

水中仕事量計測のためのエルゴメータ用アタッチメントの開発

塩野谷 明*・今川 惣元***・大崎 雅弘***・長谷川 光彦**・三宅 仁*

Development of the Ergometer Attachment for Measuring of Driving and Work Capacity in Water

Akira SHIONOYA, Yoshimoto IMAGAWA, Masayuki OSAKI,
Mituhiko HASEGAWA and Hitoshi MIYAKE

The object of this study is to develop the ergometer attachment for measuring of driving power and work capacity in water. The procedure to measure a driving power or work capacity in swimming is, for example, swim mill or water tractional power meter. These procedure leads us to be extremely accurate measurement. These, however, are very extraordinary expensive and it is very difficult for the person those who does not hold the specific knowledge to operate these procedures and estimate results using these procedures. So we have adopted the ergometer, which is a procedure to estimate a work load, because of low priced and ease to operate, developed its attachment for measuring a driving power and a work capacity in swimming.

Key Words: Ergometer, Attachment, Driving Power, Work Capacity, Swimming

1. はじめに

近年、肥満やそれに起因する成人病の増大といった社会問題がクローズアップされてきている。そしてその予防として、様々な運動・スポーツの実践が盛んに行われる。ジョギングやウォーキングといった軽負荷運動は脂質の代謝を促進し、また適度に心肺系に負荷を加えるために肥満の防止、健康の保持増進に有効と考えられている。

しかし都市化傾向が強まり、生活環境の整備が促進されると、例えば道路のアスファルト化や交通量の増加が起これ、結果としてジョギングの実施等に支障が生じてくる。ジョギングの場合、脚の接地時に膝に加わる衝撃は体重の4倍に上り、このためアスファルト上でのジョギングでは、足首や膝の故障が問題となる。これは今後の高齢者社会を考えた場合、決して好ましいものとは言えない。

こういった足腰への負担の軽減を考えると、思い浮

かぶものは、水泳に代表される水中での運動である。特に近年、各市町村に屋外・屋内の公共施設が数多く建設され、安全にかつ安価に水泳が行える環境作りが行われている。

水中での運動は水の比重と身体密度の関係から、前述のジョギングのように足腰に極端な負担が掛らない。また水中での運動は、水の持つ粘性抵抗に基づく負荷が加わり、その負荷は運動速度や運動方向への投影面積によって決まることから、負荷の強弱が簡単に付けやすいという利点を持つ。すなわち個々の目標とする運動負荷を簡単に加えられることから、肥満や成人病の運動療法には適した運動であると考えられる。

例えばジョギングやサイクリングといった運動では、その運動形態を模倣したトレッドミルや自転車エルゴメータのような運動量、仕事量を定量化する器材があり、それらを用いて個々に適した運動負荷を設定したり、運動負荷テストを行ったりすることが可能である。しかし水泳に代表される水中での運動の運動量、仕事量を定量化する器材は非常に限られてしまう。しかもスイミルや流水プール、市販される牽引力計は数百万から数千万円と非常に高価で、しかも操作に専門的な知識が必要なことから、水中での運動の運動量、仕事量の定量化は一般的にはむずかしいというのが現状

原稿受付：平成8年6月14日

*長岡技術科学大学体育・保健センター

**長岡技術科学大学計画・経営系

***長岡技術科学大学機械系

である。そのため陸上では評価が可能な酸素摂取量や最大パワーの決定は、一般化されるに至ってはいない。

そこで本研究では、水中での運動を安価に、しかも簡単に定量化できる器材の開発を目的として、実際に運動の評価に用いられる前述のエルゴメータのアタッチメントを作成することで、水中での運動の評価、定量化が可能となるかを検討した。

2. 基本原理—Hillの方程式の応用

水中運動の評価、定量化は、スイミルに代表されるように人工的な水流を起こし、泳速を変えるものと牽引力計に代表されるように一定の張力で運動体を推進方向とは反対に引っ張る2つに大きく大別される。本研究の場合は後者となる。

