

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01324

研究課題名(和文) 経穴へのレーザー照射効果を評価可能な皮膚インピーダンス測定システムの開発

研究課題名(英文) Detection of acupuncture points by impedance measurement and evaluation of optical stimulation effect

研究代表者

横山 梨香 (Yokoyama, Rika)

東北大学・工学研究科・技術一般職員

研究者番号：80722173

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：経穴への低レベルレーザー照射時における治療効果を定量的に評価するために、多チャンネル皮膚インピーダンス測定システムの開発を行った。このシステムは経穴が他の部分よりも皮膚インピーダンスが非常に小さいことを指標にして経穴の位置の特定を行っている。皮膚インピーダンスは経時変化や測定環境に非常に影響されるため、多くの電極を用いて測定を行う必要がある。本研究では、9チャンネルのマトリクス型電極、さらには48チャンネルの電極を用いて、経穴の位置を特定することに成功した。また、低レベルレーザー照射時におけるインピーダンス変化を観測することで、治療効果を評価することに成功した。

研究成果の概要(英文)：A multi-channel, skin impedance measurement system is developed for evaluation of effect of low-level laser stimulation to acupuncture point. The system measures Cole-Cole plots of skin impedance to detect acupuncture points where the impedance is lower than other parts. It is shown that, by using an impedance measurement system based on 9-channel matrix electrodes, acupuncture points are electrically detected. Furthermore, effect of low-level laser radiation is quantitatively evaluated by using the system.

研究分野：微小信号計測

キーワード：低レベルレーザー

1. 研究開始当初の背景

東洋医学において、心身に問題がある場合、体の表面の一部にある経穴に変化が起きるとされている。一般に、経穴の位置は治療者の経験的なものが多く科学的実証がされていない。しかし、経穴理学療法は経穴を刺激する事によって血流やリンパの流れを促し、筋疲労の回復など心身への影響を与えることが示されており、医療やスポーツの分野へ応用されている[1].

経穴の存在および経穴刺激の有効性を科学的に実証するためのさまざまな検討は主に日本国内で活発に行われているが、特に皮膚電気インピーダンスを用いた研究は広く行われ、その有用性が認識されている。一般に経穴は、皮膚インピーダンスが周辺と比べて異常に低い点(皮膚抵抗減弱点)として捉えられている。経穴の位置を特定する研究では、経穴と思われる部分に低周波から高周波にわたる周波数の正弦波を通電し、出力される信号から経穴を評価する方法がある。福元らの研究では、出力信号からインピーダンス $|Z|$ 及び位相差を算出して評価する方法を提案している[2]。また、誘電体に限らず皮膚インピーダンス等の生体インピーダンスにも成立される Cole-Cole 円弧則を用いた評価方法についても報告がある[3,4]。Cole-Cole 円弧のパラメータを求めるためには、複数の異なる周波数でインピーダンスを測定する必要があるが、同部位を連続的に測定する場合、部屋の室温や湿度などの外部環境や内部環境に影響を受けやすく、また皮膚の発汗による経時変化が大きいため短時間で測定を終えることが求められる。

2. 研究の目的

Cole-Cole 円弧と呼ばれる、複素インピーダンス軌跡からインピーダンスマッピングを行う手法は、直流インピーダンスによる方法と比較して、直流バイアスのドリフト等の影響が小さく正確に低インピーダンスとなる経穴位置を特定する事が期待される。一方、交流を取り扱うためのシステムの回路構成がやや複雑になるという欠点を持つが、本研究では PC を基盤とするシステムを用いることにより構成を単純化している。

また、理学療法において低反応レベルレーザー照射による経穴刺激は、従来の灸や針治療に代わる非侵襲的治療法として注目されており、一部では「レーザー鍼」として市販もされている。しかしながら、低反応レベルレーザーを利用した効果の評価についても、施術者の触診と患者の感覚についての問診により明らかになるのが通常である。

そこで、本研究では経穴へレーザー光を照射した際のインピーダンス挙動を測定することにより、レーザー刺激の効果を定量的に計測可能なシステムの開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 解析方法

