

個人健康管理の一手段としての超音波ドップラー法による 末梢血管血流速度計測

竹内裕之・児玉直樹

(受理日 2015年9月9日, 受稿日 2015年12月24日)

Doppler Ultrasound Peripheral Vascular Flow Study as a Means of Personal Healthcare

Hiroshi TAKEUCHI • Naoki KODAMA

(Received Sept. 9, 2015, Accepted Dec. 24, 2015)

1. はじめに

ウェアラブルデバイスによりリアルタイムで生活環境における個人の生体情報や運動量を計測し、Bluetoothなどの無線技術によりスマートフォンにデータを伝送して個人健康管理を行うシステムの開発が進んでいる¹⁾。これらの膨大な量のデータ（ビッグデータ）はクラウドに蓄積され、何らかの処理をしてシステムユーザの健康管理に役立つ情報を提供することが期待されている。最近の国際学会の潮流としても、m (mobile) Health や p(personalized) Health といった概念が浸透している²⁾。一方、生体情報を無侵襲で簡便に取得する手段として超音波や光（近赤外光）を用いた計測が注目されている。図1は1998年に行われた厚生科学研究「医療機器・情報システムの動向に関する調査研究」報告書³⁾から抜粋した在宅医療支援システムのイメージ図であるが、在宅での超音波を用いた体内情報取得、近赤外光を用いた脳機能計測などが描かれている。本研究では、生活環境におけ

る個人健康管理の1項目として、無侵襲で取得できる生体情報である超音波ドップラー法による末梢血管血流速度を採りあげた。血流速度を含む末梢血管における血流動態は、特に女性に多い冷え性との関連⁴⁾や動脈硬化など多くの生活習慣病との関わりもあり、近年超音波ドップラー法を用いた簡便な血流計が臨床の現場でも用いられている。本研究では、このような超音波血流計を在宅で用い、日常生活環境において末梢血管の血流速度を日毎粒度で計測し、時系列的に蓄積したデータと個人の生活習慣データとの関係を、筆者らが開発した遅延相関分析法⁵⁾により解析した。そして、その結果に基づき、超音波ドップラー法を用いた在宅での末梢血管血流速度計測の個人健康管理の一手段として可能性につき考察した。

2. 研究方法

2.1. 被験者

本研究の被験者は、自覚症状として冷え性に

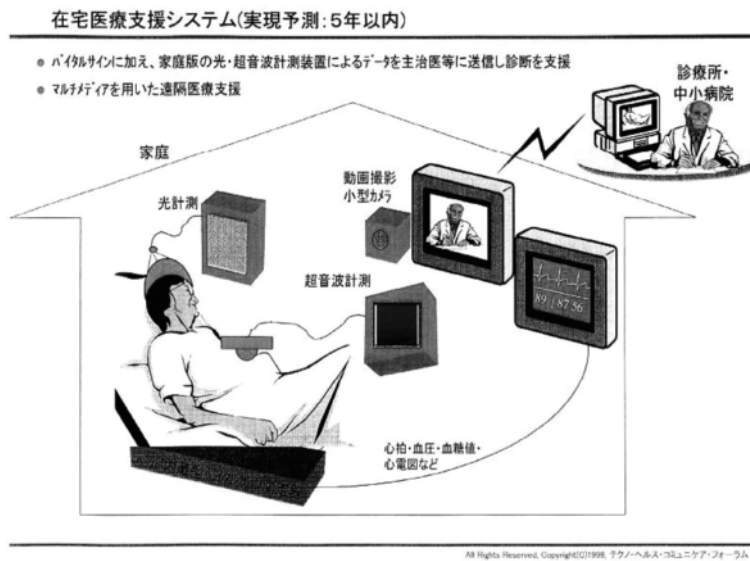


図1 在宅医療支援システムのイメージ図³⁾

悩む研究時 21～22 歳の女性 4 名 (本学学生) である。被験者 A は 2012 年, B は 2013 年, C, D は 2014 年の, それぞれ 6 月 1 日から 11 月 30 日までの夏季～秋季の期間にかけてほぼ毎日データを取得した。

本学学生である個々の被験者とは研究実施時に「個人情報取り扱いに関する覚書」を交わしており, 匿名にてデータを公表することが了承されている。なお, 本研究を含む大きな枠組みとしての「個人健康管理システムの研究」におけるデータの扱いに関して高崎健康福祉大学研究倫理委員会における審査を通してしている。

