

体冷却がその後の正弦波状運動時における 呼吸循環系の応答に及ぼす影響

山 口 大 学 曾 根 涼 子
(共同研究者) 同 丹 信 介

Effect of Precooling on Cardiorespiratory Responses during Sinusoidal Exercise

by

Ryoko Sone, Nobusuke Tan
*Department of Exercise and Health Science,
Faculty of Education, University of Yamaguchi*

ABSTRACT

In 9 healthy young male subjects, cardiorespiratory responses during sinusoidal exercise were examined with or without whole body precooling. The work rate varied sinusoidally between 10% and 60% levels of oxygen uptake reserve at a 2-min period for 30 min. The decrease in mean body temperature of about 1.4 °C was observed by precooling for 1 hour by using a water perfused suit. The averaged, maximal, and minimal values, magnitude of response (difference between maximal and minimal values), and phase lags at the top and bottom of the work rate (ΔT_z and ΔT_n , respectively) were measured in each exercise cycle for cardiorespiratory parameters. The progressive increase in magnitude of response in oxygen uptake was delayed as a result of precooling. This phenomenon might be of peripheral origin. Based on findings of respiratory sinus arrhythmia response, an index of cardiac parasympathetic activity during sinusoidal exercise was introduced and it was suggested that cardiac parasympathetic activity tends toward greater fluctuation with a higher maximal level after precooling. Furthermore, whole body cooling before exercise

tends to increase the ΔT_z in the rate of perceived exertion, and might cause the decline in perceptual capacity of the change in work rate at a higher work rate.

要 旨

本研究は、運動前に全身冷却を行った場合と行わなかった場合の2条件下で、それぞれ運動強度が酸素摂取予備量の10～60%の範囲を2分周期で正弦波状に変化する運動を30分間行わせ、運動中の呼吸循環パラメータの応答を比較検討した。被検者は健康な男子学生9名であった。全身冷却は水還流スーツを用いて1時間かけて行い、平均体温は約1.4℃低下した。正弦波状運動時のデータから、1運動周期毎に平均値、最大値、最小値、振幅（最大値と最小値の差）、および運動強度曲線の最高点および最低点における位相遅れ時間（それぞれ、 ΔT_z および ΔT_n ）を計測した。その結果、運動前に全身冷却を行うこと（precooling）によって、時間経過に伴う酸素摂取量の振幅応答の増大は遅れることが示された。そして、それは、末梢性に生じている可能性があると考えられた。また、心臓副交感神経活動度の指標である呼吸性不整脈の大きさの応答から、心臓副交感神経活動はprecoolingによって正弦波状運動時により大きく変動するようになる傾向があること、およびそれはその活動の最高レベルが高まるためであることが示唆された。加えて、正弦波状運動時の自覚的運動強度の ΔT_z はprecoolingによって増大する傾向があり、precoolingはより強い運動強度の場合に運動強度の変化に対する認知能力を低下させる可能性があると考えられた。

緒 言

ウォーミングアップは、体温を上昇させ、運動に対する呼吸循環系の応答性を向上させることがよく知られている⁷⁾。しかし、体温上昇は、持久

性運動パフォーマンスの制限因子でもある。そこで逆に、運動前に低温の部屋に滞在したり、冷水浴によって体温を下げること（precooling）で、運動中の体温を低くし、運動パフォーマンスが改善されるか否かが調べられている^{1, 2, 9, 13, 20)}。その結果、いくつかの報告は、高強度の運動について、同一時間内の運動量が増えたり、同一強度での運動時間が長くなることを認めている^{2, 9, 13)}。このように、precoolingは、ある種の運動パフォーマンスの改善に効果があるようだが、ウォーミングアップを行った場合とは逆に、呼吸循環系の応答性を低下させることが推測される¹⁶⁾。

運動に対する呼吸循環系の応答性が低下すると、全く同じ運動を行ったとしても、特に運動初期において、酸素不足は大きくなり、自覚的にはよりきつく感じられるであろう。precoolingを行った場合と行わなかった場合で運動時の自覚的運動強度（RPE）を調べて比較した研究はある^{2, 21)}が、運動初期の応答については検討していない。運動初期に酸素不足やRPEの増大が生じるならば、それらは運動パフォーマンスに影響するほどのものではないかもしれないが、precoolingがもたらす不利益の一つである。

運動初期には、心拍数（HR）は主に心臓副交感神経活動の抑制によって急増する¹⁸⁾。これは、酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）を速やかに増加させることに役立つ。したがって、仮に、precooling後にHR、ひいては $\dot{V}O_2$ の応答性が変化するならば、それらの変化は、一部には心臓副交感神経性に生じている可能性があると考えられる。しかし、そのような検討を行った先行研究は見当たらない。

われわれは、日常的には、急に歩き始めたり、止まったりといったように、運動強度が軽～中等

度の間で急に变化するような運動を繰り返し行っている。仮に、precooling後にそのような運動を行ったとすると、酸素不足やRPEの増大が周期的に生じ、最終的には疲労感の増大を引き起こす可能性があると考えられる。実際に、夏期には、空調機器の普及によって、より高温な環境に急に曝され身体活動を行う機会が増えている。それゆえ、より日常的な運動に対する呼吸循環パラメータの応答性がprecoolingによってどのように変化するか、およびその機序は非常に興味深い。

非定常運動負荷法の一つである正弦波状運動負荷法は、運動強度が正弦波状に時々刻々と変化するため、機能もそれを追従しようとして絶えず変化し、その応答性は振幅や運動強度曲線に対する位相の遅れ時間によって評価できる⁶⁾。そこで、本研究では、precoolingを行う場合と行わない場合の2条件下で、運動強度が軽～中等度の範囲を比較的短い周期(2分)で正弦波状に変化する運動(正弦波状運動)を行わせ、運動中の呼吸循環パラメータの応答を比較検討することにした。また、心臓副交感神経活動度の指標であるHRの呼吸に伴う変動、いわゆる呼吸性洞性不整脈(RSA)の大きさ^{3,8)}を観察することによって、precoolingによる正弦波状運動時の呼吸循環系の応答性の変化に対する心臓副交感神経の貢献についても検討することを目的とした。

