

2011年東北地方太平洋沖地震及びその後の停電等に伴う 混乱時のストレス及び身体的負荷の測定例

菅野久信*, 白水重憲**, 片山宗哲**

要旨 超小型心電・加速度・温度測定装置により, 7名の被験者の東北地方太平洋沖地震のメンタルストレスやその後の停電等に伴う混乱時の身体的負荷を測定した。全ての被験者で地震の際にはRR間隔が大きく減少した。その変化の周波数はRR間隔変動の低周波成分の下限とされる0.04 Hz以下であり, このような大きな緊張が予想される場合には, 高周波帯・低周波帯の範囲にとらわれない解析が必要である事が示唆された。RR間隔変動の時間周波数解析結果から算出した呼吸周波数によるその後の混乱時の身体的負荷の評価も紹介した。

キーワード : RR間隔変動, 時間周波数解析, 東北地方太平洋沖地震, メンタルストレス, 呼吸

1. 序論

NPO法人セルフケア総合研究所は3歳児でも24時間の測定が可能な超小型の心電・加速度測定装置を開発し, 3歳児から80歳過ぎの高齢者まで, 幅広く覚醒時の活動挙動, 睡眠挙動及び24時間の自律神経活動のモニタリングを開始している¹⁾。装置の小型軽量性の為, 被験者は測定している事を意識せずに, 生活行動を行う事ができる。2011年3月11日の2011年東北地方太平洋沖地震の際にも, 東京都港区及び神奈川県川崎市で合計7名の被験者のモニタリングを実施していたが, 地震の瞬間及び余震の続く時間帯でも, 停電や交通機関のストップに伴うその後混乱の中でも, 被験者の行動に影響を及ぼす事無く, 被験者の自律神経活動と置かれた環境, 及び被験者の行動とその影響のデータを得る事が出来た。いくつかの興味深いデータを紹介する。

また, 地震に伴う津波による福島県の原子力発電所から飛散をはじめた放射性物質を含有した微粒子によ

る被曝, それに伴う甲状腺機能の低下の不安が世情を賑わせているが, 自律神経活動のモニタリングは甲状腺機能の低下を評価する有力な方法の一つである。これについても紹介する。

2. 測定と解析

使用した超小型心電・加速度測定装置については既に報告している¹⁾。

東京都港区にある会社に勤務する6名(男性5名, 年齢45~73歳, 女性1名, 年齢48歳)を対象に, 前日の3月10日午後17時頃より, 24時間のモニタリングを開始していた。通常通り, 心電のサンプリング周波数128 Hz, 3軸加速度のサンプリング周波数1 Hzであった。一方, 神奈川県川崎市にあるタワーマンション33階でデスクワークを行っていた男性(年齢52歳)のモニタリングは当日の11時52分より行っていた。こちらでは, 心電のみならず3軸の加速度もサンプリング周波数128 Hzとしていた。どのモニタリングの場合も予定通りの測定が可能であり, 後日, 装置を回収してデータを解析した。

心電データよりのRR間隔の抽出及びSPWV法によ

*産業医科大学名誉教授

**NPO法人セルフケア総合研究所

受付日: 2011年4月17日

る時間周波数解析も基本的には前報の通りである¹⁾。RR 間隔の抽出に於いては、R ピークの検出ミスを減らし、正確にピーク点を捉える為の改良を施した。

前報で我々は SPWV 法を用いて 1 分間毎に計算した時間周波数 MAP より、高周波 (HF) 成分 (0.15 Hz~0.40 Hz) の値と高周波成分と低周波 (LF) 成分 (0.04 Hz~0.15 Hz) の値の比の平均値という 2 つの値のみをパラメータとして求めた¹⁾。しかしながら、時間周波数 MAP ははるかに豊かな情報を持っている。殆ど 1 拍毎の精度で、RR 間隔変動の周波数分布、つまり、自律神経活動の変化を図示する事ができ、その時間変動を各周波数帯の瞬時中心周波数の時間変化として定量的な表現もできる^{2,3)}。本来的に、地震の様な突発的なイベントにより引き起こされた変化等を把握するのに最適の方法である。

