
行動性体温調節反応からみた運動に伴う体温変動機構の研究

(研究課題番号 : No.60163557)

平成 10 年度～平成 11 年度科学研究費補助金 (基盤研究 C) 研究成果報告書

平成 12 年 9 月

研究代表者 田中 英登

(横浜国立大学教育人間科学部 助教授)

横浜国立大学附属図書館



10899087

200008891
行動性体温調節反応からみた運動に
伴う体温変動機構の研究

寄贈 田中英登

は し が き

研究組織

研究代表者：田中 英登

(横浜国立大学教育人間科学部 助教授)

研究経費

平成 10 年度 2,400 千円

平成 11 年度 900 千円

計 3,300 千円

研究発表

(2) 口頭発表

(田中英登、選択快適環境温度からみた運動時体温変動機構について、
第76回日本生理学会大会、平成11年3月28日)

<研究成果>

[研究目的]

本研究は、以下の 2 点における運動と体温変動に関する機構を探るために行った研究である。①運動時の体温変動機構、②日常の運動習慣に伴う安静時の体温水準変動機構。

- ① 運動時の体温変動機構：運動時に体温が上昇することは古くから知られており、M. Nielsen (1936) の研究以降、この運動時の体温変動は積極的な変動なのか（体温のセットポイント変動説）、あるいは他の調節系の変動に伴う受動的な結果なのか（セットポイント不変説）論議され続けている。報告者はこの問題に数年来取り組み、運動時の体温変動はセットポイントの変動によって生ずると考えられている発熱機構と類似することをこれまで報告してきた。しかし、行動性の体温調節反応の面から Cabanac 等 (1971) は発熱時と運動時の前腕部の快適温度を調べ、異なった反応を示すことから運動時の体温変動はセットポイントの変動によらないことを示唆した。しかしながら、この研究では①運動継続時間が短いこと、②局所的な快適温度を選択させていること、などが問題として挙げられた。そこで本研究では、運動時間を長くし、異なった強度の運動を行わせたときに人工気候室内の温度を被験者が快適と感じるように随意に選択させることにより、安静時、下腿温浴負荷時、発熱時及び運動時にどのような反応の異同が見られるかを明らかにする。体温の調節は皮膚などの末梢温度情報と視床下部などの中枢温度情報を統合によって生じると考えられるため、今回は特にその統合温度情報の一指標と考える平均体温がどのような水準になるよう調節が行なわれているかを各条件間で比較検討を行った。
- ② 運動習慣に伴う体温水準変動機構：日常の身体活動により安静時の体温水準が上昇することはラットを用いた Satinoff の研究 (1991) によって報告され、報告者もこの現象を確認している。また、数年前に「子供の低体温化」という問題が取り上げられ、報告者もこの問題に取り組み、日常の身体活動量が少ない子供ほど体温水準は低い傾向にあることを示唆した。本研究では、この日常の運動習慣に伴う安静時の体温水準上昇が積極的な変動なのか否かを、主に行動性体温調節反応の面から探り、この体温変動がどのような意味を持っているのかを明らかにしようとした。ヒトでは生活状態を完全にコントロールすることは不可能なため、本研究では小動物ラットを用いて行う。また、雄ラットに比べて雌ラットは自発的な運動量が多いため雌ラットを用いた。

① ヒト運動時の体温変動機構に関する研究

[実験方法]

—被験者—

健康な男子大学生 10 名 (18~22 才) を被験者として用いた。被験者には予め実験関する内容を理解させ、行った。

—実験条件—

実験は安静時、運動時、下腿温浴負荷時およびインフルエンザによる発熱時の条件下で測定を行った。運動は HRmax 50, 60, 70% の 3 強度の条件で自転車エルゴメーターを用いて行った。下腿温浴時の水温は 43°C であった。

—快適環境温度の選択—

実験は気温、湿度を自由に調節できる人工気候室内 (2 × 3 × 2.6m) で行った。気温 5~50°C の範囲で相対湿度はほぼ 50% 一定で行なわれた。被験者は快適と自ら感じられるような気温となるよう、被験者自身自由に室内温度を選択した。しかし、操作ダイヤルには温度メモリはないため、その方向性で温度調整を行った。

—実験プロトコール—

実験プロトコールは図 1 に示したように行った。各実験条件の順序はアトラランダムに行なわれた。それぞれの実験開始前、被験者は短パン着用のみとなり、室内初期温度 28°C、相対湿度 50% に設定された人工気候室に入室した。入室後、被験者は椅子に腰掛けた状態で安静を保った。直腸温測定用サーミスター、皮膚温測定用サーミスター及び心拍数測定電極を順次装着した。皮膚温 (Tsk) は胸部、上腕部、大腿部、足部の計 4 箇所を測定した。これらの Tsk より、平均皮膚温を求め ($\text{meanTsk} = 0.25T_{\text{arm}} + 0.43T_{\text{chest}} + 0.20T_{\text{thigh}} + 0.12T_{\text{foot}}$)、さらに平均体温を算出した ($\text{meanTb} = 0.65T_{\text{re}} + 0.35\text{meanTsk}$)。環境温度は人口気象室内の中心部の温度サーミスターにより測定した。

各測定電極等装着後、30 分間の安静状態の計測を行った。安静状態の計測開始 10 分後から、被験者は快適環境温度となるよう被験者自身に設定温度を選択させた。安静状態 30 分の測定終了時から安静継続、運動開始または下腿温浴の何れかの条件を 60 分間行わせ、連続して快適環境温度を選択させた。一方、発熱条件実験では、各測定電極装着後すぐに快適環境温度の選択を行わせた。

[結果]

本実験は、運動条件及び暑熱暴負荷条件を被験者数は 8 名、発熱条件を行った被験者数は 4 名 (内 2 名は運動、暑熱負荷も行った) であった。

図 2 は全ての実験条件を行った 1 名の被験者の典型的な結果を示す。安静時、初期 Tre は 37.0~37.3 の範囲であり、選択した快適温度 (Tsel) は初期値 28.0°C から僅かに低下し 25.7°C であった。安静時時の平均体温は 35.4°C であった。下

腿温浴負荷時、 T_{re} は負荷開始後徐々に上昇し、温浴負荷終了時には 36.8°C から 37.5°C に達した。この時の T_{sel} は温浴負荷開始後下降し、最終 T_{sel} は 18°C となった。 T_b は温浴負荷中ほとんど変わらず、最終 T_b は 35.6°C であった。運動条件では、 T_{re} は運動強度に比例して上昇した。 T_{sel} は運動強度に反比例して低下し、最終 T_{sel} はそれぞれ 23.0°C (低強度)、 18.2°C (中強度)、 19.0°C (高強度) であった。また、最終 T_b はそれぞれ 35.8°C 、 35.2°C 、 36.4°C であった。一方、発熱時には T_{re} は他の条件よりも高い値を示し、 T_{sel} は 30°C 前後を維持し、 T_b は 37°C 以上であった。

