

特集 国際オリンピック委員会のサプリメント合意声明の紹介

直接的にパフォーマンスを向上させるサプリメントの科学的根拠
Evidence of supplements to improve performance directly

近藤衣美¹⁾
Emi Kondo¹⁾

キーワード：サプリメント，ハイパフォーマンススポーツ，カフェイン，クレアチン，硝酸塩

I. はじめに

最高のパフォーマンスを発揮するための準備には様々な要素があり、期分けを考慮したトレーニング、体調管理のほか、適切な栄養摂取戦略が挙げられる。適切な栄養摂取戦略とは、科学的根拠に基づき、サプリメントを含む全食品の中から、いつ、何を、どのように摂取するかを具体的に考慮した計画である。近年、必要な栄養素を食事から十分に摂取し、科学的トレーニングを十分に行い、競技の技術レベルも上級に達したアスリートにおいて、さらに競技力をわずかでも向上させるために効果があるといわれているサプリメントが多く販売されている。しかし、その中には科学的に効果があるとは言えない成分も多く存在している。パフォーマンス向上をうたうサプリメントの中には、パフォーマンスを低下させたり、健康に悪影響を及ぼしたりするものもあり、さらにドーピング禁止物質で汚染されている場合もある。そのため、アスリートとチームスタッフ、保護者や友人などアスリートを取り巻く人々は、そのサプリメントの有効性についての科学的根拠が確実に得られており、さらに安全で合法的な製品であるかを見極める必要がある。

本稿では、“Evidence-based supplements for the enhancement of athletic performance⁵⁹⁾”を基に、直接的にパフォーマンスを向上させるサプリメントの競技種目適性や運動の種別、生体内でのメカニズム、典型的な摂取計画について解説する。

**II. 科学的根拠が実証されている
パフォーマンスサプリメント**

1. カフェイン

カフェインはコーヒー、紅茶、緑茶、マテ茶などの茶葉、カカオ種子（チョコレートなど）、ガラナ種子（ガラナ入りドリンクなど）などの一般的な食品にも含まれている刺激物である。アデノシン受容体拮抗作用、エンドルフィン分泌の増加、神経筋機能の強化、警戒心や注意力の向上、運動中の疲労感の軽減などの生理作用があると考えられている。

カフェインのパフォーマンス向上効果の有効性に関する研究には長い歴史があり、カフェイン摂取はトレッドミルランニングやレジスタンストレーニングでの運動時の疲労困憊までの時間を延長することが知られている²⁴⁾。さらに、持久性運動、短時間高強度運動、超最大運動、反復スプリ

¹⁾ 国立スポーツ科学センター

¹⁾ Japan Institute of Sports Sciences

E-mail : emi.kondo@jpnpsport.go.jp

ント運動など、様々な種類の運動能力に対する有効性が認められている（表1・表2）。これらの研究結果を要約すると、持久性運動や短時間高強度運動、超最大運動、反復スプリント運動の前または運動中に低用量から中用量のカフェインを摂取することは、パフォーマンス向上効果があると考えられる。しかし、パフォーマンス向上効果を狙ってカフェインを使用する場合は、副作用を最小限に抑えて効果を得るために、練習中またはあまり重要でない競技のときに試す必要がある。

2. クレアチン

クレアチンは、肉や魚に多く含まれており、体内ではアルギニン、グリシン、メチオニンから合成される非たんぱく性窒素化合物である^{30),56)}。クレアチンは平均的に1日あたり1g摂取され、体内で1-2g合成され、約2gが尿中から排泄されている。体内のクレアチンの90-95%は筋に貯蔵され、その2/3がクレアチンリン酸(PCr)として存在している。PCrは高強度運動の筋力発揮の際に、クレアチンキナーゼが触媒となり、アデノシン二リン酸(ADP)からアデノシン三リン酸(ATP)を迅速に再合成するために使用される^{56),61)}。

クレアチンサプリメントは肉や魚からの摂取量を補うことを目的に、クレアチン-水和物(creatine monohydrate; CM)が一般に広く使用されている。科学的に立証された蓄積(ローディング)および維持プロトコルに従ってクレアチンを摂取すると、筋内クレアチン貯蔵量を最大30%増加させることができ³²⁾、その応答の大きさは濃度に反比例する⁷⁹⁾。クレアチン貯蔵量の増加はPCrの再合成速度を速め、特に反復運動能力を高めることにより、短時間高強度運動のパフォーマンスを向上させる^{16),41)}。

CM摂取に関する多くのレビューは、1回の高強度運動で+1-5%、反復高強度運動で+5-15%のパフォーマンスを向上させることを示している^{11),47)}。ここでいう高強度運動は、150秒未満の運動を指しているが、最も効果が認められているのは30秒未満の全力運動である。結果的に、ク

レアチンローディングはレジスタンストレーニングやインターバルトレーニングプログラムの長期的な効果として除脂肪量や筋力、パワーの増加を大きくする^{61),79)}だけでなく、急性の効果として高強度運動が繰り返されるスポーツ(チームスポーツなど)のパフォーマンスを高める。さらに、クレアチン補給はたんぱく質合成、グリコーゲン貯蔵、及び体温調節の促進などの調節効果を伴い細胞シグナル伝達や代謝、水分貯留の変化を起こすことが報告されている^{21),42)}。そのため、持久系競技のアスリートにとって、クレアチンサプリメントの利点はあまり認識されていない可能性がある。しかし実際には、クレアチン(20g/日、5日間+3g/日、9日間)と糖質(6-12g/kg体重/日)の組み合わせにより、長時間運動(3時間以上)の自転車タイムトライアル(TT)後半に反復高強度スプリントのパワー出力が増加することが最近の研究で認められている⁷⁶⁾。CM摂取は「ローディング期」後に体重が1-2kg増加することがよく報告されており¹⁶⁾、それは持久系競技のほか、体重に敏感なスポーツのパフォーマンスに対して不利に働くため、CMを使用する際には考慮する必要がある。

