Influence of Decrease in Effective Circulating Volume on Sweating Responses

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/27058

原　　著

有効循環血液量の減少が発汗反応に及ぼす影響

田辺　実・永坂　鉄夫*

Influence of Decrease in Effective Circulating Volume on Sweating Responses

Minoru Tanabe and Tetsuo Nagasaka*

Abstract

The effects of low levels of lower body negative pressure (LBNP) on sweating rate ($\dot{m}_{sw}$) and sweat expulsions (F_{sw}) were investigated in seven healthy males. The lower body of the supine subjects was put in an acrylic LBNP box, which was covered with heating equipment to maintain the air temperature inside the box at 50 °C. Measured parameters were $\dot{m}_{sw}$ on the trunk and forearm, temperatures of the tympanum (T_{ty}), esophagus (T_{es}) and skin (T_{sk}), heart rate (HR) and blood pressure (BP). F_{sw} were carefully identified on the sweat rate records from the trunk and the forearm. Mean skin ($\bar{T}_{sk}$) and mean body ($\bar{T}_b$) temperatures were calculated. After thermal equilibrium had attained, either 3.7, 7.4 or 11.0 mmHg of LBNP was applied for 4 min in a random order. The application of LBNP did not produce any change in T_{ty}, T_{es}, $\bar{T}_b$, $\bar{T}_{sk}$, BP and HR, but $\dot{m}_{sw}$ and F_{sw} decreased especially for the initial 2 min of LBNP. Since the thermal input did not change during this period of LBNP, this reduction of sweating rate may be attributed to a low-pressure cardiopulmonary baroreceptor reflex.

Key Words: Sweating rate, Lower body negative pressure, Temperature regulation, Redistribution, Dehydration

要　　旨

軽度の下半身陰圧（LBNP）負荷が発汗量（$\dot{m}_{sw}$）と発汗拍出頻度（F_{sw}）に及ぼす影響を7名の健康成人男子について検討した。被験者は背臥位にて下半身をLBNPボックスに入れ30分以上の安静を得た。その後，LBNPボックスを覆っている体加温装置内の空気の温度を50°Cまで上昇させた。胸，前腕の2カ所の$\dot{m}_{sw}$，鼓膜温（T_{ty}），食道温（T_{es}），全身7カ所の皮

北海道大学医療技術短期大学部
* 金沢大学医学部生理学第一講座
College of Medical Technology, Hokkaido University
* Department of Physiology, School of Medicine, Kanazawa University

膚温 (T_{sk})，心拍数 (HR)，血圧 (BP) を 30 秒毎に測定した。胸と前腕で同期する F_{sw} を 1 分毎に算出した。また，平均皮膚温 ($\bar{T}_{sk}$)，平均体温 ($\bar{T}_b$) を算出した。温度平衡が得られた後，3.7，7.4，11.0 mmHg の LBNP を順不同に 4 分間負荷した。T_{ty}，T_{es}，$\bar{T}_b$，$\bar{T}_{sk}$，BP，HR は LBNP 負荷で有意に変化しなかったが，$\dot{m}_{sw}$ と F_{sw} は LBNP 負荷直後の 2 分間に有意に減少した。温度入力が LBNP 負荷中一定であることから，この発汗抑制反応には低圧系一心肺圧受容器反射が関与すると推察する。

I．緒　　言

運動時あるいは暑熱下で深部体温が上昇すると，これに比例して蒸散性熱放散反応として発汗量が増加するが，その増加の程度は脱水の程度に比例して減弱される[1]。この脱水に伴う発汗抑制反応の発生機序については充分に解明されていない。エクリン腺からの汗は一般に血漿浸透圧よりも低張である[2]。それ故，発汗による脱水時には血漿浸透圧が上昇する[3]。有効循環血液量の減少と血漿浸透圧の上昇のどちらか一方[4]，あるいは両者が複合[5]して脱水時の発汗抑制反応を誘発させる可能性が示唆される。しかしながら，この点につき体温調節反応を含めた詳細な報告はない。

本研究では，脱水時の発汗抑制反応の発生機序を解明するために，有効循環血液量を血液の再分配により減少させる循環負荷として下半身陰圧 (LBNP) を用いた。短時間の LBNP の急性負荷は血漿浸透圧をほとんど変化させずに有効循環血液量のみを減少させると考えられる。そこで，発汗量および発汗拍出頻度が LBNP 負荷によりいかに影響されるか検討した。

