

安全運転支援・健康管理のための各種循環生理指標 簡易同時計測システムの開発

著者	山越 健弘, 松村 健太, 花木 翔太, 五十嵐 朗, Rolfe Peter, 李 知炯, 山越 康弘, 廣瀬 元, 山越 憲一
雑誌名	Transactions of Japanese Society for Medical and Biological Engineering
巻	50
号	2
ページ	227-236
発行年	2012-01-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/32472

安全運転支援・健康管理のための各種循環生理指標 簡易同時計測システムの開発

山越 健弘*・松村 健太**・花木 翔太*・五十嵐 朗***・Peter ROLFE†
李 知炯*・山越 康弘††・廣瀬 元†††・山越 憲一**

Development of a Novel System Based on the Simultaneous Measurement of Physiological Variables for Safer Driving and General Daily Healthcare

Takehiro YAMAKOSHI,* Kenta MATSUMURA,** Shota HANAKI,* Akira IKARASHI,*** Peter ROLFE,†
Jihyoung LEE,* Yasuhiro YAMAKOSHI,†† Hajime HIROSE,††† Ken-ichi YAMAKOSHI**

Abstract The long term goal of our research is to develop an in-car health screening instrument, based on a novel approach for physiological measurement, in order to contribute to much-needed efforts aimed at achieving safer driving. We describe here a feasibility study in which a system was constructed to derive cardiac indices non-invasively and simultaneously using a finger cuff. Specifically, the instrument measures blood pressure (BP), pulse rate (PR), normalized pulse volume (NPV) reflecting alpha-adrenergic sympathetic activity, and finger-artery elasticity index (FEI). The instrument's measurement process has two phases: firstly, cuff pressure is maintained at 30 mmHg to measure the NPV and PR; secondly, whilst applying a gradual change in counter-pressure, the BP and FEI are measured by application of the volume-oscillometric method. We tested a prototype instrument in 5 healthy male and female volunteers (age 21, 22, 36, 37, 49 years) during two weeks day-to-day living, including a 33-hour period of total sleep deprivation as physiological challenge. The results indicated that with sleep deprivation there appear to be relatively large physiological changes. In conclusion, the prototype system we have developed has allowed the periodic collection of physiological data in a convenient and expeditious way without any failure, demonstrating the possibility to detect an adverse effect on health. Further investigations will be needed in a larger group of subjects with a variety of real environmental conditions.

Keywords : blood pressure, finger elasticity index, pulse rate, normalized pulse volume, sleep deprivation.

1. はじめに

“自動車社会”と呼ばれるように、車は日常生活の必需品の一つとなっている。(財)自動車検査登録情報協会の統計によると、日本における自家用自動車の保有台数は一世帯当たり1.08台(平成22年3月末現在)と報告されており[1]、通勤、仕事、レジャーと毎日クルマと触れ合う

機会は多い。さらに、超高齢社会が益々進行している中、高齢者が運転する機会も増加し、交通事故は依然として高い水準であり、深刻な社会問題にもなっている[2]。そこで、運転する直前の健康状態(たとえば、血圧、脈拍数、血中酸素飽和度、血糖値、血中アルコール濃度、ストレス度、血管健康度など)を簡易的にチェックし、運転者自身のその時点における健康状態を把握した上で、“より安全

2011年9月14日受付, 2011年11月7日改訂, 2011年12月16日再改訂

Received September 14, 2011; revised November 7, 2011, December 16, 2011.

* 金沢大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University

** 金沢大学理工研究域機械工学系
School of Mechanical Engineering, College of Science and
Engineering, Kanazawa University

*** 藍野大学医療保健学部臨床工学科

Department of Medical Engineering, Aino University

† ハルビン工業大学自動化測定と制御系

Department of Automatic Measurement and Control,
Harbin Institute of Technology

†† 株式会社ユーシス

yu.sys Corporation

††† 金城大学短期大学部ビジネス実務学科

Department of Business Administration, Kinjo College

な運転意識の向上”に役立たせることは、交通事故防止という観点、さらに日々の健康管理という観点からも、現在の超高齢社会と相俟って益々社会的要請が高まって行くと思われる。

そこで、本研究では、従来までに開発されてきた非侵襲生体計測技術を融合し、新たな方法に基づき、車内はもちろん、家庭内などにおいて簡易に利用できるシステム（本研究ではヘルススクリーニングシステムと命名）の開発を試みる。著者らは光電容積検出法を基盤とした容積振動法による“血圧 (blood pressure; BP) 計測”[3, 4]、その容積振動法に基づく“指動脈血管弾性 (容積弾性率: volume elastic modulus; VEM) 計測”[5]、また BP と VEM の同時計測システムの開発 [6]、指尖部容積弾性率を血管外圧一定条件で光電的に求めた α アドレナリン作動性の細動脈系血管トーン変化 (交感神経活動) を反映する“基準化容積脈波 (normalized pulse volume; NPV) 計測”[7]、さらに VEM を発展させた“指動脈血管弾性指数 (finger elasticity index; FEI) 計測”[8-10]に関して、計測精度評価や生理指標としての信頼性評価について報告してきた。本研究では、これらの研究成果に基づき、ヘルススクリーニングシステム開発の第一段階として、特に計測原理が確立されており、且つ心臓血管系疾病のリスクファクターとして重要な生理パラメータである血圧 (BP)、脈拍数 (pulse rate; PR)、血管緊張度 (NPV)、そして指動脈血管弾性指数 (FEI) の 4 指標にターゲットを絞り、それらの情報を「手指」から「同時」かつ「短時間: 60 秒以内」に取得可能な新たなプロトタイプを開発し、実験室レベルの模擬運転環境にてその動作性能評価を行った。また、明らかに健康状態が悪くなった場合に上記指標に表れうるかどうかの予備検討を行ったので報告する。

2. 装置と実験方法

2.1 試作装置の概要

図 1 に試作したシステムの構成概要 (A) とそのブロック線図 (B) を示す。同図 (A) に示すように、試作システムは机上に設置できる程度のコンパクトな設計 (268W × 78H₁ (37H₂) × 184D mm) と成っており、(i) 透過型光電容積センサ (以下、光電センサと略)、(ii) アクチュエーター、(iii) 記録処理部 (以下、計測ユニットと略)、及び (iv) 計測表示・制御部 (vostro1200, Dell Inc.) (以下、PC と略) から成る。計測ユニット内のセンサ部は手指が挿入できるような筒状 (φ35 × 54H mm) になっており、その中の全周カフに光電センサとして、近赤外発光ダイオード (LED: SMC810, Epitex Inc., 波長: 810 nm) とフォトダイオード (PD: BPW34FAS, OSRAM GmbH) が対向して組み込まれている (図 1 の右上参照)。また、手指を挿入すると基節および中節部分がカフによって全周圧迫される機構となっており、光電センサの位置は指基節部

付近になるように配置されている。なお、本プロトタイプは、指サイズ (指周囲長) の個人差に自動的に調整させる機能を有していないが、筒内部のカフ内側径に余裕を持たせて指周囲長の個人差に対応できるようにした (現時点までの被験者の指基節部周囲長は 55~63 mm であるが、全て計測可能)。また、本機は実験用の机上タイプであるが、将来的に車内への実装を鑑みた場合、電子回路・制御部はかなりの小型化が可能で有り、ヒューマン・インターフェイス (指カフ) 部を、例えば、車内中央インパネ部やステアリング部などに設置することも考えている。

