

有酸素運動の運動強度の新たな指標に関する研究 —ランニングの場合—

札幌医科大学 鷺見紋子

Study on New Index for Intensity of Aerobic Exercise: Marathon

by

Ayako Sumi

*Department of Hygiene,
Sapporo Medical University School of Medicine*

ABSTRACT

Aerobic exercise is an excellent way to maintain good health, and marathons are a popular form of aerobic exercise. It has been suggested the appropriate level of exercise intensity should be evaluated to ensure that athletes newly adopting the sport do not harm themselves. Studies that using spectral analysis of heart rate variability (HRV) to evaluate autonomic nervous activity have established HRV as an indicator of exercise intensity. HRV is analyzed in terms of four distinct frequency bands of spectral power: ultra low (ULF), very low (VF), low (LF), and high (HF) frequencies. Evidence suggests that the HF band reflects parasympathetic activity and the LF band reflects sympathetic activity. Thus, the LF/HF ratio reflects sympathovagal balance. This study evaluated two male pacesetter marathon runners wearing ECG leads monitored during a 30-km marathon in Japan. Time series data of the runners' R-R intervals over 90 min was analyzed with a method of time series analysis based on maximum entropy method. The result obtained showed that the spectral power values in ULF and VLF bands exceeded those in LF and HF bands. Others have reported that ULF and VLF power values decrease as cardiovascular disease severity increases. Accordingly, these values all have clinical prognostic potential for the evaluation of individuals' capacity for exercise.

要 旨

本研究の目的は、有酸素運動に関する運動強度の新たな指標を提起することを目指して、心拍変動の時間的変動構造、すなわち心拍変動の周期構造とゆらぎの性質を詳細に調べることである。このために、これまで広く用いられてきたスペクトル解析法を土台にした時系列解析法を用いて、心拍変動の時間的変動構造を調べた。研究対象としては、今日とりわけ競技人口の多いランニングをとりあげ、ランニング中の被験者のR-R間隔・心拍数を測定し、スペクトル解析を実行した。その結果、ランニング中の心拍変動の極低周波数領域(VLF)領域(0.003-0.04Hz)と超低周波数領域(ULF)領域(0.003Hz未満)において、明瞭な周期構造が観測された。最近VLF成分およびULF成分が疾病予後あるいは生命予後の指標として注目されているが、これらの機序については未だほとんど明らかにされていない。今回の解析結果が、VLF成分およびULF成分の機序を明らかにする有益な情報を提供することが期待される。

緒 言

近年、健康の維持・増進、あるいは生活習慣病の予防を目的とした身体運動の重要性が示唆されており、この体力づくりを目的とした運動として、ウォーキング、ランニング、水泳、自転車などの有酸素運動が注目されている。

有酸素運動を安全・効率的に行うために、個々人に適した運動強度の設定が必要となる。最近、運動強度の指標として、心拍変動のスペクトル解析による自律神経活動の評価が多く行われている¹⁻⁶⁾。例えば、2時間のパーソナルコンピュータの単純作業後、20% VO₂max(最大酸素摂取量)の強度での30分間のジョギングが、ソファーでの安静状態よりも副交感神経優位を促すことが報告された⁶⁾。すなわち、従来から経験的に言われて

いる精神的疲労に対する軽い運動の好影響が実証された⁶⁾。

一方、心拍変動のスペクトル解析の結果には、個人差と測定条件の相違が結果に現れ、統一した結果が得られていないのが現状であり、有酸素運動に関する運動強度の、新たな指標の確立が求められている⁷⁾。

有酸素運動に関する新たな運動強度を確立することによって、各個人のトレーニングの目的に沿った、適切な量のトレーニングを計画することが可能となり、このことによって、オーバートレーニングを防ぐことができ、トレーニングを長期に渡って持続させることができる。こうして、有酸素運動に関する新たな運動強度の確立は、競技の向上を目指すアスリートはもとより、健康の維持・増進をめざして運動を行う人にも役立つものであると考えられる。

