

# 肺気道断面積の音響的推定に基づく肺機能検査システムの研究

## A lung function test system based on acoustic measurement of respiratory sectional area

2031009



研究代表者 熊本大学大学院自然科学研究科 助教 中妻 啓  
共同研究者 熊本大学大学院自然科学研究科 教授 鳥越 一平

### [研究の目的]

肺機能検査は慢性閉塞性肺疾患（COPD）をはじめとする呼吸器疾患の診断のため行われるものである。現在用いられている手法の一つであるスパイロメトリーは努力呼吸を必要とするため、被験者の負担が大きい。被験者が安静状態で肺機能を知る検査手法としては強制オシレーション法（Forced Oscillation Technique, FOT）がある。これは音響信号を口唇から被験者呼吸器系内に印加し、測定した反射信号から口唇位置における音響インピーダンスを推定する手法である。臨床的に重要とされる指標は声門以深の末梢側肺気道のインピーダンスであるが、FOTで得られる情報は声門から口唇までの上部気道の影響を受ける。上部気道、特に口腔内は舌部など随意運動する部位が多く測定に影響を与えうる。

本研究では上部気道の影響を除去し、末梢側インピーダンスを直接的に推定する検査手法の確立を目指している。被験者への負担が少なく、より正確かつ広範な肺機能情報が得られるシステムを完成させることが目標である。

### [研究の内容, 成果]

まず、上部気道の影響を排除した末梢側イン

ピーダンス取得を行う本研究の内容についてその概要を述べる。

本研究で用いる測定システムの構成を図1に示す。被験者が測定装置末端のマウスピースを口にくわえた状態で、スピーカーで発生させた音波を被験者肺気道内部に入射する。入射波および肺気道による反射波を2つのマイクロフォンにより取得・分離する。ここで本研究では肺気道を一連の音響管であり、所望の声門以深音響インピーダンス  $Z_p$  で終端されているものとする。また、この音響管を図2のように短区間の断面積一定の管が接続した短管接続モデルとし仮定する。このとき、各短管の接続面における進行波・逆進行波の音圧および粒子速度は連続であることから以下の式が成り立つ。ここで、 $p_i^+(t, x_i)$ ,  $p_i^-(t, x_i)$  は時刻  $t$  および短管  $i$  に設定される（図3参照）位置  $x_i$  における進行

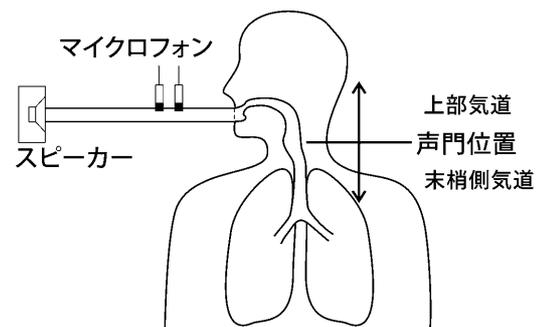


図1 測定装置構成

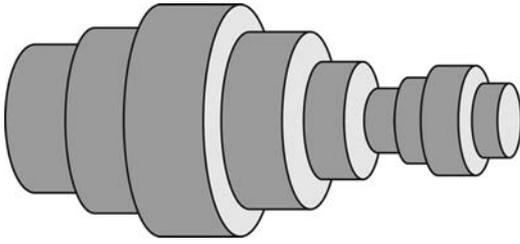


図2 上部気道の短管接続モデルの模式図

波・逆進行波の音圧,  $S_i$  は短管  $i$  の断面積,  $\rho_0, c$  はそれぞれ媒質の密度及び音速である。また  $l$  は各短管の長さである。

$$p_i^+(t, \frac{l}{2}) + p_i^-(t, \frac{l}{2}) = p_{i+1}^+(t, -\frac{l}{2}) + p_{i+1}^-(t, -\frac{l}{2})$$

$$\begin{aligned} & \frac{S_i}{\rho_0 c} \left( p_i^+(t, \frac{l}{2}) - p_i^-(t, \frac{l}{2}) \right) \\ &= \frac{S_{i+1}}{\rho_0 c} \left( p_{i+1}^+(t, -\frac{l}{2}) - p_{i+1}^-(t, -\frac{l}{2}) \right) \end{aligned}$$

なお上式および以下の議論では音響管内の減衰は考えない。ここで  $\tau = \frac{l}{c}$  とすると上記2式を整理して

$$p_{i+1}^+(t, 0) = \frac{1}{1-r_i} p_i^+(t-\tau, 0) - \frac{r_i}{1-r_i} p_i^-(t-\tau, 0)$$

$$p_{i+1}^-(t, 0) = \frac{1}{1-r_i} p_i^+(t, 0) + \frac{1}{1+r_i} p_i^-(t+\tau, 0)$$