表 1 は被験者毎に各条件における終了時 T_{sel} と安静時の平均 T_{sel} との差を求め、その分布を示したものである (マイナス値は安静時の値のほうが高いことを示す)。3 つの強度の運動条件時および下腿温浴負荷時には、多くの被験者は安静時と比較して変わらないか低い環境温度を選択したが、発熱時には被験者は安静正常時と比較して高い環境温度を選択した。表 2 は同様に、被験者毎に各条件における終了時 T_b と安静時の平均 T_b との差を求め、その分布を示した。下腿温浴負荷時の T_b は安静時と比較して変わらないか低い値が示された。運動時には何れの強度においても各被験者毎にばらつきがあったが、 T_b が高くなる傾向が示された。一方、発熱時には明らかに T_b は安静時と比較して高い値であった。

図 3 は各条件における終了時 T_{re} 、 T_{sel} 及び T_b の全被験者の平均値を示す。下腿温浴時には T_{re} は安静時より高い値を示したが、 T_{sel} は若干低く、最終的に T_b は安静時とほぼ同じであった。運動時には、最終 T_{re} は運動強度に比例して高い値を示し、 T_{sel} も運動強度に反比例して低い値を示したが、 T_b 値をみると運動強度に比例して高い値となり、安静時と比較しても中、高運動強度時には高い値であった。一方、発熱時には T_{re} は高く、 T_{sel} も高く、 T_b も高い値であった。

[考察]

本研究は運動時の体温変動機構を検討するため、運動時及び安静時、暑熱負荷時、発熱時に生体の温度統合情報量の一指標とした平均体温をどのような温度になるよう各条件において環境温度を選択するかを調べることにより、運動時体温変動機構を明らかにすることを目的として行った。

選択した環境温度は、発熱時 > 安静時 \geq 運動時 > 暑熱負荷時であった。運動時及び暑熱負荷時には安静時に比べ低い温度を選択することは Cabanac の報告にも示されている。しかし、本研究では運動時に選択した環境温度は運動強度に比例して低くなる傾向が見られたが、必ずしも全ての被験者が安静時よりも低い温度を選択せず、運動実験を行った 8 名の被験者の内、少なくとも 2 名はむしろ安静時よりも高い温度を選択した。この 2 名の被験者が運動によって深

部体温が高くなるにもかかわらず何故安静時よりも高い環境温度選択した野かについては本研究では明確にできない。しかし、数名の被験者を用いて暑熱順化前後の運動時快適環境温度を調べた例では、何らか順化が快適環境温度に影響するような傾向を示していた。この点については、今後の課題としている。

本研究では、被験者がどのような環境温度を選択したかということよりも、むしろどのような生体環境になるよう環境温度を選択したかを検討すべきと考え、平均体温をその一指標と捉え、各条件間での比較を行った。平均体温を比較すると、発熱時>運動時>暑熱負荷時=安静時であった。今回、平均体温はBurtonの重み付け ($T_b=0.65T_{re}+0.35T_{sk}$) を取り入れて算出しているが、個人的にはこの重み付けが正しいかは疑問を持っており、より生体温度情報量に近い平均体温算出法を検討すべきと考えている。しかしながら、今回の結果は運動時の体温変動は上方に移行した体温のセットポイントの結果であることを示唆させるものである。平均体温の値は生体温度情報量として捉えられ、生体温度情報量は脳内の温度調節中枢（視床下部）において体温の設定温度（セットポイント）と比較され、その誤差量を修飾するよう体温調節反応を発現させる。今回の結果を検討してみると、先ず発熱は体温のセットポイントが上方へ移行した結果と考えられている。発熱時に高い環境温度を選択した理由は、体温のセットポイントが高くなっているため、すでに高体温を示していた。さらに、高い環境温度を選択することによって平均体温はより高くなり、この水準がセットポイント水準と同値であると考えられる。逆に、もし高体温時に低い環境温度を選択したならば、平均体温は下がるため、体温のセットポイントよりもその状態の深部体温は高いと考えられ、熱放散反応が促進されると考えられる。この状態が今回の下腿温浴負荷時の反応である。下腿温浴負荷時には、深部体温は高体温を示したが、選択した環境温度は安静時よりも低い温度を選択し、その結果平均体温は安静時の値と同じであった。即ちこの温浴負荷時は、体温のセットポイントの変動による高体温ではないことが明らかである。一方、運動時には深部体温は運動強度に比例して高い値を示し、選択した環境温度はその深部体温の変化とは逆に低い温度を選択した。しかしながら、平均体温はその選択した低い環境温度による影響以上に高い深部体温による影響が強く、結果平均体温は安静時よりも高い値となる傾向を示した。もし、運動時の体温時の体温上昇がセットポイントの変動によるものでなく、調節不全によるものであるならば、より低い環境温度を選択し、平均体温即ち生体温度情報が安静時と変わらない状態を快適温度として選択するに違いないはずである。即ち本結果は運動時の体温変動は、体温のセットポイントの変動によって生じた結果であることを支持するものである。

今後は、さらに直接的に生体温度情報を変動できるような（今回は環境温度

を変えることにより末梢温度情報を直接的に変動させた)、例えば深部温度を自由に操作できるような方法を用いて、追試を行いたいと考えている。

<参考文献>

- (ア)Cabanac M., J. Cunningham and Stolwijk J.A.J
Thermoregulatory set point during exercise. A behavioral approach. J. Comp. Physiol. Psychol. 76:94-102, 1971
- (イ)Nielsen M.
Die Regulation der Korpertemperatur bei Muskel Arbeit. Skand. Arch Physiol. 79:193-230, 1938
- (ウ)Kluger M.J.
Fever:role of pyrogens and cryogens. Physiol. Rev. 71:93-127, 1991
- (エ)Tanaka H., Yanase M. and Kanosue K.
Am. J. Physiol. 258:R842-R847, 1990

② ラット日常の運動習慣に伴う安静時の体温水準変動機構に関する研究

[実験方法]

実験には9匹の雌ラット (Long Evans 系月齢6ヶ月) を用いた。実験手順を図1に示した。飼育開始後、体温測定のための送信機 (Minimitter) を腹腔内に埋め込む手術を行った後、体温をテレメトリーシステムで連続的にモニターしながら2週間自発回転ケージ内で自発回転走を行わせながら飼育した。この時、同時に1日の自発走回転数もモニターした。飼育環境条件は7:00~19:00を明期、19:00~7:00を暗期とし、自由飲食水とした。また、気温は $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 10\%$ とした。

2週間後、行動性体温調節反応の測定に用いるサーマルグラディエントチャンバー (TG) に慣れさせるため、4日間連続してTG内に放置した (Pre-test)。TGは図2に示したような温度勾配をつけ、5cm間隔に配置した光センサーより、ラットのポジションをチェックし、モニターした。また、各ポジションの温度は熱電対により測定し、連続的にモニターした (ANRITSU DATA COLLECTOR AM-7012)。このTGテストによりラットが選択した環境温度 (Tsel) とそのときの深部体温 (Tb) を求めた。尚、TGテスト中ラットは自由に飲水・飲食できるようにした。