また水中運動の評価、定量化の試みは、単に仕事量の算出に止まらず、運動時最大パワーおよびその出現張力の算出、張力に対する仕事量曲線（パワー曲線）の算出までを行った。この一連の作業は、エルゴメータの評価手順に従った³⁾。

本研究で使用した自転車エルゴメータは、モナーク社製自転車エルゴメータ7kp型である。このエルゴメータにおける仕事量をPVとすると

$$PV = L \times g \times 6 \times (R/60) \quad \cdots \cdots 1)$$

となる（但し、PV=パワー(W)、L=ペダル負荷(kp⁴⁾）、g=重力加速度(9.8m/s²)、R=ペダル回転数(rpm)、6=ペダル1回転につき、フライホイールが動く距離)。

この関係から負荷に対する（本研究の場合、張力に対する）パワー曲線と最大パワーの算出は以下の手順となる。

エルゴメータ駆動時のペダル負荷(L)とペダル回転数の関係は、

$$R = -\alpha \times L + \beta \quad (\text{但し } \alpha, \beta \text{ は正の定数}) \cdots \cdots 2)$$

となる(図1)。ここで2)式を1)式に代入すると、

$$\begin{aligned} PV &= 0.98 \times L \times R \\ &= 0.98 \times (-\alpha \times L + \beta \times L) \\ &= 0.98 \times \{-\alpha(L - \beta/2\alpha)^2 + \beta^2/4\alpha\} \quad \cdots \cdots 3) \end{aligned}$$

が得られ、これは負荷(L)に対するパワーを示す凸型の曲線を示す式である。この3)式よりPVが最大

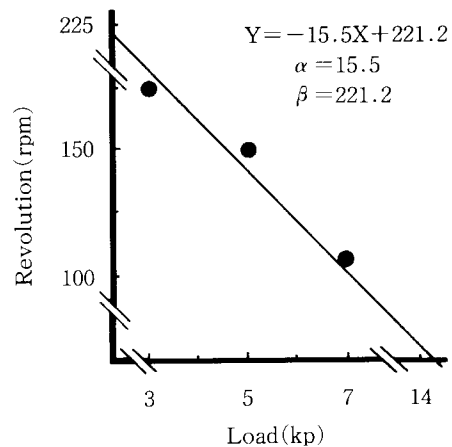


Fig. 1 Relationship between pedal revolution and load in driving ergometer

となる条件は $L = b / 2 a$ となり、その最大値を PVmax とすれば、

$$PV_{\max} = 0.98 \times \beta^2 / 4 \alpha \quad \cdots \cdots 4)$$

が得られる。すなわち1)式において、定数 α 、 β がわかれば、負荷に対するパワー曲線および最大パワーとその出現時負荷がわかることになる³⁾。

しかしここで負荷とペダル回転数の関係は一次に近似されるのではなく、凸型に指数近似されることが報告される²⁾。一般にマテリアル化されているエルゴメータ駆動時最大パワー算出は、測定時間の短縮ならびに測定の簡便化を計る目的で、両者の関係を一次近似としている。またこれは両者の関係が、測定に用いられる負荷区間ではほぼ負の直線となること³⁾に基づいている。しかしこれはエルゴメータ駆動を想定したものであって、水中での運動については定説は導かれていない。そこで本研究では、このエルゴメータにおける前述のパワー曲線算出手順の基礎となるHillの方程式からのパワー算出法を採用した²⁾。なお塩野谷はエルゴメータを用い、負荷とペダル回転数の関係をこの曲線型関数であるHillの方程式を応用して近似し、さらにパワーへの変換を行って、エルゴメータを用いた最大無酸素性パワー算出の補正方法の開発とその妥当性を報告している⁵⁾。

