呼吸・心拍機能とは別の生体情報源としての長距離走・ジョギング中体温測定の有用性

渡邊由陽
田中陽子
竹森重

Ⅰ．緒言

さきに，この「経済研究」に発表した“山のぼりでの生体変化：運動鍛錬による暑熱馴化仮説を日常的な運動で検証する[6]”では，「暑熱下の体温」を主に検討・分析した結果，仮説は支持された。

そこでも（一般学部生にも理解し易く）述べたように，運動時の心拍・呼吸の促進と，体温調整の関係を示したい。

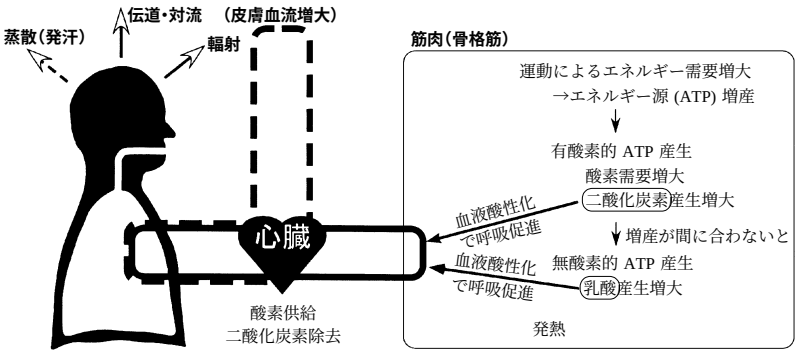
運動をすると心拍数が増してきて呼吸が苦しくなることは多くの人が共有する経験である。やがて身体が熱くなってきて汗をかく。

この一連の出来事のうち，心拍と呼吸の変化は運動に必要なエネルギー源を維持しようとする生体反応として了解可能である。すなわち，食物から取り込んだブドウ糖を燃焼させて運動に必要なエネルギー源としてのATP を筋肉で産生し続けるには，呼吸で取り入れた酸素を血流に乗せてふんだんに筋肉に提供し，燃焼で生じる二酸化炭素等の老廃物を筋肉から洗い流し続ける必要がある（有酸素代謝：**図1**）。酸素不足のもとでのエネルギー調達（無酸素あるいは嫌気代謝）は乳酸産生を伴い，この乳酸が血液中に移行して血液を酸性化すると心拍・呼吸をさらに促進して息苦しさを高める。生体には運動に伴うこれらの事態に対処するために早期から予防的に心拍と呼吸を促進する機構が備わっているものと想像される[1]。

一方の体温上昇は，筋肉の収縮過程に随伴する分子レベルでのさまざまな摩擦過程での熱産生がおおもとである。この熱産生増大が，身体から外界への熱放散を一時的に上回るために体温が上昇する。体温上昇は外界との温度差を拡大して伝導・対流と輻射による熱放散を促進するが，生体は皮膚血管を広げて体表を流れる血液に乗せて体熱を運び，体表面温度をあげてこの熱放散をさらに促進する（**図 1**）。これでも熱放散が追いつかないときには汗をかいて体表面から水分の蒸発を起こし，蒸発が奪う気化潜熱に体熱を排泄する（**蒸散**）。

日常的に運動しているトレーニング者（鍛錬者）では体熱放散促進機構が迅速かつ効率的に作動して運動時の体温上昇を抑制するらしいことが実験的に知られている[2)]。これは冬から夏に向けて皮膚表面の血管が広がりやすくなったり，汗をかきやすくなったりする暑熱馴化と同じ現象で，運動するたびに高体温にさらされるトレーニング者は，この暑熱馴化で体温調節能力を高めるという。以下この仮説を「トレーニングの暑熱馴化仮説」と呼ぶことにしよう。これは皮膚を流れる血管系の改築により，より少ない皮膚血流に乗せて体熱をより効率的に体表面に運べるようになれば，あるいは体温上昇があまり起こらないうちから汗をかいて水分蒸散によっ

図 1



運動時の心拍・呼吸の促進と，体温調整の関係

て体熱を効率的に放散できるようになれば，皮膚血流増大のための心拍負荷が軽減され，筋血流が維持されて有酸素代謝による筋収縮が持続し，無酸素代謝による乳酸産生が抑制されて血液酸性化による呼吸負荷が軽減するという仮説である（**図1**）。

このようなダイナミックな生体反応を詳細に調べるには酸素消費量，二酸化炭素排泄量，血液の pH や乳酸濃度，筋肉の活動状態を表す筋電図などの精細な測定を組み合わせて実施する必要がある。これらの込み入った測定は精細である一方で大掛かりになるから，実験室内で実施可能な特殊な制約のもとでの運動でしか実施できない。このような特殊制約のもとでの観測が，ごく日常の運動動作における生体反応を正しく反映しているかどうかを確認する必要がここに生ずる。

われわれは，**竹森**考案の小型で軽量な測定・記録装置を用いてスポーツ競技や日常的な運動を（測定のために）なるべく制約せずにリアルタイムで多くの生体反応を測定している。

その一環として長距離走専門の大学陸上競技部員，他競技部員や中高年，一般女子のジョギング中の体温，脈拍，呼吸運動などのヴァイタルサイン変動の同時測定を行なっているが，それらヴァイタルサインの相関の解析結果を報告する。

