

遺伝子とフィットネス

「遺伝子」「DNA」「細胞」「核」…と聞いて、どんなイメージを抱きますか？「少し難しそう…。フィットネス指導者には縁のない話」と決めつけてしまっている人がいたら、それは大変もったいないことです。親から受け継ぎ変えることのできない「遺伝子」と、自分が行ってからだを変化させる「フィットネス」は、一見すると対極にありますが、実は密接に関係しています。本特集では、遺伝子について縁遠かった方でも学びやすいように構成しています。最後まで読んで、ウェブサイトに掲載しているテストにぜひチャレンジしてください。

Part 1

遺伝子へのプロローグ

「わかるようでわからない遺伝子のナルホドトピックス」

私たちのからだの設計図は、DNAという物質によってその情報が保持されており、その情報はDNAの構成要素である塩基、A（アデニン）、T（チミン）、G（グアニン）、C（シトシン）の配列によって読み取ることができます。このA、T、G、Cをひとつの文字と捉えた場合、その文字数は新聞紙にたとえて約30年分の量になります。ヒトが保有するこれら文字の情報は、ほとんど同じ文字が書かれていますが、約0.1%の違いがあるとされています。つまり、30年分の新聞紙のうち、およそ11日分の文字が異なるだけ、ということになります。残りの29年と354日分は同じ文字が書かれています。この文字の違いが遺伝子上にあった場合には、この遺伝子から作り出されるたんぱく質に差が生じ、からだの構造や機能に何かしらの個人差をもたらすことになります。

近年では、これら遺伝情報を血液や唾液、毛根から抽出したDNAを基に読み取り、個人の遺伝子タイプを決定することで、個人の遺伝子タイプに合った服薬や治療方針を決定することが、医療の現場において行われ始めています。体育・スポーツ科学の分野においても、このような遺伝子タイプと運動能力等のかかわりが研究されてきています。

ある集団において運動能力を測定した場合、その運動能力には大きな個人差が見られますが、この個人差をもたらす要因に遺伝要因、つまり遺伝情報における個人間の差異が関与しています。筋力・筋パワーについては約30～70%、持久的能力では40～71%の範囲において、それらの個人差に遺伝要因が関与しているとされています¹⁾。このような遺伝要因となる具体的な遺伝子として、アンジオテンシン変換酵素遺伝子（ACE遺伝子）やアクチニン3遺伝子などが有名で、これらの遺伝子上にある個人間の違いが運動能力の違いに影響をもたらしています。アクチニン3遺伝子については、ある遺伝子タイプでは、高強度運動で筋損傷が起きやすいといったことが報告されてお

村上晴香

（独立行政法人 国立健康・栄養研究所
健康増進研究部 特別研究員）

<研究分野>

科学的根拠を基にした運動基準の策定や妥当性研究に携わるとともに、身体活動・運動行動や摂食行動にかかわる遺伝要因を明らかにする研究を行っている。



り、個人の遺伝子タイプに合った運動強度選択に、このような情報が活用され得るかもしれません。

また近年では、運動や身体活動の“行動”自体にも遺伝要因の関与が報告されています²⁾。つまり、ある遺伝子タイプを持つ人は、からだを動かすことをいわず、習慣的に運動を実施しており、一方、別の遺伝子タイプを持つ人は、からだを動かすことをせずにダラダラと過ごすことを好みます。具体的には、ドーパミン遺伝子やレプチン受容体遺伝子などの関与が報告されています。ただし、このような運動能力や身体活動・運動行動は、当然のことながら、環境要因の影響も受けます。

今後は、遺伝子タイプと環境の相互作用が研究されていくことで、アスリートのための運動トレーニングや生活習慣病予防のための身体活動・運動、食生活の指導といった場面において、個人の遺伝子タイプに合った処方が行われていく可能性があります。その際、これら遺伝子についての知識があることは重要です。また、本特集の特別寄稿（パート3）で宮下先生が書かれているように、運動やトレーニングを実施した際のからだの変化には「DNA→メッセンジャーRNA→タンパク質」といった分子レベルでの変化も伴われています。体育・スポーツ科学の分野においても分子レベルでの研究がますます進み、個人の遺伝的特性と身体活動・運動特性との関連や運動トレーニングを行った際のからだにおける変化のメカニズムが明らかとなり、それらを生かした現場での応用が可能になってくると考えられます。

参考文献 1) 村上晴香. 運動能力（筋力・筋パワーおよび持久的能力）と遺伝率. 体育の科学. Vol. 61 (6), 441-445, 2011.