Pre-test後、1週間自発回転ケージを閉鎖し、回転ケージによる運動を行わせない状態をつくり、TGテストを4日間行った (Wheel Lock test)。さらにその後、再び自発回転ケージを開き、自由に自発走運動を行わせた状態で2週間飼育し (Wheel Open test)、再度TGテストを行った。

尚、TGテストの結果の処理は日中 (7:00~19:00) とした。これは、日常の運動により安静時の体温が上昇するという期間は日中 (基本的に夜行性動物であるラットは睡眠期と考えられる) であり、かつ事前研究からこの日中時にはTGテスト時のTselへの性周期の影響がみられないことが明らかとなっていることからである。

[結果]

図3はWheel Open時における各ラットの1日の平均回転数とWheel Closed時を基準としたWheel Open時の日中平均体温の上昇度との関係を示したものである。平均自発回転数が多くなるほど、夜間時安静時の体温は高くなった。

図4, 5に典型的なTGテスト時のTb及びTselの結果2例を示す。図4は平均回転数が1700回/日と少ないラットの例である。TbおよびTselともWheel OpenまたはClosedの状況に関わらず、ほぼ同様の結果であった。一方、図5のラットは平均回転数が多い (6337回/日) ラットである。Wheel Locked時に比べ、Wheel Open時にはTselは高い値を示し、Tbも明らかに高い値であった。

図6は回転数の多いラット (high active rats ; HA 群) と少ないラット (low active rats ; LA 群) を回転数 4000 回/日を基準にグループ分けし、各 Tb, Tsel 値を示したものである。飼育ケージ内での Tb は、HA 群は自発回転走後有意に高い値を示したが、LA 群は変化しなかった。TG テスト時、HA 群は自発回転走後高い環境温度を選択し、その結果高い Tb を維持したが、LA 群では Tsel に自発運動の影響はなく、Tb もまた差は示されなかった。

[考察]

本研究は日常の習慣的な運動によって、安静時の体温水準が変動するか否かを追試するとともに、もし体温水準が変動するのであればその変動はどのような意味を持つものかを検討することを目的として行った。

本実験では雌ラットを用いた。この理由としては、①日常の生活を拘束するには人間では非常に無理があるため、実験動物を用いた、②Satinoff の研究報告において、ラットの自発走運動により安静時の体温が運動を行なわせなかったときと比較して高くなること、③雌ラットは雄ラットに比較して運動量が多く、また性周期による TG を用いた行動性体温調節反応への影響もすでに明らかにされていること、等があげられる。

本実験結果において、平均自発走回転数と安静時の体温水準の変動は相関が示され、特に運動量が 4000 回転/日以上になると日中安静時の体温水準が有意に高くなることが明らかとなった。Satinoff の研究報告ではこのような運動量と体温変動幅との関係については記述されていなかったが、安静時の体温水準変動を生ずる日常の運動量の閾値が存在することを示す結果であった。このことは、ヒトにおいて近年子供の低体温化が叫ばれ、その原因の一つに運動習慣の現象が挙げられているが、本実験結果は習慣的な運動が減少することによって体温が低くなることを立証するものである。

この運動習慣による安静時体温の上昇機構について、TG システムを用いた行動性体温調節反応の面から検討を行った。その結果、日常の運動量が少ないラットでは、TG テストによる Tsel 及び Tb には変化がみられなかったが、運動量が多かったラットにおいては、運動を行わせなかった時と比較して明らかに高い環境温度を選択し、Tb もより高く維持した。積極的な体温変動として知られる発熱時には、より高い Tsel を選択することから、本実験における結果は運動習慣による安静時の体温変動は積極的な体温変動であることが示唆される。さらに、追加実験として現在行っている、運動習慣による高体温時に 10℃の寒冷暴露を行っても、体温は高体温を維持することからも積極的な変動と考えられる。運動によって基礎代謝量が増加することは知られており、この基礎代謝の増加が何らか関与していると推測されるが、今後の課題とされる。

<参考文献>

- 1) Satinoff E.
Elevated body temperature in female rats after exercise.
Med. Sci. in Sports Exerc., 23:1250-1253, 1991
- 2) Laughter J.S.JR. and Blatteis C.M.
A system for the study of behavioral thermoregulation of
small animals. Physiol. Behav. 5:993-997, 1985
- 3) Michael K. M.JR. and Kenyon R.
Four versus five -day estrous cycles in rats: Vaginal cycling
and pregnancy. Physiol. Behav. 33:65-67, 1984
- 4) 田中英登、甘利修
小学生の低体温問題について —低体温の実態と低体温児童の
生活様式— 横浜国立大学教育学紀要 34:75-86, 1994
- 5) Tanaka H. and Satinoff E.
Selected ambient temperature during estrous and circadian
cycle in female rats. J. Physiol.Soc. Japan 46:S176, 1996

<まとめ>

本研究は、運動時及び運動習慣による体温変動機構を行動性体温調節反応から検討しようとしたものである。その結果は以下のようなものである。

- 1) ヒト運動時の選択快適環境温度は個人差があったが、安静時に比して運動強度が高いほど低い環境を選択したが、平均体温は安静時よりも高い値に調節された。これは、インフルエンザによる発熱時に行った行動性調節反応実験と同様の傾向を示したことから、運動時の体温変動は発熱と同様に積極的な変動機構によるものと考えられた。
- 2) ラットの日常の運動習慣により、日中安静時の体温水準は運動量に相関して高い値が示された。TGテストによる行動性体温調節反応では、運動を行わせなかった場合に比べて高い環境温度を選択し、高体温を維持したが、運動量の少ないラットでは変化は見られなかった。このことから、日常の運動習慣は安静時の体温に影響し、運動量に比例して高い体温を維持するよう生体内の調節を行っていることが示唆された。
- 3) 以上、2つの運動時及び運動習慣による体温変動機構は何れも積極的な変動であり、生体内調節水準が変動している（セットポイント変動）可能性を示唆する結果となった。

