

図 2: 上腸間膜動脈の灌流領域。上腸間膜動脈は、十二指腸上部以外の小腸全体に血液を供給する。また、回盲部や上行結腸、横行結腸にも血液を供給する。(文献 20 より改変)

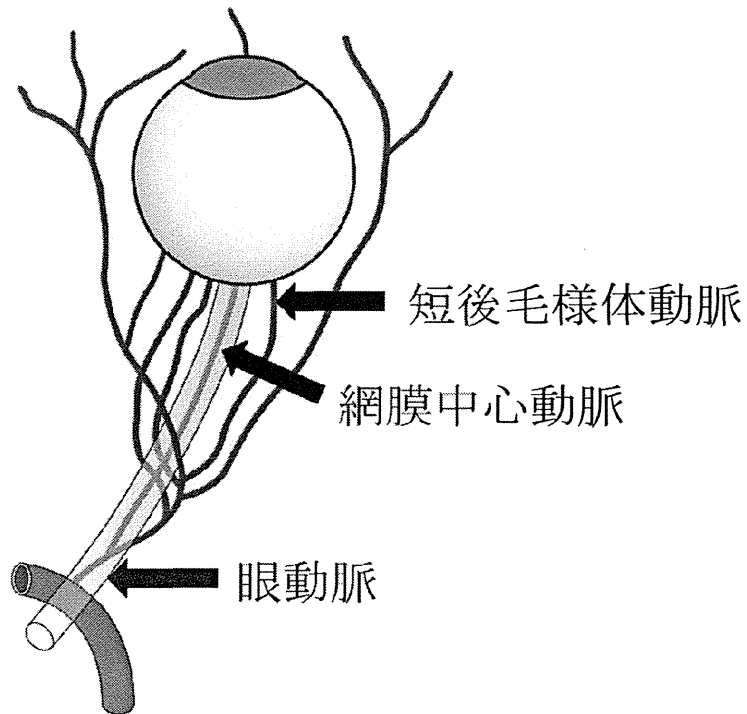


図 3: 眼球後動脈の分布。超音波ドプラを用いて、眼動脈、網膜中心動脈、短後毛様体動脈の血流測定を行なう。

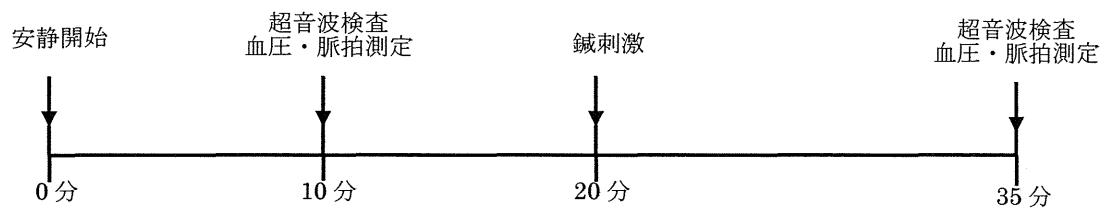


図 4: 実験プロトコル。10 分間の安静の後、血圧、脈拍、超音波検査を行なう。その後、両側の足三里穴に鍼刺激を行なう。鍼刺激から 15 分後に再度、血圧、脈拍、超音波検査を行なう。



