

平成 2 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650443

研究課題名（和文）無侵襲的に簡易に計測可能で、かつ嫌氣的代謝閾値の代替となり得る体力指標創出の試み

研究課題名（英文）Development of a non-invasive physical fitness index which can be a simple alternative to anaerobic threshold.

研究代表者

田中 志信（Tanaka, Shinobu）

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：40242218

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000 円、（間接経費） 900,000 円

研究成果の概要（和文）：近年の「健康維持・体力向上」機運の高まりを受けて、個々人の「体力」を簡便に客観評価可能な指標を見出すべく、健康成人65名を対象にエルゴメータによる運動負荷実験を行い呼吸・循環及び乳酸代謝の負荷応答を測定・解析した。その結果、従来体力指標として用いられてきた嫌氣的代謝閾値（AT）及び乳酸性閾値（LT）の出現点（負荷値）と、無侵襲的に得られた循環応答曲線の変曲点における負荷値との間に良好な直線相関があり、代替指標と成り得る可能性を確認した。

研究成果の概要（英文）：To develop a non-invasive and conventional physical fitness index, incremental ergometer exercise tests were carried out in 65 young adults. During the experiments cardiopulmonary parameters and blood lactate concentrations were simultaneously monitored. From the results obtained, it was clearly demonstrated that the value the work load at which the anaerobic threshold(AT) or the blood lactate threshold(LT) appeared could be estimated from the inflection point of non-invasively obtained cardiovascular responses, suggesting availability of this inflection point as a conventional alternative for AT or LT.

研究分野：医用生体工学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・応用健康科学

キーワード：体力指標 嫌氣的代謝閾値 無侵襲心拍出量計測 心機能 血中乳酸濃度 乳酸性閾値

## 1. 研究開始当初の背景

近年、国民医療費の増加が深刻な問題となっており、特に生活習慣病関連の疾患は国民医療費全体の約3分の1を占めていることから、医療費削減のために治療型医療から予防型医療へと移行する動きが広がっている。具体的な国家政策として2008年4月より「特定健康検診・特定保健指導」が実施され、メタボリックシンドローム、生活習慣病などの疾病予防や普段からの運動習慣付けなど「健康維持・体力向上」機運が高まっている。

例えばフィットネスクラブ会員数やジョギング人口は年々増加傾向にあり、健康維持、体力向上のモチベーションを維持するためには普段の運動やトレーニングにより自分の「体力」がどれだけ向上したかを「数値」として示すことが重要で、簡単に計測できて信頼性のある評価方法と指標が必要である。

体力を評価する指標としては、呼気ガス分析装置により得られる最大酸素摂取量や嫌氣的代謝閾値(AT)などが呼吸・循環・代謝の総合的運動耐容を表す指標としてアスリートの持久力測定やトレーニングに利用されるだけでなく、心不全における心機能分類の指標や、治療効果判定、運動耐容測定および運動療法やリハビリテーションの際の運動処方作成などに利用されている。

従ってATを非常に簡便に測定できれば、フィットネスクラブや個人のジョギングなどのトレーニング効果を「可視化」でき、運動習慣を持続させるモチベーション向上にもつながり、また心臓リハ領域での有用性も期待できる。しかし現状では呼気ガス分析装置を用いるために限られた施設でのみ計測可能で、呼気採取マスクを着用するなど被験者への負担も少なくない。

## 2. 研究の目的

上記の様な社会的背景を受けて、本研究では無侵襲的な方法であり被験者への計測の負担が比較的軽微で、将来的に健康診断レベルの適用が期待できる胸部電気的アドミタンス(またはインピーダンス)法に着目した。具体的には運動負荷に対する心機能変化を当該法で無侵襲的に計測すると共に、呼気ガスモニタ装置により同時計測した呼吸・代謝機能変化との対応を検討し、ATの代替となり得る簡易指標が得られるかどうかについて実験的検討を行った。

