ヒトの無機質栄養と運動に関する研究 —ナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウムおよび リンの代謝と出納に及ぼす運動の影響を中心として—

山 田 哲 雄

関東学院大学人間環境学部健康栄養学科

Studies on Mineral Nutrition and Exercise in Men : Effects of Exercise on the
Metabolism and Balance of Sodium, Potassium, Calcium, Magnesium and Phosphorus

Tetsuo Yamada

Department of Health and Nutrition, College of Human and
Environmental Studies, Kanto Gakuin University

The effects of exercise on the metabolism and balance of sodium (Na), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg) and phosphorus (P) were investigated in healthy men. An effect of exercise intensity was observed on acute changes in Na and K metabolism. The plasma renin activity and serum aldosterone level were elevated on the day of exercise, and the overall whole-body Na loss increased with increasing sweat excretion due to a lower level of decreasing urinary excretion. Acute changes in Ca, Mg and P metabolism were observed during 175 minutes of exercise. The serum parathyroid hormone level was significantly elevated, and the urinary adrenaline and noradrenaline excretion levels were also significantly increased. An overall whole-body loss was observed in Ca and Mg, but not in P.

Under a dietary condition with little mineral supplementation during the exercise period, there was a significant positive shift in the Na balance, while the levels of K, Ca, Mg and P were maintained, although the possibility of overall whole-body losses was anticipated in the early days of the exercise period. However, a diet providing extra energy and increasing the intake of nutrients in proportion to energy intake level was sufficient for covering the increased excretion of these minerals in sweat ; there was a significant positive shift in the Na and P balance, while the levels of K, Ca and Mg were maintained.

These results suggest that a dietary regime that maintains the intake of nutrients per 1,000kcal of energy intake would be reasonable for maintaining the nutritional status of Na, K, Ca, Mg and P under exercise conditions.

Jpn. J. Nutr. Diet., 64 (3) 139～151 (2006)

Key words : exercise, mineral balance, sweating

I. はじめに

運動時における食生活の基本的要件は、運動に伴う栄養素要求量の増大への対応である。栄養素のうちの無機質については、体内での要求量の増大に加えて汗中排泄量の増大への対応が合わせて必要となる。

暑熱環境や運動の条件下では、発汗の増大に伴い汗中への水と無機質の排泄量が高まる。その際にこれらの補給の必要性の有無が問題となるが、この問題を解明するにあたっては、体外への水と無機質の損失の程度を検討

することが基本的に必要となる。また、腎または腸管による代償作用の有無、汗腺の適応あるいは生体負担度などについて検討することも必要となる。すなわち、汗中への水と無機質の排泄量が一過性に著しく増大した場合にも、尿中への排泄量がその分減少すれば身体全体としての損失は起こらないことになる。時間的には、一過性のみならず24時間単位での検討、連日にわたって運動を行う場合の生体の適応などについても考慮することが必要である。また、出納が維持されているか否かにかか

本論文は、平成17年度（第52回日本栄養改善学会学術総会）学会賞受賞対象の研究である。

キーワード：運動，無機質，出納，発汗

（連絡先：山田哲雄 〒236-8503 横浜市金沢区六浦東1-50-1 関東学院大学人間環境学部健康栄養学科 電話・FAX 045-786-7221

E-mail tyamada@kanto-gakuin.ac.jp)

わず、内分泌や腎などの諸生理機能への負担が考慮されなければならない。

一方、運動時の栄養素摂取については、安静時の望ましい内容の食事を構成する主食・副食を偏りなく増すことがしばしば推奨される。しかしながら、この方法が無機質栄養に対して全面的に適正であるか否かを示す実験的データは、意外なことにあまり見られない。

筆者らは、運動時の無機質栄養に関する基礎的資料を得ることを目的として、体液平衡維持や筋機能・骨代謝に関係深いナトリウム (Na)、カリウム (K)、カルシウム (Ca)、マグネシウム (Mg) およびリン (P) を対象に、汗中への排泄動態を含めた代謝と出納ならびに諸生理機能に及ぼす運動の影響を観察してきた。本稿では、これらの研究結果と内外の文献をもとに、「ヒトの無機質栄養と運動」の問題について考察する。

なお、ヒトを対象とするこれらの研究はヘルシンキ宣言 (1964年承認, 2000年修正) の精神に則ることを遵守して行われたことを附記する。

II. 汗の採取方法と Na, K, Ca, Mg および P の汗中排泄レベル

(1) 汗の採取方法

定量的な汗の採取方法としては、アームバッグ法^{1~5)}、パッチ (皮膚への布等の貼付) 法^{6, 7)}、そして全身洗浄法^{8, 9)} などの方法が用いられている。しかしながら、身体の部分的な汗と全身の汗の組成は完全には一致しない^{1~3, 6)} ことから、筆者らは Vellar ら^{8, 9)} の方法に準じる全身洗浄法を採用している。

その内容は、以下のとおりである。まず、汗採取前に被験者の身体をボディシャンプーの希釈溶液で洗浄後、最終的にイオン交換水で十分に洗浄した。次いで、イオン交換水で予め十分にすすぎ処理を施した木綿製の衣類 (半袖シャツ, ステテコ等) を身につけさせ、こぼれ落ちる汗を補集するためにタオルを携行させることによって、汗の全量を回収するように努めた。規定の汗採取時間後にイオン交換水で身体を洗浄し、衣類中の汗についてはイオン交換水中で抽出した。得られた身体洗浄液と抽出液とを一定量にメスアップした後に、各々の一部を Na, K, Ca, Mg の測定に供した。既知濃度の Na, K, Ca, Mg 溶液中に、上記のイオン交換水で予め十分にすすぎ処理を施した木綿製の衣類を浸してしばらくした後、これをイオン交換水中で抽出した際の回収率は 98~102% であった。なお、後述のように汗中への P 排泄量は微量であり、我々の検討でも無視できるレベルであった。また、被験者には、実験室と宿泊施設との間の移動の際には衣類と同様にイオン交換水ですすぎ処理を施した上着を着用させ、寝具についても同じくイオン交換水です

ぎ処理を施した。

以上の方法は、Na, K, Ca, Mg に対しては適用可であると考えられるが、微量元素に対しては汗試料のコンタミネーションの危険が問題となることが予想される。その対応策として、汗採取装置の中で運動を行う方法も試みられている¹⁰⁾。

(2) Na, K, Ca, Mg および P の汗中排泄レベル

1) 発汗による体液の損失

無機質は窒素^{1, 11)} とともに汗中に多量に排泄されるが、汗中総無機質濃度や浸透圧は血漿のそれよりも常に低い。したがって、発汗は高張性脱水¹²⁾ を引き起こす。すなわち、汗には体液に比べ相対的に多くの水が排泄されるため、体液の浸透圧は上昇して、量は減少することになる。Costill ら¹³⁾ によると、暑熱環境下での運動による脱水時の各体液区分からの水分喪失量の比率は、脱水の程度が大きくなると約 40% が組織間液由来、約 50% が細胞内液由来であり、脱水の程度に関係なく常に約 10% が血漿由来であった。また、体重の 2.2%, 4.1%, 5.8% の脱水時における血漿中水分の喪失が各々 138ml, 283ml, 470ml (脱水前のレベルに比べると 4.0%, 8.2%, 13.7% の減少) であり、5.8% の脱水時には、血漿浸透圧が 6.6% 増加して約 125ml の水が赤血球から失われたという。

2) 汗中 Na, K 排泄量

Na は、汗中に最も多く排泄される無機質である¹⁴⁾。アルドステロンは汗腺と皮膚表面の汗口とを結ぶ導管で Na を再吸収するが、汗中 Na 濃度は発汗速度が増すにつれて上昇する。この現象は導管での Na の再吸収率が低下することによる¹⁵⁾ が、前述のように汗中 Na 濃度が血漿 Na 濃度を上回ることはない。