計測は、手指を挿入し、PC 側からのコマンド送信により開始され、一定カフ圧にて基準化容積脈波 (NPV) と脈拍数 (PR) 測定が行われる。その後、予め設定された加圧上限値までカフ圧を上昇させ、この加圧過程で容積振動法による血圧 (BP) 計測と指動脈弾性指数 (FEI) 計測が行われる。これらの計測中は、PC 側に光電センサからの光電容積信号の直流成分 (PG_{dc}) と交流成分 (PG_{ac})、及び圧センサからのカフ圧 (P_c) の各信号が送信され、リアルタイムで波形表示、そしてそれぞれの計測原理に基づき血圧値、FEI 値等が演算され、結果が表示される (LabVIEW 2009, National Instruments Corp.)。

図 1 (B) に示すように、計測ユニットでは LED を 300 Hz のパルス電流により駆動し、これに対応する信号をプリアンプ (Pre-amp) で増幅後、検波器、直流増幅器 (DC-amp)、交流増幅器 (AC-amp: 周波数特性 1~20 Hz (-3 dB)) を通して、 PG_{dc} と PG_{ac} を取り込む。このとき外乱光除去制御器の出力により、PD 出力に含まれる外乱光成分が除去される。なお、 PG_{dc} 、 PG_{ac} 、及び P_c は、量子化数: 12 bit、サンプリング周波数 300 Hz の条件でマイクロプロセッサ (MPU) の AD 変換部に入力され、LED の駆動パルスに同期してデジタル変換し、MPU に取り込まれる。その後、ソフトウェア的にハムフィルタ処理を行い、データ数を 1/3 に間引いたサンプリング周波数: 100 Hz の信号として、USB を介して PC へ送信される。

2.2 計測原理

本システムは、共通の光電センサを用いて手指から血圧 (SBP/MBP/DBP)、脈拍数 (PR)、基準化容積脈波 (NPV)、そして指動脈血管弾性指数 (FEI) を同時計測しようと試みたものである。以下にそれぞれの計測原理を概説する。

BP の計測原理は、容積振動法 [3, 4] で、手指を局所的に加圧しながら透過型光電センサにより容積脈波 PG_{ac} を計測し、その変化パターンから最高血圧 (systolic blood pressure; SBP, mmHg) 及び平均血圧 (mean blood pressure; MBP, mmHg) を計測するものである。なお、容積振動法の計測原理上、最低血圧 (diastolic blood pressure; DBP, mmHg) が得られないため、ここでは容積脈波定数法 [4, 11, 12] により、以下の式を用いて DBP を算出した。

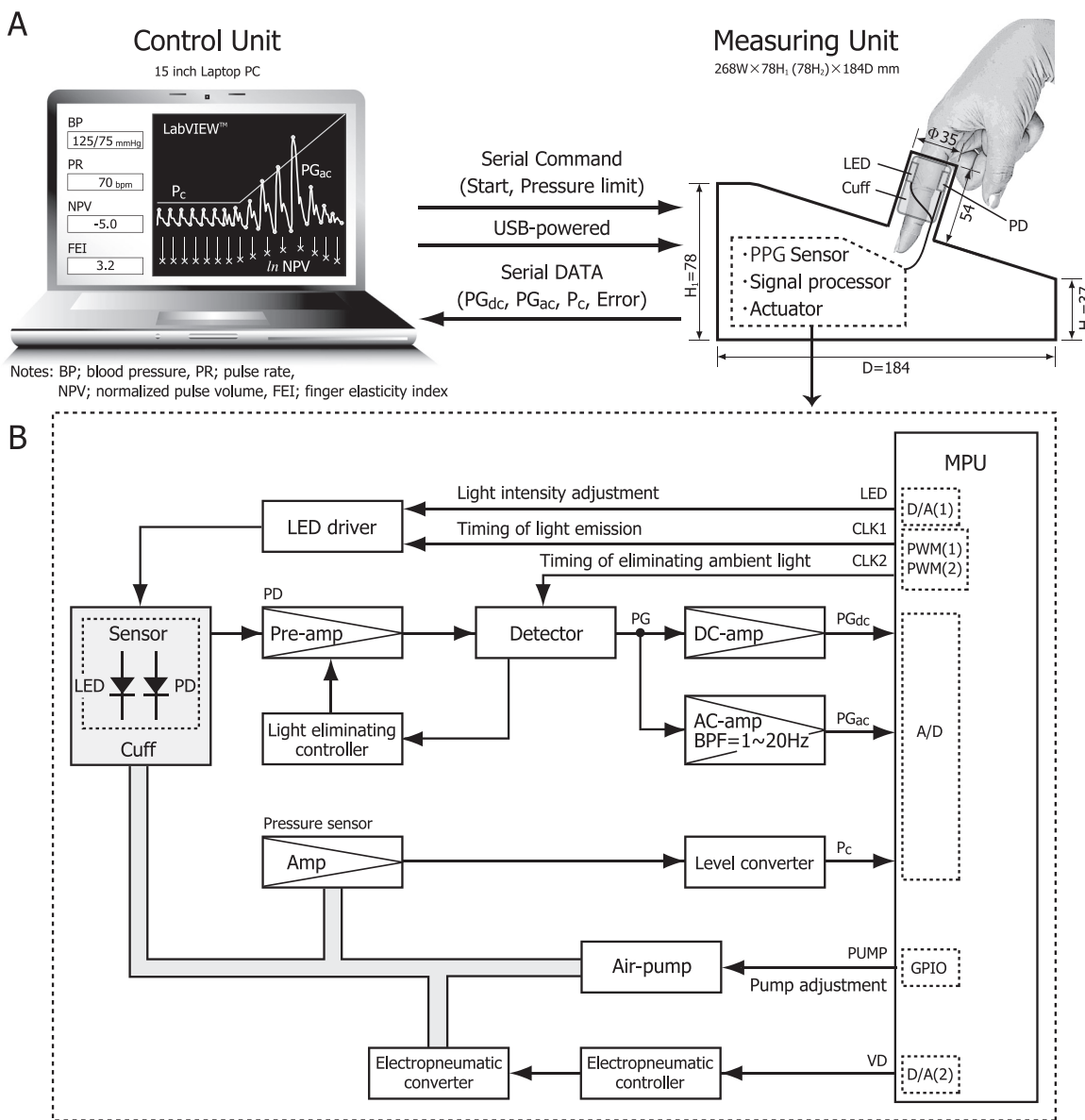


図1 試作システムの構成 (A) とブロック線図 (B)
 Fig. 1 Outline of a prototype system (A), and schematic block diagram of the measuring unit (B).

$$DBP = (MBP - \alpha_v \cdot SBP) / (1 - \alpha_v) \quad \dots (1)$$

$$\text{但し, } \alpha_v = \frac{1}{T_p} \int_{T_p} PG_{ac}(t) dt$$

なお、 α_v は容積脈波成分 $PG_{ac}(t)$ の脈波間隔時間 T_p 内の平均値であり、MBP 決定付近の $PG_{ac}(t)$ を利用した [11, 12].

