

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 23 日現在

機関番号：32607

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350545

研究課題名(和文)体表面非接触型電気インピーダンスCT装置の開発

研究課題名(英文)Development of an electrode contactless electrical impedance tomography

研究代表者

根武谷 吾 (Nebuya, Satoru)

北里大学・医療衛生学部・准教授

研究者番号：00276180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、被験者が測定用ベルトを着衣するだけで、肺疾患が検出できるウェアラブル電気インピーダンストモグラフィ(EIT)を構築することを最終目的と、小型軽量で多様な体型に適応できるウェアラブル測定ベルト、シャツなどの上からでもEIT測定可能な非接触EIT測定法を開発した。具体的には、EIT測定の高精度化に必要な体幹形状推定方法、多様な体型にも対応できるフレキシブル基板、皮膚と電極が非接触状態でも1chのインピーダンス測定が可能な測定回路を開発した。開発したEIT測定ベルトの総重量は、筐体を除いてわずか100gであり、1MHzまでのインピーダンスをワイヤレスで測定可能な仕様となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, our final objective is developing a wearable electrical impedance tomography (EIT) that can achieve electrode contactless EIT measurement for monitoring of lung disease in variety of chest shape.

A wearable EIT system was developed included flexible printed circuit board and small size of battery driven circuit board with a Bluetooth module. The system could run for 1 hour continuously and its total weight was 100g.

In addition, we developed a novel algorithm for chest shape estimation and a single channel electrode contactless impedance measurement circuit. The software could estimate chest shape on real-time and the circuit could measure change in tidal volume with good correlation with that measured by flow sensor. Both technology will be added into the EIT system in near future.

研究分野：医用電子工学

キーワード：電気インピーダンストモグラフィ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

肺疾患は死因の大きな割合を占めており、厚生労働省発表の「死因順位別にみた死亡数・死亡率の年次推移(2010年)」によると、1995年以降から近年まで肺炎が死因の第4位となっている。また1位の悪性新生物(がん)の内訳でも肺がんは2010年で男性1位、女性2位を示している(人口動態統計)。多くの肺疾患は、自覚症状が出にくいとため早期発見が困難である。肺疾患の診断にはX線CT撮影が有効であるが、X線被曝、医療費、検査混雑の問題から、無自覚の状態でも積極的なX線CT撮影を受けるまでに至らない場合が多い。

そこで、測定場所の制約が少なく簡易的に肺機能の評価を行うことを目的として、胸部表面に電極を均等に付着させて電気インピーダンスを測定し、肺の機能的断層画像を構築するElectrical Impedance Tomography(以下、EITとする)による肺機能モニタが研究されてきた(Adler A et al: Whither lung EIT: Where are we, where do we want to go and what do we need to get there?, Physiol. Meas. 33, 2012)。

EITは、肺の換気状態を動画として連続的にモニタできる技術であるが、一般的に電気インピーダンスの「相対的な」変化量が測定できる。そのため、EIT画像を得るには基準となる測定データを定める必要があり、客観的かつ再現性の高い評価指標を得ることが困難であった。そこで我々は近年、特別な校正を用いずに「絶対的な」物理量である「肺密度(kg/m<sup>3</sup>)」と「肺気量(l)」を自動的に得る方法を提案した。肺密度とは、肺胞に空気を含有した肺の、体積に対する質量の割合を定義したものであり、今日まで、肺密度と肺疾患、X線CT値との関係を調べてきた。

北里大学病院ICUの人工呼吸器装着患者11名の胸部に8個の心電図電極を付着して8ch EITを測定し、肺のスライス面を前後左右4領域に分割した時の局所肺疾患と肺密度との関係を求めると、健常肺野と比較して肺炎・無気肺・胸水において肺密度の有意な差が認められた。X線CT値と肺密度を8ch EITのピクセル毎に比較すると、8個の電極を用いる8ch EITでは、16×16ピクセルの低分解能であるものの、肺の炎症部位に類似性が認められることがわかった。患者8名における相関性は、0.66と強い相関性が認められることがわかった。この結果からEITは、肺疾患を定量的に検出できる可能性が示唆されたと考えられた。