2. 2. データ取得方法

2. 2. 1. 末梢血管血流速度

末梢血管血流速度計測には Hadecco 社製のポケット型超音波血流計 (ES-100V3) を用いた。計測原理は超音波ドップラー法で, 周波数 8MHz のペン型プローブを, 超音波ゼリーを塗布した対象部位に当て計測する。図 2 は手首の

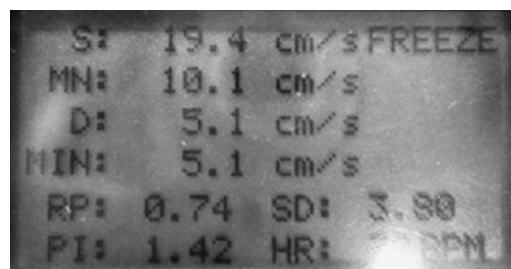


図2 Hadecco 社製ポケット型超音波血流計 (ES-100V3) と橈骨動脈血流計測の実際

橈骨動脈を対象としたデータ取得時の写真である。ドップラー音が最大になるプローブ位置と角度を探し、モニター上でドップラー信号波形が安定した状態で、最高、平均、最低血流速度、心拍数などを記録した。計測はそれぞれ被験者の自宅で行った。

橈骨動脈を対象にした超音波ドップラー法による血流計測の報告例はいくつかあるが^{6,7)}、長期に亘り時系列データを取得し解析した研究例はない。

2. 2. 2. 生活習慣データ

生活習慣としての歩数は、2名の被験者 A, B は歩数計（オムロン：Walking Style）を携帯して計測し、他の2名の被験者 C, D はリストバンド型の活動量計（JAWBONE UP-24）を装着し、専用アプリケーションを用いて自己のスマートフォンと Bluetooth インターフェースで連動させ計測・記録した（図3）。また睡眠時間は、2名の被験者 A, B は自己の判断で実測値を記録し、他の2名 C, D はやはりリストバンド型活動量計により専用アプリケーションを用いて自己のスマートフォンと連動させ記録した。さらに被験者 C は、末梢血管における血流改善



図3 リストバンド型活動量計（JAWBONE UP-24）とスマートフォンとの連動による記録

を目的として市販の「ごぼう茶」を毎日摂取し、意識的に1日の摂取量を変化させてその値を就寝時に記録した。

2. 3. 遅延相関分析

遅延相関分析法は、「生活習慣の蓄積が健康状態に変化をもたらし、その影響は時間遅れをもって現れることがある」という極めてシンプルなモデルをベースとしている。図4に示すように、健康状態 h と生活習慣 e の個々の時系列データ間には相関が見られなくても、生活習慣データの蓄積やその健康状態への影響の遅延を考慮するとしばしば健康状態の変化との間に相関がみられることがある⁵⁾。すなわち、健康状態の変化

$$\Delta h_{nm} = h_n - h_m \tag{1}$$

と生活習慣データの蓄積

$$e_{ij}^t = e_i + e_{i-1} + \dots + e_j \tag{2}$$

の間に、遅延期間 $s = n - i \geq 1$ を考慮すると時系列データ間に隠れていた相関をあぶりだすことができる。相関の評価には次式で表される時系列データ間のピアソンの積率相関係数を用いる。