一方、NPV の計測原理は、血管外圧一定条件の下で光電容積脈波 PG_{ac} と PG_{dc} の比によって求められる [7]. これは不安や脅威などのストレス負荷に敏感に反応する α アドレナリン作動性の細動脈系血管トーンズ変化 (交感神経活動) を鋭敏に反映する指標とされる. 本システムにおいては、手指部静脈系が圧閉され、動脈血管床が主要因となるカフ圧 $P_c = 30 \pm 2 \text{ mmHg}$ の一定条件下で 10 秒間計

測し、この期間の平均値を NPV 代表値とした [7]. なお、PR (= 60/脈波間隔時間 T_p , bpm) は NPV 計測中の平均値とした.

$$NPV = PG_{ac} / PG_{dc} \quad \dots (2)$$

また、FEI の計測原理は、血管壁を介した実効圧 (経壁圧: transmural pressure; $P_{tr} = MBP - P_c$) に対するコンプライアンス指数 (compliance index: $CI = NPV / (SBP - DBP)$) [8, 9, 13] の回帰直線の傾きとして (3) 式により求められる [8-10]. これは血圧非依存の指動脈血管の硬さを反映する指標とされる.

$$FEI = \delta(\ln CI) / \delta(P_{tr}) \quad \dots (3)$$

2.3 実験方法

安全運転支援や健康管理のためには、本システムで得られた 4 指標 (BP, PR, NPV, FEI) それぞれの計測素値も極

めて重要であるが、それらの指標から総合的に分析して得られる「新たな健康評価法 (総合評価関数の作成)」としての評価の提示も重要であろう。この評価関数作成に関する詳細検討は今後の研究課題とするが、本報ではまず試作システムを利用してその予備的検討を行った。すなわち、参加者に二週間の日常生活を送ってもらい、その期間中に 33 時間の断眠を介入させて健康状態を意図的に操作し、このとき試作装置によって得られた 4 変数が変化するかどうかを確認すると共に、試作装置の動作性能評価を主目的とした予備実験を以下の要領で行った。

参加者: 実験の参加者は、金沢大学医学部倫理委員会の承認を得た後、十分な実験主旨説明を受け、所定の同意書にサインした健康成人男女 5 名 (Sub. A: 21 歳, Sub. B: 22 歳, Sub. C: 36 歳, Sub. D: 37 歳, Sub. E: 49 歳) であった。ボディマス指数 (BMI) はそれぞれ, 20.2 kg/m², 19.3 kg/m², 21.3 kg/m², 21.5 kg/m², 20.8 kg/m² であり, Sub. C 以外は非喫煙者であった。

装置: 計測時は室温約 25℃ に保たれた金沢大学自然科学研究科 3 号棟 3A624 に構築された運転シミュレータ室 [14-16] を使用した。当該システムは、運転席の右側に備えた机の上に設置した (本血圧計測法では、左右第一指から第四指の何れの指でも計測可能であるが、本実験では右手人差し指で計測)。また、参考値として上腕式カフ振動法血圧計 (HEM-907, オムロンヘルスケア (株): AAMI (Association for the Advancement of Medical Instrumentation) 規定の自動血圧計の測定精度規格 (SP10) 準拠) も使用し、これは運転席の左側に設置した (左上腕で計

測)。なお参加者は、計測ユニット部と心臓位置が同レベルになるように調整して計測を行った。

実験デザイン: 基本的には、生活形態の実験的介入を行わないデザインとした。すなわち、5 名全ての参加者には二週間に渡って自由な生活を送ってもらい、毎日、朝、昼、夕方の任意なタイミングで計測を行った。

但し、5 名中 Sub. A~Sub. D の 4 名に関しては試験 4 日目から 5 日目にかけて 33 時間の断眠による実験的介入を行った。これは“ABA デザイン”と類似したものである。ABA デザインとは、介入を行わないベースライン期 (A1) と実験的介入を行う介入期 (B) の実施に引き続いて、再びベースライン期 (A2) を実施する方法である。なお、ベースライン条件測定時の前日睡眠時間や、介入 (徹夜) 時の各参加者の行動パターンとイベントに関しては既報 [17-21] の断眠試験の方法を参考にして図 2 のように統制した。

測定条件: 試作装置による生理指標と市販機による血圧測定は、運転席にて椅座安静状態で約 5 分間の適応区間を経てから 3 回実施 (所要時間 3 分程度) し、その平均値を個人代表値として使用した。なお、この適応区間では参加者に旅行や野生動物に関する中性的な雑誌を読んで貰い、安静状態を統制した [22, 23]。また、この際併せて、眠気及び疲労の主観尺度を視覚的アナログスケール (visual analog scale; VAS) [24] で測定した。

3. 結 果

図 3 は本装置による P_c , PG_{dc} と PG_{ac} の同時記録例、

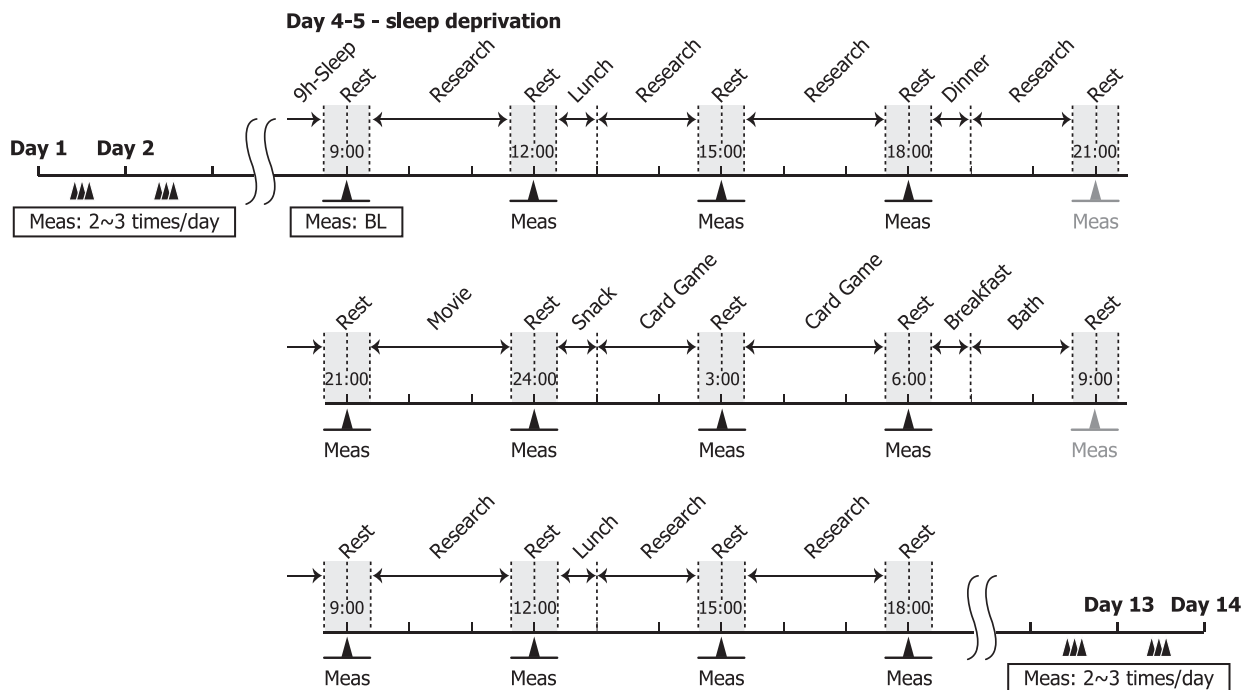


図 2 33 時間断眠介入を含む動作性能試験のタイムテーブル
 Fig. 2 Time table of performance test including of 33-h sleep deprivation.