これまでのEIT装置は、大型かつ電極装着が煩雑で時間を要していたことから、肺疾患スクリーニングのような短時間の簡易測定が困難であった。そこで我々は、ウェアラブル測定ベルトを含む小型ウェアラブル8ch EIT装置を開発した。ウェアラブル測定ベルトは、洗濯・滅菌が可能な導電性布電極を用いてお

り、ベルトを胸部に巻くだけでEIT測定を簡易に行うことができる。

### 2. 研究の目的

しかしながらこれまでのウェアラブルEITでは、「測定できる胸部形状・胸囲が著しく限定される」、「EIT測定精度が胸部形状によって影響される」、「測定装置が未だ大きく、消費電力が大きい」、「電極を皮膚に直接貼付する必要があること」、などの問題点が残っている。

そこで本研究では、「ウェアラブル電極ベルトを改良することで幅広い体型の患者に対応可能とすること」、「胸部形状を自動的に推定できるセンサ、アルゴリズムを開発すること」、「測定装置の大幅な小型化と低消費電力化をはかること」、「保護テープや衣服上からでも測定可能な非接触EIT測定技術を開発すること」を最終目的とした。

### 3. 研究方法

本研究はまず初年度に、胸部にベルトを巻くだけでEITが測定できるウェアラブルEIT試作機を完成させる。また、EIT測定精度向上を実現するための胸部形状推定法を開発する。次年度は、衣服上でのEIT測定を目的として、皮膚と電極が非接触状態におけるEIT測定条件を有限要素解析で検討し、1ch電極非接触型インピーダンス測定回路の試作を行う。最終年度は、さまざまな体型に対応できるフレキシブル基板ベルトの開発および、ボタン型リチウムイオン電池で測定可能な小型EIT測定回路の開発を行う。さらに、前年度開発した1ch電極非接触型インピーダンス測定回路を用いて、換気に伴うインピーダンス変化の測定を試みる。これらの研究によって、申請者が提案する方法の有効性と将来性を明らかにすることが申請期間での本研究の目的である。

### 4. 研究成果

平成26年度は第一に、ウェアラブルEIT試作機を完成させた。このEITは、8-16個の電極を用いてリアルタイムで肺機能モニタできるものであり、導電性糸を用いた布電極を内蔵したゴムベルトとフレキシブル基板が一体化したものである。洗濯、滅菌処理に耐え、低コストで簡易的な測定を可能とした。開発品を実際に集中治療室(ICU)内の人工呼吸器装着患者4名へ適応し、肺機能評価における有効性を確認した。

第二に、胸部形状変化によるEIT測定精度の影響を検討し、それを低減するために有効な胸部形状推定法を開発した。まず有限要素法によるシミュレーションの結果、ヒト胸部における非接触EIT測定を実現するには、被験者の胸部形状をできるだけ正確に測定することが必須であることがわかった。そこでフレキシブル基板から得られるセンサ情報を用いた胸部形状推定法を提

案し、プログラムを開発した。ICU内患者の胸部CT画像から得られた局所曲率を用いて自動的に推定した胸郭形状と、実際のそれを比較した結果、非常に良好な推定結果が得られることがわかった。

平成27年度はシャツの上からでも非接触でEITを測定できる技術を開発するための基礎検討として、「有限要素解析」「皮膚-電極非接触型インピーダンス測定回路の試作」を行った。

第一に、1mm厚のTシャツ生地を導電性布電極で挟んで算出した電極間の導電率が、約1MHz以上の周波数で0.0001S/mであることを調べ、この結果を要素数約46万、接点数約90万で構成される小児胸部の有限要素(FEM)モデルに組み込んで胸部内の電流密度分布を計算した。全ての臓器には、過去の研究で発表された組織導電率を用い、シャツと皮膚との間の導電率には前述の値を用いた。計算の結果、約1MHzの高周波数においては電極と体表面が接触しなくても十分な電流密度分布が得られることがわかった。

第二に、1ch皮膚-電極非接触型インピーダンス測定回路の試作を行った。測定回路は、100kHz以上の高周波インピーダンスを高精度で測定できる仕様とし、衣服を装着した被験者の体外部分に電極を設置しても換気量が良好にモニタできることがわかった。

平成28年度は、本研究課題の最終年度である。昨年度までの研究では、体幹形状が推定できる測定回路と画像再構成アルゴリズムの構築、ならびに電極非接触EIT測定に必要な測定条件をFEMモデル解析によって求め、さらに皮膚と電極が非接触状態でもインピーダンスが測定可能な高周波定電流回路を開発した。