一方、血中乳酸濃度(BLC)の負荷応答から得られる乳酸性閾値(LT)は古くからATと同様に体力評価指標として用いられているが、血液サンプリングを要し連続測定できないなどの問題がある。そこで上記ATの代替としてLTを循環諸量から無侵襲的に推定可能かについても併せて検討した。

## 3. 研究の方法

胸部電気的アドミタンス法の測定原理に基づく循環動態モニタ装置を用いて運動負

荷中の循環諸量(心拍数や心拍出量など)を計測し、これら循環パラメータの負荷応答から「嫌氣的代謝閾値(AT)」及び「乳酸性閾値(LT)」が推定可能か検討した。以下に実験方法の詳細を示す。

### (1)AT 推定実験

健常成人38名(男性運動者14名、男性非運動者4名、女性運動者12名、女性非運動者8名、平均年齢 $20 \pm 0.67$ 歳)を被験者として、エルゴメータによるRamp負荷(後述)に対する心拍数(HR)、心拍出量(CO)、一回拍出量(SV)の応答の違いを比較・検討した。また、呼気ガス分析装置(AE-310S, ミナト医科)を用いて酸素摂取量( $\text{VO}_2$ )及び二酸化炭素排出量( $\text{VCO}_2$ )を同時計測しATを求め、この時の負荷値(Lat)と心拍数:HR、一回拍出量:SV、心拍出量:COの応答の変曲点における負荷値(Lhr, Lsv, Lco)との相関を検討した。

[Ramp負荷法] 2分間の安静後、1分間のウォーミングアップ(20W)を行い、以後1分間に30Wの割合で各被験者の最大負荷まで直線的に負荷を増加した。なお、ペダルの回転速度はピッチ音により毎分60回に統制した。

### (2)LT 推定実験

健常成人男性27名(平均年齢 $24.3 \pm 7.2$ )を対象にエルゴメータ多段階負荷(後述)に対する循環諸量(HR, SV, CO)の応答を無侵襲的に計測すると共に、簡易血中乳酸測定器(Lactate Pro2, arkray)により血中乳酸値(BLC)を同時計測した。得られたBLCの負荷応答よりLTを求め、この時における負荷値(Llt)とLhr, Lsv, Lcoとの相関を検討した。

[多段階漸増負荷]エルゴメータ上で2分間の安静後、2分毎に20Wずつ負荷を増加し各被験者の限界まで負荷を加え続けた。なお、ペダルの回転速度はピッチ音により毎分60回に統制した。

## 4. 研究成果

### (1)AT 推定実験

表1にAT推定実験に参加した被験者の情報をまとめて示した。上段が男性、下段が女性被験者で、実験実施時において大学のサークルなどに所属し定期的な運動をしている者を「運動者(mt, ft)」、していない者を「非運動者(mu, fu)」とした。ただし男性非運動者(mu)でも高校まで継続的に運動していたものがほとんどで、長期にわたって運動習慣のない被験者はいなかった。一方女性被験者については小学生時代から全く運動習慣のない被験者が5名いた。

図1は呼気ガス分析結果から得た各被験者の最大酸素摂取量(体重で規格化)を運動・非運動者毎にまとめて示したもので、左が男性、右が女性被験者の結果である。これより男女共に非運動者に比べて運動者の平均値が有意に大きく、日頃の運動により体力(運動耐容能)が向上していることが判る。