図 5: 超音波診断検査の様子。エコープローブは 5MHz、コンベックスタイプを使用。

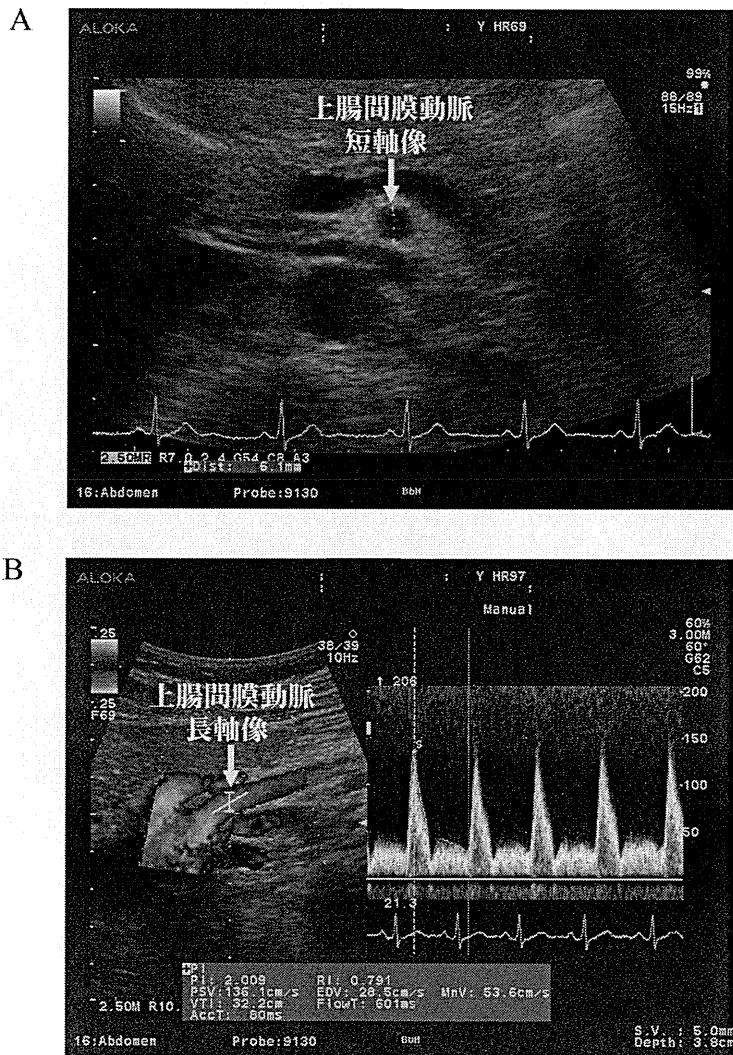


図 6:超音波診断装置による血流測定画像。A. 上腸間膜動脈の短軸像を描出し、血管径を測定。B. 上腸間膜動脈の長軸像を描出し、パルスドプラにて血流速度を測定。

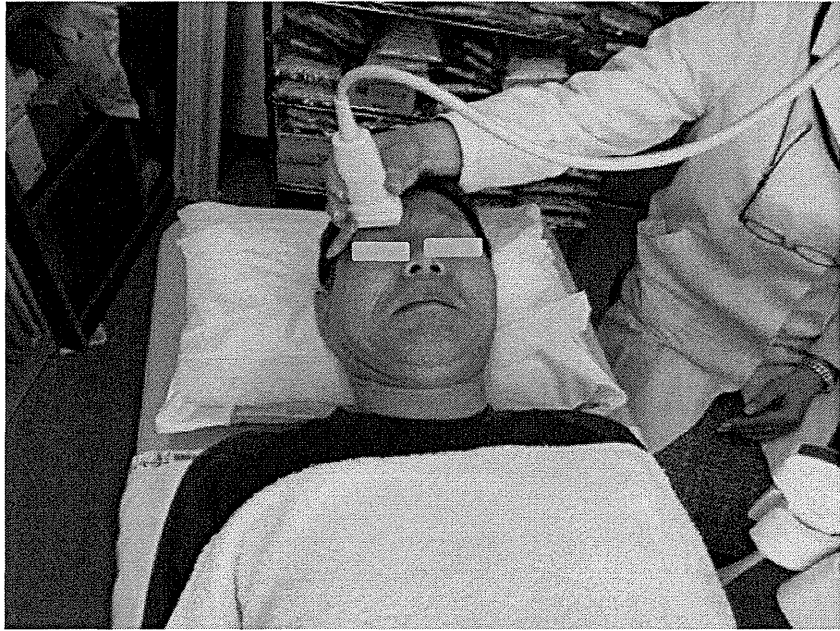
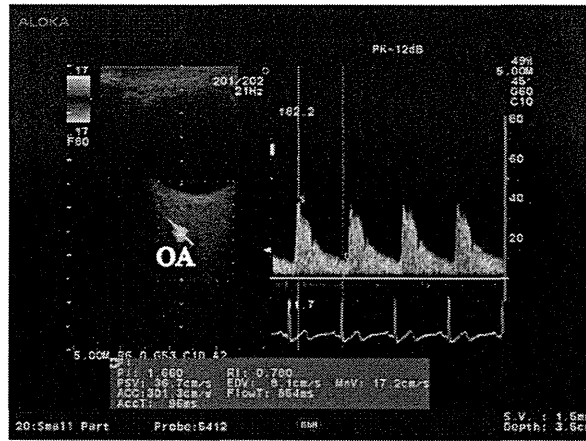
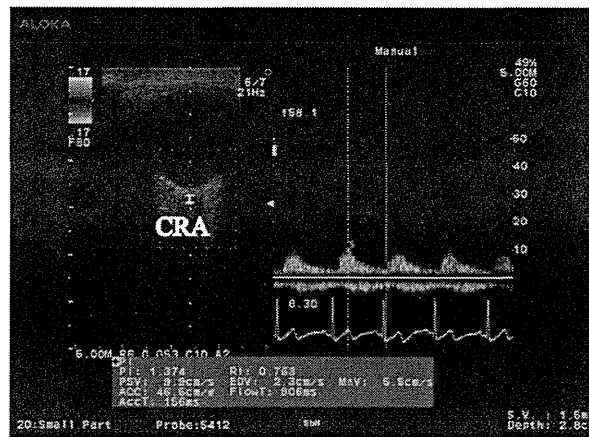