一方、汗中 K 濃度は、発汗速度に関係なく血漿 K 濃度にほぼ等しいことが知られている^{10, 16~19)}。また、Na と K の相互関係については、発汗速度が低い非運動時には K 濃度が Na 濃度を上回り、発汗速度が高くなると Na 濃度が K 濃度を上回ようになる。我々²⁰⁾ の検討でも、Na と K の各々のレベル・相互関係ともに従来の報告と同様の結果が得られている (図 1)。

3) 汗中 Ca, Mg, P 排泄量

汗中への Ca 排泄については、0.64mg/100ml, 8.16mg/60分間⁸⁾ とする低レベルの報告もあるが、44.0mg/3.5時間¹⁾, 20.2mg/60分間²¹⁾, 25mg/40分間²²⁾, 45 ± 12mg/45分間²³⁾, 6.2mg/100ml²⁴⁾, 7.2~7.4mg/100ml¹⁶⁾, 52 ± 36mg/l¹⁰⁾, 44mg/l²⁵⁾, 103 ± 22mg/日⁶⁾、健常者では 36~96mg/日で、Ca 代謝異常者ではさらに多くなる場合もあるとする報告²⁶⁾ などに見られるように、無視できないレベルの報告の方が多くみられる。

図1 運動時の体重減少量と汗中Na, K排泄量の関係

40分間の運動を含む2時間の値 (n = 5, 体重減少量は平均値±標準偏差),

C: 対照日 (安静日), ME: 中等度の運動日, HE: 激運動日

資料) 文献82を一部改変

表1 対照日 (C, 安静日), 中等度の運動日 (ME), 激運動日 (HE) の運動時間帯 (午前9～11時) における汗, 尿および (汗+尿) 中Na, K排泄量の比較

	sweat			urine			sweat + urine		
	Na (mg)	K (mg)	Na/K	Na (mg)	K (mg)	Na/K	Na (mg)	K (mg)	Na/K
C	25 ± 8	38 ± 13	1.90 ± 0.98	286 ± 52	223 ± 14	2.31 ± 0.56	311 ± 55	261 ± 19	2.17 ± 0.57
ME	300 ± 55 ^a	148 ± 21 ^a	3.97 ± 1.02	208 ± 34	223 ± 26	1.66 ± 0.27	508 ± 55 ^a	371 ± 27 ^a	2.43 ± 0.42
HE	718 ± 202 ^a	196 ± 31 ^a	6.08 ± 1.22 ^a	123 ± 6 ^a	138 ± 8 ^{ab}	1.55 ± 0.13	842 ± 205	334 ± 34	4.18 ± 0.77 ^{ab}

Exercise was loaded for 40 minutes from 9 : 10.

Values are means ± SD (n = 5). ^a Significantly different compared with C, ^b with ME at p < 0.05.

資料) 文献20

Mgについても, 0.16mg/100ml, 1.97mg/60分間⁸⁾とする低レベルの報告もあるが, 1.5～1.7mg/100ml¹⁶⁾, 2.0mg/100ml²⁴⁾, 2.0mg/100ml²⁷⁾, 3.7mg/100ml¹³⁾, 12 ± 12mg/l¹⁰⁾, 35 ± 13mg/l⁶⁾などのように, Caほど高値ではないものの出納値に算入すべきレベルの汗中排泄があるものと考えられる。

一方で, 汗中へのP排泄量は, 通常の摂取量や尿中排泄量に比べて微量であり^{21, 24, 28)}, 生体外への損失量の算定に対しては無視できるレベルである。

後述する我々の検討においても, 上述の多くの報告と同様の汗中Ca, Mg排泄レベルが観察されている。

Ⅲ. Na, K, Ca, MgおよびP代謝に及ぼす運動の一過性の影響

(1) Na, K

大量の発汗に伴う水とNaの過剰な排泄により, 循環血液量の減少のほか種々の生理機能の低下が起こる¹²⁾。運動時の汗および尿中Na, K排泄量の一過性の変動に及ぼす運動強度の影響 (室温27～28℃, 湿度73～74%) を表1に示した²⁰⁾。実際の運動強度は, 中等度の運動時

で平均63% $\dot{V}O_{2max}$, 激運動時で平均73% $\dot{V}O_{2max}$ であり, 運動時間はともに40分間 (20分間×2セット) であった。その結果,

- ① 体外へのNaの排泄が, 汗中Na排泄量が高まるほど大となる。
- ② 体外へのKの排泄は, 中等度の運動日に比べ激運動日で必ずしも高まらない。
- ③ 激運動日では, KよりもNaの排泄が相対的に大となる。

が明らかになった。またその際に, 血中乳酸, 血漿レニン活性, 血清アルドステロンの各レベルが強度依存的に有意に上昇していた。

次いで, 運動後翌日までの汗および尿中Na, K排泄量の変動に及ぼす運動強度の影響について, 環境温度の違い (第1期: 室温24～25℃, 湿度69～71%, 第2期: 室温30～31℃, 湿度67～69%) による差異を考えた上で検討した²⁹⁾。対照となる安静日 (非運動日) における24時間汗中排泄量 (平均値) は, Naが第1期: 96mg, 第2期: 160mgで, Kが第1期: 184mg, 第2期: 371mgであった。その結果, このような環境条件

の違いに関係なく中等度の運動後、激運動後ともに、運動負荷後翌日にはNaの負債（身体全体としてのNaの排泄増大）は解消され、NaとKの摂取量に対する（汗＋尿）中排泄量の比率は安静日と運動日との間に差を示さなかった（図2）。

運動時には、運動強度が高まるにつれて腎血流量が低下し、糸球体濾過率もそれに伴い低下する^{30～32)}。したがって、腎経路で排泄される水とNa、Kの量は、糸球体濾過の段階でまず減少することになる。続いて尿細管と集合管に対する抗利尿ホルモン（ADH）、レニン-アンジオテンシン-アルドステロン（RAA）系などの作用による調節が行われることになる。血漿ADH濃度、レニン活性値、アンジオテンシンI・IIおよびアルドステロン濃度は、いずれも運動強度が高まるにつれて、また、運動時間が長くなるにつれて上昇する^{33～38)}。また、環境温度が高いほど血漿アンジオテンシンII、アルドステロン濃度が高値を示したことも報告されている³⁹⁾。さらに、運動時における交感神経系の活動亢進はレニンの分泌、アンジオテンシンの生成を高める^{33, 34)}。これらのことは、神経性・体液性の両面からの調節が、皮膚血流量増大に伴う静脈還流量の減少や発汗量増大に伴う血漿の浸透圧の上昇と量の減少に対して合目的的に行われていることを示している。

尿中Na排泄量が運動時に減少することは広く認められており^{40～43)}、この点については上述のRAA系の動態が関与する。これに対して、尿中K排泄量は運動時に必ずしも減少しない^{40, 41, 44)}。この点についてはアルドステロンの作用による尿細管でのNa再吸収の問題が関与しており、尿細管ではNaがKと水素イオンの競合した分泌と交換で再吸収されることが知られている^{45, 46)}。すなわち、中等度の運動の場合にはNaの再吸収に伴うKの分泌増大が引き起こされることになる。

一方、血漿心房性ナトリウムペプチド（ANP）濃度も運動強度が高まるにつれて、また、運動時間が長くなるにつれて上昇する^{47～49)}。ADH、RAA系による体液量を保持する作用の亢進に伴い、ANPによる逆の作用の亢進もまた起こっていることになり、血液凝固と線維素溶解のような関係が体液調節にもあるのかもしれない。運動時におけるANPの生理的な意義については不明な点が多いが、心房の拡張のほか心拍数の増加、ADH、カテコールアミンなどが分泌刺激となっている可能性が示唆されている⁵⁰⁾。