効果的なCM補給戦略に関する最近のメタナリシスでは、CM研究の80%が 20.9 ± 4.5 g/日(1日あたり5gを4等分して摂取)を5-7日間摂取する「ローディング期」を用いていたことが報告された⁴⁷⁾。その後、通常は「ローディング期」に続いて1日あたり3-5gのCMを1日に1回摂取する「メンテナンス期」がある。このようなプロトコルは、主に男性の筋クレアチンローディングを調査する初期の研究で確立された³⁵⁾。興味深いことに、CMとたんぱく質/糖質の混合食(50gのたんぱく質と糖質)との同時摂取は、インスリン媒介効果によって筋のクレアチンの取り込みを促進するようであり⁶⁹⁾、クレアチンは食事と同時に摂取するのが最適であることを示唆している。適切なローディングプロトコルに従う場合、CMの長期使用(最大で4年)による健康への悪影響は報告されていない⁶⁵⁾。いくつかの報告では、

表1 カフェインが持久系パフォーマンスに及ぼす影響を調べた代表的な研究結果

著者	年	研究の種類	対象	運動の種類	摂取量	摂取タイミング	結果の概要
Ganio et al. ²⁷⁾	2009	システマティックレビュー	33報の研究 (男女)	長距離TT (自転車、ボート、ランニング、クロスカントリースキー、競泳； 運動時間 5-150分)	無水カフェイン 3-6mg/kg体重	運動前または 運動中	3.2±4.3%↑
Talanian & Spriet ²⁸⁾	2016	無作為比較試験	自転車選手 15名 男性 11名 女性 4名	自転車持久性運動 (120分規定負荷運動 +TT[26-28分])	カフェインカプセル、 プラセボ (糖電解質飲料) 100mg (1.5mg/kg体重) または 200mg (2.9mg/kg体重)	運動開始から 80分目	1.5mg/kg体重 3.8%↑ vs. プラセボ 2.9mg/kg体重 7.3%↑ vs. プラセボ
Bruce et al. ¹⁴⁾	2000	無作為比較試験	十分な訓練を積んだ 男性ボート選手 8名	ボート 2000mTT	6mg/kg体重または9mg/kg体重のカ フェインカプセル、 プラセボ (グルコース 500mg)	運動 45分前	6mg/kg体重 1.3%↑ vs. プラセボ 9mg/kg体重 1.0%↑ vs. プラセボ
Gonçalves et al. ²⁸⁾	2017	無作為比較試験	娯楽として練習して いる男性自転車選手 40名 習慣的なカフェイン 摂取量 低用量：58mg/日 中用量：143mg/日 高用量：351mg/日	自転車TT	カフェイン群：6mg/kg体重のカ フェインカプセル、 プラセボ群：デキストロース コントロール群：カプセルのみ	運動 60分前	カフェイン群 2.5%↑ vs. プラセボ群 カフェイン群 +3.3%↑ vs. コントロール群 習慣的なカフェイン 摂取量による差はない
Paton et al. ⁵⁷⁾	2015	無作為比較試験	自転車選手 20名 男性 10名 女性 10名	30km 自転車TT	3-4mg/kg体重のカフェインを含む チューインガム プラセボ (ノンカフェインチュウ インガム)	運動中 (10km地点)	最後の10kmの 平均パワー 3.8%↑ vs. プラセボ スプリントパワー 3.9%↑ vs. プラセボ

TT: タイムトライアル、↑: 向上、↓: 低下

表2 カフェインが短時間高強度運動、超最大努力運動、反復スプリントパフォーマン스에及ぼす影響を調べた代表的な研究結果

著者	年	研究の種類	対象	運動の種類	摂取量	摂取タイミング	結果の概要
Astorino & Robertson ¹⁾	2010	システムティックレビュー	28報の研究 (男性、女性)	短時間高強度運動 (ウイングートテスト、1RM、30m スプリントなど)	2-6mg/kg 体重 または 100-800mg	—	65%の研究で 1-20%のパフォーマンス↑
Wiles et al. ⁸³⁾	2006	無作為比較試験	十分なトレーニングを積んだ男性自転車選手 8名	1km 自転車 TT	カフェイン群: カフェインカプセル (5mg/kg 体重) プラセボ群: レモン果汁+水 コントロール群: 水	運動 60 分前	8名中7名の パフォーマンス↑ [TT タイム] 3.1%↑ vs. プラセボ群 [平均パワー] 3.6%↑ vs. プラセボ群 [ピークパワー] 8.8%↑ vs. プラセボ群
Duncan et al. ²⁵⁾	2014	無作為比較試験	筋力トレーニングをしている男性 10名	等速性膝伸展運動 (30°/秒、150°/秒、300°/秒)	カフェイン群: 6mg/kg 体重 カフェインカプセル プラセボ群: 甘みのある水	運動 60 分前	[筋トルク発揮] カフェイン群 > プラセボ群 [筋活動] カフェイン群 > プラセボ群
Bellar et al. ⁷⁾	2012	無作為比較試験	砲丸投げの大学生選手 男性 4名、 女性 5名	砲丸投げの距離、5分間の平均反応時間	カフェイン群: 100mg の カフェインを含むガム プラセボ群: カフェインを 含まないガム	運動 5 分前	[砲丸投げの距離 (1 投目)] カフェイン群 6.1%↑ vs. プラセボ群 [平均反応時間] カフェイン群 < プラセボ群
Schneiker et al. ⁶⁶⁾	2006	無作為比較試験	アマチュアレベルのチームスポーツの男性選手 10名	間欠的スプリントテスト (18分×2セット)	カフェイン群: 6mg/kg 体重 カフェインカプセル プラセボ群: グルコース	運動 60 分前	[仕事量] カフェイン群 > プラセボ群 [ピークパワー] カフェイン群 > プラセボ群
Wellington et al. ⁸¹⁾	2017	無作為比較試験	セミプロレベルのラグビー選手 11名	反復高強度運動 (20m スプリント、タックル動作)	カフェイン群: カフェインタブレット (300mg) プラセボ群: プラセボタブレット (150μg ビオチン)	運動 60 分前	[スプリントタイム] 8名↑ (0.06-1.20秒) 3名↓ (0.36秒-1.04秒) vs. プラセボ群 [平均タイム] 1%↑ vs. プラセボ群