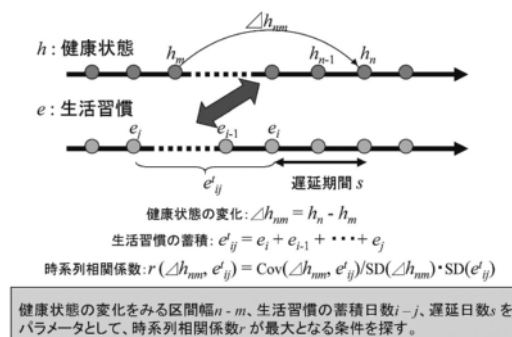


図4 遅延相関分析法⁵⁾

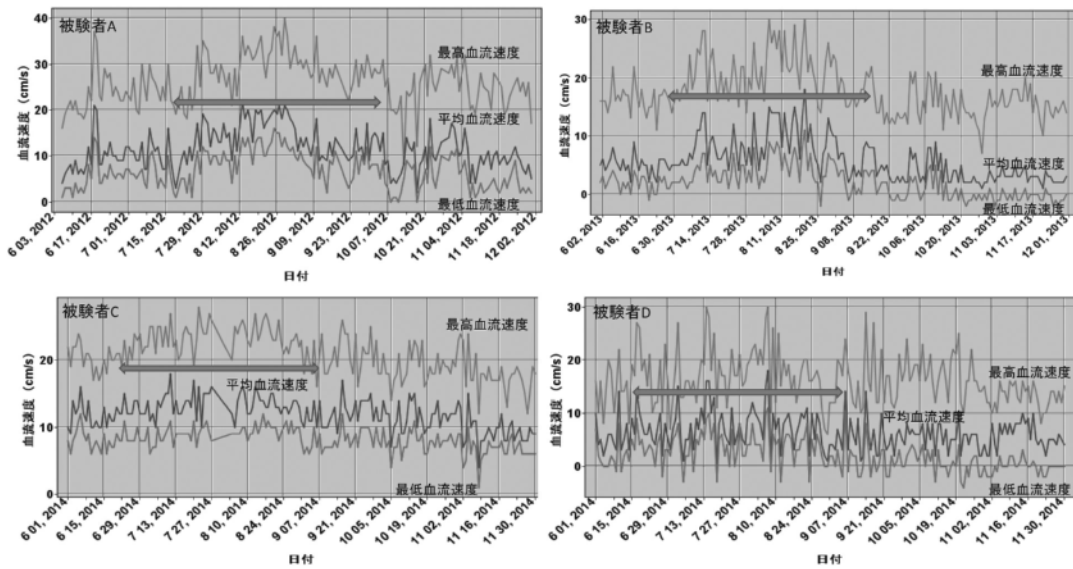


図5 4被験者における橈骨動脈血流速度の半年間の時系列データ

$$r(\Delta h_{nm}, e^{t_{ij}}) = \frac{\text{Cov}(\Delta h_{nm}, e^{t_{ij}})}{SD(\Delta h_{nm})SD(e^{t_{ij}})} \quad (3)$$

ここで、 r は相関係数、 $SD(\Delta h_{nm})$ は Δh_{nm} の時系列対象区間における標準偏差、 $SD(e^{t_{ij}})$ は $e^{t_{ij}}$ の時系列対象区間における標準偏差、 $\text{Cov}(\Delta h_{nm}, e^{t_{ij}})$ は Δh_{nm} と $e^{t_{ij}}$ の共分散である。

本研究では、健康状態 h として橈骨動脈における最高血流速度、生活習慣 e として睡眠時間、歩数などの時系列データについて、 $n-m$ 、 $i-j$ 、 s をパラメータとして式 (3) のピアソンの積率相関係数を評価し、相関係数の絶対値が最大となる $(n-m, i-j, s)$ のセット $((n-m)_{\max}, (i-j)_{\max}, s_{\max})$ を決定し、その条件下での散布図を評価した。

歩行などの運動が末梢循環に及ぼす影響を調べた研究は過去にもある⁸⁾が、本研究のように時系列データを基に相関を求めた例はない。

3. 解析結果

3. 1. 橈骨動脈血流速度の時系列変化

4名の被験者における、夏季～秋季にかけての橈骨動脈血流速度の毎日粒度の時系列データを図5に示す。データは最高血流速度、平均血流速度、最低血流速度をそれぞれ記録している。被験者Dにおいてはそれほど明瞭ではないが、被験者A、B、Cにおいては、日々のデータ分散に重なって7月～9月の間に共通した血流速度の増加傾向が観測されている。これは、気温が高い夏季に深部体温を下げる体温調節機能が働いている結果と考えることができる。被験者Dにおいては、日々の変動の中に調節機能のシグナルが埋もれてしまっていると考えられる。

比較のために4被験者の時系列データの夏季～秋季にかけてそれぞれの平均値を表1に示す。橈骨動脈の血流速度には、個人差が観測されている。

表 1 4 被験者における橈骨動脈血流速度の半年間の時系列データ平均値

被験者	最高血流速度 (cm/s)	平均血流速度 (cm/s)	最低血流速度 (cm/s)	データ数
A	26.7	12.0	7.0	186
B	17.7	5.7	2.0	183
C	20.8	12.0	8.2	176
D	16.3	6.4	2.0	183

