

筋力トレーニングの基礎知識

—筋力に影響する要因と筋力増加のメカニズム—

市 橋 則 明

は じ め に

近年、筋力トレーニングはスポーツ選手だけでなく、健康維持のための体力づくりとして、一般に広く行われるようになってきた。体力テスト時に行われる握力、背筋力といった筋力の測定は、誰もが一度は経験していることであろう。筋力は、筋肉が収縮することにより発揮される。すなわち筋肉とは、身体運動のいわばエンジンの様なものであるといえる。そのエンジンによって発揮される筋力の強い者、弱い者は一体どのような要因によって違いが生まれるのであろうか。また、筋力が増えるということは、何が変化しているのであろうか。ここでは、筋力トレーニングの基礎知識として、筋力に影響する要因と筋力増加のメカニズムを中心に述べ、筋力トレーニングについて考えてみたい。

筋収縮の分類と筋力測定

筋の収縮は、運動要素から分類したもの（表1）と収縮要素から分類したもの（表2）に分けられる。関節運動の有無から見た場合、大きく分けて関節運動を伴わない静的なものと関節運動を伴う動的なものに分けることができる。静的な運動中の筋の収縮を等尺性収縮といい、例えば椅坐位で膝を伸展して保持しているときの大腿四頭筋がこれにあたる。筋力測定としてよく行われるのは、この等尺性収縮時の筋力を測定したものが多く、一般的に行われる握力や背筋力の測定も等尺性筋力を測定しているといえる。動的な運動中の筋の収縮は、等張性収縮と等速性収縮に分けられる。等張性収縮とは、

表1 運動要素による分類

等尺性収縮—関節の角度あるいは筋の長さが一定
等張性収縮—筋の発生する張力が一定
等速性収縮—筋の収縮速度が一定

表2 収縮要素による分類

等尺性収縮—関節の角度あるいは筋の長さが一定
短縮性収縮—筋が短縮しながら収縮する
伸張性収縮—筋が伸張されながら収縮する

筋の発生する張力が一定となるような筋の収縮の仕方であるが、臨床では厳密な等張性収縮は存在せず、一定のおもりを持ち上げるような動作を等張性筋力と呼ぶことが多い。例えば、何キロの重りを持ち上げることができるのかといった様な筋力の測定は、等張性筋力の測定といえる。しかし、重りを持ち上げるときの筋にかかる負荷は一定とはいえず、人体の運動においては真の等張性収縮はありえない。等速性収縮とは、筋の収縮速度が一定となるような筋の収縮である。実際には、関節の角速度を一定に保つ機構を持った特殊な装置を用いて、動く速さを規定したときに発揮される力を測定し、これを等速性筋力と呼んでいる。等速性筋力測定は、特にスポーツ選手の筋力測定やリハビリテーションの効果判定などで、近年さかんに用いられるようになってきた。

収縮要素での分類では、前述した筋の長さの変化しない等尺性収縮の他に、短縮性収縮と伸張性収縮に分類される。短縮性収縮とは、筋が短縮しながら力を発揮するときの収縮様式を意味し、肘を屈曲しながら重力に逆らってダンベ

ルを持ち上げるときの上腕二頭筋の収縮がそれにあたる。一方、持ち上げたダンベルを、肘を伸展しながらゆっくり降ろす様な動作時の上腕二頭筋は、伸張されながら力を発揮しており、このような収縮様式を伸張性収縮という。一般的に行われるほとんどの筋力測定は、等尺性あるいは短縮性筋力を調べたものであるが、等速性筋力測定機器の開発により伸張性筋力も測定できるようになった。

筋力に影響する要因

1) 筋断面積

筋の太い人ほど力が強いことは、よく知られている。筋力と筋の断面積が高い相関を示すとした報告も多く¹⁻³⁾、筋の断面積が大きいほど筋力も大きいといえる。筋の断面積の測定として最も簡単なものは周径の測定であるが、周径では筋の断面積だけでなく皮下脂肪の影響を強く受けるため、正確な筋の断面積を求めるためには磁気共鳴画像 (MRI) 法による測定が最も良いとされている⁴⁾。