運動時には以上のような内分泌や腎による調節機構が作動するが、運動が激しくなると水とNaの一時的な負債は避けられず、その際には飲料水摂取の意義が大きくなる。また、運動時に起こるNaの一過性の負債は多くの場合に24時間以内に解消されるが、運動量が大きく

なった場合には食事へのNa付加の必要性が高まることが予想される。

(2) Ca, Mg, P

前述のように、汗中Ca、Mg排泄量は無視できないレベルに達する。自転車エルゴメーターを用いた175分の運動負荷実験（乾球温26～27℃、湿球温24～25℃）における我々の検討では、平均約3kgの体重減少下で汗中排泄量（平均値）がCaで173mg、Mgで30mgに達した（表2）。その際には、血中遊離脂肪酸、副甲状腺ホルモン（PTH）の各レベルが有意に上昇し、尿中アドレナリン、ノルアドレナリン排泄量が有意に増加していた。そして、尿中Ca、Mg排泄量が有意に減少したのに対して、P排泄量は不変であった（表3⁵¹⁾。

運動時のCa、MgおよびP代謝に対しては、乳酸産生の増大、血中への遊離脂肪酸の動員やカテコールアミンの分泌亢進などが関与する。血中カルシウムイオン（Ca²⁺）レベルの上昇が短時間激運動時の乳酸産生増大に起因する代謝性アシドーシスによって起こる^{52～55)}が、その原因としては、血液濃縮による影響のほかpH低下による過剰の水素イオンとアルブミン分子に結合したCa²⁺との可逆的な置換⁵⁶⁾などが考えられている。

長時間運動時には血中遊離脂肪酸値が上昇するが、遊離脂肪酸の増加がアルブミンへのCa²⁺結合の増加の原

図2 Na、Kの（汗＋尿）中排泄量／摂取量の比較
R：安静日、ME：中等度の運動日、HE：激運動日

Values are means $\pm$ SE ($n = 5$). * Significantly different compared with R, ^b with ME at $p < 0.05$.

資料) 文献29

因となり、血中Ca²⁺濃度が有意に低下することが報告されている^{57, 58)}。Ljunghallら⁵⁹⁾は、50%強度での5時間の運動時における検討で、血中PTH濃度が上昇した原因が血中のCa²⁺と遊離脂肪酸との結合によるものであることを推察している。有酸素性運動時における血中PTH濃度の上昇は、他にも数多く報告されている^{60~62)}。PTHの分泌については、カテコールアミンによっても促進されることが報告されており^{63~65)}、分泌反応が被験者の特性によって異なることも報告されている^{61, 62)}。一方、血中カルシトニン濃度については、有酸素性運動で変動しないとする報告が多い^{60, 62, 66)}。

運動時に血漿Mg濃度が変化しなかった、または低下

したとする報告は多く、その原因としてはMgの汗中への排泄増大⁹⁾、赤血球あるいは筋肉中への移動^{67~70)}、カテコールアミンと遊離脂肪酸の影響^{71, 72)}、脂肪分解促進時の脂肪細胞への取り込み^{73, 74)}などが考えられている。また、赤血球内MgはMg不足の診断に用いられ⁷⁵⁾、細胞内のMgは有酸素性作業能力に重要な機能をもつことが報告されている⁷⁶⁾。

近位尿細管でのPTH刺激性アデニールサイクラーゼ活性は α -アドレナリン作動性因子により抑制される^{77~79)}。すなわち、腎交感神経活性が増大する際にはPTHのP利尿作用が抑制され、 β -ブロッカーによって回復する^{80, 81)}。これらの事実は、運動時に血中PTH濃度が上昇して尿

表2 運動時の水、CaおよびMgの体外への損失量（175分間の運動を含む4時間の値）

	Water (kg)	Ca (mg)	Mg (mg)
Sweat			
Rest experiment	0.25 $\pm$ 0.03	22 $\pm$ 2	4 $\pm$ 0
Exercise experiment	2.98 $\pm$ 0.18 ^a	173 $\pm$ 15 ^a	30 $\pm$ 3 ^a
Urine			
Rest experiment	0.24 $\pm$ 0.03	30 $\pm$ 6	13 $\pm$ 2
Exercise experiment	0.14 $\pm$ 0.02	11 $\pm$ 3 ^a	4 $\pm$ 1 ^a
Total			
Rest experiment	0.49 $\pm$ 0.04	52 $\pm$ 7	17 $\pm$ 2
Exercise experiment	2.28 $\pm$ 0.20 ^{†, a}	184 $\pm$ 16 ^a	34 $\pm$ 3 ^a

Values are means $\pm$ SE ($n = 5$). [†] Water intake during exercise was 840 ml.

^aSignificantly different compared with Rest experiment at $p < 0.05$.

資料) 文献51

表3 運動時の尿中アドレナリン (A)、ノルアドレナリン (NA)、Ca、MgおよびP排泄量の変動

	Time			
	9 : 00 ~ 10 : 00	10 : 00 ~ 11 : 35	11 : 35 ~ 13 : 10	13 : 10 ~ 14 : 00
A (ng/min)				
Rest experiment	12.9 $\pm$ 3.0	15.0 $\pm$ 2.2 *	14.5 $\pm$ 2.3	15.9 $\pm$ 2.1 *
Exercise experiment	12.4 $\pm$ 2.8	18.9 $\pm$ 4.1	24.1 $\pm$ 6.5 ^{*, a}	30.3 $\pm$ 7.5 ^{*, a}
NA (ng/min)				
Rest experiment	91 $\pm$ 17	92 $\pm$ 18	90 $\pm$ 18	83 $\pm$ 13
Exercise experiment	97 $\pm$ 16	157 $\pm$ 25 ^a	193 $\pm$ 25 ^{*, a}	245 $\pm$ 43 ^{*, a}
Ca (μ g/min)				
Rest experiment	178 $\pm$ 38	154 $\pm$ 38	125 $\pm$ 23 *	103 $\pm$ 27 *
Exercise experiment	167 $\pm$ 34	65 $\pm$ 16 ^{*, a}	20 $\pm$ 5 ^{*, a}	50 $\pm$ 23 ^{*, a}
Mg (μ g/min)				
Rest experiment	60.3 $\pm$ 12.4	59.1 $\pm$ 10.3	53.7 $\pm$ 11.1	48.1 $\pm$ 8.6
Exercise experiment	52.9 $\pm$ 10.6	24.4 $\pm$ 7.9 ^{*, a}	8.4 $\pm$ 1.7 ^{*, a}	19.7 $\pm$ 9.6 ^{*, a}
P (μ g/min)				
Rest experiment	695 $\pm$ 212	503 $\pm$ 149	556 $\pm$ 103	757 $\pm$ 93
Exercise experiment	717 $\pm$ 65	549 $\pm$ 81	466 $\pm$ 59	754 $\pm$ 196

Values are means $\pm$ SE ($n = 5$). Exercise was loaded from 10 : 00 to 13 : 00. *Significantly different compared with the value at 9 : 00 ~ 10 : 00, ^a with Rest experiment at $p < 0.05$.

