

## ウェイトトレーニング中に発揮される関節トルクと トレーニング負荷

### ELBOW JOINT TORQUE AND TRAINING LOAD IN ARM CURL EXERCISE

桜井伸二\* 池上康男\* 矢部京之助\*

Shinji SAKURAI\*, Yasuo IKEGAMI\*, Kyonosuke YABE\*

Torques and angular velocities of the elbow joint were measured in two hands curl exercise with barbell in order to achieve insight into the training load of isotonic muscle strength. Subject performed lifts under four conditions of load (10.2, 14.2 kgw) and rate of lifting (24, 36 times/min). The resultant torque at the elbow was determined for one trial under each condition with the Position Sensor System. Maximal voluntary elbow flexion torque was measured in various angular velocity of elbow joint using Cybex II machine, and compared with resultant torque during arm curl exercise.

For the arm curl exercise with lifting rate of 24 times/min, the resultant elbow torques had maximum at the elbow joint angle of about 60 degrees, while as for the 36 times/min trial, the resultant torques were greatest at the beginning of lifting motion. As compared with the gravitational torque, the resultant elbow joint torque was larger in the first half of the lifting motion, and smaller in the latter half. Relative value of the resultant elbow joint torque to the maximal voluntary elbow flexion torque was determined to be 70-110% over a wide range of lifting motion except one trial lifting 10.2 kgw at the rate of 24 times/min.

These results suggests that in isotonic muscle strength training with barbell, appropriate choice of weight and lifting rate enables to put proper and sufficient load on the muscle to yield strength development.

筋力トレーニングによって筋力の増加を意図する際には、最大またはそれに近い筋力発揮を繰り返すことにより大きい効果が期待できると言われている(過負荷の原則)<sup>(2)</sup>。

従来から行なわれていたアイソメトリック筋力トレーニングやアイソトニック筋力トレーニングに加え、アイソカイネティック筋力トレーニングが紹介され<sup>(11)</sup>、スポーツの場でも近年広く行なわれるようになってきた。トレーニング速度などの諸条件により研究者間で評価が定まっていな点もあるが<sup>(4)</sup>アイソカイネティック筋力トレーニングは従来の方法に比べてより大きな効果をもたらすとの報告も数多くなされている<sup>(8)(11)</sup>。その理由の一つとして等速性収縮の際には運動の

全過程にわたって最大張力が発揮される点があげられている<sup>(1)</sup>。換言すればアイソカイネティック筋力トレーニングは関節角度による出力の変化および筋の疲労状態とは関係なく、常に筋の収縮能力に応じた最大の負荷を筋に与えることができるといって優れていると言えよう<sup>(4)</sup>。

一方、バーベルなどのフリーウェイトを用いた筋力トレーニングにおいては、一般に力学的負荷は運動加速度や関節角度によって動作中に変化することが知られている<sup>(3)(5)</sup>。それゆえ、筋に対する相対的な負荷強度も明らかではない。

本研究の目的は、①ウェイトトレーニング中に発揮される関節トルクの変化を求めること、②上記の関節トルクが関節角度・角速度との関連でど

\*名古屋大学総合保健体育科学センター

\*Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University

の程度の負荷となっているかを知ること、の二点である。

これらを明らかにするため、本研究では代表的なウェイトトレーニング動作として、上腕屈筋群のトレーニングとされるカール動作(TWO HANDS CURL)を取り上げた。

## 方 法

被検者は成人男子1名(25歳,身長1.70m,体重61.0kg重)であった。

(1) 10.2kg重, 14.2kg重のショートバーベルを用いて, 毎分24回, および36回のピッチでカール動作を行なわせた。このショートバーベルのシャフトは長さ0.42m, 重量2.2kg重であり, 中央部に1.0kg重, 半径7cmのプレート(8枚あるいは12枚セット)した。被検者にはシャフト部を握る両手は肩幅に開くこと, 肘を体幹部から離して動作すること, 手首関節をなるべく固定して動作することを指示した。