II．方　　法

1．被 験 者

本実験の被験者は健康な成人男子 7 名（年齢 21〜28 歳）であった。著しい肥満，痩身者は被験者から除いた。被験者には実験の主旨，手順を充分に説明した上で，実験に際して危険性がないことを理解してもらい，実験に協力してもらった。食餌性熱産生の影響を取り除くため，実験開始 4 時間前は絶食とした。

2．測定項目

鼓膜温 (T_{ty}) は，耳鏡により鼓膜の位置を確認し，鼓膜温センサー（PZL-74，Technol Seven）の先端を鼓膜光錐部に当て，外耳道を脱脂綿で塞いだ。素子と鼓膜の接触の確認は Brinnel と Cabanac の基準[6]に従った。食道温 (T_{es}) は食道温センサー（PZL-74，Technol Seven）を鼻孔から約 42 cm 挿入し食道内の右心房位で最も高い温度を示す位置に留置して測定した。皮膚温 (T_{sk}) は皮膚温センサーにより全身 7 カ所の皮膚温を測定した。全ての温度測定はサーミスター温度データ集録装置 (K923，タカラ工業) により行い，サーモ分析システム（サーモスキャナープログラム，金沢コントロール機器）を介し，30 秒毎にコンピューター（PC-9801VX，日本電気）に入力した。なお，平均皮膚温は上記の全身 7 カ所で測定した皮膚温にそれぞれの部位の面積比を乗じ，以下の式より算出した。

$$\bar{T}_{sk}=0.07T_1+0.14T_2+0.05T_3+0.35T_4+0.19T_5+0.13T_6+0.07T_7$$

（但し T_1 は前額，T_2 は前腕，T_3 は手，T_4 は胸，T_5 は大腿，T_6 は下腿，T_7 は足の各皮膚温）

平均体温 ($\bar{T}_b$) は T_{ty} と $\bar{T}_{sk}$ を用い，以下の式より算出した[7]。

$$\bar{T}_b=0.9T_{ty}+0.1\bar{T}_{sk}$$

発汗量 ($\dot{m}_{sw}$) は左前腕中央部と胸部中央の 2 カ所の部位に発汗カプセル（面積 0.785 cm^2）を両面テープで貼付し，カプセル換気法により連続測定した。圧縮 N_2 ガスから減圧弁を介してカプセル内に流入する気流量はマスフローコントローラー（SEC-400MK3，エステック）により毎分 500±2 ml に調節した。カプセル内空気

の相対湿度は湿度センサー（HMP36ASPF，バイサラ社）により測定し，記録器（INR-6041，TOA）に6 cm/minの速さで記録し，同時にフロッピーに10 Hzのサンプリング周期で収録した。各カプセル内の空気の絶対湿度はその相対湿度から算出した。発汗拍出頻度（F_{sw}）は胸と前腕の相対湿度の変化で同期した発汗波から1分毎の値を計測した。

心拍数（HR）は胸部双極誘導により導出した心電図出力を心拍計（AT-600G，日本光電）を介して測定した。収縮期および拡張期血圧は右上腕部にカフを巻き，自動血圧計（MPV-7101，日本光電）により2分毎に計測した。

3．実験手順（図1）

実験は室温30±0.5℃，相対湿度40±3％の人工気象室（TBS-6-S，タバイエスペック，大阪）内で行った。被験者は実験室に短パンのみを着用した裸体で入室し，各測定素子を所定の部位に装着し，背臥位にて腸骨稜より下半身をLBNPボックスに入れ30分以上の安静を得た。その後，体加温装置内の温度を50℃まで上昇させた。LBNPボックスの外側を体加温装置で覆い，この装置内だけで空気を循環させ，その温度を調節した。空気の対流による熱放散への直接の影響がないように被験者の下半身にタオルを被せた。この体加温装置により被験者の深部体温，皮膚温を高温レベルで維持した。温度平衡が得られた後，3.7，7.4，11.0 mmHgのLBNPを4分間負荷し6分間解除する方法で順不同に繰り返し負荷した。

4．統計処理

各変量の時間経過に伴う変化は，one-way ANOVAで検定し，有意性が認められた時，paired Student's *t*-testを行った。変量は全てmean±SEとして求め，統計的有意水準は5％とした。