2) 村上晴香. 身体活動・運動行動に関連する遺伝子多型から運動能力を考える. 体育の科学. Vol. 61 (10), 777-783, 2011.

Part 2

宮下充正先生へのインタビュー 「遺伝子って何ですか？」

話し手：宮下充正 (JAJA 会長 東京大学名誉教授)

聞き手：穂積典子 (JAJA/ADD ACSM/HFS)

本特集のパート3で宮下充正先生にご寄稿いただいた「筋肉をつくるー遺伝子のかかわりー」は、インストラクターになりたての方にとっては少し難しい内容に感じるかもしれません。そこで、穂積典子さんに宮下先生の手稿を読んでいただき、インストラクターの視点で遺伝子についてインタビューを行いました。パート3を読む前に、ここで遺伝子についての素朴な疑問を解消しましょう。

■遺伝子って何ですか？

穂積 20年前、私が学生時代に運動生理学を学んでいた当時、運動生理学の中では「遺伝子」という言葉は一つも出てきませんでした。遺伝子レベルで研究が進んできたのは、いつ頃かなのでしょうか？

宮下 遺伝子の二重構造がわかってきたのが1953年。一般的な科学技術の発展というものが後押しして、ヒトゲノムの全部がわかったのが10年～11年前。たとえば、私が習ったころだったら、筋線維でタイプⅠとかタイプⅡとか、遅筋とか速筋があるなんて話もなかったんだから。私が1978～79年に紹介したのがおそらく初めてでしょう。それが教科書に載るまでにはまだ時間がかかったね。研究で明らかになったものが学生の耳に届くまでには、本当に時間がかかるものです。

穂積 ということは、宮下先生がご執筆された最新の情報は『ヘルスネットワーク』を通じて私たちインストラクターが学ぶことができますが、それって運動生理学を専門に勉強している大学生よりも早く、最新情報をキャッチできているのですね。

宮下 『ヘルスネットワーク』はたぶん、類似の雑誌のなかで一番新しい情報が載っているはずですよ。

穂積 「遺伝子」とか「ゲノム」とか「DNA」という言葉を耳にしますが、まずはゲノムとは何でしょうか？ 人間の設計図みたいなものと考えてよろしいのでしょうか？

宮下 ゲノムは人間の全体像というか、人間の持っている遺伝子暗号だね。それが全部つながって、その塩基配列が30億あるということ。1人の遺伝子はどこでも同じだから、からだのどこから取り出して培養して、それを今度はからだに入れるという考え方が、再生医療のベースですね。ただし、まだ新しい細胞を作るといった段階だから、遺伝子そのものの操作というよりも、今は細胞を再生していくというところですよ。

穂積 たとえば筋肉を肥大させるためにトレーニングした場合、そのゲノムのなかのごく一部だけがコピーされ別の細胞を作り出して、たんぱくを増殖させるということですか？

宮下 そうだね。どこの核にもDNAが入っているんだけど、DNAは核から出られないから、メッセンジャー RNAというのに写し取るわけね（転写）。メッセンジャー RNAというのは、らせん状ではなく1列しかなくて、塩基がずっと並んでいる。そして一番コピーしたいところをちゃんとコピーしてくれる（p 9 図1-3 コマめ参照）。その筋肉の中にある遺伝子が活性化することを「遺伝子発現」といいます。

穂積 その遺伝子発現とは、DNAからメッセンジャー RNAが情報の一部をコピーして、細胞の核の外に押し出すということですね。それで翻訳して、たんぱく合成される…。

宮下 うん、それでどんどんつなげていくという、そのプロセスのこと。

穂積 サプリメントは、筋肉の材料であるものを摂取すれば、それがそのまま材料だから、筋肉が大きくなるという、すごく大雑把な捉え方でした。それは基本的に誤りではないと思いますが、ただその過程に、摂った材料がたんぱく質というかたちのままで届くわけではなく、アミノ酸というかたちで運ばれたとしても、筋たんぱくを作ってくれるわけではないというのが、先生の手稿を拝見してよくわかりました。