が得られる。ここで

$$r_i = \frac{S_i - S_{i+1}}{S_i + S_{i+1}}$$

であり, 短管  $i$  内の進行波および後退波の音圧より短管  $i+1$  内の進行波および後退波の音圧を計算する漸化式となっている。なお  $r_i$  は短管  $i$  と  $i+1$  の境界における進行波音圧の反射率であり, ここから進行波音圧の透過率は  $1+r_i$ , 後退波音圧の反射率, 透過率は  $-r_i, 1-r_i$  である。今, 2つのマイクロフォンによる取得信

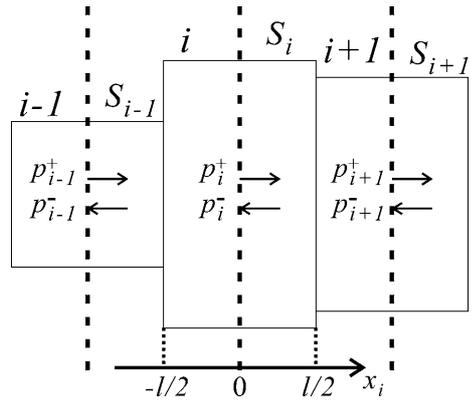


図3 短管内の進行波・逆進行波の音圧および断面積

号を分離して得られる測定装置音響管内の進行波・逆進行波音圧と初期断面積から, 口唇位置における反射率を求めることができる。ここから口唇位置の短管 ( $i=0$ ) の断面積がわかるため, 上記の漸化式を利用して各短管内の音圧・断面積が逐次的に計算される。最終的に声門位置での音圧・断面積を知ること, 声門位置の音響インピーダンスを推定することができる。以上の手法で上部気道の形状変化による音響伝搬の影響を取り除き末梢側インピーダンスを取得する。

本年度は図1を実現する実験装置試作機の製作と基礎的データの取得を行った。図4に試作装置1を示す。これは2つのマイクロフォン間隔が80 mmである。この装置の先端にアルミ・アクリル等の管を取り付け, 断面積推定・音響インピーダンス推定の基礎実験を行った。図5に実験の際にスピーカーへの出力信号として使用したパルス波形を示す。従来のFOTでは単一周波数による情報取得が一般的であったが, 本研究では広帯域のパルスを用いることで



図4 試作装置1

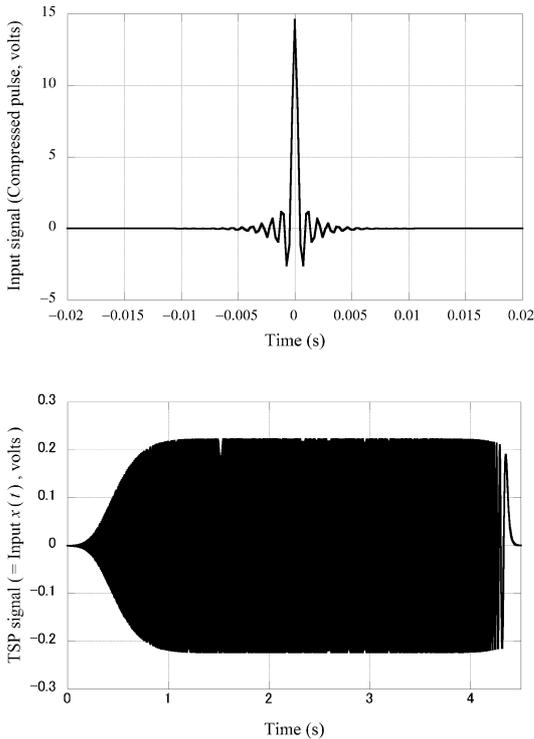


図5 実験に使用したパルス波形の一例。上が圧縮波形、下がスピーカーに入力する時間伸長波形である

肺機能の周波数依存性についても測定対象としている。本実験ではSN比の向上を目的としてパルス波形を時間領域で伸長したものを入力信号に用いている。

まず音響管の断面積推定の実験として、図4の装置先端に長さが1 m、断面積が3.14 cm<sup>2</sup>、10.18 cm<sup>2</sup>、15.21 cm<sup>2</sup>である3種類のアルミ製音響管を2本接続したものを取り付け、計6組の組み合わせについてデータ取得を行った。結果を表1に示す。なお、ここに示す結果はそれぞれ100回の測定を行ったものを平均した値である。表からわかるとおり、第1段目に比べ第2段目