この時被検者の上肢各部(手首, 肘, 肩)とショートバーベルのシャフト部に発光ダイオードを固定し, ポジションセンサシステム(セルコム社, スウェーデン)を利用してカール動作中の各点の位置変化を求めた。ポジションセンサシステムのカメラは被検者の右側方4.0m, レンズ高1.3mに光軸が各点の運動平面と垂直になるよう留意して設定し, サンプル周波数は52.08 Hz(24回/分の場合)および104.16 Hz(36回/分の場合)とした。

本研究では[ショートバーベル(プレート, シャフトを含む)+両手+両前腕部]を1個の剛体として扱い, 肘関節トルク等については左右両肢で同様な運動を行なっていると仮定して一側の値で表わすこととした。連続したカール動作の3回目または4回目のコンセントリックな一区間(肘関節の屈曲中)についてのみ分析を行なった。各点のX座標, Y座標, 上腕の角度, 肘関節角度の各データ列を数値微分し, 速度, 加速度, 角速度, 角加速度を求め, その後に5.21 Hzのデジタルフィルター<sup>(14)</sup>を用いて各データ列の平滑化を行なった<sup>(10)</sup>。図1の角 $\phi$ (肘関節角)を一般化座標

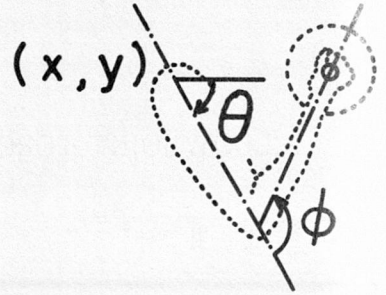
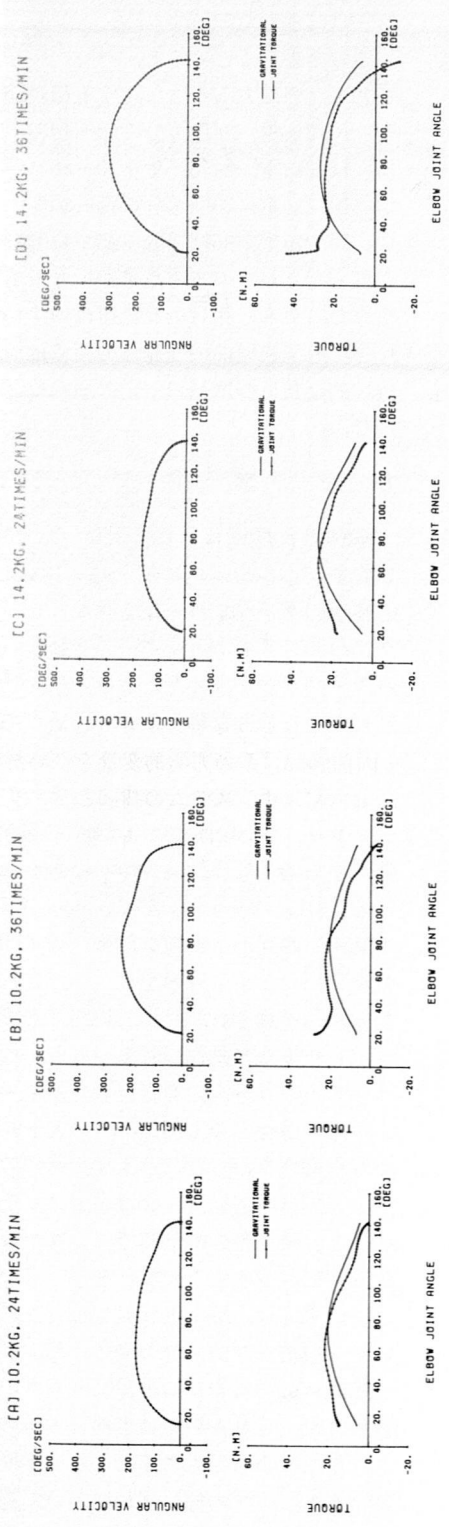


Fig. 1:  
Definition of elbow joint angle ( $\phi$ ).