3. 2. 睡眠時間と橈骨動脈血流速度の相関

4 被験者における、6 月 1 日～8 月 31 日の夏季 1 シーズンの時系列データを対象に、睡眠時間と橈骨動脈の最高血流速度の間の遅延相関分析を行った。1 シーズンの時系列データを対象

とする理由については、他報⁹⁾を参照されたい。分析は、 $n-m = 1 \sim 10$, $i-j = 0 \sim 9$, $s = 1 \sim 3$ の範囲でパラメータを変化させて実行した。式 (3) のピアソンの積率相関係数の絶対値が最大となった条件を表 2 に示し、その条件下での散布図を図 6 に示す。相関係数が最大となる条件は、4 被験者でそれぞれ異なるものの、すべて有意な正の相関が得られた (被験者 A のみ 1%水準から僅かに外れている)。すなわち、睡眠を長時間とることにより血流速度が速くなるという共通した傾向が観測された。

表 2 4 被験者における橈骨動脈の最高血流速度と睡眠時間の遅延相関分析結果

(対象データ期間：6/1～8/31)

被験者	$(n-m)_{\max}$	$(i-j)_{\max}$	s_{\max}	n	r	相関検定
A	10	9	1	76	0.286	$p = 0.012$
B	1	0	1	82	0.318	$p < 0.01$
C	5	2	2	74	0.358	$p < 0.01$
D	7	3	1	82	0.317	$p < 0.01$

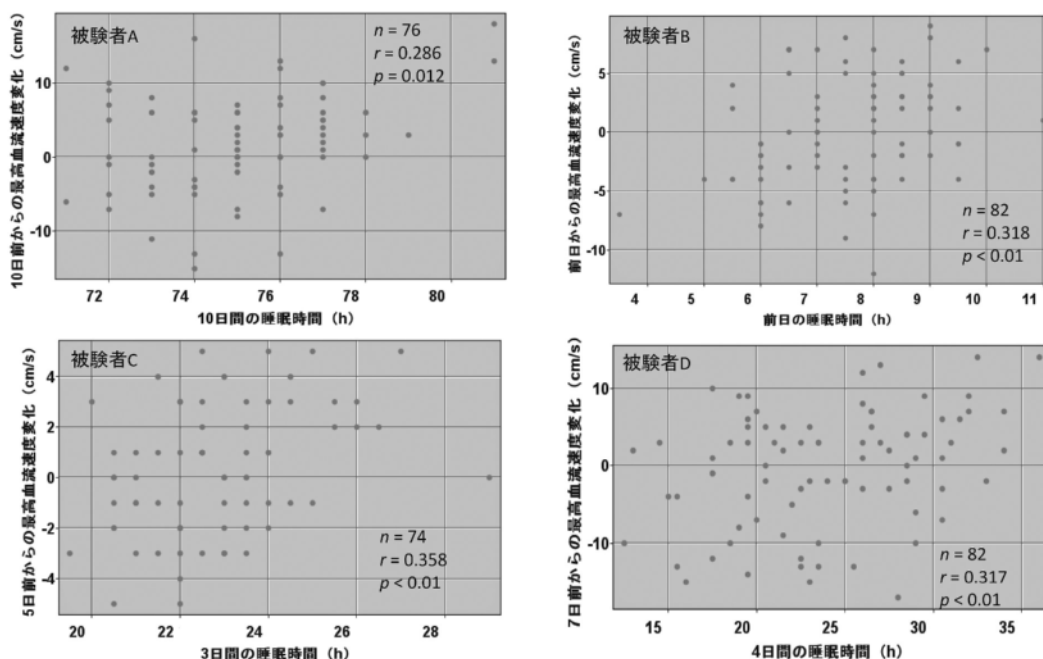


図 6 4 被験者における橈骨動脈の最高血流速度変化と睡眠時間の散布図

3. 3. 歩数と橈骨動脈血流速度の相関

4 被験者における、やはり6月1日～8月31日の夏季1シーズンの時系列データを対象に、歩数と橈骨動脈の最高血流速度の間の遅延相関分析を行った。分析におけるパラメータ範囲は3.2.で述べたのと同じである。式(3)のピアソンの積率相関係数の絶対値が最大となった条件を表3に示し、その条件下での散布図を図7に示す。被験者AとDにおいては有意な負の相関が見られ、被験者BとCにおいては有意な正の相関が見られた(被験者Bのみ1%水準から僅かに外れている)。即ち、歩行(運動)の多い