皮膚インピーダンスは図 1 (a) に示すように抵抗とキャパシタの直並列回路で構成される等価回路で表すことができる。この回路は、深部組織である顆粒層に相当する Z_{∞} とそれに接続された角質層のインピーダンスにより構成される。通常 Z_{∞} は角質層のインピーダンスと比較して非常に小さい値をとる。この等価回路における複素インピーダンスは、周波数の変化によって図 1 (b) に示すような Cole-Cole プロットと呼ばれる円弧の軌跡を描く。前述の通り、経穴部分は他の部位と比較して複素インピーダンスの絶対値が小さい値となり、経穴周辺の Cole-Cole プロットの直径は他の部位よりも小さくなる事が知られている[5-8].

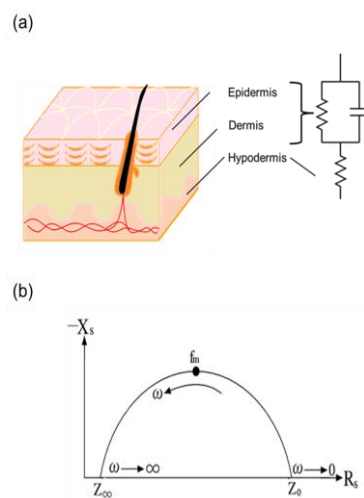


図 1. (a) 皮膚インピーダンスの等価回路

(b) cole-cole プロットの概形

本研究では、A/D 変換器 (National Instrument 以下 NI 社, NI9025) に入力された信号を LabVIEW (NI 社) を用いて処理を行った。インピーダンスの算出方法を以下に示す。

参照信号を電圧-電流変換器によって電流に変換し皮膚に通電し、それによって生じた電圧を計装増幅器を通して A/D 変換器に入力する。なお、経穴に影響されない位置にグランド電極及び参照電極を配置し、差動増幅器によって参照電極と測定電極との電位差を検出している。

参照信号 $v_r(t) = \sqrt{2}V_r \cos \omega t$ は電圧電流変換器によって $i(t) = \sqrt{2}I_r \cos \omega t$ となる。この電流を測定する皮膚に通電した際に、皮膚に生じる電圧を

$$v_x(t) = \sqrt{2}V_x \cos(\omega t + \theta)$$

とする。 v_r, v_x を乗算すると、

$$\begin{aligned} v_r v_x &= 2V_x V_r \cos \omega t \cos(\omega t + \theta) \\ &= V_x V_r [\cos \theta t + \cos(2\omega t + \theta)] \quad \dots(1) \end{aligned}$$

となる。一方、参照信号 v_r を $\pi/2$ 移相させた信号 $v'_r(t) = -\sqrt{2}V_r \sin \omega t$ を v_x に掛け合わせ

$$v'_r v_x = -2V_x V_r \sin \omega t \cos(\omega t + \theta)$$

$$= V_x V_r [\sin \theta - \sin(2\omega t + \theta)] \quad \dots(2)$$

を得る。 $v_r v_x$, $v'_r v_x$ を低域通過フィルターに通すと、(1), (2)は、

$$V_o = V_x V_r \cos \theta$$

$$V'_o = V_x V_r \sin \theta$$

となり、 V_r と I_r の関係は既知なので V_o , V'_o よりインピーダンスの実部と虚部が測定できる。なお本システムでは、測定電極、参照電極、およびグラウンド電極による3電極法を用いて測定を行った。参照電極と測定電極の電位差からインピーダンスを測定することにより、電極自体のインピーダンスや発汗などによる広範囲の皮膚インピーダンスの変動の影響を低減することが可能である。

(2) 測定電極の検討

生体信号を測定するための電極材料としては一般的に、貴金属である Au, Cu を用いたもの、不分極化した Ag-AgCl や、ステンレス等が用いられている。皮膚の直流抵抗ないし、超低周波数のインピーダンス測定を測定する場合、皮膚と電極間に発生する分極電圧が極めて小さい上に、電極自体がもつインピーダンスも小さいため、計測時の電氣的雑音を抑えることができる不分極性電極が望ましいとされている。しかし、Ag-AgCl のような不分極電極では、直流による計測は陽極に銀の析出が起こるため長時間の計測は困難である。そこで本研究では交流を印加することにより安定した計測を可能としている[7]。

