

体液調節と血液流動性との関連性に対する運動の影響
-異なる環境条件における検討-

The effect of the exercise on relationship between body fluid regulation
and blood fluidity in different environmental condition.

齋藤 初恵*, 藤田 佳代*, 伊藤 拳*, 渡辺 剛*

Hatsue SAITO, Kayo FUJITA, Susumu ITO and Tsuyoshi WATANABE

推薦評議員：渡辺 剛

Abstract

We investigated the effect of the exercise on relationship between body fluid regulation and blood fluidity. Subjects were 10 healthy men (Age;24.5±2.4y.o.,Height;178.2±5.7cm, Weight;73.3±11.1kg) , and they pedaled the bicycle ergometer during 60min at 50% $\dot{V}O_{2,max}$ in control condition and hot&humidity condition. Whole blood passage time was affected by the number of erythrocyte, leukocyte and hematocrit as well as the previous research in both environmental conditions. In addition, significantly relationship was shown between whole blood passage time and serum protein in this study. In control condition, it was considered that plasma colloid osmotic pressure improved plasma volume, so body fluid was regulated. On the other hand, plasma volume was not improved only by the function of plasma colloid osmotic pressure in hot&humidity condition, so serum osmotic pressure rose. However, there was no significantly relationship between serum osmotic pressure and plasma vasopressin, and Na^+ shows no significantly change. Therefore, it was thought that metabolite by the exercise loading was more greatly related to the rise of serum osmotic pressure than dehydration.

Key wards; body fluid regulation, whole blood passage time, plasma colloid osmotic pressure, serum osmotic pressure, plasma volume

I はじめに

生体の機能を維持する上で、体液の組成および

その量を維持することは重要である。生体の体液調節系は、循環調節系や体温調節系といった他の機能系と密接に関連しており、特に運動時のよう

に循環調節、体温調節などの各機能系が高いレベルで機能している際には、体液の量やその組成の維持は、運動の継続、ときには生命にも関わる重要な因子となる。

運動時には代謝の亢進によって熱産生が高まるため、皮膚血流量の増加や発汗により体熱を放散させることで体温が調節される。皮膚血流量の増加は、皮膚以外の循環血液量の減少や静脈還流量の減少を引き起こす。また、発汗により体液が失われると、体液の浸透圧や量のバランスが崩れる。このように運動時には体液の質や量の変化が著しい。運動時の体液のバランスの変化は、①筋運動そのもの及び筋代謝産物の影響による各体液区画間での水分、電解質の移動、②運動時の体温上昇に対する体温調節反応としての発汗による脱水の影響、の2つの原因からおこるが⁴⁾、生体にはその変化を最小限にとどめる調節機構が備わっている。体液の調節は浸透圧調節系と容量調節系の2つの調節系により行われる。浸透圧調節系は細胞外液（血漿、間質液など）の浸透圧の調節を、容量調節系は細胞外液の量を調節している。

運動時の発汗（脱水）による体液、特に血漿の成分や量の変化にともなって、血液の流動性もまた変化することが想定されるが、その関わりについては未だ不明な点が多い^{3) 5) 10) 16) 18)}。そこで本研究では、運動が体液調節と血液流動性の関連性に及ぼす影響について、特に運動による発汗（脱水）の影響について、運動時の環境条件を変化さ

せて検討することを目的とした。

II 方法

1. 被験者

被験者は健康な成人男子10名（年齢 24.5 ± 2.4 歳、身長 178.2 ± 5.7 cm、体重 73.3 ± 11.1 kg）とした。実験に先立ち、被験者には本研究の目的および危険性についての十分な説明を行い、実験の被験者となることの同意を得た。

2. 実験プロトコール (図-1)

(1) 環境条件

本研究では発汗（脱水）量による影響を明確にするために、2種類の異なった環境条件下で運動を行った。運動は温度・湿度を一定にした人工気象室内で行い、人工気象室内の環境条件はコントロール（WBGT $19.2 \pm 1.3^\circ\text{C}$ 、室温 $23.0 \pm 1.6^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $50.2 \pm 9.0\%$ ）、および高温・高湿（WBGT $29.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、室温 $31.4 \pm 0.6^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $68.7 \pm 2.5\%$ ）の2条件とした。

