

特 集

呼吸管理における最近のモニタリング

換気を可視化するモニタリング：
Electrical impedance tomography による換気の局在性中村直久¹⁾・中根正樹²⁾

キーワード：electrical impedance tomography, EIT, モニタリング, 換気

I. EIT とは

Electrical impedance tomography (EIT) は、体表面の皮膚に接触させるように巻きつけた電極を用いて電極間における生体内の電気抵抗を測定し、それを画像化するモニタリング法である。

原理としては、体表面上に等間隔に 16 個の電極を貼付し、このうちの隣り合った 2 電極を通電電極として微弱な交流電流を流し、通電電極とそれ以外の電極

との間に流れた交流電流を測定する。この測定を、通電電極を順々に交換しながら体表一周分を行い、各電極方向への電流のデータを重ね合わせて得られた体内の電気抵抗 (impedance) の強弱をマッピングすることで、CT 検査のような断層画像が得られる（図 1）。

測定はリアルタイムで連続して行われるため、測定範囲内の電気抵抗の変化を鋭敏に画像データに反映し、動画として確認することが可能である（図 2）。

生体内で最も電気抵抗の変化に富む組織は肺であ

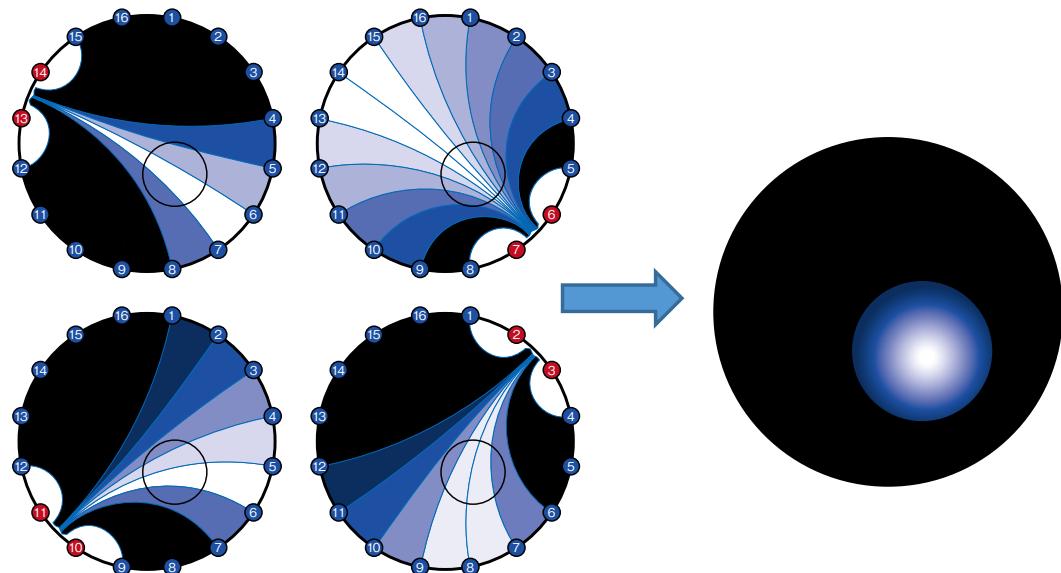


図 1 EIT image 構成原理

1) 山形大学医学部附属病院 麻酔科

2) 同 高度集中治療センター

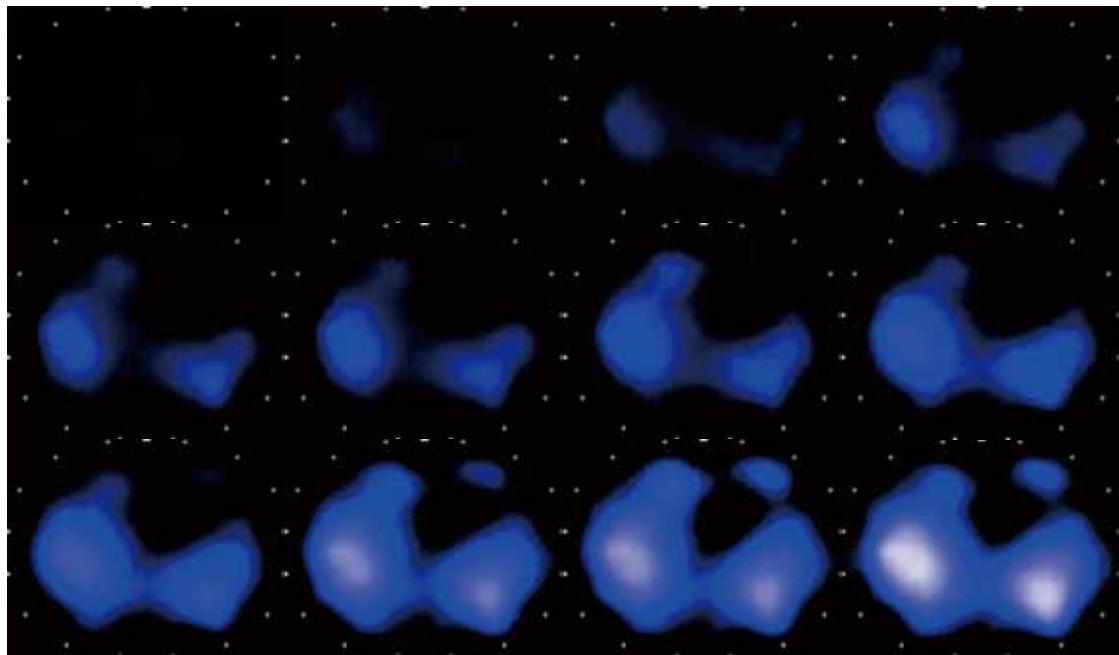


図2 電気抵抗変化の反映画像

呼気終末(左上)から徐々に吸気が始まり(上段左→右)、肺容量の増加に伴い青い色の領域が増えていく(中段左→右)。最大に伸展した部分は白で示される(下段左→右)。

る。生体内の水分は電気抵抗が低く、空気は電気抵抗が非常に高いため、呼吸によって胸腔内に空気が流入すると、胸腔内の電気抵抗は極端に高くなる。

そのため、EIT検査を胸部に用いることで、換気による胸郭内の電気抵抗の変化、すなわち含気状態の変化を観測することができる。測定範囲内の電気抵抗の相対値で画像が描出されるため、内部に空気を含まない心臓をゼロ点として較正に用いている。そのため、前胸部における第5肋間前後の高さでEITの測定が行われることが多い(図3)。

Dräger Medical社製のEITでは、電気抵抗が極端に低い含気の無い部位から、少しづつ含気が増えてきて、電気抵抗が高く含気が非常に多い部位になるにつれて、画像の表示色は黒→青→白と変化するようになっている。