また、電極と皮膚の接触によって生じるインピーダンスは発汗により大きく変化するため、直接皮膚に金属を装着すると、汗腺の活動による経時変化が大きくなる。本研究では、Ag-AgCl 電極に導電性のゲルを付着させたものを使用することにより、接触圧力による影響を低減している。

(3) システムの概要

本研究で使用した測定システムを図2に示す。

信号発生器として用いた DAQ (NI 社) から出力される正弦波信号を A/D 変換器 (NI 社, NI9205) に入力して参照信号とする。また、参照信号を電圧-電流変換器によって電流に変換し皮膚に電流を通電し、それによって生じた電圧を計装増幅器を通して A/D 変換器に入力する。なお、経穴に影響されない位置にグラウンド電極及び参照電極を配置し、差動増幅器によって参照電極と測定電極との電位差を検出している。周波数を掃引することで、周波数ごとの電流の振幅値と、測定された電圧の振幅値から Cole-Cole プロットのパラメータを取得する。ここで、機器制御および信号処理は NI 社 LabVIEW を用いて行った。

まず、測定システムの評価として、既知インピーダンスの測定を行った。皮膚インピーダンスは、前述で述べたように抵抗とキャパシタの並列回路で表すことができるので皮膚インピーダンスの代表的な値として、R

= 51 kΩ と C = 0.022 μF の擬似皮膚インピーダンスの測定を行った。この際、周波数掃引幅を 10 Hz ~ 1k Hz とした。その結果、図3に示すように理論値との差が 0.01% である

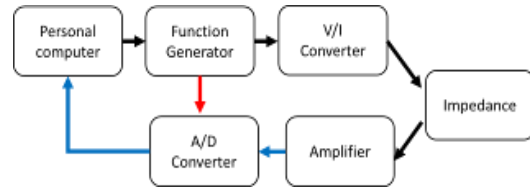


図2. 測定系の構成

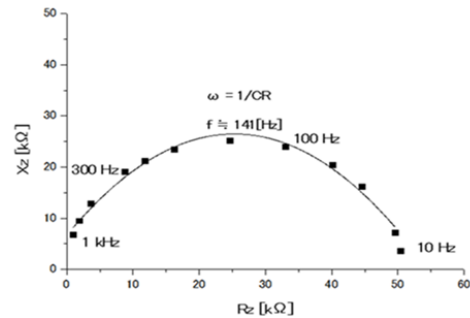


図3. 疑似皮膚インピーダンスの cole

-cole プロット測定結果

ことから本装置を用いたインピーダンス測定の有効性が確認できた。

4. 研究成果

このシステムを使用して、実際にヒト（成人女性）を対象に皮膚インピーダンス測定を行った。経穴の位置、及び電極の装着位置を図4に示す。

対象とする経穴は、“内関”と呼ばれるものであり、その位置は、鍼灸師の指示によりあらかじめ特定した。電極は市販の Ag-AgCl 電極（日本光電社）を直径 5 mm に加工し、電極間隔 7.5 mm で、3×3 のマトリクス状に配置した。電極数は9チャンネルとして、中心電極第5チャンネルが経穴の位置になるようにマトリクス電極を皮膚に装着した。この電極の他に、参照電極をマトリクス電極から約 15 cm ほど離れた場所に配置し、グラウンド電極を筋がない肘部位に配置した。このように3つの電極を用いることによ

