

〈資料〉

運動時の呼吸リズム観察への新しい呼吸モニターの応用

齊藤 満*¹⁾ 佐々木 実*²⁾ 水藤 弘吏*¹⁾

われわれは先に安価で負担の少ないウェアラブル呼吸モニター (WRM) を開発した (Sasaki et al. 2013). 本研究は新しい WRM をスポーツ活動のような激しい身体活動環境において利用できるかどうか確かめることを目的として実施した. WRM の呼吸数は呼吸流量計 (SRM) による呼吸数測定値と比較し検討した. 比較は陸上と水中での立位安静と, 次の4種類の運動, 1) 立位での腕振り運動, 2) 毎分70m, 90m のトレッドミル歩行, 120m の走行, 3) 毎分100歩または120歩の制限歩行, 4) 水中での水かき歩行について実施した. 健康な成人男性3名を被験者とした. 呼吸数はWRMとSRMそれぞれの呼吸波形を目視にて判定し, 計測した. WRMおよびSRM波形から測定した呼吸数の差は, 陸上および水中の立位安静がそれぞれ 0.0 ± 0.0 (mean \pm SD) breaths/min, -0.2 ± 1.0 breaths/minである. 運動時の差は, 腕振り運動が 0.5 ± 1.7 breaths/min, 歩・走行および歩数制限歩行がそれぞれ 0.7 ± 1.0 breaths/min, -0.5 ± 1.0 breaths/minである. 水かき付水中歩行は 8.2 ± 11.6 breaths/minである. 以上の結果から, 新しいWRMは陸上における安静および移動運動時の呼吸モニターとして十分使用できることが確かめられた. しかし, 水中運動については十分とはいえず, 水の影響を軽減する工夫が必要である.

キーワード: 呼吸数, 身体運動, FFT, ウェアラブル呼吸モニター, 歩・走運動, 水中歩行

I はじめに

生命維持に欠かせない呼吸は呼吸の速さ (1分間の呼吸数) と呼吸の深さ (一回換気量) で調節される. 健康成人の安静時呼吸数の正常値は毎分12~18回, 一回換気量は約500mLで, 換気量 (呼吸量) は毎分6~8Lである. 運動時には大量の酸素を供給するため一回換気量と呼吸数が高まるが, 呼吸数は運動の強度, 時間, そして運動の種類, 環境条件で変わる¹⁾. すなわち運動時の呼吸数の調節は必要な酸素を取り込むうえで不可欠である. さらに, 運動時にはからだの動きに合わせて呼吸を停止, あるいは呼吸のタイミングが調整される. しかも, このタイミングの良否は運動成果に大きく影響する²⁾.

歩行やジョギングなどの運動指導では呼吸のリズムや仕方, あるいは動きに合わせた呼吸のタイミングの

とり方が指導される. しかし, 指導者も被指導者も自身の経験や感覚を頼りに行っているのが現状であり, 呼吸のリズムやタイミングを客観的にモニターしながら指導することはない. その理由の一つとして, 呼吸の測定は呼吸機能や運動時の酸素摂取量を測定することを目的にして開発され, それらの多くはマウスピースや呼吸マスクなど, 動きを制限する器具の装着が不可欠で, しかも長い時間の観察が難しいためである. 自然の状態で長時間の呼吸が観察できれば, 運動時の呼吸調節を確認しながらの運動指導が可能になるだけでなく, 体調の変化や運動パフォーマンスを高める呼吸法, トレーニング効果の検証などに応用が期待できる. さらに, 運動, スポーツ活動に止まらず, 厳しい環境下での作業あるいは物理・化学, 対人関係などの生理心理ストレスに対するからだの反応評価のツールとしても発展が期待できる.

* 1) 愛知学院大学心身科学部健康科学科

* 2) 豊田工業大学工学部機械システム

(連絡先) 〒470-0195 愛知県日進市岩崎町阿良池12 E-mail: saitman@dpc.agu.ac.jp

著者たちは伝導布を用い、からだの動きが自然でしかも不快感を与えず呼吸測定ができる方法を提案し³⁾、身に着けて測定するウェアラブル呼吸モニター (WRM) システムを構築した。本研究は WRM をスポーツ活動の現場で応用する上での課題を明らかにする目的で、安静および歩行、走行を対象として基礎的検討を行った。

II ウェアラブル呼吸モニター (WRM) の原理と方法

1 基本原理

呼吸運動にともなう肺の伸展縮小は肺のガス量を増減させる。この時、肺容積の変化と同時に胸郭組織、横隔膜、内臓が変形あるいは移動する。からだは電気的伝導性の高い水と体液で構成されているが肺内ガス (空気) の電気的伝導性は極めて低い。このため、肺容積の拡大縮小にともなう胸囲の変化と横隔膜および胸郭組織の形状変化は胸部表面と背部表面間のキャパシタンス (電気容量) を変化させることになり、呼吸運動を両電極間のキャパシタンス変化としてみる事ができる (図 1)。