II. これまでの画像検査と異なる点、特にCTとの比較(表1)

SpO_2 モニタリングや血液ガス所見などの呼吸生理学的パラメータからでは分からず肺の局所情報を得るために手段として、通常は胸部レントゲン検査やCT検査などの画像診断が用いられる。ここでは、特に同じ断層画像であるCT検査とEITの相違点を挙げる。



図3 EIT測定中の様子

表1 EITとCTを比較して

	放射線被曝	簡便さ	解像度	画像
EIT	無し	ベッドサイドで施行可能	低い	動画
CT	有り	移動が必要	高い	静止画

1. 検査としての比較

EITでは、胸郭に電極を巻き付けることができれば画像が得られるため、CT検査のような放射線被曝の心配がない。よって検査の回数制限がなく、24時間連続での測定も可能である。また、ベッドサイドからの患者移動の必要性がないため、搬送によるリスクや人工呼吸の中止が無くなり、人工呼吸器の設定変更や体位変換など、呼吸条件の変化に伴う局所換気状態の変化を経時的に測定する場合においてはCTよりもはるかに有利であるといえる。

2. 画像所見の比較（図4）

EITの大きな特徴として、肺の換気状態をリアルタイムに動画で見ることができるので、肺の1断面における呼気から吸気にかけてのガスの流入のタイミングがわかり、また、肺の領域毎に含気の多い部位と少ない部位とを、測定範囲内の相対値ではあるものの、これまでの検査より詳細に評価することが可能である¹⁾。さらに、記録した画像データを解析することで、分割した肺領域毎の換気量の割合を算出することも可

能である。なお、図4では肺を画像上でVentral（腹側）からDorsal（背側）までの4区域に分けたうえで、Mid-ventral領域では全体の換気量の35～40%を占めていることが分かる。

ただし、EITはCTよりも解像度が低いため、肺の含気が良好な部位と悪い部位が隣り合っている場合などに、その境界がCTと比べて不明瞭なものとなる。同時に、臓器同士の境界や組織の識別能ではCT検査よりも劣るといえる^{2,3)}。

III. EITの有効性

動物実験では、呼気終末陽圧（positive end-expiratory pressure: PEEP）の増減による肺容量の変化はEITとCTとの間で有意な相関関係が認められており⁴⁾、EITを用いての肺容量変化の評価は信頼性が高いといえる。また、肺局所の換気状況が把握できるため、肺の区域ごとのエア入りの均一性も把握できる¹⁾。呼吸におけるリアルタイムの動画を経時的に見ることが可能であるため、人工呼吸器の設定変更や腹臥位療法など、肺理学療法の治療効果判定にも非常に有用であるといえる。