III．結　　果

背臥位で安静30分後の値は，T_{ty}が36.87±0.08℃，T_{es}が36.77±0.08℃，$\bar{T}_{sk}$が33.81±0.24℃，$\bar{T}_{b}$が35.95±0.10℃，HRが56.7±4.5 bpmであった。

体加温60分後で温度平衡時の値は，T_{ty}が37.11±0.08℃，T_{es}が36.97±0.11℃，$\bar{T}_{sk}$が36.30±0.17℃，$\bar{T}_{b}$が36.86±0.11℃，HRが73.1±5.0 bpmであった。これらの変量は全て安静時の値に比べ有意に高かった（$p<0.05$）。温度平衡時，$\dot{m}_{sw}$は胸部で0.87±0.22，前腕部で0.65±0.23 mg/cm²/minであった。F_{sw}は19.5±1.9/minであった。

表1はLBNP負荷におけるT_{ty}，T_{es}，$\bar{T}_{sk}$，$\bar{T}_{b}$，HR，SBP，DBPの変化を示した。T_{ty}，T_{es}，$\bar{T}_{sk}$，$\bar{T}_{b}$，SBP，DBPは有意に変化しなかった。HRは3.7，7.4 mmHgのLBNP負荷強度で有意に変化しなかった。11.0 mmHgのLBNP負荷で，負荷開始2分間は有意に変化しなかった

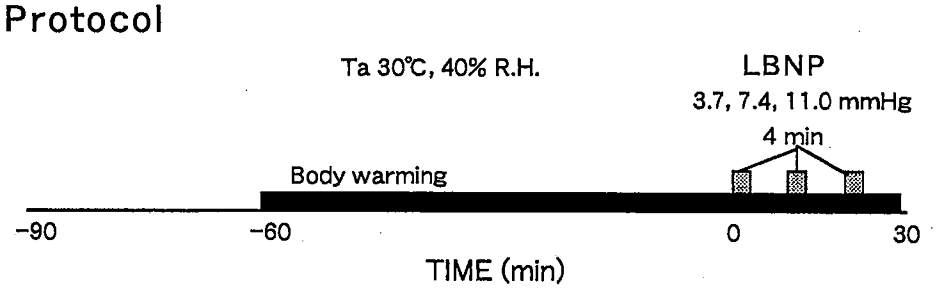

図1　実験プロトコール

表1 LBNP 負荷前，中，後の T_{ty}，T_{es}，$\bar{T}_{sk}$，$\bar{T}_{b}$，SBP，DBP，HR の変化

	負荷前	LBNP 負荷中				負荷後
	0	1	2	3	4	7 (min)
			3.7 mmHg			
T_{ty}	37.16±0.12	37.16±0.12	37.16±0.12	37.16±0.12	37.17±0.12	37.18±0.13
T_{es}	37.01±0.13	37.01±0.12	37.03±0.12	37.02±0.12	37.01±0.13	37.03±0.12
$\bar{T}_{sk}$	36.50±0.23	36.48±0.24	36.51±0.24	36.53±0.25	36.52±0.25	36.53±0.25
$\bar{T}_{b}$	36.96±0.15	36.96±0.16	36.97±0.15	36.97±0.16	36.97±0.16	36.98±0.16
HR	74.1 ±4.6	71.6 ±6.2	72.9 ±5.7	73.4 ±5.3	73.7 ±5.5	73.3 ±5.2
SBP	107.0 ±3.6	108.1 ±3.3	—	109.0 ±4.1	—	107.1 ±3.3
DBP	55.1 ±1.4	56.0 ±1.3	—	55.3 ±1.1	—	55.7 ±1.6
			7.4 mmHg			
T_{ty}	37.09±0.06	37.09±0.06	37.09±0.06	37.10±0.06	37.10±0.06	37.11±0.07
T_{es}	36.95±0.08	36.96±0.08	36.97±0.08	36.97±0.08	36.98±0.08	36.98±0.08
$\bar{T}_{sk}$	36.27±0.13	36.17±0.13	36.20±0.14	36.23±0.16	36.22±0.15	36.21±0.16
$\bar{T}_{b}$	36.83±0.08	36.81±0.08	36.82±0.08	36.84±0.09	36.84±0.08	36.84±0.09
HR	71.8 ±4.1	71.0 ±5.7	72.5 ±5.8	73.5 ±5.5	71.2 ±5.1	74.5 ±6.2
SBP	111.7 ±3.6	111.2 ±3.4	—	110.5 ±3.7	—	110.0 ±3.3
DBP	56.0 ±1.5	55.3 ±2.3	—	57.2 ±1.4	—	57.5 ±1.2
			11.0 mmHg			
T_{ty}	37.07±0.07	37.07±0.08	37.08±0.08	37.08±0.08	37.08±0.08	37.10±0.08
T_{es}	36.95±0.11	36.95±0.11	36.96±0.11	36.96±0.11	36.95±0.11	36.97±0.11
$\bar{T}_{sk}$	36.14±0.14	36.11±0.14	36.09±0.14	36.09±0.15	36.11±0.16	36.11±0.15
$\bar{T}_{b}$	36.79±0.09	36.78±0.10	36.78±0.10	36.78±0.10	36.79±0.10	36.81±0.10
HR	73.3 ±6.2	75.3 ±6.4	76.3 ±6.0	80.0 ±5.4*	78.5 ±7.2*	74.3 ±6.6
SBP	112.5 ±5.0	112.5 ±5.6	—	113.5 ±4.7	—	113.8 ±5.1
DBP	57.5 ±2.7	58.0 ±2.4	—	60.5 ±1.0	—	57.8 ±2.4

