

図 4. 平成 24 年度の研究の全体像

#### A. 研究目的

全身動脈系の集中定数血流モデルを構築し、腕部血流に影響を与えると考えられる血管断面積及び末梢血管抵抗を変化させ、これらが全体の血流分布に与える影響を解析した。

#### B. 研究方法

全身動脈系集中定数モデルは、上流から、左心室出口に対応する供給圧力源、剛体の直円管で近似した動脈および線形抵抗で近似した末梢血管抵抗から構成されている(図5)。左腕動脈に注目し、その平均断面積および末梢血管抵抗の変化が全身の血流分布に与える影響を解析した。

#### C. 研究結果

図7において、流量 $Q_1$ は、固定値として与えているため変化しない。また、 $Q_3 \sim Q_8$ は、 $A_2$ の変化に対し、0.3%以下の変化しか示さないが、 $P_2$ は、 $A_2$ の10%の減少に対して1.3%減少し、10%の増加に対して1.0%増加した。

図8において、流量 $Q_3 \sim Q_8$ は、末梢血管抵抗の10%の減少に対し2.1%減少し、10%の増加に対し2.4%増加した。一方、 $Q_2$ は、末梢血管抵抗の10%の減少に対し8.0%増加し、10%の増加に対し7.0%減少した。

#### D. 考察

左腕動脈断面積を変化させた場合、各圧力および流量の変化は最大で1.3%であったことから、血管断面積の変化が血流分布に与える影響は小さいといえる。本モデルの動脈系は分岐をもつため単純に定量的な比較はできないが、管摩擦抵抗係数の差が血行動態への寄与の大きさに関連すると考えられる。

#### E. 結論

刺鍼に伴う血流分布の変化を解析するために全身動脈系の集中定数近似血流モデルを構築した。血管径が血流分布に与える影響は小さく、刺鍼に伴う血流量変化は末梢血管抵抗に起因すると示された。この結果は、実験計測結果と一致しており、本モデルにより鍼治療による血流分布の変化を再現できることを示唆している。