資料) 文献51

図3 3時間/日の運動による汗, 尿および(汗+尿)中Na, K排泄量の経日変化

$n = 5$, 運動期の食事に, 無機質を付加しない場合

資料) 文献82

中Ca, Mg排泄量が減少するにもかかわらず, P利尿がみられないことの機序のひとつと考えられる。

Ⅳ. Na, K, Ca, MgおよびP出納に及ぼす運動トレーニングの影響

運動トレーニング時の食生活については, 日常の望ましい内容の食事を構成する主食・副食を偏りなく増すこと, すなわち, エネルギー摂取量に比例して各々の栄養素を一律に付加することがしばしば推奨される。しかしながら, その論拠となる栄養素の代謝あるいは出納を検討した実験的なデータは意外に少ない。

我々は, 運動期に無機質摂取量を増大させない食事条件下, またはエネルギー摂取量に比例して無機質を付加する食事条件下で検討を行った^{82~85)}。対照となる安静期(非運動期)には, 所要量(日本人の食事摂取基準[2005年版]の推奨量・目安量)に準じた体重維持エネルギーの実験食を設定した。そして運動期に無機質摂取量を増大させない場合には, 運動により消費された付加エネルギー量分だけエネルギー摂取量を増加させ, 増加分については無機質をほとんど含まない食品(コーンスターチ, 上白糖, コーンオイルおよび少量のマーガリン)を用いた。一方, エネルギー摂取量に比例して無機質を付加する場合には, 安静期に摂取された各食品の量をエネルギー摂取量に応じて比例的に増大させる方法を用いた。

運動期に無機質摂取量を増大させない食事条件下で, 自転車エルゴメーターによる3時間の運動負荷を行った際(平均室温30.7℃, 湿度66%)の汗中, 尿中および(汗+尿)中Na, K排泄量の経日変化を図3に示した。汗中Na排泄量は, 運動期初日に4g(食塩10g相当量)を超えるレベルに達した後漸減する者がいる一方で, 初日以降漸増する者もいて経日変化のパターンには個人

図4 3時間/日の運動によるNa, K, Ca, MgおよびP出納の変化

運動期の食事に, エネルギー摂取量に比例して無機質を付加した場合

Values are means $\pm$ SE ($n = 5$). *Significantly different compared with Rest period at $p < 0.05$.

資料) 文献84より作図

差がみられるが, 4日目ぐらいからはほぼ安定する結果となった。その際の尿中Na排泄量は, やや遅れて減少し運動期2~3日目までゼロ近くになる者もみられ, 4日目ぐらいから汗の場合と同様にほぼ安定する結果となった。その結果, (汗+尿)中Na排泄量は, 運動期初日に増大する者がみられ, その後3~4日間で逆に著しく減少した後に安静期のレベルへと向かっている。すなわち, 無機質摂取量の増加がない場合には, 運動初日にNaの負債が起こる場合があり, その後に強力なNa保留が引き起こされることになる。一方, Kでは, 汗中排泄量の増加の程度と尿中排泄量の減少の程度がほぼ等しく, 出納値の変動はみられなかった。これらと類似の結果は, これまでも報告されている^{86~88)}。CaとMgでは, 汗中排泄量の増大に対して[尿中排泄量/摂取量]と[糞便中排泄量/摂取量]が有意な低下または低下傾

表4 3時間／日の運動による血清遊離脂肪酸（FFA），尿素窒素（UN），浸透圧（Osm），ナトリウム（Na），カリウム（K），カルシウム（Ca），マグネシウム（Mg），リン（P），アルドステロン（Ald），副甲状腺ホルモン⁴⁴⁻⁶⁸（M-PTH），カルシトニン（CT）およびアルカリフォスファターゼ（ALP）の各レベルの変化

	Day			
	Exercise period			
	Before	2	4	After
FFA (mEq/l)	0.49 ± 0.04	0.73 ± 0.09 ^a	0.85 ± 0.09 ^a	0.95 ± 0.12 ^a
UN (mg/dl)	14.4 ± 0.8	24.8 ± 1.7 ^a	23.5 ± 1.5 ^a	21.3 ± 1.6 ^a
Osm (mOsm/kg·H ₂ O)	281 ± 1	287 ± 1 ^a	285 ± 1 ^a	284 ± 1
Na (mEq/l)	141 ± 0	142 ± 0 ^a	141 ± 0	140 ± 0
K (mEq/l)	3.90 ± 0.10	3.88 ± 0.14	3.92 ± 0.11	3.60 ± 0.12 ^a
Ca (mg/dl)	10.1 ± 0.3	9.5 ± 0.1 ^a	9.4 ± 0.2 ^a	9.4 ± 0.2 ^a
Mg (mg/dl)	2.18 ± 0.05	2.17 ± 0.08	2.11 ± 0.07	2.10 ± 0.07
P (mg/dl)	3.52 ± 0.16	3.82 ± 0.17 ^a	3.27 ± 0.17 ^a	3.15 ± 0.11 ^a
Ald (pg/ml)	86 ± 30	172 ± 80	152 ± 58	91 ± 29
M-PTH (pg/ml)	260 ± 38	326 ± 51 ^a	298 ± 39	282 ± 38
CT (pg/ml)	42 ± 2	46 ± 6	44 ± 5	41 ± 2
ALP (KAU/dl)	6.4 ± 0.6	6.2 ± 0.8	5.7 ± 0.7 ^a	5.7 ± 0.5 ^a

Values are means ± SE (n = 5). ^aSignificantly different compared with before exercise period at p < 0.05.
資料) 文献84

表5 3時間／日の運動による尿中クレアチニン（Cr），アドレナリン（A），ノルアドレナリン（NA），ドーパミン，バニルマンデル酸（VMA），ナトリウム（Na），カリウム（K），カルシウム（Ca），マグネシウム（Mg）およびリン（P）排泄量の変化

	Rest period	Day				
		Exercise period				
		1	2	3	4	5
Cr (g)	1.87 ± 0.05	1.96 ± 0.10	1.97 ± 0.05	1.95 ± 0.08	1.93 ± 0.07	2.03 ± 0.10
A (μg)	16 ± 2	42 ± 5 ^a	29 ± 5 ^a	26 ± 3 ^a	26 ± 3 ^a	27 ± 2 ^a
NA (μg)	71 ± 8	148 ± 11 ^a	159 ± 7 ^a	148 ± 10 ^a	145 ± 12 ^a	145 ± 17 ^a
Dopamine (mg)	1.07 ± 0.04	1.25 ± 0.09 ^a	1.17 ± 0.07	0.94 ± 0.04 ^a	0.99 ± 0.04	1.24 ± 0.10 ^a
VMA (mg)	3.56 ± 0.18	4.87 ± 0.34 ^a	4.72 ± 0.27 ^a	4.59 ± 0.37 ^a	4.34 ± 0.27 ^a	4.34 ± 0.24 ^a
Na (g)	4.65 ± 0.14	3.39 ± 0.40 ^a	3.69 ± 0.76 ^a	3.93 ± 0.63	4.46 ± 0.56	4.87 ± 0.50
K (g)	1.68 ± 0.12	2.15 ± 0.18 ^a	2.31 ± 0.24 ^a	2.32 ± 0.18 ^a	2.12 ± 0.14 ^a	1.97 ± 0.16
Ca (mg)	189 ± 40	208 ± 48	221 ± 55	232 ± 44 ^a	244 ± 51 ^a	267 ± 40 ^a
Mg (mg)	89 ± 9	106 ± 15 ^a	94 ± 17	90 ± 14	92 ± 15	94 ± 13
P (g)	1.05 ± 0.06	1.28 ± 0.11 ^a	1.36 ± 0.08 ^a	1.43 ± 0.08 ^a	1.44 ± 0.08 ^a	1.35 ± 0.11 ^a

Values are means ± SE (n = 5). ^aSignificantly different compared with rest period at p < 0.05.
資料) 文献84

向を示し、出納値は維持される結果が得られているが、運動期の初期にはNaと同様に負債の可能性が懸念される。
運動期にエネルギー摂取量に比例して無機質を付加する食事条件下でのNa、K、Ca、MgおよびP出納を図4に示した。無機質摂取量を増大させない食事条件下での検討と同様に、自転車エルゴメーターによる3時間の運動負荷を採用し、環境条件は、平均室温：29.2℃、湿

度：75%であった。Naは著しい正の出納を、そしてPも正の出納を示し、K、Ca、Mgでは出納が維持された。またその際には、Na、K、CaおよびMgのいずれについても、摂取量の増加分が汗中排泄量の増加分を上回っていた。したがって、エネルギー摂取量に比例した無機質摂取量増大下での運動時には、これらの無機質の摂取量増加分が汗中排泄量の増加分に対して充足可能なレベルであることが明らかになった。但しこの場合にも、血