本研究の目的は、有酸素運動に関する運動強度の新たな指標を提起することを目指して、心拍変動の時間的変動構造^{8,9)}、すなわち心拍変動の周期構造とゆらぎの性質を詳細に調べることである。このために、これまで広く用いられてきたスペクトル解析法の欠点を克服した新しい解析方法¹⁰⁻¹⁵⁾を用いて、心拍変動の周波数構造を詳細に調べる。研究対象としては、数ある有酸素運動のなかでも、今日とりわけ競技人口の多いランニングをとりあげ、ランニング中の被験者のR-R間隔・心拍数を測定する。ランナーの走行距離は30km、ペースは4分15秒~5分00秒である。R-R間隔・心拍数の時系列データには、最大エントロピー法(Maximum Entropy Method, MEM)に基づいたスペクトル解析^{10,11)}を実行する。さらに、時系列データの周期構造の時間変化を調べるセグメント解析を行なう。

ランニングなどの有酸素運動の持久力および脚力などの向上のためのトレーニング方法の一つとして、今日、ゾーン・トレーニングが広く普及し

ている¹⁶⁾。ゾーン・トレーニングとは、運動強度を最大心拍数のパーセンテージで表し、50～100%まで10%刻みのゾーンを1から5まで設定し、運動目的に合ったゾーンの心拍数でトレーニングを行うものである。本研究は、ゾーン1～5のうち、フルマラソンのためのトレーニングに適したゾーン1～4の場合について調べる。

1. 研究方法

1. 1 対象(被験者)と心拍変動測定方法

表1にR-R間隔と心拍数データの測定条件をまとめる。ランニング中の被験者21名(男性15名, 女性6名), 安静時の被験者3名(男性3名)のR-R間隔(1/1000秒単位)・心拍数を測定した。ランニング中のデータの測定は、2019年夏に北海道で開催された4つの大会で行われた。安静時データは、被験者が椅子に座り、目を閉じている状態で測定された。

測定にはホルター心電図計「AC100型アクティブトレーサー」(GMS Co. Ltd.)が使用された。測定器は被験者の腰に装着され、装置が小型(74×52×21mm³, 約100g)であることから、ランニングへの影響はほとんど無視できる。データはメモリに蓄積され、パソコンに転送された。

本研究は札幌医科大学倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号27-2-54)。本研究の参加に際し、対象者に研究の趣旨、内容及び結果の取扱等に関して十分説明し、書面での同意を得た。

1. 2 時系列解析方法

R-R間隔および心拍数時系列データのスペクト

ル解析は、MEMスペクトル解析によって実行された。スペクトル解析によって得られるパワー・スペクトル密度(PSD)について、4つの周波数帯のパワー値を計算した: ULF領域(<0.0033Hz: 周期長303秒以上), VLF領域(0.0033-0.04Hz: 同25-303秒), LF領域(0.04-0.15Hz: 同6.7-25秒) HF領域(0.15-0.4Hz: 同6.7-2.5秒)。こうして得られた各周波数のパワー値を、パワー・スペクトル密度の全面積(トータルパワー: TP)で割ることによって規格化した。

2. 研究結果

本研究報告では、現在解析が終了している3例(ランニング中2名, 安静時1名)の結果を用いる。

2. 1 R-R間隔

2. 1. 1 時系列データ

図1aに、大会「札幌30K」(札幌市)で測定された、1kmあたり5分のペースで走る男性の被験者(以下、ランナー1)のR-R間隔時系列データを示す。本時系列データの時間領域AM10:00～AM11:30(90分)のスペクトル解析を解析領域とした。AM11:30直前における外れ値については、それを除外し、前後2点の平均値を用いて内挿・補完を行った。

2. 1. 2 パワー・スペクトル密度

図1bに、R-R間隔時系列データ(図1a)のPSDを示す。図1cに、4つの周波数帯(ULF, VLF, LF, HF)のパワー値を示す(規格化済み)。図1cによると、ランナー1を含む2名のランナーの場合とも、ULFおよびVLFにおけるパワー値が、

