

ラグランジュアン人間気象学センサの開発

DEVELOPMENT OF LAGRANGUAN HUMAN BIOMETEOROLOGICAL SENSORS

仲吉信人¹・神田学²
Makoto NAKAYOSHI, Manabu KANDA

¹学生会員 工修 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 博士後期課程（〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1石川台4号館）

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 准教授（〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1石川台4号館）

This paper deals with the new method to detect short wave and long wave radiation (hereafter SW and LW, respectively) and to measure pulse-rate (hereafter PR) continuously. In order to measure SW and LW, and PR, we proposed two useful algorithms. SW and LW were computed from the heat balance equations (hereafter HEB) of two globe thermometers with different radiative properties, namely albedo and emissivity, and PR was estimated from the self-produced photoplethysmograph (PPG) specific to accurate measurements even during exercise. For the estimation of SW and LW from the HEB of the two globe thermometers, we presented the methods to identify the radiative properties of them.

Key Words : Heat Island, Black and white globe thermometer, Vital signs, Lagrangian human biometeorology, Compact and portable sensors

1. はじめに

ヒートアイランド現象は、都市の気象場への影響のみならず、そこで活動する人間の健康をも脅かす重要な問題の一つである。問題解決のために都市内温熱環境の詳細把握が望まれるが、実態解明に十分な量の観測データが得られているとはいえない。街区内熱環境の基礎的データ取得に向けた試みとして、酒井ら¹⁾は、気象センサを京都市内の多数の街路樹に設置し、集中観測を行っている。また、総務省は小型の無線センサを街中に配置するセンサネットワーク構想を提唱し、街区内環境を恒常的に監視する仕組み構築に取り組んでいる。高密度な定点観測網を整備する上記手法は流体力学的にはオイラー的概念に立脚していると言える。

一方、著者らはラグランジュアン概念に基づいた観測評価手法を提案している。それは、人が計測システムを装着し、移動経路に沿って連続的に変化する気象因子を捉えようとするものである。温熱場変化に伴う人体生理（体温、脈拍など）の応答も同時に計測することで、効果的な熱中症対策が可能となり、また、より人間に即した都市空間の快適性評価に繋がることが期待される。著者らは、ラグランジュアン概念に基づき、気象、人体生理、及びそれらの関係に焦点を当てる本研究をラグラン

ジュアン人間気象学（Lagrangian Human Biometeorology: LHM）と称している。前報（仲吉・神田²⁾）では、LHMのコンセプト提示、及び本手法の有効性について確認した。今後LHMの構築・普及に向けラグランジュアン観測に適した計測システムの開発が不可欠と考える。著者らはマイコンをベースにし、小型軽量で装着性が高いウェストポーチ型計測システムの開発を進めており、そこには全ての微気象センサ（気温、湿度、短波・長波放射、風速）及び人体生理センサがコンパクトに実装・接続される。人体装着型というシステムの特性上、気象センサに及ぼす人体影響を完全に除外することは難しいが、研究利用に必要な精度は保証する仕様である。

本報では、微気象センサ、人体生理センサについて以下の開発を行ったので報告する。

- ①新たな計測原理に基づく短波・長波放射センサの開発
- ②高精度の脈拍連続計測システムの開発

①は複数の有色小型グローブ球を用いた放射計測センサであり、将来的には風速計測への拡張も可能と考えられる。従来の放射計では、センサを水平に保つ必要がありラグランジュアン観測の際に誤差の累積が避けられないが、今回提案するセンサではそれは生じず、ラグランジュアン観測に適した放射センサとなりえる。②に関して、市販センサでも連続モニタリング可能なものもあるが（例えば、日立製作所の腕時計型脈拍センサ）、安静

時以外では体動によるノイズ成分が強くなり脈拍検出精度が著しく低下する。本システムは効果的なノイズ除去手法を有しており、安静時以外でも精度良い脈拍抽出が可能な点に特長がある。

2. グローブ球を用いた短波・長波放射センサ

ここではグローブ球を利用した新たな放射計測センサの原理、手法、精度について言及する。また、本原理を用いた風速計測の可能性についても議論する。

(1) 基本的なアイデアと原理

形状と表面抵抗は同じであるが異種類の表面塗装によって放射特性（アルベド・射出率）が異なるN個のグローブ温度計を利用する。理論的には、N個のグローブ温度計の熱収支式からN個の測定していない未知の気象変数が求められるはずである。