ランニング中のヴァイタルサインについては，競技力向上はもとより健康運動の指針を目的として，「運動と心拍数の科学[8)]」に代表されるように「心拍数」の研究が古くからなされてきており，近年でも“ホノルルマラソンが市民ランナーの身体に及ぼす影響”とか，“長距離ランニング中のペース変化と瞬時心拍数変動”とか「心拍数」主体の研究がなされている[3) 9)] ことに変わりはない（ただし後者では，周波数スペクトル解析の新たな手法を試みている）。

睡眠中の無呼吸症候群が取りざたされる昨今，「呼吸」への関心がもたれるがその市販の呼吸測定器は重量大かつ高価（最低でも 120 万以上といわ

れているが）であり，しかも気道に装着するため運動時測定には適さない。

本研究では安価，軽量の「呼吸」の測定器を考案，開発することによって長距離ランニングやジョギング中の呼吸の生体反応の連続記録が可能になり，同時に多項目に亙る生体反応の連続記録の解析が可能になった（2005年）。丁度時を同じくして，Thought Technology 社（カナダ）製のバイタルモニター Pro Comp（ハード，ソフト併せて80数万円＋ワイヤレス用製品代）の情報があったが，やはり運動，スポーツ競技中のモニタは無理であることがわかった。制約を受けない日常的なランニング中の，ここに報告するだけの多項目に亙る生体反応の連続記録をしたという例は筆者らの知る限りでは他に例を見ない。

Ⅱ．方法

記録装置

市販の心拍数モニタ (S610i, Polar, Kempele, Finland) をもとに，その胸部トランスミッターベルト部分に低弾性体用ストレインゲージ（KFML-5-350-C1，共和電業，東京）4枚をフルブリッジで貼り付け，胸郭の動きをベルトのたわみ変化として記録できるようにした。測温抵抗体（超薄型高精度サーミスタ103JT-100，石塚電子，東京）と2つの静電容量型3軸加速度センサ（ACB302，スター精密，静岡）からの出力を増幅してマイコンボード（AKIH8-8069，秋月通商，埼玉）で AD 変換して10ビット0.1秒周期で RAM に記録する。駆動用の乾電池006P を含めた総重量は220g 程度で，湯温測定により見積もった温度分解能は0.01℃，記録時間は5時間弱であった。記録データは PC にシリアル転送し，市販の表計算ソフト上で解析した。動脈血酸素飽和度は市販の指先光センサタイプのモニタ装置（Pulsox-3Si，ミノルタネーレ，東京）を使用して測定した。

胸郭の動きから呼吸運動を評価するためには，まず記録された胸郭の動き信号から周期0.8秒以下の高周波ノイズと周期5秒以上の低周波ノイズ

を表計算ソフト上で落として胸郭の動きとし，この胸郭の周期的な動きの一つ一つについて，呼吸数と呼吸の深さの積を呼吸の激しさとして得た。呼吸数は一呼吸ごとにその周期の逆数として見積もり，呼吸の深さはその一呼吸における胸郭の動き信号の最大振幅として見積もった。

被験者と測定

被験者は，S大学陸上競技部の中・長距離専門の男子学生3名 (Sub. A, B, C)，同大学バドミントン部1年次の未熟練男子学生2名 (Sub. D, E) と日常運動を行なっている56歳男子 (Sub. F) である。

被験者には予め測定の趣旨，研究の意義や測定方法を事前に丁寧に説明し，あくまで自らの意思で同意し参加協力を得たボランティアである。なお各人ごとに測定結果のフィードバックも行ない教育的効果も望んでいる。

測定は，2009年7月～11月にかけての放課後，各被験者2～3回試行した。測定期日，時間，気象状況などは**表1**に示す。

表1 被験者，測定期日，気象条件等

被験者	年齢	日　付	測定時刻	気温	湿度	備　考
Sub. B	19歳	7月13日	17時台	24.8℃	60%	20分走
Sub. C	22歳	7月14日	17時台	24.9℃	73%	20分走
Sub. F	56歳	7月14日	18時台	25.2℃	73%	20分走
Sub. F	56歳	7月19日	16時台	32.6℃	36%	20分走
Sub. F	56歳	7月27日	19時台	31.4℃	32%	20分走
Sub. A	19歳	11月7日	16時台	22.6℃	32%	45分走
Sub. B	19歳	11月7日	16時台	22.6℃	32%	45分走
Sub. D	19歳	11月9日	16時台	17.7℃	43%	30分走
Sub. E	18歳	11月9日	16時台	17.7℃	43%	30分走
Sub. A	19歳	11月10日	16時台	17.0℃	48%	40分走
Sub. C	20歳	11月10日	16時台	17.0℃	48%	20分走

Ⅲ. 結果

図2は，陸上競技部長距離選手の多項目にわたる，いわゆるヴァイタルサイン変動の測定，記録結果を重ねて表したものである。

左側の縦軸は任意単位であり，走り始めの起点でもある。それは加速度計の捉えた「腕の振り」が走りの終了も含めておしえてくれる（ジョギング等ほとんど腕を振らないで走る場合もあるが)。なお左右の肘部に三軸加速度センサをセットしたのであるが，片腕の一次元の記録だけで事足りる。