今年度は第一に、幅38mm長さ820mmで最長140cmまで伸張可能なフレキシブル基板ベルト、ボタン型リチウムイオン電池で約1時間の連続測定が可能な52mm×25mm×15mmの測定回路の開発を行った。測定システムの総重量は、筐体を除いてわずか100gであり、1MHzまでのインピーダンスをワイヤレスで測定可能な仕様とした。

第二に、導電性電極2個を左右の棘下筋上にそれぞれ位置するようにジャケットに固定し、被験者1名にシャツを着た上から当該ジャケットを装着させた。この導電性電極に、開発した1ch電極非接触型インピーダンス測定回路を接続し、換気に伴うインピーダンス変化を測定した。インピーダンス測定精度は、フローセンサ(METAMAX3B)を基準として求めた。換気波形比較では、一回換気量100mlから深呼吸までの換気状態において、フローセンサ出力結果との間に高い類似性が認められた。さらに一回換気量の比較では、約30%の測定誤差が認められた。

今後は、多チャンネル化をはかり、これまで開発した測定技術を測定ベルトシステムに集約することで、実用的なEITシステムを開発する。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### [雑誌論文](計7件)

一二三奏、根武谷吾、熊谷寛、"ウェアブル電気インピーダンストモグラフィに有用な胸郭形状推定法"、日本医療機器学会論文誌、査読有、Vol.86(5)、2016、450-458

岩下義明、根武谷吾、小池朋孝、今井寛、"Electrical Impedance Tomography (EIT)を用いて肺泡リクルートメント効果の確認を行った1例"、日本集中治療医学会雑誌、査読有、Vol.23、2016、675-676

根武谷吾、"電気インピーダンストモグラフィ(EIT)で肺の換気分布を見える化!"、呼吸器ケア、査読無、14(1)、2016、94-98

Nebuya S、Koike T、Imai H、Iwashita Y、Brown BH、Soma K、"Feasibility of using 'lung density' values estimated from EIT images for clinical diagnosis of lung abnormalities in mechanically ventilated ICU patients", Physiological Measurement,36(6)、査読有、2015、1261-1271

吉田冴子、根武谷吾、藤原康作、佐藤英介、廣瀬稔、"有限要素法を用いた電気メスの電動電流による植込み型心臓ペースメーカーに対する電磁干渉評価法"、日本医療機器学会論文誌、査読有、84(3)、2014、343-348

根武谷吾、平賀琢也、氏平政伸、"電気インピーダンストモグラフィ(EIT)を用いた細胞凍結過程の可視化に関する基礎的検討"、計測自動制御学会論文集、査読有、50(8)、2014、580-587

根武谷吾、一二三奏、熊谷寛、"曲率センサの胸郭上配置を想定した胸郭形状推定法-ウェアブル電気インピーダンストモグラフィの一機能として-"、計測自動制御学会論文集、査読有、50(8)、2014、616-621

### [学会発表](計11件)

根武谷吾：Electrical Impedance Tomography (EIT) - EITの概要とその有用性 -、第9回呼吸機能イメージング研究会学術集会、1月28日(2017)、京都大学百周年時計台記念館、招待講演  
Nebuya S、Koike T、Kumagai H、"Simple monitoring methods of respiration using

wearable sensors”, Life Engineering Symposium 2016, Nov.5 (2016),大阪国際交流センター

Iwata Y, Inaoka H, Nebuya S, Kumagai H, “Pressure control of the simulated vascular access circuit”, Life Engineering Symposium 2016, Nov.5 (2016), 大阪国際交流センター

Nebuya S, Hifumi S, Kumagai H, Brown BH, “Feasible method for chest shape estimation used for EIT, XIV Conference on Electrical Impedance Tomography (EIT)”, XIV Conference on Electrical Impedance Tomography (EIT), June 21 (2016), Karolinska Institutet and KTH Royal Institute of Technology in Stockholm (Sweden)

根武谷 吾 ” 体幹形状モニタリング技術の医療・ヘルスケア領域への展開 ”、第55回 日本生体医工学学会大会、4月28日(2016)、富山国際会議場(富山県富山市)