LBNP；下半身陰圧 (3.7, 7.4, 11.0 mmHg)，T_{ty}；鼓膜温 (°C)，T_{es}；食道温 (°C)，$\bar{T}_{sk}$；平均皮膚温 (°C)，$\bar{T}_{b}$；平均体温 (°C)，HR；心拍数 (/min)，SBP；収縮期血圧 (mmHg)，DBP；拡張期血圧 (mmHg)，値；平均値±標準誤差，＊；負荷前に対して有意 ($p<0.05$)

表2 LBNP 負荷前，中，後の $\dot{m}_{sw}$ の変化

	負荷前	LBNP 負荷中				負荷後
	0	1	2	3	4	7 (min)
			3.7 mmHg			
胸	0.94±0.24	0.74±0.21*	0.76±0.18*	0.85±0.18	0.87±0.19	1.02±0.24
前腕	0.62±0.18	0.52±0.16*	0.52±0.14*	0.57±0.14	0.58±0.13	0.69±0.20
			7.4 mmHg			
胸	0.88±0.23	0.74±0.25*	0.74±0.23*	0.77±0.21	0.79±0.23	1.00±0.22
前腕	0.65±0.21	0.56±0.18*	0.55±0.16*	0.60±0.15	0.63±0.18	0.69±0.21
			11.0 mmHg			
胸	0.79±0.13	0.67±0.12*	0.67±0.15*	0.71±0.14	0.76±0.19	0.89±0.20
前腕	0.69±0.20	0.57±0.18*	0.56±0.18*	0.61±0.20	0.63±0.19	0.75±0.26

LBNP；下半身陰圧 (3.7, 7.4, 11.0 mmHg)，$\dot{m}_{sw}$；発汗量 (mg/cm²/min)，値；平均値±標準誤差，＊；負荷前に対して有意 ($p<0.05$)

表3　LBNP 負荷前，中，後の F_{sw} の変化

	負荷前	LBNP 負荷中				負荷後
	0	1	2	3	4	7 (min)
3.7 mmHg	21.0±2.8	12.4±2.0*	13.6±1.4*	18.4±1.4	18.3±1.8	20.0±1.3
7.4 mmHg	18.3±1.1	11.3±1.4*	12.5±2.2*	17.3±2.8	17.0±1.8	19.8±3.4
11.0 mmHg	19.3±1.8	12.3±3.1*	13.8±2.9*	18.9±1.8	18.8±2.5	17.5±1.6

LBNP；下半身陰圧（3.7, 7.4, 11.0 mmHg），F_{sw}；発汗拍出頻度（/min），値；平均値±標準誤差，＊；負荷前に対して有意（$p<0.05$）

が，3分目以降で有意に増加した。負荷後は負荷前の値と差異がなかった。

表2は LBNP 負荷による $\dot{m}_{sw}$ の変化を示した。$\dot{m}_{sw}$ は LBNP 負荷開始直後の2分間に有意に減少した（$p<0.05$）。3.7, 7.4, 11.0 mmHg の LBNP 負荷強度による有意な差異はなかった。

表3は LBNP 負荷における F_{sw} の変化を示した。F_{sw} は LBNP 負荷開始直後の2分間に有意に減少した（$p<0.05$）。その後負荷前のレベルに戻った。3.7, 7.4, 11.0 mmHg の LBNP 負荷強度による有意な差異はなかった。