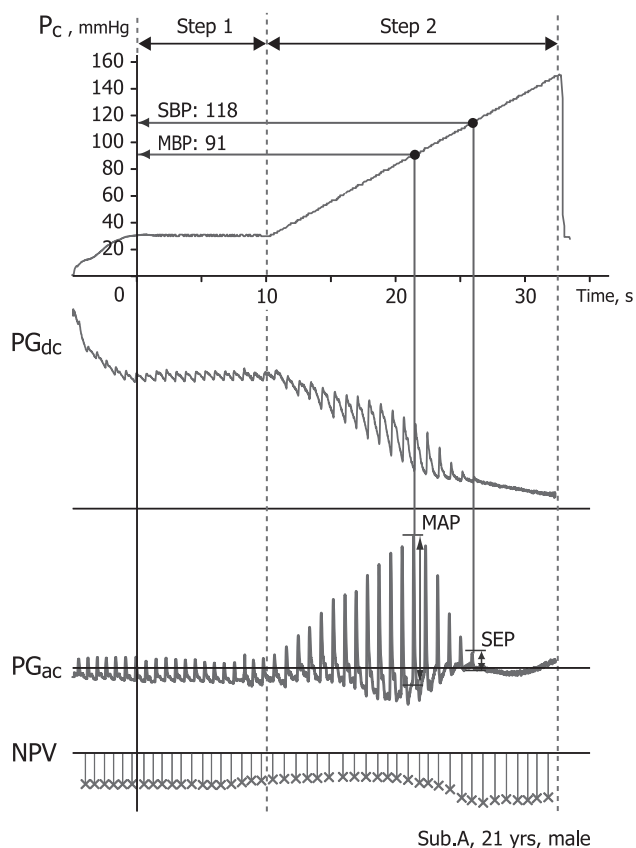


図3 本システムによる記録波形例。P_c: 手指部カフ圧迫圧力, P_{Gac}: 光電容積信号直流成分, P_{Gdc}: 光電容積信号交流成分, NPV: 基準化容積脈波

Fig. 3 Typical recordings of applied pressure (P_c), photoplethysmographic pulsation signal (P_{Gac} & P_{Gdc}), and beat-by-beat NPV obtained in a healthy subject.

及び NPV の解析値記録例である。Step 1 では 30 mmHg の血管外圧一定条件でリアルタイムに NPV が演算され、Step 2 では P_c の増加 (加圧速度: 5 mmHg/s) に伴い P_{Gac} の振幅は徐々に増加し、最大振幅点 (point of maximum amplitude; MAP) を経て消失点 (systolic end point; SEP: SEP が不明瞭な場合は MAP の 1/10 以下となる点を決定基準 [25] とした) へ移行する典型的な変化パターンを示しており、本システムが期待通りに機能していることが判る。なお、Step 2 では 30 mmHg から初期規定値 150 mmHg まで一定圧勾配で加圧されるが、SEP が検出されなかった場合は、前回の設定圧 + 30 mmHg の再加圧が始まる Step 3 へと移行して再計測される。FEI は血圧計測終了時点で (3) 式に基づいて演算され、PC 画面上に結果が表示される。これらの計測開始から結果表示までの計測手順は最長でも 60 秒以内であった。

図 4 は本システムで得られた 4 指標、疲労感・眠気感 VAS 値、及び自己申告睡眠時間の日常生活での経時変化の結果例である^{注)}。グラフから、本システムを利用して毎日の生理指標の変化が追えていることが判る。なお、NPV は分布を正規化するために対数変換を施した値

(lnNPV) で示されている。特に、疲労や眠気 VAS 値が大きくなっているポイント (例えば、5 日目 3 回目、12 日目 2 回目) で BP と lnNPV の変化量が顕著であることが判る。参考までに、従来から一般的に使用されている上腕式カフ振動法による血圧値と本法による血圧値の偏差 (上腕-本法) の平均 ± S.D. を全計測数 (5 名 × 125 データ = 625 データ) で算出すると、SBP が -5.4 ± 7.0 mmHg, MBP が -2.5 ± 9.0 mmHg, DBP が -1.1 ± 9.7 mmHg であった。

4. 考 察

本研究の目的は、筆者らのグループで開発してきた心血管関連指標計測技術 [3, 4, 6, 7, 9, 10] を融合し、安全運転支援や健康管理に利用できる簡易的なヘルスクリーニングシステムを試作することであった。そのため、手指から同時かつ短時間に計測する新たな方法を提案し、それを具現化したプロトタイプを開発した。更に、健康管理として利用可能かどうかの予備試験 (断眠を含む日常生活下の計測実験) を行い、その動作評価も行った。その結果、期待通りに試作システムは動作し、60 秒以内で、循環系の総合的指標である BP (SBP/MBP/DBP) [26-28]、心臓活動の指標である PR、その背後を成す自律神経系の指標である NPV、そして細動脈血管の硬さの指標である FEI を同時計測することができた。また、断眠実験の結果では主観的な眠気や疲労に応じた生理指標の変動を確認した。

交通事故に直結するような運転者の生体変調、たとえば低覚醒状態-居眠り状態、興奮状態、緊張状態-高ストレス状態、そして自動車競技で問題となっている鬱熱状態な

注) 実験方法で述べたように、本結果例のデータプロットは 3 回の計測の平均値を示しているが、1 時点の生理量のバラツキ (生理量の短時間の変動と計測誤差) を検討するため、以下のように定量評価した。すなわち、まず 3 回計測の標準偏差を算出し、その標準偏差の平均 ± S.D. を全計測数 ($n = 625$) で算出すると、MBP が 3.1 ± 1.2 mmHg, PR が 1.7 ± 0.8 bpm, NPV が 0.13 ± 0.09 , FEI が 0.25 ± 0.13 であった。さらに、それぞれの指標の平均値を全計測数で算出すると、MBP が 83 mmHg, PR が 72 bpm, NPV が 4.7, FEI が 3.7 であり、したがって、変動率は $MBP = (3.1/83) \times 100 = 3.7\%$ となり、同様に $PR = 2.4\%$, $NPV = 2.8\%$, $FEI = 6.8\%$ となった。FEI は他の指標よりも変動率が比較的大きかったが、これは計算式に光電容積信号 (P_{Gdc}, P_{Gac})、血圧値 (SBP, MBP)、及びカフ圧 (P_c) を含み、それぞれの計測誤差が重畳したことが原因と考えられる。しかし、全指標の変動率は 5% 前後であり、1 回のみの計測であっても大きな問題にはならないと考えられる。

