

心拍数を用いた都市環境の評価を 目的とした安静時心拍数の検討

川上 桃子¹・谷下 雅義²・大倉 典子³

¹ 非会員 中央大学大学院 理工学研究科都市人間環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: a15.akya@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: mtanishita.45e@g.chuo-u.ac.jp

³ 非会員 芝浦工業大学特任教授 SIT 総研 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

近年、安価な計測機器の普及もあり、心拍数 (HR) を用いて都市環境の快適性を評価する研究が行われている。HR は個人内および個人間の変動が大きく、単純な平均値の差の検定は適切ではない。これまで著者らは安静時心拍数 (RHR) を基準値とした指標を提案してきたが、RHR やその測定方法については十分検討されていない。本稿では、HR を用いた都市環境の印象評価のための基礎的研究として、測定時の姿勢と計測時間に着目して RHR の設定方法について検討した。その結果、起床直後に臥位で測定された RHR が最小かつ安定していること、また HR は測定開始から約 60 秒で安静状態になることなどを明らかにした。さらに確率的フロンティア分析 (SFA) により RHR を設定する方法を提案した。

Key Words: Resting Heart Rate, Stochastic Frontier Analysis

1. はじめに

計測機器の小型化、低価格化および健康まちづくりへの関心の高まりを背景に、心拍数(HR: Heart Rate)などの生理指標を用いて、さまざまな環境の快適性やストレスの定量的な評価を試みる研究が近年盛んに行われている¹⁾²⁾。例えば細野らは、高速道路休憩施設に低木・中木・高木の植栽を設置し、主観評価と脳血流動態・眼球運動・心拍変動性・心拍数から植栽の存在や大きさの違いによる生理・心理的效果を検証している³⁾。

活動中および安静時の心拍数は、年齢・性別・生活習慣などの多様な要因から個人差を有することから、安静時心拍数(RHR: Resting Heart Rate)と活動中のHRの差が一般的に指標として用いられる。

著者らは、都市空間でのストレス評価およびリラックスできる環境の検討を行うことを目的として、これまで座位安静で測定したRHRと歩行中のHR、実験協力者の年齢から推定した最大心拍数の比から、緑のある歩行空間の快適性を検討した⁴⁾。その結果、歩行中のHRのみならずRHRも変動することを明らかにした。そしてRHRの定義やその測定方法は今後の課題とされた。

RHRの定義に関して、Chentian Jiangらは、ウェアラブルバイオセンサーの心拍データから、85日間の日中の

心拍数、個々の身体活動/安静習慣、および安静時のHR値の低い偏差に基づいて、個人のRHRを推定する方法を提案している⁵⁾。また、Polar社は、ウェアラブルバイオセンサーによって測定するRHRを「覚醒している時に身体が休んでいる状態の最低心拍数」と定義している⁶⁾。

また計測装置をつけてすぐの心拍数は、機器の誤差また実験協力者自身が機器の装着自体をストレスを感じる可能性があり、変動が大きくなることはこれまでも指摘されているが、RHRの測定時間については明らかになっていない。

そこで本研究は、HRを用いた都市環境の印象評価のための基礎的研究として、姿勢と計測時間に着目してRHRの設定方法について検討する。さらに、これらの結果を踏まえ、確率的フロンティア分析(SFA: Stochastic Frontier Analysis)を援用したRHRの設定方法を提案することを目的とする。

2. RHRの計測条件の検討

(1)方法

信頼性の高いRHRが推定可能なHRデータの計測条件を明らかにするために、計測を行う時間帯と姿勢、また

表-1 心拍数測定時の条件

	時間帯	姿勢
(a) 朝臥位	起床直後	臥位
(b) 朝座位	起床後 朝臥位の測定後	座位
(c) 昼座位	昼食前	座位

測定時間に注目して HR の変動傾向を把握する。

計測を行う時間帯については起床直後と昼食前を比較する。姿勢については横になって脱力した状態（臥位）と、椅子に座った状態（座位）を比較する。また、複数の実験協力者を対象に複数日にわたって HR を計測することで、HR の個人内・個人間の変動についての知見を得る。さらに、時系列の HR の推移から RHR の推定に必要な HR の測定時間を検討する。これらの結果に基づいて、RHR を推定するための HR の測定条件を明らかにする。