Ⅳ. 考　　察

本研究の結果から，発汗反応は LBNP 負荷により影響された。温熱性の汗腺であるエクリン腺は発汗神経活動により調節されるが，局所皮膚温にも影響される[8]。それ故，本実験では皮膚温を定常状態に維持しながら LBNP を負荷した。軽度の LBNP で T_{ty}, T_{es}, $\bar{T}_{sk}$, $\bar{T}_b$, SBP, DBP, HR は変化しなかったが（表1），$\dot{m}_{sw}$ と F_{sw} は負荷中，特に，負荷開始直後の2分間に有意に減少した（表2，3）。このような LBNP 負荷直後にみられる発汗抑制反応の機序として液性因子と神経性因子が関与すると考えられる。

$\dot{m}_{sw}$ を減弱させる液性因子としてアルドステロン，エピネフリン，ノルエピネフリン，アルギニンバゾプレッシンの4つが挙げられる。アルドステロンは発汗量を減少させ，ヒトで脱水時に血漿アルドステロン濃度を上昇させるが，アルドステロンに対する汗腺の反応は分単位よりむしろ時間単位である[9]ので，本研究の発汗抑制を説明するには不十分と考えられる。エピネフリンとノルエピネフリンの両者は時間的に充分である[10]が，ノルエピネフリンと高い相関関係にある HR[11] は，$\dot{m}_{sw}$, F_{sw} が抑制される負荷直後の2分間で変化しなかった。また，アルギニンバゾプレッシンは失神を誘発させる低血圧条件でのみ上昇がみとめられる[12]。従って，これらの液性因子はどれも LBNP 負荷中の発汗反応を減弱させる誘因にならないと考えられる。

Steven と Lamb[13] は中心静脈圧が LBNP 負荷直後からその負荷強度に比例して低下することを報告した。先行研究[14]より，軽度の LBNP 負荷（<20 mmHg）で大腿と下腿の容積変化が LBNP 負荷強度に比例して増加し，負荷中それが維持され，負荷解除後に同程度の容積変化が生じることを観察した。従って，今回の実験では中心静脈圧を測定していないが，LBNP 負荷により静脈還流量が減少し中心静脈圧を低下させると考えられる。この中心静脈圧の低下は循環圧反射を惹起させると考えられる。動脈圧受容器の活動レベルを示す SBP, DBP, HR は LBNP 負荷により有意に変化しなかった。今回の負荷レベルは循環負荷として高圧系の圧受容器よりむしろ低圧系の圧受容器が賦活されると考えられる。また，F_{sw} は LBNP 負荷直後の2分間で一過性に低下した（表3）。Sugenoya ら[15] は F_{sw} が電気神経生理学的に発汗中枢活動を反映することを報告した。従って，少なくとも発汗中枢活動を介して汗腺の活動が抑制さ

れると考えられる。軽度のLBNP負荷による発汗量の減少は，低圧系一心肺圧受容器反射を介して発汗中枢活動が抑制されて惹起されると推察される。

$\dot{m}_{sw}$，F_{sw}はLBNP負荷中減少した後，3分目以降で負荷前の値と同程度になった（表2，3）。軽度のLBNP負荷中（11 mmHg以下），3分目以降に代償機構が働くと考えられる。イヌで，心肺圧受容器反射の主要な効果器は腎臓と内蔵器官であり，骨格筋と皮膚血管にはほとんど影響しない。しかし，ヒトでLBNPのランプ負荷（−1 mmHg/min）を−50 mmHgまで行ったJohnsonら[16]の実験によれば，大動脈圧が低下し始める−20 mmHg以前に前腕の皮膚と筋の血管収縮が生じ，この時，内蔵血流量に10%の低下がみられた。低圧系の循環負荷に対して，内臓，皮膚，筋で代償機構が働くと考えられる。RotheとGoddis[17]は中心静脈圧をポンプで一定にして静脈還流量を貯溜させる手法をイヌで用いて，わずかな心拍出量の変化が著明な貯溜量の変化を生じさせること，その反応が0.3分後から有意になるが3分目でも2分目より有意に変化することを報告した。従って，完全に代償機構が成立するまでには少なくとも2分以上かかり，この点で今回の$\dot{m}_{sw}$，F_{sw}の減少の回復に2分以上要する結果と一致すると考えられる。また，HRは7.4 mmHg以下のLBNP負荷では増加せず，11.0 mmHgで3分目以降に有意に増加した（表2）。高体温下において，11.0 mmHg以上のLBNP負荷はHR増加による代償機構も加わると考えられる。