表1 R-R間隔と心拍数時系列データの測定条件

被験者の状態	計測日	大会名	気温, 湿度	被験者数(性別)	計測距離	走行ペース(分:秒)
ランニング中	7月13日	旭川30K	21℃, 80%	6(男性5, 女性1)	30km	4:00, 4:15, 4:40, 5:00, 6:30, 7:00
	7月20日	札幌30K	27℃, 58%	7(男性4, 女性3)	30km	4:15, 4:30, 5:00, 6:00, 6:15
	8月10日	北海道選手権	17℃, 75%	3(男性2, 女性1)	5000m	4:00
	9月1日	稚内マラソン	22℃, 76%	5(男性4, 女性1)	42.195km	4:55, 7:00, 7:45
安静時	8月10日	---	17℃, 75%	3(男性3)	---	---

本研究報告は、札幌30Kの被験者2名と安静時の被験者1名の結果に基づいている

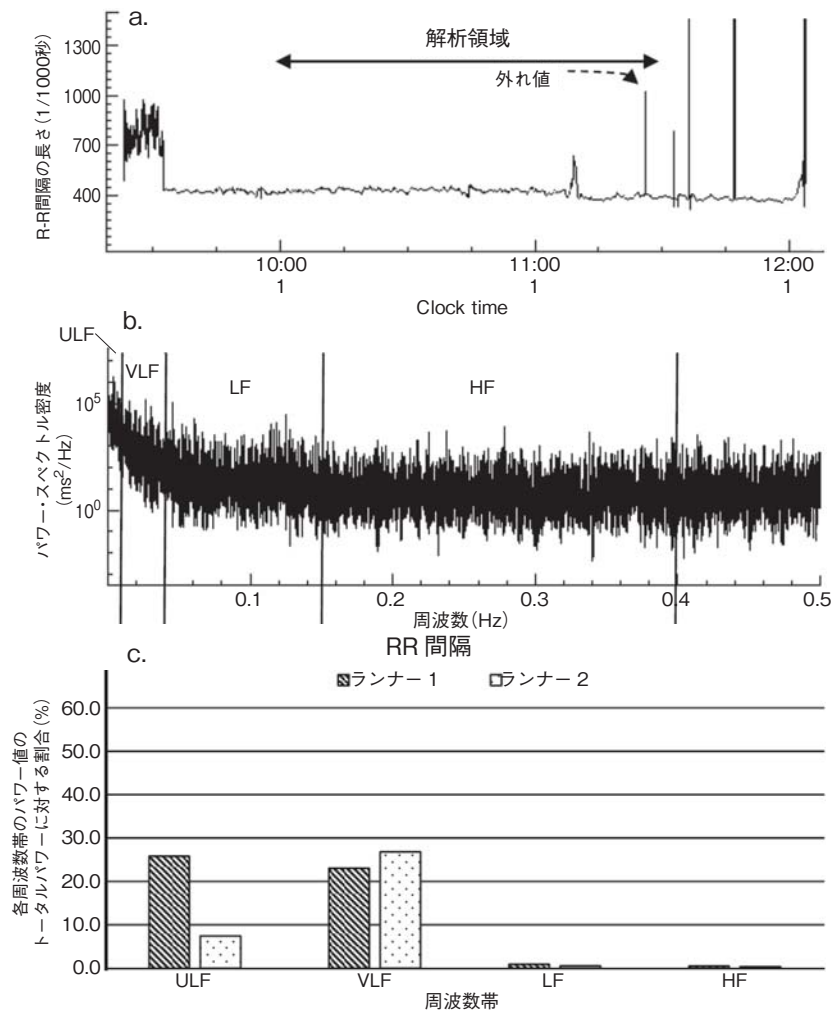


図1 札幌30Kで測定された、(a)ランナー1のR-R間隔時系列データ、(b)そのパワー・スペクトル密度、(c)ランナー1と2のPSDから得られた、各周波数帯におけるパワー値[規格化済み]