図 7: 眼球後動脈の超音波測定の様子。エコープローブは 13MHz、リニアタイプを使用。上眼瞼から、眼球を圧迫しないように注意しながら検査を行なう。

A



B



C

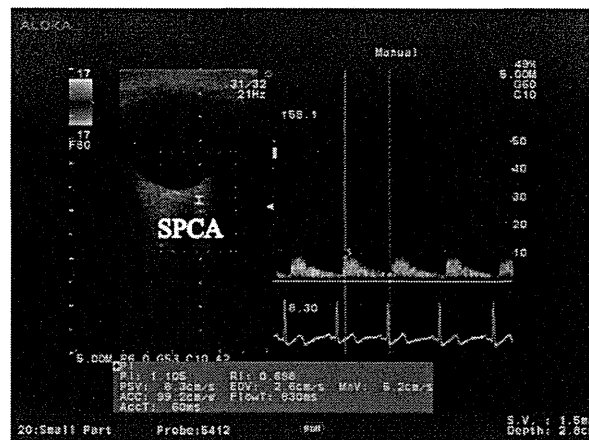


図 8: 眼動脈、網膜中心動脈、短後毛様体動脈における超音波検査画像。A. 眼動脈(OA)、B. 網膜中心動脈(CRA)、C. 短後毛様体動脈(SPCA)。

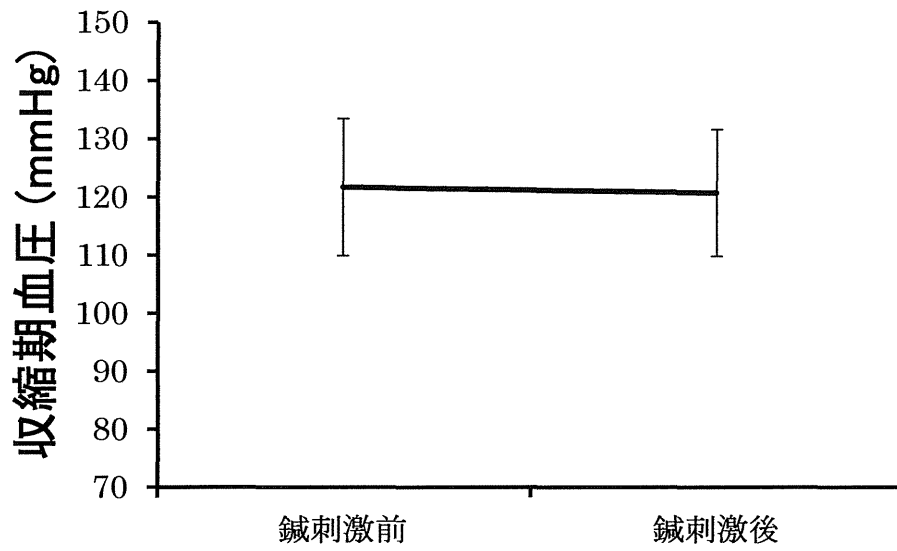


図 9: 足三里穴鍼刺激前後における収縮期血圧の変化。値は平均±標準偏差で表示。

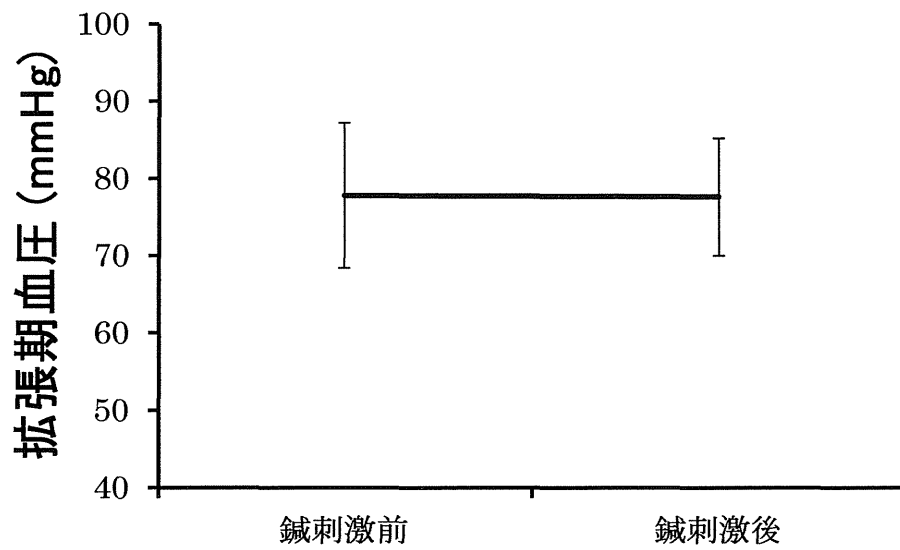


図 10: 足三里穴鍼刺激前後における拡張期血圧の変化。値は平均±標準偏差で表示。

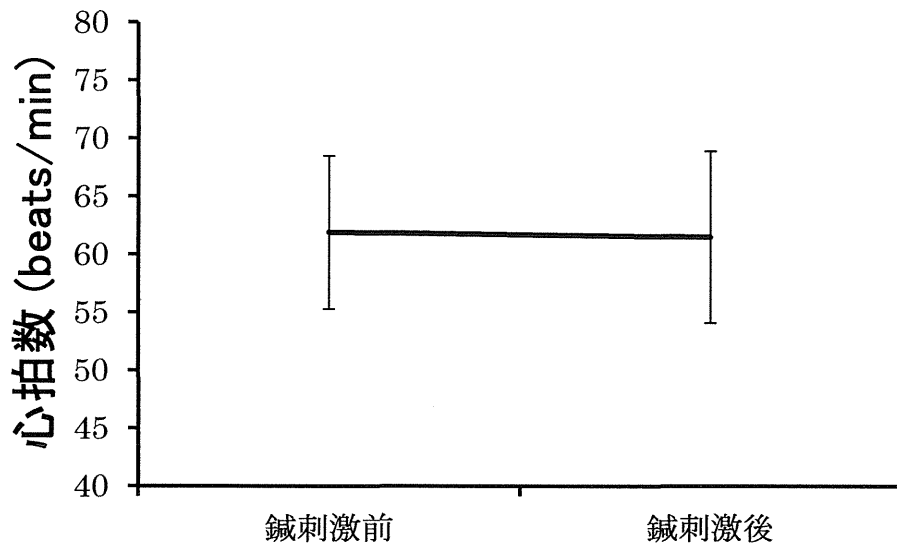


図 11: 足三里穴鍼刺激前後における心拍数の変化。値は平均±標準偏差で表示。

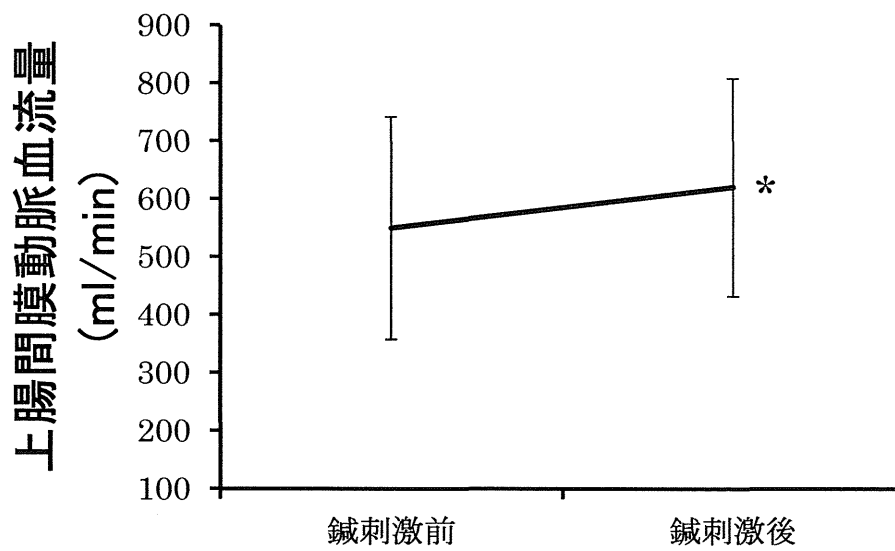


図 12: 足三里穴鍼刺激前後における上腸間膜動脈血流量の変化。平均±標準偏差表示。

\*P<0.05。



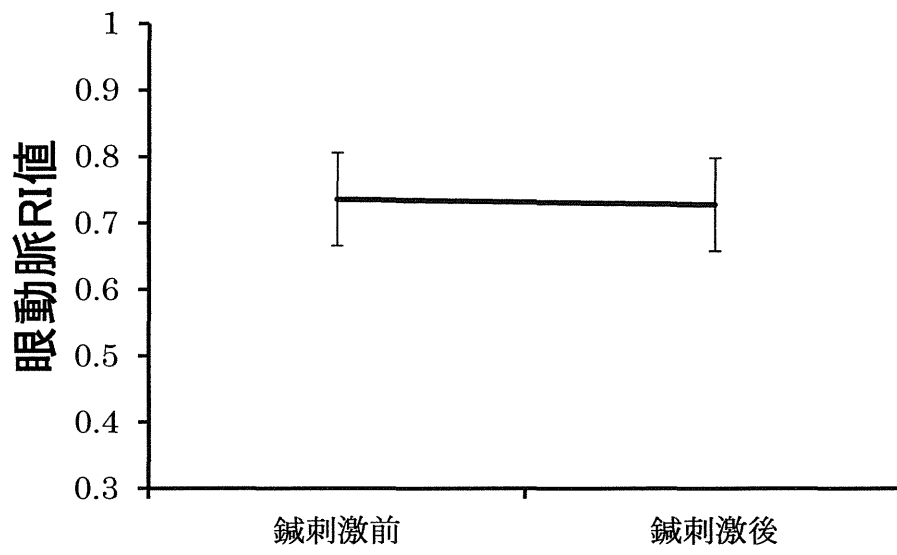


図 13: 足三里穴鍼刺激前後における眼球後動脈血管抵抗の変化。RI:血管抵抗係数

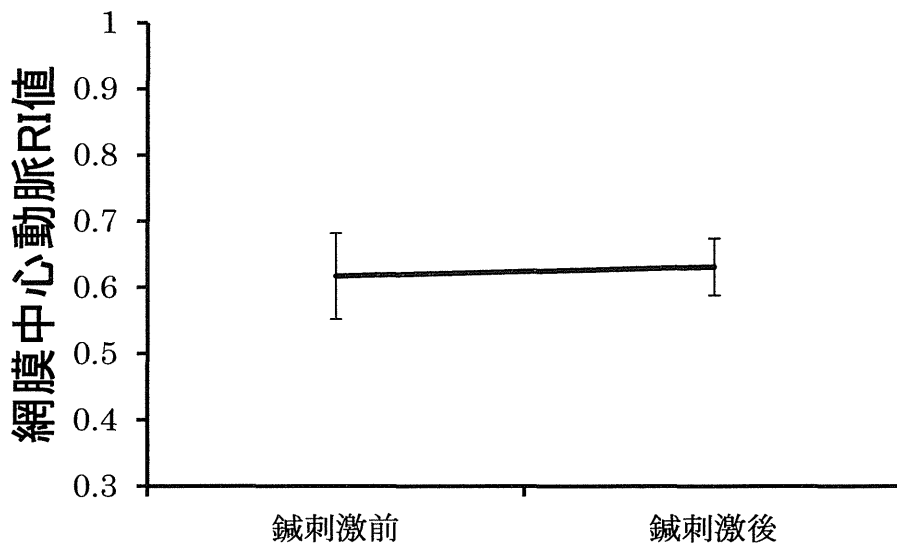


図 14: 足三里穴鍼刺激前後における網膜中心動脈血管抵抗の変化。RI:血管抵抗係数。

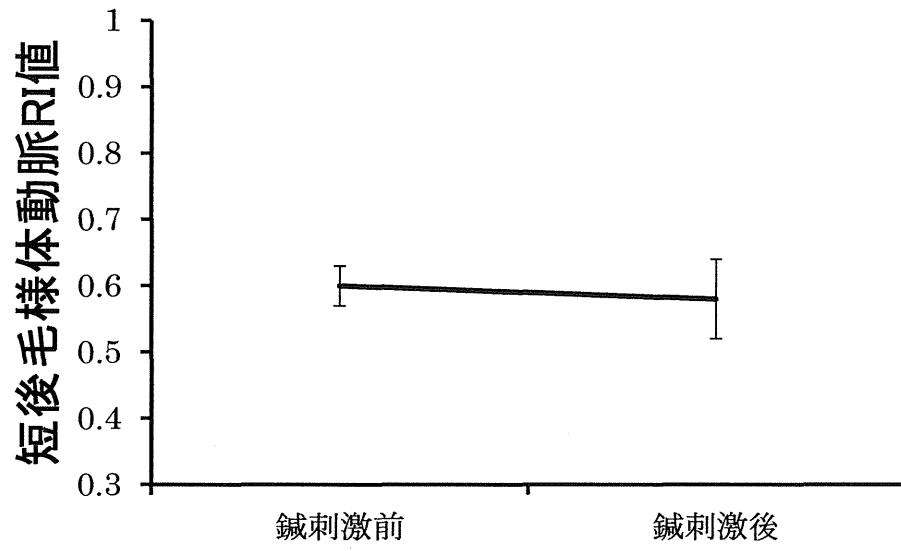


図 15: 足三里穴鍼刺激前後における短後毛様体動脈血管抵抗の変化。RI:血管抵抗係数。

## 鍼治療による血行動態変化の数値流体力学的検証

分担研究者 早瀬敏幸 東北大学流体科学研究所 教授

### 研究要旨

本調査研究は、鍼灸治療及び漢方薬の効果を定量的に評価する基礎的な検討を行いつつ、中途失明の第一の原因である緑内障、腎不全の原因となる糖原病、難治性の神経筋疾患にその評価方法を応用し、相補・代替医療、統合医療の現場ですぐにでも役に立つよう妥当性を検討することを目的とする。上分担研究では、鍼治療に対する被験者の生体反応に関して、とくに血行動態の変化に注目して、数値流体力学モデルによりそのメカニズムを検討する。従来の実験計測では、末梢動脈抵抗の変化が鍼治療による血行動態変化の重要な要因であると推察されており、本年度は、全身動脈系の集中定数モデルを構築し、流体力学的見地からこれを検証した。