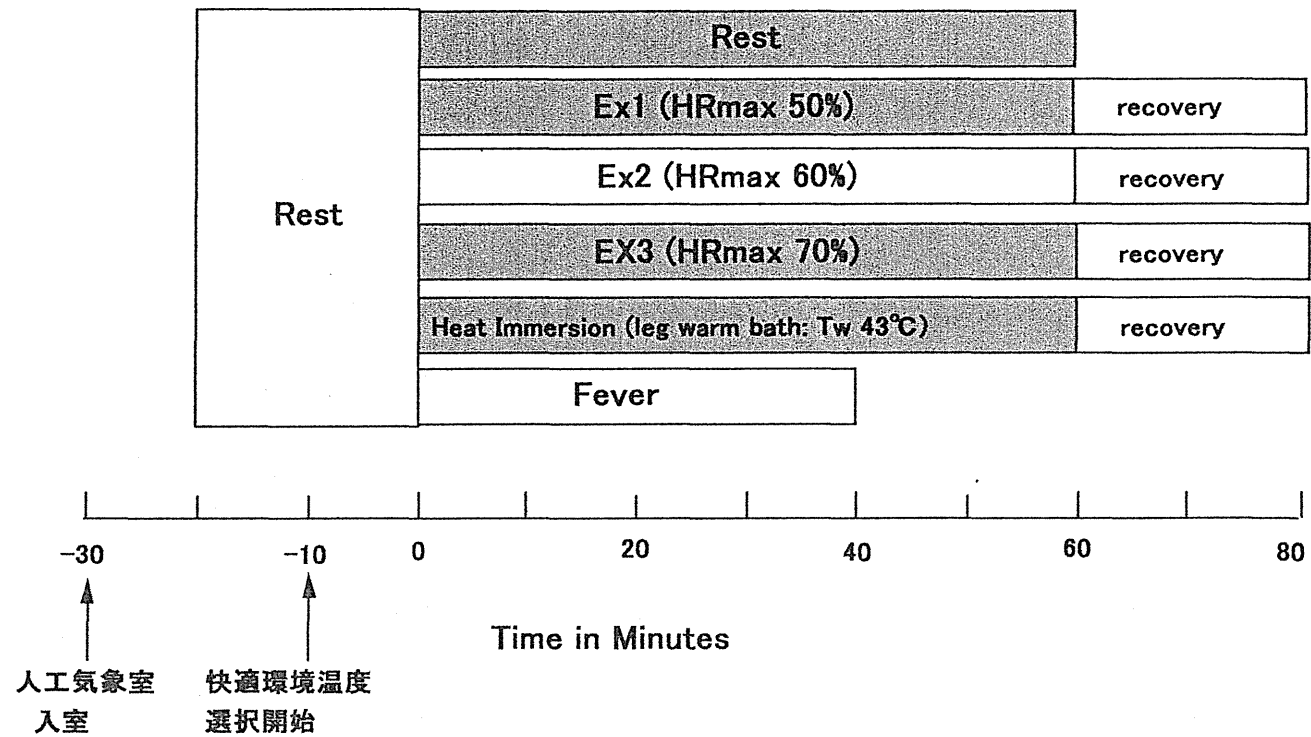
表①-1 各被験者における各条件時の最終選択
 環境温度と安静時の平均選択環境温度差
 の分布
 (一値は安静条件時の選択環境温度が高いことを示す)

	<-3°C	-3°C~3°C	3°C<
Ex 1	3	4	1
Ex 2	6	2	0
Ex 3	6	2	0
Heat Immersion	5	3	0
Fever	0	1	3

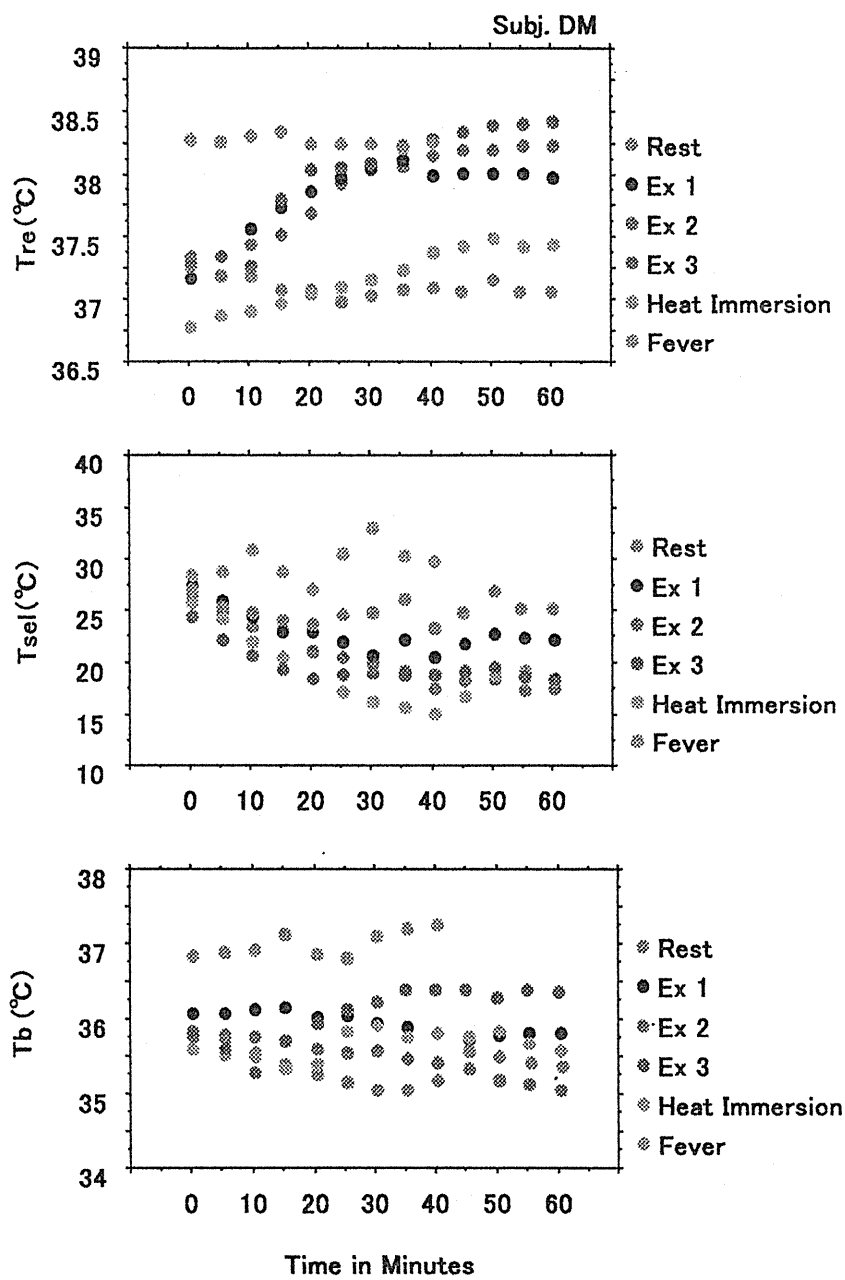
表②-2 各被験者における各条時の最終平均体温と
 安静時の平均体温の差の分布
 (一値は安静時の平均体温が高いことを示す)

	<-0.5°C	-0.5°C~ 0.5°C	0.5°C<
Ex 1	2	3	3
Ex 2	1	4	3
Ex 3	2	3	3
Heat Immersion	2	6	0
Fever	0	0	4