LBNP負荷強度による$\dot{m}_{sw}$の減少の程度に差異がなかった要因の一つに，LBNP負荷の変化率が低圧系圧反射の程度に影響する可能性が示唆されるが，この点については今後の研究課題としたい。

V．結　　論

軽度の下半身陰圧負荷による有効循環血液量のみの減少で，深部体温，平均体温，平均皮膚温，血圧，心拍数は変化しなかったが，発汗量，発汗拍出頻度は一過性に減少した。下半身陰圧負荷中，体温調節中枢への温度入力は一定であること，血圧，心拍数が維持されていることから，この発汗抑制は静脈還流量の減少に伴う低圧系一心肺圧受容器反射を介した反応と推察される。

VI．謝　　辞

本研究の一部は平成8年度北海道大学医療技術短期大学部研究助成金によって行われた。

引用文献

1）Sawka M. N., Young A. J., Francesconi R. P. et al.: Thermoregulatory and blood responses during exercise at graded hypohydration levels. J. Appl. Physiol. 59: 1394-1401, 1985

2）Kirby K. A. and Convertino V. A.: Plasma aldosterone and sweat sodium concentrations after exercise and heat acclimation. J. Appl. Physiol. 61: 967-970, 1986

3）Kubica R., Nielsen B., Bonnesen A. et al.: Relationship between plasma volume reduction and plasma electrolyte changes after prolonged bicycle exercise, passive heating and diuretic dehydration. Acta. Physiol. Pol. 34: 569-579, 1983

4）Fortney S. M., Vroman N. B., Berckett W. S. et al.: Effect of exercise hemoconcentration and hyperosmolality on exercise responses. J. Appl. Physiol. 65: 519-524, 1988

5）Liebert J. P., Candas V., Amoros C. et al.: Local sweating responses of different body areas in dehydration-hydration experiments. J. Physiol. (Paris) 83: 19-25, 1988

6）Brinnel H., Cabanac M.: Tympanic temperature is a core temperature in humans. J. Therm. Biol. 14: 47-53, 1989

7）Tanabe M. and Shido O.: Changes in body core temperatures and heat balance after an abrupt release of lower body negative pressure in humans. Int. J. Biometeorol. 38: 48-54,

1994
8) Nadel E. R., Bullard R. W. and Stolwijk J. A. J.: Importance of skin temperature in regulation of sweating. J. Appl. Physiol. 31: 80-87, 1971
9) Sato K. and Dobson R. L.: The effect of intracutaneous d-aldosterone and hydrocortisone on human eccrine sweat gland function. J. Invest. Dermatol. 54: 450-462, 1970
10) Vendsalu A.: Studies on adrenaline and noradrenaline in human plasma. Acta. Physiol. Scand. 49 (Suppl. 173): 1-123, 1960
11) Escourrou P., Freund P. R., Rowell L. B. et al.: Splanchnic vasoconstriction in heat-stress men: role of renin-angiotensin system. J. Appl. Physiol. 51: 1438-1433, 1982
12) Goldsmith S. R., Francis G. S., Cowlwy A. W. et al.: Response of vasopressin and norepinephrine to lower body negative pressure in humans. Am. J. Physiol. 243: H907-H973, 1982
13) Stevens P. M. and Lamb L.: Effects of lower body negative pressure on the cardiovascular system. Am. J. Cardiol. 16: 506-515, 1965
14) Tanabe M., Sakurada S., Shido O. et al.: Cardiovascular responses to low levels of lower body negative pressure in athletes and nonathletes. Jpn. J. Aerospace Environ. Med. 27: 67-73, 1990
15) Sugenoya J. and Ogawa T.: Characteristics of central sudomotor mechanism estimated by frequency of sweat expulsions. Jpn. J. Physiol. 35: 783-794, 1985
16) Johnson J. M., Rowell L. B., Niederberger M. and Eisman M. M.: Human splanchnic and forearm vasoconstrictor responses to reductions of right atrial and aortic pressure. Circ. Res. 34: 515-524, 1974
17) Rothe C. F. and Gaddis M. L.: Autoregulation of cardiac output by passive elastic characteristics of the vascular capacitance system. Circulation 81: 360-368, 1990