宮下 サプリメントは材料を補給するっていうだけの話。たとえばコラーゲンなんかはそもそもたんぱく質だから、余分に摂ってもあんまり意味がないということになるね。

穂積 コラーゲンというかたちで運ばれるわけじゃないですものね。ということは、一番必要なのはやっぱり、トレーニング。きちんと筋肉に負荷をかけて、ちゃんとそこに遺伝子が発現するような刺激を加えてあげることですね。

■“フィットネス” > “遺伝子”？

穂積 遺伝子配列は、ヒトという意味ではみんな同じものですが、細かく見ていったらちょっとずつ違って、それが個性を生み出しているということですか？

宮下 ヒトであれば99.9%ぐらいは同じで、残りの0.1%が一



穂積典子さん (JAJA/ADD ACSM/HFS)



宮下充正先生（JAF A会長 東京大学名誉教授）

人ひとりの個性ということだね。

穂積 それは筋肉の付き方とか、トレーニングに対する反応とかも、やはりその0.1%のなかで個人差があるということですね。

宮下 今回私が書いたのは筋肥大がテーマだったけれど、肥満と遺伝子の関係もあるんですよ。肥満遺伝子は約50種類ぐらいあるらしいといわれている。

穂積 ということは、肥満遺伝子が影響して、まったく同じような運動習慣、食習慣を持っても、やせる人と太ってしまう人がいるということですね。

宮下 薬の効き方が遺伝子によって影響されているのがわかってきている。そういうことが解明されて、肥満を解消する治療ができるまでにはまだまだ時間がかかるだろうから、今はあなたたちインストラクターが、対象者の生活に合わせて適切な食事と運動を処方することが一番大事。私個人は、医療よりはるかに良い方法だと思っています。

穂積 同じように運動をやって同じような生活習慣を持つ人がいて、一方の人は運動の効果でどんどんやせていくのに、もう一方の人がなかなかやせないというとき、もしかしたら背景として遺伝子が影響しているかもしれないということを、私たち自身はきちんと理解しておいたほうがいいですよね。それをわかりやすくお伝えして、運動量を増やすとか、食事量を減らすとか、そういうフォローをしていくべきだとわかりました。

宮下 インストラクターの皆さんに期待していますよ。

穂積 改めて基礎的な質問です。筋肉が肥大するときに、筋の細胞が増殖して細胞数が増えるのではなく、1本1本が太くなると学生時代に習ったのですが、その太くなる際に行われる現象が、先生の原稿に書かれていた、遺伝子発現によるメッセンジャー RNAからの転写と翻訳という理解でよろしいのでしょうか？

宮下 まだはっきりとは言い切れないんです。細胞分裂が起きて、それがちゃんとした筋線維になると言う研究者もいますから。

穂積 一人の人間の遺伝子情報は死ぬまで変わらないと思いますが、転写・翻訳する効率は年齢とともに変化するのでしょうか？

宮下 効率というよりも、おそらく刺激の感受性が弱くなるのでしょう。

穂積 では年を取るとトレーニング効果が出にくくなるというのは、この遺伝子発現が弱まるのではなくて、たとえばトレーニングで物理的刺激を与えた、それに対する感受性が弱くなる

ということですね。

宮下 うん、弱くなるんじゃないかな。

穂積 筋線維がどういう刺激に対して遺伝子発現を起こしやすいかっていうのも、遅筋と速筋、速筋でもタイプAかBかによって違うということですか？

宮下 その刺激がウエイトトレーニングの場合、閾値がすごく高いよね。逆に、ずっと自転車をこいでいるというのは、その刺激も閾値も低いわけだから、それが筋細胞に影響して、そこでの遺伝子の働きに影響して、違う信号を送るんだろうね。「お前はミトコンドリアを増やすほうに行きなさい」とか。

穂積 それがまさにトレーニングの特異性につながってくるのですね。それと、お客様からよく「トレーニングは何日置きにやったらいいい？」と聞かれるのですが、トレーニングの頻度と遺伝子とは何か関係ありますか？

宮下 DNAがメッセンジャー RNAになって、さまざまな過程を経て最終的にアミノ酸を作るわけだけど、それだけのことをからだのあちこちでやっているのだから、時間がかかっている。だからその時間を取ることは必要でしょう。

穂積 なるほど。やはり私たちインストラクターも、トレーニング後に筋肉の中でどういうことが起こっていて、それにどれだけの時間がかかるのかっていうことをしっかり認識しておくべきなのですね。インターバルの時間はそれぞれ個人差もあるので、何十時間と一概には言えないと思いますが、少なくとも、その間に筋肉の中で行われているプロセスについてはしっかり理解を深めるべきですね。