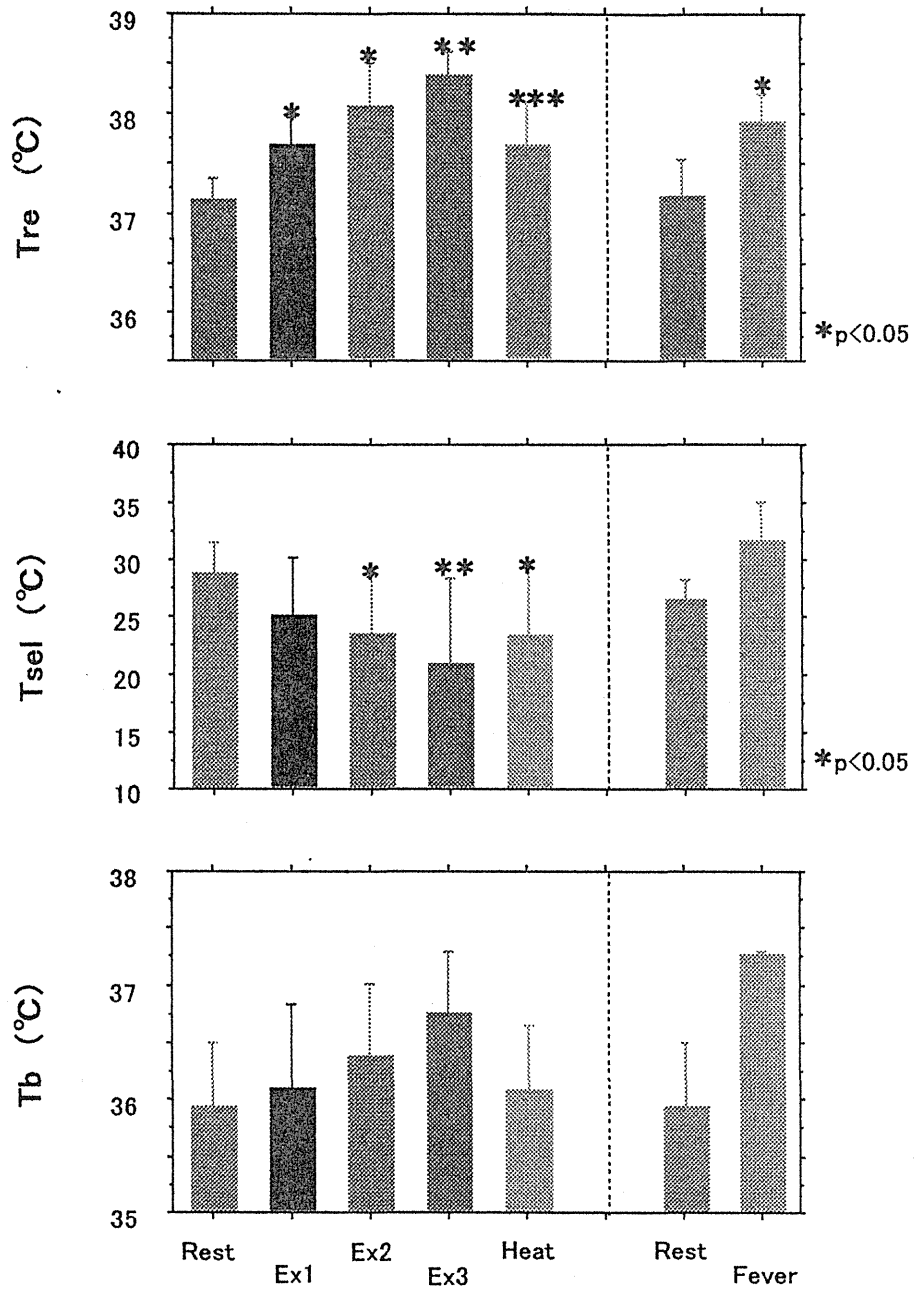
Experimental Protocol



図①-1 実験プロトコール

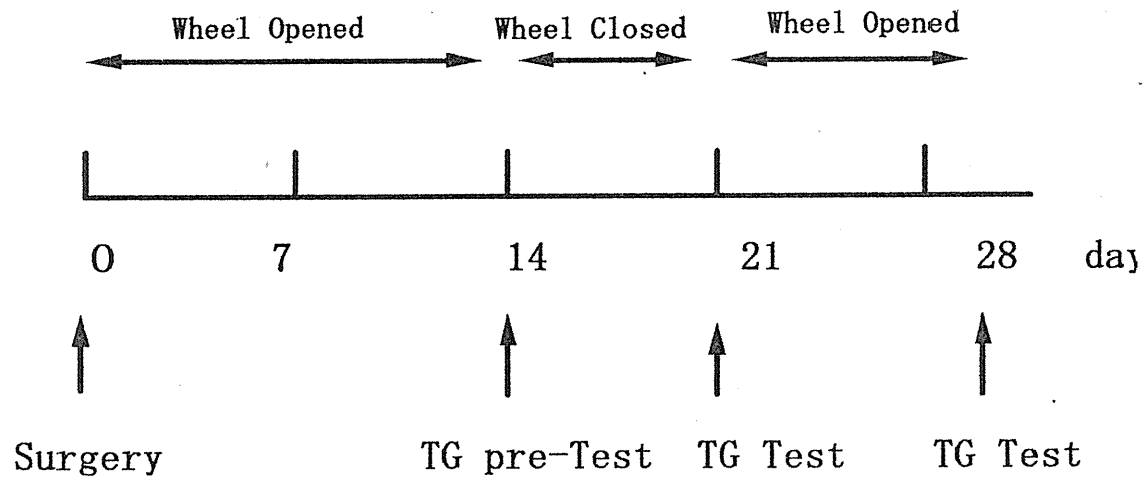


図①-2 1被験者の各条件における直腸温(T_{re}),
 選択環境温度(T_{sel}),及び平均体温(T_b)