表 1 A T 推定実験被験者情報一覧

| 被験者 No. | 大学       | 高校       | 中学       | 小学      | Age | Height | Weight | BMI  |
|---------|----------|----------|----------|---------|-----|--------|--------|------|
| mt3xk0  | 弓道3年     | 弓道3年     | バスケット3年  | 運動習慣無   | 21  | 161    | 55     | 21.2 |
| mt404   | 野球2年     | 野球2年半    | 野球2年半    | 野球3年    | 19  | 168    | 55     | 19.5 |
| mt406   | 野球2年     | 野球3年     | 野球3年     | 野球3年    | 20  | 170    | 64     | 22.1 |
| mt407   | ソフトテニス2年 | 運動習慣無    | ソフトテニス3年 | 選手6年    | 20  | 170    | 60     | 20.8 |
| mt413   | テニス2年    | 野球3年     | 野球3年     | 野球4年    | 21  | 168    | 60     | 21.3 |
| mt415   | 野球2年     | 野球3年     | 野球3年     | 野球3年    | 20  | 173    | 63     | 21.0 |
| mt418   | ソフトテニス2年 | ソフトテニス1年 | バドミントン3年 | 運動習慣無   | 20  | 168    | 58     | 20.5 |
| mt419   | バスケット2年  | バスケット3年  | 野球3年     | バスケット2年 | 19  | 168    | 70     | 24.8 |
| mt420   | スポーツ2年   | 野球3年     | 野球3年     | 水泳・野球4年 | 20  | 175    | 68     | 22.2 |
| mt501   | バレーボール2年 | バレーボール3年 | バレーボール3年 | 水泳6年    | 20  | 161    | 52     | 20.1 |
| mt503   | 剣道2年     | 山梨3年     | 剣道3年     | 剣道4年    | 19  | 180    | 65     | 20.1 |
| mt504   | 野球2年     | 野球3年     | 野球3年     | 野球5年    | 21  | 176    | 68     | 22.0 |
| mt519   | サッカー2年   | サッカー2年半  | サッカー3年   | サッカー5年  | 20  | 176    | 64     | 20.7 |
| mt3ztn  | バスケット3年  | バスケット3年  | バスケット3年  | バスケット2年 | 20  | 170    | 62     | 21.5 |
| mu510   | 運動習慣無    | 運動習慣無    | 剣道3年     | 野球4年    | 19  | 189    | 79     | 22.1 |
| mu521   | 運動習慣無    | バスケット3年  | バスケット3年  | バスケット6年 | 19  | 177    | 75     | 23.9 |
| mu3zhyg | 運動習慣無    | 弓道3年     | 剣道3年     | 運動習慣無   | 21  | 170    | 73     | 25.3 |
| mu3zhyt | 運動習慣無    | 野球3年     | 野球3年     | 野球4年    | 21  | 168    | 69     | 24.4 |

| 被験者 No. | 大学       | 高校          | 中学         | 小学       | Age | Height | Weight | BMI  |
|---------|----------|-------------|------------|----------|-----|--------|--------|------|
| ft401   | 選手2年     | バレーボール2年    | バレーボール2年   | 卓球6年     | 20  | 155    | 56     | 23.3 |
| ft402   | 剣道2年     | 剣道3年        | 剣道3年       | 剣道6年     | 20  | 165    | 50     | 18.4 |
| ft412   | バスケット2年  | バレーボール・水泳3年 | バスケット・水泳3年 | バスケット2年  | 19  | 162    | 52     | 19.8 |
| ft414   | ダンス2年    | ソフトテニス3年    | ソフトテニス3年   | 運動習慣無    | 19  | 153    | 45     | 19.2 |
| ft421   | 陸上2年     | 運動習慣無       | ソフトテニス3年   | バスケット2年  | 20  | 156.5  | 50     | 20.4 |
| ft502   | ソフトテニス2年 | ソフトテニス2年    | ソフトテニス2年半  | 運動習慣無    | 20  | 155    | 47     | 19.6 |
| ft505   | バスケット2年  | 卓球2年        | バスケット2年半   | 運動習慣無    | 20  | 163    | 53     | 19.9 |
| ft507   | バレーボール2年 | バドミントン3年    | バレーボール1年   | 運動習慣無    | 20  | 165    | 57     | 20.9 |
| ft508   | バレーボール2年 | 運動習慣無       | バレーボール3年   | 専修5年     | 21  | 157    | 49     | 19.9 |
| ft512   | バレーボール2年 | バレーボール3年    | バレーボール3年   | バレーボール3年 | 20  | 162    | 49     | 18.7 |
| ft517   | バスケット2年  | 運動習慣無       | 運動習慣無      | 運動習慣無    | 21  | 171    | 58     | 19.8 |
| ft520   | バスケット2年  | バスケット2年半    | バスケット2年半   | バスケット2年半 | 19  | 161    | 54     | 20.8 |
| fu408   | 運動習慣無    | 運動習慣無       | 水泳2年       | テニス2年    | 20  | 159    | 56     | 22.2 |
| fu416   | 運動習慣無    | 運動習慣無       | 柔道3年       | 運動習慣無    | 21  | 167    | 64     | 22.9 |
| fu417   | 運動習慣無    | 運動習慣無       | 運動習慣無      | 運動習慣無    | 20  | 163    | 59     | 22.2 |
| fu506   | 運動習慣無    | 運動習慣無       | 運動習慣無      | 運動習慣無    | 20  | 158    | 50     | 20.0 |
| fu509   | 運動習慣無    | 運動習慣無       | 運動習慣無      | 運動習慣無    | 20  | 155    | 48     | 20.0 |
| fu513   | 運動習慣無    | 運動習慣無       | 運動習慣無      | 運動習慣無    | 20  | 160    | 45     | 17.6 |
| fu514   | 運動習慣無    | 運動習慣無       | 運動習慣無      | 運動習慣無    | 20  | 148    | 46     | 21.0 |
| fu515   | 運動習慣無    | 運動習慣無       | 運動習慣無      | バスケット2年  | 20  | 159    | 51     | 20.2 |