ウェアラブルデバイスを用いた HR の測定についてはさまざまな報告がされており、機器の種類によって計測値に差が生じることがあることや、測定精度が異なることが知られている⁸⁾。本調査は RHR の変動傾向を把握することを目的としているため、実験協力者に一貫して特定のデバイス（今回は、腕時計型心拍計測器（Polar M430））を用いて測定してもらうことで、機器の違いによる誤差が生じることがないようにした。

(2) データ

健康な大学生 12 名（男性 9 名、女性 3 名）に、1 日に 3 回心拍数を測定してもらった。測定 conditions は表 1 に示す通りである。各測定では 5 分間、安静状態で 1 秒ごとの HR を測定してもらった。

(3) 結果と考察

はじめに、12 名が 1 日に 3 回、時間帯と姿勢を変えて測定した 5 分間の心拍数のデータについて、それぞれの平均値を整理した。図 1 は横軸に(a)朝臥位の平均心拍数、縦軸に(b)朝座位の平均心拍数をとった散布図である。図 2 は横軸に(b)朝座位の平均心拍数、縦軸に(c)昼座位の平均心拍数の散布図であり、実験協力者ごとに色分けして示した。

図 1 から臥位と座位では座位の方が、図 2 から朝と昼では昼の方が、心拍数が高くなったデータが多いことがわかる。また、実験協力者によって取りうる心拍数の値や範囲に差が見られる。安静状態の心拍数には個人内でも変動があると考えられる。

表 2 は各実験協力者における測定した複数日の心拍数の平均と変動係数を示したものである。

以上の結果より、3 つの条件について、平均心拍数は概ね

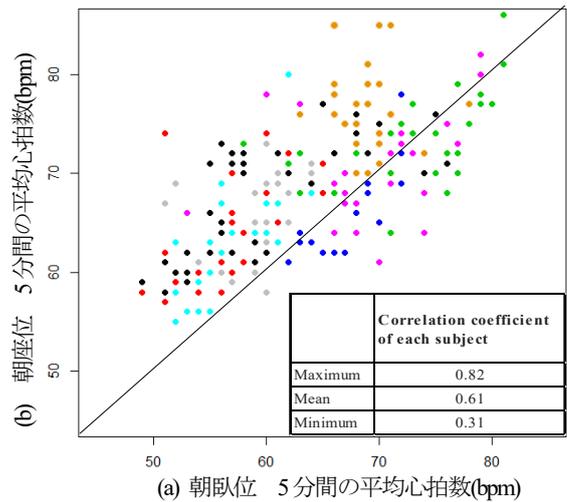


図-1 朝臥位と朝座位の HR の散布図

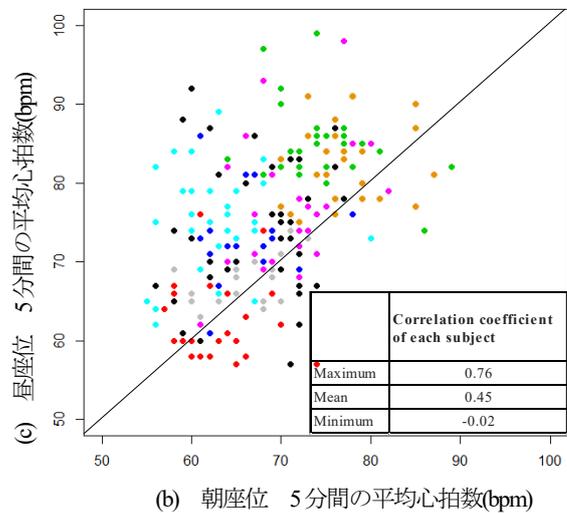


図-2 朝座位と昼座位の HR の散布図

朝臥位 < 朝座位 < 昼座位

と考えられる。臥位から座位への姿勢変化と起床後の活動が心拍数の上昇を引き起こした可能性がある。なお最小心拍数は、活動前である起床直後に臥位で測定した場合に記録されることが考えられる。またこれらの平均値は生データから計算され、測定時間や誤差については考慮されていないことに留意していただきたい。

