

平成22年 6月 3日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20700504  
 研究課題名（和文） 光学的手法を用いたペダルこぎ運動中の非接触呼吸計測に関する検討  
 研究課題名（英文） Study on Non-contact Respiration Measurement under Pedaling Exercise Using Optical Method  
 研究代表者  
 青木 広宙（AOKI HIROOKI）  
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・特任研究員  
 研究者番号：60380193

## 研究成果の概要（和文）：

運動トレーニングにおいて最適な運動強度は個人によって異なる。これを特定するためには、呼気ガス分析装置と呼ばれる、呼吸流を直接的に測定する装置が、必要であったが、本研究の成果により、光学的・画像工学的な手段を用いることで非接触かつ無拘束で自転車こぎ運動時の呼吸を計測できるようになった。簡便に最適運動強度の算定が可能となることで、運動効果の高いトレーニングプログラムの作成に役立つものと期待される。

## 研究成果の概要（英文）：

There are individual variations in the optimum exercise intensity in the exercise training. In order to specify the optimum exercise intensity, the direct measurement equipment for respiration flow called the gas analyzer is used. It was clarified by the result of the research that the non-contact and non-restraint respiration measurement under bicycle pedaling motion is realized by using the optical and image means. The calculation of the optimum exercise intensity becomes conveniently possible by our proposed method, and our proposed method is expected to be useful for the preparation of training program with high motional effect.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,100,000	330,000	1,430,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学 ・ スポーツ科学

キーワード：スポーツバイオメカニクス

## 1. 研究開始当初の背景

呼吸は、個人の運動能力を特定する上で重要なバイタルサインであると言える。これまで、リハビリテーション分野などを中心に、運動者の持久力を特定し最適な運動プログラムを処方するために、呼気ガス分析装置による呼吸計測が行われてきた。呼気ガス分析装置による計測においては、口鼻部をマスクで覆い計測が行われる。マスクの取り付けや洗浄に手間や時間がかかり、装置が高価である。リハビリテーションのような少人数を対象とした計測においては、これらは大きな問題となっていないが、多人数を対象とした計測を行うには手軽に実施可能な計測手法であるとは言いがたい。われわれは、簡便に運動中の呼吸計測を実現できれば、フィットネスクラブに設置するなどして日々の健康管理に役立てることができ、国民の健康増進のために役立つものと考えた。

われわれは、これまで、睡眠時無呼吸症候群のスクリーニングを目的として、画像センサを応用した非接触呼吸計測手法に関する研究に取り組んできた。この非接触呼吸計測手法は、複数のドットで構成されるドットマトリックスパターン光を就寝者の胸腹部に照射し、画像処理によりその動きを解析することで呼吸を計測する。検討の結果、この呼吸計測において計測される呼吸波形が、実際の呼吸気流による波形と高い相関性を有することを示すに至った。

上記の非接触呼吸計測手法を応用し、リカベント型のエルゴメータで自転車こぎを行う運動者の呼吸を非接触で計測することを試みた。呼吸運動に比べて自転車こぎによる体動が大きいため計測される波形は体動による成分が支配的であったが、計測された波形信号にフィルタ処理を施すことで呼吸運動成分のみを抽出することができた。呼気ガス分析装置との比較実験を行った結果、2つの計測装置による計測結果の間には高い相関性が示され、提案した手法の有効性が明らかとなった。

## 2. 研究の目的

上記の非接触呼吸計測方法に基づき簡便に実施可能な運動中の呼吸計測方法の確立を目指し、本研究においては、リカベント型自転車エルゴメータ以外に、より広く利用されているアップライト型自転車エルゴメータによる運動中の非接触呼吸計測を実現することを目的とした。アップライト型自転車エルゴメータにおいては、リカベント型と比較して運動中の姿勢が安定しないため、非接触での呼吸計測の実現が困難であるものと考えられ、その実現に向けて工夫が必要であると考えられた。