に選びラグランジュの運動方程式を用いて肘関節が発揮するトルクを求めた。

尚, 手部と前腕部の質量, 重心位置, 慣性モーメントの算出には Dempster, Widule の値に基づき<sup>(9)</sup>, これにバーベル(シャフト, プレートを含む)の力学的変量を勘案して[バーベル+両手+両前腕部]系の力学的変量を求めた。またポジションセンサシステムの制御とデータ処理にはミニコンピュータ(Eclipse MV-4000, Data General Co.)を用いた。

(2) ポジションセンサシステムによるカール動作の分析とは別に等速性筋力測定装置(サイベックスII, サイベックス社)により最大努力で右肘屈曲を行なう時のトルクの変化をもとめた。レバーアームの角速度を $5/3\pi, 4/3\pi, \pi, 2/3\pi, 1/3\pi, 1/6\pi$ , rad/sec(それぞれ300, 240, 180, 120, 60, 30度/秒)として, 伸展位(肘関節角0度)から, 最大努力で屈曲した。サイベックスIIマシンの出力のダンピングは0に設定した。同様にサイベックスIIマシンの出力を用いて, 5種類の肘関節角度における最大等尺性肘屈曲トルクの測定を行なった。肘関節角度およびトルクの変化をデータレコーダー(ソニー, FE-30A)に記録し, 後に再生信号をミニコンピュータ(NOVA-01, Data General Co.)を用いてAD交換し, カットオフ周波数5.00 Hzで平滑化して<sup>(14)</sup>関節角度と最大屈曲トルクとの関係を求めた。最大等尺性肘屈



**Fig. 2:** (upper panel) Angular velocity of elbow joint plotted as a function of elbow joint angle for curls performed with a barbell. (lower panel) Comparison of data of gravitational torque and resultant torque at elbow plotted as a function of elbow joint angle.

Data are for (A) lifting 10.2kgw at rate of 24 times/min  
 (B) " 10.2kgw " 36 times/min  
 (C) " 14.2kgw " 24 times/min  
 (D) " 14.2kgw " 36 times/min

曲トルクについては関節角度とトルクの関係を二次回帰式で求めた。これらから肘関節角度が30-90度の範囲で10度毎に最大関節屈曲トルクを関節角速度から指数曲線近似した。

(3) 各関節角度毎に上記の(1)と(2)の値を比較した。すなわち、(1)で求めたバーベル挙上時のトルクと、(2)で求めた同一条件時(肘関節角および角速度)の最大トルクの比をもとめた。

## 結 果

(1) 図2には、10.2kg重、14.2kg重、のバーベルを用いて毎分24回、36回のピッチでカール動作を行なう際の肘関節角速度(上段)および肘関節トルク(下段)の変化を横軸を肘関節角として示した。尚、下段の図には重力によるトルクもあわせて示した。

いずれの試行でも重力によるトルクは動作の中盤(肘関節角度80度前後)で最大となった。24回/分のピッチで動作を行なった(A)、(C)の試行では、肘関節角速度の最大値は150-180度/秒程度であった。関節屈曲トルクは肘屈曲角が60度前後で最大値となった。36回/分のピッチの(B)、(D)の試行では、肘関節角速度の最大値は280-300度/秒程度であった。関節屈曲トルクは肘屈曲動作の始まり(肘関節角度20度前後)で最も大きかった。重力によるトルクと実際に発揮される関節トルクを比較するといずれの試行でも動作の前半では関節トルクは重力によるトルクより大きく、動作の後半では小さい値となる傾向が認められた。

(2) 図3にはサイベックスIIマシンを用いて最大努力で肘関節の屈曲を行なった際の、肘関節角速度(上段)および肘関節トルク(下段)の変化を肘関節角速度300, 180, 60, 0度/秒の場合について示した。これに基づき、各肘関節角毎(30, 40, 50, ……90度)に肘関節角速度(横軸)と最大トルク(縦軸)の関係を最小二乗法により指数曲線近似し、結果を関節角度が30, 60, 90度の場合について図4に示した。