中・尿中諸成分の変動から、運動期初期の2～3日間では生体内代謝の変動が大きいことに留意すべきである(表4, 5)。

運動トレーニングに伴うNaの正の出納はこれまでも報告されており^{87, 89, 90)}、また、血漿量の増加が観察されている^{35, 87, 89～95)}。脆弱赤血球の物理的・化学的破壊の問題を含めたいわゆる運動性貧血の問題⁹⁶⁾を考慮する必要があるが、赤血球数、ヘモグロビン濃度およびヘマトクリット値の低下は、血漿量の増加に大きく起因するものと考えられる。血漿量の増加は、循環血液量の増加につながり、また、血液粘性を低下させることになる。これらのことは、呼吸・循環系の適応と複合して有酸素性作業能力を高める大きな要因となる⁹⁷⁾。実際に我々の検討でも、出納試験後の有酸素性作業能力の向上を認めている^{98, 99)}。血漿量を一過性に増加させた際の有酸素性作業能力についての検討では、200～300mlの血漿量増大時には最大下運動時の心拍出力、最大酸素摂取量の増加がみられたが、500～600mlの血漿量増加時には血液の希釈が大となりそのような効果はみられなかったことが報告されている¹⁰⁰⁾。おそらく運動トレーニング時には、血漿量の増加が最適レベルを越えないためのなんらかの調節機構が働いていることが考えられる。また、運動が行われない暑熱曝露ではこのような適応はみられなかったという報告¹⁰¹⁾がある。正のNa出納ならびに血漿量の増大を引き起こす要因としては、RAA系とADHの関与が考えられ、レニンやアルドステロンの血中レベルが運動トレーニングの初期に最高値を示した後に低下したという報告^{35, 87, 93)}、60% $\dot{V}O_{2max}$ での60分間の運動後には6～12時間で運動前値に回復したという報告³⁵⁾がみられる。一方、ADHに関しては、運動トレーニングによる体液の浸透圧変化、容量変化に対する分泌感受性の変化を示唆する報告¹⁰²⁾がある。

以前より、運動トレーニングに伴う身体のK欠乏が指摘されており^{103～105)}、この点についてはRAA系の亢進による腎でのNaの再吸収増大に伴うK欠乏の可能性が考えられている。しかしながら、出納試験を伴った研究では運動トレーニングによる負のK出納は起こらなかったとする報告が多い^{89, 106, 107)}。そして、その結果は、低Na食の条件下⁸⁹⁾、低K食の条件下¹⁰⁶⁾においておのの認められている。我々の検討においても、無機質摂取量の増大がない食事条件下での運動時、エネルギー摂取量に比例した無機質摂取量増大下での運動時とともに、K出納は少なくとも維持された。しかしながら、RAA系の亢進にもかかわらずNaとKの尿中排泄量が運動期とともに減少した機序は不明である。

Ca必要量については、運動時に特に増大することは

ないという見解がある^{23, 25)}。CaとMgに関する我々の検討結果では、無機質摂取量の増大がない食事条件下、エネルギー摂取量に比例した無機質摂取量増大下とともにこれらの出納が維持されたが、前者では腎と腸管による排泄抑制作用が大であったことがうかがわれる。また、血中PTH濃度は運動トレーニング時に上昇する^{108, 109)}が、食事によるCaの補充がなされた場合にも、血中遊離脂肪酸やカテコールアミンの分泌の増大などによって上昇するものと考えられる。その際には一過性の場合と同様、Pの尿中排泄量は増大しない。また、Ljunghallら¹⁰⁹⁾は激しい身体活動を伴う7日間の野外運動演習後の血中P濃度の低下を報告しており、外傷後の血中P濃度の低下が報告されている¹¹⁰⁾。これらの点については、筋からのPの放出^{111, 112)}に続いて筋肥大に伴う筋中へのPの移行が起こるのかもしれないが、その詳細は不明である。MgについてはBrotherhood¹¹³⁾が、発汗に起因するMg不足は尿中排泄量の急速な減少のために起こらないだろうと述べ、Seelig¹¹⁴⁾は、急性の過度の発汗時における尿中および糞中Mg排泄量の減少は腎と腸管におけるMgの保持を示唆するものであると述べている。

V. まとめと今後の課題

運動トレーニング時にエネルギー増加分をバランスのよい食事で補充することは、Na, K, Ca, MgおよびPの栄養状態を良好に保つために基本的には有効である。但し、我々の一連の研究でも明らかなように、激しいトレーニングの場合には初期の2～3日間で汗中への排泄増大が大きく交感神経緊張状態が顕著であることに留意すべきであり、場合によっては特別な補給が必要になることも予想される¹¹⁵⁾。

今後の課題としては、ほかの無機質についての観察、ほかの栄養素、ことにたんぱく質摂取量との関連、体重減量時の問題、そして高齢者についての検討などが挙げられる。

VI. 謝 辞

以上の一連の実験的研究と受賞者講演中の高齢者を対象とする研究は、数多くの被験者の皆様、ケアハウス入居者およびスタッフの方々のご協力のもと、共同研究者(敬称略: 高橋徹三, 村松成司(筑波大学体育科学系運動栄養学研究室), 林 淳三, 笠原久弥(関東学院女子短期大学家政科), 倉沢新一, 有田匡孝, 松崎政三, 江田節子, 田中 明(関東学院大学人間環境学部健康栄養学科), 藤本修二, 藤本真美子(社会福祉法人明石恵泉福祉会))によるご指導・ご援助によって遂行されたものである。ここに深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Consolazio, C.F., Matoush, L.O., Nelson, R.A., Isaac, G.J. and Canham, J.E. : Comparisons of nitrogen, calcium and iodine excretion in arm and total body sweat, *Am. J. Clin. Nutr.*, **18**, 443-448 (1966)
- 2) Heyning, R.V. and Weiner, J.S. : A comparison of arm-bag sweat and body sweat, *J. Physiol.*, **116**, 395-403 (1952)
- 3) Iyer, E.M., Dikshit, M.B., Banerjee, P.K. and Suryanarayana, S. : 100% oxygen breathing during acute heat stress : effect on sweat composition, *Aviat. Space Environ. Med.*, **54**, 232-235 (1983)
- 4) Kozlowski, S. and Saltin, B. : Effect of sweat loss on body fluids, *J. Appl. Physiol.*, **19**, 1119-1124 (1964)
- 5) Verde, T., Shephard, R.J., Corey, P. and Moore, R. : Sweat composition in exercise and in heat, *J. Appl. Physiol.*, **53**, 1540-1545 (1982)
- 6) Palacios, C., Wigertz, K. and Weaver, C.M. : Comparison of 24 hour whole body versus patch tests for estimating body surface electrolyte losses, *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, **13**, 479-488 (2003)
- 7) Rianon, N., Feeback, D., Wood, R., Driscoll, T., Shackelford, L. and LeBlanc, A. : Monitoring sweat calcium using skin patches, *Calcif. Tissue Int.*, **72**, 694-697 (2003)
- 8) Vellar, O.D. : Studies on sweat losses of nutrients. I. Iron content of whole body sweat and its association with other sweat constituents, serum iron levels, hematological indices, body surface area, and sweat rate, *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **21**, 157-167 (1968)
- 9) Vellar, O.D. and Askevold, R. : Studies on sweat losses of nutrients. III. Calcium, magnesium, and chloride content of whole body cell-free sweat in healthy unacclimatized men under controlled environmental conditions, *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **22**, 65-71 (1968)
- 10) Shirreffs, S. M. and Maughan, R. J. : Whole body sweat collection in humans : an improved method with preliminary data on electrolyte content, *J. Appl. Physiol.*, **82**, 336-341 (1997)
- 11) 高橋徹三 : 運動とタンパク質栄養に関する基礎的研究, 日本栄養・食糧学会誌, **42**, 113-121 (1989)
- 12) 飯田喜俊 : 図解 水と電解質, pp.50-57 (1981) 中外医学社, 東京
- 13) Costill, D.L., Cote, R. and Fink, W. : Muscle water and electrolytes following varied levels of dehydration in man, *J. Appl. Physiol.*, **40**, 6-11 (1976)
- 14) 久野 寧 : 汗の話, pp.83-88 (1975) 光生館, 東京
- 15) 大原孝吉, 奥田宣明 : 発汗の生理学, 日本臨床, **41** (秋季臨時増刊号 体液), 238-248 (1983)
- 16) Costa, F., Calloway, D.H. and Margen, S. : Regional and total body sweat composition of men fed controlled diets, *Am. J. Clin. Nutr.*, **22**, 52-58 (1969)
- 17) Costill, D.L. : Sweating : its composition and effects on body fluids, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **301**, 160-174 (1977)
- 18) Dill, D.B., Horvath, S.M., Beaumont, W.V., Gehlsen, G. and Burrus, K. : Sweat electrolytes in desert walks, *J. Appl. Physiol.*, **23**, 746-751 (1967)
- 19) 西牟田守 : 水・電解質・ミネラルの摂取と運動, *Jpn. J. Sports Sci.*, **5**, 161-167 (1986)
- 20) 山田哲雄, 村松成司, 高橋徹三 : 運動時の汗および尿中ナトリウム, カリウム排泄量の一過性の変動に及ぼす運動強度の影響, 日本栄養・食糧学会誌, **46**, 39-46 (1993)
- 21) Mitchell, H.H. and Hamilton, T.S. : The dermal excretion under controlled environmental conditions of nitrogen and minerals in human subjects, with particular reference to calcium and iron, *J. Biol. Chem.*, **178**, 345-361 (1949)
- 22) Chu, J.Y., Margen, S., Calloway, D.H. and Costa, F.M. : Integumentary loss of calcium, *Am. J. Clin. Nutr.*, **32**, 1699-1702 (1979)
- 23) Bullen, D. B., O'Toole, M. L. and Johnson, K. C. : Calcium losses resulting from an acute bout of moderate-intensity exercise, *Int. J. Sport Nutr.*, **9**, 275-284 (1999)
- 24) Thapar, G.S., Shenolikar, I.S. and TulPule, P.G. : Sweat loss of nitrogen and other nutrients during heavy physical activity, *Indian J. Med. Res.*, **64**, 590-596 (1976)
- 25) O'Toole, M. L., Johnson, K. C., Satterfield, S., Bush, A. J., Koo, W. W., Klesges, R.C. and Applegate, W. B. : Do sweat calcium losses affect bone mass during firefighter training ?, *J. Occup. Environ. Med.*, **42**, 1054-1059 (2000)
- 26) Charles, P., Eriksen, E. F., Hasling, C., Sondergard, K. and Mosekilde, L. : Dermal, intestinal, and renal obligatory losses of calcium : relation to skeletal calcium loss, *Am. J. Clin. Nutr.*, **54** (1 Suppl.), 266S-273S (1991)
- 27) Costill, D.L., Cote, R., Fink, W.J. and Handel,

