

水中トレーニング装置の開発とその有効性の検証

金, 相培

<https://doi.org/10.11501/3168346>

出版情報：九州芸術工科大学，1999，博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：

第Ⅲ章

水中筋トレーニング装置の開発と その有効性の検証

III-1. はじめに

肥満者の運動療法や健常者のフィットネスなどに対する運動処方では用いられる運動は、大きく二つの種類に分けることができる。一つは全身的な運動であり呼吸循環系のトレーニングとなる有酸素性運動である。もう一つは、局所的な筋力の向上を目的とする筋トレーニングである。第II章では水中での有酸素性運動のための機器を開発したが、本章では水中での筋トレーニングのための機器を扱う。

運動療法としての筋トレーニングは以下の3種類に分けられる(蜂須賀, 1988)。

1. 等尺性トレーニング: 筋肉の長さの変化を伴わない筋収縮であり、当然関節運動を伴わない。この方法の長所は特別な装置を必要とせず、訓練時間も少ない上、二次的な筋損傷を生じにくく、また関節に疼痛などの問題があっても可能であることである。短所は関節運動を伴わないことは運動能力の向上には有効ではないこと、筋持久力を増進させることができないこと、動的な運動に比べて著しく血圧が上昇することである。1回の収縮は最大筋力の30~40%以上、5秒程度が良い。

2. 等張性トレーニング: 一定の筋力発揮のもとで関節運動を伴う筋収縮であり、通常手や足に重錘をもたせて関節運動を行う。本法の長所は関節運動を伴うので動作の巧緻性の改善など運動能力の向上、関節可動域の拡大をもたらすこと、および訓練者の意欲を高めることである。短所は関節障害があれば実行困難となること、二次的筋損傷を生じやすいことである。筋力増大のためには最大筋力の2/3以上の負荷を与える必要があるとされる。

3. 等速性トレーニング：一定の角速度での筋収縮であり，cybex machine など専用の特種な機器を必要とする．この機器には筋力の大小に関わりなく一定の角速度で動くように設定できるアームがあり，訓練者はこのアームを押ししたり，引いたりしながら運動する．この方法は前二者の特徴を合わせもつとされ，長所としては関節可動域の全範囲にわたって筋に十分な抵抗を加えることができ，また角速度を速く設定すれば十分な筋力増大を図ることが可能となる．短所は高価な機器を必要とすることであり，訓練する筋ごとに条件をセットしなければならないことである．

筋トレーニング中の急激な力の変化や速度変化は筋や腱を急激に伸張させ，関節に負担を与えると考えられるが，水中での運動は水が抵抗となるため運動しても局部に急激な力が加わらないこと，またある一定の部位に過剰な負担をかけることのない（宮下，1990）ことから，関節の負担を軽減させることができる．従って，筋トレーニングにおいても水中運動が有効であると考えられる．しかし，水中運動における骨格筋の筋活動を客観的に評価した報告は少なく，水中トレッドミル利用を中心とした水中運動の有効性を示した報告が散見されているに過ぎなく，その運動処方は経験的になされている（中ら，1992）．

本章では，筋トレーニングのための水中筋トレーニング装置（レッグプレス）を開発し，本装置を利用した運動の物理的仕事と下肢筋の筋電図を測定することによって負荷調節機構の有効性を検証した．加えて，下肢運動における筋収縮パターンを検討することによって本装置による筋トレーニングの特性を明らかにするとともに，陸上での等張性収縮，等速性収縮運動における

筋収縮パターンとの比較を行った。

Ⅲ-2. 水中筋トレーニング装置の開発

Ⅲ-2-1. 負荷発生 の原理と負荷調節部の構造

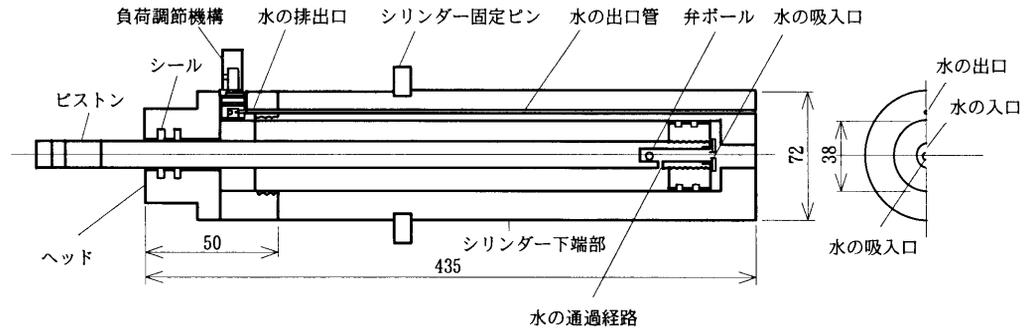
トレーニング装置の負荷は、小さな穴を水が通るときの抵抗を利用して発生させる。具体的には水の吸入口からシリンダーの中に入った水が負荷調節部にある小さな穴を通るときの抵抗によって発生させている。図Ⅲ-1-1 に負荷を発生させる部分のシリンダーとピストンの構造を示す。

シリンダーの寸法は長さ 435mm、直径 72mm の大きさで、ヘッドとシリンダー下端部から構成される。シリンダー下端部にはシリンダー固定ピン、水の出口管、水の入口、水の出口がある。ヘッドとシリンダー下端部の連結はねじ式である。材質は水中で使用しても錆の心配がないステンレススチールであり、水漏れを防ぐためにヘッドにはシールがはめ込まれている。

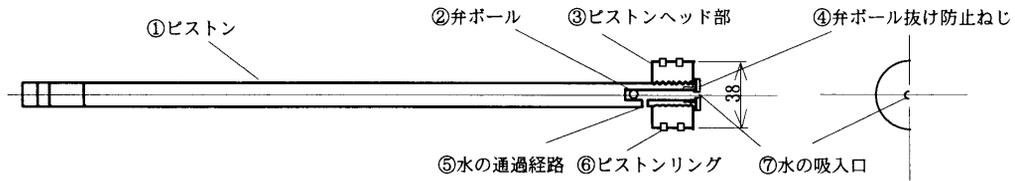
ピストンの構造（材質）は基本的に ①ピストン（ステンレススチール）②弁ボール（ステンレススチール）③ピストンヘッド部（合金アルミニウム）④弁ボール抜け防止ねじ（合金アルミニウム）⑤水の通過経路 ⑥ピストンリング（皮）⑦水の吸入口で構成されている。

