰掛けて行う運動であるため、加速度計の装着部位は身体の重心ではなく、漕艇運動による身体動作を最も反映する部位にする必要がある。また、歩行運動においては、体内で消費されるエネルギーに着目して、加速度積分値と酸素摂取量との比較を行っている。身体加速度から歩行中の消費エネルギーを推定することは、過度の運動負荷が禁忌となる心疾患患者や、健常者に比べて歩行に多くのエネルギーを要する下半身に障害をもつ患者に応用した場合、非常に有効であると考えられる。一方、スポーツ、とくに運動の目的がボートを推進することにある漕艇運動では、身体が動作することによって外部に発揮されたエネルギー量を推定することが、内部で消費されたエネルギーの推定と同様に重要となる。そこで、本研究では、身体加速度の積分値をボートの推進に寄与したエネルギーと比較することで、漕艇運動において身体が発揮したエネルギーとしての身体活動量を身体加速度の積分値から推定できるかどうか検討した。

3. 身体加速度の測定

3.1 加速度センサ

加速度が $0 \sim 980 \text{ m/s}^2$ の範囲で線形な出力 (9 mV/1 g) が得られる圧電式加速度センサ(松下電子部品(株)製)を用いて加速度計を構成した。製作した加速度計は、三つの圧電式加速度センサ、駆動回路および電源(9 V 電池 $\times 2$)が $10 \text{ cm} \times 8 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$ のケースに収められており、重量は 250 g である。三つのセンサはそれぞれ垂直に位置するように配置されており、3軸の加速度が個別に検出できる。加速度センサで検出された加速度信号は、アンプで増幅され、カットオフ周波数 25 Hz のローパスフィルタで高周波成分を除去された後に加速度計から出力される。身体加速度の測定は、加速度計からの出力信号をサンプリング周波数 100 Hz で A/D 変換器を介してコンピュータにいったん記録して、オフライン解析を行った。

3.2 漕艇運動における身体加速度の測定

漕艇運動の解析には、陸上において漕艇運動を模擬できる装置であるローイングエルゴメータを利用した。ローイングエルゴメータを用いて漕艇運動を行っている様子を **Photo. 2** に示す。漕手は、ボート上と同様に足をストレッチャに固定し、移動するシートに腰掛けてハンドルを握る。ハンドルは、チェーンによって写真右側のケージの中にあるフライホイールと接続されており、ハンドルを引くときのみフライホイールへ力が伝達されるようになっている。よって、フライホイールを回転させることによって、漕手にはボート上でオールを水中に入れてハンドルを引いているときと同様の負荷が与えられることになる。漕手がハンドルに対して行った仕事は、フライホイールの回転速度を検出することによって計算され、ピッチとともにローイングエルゴメータのパネルに表示されている。

漕艇運動時の身体加速度の測定は、**Photo. 2** に示すように漕手の背部に加速度計を装着することで行った。加速度計の底面にはマジックテープが貼付してあり、漕手

Photo. 2 Rowing ergometer used in the experiments

の背部に対になるマジックテープを貼付することによって加速度計の装着位置を決定した。マジックテープによって加速度センサを仮留めしたのち、幅 25 mm の弾性を有するゴムバンドを加速度計の上からたすき掛けすることによって身体と加速度計を固定した。Fig. 1 は、個々の加速度センサの出力が示す方向成分の軸と身体の関係を示したものである。加速度計の装着位置は身体の重心とは一致してはいないが、漕艇運動における脚と上体の合成運動を検出するには、背部が最適であると考えられる。この場合、加速度計は腕の動作に関しては加速度を検出することができない。しかし、腕の力は脚や上体に比べて小さく、ボートの加速に寄与する割合は小さいとされているので、本研究の段階においては無視することとした。

漕艇運動中、上体は前後に傾くため、加速度計の各軸は上体の動きに伴って変動してしまう。そこで、身体活動量の指標とする加速度の積分値は一軸に関する加速度出力を用いるのではなく、複数軸の加速度ベクトルを足しあわせた合成加速度から求めることとした。漕艇運動は基本的には Fig. 1 の紙面内での 2 次元運動であると考えてよいので、合成加速度は上下軸と前後軸の加速度ベクトルから計算した。