2) 神経系による要因

中枢神経系による筋力の調節としては、①動員する運動単位の種類と総数による調節 (Recruitment) ② α 運動神経発火頻度による調節 (Rate coding) ③運動単位の活動時相による調節 (Synchronization) の3つの機序により調節される⁵⁾。どんなに大きな断面積を持った筋でも、この神経系の筋力の調節機構がうまく機能しないと、大きな力を発揮することはできない。

3) 筋線維組成

人間の筋線維は次の3つに分類される。

①SO 線維 (タイプ I)

短縮速度は遅いが、持久性に優れている。

②FG 線維 (タイプ IIb)

速く短縮し、発揮する張力も大きい、疲労しやすい。

③FOG 線維 (タイプ IIa)

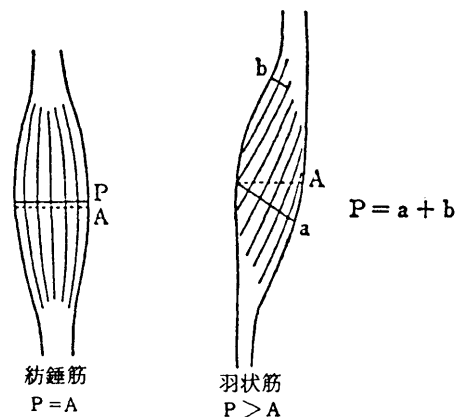
FG 線維と SO 線維の両方の性質を有し、短縮速度も速く、持久性も高い。

以上3つの筋線維は、短縮速度における特性から、FG 線維と FOG 線維を速筋線維、SO 線維を遅筋線維と大別することがある。速筋線維が多いほど高いパワーを発揮し、すばやい動きが可能であろうし、遅筋線維が多くあればあるほど長時間一定のパワーを発揮し、持久性の運動に優れていることになる。筋線維組成と筋出力の関係に関する報告では、等尺性筋力と筋線維組成については、速筋線維の割合が高いほど高い筋力を発揮するとした報告が多いが、関係がないとした報告もみられ、一致した見解はない。一方、等速性筋力と筋線維組成の間には、正の相関があると多くの研究で確認されており、特に低速度よりも高速度でより高い関係が認められるとしたものが多い⁶⁾。

運動強度と筋線維の動員の関係を見ると、サイズの原理に従い運動強度 (発揮筋力) が小さいときは、まず遅筋線維が動員され、運動強度が大きくなると速筋線維も動員されるようになる。

4) 解剖学的要因

骨格筋のマクロな形態は、筋線維の走向方向に基づき、紡錘筋と羽状筋に大きく分類される⁷⁾ (図1)。両筋の断面積について考えてみると、紡錘筋の場合においては、筋の長軸に対して直角に切断した場合の断面積 (解剖学的断



P: 生理学的断面積 A: 解剖学的断面積

図1 紡錘筋と羽状筋における解剖学的断面積と生理学的断面積⁷⁾

面積)と筋線維の走向に対して直角に切断した場合の断面積(生理学的断面積)は等しい。これに対して、羽状筋では解剖学的断面積よりも生理学的断面積が大きくなる。すなわち、解剖学的断面積が同じでも羽状筋と紡錘筋では、生理学的断面積は羽状筋の方が大きくなる。筋力は筋の生理学的断面積に比例することを考えれば、羽状筋は高い筋収縮力を発揮できるような構造を持った筋といえる。一方、筋線維長の側面から両筋をみると、羽状筋よりも紡錘筋のほうが長いことがわかる。筋の収縮速度が筋線維長に比例することを考慮すると、紡錘筋の方が羽状筋よりも筋収縮速度に優れた構造を持っているといえる。

筋収縮力と収縮速度に関わる筋の構造に関して筋節(サルコメア)の配列に着目した金子の説明⁸⁾によると(図2)、筋節が1個のエンジンと考えて、エンジンが並列に連結された場合と直列の場合に分けて考えることができる。エンジンが並列に連結された場合は、個々のエンジンの力が加算されて大きくなる。しかし直列の場合は、1個のエンジンの力と変わらない。すなわち、エンジンが並列に連結されるということは、断面積が大きいことを意味し、エンジ