TT: タイムトライアル、↑: 向上、↓: 低下

CM 補充は抗炎症作用があり、運動誘発性の酸化ストレスを軽減すると提示されている²²⁾。

以上のことから、現在認められている CM 補給プロトコルに従ったときに予測される筋クレアチン貯蔵量の増加は、除脂肪量、最大パワー/筋力及び1回または繰り返し行う短時間高強度運動のパフォーマンスを向上させる可能性がある。

3. 硝酸塩

硝酸塩 (NO_3^-) は、長時間最大運動中の酸素摂取量 (VO_2) 動態を改善することを目的に普及したサプリメントである³⁾。 NO_3^- を摂取すると最初に口腔や消化器内の細菌による還元により、 NO_3^- -亜硝酸塩-一酸化窒素 (NO) 経路を介して NO の生物活性の促進が起こる²³⁾。 NO は筋力発揮時の ATP コスト削減、ミトコンドリア呼吸の効率向上、筋肉への血流増加、及び VO_2 の不均一性に対する血流減少などのパフォーマンス改善につながるメカニズムを基に、骨格筋機能の調節において重要な役割を果たすと考えられている³⁾。

NO_3^- 補給後の最大下運動の VO_2 の約 5% の減少と筋機能の向上が、疲労困憊に至る時間の大幅な改善 (4-25%)³⁶⁾、スポーツ特有の TT のわずかな改善 (1-3%)⁴⁹⁾ に関連していたという報告がある。これまでに持続時間が 40 分を超える運動中の有益な効果が認められた研究は限られているが、これは運動強度が比較的低いことと、 NO 産生のための亜硝酸塩運搬経路の役割が小さいことによるものである³⁶⁾。最近、 NO_3^- 補給はタイプ II 筋線維の機能を促進することが見出され⁴⁾、12-40 分の高強度運動、間欠的運動及びチームスポーツのパフォーマンスを改善する (3-5%) ことが認められている^{75), 84)}。しかし、短時間 (12 分未満) の運動に対するメリットは不明であり、いくつかの研究では反復スプリントパフォーマンスに対する NO_3^- 摂取の急性的な影響はないこと⁶³⁾ が示されている一方で、5 日間の継続摂取は 1 回のスプリント能力 (1.2%) や反復スプリント能力 (3.9%) の有意な改善が認められてい

る⁷⁴⁾。これらの見解の違いは、急性的に供給される NO_3^- の投与量に関連している可能性がある。実際に、 NO_3^- の高容量摂取は 2000m のボートパフォーマンスに大きな影響を及ぼしたことが報告されている³⁴⁾。アスリートのトレーニング状態もまたサプリメントの有効性に影響を及ぼし、レベルの高いアスリートで効果を得るために必要とされる NO_3^- の量はより多くなる可能性がある³⁶⁾。しかし、すべての研究結果が有効性を示している訳ではない^{10), 55), 60)} ため、よくトレーニングを積んだエリートアスリートの NO_3^- 補給の有効性の検証にはさらなる研究が必要である。最後に、各スプリントインターバルトレーニングセッションの 2.5 時間前に 8mmol (または 500mg) の NO_3^- を摂取することを 3 週間継続すると最大仕事率の改善 (8.7% vs プラセボ 4.7%) がみられたという報告があり⁵²⁾、慢性的な NO_3^- サプリメント摂取、特に主要なセッション前の摂取はトレーニングによる適応を促進する可能性がある。

青菜や根菜 (すなわち、ほうれん草、ハナダイコン (ロケット)、セロリ、ビートルートなど) は食事からの NO_3^- の主要な供給源である³⁶⁾。しかし、最近行われた 76 報の NO_3^- 研究のメタアナリシスでは、運動介入時に使用された NO_3^- 源の大部分 (76%) がビートルートジュースであったことが明らかになった⁴⁹⁾。最近の研究では、特によくトレーニングを積んだアスリートにおいて、5-9mmol (310-560mg) の NO_3^- 摂取による急性 (2-3 時間以内) のパフォーマンス向上効果^{34), 60)} や、同量の NO_3^- の反復使用 (3 日以上) による累積的な効果がある可能性があることが報告されている^{74), 75)}。さらに、少なくとも 15 日間継続して摂取すると、パフォーマンスへの有効性は少なくともこの期間中維持されるようである⁷⁸⁾。

4. ベータアラニン

ベータアラニンは内因性の細胞内 (筋) 緩衝液であるカルノシンの律速前駆体である。カルノシンは運動中の活動筋内のプロトンの蓄積に対する即時防御物質の一つである⁴⁶⁾。ベータアラニンを

3.2-6.4g (～ 65mg/kg 体重)、最低 2-4 週間毎日摂取することは、骨格筋カルノシン含量を安静レベルより 65% 以内の範囲で増加させ、30 秒-10 分で終了する最大運動に対する耐性を改善する⁶⁴⁾。ベータアラニン摂取のわずかではあるが意味のある効果(約 2-3%)は、連続的及び間欠的なパフォーマンステストの両方で示されている。しかし、間欠的スポーツにおける実用性を強調したスポーツ特有の調査は明らかに不足している^{33), 64)}。サプリメント摂取期間を 10-12 週まで延ばすと、筋カルノシン含量はさらに増加する可能性がある(安静時レベルより～ 80% を超える)が、筋の変化とパフォーマンスに及ぼす効果の大きさとの関連性はまだ立証されていない⁶⁴⁾。すでに緩衝能の高まっている人ではカルノシンの筋内 pH 調節の役割は減少しているため、十分にトレーニングを積んだアスリートではトレーニングされていない人ほどベータアラニン摂取が有効ではない可能性がある⁸⁾。しかし、これまで十分にトレーニングを積んだアスリートで観察された小さなパフォーマンスの変化 (0.2-1.3%)^{2), 20)} は、競技の場面において有意義であるかもしれない。

ベータアラニンの副作用⁶⁴⁾ (かゆみや皮膚の発疹から一過性の感覚異常が起こる可能性がある⁷⁰⁾) の可能性を最小限に抑えるために、1 日を通じて分割して摂取する (3-4 時間ごとに 0.8-1.6g) 方法がある。しかし、ベータアラニン摂取後の筋カルノシン合成における個人差が報告されており、(a)個人の摂取前のカルノシンレベル、(b)個人のトレーニング状況、及び(c)速筋線維の割合と逆相関があると仮定されている⁵³⁾。この個人差を説明するにあたり、Stellingwerff et al.⁷⁰⁾ は筋カルノシンを約 50% 増加させるために、毎日 1.6-6.4g/日、合計約 230g のベータアラニンを摂取すべきであることを提案している。いずれにしても、ベータアラニン摂取をする際には、可能な限り個別のアプローチを検討するべきである。