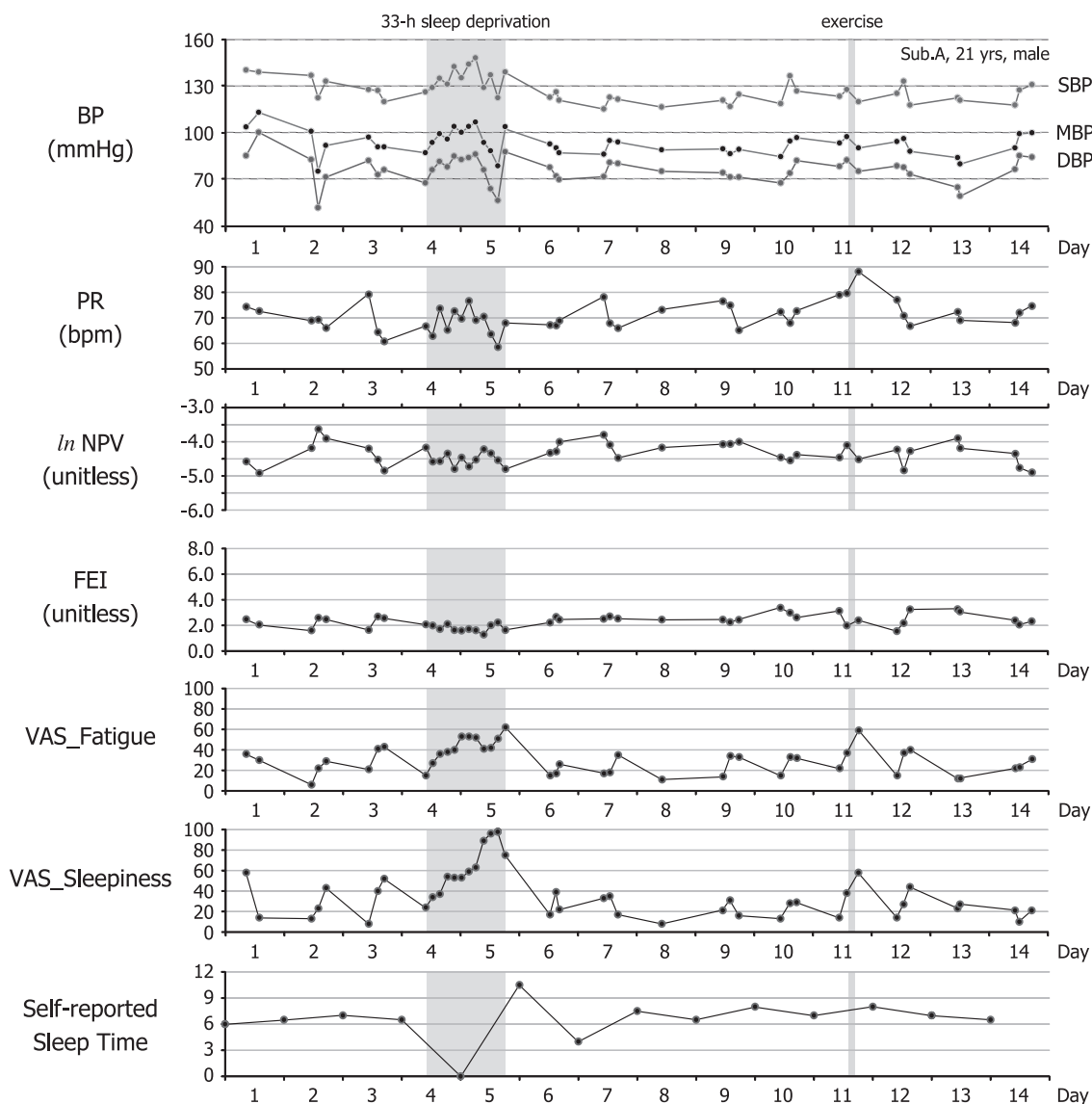


図 4 本システムによる日常生活での計測実験結果例

Fig. 4 Results of physiological indices (SBP/MBP/DBP, PR, \ln NPV, FEI) measured by the present system, the VAS of fatigue and sleepiness, and the self-reported sleep time during day-to-day living in one participant.

などを、運転中の生体情報から簡便な方法で検知しようとする研究は盛んである[14-16, 29-36]。しかし、より安全な運転意識の向上や健康管理のために、日常的に利用する車内空間を生体情報取得の場所として、運転する前の健康状態をチェックしようとする試みは新しい。この試みは間接的ではあるが、そして明確なエビデンスに乏しいが、少なからず将来の交通事故防止に貢献すると考えられる。さらに、光電容積脈波を基盤として得られる生体情報は、今回扱った4変数に留まらないと考えられるので、本システムの更なる発展可能性は高いと言える。すなわち、計測原理が確立されている血中酸素飽和度計測法[37]のように、複数波長のLEDを利用することで血液関連情報も取得できる可能性がある。つまり、物質固有の波長吸光特性を利用することで、血糖値、アルブミン濃度、コレステロール

値、及び血中アルコール濃度なども定量できる可能性がある[38-41]。しかし、これらの光を用いた血液成分定量化研究は発展途上であり、今後の進展が強く期待される。安全運転支援との関連性からは、上述の光を利用した血中アルコール濃度計測が最も興味深い。最近では「飲んだら乗れない」ようにするアルコールイグニッションインターロック装置と呼ばれる機器の必要性が高まってきており、諸外国では既にその実用化が進んでいる[42]。これは呼気ガスをを用いた手法[43]が一般的であるが、より簡易な計測技術も望まれている。将来的にこの血中アルコール濃度も本システムの1指標としてその計測技術を組み込むことができれば、飲酒運転撲滅にも貢献できると考えられる[44]。

本システムは、手指を計測部位とし、SBP/MBP/DBP,

PR, NPV, FEI を同時かつ短時間に計測する方法を提案し、それを具現化したプロトタイプを開発した。まず 10 秒間の一定カフ圧による NPV, 及び PR 計測から始まり、その後、カフを加圧していきその過程で容積振動法による BP 計測、及び FEI 計測が行われる。本結果から、この一連の計測シーケンスは期待通りに実動したことが示された。BP 計測に関しては、一般的にはカフ振動法の原理 [45] により上腕で計測されることが多いが、手首や手指でも計測が可能である。特に、本法で対象とした手指基節部での容積振動法による計測精度に関しては実証済みであり、動脈へのカテーテル留置による直接法との対比による詳細な検討が成されているので既報 [3, 4, 11, 46-49] を参照されたい。本実験では、参考までにカフ振動法による上腕血圧も同時計測したが、上腕と本法の偏差は SBP で -5.4 ± 7.0 mmHg, MBP で -2.5 ± 9.0 mmHg, DBP で -1.1 ± 9.7 mmHg であった。バイアスが 3 指標共に負となっており、本法の方が高値を示す傾向であったが、カフ振動法の計測精度は直接法との比較検討から問題視されており [50, 51], 特に Andreas *et al.* (2000) によると“カフ振動法による血圧値は過小評価される”と結論付けられており、本実験はこの知見とも一致していた。しかし、そもそも一般にカフ圧迫法の原理による間接血圧計測は、カフ加圧（あるいは減圧）速度に由来した誤差は避けられないものであり、その計測誤差（上腕： ± 3 mmHg; 本法： ± 5 mmHg; 即ち、両者の差を考えた場合、最大で ± 8 mmHg の誤差を与える場合がある）を考慮すると、本法による手指血圧値は、色々な計測条件下においても上腕部による間接血圧値を十分反映していると言える。