(2) 摂取飲料

摂取飲料は市販のミネラルウォーターとした。水分摂取量と水温、摂取タイミングの設定は、アメリカ栄養士会SCANの「スポーツ栄養ワークショップ資料」¹⁾ および日本体育協会による「スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック」¹⁴⁾を参考に、運動開始20分前に400ml、運動開始20分後、40分後、60分後に各200ml、計1000ml摂取した。

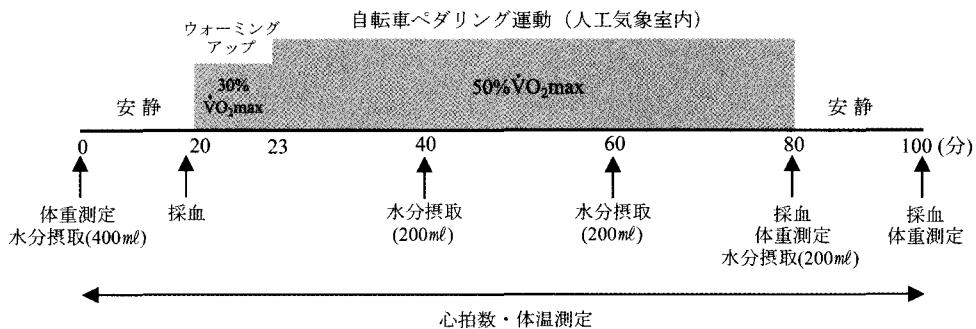


図-1 実験プロトコール

ミネラルウォーターの温度は5~15℃とした。

(3) 運動負荷

20分間の座位安静を保った後、人工気象室に入室し、運動負荷として自転車ペダリング運動を行った。運動は30% $\dot{V}O_2$ maxの負荷で3分間のウォーミングアップを行い、その後50% $\dot{V}O_2$ maxで57分間、計60分間行った。ペダリングの回転速度は60rpmとした。運動終了後には人工気象室から退室し、再び20分間の座位安静を保った。

(4) 測定項目および測定方法

測定項目は体温、心拍数、体重、ヘマトクリット（以下Hct）、血清総タンパク質、血清浸透圧、血漿バソプレシン（抗利尿ホルモン）、血中ナトリウム濃度（以下 Na^+ ）、赤血球数、白血球数、血小板数、平均赤血球容積（以下MCV）とした。体温、心拍数は安静開始から運動終了20分後まで5分ごとに記録した。体温は耳式体温計（OMRON MC-510）を用いて測定した。体重測定は安静開始前、運動終了後、運動終了20分後に行った。採血は安静開始20分後（以下安静時）、運動終了後、運動終了20分後に行った。

全血通過時間の測定はKikuchiら⁹⁾の方法によって行い、採血後ただちにヘパリンナトリウム濃度が5%になるように全血を調整し、MC-FAN KH-3（日立原町電子工業社製）を用いて、マイクロチャンネルアレイBloody 6-7（同社製、流路深4.5 μ m、流路幅7 μ m、流路長30 μ mの溝が8736本並列配置されているシリコン単結晶基板）を毛細血管モデルとし、全血液100 μ lがこの毛細血管モデルを通過する時間を測定した。各全血試料測定の直前に測定した生理食塩水100 μ lのマイクロチャンネルアレイ通過時間から、次式によって全血通過時間を算出した。

$$\text{全血通過時間(秒)} = \frac{\text{血液通過時間} \times 12 \text{秒}}{\text{生理食塩水通過時間}}$$

Hct、血清総タンパク質、血清浸透圧、血漿バソプレシン、血清総タンパク質、 Na^+ 、赤血球数、白血球数、血小板数、MCVについては、(株)三菱化学ビーシーエルに委託分析した。

(5) 統計処理

統計量は全て平均値 \pm 標準偏差で表した。環境条件間、経過時間ごとの比較にはANOVAを用い、有意差が認められた場合にはFisherのPLSDによる多重比較検定を行った。また、測定項目間の相関関係の有意差検定にはPearsonの相関係数検定法を用いた。いずれも有意水準は5%未満とした。

