

肺の熱伝導率の内部圧力依存性の測定

Measurement of Internal Pressure Dependence on Lung Thermal Conductivity

○ 山崎 望 (早稲田大学) 渡辺 広樹 (早稲田大学) 関 雅俊 (早稲田大学)
 小林 洋 (早稲田大学) 宮下 朋之 (早稲田大学) 藤江 正克 (早稲田大学)

Nozomu YAMAZAKI, Waseda University
 Hiroki WATANABE, Waseda University
 Masatoshi SEKI, Waseda University
 Yo KOBAYASHI, Waseda University
 Tomoyuki MIYASHITA, Waseda University
 Masakatsu G. FUJIE, Waseda University

Key Words: Thermal conductivity, Pressure, Lung, Radio Frequency Ablation

1. 序論

近年、がんの治療法としてラジオ波焼灼療法(Radio frequency ablation: RFA)を選択する症例が増加している。RFAは患部にラジオ波を流すことで誘電加熱により腫瘍を凝固・壊死させる術式であり、従来の切除法と比較して侵襲性が低く根治性が高い。肝がんや乳がんなどで治療実績を伸ばし、その有効性から肺がんにも適用が開始されている。肺がんに対するRFAは、局所麻酔後、X線CTガイド下で、細径針で正確な方向付けと距離測定を行った後、電極針を用いて通電を行う。肺は空気を多量に含む臓器であり腫瘍の周囲は熱伝導率の低い空気に囲まれているため、ラジオ波により発生した熱が局所に留まる⁽¹⁾。ゆえに、肝がんや乳がんなどと比較し、焼灼に適するといわれる。

しかし、実際には術中の未焼灼・焼灼過多による合併症が報告されている⁽²⁾。これは呼吸性移動による、肺RFA術中の肺内部空気量の変化があること。また術前のCT撮像診断時と術中では空気量が異なるため、焼灼領域の予測が異なるからである。

そこで本研究では、空気量変化に伴う焼灼領域の予測困難性を解決するため、肺がんの精確な焼灼を支援する焼灼シミュレータの開発を行っている。本シミュレータは、空気量変化に伴う肝臓内部の温度分布の推移を予測するものであり、シミュレータの構築には肺の熱伝導率、比熱、密度など熱物性値の取得が必要となる。本論文では、シミュレーション精度に特に大きな影響を与えると考えられる肺の熱伝導率に関し、熱伝導率の内部圧力依存性を実験から取得することで、肺内部の空気量が熱伝導現象に与える影響について考察した。

2. 空気圧制御機器

肺に送気する空気の圧力と流量を自動制御可能な空気圧・流量制御機器を製作した。圧力と流量の双方を独立に制御することで、熱伝導率を変化させる因子が肺内部の圧力であるか、もしくは肺内部に存在する空気量であるか検討することが可能である。本論文では、研究の基礎的検討として、まずは圧力制御のみを行い熱伝導率の圧力依存性について検討を行った。

Fig. 1に空気圧・流量制御機器の概要図を示す。コンプレッサーにて圧縮された高圧の空気は、レギュレータにより適度に減圧され、流量調整弁により流速が調整された後、

2 ポート電磁弁を通り肺に流入する。この際、肺内部圧力を測定し、肺内部圧力が目標圧力に到達後、電磁弁に電圧を印加し、電磁弁を閉じる。電磁弁のOn-Off制御により、肺内部に空気を留め、圧力を一定に保持した。