表1 2段の音響管を用いた断面積推定結果

true (cm <sup>2</sup> )		estimated (cm <sup>2</sup> )	
1st stage	2nd stage	1st stage	2nd stage
3.14	10.18	3.08	11.02
3.14	15.21	3.06	15.90
10.18	3.14	10.48	3.28
10.18	15.21	10.53	15.95
15.21	3.14	15.36	3.39
15.21	10.18	15.67	10.98

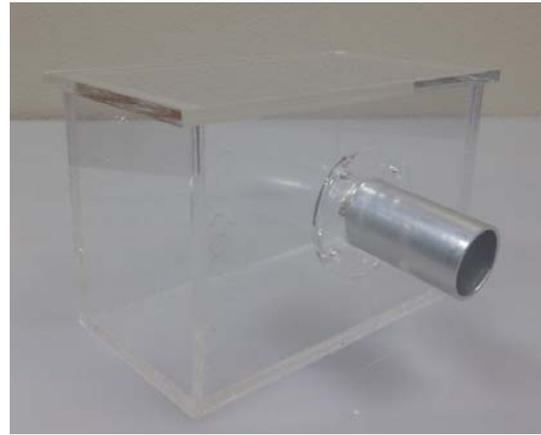


図6 音響インピーダンス測定実験に用いた共鳴容器

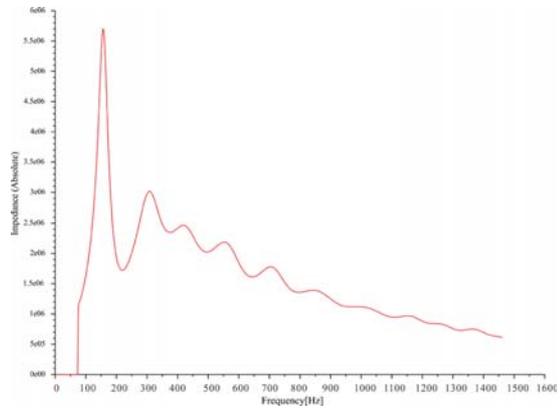


図7 測定された終端音響インピーダンス (アドミッタンス)

の断面積推定精度がやや劣るものの、おおむね良好に断面積を推定できた。

次に音響管終端の音響インピーダンス推定実験を行った。図4の測定装置に長さ1 mのアルミ音響管を接続し、さらにその末端を図6に示す共鳴容器で終端した。この共鳴容器はヘルムホルツ共鳴器の原理に基づき共振周波数がおよそ160 Hzとなるよう設計されている。このときに得られた終端インピーダンス推定結果を図7に示す。グラフはアドミッタンスの絶対値を示しており、設計値である160 Hz近傍にピークが見られる。また共振点より広域のリップルは定在波に対応していると考えられる。

[今後の研究の方向, 課題]

前節の内容から、本研究の今年度の成果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 本研究の手法の検証を行う実験装置の試作を行った
- (2) 試作装置を用いて断面積推定実験を行った
- (3) 試作装置を用いて終端インピーダンス推定実験を行った
- (4) 上記2項について有望な見通しを得た

また、断面積推定・終端インピーダンス推定の実験を遂行する前段階として、音源（スピーカー）と2本のマイクロフォンの特性を補正するアルゴリズムを考案している。これにより測定装置を図4のように組み立てた状態で補正が可能であり、気温・湿度など音響測定装置に影響を与える環境要因の影響を測定実施場所にて補正することができる。これは臨床検査装置としての応用を目指す上で重要な進展であった。

試作装置1を用い基礎的な手法の検証はできたものの、現在の装置では帯域を十分に広げることができず細かい区間の断面積推定ができない。そこで、低周波領域・高周波領域について十分広い帯域を確保するため3つのマイクロ



図8 試作装置2

フォンを用い帯域に応じて使用するマイクロフォンを切り替えることが可能な試作装置2を製作中である。図8にその一部を示すが、現在この装置を用いてより短い区間の断面積推定および音響管壁面による減衰の影響についての検証を継続中である。この検証を終えたのち、被験者を用いた肺気道インピーダンスの取得実験を計画している。

[成果の発表, 論文等]

本研究の成果は平成25年度中に以下の学会にて発表を行った。

中妻 啓, 山崎拓也, 大嶋康敬, 鳥越一平, “臨床肺機能検査のための肺気道音響インピーダンス直接測定法の基礎的検討,” 第30回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 6PM3-PSS-122, Nov., 2013, 仙台.

また現在国際会議1件に投稿中の他、試作機2を用いた実験をさらに進めその成果は国際会議・学術誌にて発表予定である。