Hillの方程式²⁾とは一般に

$$(P + a)(v + b) = (P_0 + a)b \quad \cdots \cdots 5)$$

または

$$(P + a) v = b (P_0 - P) \cdots \cdots 6)$$

で示される実験によって導かれた方程式である（但し P は力または負荷、 v は速度、 P_0 は最大等尺性力、 a 、 b は定数）。

Hill の方程式とは、一般には筋の収縮張力と収縮速度の関係を示した曲線型方程式（一般には直角双曲線型）で、いわゆる力学モデルであるが、このモデルは運動時（筋収縮時）の ATP 分解に係る熱発生に一致する化学モデル¹⁾に基づいている。それゆえ Vandewalle や松井らによって自転車駆動運動や疾走運動、そのほか多くの運動に適応が試みられている。実際のパワーへの変換は、一般式 6) を変形し

$$P = b \times \{(P_0 - P) / v\} - a \cdots \cdots 7)$$

として、測定値（実験値）を代入し、定数 a 、 b を決定する。これは筋の収縮によって発生する単位時間当りのエネルギーが、最大等尺性筋力と加重の差に比例することを示している。

a 、 b が決定されると、次に加重に対するパワー曲線の算出が以下の手順によって行われる。

5) 式を変形し

$$\begin{aligned} V &= \{(P_0 + a) b / (P + a)\} - b \\ &= b \{(P_0 + a) / (P + a) - 1\} \cdots \cdots 8) \end{aligned}$$

として、さらに両辺に力 (P) を掛ける。

$$PV = b \times P \{(P_0 + a) / (P + a) - 1\} \cdots \cdots 9)$$

が得られ、これは加重 (P) に対するパワー (PV) の曲線を示す方程式となる。

仮にこのパワー曲線が最大となる条件を求めるとすると、 $\Delta(PV) / \Delta(P) = 0$ として、8) 式を微分すればよいことになる。すなわち

$$P = a \{ \sqrt{(1 + P_0/a)} - 1 \} \cdots \cdots 10)$$

となり、定数 a 、 b および最大等尺性筋力が分かれば、パワー曲線上の最大値が決定される（図 2）²⁾。

この手順に基づき、塩野谷はエルゴメータにおける従来のパワー算出では実際のパワーよりも 30% から 50% 大きく算出されることを報告^{5) 6)}している。この誤

差は運動の評価というにはあまりに大き過ぎ、運動負荷という点では危険も伴うことから、新しい運動様式の評価の場合には Hill の方程式等に従った一定の手順を踏むことが重要と考えられ、本研究の手順が妥当なものであることが示唆される。

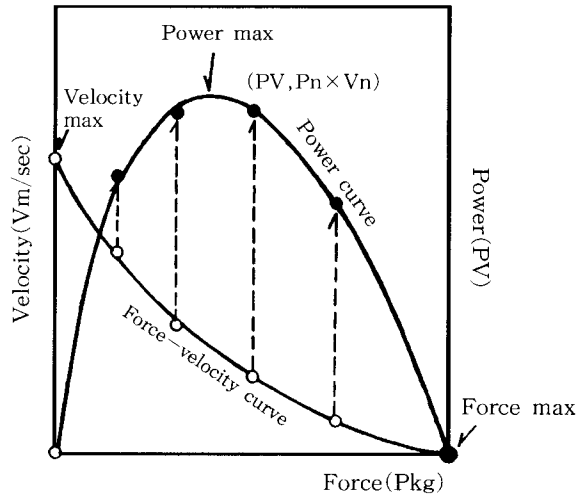


Fig. 2 Transform from the force-velocity curve to the power curve

3. 予備実験

エルゴメータにアタッチメントを装着することで、前述の手順から水中運動の仕事量評価が可能となるかを検討するために、予備実験用システムの開発とそれを用いた予備実験を行った。

