

心拍時系列ビッグデータに潜在するプライバシーリスク

早野順一郎[†] 吉田 豊[†] 古川由己[†] 湯田 恵美[†]

概要: 近年の心拍や脈拍を検出するウェアラブルセンサの普及により、心拍時系列のビッグデータが形成される状況が生じているが、そこに潜むプライバシーリスクはあまり認識されていない。ALLSTARプロジェクトの24時間心電図から得られた心臓の拍動間隔時系列のみの自動解析による実証実験で、突然の意識消失や突然死につながる30秒以上の持続性心室頻拍が247,712例の解析で164例(0.066%)に、また日中の強い眠気をもたらす重症睡眠時無呼吸(無呼吸低呼吸指数>30/時)が、196,091件の解析で、男性の7.2%、女性の2.6%に発見された。これらの情報が個人や特定の集団の情報として流出すれば、本人や所属集団にとって大きなプライバシーリスクとなる可能性がある。

キーワード: ALLSTAR, 24時間心電図, ビッグデータ, 心拍変動, 希少事象, セキュリティ・リスク, ウェアラブルセンサ

Latent Privacy Risk in Heart Rate Big Data

EMI YUDA[†] YUTAKA YOSHIDA[†] YUKI FURUKAWA[†]
JUNICHIRO HAYANO[†]

Abstract: With the rapid progress of wearable sensors, continuous monitoring of biological signal in daily life has become widespread. Particularly, for heart / pulse rate signals that can be monitored relatively easily, enormous continuous signals are accumulated and big data are being formed. However, given the healthcare information that can be extracted from continuous heart / pulse rate signals, our perceptions of the potential information security risks of their big data may be inadequate. In this study, we analyzed 24-hr heart rate data obtained in Allostatic State Mapping by Ambulatory ECG Repository (ALLSTAR) project. By the analysis of data in 247,712 subjects, we were able to find 164 (0.066%) subjects who showed episodes of ventricular tachycardia sustained for >30 sec that can lead sudden syncope or death. We also detected the typical heart rate pattern of severe sleep apnea with apnea-hypopnea index >30/h that can cause strong daytime sleepiness and increased health risk in 7.2% of males and 2.6% of females among 196,091 subjects. If such information leaks along with the subject or group identity information, it could be a major privacy risk for individuals and related groups.

Keywords: ALLSTAR, ambulatory ECG, big data, heart rate variability, rare event, security risk, wearable sensor

1. はじめに

近年の様々な携帯型センサーの進歩によって、日常生活下における生体信号の連続モニタリングが可能になった。特に心拍・脈拍データについては、その連続センシングが比較的容易であることから、多くのウェアラブル機器が市販されており、膨大な連続データが日々蓄積され、ビッグデータを形成しつつある。

市販されている心拍・脈拍モニタリング機器の多くは、随時心拍数や心拍変動解析から得られる自律神経指標とそれらの日内変動などの情報を、附属するソフトウェアやクラウドを通じて提供している。例えば、運動時の心拍数、休息に伴う副交感神経機能を表す心拍変動の高周波数(HF, 0.15-0.45 Hz)成分のパワー[1, 2], ストレス等によって増加するとされる低周波数(LF, 0.04-0.15 Hz)成分と HF 成分のパワーの比(LF/HF)などである[3]。