3. RHR の推定に必要な測定時間

2 章では、起床直後に臥位で HR を測定することで実験協力者の RHR が推定可能であることが示唆された。そこで本章では、朝臥位の HR 測定に着目して実験を行い、必要な測定時間を検討するとともに、RHR の設定方法について検討する。

表-2 実験協力者ごとの平均心拍数と変動係数

id	平均心拍数 (bpm)			変動係数		
	①朝臥位	②朝座位	③昼座位	①朝臥位	②朝座位	③昼座位
1	69.4	77.3	82.3	0.042	0.060	0.061
2	67.4	65.9	72.9	0.046	0.065	0.074
3	56.6	62.6	74.9	0.057	0.083	0.087
4	56.5	63.9	63.8	0.074	0.080	0.086
5	67.9	69.7	80.4	0.080	0.080	0.081
6	56.6	66.1	72.0	0.083	0.088	0.119
7	64.4	71.6	73.5	0.089	0.094	0.094
8	69.3	70.7	75.7	0.087	0.072	0.111
9	55.1	61.8	60.7	0.098	0.074	0.117
10	60.1	68.7	80.1	0.135	0.105	0.159
11	59.1	66.0	67.7	0.059	0.068	0.055
12	73.3	73.9	84.7	0.082	0.070	0.067

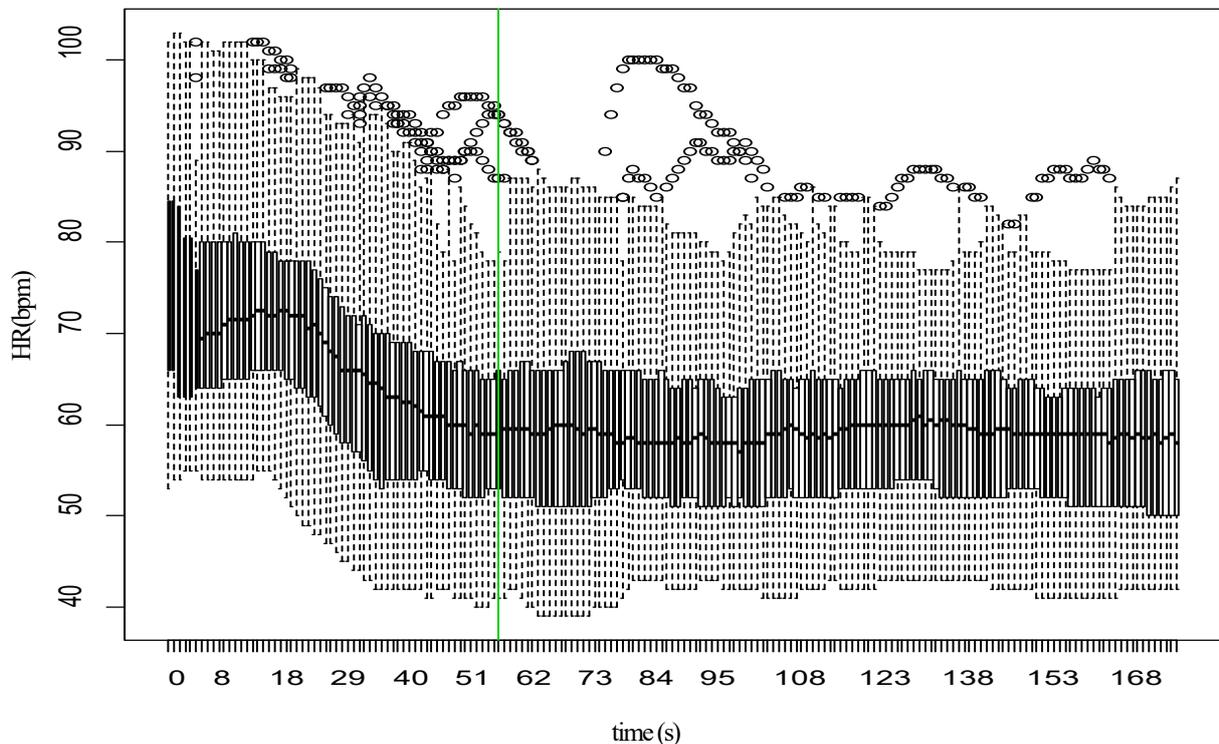


図-3 1秒ごとの心拍数の推移傾向

(1) データと方法

実験協力者数を増やし、健康な 20 代前半の大学生 15 名を対象とした。腕時計型心拍計測器 (Polar M430) により、起床直後の HR を臥位安静状態で 3 分以上測定してもらい計測を複数日にわたって行ってもらった。なお、寝不足や体調不良の自覚症状がある場合や、強いストレスを感じる場合、前日にたくさんアルコールを摂取した場合には測定を控えるようにしてもらった。