走り出すと定常状態を示す呼吸数，心拍数は左軸値に合わせて表記している。すなわち0〜100の呼吸数，0〜200の心拍数である。

右の縦軸は体温を示すとともに，記録の終了でもある。

図3から**図9**が本論の結果であり，それぞれの測定項目別に対比，表したものである。比較のため，それぞれの図は縮尺をほぼ同じくした。

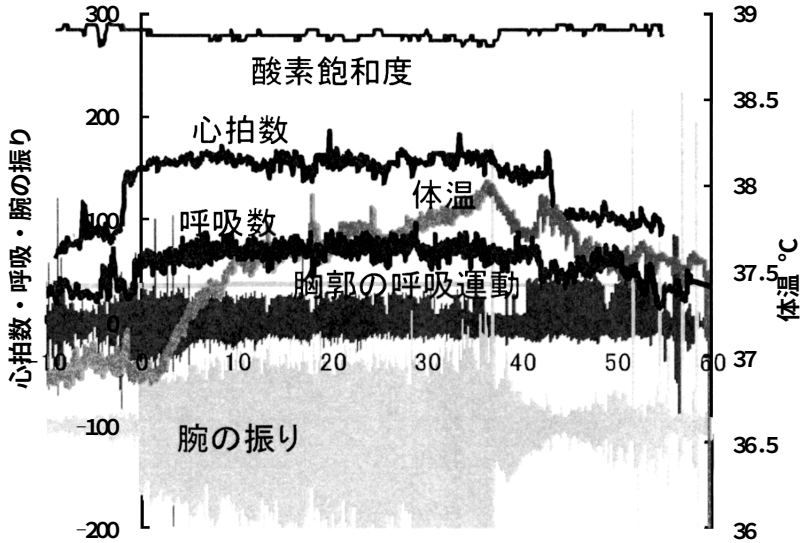
なお，被験者56歳（以後Sub. Fとする）は体育館フロアー内周回の20分走であり，他はすべてS大学グランドからのロード・ラン（上り下りの急激な大きな高低差はなかった）であった。

長距離走の陸上競技部員であるSub. A, B, Cは，各人20分走と40分〜45分走を2〜3回行なっているが，かなり速いペースの4分/km（11月7日），もしくは5分/km（11月10日）で走っているというのが高校時に準レギュラーのSub. Aであり,それ以下の者は少しペースを落として 6 , 7分/km 位と推定していた（各自ペースを計時していた)。

Sub. Aの11月7日と10日の45分走では，前者がかなり速いペースといっているが，体温，心拍数，呼吸数においてほぼ同じ値を示しており，むしろ速いペースの方がやや低い様相を示す。それは一緒に走ったやや下位のSub. Bと比しても体温，心拍数において低い値を示していることより実力上位をうかがわせる。

Sub. BとSub. Cの夏場20分走の結果は，Sub. A, Sub. Bの速いペー

図2　長距離走選手の例

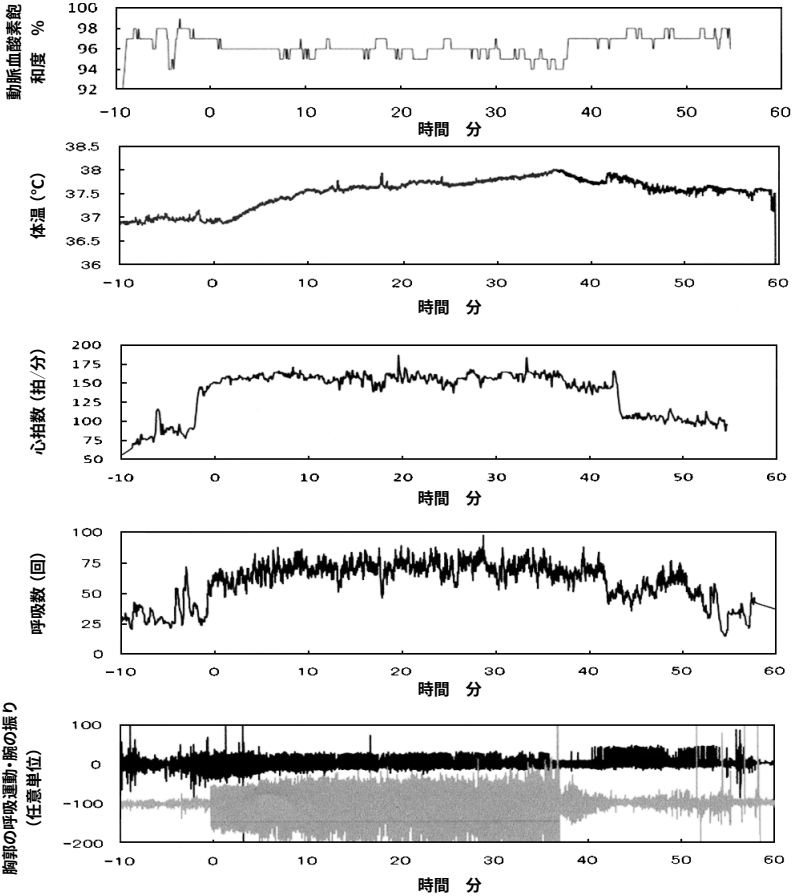


ス・ランから比べると両者とも明らかに低い値を示した。

また胸郭の呼吸運動をみてみると，長距離走上位より胸郭の呼吸運動は下位の者が大きい傾向が窺える。そのことは未熟練バドミントン部員のジョギング走とくらべるとなお一層あきらかのようである。このことは，たとえば呼吸数がほぼ同じで上位者の呼吸が小さいことは，上位者は効率的な呼吸をしていることが容易に理解でき，また上位者は効率的な呼吸が出来るゆえ速いペースで走れることが推察される。