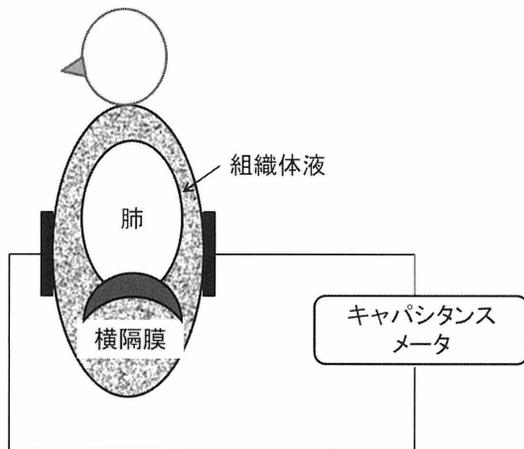


図 1 ウェアラブル呼吸モニターの原理

2 呼吸運動記録

WRM の呼吸測定用電極には動きや肌触りが気にならない伝導布を用いた。電極の大きさは100平方センチメートル (10cm×10cm) の大きさとした。電極位置は臍上 5~10cm の右肺葉下部腹部と同背部表面に位置するよう下着に貼付し、着用した。水中運動では電極をプラスチックフィルムで絶縁し、陸上運動と同じ位置にサージカルテープで体表面に直接貼付した

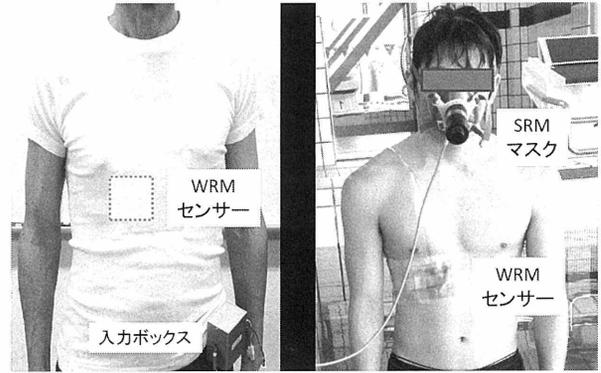


図 2 ウェアラブルモニターセンサー。センサーを下着の内側に貼付し、着用 [陸上測定] (左)。体表面にセンサーをサージカルテープで貼付し、呼吸マスクを装着 [水中測定] (右)。

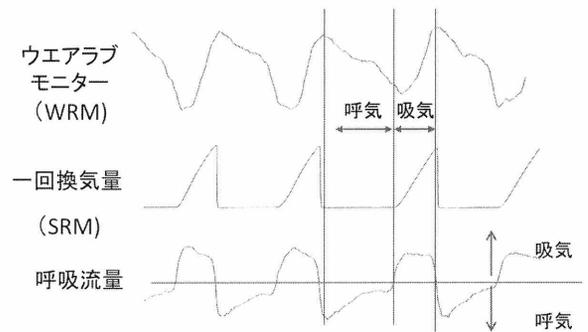


図 3 ウェアラブルモニター (WRM) と呼吸流量計 (SRM) による一回換気量、呼吸流量の同時記録波形

(図 2)。WRM による呼吸リズムの確認は呼吸マスクを用いた呼吸流量計 (SRM: Spirometer) (RF-H ミナト医科学 東京) による換気量と同時に記録し、比較検討した (図 3)。WRM, SRM データは A/D 変換 (MP150 Biopac Systems, CA) 後 200Hz で PC に取り込み、実験後呼吸波形を解析した。

III 測定方法

1 被験者

健康な成人男子 3 名 (年齢 19~36 歳, 身長 165~175cm, 体重 65~72kg) を対象とし、1 名は水中運動のみ、2 名はトレッドミル運動と水中運動をそれぞれ別の日に測定した。被験者が実験室に来室後実験内容を説明し、書面による同意を得たうえで実施した。本研究は愛知学院大学倫理委員会の承認を得て実施した。

陸上運動の服装は T-シャツ, ショートパンツ, 水

中運動では水着とした。陸上運動は愛知学院大学運動生理実験室において、室温 $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ で、水中運動は愛知学院大学スポーツセンタープールにおいて、室温 30°C 、水温 29°C 、で測定した。

2 測定内容

陸上の測定は、1) 立位安静、2) 腕振り運動、3) トレッドミル歩行および走行、水中の測定はプールサイドでの1) 立位安静、2) 水中直立安静、3) 水中歩行、4) 腕の水かき水中歩行の順序で測定した。

(1) 安静

安静の測定は直立位とし、陸上と水中でそれぞれ2分間測定した。水中の測定は、プールサイドで立位安静の測定をおこない、続いて水中に移動し、直立位において水位を股、臍、腋の高さに設定してそれぞれ2分間測定した。

(2) 腕振り運動

腕振り運動は立位安静に続いて1分間行い測定した。

(3) トレッドミル歩行、走行

歩行および走運動はトレッドミルを用い、斜度0% (水平) とし、速度は毎分70mと90m自由歩行と毎分100歩または120歩の歩数に規定した条件で測定した。歩数頻度は電子メトロノーム音に合わせて実施した。走運動は自由走のみで毎分120mの速度で測定した。

