

総説

# ビタミンと運動に関する最近の知見

東田 一彦

滋賀県立大学人間文化学部生活栄養学科

本総説では、ビタミンに関して近年話題となっているトピックスについて記した。

ビタミンCを含む抗酸化物質は、アスリートだけでなく一般の人も摂取しているが、近年の研究で、酸化ストレスが筋の適応に重要である可能性が示されている。また、骨代謝との関連が古くから知られているビタミンDは、骨格筋に直接的に作用することが明らかとなってきた。最後に、栄養・食事指導に利用できるかもしれない、客観的なビタミン摂取量の生体指標について紹介する。

キーワード：ビタミン 運動 抗酸化 尿

## I はじめに

ビタミンは生体にとって必要な栄養素である。例えばビタミンB群はエネルギー代謝において非常に重要な役割を担っていることが知られている。また、抗酸化作用を持つビタミンCとビタミンEは、運動によって引き起こされる酸化ストレスを軽減させる目的でアスリートをはじめ広く利用されている。骨代謝において重要な働きをすることが知られているビタミンDが骨格筋機能にも関与していることが分子レベルで明らかとなってきた。近年の研究によりこれまで知られていなかったビタミンの様々な機能が明らかになってきている。ビタミンが発見されて以来、ビタミンの摂取が運動パフォーマンスを向上させるかどうかについて多くの研究が行われているが、その多くは研究デザインが不十分であったり、評価項目が不適切であったりした<sup>1)</sup>。近年では、必要な栄養素が十分に摂取できている条件では、ビタミンをサプリメントとして摂取しても運動パフォーマンスは向上しないということが一致した見解になっている。または運動パフォーマンスを損なう効果もない、ということも共通の見解であると思われる。当然ではあるが、特定のビタミン欠乏は、脚気や壊血病、溶血などの欠乏症を引き起こすため、運動パフォーマンス以前に健康を維持するために必要量を食事から摂取する必要がある。

## II 抗酸化ビタミンと運動

ヒトをはじめとする動物は、大気中に存在する酸素

を体内に取り込んで有酸素的にエネルギーを合成しているが、その一部の酸素は非常に反応性に富んだ活性酸素種となる。生体にはこれらの活性酸素を産生する機構と除去する機構が存在するが、このバランスが崩れるといわゆる酸化ストレスが誘発され、DNA、タンパク質や脂質に損傷を引き起こす。運動時の骨格筋の酸素消費量は、安静時と比べ数十倍にまで増加するため、運動時は活性酸素種も同様に増加し、活動筋に酸化ストレスによる傷害が生じると考えられている<sup>2)</sup>。

抗酸化サプリメントの代表格として、水溶性のビタミンCと脂溶性のビタミンEがあるが、これらの抗酸化ビタミンを運動前に摂取することで、運動後の酸化ストレスマーカーの増加が抑制されることが多くの研究で確認されている。また、抗酸化ビタミンの摂取は、酸化ストレスマーカーだけでなく、筋損傷のマーカーであるクレアチンフォスフォキナーゼや乳酸脱水素酵素の上昇も抑制することから、筋損傷の抑制にも効果があるという報告もある。そのため、運動中や運動後に高まった酸化ストレスを軽減する目的で抗酸化サプリメントを摂取するアスリートや運動愛好者が多いと考えられる。

近年の研究結果から、活性酸素は生体への悪い影響だけでなく、細胞内外で情報を伝える分子としての役割があり、生体内で重要な機能を有していると考えられている<sup>3), 4)</sup>。したがって、トレーニングを行うことで引き起こされる適応、例えば、持久性運動能力や筋持久力の向上にも、酸素ストレスの増加が寄与していると考えられるようになってきた。このような背景から、運動で生じる活性酸素を、高容量の抗酸化ビタミン