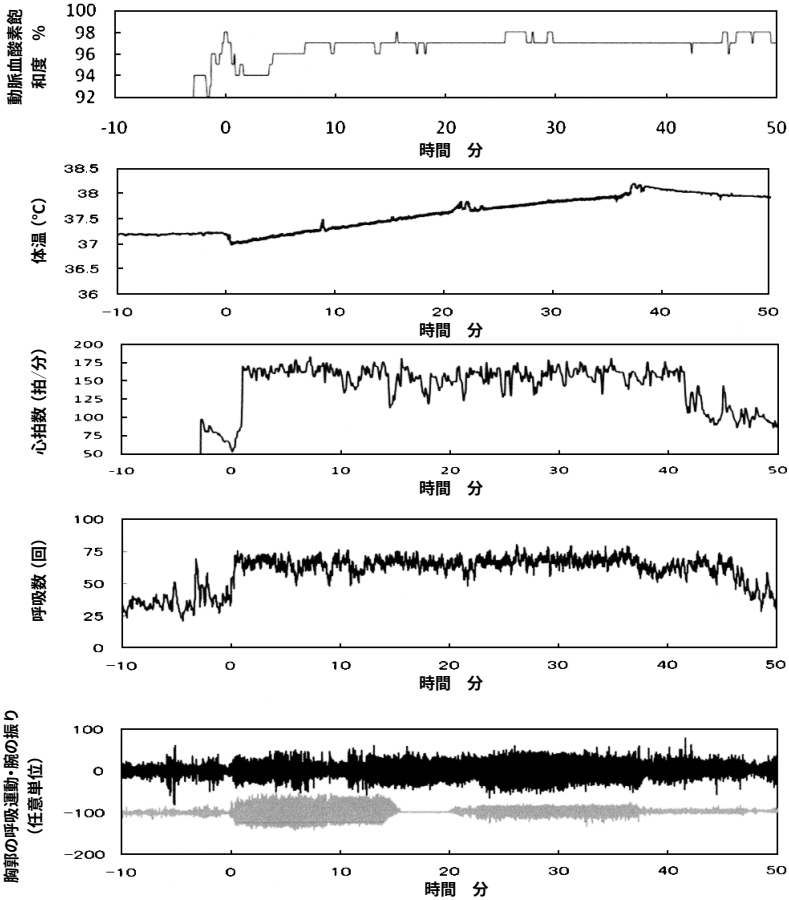
動脈血酸素飽和度については筆者らは，特に平地の運動についてはそんなに変わらないのではないかという認識であったが（高地トレーニングでも有意差がないという研究発表も目にしていたので，98% くらいから 2% くらいの低下の繰り返しを想像），中等度レベルの長距離ランナーらは呼吸数や心拍数が定常状態になるのと同時に酸素濃度が低下する（4%～7，8%）ことが観察された。

図3　Sub.A 陸上競技部（11/7）



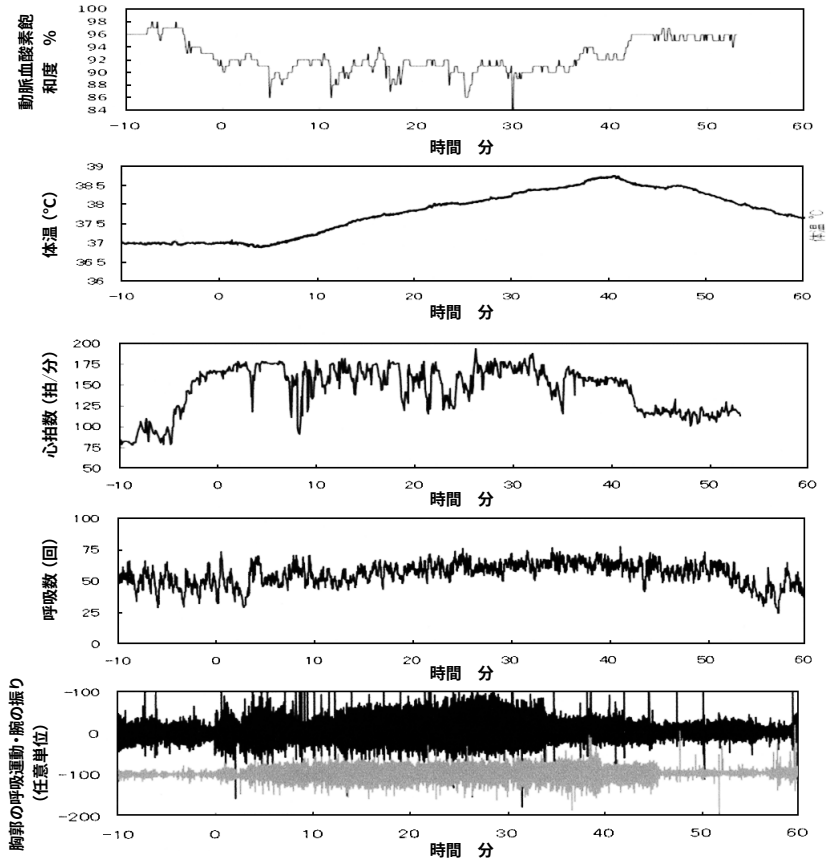
長距離走上位者Aの，4分/km のかなり速いペース45分走の後5分のジョギング，5分のウォーキングの結果を示す。走り始めると体温は急激に上昇してからゆっくりの上昇に移行する。呼吸数も振幅があるものの75回を超える。胸郭の呼吸運動は後半にむかって小さく，その後のジョギング，ウォーキングよりはるかに小さく，小刻みでもより効率的に行なわれるのを示唆する。腕の振りも極めて大きい。酸素飽和度は2〜3％低下して行なわれる。