P.V. : Muscle water and electrolyte distribution during prolonged exercise, *Int. J. Sports Med.*, **2**, 130-134 (1981)

28) Robinson, S. and Robinson, A.H. : Chemical composition of sweat, *Physiol. Rev.*, **34**, 202-220 (1954)

29) 山田哲雄, 村松成司, 高橋徹三 : 24時間の汗及び尿中ナトリウム, カリウム排泄量に及ぼす運動の影響, *栄養学雑誌*, **54**, 161-172 (1996)

30) Castenfors, J. and Piscator, M. : Renal haemodynamics, urine flow and urinary protein excretion during exercise in supine position at different loads, *Acta Med. Scand.*, Suppl. **472**, 231-244 (1967)

31) Castenfors, J. : Renal function during prolonged exercise, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **301**, 151-159 (1977)

32) Kachadorian, W.A. and Johnson, R.E. : Renal responses to various rates of exercise, *J. Appl. Physiol.*, **28**, 748-752 (1970)

33) Convertino, V.A., Keil, L.C., Bernauer, E.M. and Greenleaf, J.E. : Plasma volume, osmolality, vasopressin, and renin activity during graded exercise in man, *J. Appl. Physiol.*, **50**, 123-128 (1981)

34) Convertino, V.A., Keil, L.C. and Greenleaf, J.E. : Plasma volume, renin, and vasopressin responses to graded exercise after training, *J. Appl. Physiol.*, **54**, 508-514 (1983)

35) Costill, D.L., Branam, G., Fink, W. and Nelson, R. : Exercise induced sodium conservation : changes in plasma renin and aldosterone, *Med. Sci. Sports*, **8**, 209-213 (1976)

36) Francis, K.T. and MacGregor, III. R. : Effect of exercise in the heat on plasma renin and aldosterone with either water or a potassium-rich electrolyte solution, *Aviat. Space Environ. Med.*, **49**, 461-465 (1978)

37) Viru, A., Karelson, K. and Smirnova, T. : Stability and variability in hormonal responses to prolonged exercise, *Int. J. Sports Med.*, **13**, 230-235 (1992)

38) Wade, C.E. : Response, regulation, and actions of vasopressin during exercise : a review, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **16**, 506-511 (1984)

39) 鈴木政登, 塩田正俊, 中嶋孝之, 井川幸雄 : 種々の環境条件下で運動時事故死の原因を考える, *デサントスポーツ科学*, **2**, 127-133 (1981)

40) Castenfors, J., Mossfeldt, F. and Piscator, M. : Effect of prolonged heavy exercise on renal function and urinary protein excretion, *Acta Physiol. Scand.*, **70**, 194-206 (1967)

41) Castenfors, J. : Renal clearances and urinary

sodium and potassium excretion during supine exercise in normal subjects, *Acta Physiol. Scand.*, **70**, 207-214 (1967)

42) Raisz, L.G., Au, W.Y.W. and Scheer, R.L. : Studies on the renal concentrating mechanism. III. Effect of heavy exercise, *J. Clin. Invest.*, **39**, 8-13 (1959)

43) Refsum, H.E. and Stromme, S.B. : Relationship between urine flow, glomerular filtration, and urine solute concentrations during prolonged heavy exercise, *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **35**, 775-780 (1975)

44) Zambraski, E.J., Tipton, C.M., Tcheng, T.K., Jordon, H.R., Vailas, A.C. and Callahan, A.K. : Iowa wrestling study : changes in the urinary profiles of wrestlers prior to and after competition, *Med. Sci. Sports*, **7**, 217-220 (1975)

45) 飯田喜俊, 白井大祿 : 図説 カリウムのすべて, pp.6-10 (1977) 日本チバガイギー, 大阪

46) 真島英信 : 生理学, pp.480-481 (1979) 文光堂, 東京

47) Follenius, M., Candas, V., Bothorel, B. and Brandenberger, G. : Effect of rehydration on atrial natriuretic peptide release during exercise in the heat, *J. Appl. Physiol.*, **66**, 2516-2521 (1989)

48) Goodman, J.M., Logan, A.G., McLaughlin, P.R., Laprade, A. and Liu, P.P. : Atrial natriuretic peptide during acute and prolonged exercise in well-trained men, *Int. J. Sports Med.*, **14**, 185-190 (1993)

49) Tanaka, H., Shindo, M., Gutkowska, J., Kinoshita, A., Urata, H., Ikeda, M. and Arakawa, K. : Effect of acute exercise on plasma immunoreactive-atrial natriuretic factor, *Life Sci.*, **39**, 1685-1693 (1986)

50) 田中宏暁, 木下昭生, 古賀 学, 松崎元徳, 高田洋一, Gutkowska, J., 田中 守, 池田正春, 進藤宗洋, 荒川規矩男 : 長時間運動時に分泌される心房性ナトリウム利尿因子の体液調節作用, *体力研究*, **69**, 69-78 (1988)