ンの数(筋節の数)に比例して筋力は増加するが、エンジンが直列に連結された筋線維長の長い筋では、いくら筋線維長が長くても筋力の増加は起こらないことになる。次に収縮速度を考えてみると、個々のエンジンが、1秒間に1cm短縮するとした場合、並列では何個のエンジンを連結しても全体の速度は1cm/secである。しかし、直列の場合は全体の短縮量が加算されて著しく速い速度になる。すなわち、筋の短縮速度は、直列に並んだ筋節の数に比例し、筋線維長の長い筋ほど筋収縮速度が速いといえるのである。

大腿部の生理学的断面積と筋線維長をMRIを使って算出したものを図3に示した⁹⁾。この図を見てわかるように、大腿四頭筋は生理学的断面積が大きく、筋線維長が短い構造を持っており、筋収縮力に優れた構造であるといえる。一方、ハムストリングスは生理学的断面積が小さく、筋線維長が長い構造を持っており、筋収縮速度に優れた構造であるといえる。

5) 関節の角度

筋収縮によって生じた力は、腱を介して骨に伝達され、関節を介してテコの作用により外部に発揮される。この外部に発揮された力を我々は、関節トルクとして測定できる。それゆえ各関節角度で測定された筋力は、筋そのもののが発揮している力ではなく、関節の構造すなわちモーメントアームが関係する。関節のトルク(T)、モーメントアーム(Ma)、筋張力(F :筋線維張力が総合されて腱に作用された力)の関係は $T = Ma \times F$ で表すことができる¹⁰⁾。モーメントアームは、関節の構造(腱の付着する位置)に影響され、筋張力は筋の構造(生理学的断面積)に影響される。また、同じ関節でも関節の角度が変化することによりモーメントアームは変化し、筋張力の変化も筋長が変化することにより引き起こされる。例えば、膝関節伸展の場合を考えてみると、トルクが最大になる角度は約60度であり、伸展していくに従ってトルクは減少する。これはモーメントアームの減少と筋線維長の短縮(筋線維の張力—長さ関係に

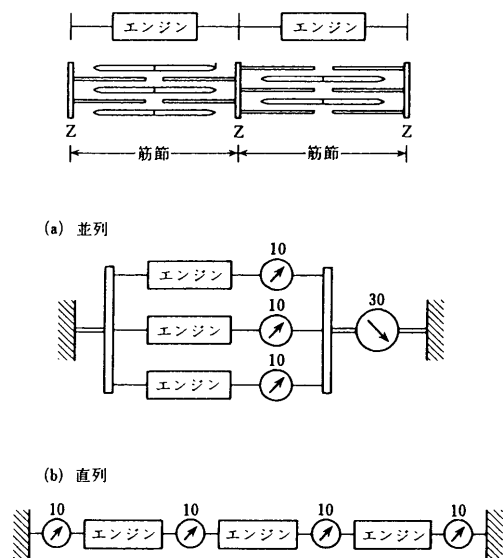


図2 筋節の連結（並列と直列）における力⁸⁾

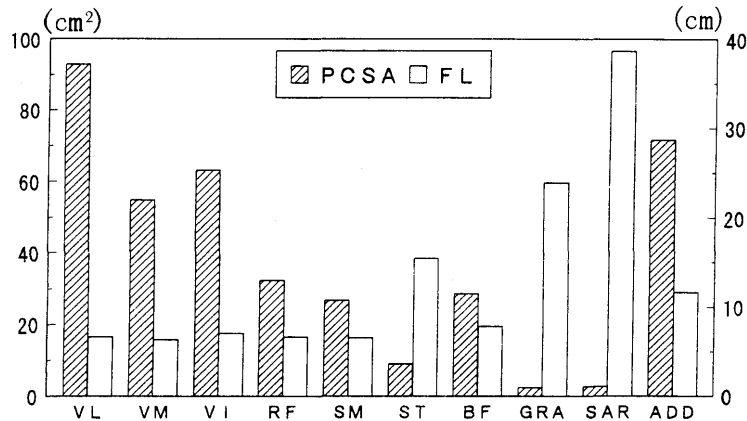


図3 大腿部における筋の生理学的断面積 (PCSA) と筋線維長 (FL)⁹⁾
(VL: 外側広筋, VM: 内側広筋, VI: 中間広筋, RF: 大腿直筋, SM: 半膜様筋, ST: 半腱様筋, BF: 大腿二頭筋, GRA: 薄筋, SAR: 縫工筋, ADD: 内転筋群)