図 3 に示されるように、エルゴメータのペダル部に作成した回転ドラムを装着した。回転ドラムには、ビスを用いて突起部を作り、ドラムの回転に伴い、その突起部がマイクロスイッチを作動させて、信号 (ON) がレコーダーに出力されるように設計した。回転ドラムは直径 30cm、幅 10cm で被験者が引く牽引用糸を巻付けた。牽引用糸は質量（軽量）、伸び（無）を考慮して、測量用の企画糸を使用した。

ペダル接続部は、回転ドラムとペダルに直接装着したホイール板を軸に固定し、ドラムとペダルが同一回転となるようにした。

実験は、25m 室内プールにおいて実施した。被験者には腰に牽引用糸を装着し、エルゴメータ負荷加重部を操作し、1.0kg、3.5kg、6.0kg の 3 つの張力時の泳運動を行わせた。測定開始点はプールサイドより 5 m

のところでし、測定距離は7.5mとした。この7.5m間の泳時間をマイクロスイッチからの出力信号で計測し、泳速度を算出した。信号は60度毎に出力されることから、エルゴメータの構造上1m毎の泳速度が算出されることになる。今回泳速は、測定区間の最大値とした。

またHillの方程式に適応させるために必要な最大等尺性筋力はデジタル式の張力計を用い、ワイヤーを介して被験者を同位置に固定、推進速度を0としてそのときの最大牽引力をもって決定した。一般的に単発の筋収縮における速度と力の関係は直角双曲線型に、また前述のように自転車エルゴメータ駆動のような連続

収縮の場合は逆双曲線型に近似されることが報告されるが、今回の水中運動の場合は依然として明確ではない。よって塩野谷のエルゴメータを用いた最大無酸素性パワー算出の補正方法のように、両者の関係を2次近似するといった手順は今回は避けた。また最大等尺性筋力とは、ある運動において主動筋がまたがる関節角度の位置関係が変化しない（運動速度＝0）ときの最大筋力をいうが、今回は水中運動において被験者の推進速度を0（運動速度＝0）とし、そのときの最大牽引力を最大等尺筋力に対応させた⁴²⁾。

被験者は、新潟県水泳連盟強化指定選手2名でいず

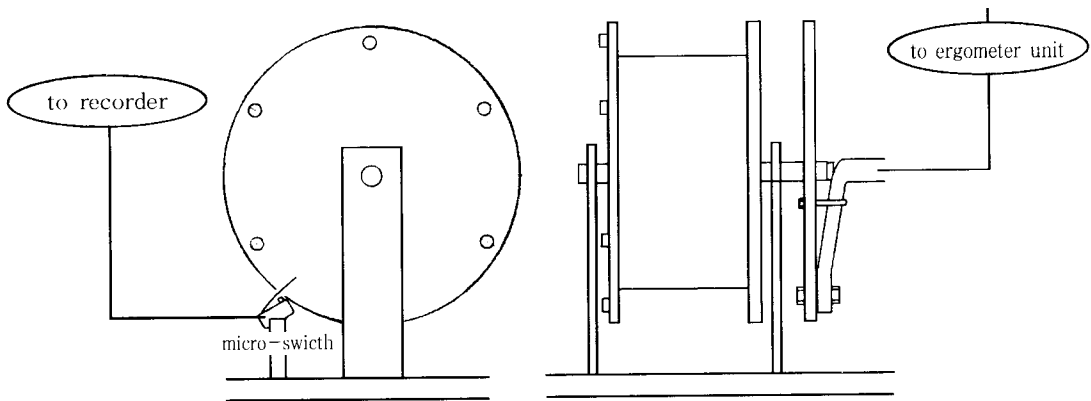


Fig. 3 The simplified ergometer attachment for measuring of power in swimming

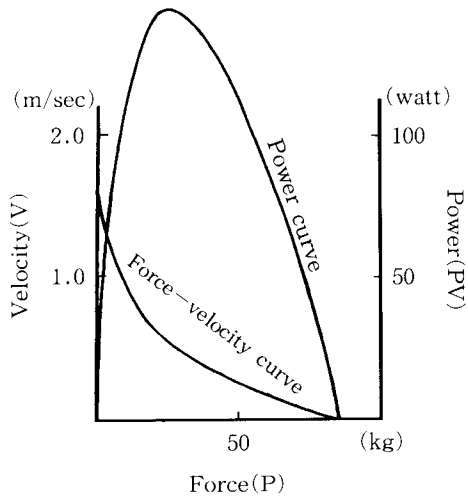


Fig. 4 Force-velocity curve and Power curve on NO.1 subjects (The butterfly stroke) in preparatory experiment