さらには、現時点では人工呼吸器関連肺損傷（ventilator-associated lung injury: VALI）の予防のための指標として、人工呼吸設定を決める際にも有効ではないかといわれている。VALIは、不適切な人工呼吸

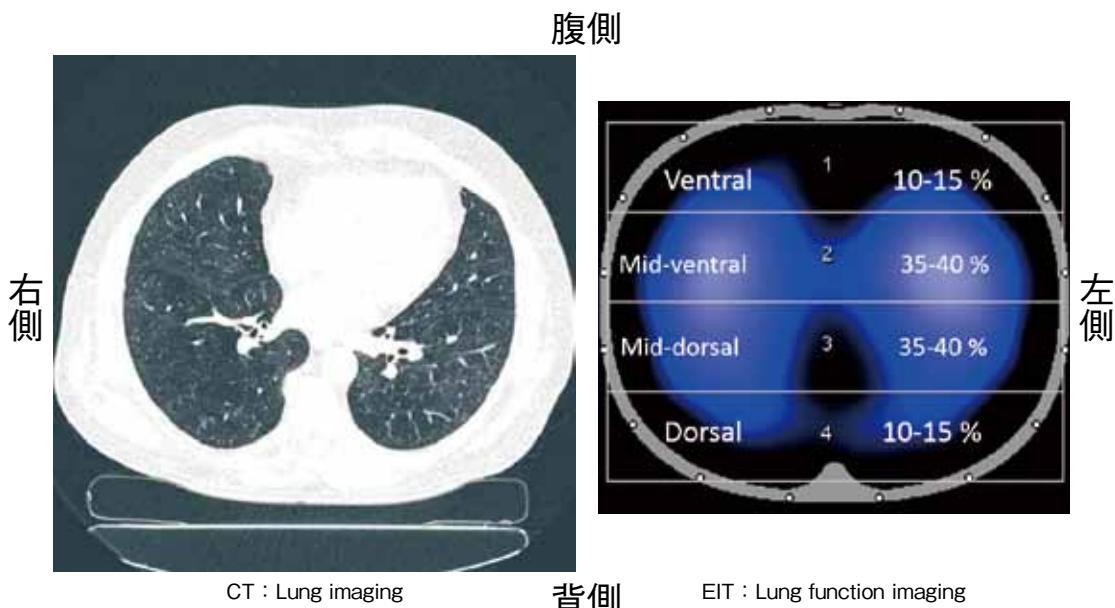


図4 CT画像とEIT画像の比較
右図は腹側から背側までを4分割した際の標準的な換気分布の割合を示す。

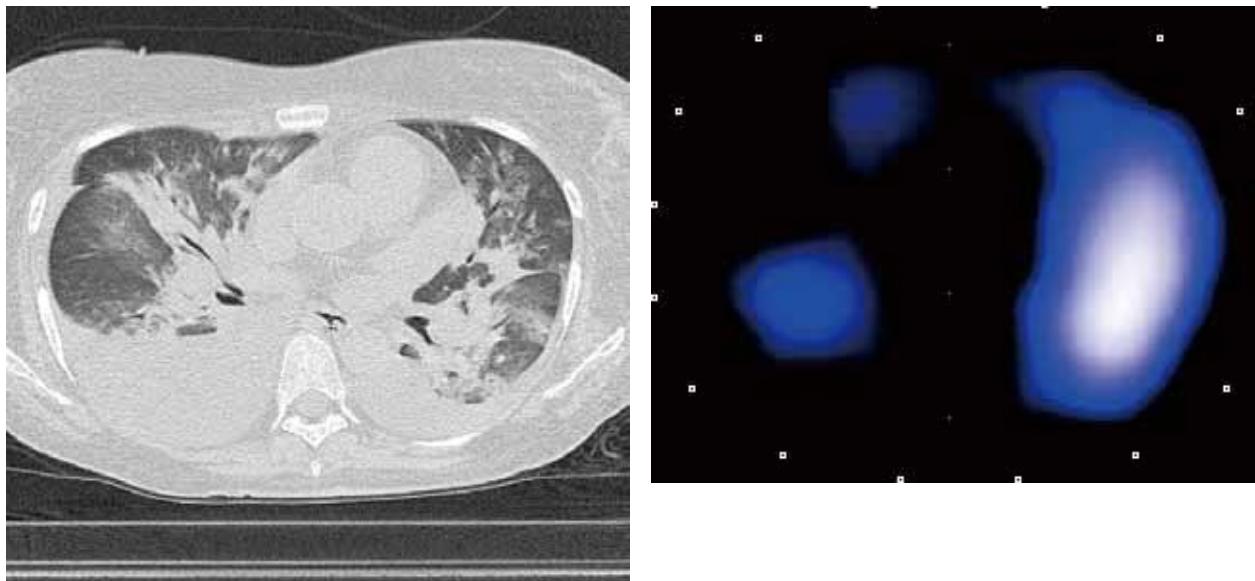


図5 症例1のCT画像とEIT画像
換気の左右差が大きいことが分かる。

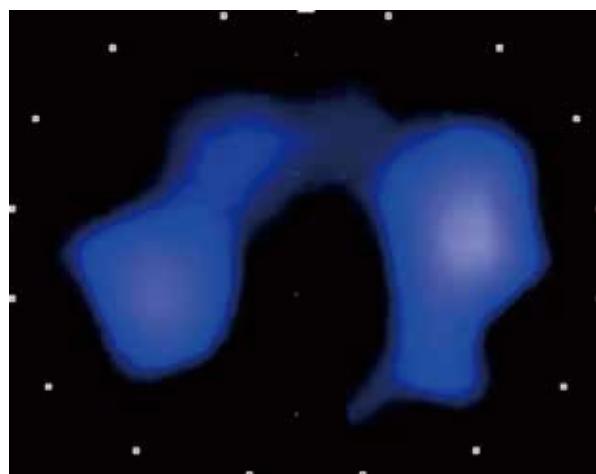


図6 症例1にCPAPおよび前傾側臥位を施行した後のEIT画像
左右の換気がより均等になっている。

器設定による肺胞の過伸展と虚脱再開放が原因となって惹起される肺損傷であり、肺保護換気戦略では、PEEPなどによる肺胞虚脱予防および換気量制限による肺胞過伸展の予防が主軸を担っている⁵⁾。しかし、換気量制限を行っても患者の肺に低換気の領域が多いと肺胞過伸展が回避できないとする報告もある⁶⁾。

EIT検査を行うことでその達成度を客観的に評価し、無気肺および肺胞過伸展を生じている可能性を監視しながら人工呼吸設定を調整することで、より肺保護的な人工呼吸器設定を探ることができる可能性がある。豚の急性肺傷害 (acute lung injury : ALI) モデル

に対し、PO₂を指標に換気設定を行った群をコントロールしてEITを用いた換気設定を行うことで、組織学的にVALIを減少させたという報告もある⁷⁾。これは、EIT使用群の呼吸管理として、EIT画像上で無気肺と考えられる黒色で表示される領域が見られる際にはPEEP設定を高くすることを試み、過伸展と思われる白色の領域を生じた際には最高気道内圧設定を下げるという操作を継続的に行うものであった。