(3) (1)で求めたバーベル挙上時のトルクを(2)で求めた同一条件時(肘関節角および角速度)の最大トルクに対する相対値で表わし、各試行毎に図5

(A)~(D)に示した。

この結果をまとめると、バーベル挙上中の肘関節トルクの最大トルクに対する相対値はおおよそ

(A) 10.2kg重, 24回/分: 50-70%

(B) 14.2kg重, 24回/分: 70-80%

(C) 10.2kg重, 36回/分: 75-80%

(D) 14.2kg重, 36回/分: 95-110%

であった。バーベルの重量が増しても、ピッチが速くなくても、相対的な負荷は増す傾向が認められた。肘関節屈曲の一動作の間では肘関節角度と相対的な負荷の増減に一定の傾向は認められなかった。

## 考 察

小林と大島<sup>(5)</sup>は1.20, 3.00, 5.00kg重の三種類のダンベルを用いて毎分43-133回という比較的高速のダンベルカールを行なわせ[前腕+手+ダンベル]系のエネルギーの変動から、加えられる力・パワーを求めたところ、動的状態で加わる最大の力は静的な場合の3-15倍であったと報告している。また5.00kg重のダンベルを用いて55回/分のピッチで動作を行なった場合の例で、コンセントリックな場面では力は動作の最初で大きく、動作中を通じてほぼ減少傾向にあることを示している。Hay, Andrews & Vaughan<sup>(3)</sup>は40-80% 4 RM(四回挙上可能な負荷の40-80%)のバーベルを用いて挙上時間を1, 2, 3秒, 降下時間を2秒(それぞれ20, 15, 12回/分のピッチ)と規定したカール動作(肘をパッドに固定してのプリーチャーカール)を行なわせた結果、最もピッチの速い試行で挙上開始時の最大トルクが他より25%程度大きかったこと、運動範囲の最初と最後を除いては肘関節トルクは挙上ピッチに関係しないこと、挙上動作の最初でトルクが最大でその後は単調に減少することなどを示している。

本研究では、静的な状態で加わる最大トルクの1.0-1.1倍(24回/分の場合)および1.4-1.6倍(36回/分の場合)の肘関節トルクの最大値が観察された。これらの値は小林と大島の報告する値よりかなり小さなものであった。本研究の結果においてもピッチの速い試行において静的な状態と

の差がより大きくなることから、小林らの値との差は方法論の違いに加えてピッチの違いによるところが大きいと考えられた。また Hay, et al の研究結果との比較では、本研究においてもピッチの速い試行で挙上開始時のトルクが大きく、また運動範囲の中盤においては肘関節トルクは挙上ピッチに関係しないという同様の傾向が認められた。ただし本研究においては、ピッチが24回/分の場合には動作の中盤で、また36回/分の場合には動作の最初で最大トルクが観察された。Hay, et al の設定ピッチが本研究のピッチよりさらに遅いことを考慮すると、両者の研究結果の相違の理由は明かではないが、運動様式の違いなどが考えられた。

本研究の第二の目的であった相対負荷の問題については、直接の比較が可能な先行研究は、これまでほとんど行なわれていない。ウェイトトレーニングを実施している現場においては、チーティングスタイルと呼ばれる素早い動作によるウェイトトレーニング法で運動の後半部の負荷が不十分となる、あるいはスティッキングポイントと呼ばれる筋力の最も弱い関節角度が存在し、トレーニング負荷は一動作の間でも関節角度により一定ではないなどと考えられてきた<sup>(6)</sup>。しかしながら本研究の結果によれば、10.2kg重、24回/分の(A)の場合を除いては、関節角度・角速度を考慮した最大能力の70-110%のトルク発揮がなされており、しかも関節角度によってほぼ同程度の相対値となっていた。一般にウェイトトレーニングのトレーニング負荷(重量)を決定する際に、1 RM(1回のみ挙上可能な最高重量)を基準としてその70-90%程度とすることを考慮すれば<sup>(6)</sup>、フリーウェイトを用いたウェイトトレーニングにおいても負荷重量やピッチの選択によってはかなり広い関節角度範囲において、トレーニング負荷として十分な関節トルクが発揮される可能性のあることが示唆された。