図４ Sub.A 陸上競技部（11/10）



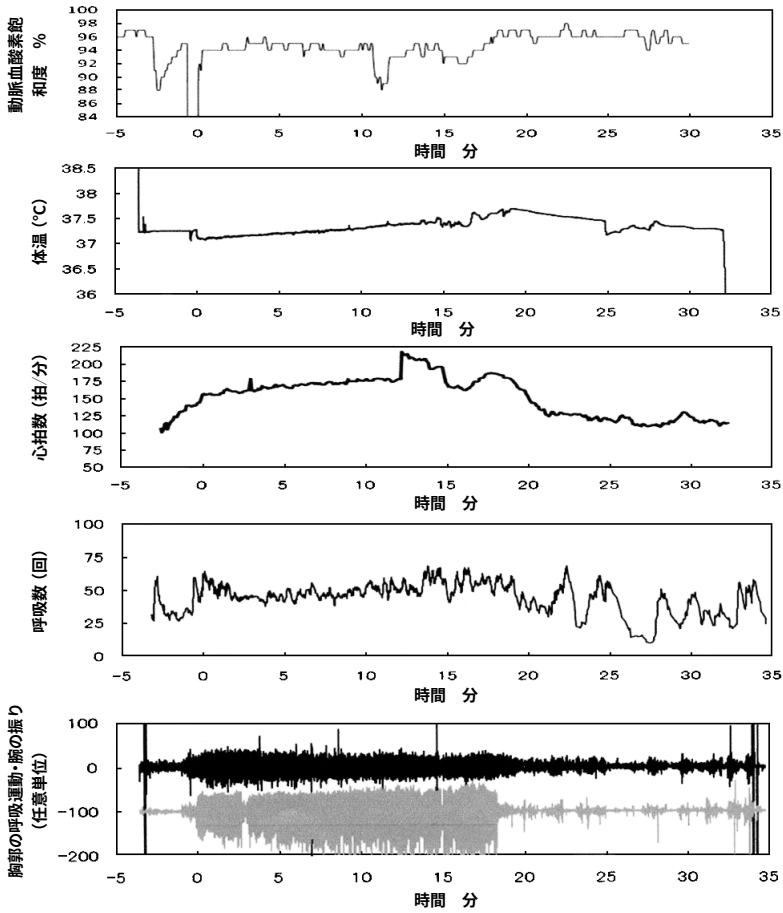
長距離走上位者Aが，５分~6 分/km ペースの 40 分走の後５分のウォーキングを行なっている。最初 10 分ほど速目のペースの後，本人申告の少しゆっくり目の走であったというように心拍数も 170 拍くらいの一定ペースより，それより低いしかも 20 拍ほども大きな触れ幅のある経過を示した。早めペースでは胸郭の呼吸運動は小さめ，ゆっくりペースでは大きく，腕の振りは逆になっていた。酸素飽和度は走り始めのほんの数分３，４％の低下がみられたが，あとは １％ほどで一定であり影響なしといえる。

図5　Sub.B 陸上競技部（11/7）



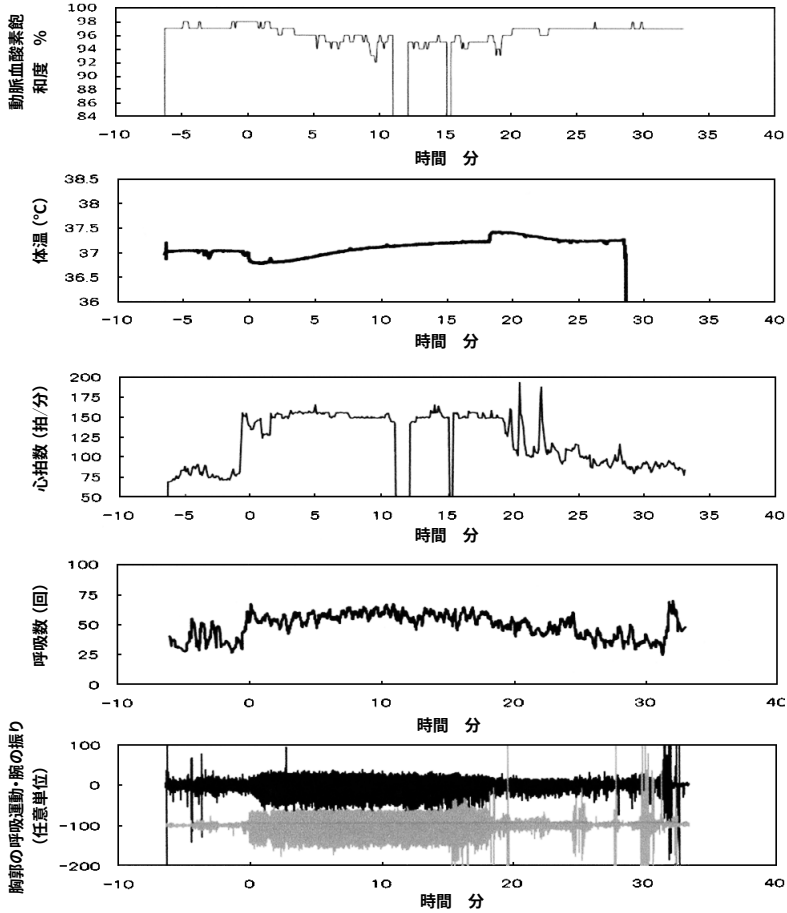
長距離走上位者Aの4分/km の速いペースに準ずる45分走である。胸郭の呼吸運動が後半にむかってかなり大きく，したがって呼吸数も50〜65回くらいと小さい。腕の振りも非常に小さい。心拍数も最高175拍を示すが振幅も大きく40拍以上もある。酸素濃度も92% から88% も低下を継続する。体温も38.5℃を超えるピークに向かって上昇を続けていた。