51) 山田哲雄, 有田匡孝 : カルシウム, マグネシウム, リン代謝に及ぼす長時間運動の影響, *日本栄養・食糧学会誌*, **50**, 63-68 (1997)

52) Aloia, J.F., Rasulo, P., Deftos, L.J., Vaswani, A. and Yeh, J.K. : Exercise-induced hypercalcemia and the calciotropic hormones, *J. Lab. Clin. Med.*, **106**, 229-232 (1985)

53) Henderson, S.A., Graham, H.K., Mollan, R.A.B., Riddoch, C., Sheridan, B. and Johnston, H. : Calcium homeostasis and exercise, *Int. Orthop.*, **13**, 69-73 (1989)

- 54) Ljunghall, S., Joborn, H., Lundin, L., Rastad, J., Wide, L. and Akerstrom, G. : Regional and systemic effects of short-term intense muscular work on plasma concentration and content of total and ionized calcium, *Eur. J. Clin. Invest.*, **15**, 248-252 (1985)
- 55) Nielsen, S.P., Christiansen, T.F., Hartling, O. and Trap-Jensen, J. : Increase in serum ionized calcium during exercise, *Clin. Sci. Mol. Med.*, **53**, 579-586 (1977)
- 56) Pedersen, K.O. : Binding of calcium to serum albumin. II. Effect of pH via competitive hydrogen and calcium ion binding to the imidazole groups of albumin, *Scan. J. Clin. Lab. Invest.*, **29**, 75-83 (1972)
- 57) Warshaw, A.L., Lee, K.H., Napier, T.W., Fournier, P.O., Duchaine, D. and Axelrod, L. : Depression of serum calcium by increased plasma free fatty acids in the rat : a mechanism for hypocalcemia in acute pancreatitis, *Gastroenterology*, **89**, 814-820 (1985)
- 58) Zaloga, G.P., Willey, S., Tomasic, P. and Chernow, B. : Free fatty acids after calcium binding : a cause for misinterpretation of serum calcium values and hypocalcemia in critical illness, *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, **64**, 1010-1014 (1987)
- 59) Ljunghall, S., Joborn, H., Roxin, L.E., Rastad, J., Wide, L. and Akerstrom, G. : Prolonged low-intensity exercise raises the serum parathyroid hormone levels, *Clin. Endocrinol.*, **25**, 535-542 (1986)
- 60) Nishiyama, S., Tomoeda, S., Ohta, T., Higuchi, A. and Matsuda, I. : Differences in basal and postexercise osteocalcin levels in athletic and nonathletic humans, *Calcif. Tissue Int.*, **43**, 150-154 (1988)
- 61) Salvesen, H., Johansson, A.G., Foxdal, P., Wide, L., Piehl-Aulin, K. and Ljunghall, S. : Intact serum parathyroid hormone levels increase during running exercise in well-trained men, *Calcif. Tissue Int.*, **54**, 256-261 (1994)
- 62) Grimston, S.K., Tanguay, K.E., Gundberg, C.M. and Hanley, D.A. : The calciotropic hormone response to changes in serum calcium during exercise in female long distance runners, *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, **76**, 867-872 (1993)
- 63) Blum, J.W., Fischer, J.A., Hunziker, W.H., Binswanger, U., Picotti, G.B., Prada, M.D. and Guillebeau, A. : Parathyroid hormone responses to catecholamines and to changes of extracellular calcium in cows, *J. Clin. Invest.*, **61**, 1113-1122 (1978)
- 64) Brown, E.M., Hurwitz, S. and Aurbach, G.D. : Beta-adrenergic stimulation of cyclic AMP content and parathyroid hormone release from isolated bovine parathyroid cells, *Endocrinology*, **100**, 1696-1702 (1977)
- 65) Habener, J.F., Rosenblatt, M. and Potts, J.T., Jr. : Parathyroid hormone : biochemical aspects of biosynthesis, secretion, action, and metabolism, *Physiol. Rev.*, **64**, 985-1053 (1984)
- 66) O'Neill, M.E., Wilkinson, M., Robinson, B.G., McDowall, D.B., Cooper, K.A., Mihailidou, A.S., Frewin, D.B., Clifton-Bligh, P. and Hunyor, S.N. : The effect of exercise on circulating immunoreactive calcitonin in men, *Horm. Metab. Res.*, **22**, 546-550 (1990)
- 67) Casoni, I., Guglielmini, C., Graziano, L., Reali, M.G., Mazzotta, D. and Abbasciano, V. : Changes of magnesium concentrations in endurance athletes, *Int. J. Sports Med.*, **11**, 234-237 (1990)
- 68) Deuster, P.A., Dolev, E., Kyle, S.B., Anderson, R.A. and Schoemaker, E.B. : Magnesium homeostasis during high-intensity anaerobic exercise in men, *J. Appl. Physiol.*, **62**, 545-550 (1987)
- 69) 西牟田守, 山田哲雄, 小林修平, 鈴木一正 : 運動・栄養とマグネシウム代謝, *マグネシウム*, **2**, 49-56 (1983)
- 70) Refsum, H.E., Meen, H.D. and Stromme, S.B. : Whole blood, serum and erythrocyte magnesium concentrations after repeated heavy exercise of long duration, *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **32**, 123-127 (1973)
- 71) Flink, E.B., Brick, J.E. and Shane, S.R. : Alterations of long-chain free fatty acid and magnesium concentrations in acute myocardial infarction, *Arch. Intern. Med.*, **141**, 441-443 (1981)
- 72) Joborn, H., Akerstrom, G. and Ljunghall, S. : Effects of exogenous catecholamines and exercise on plasma magnesium concentrations, *Clin. Endocrinol.*, **23**, 219-226 (1985)
- 73) Lijnen, P., Hespel, P., Fagard, R., Lysens, R., Eynde, E.V. and Amery, A. : Erythrocyte, plasma and urinary magnesium in men before and after a marathon, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **58**, 252-256 (1988)
- 74) Rayssiguier, Y., Guezennec, C.Y. and Durlach, J. : New experimental and clinical data on the relationship between magnesium and sport, *Magnesium Res.*, **3**, 93-102 (1990)
- 75) 田沼 悟 : 生体とマグネシウム—マグネシウム不足の診断法—, *臨床栄養*, **81**, 262-269 (1992)
- 76) Steinacker, J.M., Grunert-Fuchs, M.,