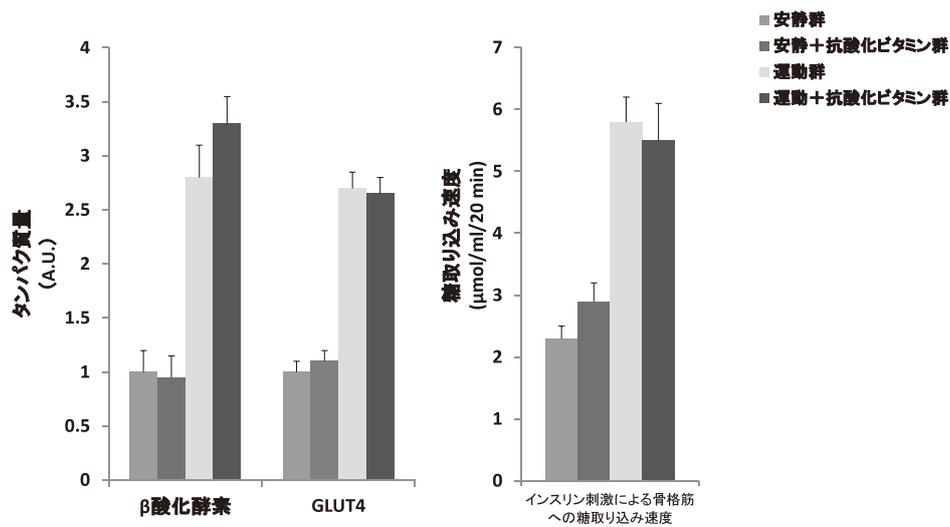


図1 運動トレーニングと抗酸化ビタミン摂取がトレーニングによる骨格筋の適応反応（β酸化酵素とGLUT4タンパク質量、糖取り込み速度）に及ぼす影響

文献6より引用改編

ンの摂取により除去することでトレーニング効果を損なうのではないかと考えられ、近年になっていくつかの研究が行われた。健康な成人男性に8週間の運動トレーニングの期間中、一日1,000 mgのビタミンCを摂取させた介入実験では<sup>5)</sup>、プラセボ群では最大酸素摂取量が22%増加したのに対し、ビタミンC摂取群では、10.8%しか増加しなかった（統計的に有意ではない）。また、実験動物を対象とした実験では、6週間の運動トレーニング期間中にビタミンC（500 mg/kg BW/日）を摂取させた結果、プラセボ群の持久性パフォーマンステストの結果は、トレーニング前と比較して186.7%増加したが、ビタミンC摂取群では、26.5%しか増加せず、ビタミンC摂取が運動トレーニングの効果を低減させると報告している<sup>5)</sup>。この結果をもたらした要因として、高容量の抗酸化ビタミン摂取により、活性酸素を除去することで運動トレーニングの効果を消し去ってしまう、と結論付けられている。この報告は、抗酸化ビタミンサプリメントの運動選手での普及を考えると非常にセンセーショナルな内容であったため、研究者のみならず多くのスポーツ関係者に衝撃を与えた。

一方で、抗酸化ビタミン（ビタミンC；750 mg/kg 体重/日、ビタミンE；150 mg/kg 体重/日）を9日間、ラットに摂取させ運動トレーニングを負荷した研究では、運動トレーニングにより骨格筋のエネルギー代謝にかかわる酵素の働きが顕著に増加し、この増加は抗酸化ビタミン摂取群でも同様に観察された。さらに、グリコーゲンの貯蔵などにかかわる糖輸送体GLUT4のタンパク質量や骨格筋の糖取り込み能は、抗酸化ビ

タミン摂取の有無に関わらず運動トレーニングにより著しく増加することが明らかになった（図1）<sup>6)</sup>。これ以外にも、いくつかの研究グループが、「短期および長期の抗酸化ビタミン摂取は運動による骨格筋の適応変化に影響を及ぼさない」と報告しており<sup>7), 8)</sup>、議論が分かれている。

現在では多くのポリフェノールが発見されており、ワインをはじめとするポリフェノールを多く含む食品が人気となっている。特に、ケルセチン(Quercetin)、カテキンやアントシアニンといった抗酸化作用を持つポリフェノールは多くの健康食品に利用されている。近年いくつかのポリフェノールは持久性運動機能を高める可能性が指摘されている。レスベラトロール(Resveratrol)はブドウの皮や赤ワインに多く含まれるポリフェノールの一種で、エネルギー産生器官であるミトコンドリアを増加させる作用を有することが報告された。Dolinskyらは、トレーニングのみを行う群と比較して、トレーニング中にレスベラトロールを摂取した群では持久性パフォーマンスが21%高かったことを報告している<sup>9)</sup>。同様に、ポリフェノールの一種、柑橘類などに多く含まれるケルセチンも運動パフォーマンスを高めることが報告されている<sup>10), 11)</sup>。