## 3. 研究の方法

### (1) 概要

われわれの従来研究においては、体表面にドットマトリックスパターンを投影してきたが、本研究では、複数のスリットからなるマルチスリットパターン光を投影することとした。ドットマトリックスパターン投影では、ドットとドットの間の部分の呼吸運動が測定できないが、マルチスリットパターンであればパターン光の投影領域が増えるため、より詳細な呼吸運動の測定が可能となるものと考えた。

本研究では、実測システムを構築し、構築したシステムを用いて実測を行なった。呼気ガス分析装置との比較実験を行うことで、提案手法の有効性・妥当性について検証した。

### (2) 提案手法

われわれが提案する運動中の非接触呼吸計測方法においては、図1に示すように、パターン光投影装置およびCCDカメラを、自転車エルゴメータでペダルこぎ運動を行う被験者の直上に設置する。パターン光投影装置により被験者の胸腹部にはマルチスリットパターンが投影され、パターン光がCCDカメラにより図2に示すような画像が取得される。測定中、被験者は、自転車エルゴメータの背もたれに背をつけた状態でペダルこぎ運動を行う。画像には、被験者の胸部、腹部、足の付け根が撮影される。

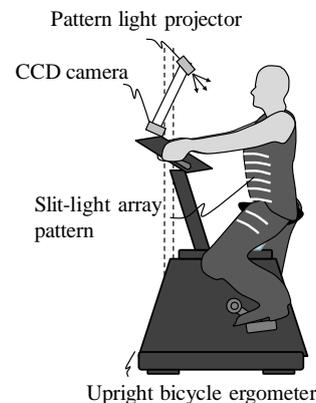


図1 システムの模式図

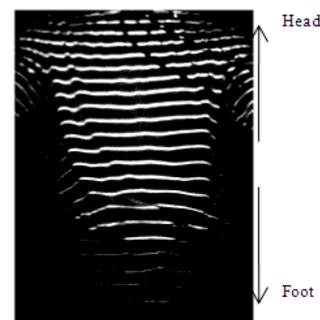


図2 撮像される画像

パターン光投影装置は、光学素子とレーザ光源とから構成される。光学素子はおよそ二百本の光ファイバーをすだれ状に配列したものである。光ファイバーの向きが直交するように固定された3枚の光学素子に対しレーザ光を入射すると、これらは回折格子として作用し、対向する物体表面にマルチスリットパターン光が投影される。

図3に示すように、被験者の胸腹部の上下動に伴い、画像中でパターン光は画像中で移動する。画像中のパターン光が移動する方向は、パターン光投影装置と CCD カメラとを結ぶ方向である。投影されるパターンは被験者の呼吸運動やペダルこぎ運動に伴い画像中を移動し、その移動量は被験者の動きに応じて大きくなる。図3に示す光学配置において被験者の胸郭部の上下動 $\Delta Z$ と画像中でのそれぞれのドットの移動量 $\Delta P$ との間には次式の関係が成り立つ。

$$\Delta P = \frac{\Delta Z}{Z(Z - \Delta Z)} DL \quad (1)$$

ここで、 $L$ はパターン光投影装置と CCD カメラのレンズとの距離、 $Z$ はパターンと線分 $L$ との距離、 $\Delta Z$ はパターンが投影された部位の変動距離、 $\Delta P$ は画像中におけるパターンの移動距離をそれぞれ示している。上式①は、三角測量の原理に基づくものである。

上式①により各パターンのフレーム間移動量を算出する。そして、各パターンのフレーム間移動量を、全パターンについて総和を算出する。パターンのフレーム間移動量の総和は、画像中に撮影された胸腹部全体の呼吸運動やペダルこぎ運動に伴うパターンの上下動を反映している。上記の通り、パターンのフレーム間移動量は三角測量の原理に基づき体表面と撮像装置との距離変化に相当することから、パターンのフレーム間移動量の総和は体積変化に相当する量であると言える。