一方、本システムの手指基節部での NPV と FEI 計測に関しては、忠実に原法に基づいている [7-10]。これらの指標の利点は、測定が比較的容易であるにも関わらず、正確かつ鋭敏なことである。血管活動の背景の自律神経活動の指標である NPV は、ヒトが受けるストレスの質的特徴（能動的-受動的対処事態 [52]）を問わず、一貫して敏感に反応する [53, 54]。また、細動脈の硬さの指標である FEI は、動脈硬化の進展は細い動脈から始まる [55] と報告されているため、この指標の採用により、より早期の段階における心臓血管疾病兆候のスクリーニングができるかもしれないという利点もある。

しかしこれらの指標の抱える実用上の問題は、温熱環境の影響を受けやすい点である。すなわち、細動脈血管の収縮・拡張運動は体熱放散に関わる温熱中枢の影響も受けるため、測定中の温熱環境は“一定”かつ長期に渡って評価する場合は測定点の温熱環境は“ほぼ同一”条件であることが求められる。本システムの利用を想定している空間、特に乗車時点の車内は必ずしも同一の温熱条件となるとは言い難いことから、将来、実用化研究へ持って行くには、これを調整する方法の検討も重要な課題となる。また、本

論文では試作システムの開発とその動作性能を示すことを主目的としたため、極めて統制された条件下（外乱の無い模擬運転環境、5 分間の安静適応期間の設定、3 回の計測）での評価であった。今後は実車環境での使用を踏まえた、より実際に則した条件での検討も重要な課題である。

さて、本提案システムの最終目標は“ヘルススクリーニング：不健康状態を多種生理指標からふるい分けすること”であることから、不健康状態時にどのような生理反応を示すのかを本システムで定量的に把握しておくことも重要な課題である。そして、将来的には特徴パラメータを分析した結果から、専門知識のないヒトでも直感的に健康状態を理解できるような提示方法も望まれる。その上で先ずは、不健康状態を今回の場合の 4 指標から判別できるのかどうか、できるとするならば、どの変数が判別に効いているのを明らかにする必要があるだろう。さらに今後は実験規模を拡大し、想定しうる不健康状態、たとえば今回のような断服後の精神的・肉体的に疲弊している状態、それ単体の状態、年齢による基礎健康レベルの低下している状態、そして心疾患などの病的状態などにまで踏み込み、それらの状態を本システムによって定量的に明らかにすることで新たな健康評価法を提案し、より本システムの有用性を高めていく必要性もある。

最後に、本研究と関連した研究として、運転に不可欠な認知・判断・操作能力を、最近流行のスマートフォンなどの加速度機能付き小型電子機器を利用して、簡易な心理パフォーマンステストで判定しようという試み [56, 57] も進められている。将来的には“生理量”と“心理量”の両側面から安全や健康を支援していくことも極めて有益となるであろう。

5. おわりに

安全運転支援や健康管理のために簡易に利用できる新たな循環生理指標同時計測システムを試作開発し、健康管理として利用可能かどうかの予備試験を通してその動作性能評価を行った。その結果、期待通りに試作システムは動作し、循環系の総合的指標である血圧、心臓活動の指標である脈拍数、その背後を成す自律神経系の指標である基準化容積脈波、及び細動脈血管の硬さの指標である指動脈弾性指数を同時計測することができた。また、日常生活下における二週間の連日測定予備実験の結果からは、主観的な眠気や疲労に応じて生理指標が変化している様子を確認した。今後は、より詳細な実験検討を通して、目標とする“車内ヘルススクリーニングシステム”としての有用性を検証していきたい。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構シーズ発掘試験（課題番号：07-053）、および文部科学省科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究（課題番号：23650349）の助成を受

けて行われた。ここに記して謝意を表する。また本評価試験にご協力頂いた、金沢大学理工学域機械工学類の小西英明氏に深謝する。

文 献

- 財団法人自動車検査登録情報協会: 自家用自動車の世帯当たり普及台数。 < http://www.airia.or.jp/publish/pdf/happyou/2010_08setai.pdf > [accessed Sept 10, 2011]
- 警察庁: 警視庁統計「平成 22 年度中の交通事故の発生状況」
- Yamakoshi K, Shimazu H, Shibata M, Kamiya A: New oscillometric method for indirect measurement of systolic and mean arterial pressure in the human finger: Part I & II. *Med Biol Eng Comput.* **20**(3): 307-313 & 314-318, 1982.
- Yamakoshi K: Non-invasive cardiovascular haemodynamic measurements. In: Oberg PA, Togawa T, Spelman F eds, *Sensors in Medicine and Health Care (Sensors Applications, Volume 3)*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2004, pp. 107-160.
- Shimazu H, Yamakoshi K, Kamiya A: Noninvasive measurement of the volume elastic modulus in finger arteries using photoelectric plethysmography. *IEEE Trans Biomed Eng.* **33**(8): 795-798, 1986.
- Yamakoshi K, Kamiya A: Noninvasive measurement of arterial blood pressure and elastic properties using photoelectric plethysmography technique. *Med Prog Technol.* **12**(1-2): 123-143, 1987.
- Sawada Y, Tanaka G, Yamakoshi K: Normalized pulse volume (NPV) derived photo-plethysmographically as a more valid measure of the finger vascular tone. *Int J Psychophysiol.* **41**(1): 1-10, 2001.
- Tanaka G, Sawada Y, Matsumura K, Nagano Y, Yamakoshi K: Finger arterial compliance as determined by transmission of light during mental stress and reactive hyperaemia. *Eur J Appl Physiol.* **87**(6): 562-567, 2002.
- Tanaka G, Sawada Y, Matsumura K, Yamakoshi K, Okayasu T: Exponential model of pressure-volume relationship in the finger artery: Theoretical and experimental evaluation of vascular tone under mental stress and reactive hyperemia. In: Shohov S ed, *Advances in Psychology (Vol. 34)*. Nova Science Publishers, New York, 2005, pp. 89-109.
- Tanaka G, Kato Y, Matsumura K, Horiguchi M, Ogasawara H, Sawada Y: The association between chronic psychosocial stress, allostatic load, and vascular health in asymptomatic young men: A pilot study using a novel finger arterial stiffness index. *Jap Psychol Res.* **53**(2): 140-154, 2011.
- Shimazu H, Ito H, Kobayashi H, Yamakoshi K: New idea to measure diastolic arterial pressure by the volume-oscillometric method in human fingers. *Med Biol Eng Comput.* **24**(5): 549-554, 1986.
- Shimazu H, Kobayashi H, Ito H, Yamakoshi K: Indirect measurement of the systolic, mean and diastolic arterial pressure in the forearms and ankles of babies and children by the volume-oscillometric method. *J Clin Eng.* **12**(4): 297-303, 1987.
- Tanaka G, Sawada Y, Nagano Y, Yamakoshi K: Finger arterial compliance, rather than normalized pulse volume, could be a more valid index of the finger vascular tone. *Psychophysiol.* **38**: S94, 2001.
- Yamakoshi T, Rolfe P, Yamakoshi Y, Hirose H: A novel physiological index for Driver's Activation State derived from simulated monotonous driving studies. *Transp Res C.* **17**(1): 69-80, 2009.
- Yamakoshi T, Park SB, Jang WC, Kim KH, Yamakoshi Y, Hirose H: Relationship between salivary Chromogranin-A and stress induced by simulated monotonous driving. *Med Biol Eng Comput.* **47**(4): 449-456, 2009.
- 山越健弘, 松村健太, 小林寛幸, 後藤雄二郎, 廣瀬元: 差分顔面皮膚放射温度を用いた運転ストレス評価の試み—単調運転ストレス負荷による基礎的検討—. *生体医工学.* **48**(2): 163-174, 2010.
- Kato M, Phillips BG, Sigurdsson G, Narkiewicz K, Pesek CA, Somers VK: Effects of sleep deprivation on neural circulatory control. *Hypertension.* **35**(5): 1173-1175, 2000.
- Ogawa Y, Kanbayashi T, Saito Y, Takahashi Y, Kitajima T, Takahashi K, Hishikawa Y, Shimizu T: Total sleep deprivation elevates blood pressure through arterial Baroreflex resetting: a study with microneurographic technique. *Sleep.* **26**(8): 986-989, 2003.
- Vaara J, Kyrolainen H, Koivu M, Tulppo M, Finni T: The effect of 60-h sleep deprivation on cardiovascular regulation and body temperature. *Eur J Appl Physiol.* **105**(5): 439-444, 2009.
- Sauvet F, Leftheriotis G, Gomez-Merino D, Langrume C, Drogou C, Van Beers P, Bourrillon C, Florence G, Chennaoui M: Effect of acute sleep deprivation on vascular function in healthy subjects. *J Appl Physiol.* **108**(1): 68-75, 2010.
- Robillard R, Lanfranchi PA, Prince F, Filipini D, Carrier J: Sleep deprivation increases blood pressure in healthy normotensive elderly and attenuates the blood pressure response to orthostatic challenge. *Sleep.* **34**(3): 335-339, 2011.
- Jennings JR, Karmarck T, Stewart C, Eddy M, Johnson P: Alternate cardiovascular baseline assessment techniques; Vanilla or resting baseline. *Psychophysiol.* **29**(6): 742-750, 1992.
- 松村健太, 松岡豊: 外傷後ストレス障害に関する最新の精神生理学的研究. *脳と精神の医学.* **20**(2): 143-155, 2009.
- 日本疲労学会: 疲労感 VAS (Visual Analogue Scale) 検査の記入方法について. < <http://www.hirougakkai.com/VAS.pdf> > [accessed Sept 10, 2011]
- 田中志信, 本井幸介, 野川雅道, 山越健弘, 山越憲一: ホームヘルスケアのための便座内蔵型血圧計測システムの試作. *生体医工学.* **44**(3): 467-474, 2006.
- Julius S: The blood pressure seeking properties of the central nervous system. *J Hypertens.* **6**(3): 177-185, 1988.
- 澤田幸展: 血圧反応性再訪. *生理心理学と精神生理学.* **24**(3): 257-271, 2006.
- Tucker PM, Pufferbaum B, North CS, Kent A, Burgin CE, Parker DE, Hossain A, Jeon-Slaughter H, Trautman RP: Physiologic reactivity despite emotional resilience several years after direct exposure to terrorism. *Am J Psychiatry.* **164**(2): 230-235, 2007.
- Helander M: Applicability of drivers' electrodermal response to the design of the traffic environment. *J Appl Psychol.* **63**(4): 481-488, 1978.
- Miyakawa T, Sakai T, Nakamura K: Development of blink detection system for doze alarm using real-time eye tracking system. *IEICE Tech Rep.* **103**(81): 41-45, 2003.
- 柳平雅俊, 安土光男: 眠気予測技術の開発. *PIONEER R &*