漕艇運動を行う被験者は、大学の代表選手となる対校レベルの漕手と、体力・技術面で対校レベルの漕手に劣るジュニアレベルの漕手とした。まず、画像解析から得られた漕艇運動時における身体各部の動作と加速度計の出力波形を対応づけするとともに、身体加速度の積分値をエルゴメータで測定されたハンドルに与えられたエネルギーと比較した。これらの結果から、加速度計を用いて身体動作や身体活動量を測定することの妥当性について検討した。さらに、漕手のレベルの差による身体加速度の差異を比較することにより、身体加速度から漕艇運

Fig. 1 Schematic diagram of the accelerometer fixed on a body and the coordinate axis of the output signal of it

動における科学的なトレーニングや競技能力の評価に用いることが可能な客観化された指標を得ることができるかどうかを検討した。

4. 測定結果

対校レベルの漕手が、バックワードを全力でピッチ 30 を維持して漕いだときに得られた加速度計の各軸、および合成加速度の経時変化を Fig. 2 に示す。加速度波形は上から前後軸、上下軸、左右軸の各方向成分、そして前後軸と上下軸の加速度ベクトルを足し合わせた合成加速度を示している。まず、バックワードに着目すると、身体合成加速度はキャッチ直後に急速に増加し、鋭いピークが観測されている。合成加速度の最大値はキャッチの約 70 ms 後に観測されており、約 12 m/s^2 に達している。このときの前後方向と上下方向の加速度波形を見ると、ほぼ同一の時相でピークが観測されている。この後、加速度はいったん低下するが、キャッチ後約 200 ms (バックワードの約 35 %) から再び増加する。しかし、合成加速度の大きさは 4 m/s^2 程度であり、キャッチ直後に比べると小さい。このときも前後方向と上下方向の加速度波形にピークが観測されているが、キャッチ直後とは異なり時相にずれが見られる。キャッチ後約 550 ms (バックワードの約 75 %) になると加速度は負となるが、これはフィニッシュで身体の動きを止めるための減速が始まるためである。しかし、この時点まで加速度は常に

Fig. 2 Acceleration generated by body during steady state rowing (30 strokes/min.) of a skilled oarsman

正であり、身体は加速され続けていたことがわかる。オールは、上体が停止したあとも腕を曲げることによって引き続けられており、フィニッシュは負の加速度が発生した少し後になる。しかし、加速度センサは体幹に装着されているため、この腕の動きに対応する加速度はほとんど検出されない。フォワードは、フライホイールによる負荷がないため、バックワードとは異なり身体加速度には時相による特徴的な波形の変化は見られない。フォワード前半は、身体を前方に移動するために負の加速度が生じているが徐々に小さくなり、後半は正の加速度が発生している。しかし、加速度の絶対値は全般的に小さく、ほぼ等速の運動がなされていることがわかる。

検出された身体加速度がどのような動作によって生じたかを確認するため、Fig. 3の右図に示すように漕手の手首、肘、肩、腰、膝、足首に標点を取りつけて、漕艇運動の動作をVTRに録画した。とくに加速度波形に特徴的な変化がみられたバックワードに着目して、VTR画像を画像処理して標点の抽出を行い、身体動作を解析した。Fig. 3の左図は、キャッチからフィニッシュまでの時間を4等分し、それぞれの時相における身体動作の解析結果をスティックピクチャーとして連続的に表示したものである。また、バックワード中の膝角度 θ 、および上体が水平面に対してなす角度 ϕ の変化を解析した結果