180 秒間にわたって 1 秒ごとに記録された HR の時系列のデータから、HR が低い水準で安定するまでの時間を検討する。

(2) 結果

図 3 に測定開始から 180 秒間の HR の推移を示す。この図は全実験協力者のすべての計測の 1 秒ごとの心拍数を箱ひげ図にしたもので、縦軸が HR (bpm)、横軸が時

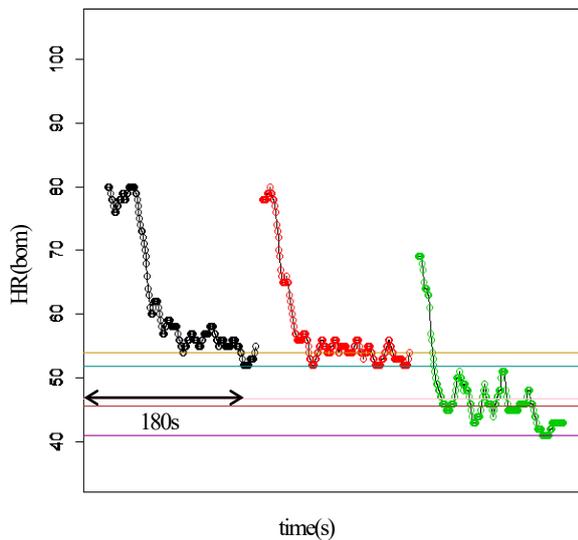


図4 3日間にわたり測定したHR

間(s)で、箱は1秒ごとのHRの四分位範囲、箱の内側の線が15名が複数日にわたり測定したHRの中央値、丸い点は外れ値を示す。この図から、HRは概ね最初の約60秒間(図中の緑の垂線)で徐々に低下し、その後は緩やかに上下しながら安定する傾向にあることがわかる。

したがって、RHRを推定するためには少なくとも60秒以上はHRを測定する必要があるといえる。

図4にある1名の実験協力者が今回測定した3日分のHRデータを折れ線グラフでプロットした。縦軸はHR、横軸は時間で、色分けされたひとつひとつのグラフが1回の測定(180秒間)の推移を表す。測定開始直後は、実験協力者が計測機器の操作で身体を動かすことや心理的な緊張からHRが高くなっている。その後60秒程度はHRの減少が観察されるが、最低値に近い値に到達してからは低い水準で安定している。

以上より、RHRは個人内では比較的安定しており、各個人の値をひとつのRHRとして推定できると考えられる。しかし、図は省略するが、RHRの水準自体が日々かなり変化している人も見受けられた。このような計測結果をどのように扱うかは今後検討を要する。

4. RHRの設定方法の提案

安静時の心拍数も一定ではなく変動する。この変動は心拍数を増加させる方向に作用すると考えられることから、確率フロンティア分析(SFA: Stochastic Frontier Analysis)を使用してRHRを推定することを提案する。SFAはパラメトリックなアプローチであり、入力データと出力の間の確率的な関係を推定する。データに含まれるノイズを考慮して最小値を推定するものである。

$$\log y_t = \beta + u_t - v_t \quad (1)$$

y_t は時刻 t に計測されたHRである。 β は定数項、 u_t は両側正規分布に従う誤差項で、 v_t は切断正規分布に従う非負の誤差項である。

測定したデータに関して、ある個人は1つのRHRを有すること、観測される心拍数はRHR(β はその自然対数)に加えて、正規分布に従う誤差と切断正規分布に従う誤差をともなって観測されるという2点を満たすことを仮定する。最尤法を用いて β 、 u_t の分散(Sigma Sq)、 v_t (Gamma)を推定する。推定には(R)のFrontierパッケージを用いた。