具体的に見てみよう。式(1) はグローブ球の熱収支式である。

$$C \frac{dT_g}{dt} = (1 - \alpha)S_g + \varepsilon L_g - \varepsilon \sigma T_g^4 + C_p \rho C_H U (T_a - T_g) \quad (1)$$

ここで C はグローブ球熱容量 ($\text{J K}^{-1} \text{m}^3$)、 T_g はグローブ温度計の指示値 (K)、 α 、 ε はグローブ球のアルベド、射出率、 S_g 、 L_g はグローブ球に入射する平均短波・平均長波放射 (W m^{-2})、 σ はステファンボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)、 $C_p \rho C_H$ は空気 の体積熱容量 ($\text{J K}^{-1} \text{m}^3$)、 C_H は球の熱輸送係数、 U は風速 (m s^{-1})、 T_a は気流温度 (K) を表す。式の中で、熱容量 (C) は材質と球径から、熱輸送係数 (C_H) は流体力学の理論式から、放射特性 (α 、 ε) は同定実験からそれぞれ既知であるとし、グローブ温度 (T_g) と気温 (T_a) は計測値を使うものとする。すると未知変数は S_g 、 L_g 、 U の三つとなり、理論上、放射特性の異なる3球のグローブ温度計の連立熱収支式の解として求められるはずである。この逆問題を実用化する技術的要件として以下の二つを挙げる。

- ①逆問題としての解の安定性が保証されること
 - ②グローブ球の放射特性が精度良く同定されていること
- グローブ球を用いたN変数問題の基本的考えは、神田ら³⁾や梅干野ら⁴⁾によって提案されてはいるが、最重要パラメータである射出率・アルベドの同定方法が言及されておらず、それらの同定精度、及び気象未知変数の算出精度は不明で実用化されるに至っていない。

最終目標は3変数（短波・長波放射・風速）全ての逆推定であるが、2個のグローブ球を用いた放射2変数の逆推定において良好な結果が得られたので紹介する。

表-1 選定に使用した塗料一覧

塗料ID	色	型番	メーカー
1	つや消し黒	TS-6	TAMIYA
2	つやあり白	TS-26	TAMIYA
3	濃緑	TS-2	TAMIYA
4	赤	TS-8	TAMIYA
5	銀	TS-30	TAMIYA
6	銀	-	TEROSON
7	金	-	TEROSON
8	黒	-	サンデーペイント
9	つやあり白	-	サンデーペイント
10	黒	THI-1B	タスコジャパン

* 塗料ID10は黒体塗料

(2) 最適グローブ球の選定

a) グローブ球の塗料選定

放射特性の違いが大きいほどグローブ温度指示値の差が大きくなり解の安定性は増す。様々な塗料をピンポン球に塗布し作成したグローブ温度計を日射環境下に設置し、最も温度指示値に違いが見られる塗料を調べた。検定に使用した塗料一覧を表-1に示す。塗料1（つや消し黒）、塗料2（つやあり白）を用いたグローブ球において最大温度、最低温度が得られたので、この2種類をグローブ球の塗布塗料とした。

b) 球径・材質の選定

携帯性を考慮した場合、球径は小さいほど望ましい。最適球径・材質を調べるために直径10 mmのアルミ球、銅球、及びピンポン球（直径40 mm、セルロイド製）に上記塗料を塗り解の安定性を調べた。中空球はピンポン球のみである。ピンポン球を用いた場合に最も解の安定性が高かったため、これをグローブ球のベースとした。なお、アルミ製、銅製の球で解が安定しなかった理由については以下の可能性を挙げる。

- ①中空でないためグローブ球心温度と表面温度が一致せず、式(1)が不適用になる。
- ②球径に対し支持棒・配線のサイズが無視できず、熱輸送係数の理論式（付録）が不適用になる。