負荷発生のプロセスを、図Ⅲ-1-2 に示す。水中筋トレーニング装置（図Ⅲ-3-1）のフットプレートを前方に押すと、アームに取り付けられたピストンの中にある弁ボールが水の吸入口を埋め（a）、ピストンがシリンダー中の水を押し上げ、負荷調節機構の穴を水が通ることによって負荷を生成し、水は出口から流れていく（b,c）。フットプレートを元の位置の方へ戻すにつれて、シリンダー下端部にある水の入口から入り込んだ水は、ピストンヘッ

下部にある水の吸入口を通して弁ボールを押し上げ、水の通過経路からシリンダーの中に水が入り (d,e), 元の状態に戻る (a)。



水中シリンダー



水中ピストン

図. III-1-1 負荷を発生させる部分の水中シリンダーとピストンの構造. 数値の単位 (mm)

Fig. III-1-1 Construction of the underwater cylinder and the piston that generate the load. (mm)

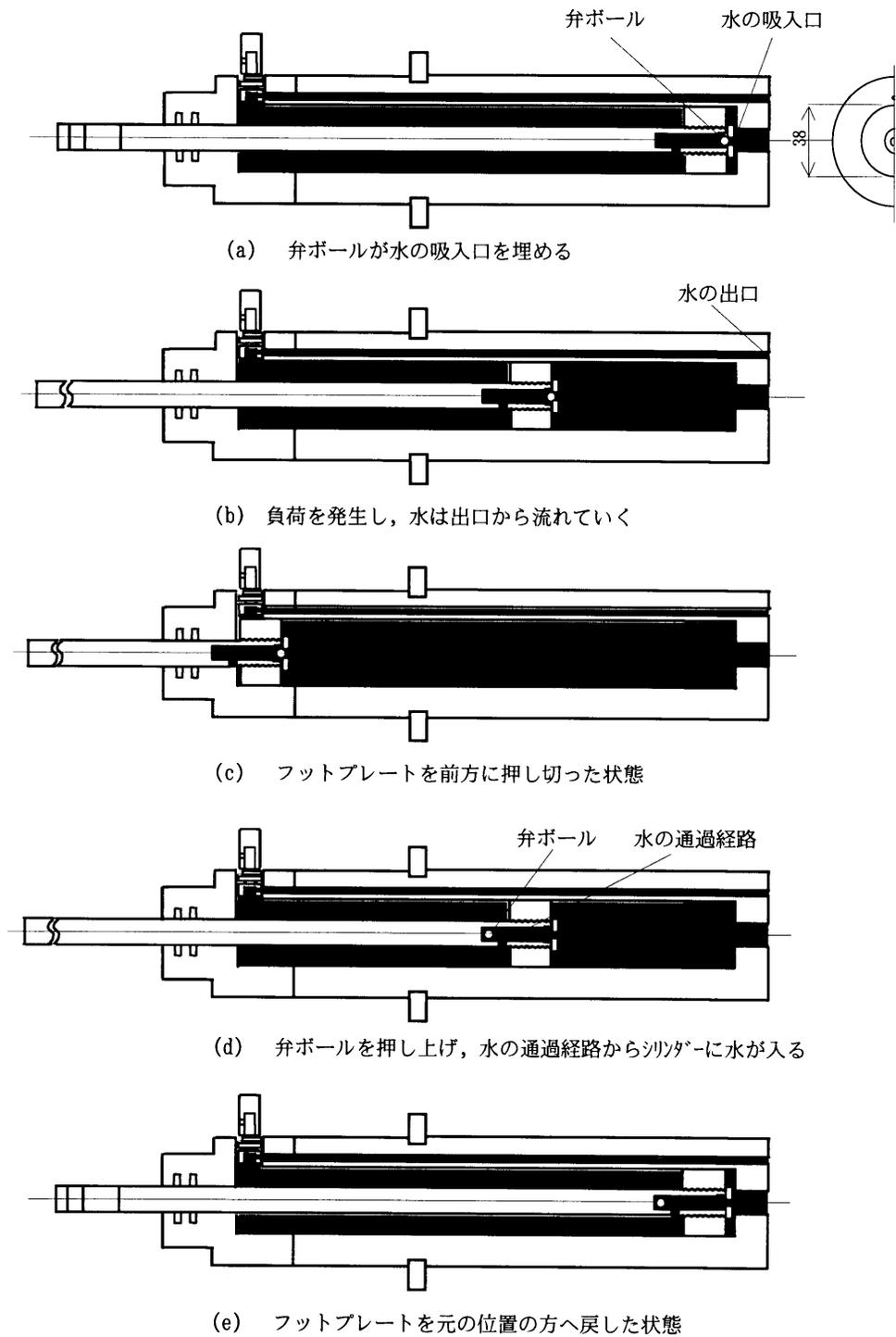


図. III-1-2 負荷発生のプロセス.

Fig. III-1-2 The process of the work load generation.

図III-2 に水中筋トレーニング装置の負荷調節機構の構造を示す。運動負荷は負荷調節機構によって任意の4段階に変えることができる。シリンダーヘッドに差し込まれている運動負荷調節機構を回し、シリンダーの水の出口管と深さ3mmの4つの穴($\phi 1.8$, $\phi 1.5$, $\phi 1.2$, $\phi 0.7$)のどれかを一致させることによって作業負荷を決めるように設計されている。穴が小さいほど水が通るときの抵抗が大きくなり、負荷が大きくなる。

本装置の開発の初期段階では、負荷調節機構の穴は6つ開けられており($\phi 2.5$, $\phi 2.0$, $\phi 1.8$, $\phi 1.5$, $\phi 1.2$, $\phi 0.7$)、運動負荷設定は6段階の調節が可能であるように製作していた。しかし各穴に対する仕事量を測定した結果、水が通る穴の大きさが $\phi 1.8$ 以上の穴の間では仕事量に有意差が認められなかった。このことから最終的には $\phi 1.8$, $\phi 1.5$, $\phi 1.2$, $\phi 0.7$ の4つの穴を利用することとした。これらの穴の断面積はそれぞれ 2.543mm^2 , 1.766mm^2 , 1.130mm^2 , 0.384mm^2 である。