宮下 そうだね。人間には60兆ぐらいの細胞があって、それが1年ぐらいで何十パーセントか入れ変わるらしい。それだけ細胞は入れ変わっているのに同じ人間だということがおもしろいね。

穂積 今回先生の原稿を読むまで、DNAと聞くと「親譲りのもの」「自分では変えられないもの」「努力しても変えられないもの」というイメージでした。私も含めてインストラクターの多くはそうだと思います。だから、自分の努力でからだを変えていくフィットネスやトレーニングと、すごく対照的な話だと思っていました。でも、そんな相反するものが、実はすごく密接に関係しているっていうことを知って、非常に勉強になりました。読者のみなさんも、そんな視点で先生の原稿を読んでいただけると理解が深まると思います。本日はありがとうございました。



Part 3

宮下先生特別寄稿

「筋肉をつくるー遺伝子のかかわりー」



Urso UL 博士／著 宮下充正（Jafa 会長 東京大学名誉教授）／訳及び解説

本誌 2010 年 4 月号に掲載した「運動能力や健康にかかわる遺伝子」に対して、わかりにくいというお叱りを受けた。私の書き方が下手なせいもあるが、遺伝子の働きすべてが解明されていないので、すっきりと理解しにくいこともあるだろう。しかし、フィットネスインストラクターは難しいからといわないで、これからさらに発展していく細胞生物学の研究成果の理解を少しでも深める努力をしたほうがよいと思う。以下、ASCM/HFS の資格更新テスト（January-March, 2011）に使われた文章に、解説〔括弧内〕を加えて紹介するので、テストに挑戦してみたらどうだろう。

※編集部注：本コーナーでは、著者の原稿を抜粋して掲載しています。テスト及び全文は、Jafa ウェブサイト（トップページの「ニュース」から確認できます）に掲載していますので、ぜひ挑戦してください。なお、このテストに教育単位は付与されません。

骨格筋は、フィットネスを構成する主要なものの、スポーツの競技力を左右するもの、そして、特に加齢とともに多く発生する「けが」を予防する重要なものである。だから、フィットネス、競技成績、健康を向上させるレジスタンストレーニングは、種々の健康関連機関とともにアスレティックトレーナーや医師によって処方されるのである。レジスタンストレーニングの効果として最初の数週間に現れるのは、筋肉を活動させる神経系の活性化によって活動する筋肉へより効率の高い働きかけが行われ、肥大しないが筋力が増大することである。これは古くから知られてきた。その後の数週間は、継続するトレーニングによってより多くの刺激が筋肉へもたらされ、たんぱく質の合成が増え筋肉が肥大し収縮機能が強くなる。

このように、レジスタンストレーニングによって筋肉が肥大するのは、特別新しく発見されたことではない。新しいことは、最近10年間の科学技術の発展によって、運動への反応として骨格筋での遺伝子発現〔**遺伝子もっているたんぱく質を合成する情報を利用する過程**〕が変化を受け、たんぱく質合成がなされるという骨格筋の肥大の分子生物学的基礎が明らかにされたことである。したがって、医師、コーチ、運動指導者は、筋肉の肥大がもたらされる細胞レベルでの基礎的理解を深めるのは大切なことである。このような知識をもつことによって、筋肉の肥大をもたらす方法を、はっきりと選択できるようになる。また、分子生物学のこれからの発展によって、さらに効果の高いたんぱく質同化作用をもつ薬剤、遺伝子治療、高額な補助食品などが開発されるだろうから、それらに対して、私たちは強い関心を払っていかなければならない。

次に、骨格筋の肥大をもたらす遺伝子発現とたんぱく質合成

の基礎を解説しよう。最初は、遺伝子発現とたんぱく質合成の基本的考え方を紹介し、それらがトレーニングの負荷の増大と栄養によって、いかに影響されるかについても触れる。

転写：遺伝子発現を説明する

〔細胞は、たった1個の遺伝子に書かれている情報を、転写と翻訳という2つの過程を経ることによって、100万倍にも増やす能力をもっている。人間の遺伝子約2万2,000個のうち、どれだけがたんぱく質に合成されるかは、細胞の種類と周囲の環境によってさまざまである。活発な活動を行っている脳細胞では、2,000～3,000種もの遺伝子が発現していることが知られている。〕