LFおよびHFと比して大きい。

2. 1. 3 3Dスペクトルアレイ

図2に、セグメント解析によって得られた、R-R間隔時系列データ(図1a)の3Dスペクトルアレイを示す。本セグメント解析では、セグメント長は15分、セグメントのずらしは3分である。図2で注目されるのは、ULF領域とVLF領域において、パワー値の大きい多くのスペクトルピークが観測されることである。

2. 2 心拍数

2. 2. 1 時系列データ

図3aに、R-R間隔時系列データ(図1a)から得られた心拍数時系列データを示す。この心拍数時系列データの時間領域AM10:00~AM11:30(90分)について、スペクトル解析を実行する。

2. 2. 2 パワー・スペクトル密度

図3bに、心拍数時系列データ(図3a)のPSDを示す。図3bには、PSDに観測されるパワー値の大きい10個のスペクトルピークが矢印で示されており、主要な周期モードがULFとVLF領域に観測されることがわかる。

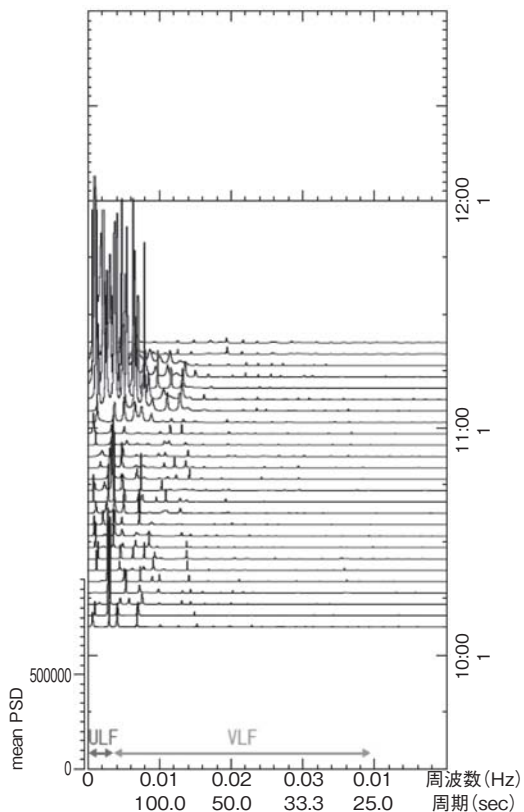


図2 札幌30Kで測定された,ランナー1のR-R間隔時系列データのセグメント解析による3Dスペクトルアレイ

2. 2. 3 セグメント解析

図4は, 心拍数時系列データ (図3a) から計算された3Dスペクトルアレイである. 本セグメント解析では, セグメント長さは30分, セグメントのずらしは30秒である. 図4では, ULF・VLF領域内である周波数0.003Hz付近 (約333秒) に明瞭なスペクトルアレイが観測される.

3. 考察

本研究で得られた重要な結果は, 図1cが示すように, ランニング中のR-R間隔時系列データのパワー・スペクトル密度において, ULF領域とVLF領域のパワー値が, LF領域とHF領域に比べて大きいという点にある. この結果は, Serrador et al.¹⁷⁾ による研究に支持されるものであり, この研究は, 徒歩などの軽い運動中のR-R間隔時系列のULF領域とVLF領域のパワー値が, LF領域とHF領域のパワー値と比べて大きいことを報告した. ULF領域とVLF領域のパワー値が大きくなる理由として, ホルモン (アンジオテンシン)