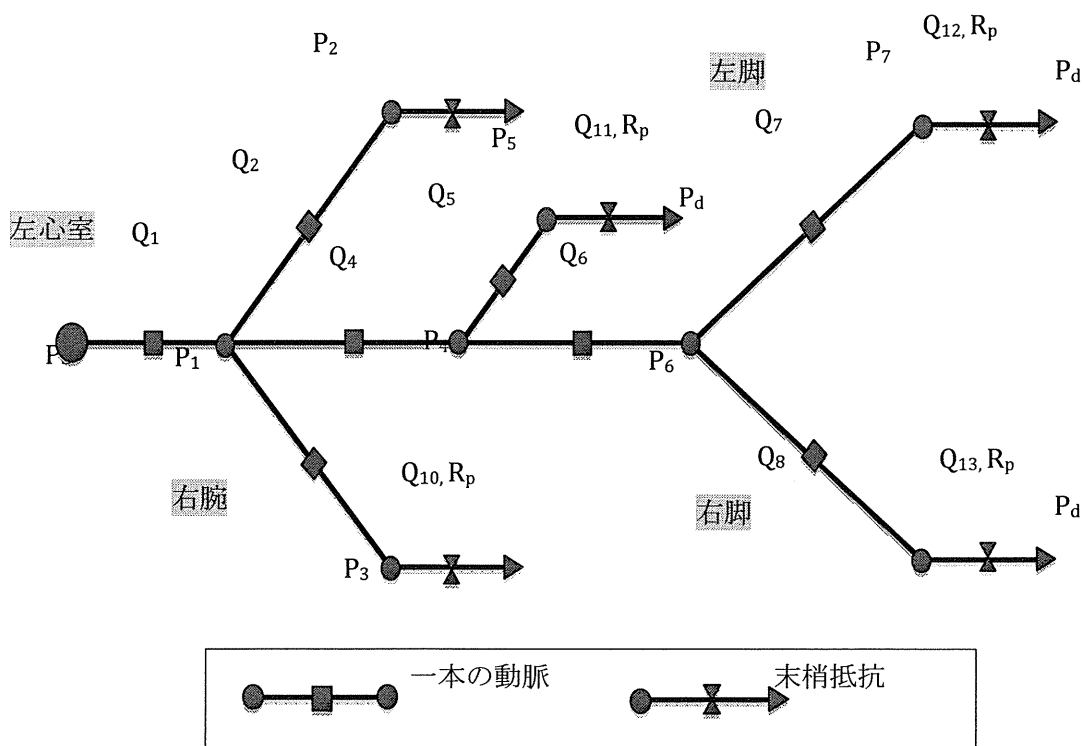


図5. 全身動脈系集中定数血流モデル

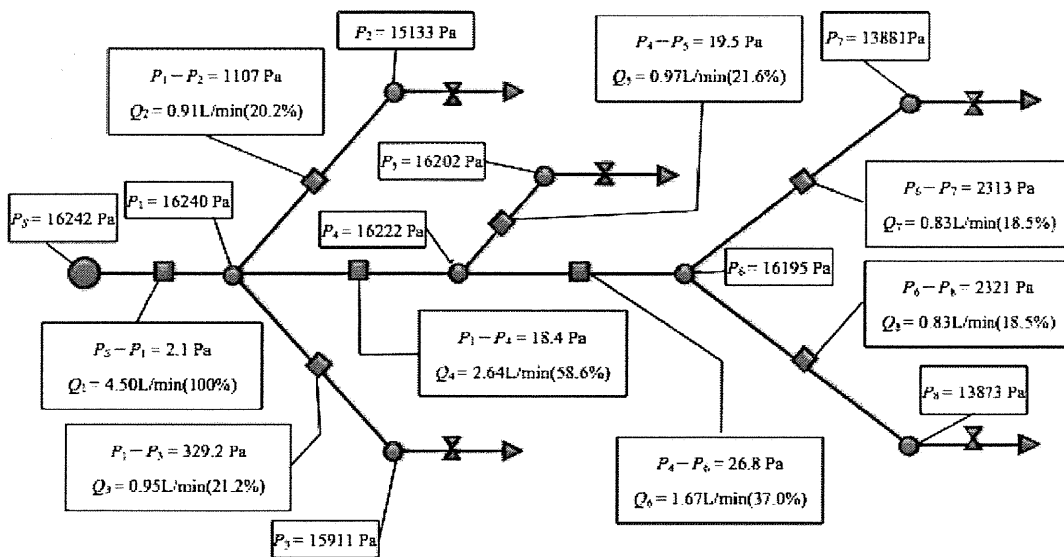


図6. 基準値の血管寸法の形状における血流分布

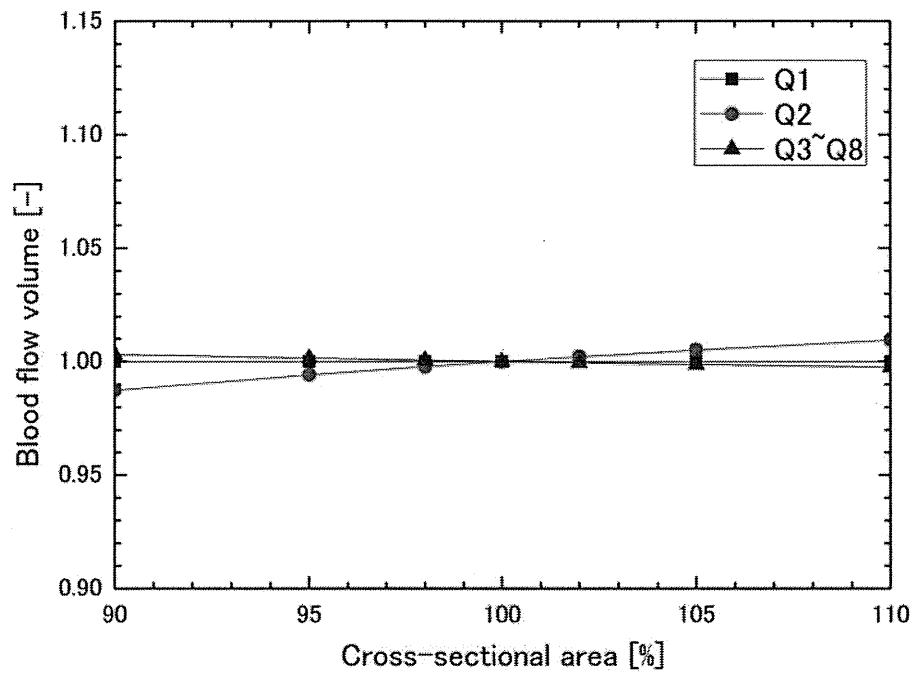


図7. 左腕動脈断面積  $A_2$  を変化させた場合の流量の変化

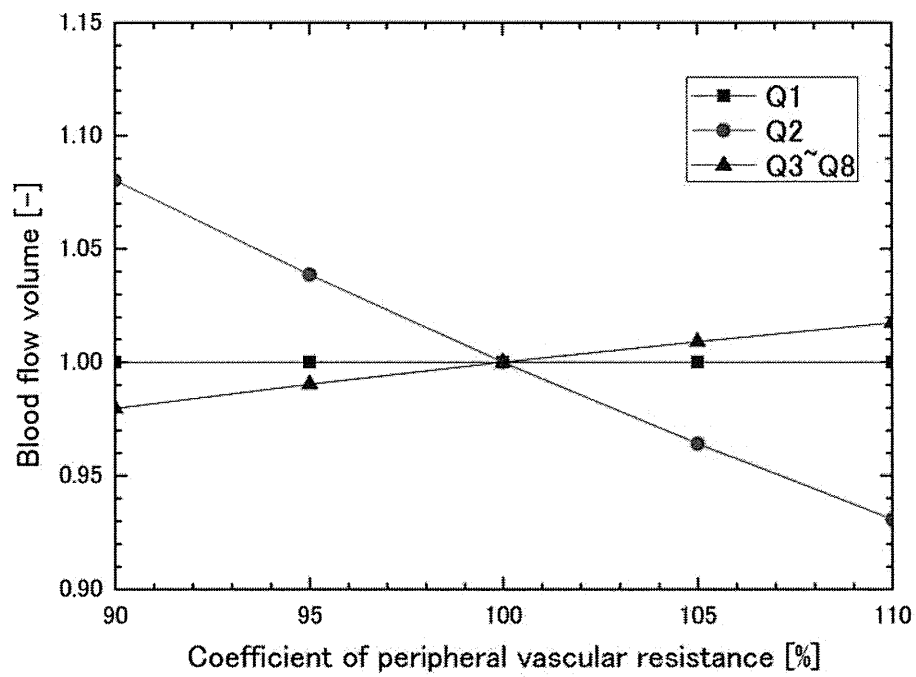


図8. 左腕末梢血管抵抗係数を変化させた場合の流量の変化

平成 22 年度 橈骨動脈血流量のゆらぎ解析

平成 23 年度 超音波診断装置による血流量計測の自動化、  
パワースペクトルの推定

平成 24 年度 鍼刺入時における皮膚表面輝度信号の解析

分担研究者 吉澤 誠 東北大学サイバーサイエンスセンター 教授

#### 研究要旨

自律神経系が支配する循環制御系のパラメータのうち血流量は、心拍数および血圧とならび重要な因子であるにもかかわらず、その計測の困難さから解析の対象となることが少なかった。本研究では、脈診の対象部位である橈骨動脈における血流量を超音波診断装置により非侵襲的に計測し、その周波数スペクトルを求めることにより、自律神経系から見た脈診の科学的評価の可能性を検討した。その結果、血流量から心拍数までの相互相関係数から判断して、約 5 秒遅れて負の相関があることが分かった。

本研究では、超音波診断装置により、主として橈骨動脈の平均血流速度と血流量を拍毎に計測していたが、その出力形式がディスプレイ表示のみであり、その値を視認して記録する必要があった。この作業は転記時に人為的な誤りが生じる可能性が高かった。超音波診断装置からのビデオ信号出力をキャプチャして、画像ファイルとし、自動文字認識を行うことにより、表示された数値をファイルに記録するシステムを作成した。

さらに、この情報について、血流量の周波数スペクトル解析を連続的に行うプログラムを作成した。橈骨動脈の血流量のパワースペクトルは、周波数が 0.1Hz において鍼の刺入前より刺入後の平均値が有意に小さかった。このことは、0.1Hz 付近の Mayer 波が小さくなったことを意味し、鍼刺入が交感神経系活動を抑制した可能性を示唆するものである。

多くの場合、循環系パラメータの計測はセンサを身体に装着する方式によりなされる。このこと自体が被験者に緊張や不安のような心理的な影響を与え、心拍数の変動として現れる場合がある。このため、得られた心拍数変動が鍼刺入の効果なのか計測自体の効果なのかを区別しにくい難点がある。被験者にできるだけ計測行為を意識させないようにするために、通常のカメラで顔や手の動画を撮影し、これを画像処理することにより、顔や手などの 2 つの脈波信号に相当する皮膚表面輝度信号から、心拍間隔ばかりでなく、それらの極小値や瞬時振幅を求めるとともに、脈波伝搬時間の情報に対応する瞬時位相差などを拍毎に抽出する方法を提案した。通常照明環境下フレーム周波数 166fps で撮影した映像であっても、鍼刺入に対する過渡的な変化が把握できる可能性があることが確認された。

## 平成 22 年度 橈骨動脈血流量のゆらぎ解析

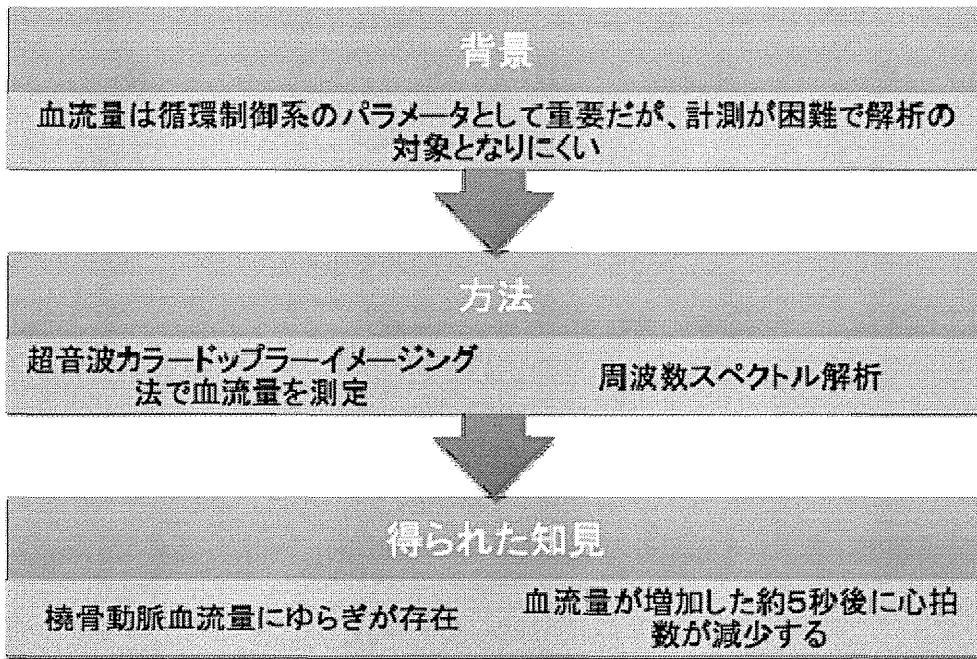


図 1. 平成 22 年度の研究の全体像

### A. 研究目的

自律神経系が支配する循環制御系のパラメータのうち血流量は、心拍数および血圧とならび重要な因子であるにもかかわらず、その計測の困難さから解析の対象となることが少なかった。