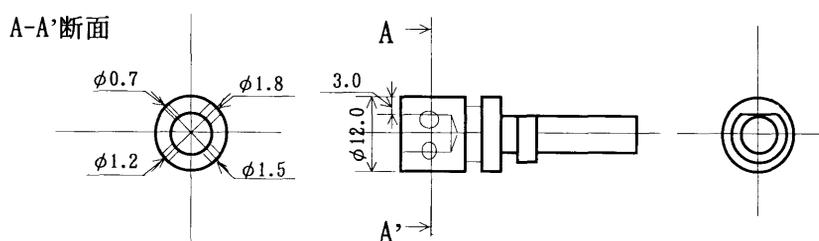


図. III-2 水中筋トレーニング装置の負荷調節機構の構造. 数値の単位 (mm)

Fig. III-2 Construction of the mechanism for regulation of the load of the underwater muscle training machine. (mm)

Ⅲ-2-2. 水中筋トレーニング装置（レッグプレス）の構造及び特徴

図Ⅲ-3-1（正面図，側面図），図Ⅲ-3-2（写真）に開発した水中筋トレーニング装置（レッグプレス）の構造を示す．装置の外形寸法は高さ 1000mm，幅 820mm，奥行き 1300mm の大きさで，総重量は約 30kg である．基本的な材質は水中で使用しても錆の心配がないステンレススチールである．主な部品の可動部分には，滑らかな回転操作のために固体潤滑剤埋め込み軸受が取り付けられている．その他の特徴として，アームが前方に行きすぎないためのストッパーが取り付けられていること，アームに対するフットプレートの角度が可変式になっている点などが挙げられる．

図Ⅲ-3-3 に，運動方法を示す．運動方法は座面上に座り，足首を足留めベルトでフットプレートに固定させ，上体を背あてシートに密着させて体をスタート位置にセットし，両手で左右にあるグリップを握る．一定速度で膝を伸ばしながらフットプレートを押し上げ，膝を伸ばしきったら今度は膝を曲げ，ゆっくり元の位置に戻す．装置の前下端部には足置き場が設置してある．そのため目的によって片下肢のみの運動をすることができる．

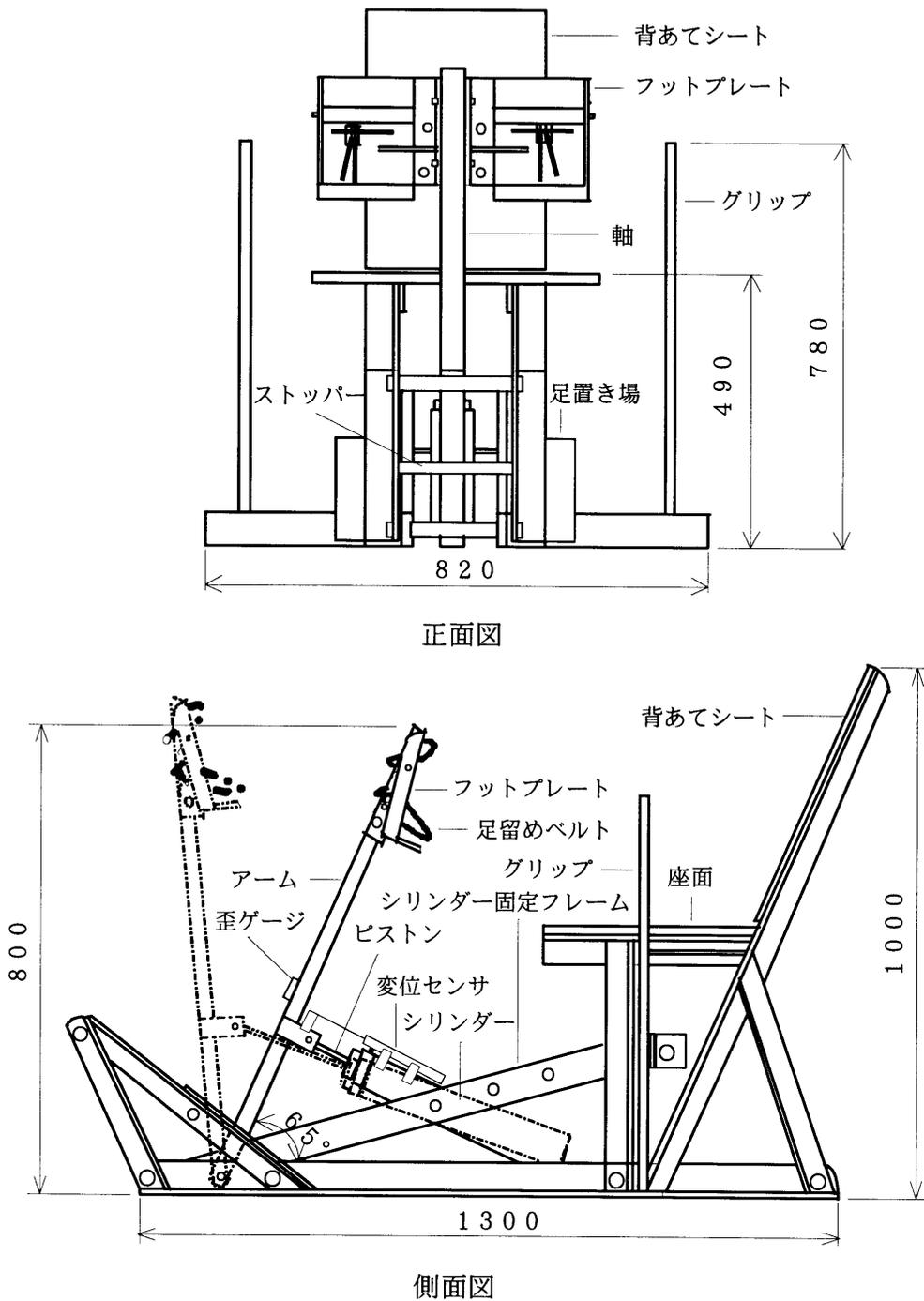


図. III-3-1 水中筋トレーニング装置の構造. 数値の単位 (mm)