Fig. 3 Body motion during rowing analyzed with image processing

Fig. 4 Change of knee angle and trunk angle of a skilled oarsman

をFig. 4に示す。バックワードの0～25%の時相では上体の角度はほとんど変化せず、膝角度のみが変化していることがFig. 4からわかる。このことは、Fig. 3のスティックピクチャーにおいて上体がキャッチから平行移動していることから明らかである。25～50%の時相では、Fig. 4の膝角度の変化がほぼ一定の割合で変化しているのに対して、上体の角度が大きく変化している。スティックピクチャーでは足だけでなく上体の運動も加わった身体動作が観測されている。50～75%の時相では、足が伸びきることによって膝角度の変化の割合は小さくなるが、上体の角度はさらに増加している。よって、脚による身体動作は少なく、上体の動作が支配的になっていることがわかる。75～100%の時相では、膝角度、上体角度ともさほど変化しておらず、この時相がフィニッシュの姿勢にいたる減速期であることがわかる。ここで、Fig. 3における肩の位置に着目すると、各時相間における肩の移動距離は0～75%までは前の時相より増加する傾向にあり、75～100%の時相でのみ減少している。よって身体速度のおおよその変化としては、前半3/4は加速を続け後半1/4は減速していると考えられ、この傾向はFig. 2の加速度波形と一致している。

Fig. 5は、対校レベルの漕手がピッチを20にしてバックワードを50%程度の力で漕いだときに得られた波形である。バックワードを全力で漕いだときに比べて身体の動きが遅くなるため、測定された加速度の値は全体的

Fig. 5 Acceleration generated by body during light paddle rowing (20 strokes/min) of a skilled oarsman

に小さくなっており、キャッチ直後のピーク値で 6.4 m/s^2 と全力で漕いだときの半分程度の値になっている。ただし、両者の違いは漕ぐ強さとピッチだけであり、身体各部の動作自体は変化しないため、1ストローク中に見られるピークの時相などの波形に関する特徴については Fig. 2 と Fig. 5 で同様の傾向が観測されている。

Fig. 6 と Fig. 7 は対校レベルの漕手とジュニアレベルの漕手が、レースを行うときと同程度のピッチ 34 でバックワードを全力で漕いだときに測定された身体加速度と、合成加速度波形を積分することによって得た身体速度波形をそれぞれ示している。両者の合成加速度の波形を比較すると、対校レベルの漕手では、キャッチ直後に高く鋭い加速度のピークが認められる。これに対して、ジュニアレベルの漕手ではキャッチ直後の加速度のピークが低くなっている。そのため、両者の身体速度変化は、キャッチから最高速度に達するまでの波形に大きな差異が見られる。対校レベルの漕手ではキャッチ直後から大きな身体速度が生じており、上に凸の速度波形になっているのに対して、ジュニアレベルの漕手では徐々に身体速度が増加しているため、下に凸の速度波形になっている。Fig. 8 は、ジュニアレベルの漕手についてバックワー

ドの膝角度と上体の角度変化を測定した結果である、Fig. 4 の対校レベルの漕手の身体動作と比較すると、対校レベルの漕手がキャッチ直後に上体の角度が変化せずに膝角度が変化していたのに対して、ジュニアレベルの漕手はキャッチ直後に膝角度がほとんど変化せずに上体が動いていることがわかる。

加速度計による漕艇運動中の身体活動量測定の可能性を検討するため、加速度波形の積分値とエルゴメータのエネルギー計数値を比較した。被験者は対校レベルの漕手 3 名(体重 $73.6 \pm 3.1 \text{ kg}$, 漕歴 3 年～6 年)とジュニアレベルの漕手 3 名(体重 $72.0 \pm 5.6 \text{ kg}$, 漕歴 2 年程度)で、バックワードを全力で漕ぎ、かつ指定されたピッチを維持するように指示を与えた。ピッチは 18 から 40 まで変化させた。ピッチを一定に保って漕艇運動を 20 秒間行なったときに得られた加速度波形の積分値とエルゴメータのエネルギー計数値の関係を Fig. 9 に示す。ここで、漕艇運動の身体動作のうち、ボートの推進に寄与するのはオールが水中にある時相だけであるから、加速度計の積分値はバックワードの区間についてのみ積算した。図中の直線は、加速度積分値とエルゴメータのエネルギー計数値の回帰直線を漕手ごとに求め、対校レベルの漕手

Fig. 6 Acceleration generated by body and body velocity during race speed rowing (34 strokes/min.) of a skilled oarsman

Fig. 7 Acceleration generated by body and body velocity during race speed rowing (34 strokes/min.) of a semi-skilled oarsman