しかしながら14.2kg重のバーベルで36回/分の試行では関節角度が30-90度の範囲でほとんど100%がそれ以上の相対負荷の値を示しており、このようなことはトルクおよび相対負荷について過大

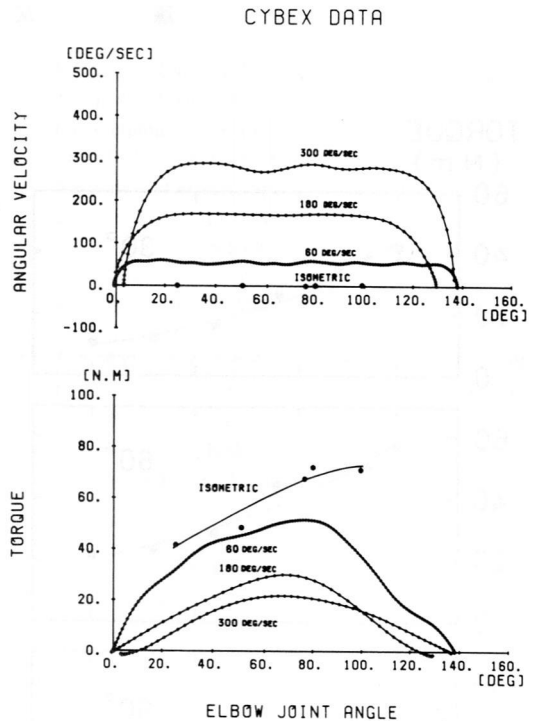


Fig. 3: Angular velocity(upper panel)and torque(lower panel) of elbow joint plotted as a function ofelbow joint angle for maximal voluntary elbow flexion performed on Cybex II machine withthe angular velocities 300, 180, 60, 0deg/sec.

の見積もりを生じていることを示している。この理由としては、まず運動学的な測定での誤差が考えられる。系の重量や重心位値、慣性モーメントについての人体計測学上の誤差、あるいはポジションセンサシステム解析に伴う誤差はこのような運動学的測定において避けられないものである。

つぎにサイバックスIIマシーンにおいて測定された等速性最大筋力が実際の動作において発揮される最大能力を反映していない可能性が考えられる。等速性最大筋力において得られた力-速度関係は従来得られていたものとかかなり様相の違うものであることが報告されている<sup>(7)(12)</sup>。また一般の動作とは異なりサイバックスIIマシーンにおいては筋の予備緊張のない状態で測定されるのが

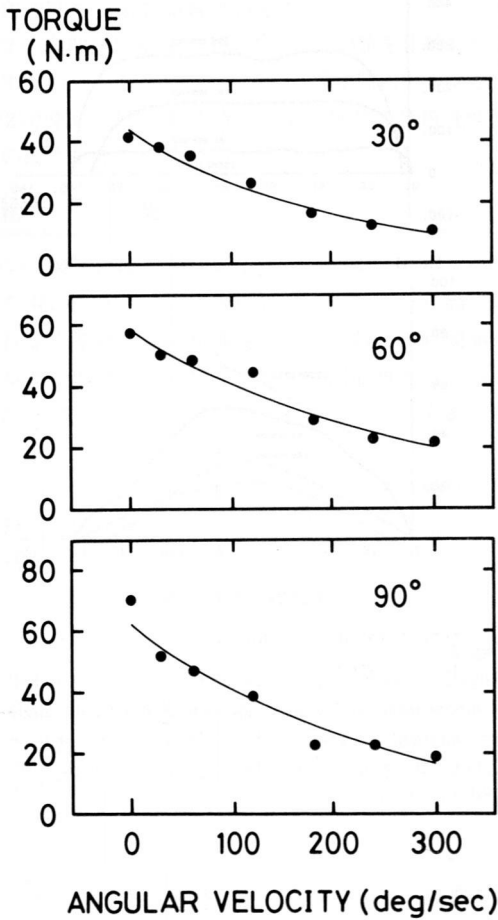


Fig. 4: Torque at elbow joint plotted as a function of angular velocity of elbow joint for maximal elbow flexion performed on Cybex II machine. Data are in the cases of 30, 60, 90 deg. of elbow joint angle.