III 結果および考察

表-1に各環境条件における測定値の変化を示した。60分間の自転車ペダリング運動による体重減少量は、コントロールよりも高温・高湿の方が有意に多かった（運動終了後： $p < 0.01$ 、運動終了20分後： $p < 0.01$ ）。今回の運動負荷による体重減少は、ほぼ発汗によるものと考えられるため、高温・高湿の環境条件ではより多く発汗していたといえる。発汗（脱水）による体重減少の多い場合には全血通過時間が遅延することが予想されたが、運動終了後の全血通過時間はコントロールの方が高温・高湿よりも有意に通過時間が遅く（ $p < 0.05$ ）、また安静時との比較では、コントロールのみ運動終了後に有意に遅延していた（ $p < 0.05$ ）。これは、コントロールでは安静時における400mlという水分摂取が全血通過時間に影響したと推察される。すなわち、400mlの水分を一度に摂取することは負担・負荷を感じることであり、さらにコントロールでは体重減少を上回る水分量を摂取していることから、水分摂取が負荷になり、ストレスの結果として血流が遅延したと考えられる⁹⁾。一方、高温・高湿では安静時や運動中に摂取した水分は体温調節に機能したため、全血通過時間に有意な変化が見られなかったものと考えられる。

表-2に安静時から運動終了後にかけての全血通過時間と各測定項目との相関係数を示した。いずれの環境条件においてもHct（コントロール： $r = 0.553$ 、 $p < 0.05$ 、高温・高湿： $r = 0.612$ 、 $p < 0.01$ ；図-2）、赤血球数（コントロール： $r = 0.499$ 、

表-1 各環境条件における測定値の変化

測定項目	環境条件	安静時	運動終了後	運動終了20分後
体重減少量 (kg)	コントロール	—	0.84±0.10	0.91±0.11
	高温・高湿	—	1.25±0.19 ^{##}	1.38±0.24 ^{##}
全血通過時間 (秒)	コントロール	37.61±4.56	47.95±13.27 [*]	39.38±5.66 [†]
	高温・高湿	37.56±3.46	38.35±5.68 [#]	36.11±0.37
Hct (%)	コントロール	45.4±2.9	47.6±2.8	45.5±3.1
	高温・高湿	45.5±3.0	48.1±2.3 [*]	45.9±1.8
血清総タンパク質 (g/dℓ)	コントロール	7.20±0.32	7.79±0.29 ^{**}	7.33±0.31 ^{††}
	高温・高湿	7.12±0.30	8.05±0.38 ^{**}	7.55±0.36 ^{**††}
血清浸透圧 (mOsm/ℓ)	コントロール	290.6±4.6	292.4±4.1	288.5±3.6 [†]
	高温・高湿	288.3±2.3	291.8±2.9 ^{**}	287.7±2.4 ^{††}
血漿バソプレシン (pg/ml)	コントロール	6.39±3.78	8.21±4.52	6.04±3.24
	高温・高湿	6.86±4.84	9.45±4.98	7.42±5.60
Na ⁺ (mEq/ℓ)	コントロール	139.4±1.8	140.7±1.3	138.9±1.7
	高温・高湿	139.9±1.0	140.9±1.1	138.9±1.0
赤血球数 (×10 ⁴ /μℓ)	コントロール	493.0±32.3	516.5±37.1	495.2±30.9
	高温・高湿	487.5±31.5	518.9±25.8	503.7±25.1
白血球数 (/μℓ)	コントロール	5560.0±1307.4	7830.0±2052.1 ^{**}	6380.0±1781.9
	高温・高湿	5580.0±1592.2	7120.0±1790.0	6100.0±1893.8
血小板数 (×10 ⁴ /μℓ)	コントロール	23.0±2.9	26.3±3.6	23.5±3.0
	高温・高湿	23.0±4.1	26.0±3.6	24.2±4.9
MCV (fl)	コントロール	92.2±3.0	92.4±3.4	92.0±3.2
	高温・高湿	92.8±3.2	92.0±2.9	92.2±2.9

Values are Mean±SD., #, p<0.05, ##, p<0.01 vs コントロール
^{*}, p<0.05, ^{**}, p<0.01 vs 安静時
[†], p<0.05, ^{††}, p<0.01 vs 運動終了後

表-2 全血通過時間と各測定項目との相関係数

	コントロール	高温・高湿
体重減少量	0.571	-0.267
Hct	0.553 *	0.612 **
血清総タンパク質	0.650 **	0.704 **
血清浸透圧	-0.271	0.376
血漿パソプレシン	0.007	0.068
Na ⁺	0.036	0.202
赤血球数	0.499 *	0.561 *
白血球数	0.647 **	0.523 *
血小板数	0.194	0.209
MCV	0.029	0.021