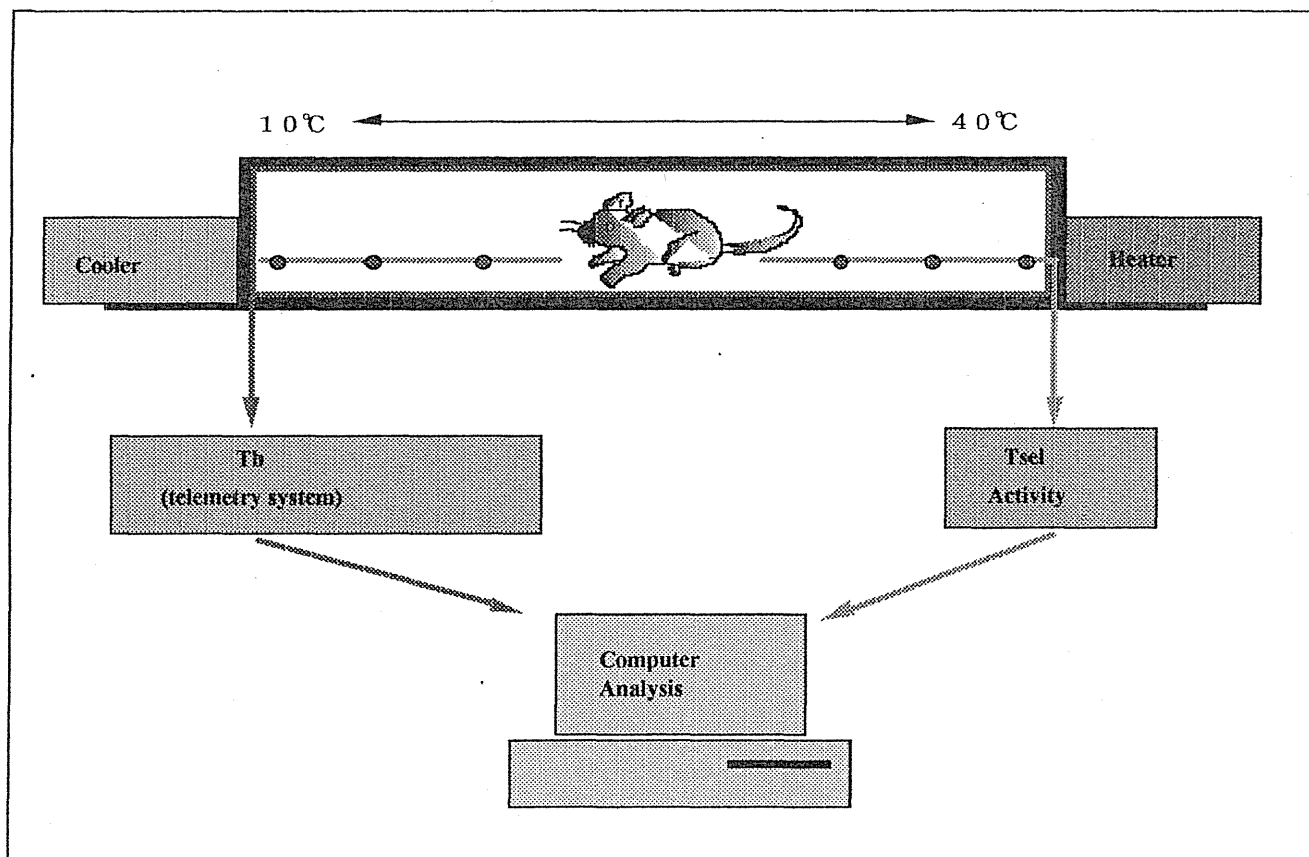


図①-3 各条件時の平均 T_{re} , T_{sel} 及び T_b

Experimental Schedule

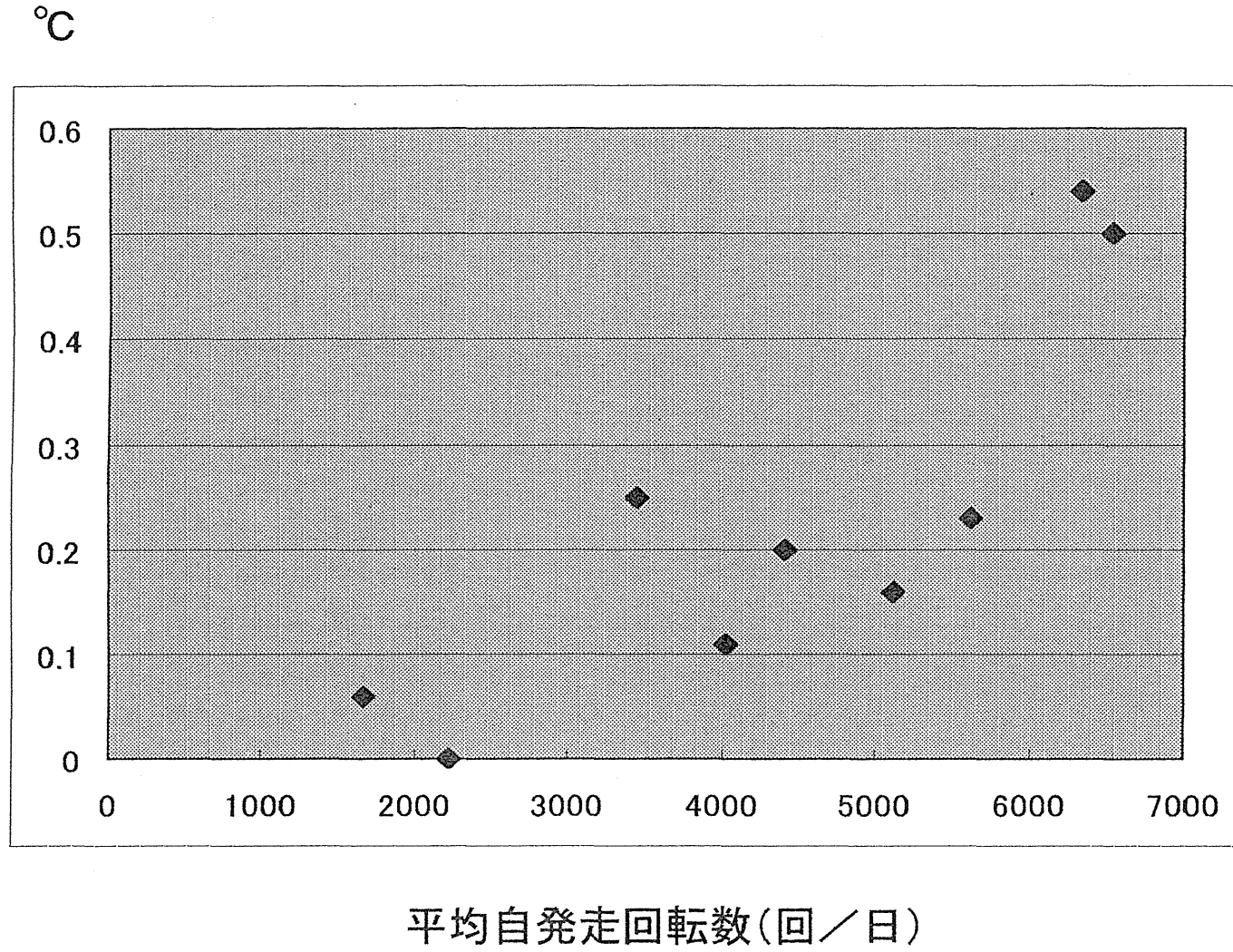


図②-1 実験手順