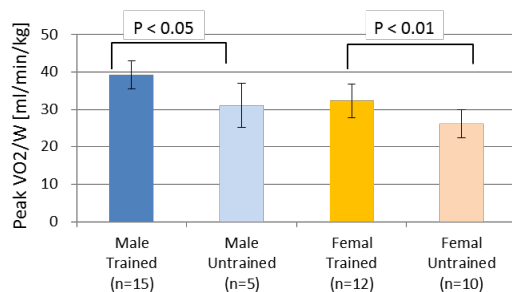


図 1 運動者と非運動者の最大酸素摂取量の比較（左：男性，右：女性）

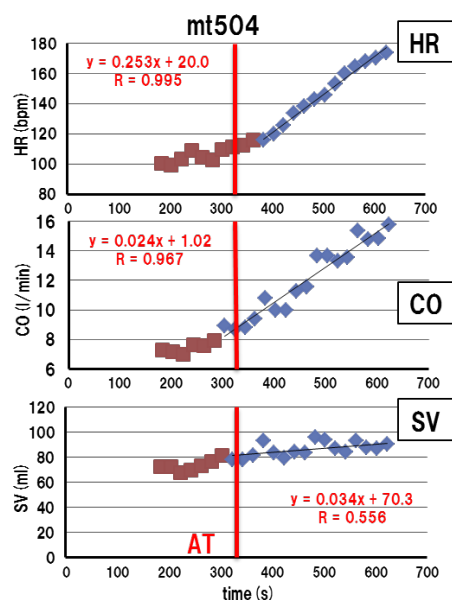


図 2 エルゴメータ負荷時の循環応答結果例（赤線は A T 出現時点を示す）

図 2 は男性運動者の計測結果例で，上から順に HR, CO, SV の経時変化（負荷応答）である．なお赤線は V-Slope 法により特定した A T の出現時点である．この結果より時間経過（負荷増加）に伴い HR, CO, SV 共に増加し，その傾きがある時点から増加あるいは減少している，即ち「変曲点」が見られる．この現象は他の被験者でもほぼ同様であった．

Hofmann らは HR における当該変曲点に着目し，その出現時点が AT と一致すると報告している[Med. Sci. Sports Exerc. 29(6):762-768,1997]．この方法，即ち AT 推定に HR を利用する「従来法」に対して，全身の血液循環や心臓の収縮力をより直接的に反映していると考えられる CO や SV の負荷応答を用いることで，より高精度で AT を推定可能ではないかとの仮説のもとにデータ解析を行った．