筋肉を構成するたんぱく質を合成する基本的なメカニズムは、DNAをメッセンジャーRNAへ転写することから始まる。そして、メッセンジャーRNAはたんぱく質合成へと翻訳される（図1の3コマめ）。

レジスタンストレーニングの場合、筋肉は強い張力あるいは負荷を経験すると、転写に関連する遺伝因子が活性化し転写が始まる。転写に関連する遺伝因子とは、DNAの調節機能部分と結びついているたんぱく質であって、たくさんの遺伝子発現をコントロールしている。言い換えれば、促進させる/高める転写活性化因子、そして、沈黙させる転写抑制因子と結びつくことによって、転写因子はコントロールしているそれぞれの遺伝子の活動をオンにするか、オフにすることができる。〔**筋肉の主成分は、アクチンおよびミオシンと呼ばれる筋肉の収縮活動に必須なたんぱく質である。**〕たとえば、筋肉に対する負荷の

増大は、筋線維のアクチン、あるいは、ミオシンにかかわる遺伝子の促進因子と転写因子とが結びついて刺激する。同時に、筋肉の成長を止める遺伝子ミオスタチンの活性化を抑制する因子と転写因子は結びつくのである。

遺伝子発現でみられる変化のスピード、大きさ、時間経過は、運動の様式と継続時間、負荷の強さ、負荷のかかる頻度の影響を受ける。図2は、レジスタンストレーニングと比べて、持久性の運動の負荷はどう異なるのかを示している。[たんぱく質から構成されているミトコンドリアは、エネルギーをつくり出す細胞内の発電所であり、ATPが合成される。持久性トレーニングによってミトコンドリアの量と数が増えると報告されている。] このように基本的には、たんぱく質合成の量は、遺伝子発現の変化を引き起こす刺激の様式に関連していることがわかる。

翻訳とは、たんぱく質合成のメッセンジャー RNAがたんぱく質へ翻訳される過程を指す言葉である。核の中にある染色体から（RNA配列としてコード化されている）遺伝情報を、核の外にあるリボソームへ運ぶのがメッセンジャー RNAである。リボソームは、RNA塩基配列を読み取って、それをアミノ酸のグループへ翻訳する。そして、アミノ酸グループは、ポリペプチド鎖を形成する。RNA合成酵素は、リボソームの酵素であって、活性化されたアミノ酸をポリペプチド鎖へ加えたたんぱく質は肥大していく。

どのくらいのたんぱく質をつくるかを決めるのはメッセンジャー RNAの量であって、遺伝子発現の規模が、それぞれの骨格筋線維が合成するたんぱく質の量を詰め込むことになる。しかし、転写と翻訳との比率は、1対1とはならない。たとえば、RNAの塩基配列がつくられる速さ、メッセンジャー RNA分子の安定性（破壊される程度）、そして、リボソームでの翻訳の効率が、翻訳の割合に影響するからである。それゆえ、たんぱく質合成の遺伝情報がメッセンジャー RNAに転写されたとしても、すべてがメッセンジャー RNAによってたんぱく質へ翻訳されるとは限らない。[このことが、同じトレーニングを実施しても個人差が現れる理由の一つとして挙げられる。]

「からだを構成するたんぱく質は、常に分解と生成をくり返して、新陳代謝を行っている。その寿命はわずか数秒間しかないたんぱく質から、長いものでは数カ月間働き続けるものもある。」DNAからメッセンジャー RNAを介してたんぱく質合成という過程が、たんぱく質の回転率に影響する。たんぱく質の回転率とは、合成と分解との関係である。これまでの研究では、1回のレジスタンストレーニング後1～2時間の間にたんぱく質の合成は急速に高まる。そして、各人の鍛錬度によって異なるが、たんぱく質合成の高まりは24～48時間続く。たんぱく質の合成がたんぱく質の分解を上回れば、同化[生物が外界から摂取した物質を自分の成分に変える]状態になる。しかし、たんぱく質の分解は細胞の重要な役割であり、筋線維内の損傷したたんぱく質を除去するように働き、その代りとして新しいたんぱく質が置き換わる。レジスタンストレーニングによって生じるたんぱく質の分解を減少させるように、多くの栄養補助食品がつくられているのは、このような理由による。もし、た