Table 1. Swim velocity and power in swimming on NO.1 subject (The butterfly stroke) in preparatory experiment

Load:P(kg)	Velocity :V(m/s)	Power :PV(w)
1.0	1.66	16.3
3.5	1.52	52.5
6.0	1.28	75.3
Tractional Force max		$P_0=87.0\text{kg}$
Maximum Power(w)		142.0w
Force detected Max PV		21.7kg

れも男子選手とした^{7), 8)}。

表1, 2, 図4, 5には, Hillの方程式への適応結果ならびに得られたパワー曲線を示した。

表1(図4)はクロール, 表2(図5)はバタフライの場合である。クロールでは最大牽引力33.5kg, 最大パワーは104.2wattであったのに対し, バタフライでは最大牽引力87.0kg, 最大パワーは142.6wattであった。また最大パワー出現時張力はクロールが8.2kgに対し, バタフライは21.7kgとパワーの構造に大きな違いのあることが伺えた。クロールの場合, 森谷らが市販される牽引力計を用いて行った結果とほぼ同じ傾向が伺えた。森谷らは今回の最大パワー出現張力8.2kgとほぼ同じ8.0kgにおいて, やはり最大パワーが出現することを報告⁴⁾している。また最大パワーについては, これまでの先行研究が70watt前後としているのに比較して, やや高い傾向がみられるが, これ

は今回泳速を測定区間の最大値を取ったためと考えられる。森谷らの研究でもやはり最大パワーは80watt前後を示しているが, これも測定区間(15秒前後)の平均値を取っているためと考えられ, 連続的なパワーの最大値はやはり100wattを越えている。

またバタフライでは, クロールとは異なった出力形態がみられ, これらは泳法による違い, 例えば推進方向に対する投影面積=抵抗の違いを示唆するものと考えられる。すなわちクロールとバタフライの様式の違いが明確に現れることから, この手順による水中運動の仕事量算出, 評価が妥当性の高いものであるということが示唆される。

4. 水中推進力および仕事量計測のためのエルゴメータ用アタッチメントの開発

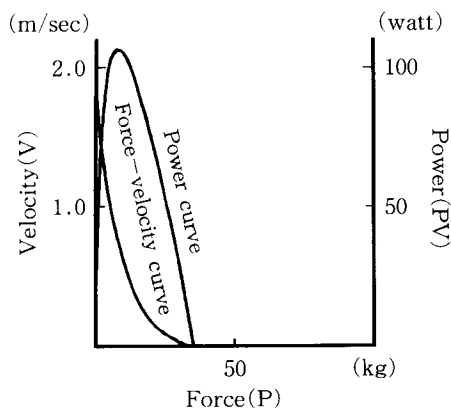


Fig. 5 Force-velocity curve and Power curve on NO.2 subject (The crawl stroke) in preparatory experiment

Table 2. Swim velocity and power in swimming on NO.1 subject (The crawl stroke) in preparatory experiment

Load:P(kg)	Velocity :V(m/s)	Power :PV(w)
1.0	1.70	16.7
3.5	1.39	47.7
6.0	1.05	61.7
Tractional Force max		P ₀ =33.5kg
Maximum Power(w)		104.2w
Force detected Max PV		8.2kg