(3) 放射特性同定手法

a) 射出率同定方法

射出率の同定方法を以下に示す。

- ・板厚0.2 mmの銅板にて上面開口容器を作成（50 x 50 x 50 mm）し、壁面に同定したい塗料を均質に塗布する。
- ・容器内に温水を注入し、温度計にて水温 (T_w) を計測する。その際、容器内水温が均質になるようにたえず攪拌する。
- ・サーモカメラを計測したい着色面に向け、長波放射量 (Rad) を測定する。
- ・実験室内室温 (T_a) を計測する。
- ・同期計測された T_w 、 Rad 、 T_a より、以下の式を満たすような射出率 (ε) を逆算する。

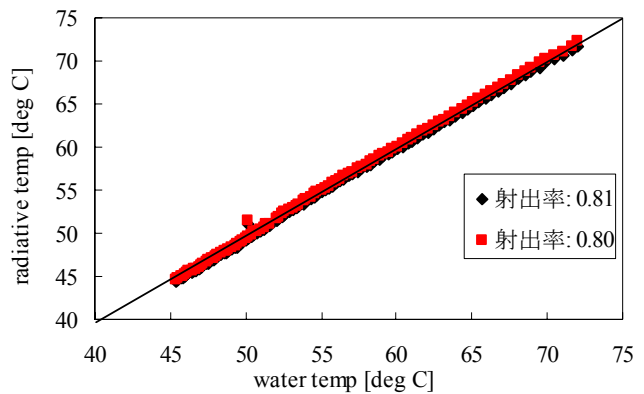
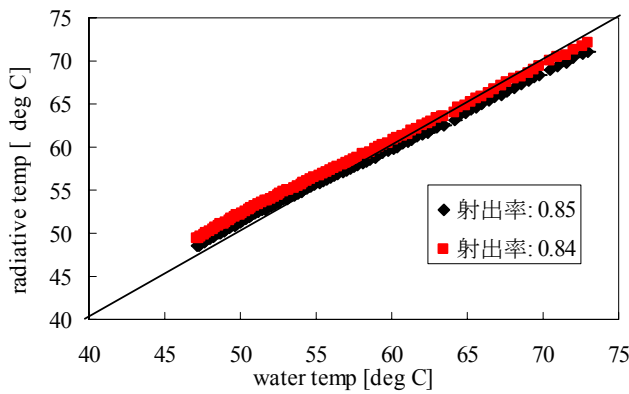


図-1 射出率同定結果（左図：黒塗料，右図：白塗料）

表-2 アルベド同定に用いた計測器一覧

測定項目	測器	型番	メーカー
黒グローブ温度	自作グローブ球	-	-
白グローブ温度	自作グローブ球	-	-
気温	熱電対	-	-
風速	風向風速センサ	03001-L	Campbell
短波放射 長波放射	4成分放射 収支計	CNR1	Kipp & Zonen

* データロガーにはクリマテックのCR23xを使用

$$Rad = \varepsilon \sigma T_w^4 + (1 - \varepsilon) \sigma T_a^4 \quad (2)$$

上式右辺第二項は、実験室内の壁面などから放射される長波が塗料面で反射し、サーモカメラに入射する現象を補正する項である。

本検定法に用いられている仮定は以下の通りである。

- ・実験室内の壁面温度、全ての物品表面温度は T_a と等しい。
- ・容器の壁面温度は T_w と等しい。

第一の仮定は、日射強制力のない夜間に実験を行い、実験室の消灯、密閉により一様温度場となるような室内環境に近づけたことから満足されていると考えられる。第二の仮定は、熱伝導率が高い銅製容器を用いたこと、板厚が十分に薄いことから満足していると考えられる。

図-1に黒・白塗料についての射出率の同定結果を示す。図-1より黒・白塗料の射出率についてはそれぞれ0.84, 0.80を採用した。

b) アルベド同定方法

アルベドは前節で同定した射出率を用い、グローブ球熱収支式(1)から同定した。気象計測器を日射環境下に設置し、計測されたグローブ温度・風速・長波放射量・気温を式(1)に与え、短波放射の推定精度が最も高くなるアルベドを最小二乗法により求めた。使用した計測器一覧を表-2に示す。ここで、式(1)中の球の熱輸送係数についてはYuge⁴⁾の式を用いている（付録参照）。4成分放射収支計の指示値からグローブ球に入射する短波・長波放射量 (S_g , L_g) を推定する式は以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} S_g &= 0.5 \times (S_{dn} + S_{up}) \\ L_g &= 0.5 \times (L_{dn} + L_{up}) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、添え字 dn , up はそれぞれ下向き、上向きを表している。短波・長波とも放射の指向性については考慮していない。同定されたアルベドは黒球・白球それぞれ0.4, 0.7であった。