これらの指標からも間接的には健康状態や健康リスクをある程度までは推定することができるが、一見しただけで

は、疾患の存在や発作や死亡などに直接結びつく情報には見えない。その結果、心拍・脈拍データに対する個人情報としての意識や情報セキュリティについてのユーザーの危機感は低いように思われる。しかし、心拍・脈拍信号の連続データから得られる情報は、これらの指標だけではない。心拍・脈拍変動に関する研究は、自律神経機能だけでなく、そこから生体の様々な現象を検出する方法が、次々と開発されつつある。最も以前から注目されているのは、心臓性突然死の原因である心室細動に移行しやすい持続性(30秒以上持続する)心室頻拍(sustained ventricular tachycardia), 急性のリスクではないが脳梗塞のリスクとなる心房細動がある[4]。また、最近では、居眠り事故や疾患のリスクである睡眠時無呼吸の発作時の心拍変動パターンである心拍数周期性変動(cyclic variation of heart rate, CVHR)の自動検出法が開発されている[5, 6]。これらの稀少事象の情報流出は、個人にとって重大なプライバシーリスクとなるのみでなく、個人は特定できなくても対象集団が特定できる場合は、その集団にとってセキュリティ・リスクとなりうる。

そこで、本研究では、心拍・脈拍のビッグデータが実際にこれらの情報セキュリティ・リスクが起ころうかどうか

[†]名古屋大学大学院医学研究科
Nagoya City University Graduate School of Medical Sciences

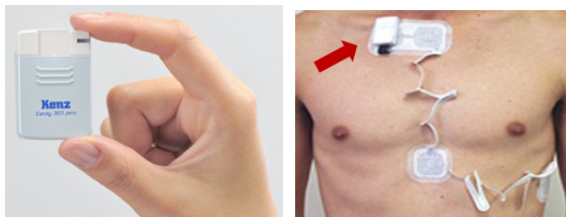


図1 超小型ホルター心電計(重さ 13g, 左)と、防水電極とともに装着した状態(右, 矢印部が本体)

かを傍証するために, Allostatic State Mapping by Ambulatory ECG Repository (ALLSTAR) プロジェクトで構築された, 24 時間の心拍信号のビッグデータを用いて, 自動処理アルゴリズムのみによって, 持続性心室頻拍と重症睡眠時無呼吸例の検出が可能かどうかを検証した。

2. ALLSTAR プロジェクト

本研究では, 日常活動下の心拍の連続データとして ALLSTAR プロジェクトのデータベース[7] を使用した。ALLSTAR は 7 大学 9 名の研究者を中心に, データの所有者である(株)スズケン(名古屋)の協力を得て発足したプロジェクトである。プロジェクトの目的は, 日本全国で記録されるホルター心電図データから, 環境因子が健康や疾患に与える影響の評価法を確立し, ホルター心電図の医療における利用価値の向上とともに, 健康寿命の延伸を中心とする予測・予防医療の推進に貢献することである。本プロジェクトでは, 日本全国で記録されるホルター心電図の約 5%にあたる年間約 6 万件のホルター心電図データの収集とデータベース化を進めており, 現在, 約 40 万件が登録されている。

ALLSTAR プロジェクトに使用されているデータは, (株)スズケンの札幌, 東京, 名古屋にある心電図解析センターが, 医療機関から解析の依頼を受けた 24 時間ホルター心電図の内, 検査対象者によるプロジェクトでの使用を拒否する申し出のあったものを除いた, 全データである。したがって, 対象となるホルター心電図は, 疾患のスクリーニングや診断, 重症度判定, 治療効果判定など, 何らかの医療上の目的で記録されたものである。

ALLSTAR プロジェクトのホルター心電図記録には, (株)スズケン社製のホルター心電計(Cardy 2, Cardy 2P, Cardy 203, Cardy 301, Cardy 302 Mini and Max, Cardy 303 pico and Cardy 303 pico+のいずれか)が使用されている(図 1)。これらの心電計は, 24 時間の心電図をサンプリング周波数 125 Hz でデジタル化して保存する。データは, 札幌, 東京, 名古屋のいずれかの心電図解析センターに送られ, ホルター心電図解析器(Cardy Analyzer 05, (株)スズケン)によって, 全ての心拍の不整脈判定と拍動間隔の測定が行われる。