*:p<0.05, **:p<0.01

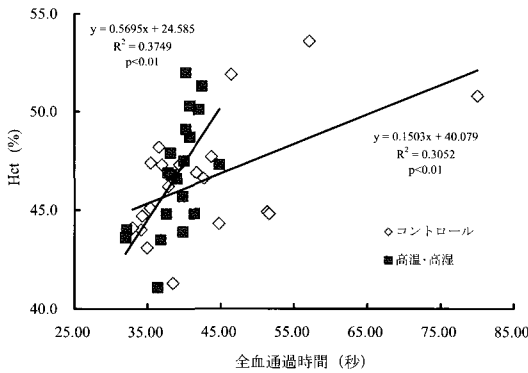


図-2 全血通過時間とHctとの相関

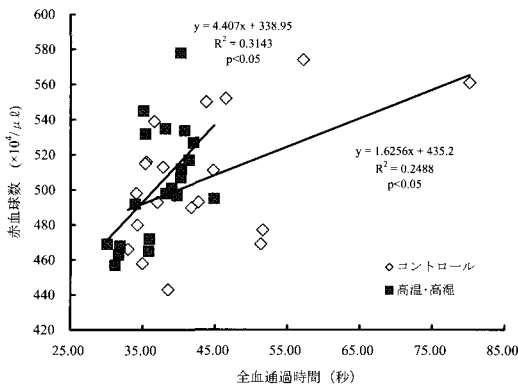


図-3 全血通過時間と赤血球数との相関

p<0.05、高温・高湿：r=0.561、p<0.05；図-3）、白血球数（コントロール：r=0.647、p<0.01、高温・高湿：r=0.523、p<0.01；図-4）で全血通過時間との間に有意な相関が認められた。これらの血液成分は、先行研究においても全血通過時間と関連があることが報告されており、特に赤血球、白血球、血小板数といった血球成分が血液流動性に影響を与え、そのためHctも血液流動性と関連が認められることが明らかにされている^{3) 7) 9) 15) 17)}。さらに本研究では血清総タンパク質と全血通過時間にも高い相関が認められた（コントロール：r=0.650、p<0.01、高温・高湿：r=0.704、p<0.01；図-5）。細胞外液である血漿と間質液では毛細血管壁を介して物質や水分の移動が常に行われている。毛細血管の内皮は、低分子は容易に通過することができるがタンパク質のような高分子は通過できず、毛細血管内外に浸透圧差が生じる（膠質浸透圧）。毛細血管内外の水分はStarlingの法則により血管内圧と膠質浸透圧の差によって移動する¹¹⁾。また血漿膠質浸透圧は血漿タンパク質濃度により決定されることが知られている¹²⁾。つまり、血漿量は血中の総タンパク質量に影響を受けるといえ、本研究においても血清総タンパク質とHctに有意な相関が認められた（コントロール：r=0.522、p<0.05、高温・高湿：r=0.611、p<0.01；図-6）。したがって、血漿膠質浸透圧のはたらきにより運動時の血漿量が調節され、それが全血通過時間に影響を与えたと考えられた。

さらに高温・高湿の運動終了後においては、Hct、血清浸透圧が安静時と比較して有意に上昇し（p<0.05、p<0.01；表-1）、また血清総タンパク質と血清浸透圧に有意な相関が認められた（r=0.499、p<0.05；図-7）。高温・高湿では血漿膠質浸透圧のはたらきだけでは血漿量は改善されずHctが上昇し、血清浸透圧もまた上昇したと考えられる。しかし血漿パソプレシンに有意な変化が認められなかったこと（表-1）、また血清浸透圧と血漿パソプレシンにも有意な相関が認められなかったことから、パソプレシン分泌による体液調節