- D. **17**(1): 1-8, 2007.
32. 西山潤平, 谷田公二, 楠見昌司, 平田豊: 瞳孔ゆらぎを指標とした覚醒度状態評価. 生体医工学. **46**(2): 212-217, 2008.
 33. Tomimori H, Ishida Y, Sasaki K, Nakano Y, Sano S: Measurement of a car driver's pulse interval while driving with one hand. Service Robotics Mechatron. **12**: 241-244, 2010.
 34. 山越健弘, 田中直登, 山越康弘, 松村健太, Peter ROLFE, 廣瀬元, 高橋規一: イヤホン組込型深部体温連続計測装置の開発と安全支援を目指したGTドライバーへの応用. 生体医工学. **48**(5): 494-504, 2010.
 35. Yamakoshi T, Matsumura K, Yamakoshi Y, Hirose H, Rolfe P: Physiological measurements and analyses in motor sports: a preliminary study in racing kart athletes. Eur J Sport Sci. **10**(6): 397-406, 2010.
 36. Katsis CD, Goletsis Y, Rigas G, Fotiadis DI: A wearable system for the affective monitoring of car racing drivers during simulated conditions. Transp Res C. **19** (3): 541-551, 2011.
 37. Severinghaus JW, Astrup PB: History of blood gas analysis. VI. Oximetry. J Clin Monit Comput. **2**(4): 270-288, 1986.
 38. Yamakoshi K, Yamakoshi Y: Pulse Glucometry: a new approach for noninvasive blood glucose measurement using instantaneous differential near-infrared spectrophotometry. J Biomed Opt. **11** (5): 0540281-9, 2006.
 39. Yamakoshi Y, Ogawa M, Tamura T: Multivariate regression and classification models for estimation of blood glucose levels using a new non-invasive optical measurement technique named "Pulse-Glucometry". The Open Opt J. **3**: 63-69, 2009.
 40. 小川充洋, 山越健弘, 田中志信, 山越憲一: ヒト血清アルブミンリン酸緩衝溶液の近赤外領域における分光学的特性およびその定量化の試み. 生体医工学. **48**(3): 259-268, 2010.
 41. Ogawa M, Yamakoshi T, Yamakoshi Y, Yamakoshi K: Determination of concentrations of human serum albumin in phosphate buffer solutions using near-infrared spectroscopy in the region of 750-2500 nm. Int J Bioeng. **4** (2), 2010.
 42. Volvo Trucks Corporate Communication (2008): Volvo Alcolock. < http://www.etsc.eu/documents/PILSKOG_Alcolock.pdf > [accessed Sept 10, 2011]
 43. Hok B, Pettersson H, Kaisdotter Andersson A, Haasl S, Akerlund P: Breath analyzer for alcolocks and screening devices. IEEE Sens J **10**(1): 10-15, 2010.
 44. 井田孝之, 板坂優希, 宮崎慎平, 小川充洋, 山越憲一, 田中志信, 野川雅道, 松村健太, 山越康弘, 廣瀬元, 山越健弘: 多波長型光電脈波利用新規アルコールイグニッションインターロック装置開発に向けた基礎的検討. 日本生体医工学会北陸支部大会 2010 論文集, 金沢, 7-8, 2010.
 45. Geddes LA: The direct and indirect measurement of blood pressure. Year Book Medical Publisher, Chicago, 1970, p. 196.
 46. Imai Y, Abe K, Sasaki S, Sekino H, Yamakoshi K, Yoshinaga K: A new automated volume-oscillometric device for monitoring ambulatory blood pressure in the human finger in man. J Hypertens. **4**: S662-S664, 1986.
 47. Imai Y, Nihei M, Abe K, Sasaki S, Minami N, Ninakata M, Yumita S, Onoda Y, Sekino H, Yamakoshi K, Yoshinaga K: A finger volume-oscillometric device for monitoring ambulatory blood pressure: Laboratory and clinical evaluations. Clin Exp Hypertens A. **9**(12): 2001-2025, 1987.
 48. Imai Y, Abe K, Miura Y, Nihei M, Sasaki S, Minami N, Munakata M, Taira N, Sekino H, Yamakoshi K, Yoshinaga K: Hypertensive episodes and circadian fluctuations of blood pressure in patients with pheochromocytoma; Studies by long-term blood pressure monitorings based on a volume-oscillometric method. J Hypertens. **6** (1): 9-15, 1988.
 49. Yamakoshi K, Rolfe P, Murphy C: Current developments in non-invasive measurement of arterial blood pressure. J Biomed Eng. **10**(2): 130-137, 1988.
 50. Van Bergen FH, Weatherhead DS, Treloar AE, Dobkin AB, Buckley JJ: Comparison of indirect and direct methods of measuring arterial blood pressure. Circulation. **10** (4): 481-490, 1954.
 51. Andreas B, Michael MH, Harald H, Elisabeth O, Julia K, Christian W, Anton NL: Accuracy of oscillometric blood pressure measurement according to the relation between cuff size and upper-arm circumference in critically ill patients. Crit Care Med. **28**(2): 371-376, 2000.
 52. Obrist PA: Cardiovascular psychophysiology: A perspective. Plenum Press, New York, 1981, p. 236.
 53. 松村健太, 澤田幸展: 精神的ストレス負荷時の血行力学的反応パターンとコントロール可能性. 生理心理学と精神生理学. **22**(3): 247-255, 2004.
 54. 松村健太, 澤田幸展: 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. **79**(6): 473-480, 2009.
 55. Cohn JN, Quyyumi AA, Hollenberg NK, Jamerson KA: Surrogate markers for cardiovascular disease functional markers. Circulation. **109**(25): 31-46, 2004.
 56. Matsumura K, Yamakoshi T, Ida T: Performance measures of alcohol-induced impairment: Towards a practical ignition-interlock system for motor vehicles. Percept Mot Skills. **109**(3): 841-850, 2009.
 57. 松村健太, 山越健弘: 作業検査式イグニッション・インターロック装置開発に向けた標準的な検査性能評価法の提唱. 認知心理学研究. **9**(2): 125-135, 2012.