これらのポリフェノールが注目されるようになったのは、その強い抗酸化作用である。前項で述べた抗酸化物質としてのビタミン摂取が運動トレーニングの効果を打ち消す、という先行研究の結果と矛盾している。このように、ビタミンを含む抗酸化サプリメント摂取の効果に関して、古典的な研究結果を覆す研究報告が多く発表されており、混乱を招いている。しかし

ながら、前述したように、ビタミンが運動パフォーマンスを向上させるか、トレーニングによる適応を増強するか否かを検討した多くの研究では、ビタミンのエルゴジェニックエイドとしての効果を否定するものが多い反面、運動パフォーマンスを損なうことも報告していない。そのため、過去の研究結果や多くのアスリートが抗酸化ビタミンをサプリメントとして摂取している現状を踏まえると、ビタミンを含む抗酸化物質を摂取することでトレーニング効果が打ち消される、競技パフォーマンスが低下すると考えることは難しい。一方、これらの研究結果は、通常の食事の重要性を強調する一面もある。それは、普段の食事から十分な栄養素を摂取する努力を行うことで、研究結果に議論がある、もしくは科学的根拠の乏しい物質に依存する必要がなくなるからである。

### Ⅲ ビタミンDと骨格筋

脂溶性ビタミンの一つであるビタミンDは、カルシウムをはじめとするミネラルの恒常性や骨代謝に関与しており、欠乏することによる病や骨軟化症を発症することが古くから知られていた。一方、近年になり、ビタミンDのもつ他の機能が明らかにされ、特に骨格筋機能と密接な関連があることが多く報告されてきた。ビタミンD欠乏による代表的な疾患の一つであるくる病や骨軟化症患者では、筋力の低下、筋萎縮や転倒リスクの増加などが知られている。また、若年者および高齢者の骨格筋量と血中ビタミンD濃度とが正の相関関係を示すことも多く報告されており、ビタミンDは骨代謝だけでなく、骨格筋の機能やサイズ調節に直接的にかかわる栄養素であることが示唆されていた。

ビタミンDは脂溶性ビタミンであるため、細胞内に取り込まれ、ビタミンD受容体と結合することで標的となる様々な遺伝子の発現調節を行っている。骨格筋でビタミンDがどのような作用をもつかは不明な点が多かったが、現在では骨格筋細胞においてビタミンD受容体が発現していることが確認されている。さらにビタミンDは筋サイズを小さくする機能を持つミオスタチン遺伝子の発現を低下させること、反対にフォリスタチンやInsulin-like Growth Factorなどの筋肥大を引き起こす遺伝子を増やすことが報告され、ビタミンDの骨格筋への作用が、分子レベルでも明らかになってきた<sup>12)~14)</sup>。

これらの先行研究の結果から、近年になってスポーツ栄養の分野でも骨代謝のみならず、筋力や筋量といった観点からビタミンDについて研究が実施されている。また、健康で活動的な被験者に対し、一日当たり4,000IUのビタミンDを35日間摂取させたRCTでは、ビタミンD摂取はジャンプ運動後の炎症性マ

ーカーの増加を抑制することや、ジャンプ運動後の等尺性収縮での張力の低下が抑制されたことを報告している<sup>15)</sup>。実験動物を用いた研究から、ビタミンDサプリメントは、損傷した骨格筋の再生や発揮張力の回復を早めることが報告されている。そのため、ビタミンDは骨格筋細胞の損傷抑制や、回復促進作用も有する可能性が考えられる<sup>16)</sup>。