そこで本研究では、脈診の対象部位である 橈骨動脈における血流量を超音波診断装置により非侵襲的に計測し、その周波数スペクトルを求めることにより、自律神経系から見た脈診の科学的評価の可能性を検討した。

### B. 研究方法

図 4 は、心臓血管系を、心拍数 HR と血管抵抗 ( $R$  [mmHg min/L]) を入力とし、血圧 BP と心拍出量 ( $CO$  [L/min]) を出力とし 2 入力-2 出力系とみなすようなモデルである。このとき、圧反射系は、BP と  $CO$  の両方を独立に調整するように HR と  $R$  の両方をそれぞれ操作するものと考えている。

超音波診断装置のドプラー流速計測機能等を使用して、対象となる血管の心拍数 [bpm]、収縮期血管径 [mm]、拡張期血管径 [mm]、平均血流速度 [cm/s]、血流量 [ml] を 1 拍毎に計測する。

各データにつき 3 次のスプライン補間を使って連続関数に直し、これを 0.05 秒 (20Hz) 毎

に再サンプリングすることにより等間隔データを得る。次に、信号の超低周波成分を除去するために線形トレンド成分を除去する。また、12.8 秒 (256 点) のデータを Hamming 窓で切り出し、これに対して FFT を行ってパワースペクトル (periodogram) を求めこれを 0.3 秒ずつずらしていくことで時間周波数解析を行う。

さらに、LF 成分の周波数範囲を 0.05Hz ~ 0.15Hz とし、HF 成分の周波数範囲を 0.15Hz ~ 0.5Hz と設定し、この区間にわたるパワースペクトルの平均値の平方根を求め、それぞれ、LF 成分および HF 成分とする。両者の比を LF/HF で表す。

### C. 研究結果

ある健常者において、心拍数の時系列信号は、このデータの場合、約 20 秒から約 30 秒の間で振幅が小さく平坦な部分が見られ、それより後半では約 5 秒周期のゆらぎが見られる。これに対して、血流量の時系列では、全区間で約 5 秒周期のゆらぎが見られ、それより高い周波数成分が少ないように見える。

心拍数の LF/HF は 1 ないし 6 であり、25 秒のところでも最も大きくなっており、パワースペクトルは 0.05Hz、0.15Hz、0.3Hz にピークを持っているのに対して、血流量の LF/HF は 1 ないし 3 であり、全区間で 2 程度であり、

パワースペクトルは 0.15Hz だけに大きなピークを持っている。

#### D. 考察

正弦波のような線スペクトルの推定をすることが目的の場合、ARモデルの当てはめをするようなパワースペクトルの推定法よりも、FFTの結果をそのまま使う periodogram を用いたほうがよいことがわかる。

血流量から心拍数までの相互相関係数を計算すると図5のようになり、約5秒遅れて負の相関がある。このことは、血流量が増加してから約5秒後に心拍数が減少するという負帰還の作用があることを示唆している。このことは、今後、

脈診の対象部位である橈骨動脈における血流量と心拍数の間の関係性を分析することで、自律神経系の働きである圧反射系の特性が定量化できることを意味する。

#### E. 結論

脈診の対象部位である橈骨動脈における血流量を超音波診断装置により非侵襲的に計測し、その周波数スペクトルを求めることにより、自律神経系から見た脈診の科学的評価の可能性を検討した。

その結果、血流量から心拍数までの相互相関係数から判断して、約5秒遅れて負の相関があることが分かった。

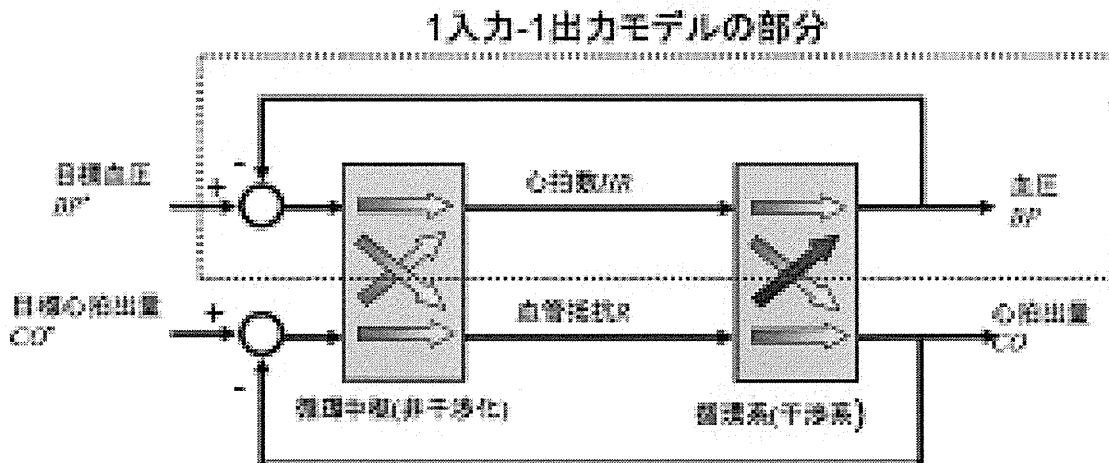


図2. 循環制御系の2入力-2出力系モデル

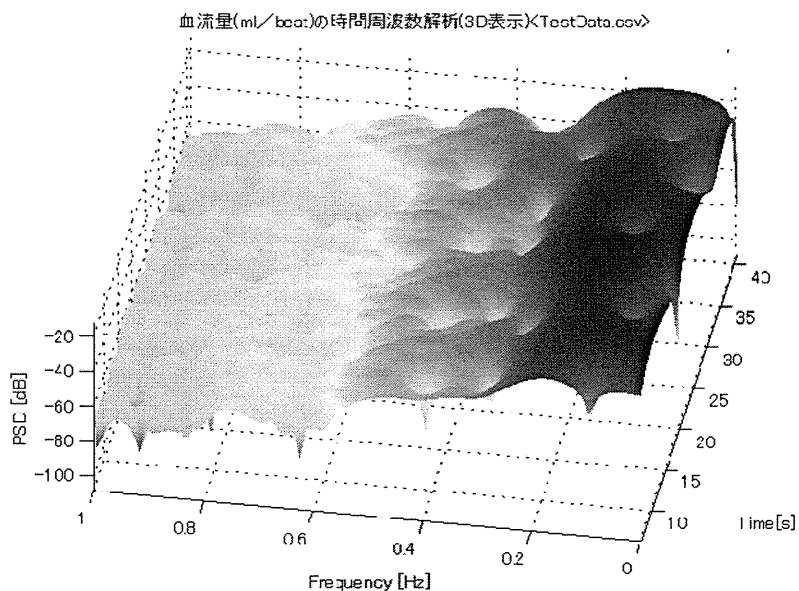


図3. 血流量の時間周波数解析 (3D 表示)