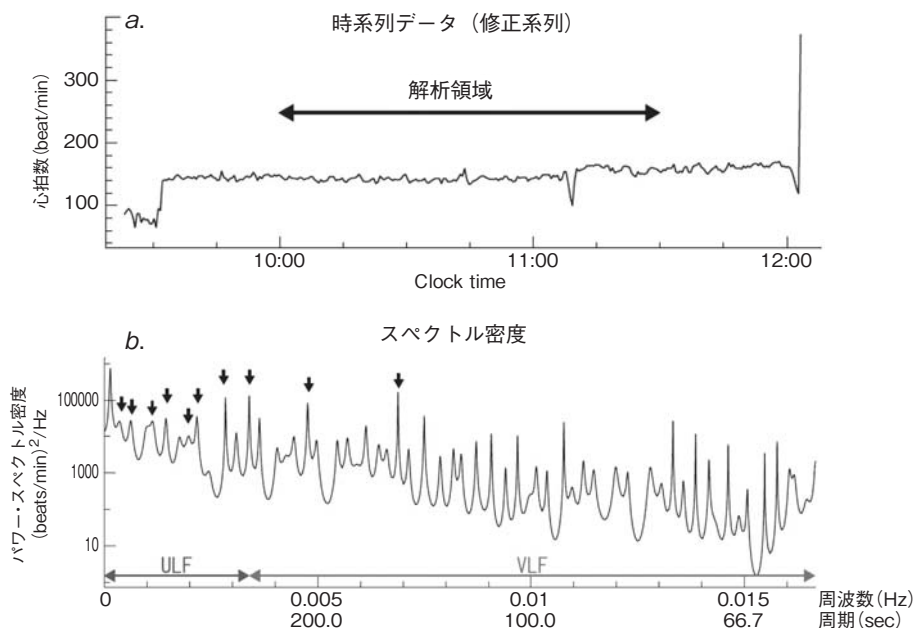


図3 札幌30Kで測定された, (a)ランナー1の心拍数データ, (b)そのパワー・スペクトル密度

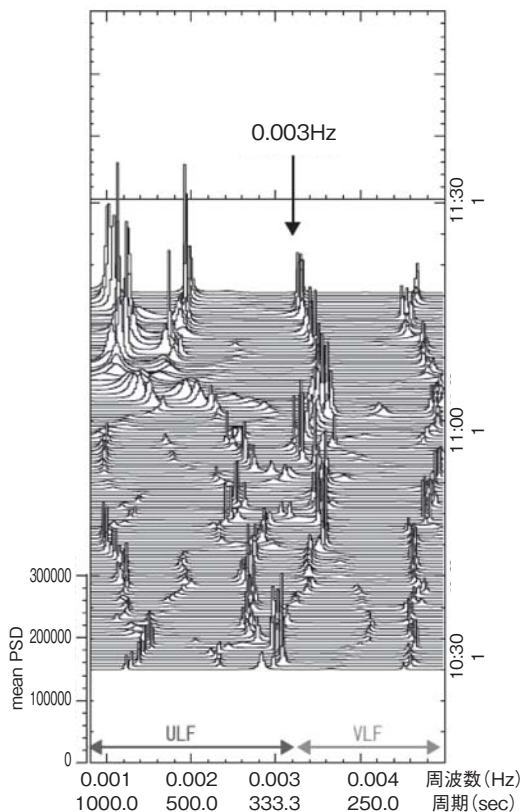


図4 札幌30Kで測定された、ランナー1の心拍数時系列データのセグメント解析による3Dスペクトルアレイ

調節¹⁸⁾あるいは体温調節^{19,20)}が関係していると指摘されているが、機序の解明は今後の課題である⁷⁾。

更に本研究では、図2が示すように、セグメント解析によって、R-R間隔時系列データの全時間領域に渡ってULFとVLF領域にパワー値が大きいスペクトルピークを観測した。図2の結果は、運動中のR-R間隔時系列データにセグメント解析を実行した例として先駆的なものである。セグメント解析によるR-R間隔時系列データのULFとVLF領域の解析の重要性は、循環器病学の分野において大塚²¹⁾によって指摘されている。大塚は、循環器疾患の度合いが重症であるほどULFとVLF領域のパワー値が減衰することを報告し、臨床的立場からは自律神経機能の評価と