Fig. III-3-1 Construction of the underwater muscle training machine. (mm)

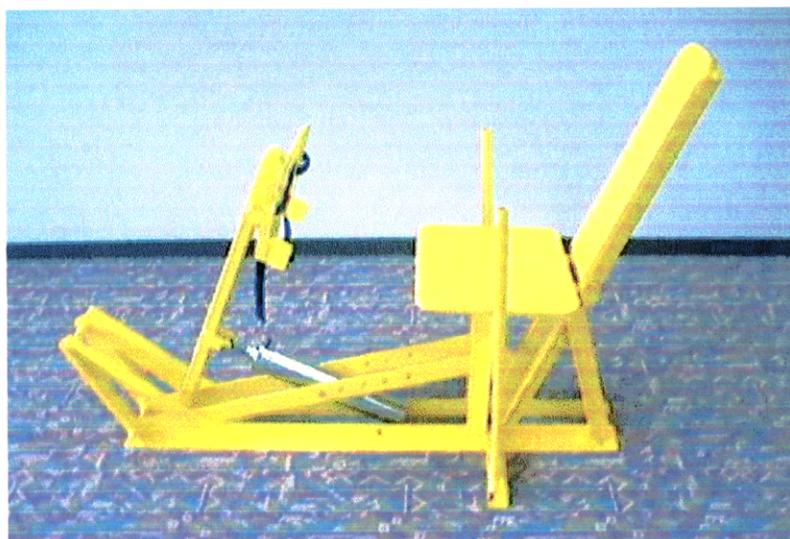
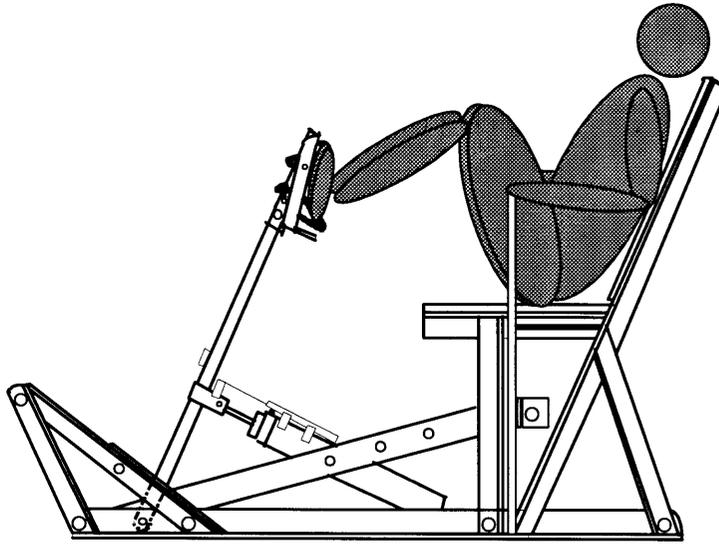
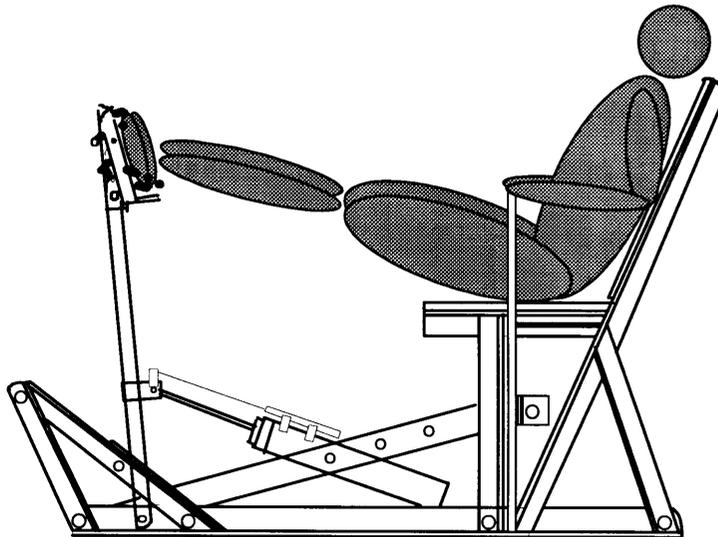


図. III-3-2 水中筋トレーニング装置.

Fig. III-3-2 Underwater muscle training machine.



屈曲時



伸展時

図. III-3-3 筋トレーニング装置の運動方法.

Fig. III-3-3 Ways of exercise on the muscle training machine.

Ⅲ-3. 水中筋トレーニング装置の有効性に関する実験

Ⅲ-3-1. 目的

実験によって本装置（レッグプレス）の有効性を二つの面から検討した。一つは本装置の特色である水の抵抗を利用した負荷調節機構の有効性を機械的仕事量と被験者の筋放電量から検証することを目的とする。二つめは本装置を用いた下肢運動における筋収縮パターンと陸上での等張性収縮，等速性収縮運動における筋収縮パターンの比較を通じて，本装置による筋トレーニングの特性を明らかにすることを目的とする。

Ⅲ-3-2. 方法

被験者は男子大学生 7 名で，彼らの年齢，身長，体重の範囲（平均）はそれぞれ 19～23(22.1)歳，162.2～178.5(170.4)cm，55.4～73.8(64.4) kg であった。被験者に実験の目的，内容および意義について十分に説明し，同意を得た上で実験した。

水温のコントロールが可能な実験プールに水中筋トレーニング装置を入れ，室温約 28℃，水温 26℃の一定条件下で被験者を水中座位で肩まで身体を水浸させた。水中筋トレーニング装置のアームとシリンダーに歪ゲージ（STRAIN AMPLIFIER: 6M82）と変位センサ（新光電機株式会社，TYPE: LTI-160R）をそれぞれ取り付け付けた（図Ⅲ-3-2）。被験者は椅子の両側にあるグリップを手で握ることにより身体を保持した。膝の伸展と屈曲運動を 1 サイクルの運動とし，連続的に 10 サイクルの運動を行わせた。運動負荷は運動負荷調節機構の穴の選択により 4 段階に変化させた。1 サイクルの運動周期は 3 秒周期，5 秒周期，自由周期とした。3