図 6　Sub.B 陸上競技部（7/13）



6〜7 分/km ペースの 20 分走であり、体温も 37.5℃ のピークで終了している。上位者Aのペースから較べると軽度であろうが，酸素飽和度も 94% に低下，走り始めと後半に 88% ほどへの低下がみられる。後者ではそれに連動して心拍数が 200 拍を超えている。胸郭の呼吸運動が後半に向かって小さく呼吸数も後半に増加があり，腕の振りも同様にかなり大きくなり，ペースアップがうかがえる。

図 7　Sub.C 陸上競技部（7/14）



下位レベル競技部員の，7 分/km ペースの 20 分走。体温ピーク値も 37.5℃ 未満である。
酸素飽和度も 96%～94% の低下を示す。

図８ Sub.D Badminton 部（11/9）

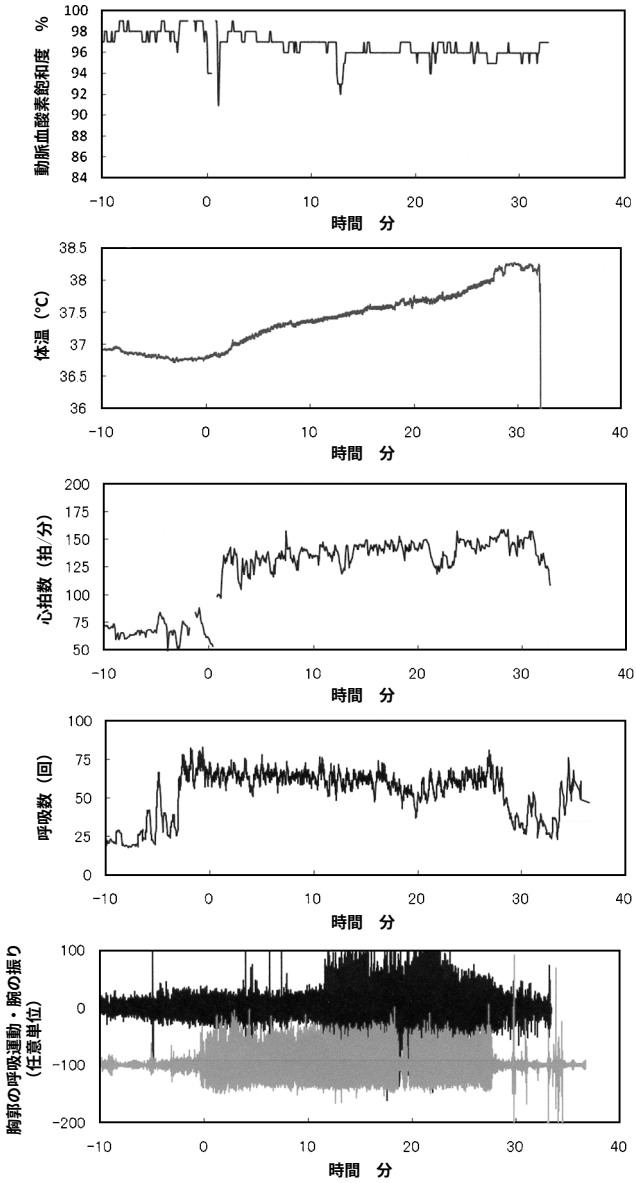
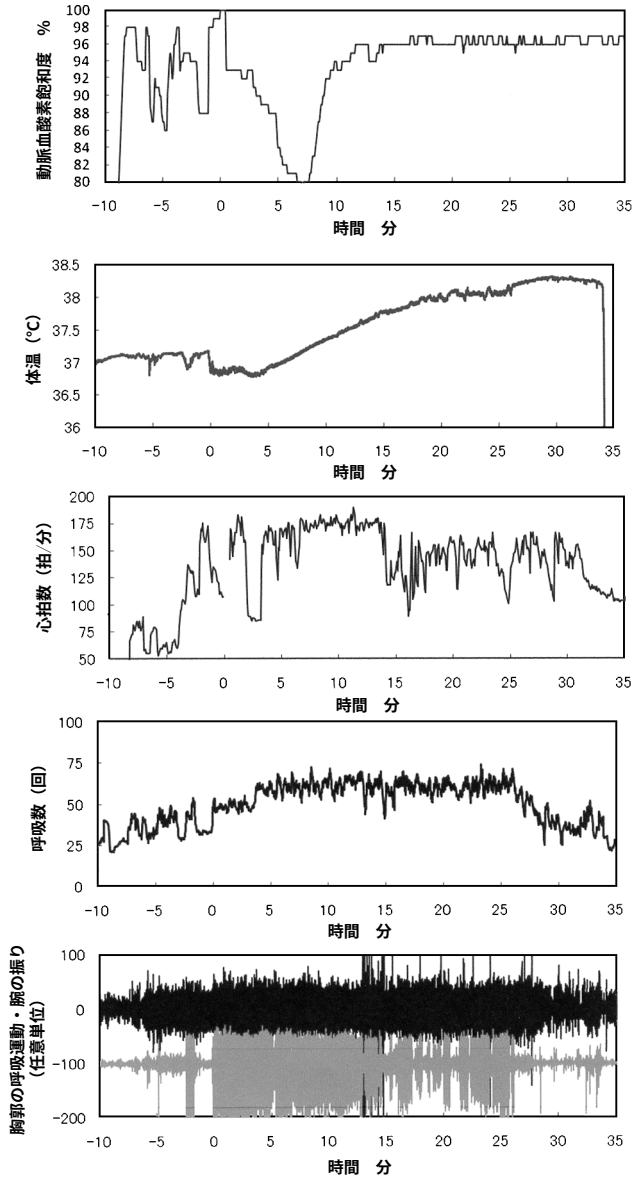