さと橈骨動脈血流速度の間には、個人によって相反する傾向が観測されている。

3. 4. ごぼう茶摂取の効果

被験者Cは末梢血管の血流改善を目的として、市販の「ごぼう茶」を毎日摂取した。摂取量を意識的に変化させて取得した時系列データについて、摂取量と橈骨動脈の血流速度のとの間の遅延相関分析を行った。対象としたデータは、6月1日～8月31日の夏季1シーズンの時系列データで、分析におけるパラメータ範囲はこれまでと同様である。結果を図8に示した。

表3 4被験者における橈骨動脈の最高血流速度と歩数の遅延相関分析結果

(対象データ期間：6/1～8/31)

被験者	$(n-m)_{\max}$	$(i-j)_{\max}$	s_{\max}	n	r	相関検定
A	10	8	3	77	-0.38	$p < 0.01$
B	3	9	1	82	0.265	$p = 0.016$
C	10	3	2	74	0.379	$p < 0.01$
D	10	3	2	81	-0.334	$p < 0.01$

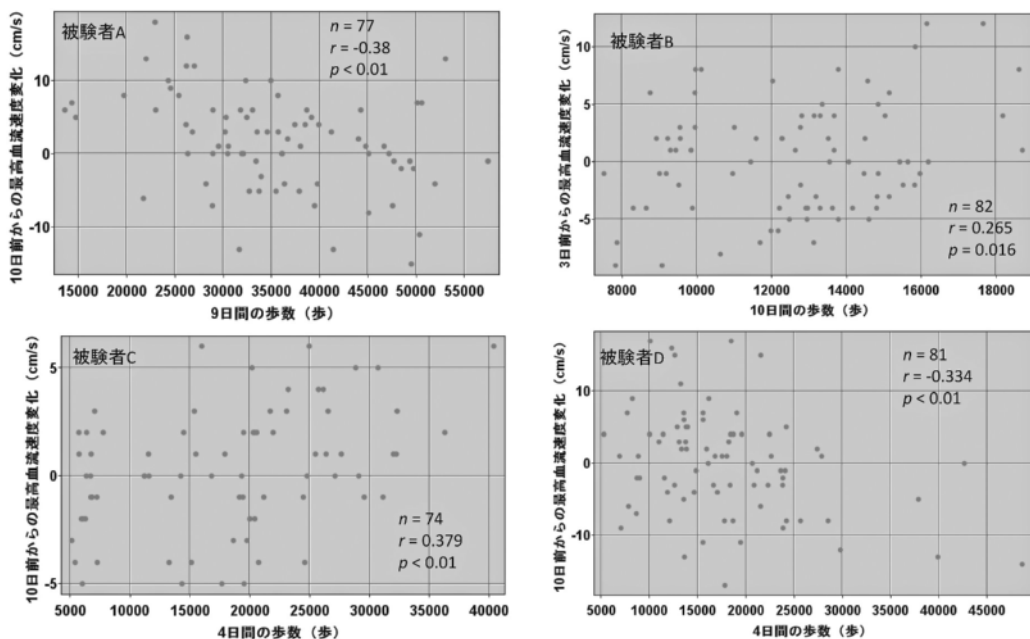


図7 4被験者における橈骨動脈の最高血流速度変化と歩数の散布図

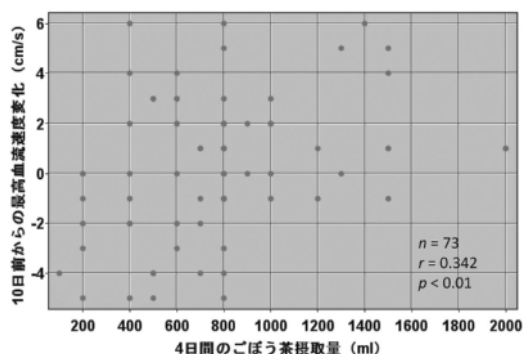


図8 被験者Cにおける橈骨動脈の最高血流速度変化とごぼう茶摂取量の散布図

パラメータ条件 $n-m=10$, $i-j=3$, $s=3$ で相関係数は最大 ($r=0.342$) となり、有意な正の相関が見られた。さらに散布図には、4日間のごぼう茶摂取量が1000ml(1日当たり250ml)前後を境として、血流速度の変化がプラスになる確率が顕著に増加するという特徴が見られた。この結果は、被験者Cにおいては毎日250mlのごぼう茶を4日間摂取し続けることにより、末梢血流状態が改善されることを示唆している。

なお、ここで得られた結果は、あくまでも被験者Cの個人の時系列データに基づき得られた、個人についての効果(傾向)を示すもので一般性はないことを強調しておく。

4. 考察

4.1. 時系列変化

4被験者の橈骨動脈血流速度の時系列変化(図5)において、夏季に速度が大きくなる傾向が観測されたが、これは以下に述べる生体に備わる体温調節機能として解釈することができる。

橈骨動脈は手の小動脈へと分岐し、さらに細動脈から皮膚毛細血管へと繋がっている。気温