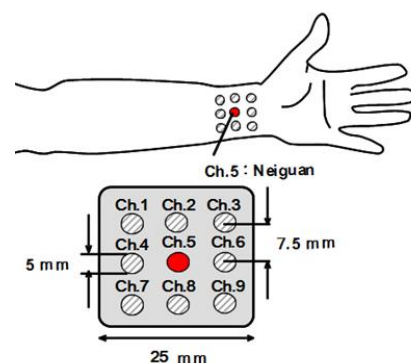


図4. 経穴“内関”の位置とマトリクス型電極

り、電極インピーダンスや発汗などによる広範囲の皮膚インピーダンスの変動の影響を低減することが可能となる。また、皮膚インピーダンス電極を皮膚に装着した直後は接触抵抗の変動が大きいので、電極が皮膚に馴染むように 20 分以上経過してから実験を行っている。なお、通電する電流値は、生体に影響を与えない $10 \mu\text{A}$ 以下とし、掃引する周波数は $10 \sim 100 \text{ Hz}$ の範囲とした。測定されたインピーダンスを図 5 に示す。この結果から、経穴の位置に配置したチャンネル 5 のインピーダンスが他の部位に比べて非常に小さいことが分かる。チャンネル 4 とチャンネル 5 の 2 点におけるインピーダンス比較を行うと約 80% 程度インピーダンスが低下していることが分かる。

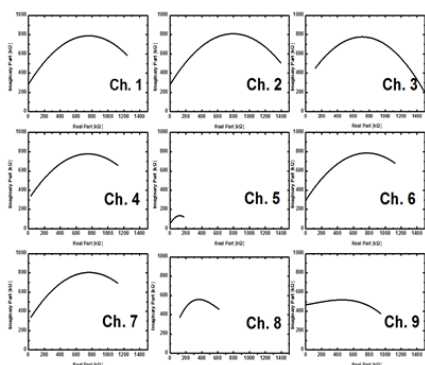


図 5. 同時計測した 9 チャンネル皮膚インピーダンスの cole-cole プロット

さらに測定インピーダンスの評価には、取得された各チャンネルの Cole-Cole 円弧の面積を用いてマッピングを行った。面積を評価指針として用いることによって、円弧の半径を用いるより誤差率が減少する。また、マッピングによりその位置を視覚的に明瞭に得る事が可能である。

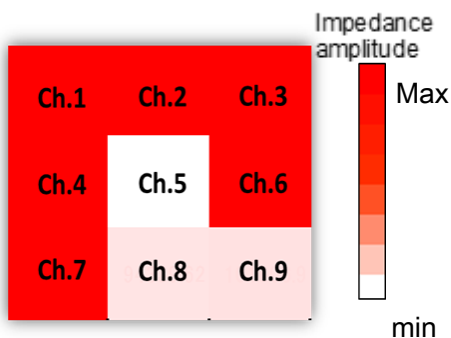


図 6. 皮膚インピーダンスマッピング

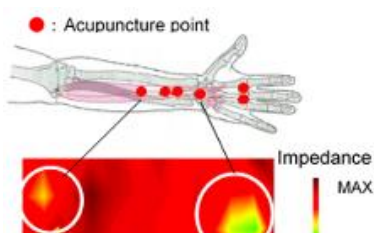


図 7. 腕のインピーダンスマッピング

また、腕には経穴が複数箇所が存在することが知られている。そこで腕全体のインピーダンスを取得し、経穴位置のマッピングを行った。使用する電極数は直径 5 mm の電極で構成される 4×4 のマトリクス電極を 1 ブロックとし 3 ブロック分 (計 48 チャンネル) を腕に装着しインピーダンスの測定を行った。結果を図 7 に示す。手首に装着した電極が低インピーダンスを示した。この位置と一般的に経穴とされる位置が一致した。このことから、腕に分布する経穴を特定することに成功した。

次に、経穴部分に低反応レベルレーザーを照射した際のインピーダンス挙動について調べた。実験は前述のものと同時刻に行い、求められた cole-cole プロットのパラメータにおいて、インピーダンスが顕著に小さいチャンネルを経穴の位置と特定し、電極に設けた細孔を介してレーザー光を照射した。光源として用いたレーザーは、波長 625 nm 、出力 10 mW の半導体レーザー (Thorlabs 社) である。この波長は、皮膚表面から約 $1.0\text{-}2.0 \text{ mm}$ の深部まで刺激を与えることが可能であるとされており、低反応レベルレーザー治療に一般的に用いられる波長のひとつである。