この目的の為に、本報では解析プログラムに改良を施し、2 つのバージョンとした。まず、RR 間隔変動に大きな 0.04 Hz 以下の超低周波成分が存在すると、時間周波数 MAP を歪ませる場合があるので、Jasson 等にならない²⁾リサンプリングした RR 間隔データから、カットオフ周波数 0.04 Hz の急峻なチェビシヨフハイパスフィルターで、0.04 Hz を取り除いた。

最初のバージョンは、呼吸周波数を求める為のものである。呼吸が副交感神経活動中枢をカットする事で RR 間隔変動の高周波成分 (0.15 Hz ~ 0.04 Hz) が発生するという機序を考えても、Novak 等の様に同時測定した RR 間隔変動と呼吸の時間周波数 MAP を見比べても、RR 間隔変動の高周波の成分は呼吸の周波数を表すと考えるのは妥当である^{4,5)}。Jasson 等は、RR 時系列データを 2 Hz でリサンプリングして 1 Hz までの周波数範囲の時間周波数解析を行い、高周波成分 HF、低周波成分 LF 及び全周波数帯域 (HF+LF) の瞬時中心周波数⁶⁾を求め、HF 帯の瞬時中心周波数が呼吸周波数に対応するとした²⁾。一方、Bailón 等は 5 Hz でリサンプリングし、平均心拍数の半分の周波数までを解析範囲とすべきと主張したが、時間周波数 MAP での定性的議論にとどまり、呼吸周波数を顕わには求めていない⁷⁾。

我々は、Bailón 等にならない 1 分間毎の RR 間隔データを 4 Hz でリサンプリングし、平均心拍数の半分の周波数を解析上限周波数とした⁷⁾。心拍数が 180 の場合でも 1.5 Hz であるので 4 Hz のリサンプリングで十分と考えた。一方、Jasson 等の方式を拡張して²⁾、高

周波成分の下限の 0.15 Hz から平均心拍数の半分の周波数までの範囲の瞬時中心周波数 (CFR) を求め、更に、10 秒間毎の平均値を求めた。こうして求めた CFR を呼吸周波数とした。

解析プログラムのもう一つのバージョンは、地震等のイベントの瞬間の自律神経活動を見るためのものである。イベントの前後の数分間に亘る MAP を描く必要があると考えた。512 秒分のデータの MAP を描くものとし、データ長が多い為に 2 Hz リサンプリングとし、自律神経活動評価に関係のある 0.5 Hz までを描くものとした。このバージョンでは、Jasson 等と同様の 3 つの瞬時中心周波数を求めた²⁾。また、イベントの前後には、体動によるアーチファクトや緊張による筋電の混入がみられる事が多い。これらの存在は、本研究の改良した RR 間隔抽出ソフトウェアであっても R ピーク位置の誤判定を招き、これに伴う偽 RR 間隔の混入は、時間周波数 MAP を見苦しくし混乱を招く。この為に、本バージョンには解析範囲内のソフトウェアにより自動的に決定された R ピークの位置を、手動で訂正する機能も付加した。

3. 結果と考察

図 1 にタワーマンションの 33 階にいた被験者が装着していた装置に記録されていた 3 軸加速度、つまり彼が感じた加速度の例を示す。最上段が装着者にとっての上下方向加速度、次段が前後方向加速度、最下段が左右方向加速度である。生活の中での加速度であるので重力加速度 (g) を単位としている。各図の黒い横線が 0 g のレベルを示し、±1 g 毎に灰色の目盛線が入っている。横軸は共通して時刻を示す。この被験者は地震の発生した際はソファーで居眠りしており、家人の大きな悲鳴により目を覚まし、起き上がって事態を認識した。従って、最初の大きな揺れは検出されていない。

14 時 49 分以降の加速度のデータをみれば、地震による高周波の揺れが終わった後も低い周期の揺れが継続している。これはタワーマンション独特の揺れと思われる、長く続いて、緊張と不快感を継続させた。船酔いにも似た気分悪化を訴えたものもあった。