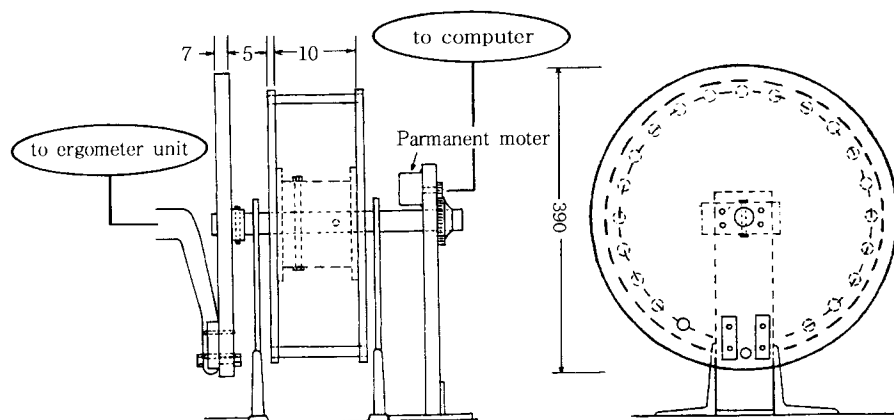


Fig. 6 The ergometer attachment for measuring of power in swimming (Unit is "cm")

これまでの結果から、水中運動の評価がHillの方程式に基づいた一連の手順によって可能であることが示唆された。そこで泳速の算出からパワーの算出までを自動化し、連続的な測定が可能なシステムならびにエルゴメータ用のアタッチメントの開発を行った。

エルゴメータのアタッチメント部となる回転ドラム(図6)は、外枠とペダル接続部の板にアクリル板を使用し、糸巻部は15度間隔で、径9.5mmのステンレスパイプ24本を円周1000mmとなるように並べた。円周を決めるために以下の計算を行い、半径を159.6mmとした。

$$\{1000 - (9.5\pi)\} / 24 = 40.423$$

$$(40.423/2) / \sin(7.5) = 154.85$$

$$154.85 + (9.5/2) = 159.6$$

またペダル接続部の板には、回転時ペダルと板が同一回転できるように、ペダル軸を挟んで小さなアクリル板を付け、ペダルを固定した。

ドラム軸には径16mmのステンレスパイプを使用、軸延長上のギアを介し、発電モータに接続した。使用した発電モータはステッピングモータ(パーマネントマグネット型:日本サーボ社製KP3P8)であった。

モータの特性(電圧と速度の関係)は

$$N = (1/6) \cdot \theta \cdot s \cdot P$$

(但しNは回転速度rpm, θ はステップ角(deg), Pはパルスレート)

とされるが、回転時振動によるノイズや脱調を想定して、実際の回転速度と電圧の関係は、実験によって以下のように設定した。

$$V(m/s) = \text{電圧}(v) / 1.38$$

なおこの電圧と回転速度の関係は、図7に示す。

図8は、プログラム構成のフローチャートを示している。張力計によって予め測定した最大牽引力を入力し、3つ以上の任意の負荷の牽引を行い、7)式に基づいたHillの方程式の定数a, bを決定、さらに8)式から10)式に至る手順に従ってパワーを算出する。