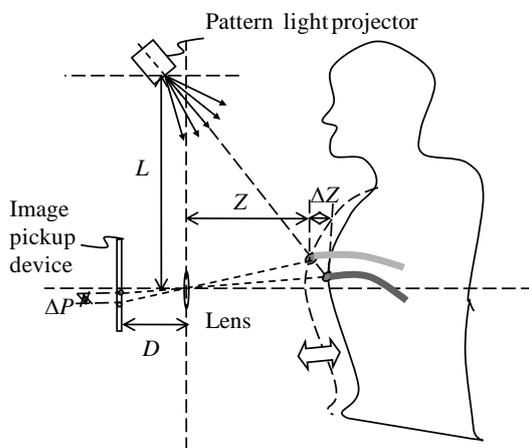


図3 測定原理

被験者がペダルこぎ運動をせずにじっとしている状態（安静状態）においては、胸腹部に表れる動きは呼吸によるものである。したがって、パターンのフレーム間移動量の総和を時系列に並べると、図4に示すように、呼吸による周期変動を表す波形が得られる。波形の符号（正負）は呼吸の状態を示し、呼気状態と吸気状態では符号が逆転する。例えば、被験者が呼気状態にあるときには波形は正の値を示し、逆に吸気状態にあるときには負の値を示す。ただし、呼吸状態と正負の対応は、座標系の設定により決定される。

被験者がペダルこぎ運動をしている状態では、胸腹部には呼吸による動きだけでなくペダルこぎによる動きが含まれるため、フレーム間移動量を時系列に並べて得られる波形は呼吸周期とペダルこぎ周期の合成波形となる。ペダルこぎ運動時の波形において、ペダルこぎ運動成分は呼吸計測にとってはノイズとなる。このため、ペダルこぎ運動の成分を除去する必要がある。

本研究の測定においては、被験者のペダルこぎのペダル回転数は、一般的に利用されるペダル回転数である60rpmと定める。被験者がペダルこぎ運動を行っている状態で算出される波形に対しFFTを適用し、ペダル回転数に対応する周波数より高周波成分をローパスフィルタ処理することで、図5に示すように、呼吸運動の周波数成分のみを抽出することができる。ローパスフィルタ処理によって抽出された呼吸運動成分波形は、呼吸による周期変動を示す。

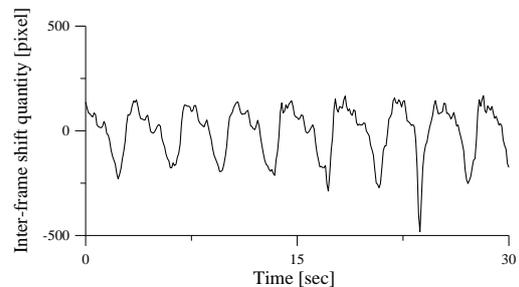


図4 呼吸波形

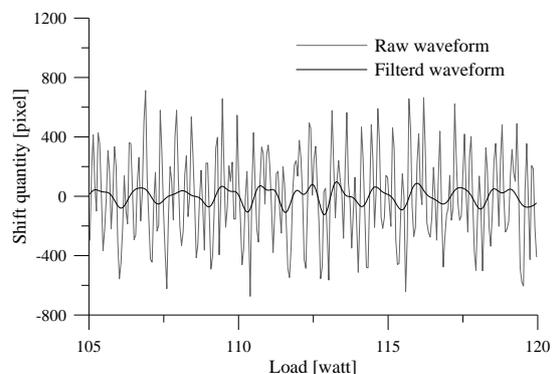


図5 体動波形からの呼吸成分の抽出

呼吸状態にある区間の波形の積分値は、呼吸に伴う胸腹部の運動の量である。同様に、吸気状態にある区間の波形の積分値は、吸気に伴う胸腹部の運動の量である。本稿では、それぞれの積分値の値を準一回換気量 (QTV: Quasi Tidal Volume) と呼ぶこととする。QTV は実際の呼吸流量である一回換気量に準ずるため、QTV と 1 分間当りの呼吸数の積は分時換気量 (VE: minute VEntilation) に相当すると考えることができる。ここで、QTV と 1 分間当りの呼吸数の積を準分時換気量 (QVE: Quasi minute VEntilation) と呼ぶこととする。