以上を要約すると、ベータアラニン 3.2-6.4 g (～ 65mg/kg 体重/日) を分割して最低 2-4 週間、最大 12 週間摂取することで、30 秒から 10 分の高

強度運動能力が高まると考えられる。

5. 重炭酸ナトリウム (重曹)

重炭酸ナトリウム (NaHCO_3) の摂取が細胞外(血液)緩衝能として高強度運動パフォーマンスを向上させることが示されている⁶⁷⁾ が、その作用メカニズムは複雑である。細胞内と細胞外の pH の維持に重要な役割を果たしているが、 NaHCO_3 は筋鞘に浸透することができないため、細胞外 pH と重炭酸イオン (HCO_3^-) 濃度の両方を上げることによって間接的に細胞内の pH 調節を助けている^{37), 46)}。これは、細胞内と細胞外との間の pH 勾配を効果的に増加させ、高強度運動中の筋からの H^+ 及び La^- の流出を促進する³⁷⁾。

NaHCO_3 摂取はパフォーマンスへの個人内変動に関連しているが、その効果は一般的に 60 秒以内に終了する短時間高強度スプリント運動 (約 2% の平均パフォーマンスの向上) でみられ、10 分を超える運動ではその効果は減弱する¹⁹⁾。しかし、反復回数の多いスプリント運動でその効果は認められている (8% 以上の改善)⁴⁶⁾。効果的な NaHCO_3 摂取プロトコルの典型例は 0.2-0.4g/kg 体重であり、摂取 60-150 分後に HCO_3^- 濃度がピークになる^{19), 68)}。しかし、一般的な副作用の一つに胃腸の不調があり、それはパフォーマンスの向上を妨げ、個々の反応の大ききなばらつきを説明するかもしれない¹⁹⁾。胃腸の不調を最小限に抑えるために、 NaHCO_3 と糖質を豊富に含む食事 (1.5g/kg 体重) を少量、同時に摂取する¹⁹⁾、1 回量を 30-60 分間にわたって少量ずつに分けて摂取する⁴⁵⁾、試合前に 2-4 日続けて 1 日あたり 3-4 回、少量ずつ「連続的に」摂取する¹⁷⁾ などの工夫をすると良いだろう。さらに、胃腸の不調が起こる確率の低い方法として、クエン酸ナトリウムを NaHCO_3 の代替品として使用することも提案されている⁶²⁾。

Ⅲ. 効果が不確かなパフォーマンスサプリメント

以下のサプリメントはアスリートに使用されている。しかし、運動能力を高める可能性がある

いう科学的根拠は明確にされていない。

1. クエン酸ナトリウム

クエン酸ナトリウムは NaHCO_3 と同様に、細胞外の pH を上げ、血液と活動筋との勾配を増加させることにより血液緩衝剤として働く。これはクエン酸ナトリウムがイオンに解離することによって達成され、電気平衡が回復すると H^+ が減少し HCO_3^- が増加する⁶²⁾。

初期の研究では 60 秒の最大スプリントテストの 90 分前に 0.1-0.5g/kg 体重のクエン酸ナトリウムを摂取させた。そのとき見られた濃度反応として、パフォーマンス向上の効果を得るためには最低でも 0.3g/kg 体重の摂取が必要であった⁵¹⁾。その後、0.5g/kg 体重を摂取したときに、2-4 分間の運動の全仕事量が 12% 増加したことが報告された⁵⁰⁾。しかし、さらに高容量 (0.7-0.9g/kg 体重) では、さらにアルカローシス状態を増強することはなく、胃腸の不調が増加した⁷⁷⁾。最近の研究では、クエン酸ナトリウム摂取後 180-240 分に血液の pH がピークに達することが示唆されていることから⁷⁷⁾、少なくとも運動 3 時間前に摂取すべきであると考えられている。

クエン酸ナトリウム摂取がパフォーマンスに有効であることを示す研究が少ないにもかかわらず、パフォーマンス向上効果があるかのように扱っている情報には注意が必要である。最近のメタアナリシスでは、このサプリメントを使用するメリット ($0.0 \pm 1.3\%$ の改善) は取るに足らないことが示唆されている¹⁹⁾。 NaHCO_3 とクエン酸による副作用とクエン酸の限定的な有効性を考慮すると、アスリートやサポートスタッフは競技会で個別の特別なプロトコルで摂取する前に、これらの血液緩衝作用をもつ物質を慎重に試用することが推奨される。

2. リン酸

運動パフォーマンスに対するリン酸摂取の潜在的な効果を裏付ける多数の仮説が提示されている¹⁵⁾。これらの効果が得られるメカニズムに

は、ATP 及びクレアチンリン酸の再合成速度の向上⁴⁰⁾、素早い嫌気性解糖を支えるための緩衝能の改善⁴⁰⁾、心筋効率の向上につながる心筋収縮性の改善⁴³⁾、赤血球 2,3 ジホスホグリセリン酸 (2,3DPG) 濃度の増加によってヘモグロビンに対する酸素の親和性が低下し末梢組織への酸素供給が容易になること⁹⁾が挙げられる。

リン酸塩 (リン酸ナトリウム、リン酸カルシウム、リン酸カリウム) 摂取とパフォーマンスに関する研究では、全体的にみて、その科学的根拠は曖昧である。リン酸は最大酸素摂取量 (VO_2max)^{18), 44)}、嫌気性閾値⁴⁴⁾ 及び自転車 TT²⁶⁾ のパフォーマンスを向上させることが報告されている。しかし、反復スプリントの場合、効果の大きさは様々であり不明確である³⁸⁾。リン酸摂取 (単独、または他の緩衝剤と組み合わせて) がパフォーマンスに影響を及ぼさないことを示唆する報告もあれば、同じ生理学的指標やパフォーマンス測定に対して効果があったとする研究も存在する^{13), 29), 39), 82)}。それは、使用された補給プロトコル (用量、タイプ、運動プロトコルなどの違い) ならびにリン酸に対する個々の反応の違いが要因であるだろう⁵⁸⁾。