ビタミンDをサプリメントとして摂取させた研究では、筋機能の向上、垂直跳びや10 m走の成績が向上したことが報告されている<sup>17),18)</sup>。一方、若年者と高齢者に16週間のビタミンDサプリメント摂取(48 $\mu$ g/日)と12週間のレジスタンストレーニングを行わせた実験では、若年者および高齢者ともにレジスタンストレーニングによる筋力・筋量の増加がみとめられたものの、ビタミンDサプリメント摂取は加算的な効果を示さなかったことを報告している<sup>19)</sup>。これらの実験結果の違いは、実験被験者の血中ビタミンD濃度の違いである可能性が高い。すなわち、血中ビタミンD濃度が低い被験者にサプリメントとしてビタミンDを摂取させた場合には、筋力の向上をはじめとする筋機能の向上が認められた可能性が考えられる<sup>20)</sup>。血中ビタミンD濃度は季節変動が大きく、食事からのビタミンD摂取量だけでなく、日光による皮膚での合成量にも影響を受ける。23報の論文を検証したメタ解析では、2,313人のアスリートの内56%がビタミンD不足であることが示されている<sup>21)</sup>。そのため、運動選手においては、筋量や筋力、筋損傷からの回復といった観点からも生体内のビタミンD濃度を、一年を通して高く維持することが必要であると考えられる。

### Ⅳ 栄養評価の客観的指標—水溶性ビタミンを例に一

水溶性ビタミンの中でもビタミンB群に属するビタミンは、エネルギー代謝に関わる酵素反応において補酵素として働くことが知られている。スポーツ選手は激しいトレーニングや食事制限などで栄養素の摂取量の変動が一般人よりも大きいと考えられる。そのため、水溶性ビタミンの栄養状態を客観的な指標を用いて評価する必要がある。

栄養状態を調べるために食事調査が行われるが、食事調査のゴールドスタンダードは自記式の秤量記録法である。しかしながら、この方法は、調査対象側と評価側両者の負担が大きいかかわらず、信頼性の低いデータが得られるケースがある。また、大人数を対象に調査を行う場合には、食事摂取頻度調査法が用いられるが、どの手法を用いても、過大評価、過小評価はどうしても起こってしまう。アスリートにとっての食事とは、激しいトレーニングから解放されリラックスできる瞬間でもある。他方で、次のトレーニング

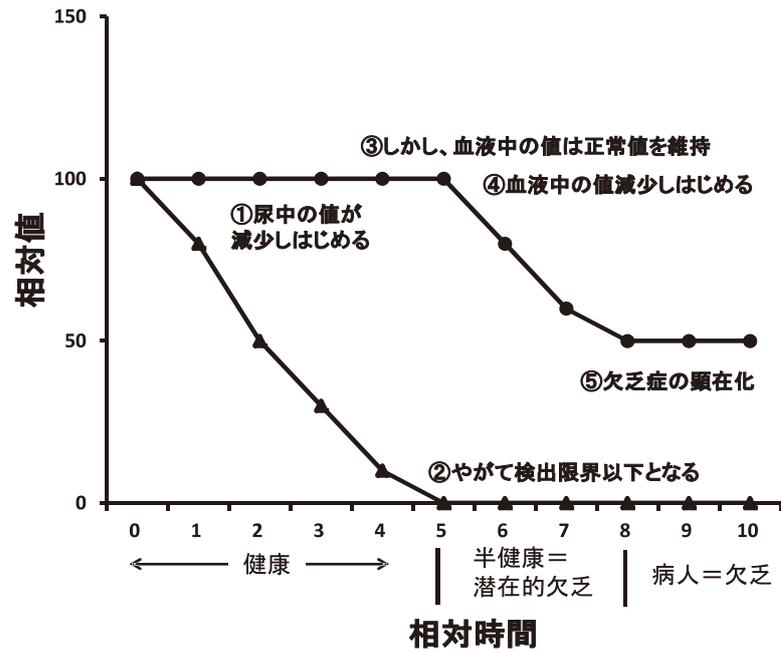


図2 水溶性ビタミン欠乏食投与後の血中ビタミン濃度および尿中水溶性ビタミン排泄量との関係の概念図

●、血中水溶性ビタミン濃度；▲、尿中水溶性ビタミン量  
文献 22 より改編

に向けての準備期間でもある。そのため、自身のトレーニング内容や体調を考慮して必要量の栄養素を摂取したつもりでも、実際に必要な栄養素を摂取できていなければ、食事の主要な目的を達成できていないとも言える。さらに、栄養素摂取量の計算は、食品成分表を基に計算が行われるが、同じ食材を摂取したとしても、季節、保存方法、調理方法、さらには摂取するヒトの状態によって体内に入ってくる栄養素量は異なる。したがって、どれだけの栄養素を摂取したかを食事調査から正確に判断することは難しいと考えられる。

