

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20300073

研究課題名(和文) “息づかい”のウェアラブル計測によるストレス被曝量の推定

研究課題名(英文) Mental stress modeling using wearable measurement of breath

研究代表者

三輪 洋靖 (MIWA HIROYASU)

独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・研究員

研究者番号：30367073

研究成果の概要(和文)：

日常生活を通しわれわれは多くのストレスを受けており、日常生活におけるストレスの計測・管理技術の実現が期待されている。そこで、本研究ではストレスに対する代表的な生理反応である心拍数と呼吸数を同時かつ簡易に計測できる計測装置の開発と急性ストレスに対する生理反応である心臓血管反応と唾液中コルチゾール反応の解析を目指した。そして、心臓や肺、消化器などの各器官や筋肉の活動によって発せられる音、すなわち、体内音に着目し、聴診器と小型マイクを組み合わせたウェアラブル体内音センサを開発した。さらに、頸部体内音に対してウェーブレット変換による時間周波数解析を行うことで、拍動由来の信号と呼吸由来の信号を抽出し、心拍数および呼吸数の同時計測手法を開発した。また、連続減算課題と鏡映描写課題を与えたときの心臓血管反応、唾液中コルチゾール反応を計測し、心拍数や収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧が急性ストレスによって有意に上昇することを確認した。

研究成果の概要(英文)：

Excessive amounts of daily stress threaten mental health and increase mental illness such as depression. And, it is important to learn how to know stress burden of individuals and coexist well with mental stress. We have therefore developed physiological signal sensors for measurement of heart and respiratory rate as common stress markers, and analyzed cardiovascular reaction and salivary cortisol reaction as typical physiological reaction. The present study has focused on body-sound comprised of sound generated by internal organs. We newly developed a prototype body-sound sensor consisting of stethoscopes, amplifier microphones and an IC recorder. We proposed measuring heart and respiratory rate simultaneously from body-sound at the neck using continuous wavelet transformation. We experimentally confirmed that heart and respiratory rate were determined by our proposal and ECG or respiratory waveform coincided sufficiently to be feasible. Also, we have conducted stress evaluation experiment including repeated subtraction task and mirror drawing task to measure cardiovascular and salivary cortisol reaction. We confirmed that heart rate, systolic blood pressure, diastolic blood pressure and mean arterial pressure were significantly increased by the mental stress.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：ストレス, 体内音, 心拍, 呼吸, コルチゾール

## 1. 研究開始当初の背景

健康的な日常生活を送るためには、健康な肉体と健康な心の両方を保つ必要があるが、われわれは日常生活を通して様々なストレスを受けている。心理的なストレス（以下、ストレス）は、日々の生活の活力を失わせ、効率を下げるだけでなく、管制ミスによる日航機ニアミス事例や JR 宝塚線脱線事故などの重大なヒューマンエラーの原因となっている。近年では、ストレスによるメンタルヘルスの低下も社会問題になっており、国内における精神疾患患者は年々増加し(図 1)、特にうつ病患者は 2008 年に患者数が 100 万人を越え、10 年前の 2 倍以上となった[1]。精神疾患医療費も 1.8 兆円を超え[2]、経済的にもストレスの社会的影響が増大してきている。

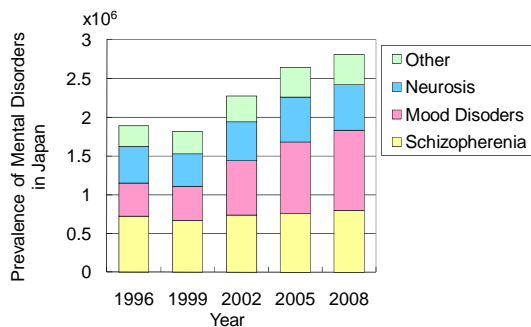


図 1 国内の精神疾患患者数の推移

しかし、われわれの生活においてストレスを完全に消し去り、ストレスのない社会を作り上げることは不可能である。したがって、ストレスとうまく付き合っていくことが重要である。そのためには、ストレスを知り、ストレスを軽減する、すなわち、日常生活のどの場面でのどの程度のストレスがかかっているかを計測し、適切に対処することが有効と考えられる。

日常生活環境において、長期間連続的にストレス被曝量を計測する方法が確立されれば、われわれが体温計や体重計で健康管理や異常検知をしていると同様に、体が受けたストレスやその影響を計測可能となり、早期に適切な対処をすることで重大な疾患や事故を予防できる。したがって、経済的にも、安全で活力ある社会の実現のためにも、日常生活におけるストレスの計測・管理技術の実現が期待されている。