(5) 短波・長波放射量の推定精度

計測した風速値を与え、式(1)から短波・長波放射量を推定した。推定された短波・長波放射量と4成分放射収支計で計測された短波・長波放射量との精度比較を図-2, 図-3に示す。誤差の標準偏差を示すと短波推定値が33.5 W m², 長波推定値が19.6 W m²であった。用いた4成分放射収支計 (CNR1, Kipp & Zonen) の精度が10%であり、本システムは非常に簡単な原理ながら、晴天日・曇天日問わず比較的良好な精度で推定出来ていると言える。短波放射の推定値に弱い非線形性が見られる理由については、短波放射の指向性が影響している可能性が挙げられる。短波放射量が大きいデータは、直達光成分が卓越する気象条件時のものであり、放射の指向性を考慮していないことによる可能性が考えられる。もう一つの可能性としてグローブ球の熱慣性の影響を挙げる。日射量が急変するような気象条件ではグローブ球の熱容量がバッファとなりグローブ温度が熱環境変化に追従することが難しくなるためと考えられる。

(6) 風速計測への適用可能性

ここでは本計測原理を用いた風速計測の可能性について議論する。計測した短波放射を与え、式(1)から風速・長波放射量を推定した。風速・長波放射量の推定値と計測値の比較を図-4に示す。日射強制力の無い夜間や曇天日においては黒・白グローブ温度の差がなくなるため計算が不安定になっている。そこで黒球温度が白球温度よりも高いデータのみを取り出し相関を調べた（図-5）。0.1℃刻みに温度差を増やしたところ、温度差が大きくなるほど推定精度は増したが（図省略）、ここでは温度

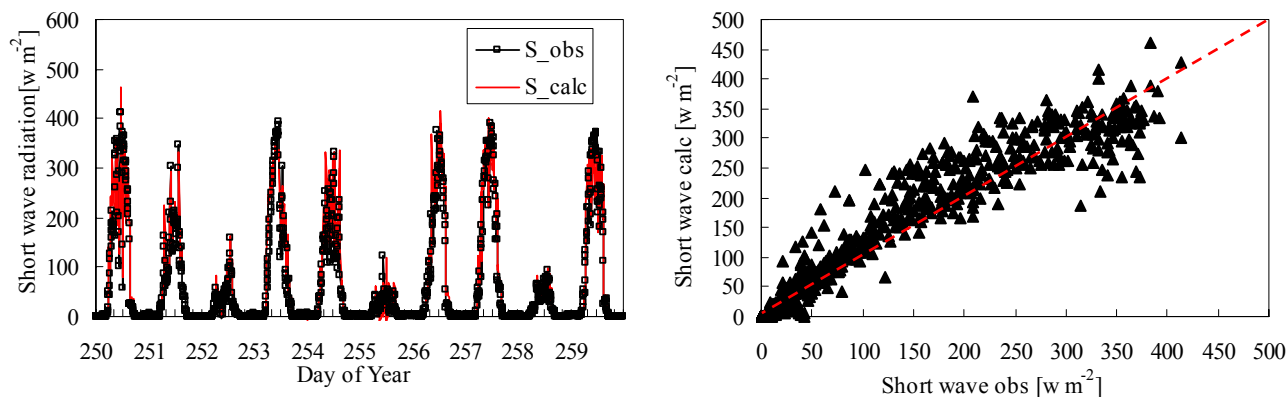


図-2 グローブ球から推定された短波放射量の算出精度 (左図：時系列，右図：相関図)