横関滉平、根武谷吾、氏平政伸、熊谷寛、 “EIT装置を用いた生体組織解凍過程の3次元モニタリング”、電気学会 光・量子デバイス研究会「医療工学応用一般(QIE-2)」, 4月22日(2016)、電気通信大学(東京都調布市)

Nebuya S: Application of Electrical Impedance Measurement and Electrical Impedance Tomography in Japan, International Biomedical Engineering Conference 2015, Hotel Hyundai in Gyeongju, Korea, November 13 (2015), 招待講演

根武谷吾、小池朋孝、岩下義明、熊谷寛、相馬一玄、新井正康、今井寛、 ” 集中治療室における肺機能評価を実現するウェアラブルEITの開発 ”、生体医工学シンポジウム2015、9月25日(2015)、岡山国際交流センター(岡山県岡山市)

Nebuya S, Koike T, Imai H, Iwashita Y, Kumagai H, Soma K, Arai M, Brown BH, “A wearable electrical impedance tomography system – Its features and clinical application-”, 16<sup>th</sup> International Conference in Electrical Impedance Tomography, June 2 (2015), Microcity in Neuchatel (Switzerland)

熊谷寛、根武谷吾、鈴木英行、電流誘導磁気トモグラフィー技術、電気学会 光・量子デバイス研究会、1月26日(2015)、ゆふいん七色の風(大分県由布市)

一二三奏、根武谷吾、熊谷寛、 ” ウェアラブル電気インピーダンストモグラフィに有効な胸郭形状推定法 ”、電気学会 光・量子デバイス研究会、4月24

日(2015)、北里大学(神奈川県相模原市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計5件)

名称: 体脂肪測定装置  
発明者: 根武谷吾  
権利者: 学校法人北里研究所  
種類: 特許  
番号: 特許願 2014 - 257470  
出願年月日: 平成26年12月19日  
国内外の別: 国内

名称: 検知システム、繊維シート、コネクタ、検知装置および液体種類推定方法  
発明者: 根武谷吾  
権利者: 学校法人北里研究所  
種類: 特許  
番号: 特許願 2015 - 132024  
出願年月日: 平成27年6月30日  
国内外の別: 国内

名称: 形状推定装置、スキャニング装置、動作検出装置、形状推定方法、スキャニング方法、動作検出方法、プログラム  
発明者: 根武谷吾  
権利者: 学校法人北里研究所  
種類: 特許  
番号: 特許願 2016 - 003764  
出願年月日: 平成28年1月12日  
国内外の別: 国内

名称: 輪郭形状推定装置、輪郭形状推定方法およびプログラム  
発明者: 根武谷吾  
権利者: 学校法人北里研究所  
種類: 特許  
番号: 特許願 2016 - 003892  
出願年月日: 平成28年1月12日  
国内外の別: 国内

名称: 運転手監視装置、監視装置、監視方法、プログラム、シートベルト  
発明者: 根武谷吾  
権利者: 学校法人北里研究所  
種類: 特許  
番号: 特許願 2016 - 020947  
出願年月日: 平成28年2月5日  
国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

名称：検知装置、繊維シート、糸、検知システム、検知方法およびプログラム  
発明者：根武谷吾  
権利者：学校法人北里研究所  
種類：特許  
番号：特許第 5791132 号  
出願年月日：平成 26 年 12 月 19 日  
取得年月日：平成 27 年 8 月 14 日  
国内外の別： 国内

〔その他〕  
ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

根武谷 吾 (NEBUYA Satoru)  
北里大学・医療衛生学部・准教授  
研究者番号：00276180

### (2) 研究分担者

相馬 一亥 (SOMA Kazui)  
北里大学・医学部・名誉教授  
研究者番号：00112665

今井 寛 (IMAI Hiroshi)  
三重大学・医学部附属病院・教授  
研究者番号：00184804

新井 正康 (ARAI Masayasu)  
北里大学・医学部・教授  
研究者番号：50222724

小池 朋孝 (KOIKE Tomotaka)  
北里大学・大学病院・研究員  
研究者番号：90523506

岩下 義明 (IWASHITA Yoshiaki)  
三重大学・医学部附属病院・助教  
研究者番号：90525396

(3) 連携研究者 なし  
( )

研究者番号：

(4) 研究協力者 なし  
( )