の高い夏季に深部体温が上がると、細動脈が拡張して皮膚毛細血管に流す血液量を増やし熱を体外に放出しようとする。また、逆に気温の低い季節に深部体温が下がると、細動脈は収縮して皮膚毛細血管の血流を抑えて熱を逃がさないようにする。したがって、気温が高くなる7月頃から手の細動脈は拡張し、その結果、大本の橈骨動脈の血流速度が高くなり、最も気温の高い8月頃にピークとなる。その後、秋に向かって気温が下がり細動脈が収縮することにより、橈骨動脈の血流速度は低くなっていると考えられる。

4.2. 睡眠と橈骨動脈の血流速度

遅延相関分析で相関係数の絶対値が最大となるパラメータは異なるものの、4被験者すべてにおいて、橈骨動脈の血流速度は睡眠時間との間に有意な正の相関を示した(図6)。

一般的に睡眠中は副交感神経の働きが優位となって全身の血管が拡張し、また成長ホルモンが分泌されるために血中脂肪の代謝も促され血流(血行)が良くなる。しかし、睡眠不足が続くと血管が収縮した状態が長くなり、成長ホルモンの分泌、血中脂肪の代謝も抑制されて血流(血行)が悪くなるといわれている。図6に示されている、睡眠を長くとることにより橈骨動脈の血流速度が高くなるという共通した傾向は、この説明と整合がとれるものである。この場合、橈骨動脈の血流に限らず、全身の血流が改善されていると解釈すべきであろう。

なお、相関係数の絶対値が最大となるパラメータが4被験者で異なるのは、遺伝的体質およびその他の生活習慣の差異に基づく個人差と考えられるが、その究明は今後の課題である。

4. 3. 運動と橈骨動脈の血流速度

4 被験者中、2 被験者 (B および C) においては、橈骨動脈の血流速度と歩数の間に有意な正の相関がみられたが、他の 2 被験者 (A および D) においては、逆に有意な負の相関がみられた。一般に歩行やウォーキングのような有酸素運動によって筋肉量は増え、骨格筋ポンプ機能の上昇により全身の血液循環が良くなり血流速度は高くなることが期待される。しかし、被験者 A および D においては、むしろ低くなる傾向がみられた。この原因として、未だ全くの仮説ではあるが、生体に備わる血流配分機能が関係している可能性が考えられる。即ち、被験者にとって強度の大きい歩行やウォーキング習慣により特に大腿筋肉が増強され、そちらへの血流配分が大きくなることにより、掌への血流配分が抑制される可能性である。

これらは、生活習慣や体格・体質などにより個人差が大きく出てくることが予想され、今後のさらなる研究課題である。いずれにしても、運動と血流の関係は睡眠と血流の関係に比べて複雑であることを、研究結果は示唆している。