解析センターは, ALLSTAR プロジェクトの目的のために, 対象となるデータを匿名化し, 年齢, 性別, 記録日時,

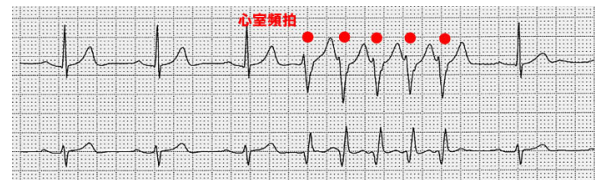


図 2 ホルター心電計で捉えられた 5 連発の心室頻拍 (非持続性)

記録場所(郵便番号)とともにデータベースに保存している。(株)スズケン は, 収集, 保存されたデータの研究目的での使用についてのライセンスを, ALLSTAR プロジェクト委員会に付与し, ポータブルハードディスクを介してデータをプロジェクトの専用サーバに転送している。

3. 心室頻拍の検出

3.1 対象データ

対象や集団が特定されるリスクを下げるために, 本論文では, 約 40 万件の ALLSTAR データベースから 247,712 例をランダムに抽出したサブグループのデータを使用した。R-R 間隔と心拍の調律についてのラベル(洞調律, 心室性期外収縮, 上室性期外収縮, ノイズ)情報から, 洞調律時に発生し, 連結期(拍動間隔)が 500 ms 以下で, 4 拍以上連発する心室性期外収縮として, 心室頻拍を検出した。

3.2 データ分析

検出された心室頻拍は, その持続時間によって次の 3 種類に分類した。(1) Short <5 秒, (2) 非持続性 5-30 秒, (3) 持続性 >30 秒。また, 心室頻拍発生前の心拍動態を見るために, 直前の R-R 間隔のトレンド, 直前の連続する洞調律 R-R 間隔の差分のトレンドを求めた。

3.3 心室頻拍の検出結果

表 1 に, 心室頻拍が検出された対象数を示す。持続性心室頻拍が 164 例(0.066%)検出された。図 3 はこれらの心室頻拍の発生直前の R-R 間隔の加算平均値のトレンドである。持続性心室頻拍の直前の R-R 間隔は, short または非持続性心室頻拍の直前の R-R 間隔よりも短いことが分かった。

表 1 247,712 例の 24 時間心拍データから検出された心室頻拍

	Short <5 sec	Non-sustained 5-30 sec	Sustained >30 sec
例数 (%)	5,921 (2.4%)	649 (0.26%)	164 (0.066%)
Age, yr	63 ± 21	65 ± 20	58 ± 22
Sex (M/F)	58%/42%	66%/34%	66%/34%

Non-sustained = 非持続性心室頻拍, sustained = 持続性心室頻拍

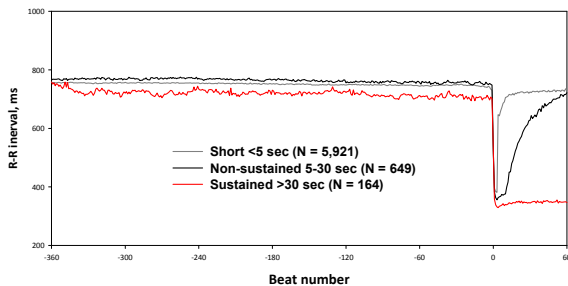


図3 持続時間で分類した心室頻拍の直前の加算平均 R-R 間隔

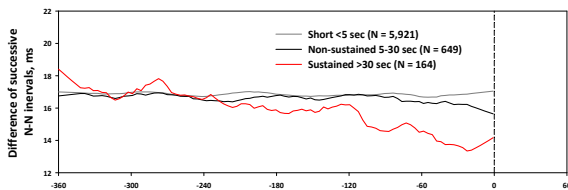


図4 心室頻拍直前の連続する洞調律 R-R 間隔の差分 (迷走神経機能の指標)の加算平均値

図4は、心室頻拍の連続する洞調律 R-R 間隔の差分の絶対値の加算平均値のトレンドである。心室頻拍の直前には、非持続性、持続性ともに、R-R 間隔の差分値が低下し、特に持続性心室頻拍では、発生の200心拍程度前から、低下が観察された。R-R 間隔の差分値は心臓迷走神経活動の指標であることから、心室頻拍の直前には迷走神経活動の抑制が起こり、特に持続性心室頻拍では、非持続性心室頻拍よりも、早くからより強い抑制が起こることが示めされた。