直後に停電し、携帯電話の中継器が動作しなくなると携帯も通じず、マンション管理からのアナウンスも無く、外の被害状況が全く不明で、非常に緊張したとの事であった。更に、停電が続いた為に、状況を確認

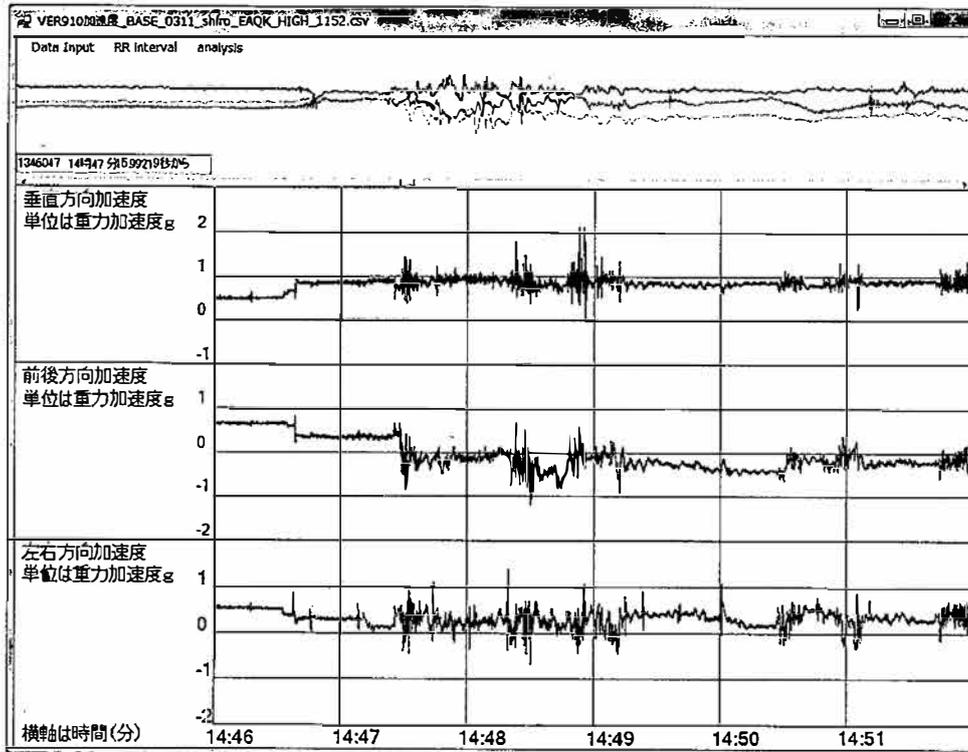


図1 タワーマンションでデスクワークをしていた被験者が感じた地震時の加速度

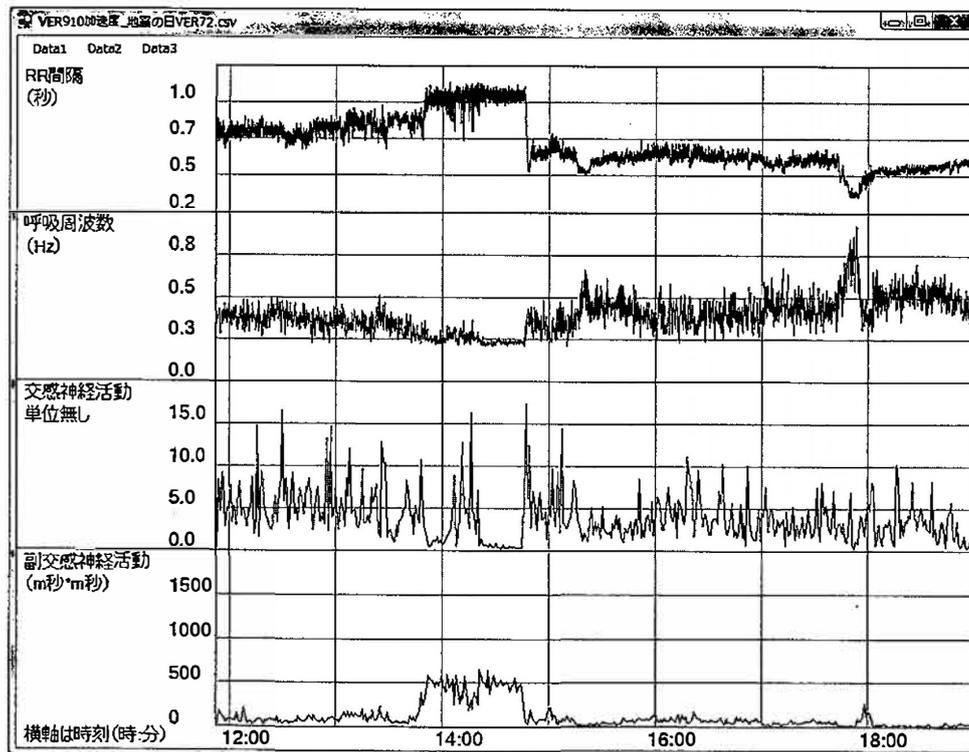


図2 地震の日のRR間隔、自律神経活動変化及び呼吸数の例

する為に階段で下に降り、更に数時間後、停電が長く続いた為に非常灯も消えて真っ暗になった階段を、一つの懐中電灯を頼りに若い人たちと一緒に登ったとの事であった。このような状況下におけるこの被験者の

RR間隔、自律神経活動及び呼吸数の変化を図2に示す。

測定開始後、13時頃まではRR間隔は中程度(0.75秒程度)であり、交感神経活動は大きく、副交感神経

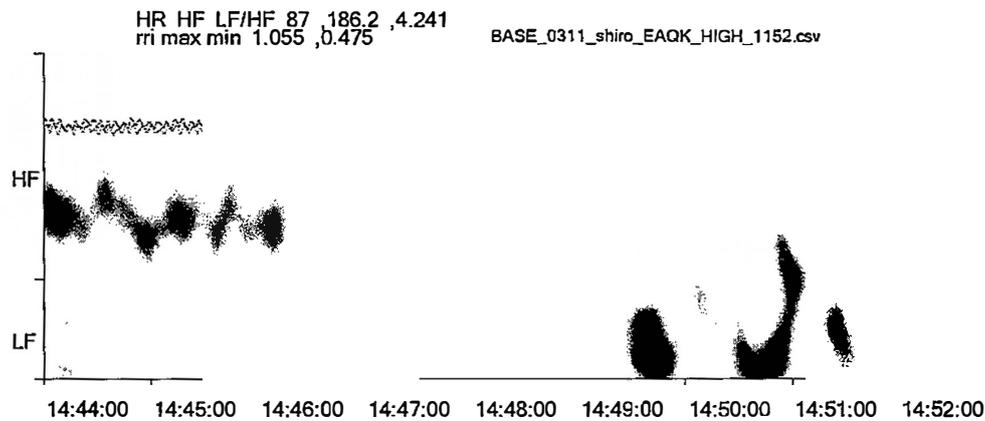


図3 心拍変動の自律神経活動の地震による瞬時変化 被験者1

活動は小さい。呼吸周波数は 0.4 Hz 程度とこの被験者の平均的な値であり、その変動の幅は大きい。少し緊張した覚醒状態で、精神的・身体的活動をしている事が判る。ここでデスクからソファに移動した。

13 時頃から 13 時 40 分頃にかけて、RR 間隔は徐々に大きくなり、交感神経活動は減少を始め、副交感神経活動は大きくなる。呼吸は周波数が低下し、その変動幅も小さくなる。緊張が緩んでリラックスし、更には眠気を催したものと思われる。

13 時 40 分を過ぎた所で RR 間隔は 1 秒程度に跳ね上がり、副交感神経活動は大きく増加する。交感神経活動は小さくなり、呼吸の周波数は 0.25 Hz 程度まで低下し幅も小さくなる。14 時頃まで安定状態が続いた後、14 時頃から 20 分間は、RR 間隔、交感神経活動、副交感神経活動、呼吸数再び大きく変化する。眠りにおちながらも目を覚まそうと抵抗しているものと思われる。