(4) 水中歩行

水中運動は腋下水位で実施した。歩行は腕を水没させた状態で毎分60テンポの足踏み条件とした。水か

き歩行は毎分30回のテンポで左右交互に腕を動かしながら足踏みを行う条件とした。動きのテンポは検者の合図で実施し、それぞれ1分間実施した。

3 解析

呼吸回数はSRM および WRM 個々の記録波形から、1) 呼吸波形を目視で確認し実測する方法 (以下 SRM_{actu} , WRM_{actu} と略記)、2) 呼吸曲線の周波数解析結果から算出した (以下 SRM_{FFT} , WRM_{FFT} と略記)。目視による呼吸数計測は WRM および SRM の個別波形記録から、検者の一人が目視により波形のピークを抽出し計数した。周波数解析による呼吸数計測は60秒間の呼吸運動波形を高速フーリエ変換 (FFT: First Fourier Transform, Biopack system) 後、呼吸周波数に相当する周波数を抽出した。呼吸周波数の抽出は健康人の標準呼吸速度 (毎分呼吸数) 下限である10回/分から最大運動時の呼吸数上限である80回/分までの範囲を基準として抽出周波数の範囲を $0.167\text{Hz} \sim 1.500\text{Hz}$ に設定し、この間で得られた最も強い周波数を呼吸リズムと判定した。

IV 結果と考察

1 安静

1) 立位安静

安静時の WRM と SRM 記録を図4に示す。WRM および SRM 波形の頂点は一致してみられた (図4左欄)。WRM および SRM 波形から実測した呼吸回数を

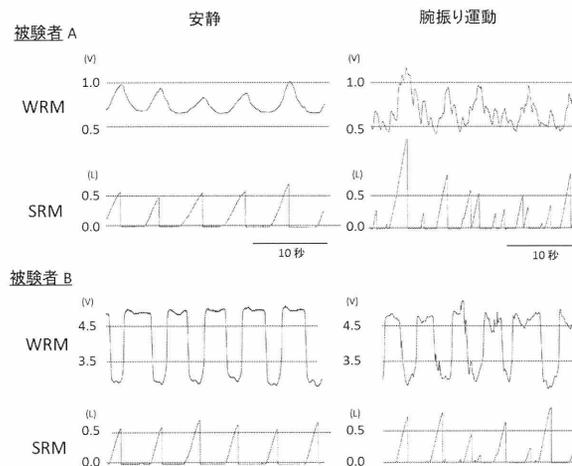


図4 立位安静 (左図) および腕振り運動 (右図) 時の呼吸記録

WRM: ウェアラブルモニター, SRM: スパイロメーター,
V: volt, L: liter

表 1 a 安静立位時のウェアラブルモニターおよび呼吸流量計計測による呼吸リズム比較

環境温	被験者	実測呼吸数 (回/分)			周波数解析から求めた呼吸数 (回/分)			SRM _{actu} との差 (回/分)	
		SRM _{actu}	WRM _{actu}	差	SRM _{FFT} (Hz)	WRM _{FFT} (Hz)	差	SRM _{FFT}	WRM _{FFT}
23°C	A	11	11	0	11 (0.183)	11.0 (0.183)	0.0	0.0	0.0
	B	11	11	0	10.3 (0.171)	10.3 (0.171)	0.0	-0.7	-0.7
	C	15	15	0	15.0 (0.250)	15.0 (0.250)	0.0	0.0	0.0
30°C	A	13	13	0	13.2 (0.220)	13.2 (0.220)	0.0	0.2	0.2
	B	20	20	0	20.5 (0.342)	20.5 (0.342)	0.0	0.5	0.5
	C	21	21	0	20.5 0.34	19.0 0.32	-1.5	-0.5	-2.0
平均		15.2	15.2	0.0	15.1 (0.251)	14.8 (0.247)	-0.2	-0.1	-0.3
標準偏差		4.4	4.4	0.0	4.5 (0.075)	4.2 (0.070)	0.6	0.5	0.9

表 1 a に示す, SRM_{actu} と WRM_{actu} の呼吸回数は完全に一致 (0.0 ± 0.0回/分) した。

周波数解析から算出した呼吸回数の平均値は SRM_{FFT} が 15.1 ± 4.5回/分, WRM_{FFT} が 14.8 ± 4.2回/分となりその差は -0.2 ± 0.6回/分である (表 1 a)。周波数解析で求めた SRM_{FFT} と WRM_{FFT} の呼吸回数と SRM_{actu} との差はそれぞれ -0.1 ± 0.5回/分, -0.3 ± 0.9回/分である。

日を替え環境温が異なる条件では高温条件で呼吸が促進することが SRM_{actu} の結果から確認できた。このような反応の違いを WRM_{actu} および WRM_{FFT} の結果から正確に計測できることが確認できた。

2) 立位安静：水の影響

WRM の測定に及ぼす水の影響をみるために水位を股, 臍および腋下の条件で立位安静の測定を実施した。電位は水位の上昇とともに高くなるが, 振幅には大きな変化はみられず波形の天頂と下底の判定は可能である (図 5)。WRM_{actu} と SRM_{actu} の呼吸数の差は -0.2 ± 1.0回/分である (表 1 b)。周波数から求めた WRM_{FFT} および SRM_{FFT} の呼吸数と SRM_{actu} の呼吸数の差はそれぞれ -0.3 ± 0.9回/分, -0.2 ± 0.6回/分となり, いずれも毎分 1 呼吸以下の差である。

水位の上昇にともなう WRM 波形電位の上昇は伝導

性の高い水の影響によると考えられるが, 電極間キャパシタンスの変化は十分検知することが可能である。したがって, 腋までの水位であれば WRM モニターによる呼吸リズムの計測は可能であり, しかも SRM_{actu} の呼吸数との差は毎分 1 回以下であることから水中の呼吸リズム観察が可能といえる。