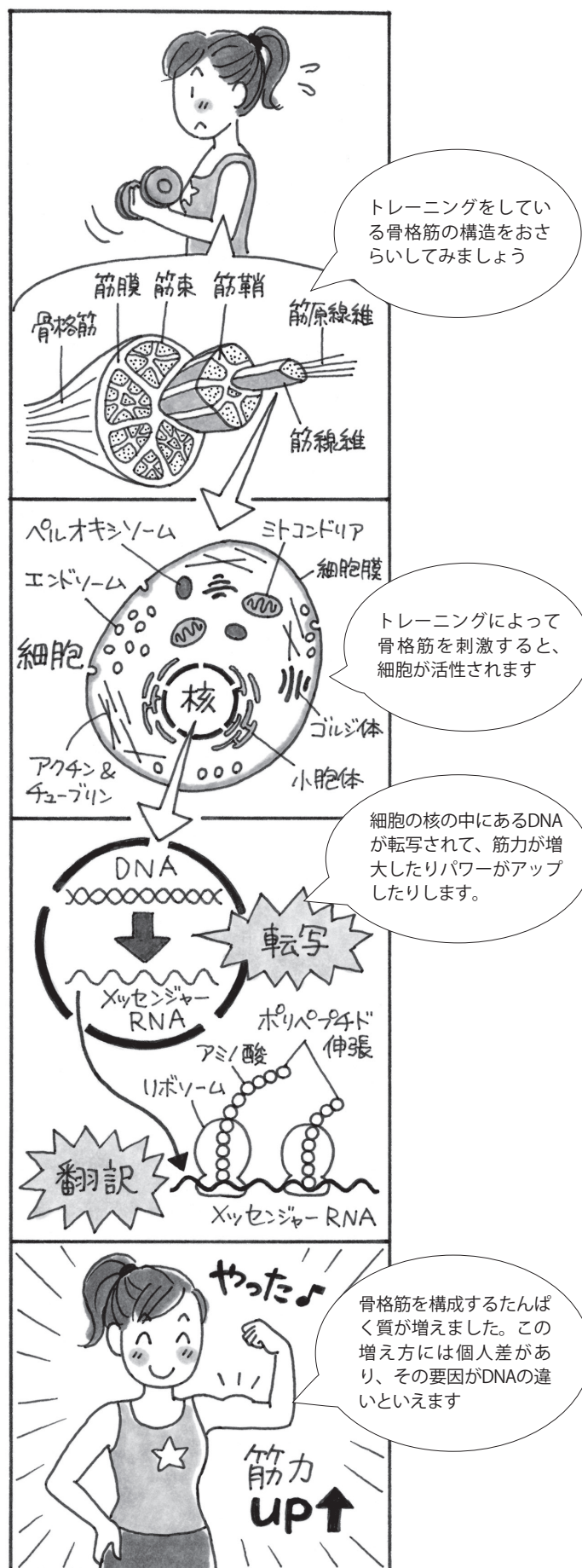


図1 転写と翻訳の流れ（編集部による作成）



たんぱく質の分解が生成を越えてしまえば、損傷した筋肉のたんぱく質が残って新しいたんぱく質の合成を抑えてしまう。したがって、新しいたんぱく質は、組織の損傷を復旧するために役立たなくなり、筋肉の肥大にとって大きなマイナスとなってしまふのである。

あなたの遺伝子を養う

〔生命活動の根本は、食品として摂取したたんぱく質を、アミノ酸という構成要素にまで分解し、再びアミノ酸をつなぎ合わせてたんぱく質をつくるというサイクルである。〕

肥大 (hypertrophy) という言葉は、ギリシャ語の「普通以上」という意味のhyperと栄養を意味する言葉tropheからできあがったものである。だから、筋肉の肥大にはトレーニング効果に加えて、栄養の影響は無視できない。たんぱく質は筋肉をつくり上げる原料の中で主要なものであるから、レジスタンスエクササイズが筋肉の量を増やすためには、十分なたんぱく質の摂取が必須である。このため、筋肉のたんぱく質合成を促進させるレジスタンスエクササイズに対する迅速な同化反応の栄養面からの研究が多くみられるようになった。

レジスタンストレーニングプログラム実施中に十分なたんぱ

く質を摂取することは、構造的に役立つ部品を、またたんぱく質合成過程での機能的な働きをする細胞内の小器官へも部品を提供する。骨格筋の量の増大は、たんぱく質翻訳（例：リボゾーム）の機能的働きの増大によるから、たんぱく質の不十分な摂取は翻訳する量を減少させる。負荷の増大によってメッセンジャー RNAが増大したとしても、これらのメッセンジャー RNAはリボゾームによって効率よくペプチドへ翻訳されないの