1. 方法

1.1 被検者

被検者は、定期的な運動を行っておらず、非喫煙者である健康な男子大学生9名とした。被検者の身体特性は表1に示した。被検者には前もって

表1 Physical characteristics and peak oxygen consumption ($\dot{V}O_{2peak}$) of subjects

Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	%Fat (%)	$\dot{V}O_{2peak}$ (ml/kg/min)
n=9 20.7±0.3	173.2±1.3	68.7±3.0	18.0±1.5	43.5±1.7

n; number of subjects, M ± SE

実験の目的、内容等について十分に説明を行い、参加の同意を得た。被検者は、実験前日は普段行わないような特別な身体活動を控え、体調を整えた。実験の12時間前からはアルコールおよびカフェイン入りの飲料の摂取、2時間前からは水以外の飲食物の摂取を行わなかった。また、実験当日は、測定の前2時間以上前に起床し、運動を行ったり、風呂に入ったりせずに実験室に来室した。

1.2 実験手順

まず、最大運動負荷試験を行い、酸素摂取予備量($\dot{V}O_{2reserve}$)を求め、正弦波状運動負荷試験の運動強度を決定した。正弦波状運動負荷試験は、その前に全身冷却を行った場合(cooling条件)と行わなかった場合(control条件)に各2回ずつ、日を変えて計4回行った。各条件における2回の運動負荷試験では、それぞれ正弦波状運動中にRSAの大きさ(RSA実験)とRPE(RPE実験)を連続的に測定した。また、被検者には、正弦波状運動や測定に慣れてもらうために、事前に練習を行ってもらった。運動負荷試験の間隔は、疲労やトレーニング効果の影響を避けることなどのため、3日以上7日以内とした。実験中の室温および湿度は、それぞれ25.1±0.1℃および56.4±0.7%であった。

1. 最大運動負荷試験

被検者は、半仰臥位の自転車エルゴメータ(Lode社、アンギオWLP-300)を用いて多段階漸増負荷法によって、疲労困憊まで運動した。最高酸素摂取量($\dot{V}O_{2peak}$)の出現時点におけるガス交換率、HR、およびRPEは、それぞれ1.14±0.02, 191.9±2.3 beats/min, および19.8±0.2であった。

2. 体温コントロールおよび正弦波状運動負荷試験

(1) 体温コントロール

被検者は、実験室に来室後、まず、心電図用電

極 (CM5誘導) と皮膚温測定用熱電対 [上背部 (T1), 下背部 (T2), 腹部 (T3), 上胸部 (T4), 大腿部 (T5), および下腿部 (T6)] を体に貼付した後, 水還流スーツ (頭部を除く) を着用した。そして, 椅座位で食道温測定用熱電対を口腔から食道内に身長約4分の1の長さまで挿入した。被検者には同姿勢で安静を保たせ, cooling と control の両条件において, まず, 平均皮膚温 ($\bar{T}_{sk} = 0.21T1 + 0.19T2 + 0.14T3 + 0.22T4 + 0.14T5 + 0.11T6$) ¹⁹⁾ が34℃付近になるように恒温槽を用いて水還流スーツに流す水の温度を調節した (水温: 約30℃)。 \bar{T}_{sk} が安定した後に, RSA 実験では呼吸曲線を, RPE 実験では $\dot{V}O_2$ をそれぞれ測定するために呼吸マスクを装着し, 測定を3分間行った (baseline 期)。 RSA 実験の場合は, baseline 期の1分以降, カセットテープに録音した検者の声およびメトロノームの音に合わせて3秒周期 (吸気時間: 1.5秒, 呼気時間: 1.5秒) の呼吸を行った。 baseline 期終了後, 呼吸マスクをはずし, cooling 条件の場合は, 約20分間かけて還流水温を約10℃まで下げ, それ以降の40分間は水温を維持した (体温コントロール期)。 control 条件の場合は, 60分間, 最初の水温を保つようにした。 体温コントロール期終了後は, 速やかに水還流スーツを脱ぎ, 軽く体操した後に, 自転車エルゴメータ (前出) 上に移動し, 呼吸マスクを装着した。 体温コントロール期終了後5分から, 正弦波状運動負荷試験を開始した。

(2) 正弦波状運動負荷試験

まず, 安静時の測定を3分間行った後に, 運動強度が $\dot{V}O_{2reserve}$ の10~60%の範囲を2分周期で正弦波状に変化する自転車運動を30分間行った。ペダル回転数は60回転/分とした。 RSA 実験の場合は, baseline 期と同様にして, 安静時 (2分間) および正弦波状運動時に3秒周期の呼吸を連続して行った。 また, RPE 実験の場合は, 正弦波状運動中, 5秒毎にRPE計測装置 (サンエイ山口) か

ら発生する音, およびその装置上に点灯するランプに合わせて, 被検者自身が運動のきつさをBorgスケール (6~20) から選び, 選んだ数値を装置のキーボードから入力した。

1. 3 測定および解析

心電図, 食道温 (T_{es}), および局所皮膚温 (T_{sk}) は実験を通して連続測定した。心電図は, 心電計 (NEC社, Bioview1000) によって測定し, 同時に瞬時心拍計 (NEC社, 1321) を介して瞬時HRに変換した。 T_{es} は, ポータブル熱電対温度計 (ユニークメディカル社, PTM-301-6S) によって測定した。瞬時HRと T_{es} は, Power Labシステム (AD Instruments社, 16sp) を用いてコンピュータ (アップル社, iBook) に1秒間隔で保存した。 T_{sk} は, ハイブリッドレコーダ (横河電気社, HR2300) によって測定し, コンピュータ (NEC社, Lavie Nr13) に1秒毎に保存した。