14 時 20 分を過ぎると RR 間隔、副交感神経活動は大きい値で安定し、交感神経活動、呼吸周波数及びその変動は小さな値で安定している。眠ってしまった。この状態で地震に遭遇する訳である。

図 3 に、この被験者の地震発生時前後の時間周波数 MAP を示す。解析開始時刻は 14 時 44 分であり解析時間長は 512 秒である。縦軸の LF の範囲が低周波領域、HF が高周波領域を示している。スペクトル強度は濃度で示され、黒が強度最大である。図中に表示している黒と灰色の波形は RR 間隔波形であり、灰色が生波形、黒が 0.04 Hz 以下の成分を除去したものであり、時間周波数解析に使用したものである。解析開始時の 14 時 44 分には眠っており、RR 間隔は 1.055 程度と長く、スペクトルには高周波成分が大きい。14

時 46 分 20 秒過ぎから RR 間隔と高周波成分が急速に減少する。減少は 2 段に分かれており、最初の段階では RR 間隔の減少は 0.8 秒程度に留まり、スペクトルの高周波成分も幾分か残っている。次に、少しゆるやかな減少が RR 間隔が 0.481 秒になるまで続き、数分間高周波成分が全く無くなる。14 時 50 分から 14 時 51 分にかけて、RR 間隔は若干回復し高周波成分も出現するが低周波成分も大きい。その後また高周波成分がなくなる。

最初の急速な減少は睡眠から覚醒した事と立位への姿勢変換によるものである。その後、揺れを体感し状況を認識する事で緊張が強まっている。14 時 50 分から 51 分にかけての高周波成分の出現は、揺れが小さくなった為にほっとしたものであろうが、低周波成分も大きく緊張状態は強い。この時間範囲の最大 RR 間隔は 1.055 秒、最小 RR 間隔は 0.481 秒であるが、緊張による低下分は、減少時の踊り場の値 0.800 秒からの 0.319 秒とすべきかもしれない。平均値としての心拍数は 88、HF 成分は 160.1msec²、LF/HF 比は 5.301 であるが、このような平均パラメータのみでは先に示した様な事態は知りえず、時間周波数解析の有効性が良く分かる。

他の被験者の同様の時間帯の時間周波数 MAP を図 4 に示す。居眠りをしていた図 3 の被験者の場合とは違い、地震前に高周波成分がはるかに大きかった訳では無いが、地震の後の RR 間隔の大きな減少と LF 成分の増加は同様である。この RR 間隔の大きな減少と LF 成分の増加は全ての被験者で見られた。表 1 に、同じ解析範囲の RR 間隔の最大値、最小値及び LF 帯の極大値の強度、周波数及び時刻を示す。

