

生体信号計測で皮膚下の状態を可視化する医療センシング

東京理科大学 先進工学部 機能デザイン工学科 嘱託助教

かん す いん
姜 琇仁

1 はじめに

私たちの体は、心拍、呼吸、体温、筋肉の活動、皮膚の電氣的応答など、さまざまな信号を発している。これらの信号は体内で起きている生理的な変化を反映しているが、測定された時点で直ちに健康状態を示す情報となるわけではない。センサによって得られた信号は、ノイズの除去、時間変化や空間分布の解析、さらに生理学的・医学的な知識との対応づけを経て、はじめて医療や看護を支える健康情報として解釈される。

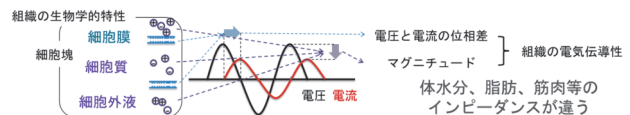
「信号を情報に変える」技術は、目で直接確認することが難しい体内の変化を扱う場面で重要となる。例えば褥瘡（床ずれ）では、皮膚表面に現れる傷だけでなく、皮膚の下で進行する組織変化を把握することが求められる。一方で、創部はドレッシングによって保護されており、状態を確認するたびに外すことは患者の負担になり得る。本稿では、生体信号が健康情報として解釈される過程に着目し、その具体例として、微弱な電気信号を用いた皮膚下状態の医療センシングを取り上げる。

2 インピーダンスで皮膚の下を読む

生体組織の電氣的応答を考えるうえで、電圧、電流、抵抗の関係は基本となる。電圧を V 、電流を I 、抵抗を R とすると、その関係は $V=IR$ で表される。抵抗 R は電気の流れにくさを示す量であるが、生体組織は単純な抵抗体としては扱えない。皮膚や皮下組織には水分やイオンが含まれており、細胞膜は電荷を蓄える性質をもつ。そのため、交流電流を用いた計測では、電圧と電流の大きさの関係に加えて、両者の時間的なずれも重要な情報となる。

交流における電圧と電流の比は、インピーダンス Z として表される。電圧の振幅を A 、電流の振幅を B 、それぞれの位相を ϕ_v 、 ϕ_i とすると、角周波数 ω におけるインピーダンスは

$$Z(\omega) = \frac{V}{I} = \frac{A}{B} e^{i(\phi_v - \phi_i)}$$



【図1】 組織の構成要素とインピーダンスの関係。細胞膜、細胞質、細胞外液などの性質により、電圧と電流の大きさや位相差が変化する。

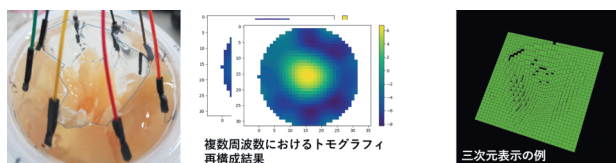
と表される。ここで A/B は電圧と電流の大きさの比を示し、 $\phi_v - \phi_i$ は電圧と電流の位相差を示す。すなわち、インピーダンスには、電気の流れにくさを表す大きさの情報だけでなく、生体組織が交流電流に対してどのように応答したかを示す位相の情報も含まれる。

皮膚の水分量、細胞の状態、組織の種類が変化すると、インピーダンスの大きさや位相差も変化する。さらに、周波数を変えながら測定することで、単一周波数の測定では捉えにくい組織状態の違いが現れる場合がある。このため、インピーダンスは、皮膚表面の観察だけでは把握しにくい皮膚下の状態を評価するための特徴量として利用できる。測定された電圧と電流は単なる電気信号であるが、インピーダンスとして整理することで、組織状態を推定するための情報へと変換される。

3 空間情報として見えない変化を捉える

インピーダンス計測は、皮膚や組織の電氣的状態を反映する特徴量を与える。一方で、単一の測定値からは、変化の有無を推定できても、その変化が測定領域内のどこに生じているかを特定することは難しい。医療や看護における観察情報として利用するためには、電氣的変化の大きさだけでなく、その空間的な分布を推定することが求められる。

この課題に対して有効な考え方がトモグラフィである。トモグラフィは、複数方向から得られた測定情報を組み合わせ、対象内部の分布を再構成する方法である。X線CTでは、多方向から取得したX線透過情報を計算処理により統合し、体内の断面像を得る。電気インピーダンストモグラフィも同様に、測定対象の