普通である。

さらに多関節筋が発揮するパワーによる影響が考えられる。Van Ingen Schenau, et al<sup>(13)</sup>は垂直跳び時の足関節が発揮する最大パワーが2500 wattにも達することから、膝の伸展と足底屈が同時におきることにより上位の筋で発揮されたパワーが多関節筋(m. gastrocnemius)を通じて足関

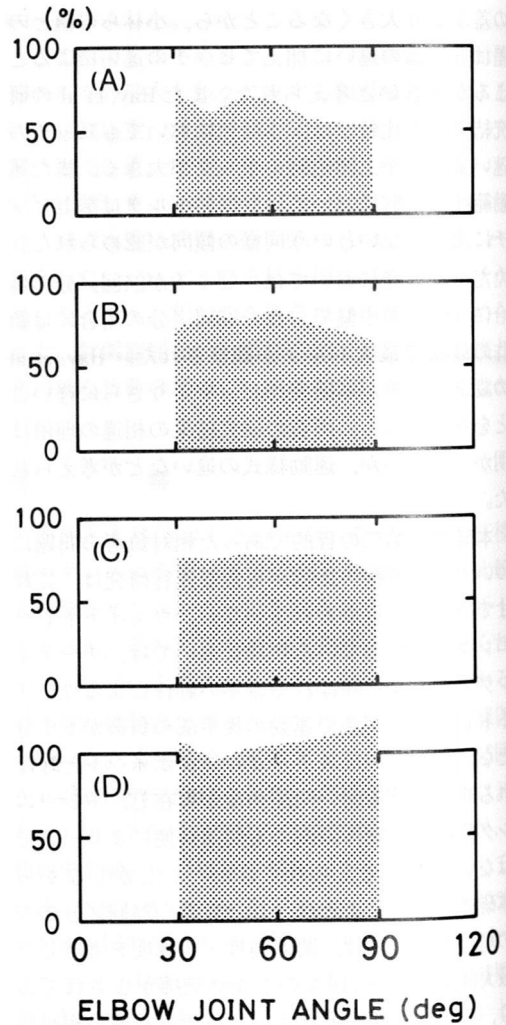


Fig. 5: Relative value of resultant elbow joint torque during curls performed with a barbell to the maximal voluntary elbow flexion torque measured on Cybex II machine. Comparison was made on the same conditions (elbow joint angle and angular velocity of elbow joint).

節へ伝達されたのではないかと考察している。本研究で扱ったカール動作においても肘関節屈曲と肩関節の前挙とは同時におこっているので、烏口腕筋・三角筋前部で発揮されたパワーが上腕二頭筋などの二関節筋により肘関節に伝達され、実際の肘関節の最大能力以上のトルクが発揮された可能性がある。すなわち肘関節トルクは必ずしも上

腕屈筋群の発揮パワーをそのまま反映していない可能性があるのである。

このような実際の動作中に発揮される能力の相対的役割を考慮する際には、各関節毎に発揮されるトルクやパワーだけではなく、今後は筋の起始・停止やテコ比等も含め各々の筋が発揮する張力について考察を進めなければならないであろう。

## ま と め

10.2kg重、14.2kg重のバーベルを用いて、毎分24、36回のピッチでカール動作を行なった際の肘関節トルクの変化を求め、等性最大筋力との比較からウェイトトレーニングにおける相対的なトレーニング負荷強度について検討した。