男女年代を問わず全ての被験者で RR 間隔の減少が

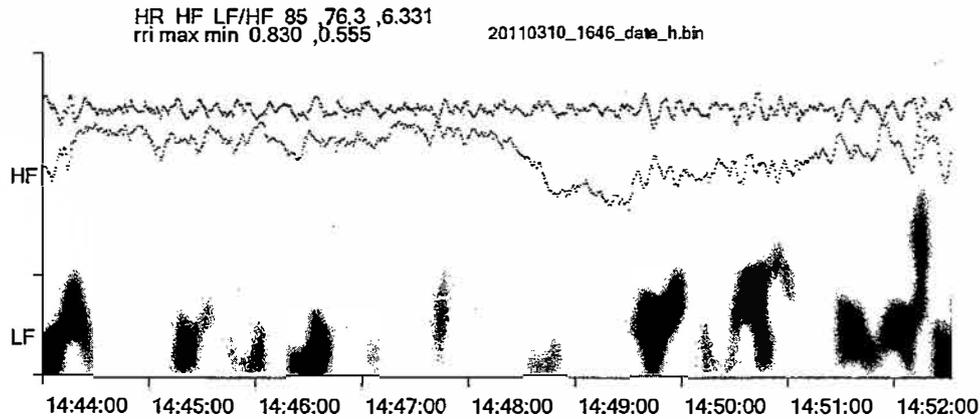


図4 心拍変動の自律神経活動の地震による瞬時変化 被験者5

表1

被験者番号	性別	年齢	RR 間隔				LF 帯の極大		
			最大 (秒)	最小 (秒)	最大と最小 の差 (秒)	地震発生から 最小 RR 間隔 までの秒数 (秒)	ピーク強度 (msec ² /Hz)	ピーク周波数 (Hz)	地震発生から の秒数 (秒)
1	M	52	1.055	0.481	0.574	152	23.374	0.076	221
2	M	58	0.914	0.438	0.476	186	77.493	0.090	382
3	M	45	0.891	0.453	0.438	196	32.124	0.091	331
4	M	52	0.855	0.545	0.31	174	35.537	0.104	220
5	M	55	0.836	0.563	0.273	209	20.017	0.088	224
6	M	73	0.815	0.590	0.225	145	27.739	0.070	275
7	F	48	0.961	0.672	0.289	146	65.515	0.070	281

観測された。最小値の最小は、0.438秒であり、0.5秒以下まで減少したものの3名、0.6秒以下まで減少したものの3名であった。減少の度合いを示す最大値と最小値の差は、最大のものが図2, 3に示された0.574であるが、同様に0.4秒以上減少し、半分以下或いは半分程度に減少したものが他に2名いた。全ての被験者が、地震による強い緊張を示した事になる。

地震発生から最小のRR値が出現するまでの時間間隔は最短で145秒、最長で209秒であった。このような事態で、状況を把握し、本格的な緊張状態になるには時間がかかる事が示唆される。図3, 4に示す様に、このようなゆっくりとした変化は周波数的には自律神経活動を評価する範囲の下限とされる0.04 Hz以下であり、0.04 Hzのハイパスフィルターでは除去されている。今後、このような状況下のデータを解析する際には、HF帯、LF帯の範囲にとらわれない解析が必要である事も示唆される。

LF帯の成分の増加も全ての被験者で観測された。

時間周波数MAP上でのLF帯のピークは、周波数0.070 Hzから0.104 Hz、地震からの時間間隔220秒から381秒であった。緊張によりRR間隔がまず減少し、次にLF帯成分が増加する事が示された。

港区内の低層ビルで勤務していた被験者群の場合は、地震の揺れは短時間で終わり、外部の状況もすぐ把握でき、短時間でほぼ日常に戻った様である。測定が18時には終了していたので、帰宅時の情報は得られなかった。

一方、前述した様にタワーマンションでは地震が終わった後も揺れが続き、そこにいた被験者は、停電が続いていたので外部の情報も得られず、外の状況を知るのもままならなかった。図2に戻り、地震による緊張と、長く続いた停電によりもたらせた高層マンションならではの混乱下のデータを引き続き紹介したい。

地震の瞬間の大きな緊張の時期が終わると、少しはほっとしたらしく、RR間隔は少し上昇し、呼吸周波数は低下している。しかしながら、マンションの揺れ

が続き、情報も途絶している為、緊張状態は続いており、交感神経活動は大きいままである。余震が起り、RR 間隔は再び低下し、呼吸数が再び増加している。

余震の影響が無くなった所で、33 階の階段を下りて情報を確認に向かっている。15 時 20 分あたりの急速な RR 間隔の低下と呼吸周波数の増加はこれに対応している。

地上に降りて周りを歩きながら確認すると、殆ど被害は無く、停電しているのは、このマンションの存在する 1 ブロックのみであり、隣のブロックでは商店もレストランも普段通りに営業していた。この状況を確認するにつれて、RR 間隔が増加し、呼吸数が低下し、副交感神経活動が増加している事が判る。16 時から 17 時頃まで、レストランで食事をしながら、停電の終了を待っていた。その後、マンションのロビーに戻り、更に、停電の終了を待っていた。17 時頃の RR 間隔の減少、呼吸数の増加は、レストランで座っている状態から立位に移動した為である。

電気がなかなか復旧しない為に、階段で自宅に戻ろうとしたが、17 時 40 分にはマンションの非常電源が備蓄エネルギー不足で切れており、階段は真っ暗であったそうである。ちょうど、確認の為に階段を登る管理会社の社員達に同行して 33 階まで階段で戻った