Fig. 8 Change of knee angle and trunk angle of a semi-skilled oarsman

Fig. 9 Relationship between cumulative record of accelerometer and power measured with rowing ergometer

については実線、ジュニアレベルの漕手については破線で示したものである。これらの回帰直線の相関係数は0.960～0.996で、両者の関係はよく相関しており、漕艇運動中の身体加速度の積分値から身体が発揮したエネルギーを推定することができるものと考えられる。ただし、同一の加速度で身体を動作させた場合には、体重が重い漕手のほうがボートを推進させるエネルギーが大きくなる。そこで、加速度積分値を体重で除してエネルギー計数値との関係を調べたものが Fig. 10 である。ここで、図中の実線は、対校レベルの漕手とジュニアレベルの漕手をそれぞれ一つのグループとして求めた回帰直線であり、破線は95%の信頼区間を示している。体重で除した

Fig. 10 Relationship between cumulative record of accelerometer and power normalized by body weight

加速度積分値とエネルギー計数値の相関係数は、対校レベルの漕手で0.984、ジュニアレベルの漕手で0.931であった。

5. 検 討

まず、漕艇運動中における身体動作と検出される加速度の関係について考える。対校レベルの漕手は、キャッチ直後とバックワード中盤に合成加速度の増加が見られた。これらを画像処理による動作解析の結果と対応づけると、対校レベルの漕手は、脚を曲げて上体を前傾させたキャッチの姿勢から脚を伸ばす動作によってバックワードを開始している。よって、キャッチ直後のピークは主として脚力によって生じていると考えられる。このとき、上体の角度はほとんど変化していないので、加速度計は並進運動しており、前後軸、上下軸のセンサが検出する身体加速度の方向成分はほぼ一定となる。したがって、前後方向、上下方向の加速度波形はピークの時相が一致することになる。これに対して、バックワード中盤では脚力による加速は低下し始めるが、上体を後方へあおることでオールへの引きはさらに加速されている。したがって、バックワード中盤のピークは主として上体の動きによる加速度の増加と考えられる。このとき、加速度計は上体の動きに伴い並進運動とともに回転運動している。このことから、バックワード中盤において、合成加速度がほぼ一定値を示しているのに対して前後方向、上下方向の加速度波形に時相のずれが見られるのは、上体の角度の変化によって前後、上下軸の加速度センサが検出する加速度の方向成分が変化することに起因して

いるものと考えられる。以上のことから、キャッチ直後における加速度波形の第1のピークは脚の伸ばし、バックワード中盤の第2のピークは上体のあおりに主として起因しているものと考えられる。したがって、二つのピークが高く、谷間が小さいほど、脚と上体の連係動作が効率よく行われていると評価することが可能である。一方、左右方向の加速度はボートの進行に直接寄与しないむだな動作を意味しているため、なるべく小さいほうがよいと考えられる。

つぎに、対校レベルの漕手とジュニアレベルの漕手の漕艇運動の差異について検討する。両者の合成加速度の波形を比較すると、対校レベルの漕手に比べてジュニアレベルの漕手ではキャッチ直後の加速度のピークが低く、脚の蹴りが弱いことを示している。この要因として、まず脚の筋力が不十分であるということが考えられる。また、キャッチ直後の前後軸、上下軸の加速度波形を見ると、上下軸のピークが前後軸に比べて時相が遅れていることがわかる。このことは、上体の角度が変化していることを表わしている。つまり、ジュニアレベルの漕手はキャッチで上体をおる動作をしているため脚の蹴りが鈍っている、という技術的な問題もこの波形から指摘することができる。これは、Fig. 8 に示した画像処理による動作解析から得られた傾向と一致している。身体速度の波形を比較すると、対校レベルの漕手のほうが全体的に身体速度が速いだけでなく、キャッチ直後の鋭い脚の蹴りにより、身体速度が急速に増加していることがわかる。これに対して、ジュニアレベルの漕手ではキャッチ後に身体加速が鈍く、ゆっくりと増加している。ボートを速く漕ぐという目的からすると、オールを引く身体速度はキャッチ後なるべく早い時相で最高速度になり、その速度をフィニッシュまで維持することが望ましいと考えられる。対校レベルの漕手の身体速度波形の傾向は、ジュニアレベルの漕手のものと比べてこの要件をより満たす傾向にあることがわかる。