一般的なリン酸摂取法では、3-6 日の期間にわたって 1 日当たり除脂肪量 1kg あたり ~ 50mg (~ 3-4g) を 1 回あるいは複数回に分けて摂取する。胃腸障害を伴うことがよくある^{18), 82)} が、300ml の糖質が豊富な飲料との同時摂取により改善される¹²⁾。しかし、サプリメントで摂取したリン酸が筋内に蓄積することを示唆する科学的根拠が存在しないため、リン酸摂取の有効性に関する科学的根拠は不明瞭なままである。したがって、パフォーマンスを向上させるためにこのサプリメントを使用することには、まだ疑問の余地があるだろう。その真の効果を確かめるためにさらなる研究が必要である。競技会でこのサプリメントを使用する前に徹底的に試行し、個々の反応を確認すべきである。

3. カルニチン

カルニチンは主に骨格筋内に存在する化合物であり、基質利用においていくつかの重要な役割を果たす。カルニチンは、 β 酸化の場であるミトコンドリアへの長鎖脂肪酸の移動を助けるだけでなく、過剰に産生されたアセチル CoA を調節し、クエン酸サイクルによる糖質代謝を助けている⁷¹⁾。L-カルニチンの補給による筋カルニチン蓄積量の増加は、低強度運動での脂質酸化量の増加、高強度運動での糖質酸化の促進と乳酸蓄積量の減少を促進し、持久性運動の疲労の発生を遅らせる。

しかし、L-カルニチン補給に関する研究では、一致した見解は得られていない。Morconi et al.⁴⁸⁾は、多段階トレッドミルランニング中に VO_{2max} が6%増加したと報告しているが、6時間ごとに1gのL-カルニチンを2週間摂取した場合、 VO_2 に変化はなく、最大下運動(65% VO_{2max})の基質酸化も変化しなかった。さらに、Greig et al.³¹⁾は、2g/日を分割して2週間または4週間投与した場合、 VO_{2max} にも基質代謝にも効果は認められなかったと報告している。これらの研究でパフォーマンス効果がみられなかった要因は、筋内のカルニチンレベルがこれらの標準的な補給プロトコル(4g/日、14日間)⁶⁾では増加しないことが関与していると考えられている。最近では、Novakova et al.⁵⁴⁾が12週間のL-カルニチン摂取(2g/日を分割投与)が、習慣的に肉を摂取している人の血漿カルニチンレベルを12%増加させ、ベジタリアンにおいては30%増加させたことを報告している。しかし、筋カルニチン濃度は食肉摂取群では変化せず、ベジタリアン(開始時の筋カルニチンレベルが10%低い)群で13%増加させただけであった。さらに、筋機能、エネルギー代謝、最大下または最大運動テスト中の VO_2 には影響しなかったことは重要な点である。

多くの研究においてL-カルニチンの経口摂取の有効性がみられないのは、生物学的利用能が低く、筋内カルニチン量が増えないためである可能性が高い。しかし、Stephens et al.⁷²⁾は、長期(100日)

にわたり、カルニチンサプリメントを十分な糖質源と同時摂取する(3g/日のカルニチンと94gの糖質)ことで、インスリン介在性の取り込みの増加が起こり、全身のカルニチン貯蔵量が増加することを報告した(筋カルニチンは10%増加)。そのフォローアップ研究⁸⁰⁾では、継続的な補給(24週間、2gのL-カルニチン+80gの糖質摂取を2回/日)は筋カルニチンを21%増加させ、最大下自転車運動中(50% VO_{2max} 、30分)の筋グリコーゲン利用を55%減少させ、高強度自転車運動中(80% VO_{2max} 、30分)の代謝流量の均衡を改善し、30分のオープン強度のパフォーマンステスト中の仕事量を11%増加させた(無酸素的なATP産生の減少に起因する)。これらの研究が示すようにパフォーマンスに関して利点はあるが、用いられた摂取プロトコルは実用的でなく、個々の健康に及ぼす影響についても明らかとなっていない。したがって、これらのプロトコルを実践するためには、さらなる研究によって有効性と安全性を明確にする必要がある。

IV. おわりに

本稿では、パフォーマンスを高める目的で摂取されている一般的なサプリメントの根拠を要約した。これらの情報を参考にし、アスリート及びサポートスタッフは各アスリートの状況に応じたパフォーマンスサプリメントを選択していただきたい。各アスリートの状況に応じた現実的な方法でサプリメントを摂取したときには反応が弱い場合もあることなどを考慮し、得られる効果を確認したうえで使用を検討すべきである。有効性の欠如や有害な反応が、予想されるパフォーマンス向上効果を上回る可能性もあるため、パフォーマンスサプリメントを実際に試合で導入する前に徹底的に試行するべきであろう。

文献

- 1) Astorino TA, Roberson DW. Efficacy of acute caffeine ingestion for short-term high-intensity exercise performance: a systematic review. J