体温コントロール期には, 温熱感覚 (0~8, 0:非常に寒い, 4:快適である, 8:非常に暑い) ¹¹⁾ を5分ごとに測定した。また, 正弦波状運動負荷試験の開始時と終了時にも温熱感覚を測定した。

baseline 期と正弦波状運動負荷試験時において, RSA 実験では, 熱線呼吸流量計 (ミナト医科学社, RF-HE) を用いて呼吸量を連続測定した。 RPE 実験では, 自動呼気ガス分析システム (ミナト医科学社 RM-300i, ウェストロン社 WSMR-1400) によって $\dot{V}O_2$ を1呼吸毎に連続測定し, コンピュータ (EPSON社, Type-VN5) に保存した。また, RPE計測装置から出力されるRPE値に対応した電圧信号を, Power Labシステムを用いて, 瞬時HRおよび T_{es} とともにコンピュータに1秒間隔で保存した。

心電図と呼吸量は, 測定時に500Hzのサンプリング周波数でA/D変換し, コンピュータ (アップル社, Quadra650) に保存した。そして, 後刻,

心電図からRR間隔(HR)を1拍毎に、呼吸量から1回換気量を1呼吸毎に解析用プログラムを用いて自動計測した。RSAの大きさは、移動平均法を用いて抽出したRR間隔の呼吸性変動から、呼吸量の変化をもとにして、1呼吸毎に求め(Δ RR), それを1回換気量で除して1ℓあたりに換算した(Δ RRst)¹⁷⁾。平均体温(Tb)は、 $Tb = 0.65T_{es} + 0.35T_{sk}$ で求めた⁹⁾。

baseline期および正弦波状運動負荷試験の安静時におけるHR(RR間隔), Δ RRst, $\dot{V}O_2$, および体温(T_{es} , T_{sk} , およびTb)の値は、それぞれの2分間の値を平均した。正弦波状運動時の体温の値については1運動周期毎に平均した。また、HR, Δ RRst, RPE, および $\dot{V}O_2$ については、1運動周期毎に各パラメータの平均値、および運動強度曲線の最高と最低に対する応答の極値[最大値(MAX)および最小値(MIN)], および位相遅れ時間(それぞれ、 ΔT_z および ΔT_n)をそれぞれ求めた。また、MAXからMINを差し引くことによって振幅(MAG)も求めた。

1. 4 統計処理

データは、すべて平均値±標準誤差で示した。各パラメータについて、baseline期の値(base 1)と正弦波状運動負荷試験の安静時における値(base 2)の各値の条件間比較および各条件における両値間の比較をpaired t-testによって行った。また、温熱感覚については正弦波状運動負荷試験前後の値についてもpaired t-testによって比較した。体温, HR, $\dot{V}O_2$, および Δ RRstについて、base 2および1運動周期ごとの平均値は、時間とprecoolingの有無を要因として、two-way ANOVA for repeated measuresを用いて検定した。また、HR, $\dot{V}O_2$, RPE, および Δ RRstの1運動周期ごとの平均値, MAX, MIN, MAG, ΔT_z , および ΔT_n は、時間とprecoolingの有無を要因として、two-way ANOVA for repeated measuresを用い

て検定した。ANOVAの結果、時間とprecoolingの有無の要因の有意な影響が見られた場合は、それぞれContrastおよびFisher's PLSD法を用いて更に検定を行った。統計処理の危険率は5%水準で有意とした。

2. 結果

cooling条件において、体温コントロール期に震えが継続して自覚あるいは観察された場合には、全身冷却を中止し、被検者の体調によって可能な場合は運動負荷試験を行うことにしていたが、実際に継続して震えが認められた者はおらず、断続的に認められた者が1名であり、全員が実験を完遂した。

RSA実験とRPE実験で共通して測定された T_{es} , Tb, T_{sk} , HR, および温熱感覚の結果に差はなかったため、それらの結果は、両実験結果の平均値で示した。

2. 1 base 1とbase 2の比較(図1および2)

全パラメータにおいて、base 1はcontrol条件とcooling条件の間で差はなかった。 T_{es} は、両条件でbase 1とbase 2の間に有意な差はなかった。Tbおよび T_{sk} は、両条件でbase 1に比べてbase 2の方が有意に低く($p < 0.05$)、base 2はcontrol条件よりcooling条件の方が有意に低かった($p < 0.05$)。HRおよびRR間隔は、control条件の場合にはいずれもbase 1とbase 2の間に差はなかった。一方、cooling条件の場合には、base 2の方が有意にHRは低く、RR間隔は大きかった($p < 0.05$)。その結果、HRおよびRR間隔のbase 2の値は、条件によって有意に異なった($p < 0.05$)。 $\dot{V}O_2$ は、controlとcoolingの両条件において、base 1よりbase 2の方が僅かに大きかった($p < 0.05$)。 Δ RRstは、control条件の場合にはbase 1とbase 2の間に差はなく、cooling条件の場合にはbase 2の方が有意に大きかった($p < 0.05$)。

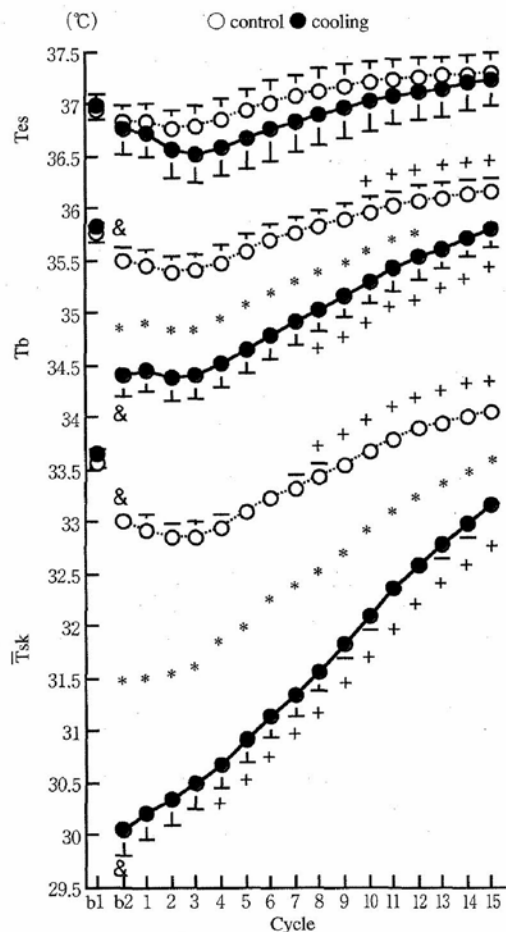


図1 Time courses of body temperature in control and cooling experiments

Tes; esophageal temperature, Tb; mean body temperature, Tsk; mean skin temperature, b1; base 1, b2; base 2, &; vs b1, +; vs b2, *; control experiment vs cooling experiment