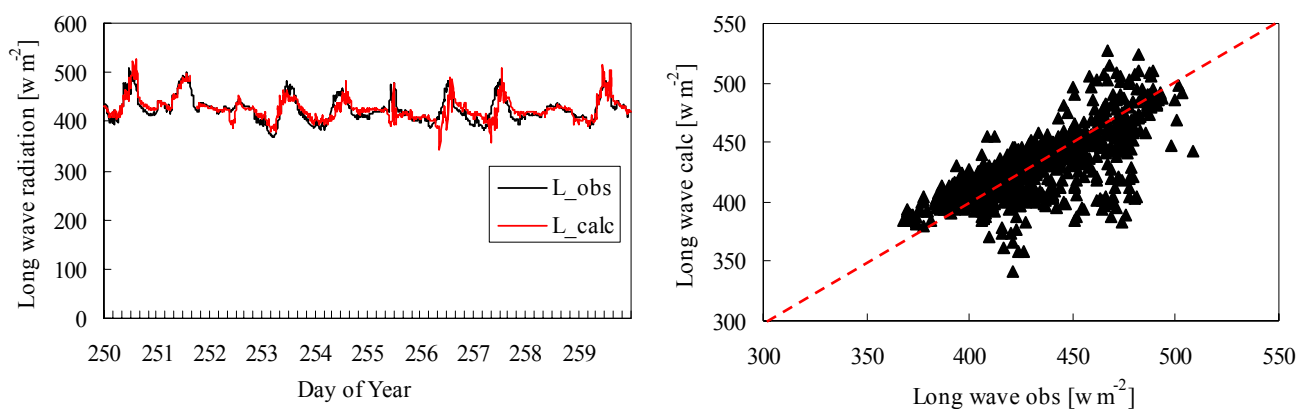


図-3 グローブ球から推定された長波放射量の算出精度 (左図：時系列，右図：相関図)

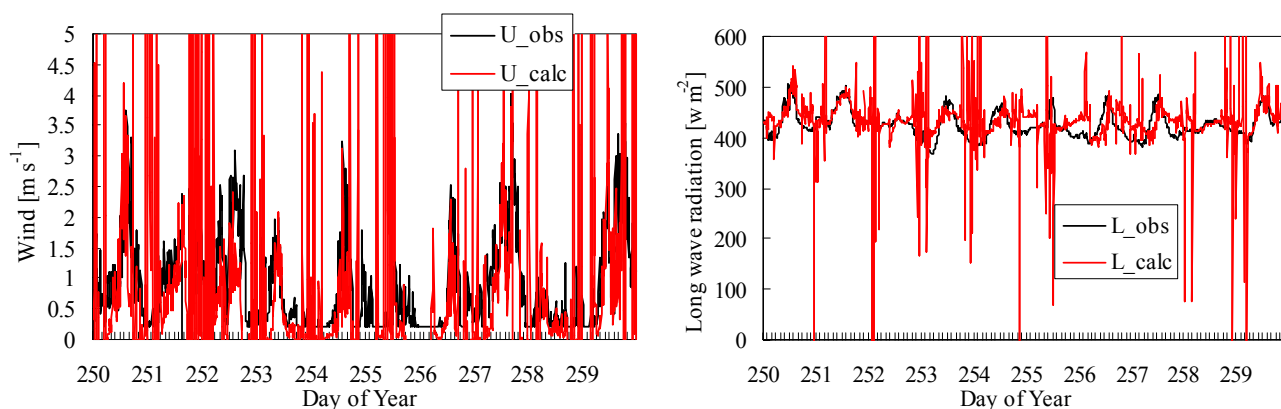


図-4 グローブ球から推定された風速・長波放射の算出精度 (左図：風速時系列，右図：長波時系列)