### A. 研究目的

西洋医学を中心に発達した現代医学は、近年、細分化、専門化される傾向にあり、専門外の患者について治療方針を立て、診断しなければならないケースが増加している<sup>(1)</sup>。また、西洋医学的に治療法が明確でない慢性疾患や難病、自覚症状があっても検査で異常が見られない疾患、ストレスなど精神的な部分が原因となる疾患などが増加している<sup>(2)</sup>。これらの問題に対し、伝統中国医療をはじめとした東洋医学が代替医療として注目を集めている。とくに、西洋医学では、体や精神の状態を表すパラメータがある範囲に保たれることを健康として定義し、病気そのものに的を絞って治療をす

るのに対し、東洋医学では、種々の病因に対して常に変化しながら全身のバランスを保っている状態を健康と考え、全身のバランスを整えることによって体が本来有している抵抗力などを高め、病気を治療する<sup>(3)</sup>。そのため、西洋医学だけでは対処できない現代の様々な問題に対して有効であると考えられている。

しかし、東洋医学の最大の欠点として、エビデンスの不足が挙げられる。漢方薬を例に採れば、西洋医学の新薬開発では、基礎薬理実験、臨床薬理実験、さらに二重盲検査で最終評価をされるのに対し、漢方薬は、3000年以上、天然由来の自然素材を薬として臨床試験を繰り返し、その治験のみによ

って評価されたものである<sup>(4)</sup>。そのため、東洋医学は長い歴史の中で纏められた智恵と理論があるが、西洋医学的に見れば主観的で、客観的に診断する手段のない医療である。そのため、東洋医学が今後さらに一般的に受け入れられるためには、科学的な作用機序の解明が不可欠である。

本研究で対象とする鍼治療は、灸や漢方薬と並ぶ伝統中国医療の一つであり、近年、慢性的な首の痛みを患った患者に対して無作為化比較試験を行った結果、プライマリーケアに加えて鍼治療を施した患者は、プライマリーケアのみを施した患者よりも早く症状が改善されることが報告されている<sup>(5)</sup>。また、Takayamaらは、高血圧や頭痛、めまい、不眠症等の治療に用いられる大衝と呼ばれる経穴に対する鍼刺激が血行動態に与える影響に注目し、刺鍼に伴う種々の血行動態変化を計測した<sup>(6)</sup>。その結果、心係数、収縮期及び拡張期血圧に有意な変化は見られなかったが、上腕動脈および橈骨動脈の血流量に有意な変化が確認された。手先の血管調節はその他の部位と異なり、完全に交感神経によって支配されていることが知られている。そのため、Takayamaらは、血行動態の変化は交感神経の反応に起因する末梢血管の調節運動に関係しているとの仮説を立てた。