温熱感覚の base 1 および base 2 の値は、それぞれ control 条件が 3.8 ± 0.1 および 3.4 ± 0.2 , cooling 条件が 3.8 ± 0.1 および 2.2 ± 0.2 であり、両条件で base 2 の方が低値を示したが ($p < 0.05$), base 2 の値は cooling 条件の方が明らかに低かった ($p < 0.05$).

2. 2 正弦波状運動負荷試験時の応答

正弦波状運動時における 1 運動周期ごとの平均値の経時変化を Tes, Tb, および Tsk については図 1, HR, RR 間隔, $\dot{V}O_2$, RPE, および $\Delta RRst$ については図 2 に示した. また, HR, $\dot{V}O_2$, RPE, および $\Delta RRst$ の MAX, MIN, および MAG, および ΔT_z および ΔT_n の経時変化はそれぞれ図 3 および図 4 に示した. なお, $\dot{V}O_2$ と $\Delta RRst$ について

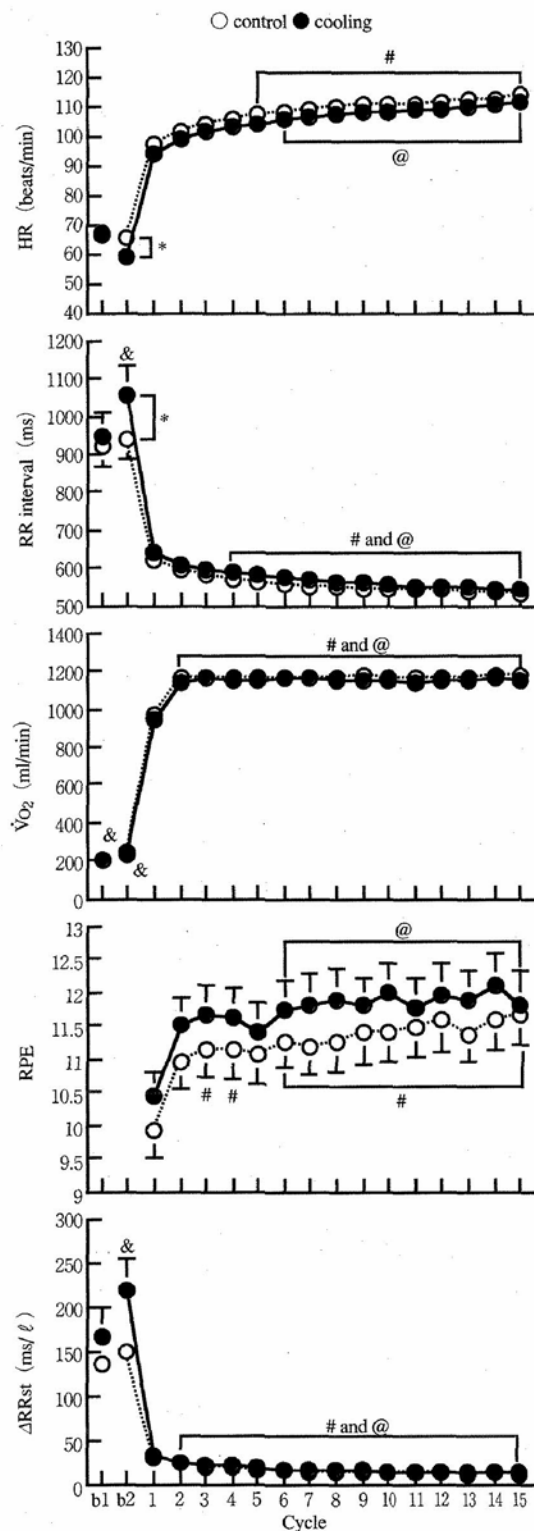


図2 Time courses of HR, RR interval, $\dot{V}O_2$, RPE, and $\Delta RRst$ in control and cooling experiments

$\Delta RRst$; magnitude of respiratory sinus arrhythmia adjusted for tidal volume, b1; base 1 b2; base 2, &; vs b1, *; control experiment vs cooling experiment, # and @; vs first cycle in control and cooling experiments, respectively