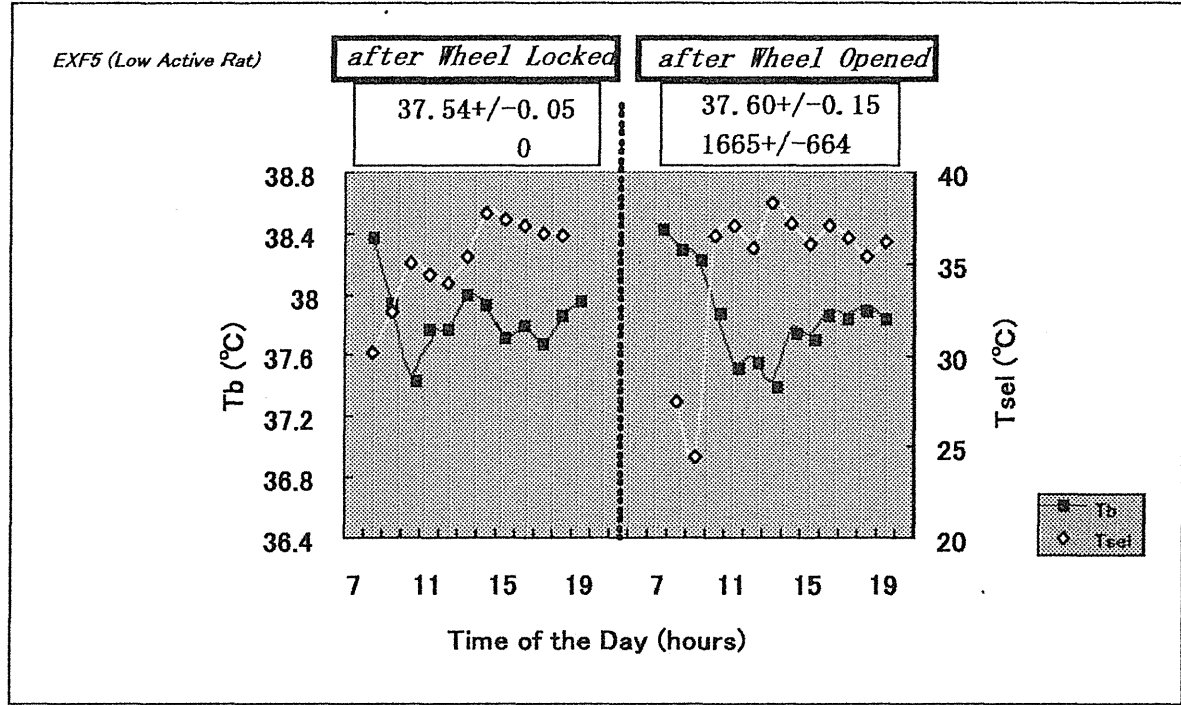


図②-2 サーマルグラディエント(TG)システム

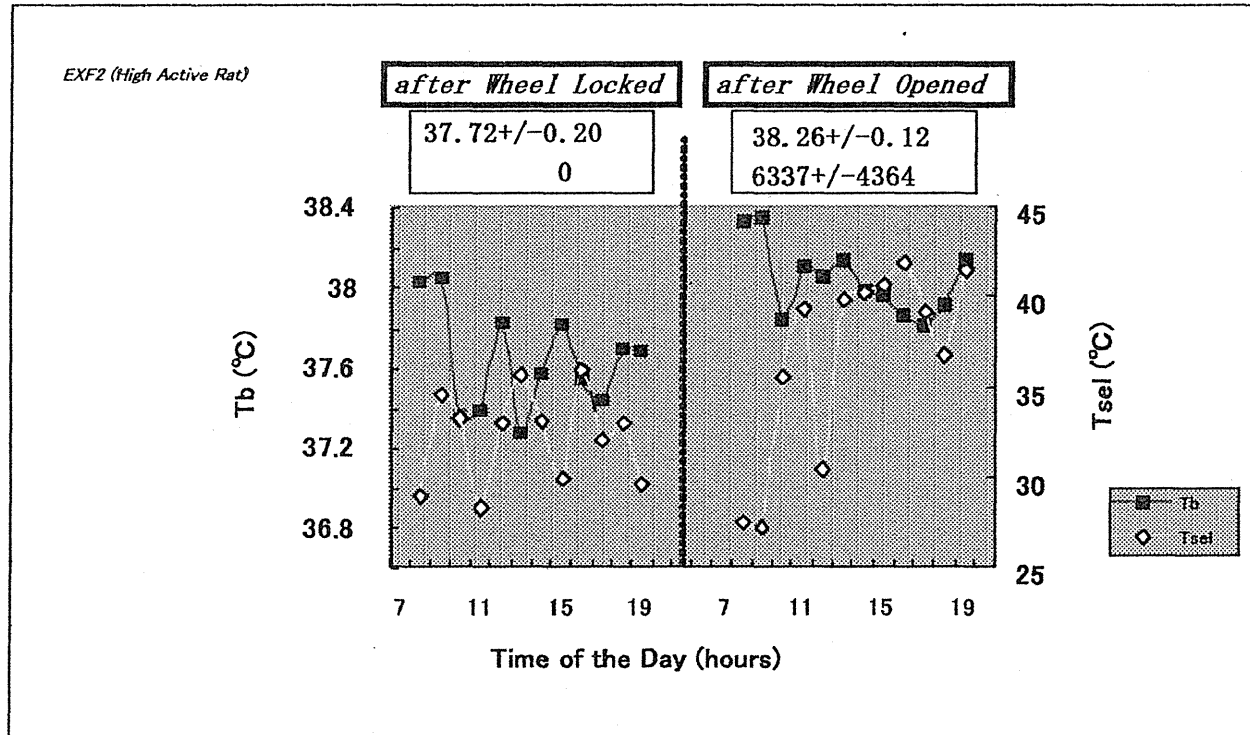
ΔT_b (Wheel Lock時平均 T_b - Wheel Open時平均 T_b)