- Strength Cond Res, 24(1): 257-265, 2010.
- 2) Baguet A, Bourgois J, Vanhee L, Achten E, Derave W. Important role of muscle carnosine in rowing performance. *J Appl Physiol*, 109(4): 1096-1101, 2010.
 - 3) Bailey SJ, Fulford J, Vanhatalo A, Winyard PG, Blackwell JR, DiMenna FJ, Wilkerson DP, Benjamin N, Jones AM. Dietary nitrate supplementation enhances muscle contractile efficiency during knee-extensor exercise in humans. *J Appl Physiol*, 109(1): 135-148, 2010.
 - 4) Bailey SJ, Varnham RL, DiMenna FJ, Breese BC, Wylie LJ, Jones AM. Inorganic nitrate supplementation improves muscle oxygenation, O₂ uptake kinetics, and exercise tolerance at high but not low pedal rates. *J Appl Physiol*, 118(11): 1396-1405, 2015.
 - 5) Bailey SJ, Winyard P, Vanhatalo A, Blackwell JR, DiMenna FJ, Wilkerson DP, Tarr J, Benjamin N, Jones AM. Dietary nitrate supplementation reduces the O₂ cost of low-intensity exercise and enhances tolerance to high-intensity exercise in humans. *J Appl Physiol*, 107(4): 1144-1155, 2009.
 - 6) Barnett C, Costill DL, Vukovich MD, Cole KJ, Goodpaster BH, Trappe SW, Fink WJ. Effect of l-carnitine supplementation on muscle and blood carnitine content and lactate accumulation during high-intensity sprint cycling. *Int J Sport Nutr*, 4(3): 280-288, 1994.
 - 7) Bellar DM, Kamimori G, Judge L, Barkley JE, Ryan EJ, Muller M, Glickman EL. Effects of low-dose caffeine supplementation on early morning performance in the standing shot put throw. *Eur J Sport Sci*, 12(1): 57-61, 2012.
 - 8) Bellinger PM. β -Alanine Supplementation for Athletic Performance: An Update. *J Strength Cond Res*, 28(6): 1751-1770, 2014.
 - 9) Benesch R, Benesch RE. Intracellular organic phosphates as regulators of oxygen release by haemoglobin. *Nature*, 221(5181): 618-622, 1969.
 - 10) Boorsma RK, Whitfield J, Spriet LL. Beetroot juice supplementation does not improve performance of elite 1500-m runners. *Med Sci Sports Exerc*, 46(12): 2326-2334, 2014.
 - 11) Branch JD. Effect of creatine supplementation on body composition and performance: a meta-analysis. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 13(2): 198-226, 2003.
 - 12) Brewer CP, Dawson B, Wallman KE, Guelfi KJ. Effect of repeated sodium phosphate loading on cycling time-trial performance and VO₂peak. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 23(2): 187-194, 2013.
 - 13) Brewer CP, Dawson B, Wallman KE, Guelfi KJ. Effect of sodium phosphate supplementation on cycling time trial performance and VO₂ 1 and 8 days post loading. *J Sports Sci Med*, 13(3): 529-534, 2014.
 - 14) Bruce CR, Anderson ME, Fraser SF, Stepto NK, Klein R, Hopkins WG, Hawley JA. Enhancement of 2000-m rowing performance after caffeine ingestion. *Med Sci Sports Exerc*, 32(11): 1958-1963, 2000.
 - 15) Buck CL, Wallman KE, Dawson B, Guelfi KJ. Sodium phosphate as an ergogenic aid. *Sports Med*, 43(6): 425-435, 2013.
 - 16) Buford TW, Kreider RB, Stout JR, Greenwood M, Campbell B, Spano M, Ziegenfuss T, Lopez H, Landis J, Antonio J. International Society of Sports Nutrition position stand: creatine supplementation and exercise. *J Int Soc Sports Nutr*, 4(1): 6, 2007.
 - 17) Burke LM. Practical considerations for bicarbonate loading and sports performance. *Nestle Nutr Inst Workshop Ser*, 75: 15-26, 2013.
 - 18) Cade R, Conte M, Zauner C, Mars D, Peterson J, Lunne D, Hommen N, Packer D. Effects of phosphate loading on 2,3-diphosphoglycerate and maximal oxygen uptake. *Med Sci Sports Exerc*, 16(3): 263-268, 1984.

- 19) Carr AJ, Hopkins WG, Gore CJ. Effects of acute alkalosis and acidosis on performance: a meta-analysis. *Sports Med*, 41(10): 801-814, 2011.
- 20) Chung W, Shaw G, Anderson ME, Pyne DB, Saunders PU, Bishop DJ, Burke LM. Effect of 10 week beta-alanine supplementation on competition and training performance in elite swimmers. *Nutrients*, 4(10): 1441-1453, 2012.
- 21) Cooper R, Naclerio F, Allgrove J, Jimenez A. Creatine supplementation with specific view to exercise/sports performance: an update. *J Int Soc Sports Nutr*, 9(1): 33, 2012.
- 22) Deminice R, Rosa FT, Franco GS, Jordao AA, de Freitas EC. Effects of creatine supplementation on oxidative stress and inflammatory markers after repeated-sprint exercise in humans. *Nutrition*, 29(9): 1127-1132, 2013.
- 23) Duncan C, Dougall H, Johnston P, Green S, Brogan R, Leifert C, Smith L, Golden M, Benjamin N. Chemical generation of nitric oxide in the mouth from the enterosalivary circulation of dietary nitrate. *Nat Med*, 1(6): 546-551, 1995.
- 24) Duncan MJ, Stanley M, Parkhouse N, Cook K, Smith M. Acute caffeine ingestion enhances strength performance and reduces perceived exertion and muscle pain perception during resistance exercise. *Eur J Sport Sci*, 13(4): 392-399, 2013.
- 25) Duncan MJ, Thake CD, Downs PJ. Effect of caffeine ingestion on torque and muscle activity during resistance exercise in men. *Muscle Nerve*, 50(4): 523-527, 2014.
- 26) Folland JP, Stern R, Brickley G. Sodium phosphate loading improves laboratory cycling time-trial performance in trained cyclists. *J Sci Med Sport*, 11(5): 464-468, 2008.
- 27) Ganio MS, Klau JF, Casa DJ, Armstrong LE, Maresh CM. Effect of caffeine on sport-specific endurance performance: a systematic review. *J Strength Cond Res*, 23(1): 315-324, 2009.
- 28) Gonçalves LdS, Painelli VdS, Yamaguchi G, Oliveira Lfd, Saunders B, Silva RPd, Maciel E, Artioli GG, Roschel H, Gualano B. Dispelling the myth that habitual caffeine consumption influences the performance response to acute caffeine supplementation. *J Appl Physiol*, 123(1): 213-220, 2017.
- 29) Goss F, Robertson R, Riechman S, Zoeller R, Dabayebeh I, Moyna N, Boer N, Peoples J, Metz K. Effect of potassium phosphate supplementation on perceptual and physiological responses to maximal graded exercise. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 11(1): 53-62, 2001.
- 30) Greenhaff PL. The nutritional biochemistry of creatine. *J Nutr Biochem*, 8(11): 610-618, 1997.
- 31) Greig C, Finch KM, Jones DA, Cooper M, Sargeant AJ, Forte CA. The effect of oral supplementation with l-carnitine on maximum and submaximum exercise capacity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 56(4): 457-460, 1987.
- 32) Harris RC, Söderlund K, Hultman E. Elevation of creatine in resting and exercised muscle of normal subjects by creatine supplementation. *Clin Sci*, 83(3): 367-374, 1992.
- 33) Hobson RM, Saunders B, Ball G, Harris RC, Sale C. Effects of β -alanine supplementation on exercise performance: a meta-analysis. *Amino Acids*, 43(1): 25-37, 2012.
- 34) Hoon MW, Jones AM, Johnson NA, Blackwell JR, Broad EM, Lundy B, Rice AJ, Burke LM. The effect of variable doses of inorganic nitrate-rich beetroot juice on simulated 2,000-m rowing performance in trained athletes. *Int J Sports Physiol Perform*, 9(4): 615-620, 2014.
- 35) Hultman E, Soderlund K, Timmons JA, Cederblad G, Greenhaff PL. Muscle creatine loading in men. *J Appl Physiol*, 81(1): 232-237, 1996.
- 36) Jones AM. Dietary nitrate supplementation and exercise performance. *Sports Med*, 44(1): 35-45,