は、それぞれ MIN および MAX が運動終了までに出現しなかった被検者が数名認められたため、15

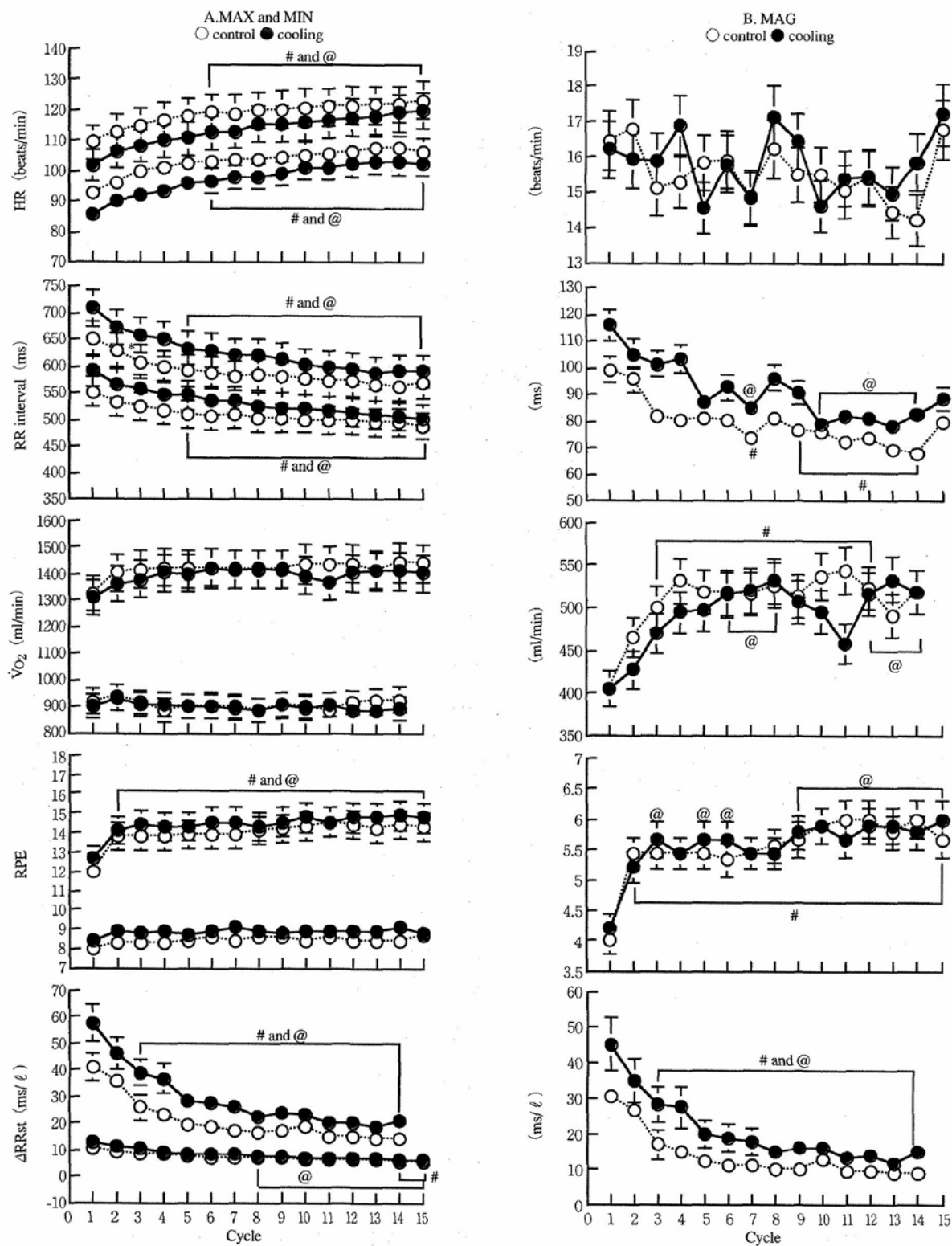


図3 Maximal and minimal (A) and magnitude (B) responses in HR, RR interval, $\dot{V}O_2$, RPE, and $\Delta RRst$ to sinusoidal exercise

magnitude; maximal value minus minimal value, $\Delta RRst$; magnitude of respiratory sinus arrhythmia adjusted for tidal volume, # and @; vs first cycle in control and cooling experiments, respectively

周期目のMINまたはMAX, MAG, および ΔT_n は図中に示されていない。

1) 体温

Tesの1運動周期ごとの平均値は、control条件より cooling条件の方が全体的に低値を示したが、

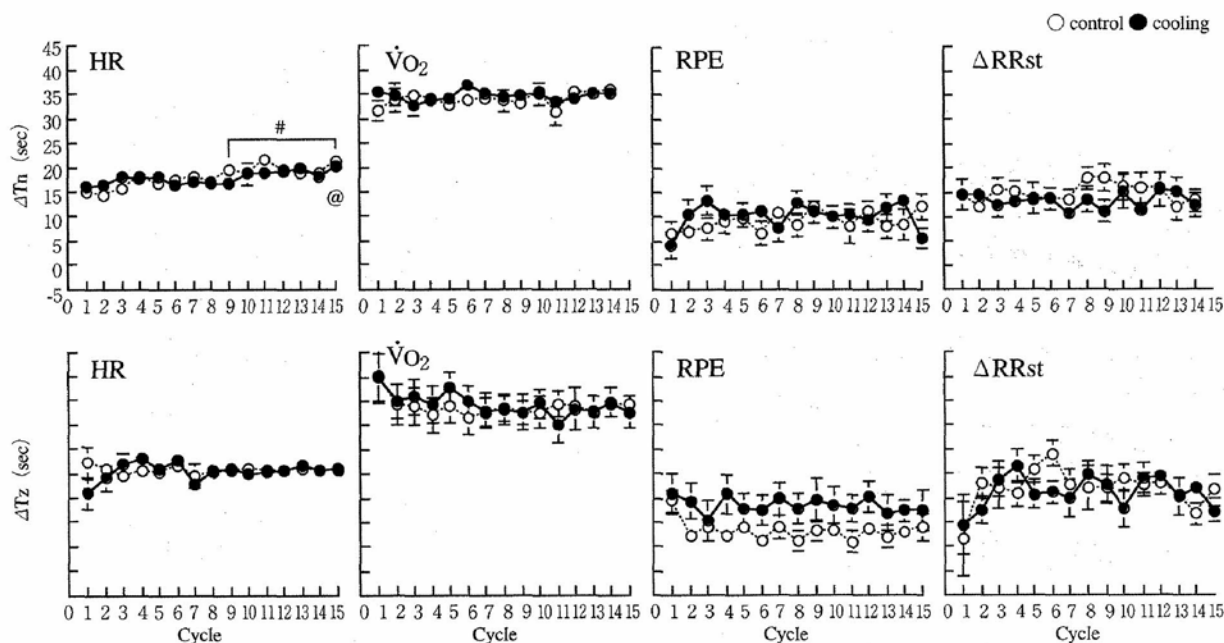


図4 Phase response in HR, $\dot{V}O_2$, RPE, and $\Delta RRst$ to sinusoidal exercise