との事である。一つの懐中電灯が頼りという緊張した中、初体験でもあり、若い人たちについて行こうとしたので、本当につらく息絶え絶えだったとの話である。RR 間隔は 0.3 秒にまで低下し、呼吸数は 0.9 Hz まで増加している。心拍数は 188 になり、この被験者にとってのいわゆる最高心拍数 = $220 - \text{年齢} = 168$ 拍を大きく超えている。

33 階まで到達後、RR 間隔はある程度までは急速に低下するが、残りの回復には時間がかかっている。また、呼吸周波数もかなり長い間、大きな値を保っている。

このように、地震発生時、及びその後の停電等による混乱の中で非日常的な行動を強いられた時の、精神的緊張状態、身体的負荷状態を、装着者の行動に何等の束縛を与える事無く測定する事ができる事が示された。

地震に伴う福島原子力発電所の事故等による電力不足の為に、計画停電が実施されたが当該マンション地区は、当初そのスケジュール連絡が曖昧であり、帰宅時に予想外に停電に遭遇し、再度、階段を登る事態になった事もあったようである。今後も続く電力不足やその他の災害に備えて、高層マンションの住民には、いざという場合には階段を利用する覚悟が必要である

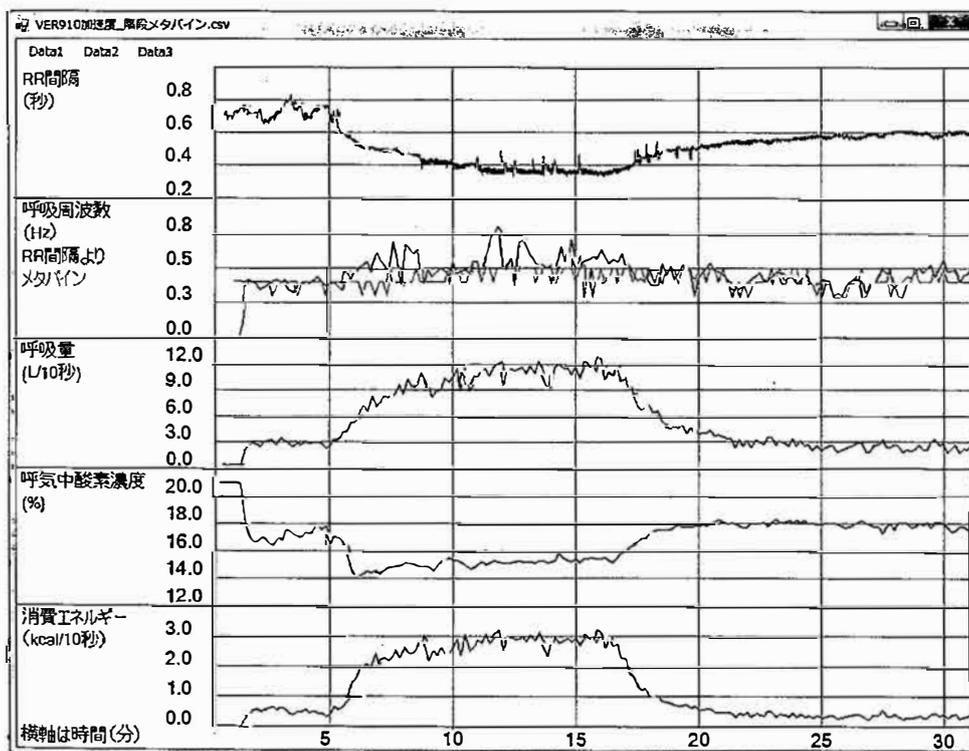


図5 33階まで階段を登った際の呼吸挙動と心拍変動

う。また、これは、津波等から高所へ避難する際にも通じるものがある。階段登り時の心臓と呼吸の挙動はより明確化しておく事が望ましい。

携帯型の基礎代謝測定装置として定評のあるバイン社のメタバインは、呼吸数、呼吸量及び呼気中の酸素濃度を測定する事で、酸素消費量を求め、消費エネルギーを測定する事ができる。階段登り時の挙動をこのメタバインと心電・加速度測定装置を併用して測定した。メタバインにより求めた、10秒毎の呼吸量、呼吸回数（1秒あたりに換算）、呼気中の酸素濃度及びエネルギー消費量と、RR間隔及びそれより導出した呼吸周波数を図5に示す。階段歩行を始めると、呼吸数も増加するが、呼吸量が大幅に増加し、10リットル/秒を超えてしまう。メタバインでは呼吸量が10リットル/秒を超えるとマスクから空気が漏れ始めるので、マウスを手で押さえながら、呼吸量があまり大きくならないように速度を調整しながら登った。