#### 4. 研究成果

測定システムを適用し、男性 15 名 (年齢  $28 \pm 7$  歳, 身長  $170.3 \pm 7.5$  cm, 体重  $68.4 \pm 9.1$  kg) を対象としたペダルこぎ運動中の非接触呼吸運動計測を試みた。なお、実験に際し被験者には実験の趣旨を口頭並びに文書にて説明し、実験への協力に関して文書による同意を得た。図 6 に測定中の様子を示す。

本実験では試作システムによる計測と共に、従来手法である呼吸ガス分析機 (ミナト医科学社 AEROMONITOR AE-280S) を用いた同時測定を行い、われわれの提案手法の妥当性について検討した。測定プロトコルにおいて、被験者は 1 分間安静状態を保ち、次いで初期負荷 0W, 漸増負荷  $20\text{W}/\text{min}$  のランプ負荷法により負荷を徐々に増加させ被験者の限界までペダルこぎ運動を行うこととした。被験者のペダルこぎ回転数が 60rpm となるように、電子メトロノーム音により管理した。



図 6 実験の様子

図 7 に、同時測定による結果を示す (被験者 3 名分)。丸字シンボル (○) は試作システムにより得られた QVE を、十字シンボル (+) は呼吸ガス分析機による VE を、それぞれ示している。図 7 のグラフの縦軸は、QVE と VE の値を、それぞれの安静時における平均値を基準として正規化している。図 7 より、いずれの被験者においても QVE と VE とが同

じ傾向で変化しているが、運動強度が漸増するにつれて QVE の値にばらつきが生じていることがわかる。

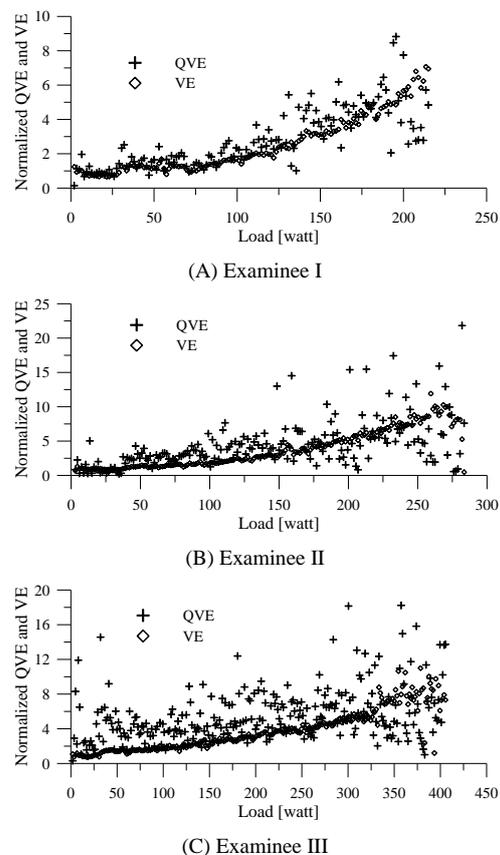


図 7 QVE と VE の変化動向の比較

図 8 は、図 7 に示したそれぞれのグラフに対して移動平均処理を施した結果である。移動平均処理は、前後 2 測点分の QVE の値を用いて行なった。移動平均処理を行なうことで、図 7 で見られた QVE のばらつきが抑制されており、運動強度 200 ワット付近まで、QVE の変化傾向が VE のそれとよく一致していることがわかる。

図 9 および図 10 は、それぞれ、図 7 および図 8 の Bland-Altman 図である。図 9 と図 10 を比較すると、図 10 においては、0~180 ワットの運動強度においては、差 (縦軸) の値が、 $\pm 1.96\text{SD}$  の範囲に分布しており、図 9 に比べて、QVE と VE の差異が小さいことがわかる。本結果より、180 ワット以下の運動強度のペダルこぎ運動であれば、従来技術である呼吸ガス分析装置と同等に呼吸変動が非接触・無拘束で測定できることが明らかとなった。人の換気性作業閾値は、高くても 120 ワット程度であることから、180 ワット程度までの運動強度における呼吸変動が測定できれば、換気性作業閾値の算定は可能である。