3) 腕振り運動

腕振り運動を行うと安静時にみられた明瞭で大きな波形に小さな波が混入した (図 4 右欄)。このため WRM_{actu} の呼吸数と SRM_{actu} との差が安静時に比べてわずかに拡大した (-0.5 ± 1.7回/分)。この理由として腕振りがはじまると一回換気量が大きく変動し, 同時に呼吸リズムが大きく乱れたことが関係したと考えられる (図 4)。特に一回換気量が 50mL 以下に低下すると肺容積変化に伴うキャパシタンス変化より腕振り運動による体幹や組織の変形によるキャパシタンス変動の影響が相対的に大きくなるためと考えられる。

被験者 A において周波数から求めた WRM_{FFT} 呼吸数と SRM_{actu}, SRM_{FFT} との差が大きくなった (図 4, 表 2) 理由としては一回換気量と呼吸リズムが大きく変動したためと考えられる。

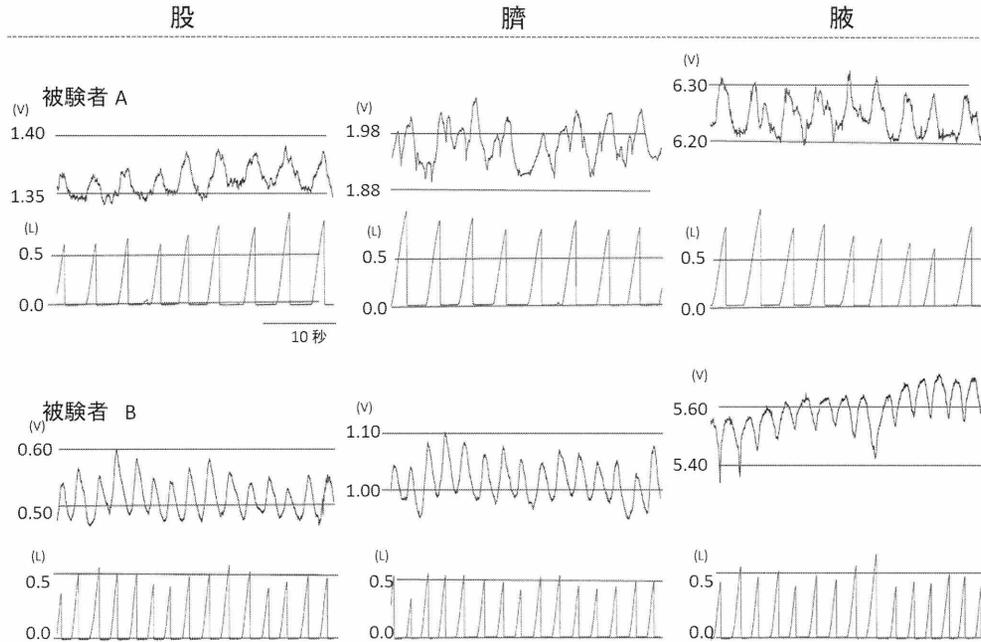


図5 水中立位安静の呼吸測定に及ぼす水位の効果

被験者ごとに示す波形は、上段がWRM波形、下段がSRM波形を示す。
V: volt, L: liter

表1b 水中安静時のウェアラブルモニターおよび呼吸流量計計測による呼吸リズム比較

水位	被験者	実測呼吸数 (回/分)			周波数解析から求めた呼吸数 (回/分)			SRM _{actu} との差 (回/分)	
		SRM _{actu}	WRM _{actu}	差	SRM _{FFT} (Hz)	WRM _{FFT} (Hz)	差	SRM _{FFT}	WRM _{FFT}
股	A	12	12	0	11.7 (0.195)	12.5 (0.208)	0.7	-0.3	0.5
	B	24	24	0	24.9 (0.415)	24.9 (0.415)	0.0	0.9	0.9
臍	A	13	14	1	12.5 (0.208)	12.5 (0.208)	0.0	-0.5	-0.5
	B	23	23	0	22.7 (0.378)	22.7 (0.378)	0.0	-0.3	-0.3
腋	A	13	13	0	12.5 (0.208)	11.7 (0.195)	-0.8	-0.5	-1.3
	B	24	22	-2	23.4 (0.391)	22.7 (0.366)	-0.7	-0.6	-1.3
平均		18.2	18.0	-0.2	17.9 (0.299)	17.8 (0.295)	-0.1	-0.2	-0.3
標準偏差		6.0	5.5	1.0	6.3 (0.106)	6.2 (0.102)	0.6	0.6	0.9

表2 腕振り運動時のウェアラブルモニターおよび呼吸流量計計測による呼吸リズム比較

環境温	被験者	実測呼吸数 (回/分)			周波数解析から求めた呼吸数 (回/分)			SRM _{actu} との差 (回/分)	
		SRM _{actu}	WRM _{actu}	差	SRM _{FFT} (Hz)	WRM _{FFT} (Hz)	差	SRM _{FFT}	WRM _{FFT}
23°C	A	11	9	2	(11.7) (0.195)	(11.7) (0.195)	0.0	0.7	0.7
	B	22	20	2	(22.0) (0.366)	(22.0) (0.366)	0.0	0.0	0.0
30°C	A	19	20	-1	(19.0) (0.317)	(17.6) (0.293)	-1.5	0.0	-1.4
	B	24	25	-1	(27.1) (0.452)	(27.1) (0.452)	0.0	3.1	3.1
平均		19.0	18.5	0.5	(20.0) (0.333)	(19.6) (0.326)	-0.4	1.0	0.6
標準偏差		5.7	6.8	1.7	6.4 (0.107)	6.5 (0.109)	0.7	1.5	1.9