して用いられるLFとHF領域の解析だけでなく、生命予後の指標としてULFとVLF領域の解析がより重要であるとした。そしてセグメント解析によって、時々刻々と変化するULFとVLF領域のパワー値を観測する重要性を指摘した上で、循環器病学の分野でそれを観測した例は大塚が報告した例以外は見当たらないとした。このことから、今回の本研究における運動中のR-R間隔時系列データのセグメント解析の結果(図2)は意義深いと考える。

本研究では更に、図4が示す、心拍数時系列データの3Dスペクトルアレイを得た。図4では、明瞭なスペクトルアレイが観測される周波数0.003Hzは周期約333秒に相当し、これはランナーのペースである5分/kmに近い。従って、図4に観測される明瞭なスペクトルアレイは、ランナーの走行ペースと関係している可能性がある。一方、現在解析中の安静時データの場合、図4のランナーの場合に観測される明瞭なスペクトルアレイは観測されない。

本研究は、セグメント解析を運動中のR-R間隔および心拍数時系列データに実行した例(図2, 4)として先駆的なものである。本研究でセグメント解析が成功した理由として、今回用いたスペクトル解析法の優位性が考えられる¹¹⁻¹⁶⁾。これまで広く用いられてきたスペクトル解析法である高速フーリエ変換(FFT)と自己回帰(AR)法の場合、前者は測定データを $-\infty$ から $+\infty$ の時間領域の無限長時系列であることを前提とし、後者は測定データのゆらぎを白色雑音(ホワイトノイズ)と仮定するなどといった非現実的仮定が必要であり、このことからスペクトルの分解能が悪くなり、ULFとVLF領域といった低周波数領域の周期構造を詳細に明らかにすることが不可能であった。一方、今回用いたMEMスペクトル解析法はこれらの短所を克服したものであり^{10,11)}、膨大な演算が可能となり、今回のセグメント解析の結果が得

られたと考える。

今後、今回夏の時期に測定したデータの解析を進めるとともに、冬の時期のデータを同様に測定・解析し、夏と冬の結果を比較検討する。そしてランニングのペース、距離、走行時間などを変えて、ULFとVLF領域の時間的変化をより詳細に観測し、ランニングに関する新たな運動強度の指標の確立をめざしたい。このことによって、各個人のトレーニングの目的に沿った、適切な量のトレーニングを計画することが可能となり、オーバートレーニングを防ぐことができ、トレーニングを長期に渡って持続させることができる。こうして、ランニングに関する新たな運動強度の指標の確立は、競技の向上を目指すアスリートはもとより、健康の維持・増進をめざして運動を行う人にも役立つものであると考える。

4. 結 論

本研究では、ランニング中の心拍変動のVLFおよびULF領域において、明瞭な周期構造が観測された(図1c, 2, 4)。VLF成分およびULF成分は疾病予後あるいは生命予後の指標として注目されているが、これらの機序については未だほとんど明らかにされていない。今回の解析結果が、VLF成分およびULF成分の機序を明らかにする有益な情報を提供することが期待される。

謝 辞

本研究に対して助成賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝いたします。本研究の基本的枠組みは、作田徹氏(札幌医科大学医学部衛生学講座訪問研究員)による、平成28年度札幌医科大学大学院医学研究科医科学専攻(環境保健予防医学)修士論文「ランニング中の心拍変動のスペクトル解析」が土台となっている。