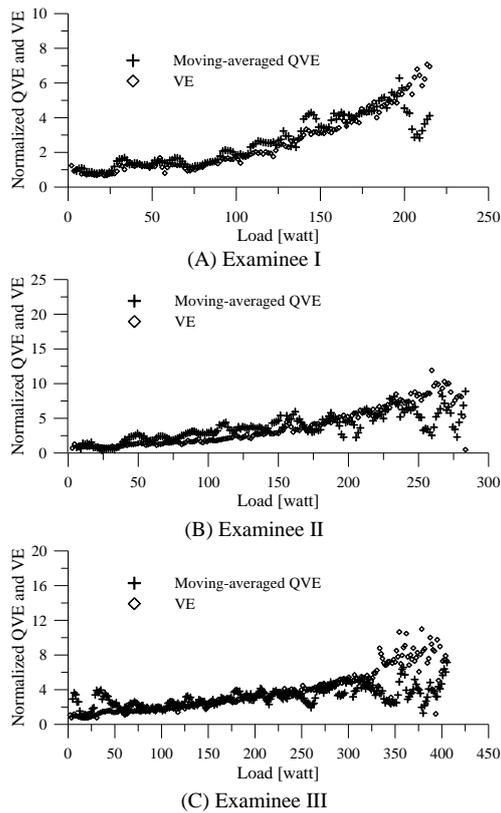


図8 QVE と VE の変化動向の比較  
(移動平均処理)

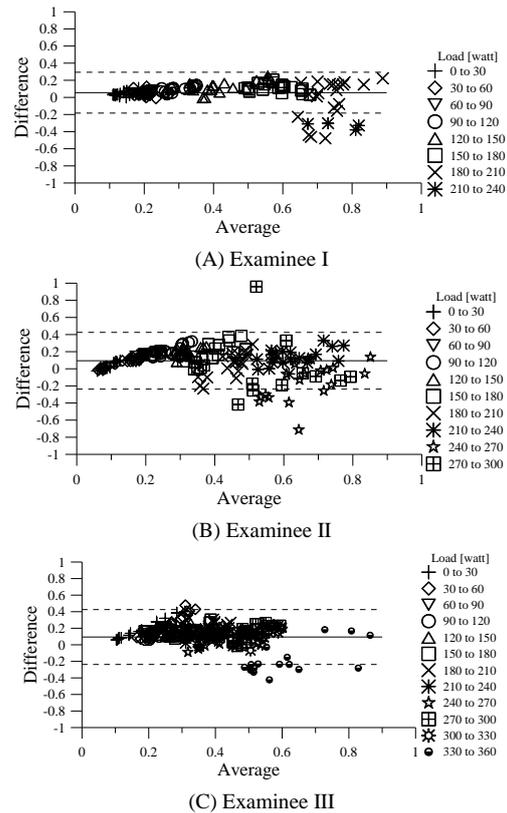


図10 Bland-Altman 図 (移動平均処理)