2 陸上運動

1) 歩行, 走行運動

(1) 自由歩行, 走行

安静から歩または走行への移行, および歩または走行停止後の安静立位への移行期の WRM と SRM 波形記録例を図 6 に示す。安静から運動への移行期には大きな呼吸波に小さな波形が混入し一時的に乱れる。それに続く運動中は, 小さな波の混入は続くが, 運動停止後は消失する。運動開始期にみられる一過性の大きな波形の乱れは呼吸リズムの変化, 体幹部の動き, さらに静脈還流増大に伴う胸郭内血液量の増加などが影響したと考えられる。

歩行および走行時には, WRM と SRM 両波形の大きな波の頂点はほぼ一致して認められ, それぞれの波形から実測した呼吸数の差は -0.7 ± 1.0 回/分である。周波数から算出した呼吸数と SRM_{actu} 呼吸数との差は SRM_{FFT} が -0.1 ± 1.2 回/分, WRM_{FFT} が -0.5 ± 1.1 回/分でありいずれも毎分 1 回以下である (表 3 a)。

これらの結果, 一定の速度で歩行, 走行している場合には WRM による呼吸リズムの計測は良好にでき, SRM_{actu} 呼吸数に近い値で計測することが可能といえる。

2) 制限歩行

一定速度で歩数頻度を毎分 100 または 120 歩に規定すると一定速度の自由歩行と比較して呼吸数の実測値は増加した (図 7)。この時の WRM_{actu} および SRM_{actu}

呼吸数の差は -0.5 ± 1.0 回/分であり, 制限歩行により高まった呼吸リズムの不安定な変動は WRM により良好に捉えることができたといえる。しかしながら, 周波数から算出した WRM_{FFT} および SRM_{FFT} 呼吸数は SRM_{actu} と比べて, それぞれ -4.4 ± 4.9 回/分, -4.1 ± 3.3 回/分に差は拡大した。この要因として歩数調節のため呼吸リズムと一回換気量が大きく変動したことで WRM 波形が乱され, 周波数解析の結果が SRM_{FFT} 呼吸数との差を大きくしたと考えられる (図 7 右図, 表 3 b)。

3 水中運動

1) 水中歩行

腕を水中に入れた水中歩行では, 足踏み動作に一致した波が混入し, 呼吸に伴う WRM 波形は不安定な波形に変化した (図 8 上段)。さらに左右交互の水かき歩行では, 安静時の呼吸リズムに一致した単調な波形から複雑な波形に変化した (図 8 下段)。被験者 A の水中歩行, 水かき歩行の WRM 波形は乱れが大きく波形から呼吸数を計測するのは困難である。結果として SRM_{actu} 呼吸数との大きな差が生じた (表 4)。これに対し, 被験者 B の水中歩行では WRM_{actu} と SRM_{actu} 呼吸数の差は 1.0 回/分, 水かき歩行では 0.0 回/分である。このように測定ごとに大きな違いが生じた原因は明らかではないが, 水の影響が最も大きいと考えられる。