IV. EITの安全性

基本的に安全であるが、微弱な電流を流すためペー

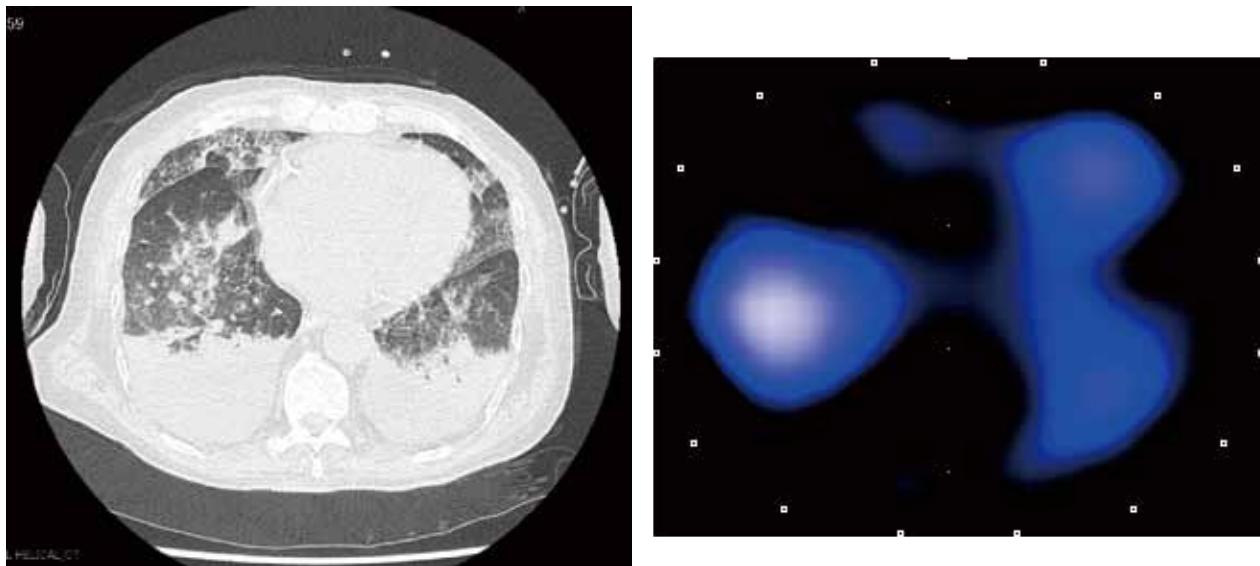


図7 症例2のCT画像とEIT画像
左右肺での換気が不均一であることが分かる。

スメーカー埋め込み患者への使用は制限される。ベルトの長時間装着や浮腫の強い患者においては、ベルトの皮膚面への接触が原因で水疱形成したり表皮剥離を生じたりすることもあるので注意すべきである。

V. 症例解説

【症例1】

36歳女性の呼吸不全症例、自発呼吸下の吸気終末のEIT画像を示す(図5右)。CT上では両側の背側無気肺が存在し、特に右肺に無気肺が目立っている(図5左)。EITでは右肺に黒～青の領域が多く、左肺に青～白の領域が多くなっている。つまり、エア入りが右肺よりも左肺に偏っており、左右の肺で非常に不均等な換気になっている。背側無気肺のリクルートメントおよび左前傾側臥位などの体位療法を含む呼吸理学療法が検討される。

持続気道陽圧(continuous positive airway pressure: CPAP)および左前傾側臥位療法を施行したところ、左肺の無気肺が軽減し、左右の領域で電気抵抗の高低差(黒～青～白の色彩変化)が少なくなつておらず、換気の不均等が解消されつつあることがわかる(図6)。

【症例2】

78歳男性、急性呼吸促迫症候群(acute respiratory distress syndrome: ARDS)のため挿管人工呼吸管

理中の症例。CT画像では両側の背側無気肺が存在しており、また無気肺の領域以外にも間質影が散在して認められる(図7左)。EITでは、呼気終末から吸気になるにつれて、左肺は比較的均一に換気されているのに対し、右肺では一部の領域で、画像上で白くなるほど換気されている部位と黒いまま換気不良となっている部位があり、換気の不均一性が確認できる(図7右)。EIT検査を行いながら無気肺を改善できるべく高いPEEP設定とし、換気がなるべく均等になるように、また過伸展が生じないように、プラトー圧なども考慮した適切な人工呼吸設定や、腹臥位や前傾側臥位などの適切な体位を模索することが必要であると考えられる。

この症例の右肺腹側のように、CT画像上で含気があるように見える部位でも、EITを測定してみると実際の吸気ではエア入りが不良であることが分かる。逆に、この症例の左肺背側のように、呼気終末で撮像されているCT画像では無気肺に見える部位においても、EITで確認すると吸気時にはエア入りが存在することがわかる場合がある。吸気に伴い虚脱肺が再開放した可能性や、吸気に伴い肺の位置が尾側に移動した可能性などが考えられる。

本稿の全ての著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) Bhatia R, Schmolzer GM, Davis PG, et al : Electrical impedance tomography can rapidly detect small pneumothoraces in surfactant-depleted piglets. *Intensive Care Med.* 2012 ; 38 : 308-15.
- 2) 小池朋孝 : electrical impedance tomography (EIT). 小児科診療. 2010 ; 10 : 1773-8.
- 3) 小谷 透 : Electrical impedance tomography. 呼吸. 2010 ; 29 : 500-5.
- 4) Meier T, Luepschen H, Karsten J, et al : Assessment of regional lung recruitment and derecruitment during a PEEP trial based on electrical impedance tomography. *Intensive Care Med.* 2008 ; 34 : 543-50.
- 5) Gattinoni L, Caironi P, Cressoni M, et al : Lung recruitment in patients with the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2006 ; 354 : 1775-86.
- 6) Terragni PP, Rosboch G, Tealdi A, et al : Tidal hyperinflation during low tidal volume ventilation in acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med.* 2007 ; 175 : 160-6.
- 7) Wolf GK, Gomez-Laberge C, Rettig JS, et al : Mechanical ventilation guided by electrical impedance tomography in experimental acute lung injury. *Crit Care Med.* 2013 ; 41 : 1296-304.