また同一負荷の場合はキャンセルングをかけるのではなく、平均化されるようにプログラムを組んだ。

電圧の検出速度は25 μ secで、500個の検出データから速度変換を行った。なお電圧検出では、以下の式を用いた。

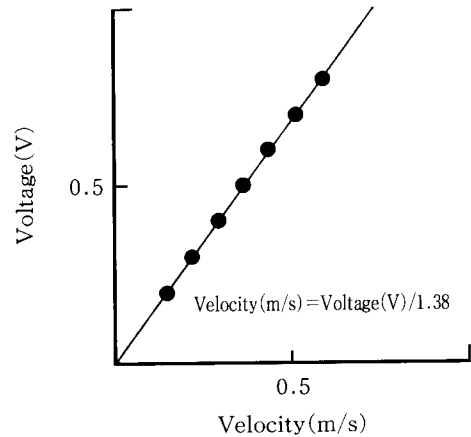


Fig. 7 Calculating velocity from voltage

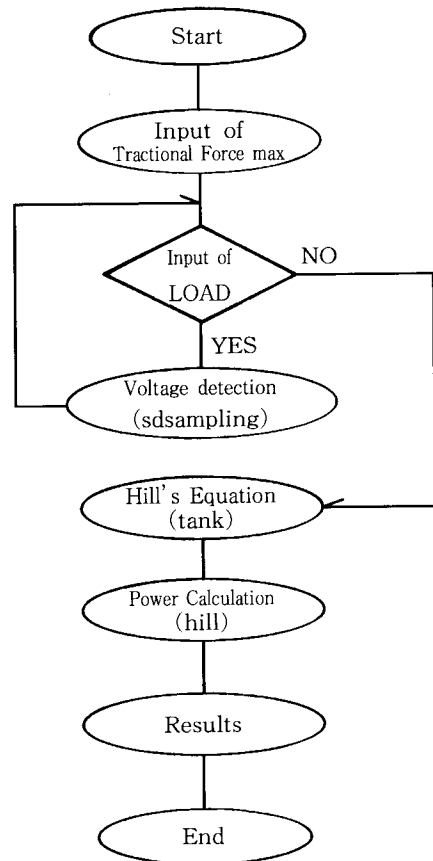


Fig. 8 Flow chart of program for calculating power in swimming

$$V(v) = (FS \cdot CD) / 4096$$

(但し、V：電圧，FS：フルスケール電圧，CD：A-D変換データ)

5. システム起動 (実験)

実験は上記のエルゴメータ・アタッチメントを用いて、予備実験同様25m室内プールで行った。実験の手順については、予備実験を参照するものとする。

なお被験者は、大学水泳部所属の者2名とした。しかし競技水準は、予備実験の被験者2名に比較してかなりの低下となる。泳法については、2名ともクロールとした。

表3、4および図9、10はHill式への適応結果ならびに得られたパワー曲線を示した。

表3 (図9) に示される被験者では最大牽引力22.5kg，最大パワー48.8watt，また表4 (図10) に示される被験者では最大牽引力32.5kg，最大パワー49.5wattであった。予備実験での数値に比較して，最大パワーが1/2程度と低い数値に留まったのは，被験者の競技水準の違いが顕著に現れたものと考えられる。この最大パワーの出現する張力についてみると，それぞれ7.8kg，11.8kgと予備実験の数値，先行研究の数値に近いので，システムとしては妥当性の高いものであると考えられる。また最大パワー出現張力が11.8kgとやや高い数値となった被験者の場合は，張力1kgの時点で泳速が1.11m/sと全体的に泳速が著しく遅く，逆に最大牽引力は32.5kgとほぼ予備実験の被験者と同じ水準であることから，パワー特性が力に依存したものとなったと考えられる。

6. おわりに

本研究は以下のようにまとめられる。

- 1) 自転車エルゴメータを用いて，そのアタッチメントを作成，安価に水中の仕事量を算出するシステムを構築した。
- 2) 仕事量算出のためにHillの方程式からのパワー算出法を導入，その妥当性を確認した。
- 3) 水中での速度検出，パワー算出をコンピュータ化し，測定に係る時間の短縮等を可能にした。

また今後の課題としては，

- 1) 競技水準の高い被験者を用いた測定
- 2) 水中での最大酸素摂取量測定への応用
- 3) 泳速の時系列表示等が上げられる。

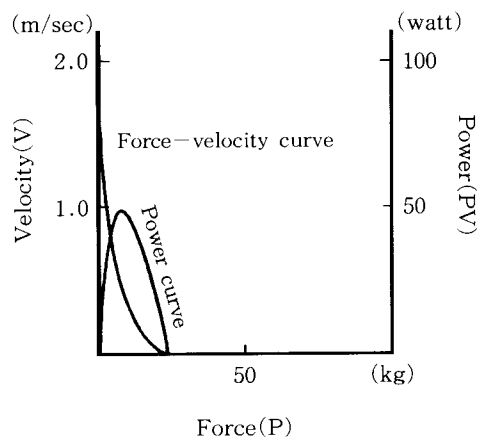


Fig. 9 Force-velocity curve and Power curve on NO.1 subject(The crawl stroke) in main experiment