水かき歩行時の周波数解析では, WRM_{FFT} の呼吸数は SRM_{actu} に近い呼吸リズムが抽出された (表 4)。

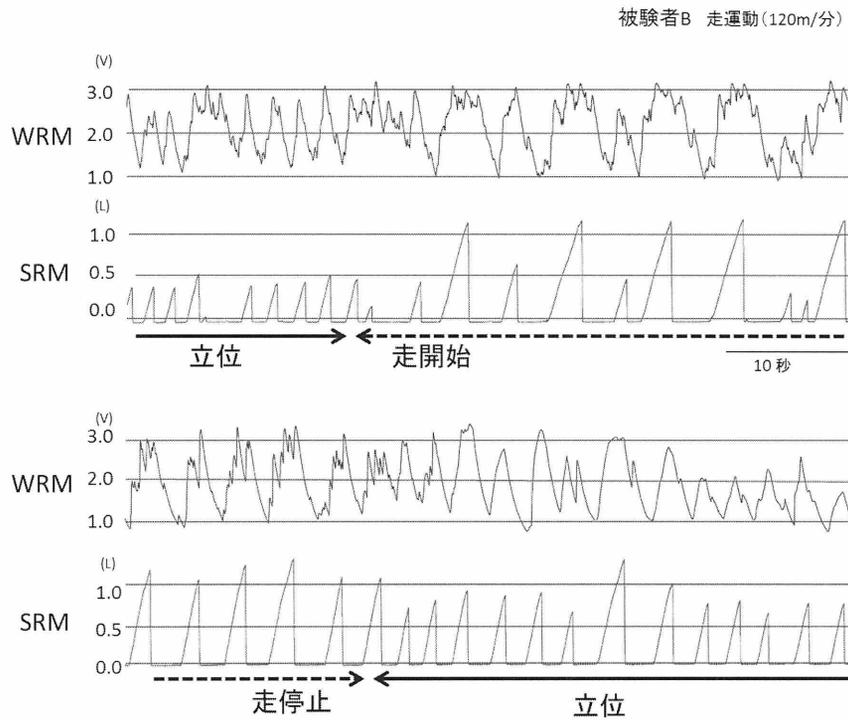


図6 安静から走行（上段），走行から安静（下段）への切り替え時の呼吸変化

V: volt, L: liter

表3a 歩・走行時のウェアラブルモニターおよび呼吸流量計計測による呼吸リズム比較

速度 (m/分)	被験者	実測呼吸数 (回/分)			周波数解析から求めた呼吸数 (回/分)			SRM _{actu} との差 (回/分)	
		SRM _{actu}	WRM _{actu}	差	SRM _{FFT} (Hz)	WRM _{FFT} (Hz)	差	SRM _{FFT}	WRM _{FFT}
70	A	16	16	0	14.6 (0.244)	14.6 (0.244)	0.0	-1.4	-1.4
	B	8	8	0	8.4 (0.140)	8.4 (0.140)	0.0	0.4	0.4
90	A	18	17	-1	16.1 (0.269)	16.1 (0.269)	0.0	-1.9	-1.9
	B	15	15	0	15.4 (0.256)	15.4 (0.256)	0.0	0.4	0.4
120	A	19	17	-2	19.8 (0.330)	18.3 (0.305)	-1.5	0.4	-1.1
	B	17	16	-1	18.3 (0.305)	17.6 (0.293)	-0.7	1.3	0.6
平均		15.6	14.8	-0.7	15.4 (0.257)	15.1 (0.251)	-0.4	-0.1	-0.5
標準偏差		4.0	3.4	1.0	3.9 (0.066)	3.5 (0.059)	0.6	1.2	1.1

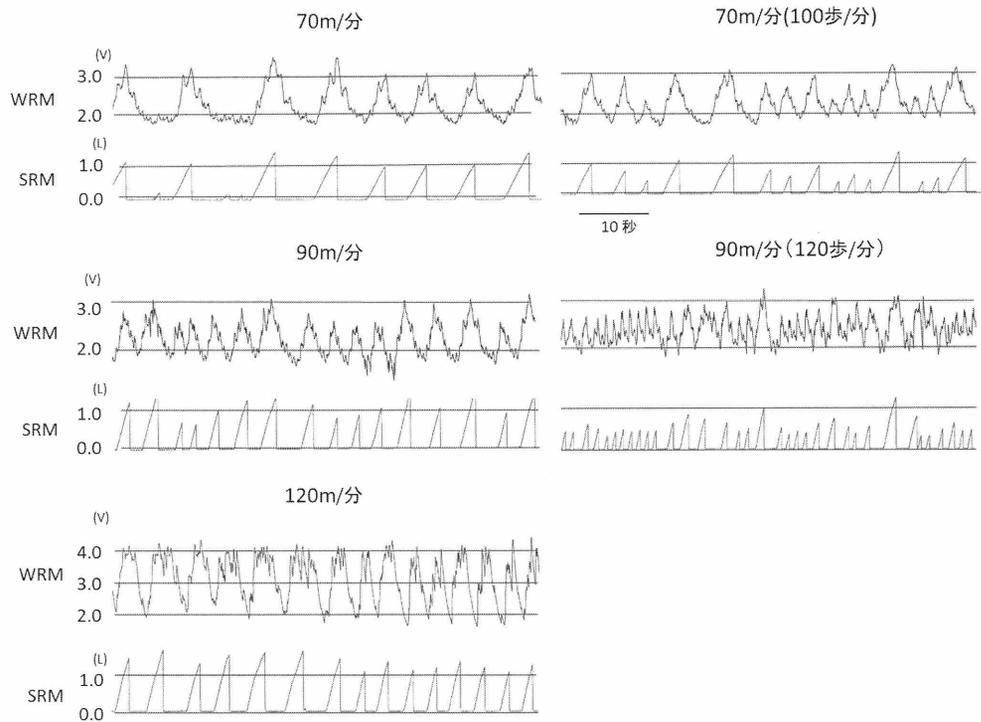


図7 歩行, 走行時の呼吸および一回換気量波形. 左列, 右列はそれぞれ自由歩行と歩数頻度を規定した歩行, 左列最下段は自由走行.

V: volt, L: liter

表3b 制限歩, 走行時のウェアラブルモニターおよび呼吸流量計計測による呼吸リズム比較

速度 (m/分) [歩数] (歩/分)	被験者	実測呼吸数 (回/分)			周波数解析から求めた呼吸数 (回/分)			SRM _{actu} との差 (回/分)	
		SRM _{actu}	WRM _{actu}	差	SRM _{FFT} (Hz)	WRM _{FFT} (Hz)	差	SRM _{FFT}	WRM _{FFT}
70 [100]	A	21	20	-1	20.5 (0.342)	20.5 (0.342)	0.0	-0.5	-0.5
	B	13	13	0	9.5 (0.159)	9.5 (0.159)	0.0	-3.5	-3.5
90 [100]	A	23	21	-2	17.6 (0.293)	17.6 (0.293)	0.0	-5.4	-5.4
	B	25	24	-1	21.7 (0.362)	22.0 (0.366)	0.2	-3.3	-3.0
120 [120]	A	18	19	1	16.1 (0.269)	17.6 (0.293)	1.5	-1.9	-0.4
	B	29	29	0	19.0 (0.317)	15.4 (0.256)	-3.7	-10.0	-13.6
平均		21.5	21.0	-0.5	17.4 (0.290)	17.1 (0.285)	-0.3	-4.1	-4.4
標準偏差		5.6	5.3	1.0	4.4 (0.073)	4.4 (0.073)	1.7	3.3	4.9