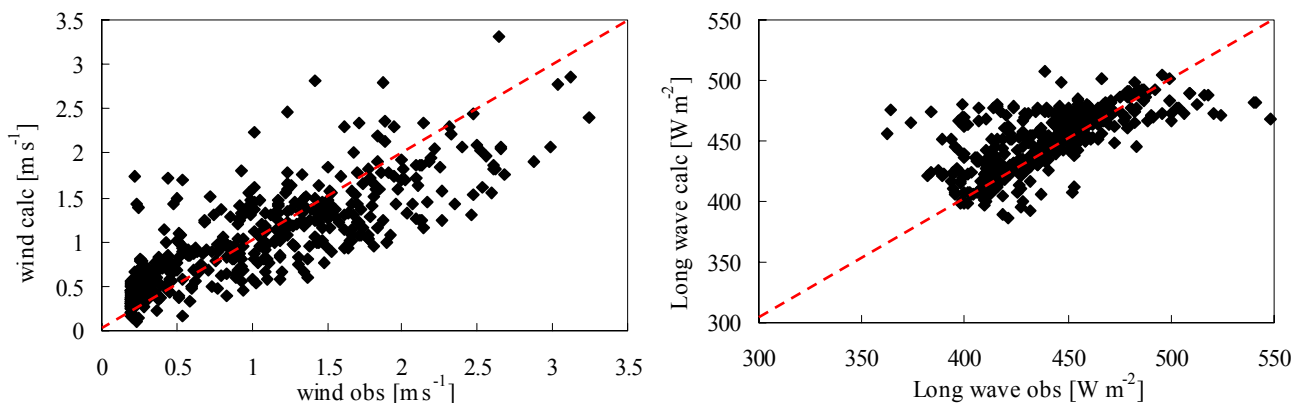


図-5 グローブ球から推定された風速・長波放射の算出精度 (左図：風速相関図，右図：長波相関図)
黒球グローブ温度が白球グローブ温度より0.2℃高いデータのみ抽出

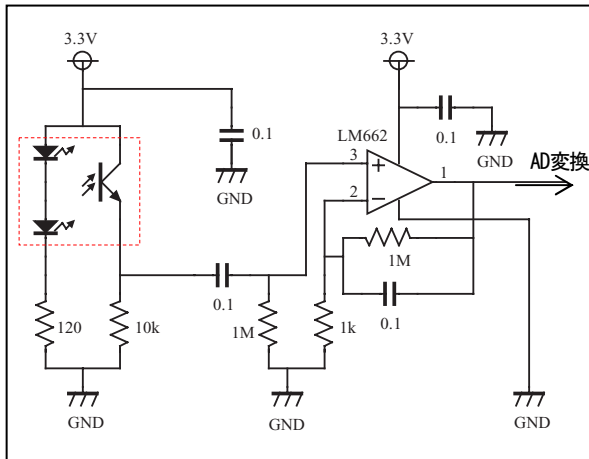


図-6 脈拍検出回路

差が 0.2°C よりも高いデータ群のみを抽出している。その結果、993個のデータが除外されている。 0.2°C の温度差は 70 W m^{-2} 程度の日射環境下で確認することができる。風速、長波における推定誤差の標準偏差はそれぞれ 0.41 m s^{-1} 、 22.2 W m^{-2} であった。今回比較に用いた風杯風速計の感度が 0.75 m s^{-1} であり、システムの簡便さを考えれば第一段階としての算出精度はそれほど悪くない。しかし夜間や曇天日に計測ができなければ、今後精度が向上しても暑熱環境計測システムとしての使用に限られる。夜間・曇天日へ適用するための改善案として、2球のグローブ球射出率に顕著な違いを持たせ、両球に等しい熱量を人為的に加える方法が考えられる。これにより、日射強制力が無い気象条件でも両球温度指示値に違いが生じ、解が安定するはずである。今回の結果によれば風速 4 m s^{-1} 程度までは黒・白グローブ球に 0.2°C の温度差を与えれば解が安定するため、熱量付加による消費電力の増加もそれほど大きくないと思われる。

3. 脈拍の高精度連続計測センサの開発

脈拍は外部環境に対する反応性が良く、温熱生理研究では体温と並び重要な計測因子の一つである。本章では非侵襲的に脈拍の連続計測が可能なセンサを紹介し、運動時の脈拍検出精度を高める手法について提案する。

(1) 脈拍の非侵襲連続検出原理

非侵襲で脈拍を連続計測する手法としては、心電位波形の変化から推定する心電位法と、容積脈波の変化から算出する光電容積脈波法に二分される。容積脈波とは心臓の拍動に伴う血管の容積変化を捉えたものである。センサの装着性を鑑みて、容積脈波法から脈拍を求める手法を採用した。