図9　Sub.E Badminton 部（11/9）



運動における酸素摂取量，心拍出量，換気量，炭酸ガス排泄量の関係などの研究[4) 5) 10) 11)] もなされているが，まだなかなか顕著な結果，成果もあがっていないようである。本研究の手法でもきちっと照準を合わせるならば，数値で現われないまでも成果を得ることが可能であろう。

Ⅳ. まとめ

図10では，6名の被験者（18～22歳，56歳－男性）について走り出す前10分から1分前には心拍数が増大することが確認される。これはよく知られるように，これから走ろうとすることに臨んでの交感神経による緊張が高まっていることの現われである。

次に**図11**（6名の被験者）では，長距離走の最中には体温が徐々に上昇していくことが最も顕著な変化であった。

直腸温は走っている間に徐々に上昇し，ちょうどプラトーに達したところで走り終わるパターンになっていた。

図10 走り出す前に上昇する心拍数

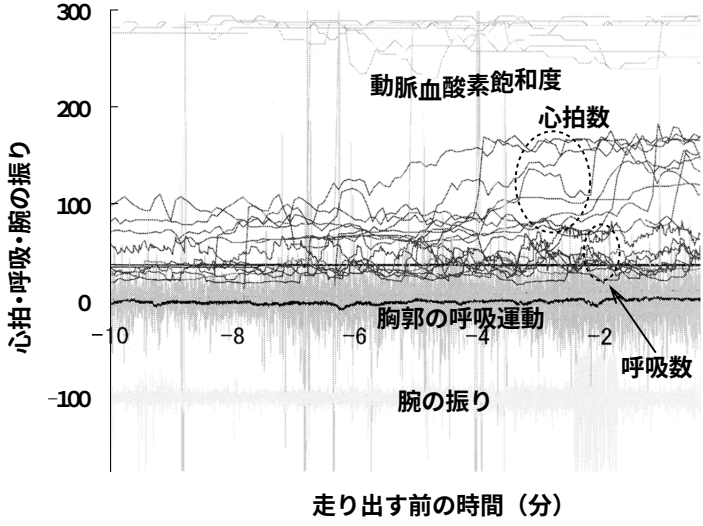


図 11　長距離走の最中には徐々に上昇していく体温

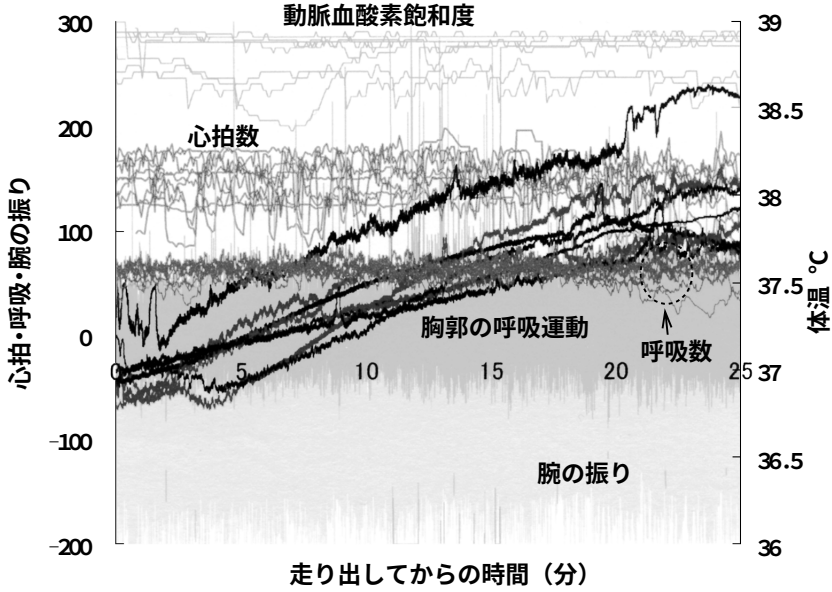
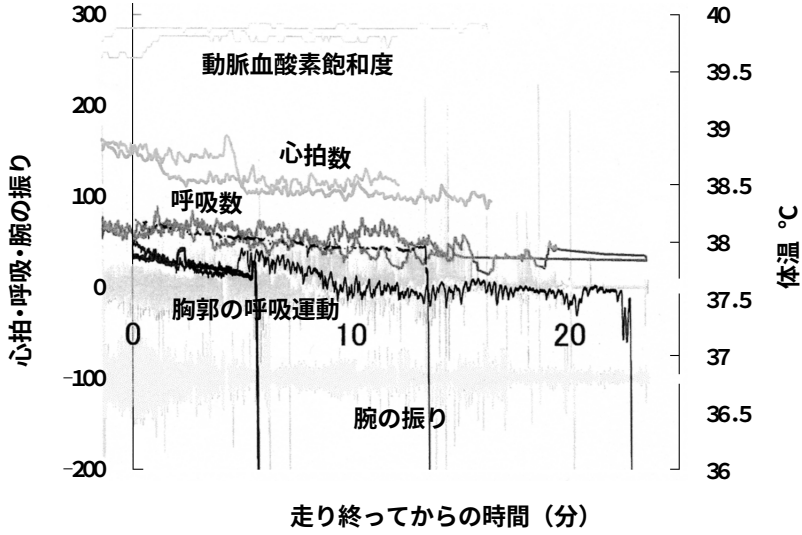