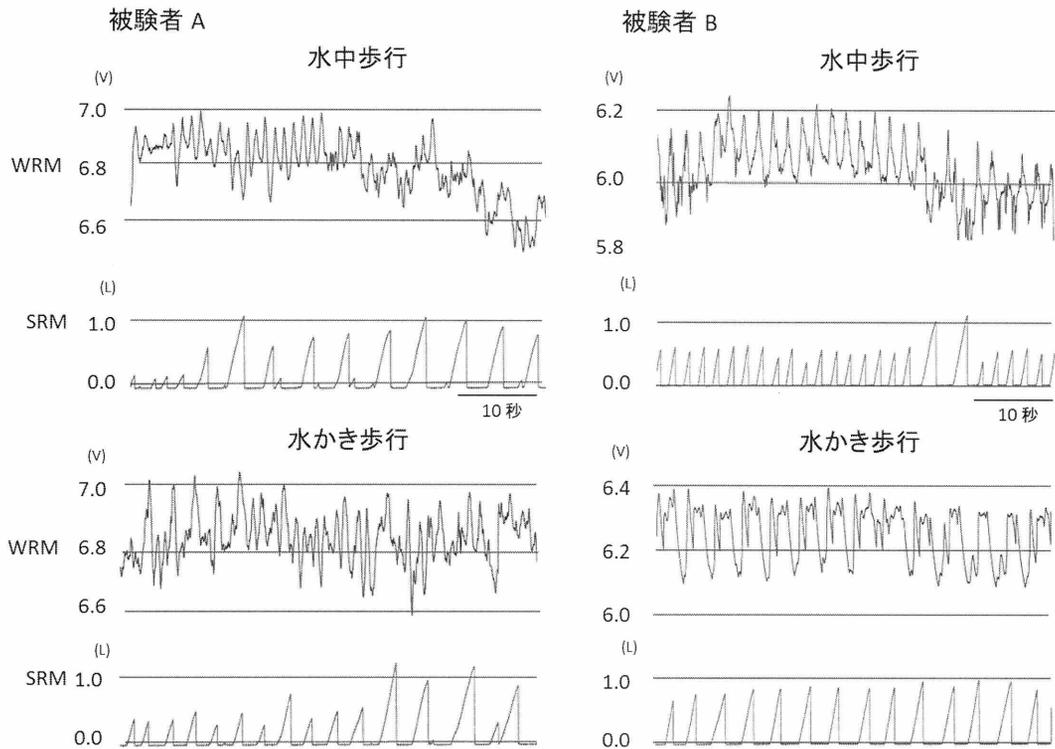


図8 水中歩行の呼吸記録波形。
 上段は足踏み歩行，下段は腕かき歩行。
 V: volt, L: liter

表4 水中歩行時のウェアラブルモニターおよび呼吸流量計計測による呼吸リズム比較

水中歩行	被験者	実測呼吸数 (回/分)			周波数解析から求めた呼吸数 (回/分)			SRM _{actu} との差 (回/分)	
		SRM _{actu}	WRM _{actu}	差	SRM _{FFT} (Hz)	WRM _{FFT} (Hz)	差	SRM _{FFT}	WRM _{FFT}
歩行	A	15	*	-	14.6 (0.244)	16.1 (0.269)	1.5	-0.4	1.1
	B	27	28	1	30.0 (0.500)	30.0 (0.500)	0.0	3.0	3.0
水かき歩行	A	22	45	23	35.2 (0.586)	24.9 (0.415)	-10.3	13.0	2.7
	B	16	16	0	16.8 (0.281)	16.1 (0.269)	-0.7	0.8	0.1
平均		20.1	29.9	8.2	24.2 (0.403)	21.8 (0.363)	-2.4	4.1	1.7
標準偏差		5.6	19.3	11.6	10.0 (0.166)	6.9 (0.115)	5.3	6.1	1.4

* 計測不可

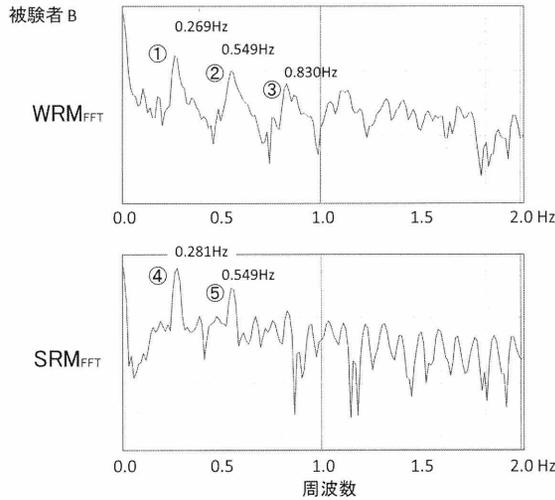


図9 WRM (上段) および SRM 波形 (下段) の FFT 解析スペクトラム

それぞれの周波数ピークは,
 呼吸リズム: ①16.8回/分, ④16.1回/分,
 水かきリズム: ②32.9回/分, ③32.9回/分,
 足踏みリズム: ⑤49.8回/分
 にほぼ一致する。