まとめ

遺伝子発現からたんぱく質合成まで (DNA→メッセンジャー RNA→たんぱく質)、筋肉増加の過程を分子レベルで解説し、筋力増大のカギとなる筋肉量を調節する分子の流れの道筋を明らかにしてきた。これらの道筋は [トレーニングという刺激が遺伝子の活性をうながし、DNAの塩基配列をメッセンジャー RNAへ転写し、核の外へ出て3つの塩基からなるコドンへ翻訳してたんぱく質が合成され、筋肉が肥大していくという一連の過程である。そして]、それぞれのレベルで調節されているのである。

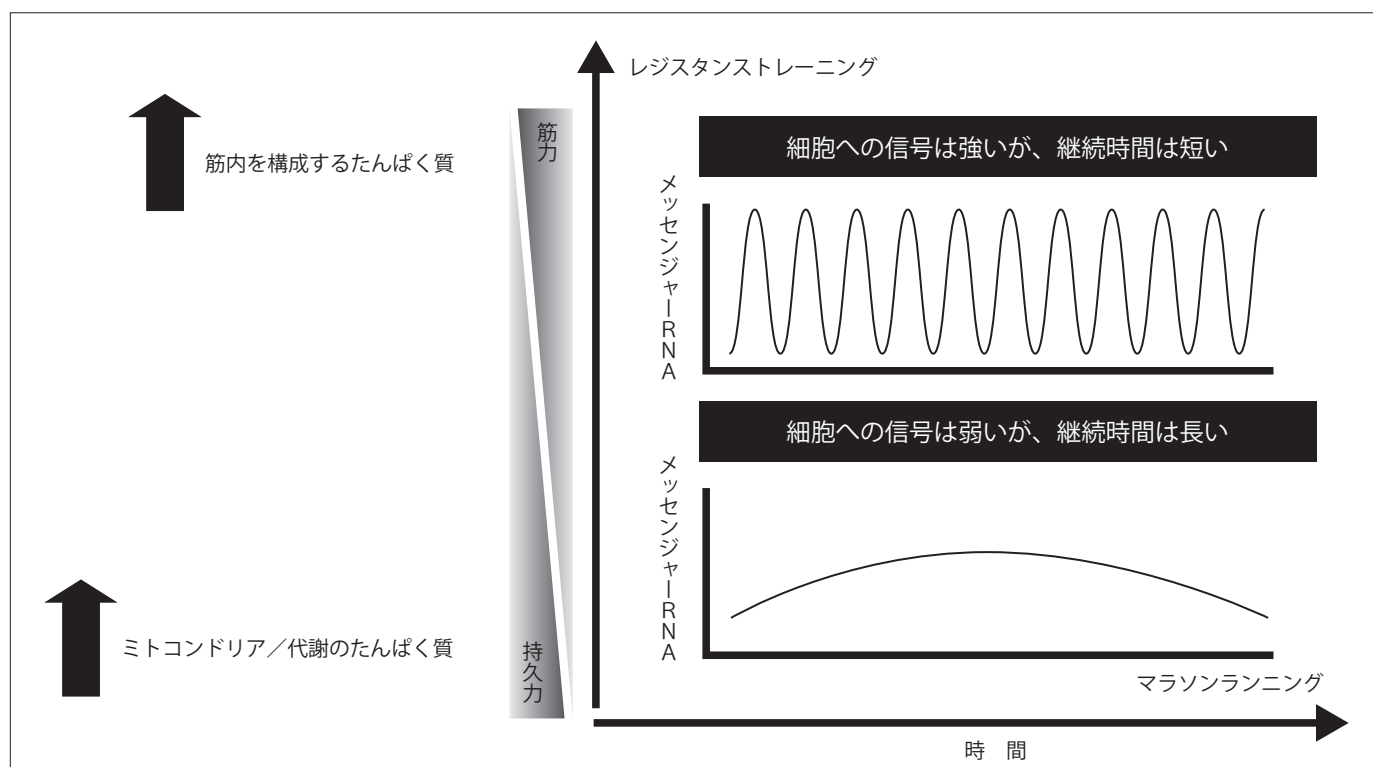


図2 レジスタンストレーニングと持久性の運動の負荷の比較 (Urso2011の図を一部改変)