その鍵となるストレスの計測に関する研究としては、心理学、生理学、生物学、医学など様々な分野においてこれまで研究が行われてきた。大須賀らは単調作業によるストレスを皮膚温度や発汗、心拍、血圧などの生理指標から推定している[3]。松村らは 2 種類

の計算課題遂行時における心血管反応を計測し、外部刺激への注意が高まったときに血管優位の反応が現れることを確認した[4]。また、唾液中物質などの生化学的アプローチも多く、唾液中のコルチゾールは急性の精神・身体ストレスを受けた 20~30 分後に増加することや、慢性的なストレスを受けている人は、そうでない人よりも起床時の唾液中コルチゾール濃度が高いことが知られている[5]。しかし、これらの従来研究の多くは、実験条件を厳しく統制し、実験室内で大規模な計測システムを用いて行われており、日常生活におけるストレスの計測には至っていなかった。一方、日常生活でのストレス計測としては、公衆衛生学において、主観評価による職場ストレスの調査研究が行われてきた[6]。しかし、ストレス場面の特定はされたものの、ストレスの被曝量を定量的に評価することが困難であった。

- [1] 厚生労働省; “平成 20 年患者調査”, 厚生労働省統計表データベース, 2009
- [2] 高橋三郎ほか(訳): DSM-IV-TR 精神疾患の診断・統計マニュアル, 医学書院, p.360, 2002
- [3] 大須賀, 寺下, 下野; “心臓血管系モデルを用いた自律神経指標の解釈”, BME, Vol. 11, No. 1, pp.75-85, 1997
- [4] 松村, 澤田; “2 種類の暗算課題遂行時における心血管反応”, 心理学研究, Vol. 79, 473-480, 2009
- [5] 井澤, 城月, 菅谷他; “唾液を用いたストレス評価”, 日本補間代替医療学会誌, Vol. 4, No. 3, pp.91-101, 2007
- [6] 加藤正明ほか: 労働の場におけるストレス及びその健康影響に関する研究報告書, 労働省平成 11 年度「作業関連疾患の予防に関する研究」, 2000

## 2. 研究の目的

われわれは、短時間のイベントの積み重ねであるストレスに対して、血圧や呼吸などの生理的なストレス反応を、連続的かつ非侵襲で簡便に行うことが困難であることに技術的課題があると考えた。そこで、本研究課題では、ストレスマーカーとなる生理指標を計測できる軽量かつ小型なウェアラブルセンサの開発とストレスに対する生理反応のモデル化を研究目標とした。

具体的には、(1)代表的なストレス反応である心拍数と呼吸数を同時に計測できるウェアラブルセンサの開発、(2)急性ストレスに対する生理反応である、心臓血管反応と唾液中コルチゾール反応の解析を研究目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 体内音センサの開発

ストレスに関する生理反応としては、心拍、血圧、呼吸、皮膚温度、皮膚電気抵抗、唾液中コルチゾール濃度、唾液中アミラーゼ濃度などが知られているが、本研究では、人間の体内から発せられる音である「体内音」に着目した。ヒトは自律神経を介して、脳が心臓や肺など体内の各器官を制御している。通常、体内の各器官はホメオスタシスによって一定の活動を続けており、その結果として、機械的な音、すなわち、体内音が発生され、各器官の活動に変化が生じれば、各器官が発する音も変化する。例えば、体幹部で計測される体内音には、循環器、呼吸器、消化器、関節、筋肉などの音が含まれており、それらの音が重なり合って体内音が構成される。したがって、体内音には、生理状態に関するさまざまな情報が含まれているといえ、それを抽出することで、体内音の発生源である器官の活動を推定できると考えた。

一方、日常生活において、連続的に生理指標を計測するセンサには、非侵襲計測、日常生活への最小限の負担、着脱の簡便性が要求される。これらの要求を満たすセンサとしては、ウェアラブルセンサが適当である。

そこで、体内音を計測可能なウェアラブルセンサを開発し、体内音から心拍数と呼吸数を同時に抽出する手法を開発した。

#### (2) ストレス評価実験

ストレスに対する生理反応としては、心臓血管反応と唾液中コルチゾール反応が知られている。そこで、ストレス課題に対する両者の反応を解析するため、ストレス評価実験を行った。ストレス課題としては、暗算課題である連続減算課題と、PC上でマウスを操作する鏡映描写課題を用意した。被験者は10分間の安静後、2つのストレス課題を連続して行った。ストレス課題の順序は参加者間でランダムに割り付け、1つの課題につき5分間行い、課題終了後、60分間の回復期を設けた。