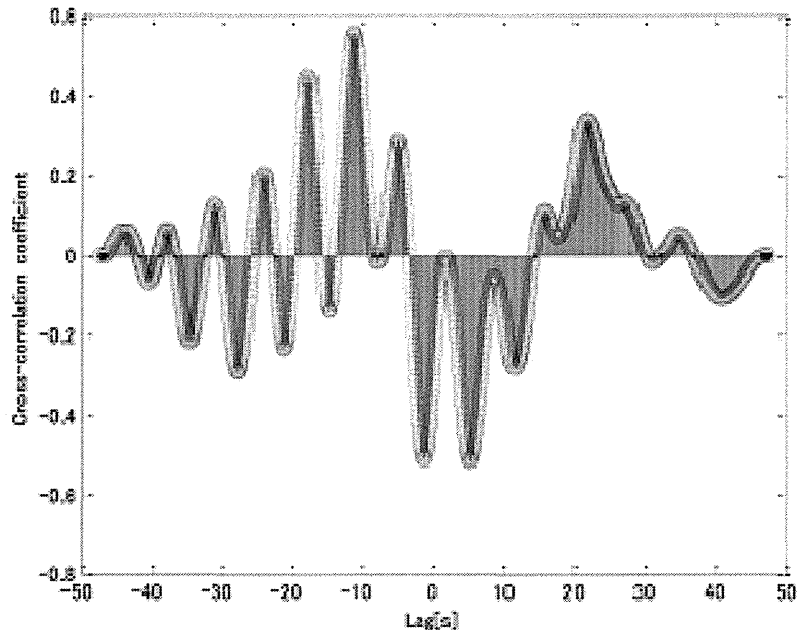


図4. 血流量から心拍数までの相互相関係数

## 1. 超音波診断装置による血流量計測の自動化

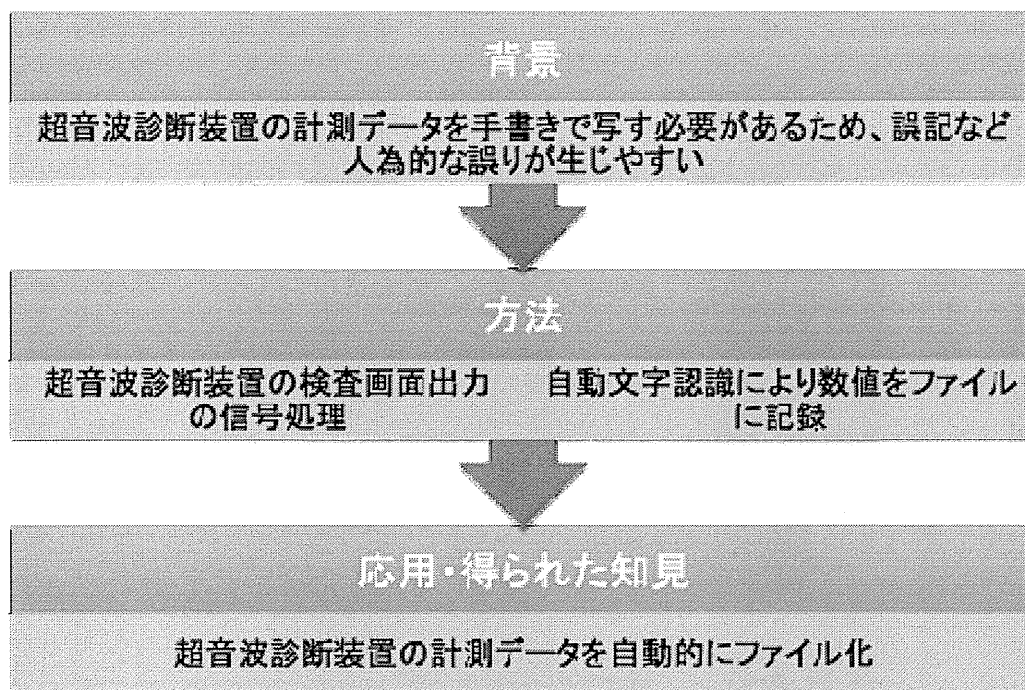


図 4. 平成 23 年度の研究 1 の全体像

### A. 研究目的

これまで本研究では超音波診断装置により、主として橈骨動脈の平均血流速度と血流量を拍毎に計測していたが、その出力形式がディスプレイ表示のみであり、その値を視認して記録する必要があった。この作業は非常に手間がかかるものであり、ディスプレイ読み取りからの転記時に人為的な誤りが生じる可能性が高かった。

本研究では、超音波診断装置からのビデオ信号出力をキャプチャして、画像ファイルとし、この中の対象部分の画素情報に対して自動文字認識を行うことにより、表示された数値をファイルに記録するシステムを作成した。

### B. 研究方法

超音波診断装置の映像出力用 S 端子の出力をビデオキャプチャ(I・O データ社 GV-USB2)によってデジタル画像化し、これをパソコンにおいて処理する。S ビデオ映像信号に基づき画面をキャプチャし、720×480 画素のビットマップファイル(BMP)形式でファイル保存をする。

(図 5) BMP ファイルを読み込み、画像をモノクロ 2 階調化する。次に、読み取りの対象とするエリアを自動的に切り抜く。テンプレートマ

ッチング法の画像マッチングにより数字を自動認識する。全画像ファイルに対して実行した後、結果をテキストファイルとして出力する。

### C. 研究結果

本システムは現在のところ動作テスト中であり、文字認識結果を評価するまでには至っていない。その理由は、超音波診断装置からの出力が S ビデオ映像信号であり、アナログ信号のためゆらぎが大きく、同一画面上での対象部切り出しが安定しないことと、画素のボケが大きいところにある。

### D. 考察

アナログ信号としてのゆらぎが加わるので、対象区間の切り出しや画素輝度の不安定性が避けられない。しかし、対象は確定的なフォントの文字であり、手書き文字のような任意性はほとんどない。したがって、上記の問題が改善されれば文字の認識率はかなり高くすることができると思われる。