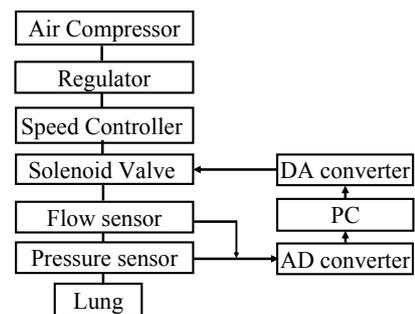


Fig. 1 Overview of pressure control system

3. 熱伝導率測定法

一般に、熱伝導率を測定するための方法として、以下の3つの方法が挙げられる。

(A) 非定常熱線法

試料中に置かれたワイヤに一定熱量を印加し、十分時間が経過後、時間変化に対する温度変化から計算により熱伝導率を算出する。

(B) 非定常レーザーフラッシュ法

円盤状試料にレーザー光を照射し、十分時間が経過後、円盤裏面の任意の2時刻間の温度変化から熱拡散率、比熱を求め、2値を基に熱伝導率を算出する。

(C) 定常比較法

2本の円柱の間に試料を挟み、上部円柱から下部円柱に一定熱量を流す。十分時間が経過後、円柱に生じる温度勾配から熱伝導率を算出する。

本研究では、肺に空気を含有した状態で熱伝導率を求める。(A)非定常熱線法以外は、試料を円盤状や円筒状に整形する必要があり、肺に空気が含有した状態で熱伝導率を測定することは不可能である。ゆえに、(A)非定常熱線法により熱伝導率の測定を行った。

本研究で使用した非定常熱線法の測定プローブは直径1.0[mm]、長さ60[mm]の針形状となっている。針の内部には試料に加熱を行うヒータ線と、試料加熱による温度変化を測定するために熱電対が内蔵されており、ヒータ線に一

定電力（熱量）を与え続けると、ヒータ線の温度が時間とともに指数関数的に上昇する。この際の昇温率を基に熱伝導率が算出される。

4. 実験

4-1 実験方法

Fig. 2 に実験系を示す。大気圧下で、空気圧制御機器にて、ブタ肺に空気を送気して熱伝導率を測定した。肺が膨張していく様子を、Fig. 3 に示す。この際、人の呼吸動が 6.0[L/min]であることを考慮して、空気圧制御機器にて流量を調整し、6.0[L/min]で送気を行った。また、肺 RFA の対象区域は多くの場合、肺末端部分の表面に近い部位に発生したがんであることを考慮し、本実験では、ブタ肺の下葉に測定用プローブを穿刺し熱伝導率を測定した。また肺が大きく膨張する際には気管支の位置も移動するため、気管支を避け、針の周囲が肺実質に満たされる部位を選別し、穿刺を行った。

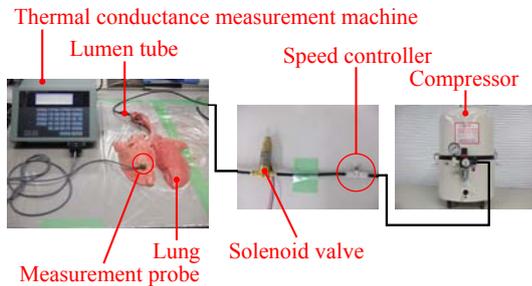


Fig. 2 Experimental condition

実験手順は、以下の通りである。

- (1) バルーン径 33[mm]の医療用ルーメンチューブを用い気管閉塞を行い、片肺のみ空気が送気される状態（片肺換気）にする。
- (2) 空気圧制御機器を用いて、肺に空気を送気する。
- (3) 熱伝導率測定用プローブを気管支存在部位を避けて穿刺する。
- (4) 0~3.0[kPa]まで 0.2[kPa]毎に、各圧力につき 2 回ずつ測定を行う。