そこで、本研究では、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

モデルの概略図および以下で用いられる主な変数を図1に示す。本モデルは、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。各動脈内における血流は同様であるとし、動脈両端の圧力差とその中央での流量で規定される。動脈は、(1)上行大動脈から大動脈弓、(2)左鎖骨下動脈から左橈骨動脈、(3)湾頭動脈から右橈骨動脈、(4)胸大動脈から上腸間膜動脈までの腹大動脈、(5)上腸間膜動脈、(6)上腸間膜動脈以下の腹大動脈、(7)左総腸骨動脈から左前脛骨動脈、(8)右総腸骨動脈から右前脛骨動脈の8本で構成される。各動脈の長さ $L$ 、上流端半径 $R_u$ および下流端半径 $R_d$ を表1に纏めて示す<sup>(7)</sup>。解析において、血液は粘度 $\mu = 0.03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ( $= 3 \text{ cP}$ )の非圧縮性ニュートン流体とし、各動脈内の流れは十分に発達した定常層流であり、重力の影響はないものと仮定した。各動脈の流量 $Q$ と圧力差 $P_u - P_d$ の関係は次式で与えられる。

$$Q_i = \frac{A_i^2}{8\pi\mu L_i} (P_u - P_d)_i \quad (1)$$

ここで、 $i$ は表1に示した動脈の番号、 $A$ は円錐台に近似した動脈と体積の等しい円柱の断面積である。また、動脈の分岐点において、流入する流量と流出する流量が等しいとして、次式で与える。

$$\sum_i Q_i = 0 \quad (2)$$

また、末梢血管では末梢血管抵抗のみを考

慮するものとして、ここでの圧力降下  $\Delta P$  を次式で与える.

$$\Delta P_i = R_p Q_i \quad (3)$$

ここで、末梢血管抵抗係数  $R_p$  は、*in vivo* での計測データが存在しないため、動脈から細静脈までの圧力降下および流量から算出された値  $R_p = 4.3 \times 10^9 \text{ kg}/(\text{m}^4\text{s})$  を基に<sup>(8)</sup>、簡単のために  $R_p = 1.0 \times 10^9 \text{ kg}/(\text{m}^4\text{s})$  として与えた。また、末梢血管下流端圧力は、全て 0 Pa とした。

### 数値解析

本研究では左腕動脈に注目し、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。そのため、(1)基準値として、表 1 に示した各血管寸法における血流分布を求め、(2)左腕動脈の平均断面積  $A_2$  が変化した場合、(3)左腕の末梢血管抵抗  $R_p$  が変化した場合の計算を行った。なお、Takayama らの測定結果<sup>(6)</sup>において刺鍼前後で新拍出量に有意な変化がなかったことから、供給流量として  $Q_1$  に心拍出量にあたる  $7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $=4.5 \text{ L}/\text{min}$ ) を与えた<sup>(9)</sup>。

## C. 計算結果と考察

### 初期形状における血流分布

図 2 に、表 1 に示した各血管寸法における各点の圧力および各血管の圧力降下、流量および  $Q_1$  に対する割合を示す。この場合、左心室平均圧に対応する  $P_s$  は、約 16.2 kPa ( $= 122 \text{ mmHg}$ ) であった。文献で一般的な左心室平均圧は 100 mmHg であるが<sup>(10)</sup>、この

値は個人差や年齢による差が大きいことが知られているため、この値は妥当なものであると考える。また、以下の計算で対象とする左腕において、 $Q_2 = 0.91 \text{ L}/\text{min}$ 、 $P_1 - P_2 = 1107.4 \text{ Pa}$  であった。ただし、本モデルにおいて全ての動脈がモデル化されているわけではないため、ここで得られた値は、その数値をもって実際の血流量とみることはできない。さらに、血流分布は個人差や体位による影響が大きく、また、実際に生体の各部における血流量等を測定した例を知見しない。従って、以下では、図 2 の基準状態からの変化の割合で評価する。

### 左腕動脈断面積を変化させた場合

図 3 に、左腕動脈断面積  $A_2$  のみを  $\pm 10\%$  の範囲で変化させた場合の各圧力および流量の変化を示す。ここで、先に述べたように、各値は、前節で求めた値からの変化割合として示す。図 3(a)において、圧力  $P_s$ 、 $P_1$  および  $P_3 \sim P_8$  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 3(b)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。

### 左腕末梢血管抵抗係数を変化させた場合

図 4 に、左腕末梢血管抵抗係数を  $\pm 10\%$  の範囲で変化させた場合の各圧力および流量の

変化を示す。ここで、各値は、図3と同様に、初期状態における値からの変化割合として示す。図4(a)において、 $P_0$ 、 $P_1$ および $P_3 \sim P_8$ は、末梢血管抵抗の10%の減少に対して2.0%減少し、10%の増加に対して1.7%増加した。 $P_2$ は、末梢血管抵抗の10%の減少に対して2.8%減少し、10%の増加に対して2.4%増加した。図4(b)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。Takayamaらの測定結果<sup>(6)</sup>では、刺鍼後の血管断面積の変化は最大で3.4%(実際に測定された血管径変化から、血管を円管と仮定して換算)であり、これを本解析結果と照らし合わせると、血管断面積が3.4%変化したことによる血流量圧力及び血流量に与える変化は1%に満たないと考えられる。一方、末梢血管抵抗を変化させた場合、 $Q_2$ の変化が最大で8.0%、 $P_2$ の変化が2.8%であり、その他は、2%以下であった。これらの結果は、末梢血管抵抗係数が、左腕の血行動態、とくに血流量に特異的に影響を与え、その他に与える影響が小さいことを示している。

Takayamaらは、刺鍼後の上腕動脈および橈

骨動脈の血流量変化が、末梢血管抵抗の変化に起因すると考えた<sup>(6)</sup>。本解析結果は、末梢血管抵抗が左腕の流量変化に対して重要であるという点でTakayamaらの仮説と定性的に一致したといえる。