- Steininger, K. and Wodick, R.E. : Effects of long-time-administration of magnesium on physical capacity, *Int. J. Sports Med.*, **8**, 151 (1987)
- 77) Isaac, J., Berndt, T.J., Thothathri, V., Tyce, G.M. and Knox, F.G. : Catecholamines and phosphate excretion by the remnant kidney, *Kidney Int.*, **43**, 1021-1026 (1993)
- 78) Woodcock, E.A. and Johnston, C.I. : Selective inhibition by epinephrine of parathyroid hormone-stimulated adenylate cyclase in rat renal cortex, *Am. J. Physiol.*, **242**, F721-F726 (1982)
- 79) Woodcock, E.A. and Johnston, C.I. : Renal proximal tubular α -adrenergic receptors oppose urinary 3,5'-cyclic adenosine monophosphate response to parathyroid hormone in vivo, *Endocrinology*, **116**, 1085-1089 (1985)
- 80) Hoppe, A., Rybczynska, A., Knox, F.G. and Angielski, S. : β -Receptors in resistance to phosphaturic effect of PTH in respiratory alkalosis, *Am. J. Physiol.*, **255**, R557-R562 (1988)
- 81) Rybczynska, A., Hoppe, A. and Knox, F.G. : Propranolol restores phosphaturic effect of PTH in short-term phosphate deprivation, *Am. J. Physiol.*, **258**, R120-R123 (1990)
- 82) 山田哲雄, 高橋徹三 : 尿中および汗中ナトリウム, カリウム排泄量に及ぼす運動の影響, 臨床スポーツ医学, **4**, 1104-1109 (1987)
- 83) 山田哲雄 : 運動とマグネシウム, 臨床栄養, **81**, 295-301 (1992)
- 84) 山田哲雄, 倉沢新一, 笠原久弥, 林 淳三 : 3時間/日の運動時におけるナトリウム, カリウム, カルシウム, マグネシウムおよびリン出納, 日本栄養・食糧学会誌, **49**, 85-93 (1996)
- 85) 山田哲雄, 倉沢新一, 笠原久弥, 林 淳三 : 1時間または2時間/日の運動時におけるナトリウム, カリウム, カルシウム, マグネシウムおよびリン出納, 日本食生活学会誌, **6**, 23-33 (1995)
- 86) Smiles, K.A. and Robinson, S. : Sodium ion conservation during acclimatization of men to work in the heat, *J. Appl. Physiol.*, **31**, 63-69 (1971)
- 87) Milledge, J.S., Bryson, E.I., Catley, D.M., Hesp, R., Luff, N., Minty, B.D., Older, M.W., Payne, N.N., Ward, M.P. and Withey, W.R. : Sodium balance, fluid homeostasis and the renin-aldosterone system during the prolonged exercise of hill walking, *Clin. Sci. (Lond)*, **62**, 595-604 (1982)
- 88) Withey, W.R., Milledge, J.S., Williams, E.S., Minty, B.D., Bryson, E.I., Luff, N.P., Older, M.W. and Beeley, J.M. : Fluid and electrolyte homeostasis during prolonged exercise at altitude, *J. Appl. Physiol.*, **55**, 409-412 (1983)
- 89) Armstrong, L.E., Costill, D.L., Fink, W.J., Bassett, D., Hargreaves, M., Nishibata, I. and King, D.S. : Effects of dietary sodium on body and muscle potassium content during heat acclimation, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **54**, 391-397 (1985)
- 90) Costill, D.L., Cote, R., Miller, E., Miller, T. and Wynder, S. : Water and electrolyte replacement during repeated days of work in the heat, *Aviat. Space Environ. Med.*, **46**, 795-800 (1975)
- 91) Convertino, V.A., Brock, P.J., Keil, L.C., Bernauer, E.M. and Greenleaf, J.E. : Exercise training-induced hypervolemia : role of plasma albumin, renin, and vasopressin, *J. Appl. Physiol.*, **48**, 665-669 (1980)
- 92) Harrison, M.H. : Effects of thermal stress and exercise on blood volume in humans, *Physiol. Rev.*, **65**, 149-209 (1985)
- 93) Kirby, C.R. and Convertino, V.A. : Plasma aldosterone and sweat sodium concentrations after exercise and heat acclimation, *J. Appl. Physiol.*, **61**, 967-970 (1986)
- 94) Smoak, B.L., Singh, A., Day, B.A., Norton, J.P., Kyle, S.B., Pepper, S.J. and Deuster, P.A. : Changes in nutrient intakes of conditioned men during a 5-day period of increased physical activity and other stresses, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **58**, 245-251 (1988)
- 95) Wyndham, C.H., Benade, A.J.A., Williams, C.G., Strydom, N.B., Goldin, A. and Heyns, A.J.A. : Changes in central circulation and body fluid spaces during acclimatization to heat, *J. Appl. Physiol.*, **25**, 586-593 (1968)
- 96) 高橋徹三 : たん白質栄養と運動, 栄養学雑誌, **42**, 213-223 (1984)
- 97) Mack, G., Nose, H. and Nadel, E.R. : Role of cardiopulmonary baroreflexes during dynamic exercise, *J. Appl. Physiol.*, **65**, 1827-1832 (1988)
- 98) 山田哲雄, 倉沢新一, 笠原久弥, 林 淳三 : 栄養所要量摂取時のエネルギー代謝に及ぼす有酸素的トレーニングの影響, 関東学院女子短期大学論叢, **86**, 49-56 (1991)
- 99) 山田哲雄, 倉沢新一, 笠原久弥, 林 淳三 : 栄養所要量摂取時のエネルギー代謝に及ぼす有酸素的トレーニングの影響—第2報 短期間の長時間トレーニングの影響—, 関東学院女子短期大学論叢, **87**, 17-22

(1992)

100) Coyle, E.F., Hopper, M.K. and Coggan, A.R. : Maximal oxygen uptake relative to plasma volume expansion, *Int. J. Sports Med.*, **11**, 116-119 (1990)

101) Francesconi, R., Maher, J., Bynum, G. and Mason, J. : Recurrent heat exposure : effects on levels of plasma and urinary sodium and potassium in resting and exercising men, *Aviat. Space Environ. Med.*, **48**, 399-404 (1977)

102) Claybaugh, J.R., Pendergast, D.R., Davis, J.E., Akiba, C., Pazik, M. and Hong, S.K. : Fluid conservation in athletes : responses to water intake, supine posture, and immersion, *J. Appl. Physiol.*, **61**, 7-15 (1986)

103) Armstrong, L.E., Hubbard, R.W., Szlyk, P.C., Matthew, W.T. and Sils, I.V. : Voluntary dehydration and electrolyte losses during prolonged exercise in the heat, *Aviat. Space Environ. Med.*, **56**, 765-770 (1985)

104) Knochel, J.P. : Potassium deficiency during training in the heat, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **301**, 175-182 (1977)

105) Torun, B., Scrimshaw, N.S. and Young, V.R. : Effect of isometric exercises on body potassium and dietary protein requirements of young men, *Am. J. Clin. Nutr.*, **30**, 1983-1993 (1977)

106) Costill, D.L., Cote, R. and Fink, W.J. : Dietary potassium and heavy exercise : effects on muscle water and electrolytes, *Am. J. Clin. Nutr.*, **36**, 266-275 (1982)

107) Lane, H.W., Roessler, G.S., Nelson, E.W. and Cerda, J.J. : Effect of physical activity on human potassium metabolism in a hot and humid environment, *Am. J. Clin. Nutr.*, **31**, 838-843 (1978)

108) Klausen, T., Breum, L., Sorensen, H.A., Schifter, S. and Sonne, B. : Plasma levels of parathyroid hormone, vitamin D, calcitonin, and calcium in association with endurance exercise, *Calcif. Tissue Int.*, **52**, 205-208 (1993)

109) Ljunghall, S., Joborn, H., Roxin, L.E., Skarfors, E.T., Wide, L.E. and Lithell, H.O. : Increase in serum parathyroid hormone levels after prolonged physical exercise, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **20**, 122-125 (1988)

110) Loven, L., Nordstrom, H., Larsson, L., Lindell, B., Sjoberg, H.E. and Lennquist, S. : Traumatically induced hypophosphataemia in anaesthetized pigs, *Acta Chir. Scand.*, **148**, 21-25 (1982)

111) Sorlie, D., Myhre, K., Saugstad, O.D. and Giercksky, K.E. : Release of hypoxanthine and phosphate from exercising human legs with and without arterial insufficiency, *Acta Med. Scand.*, **211**, 281-286 (1982)

112) Tibes, U., Hemmer, B., Schweigart, U., Boning, D. and Fotesco, D. : Exercise acidosis as cause of electrolyte changes in femoral venous blood of trained and untrained man, *Pflugers Arch.*, **347**, 145-158 (1974)

113) Brotherhood, J. R. : Nutrition and sports performance, *Sports Med.*, **1**, 350-389 (1984)

114) Seelig, M.S. : The requirement of magnesium by the normal adult. Summary and analysis of published data, *Am. J. Clin. Nutr.*, **14**, 342-390 (1964)

115) Sawka, M. N. and Montain, S. J. : Fluid and electrolyte supplementation for exercise heat stress, *Am. J. Clin. Nutr.*, **72** (2 Suppl), 564S-572S (2000)

(受理：平成18年4月24日)