具体的には図 2 の赤線で示した AT 出現点における負荷値 (Lat) と HR, CO, SV の応答の変曲点における負荷値(Lhr, Lco, Lsv)との相関を検討した．

表 2 AT 時の負荷値と循環応答変曲点から得た負荷値との相関分析結果

|    |      | デー-タ数<br>n | 回帰直線  |      | 相関係数  |
|----|------|------------|-------|------|-------|
|    |      |            | 傾き:a  | 切片:b |       |
| HR | 全被験者 | 38         | 0.747 | 14.5 | 0.691 |
|    | 選定後  | 18         | 0.934 | 5.1  | 0.911 |
| CO | 全被験者 | 38         | 0.487 | 52.3 | 0.420 |
|    | 選定後  | 18         | 0.863 | 12.9 | 0.939 |
| SV | 全被験者 | 38         | 0.946 | 9.0  | 0.615 |
|    | 選定後  | 16         | 0.938 | 3.6  | 0.920 |

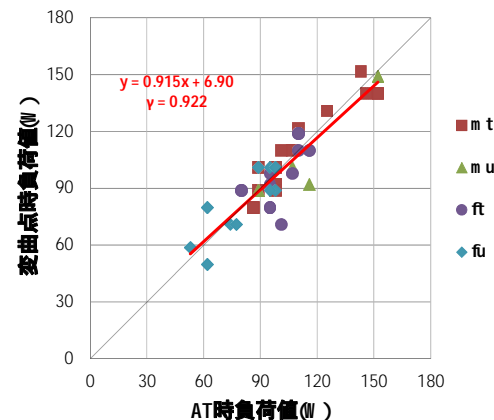


図 3 表 2 における「選定後」のデータ全てを用いて得られた相関図

表 2 はその結果を示したもので，表中の「全被験者」とは 38 名全員分のデータを用いて HR, CO, SV それぞれについて相関分析を行った結果である．これに対して「選定後」とは，各被験者において Lhr, Lco, Lsv のうちで Lat に最も近かったパラメータを選定し，これらの値を用いて相関分析を行った結果である．なお後者については同一被験者で異なる二つのパラメータが同値となる場合があったため「選定後」のデータ数 (n) をすべて足し合わせると「全被験者数」の 38 を超えている．

分析結果について見てみると、「全被験者」の場合はすべてのパラメータにおいて回帰直線の傾き:  $a$  及び相関係数:  $r$  共に  $0.4 \sim 0.8$  程度と良好な結果とはなっていない。これに対して「選定後」の場合は各パラメータ共に  $a$  が  $0.9$  前後,  $r$  が  $0.9$  以上と非常に良好な直線相関となっている。また図3は「選定後」のデータ全てを用いて得た散布図で,  $a = 0.915$ ,  $r = 0.922$  と極めて良好な回帰直線が得られている。

以上より無侵襲的に得られる  $L_{hr}$ ,  $L_{sv}$ ,  $L_{co}$  のうち、どれか一つを何らかの基準により選定できれば高精度で  $L_{at}$  を推定可能であることがわかった。なお選定基準としては過去の運動履歴やその種類(瞬発力が持久力かなど)を考慮する必要があると予想される。

## (2) LT 推定実験

図4はLT推定実験結果の一例で、横軸は負荷値、縦軸は上から順に血中乳酸値(BLC), 心拍数(HR), 心拍出量(CO)である。この結果よりBLCの負荷応答には2箇所の明瞭な変曲点があることが判る。この2箇所の変曲点のうち1つ目の変曲点が, BLCが安定水準から非線形的に急増する直前のポイントであり乳酸性閾値(LT)となる。

またHRの応答曲線からも変曲点が2か所観察され、前出のHoffmanらは最初の点がLTと良く一致すると報告しているが[*Intl. J. Sports Med.*, 15:232-237, 1994], 一方において実際のLTよりも高い値を示すという報告や変曲点そのものが現れない例があるという報告も有り評価が定まっていない。