図 12 は走り終わっての回復期，56 歳の例である。他の被験者も同様に走り終わってからの回復は心拍数と呼吸運動とは互いによく相関していたが，体温の回復の経過は心拍や呼吸運動の回復よりもずっと遅いのが一般であった。今回の長距離走では回復期に照準を合わさなかったものの，心拍と呼吸運動は 15〜20 分での回復が観察，推察されたが，体温は剣道や山のぼりが 1 時間余から長い場合 2 時間であった[6) 7)] のと同様な傾向が推察される（体温測定終了時においていずれも 37.5℃ 以上を示しており，**図 2**，**図 11** の測定開始時の体温と比べても明らかにまた回復し切っていない。）。

以上のように，安価になったマイコンを用いて，乾電池も含めて総重量 220 グラムの簡易携帯型の測定器を開発し，心拍数，直腸温，呼吸運動，上肢の動き，動脈酸素飽和度を，なるべく自然な競技状況で測定できるようにした。この装置を使って長距離走におけるこれらヴァイタルサインの

図12　走り終わっての回復期（56歳例）



変動の相関を調べた結果，体温が運動負荷の持続的な蓄積をよく反映する指標であることがわかった。剣道の稽古中やバドミントンの練習においても調べているが，同様な結果を得ている。すなわち，稽古・練習においては，心拍数や呼吸運動の激しさに比べて，体温は休憩を取らない限りはほぼ単調に増加し続けることが認められている。

体温は安価・簡便に計測できて遠隔モニタも容易な指標であるから，これまで以上に有用な指標として体温測定が運動競技能力を問わずに，運動メニュー改善の目的に活かせるだろうと考えている。

謝辞

本研究は，田中陽子（本学・社会イノベーション学部），竹森　重（東京慈恵会医科大学・分子生理学）との共同研究であり，成城大学特別研究助成による研究成果の一部である。ここに感謝とともに記す。

参考文献

1） Amann M, Eldridge MW, Lovering AT, Stickland MK, Pegelow DF & Dempsey JA. Arterial oxygenation influences central motor output and exercise performance via effects on peripheral locomotor muscle fatigue in humans. J Physiol 575: 937-52 (2006)

2） 堀　清記　高温環境下における運動時の生理的反応　　体力科学 56: 1-8 (2007)

3） 三村寛一，野中耕次，安部惠子，前田和良，壇上弘晃，辻本健彦　ホノルルマラソンが市民ランナーの身体に及ぼす影響　大阪経大論集　58-2: 9-20 (2007)

4） 宮地元彦，小野寺昇，木村一彦，米谷正造，小野三嗣　運動時換気量と運動終了後の２つの換気減少成分との関係　体力科学 40: 545 (1991)

5） 武田ひとみ，宮側敏明，松永　智，河端隆志，渡辺一志，二木須美子，藤本繁夫，前田如矢　運動中における呼吸制御が生体反応に及ぼす影響　体力科学 40: 540 (1991)

6） 渡邊由陽，竹森　重，田中陽子　山のぼりでの生体変化：運動鍛錬による暑熱馴化仮説を日常的な運動で検証する　成城大学「経済研究」177・178: 99-119 (2007)

7） 渡邊由陽，竹森　重，巽　申直　剣道動作に影響しない携帯型体温モニタ装置の開発：体温測定の効能　武道学研究 41-1: 17-23 (2008)

8） 山地啓司　運動処方のための心拍数の科学　大修館書店 (1981)

9） 山崎　健，馬場裕子，ソリタラト，岡本芳三　長距離ランニング中のペース変化と瞬時心拍数変動　新潟大学教育人間科学部紀要・自然科学編 8-2: 109-123 (2006)

10） 吉田敬義，有働正夫　運動開始時における酸素摂取量と心拍出量の連関について　体力科学 40: 542 (1991)

11） 吉塚一典，山本正嘉　環境温の違いが多段階ペース走時の鼓膜音に及ぼす影響　スポーツトレーニング科学 9: 19-25 (2008)