なお、血管断面積と比較して末梢血管抵抗係数の影響が大きい原因として以下が考えられる。左腕血管断面積が10%増加した場合、線形抵抗に近似した左腕動脈の管摩擦抵抗係数は、 $7.31 \times 10^7$  kg/(m<sup>4</sup>s)から $6.05 \times 10^7$  kg/(m<sup>4</sup>s)へ約17.3%減少するが、この差である $1.27 \times 10^7$  kg/(m<sup>4</sup>s)は、末梢血管抵抗係数の変化量である $1.0 \times 10^8$  kg/(m<sup>4</sup>s)と比較して1桁小さい。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、こ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。そして、左腕血流量の変化に寄与する要因として、左腕血管断面積およびその末梢血管抵抗係数をパラメータとして取り上げ、これらが全身動脈系の血流分布に与える影響を解析した。その結果、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。

## 研究協力者

白井 敦 東北大学流体科学研究所  
船本健一 東北大学流体科学研究所

## 参考文献

1. 後藤, 高山, 石木, 池田, 専門外の患者を抱えた医師のための, 診断や治療方針の遠方の医師への相談システム, 電子情報通信学会技術研究報告, DE データ工学, Vol. 105, 2005, 37-42.
2. 折茂, 東洋医学って何だろう?, 大蔵省印刷局, 1996.
3. 仙頭, カラー図解 東洋医学 基礎としくみ, 西東社, 2011.
4. 佐藤, 漢方薬理学: 補完・代替医療としての漢方方剤, 日薬理誌, Vol. 140, 2012, 54-57.
5. Witt CM, Jena C, Brinkhaus B, Liecker B, Wegscheider K, Willich SN, Acupuncture for patient with chronic neck pain, Pain, Vol. 125, 2006, 813-816.
6. Takayama S, Seki T, Watanabe M, Monma Y, Yang SY, Sugita N, Konno S, Saijo Y, Yambe T, Yaegashi N, Yoshizawa M, Nitta S, Brief effect of acupuncture on the peripheral arterial system of the upper limb and systemic hemodynamics in humans, J. Altern. Complement. Med., Vol. 16, No. 7, 2010, 1-7.
7. Stergiopoulos N, Young DF, Rogge TR, Computer simulation of arterial flow

with applications to arterial and aortic stenosis, J. Biomech., Vol. 25, 1992, 1477-1488.

8. 鳴海, 中西, 白井, 早瀬, 脈診の科学的検証のための一次元数学モデルの構築, 機論, B編, Vol. 74, No. 737, 2008, 142-148.
9. 谷下, 山口, 生物流体力学, 朝倉書店, 2012.
10. 菅原, 前田, 血液のレオロジーと血流, コロナ社, 2003.

## F. 研究発表

### 1. 論文発表

Kenichi Funamoto and Toshiyuki Hayase, Reproduction of pressure field in ultrasonic-measurement-integrated simulation of blood flow, International Journal for Numerical Methods In Biomedical Engineering, DOI:10.1002/cnm.2522, 2012 .

### 2. 学会発表

高島稔, 白井敦, 早瀬敏幸, 分岐を考慮した腕部血管系一次元数学モデルにおける脈波の反射の検証, 日本機械学会 2012 年度年次大会 CD-ROM, (2012) J024044.

## G. 知的所有権の取得状況

### 1. 特許取得

なし

### 2. 実用新案登録

なし

### 3. その他

なし

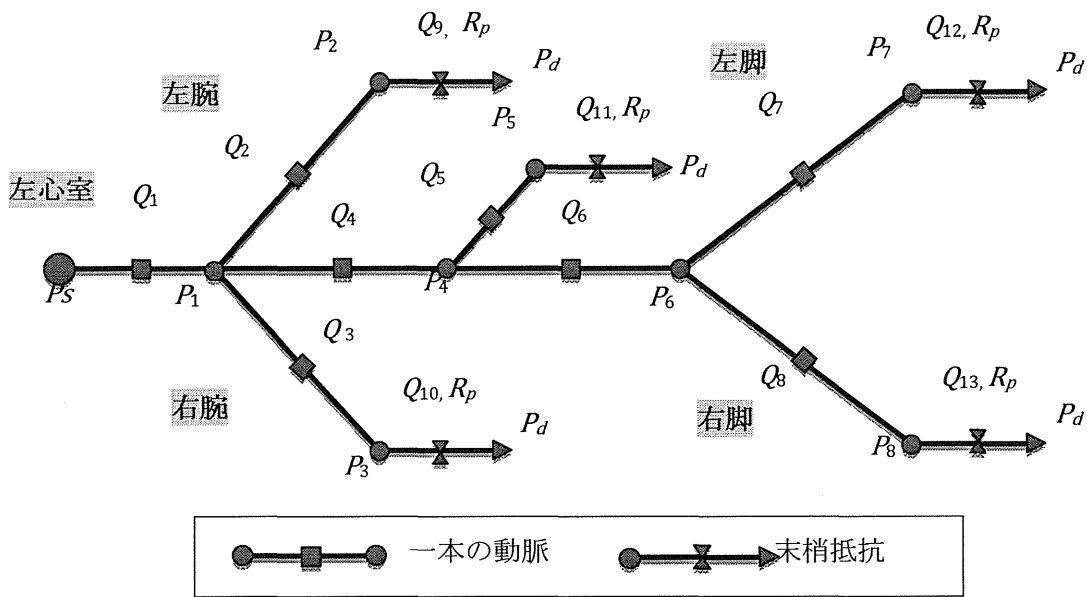


図1 全身動脈系集中定数血流モデル

表1 血管形状<sup>(7)</sup>

| 動脈 | 名称                              | 長さ<br>$L$ [m] | 上流端半径<br>$R_u$ [m] | 下流端半径<br>$R_d$ [m] |
|----|---------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| 1  | 上行大動脈～大動脈弓                      | 0.099         | 0.0147             | 0.0107             |
| 2  | 左鎖骨下動脈～左橈骨動脈                    | 0.691         | 0.0042             | 0.0014             |
| 3  | 腕頭動脈～右鎖骨下動脈～右橈骨動脈               | 0.725         | 0.0062             | 0.0014             |
| 4  | 胸大動脈～腹大動脈                       | 0.229         | 0.0100             | 0.0059             |
| 5  | 上腸間膜動脈                          | 0.059         | 0.0044             | 0.0044             |
| 6  | 腹大動脈                            | 0.116         | 0.0058             | 0.0052             |
| 7  | 左総腸骨動脈～左外腸骨動脈～<br>～左大腿動脈～左前脛骨動脈 | 0.988         | 0.0037             | 0.0013             |
| 8  | 右総腸骨動脈～右外腸骨動脈～<br>～右大腿動脈～右前脛骨動脈 | 0.992         | 0.0037             | 0.0013             |