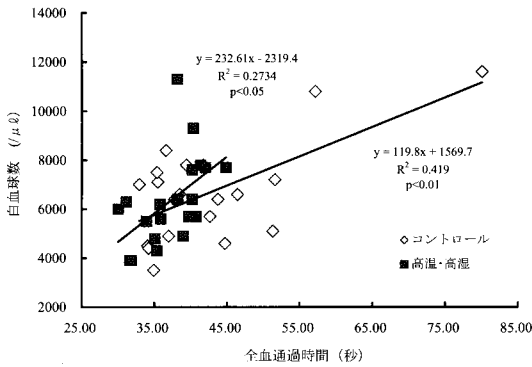


図-4 全血通過時間と白血球数との相関

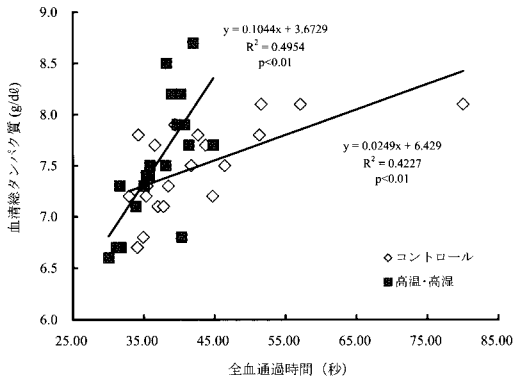


図-5 全血通過時間と血清総タンパク質との相関

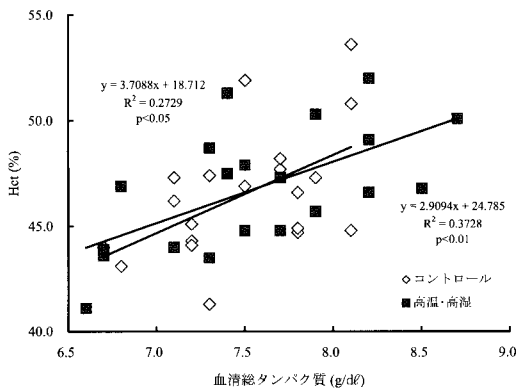


図-6 血清総タンパク質とHctとの相関

は行われていなかったと推察できる。血漿ポンプレシンは血清浸透圧上昇に対して直線的に上昇し²⁾、血清浸透圧が295mOsm/lを越えると体温上昇に伴い分泌が亢進されるといわれており²⁰⁾、また中程度以上の運動強度では血漿量の低下は血清浸透圧の上昇を伴うが、それは必ずしも脱水を伴うものではなく、筋運動によって産生された代謝産物により浸透圧が上昇するものと考えられている^{3) 21)}。これらのことより、本研究では合計で1000mlの水分摂取を行っていることから血清浸透圧に対する脱水の影響は少ないと考えられ、運動による代謝産物（乳酸など）が血清浸透圧の上昇に大きく関与していたものと考えられる。また体液調節はまず浸透圧調節系がはたらき、その後時間において容量調節系が機能するとされている¹³⁾¹⁹⁾。本研究では浸透圧調節系が機能していなかったことから、容量調節系の担い手であるNa⁺にも変化が認められなかったものと考えられた。

今回、高温・高湿では水分摂取量を上回る発汗量であったものの浸透圧調節系、容量調節系は体液調節に関与せず、また全血通過時間にも有意な変化が認められなかった。しかし、高温環境下における運動時の発汗による血液流動性への影響と、それに対する体液調節系との関わりを明確にするためには、水分摂取を行わない条件についても検討する必要があると考えられた。

IV まとめ

本研究では、コントロールおよび高温・高湿の異なった環境条件下における60分間の自転車ペダリング運動が、体液調節と血液流動性との関わりに及ぼす影響について検討した。その結果、全血通過時間は先行研究と同様に赤血球数、白血球数といった血球成分やHctの影響を受けることが明らかとなり、加えて本研究では全血通過時間と血清総タンパク質にも有意な相関が認められた。運動により発汗（脱水）がおこると、血漿量を改善させるように血漿膠質浸透圧がはたらく。血漿膠