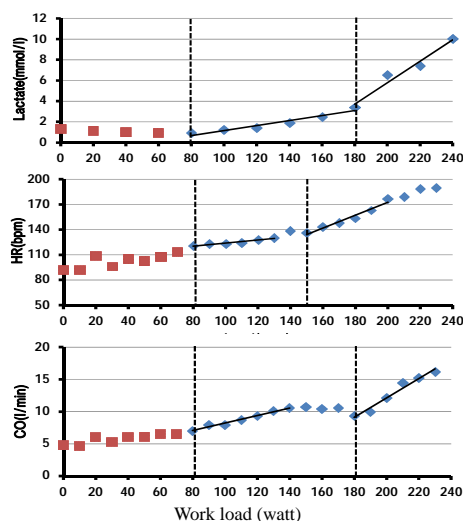


図4 エルゴメータによる負荷値(横軸)とBLC(上), HR(中), CO(下)の関係

またHRに比べて全身の血液循環状態をより直接的に反映していると考えられるCOの負荷応答においても2箇所の変曲点が確認された。そこでHR及びCOそれぞれの第一・第二変曲点(HR1, CO1, HR2, CO2)における負荷値( $L_{HR1}$ ,  $L_{CO1}$ ,  $L_{HR2}$ ,  $L_{CO2}$ )を求め、これと第一・第二乳酸性閾値(LT1, LT2)における負荷

値( $L_{LT1}$ ,  $L_{LT2}$ )との相関について検討した。その結果を図5及び図6に示す。

この結果からCO1(図5左)においては回帰直線の傾き:  $a=0.819$ , 相関係数:  $r=0.903$ , HR1(図5右)に関しては  $a=0.821$ ,  $r=0.765$  となった。また, CO2(図6左)においては  $a=0.986$ ,  $r=0.906$ , HR2(図6右)に関しては  $a=0.509$ ,  $r=0.719$  となりHRとCOの回帰直線の傾き, 相関係数を比較すると, COの相関係数がHRよりも良好な結果となっている事が確認された。

このような結果が得られた理由として、心拍数(HR)は「心臓がどれだけ早く鼓動できるか」という「変時作用」の側面のみを反映しているのに対して、心拍出量(CO)は「どれだけ強く収縮できるか」という「変力作用」を反映する一回拍出量(SV)とHRの掛け算で表されるため、変時・変力の両側面を含んでいるためにHRよりも高精度で乳酸性閾値(LT)が推定可能であったと考えられる。

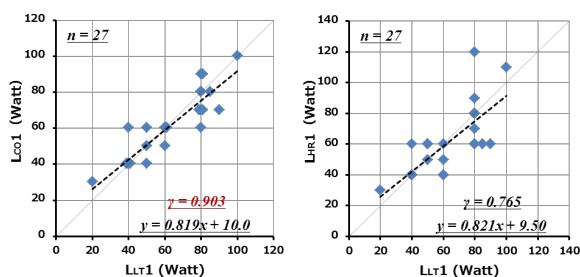


図5 血中乳酸値第1変曲点の推定精度検証結果(左:  $L_{LT1}$ - $L_{CO1}$ , 右:  $L_{LT1}$ - $L_{HR1}$ )

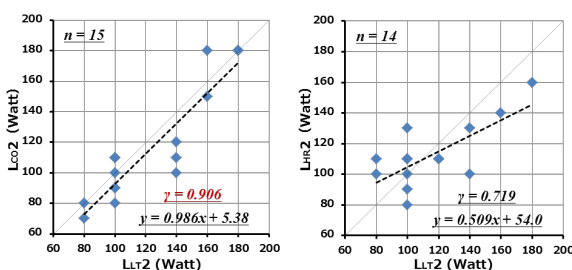


図6 血中乳酸値第2変曲点の推定精度検証結果(左:  $L_{LT2}$ - $L_{CO2}$ , 右:  $L_{LT2}$ - $L_{HR2}$ )