摂取した水溶性ビタミンは、肝臓および血液中ビタミン濃度が飽和状態に達すると、尿中に多量に排泄される。そのため、尿中に多量の水溶性ビタミンが排泄されるということは、生体内の水溶性ビタミンが飽和している(=足りている)ことを意味している。この状態以降は、水溶性ビタミンの摂取量の増大に伴い尿中ビタミン濃度も直線的に増加する。一方、食事から摂取するビタミン量が不足している場合は、尿中排泄量が即座に低下するものの、血液中および肝臓中のビタミン濃度は一定期間維持される。このことから、尿中の水溶性ビタミン排泄量は摂取したビタミンの量に鋭敏に反応することがわかる。図2は上述した内容を概念図として示している<sup>22)</sup>。図中の①から②の間に栄養・食事指導を行うことで水溶性ビタミン不足の悪影

響を防ぐことができると考えられる。

尿を用いた水溶性ビタミンの栄養状態の把握の最大の利点は、非侵襲的な手法であることと、生体情報に基づいた栄養評価を行うことができることである。採尿は非侵襲的かつ簡単に誰にでも行うことができる。さらに、生体情報に基づいた栄養・食事指導には説得力があり、食行動の変容につながりやすいと考えられる。そのため、栄養状態を鋭敏にかつ素早く評価することができる尿中ビタミン濃度の測定は、スポーツ栄養学分野、とくに運動選手への食事・栄養指導での有効なツールになるかもしれない。

## V おわりに

スポーツ栄養に関する研究に限らず、研究の結果が一致しないことは多くある。その中でも様々な手法や角度からの研究が行われ、一致した見解が生まれてくる。また、測定技術の進歩により、採血をしなくても血糖値を測定することが可能な分析機器が開発されている。それほど遠くない将来、非常に安価に、一滴の尿や血液(髪の毛一本かもしれない)を用いることですべての栄養状態を素早く調べることができるようになるかもしれない。そうすると、これまでの煩雑な食事調査は必要ではなくなり、ほぼリアルタイムで生体内の栄養素の充足状態を把握することができるようになる。