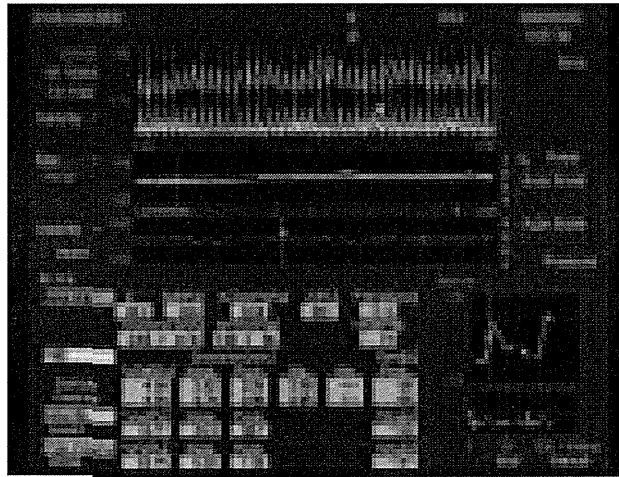
## E. 結論

超音波診断装置からのビデオ信号出力をキャプチャして、画像ファイルとし、この中の対象部分の画素情報に対して自動文字認識を行うこ

とにより、表示された数値をファイルに自動的に記録するシステムを作成し、作業効率を大幅に向上させた。



図5. ハードウェア構成



2階調化

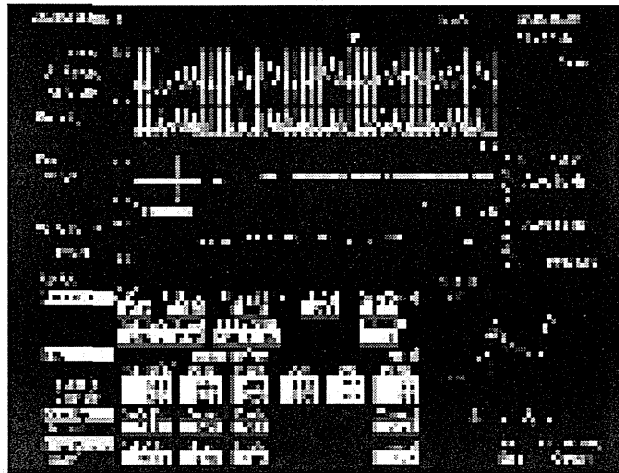
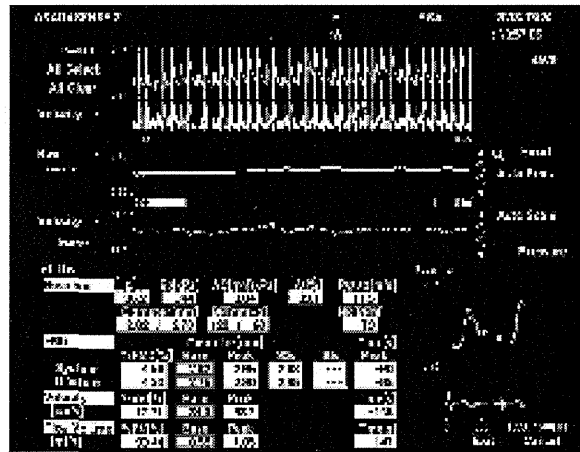


図6. 2階調化



読み取り対象エリアを切り抜き

0.55

各位9×14ドットのデータとして数値認識アルゴリズムへ

図7. 文字認識対象エリアの切り出し

## 2. パワースペクトルの推定

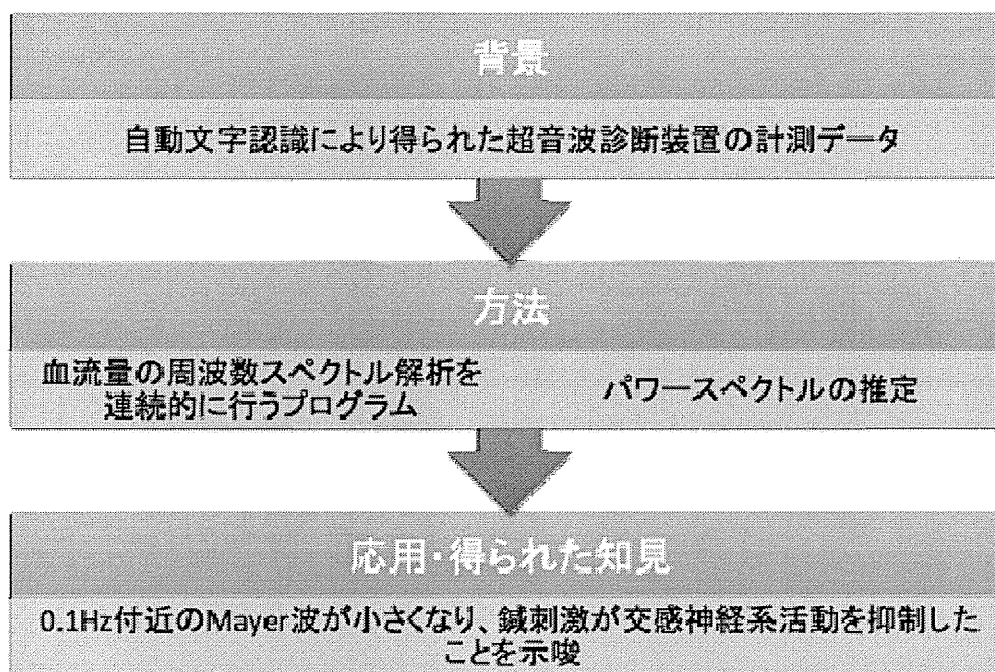


図8. 平成23年度の研究2の全体像

### A. 研究目的

脈診の対象部位である橈骨動脈における血流量の周波数スペクトルに基づいて、自律神経系から見た脈診の科学的評価の可能性を検討した。

### B. 研究方法

超音波診断装置からのビデオ信号出力をキャプチャして生成した情報に基づいて、血流量の周波数スペクトル解析を連続的に行うプログラムを作成した。

### C. 研究結果

心拍数のパワースペクトルを見ると、約0.15~約0.2Hzのパワーが最も強い。これは呼吸性洞性不整脈(呼吸性変動成分;RSA)に対応する成分(以下、HF成分と呼ぶ)であると思われる。一方、約0.06Hz付近のピークはいわゆるMayer波に対応する成分(以下、LF成分と呼ぶ)であると思われる。

### D. 考察

最大値で規格化しない場合の血流量のパワースペクトルを求めたところ、0.1Hzにおいて、刺入前より刺入後の平均値が有意に小さかった(図9)。このことは、0.1Hz付近のMayer波が小さくなったことを意味し、鍼刺入が交感神経系活動を抑制した可能性を示唆するものである。

### J. 結論

脈診の対象部位である橈骨動脈における血流量の周波数スペクトルに基づいて、自律神経活動から見た鍼刺入の効果を検討した。その結果、血流量のパワースペクトルは、周波数が0.1Hzにおいて鍼の刺入前より刺入後の平均値が有意に小さかった。このことは、0.1Hz付近のMayer波が小さくなったことを意味し、鍼刺入が交感神経系活動を抑制した可能性を示唆するものである。

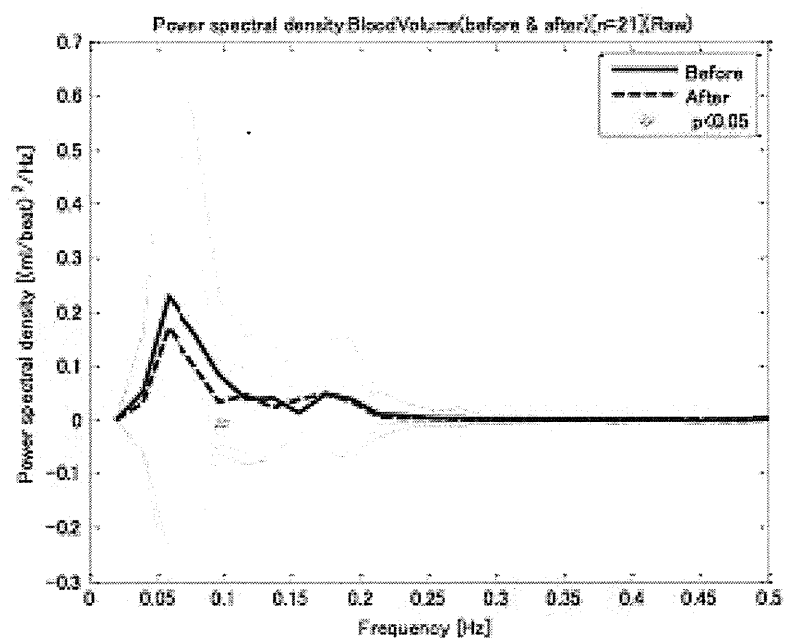


図 9. 規格化しない血流量のパワースペクトルの鍼刺入の前後の比較 (n=21)