- 2014.
- 37) Katz A, Costill DL, King DS, Hargreaves M, Fink WJ. Maximal exercise tolerance after induced alkalosis. *Int J Sports Med*, 05(2): 107-110, 1984.
- 38) Kopec BJ, Dawson BT, Buck C, Wallman KE. Effects of sodium phosphate and caffeine ingestion on repeated-sprint ability in male athletes. *J Sci Med Sport*, 19(3): 272-276, 2016.
- 39) Kraemer WJ, Gordon SE, Lynch JM, Pop ME, Clark KL. Effects of multibuffer supplementation on acid-base balance and 2,3-diphosphoglycerate following repetitive anaerobic exercise. *Int J Sport Nutr*, 5(4): 300-314, 1995.
- 40) Kreider RB) Phosphorous in exercise and sport. *Macroelements, water and electrolytes in sport nutrition*. CRC Press, pp. 29-43, 1999.
- 41) Kreider RB. Effects of creatine supplementation on performance and training adaptations. *Mol Cell Biochem*, 244(1-2): 89-94, 2003.
- 42) Kreider RB, Kalman DS, Antonio J, Ziegenfuss TN, Wildman R, Collins R, Candow DG, Kleiner SM, Almada AL, Lopez HL. International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine. *J Int Soc Sports Nutr*, 14: 18, 2017.
- 43) Kreider RB, Miller GW, Schenck D, Cortes CW, Miriel V, Somma CT, Rowland P, Turner C, Hill D. Effects of phosphate loading on metabolic and myocardial responses to maximal and endurance exercise. *Int J Sport Nutr*, 2(1): 20-47, 1992.
- 44) Kreider RB, Miller GW, Williams MH, Somma CT, Nasser TA. Effects of phosphate loading on oxygen uptake, ventilatory anaerobic threshold, and run performance. *Med Sci Sports Exerc*, 22(2): 250-256, 1990.
- 45) Krustrup P, Ermidis G, Mohr M. Sodium bicarbonate intake improves high-intensity intermittent exercise performance in trained young men. *J Int Soc Sports Nutr*, 12(1): 25, 2015.
- 46) Lancha Junior AH, de Salles Painelli V, Saunders B, Artioli GG. Nutritional strategies to modulate intracellular and extracellular buffering capacity during high-intensity exercise. *Sports Med*, 45(1): 71-81, 2015.
- 47) Lanhers C, Pereira B, Naughton G, Trousselard M, Lesage FX, Dutheil F. Creatine supplementation and upper limb strength performance: a systematic review and meta-Analysis. *Sports Med*, 47(1): 163-173, 2017.
- 48) Marconi C, Sassi G, Carpinelli A, Cerretelli P. Effects of l-carnitine loading on the aerobic and anaerobic performance of endurance athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 54(2): 131-135, 1985.
- 49) McMahon NF, Leveritt MD, Pavey TG. The effect of dietary nitrate supplementation on endurance exercise performance in healthy adults: a systematic review and meta-Analysis. *Sports Med*, 47(4): 735-756, 2017.
- 50) McNaughton L, Cedaro R. Sodium citrate ingestion and its effects on maximal anaerobic exercise of different durations. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 64(1): 36-41, 1992.
- 51) McNaughton LR. Sodium citrate and anaerobic performance: implications of dosage. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 61(5): 392-397, 1990.
- 52) Muggeridge DJ, Sculthorpe N, James PE, Easton C. The effects of dietary nitrate supplementation on the adaptations to sprint interval training in previously untrained males. *J Sci Med Sport*, 20(1): 92-97, 2017.
- 53) Nassis GP, Sporer B, Stathis CG. β -alanine efficacy for sports performance improvement: from science to practice. *Br J Sports Med*, 51(8): 626-627, 2017.
- 54) Novakova K, Kummer O, Bouitbir J, Stoffel