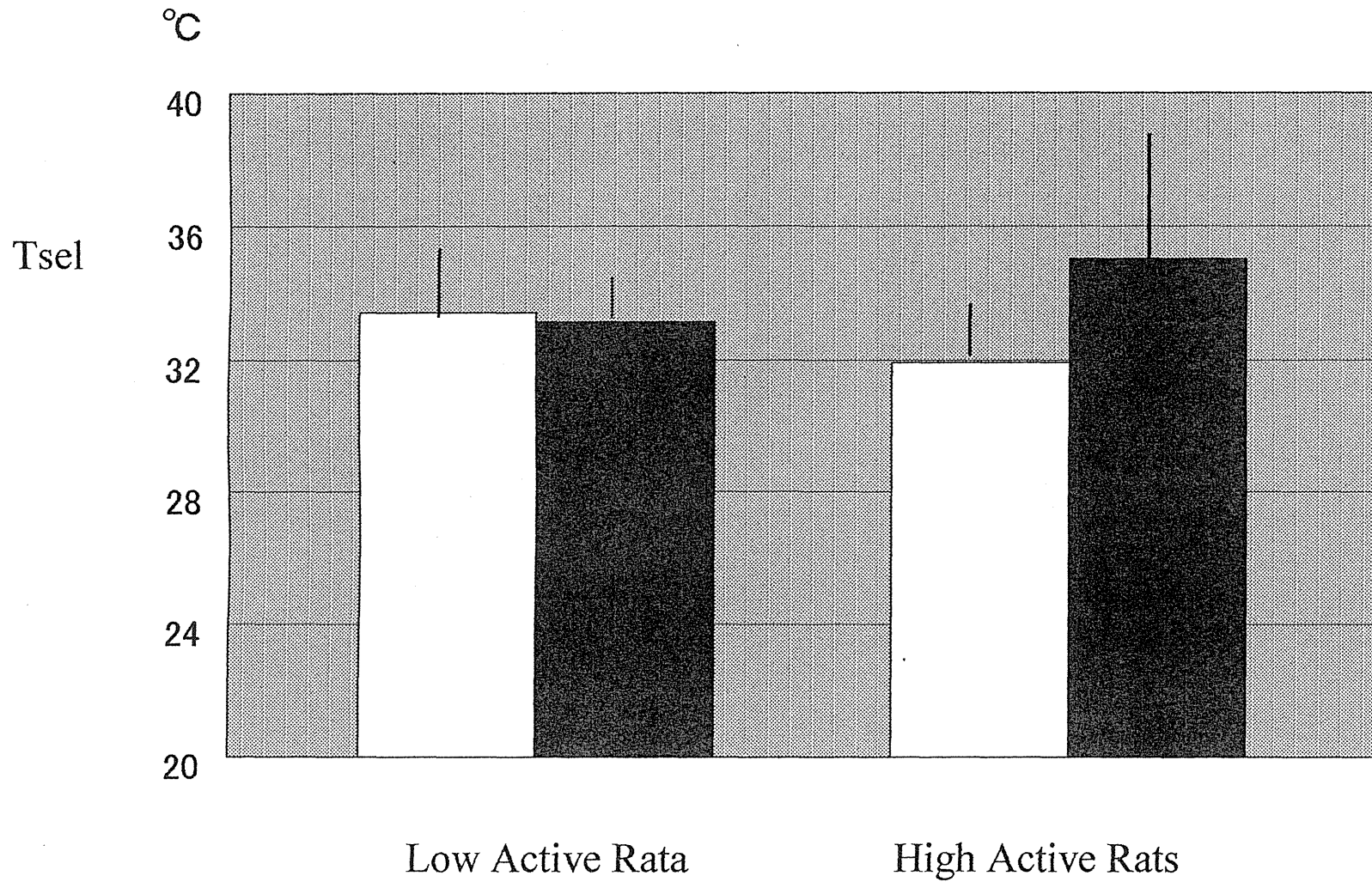
図②-3 自発走運動量と体温上昇度の関係



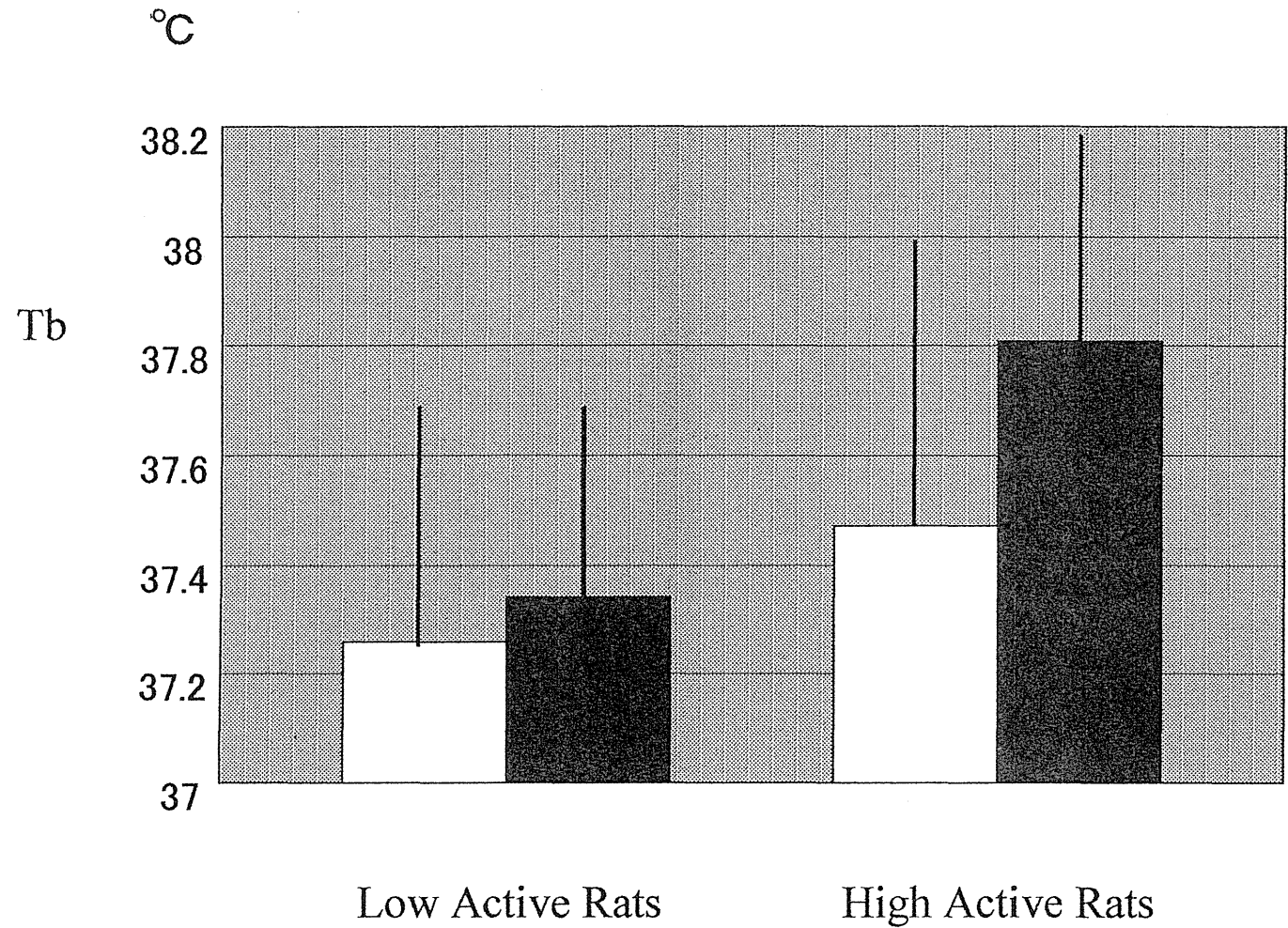
図②-4 Wheel Lock後(左)及びWheel Open 後(右)の体温と選択環境温度
(平均自発走回転数の少ないラットの例)



図②-5 Wheel Lock後(左)及びWheel Open後(右)の体温と選択環境温度
 (平均自発走回転数の多いラットの例)



図②-6-1 自発運動量の低群及び高群ラットにおけるTGテスト時の平均Tsel。
 白バーはWheel Lock時、黒バーはWheel Open時。



図②-6-2 自発運動量の低群及び高群ラットにおけるTGテスト時の平均Tb。
 白バーはWheel Lock時、黒バーはWheel Open時。