よると自然長で張力が最大を示し、その長さから短縮しても伸張しても張力は低下する) によるものと考えられる。

6) 心理的限界

人が筋力を発揮するときは、最大努力で行ったつもりでも筋そのものが持っている生理的能力のすべてを発揮しているわけではなく、常に予備力を残して筋力を発揮している。そのような場合に生理的能力のすべてを生理的限界と呼び、日常最大努力下での筋力を心理的限界という¹¹⁾。この両者の間には、その発揮能力において20～30%の差があると考えられている⁶⁾。

筋力トレーニングの原則

筋力トレーニングを行う場合に重要な原則¹²⁾として最も一般的なものに過負荷 (over load) の原則がある。過負荷の原則とは、負荷強度が通常用いているものより強くなければ、身体への適応性を利用して筋力の向上を期待することができないということであり、一般的には最大筋力の2/3以上の強度で筋力トレーニングする必要がある。筋力トレーニングの原則として特筆すべきもう一つの原則は、特異性 (specificity) の原則である。特異性の原則とは、ある種の能力は同種の運動を用いたトレーニングによって効果的に高められると定義されている。特異性の

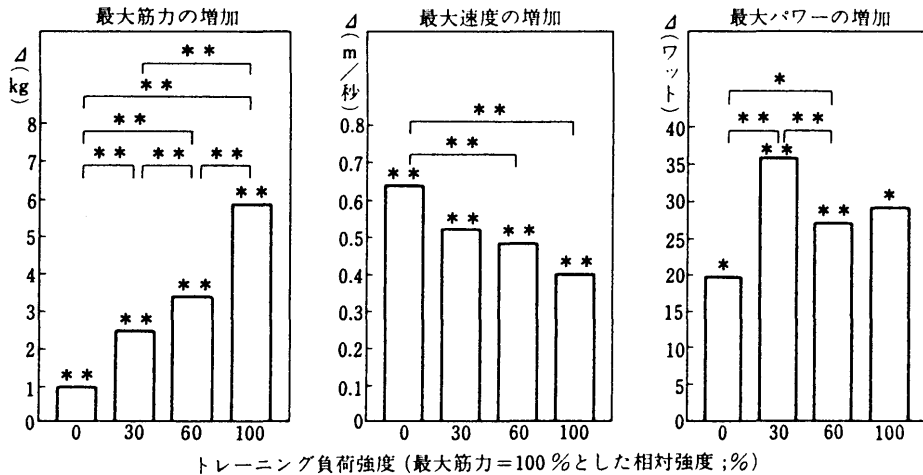
原則について3つに分けて以下に説明する¹³⁾。

1) 筋の活動様式からみた特異性

筋のトレーニングには、前述した活動様式の分類により、等尺性、短縮性、伸張性トレーニングあるいは等張性、等速性トレーニングがある。これらの活動様式のいずれかを主体とするトレーニングを実施した場合に、トレーニングと同一の活動条件における筋力の増加率は、他の活動条件でのそれに比較して高いとされている。すなわち、等尺性の筋力トレーニングを行えば等尺性筋力が増加し、低速度の等速性トレーニングを行えば低速度のスピードでの等速性筋力が最も増加する。

2) 負荷様式からみた特異性

重量物の挙上による筋力のトレーニングでは、トレーニング動作において発揮し得る最大筋力を基準に、負荷の大きさが処方される。その場合に、最大筋力に対する相対的な強度の大きさによって、筋力、筋パワーおよび筋肥大に対する効果に違いが生じる¹⁴⁾。図4に示したように、最大筋力を増加させたいときには、負荷を100%で (最大筋力で) トレーニングした方が最も効果が大きく、最大速度を増加させたいときは、負荷を0%で (最大速度で) トレーニングした方がよく、最大パワーを増加させたいときは、最大パワーがでる負荷でトレーニン