【図2】 周囲電極による測定とトモグラフィ再構成の例。左：皮膚模擬ファントムを用いた測定，中：複数周波数における再構成画像，右：推定結果の三次元表示。

周囲から得られる信号を用いて内部状態の分布を推定する。

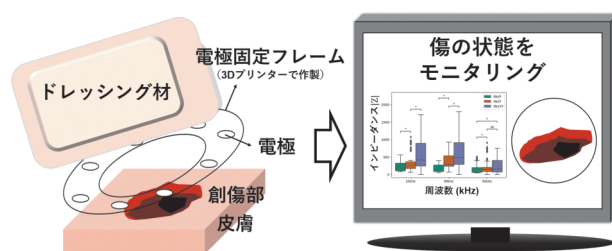
電気インピーダンストモグラフィでは、微弱な交流電流を用い、皮膚の周囲に配置した複数の電極の組み合わせを切り替えながら、多方向のインピーダンス応答を取得する。これらの測定値を再構成計算に用いることで、皮膚下のどの領域で電気の通り方が変化しているかを空間分布として表すことができ、表面観察だけでは把握しにくい内部状態を視覚的な情報として扱うことが可能になる。

④ 皮膚下状態モニタリングへの応用

医療や看護の現場では、皮膚表面の観察だけでは十分でない場面がある。褥瘡（床ずれ）では、表面に現れる傷の大きさや色に加えて、皮膚の下で進行する組織変化や深さ方向の状態を客観的に把握することが重要となる。一方で、創部はドレッシングによって保護されており、状態を確認するたびに外すことは患者の負担になり得る。また、創部に直接センサを貼付すると、観察や処置の妨げとなる可能性もある。

この課題に対し、測定対象に直接触れるのではなく、その周囲に電極を配置し、内側の状態を推定する方法が考えられる。皮膚インピーダンスを用いた創傷評価や褥瘡検出の研究はこれまでも報告されており¹⁾、筆者らも創部周囲の電極を用いた皮膚状態推定を検討してきた²⁾。試作したシステムでは、皮膚の周囲に配置した電極から微弱な交流電流を流し、複数の周波数でインピーダンスを測定する。得られた信号は、トモグラフィ再構成によって領域ごとの情報に変換され、さらに機械学習を用いることで、皮膚状態が変化した領域の分類に用いられる。

この過程では、電圧や電流として得られた生体信号が、インピーダンス、空間分布、分類結果という段階を経て、皮膚下の変化を示す情報へと整理される。すなわち、周囲電極による計測は、創部に直接触れることなく、見えにくい皮膚下の変化を健康情報として扱うための一つの方法である。



【図3】 ドレッシングを外さず、周囲の電極からインピーダンスを測定する医療センシングの概念と、健康な参加者の下肢創傷を10日間観察したインピーダンス変化の例。

基礎的な検証として、健康な被験者の前腕に電極を配置し、囲まれた領域の一部に保湿剤を塗布することで皮膚状態の変化を模擬した。その後、一時間にわたってインピーダンスを測定し、保湿剤を塗布した領域と塗布していない領域の違いを解析した。その結果、周囲から測定した電気信号に基づいて、皮膚状態が変化した位置を推定できる可能性が示された。また、予備的な観察として、健康な参加者の下肢に生じた小さな創傷を10日間測定したところ、時間経過に伴うインピーダンス変化も確認された。これらの結果は創傷診断そのものを示すものではないが、皮膚下の微小な変化を非侵襲的に捉える医療センシングの基礎となる。

⑤ 健康情報センシングが支える未来

健康情報センシングの役割は、医師や看護師の判断を置き換えることではない。人が観察し、判断し、ケアを行うための情報を補うことにある。創傷管理においても、表面観察だけでは捉えにくい深さ方向の変化や組織状態を継続的に把握できれば、患者の負担を抑えながら、より客観的な観察を支援できる可能性がある。

実用化に向けては、測定されたインピーダンスがどのような生理的・病理的变化を反映しているのかを検証し、電極の接触状態、皮膚の水分量、姿勢、体動などの影響を抑える必要がある。見えない生体信号を測り、健康状態を評価する情報へと変換する技術は、創傷管理にとどまらず、ウェアラブル機器、在宅医療、リハビリテーション、人と接するロボットの表面センサなどにも広がっていく可能性がある。

参考文献

- 1) S. L. Swisher et al. "Impedance sensing device enables early detection of pressure ulcers in vivo," Nat. Commun., 6 (2015) 6575.
- 2) S. Kang et al. "Development of an electrical impedance tomography spectroscopy for pressure ulcer monitoring tool: Preliminary study," Proc. IEEE EMBC, (2020) 5073-5076.