4. CVHR による重症睡眠時無呼吸の検出

4.1 対象データ

睡眠時無呼吸の検出には、約40万件のALLSATRプロジェクトの24時間心拍データベースより、洞調律を示す20歳以上の男性87,821例、女性108,270例をサブグループとしてランダムに抽出した。

4.2 データ分析

図5に示す様に、睡眠時無呼吸の発作時にはCVHRと呼ばれる特徴的なR-R間隔の変動パターンが現れる[8]。また、CVHRの頻度はAHIを反映することが分かっている[5][6]。そこで、夜間就寝中のR-R間隔に対して、睡眠時無呼吸の自動検出アルゴリズム(Auto-correlated wave detection with adaptive threshold, ACAT) [5]を適用してCVHRの頻度を求めた。

4.3 CVHRの検出結果

図6に男女それぞれの各年齢層におけるCVHRの頻度を示す。先行研究[6]で、 $AHI \geq 15$ の睡眠時無呼吸の有病率は、CVHR ≥ 30 で100%、CVHR12-30で70%である。これに基づいて推定すると、196,091例中、48,873例(24.9%)に

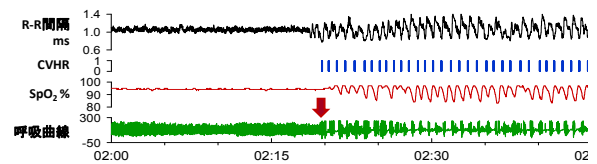


図5. 睡眠ポリグラフに見られる睡眠時無呼吸発作開始(矢印)のR-R間隔の変動。

発作開始と共にR-R間隔にはcyclic variation of heart rate (CVHR)と呼ばれる特徴的な変動が見られる。青色のバーは自動検出ソフトで検出されたCVHRの位置を示す。

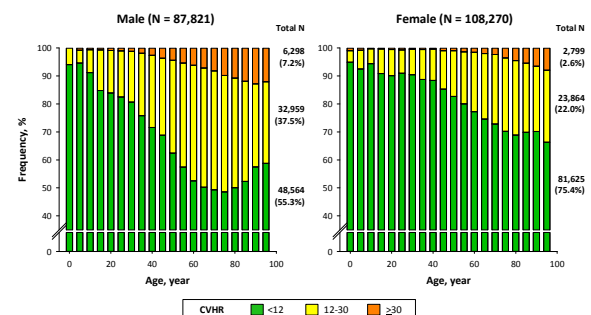


図6 ALLSTAR データベースにおいて、睡眠時無呼吸の自動検出ソフトウェアで捉えられた各年齢層の心拍数周期性変動(CVHR)の頻度
 中等症 CVHR 15-30/h
 重症 CVHR >30/h

中等症以上の睡眠時無呼吸が存在することになる。また、男性の7.2%、女性の2.6%が、重症睡眠時無呼吸(無呼吸低呼吸指数>30/時)を有するものと推定された。

5. 考察

心拍・脈拍信号の連続データには、個人や集団の情報セキュリティ上のリスクとなり得る情報が含まれていることを実証するために、ALLSTARプロジェクトの24時間心拍ビッグデータから、重大な健康リスクの情報である持続性心室頻拍および重症睡眠時無呼吸を有する例を抽出可能かどうか検証した。その結果、247,712例から164例(0.066%)の持続性心室頻拍例が、また、196,091件の解析で、男性の7.2%、女性の2.6%に重症睡眠時無呼吸の兆候が自動検出された。