表3にSFAによる推定結果を示す。HRの自然対数の項は、全ての実験協力者において99%有意水準で有意となった。

図5にHRの中央値、最小値、SFAによる推定結果から計算したRHRを実験協力者ごとに示した。中央値と最小値はHRの変動が大きい測定開始後60秒間のデータを除いて計算した。SFAによるRHRは、最小心拍数をわずかに上回る。朝臥位で180秒間測定したHRデータにSFAモデルを当てはめることで、ほとんどの実験協力者のデータで観察された測定開始直後の高いHRの影響は受けずにRHRが計算ができたと考えられる。本実験の結果からHRが測定開始後に安定するまでに60秒かかることが明らかになったが、ひとつひとつのデータをみると安定までに要する時間は個人内・個人間で多少のばらつきがある。SFAにより、短時間でのHRの変動傾向を考慮したうえでRHRを推定できたと考えられる。すなわち、1回につき180秒の測定を数日行うだけでも、RHRを推定できる可能性がある。

15名中13名は推定したRHRと最小心拍数の差はわずかである一方で、2名の実験協力者はRHRと最小心拍数に10bpm以上の差がある。これらの実験協力者のデータを見ると、心拍数が極端に低い1日が存在するために最小心拍数が低い値をとっていた。今回の推定では、複数日のHRが共通の分布に従うと仮定したため、極端に小さい値は誤差として処理された。HRには日々小幅な変動が存在するが、SFAによる推定は外れ値を除外した上で最低心拍数に近い値を計算しているといえる。RHRを「覚醒している時に身体が休んでいる状態の最低心拍数」と考えると、定義に合致した方法であると考えられる。

5. おわりに

本研究ではRHRについて検討し、以下の知見を得た。

- ・姿勢：覚醒時の最低心拍数の測定には起床直後に横になって測定するのが適している。
- ・計測時間：60秒程度で心拍数が安定する

さらに、これらの結果を踏まえ、確率的フロンティア

表-3 SFA の推定結果

id	(Intercept): log(RHR)				sigmaSq				gamma			
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
1	3.81	0.01	629.25	< 2.2e-16 ***	0.08	0.00	18.58	< 2.2e-16 ***	0.94	0.01	108.18	< 2.2e-16 ***
2	3.75	0.06	65.13	< 2e-16 ***	0.06	1.00	0.06	0.95	0.99	1.00	0.99	0.32
3	4.01	0.01	785.71	< 2.2e-16 ***	0.06	0.00	20.03	< 2.2e-16 ***	0.93	0.01	95.47	< 2.2e-16 ***
4	4.13	0.02	165.65	< 2e-16 ***	0.01	0.00	27.19	< 2e-16 ***	0.00	0.01	0.03	0.98
5	4.09	0.00	1261.64	< 2.2e-16 ***	0.02	0.00	22.54	< 2.2e-16 ***	0.88	0.02	52.04	< 2.2e-16 ***
6	3.72	0.30	12.37	< 2e-16 ***	0.07	0.97	0.07	0.94	0.98	0.98	1.00	0.32
7	3.96	0.00	889.56	< 2.2e-16 ***	0.03	0.00	17.37	< 2.2e-16 ***	0.98	0.01	128.17	< 2.2e-16 ***
8	3.79	0.00	1192.32	< 2.2e-16 ***	0.05	0.00	20.60	< 2.2e-16 ***	0.99	0.00	399.74	< 2.2e-16 ***
9	3.82	0.01	305.34	< 2.2e-16 ***	0.06	0.01	10.36	< 2.2e-16 ***	0.88	0.03	26.91	< 2.2e-16 ***
10	3.83	0.31	12.47	< 2e-16 ***	0.06	0.96	0.06	0.95	0.98	0.99	0.99	0.32
11	4.12	0.01	527.09	< 2.2e-16 ***	0.04	0.00	13.44	< 2.2e-16 ***	0.98	0.02	61.43	< 2.2e-16 ***
12	4.02	0.01	411.99	< 2.2e-16 ***	0.02	0.00	9.37	< 2.2e-16 ***	0.72	0.07	9.88	< 2.2e-16 ***
13	4.00	0.01	347.64	< 2.2e-16 ***	0.02	0.00	9.56	< 2.2e-16 ***	0.59	0.08	7.02	0.00 ***
14	4.01	0.00	1004.33	< 2.2e-16 ***	0.03	0.00	15.56	< 2.2e-16 ***	0.95	0.01	114.48	< 2.2e-16 ***
15	3.86	0.00	896.89	< 2.2e-16 ***	0.05	0.00	14.56	< 2.2e-16 ***	0.99	0.00	261.78	< 2.2e-16 ***