容積脈波法は、血中ヘモグロビンが赤外線をよく吸収する性質を利用した脈波検出法である。具体的には、赤外波長の発光ダイオード及び受光ダイオードを毛細血管

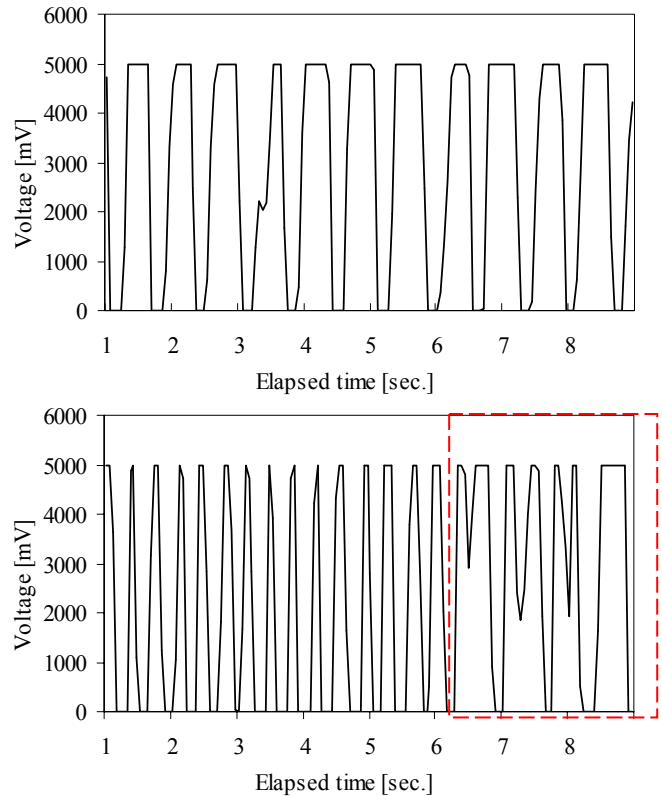


図-7 容積脈波形（上図：安静時，下図：ランニング時）

が集中する部位（指尖や耳たぶ）に当て、赤外線を照射する。血流量変化に応じ、赤外線の一部はヘモグロビンに吸収され、残りは反射され受光ダイオードに入射し電気信号を生じさせる。赤外線反射強度の変化に伴う電気信号の変化を記録することで容積脈波を検出することが可能となる。

図-6に脈拍センサの回路図を示す。脈拍センサは自作の腕輪型データロガーに接続し16 Hzで連続計測した。

図-7上図に座位静止状態で計測した指尖容積脈波形を示す。シンプルな回路構成ながら本センサによりきれいな脈波形を得ることが確認できる。

運動時には体動に伴うノイズ成分が脈波信号に重畳するため脈拍の検出性が低下する問題が生じる（小須田・青島⁶⁾）。これを体動アーチファクトと呼ぶ。体動アーチファクトを弱め運動時も脈拍検出精度を高める工夫について次項に示す。

(2) 体動アーチファクトの除去

a) デバイスの工夫

光電容積脈波法では、体動により皮膚とセンサ装着面がずれることで予期せぬ赤外線反射信号が生じやすい。そこで、センサ装着面をシリコンで成型しセンサと皮膚が常に密着するよう工夫した。

図-7下図にランニング時の脈波形の計測例を示す。本工夫により運動時でも安静時と変わらずきれいな脈波形が得られるようになったが一部除去しきれない波形の乱れも存在する（図-7下図囲い領域）。このノイズについて

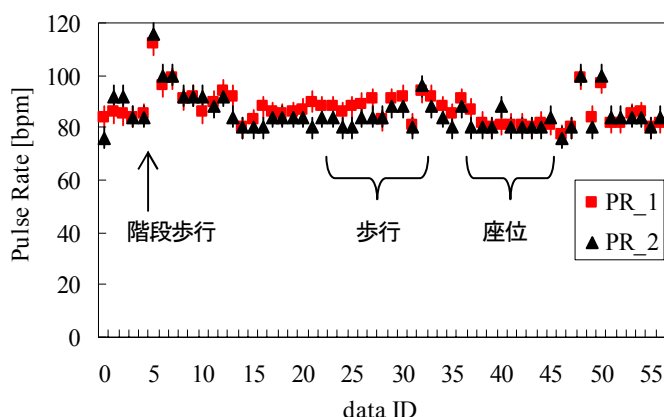


図-8 静止時・運動時の脈拍検出精度

PR_1は自作センサにより算出された脈拍数を、PR_2は触診により計測した脈拍数を示す。PR_1、PR_2ともに15秒間の拍動変化から1分間脈拍値を算出した。PR_1とPR_2の同期データのみを抽出しておりサンプリング間隔は一定ではない。