持続性心室頻拍は突然の意識消失の原因となり、また突然死の原因となる心室細動に移行するリスクが高い。また、重症睡眠時無呼吸は、居眠り事故の原因となるばかりでなく、高血圧や糖尿病、さらには認知症などの疾患のリスクとなる[9]。これらの稀少事象の情報が、個人を特定できる

形で流出すれば、個人にとって重大なプライバシーリスクとなるのみでなく、個人は特定できなくても対象集団が特定できる場合は、その集団にとってのセキュリティ・リスクとなりうる。

近年の携帯型センサーの進歩によって、日常生活下における心拍・脈拍データの連続センシングが可能となり、様々なウェアラブル機器が市販されている。そこからは膨大な連続データが日々蓄積されてビッグデータを形成しつつあるが、この情報のセキュリティに対するユーザーの意識は相対的に低いように思われる。本研究では心拍・脈拍のビッグデータから、どのような情報が取得可能かを実際に示した。これらの情報が持つリスクに対する適切な認識と、それに見合ったセキュリティの確保が望まれる。

参考文献

- [1] J. Hayano and F. Yasuma, "Hypothesis: respiratory sinus arrhythmia is an intrinsic resting function of cardiopulmonary system," *Cardiovascular Research*, vol. 58, pp. 1-9, 2003.
- [2] J. Hayano, "Introduction to heart rate variability," in *Clinical assessment of the autonomic nervous system*, S. Iwase, J. Hayano, and S. Orimo, Eds., ed Japan: Springer, 2016, pp. 109-127.
- [3] A. Malliani, "The Pattern of Sympathovagal Balance Explored in the Frequency Domain," *News in physiological sciences : an international journal of physiology produced jointly by the International Union of Physiological Sciences and the American Physiological Society*, vol. 14, pp. 111-117, Jun 1999.
- [4] E. Watanabe, K. Kiyono, J. Hayano, Y. Yamamoto, J. Inamasu, M. Yamamoto, *et al.*, "Multiscale Entropy of the Heart Rate Variability for the Prediction of an Ischemic Stroke in Patients with Permanent Atrial Fibrillation," *PLoS One*, vol. 10, p. e0137144, 2015.
- [5] J. Hayano, E. Watanabe, Y. Saito, F. Sasaki, K. Fujimoto, T. Nomiyama, *et al.*, "Screening for obstructive sleep apnea by cyclic variation of heart rate," *Circ Arrhythm Electrophysiol*, vol. 4, pp. 64-72, Feb 2011.
- [6] J. Hayano, T. Tsukahara, E. Watanabe, F. Sasaki, K. Kawai, H. Sakakibara, *et al.*, "Accuracy of ECG-based screening for sleep-disordered breathing: a survey of all male workers in a transport company," *Sleep Breath*, vol. 17, pp. 243-51, Mar 2013.
- [7] *Allostatic State Mapping by Ambulatory ECG Repository (ALLSTAR)* Available: Nov 6, 2017
<http://www.med.nagoya-cu.ac.jp/mededu.dir/allstar/index.html>
- [8] C. Guilleminault, S. Connolly, R. Winkle, K. Melvin, and A. Tilkian, "Cyclical variation of the heart rate in sleep apnoea syndrome. Mechanisms, and usefulness of 24 h electrocardiography as a screening technique," *Lancet*, vol. 1, pp. 126-31, Jan 21 1984.
- [9] V. K. Somers, D. P. White, R. Amin, W. T. Abraham, F. Costa, A. Culebras, *et al.*, "Sleep apnea and cardiovascular disease: an American Heart Association/American College Of Cardiology Foundation Scientific Statement from the American Heart Association Council for High Blood Pressure Research Professional Education Committee, Council on Clinical Cardiology, Stroke Council, and Council On Cardiovascular Nursing. In collaboration with the National Heart, Lung, and Blood Institute National Center on Sleep Disorders Research (National Institutes of Health)," *Circulation*, vol. 118, pp. 1080-111, Sep 2 2008.