4. 4. 個人健康管理手法としての可能性

被験者が 4 人と少なく、データ解析結果も不明な点は未だ多いが、日毎粒度で時系列的に末梢血流速度 (本研究では橈骨動脈が対象) を計測することで、個人毎に、1) 体温調節機能の可視化、2) 睡眠と血行の関係把握、3) 例えば「ごぼう茶摂取」のような血行改善チャレンジ効果の確認、などができる可能性が示唆された。今後さらに被験者数を増やし、ケーススタディを積み重ねる必要があるが、在宅でも使用可能な無侵襲・簡便性を備えた、超音波ドップラー血流計測は、冷え性など特に血液循環系の

不安を持つ個人にとって、一つの有用な健康管理手段になりうるものと考えられる。

5. まとめ

4 人の「冷え性」に悩みをもつ被験者を対象に、ポケット型超音波血流計を在宅で用いて手首の橈骨動脈血流速度を日毎粒度で半年間計測・取得したデータを基に、睡眠、運動など生活習慣との関係を分析した結果を以下にまとめる。

- (1) 4 被験者すべてにおいて、気温の高い夏季期間に血流速度の増加が観測され、生体に備わる深部体温調節機能の表れと考えられた。
- (2) 4 被験者すべてにおいて、血流速度と睡眠時間の間に有意な正の相関がみられ、睡眠による血液循環の改善効果と考えられた。
- (3) 血流速度と歩数の間に、2 被験者で有意な正の、他の 2 被験者で負の相関がみられ、未だ全くの仮説ではあるが、原因として運動による血液循環の改善と筋肉への血流配分の兼ね合いによる可能性が考えられた。
- (4) 1 被験者が試みた継続的「ごぼう茶」摂取により血流速度が高くなる有意な相関がみられた。

これらの結果により、在宅での超音波による末梢血管血流計測は、特に「冷え性」に悩む個人の健康管理の 1 手段として有効である可能性が示唆された。

謝辞

本研究にご協力いただいた 4 人の被験者 (本学医療情報学科 4 年生 (当時)) に深く感謝しま

す。

なお、本研究は文部科学省科研費(課題番号：26350868)の助成を受けている。また、日本データベース学会と日立製作所による日立 HiRDB アカデミック制度の適用を受けている。

参考文献

- 1) Kanto E.; Augustyniak P.; Markiewicz M.; Prusak D..Monitoring activities of daily living based on a wearable wireless body sensor network. Proc. 36th Annual International Conference of the IEEE EMBS. 2014. p.586-589.
- 2) Zapata B.C.; Ninirola A.H.; Fernandez-Aleman J. L.; Toval A..Assessing the privacy policies in mobile personal health records. Proc. 36th Annual International Conference of the IEEE EMBS. 2014. p.4956-4959.
- 3) テクノ・ヘルス・コミュニケア・フォーラム. 平成 9 年度厚生科学研究費, 医療機器・情報システムの動向に関する調査研究—21 世紀に向けた医療機器・情報システム開発の在り方に関する研究—報告書. 1998-2004.
- 4) 西川桃子, 我部山キヨ子. 冷え症の定義, 測定, 特徴および妊婦の冷え症に関する文献レビューと今後の研究の方向性. 京都大学大学院 医学研究科 人間健康科学系専攻紀要 健康科学. 2009, (6), p.57-65.
- 5) 竹内裕之, 児玉直樹. 生活習慣と健康状態に関する時系列データ解析手法の開発. 第 19 回データ工学ワークショップ DEWS 2008 論文集. 2008, E1-5.
- 6) 宮内喜男, 駒井康伸, 山形高志, 前野幹幸, 永井彰, 伊藤元彦. 高齢患者における末梢循環障害とその早期診断法の検討. IRYO. 1994, 48(10). p.789-794.
- 7) 前田順一, 竹宮 隆. レーザー組織血流計及び双方向性超音波血流計による位置負荷—末梢循環応答の分析. 体力科学. 1990, 39. p.106-113.
- 8) 片岡幸雄, 武田直子, 佐野裕司. 若年者および中高年者における 60 分間の普通歩および速歩が血圧および末梢循環に及ぼす影響. 千葉大学教育学部研究紀要. 2001, 49(III) : 自然科学編. p.75-83.
- 9) Takeuchi Hiroshi ; Kodama Naoki ; Takahashi Shingo. Time-series data analysis of long-term home blood pressure measurements in relation to lifestyle. Proc. 15th World Congress on Health and Biomedical Informatics. 2015. p.751-755.