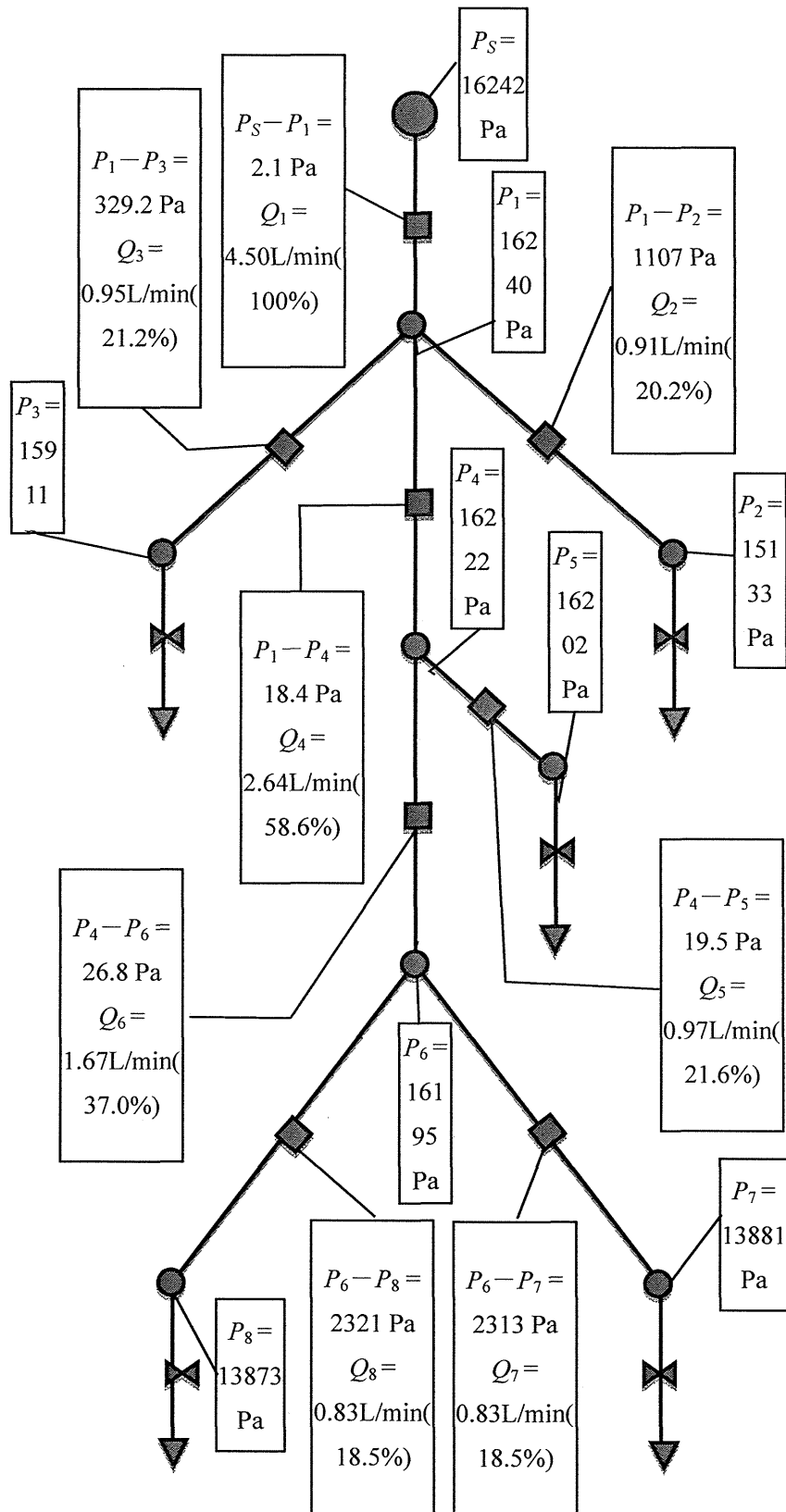
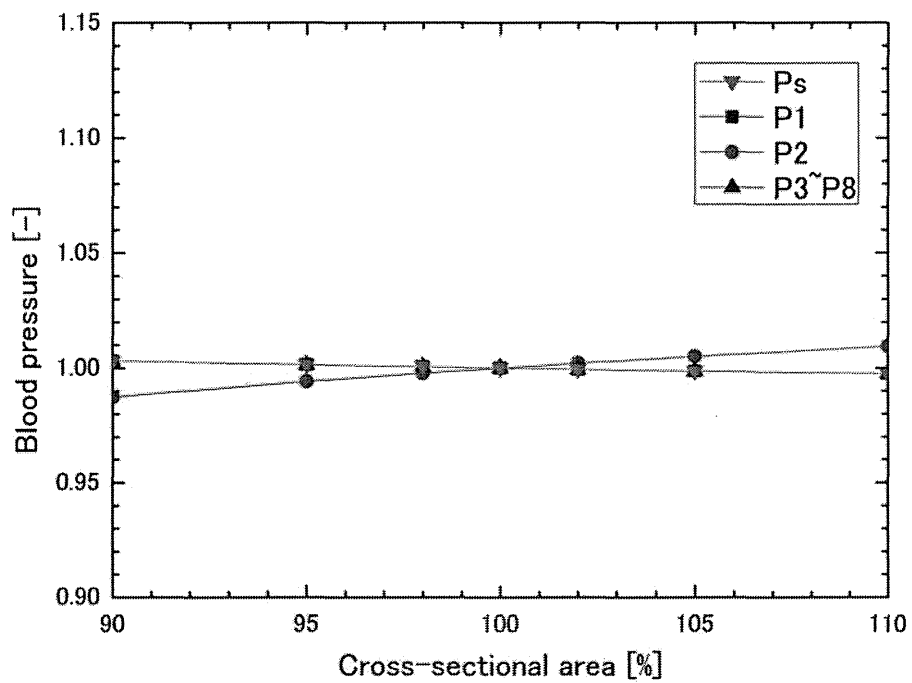
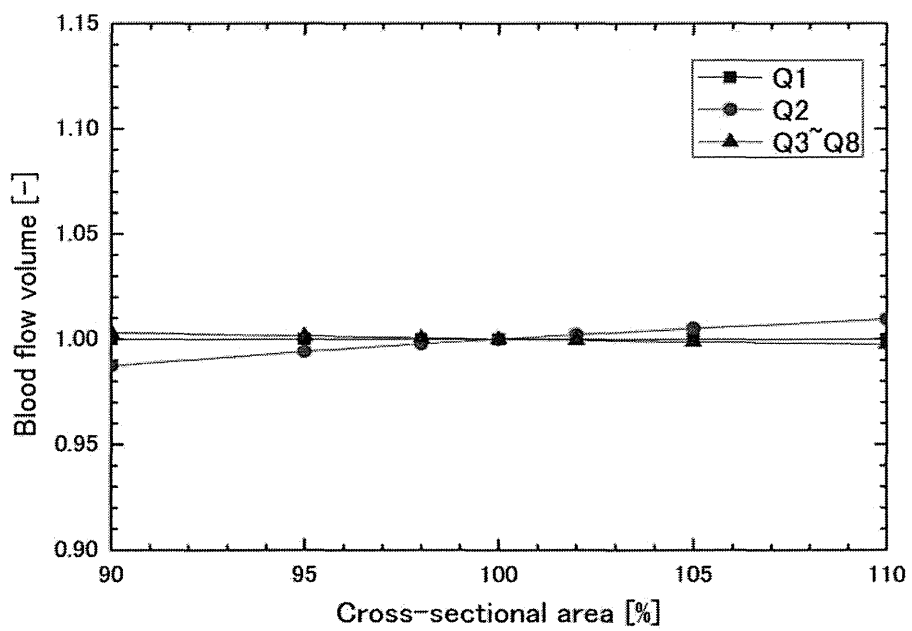