そして、実験開始から回復期10分までの収縮期血圧(SBP)、拡張期血圧(DBP)、平均血圧(MAP)、心拍数(HR)、心拍出量(CO)、全末梢抵抗(TPR)を計測した。さらに安静後、ストレス課題実施直後、回復期(ストレス課題終了時から、10分後、20分後、30分後、45分後、60分後)の合計7回の唾液サンプルを採取し、酵素免疫測定法(ELISA)によってコルチゾール濃度を算出した。得られた生理指標および唾液中コルチゾール濃度からストレス課題に対する両者の反応を解析した。

### 4. 研究成果

#### (1) 心拍数と呼吸数を同時に計測できるウェアラブルセンサの開発

体内音を計測可能なウェアラブルセンサとして、図2に示すウェアラブル体内音センサを開発した。センサは聴診器(Littmann Master Classic II; 3M, USA)、アンプ付きマイク(AT9903; Audio-Technica)で構成され、聴診器によって集められた体内音をICレコーダーで録音し、最大2chの体内音を同時計測可能である。ICレコーダーをA/Dコンバータ(TD-BD-8CSUSB; Tokyo Electron Device)、PCと置き換えた場合、ウェアラブル性は低下するが、最大8chの体内音を同時計測でき、用途によって使い分けが可能とした。

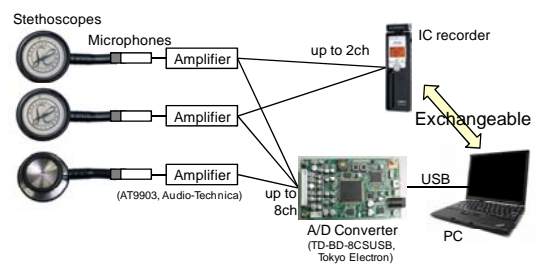


図2 体内音センサのシステム構成

体内音には複数の器官の活動による音が含まれている。そこで、頸部、胸部、腹部、下腹部の合計8箇所の体内音を開発した体内音センサで計測したところ、頸部は体幹部から発生する体内音が混入しにくいこと、気管・頸動脈が近いことから、心拍音および呼吸音の同時計測に適していることが明らかになった。また、胸部・腹部の左右は心拍音が強いことが特徴で、心拍音の計測に適していた。腹部中央は呼吸音が小さく、相対的に心拍音が強調されやすい特徴があった。胃を中心とした消化器音の計測も可能と考えられる。下腹部は、心拍音、呼吸音がほとんど計測されず、消化器音を計測できるという特徴を有しており、ストレスと関連性があると言われている腸管運動の計測が期待できる。本研究の目的である心拍数と呼吸数はそれぞれ心音(拍動音)、呼吸音に多く含まれることから、本研究では頸部体内音を計測に用いることとした。

次に、頸部体内音に対して、時間周波数解析を適用することで、体内音に含まれる情報を抽出した。時間周波数解析には短時間FFT等が知られているが、解析対象周波数が広範囲であることから、周波数によって信号長が可変となる連続ウェーブレット変換(CWT、式(1))を用い、式(2)で表される複素Morletウェーブレットをマザーウェーブレットとして組み合わせた。

$$W_{\Psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (1)$$

$$\Psi(t) = \pi^{-1/4} e^{imt} e^{-t^2/2} \quad (2)$$

$W$ : Wavelet coefficients

$f(t)$ : original signal (body-sounds)

$a$ : Scale ( $a > 0$ )

$b$ : Shift

$t$ : Time

$\Psi(t)$ : Mother wavelet

図3、図4に頸部体内音とそのCWTの結果を示す。すると、20Hz前後の周波数帯域に鋭いピークが、200Hz前後の周波数帯域にゆっくりとしたピークが確認された。前者は心音に由来し、心室拡張期、心室収縮期のそれぞれに対応しており、1回の心拍に対して2回のピークが起こっていると考えられる。後者は呼吸音に由来し、呼気、吸気のそれぞれに対応しており、心音同様、1回の呼吸に対して2回のピークが発生していると考えられる。したがって、20Hz、200Hz帯域のウェーブレット係数に生じるピークを検出し、ピークの回数を2で割ることで、体内音から心拍数と呼吸数を同時に得た。