図4 最大筋力, 最大速度, 最大パワーに及ぼす4種のトレーニング効果¹⁴⁾

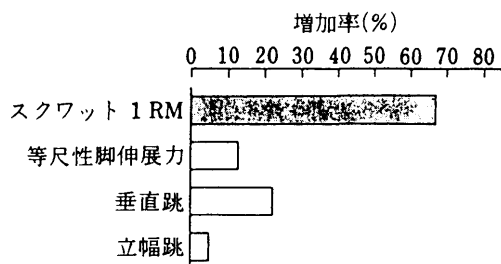
グをした方が効果的だといえる。

3) 動作様式からみた特異性

たとえ主動作筋が同一であっても、測定時の動作様式の違いにより効果としてとらえられる筋力の増加率には差異が生じる。一般にトレーニング動作における発揮筋力の増加率に比較して、他の動作様式での増加率は低い。図5は、スクワットトレーニングを8週間行ったときの筋力の増加率を示したものである¹⁵⁾。スクワットでトレーニングすれば、等尺性脚伸展筋力などに比較して、スクワットの筋力が増加するのがわかる。

筋力増強のメカニズム

筋力トレーニングの効果は、トレーニング様式や負荷、頻度によって異なるが、過負荷の原理に従い筋力はトレーニングに伴って増加す

図5 トレーニングによる最大挙上重量, 等尺性最大筋力および跳躍力の変化¹⁵⁾

る。トレーニング初期の筋力の増加は、主に神経系の改善によるもので筋肥大はみられない。引き続いて筋の肥大が生じ、それに伴って筋力も増加していく。図6は、静的最大筋力を10秒間発揮するトレーニングを60日間毎日実施したときの最大筋力、筋断面積および絶対筋力（単位断面積当たりの筋力）の変化を見たものである¹⁶⁾。この図に見られるように、最大筋力はトレーニング開始後増加し続けるが、断面積はトレーニング20日ではほとんど変化が見られない。従って、この時期の最大筋力の増加は、絶対筋力の増加（脳の興奮水準の増加）により引き起こされている。その後、さらにトレーニングが40日、60日と進むにつれて、筋断面積は増加し始める。すなわち、この時期の最大筋力の増加は、筋断面積の増加によるものであり、絶対筋力の変化はあまり見られない。高齢者と大学生に同一条件下での筋力トレーニングを行い、両群での違いを調べた報告によると¹⁷⁾（図7）、両グループにおいて有意な筋力増加が見られたが、その生理的適応機序が異なることが明らかとなった。トレーニング初期では、高齢者も大学生も神経的要因によって筋出力が増大しているが、トレーニング後期では、筋肥大による筋力増加が大学生において顕著になっている。高齢者の場合、筋肥大の傾向を示すが、大部分の筋力増加が神経的要因の改善によって

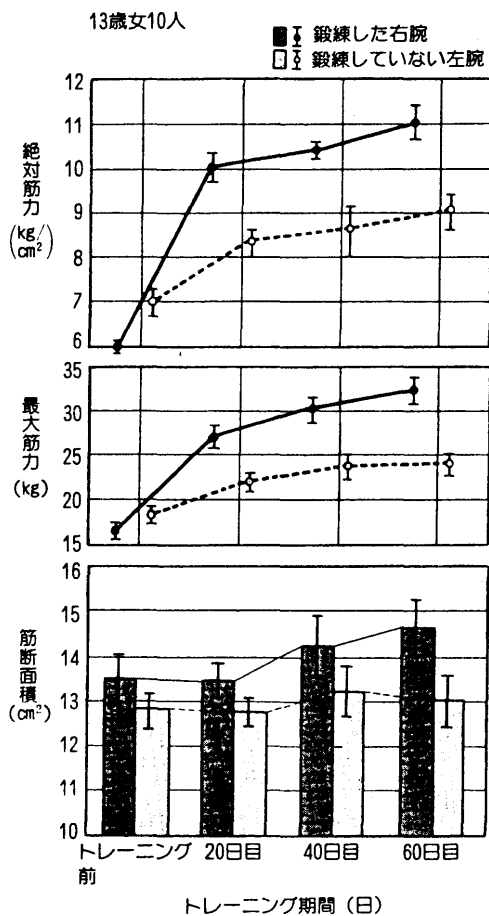


図6 最大筋力、筋断面積および絶対筋力のトレーニングに伴う変化¹⁶⁾

もたらされている。

ま と め

筋力に影響する要因の中で、トレーニングにより変化させることができるのは、筋の断面積と神経系による要因である。このことから、筋力トレーニングを実施する場合は、筋線維の肥大を引き起こすことに重点をおいたトレーニングと神経系の要因を高める（脳の興奮水準を高める）トレーニングに分けることができる¹⁶⁾。例えば、筋肥大を目的としたトレーニングとしては、ボディビル選手の実施しているトレーニングがある。この場合、負荷はあまり強くしない（最大筋力の60～70%）で量を多くする方向でトレーニングされる。一方、神経系