山越 健弘 (ヤマコシ タケヒロ)

2006年福井大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。2006年金沢大学大学院自然科学研究科・システム創成科学専攻・信頼性システム工学講座(寄附講座)特任准教授に就任,現在に至る。生体情報の無侵襲・無拘束計測と解析,健康・福祉科学,スポーツ科学,温熱生理学に関する研究に従事。

日本生体医工学会,日本自動車技術会,電子情報通信学会,計測自動制御学会,国際医用生体工学会議,IEEE Engineering in Medicine & Biology Societyに所属。



松村 健太 (マツムラ ケンタ)

2007 年北海道大学大学院文学研究科博士後期課程修了. 博士 (文学). 2006 年日本学術振興会特別研究員 DC2, 2007 年同 PD, 2008 年国立精神・神経医療研究センター精神保健研究所流動研究員, 2011 年金沢大学理工研究域博士研究員, 現在に至る. ストレス負荷時やスポーツ中の心理生理的反応, 外傷後ストレス障害 (PTSD) のバイオマーカー, 運転適性を測定するソフトウェア開発, 生体計測機器の開発に関する研究に従事.



日本心理学会, 日本生理心理学会, 日本認知心理学会, 日本健康心理学会, 日本トラウマティック・ストレス学会, American Psychosomatic Society などに所属.

花木 翔太 (ハナキ ショウタ)

2011 年金沢大学工学部人間・機械工学科卒業. 現在, 金沢大学大学院修士課程在学中. 主に自動車運転中の生体情報計測・解析に関する研究に従事.



日本生体医工学会に所属.

五十嵐 朗 (イカラシ アキラ)

2009 年金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了. 博士 (工学). 1989 年日本電気 (株) 入社, 2002 年科学技術振興事業団研究員, 2005 年 (財) 石川県産業創出支援機構出向研究員 (金沢大), 2009 年金沢大学理工学研究域機械工学系博士研究員, 2010 年藍野大学医療保健学部臨床工学科講師, 現在に至る. 生体情報の無侵襲・無拘束計測法, 生体信号処理などの研究開発に従事.



日本生体医工学会, 国際医用生体工学会議, IEEE Engineering in Medicine & Biology Society などに所属.

Peter ROLFE (ピーター ロルフ)

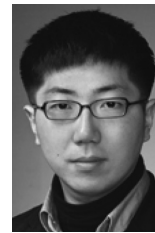
Final affiliated college: 1975. PhD; Royal Postgraduate Medical School, University of London 1980. MA status, Green College, Oxford University. Career summary: Professor ROLFE has held professorial positions in the UK, Italy, and China. Whilst founding Director of the Biomedical Engineering Centre at Oxford University. He also set up two spin-out companies. He has been Editor-in-Chief of two international biomedical journals, has for many years acted as a consultant to the World Health Organization, been the Director of a WHO Collaborating Centre, and currently acts as an assessor for EU research programmes. Special field of study: Physiological measurement, micro and nano sensors, cellular engineering, tissue engineering, perinatal technology, environmental monitoring.



Society Memberships: Fellow Royal Society of Medicine; Member IEEE; Founding Fellow International Academy of Medical & Biological Engineering.

李 知炯 (リ ジヒョン)

2011 年韓国壇国大学大学院・工学大学電子電気工学科修士課程修了. 修士 (工学). 現在, 金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻博士後期課程在学中. 無侵襲生体計測機器の開発, 健康・福祉機器の開発, 生体信号の計測と解析に関する研究に従事.



韓国コンピュータ情報学会に所属.

山越 康弘 (ヤマコシ ヤスヒロ)

2010 年千葉大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 博士 (工学). 2004 年 TYT 技研株式会社に研究員として入社, 2007 年株式会社ユーシス代表取締役, 現在に至る. 無侵襲生体計測機器, 健康・福祉機器, スポーツ機器に関する研究開発に従事.



日本生体医工学会, 国際医用生体工学会議, IEEE Engineering in Medicine & Biology Society などに所属.

廣瀬 元 (ヒロセ ハジメ)

2003 年東北大学大学院博士後期課程修了. 博士 (工学). 1998 年金城短期大学短期学部秘書学科専任講師, 同大学共同研究センター専任講師, 2006 年金城大学短期大学部ビジネス実務学科准教授, 現在に至る. X 線材料強度学などに関する研究に従事.



日本機械学会, 日本材料学会などに所属.

山越 憲一 (ヤマコシ ケンイチ)

1972 年早稲田大学大学院修士課程修了. 工学博士, 医学博士. 1972 年東京女子医大助手, 1974 年東京医科歯科大助手, 1980 年同大講師, 同年北海道大学助教授, 1987 年オックスフォード大学客員教授, 1994 年金沢大学教授, 2002 年中国大連大学客員教授, 2003 年早稲田大学客員教授, 2008 年中国黒竜江大学客員教授, 現在に至る. 生体計測と制御, バイオメカニクス, 健康・福祉工学などの研究開発に従事.



日本生体医工学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, 日本臨床モニター学会, 国際医用生体工学会議, IEEE Engineering in Medicine & Biology Society などに所属.