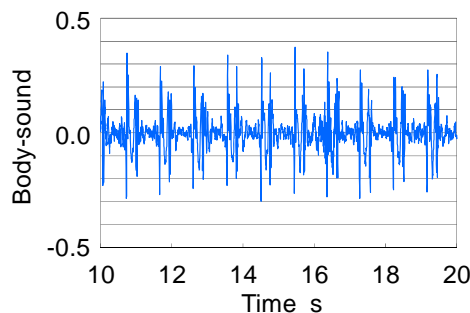


図3 頸部体内音 (10秒間)

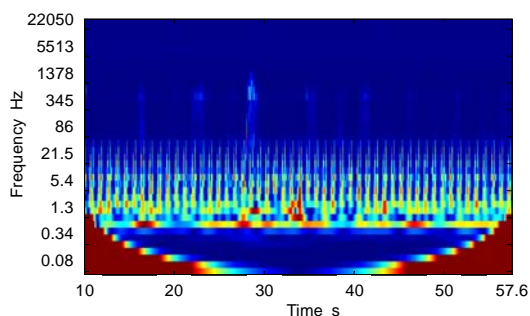


図4 ウェーブレット変換された頸部体内音

開発した体内音センサの性能評価として、5名の健常男性(平均年齢23.4歳)に対して、頸部体内音と心電図、呼吸波形の同時計測実験を行い、それぞれのデータから算出された心拍・呼吸数を比較した。実験では60秒間の計測を各被験者6回行い、10秒~57.6秒の

データを解析した。心電図、呼吸波形の計測には基礎医学研究システム Biolog (DL-2000 and DL320; S&ME)を使用した。

その結果、頸部体内音より平均59.9回の心拍、8.3回の吸気、7.5回の呼気が得られた。一方、心電図、呼吸波形からは、平均59.8回の心拍、9.0回の吸気、9.1回の呼気が得られた。両者の絶対平均誤差は心拍数1.3回、吸気0.7回、呼気1.6回であった。図5および図6にウェーブレット係数と心電図、呼吸波形を比較した結果を示す。

呼吸数計測において、誤差が生じた理由としては、呼吸が静かでゆっくりな場合に、気管を振動させるのに十分なパワーを持っていなかったことが原因と考えられる。しかし、特に誤差の大きかった1名の被験者を除いた場合、それぞれの絶対平均誤差は1.0回未満となり、提案手法による心拍数および呼吸数の同時計測が心電図、呼吸波形による計測と同等の性能を有していると言える。

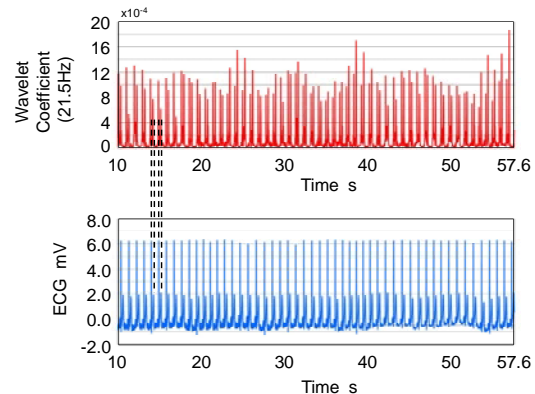


図5 ウェーブレット係数と心電図の比較

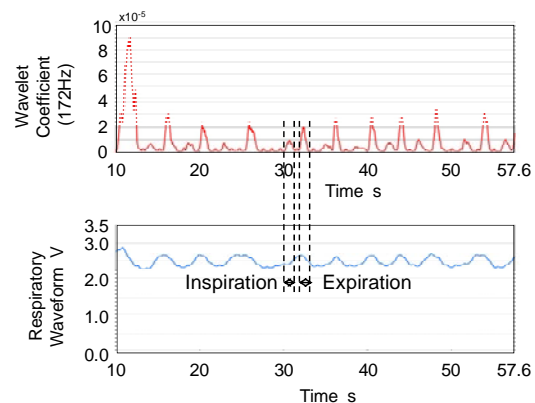


図6 ウェーブレット係数と呼吸波形の比較

さらに、本研究では、体内音によって得られた心拍数から心拍間隔を求め、心電図から得られるR-R間隔と比較した。R-R間隔はストレス反応の一つである交感神経の活性度の指標として使用される指標である。