秒周期，5秒周期では，伸展半周期と屈曲半周期のリズムで行わせた．自由周期では，運動のスピードに関しては特に指示せず，各自が自由なスピードで運動を行った．

装置のアームに貼付した歪ゲージとシリンダーに取り付けた変位センサーにより各周期の運動における張力と変位を記録した．仕事量の計算は，歪ゲージと変位センサーからの出力をサンプリング周波数 500Hz で A/D 変換後，コンピュータによりフットプレートの位置におけるアームに直角な力(f)と同位置の移動距離(Δl)を比例配分および三角法を用いて算出し，仕事量($\Delta W = f \cdot \Delta l$)を求めた．膝伸展運動の仕事量(W)はアームを前方に押し出している期間にわたって， ΔW を時間的に積分して求めた．仕事率は仕事量を膝伸展運動時間(秒)で除して求めた．

水中運動と比較するために等速性収縮運動(Isokinetic exercise)と等張性収縮運動(Isotonic exercise)を陸上で行った．これらの運動には，短縮性(Concentric)収縮と伸張性(Eccentric)収縮ができ，運動角度の設定が可能なことから，KINCOM APII(ジャパン チャタヌガ株式会社)を用いた．等速性収縮は4段階の負荷で，それぞれ3秒周期，5秒周期で行い，等張性収縮はこれら2条件に加えて自由周期についても行った．各条件とも10サイクルずつ運動を行った．

3種類の収縮とも同様に，大腿直筋，外側広筋，大腿二頭筋，腓腹筋(内側頭)，前脛骨筋の双極表面筋電図と張力および変位を連続的に記録した．本研究で開発した装置を用いての運動については，各筋の表面筋電図をサンプリング周波数 1kHz で A/D 変換後，コンピュータにより変位を基準として1サイクル運動中の筋電図積分値を得た．

Ⅱ-3-3. 結果

図Ⅲ-4 に負荷調節機構の穴の断面積と膝伸展による物理的仕事量の関係を示す。上段が仕事量の絶対量を J (ジュール) で表しており,下段は時間当たりの仕事量である仕事率を W(ワット)で表している。穴の断面積が小さくなるに従い仕事量および仕事率は増加した。t 検定によると, 3 秒周期と自由周期においては, 仕事量と仕事率に関して各穴の間に有意差 ($p < 0.01$) が認められた。5 秒周期においては断面積 1.766mm^2 と 1.130mm^2 の穴の間以外で仕事量および仕事率に有意差 ($p < 0.01$) が認められた。

仕事量を周期間で比較すると, 一番大きい穴 (断面積 2.543mm^2) では 5 秒周期が 3 秒周期と比べ仕事量が有意に ($p < 0.01$) 大きく, 自由周期と比べでも有意に ($p < 0.05$) 大きかった。断面積 1.766mm^2 の穴では 5 秒周期が 3 秒周期と比べ仕事量が有意に ($p < 0.05$) 大きかった。小さい方の穴 2 つ (断面積 1.130mm^2 と 0.384mm^2) では 5 秒周期より自由周期および 3 秒周期で仕事量が大きい傾向が見られたが, 有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。

仕事率を周期間で比較すると, 4 つの穴とも 3 秒周期が 5 秒周期と比べ有意に ($p < 0.01$) 大きく, 自由周期と比べでも大きい傾向が見られたが, 有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。

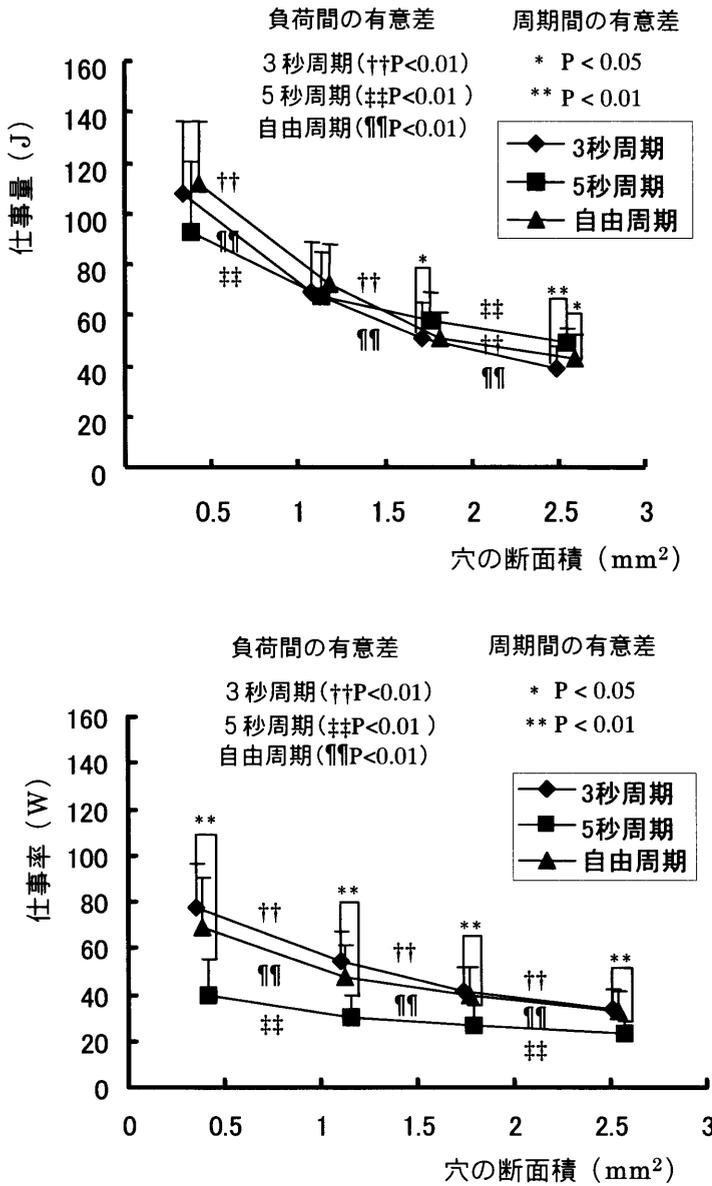


図. III-4 負荷調節機構の穴の断面積と仕事量及び仕事率平均値の関係.
縦棒は標準偏差

Fig. III-4 Relationship between and the size of the hole of
the mechanism regulating load the average physical work.