## 平成 24 年度 鍼刺入時における皮膚表面輝度信号の解析

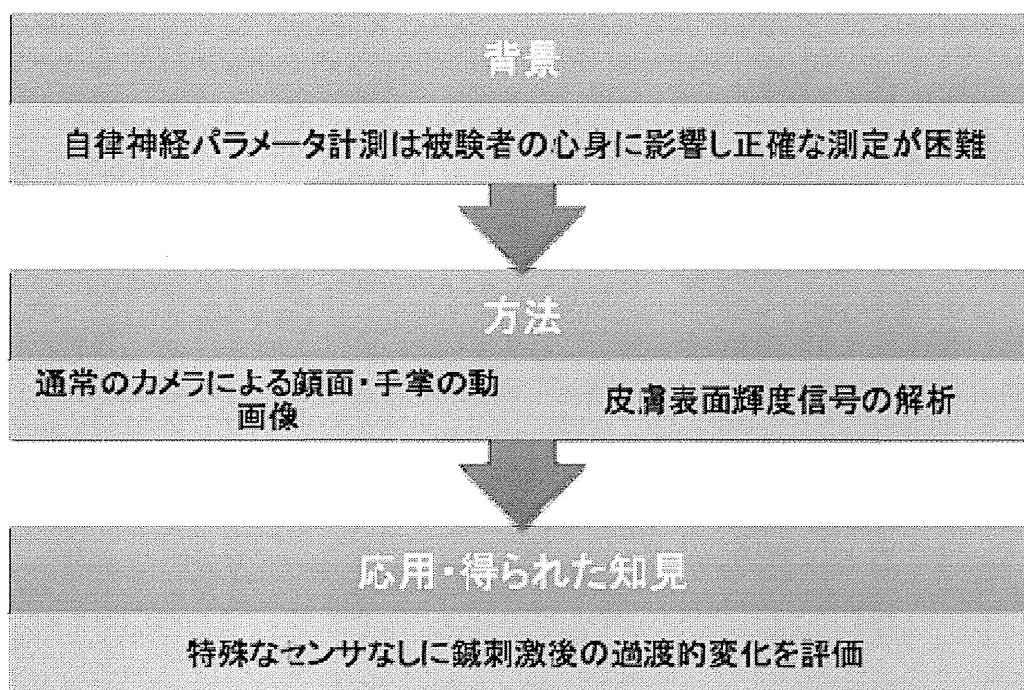


図 10. 平成 24 年度の研究の全体像

### F. 研究目的

多くの場合、心拍数・血圧・血流量等の循環制御系のパラメータの計測は、センサを身体に装着する方式によりなされてきた。しかし、このこと自体が被験者に緊張や不安のような心理的な影響を与えることがあり、これが心拍数の変動として現れる場合がある。

人間の体表面を撮影した映像信号から心拍数情報を抽出する方法では通常のカメラで撮影した映像信号を処理するだけであるため、単体のビデオカメラではなくても、ノートPCあるいはスマートフォンに内蔵されているビデオカメラからの映像信号が得られればよい。このため、手軽に安価にしかも非接触で心拍数情報が得られる可能性がある。

本研究では、ビデオカメラで撮影した鍼刺激刺入時の顔と手の映像に基づき、心拍数、脈波伝搬時間、脈波極小値などを計測することにより、鍼刺激がそれらに及ぼす影響を検討した。

### G. 研究方法

健常被験者を座位とし、足背部の太衝穴に刺針し、捻転した後置鍼した。

その時、ビデオカメラからパソコンに被験者の映像を取り込む。撮った動画像において、図 11 のように、顔の領域（領域 1）と手のひらの領域（領域 2）の 2 箇所を指定する。このよう

な 2 箇所を指定するのは、心臓に近い部位（顔）の脈波と遠い部位（手のひら）の脈波を得るためである。外部光の変化やカメラの自動光量制御による影響を抑制するために、皮膚以外で第 3 の領域（バイアス領域）を指定し、領域 1 または領域 2 の平均輝度からバイアス領域の平均輝度を差し引いたものを、それぞれ各領域の平均値とする。

各フレームにおいて、R、G、B 成分毎に各領域内の画素値の平均値を計算する。その後、高周波雑音を低減し、さらに直流および低周波成分のゆらぎを除く。

この信号とそのヒルベルト変換のそれぞれの 2 乗値の和の平方根から瞬時振幅を求める。また、同様に両者の比の逆正接から瞬時位相を求める。最後に、顔と手の間の脈波伝搬時間差に対応する情報を求めるために、帯域通過フィルタ通過後の顔と手の信号の立ち上がり時間の差、顔と手の信号の差分の極大点の差、および顔と手の瞬時位相の差を求める。

### H. 研究結果

ヒトの顔を肉眼で観察しても、心拍に由来する脈波を読み取ることはできない。しかし、皮膚が映った映像信号の各フレームで得られる領域内平均値を時系列信号とみなし、この信号に対して心拍周波数（約 1Hz）前後の帯域幅を持つ

帯域通過フィルタを掛けると、心拍に同期した R, G, B 信号が得られた。

#### I. 考察

多くの文献では鍼刺入後に心拍数が減少することが報告されている。しかし、今回の場合、鍼刺入後に心拍間隔が目立って増加する（心拍数が低下する）傾向は見られなかった。

ヒルベルト変換を求めるには FFT と逆 FFT を適用するために、計算量が圧倒的に大きいという欠点がある。

#### J. 結論

通常のカメラで撮影される顔や手の動画を情報処理することにより、顔や手などの2つの脈波信号に相当する皮膚表面輝度信号から、心拍間隔ばかりでなく、それらの極小値や瞬時振幅を求めるとともに、脈波伝搬時間の情報に対応する瞬時位相差などを拍毎に抽出する方法を提案した。

太衝の位置に鍼を刺入した時における上述の各パラメータの時間変動を求めることにより、鍼の影響が確認できるかどうかについて検討した。その結果、通常照明環境下 166fps で撮影した映像であっても、鍼刺入に対する過渡的な変化が把握できる可能性があることが確認された。



図 11. 鍼刺入実験で解析対象とした領域.

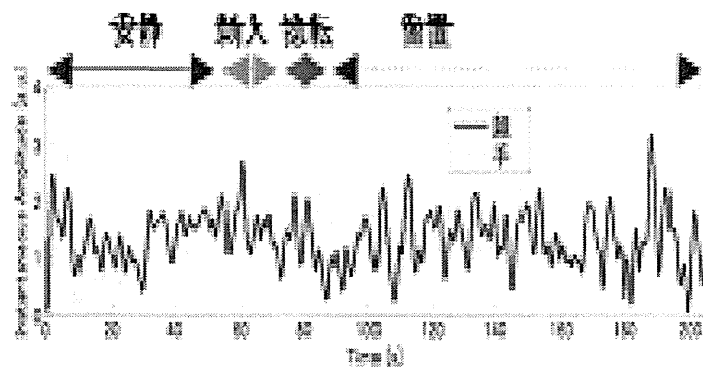


図 12. 帯域通過フィルタ通過後の顔と手の G 信号のヒルベルト変換に基づいて得られた瞬時振幅.