最後に、漕手が外部に発揮したエネルギーの指標となる身体活動量を身体加速度から推定する試みについて考える。前述したように、前後軸、上下軸のセンサが検出する加速度の方向成分は上体の角度によって変化してしまうが、身体加速度の積分値を求めるときに合成加速度を用いることで、軸の変動に起因する影響を軽減できるものと考えられる。Fig. 9 からわかるように加速度積分値から求めた身体活動量の指標とローイングエルゴメータで測定したエネルギー計数値は非常によく相関している。このことは、漕艇運動において測定された加速度積分値から漕手が外部に発揮したエネルギーの指標となる身体活動量を推定できることを示している。ここで、前

述したように本研究では加速度計を体幹の背部に装着したため、腕の動作に関しては加速度の出力に反映されていない。しかし、腕の力は脚や上体に比べて小さく、エネルギー計数値への寄与についても脚や上体と比べると小さいため、無視してもさほど大きな問題は生じないものと考えられる。

ここで、注目すべきことは、Fig. 10 において、同じエネルギー計数値が得られた場合の身体活動量はジュニアレベルの漕手のほうが大きくなっている点である。たとえば、Fig. 6 と Fig. 7 では、ピッチを同一にしたときの対校レベルとジュニアレベルの漕手の身体加速度を比較している。この場合には対校レベルの漕手のほうが大きな加速度が生じており、エルゴメータで測定されたエネルギー計数値も当然大きくなっている。ジュニアレベルの漕手が、このときの対校レベルの漕手と同じエネルギー計数値を得るためには、ピッチを上げることなどによって単位時間あたりの身体活動量を増やさなければならない。そして、同一のエネルギー計数値が得られるように漕いだ場合、そのときの身体活動量は Fig. 6 の対校レベルの漕手よりも大きくなってしまことになる。このことは、身体活動量が同一の場合には対校レベルの漕手のほうがボートの推進に寄与するエネルギーが大きい、つまり身体が発揮したエネルギーをオールに伝達する効率が高いことを示唆している。したがって、加速度計で測定した身体活動量とエルゴメータのエネルギー計数値を用いることで漕手の能力を評価する一つの指標を得ることができるものと考えられる。

本研究においては、身体から外部に発揮されるエネルギーを身体活動量として捉え、身体加速度の積分値から身体活動量が推定できるかどうか検討した。しかし、1, 2 章でも述べたように、身体活動量は体内でのエネルギー消費量として捉えることもできる。漕艇運動はスタート直後やゴール直前などのスパート時を除いては、有酸素運動であり、身体加速度積分値と酸素摂取量の間に相関が得られる可能性は高いと考えられる。よって、漕艇運動時に体内で消費されたエネルギーを身体加速度から推定することも、今後の重要な課題になると考えられる。また、身体加速度の測定においては、加速度計と身体が一体化することが望ましい。今回行った測定では、ゴムバンドをたすき掛けにして加速度計を固定したため、肩を動かすときに違和感を訴えた漕手が存在した。このことによる漕艇運動への影響は見られなかったが、より簡便かつ再現性のよい測定が行える加速度計の装着法も実用化へ向けての課題になるものと考えられる。

6. 結 言

本研究では加速度センサをスポーツにおける計測に応用することを目的として、漕艇運動中における身体動作と活動量の解析を加速度計を用いて行った。その結果、身体加速度の波形から漕艇運動中の脚や上体の動作に関する特徴を解析することが可能であること、身体加速度の積分値から漕艇運動時に身体が発揮したエネルギーを推定できることが明らかになった。これらのデータは漕艇運動のトレーニングの指標や漕手の能力評価を行う上で有用なものであった。