図III-5-1に3秒周期の運動における仕事量と各下肢筋筋電図積分値の関係を示す。運動中の筋放電量は、前脛骨筋が一番大きく、次いで大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋、腓腹筋の順で筋放電量が大きかったが、大腿二頭筋と腓腹筋の差は僅かであった。この傾向は仕事量が増加しても維持された。前脛骨筋はアームを元に戻すとき働くため、フットプレートを押すときの負荷と関係なく、仕事量の違いに関わらずほぼ一定の筋放電量であった。

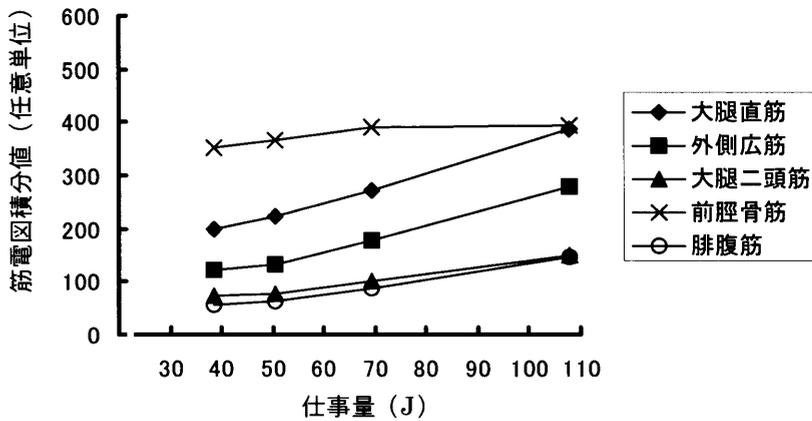


図. III-5-1 3秒周期の運動における 仕事量と各下肢筋筋電図積分値平均値の関係.

Fig. III-5-1 The relationship between the physical work and the average integrated EMG of the lower limb muscles in 3 sec-period movement.

図III-5-2に5秒周期の運動における仕事量と各下肢筋筋電図積分値の関係を示す。運動中の筋放電量の様相は、基本的には3秒周期の運動と同じであった。

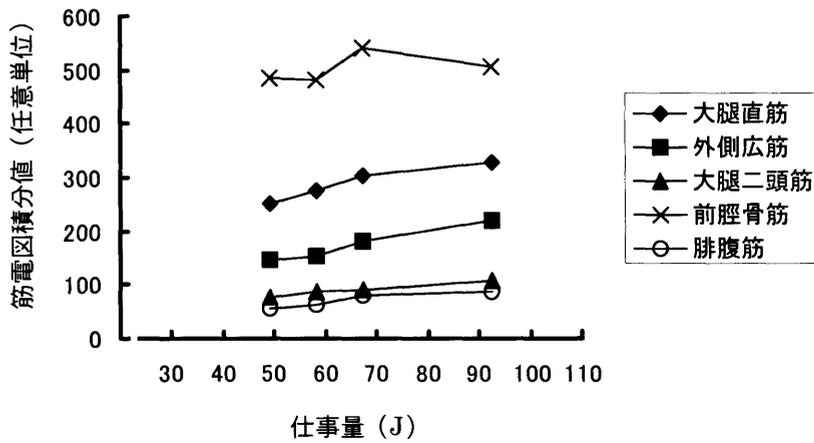


図. III-5-2 5秒周期の運動における仕事量と各下肢筋筋電図積分値平均値の関係.

Fig. III-5-2 The relationship between the physical work and the average integrated EMG of the lower limb muscles in 5 sec-period movement.

図III-5-3 に自由周期の運動における仕事量と各下肢筋筋電図積分値の関係を示す。自由周期における筋放電量は、基本的には同様であったが5秒周期より3秒周期の運動に近かった。

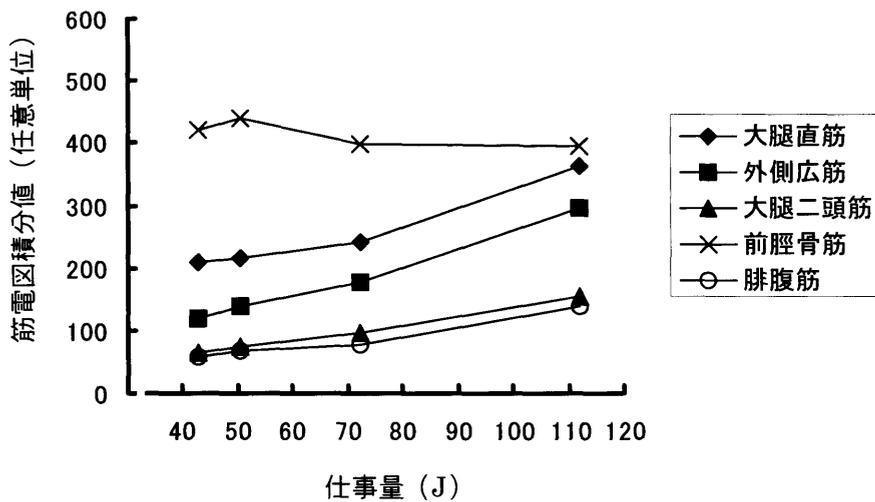


図. III-5-3 自由周期の運動における仕事量と各下肢筋筋電図積分値平均値の関係.

Fig. III-5-3 The relationship between the physical work and the integrated EMG of lower limb muscles in free time period movement.