*本研究内容は、札幌医科大学倫理委員会の承

認を既に得ているものである。

文 献

- 1) Pichon A.P., Bisschop C.D., Roulaud M., Denjean A., Oaolier Y., Spectral analysis of heart rate variability during exercise in trained subjects, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **36**: 1702-1708(2004)
- 2) Aubert A.E., Steps B., Beckers F., Heart rate variability in athletes, *Sports Med.*, **33**: 889-919(2003)
- 3) Shin K., Minamitani H., Onishi S., Yamazaki H., Lee M., The power spectral analysis of heart rate variability in athletes during dynamic exercise-Part I, *Clin. Cardiol.*, **18**: 583-586(1995)
- 4) Shin K., Minamitani H., Onishi S., Yamazaki H., Lee M., The power spectral analysis of heart rate variability in athletes during dynamic exercise-Part II, *Clin. Cardiol.*, **18**: 664-668(1995)
- 5) 山地啓司, 運動と心拍数, *体力科学*, **50**: 1-6(2001)
- 6) 菅原順, 湯川英昭, 白井克佳, 齊藤実, 鍋倉賢治, 松田光生, アスリートにおける運動負荷後の心臓副交感神経系活動回復応答を用いた体調評価の有効性, *体育学研究*, **45**: 611-618(2000)
- 7) 山地啓司, ころとからだを知る心拍数, 東京: 杏林書院(2013)
- 8) 渡辺尚彦, フルマラソンにおけるホルター心電図と血液生化学所見, *日本臨床生理学学会誌*, **18**: 163-171(1988)
- 9) 梅野克身, 水戸茂樹, 山地啓司, RR間隔のパワースペクトルからみた体調の評価, *ランニング学研究*, **5**: 51-60(1994)
- 10) 大友詔雄, 田中幸雄, 時系列の構造とMemCalc. 細田嵯一監修, 笠貫宏, 大友詔雄編, 生体時系列データ解析の新展開, 札幌: 北海道大学図書刊行会, p7-31(1996)
- 11) Ohtomo N., Tanaka Y., New method of time series analysis and "MemCalc." In: Saito K, Koyama A, Yoneyama K, Sawada Y, Ohtomo N editors. A recent advance in time series analysis by maximum entropy method. Sapporo: *Hokkaido University Press*; P. 11-30(1994)
- 12) Mise K., Sumi A., Kobayashi N., Torigoe T., Ohtomo N., Spectral analysis of spatial series data of pathologic tissue; a study on small intestine in ICR mouse, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**: 017001-1-9(2009)

- 13) Sumi A., Telan E.F.O., Chagan-Yasutan H., Piolo M., Hattori T., Kobayashi N., Effect of temperature, relative humidity and rainfall on dengue fever and leptospirosis infections in Manila, the Philippines, *Epidemiol. Infect.*, **145**: 78-86 (2017)
- 14) Kohei Y., Sumi A., Kobayashi N., Time-series analysis of monthly age-specific numbers of newly registered cases of active tuberculosis in Japan from 1998 to 2013, *Epidemiol. Infect.*, **144**: 2401-2014 (2016)
- 15) Chen B., Sumi A., Toyoda S., Hu Q., Zhou D., Mise K., Zhao J., Kobayashi N., Time series analysis of reported cases of hand, foot, and mouth disease from 2010 to 2013 in Wuhan, China, *B.M.C. Infect. Dis.*, **15**: 495-509 (2015)
- 16) 能勢博, 山に登る前に読む本 – 運動生理学からみた科学的登山術 –, 東京: 講談社 (2014)
- 17) Serrador J.M., Finlayson H.C., Hughson R.L., Physical activity is a major contributor to the ultra low frequency components of heart rate variability, *Heart*, **82**: 1-6 (1999)
- 18) Taylor J.A., Carr D.L., Myers C.W., Eckberg D.L., Mechanism underlying very-low frequency RR-interval oscillations in humans, *Circulation*, **98**, 547-555 (1998)
- 19) Fleisher L.A., Frank S.M., Sessler D.I., Cheng C., Matsukawa T., Thermoregulation and heart rate variability, *Clin. Sci. (Lond.)*, **90**: 97-103 (1996)
- 20) Thayer J.F., Nabors-Oberg R., Sollers J.J. 3rd., Thermoregulation and cardiac variability: a time-frequency analysis, *Biomed. Sci. Instrum.*, **34**: 252-256 (1997)
- 21) 大塚邦明, 時間医学とヤマス医学 – 時間生物学とエコロジーの立場からみた心拍変動と血圧変動 –, 東京: メディカルレビュー社 (1998)