肘関節屈曲トルクは、24回/分の場合には肘関節角度が60度前後で、また36回/分の場合には20度前後で最大となった。いずれの試行においても肘関節トルクは重力によるトルクと比べ動作の前半で大きく後半で小さいという傾向が認められた。最大トルク発揮能力との比較により求めた相対負荷は、10.2kg重、24回/分の場合を除いて、動作の初期から終盤までの広い関節角度範囲で70-110%となることが明らかにされた。

これらの結果からフリーウェイトを用いたアイソトニック筋力トレーニングにおいても、負荷重量やピッチの選択によって、関節角度・角速度による出力の変化に応じた十分かつ適切な負荷を筋に与えうることが示唆された。今後は各関節毎に発揮されるトルクやパワーばかりでなく、筋自体の発揮する張力についても考察を進めなければならないと考える。

本研究は文部省科学研究費補助金 (No. 60780133) の援助により行なわれた。

## 文 献

- 1) Fox, E. L. : Chap. 5. Neuromuscular concepts applied to sports. Sports Physiology, W. B. Saunders Co. Philadelphia, 1979, PP 82-119.
- 2) Fox, E. L. : Chap. 6. Weight resistance training : Methods and effects. Sports Physiology, W. B. Saunders Co. Philadelphia, 1979, PP 120-158.
- 3) Hay, J. G., J. G. Andrews and C. L. Vaughan : Effects of lifting rate on elbow torques exerted during arm curl exercises. Med. Sci. Sports Exerc., 15 : 63-71, 1983.
- 4) 金久博昭 : アイソキネティックトレーニング, 現代体育・スポーツ体系第8巻, トレーニングの科学, 講談社, 1984, PP 172-191.
- 5) 小林一敏, 大島義晴 : トレーニング負荷の力学的実効値の実験的研究, 体育学研究, 22 : 169-177, 1977.
- 6) 松尾昌文 : アイソメトリックスとウェイト・トレーニング, 現代体育・スポーツ体系第8巻, トレーニングの科学, 講談社, 1984, PP 148-172.
- 7) Perrine, J. J. and V. R. Edgerton : Muscle force-velocity and power-velocity relationships under isokinetic loading. Med. Sci. Sports, 10 : 159-166, 1978.
- 8) Pipes, T. V. and J. H. Wilmore : Isokinetic vs isotonic strength training in adult men. Med. Sci. Sports, 7 : 262-274, 1975.
- 9) 桜井伸二 : 身体運動にともなう力学的諸変量の算出, 現代体育スポーツ大系第7巻, 身体運動の科学, 講談社, 1984, PP 91-101.
- 10) 桜井伸二, 池上康男 : フィルムデータの平滑化法について, 総合保健体育科学, 8 : 95-102, 1985.
- 11) Thistle, H. G., H. J. Hislop, M. Moffroid and E. W. Lowmann : Isokinetic contraction, A new concept of resistive exercise, Arch. Phys. Med. Rehabil. 48 : 279-282, 1967.
- 12) Thorstensson, A., G. Grimby, and J. Karlsson : Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. J. Appl. Physiol. 40 : 12-16, 1976.
- 13) Van Ingen Schenau, G. J., M. F. Bobbert, P. A. Huijing and R. D. Woittiez : The instantaneous torque-angular velocity relation in planter flexion during jumping. Med. Sci. Sports Exerc., 17 : 422-426, 1985.
- 14) Winter, D. A. : Biomechanics of human movement. John Wiley & Sons, New York, 1979, PP 25-39.

(昭和61年1月22日受付)

### 文 献

1. The E. coli group of bacteria is the most important cause of acute bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

2. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of chronic bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

3. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of acute bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

4. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of chronic bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

5. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of acute bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

6. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of chronic bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

7. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of acute bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

8. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of chronic bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

9. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of acute bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

10. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of chronic bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

11. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of acute bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

12. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of chronic bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

13. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of acute bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.

14. The E. coli group of bacteria is also the most common cause of chronic bacterial dysentery. It is characterized by the presence of a toxin which produces the typical symptoms of the disease.