解析は、体内音による心拍数と心電図によ



る心拍数が等しかった 10 試行を対象とした。解析結果の一部を図 7 に示す。その結果、心拍間隔(体内音)と R-R 間隔(心電図)との絶対誤差平均は 22.5ms であり、50%以上の試行において 10ms 以下の誤差であった。また、両者の相関係数は平均 0.69、80%以上の試行において相関係数は 0.6 を超え、両者の間に高い相関が得られ、体内音より得られた心拍間隔が心電図による R-R 間隔と同等であることが確認された。

以上より、心電図および呼吸波形計測と同等の性能を有している、心拍数と呼吸数を同時に計測可能なウェアラブルセンサが開発できた。

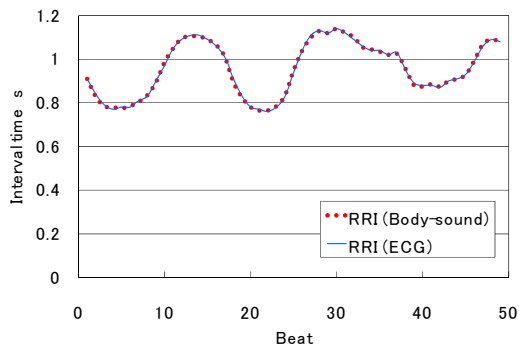


図 7 体内音による心拍間隔と心電図による R-R 間隔の比較

## (2)急性ストレスに対する心臓血管反応と唾液中コルチゾール反応の解析

インフォームド・コンセントを得た成人男性 11 名(平均年齢 26.7 歳)に対してストレス評価実験を実施し、心臓血管反応および唾液中コルチゾール濃度を得た。測定不備によりデータが欠損した 2 名を除く 9 名分のデータを解析対象とし、安静時の最後の 3 分間(安静期)、ストレス課題実施時の 10 分間(ストレス期)、ストレス課題直後からの 3 分間(回復期)の心臓血管反応についてそれぞれの平均値、および、唾液採取時の 7 点の唾液中コルチゾール濃度について、反復測定の一元配置分散分析(自由度の調整は Greenhouse -Geisser 法を適用)を用いてストレス反応を解析した。

その結果、心臓血管反応では HR ( $F[3, 24] = 23.9, p < 0.001$ )、SBP ( $F[3, 24] = 13.9, p < 0.001$ )、DBP ( $F[3, 24] = 13.5, p < 0.001$ )、MAP ( $F[3, 24] = 15.9, p < 0.001$ )で有意差が認められ、ストレス期のほうが安静期、回復期よりも有意に高くなることが確認された( $p < 0.05$ )。また、CO ( $F[3, 24] = 12.7, p < 0.001$ )では回復期よりもストレス期で有意に高く、TPR では有意差は確認できなかった( $F[3, 24] = 2.9, p = 0.06$ )。図 8~図 11 に有意差が認められた心臓血管反応に関する実験結果を示す。