この時の周波数解析のスペクトルをみると呼吸リズムに一致したピークと同時に手足の動きのリズムに近い周波数が抽出された (図9)。このことから、水中運動時の波形の乱れには呼吸、手足の動き、それともなう水の動きが大きく影響すると考えられ、その要因の解明と除去が水中運動への WRM 応用の課題と言える。

V 総括

新しい考えのウェアラブル呼吸モニターを運動場面で応用するための課題を明かにする目的で、安静および歩行、走行運動を対象に検討した。結果は以下に示す。

1. 本研究では呼吸流量計を用いて実測した呼吸リズムを基準にウェアラブル呼吸モニターによる呼吸数と呼吸リズムを比較解析した。安静では呼吸運動に対応した明瞭な呼吸波形が WRM により計測できることが確かめられた。運動時の呼吸波形は姿勢変化や体動、不規則な呼吸リズムの影響を受け安静時の安定した呼吸波形に比べて複雑に変化した。この要因の一つは体幹、四肢の動きによるセンサーの揺れ、体組織や内臓

の移動、変形、胸郭内部の水分量変化が電極間のキャパシタンスを不安定にした可能性がある。

2. 一定速度の歩、走行の運動では体動による小ノイズ波形が混入するものの呼吸運動に一致した大きな波形は明確に検出することができた。また、記録波形から目視による呼吸リズム判定が困難な場合、周波数解析手法を用いて呼吸リズムに一致した呼吸数を高い精度で推定できることが確かめられた。

3. 呼吸リズムや一回換気量がランダムに変動する場合、WRM センサーが呼吸リズムに追従できない場合が認められた。特に、一回換気量が小さくなるとセンサー間のキャパシタンス変化が小さくなり、呼吸運動以外の要因によるノイズが勝り呼吸波形として認識することが難しくなる。これにより SRM_{actu} 呼吸数との計測差が大きくなる。

4. 運動は様々な環境で実施されるが、今回は水環境下での安静と水中歩行運動について検討した。安静立位姿勢では水の伝導性が高いことから水深の上昇とともに電位の上昇がみられたものの波形の振幅は安定しており、呼吸リズムが十分に解析できることが確かめられた。水中運動では手足の動き以外に水の動き (水流および波) と考えられるノイズの混入が認められた。これらの波形に及ぼす外乱の除去は WRM を水中で応用するためのシステム開発の大きな課題といえる。これに対し、今回応用した周波数解析法を用いた測定データの呼吸リズム推定は WRM の実用化を進めるうえで有効な手段となろう。

謝辞

愛知学院大学教養部 城 貞晴 准教授より論文作成段階で貴重な意見を頂きました。記して感謝します。

本研究は KAKEN (課題番号 24650397) の補助により実施した。

文献

- 1) 宮村実晴, 谷内文人. 運動中の呼吸数と換気量の関係について. 日本生理誌 13: 1-2, 1975.
- 2) 齊藤 満, 橋本 勲. 全身反応時間に及ぼす呼吸相の影響. 東海保健体育科学 17: 29-34, 1995.
- 3) Subrata K. Kundu, Shinya Kumagai, and Minoru Sasaki. A wearable capacitive sensor for monitoring human respiratory rate. Jpn J Appl Phys 04CL05 52: 1-7, 2013.

最終版平成27年9月30日受理

Application of New Respiratory Monitor for Measuring Breath Rhythm During Exercise

Mitsuru SAITO, Minoru SASAKI and Hiroshi SUITO

Abstract

We developed a low-cost and comfortable to wear respiratory monitor (WRM) (Kundu et al. 2013). An aim of this investigation was to verify whether the WRM could be used under difficult conditions, for instance during sports activities. We compared a respiratory rate determined by the WRM measurements and a spirometer (SRM) measurements at rest in standing position in the dry and in the water conditions, and during exercise in the four conditions, 1) swinging arms in a standing position, 2) walking on treadmill at the speed of 70 and 90 m/min and running at 120 m/min, 3) walking with controlled steps as 100 or 120 steps/min and 4) walking with arm stroking in the water. Three healthy males participated in this study. The respiratory rate was counted from the respiratory curve recorded by WRM and SRM, respectively. A difference in breath rate between SRM and WRM at rest was 0.0 ± 0.0 (mean \pm SD) breaths/min in the dry and -0.2 ± 1.0 breaths/min in the water. During exercise those differences in the exercise in the swinging arms, the walking and running, and controlled steps walking were 0.5 ± 1.7 , 0.7 ± 1.0 , and -0.5 ± 1.0 breaths/min, respectively, and the walking in the water the difference was 8.2 ± 11.6 breaths/min. From these results we concluded that a newly developed WRM could be useful to determine the respiratory rate at rest as well as locomotive exercises in the dry conditions, but in water it was incomplete and there would be a need to reduce the effect of water conductance.

Keywords: breath rate, physical exercise, FFT, wearable respiratory monitor, walking & running, aquatic walk