レーザー照射前、および 2 分間のレーザー照射後の cole-cole プロットを図 8 に示す。

レーザー照射前の皮膚インピーダンスに比べて、照射後の皮膚インピーダンスが小さくなっていることが確認された。

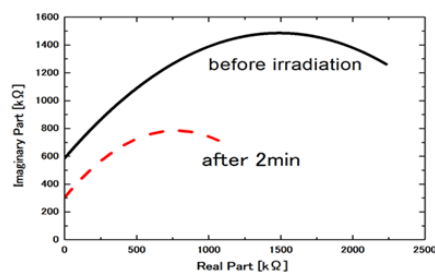


図 8. レーザー照射による皮膚インピーダンス挙動

また、この測定結果のマッピングを図 9 に示す。レーザー照射前のインピーダンスとレーザー照射後のインピーダンスを比較すると全てのチャンネルにおいてインピーダンスが低くなっていることを確認した。レーザーの照射前後でインピーダンスに有意義な差がみられることから、経穴への光刺激が生体組織へ影響を与えていることが分かる。本システムを用いることによりレーザー刺激による効果を定量的に評価できる可能性があることが示された。

次に経穴にレーザーを照射した際の効果が及ぶ範囲を評価するために、新たに電極中心間隔 10 mm の 9 チャンネルマトリクス型電極を製作した。上述の手法と同様に、9 チャンネルで皮膚インピーダンス同時計測を行うことにより経穴を特定し、そのチャンネル付近にレーザー照射した。レーザー照射前後のインピーダンスマッピングの変化を図 10 に示す。電

極間隔が小さい場合には、全体的にインピーダンスが低下していることが確認されたが、電極間隔を大きくした場合も全体的にインピーダンスが低下しており、レーザー照射位置から約 12 mm 離れたチャンネルにおいてインピーダンスが低下していることが確認された。このことから、今回使用したレーザーの強度では、12 mm 以上離れた部位においても治療効果が得られたことが示された。

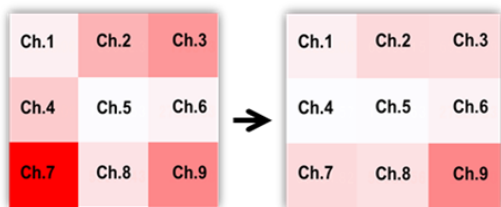


図 9. レーザ照射による皮膚インピーダンスマッピング変化

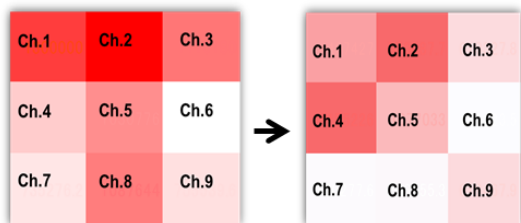


図 10. レーザ照射前後の皮膚インピーダンスマッピング (電極中心間隔: 10)

次に、レーザー照射時における皮膚表面の温度変化の測定をサーモグラフィ (KEYSIGHT 社, U5855A) を用いて評価を行った。まず、装置と被写体の位置を固定して経穴以外にレーザー光を照射した場合の皮膚表面温度の測定を行った。

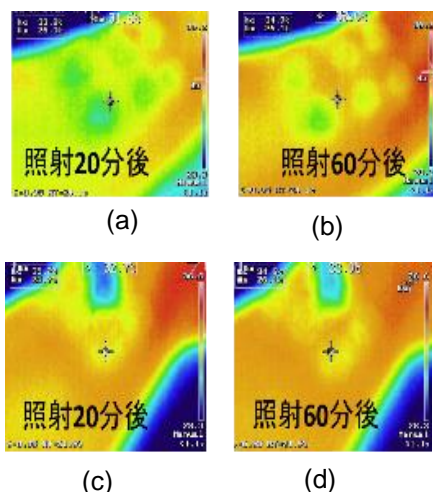


図 11. 皮膚表面温度変化

(a), (b) 経穴以外にレーザー照射した温度分布

(c), (d) 経穴にレーザー照射した温度分布

図 11 にレーザー照射後の温度変化を示すように、経穴に照射した場合と経穴以外に照

射した場合において両条件とも温度変化が観測できた。しかし、経穴にレーザーを照射した方が皮膚表面の温度変化が大きいことから、インピーダンス測定等と同様の結果が得られたことが分かる。