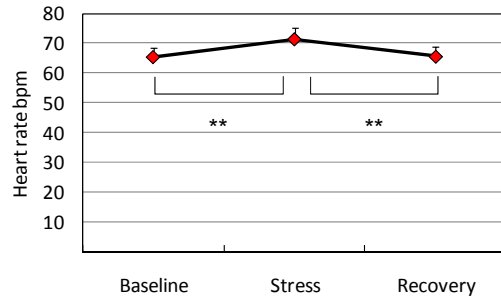


図 8 ストレス課題による心拍数の変化

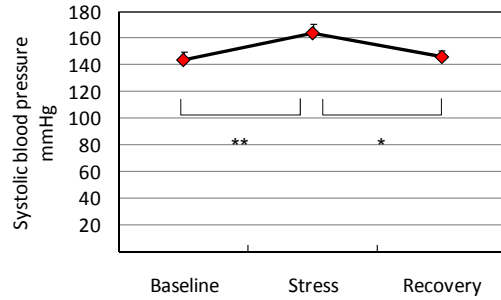


図 9 ストレス課題による収縮期血圧の変化

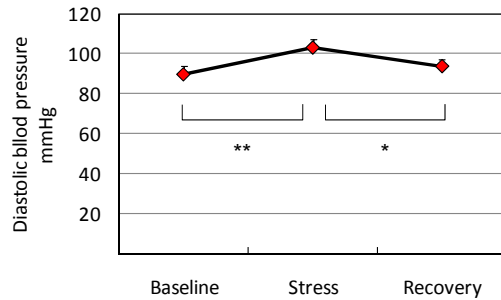


図 10 ストレス課題による拡張期血圧の変化

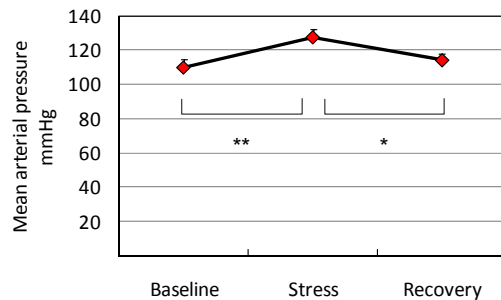


図 11 ストレス課題による平均血圧の変化

一方、唾液中コルチゾール反応については、図 12 のように、有意差は認められなかった ( $F[1.7, 13.2] = 3.39, p = 0.71$ )。従来知見と本実験結果の間に差異が現れた原因としては、実験自体が強固な社会的評価状況となり、安静時に唾液中コルチゾール反応のピークを迎えた可能性が考えられ、その結果として心臓血管反応では十分な安静状態が確保されていたが、唾液中コルチゾール反応はそうではなく、安静時に既にストレス反応が生じてい

た可能性が考えられる。

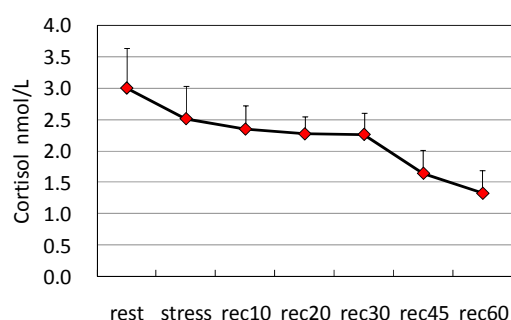


図 12 ストレス課題による唾液中コルチゾール濃度の変化

以上より、本研究において実施したストレス課題においては、心臓血管反応では急性ストレスによる影響が認められ、唾液中コルチゾール反応では影響が見出せなかった。本結果より単純に心臓血管反応とストレス課題の関係を結びつけることはできないが、急性ストレス負荷が与えられることによって心拍数をはじめとする心臓血管系指標が上昇することが確認された。

### (3) まとめ

本研究では、ストレスに対する代表的な生理反応である心拍数と呼吸数を同時かつ簡易に計測できる計測装置として、体内音センサを開発し、頸部体内音に対してウェーブレット変換による時間周波数解析を行うことで、心拍数および呼吸数の同時計測を実現した。また、連続減算課題と鏡映描写課題を与えたときの心臓血管反応、コルチゾール反応を計測し、心拍数や収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧において急性ストレスによって有意に上昇することが確認された。今後、日常生活環境下での評価実験や多様な種類のストレスとの関係を明らかにする必要があるが、本研究成果を組み合わせることで、体内音センサによるストレス推定への発展が期待できる成果と考える。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Hiroyasu Miwa, “Heart rate and respiratory rate measurement using body-sound”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 査読有, Vol.23 No.3, pp.434-442, 2011

[学会発表] (計 4 件)

- ① 山田 クリス孝介, 三輪 洋靖, “急性ストレスに対する唾液中コルチゾール反応と心臓血管反応”, 生理心理学と精神生理学,

2011.5.21, 高知

- ② 三輪 洋靖, “多チャンネル体内音センサによる胸部・腹部体内音の計測”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’10, 日本機械学会, 2010.6.16, 旭川

- ③ Hiroyasu Miwa, Kensaku Sakai, “Development of heart rate and respiration rate measurement system”, *Proceedings of 9th International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine*, 2009.11.6, Cyprus

- ④ 三輪 洋靖, 酒井 健作, 松井 俊浩; “体内音による心拍・呼吸数計測装置の開発”, 第 48 回日本生体医工学会大会, 2009.4.25, 東京

[その他]

- ① 研究代表者ホームページ

<http://www.dh.aist.go.jp/jp/members/miwa.php>

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

三輪 洋靖 (MIWA HIROYASU)  
独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・研究員  
研究者番号: 30367073  
(2009-2010 年度)

#### (2) 研究分担者

中田 亨 (NAKATA TORU)  
独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・研究員  
研究者番号: 10344152  
(2009 年度より参加)

三輪 洋靖 (MIWA HIROYASU)  
独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・研究員  
研究者番号: 30367073  
(2009 年度より研究代表者に変更)

酒井 健作 (SAKAI KENSAKU)  
独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン研究センター・研究員  
研究者番号: 50415684  
(2008 年度・研究代表者)