ΔT_z and ΔT_n ; phase lag at maximal work rate and at minimal work rate, respectively, $\Delta RRst$; magnitude of respiratory sinus arrhythmia adjusted for tidal volume, # and @; vs first cycle in control and cooling experiments, respectively

条件による有意な差はなかった。Tesは、統計上有意な変化ではなかったが、正弦波状運動の開始から数周期にわたって一過性に低下する傾向があった。TbおよびTskは、それぞれ正弦波状運動の開始から12および15周期までcooling条件の方が有意に低かった ($p<0.05$)。base 2との比較では、Tbは、control条件では10周期、cooling条件では8周期以降、有意に高値を示した ($p<0.05$)。また、Tskはcontrol条件では8周期、cooling条件では4周期以降、有意に高値を示した ($p<0.05$)。

2) 呼吸循環パラメータ

HR, RR間隔, $\dot{V}O_2$, および $\Delta RRst$ について1運動周期ごとの平均値をbase 2と比較すると、いずれもcontrolとcoolingの両条件で1周期目に有意に変化した ($p<0.05$)。

HRおよびRR間隔：1運動周期ごとの平均値について、1周期目の値との比較では、HRについてはcontrol条件で5周期、cooling条件で6周期以降、有意に高値を示した ($p<0.05$)。RR間隔については両条件で4周期以降、有意に低値を示した ($p<0.05$)。HRおよびRR間隔のMAXおよびMIN

も、1周期目との比較の結果、両条件で4~6周期以降有意な変化が見られた ($p<0.05$)。MAGは、RR間隔についてのみ、両条件で7周期以降の多くの周期で有意に小さい値が見られた ($p<0.05$)。位相遅れ時間についてみると (HRとRR間隔では同じ値になるため、図4にはHRの位相遅れ時間として示した)、 ΔT_z には有意な変化は見られなかった。一方、 ΔT_n はcontrol条件では9周期以降、cooling条件では15周期のみ、有意に高値を示した ($p<0.05$)。また、HRとRR間隔の全測定項目において、control条件とcooling条件の間に有意な差はなかった (ANOVA, N.S.)。

$\dot{V}O_2$ ：1運動周期ごとの平均値は、controlとcoolingの両条件において、1周期目と比較して2周期目以降、有意に高値を示した ($p<0.05$)。MAX, MIN, および位相遅れ時間には、いずれにも時間による有意な変化はなかった。 $\dot{V}O_2$ のMAGは、1周期目の値と比較して、control条件では3周期以降、13周期目を除いて有意に大きかった。一方、cooling条件では、6~8周期および12~14周期のMAGが有意に大きかった ($p<0.05$)。また、 $\dot{V}O_2$ の全測定項目において、control条件と

cooling 条件の間に有意な差はなかった (ANOVA, N.S.).

RPE: 1 運動周期ごとの平均値は, 1 周期目との比較の結果, control 条件では 3 周期以降 (5 周期目を除く), cooling 条件では 6 周期以降, 有意に高値を示した ($p < 0.05$). MAX は両条件において 2 周期以降, 有意に高値を示した ($p < 0.05$). MAG は control 条件では 2 周期以降, cooling 条件では 3, 5, および 6 周期, および 9 周期以降に有意に大きい値を示した ($p < 0.05$). RPE の MIN および位相遅れ時間には時間による有意な影響は見られなかった. 条件間の比較では, ΔT_z において control 条件と比較して cooling 条件で全体的に大きい傾向があった (ANOVA, $p = 0.127$) が, それ以外の測定項目には差はなかった.

ΔRR_{st} : 1 周期目との比較では, 一運動周期ごとの平均値は両条件において 2 周期以降, 有意に低値を示した ($p < 0.05$). MAX および MAG は両条件において 3 周期以降, MIN は control 条件では 14 周期以降, cooling 条件では 8 周期以降に有意に低値を示した ($p < 0.05$). ΔRR_{st} の位相遅れ時間は, 時間によって有意に変化しなかった. 条件間の比較では, MAX および MAG は, いずれも control 条件に比べて cooling 条件の方が全体的に大きい傾向が見られた (ANOVA, $p = 0.062$ および 0.063). それら以外の測定項目には条件による差はなかった.

3) 温熱感覚

温熱感覚の正弦波状運動負荷試験前後の値は, それぞれ control 条件が 3.4 ± 0.2 および 5.9 ± 0.1 , cooling 条件が 2.2 ± 0.2 および 5.1 ± 0.2 であり, 前後ともに条件による差は有意であった ($p < 0.05$).

3. 考 察

3. 1 precooling が安静時の体温および呼吸循環パラメータに及ぼす影響

安静時において, ヒトが寒冷に暴露されると, 一般に以下のような反応が起こる⁴⁾. 交感神経活動が活性化し, 皮膚血管が収縮し, 皮膚血流量が減少する. そのため, 皮膚温が低下し, 身体から外部環境への熱放散が抑制される. そして, 皮膚血流量の減少だけで深部体温が保持できなくなると, 熱産生量の増加が加わる. 熱産生を亢進しても深部体温が保持できなくなったとき, 深部体温は低下する. 本研究では, precooling によって, T_{sk} (base 1: $33.6 \pm 0.1^\circ\text{C}$, base 2: $30.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$) および T_b (base 1: $35.8 \pm 0.4^\circ\text{C}$, base 2: $34.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$) は顕著に低下したが, T_{es} (base 1: $37.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$, base 2: $36.8 \pm 0.2^\circ\text{C}$) には明らかな変化は見られなかった. precooling に関する先行研究^{1, 20)}では, 本研究より短時間の precooling で T_{es} の顕著な低下 (約 0.5°C) を認めている. しかし, その場合には, 熱の伝導性の高い水に直接浸ることによって precooling を行っている. 本研究の $\dot{V}O_2$ の base 1 と base 2 には, いずれにも control 条件と cooling 条件の間に差はなかった. 両条件で base 1 より base 2 の方が高値を示したが, これには, 姿勢の相違, すなわち base 1 が椅座位安静状態であったのに対して, base 2 が自転車上座位安静状態であったことが関係しているであろう. また, precooling 中にふるえが生じた被検者は 1 名のみであった. これらのことから, 本研究における precooling は, 熱産生量にほとんど影響しないような, 比較的軽度の冷負荷であったといえるであろう.