RR間隔の変化挙動とメタバインの測定結果は良く符合する。また、1秒あたりに換算した呼吸回数（周波数）とRR間隔より導出した呼吸周波数も良く一致する。一方、消費エネルギーは非常に大きく、加速度センサーを使用した活動量計や、我々の平地歩行・走行の加速度変動等からの推定値よりも遥かに大きい。加速度センサーを使用した消費エネルギー推定に残された大きな課題である事が判る。今後は加速度データと呼吸周波数の変化を併用した消費エネルギー推定法を検討したい。

原子力発電所事故により飛散した放射能をもつ微粒子の影響が不安視されているが、一番の影響は甲状腺機能の低下や甲状腺癌である。この甲状腺機能の低下は自律神経活動を大きく低下させ、RR間隔の変動に大きな変化を与える。従って、本報で紹介したように心電・加速度データロガーを使用して心拍変動のモニ

タリングを続ければ、甲状腺機能に低下その他の問題が認められるか否かを判断する事もできる。研究報告例を紹介しておく。

謝辞

測定に使用したメタバインをご貸与頂きました済生会長崎病院内科部長・睡眠医療センター部長の近藤英明先生に深謝致します。

文献

- 1) 白水重憲, 片山宗哲, 正木健雄: 幼稚園児の自律神経活動の24時間モニタリング 全面発達の展開 1: 32-41 2011.
- 2) Jasson S, Medigue C, Maison P et al: Instant Power Spectrum Analysis of Heart Rate Variability During Orthostatic Tilt Using a Time/Frequency-Domain Method: Circulation 96: 3521-3526 1997.
- 3) Mendez MO, Bianchi AM, Montano N et al: On arousal from sleep: time-frequency analysis: Med. Biol. Eng. Comput. 46: 341-352 2008.
- 4) Novak P, Novak V, de Champlain J et al: Influence of respiration on heart rate and blood pressure fluctuations: J Appl Physiol. 74: 617-626 1993.
- 5) Novak P, Novak V: Time/frequency mapping of the heart rate, blood pressure and respiratory signals: Med Biol Eng Comput.; 31: 103-110 1993.
- 6) Boashash B: Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal, I: fundamentals: Proc IEEE.; 80: 520-538 1992.
- 7) Bailón R, Laguna P, Mainardi L et al: Analysis of Heart Rate Variability Using Time-Varying Frequency Bands Based on Respiratory Frequency: Proc. 29th Ann. IEEE EMBS Int. Conf., Lyon, France 6674-6677 2007.
- 10) Galetta F, Franzoni F, Fallahi P L et al: Changes in heart rate variability and QT dispersion in patients with overt hypothyroidism: European Journal of Endocrinology 158: 85-90 2008.

Examples of Mental Stress and Physical Load Due to the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Accompanying Confusions

HISANOBU SUGANO, SHIGENORI SHIROUZU, SOTETSU KATAYAMA

Mental stress and physical load due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and accompanying confusions were measured at seven subjects by a very small and light ECG, acceleration and temperature measuring device. Remarkable decreases of RR interval (RRI) due to the earthquake were observed in all seven subjects. Frequency of these RRI decreases were below 0.04Hz in all the subjects, suggesting frequency analysis beyond the band limits of HF and LF bands is necessary when very large mental stress is expected. The evaluation of physical load during confusion accompanying the earthquake with the change of respiration frequency calculated by the results of time-frequency analysis of RRI is also introduced.

Key Words: RR interval variation, time-frequency analysis, 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, mental stress, respiration