ては次項で示すソフトウェア処理により無効化した。

a) ソフトウェアの工夫

生体信号の周波数解析にはFFTが広く利用されているが、一般的なFFT法では非線形性が強くなると解析信頼性が悪くなることが知られている。そこで、著者らは海岸工学の分野で利用されているゼロアップクロス法を改良した脈拍抽出アルゴリズムを提案する（以下、修正ゼロアップクロス法と記す）。

解析手順を以下に示す。

- あるインターバル間に得られた脈波形についてゼロアップクロス法にて個別波形の周期を求め、それらの平均値（zero_up_T）を算出する。
- 個別波形の周期が、zero_up_Tの α 倍、もしくは $1/\alpha$ の場合はその個別波形にフラグを立てる（ α は任意の閾値）。
- フラグが付いた波形を除外し、残りの個別波形から再度その区間の平均周期（zero_upT2）を求める。
- 同じ処理をゼロダウンクロス法で行う（zero_dnT2）。
- 除外された波形の数からデータ棄却率を求める。棄却率が β を超えた場合、その区間の脈拍回数にはエラー値を与える（ β は任意の閾値）。
- 棄却率が β を超えない場合、zero_upT2とzero_dnT2を比べ、小さい値を用い1分間脈拍回数に換算する。

現状では15秒インターバルを一区間として1分間脈拍数を計算しており、その際の α 、 β にはそれぞれ2、0.2を用いている。15秒間に脈拍周期が2倍もしくは半分に変化するような激しい運動はラグランジュアン観測中ありえないと考え、 α は2と設定した。

本センサにより推定された脈拍推定精度を図-8に示す。本手法により、安静時・活動時間問わず高精度の脈拍計測が出来ていることが確認される。

4. 結論

本論文では、LHMの構築・普及に不可欠なコンパクトで装着性が高い計測システムの開発について報告した。具体的には、

- (1)放射特性の異なる二つのグローブ球熱収支式より簡便に短波・長波放射量を推定する手法を開発・試作した。
- (2)上記手法による風速推定の可能性について議論した。
- (3)高精度脈拍連続計測システムを開発した。

複数のグローブ球から、短波・長波を逆算する手法は非常に簡便なシステムであり、LHMへの適用のみならず、発展途上国などでの簡易短波・長波放射計としての利用も期待される。今後は、更なる小型化、及び高反射塗料を用いるなどして算出精度の向上を目指す。また、アルベド・射出率の異なる三つのグローブ球から短波・長波放射・風速を逆算する手法へと発展させていきたい。

付録 球の熱輸送係数

$$C_H U = \frac{(2 + 0.493 Re^{0.5})a}{D}$$

$$\text{for } 10 < Re < 1.8 \times 10^3$$

$$C_H U = \frac{(2 + 0.300 Re^{0.5664})a}{D}$$

$$\text{for } 1.8 \times 10^3 < Re < 1.5 \times 10^5$$

Re 、 a 、 D はそれぞれレイノルズ数、空気の熱拡散係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、球の直径 (m) を示す。なお、原論文においてはヌッセルト数を用い表現されているが、ここでは読者に馴染みの深い熱の交換速度 $C_H U$ に変換し記載している。

参考文献

- 1) 酒井敏、梅谷和弘、飯澤功、伊藤文、小野耕作、矢島新、飴村尚起、森永修司：都市熱環境観測システムの開発研究、天気、Vol. 56, pp.25-39, 2009.
- 2) 仲吉信人、神田学：ラグランジュアン人間気象学の試論、水工学論文集、Vol. 53, pp. 2009.
- 3) 神田学、柳本記一、宇梶正明：新しい屋外用温熱感指標の提案、土木学会論文集、No.545/II-36, pp.1-10, 1996.
- 4) 梅干野晃、何江：屋外熱環境システムの試作とその検討、日本建築学会計画系論文報告集、第388巻、pp.29-36, 1987.
- 5) Yuge, T.: Experiments on heat transfer from spheres including combined natural and forced convection, *Trans. ASME, Journal heat transfer*, C82, pp214-220, 1960.
- 6) 小須田司・青島一郎：体動アーチファクトに強い脈拍計測技術の開発、日本時計学会誌、Vol. 48, pp.42-51, 2004.

(2009. 9. 30受付)