平成 22 年度 自律神経指標と末梢循環解析による血圧反射機能推定

平成 23 年度 自律神経パラメータ計測による統合医療の科学的評価

平成 24 年度 統合医療が心臓血管機能に与える影響を解析するための  
心臓内血流構造解析の研究

研究分担者 山家 智之 東北大学加齢医学研究所 教授

#### 研究要旨

血圧の変動と、動脈の弾性を計測することで、回帰直線から血管の血圧反射の反応性を定量的に診断することができる方法論により動脈血圧反射機能の感受性の定量診断を具現化した。

東日本大震災、高血圧や心不全患者では自律神経機能の障害が観測されており、自律神経機能の定量診断は重要になる。インピーダンス法により心拍出量を計測することで、心収縮性の血圧反射機能の定量診断も具現化した。今後、統合医療の定量評価を目指して、本態性高血圧だけでなく、脳神経性の疾患、自律神経機能疾患、糖尿病などに伴う自律神経障害、循環器疾患等の精密な診断と治療に幅広い応用が期待できる。東日本震災で最も地震、津波、火災の被害が大きかった気仙沼地区などにおいて、「電子診療靴」を用いて被災地におけるストレス、自律神経機能障害の臨床試験に着手を開始しており、臨床的な有効性の確認が期待される。

脈診を客観的、定量的に評価するため「脈診機」を開発し、検討した。

エコーダイナモグラフィにより心臓の拡張と収縮は、左室内血流動態という新たな評価指標により互いに連関していることが判明し、流軸上速度分布評価と渦流評価が収縮能、拡張能の新たな指標となりえる可能性が示された。

#### 研究協力者

東北大学加齢医学研究所

金野敏、白石泰之、仁田新一

東北大学大学院医学系研究科

上月正博

東北大学サイバーサイエンスセンター

吉澤誠

東北大学大学院工学研究科

杉田典大

福島大学理工学部

田中明

東北厚生年金病院循環器センター

山口済、片平美明

宮城社会保険病院循環器科

秋野能久

宮城県立循環器呼吸器病センター

柴田宗一、渡辺誠、三引義明、大沢上、佐藤尚

東北労災病院勤労者予防医療センター

宗像正徳

仙台市立病院循環器科

八木哲夫

## 平成 22 年度 自律神経指標と末梢循環解析による血圧反射機能推定

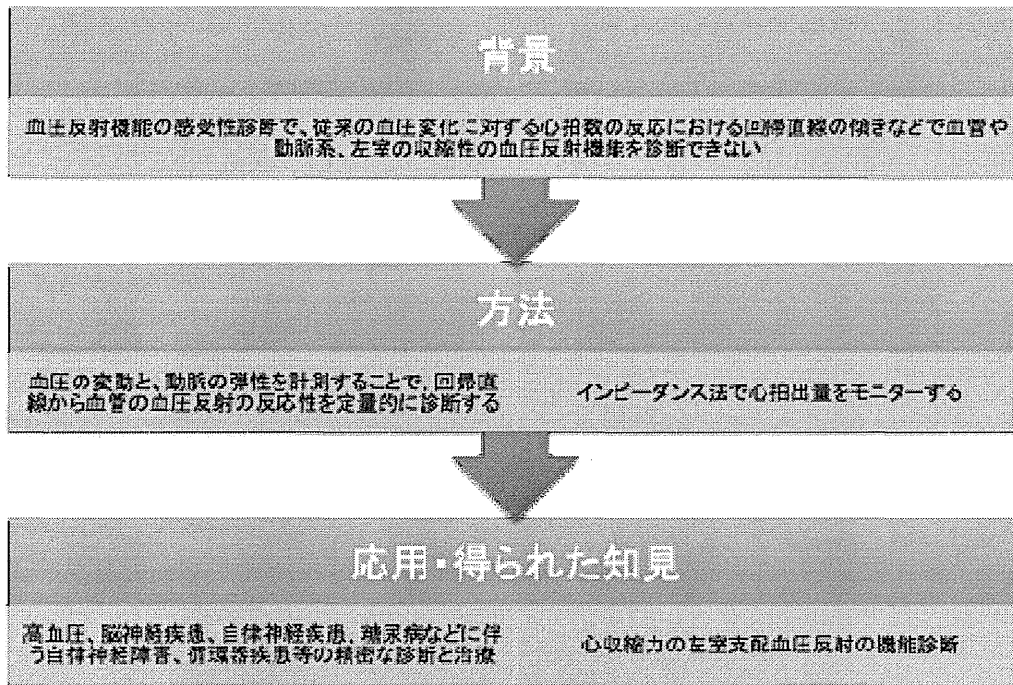


図 1. 平成 22 年度の研究の全体像

### A. 研究目的

高血圧や心不全患者では自律神経機能の障害が観測されており、自律神経機能の定量診断は重要なフォローアップのパラメータになる。その定量的診断を心拍数だけでなく、動脈系、心収縮力の血圧反射機能の感受性を定量的に診断することができる全く新しい血圧反射機能測定装置をもちいて検討する。

### B. 研究方法

心電図、あるいは心音図、及び、各動脈の脈波などによる脈波伝播速度の計測を行い、血管の弾性を診断し、血圧の変動に対する血管弾性の変動の反応を計測し、その回帰直線から血管の血圧反射機能を定量的に診断する。更に、インピーダンス法で心拍出量をモニターすることで、心収縮力の左室支配血圧反射の機能診断おこなう。

### C. 研究結果

臨床試験において健常者に比べ、高血圧を持つ症例においては、心臓の血圧反射機能と動脈の血圧反射の感受性が共に低下している傾向が観測されており、高血圧の病態を形成する一部になっている可能性が考えられた。

### D. 考察

今後、高血圧だけでなく脳神経疾患、自律神経疾患、糖尿病などに伴う自律神経障害、循環器疾患等の精密な診断と治療に幅広い応用が期待できる。

### E. 結論

血圧の変動と、動脈の弾性を計測することで、回帰直線から血管の血圧反射の反応性を定量的に診断することができる方法論により動脈血圧反射機能の感受性の定量診断を具現化した。

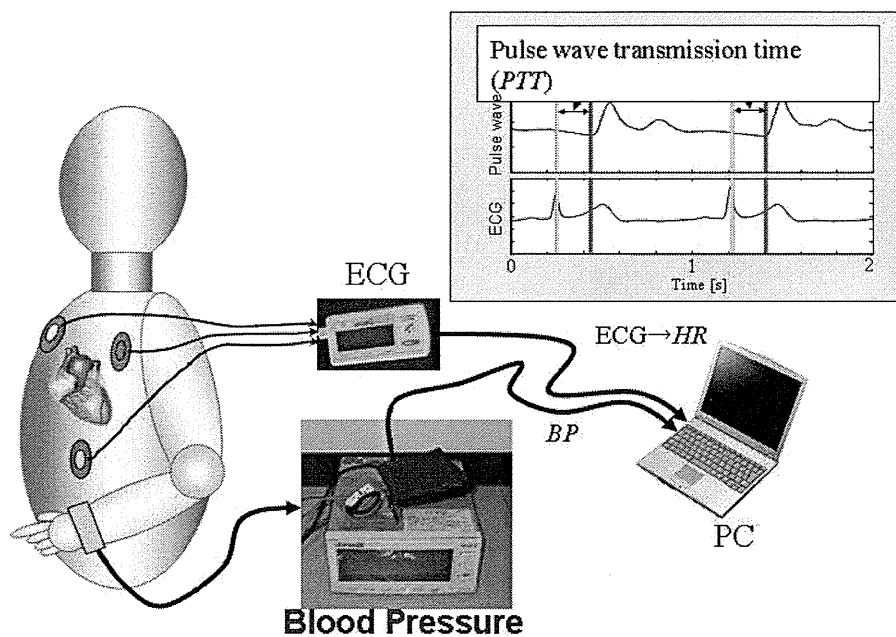


図2. 動脈の血圧反射機能診断装置の測定システムの一形態。心電図のR波から、橈骨動脈の脈波の立ち上がりまでの時間遅れまでのタイムラグにより、脈波伝播時間 (Pulse wave transmission time ; PTT) が計算される。