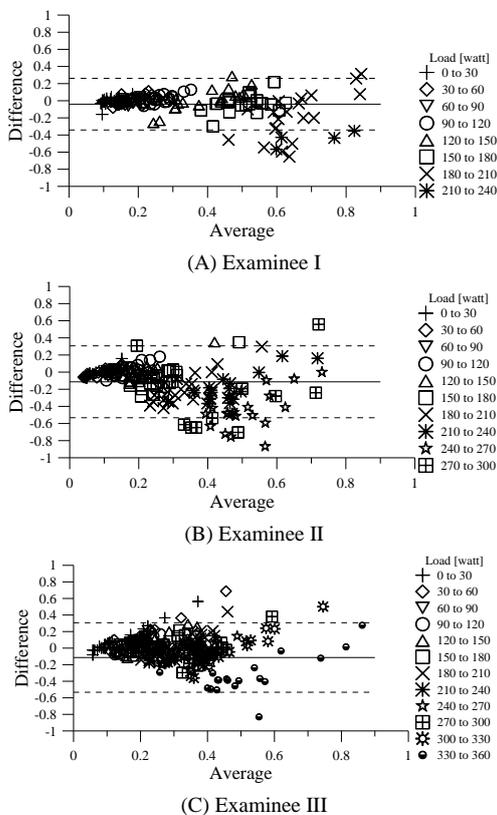


図9 Bland-Altman 図

したがって、これまでマスクを着用しての直接呼吸計測でしか算定することができなかった換気性作業閾値が、提案手法を応用することで簡便に算定可能となると考えられる。換気性作業閾値が簡便に算定できるようになれば、日々の運動トレーニングにおいて、個人の最適運動強度の特定が可能となり、効率的なトレーニングプログラムを作成する手助けとなる。また、日々のトレーニング効果を知ることができ、トレーニングに対するモチベーションの維持・向上にも役立つものと考えられる。本研究成果は、国民の健康増進に貢献するものと期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

(1) Hirooki AOKI, Kohji KOSHIJI, Masamichi SAKAGUCHI, and Hideo FUJIMOTO: “Noncontact Respiration Measurement under Pedaling Motion Using Slit-light Array Pattern Projection”, Proceedings of 16th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision, 査読有, Vol. 16, 2010, pp. 504-508

(2) 青木広宙, 越地耕二: “パターン光投影を用いた非接触肺機能検査に関する検討”, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 130, 2010, pp. 813-821

(3) H. Aoki, S. Ichimura, T. Fujiwara, S. Kiyooka, and K. Koshiji: "Calculation of Systemic Aerobic Capacity without Contact Using Pattern Light Projection", Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2009, 査読有, Vol. 25, 2009, pp. 312-314

(4) 青木広宙, 市村志朗, 清岡智, 越地耕二: "非接触呼吸計測を用いた漸増負荷試験による換気性作業閾値決定の試み", 情報科学技術レターズ, 査読有, Vol. 7, 2008, pp. 37-40

(5) Hirooki AOKI, Shiro ICHIMURA, Satoru KIYOOKA, Kohji KOSHIJI: "Calculation of Ventilation Threshold Using Noncontact Respirometry", Proceedings of 30th IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Annual International Conference, 査読有, Vol. 30, 2008, pp. 2273-2276

(6) 青木広宙, 市村志朗, 清岡智, 越地耕二: "パターン光投影を用いた呼吸計測による有酸素能力測定", 信学技報, 査読無, PRMU2008-107, 2008, pp. 107-112

[学会発表] (計5件)

- (1) 青木広宙: "画像工学的手段を応用したインテリジェント自転車エルゴメータの開発", 第7回生活支援工学系学会連合大会, 2009年9月24日, 高知工科大学, 高知
- (2) 青木広宙: "Basic Study on Noncontact Respiration Measurement under Pedaling Motion with Upright Bicycle Ergometer", World Congress on Bioengineering 2009, 2009年7月29日, Hong Kong Polytechnic University, China
- (3) 小澤尚由 (指導学生): "Proposal of 3-D Shape of Body Surface using Slit-light Array Pattern Projection", World Congress on Bioengineering 2009, 2009年7月27日, Hong Kong Polytechnic University, China
- (4) 青木広宙: "アップライト型自転車エルゴメータによる自転車こぎ運動時の非接触呼吸運動計測", 第48回日本生体医工学会講演会, 2009年4月25日, タワーホール船堀, 東京
- (5) 小澤尚由 (指導学生): "マルチスリットパターン投影による非接触呼吸機能計測システム", 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2008年12月7日, 長良川国際会議場, 岐阜

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青木 広宙 (AOKI HIROOKI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・特任  
研究員

研究者番号: 60380193