次に下肢筋全体の働きをみるために便宜的に各下肢筋筋電図積分値を加え合わせた値を求めた．図III-6 に運動における仕事量とその下肢筋筋電図積分値の関係を示す．どの周期においても仕事量が増加するに従い筋電図積分値は増加した．t検定によると，3秒周期では全段階の仕事量間に筋電図積分値の有意差 ($p<0.01$) が認められた．5秒周期では中間の2段階の仕事量間に筋電図積分値の有意差が ($p<0.01$) 認められたが，両端の2段階の仕事量間では有意差は認められなかった ($p>0.05$)．自由周期では大きい方2段階の仕事量間に有意差 ($p<0.01$) が認められた．

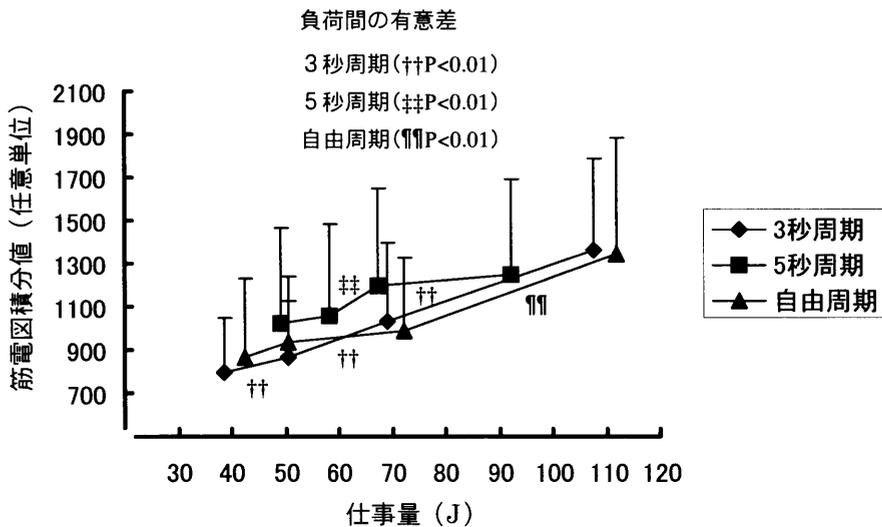


図. III-6 運動における仕事量と下肢筋筋電図積分値平均値の関係.

Fig. III-6 The relationship between the physical work and the average integrated EMG of the lower limb muscles movement.

図Ⅲ-7に3種類の収縮における筋電図波形，張力変化，変位変化の関係を運動周期3秒について示す．等速性収縮では伸展，屈曲のリズムに同期した筋収縮が発生しているのがわかるが，等張性収縮の場合はこの収縮リズムが等速性の場合ほど明確には見られなかった．水中運動の場合は等速性，等張性の場合と比較すると，その筋収縮パターンは等張性よりは等速性収縮に近く，比較的明確な収縮リズムを示した．また，1サイクル内での筋電図波形を見ると，等速性収縮の場合はピークを持つのに対し，水中運動の場合は比較的一定の振幅が持続する傾向が見られた．水中筋トレーニング装置による3秒周期の運動では張力が運動開始から徐々に増加し，1秒後にピークを示し，その後徐々に減少し，次のサイクル開始までほぼ0の値を示した．等速性収縮の場合は水中収縮と同様に張力の変化が緩やかであった．等張性収縮の場合は運動開始直後に設定負荷を上回る急激な力が発生し，ピークを示した．変位変化は等速性収縮，水中収縮，等張性収縮の順で変化速度が一定の傾向が明確であった．この結果は水の抵抗を利用して筋トレーニングを行えば，等速性運動に近い効果が得られるという先行研究結果（中山，1987）と同様であった．

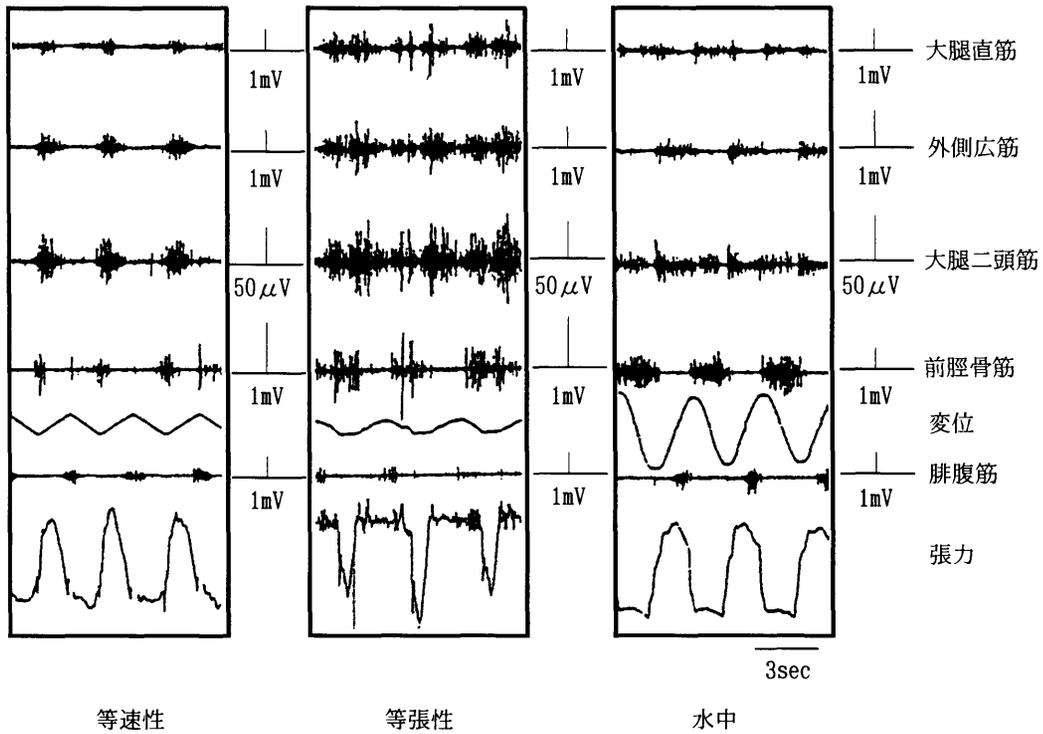


図. III-7 3種類の筋収縮における筋電, 角度, 張力波形の関係.

Fig. III-7 Relationship between the EMG, tension and displacement in three kinds of muscle contraction.