なお、実験にあたっては 8 個体用意した肺の中で、空気漏れが少なかった 2 個体を測定対象とした。

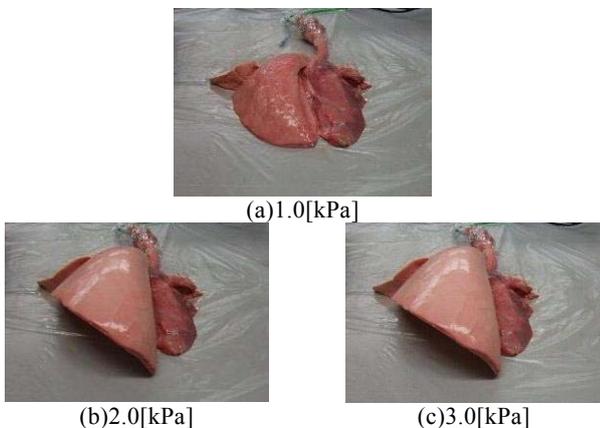


Fig. 3 Lung expand to Target Pressure

4-2 実験結果

Fig. 4 に実験結果を示す。グラフ中の実線は、最小 2 乗法を用いて線形近似を行ったモデル値である。実験の結果

肺内部の圧力と熱伝導率の関係は式(1), (2)で示された。

$$\lambda_{Air} = -8.8 \times 10^{-2} P + 1.8 \times 10^{-1} \quad (P < 2.0 \text{ kPa}) \quad (1)$$

$$\lambda_{Air} = 1.3 \times 10^{-1} \quad (P > 2.0 \text{ kPa}) \quad (2)$$

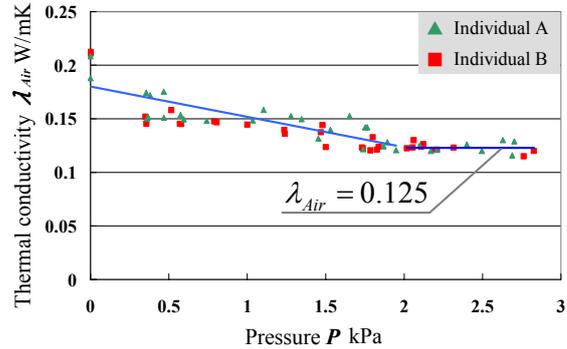


Fig. 4 Relation between thermal conductivity and Lung pressure

4-3 考察

Fig. 4 より、0~2.0[kPa]までは圧力が上昇するにつれ熱伝導率は減少しているが、2.0[kPa]以降、熱伝導率は一定値に収束していることが理解できる。なお、Fig. 3 に示すように、熱伝導率の変化と同様に肺内部の空気量も 2.0[KPa]を境として傾向が変化している。つまり 0~2.0[kPa]までは肺胞が膨張し続け、肺内部の空気量は増大し続けているが、一方で 2.0[kPa]以上では肺胞は膨張の限界に到達し、空気量が一定値に保持されている⁽³⁾。したがって、0~2.0[kPa]までは、実質の存在量に対する空気の存在比率が大きくなるため、熱伝導率が極めて低い空気の熱伝導率の影響が増し、臓器全体としての熱伝導率が減少したものと考えられる。一方 2.0[kPa]以上では、空気量が変化しないため、実質と空気の存在比率に変化が無く、熱伝導率が一定となったものと推測される。

5. 結言

本研究では、焼灼シミュレータ構築に必要である、肺の熱伝導率取得を目的とし、非定常熱線法により、熱伝導率の圧力依存性を取得した。肺内部の圧力を 0~3.0[kPa]まで 0.2[kPa]毎に熱伝導率を測定した結果、0~2.0[kPa]までは熱伝導率は線形的に減少し、2.0~3.0[kPa]以降は一定値となった。今後は熱伝導率の流量依存性を取得し、肺内部の空気と RFA 熱伝達との関係を検討し、焼灼シミュレータを構築していく。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム「グローバルロボットアカデミア」、文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業、科研費（22360108）、科研費（21700513）、科研費（22103512）、および早稲田大学特定課題研究助成費（2009B-104）の支援を受けて行われた。

参考文献

- (1) 馬場康貴, “切除不能肺癌に対する肺ラジオ波焼灼療法”, 鹿児島大学医学雑誌, Vol. 61, No. 2, P29-33, September, 2009
- (2) 大隈智尚, “CT ガイド下経皮的肺腫瘍ラジオ波凝固療法後に空洞形成と著明な炎症反応を来した 2 例”, Japanese Journal of Lung Cancer, vol.45, pp.857-861, 2005
- (3) 横山仁志, “人工呼吸装着患者における肺コンプライアンス測定の有用性”, 理学療法科学, P373-378, 2007