なる。その際に重要になるのは、科学的根拠と客観的な指標に基づいた栄養・食事指導を行えるスポーツ栄養士の存在である。

## 利益相反

本研究内容に関して利益相反は存在しない。

### 文献

- 1) Bucci, L.R.: Nutrients as ergogenic aids for sports and exercise, p193 (1993) , CRC Press, Florida
- 2) Sen, C.K.: Oxidants and antioxidants in exercise. *J. Appl. Physiol.*, 79, 675-686 (1995)
- 3) Thannickal, V.J., Fanburg, B.L.: Reactive oxygen species in cell signaling. *Am. J. Physiol. Lung. Cell. Mol. Physiol.*, 279, L1005-L1028 (2000)
- 4) Allen, R.G., Tresini, M.: Oxidative stress and gene regulation. *Free. Radic. Biol. Med.*, 28, 463-499 (2000)
- 5) Gomez-Cabrera, M.C., Domenech, E., Romagnoli, M., et al.: Oral administration of vitamin C decreases muscle mitochondrial biogenesis and hampers training-induced adaptations in endurance performance. *Am. J. Clin. Nutr.*, 87, 142-149 (2008)
- 6) Higashida, K., Kim, S.H., Higuchi, M., et al.: Normal adaptations to exercise despite protection against oxidative stress. *Am. J. Physiol., Endocrinol. Metab.*, 301 : E779-E784 (2011)
- 7) Yfanti, C., Akerstrom, T., Nielsen, S., et al.: Antioxidant supplementation does not alter endurance training adaptation. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 42, 1388-1395 (2010)
- 8) Wadley, G.D., McConell, G.K.: High-dose antioxidant vitamin C supplementation does not prevent acute exercise-induced increases in markers of skeletal muscle mitochondrial biogenesis in rats. *J. Appl. Physiol.*, 108, 1719-1726 (2010)
- 9) Dolinsky, V.W., Jones, K.E., Sidhu, R.S., et al.: Improvements in skeletal muscle strength and cardiac function induced by resveratrol contribute to enhanced exercise performance in rats. *J. Physiol.*, 590, 2783-2799 (2012)
- 10) Davis, J.M., Murphy, E.A., Carmichael, M.D., et al.: Quercetin increases brain and muscle mitochondrial biogenesis and exercise tolerance. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 296, R1071-R1077 (2009)
- 11) Nieman, D.C., Williams, A.S., Shanely, R.A., et al.: Quercetin's influence on exercise performance and muscle mitochondrial biogenesis. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 42, 338-345 (2010)
- 12) Pojednic, R.M., Ceglia, L.: The emerging biomolecular role of vitamin D in skeletal muscle. *Exerc. Sport. Sci. Rev.*, 42, 76-81 (2014)
- 13) Artaza, J.N., Mehrotra, R., Norris, K.C.: Vitamin D and the cardiovascular system. *Clin. J. Am. Soc. Nephrol.*, 9, 1515-1522 (2009)
- 14) Moran, D.S., McClung, J.P., Kohen, T., et al.: Vitamin d and physical performance. *Sports. Med.*, 43, 601-611 (2013)
- 15) Barker, T., Scheneider, E.D., Dixon, B.M., et al.: Supplemental vitamin D enhances the recovery in peak isometric force shortly after intense exercise. *Nutr. Metab. (Lond)* ., 10, 69 (2013)
- 16) Stratos, L., Herlyn, P., Rotter, R., et al.: Vitamin D increases cellular turnover and functionally restores the skeletal muscle after crush injury in rats. *Am. J. Pathol.*, 182, 895-904 (2013)
- 17) Ceglia, L., Niramitmahapanya, S., da Silva Morais, M., et al.: A randomized study on the effect of vitamin D<sub>3</sub> supplementation on skeletal muscle morphology and vitamin D receptor concentration in older women. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 298 : E1927-E1935 (2013)
- 18) Close, G.L., Russell, J., Cobley, J.N., et al.: Assessment of vitamin D concentration in non-supplemented professional athletes and healthy adults during the winter months in the UK : implications for skeletal muscle function. *J. Sports. Sci.*, 31 : 344-353 (2013)
- 19) Agergaard, J., Trostrup, J., Uth, J., et al.: Does vitamin-D intake during resistance training improve the skeletal muscle hypertrophic and strength response in young and elderly men? - a randomized controlled trial. *Nutr. Metab. (Lond)* ., 12, 32 (2015)
- 20) Beaudart, C., Buckinx, F., Rabenda, V., et al.: The effects of vitamin D on skeletal muscle strength, muscle mass, and muscle power : a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 99, 4336-4345. (2014)
- 21) Farrokhyar, F., Tabasinejad, R., Dao, D., et al.: Prevalence of vitamin D inadequacy in athletes : a systematic-review and meta-analysis. *Sports. Med.*, 45, 365-378 (2015)
- 22) 柴田克己. : ヒト尿を用いる新しいビタミン栄養状態の創成. 日本栄養・食糧学会誌, 66, 3-8 (2013)

Review

# Recent Evidence of Vitamins and Exercise

Kazuhiko HIGASHIDA

The University of Shiga Prefecture, School of Human Cultures, Department of Nutrition

---

## ABSTRACT

In this review, recent developments in research on vitamins in sports nutrition are described. Antioxidants, including vitamin C, are widely used by athletes and the general population. Recent research has reported the importance of oxidative stress induced by exercise in muscle adaptation to exercise training. Vitamin D plays a critical role in bone metabolism, but growing evidence indicates that vitamin D is also involved in muscle development. Furthermore, the accessibility of urinary measurements of water-soluble vitamins for assessing vitamin intakes is discussed.

**Keywords:** Vitamins, Exercise, Antioxidant, Urine