本研究では、経穴に低出力レーザー刺激を与えた際の皮膚インピーダンスの挙動観察を行うために、マトリクス型電極を用いた多チャンネル皮膚インピーダンス測定システムの開発を行った。9チャンネルの皮膚インピーダンスを同時計測可能なシステムを構築し、皮膚インピーダンスの *cole-cole* プロットを測定したところ、その直径が顕著に小さくなる位置を経穴として特定できることを確認した。また、レーザー刺激による効果を定量的に評価できる可能性があることが示された。本システムによって、施術者の勘と経験に頼らない治療法を確立するとともに、経験の浅い施術者の補助として利用することも可能であると考えられる。

今後の展望として、汎用性を向上するために測定チャンネル数や被験者数、経穴部位の数をさらに増やすことで本システムの有効性を検討する。また、経穴以外の箇所にも光刺激を与えた際の刺激効果についても評価を行う予定である。

<参考文献>

- [1] 二本松明, 吉井大樹, 宇津木努, 平井顯徳, “実験的筋疲労に対する遠隔部刺激の効果”, 理学療法科学, vol. 26, no. 3, pp. 397-400 (2011)
- [2] 福元剛智, 大庭茂男, 二見亮弘, 田中治雄, 星宮望, “経穴周辺における皮膚の複素インピーダンス軌跡の電流依存性” 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティックス, vol. 100, no. 685, pp. 1-8 (2001)
- [3] 神口達也, 福元剛智, 大庭茂男, 二見亮弘, 田中治雄, 星宮望, “皮膚インピーダンスの多点同時測定における評価パラメータの基礎的検討” 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティックス, vol. 102, no. 481, pp. 5-8 (2002)
- [4] U. G. Kyle, I. Bosaeus, A. D. De Lorenzo, P. Deurenberg, M. Elia, “Bioelectrical impedance analysis-part I: review of principles and methods,” Clinical Nutrition, vol. 23, no. 5, pp. 1226-1243 (2004).
- [5] T. Fukumoto, S. Ohba, R. Futami, H. Tanaka, N. Hoshimiya, and K. Sasaki, “A basic study about multi channel measurement of skin impedance vector loci on the acupuncture points”, Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., pp. 3392-3395 (2001).
- [6] T. Fukumoto, G. Eom, S. Ohba, R. Futami, N. Hoshimiya, “Temporal resolution of the skin impedance measurement in frequency domain

method,” IEEE Trans. Biomed. Eng. 50, pp. 170-173 (2007).

[7]H. M. Johng , J. H. Cho, H. S. Shin, K. S. Sah, “Frequency dependence of impedances at the acupuncture point Quze (PC3),” IEEE Eng. Med. Biol. 21, 33-36 (2002)

[8]S. Pearson, A. P. Colbert, J. McNames, M. Baumgartner, and R. Hammerschlag, “Electrical skin impedance at acupuncture points,” J. Altern. Complement. Med. 13, 409-418 (2007).

[9]星宮望, 石井直宏, 塚田稔, 井出英人 : “生体情報工学”, 森北出版 (1986)

[10] 横山梨香, 松浦祐司, 電気学会研究会報告, OQD-14, 17 (2014).

[11]横山梨香, 松浦祐司, “経穴へのレーザー照射刺激におけるインピーダンス挙動測定システムの開発”, レーザー学会学術講演会第35回年次大会, 11pV02 (2015)

[12]横山梨香, 松浦祐司, “複素インピーダンス測定による低レベルレーザー治療のための経穴検出と刺激効果の評価,” レーザー学会研究会報告, RTM16(18-24), 23-28 (2016).

5. 主な発表論文等

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 梨香 (YOKOYAMA, Rika)

東北大学・大学院工学研究科・技術一般職員

研究者番号 : 80722173

(2) 研究分担者

松浦 祐司 (MATSUURA, Yuji)

東北大学・大学院医工学研究科・教授

研究者番号 : 10241530

(3) 研究分担者

木野 彩子 (KINO, Saiko)

東北大学・大学院医工学研究科・産学官連携

研究者番号 : 30536082