図2 表1の形状における血流分布



(a)

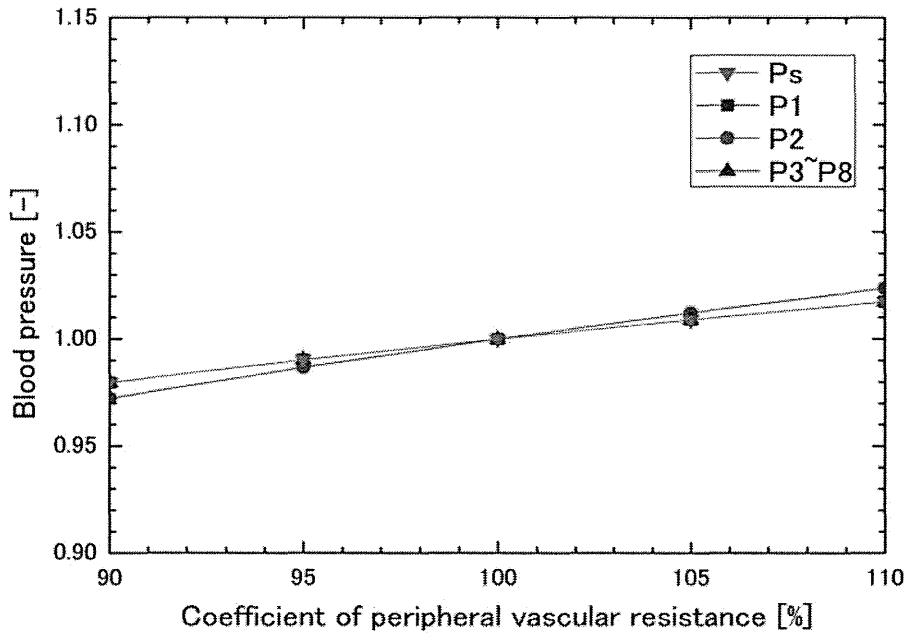
血圧の変化



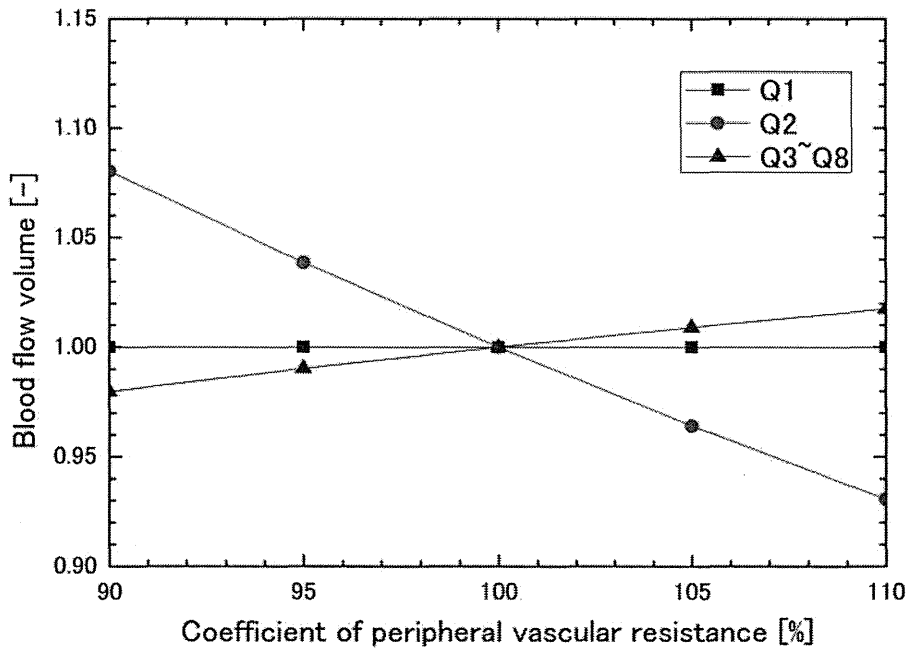
(b)

流量の変化

図3 左腕動脈断面積  $A_2$  を変化させた場合



(a) 圧力の変化



(b) 流量の変化

図4 左腕末梢血管抵抗係数を変化させた場合

### 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：

鍼が自律神経系に与える影響を定量的に把握するため、これまで心拍数・血圧・血流量等の循環系に関するパラメータが計測・解析されてきた。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。例えば心拍数を計測するには心電計の電極や光電脈波計のクリップなどを装着する必要がある。ところが、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。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。

そこで本研究では、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。実験では、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、通常の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。これによって、将来日常生活においても、特殊なセンサを使用することなしに、鍼刺入の効果が簡単に理解できるようになることが期待できる。

#### A. 研究目的

本研究では、医工学的計測手法を用いて、統合・代替医療の患者の生体情報を計測・解析する手法を調査研究することにより、相補・代替医療、統合医療における医学的効果を科学的に検証することを目的としている。

これまで、心拍数・血圧・血流量等を計測し、それらの周波数スペクトルを計算することにより、鍼刺激が自律神経系に及ぼす影響を定量的に評価しようとする試みがなされてきた[1]-[14].

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[15]-[19]. 例えば心拍数を計測するには心電計の電極や光電脈波計のクリップなどを装着する必要がある。

ところが、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。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