cooling 条件において, 体温コントロール期後に HR の低下と ΔRR_{st} の増加が見られた. RSA の大きさは呼吸条件に依存して変化するが, 本研究では呼吸周期は一定とし, RSA の大きさに対

する1回換気量の影響は単位1回換気量当りに換算することによって補正した¹⁷⁾。したがって、 $\Delta RRst$ は心臓副交感神経活動度をよりよく反映したであろうと考えられ、その増加は、心臓副交感神経の活性化によって生じたことが推測される。心臓副交感神経の活性化はHRを低下するように作用するから、本研究の結果は、約60分間の全身冷却によって、徐脈化が顕著に生じること、およびその徐脈化現象には心臓副交感神経活動度の変化が関係することを示唆する。われわれは、先に同様な結果を認めて報告しており²²⁾、その研究結果は、心臓交感神経活動は全身冷却（水還流スーツの水溫：10℃、冷却時間：40分間）によって変化しないことを示唆している。

3. 2 precooling が正弦波状運動時の体温および呼吸循環パラメータに及ぼす影響

正弦波状運動時における体温の経時変化（1運動周期ごとの平均値）をみると、 T_{es} は、controlとcoolingの両条件で、統計上有意ではないが初期に低下する傾向がみられ、その後上昇した。運動開始後の T_{es} の一過性の低下は、先行研究においても低温および常温の両環境下で認められており、運動強度が強いほど著しくなるという⁵⁾。この現象は、皮膚表面の低い温度の血液が体深部へ流入することにより生じるとされている。 T_b と T_{sk} は、運動開始時（base 2）にはcontrol条件よりcooling条件の方が顕著に低値を示したが、運動の開始後、cooling条件の方がより早期に有意に上昇し、両条件間の差は周期を重ねる毎に小さくなった。しかし、両条件間の差は、 T_b については12周期まで、 T_{sk} については正弦波状運動を通して有意であった。したがって、本研究では、正弦波状運動中、control条件よりcooling条件の方が常により低い体温レベルで推移したことになる。被検者の温熱感覚が運動終了後においてもcooling条件の方が低かったことは、その体温差

を反映するものであろう。

本研究の結果、正弦波状運動時における時間経過に伴う $\dot{V}O_2$ のMAGの増大は、control条件と比べてcooling条件で遅れることが認められた（図3）。これは、 $\dot{V}O_2$ のMINとMAXの応答がprecoolingの影響を受けて変化したことによるわけだが、HRのMIN、MAX、およびMAGの応答に、 $\dot{V}O_2$ の結果を説明するような条件間の差は見られなかった。したがって、precoolingによる $\dot{V}O_2$ のMAG応答の変化には、HR以外の因子が関係すると考えられる。ウォーミングアップは、体温を上昇させ、ヘモグロビンの酸素解離曲線を右方にシフトさせ、運動初期の $\dot{V}O_2$ の立ち上がりを速める。それによって、運動初期の酸素不足を抑制し、有酸素能力を高めると言われている⁷⁾。precoolingについては、逆に体温を低下させるので、ヘモグロビンの酸素解離曲線を左方にシフトさせることになり、運動に対する $\dot{V}O_2$ の応答性を低下させることが推測され、それが本研究の結果に関係している可能性があると考えられる。固定負荷運動の場合に、運動初期の $\dot{V}O_2$ の応答が体冷却によって緩徐になることが認められている¹⁶⁾。正弦波状運動時における $\dot{V}O_2$ の経時変化（1運動周期ごとの平均値）にはcontrolとcoolingの両条件間に差は見られなかった。それは、本研究が正弦波状運動に対する応答に焦点を当てたものであり、2分ごとの平均値を採用したことによると考えられる。また、precoolingは、運動時の皮膚血流量の増加を抑制し、活動筋へより多くの血流を配分させることが考えられている^{12, 14)}。したがって、precoolingの $\dot{V}O_2$ 応答への影響は、ヘモグロビンの酸素親和性の増大による筋の酸素利用の低下、筋への血液配分の増大による酸素運搬の増大などが総合された結果であるといえよう。

本研究において、precoolingによって、 $\Delta RRst$ のMAXおよびMAGは増加する傾向が見られた。 $\Delta RRst$ のMAXは、運動強度の最低点に対応する。

したがって、precoolingは、正弦波状運動時における運動強度の最低点に対する心臓副交感神経活動度を高め、その変動の幅を大きくする傾向があると考えられる。そのような心臓副交感神経活動の応答の変化がRR間隔に影響したことは、RR間隔の応答が ΔRR_{st} の応答と類似していることによって裏付けられるであろう。しかし、HRのMAG応答には、precoolingの有無による差も、 ΔRR_{st} やRR間隔に見られたような時間経過に伴う低下も認められなかった。このような結果になったのは、心臓副交感神経活動度とRR間隔は直線関係にあり³⁾、RR間隔とHRの間には二次的関係があることによると考えられる。これらのことから、precoolingによって、運動強度の最低点における心臓副交感神経活動度は高まり、その時点のHRを徐脈化するように作用することが考えられるが、心臓副交感神経活動度の変化はHRの振幅を変化するほどのものではないのであろう。