以上、無侵襲的かつ簡易に測定可能で嫌气的代謝閾値(AT)または乳酸性閾値(LT)の代替となり得る体力の新指標を見出すべく、エルゴメータ負荷に対する循環応答を無侵襲心拍出量計測装置により計測した。

呼気ガス分析装置との同時計測結果からは, HR, CO, SVの負荷応答の変曲点を用いた場合、被験者毎に誤差が最小となるパラメータが異なること、各パラメータにおいて誤差が最小となるデータを抽出し相関分析すると良好な結果が得られることを確認した。従って誤差が最小となるパラメータの『選定基準』が明確になれば、高精度でATが推定可能であると考えられる。

一方、血中乳酸値との同時計測実験については、心拍数(HR)よりも心拍出量(CO)の方が

高精度で LT を推定可能であることを確認した。その理由としては前述したように HR に比べて CO の方が心機能の二つの側面（変時及び変力作用）を反映していることが考えられる。

今後の予定としては若年女性及び中高年男女を対象とした追加実験により本法の妥当性を検証すると共に、新たな測定項目として心臓の酸素消費を反映するとされている「Double Product」（心拍数×最高血圧）に関しての検討も行っていきたいと考えている。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

### 〔雑誌論文〕（計 2 件）

J. Lee, K. Matsumura, K. Yamakoshi, P. Rolfe, S. Tanaka and T. Yamakoshi: Comparison Between Red, Green and Blue Light Reflection Photoplethysmography for Heart Rate Monitoring During Motion, Proceedings of the 35th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medical and Biological Society, (2013), 1724-1727, 査読有

DOI: 10.1109/EMBC.2013.6609852

田中志信, 野川雅道, 小川充洋, 山越憲二: 嫌氣的代謝閾値の代替となり得る簡易体力指標に関する基礎的検討, 第 27 回生体・生理工学シンポジウム論文集, 27, (2012), 285-286, 査読無, カタログ No. SY0010/12/0000-0285©2012 SICE

### 〔学会発表〕（計 5 件）

沖本康平, 宮崎勝貴, 野川雅道, 山越憲二, 田中志信: 無侵襲心拍出量計測による簡易体力評価法の検討, 第 53 回日本生体医工学会大会, 2014 年 6 月 26 日, 仙台国際センター（仙台市）

沖本康平, 宮崎勝貴, 野川雅道, 山越憲二, 田中志信: 無侵襲心拍出量計測による簡易体力指標創出の試み - 血中乳酸値との比較 -, 平成 25 年度日本生体医工学会北陸支部大会, 2013 年 12 月 7 日, 福井市地域交流プラザ（福井市）

J. Lee, K. Matsumura, K. Yamakoshi, P. Rolfe, S. Tanaka and T. Yamakoshi: Comparison Between Red, Green and Blue Light Reflection Photoplethysmography for Heart Rate Monitoring During Motion, 35th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medical and Biological Society, 2013.7.4, Osaka International Convention Center, Osaka (Japan)

田中志信, 野川雅道, 小川充洋, 山越憲二: 嫌氣的代謝閾値の代替となり得る簡易体力指標に関する基礎的検討, 第 27 回生体・生理工学シンポジウム, 2012

年 9 月 20 日, 北海道大学学術交流会館（札幌市）

吉元健史, 松村健太, 山越健弘, 小川充洋, 湯地忠彦, 山越憲二: 携帯型胸部電氣的アドミタンス心拍出量計測装置の開発とその妥当性評価, 生体医工学シンポジウム 2012, 2012 年 9 月 8 日, 大阪大学基礎工学部（大阪市）

### 〔その他〕

ホームページ等

金沢大学理工研究域 人間適応制御研究室

<http://www.hm.t.kanazawa-u.ac.jp/biomed/top.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 志信 (TANAKA SHINOBU)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：40242218

### (2) 研究分担者

山越 憲一 (KEN-ICHI YAMAKOSHI)

昭和大学・医学部・客員教授

研究者番号：40014310

野川 雅道 (NOGAWA MASAMICHI)

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号：40292445