### Sub2-Supine

氏名: Sub2  
 検査日: 2007/02/07  
 FileName = PAT070207\_sub2carri

[HR]  
 Mean(Std) 64.9 (1.9)

[BP]  
 Mean(Std) 106.0 (5.0)  
 Max/Min 137/ 85

[PTT]  
 Mean(Std) 197.6 (4.3)

RSO 0.00  
 CVRR 2.92  
 LF/HF(HR) 2.25  
 $\alpha$ LF 4.88  
 $\alpha$ HF 4.29

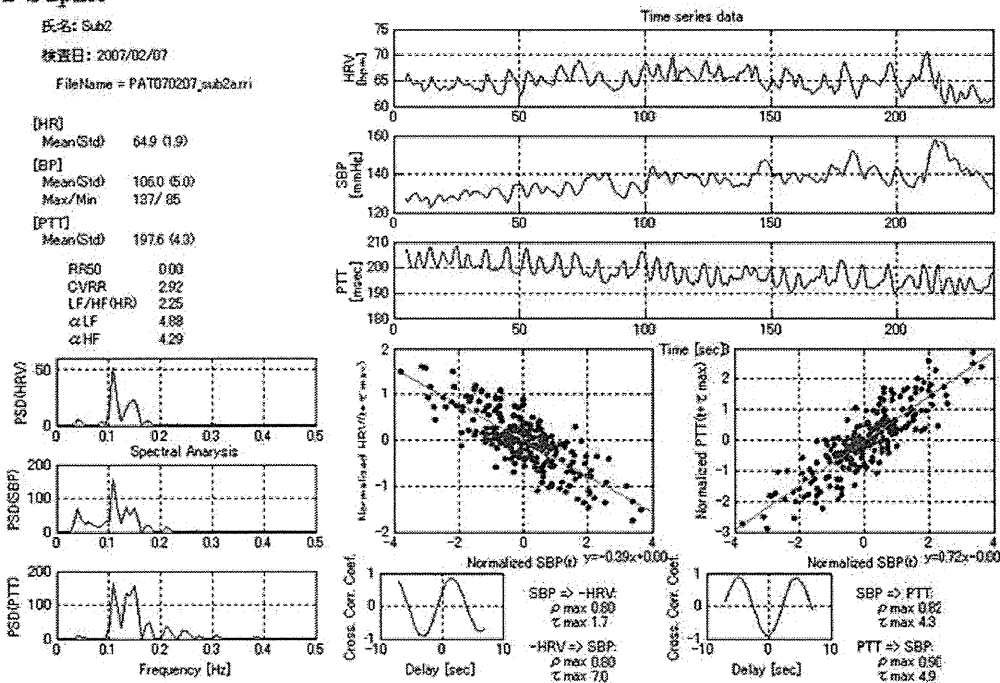


図3. 心臓と動脈の血圧反射機能診断装置の検査結果の一例。被験者の心拍、血圧、脈波伝播時間の時系列と、それぞれの時系列のスペクトル解析結果。心臓と動脈の血圧反射機能の回帰直線が右下に提示されている。

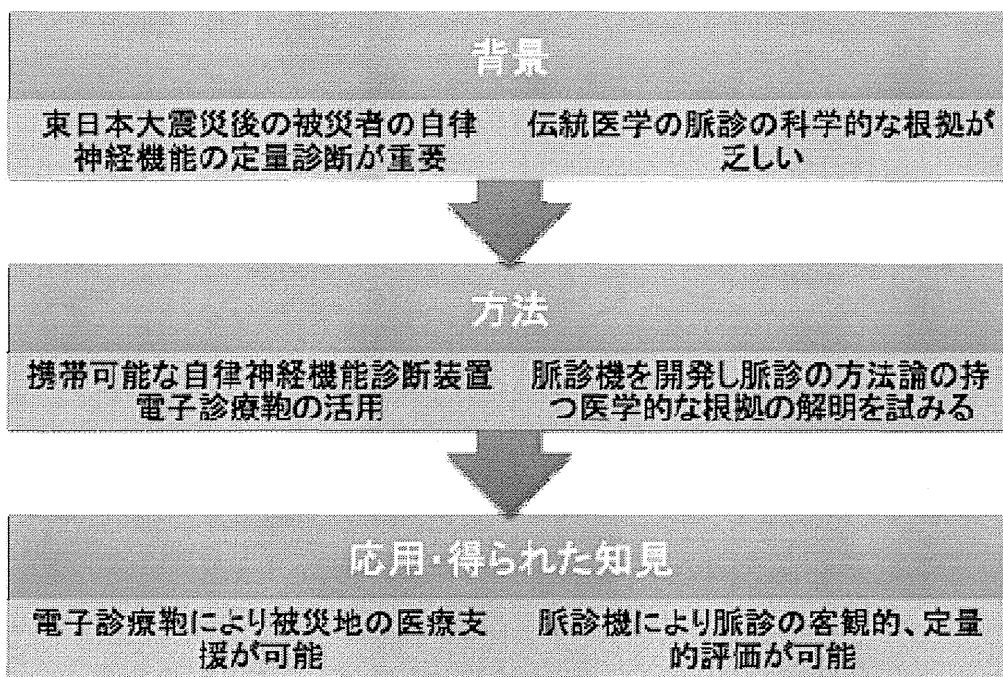


図 4. 平成 23 年度の研究の全体像

#### A. 研究目的

2011年3月11日、東日本震災の被災地では心血管イベントが多発し、改めて自律神経機能診断による心血管系機能、凝固機能診断の重要性が指摘される結果となった。改めて自律神経機能診断による心血管系機能、凝固機能診断の重要性が指摘された。地震、津波、火災、および原発事故の複合震災に襲われた現地では、壊滅した病院診療所の支援策として遠隔医療が強く求められる結果になった。われわれは電子診療靴を用いて医療支援をした。

また、伝統医学において重要な診断技術である脈診はその科学的エビデンスに乏しいため、機械化を試み脈診を客観的、定量的に検討した。

#### B. 研究方法

大震災被災地において携帯可能な自律神経機能診断装置「電子診療靴」の臨床展開を試みた。

脈診を定量的、客観的に評価するための「脈診機」を開発し、心臓の前負荷、後負荷を定量的に再現性を持って変動させることが出来るモック循環回路を用い、脈診によって橈骨動脈に加えられる側面圧力と計測波形の定量的な再現を試みた。さらに、人体の脈の時系列波形に対して、非線形力学理論と用いたカオス解析を行い、フラクタル次元解析などを行った。

#### C. 研究結果

心拍変動のパラメータや、心拍変動、血圧変動のスペクトル解析による自律神経機能評価だけでなく、脈波伝播時間のスペクトル解析も行うことが出来る。動脈系のゆらぎ解析は過去に報告がなく、地域性反応がある自律神経系における新しい機能診断として将来性が注目される。

脈診機をもちいることで、末梢へ脈波波形が伝達するにつれて、複雑性の構造力学が多次元化しているのが観測されており、高次元の非線形力学系が関与するカオス的なダイナミクスが、より複雑な力学構造で具現化されていることがわかる。

#### D. 考察

仙台市の救急車、宮古島などの遠隔離島などにおいて、電子診療靴の救急情報転送がトライアルされており、良好な結果が得られている。すなわち開発した電子診療靴は、救急現場や、在宅医療への展開はすでに担保されたと判断されている。

臨床に普及できる脈診の機器開発を試みている。