心臓副交感神経活動によるHRの調節は、HRがおおよそ100 beats/minまでにおいて特に優位であり、それ以降は心臓交感神経活動の活性化が、HRを主に増加させるという¹⁵⁾。また、一般に、心臓交感神経によるHRの調節は心臓副交感神経によるよりも緩徐であるとされている¹⁸⁾。HRのMAXは両条件の全運動周期において100 beats/min以上であった。一方、HRのMINは、control条件では4周期、cooling条件では10周期の時点で100 beats/minに達した。すなわち、cooling条件の方が遅い周期で100 beats/minに達した。したがって、時間経過に伴うHRの ΔT_n の増大はcontrol条件よりcooling条件で遅れて生じることが認められた(図4)が、この結果には、自律神経性のHR調節機序がprecoolingの影響によって変化したことが関係していることが推測される。

正弦波状運動時におけるRPEの1運動周期ごとの平均値やMAG応答にはprecoolingによる明ら

かな影響は見られなかったが、 ΔT_z はprecoolingによって増大する傾向が認められた。一般にRPEはHRや $\dot{V}O_2$ と高い相関関係があるとされている¹⁰⁾。しかし、正弦波状運動時には、HRや $\dot{V}O_2$ より、RPEの方が常に先行して変化した(図4)。また、HRや $\dot{V}O_2$ の位相応答にはprecoolingは影響しなかった。したがって、RPEの ΔT_z の増大傾向は、HRや $\dot{V}O_2$ とは関係しておらず、それ以外の因子の影響によって生じた可能性が高いと考えられる。比較的軽強度の運動では、RPEは物理的運動強度の変化によって強く影響されとの報告がある¹⁰⁾。これらのことから、precoolingは高位中枢において運動強度の変化の認知能力を低下させるように作用し、それが正弦波状運動のより強い運動でRPEの位相応答に影響することが推測される。

以上のことより、precoolingによって、正弦波状運動時における時間経過に伴う $\dot{V}O_2$ の振幅応答の増大には遅れが生じることが示された。そして、それは、末梢性に生じることが推測された。また、心臓副交感神経活動は正弦波状運動時により大きく変動するようになる傾向があること、およびそれはその活動レベルが高まることによることが示唆された。加えて、precoolingは、正弦波状運動時においてより強い運動強度の変化に対する認知能力を低下させる可能性があると考えられた。

謝 辞

本研究の実施にあたり多大な貢献をいただきました山口大学教育学部スポーツ健康科学コースの井上洋氏に深く感謝申し上げます。また、本研究に助成いただきました石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Bolster, D. R. et al.; Effects of precooling on thermoregulation during subsequent exercise. *Med.*

- Sci. Sports Exerc.*, 31 (2), 251-257 (1999)
- 2) Booth, J. et al.; Improved running performance in hot humid conditions following whole body precooling. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 29 (7), 943-949 (1997)
 - 3) Fouad, F. M. et al.; Assessment of parasympathetic control of heart rate by a noninvasive method. *Am. J. Physiol.*, 246, H838-H842 (1984)
 - 4) 平田耕造ら；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社, 156-157 (2002)
 - 5) Hon, S. I. and Nadel, E. R.; Thermogenic control during exercise in a cold environment. *J. Appl. Physiol.*, 47, 1084-1089 (1979)
 - 6) 池上晴夫；フィットネス評価法としての正弦波負荷法. *Health Sciences*, 5, 3-8 (1989)
 - 7) 池上晴夫；身体機能の調節性—運動に対する応答を中心に—, 朝倉書店, 5-9 (1997)
 - 8) Katona, P. G. and Jih, F.; Respiratory sinus arrhythmia: noninvasive measure of parasympathetic cardiac control. *J. Appl. Physiol.*, 39, 801-805 (1975)
 - 9) Lee, D. T. and Emily, M. H.; Exercise duration and thermoregulatory responses after whole body precooling. *J. Appl. Physiol.*, 79 (6), 1971-1976 (1995)
 - 10) Lollgen, H. et al.; Heart rate and perceptual response to exercise with different pedalling speed in normal subjects and patients. *Europ. J. Appl. Physiol.*, 37, 297-304 (1977)
 - 11) Michael, M. T. et al.; Perceptual and physiological responses during exercise in cool and cold water. *Perceptual and Motor Skills*, 62, 211-220 (1986)
 - 12) Nakayama, T. et al.; Fall in skin temperature during exercise. *Jpn. J. Physiol.*, 27, 423-437 (1977)
 - 13) Olschewski, H. and Brück, K.; Thermoregulatory, cardiovascular, and muscular factors related to exercise after precooling. *J. Appl. Physiol.*, 64, 803-811 (1988)
 - 14) 大貫義人ら；発汗を伴わない運動時の皮膚温について, 日生氣誌 16, 36-41 (1979)
 - 15) Rowell, L. B. et al.; Human Circulation. Regulation during Physical Stress. Oxford University Press. New York, 144-148 (1986)
 - 16) Shiojiri, T. et al.; Effects of reduced muscle temperature on the oxygen uptake kinetics at the start of exercise. *Acta Physiol. Scand.*, 159, 327-333 (1997)
 - 17) 曾根涼子；自律神経のとらえ方—心拍変動からの心臓自律神経活動の推定—, 体育の科学 54 (7), 561-566 (2004)
 - 18) Sone, R. et al.; Autonomic heart rate regulation during mild dynamic exercise in humans: insights from respiratory sinus arrhythmia. *Jpn. J. Physiol.*, 54, 273-284 (2004)
 - 19) Taylor, W. F. et al.; Effect of high local temperature on reflex cutaneous vasodilation. *J. Appl. Physiol.*, 57, 191-196 (1984)
 - 20) White, A. T. et al.; Metabolic, thermoregulatory, and perceptual responses during exercise after lower vs. whole body precooling. *J. Appl. Physiol.*, 94, 1039-1044 (2003)
 - 21) Wilson, T. E. et al.; Thermal regulatory responses to submaximal cycling following lower-body cooling in humans. *J. Appl. Physiol.*, 88 (1-2), 67-75 (2002)
 - 22) Yamazaki, F. and Sone, R.; Modulation of arterial baroreflex control of heart rate by skin cooling and heating in humans. *J. Appl. Physiol.*, 88, 393-400 (2000)