加速度計は、身体動作の変化を敏感に捉えることができるため、動作の特徴を抽出することが比較的容易に可能である。反面、自由度の大きな動作では、加速度波形のもつ意味を解析するのが困難になるという問題を生じる。ただし、この点に関しては、スポーツのトレーニングにおいては同一動作を繰り返すことが多く、そのような場合には、本研究で取り扱った漕艇運動と同様に、各時相における動作は既知である。そうでない場合でも、ビデオなどを併用することにより波形の解釈が可能であると考えられる。また、本研究においては加速度計の出力を有線でコンピュータへ接続したが、テレメータを用いれば無拘束で測定が行えるため、さらに適用範囲は広がるものと考えられる。以上のことから、加速度計を用いた身体動作や活動量の測定は、適用可能な競技種目はある程度限定されるものの、トレーニングや選手評価に用いることが可能な客観化された定量的な指標を比較的容易に得ることができるため、スポーツにおける有効な計測手段の一つになりうるものと考えられる。

本研究を遂行するにあたって、加速度センサをご提供頂いた日本光電工業(株)、加速度計の校正にご協力頂いた小野測器(株)、また、実験にご協力頂くとともに有益なご意見を頂戴した、慶應義塾大学大学院理工学研究科根武谷悟氏、慶應義塾大学スポーツ医学研究センター副所長山崎元助教ならびに大西祥平助手に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 阿江通良: スポーツにおける運動計測, 日本 ME 学会雑誌 BME, 5-1, 25/32 (1991)
- 2) 阿江通良: スポーツ技術の改善と計測, 計測と制御, 31-3, 430/436 (1992)
- 3) 田村, 佐藤, 樋口, 戸川: 携帯形酸素摂取量測定装置の開発とその応用, 計測自動制御学会論文集, 29-8, 916/924 (1993)
- 4) 小田, 千野, 山崎: マイコンを応用した簡易歩行分析, 総合リハ, 10-2, 245/249 (1982)
- 5) H. J. Montoye, R. Washburn, S. Servais, A. Ertl, J. G. Webster and F. J. Nagle: Estimation of Energy Expenditure by a Portable Accelerometer, Medicine and Science in Sports and Exercise, 15-5, 403/407 (1983)
- 6) G. A. L. Meijer, K. R. Westertep, F. M. H. Verhoeven,

H. B. M. Koper, and F. ten Hoor: Methods to Assess Physical Activity with Special Reference to Motion Sensors and Accelerometers, IEEE Trans., BME-38-3, 221/229 (1991)

- 7) 川上, 福永: ボートの競技記録に影響を及ぼす因子, パイオメカニズム学会誌, 16-2, 101/109 (1992)

[著 者 紹 介]

岡 田 英 史 (正会員)

1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。同年日本学術振興会特別研究員、慶應義塾大学訪問研究員。91年慶應義塾大学理工学部電気工学科助手。93年同専任講師。現在に至る。94年より日本学術振興会海外特別研究員として英国へ派遣、ロンドン大学ユニバーシティカレッジ客員講師。87年計測自動制御学会学術奨励賞。88年欧州微小循環学会 Innovative Instrumentation Award。89年安藤博記念学術奨励賞、米国電気電子学会(IEEE) Student Paper Award。90年日本エム・イー学会科学新聞賞学術奨励賞。92年丹羽記念賞。専門は光情報工学、光・画像計測工学、スポーツ工学や生体計測の分野にも興味をもっている(工学博士)。

中 村 好 孝

1993年、慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年 NTT データ通信(株)入社。在学中、主に加速度センサを用いた動作解析と身体活動量の測定に関する研究に従事。現在、ミドルソフトの開発に携わる。

茅 元 司

1994年、慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科生体医工学専攻入学。現在、在学中。漕艇運動の動作解析に関する研究に従事。

南 谷 晴 之 (正会員)

1971年、慶應義塾大学大学院工学研究科後期博士課程修了。70年同大学工学部電気工学科助手。専任講師、助教授を経て、現在、同教授、兼大学院理工学研究科生体医工学専攻主任。74~76年西独アーヘン工科大学ヘルムホルツ研究所訪問研究員。生体画像計測、生体情報処理、光応用計測などの研究に従事。88年欧州微小循環学会 Innovative Instrumentation Award 受賞(工学博士)。