Ⅲ-4. 考察

今回、水の抵抗を利用した水中筋トレーニング装置を開発し、物理的仕事量および大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋（内側頭）の双極表面筋電図を用いてこの水中筋トレーニング装置の有効性を検証した。

4つの穴の断面積の違いにより負荷を変化させ、3秒周期、5秒周期、自由周期で運動を行なわせたところ、穴の断面積が小さくなるに従い仕事量は増加した。前脛骨筋を除く下肢筋放電量はどの周期でも仕事量にほぼ比例して増加した。このことから水の抵抗を利用した運動負荷設定機構が有効であることが示された。

運動中の筋放電量は、前脛骨筋が一番大きく、次いで大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋と腓腹筋の順で筋放電量が大きかった。一般的なレッグプレス運動では大腿部のトレーニングが主となるが、本装置は大腿部のみではなく前脛骨筋などの下腿部のトレーニングにも適していると考えられる。また、大腿二頭筋と腓腹筋が他の筋より活動が少ないことから、シンスプリント（疲労性骨膜炎）やアキレス腱炎など下腿部に障害のある場合やハムストリングスの肉離れの後療法を行う場合に適する（中ら、1992）と考えられる。

水中では秒速1mで進行していく物体が受ける抵抗は空気中を秒速28mで進行していく際の力に相当する。比較的遅いスピードでの抵抗は速度に正比例し、速いスピードでは速度の2乗および推進投影面積に比例する。このため水中ではスローモーション的

身体動作が特徴となり、等速性運動と類似した性質を示す(中山, 1987)。本実験の結果でも、陸上での等張性収縮運動の場合と比較して、本装置を用いた水中運動では水の抵抗が加わるため、張力の変化パターンが緩やかであり、等速性運動に近い性質を持つことがわかった。このことから本装置による水中運動は、陸上での等張性運動と比較して、関節に負担の少ない運動であるといえる。

等速性収縮では水中運動と同様に緩やかな張力の変化パターンを示した。この点から言えば、陸上での等速性運動は水中運動と同様に関節等への負担が少ない運動であるといえる。ところが、等速性運動を実現させるためのトレーニング装置(cybex machine)は、大型で高価なものになりがちであり、訓練する筋ごとに条件をセットしなければならない(伊藤, 1994)。これに対し、本装置を用いた水中運動では、比較的コンパクトで安価な装置で等速性運動と同様の効果を得ることができる。

水中運動のプログラムの効果を検討した研究はいくつか見られるが、水中運動における骨格筋の筋活動を客観的に評価した報告は少なく、水中トレッドミルを中心とした水中筋トレーニング運動での有効性を中心とする報告が散見されるに過ぎない。

水中トレッドミル走の筋トレーニングでは、陸上走行に比べ、水の抵抗および浮力のために膝の伸展角度が減少し、床面と足との摩擦係数が低い(滑りやすい)ので力強いキックができず、水位が胸部付近までであると浮力によって着地までの時間(floating time)が長くなる(Yamaji et al., 1990)。

中ら(1992)は、水深が膝および大腿部レベルで筋放電量は陸上時より全般的に増加するが、水深が胸部の場合は外側広筋、内側

広筋を除いては陸上時よりも下回ると報告している。これは、水深が胸部の場合浮力によって70%近く体重が減少し、接地してからの体重支持と蹴りだし時の負荷が軽減されるためと思われる。したがって、水中トレッドミル走を筋力トレーニングに応用する場合、適当な水深は大腿周辺である（中ら，1992）。

このように、水中における走行では陸上走行に比べ、水の抵抗および浮力のため膝の伸展角度が減少し、水深が腰部、胸部と増すにつれて、下肢筋の活動量が減少するといった問題が生じる。本装置を用いた水中運動では以上のような問題点を解決でき、水中歩行と比較して狭いスペースで効率的な下肢筋運動が期待出来る。アームに対するフットプレートの角度が可変式になっていることにより足関節を自由に動かすことができるため、膝関節の伸展と屈曲運動中でも足関節に無理を生じさせない。水中走行が不可能な、足が不自由な人の運動療法にも利用できる。また、外寸がコンパクトなので、プールのみならず水深1mの下肢用渦流浴槽等においても使用することができる。

水中筋トレーニング装置は体重を自ら支えることが困難で陸上での運動を行えない肥満者、或いは身体障害者、高齢者などの低筋力者の様々な運動療法やリハビリテーションなどへの活用が期待できる。

Ⅲ-5. まとめ

肥満者、腰痛者、低体力者の運動処方や手術後のリハビリテーションを考慮して、水の持つ物理的特徴を利用した水中筋トレーニング装置（レッグプレス）を開発した。この装置は小さな穴が水を通るときの抵抗を利用し、大きさが異なる4つの穴（ $\phi 1.8$, $\phi 1.5$, $\phi 1.2$, $\phi 0.7$ ）があいている負荷調節機構によって作業負荷を4段階に変えることができ、一定の作業負荷を保つことが可能である。

本装置は、シリンダーヘッドに差し込まれている運動負荷調節機構を回し、シリンダーの水の出口管と4つの穴のどれかの穴を一致させることによって作業負荷を決めるように設計されている。

3秒周期、5秒周期、自由周期で膝の伸展・屈曲運動を行なわせたところ、伸展運動の物理的仕事量はどの周期でも4つの穴の断面積が小さくなるに従って増加した。運動中の筋放電量は、前脛骨筋が一番大きく、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋と腓腹筋の順で筋放電量が大きかった。下肢筋放電量は仕事量に比例して増加した。これらのことから水の抵抗を利用した運動負荷設定機構が有効であることが示された。

また、陸上での等張性収縮運動の場合と比較して、本装置を用いた水中運動では水の抵抗が加わるため、筋力の変動が少ないことがわかった。このことは本装置によって関節に負担の少ない筋トレーニングが可能となることを意味する。一般的なレッグプレス運動では大腿部のトレーニングが主となるが、本装置は大腿部のみではなく前脛骨筋などの下腿部のトレーニングにも適して

いると考えられる。この装置は可搬性があり、操作が簡単で、安全でしかも安価であるため、肥満者の運動療法や身体障害のリハビリテーションにも応用でき、しかも設備面や維持管理面の問題にも対応できる。