RHR vs Median HR vs Minimum HR



図-5 中央値, 最小値, RHR の推定結果の比較

分析 (SFA : Stochastic Frontier Analysis) を援用した RHR の設定方法を提案し, その妥当性を確認した。

今回, 短期間の心拍数のデータから RHR を推定できる可能性を明らかにしたが, 何日間のデータを使う必要があるのかの検討は今後の課題である。

RHR は多くの研究で HR の基準値として用いられてきた。しかし本研究における安静時の HR の変動傾向の調査により, この生理指標が多くの変動要因を有すること

がわかり, 信頼性を有する RHR を基準値として推定することの重要性が確認された。今回の知見に基づき, 信頼性の高い RHR の推定値を基準として都市環境におけるストレスを定量的に評価し, 健康まちづくりに資するリラックスできる環境の検討を行っていきたい。

謝辞: のべ 27 名の方に実験にご協力いただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松葉直也, 李宙營, 朴範鎮, 李旻宣, 宋チョロ
ン, 宮崎良文: 大規模都市緑地における歩行がもたらす生理的影響: 新宿御苑における実験, 日本生理人類学会誌, 16(3), 133-139, 2011.
- 2) R. Miyagi, Y. Sasawaki, and H. Shiotani, "The influence of short-term sedentary behavior on circadian rhythm of heart rate and heart rate variability," *Chronobiology International*, 2018.
- 3) T. Lanki, T. Sipilonen, A. Ojala, K. Korhonen, A. Pennanen, P. Tiittanen, Y. Tsunetsugu, T. Kagawa, L. Tyrväinen, "Acute effects of visits to urban green environments on cardiovascular physiology in women: A field experiment", *Environmental Research*, 159, pp.176-185, 2017.
- 4) 細野哲央, 佐藤将, 若林美之, 松本脩: 高速道路休憩施設におけるアプローチ広場の植栽がもつ生理・心理的効果, ランドスケープ研究 (オンライン論文集), vol.10, pp.31-36, 2017.
- 5) 川上桃子, 谷下雅義: 都市内緑環境の評価のための心拍数の計測条件の検討, 土木計画学研究・講演集, vol.59, CD-ROM, 2019.
- 6) X. Li, J. Dunn, D. Salins, G. Zhou, W. Zhou, S. M. Schüssler-Fiorenza Rose, D. Perelman, E. Colbert, R. Runge, S. Rego, R. Sonecha, S. Datta, T/McLaughlin, M.P. Snyder, "Digital health: Tracking physiomes and activity using wearable biosensors reveals useful health-related information," *PLoS Biol.*, vol. 15, no. 1, p. e2001402.
- 7) Heart rate – the essentials. : <https://www.polar.com/en/smart-coaching/heart-rate-the-essentials> (2020/05/03閲覧).
- 8) C. Jiang, L. Farooqi, L. Palaniappan, J. Dunn, "Estimating Personal Resting Heart Rate from Wearable Biosensor Data," *Information Technology Applications in Biomedicine (ITAB)*, 2019.

(Received July 1, 2009)

(Accepted November 1, 2009)

ESTIMATION OF RESTING HEART RATE FOR THE BUILT ENVIRONMENT EVALUATION

Momoko KAWAKAMI, Masayoshi TANISHITA and Michiko OHKURA

Recently, researches on evaluating comfort or stress in various built environments using heart rate (HR) have been actively conducted. Resting Heart Rate (RHR) is an important index as a reference value of the subject's HR. However, its definition and measuring method are controversial. In this paper, we examined how the RHRs change with the measurement method in terms of posture and measurement time. As a result, HR measured in the supine position immediately after waking up was not only minimum but also the most stable. Regarding measuring time, the test subject reached a resting state about 60 seconds after the start of the measurement. Then we proposed a method to estimate the RHR applying stochastic frontier analysis (SFA) and showed the applicability.