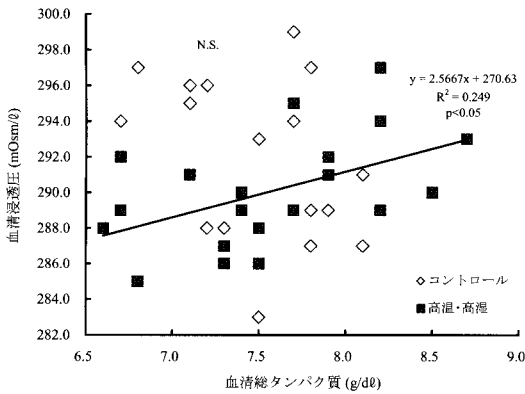


図-7 血清総タンパク質と血清浸透圧との相関

質浸透圧は血中の総タンパク質濃度により決定されることから、血清総タンパク質とHctに有意な相関が認められ、さらにHctが全血通過時間に影響を与えたと考えられた。コントロールではこの血漿膠質浸透圧の機能により体液調節がなされていたと考えられるが、一方、高温・高湿ではHctおよび血清浸透圧に有意な変化が認められたため、血漿膠質浸透圧のはたらしただけでは血漿量は改善されず、血清浸透圧も上昇したものと考えられた。しかし、血清浸透圧の上昇に血漿バソプレシンが関与していないこと、またNa⁺にも有意な変化が認められていないことから、本研究では脱水の影響よりも、運動による代謝産物が血清浸透圧の上昇に大きく関与したと考えられた。運動時の発汗による血液流動性への影響と、それに対する体液調節系の関わりについては今後さらに検討を重ねる必要があると考えられた。

引用・参考文献

- 1) アメリカ栄養士会SCAN, 1998スポーツ栄養ワークショップ資料, コーチングクリニック, 14-17, 2001
- 2) Baylis P.H., Osmoregulation and control of vasopressin secretion in healthy humans. *Am.J. Physiol.*, 253:R671-678, 1987
- 3) Galea G. et al., Hemorheology of marathon running. *Int.J.Sports Med.*, 6:136-138, 1985
- 4) 井澤鉄也, 運動とホルモン-液性因子による調節と適応-, NAP,2001

- 5) 川崎和代ほか, 最大運動の血液流動性に及ぼす影響. *日本ヘモレオロジー学会誌*, 5:17-21, 2002
- 6) 菊池佑二ほか, 水分摂取の全血通過時間に及ぼす影響. *日本ヘモレオロジー学会誌*, 6:41-45, 2003
- 7) 菊池佑二ほか, MC-FANによる全血通過時間の測定と健常者におけるその分布. *ヘモレオロジー研究会誌*, 1:53-56, 1998
- 8) Kikuchi,Y., et al., Modified cell-flow microchannels in a single-crystal silicon substrate and flow behavior of blood cells. *Microvasc.Res.*, 47:126-139, 1994
- 9) 木村達志ほか, 4週間の歩行運動トレーニングが血液流動性に及ぼす影響について. *日本ヘモレオロジー学会誌*, 6:23-27, 2003
- 10) 木村達志ほか, 運動が血液の小孔通過時間に及ぼす影響について-運動特性と水分摂取を中心に-. *体力科学*, 46:453-460, 1997
- 11) 近藤徳彦ほか, 体温-運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因-, *NAP*, 2002
- 12) Lundvall J. et al., Fluid transfer between blood and tissues during exercise. *Acta.Physiol.Res.*, 85:258-269, 1972
- 13) Nadel E.R. et al., Influence of fluid replacement beverages on body fluid homeostasis during exercise and recovery. *Perspectives in Exercise Science and Sports Medicine*,3, Fluid Homeostasis during Exercise, 181-205. Benchmark, Chelsea, 1990
- 14) 日本体育協会, スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック, 1999
- 15) 岡崎和伸ほか, 持久性運動トレーニングの全血流動性に及ぼす影響. *ヘモレオロジー研究会誌*,1:59-63, 1998
- 16) Okazaki K. et al., Effects of exercise training on thermoregulatory responses and blood volume in older men. *J.Appl.Physiol.*, 93:1630-1637, 2002
- 17) 岡崎和伸ほか, 持久性運動トレーニングによるMC-FAN全血通過時間の短縮について. *日本ヘモレオロジー学会誌*, 6:7-12, 2003
- 18) Sawka M.N. at al., Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stress, and trauma/sickness. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 32:332-348, 2000
- 19) Takamata A. at al., Sodium appetite, thirst, and body fluid regulation in humans during dehydration without sodium replacement. *Am.J. Physiol.*, 266:R1493-1502, 1994
- 20) Takamata A. at al., Body temperature modification of osmotically induced vasopressin secretion and thirst in humans. *Am.J.Physiol.*, 269:R874-880, 1995
- 21) Takamata A. at al., Effect of acute hypoxia on

vasopressin release and intra-vascular fluid during dynamic exercise in humans. *Am.J.*

Physiol.Regulatory Integrative Comp. Physiol.,
279:R161-168, 2000