- SD, Hoerler-Koerner U, Bodmer M, Roberts P, Urwyler A, Ehram R, Krähenbühl S. Effect of l-carnitine supplementation on the body carnitine pool, skeletal muscle energy metabolism and physical performance in male vegetarians. *Eur J Nutr*, 55(1): 207-217, 2016.
- 55) Nyakayiru J, Jonvik KL, Trommelen J, Pinckaers PJ, Senden JM, van Loon LJ, Verdijk LB. Beetroot juice supplementation improves high-intensity intermittent type exercise performance in trained soccer players. *Nutrients*, 9(3): 314, 2017.
- 56) Paddon-Jones D, Børshøj E, Wolfe RR. Potential ergogenic effects of arginine and creatine supplementation. *J Nutr*, 134(10): 2888S-2894S, 2004.
- 57) Paton C, Costa V, Guglielmo L. Effects of caffeine chewing gum on race performance and physiology in male and female cyclists. *J Sports Sci*, 33(10): 1076-1083, 2015.
- 58) Peeling P. Phosphate. In: Castell L, Stear S, Burke L (Eds.) *Nutritional supplements in sport, exercise and health: An A-Z guide*. Routledge Published, pp. 205-206, 2015.
- 59) Peeling P, Binnie MJ, Goods PSR, Sim M, Burke LM. Evidence-based supplements for the enhancement of athletic performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 28(2): 178-187, 2018.
- 60) Peeling P, Cox GR, Bullock N, Burke LM. Beetroot juice improves on-water 500 M time-trial performance, and laboratory-based paddling economy in national and international-level kayak athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 25(3): 278-284, 2015.
- 61) Rawson ES, Persky AM. Mechanisms of muscular adaptations to creatine supplementation : review article. *International SportMed Journal*, 8(2): 43-53, 2007.
- 62) Requena B, Zabala M, Padial P, Feriiche B. Sodium bicarbonate and sodium citrate: ergogenic aids?. *J Strength Cond Res*, 19(1): 213-224, 2005.
- 63) Reynolds CME, Halpenny C, Hughes C, Jordan S, Quinn A, Egan B. Acute ingestion of beetroot juice does not improve repeated sprint performance in male team sport athletes. *Proc Nutr Soc*, 75(OCE3): E97, 2016.
- 64) Saunders B, Elliott-Sale K, Artioli GG, Swinton PA, Dolan E, Roschel H, Sale C, Gualano B. β -alanine supplementation to improve exercise capacity and performance: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med*, 51(8): 658-669, 2017.
- 65) Schilling BK, Stone MH, Utter A, Kearney JT, Johnson M, Coglianese R, Smith L, O' bryant HS, Fry AC, Starks M, Keith R, Stone ME. Creatine supplementation and health variables: a retrospective study. *Med Sci Sports Exerc*, 33(2): 183-188, 2001.
- 66) Schneiker KT, Bishop D, Dawson B, Hackett LP. Effects of caffeine on prolonged intermittent-sprint ability in team-sport athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 38(3): 578-585, 2006.
- 67) Siegler JC, Marshall PWM, Bishop D, Shaw G, Green S. Mechanistic insights into the efficacy of sodium bicarbonate supplementation to improve athletic performance. *Sports Med Open*, 2(1): 41, 2016.
- 68) Siegler JC, Marshall PWM, Bray J, Towlson C. Sodium bicarbonate supplementation and ingestion timing: does it matter?. *J Strength Cond Res*, 26(7): 1953-1958, 2012.
- 69) Steenge GR, Simpson EJ, Greenhaff PL. Protein- and carbohydrate-induced augmentation of whole body creatine retention in humans. *J Appl Physiol*, 89(3): 1165-1171, 2000.
- 70) Stellingwerff T, Decombaz J, Harris RC, Boesch C. Optimizing human in vivo dosing and delivery of beta-alanine supplements for muscle carnosine synthesis. *Amino Acids*, 43(1): 57-65,

- 2012.
- 71) Stephens FB, Constantin-Teodosiu D, Greenhaff PL. New insights concerning the role of carnitine in the regulation of fuel metabolism in skeletal muscle. *J Physiol*, 581(2): 431-444, 2007.
- 72) Stephens FB, Evans CE, Constantin-Teodosiu D, Greenhaff PL. Carbohydrate ingestion augments l-carnitine retention in humans. *J Appl Physiol*, 102(3): 1065-1070, 2007.
- 73) Talanian JL, Spriet LL. Low and moderate doses of caffeine late in exercise improve performance in trained cyclists. *Appl Physiol Nutr Metab*, 41(8): 850-855, 2016.
- 74) Thompson C, Vanhatalo A, Jell H, Fulford J, Carter J, Nyman L, Bailey SJ, Jones AM. Dietary nitrate supplementation improves sprint and high-intensity intermittent running performance. *Nitric Oxide*, 61: 55-61, 2016.
- 75) Thompson C, Wylie LJ, Fulford J, Kelly J, Black MI, McDonagh STJ, Jeukendrup AE, Vanhatalo A, Jones AM. Dietary nitrate improves sprint performance and cognitive function during prolonged intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol*, 115(9): 1825-1834, 2015.
- 76) Tomcik KA, Camera DM, Bone JL, Ross ML, Jeacocke NA, Tachtsis B, Senden J, Van Loon LJC, Hawley JA, Burke LM. Effects of creatine and carbohydrate loading on cycling time trial performance. *Med Sci Sports Exerc*, 50(1): 141-150, 2018.
- 77) Urwin CS, Dwyer DB, Carr AJ. Induced alkalosis and gastrointestinal symptoms after sodium citrate ingestion: a dose-response investigation. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 26(6): 542-548, 2016.
- 78) Vanhatalo A, Bailey SJ, Blackwell JR, DiMenna FJ, Pavey TG, Wilkerson DP, Benjamin N, Winyard PG, Jones AM. Acute and chronic effects of dietary nitrate supplementation on blood pressure and the physiological responses to moderate-intensity and incremental exercise. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 299(4): R1121-R1131, 2010.
- 79) Volek JS, Rawson ES. Scientific basis and practical aspects of creatine supplementation for athletes. *Nutrition*, 20(7): 609-614, 2004.
- 80) Wall BT, Stephens FB, Constantin-Teodosiu D, Marimuthu K, Macdonald IA, Greenhaff PL. Chronic oral ingestion of l-carnitine and carbohydrate increases muscle carnitine content and alters muscle fuel metabolism during exercise in humans. *J Physiol*, 589(4): 963-973, 2011.
- 81) Wellington BM, Leveritt MD, Kelly VG. The effect of caffeine on repeat-high-intensity-effort performance in rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(2): 206-210, 2017.
- 82) West JS, Ayton T, Wallman KE, Guelfi KJ. The effect of 6 days of sodium phosphate supplementation on appetite, energy intake, and aerobic capacity in trained men and women. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 22(6): 422-429, 2012.
- 83) Wiles JD, Coleman D, Tegerdine M, Swaine IL. The effects of caffeine ingestion on performance time, speed and power during a laboratory-based 1 km cycling time-trial. *J Sports Sci*, 24(11): 1165-1171, 2006.
- 84) Wylie LJ, Bailey SJ, Kelly J, Blackwell JR, Vanhatalo A, Jones AM. Influence of beetroot juice supplementation on intermittent exercise performance. *Eur J Appl Physiol*, 116(2): 415-425, 2016.