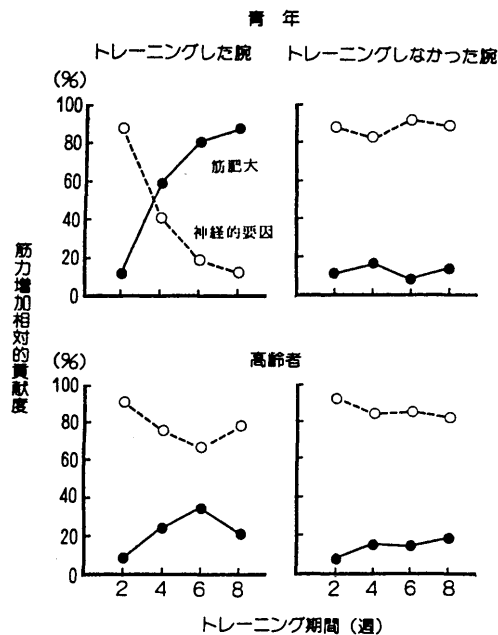


図7 筋力トレーニングにおける筋肥大と神経的要因の相対的貢献度¹⁷⁾

の因子を高めるトレーニングとしては、ウエイトリフティング選手のトレーニングがあげられる。ウエイトリフティングは、制限された体重の中で、より強い筋力発揮が要求されるため、脳の興奮水準を可能な限り高め、筋力発揮に参加する筋線維を100%近くまで高めるような、言い換えれば心理的限界をできるだけ生理的限界に近づけるようなトレーニングが必要になる。そのためには、強い負荷（最大の90～100%）で低頻度の筋力トレーニングが実施される。

文 献

- 1) 福永哲夫：ヒトの絶対筋力—超音波による体肢組成・筋力の分析—。東京：杏林書院，1978：75-105
- 2) 金久博昭：スポーツ選手の単位断面積当たりの脚伸展力。Jap J Sports Sci 1986：5，409-414
- 3) 角田直也，金久博昭，福永哲夫他：大腿四頭筋断面積における各種競技選手の特性。体力科学 1986：35，192-199
- 4) 岡 英世，市橋則明，吉田正樹，三浦 元，北 潔：MRI による大腿部における筋の断面積特性—断面積と周径との関連性—。理学診療

- 1995 : 6, 125-129
- 5) 古屋かおる：筋収縮力の調節機構. 体育の科学 1988 : 38, 419-425
- 6) 勝田茂：運動生理学20講. 東京：朝倉書店, 1993 : 8-14
- 7) 金久博昭：筋のトレーニング科学. 東京：光文堂, 1989 : 42-50
- 8) 金子公宥：パワーアップの科学. 東京：朝倉書店, 1988 : 37-53
- 9) 市橋則明, 吉田正樹, 石川 斉他：MRI による筋線維長及び生理学的断面積の測定. 理学療法 1994 : 21 (学会特別号), 354
- 10) 福永哲夫：筋力「人間の発揮できる力ー筋力ーのとりえ方」. Jap J Sports Sci 1994 : 13, 371-376
- 11) 猪飼道夫：筋力の生理的限界と心理的限界の筋電図学的研究. 体育学研究 1961 : 5, 154-166
- 12) 金子公宥, 田路秀樹：パワーアップの原則再考. Jap J Sports Sci 1993 : 12, 160-164
- 13) 森谷敏夫, 根本 勇：スポーツ生理学. 東京：朝倉書店, 1994 : 147-159
- 14) 金子公宥, 測本隆文, 田路秀樹, 末井健作：人体筋の力・速度・パワー関係に及ぼすトレーニングの効果. 体力科学 1981 : 30, 86-93
- 15) Thorstensson A, Hulten B, VonDoblen W, Karlsson J: Effect of strength training on enzyme activities and fibre characteristics in human skeletal muscle. Acta Physiol Scand 1976: 96, 392-398
- 16) 福永哲夫：筋力トレーニング. 臨床スポーツ医学 1984 : 1, 571-578
- 17) 森谷敏夫：トレーニングによる筋力増大のメカニズム. 臨床スポーツ医学 1991 : 8, 741-744