Table 3 Swim velocity and power in swimming on NO.1 subject

Load:P(kg)	Velocity :V(m/s)	Power :PV(w)
1.0	1.31	14.0
3.5	1.16	35.5
6.0	0.78	45.4
Tractional Force max		P ₀ =22.5kg
Maximum Power(w)		48.8w
Force detected Max PV		7.8kg

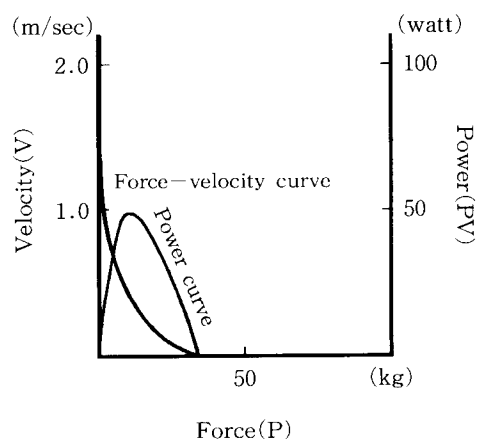


Fig.10 Force-velocity curve and Power curve on NO.2 subject(The crawl stroke) in main experiment

なお本研究に際して、新潟県水泳連盟の大桃正隆先生、遠山恵美子先生、立川綜合病院の立川厚太郎先生からの貴重なご助言、ならびに新潟県水泳連盟強化選手および長岡技術科学大学水泳部学生から多大なご協力を頂いたことを深く感謝する。

参考文献

- 1) Hill, A, V : The heat of shortening and the dynamic constant of muscle. Proc. Roy. Soc. B76, pp136-196, 1938.
- 2) 猪飼道夫編著：身体運動の生理学，杏林書院，1973.
- 3) 宮下充正編著：一般人・スポーツマンのための体力診断システム
- 4) 森谷陽他：牽引泳時に発揮されるパワー，中央大学保健体育研究所紀要，Vol.12, pp71-83, 1994.
- 5) 塩野谷明他：テニス選手の最大無酸素パワーとプレイスタイルの関係（第2報）—プレイスタイル評価のためのパワー算出法の開発—，トレーニング科学，投稿中。
- 6) 塩野谷明他：非乳酸性代謝に係る運動駆動能力評価のための自転車エルゴメータの開発—最大無酸素パワー決定のための補正方法の検討—，長岡技術科学大学研究紀要，Vol. 18, 1996.
- 7) 塩野谷明他：平成7年度新潟県水泳連盟強化選手測定合宿結果報告，新潟県水泳協会機関誌，pp302-312, 1996.
- 8) 塩野谷明他：新潟県水泳連盟医科学委員会報告書，1995.

脚 注

- 註1) kp（キロボンド）とは正常な重力の加速度のもとで，1 kgの質量に作用する力。
- 註2) Hillの方程式は，筋収縮の際のエネルギー発生速度が，最大筋力とそのときどきの発揮筋力の差に比例することを示すモデルである。当初一回の収縮における上記関係が確認されたため，最大筋力を最大等尺性筋力として記述されるが，連続運動への適応も図られてきていることから最大等尺性筋力という言葉にも幅広い意味での捉え方が必要となる。

Table 4 Swim velocity and power in swimming on NO.2 subject

Load:P(kg)	Velocity :V(m/s)	Power :PV(w)
1.0	1.11	10.6
3.5	0.86	29.6
6.0	0.71	41.0
Tractional Force max		P ₀ =32.5kg
Maximum Power(w)		49.5w
Force detected Max PV		11.8kg