2B11 コラプシブルチューブを中咽頭モデルとして使った OSAS に起因する いびき発生メカニズムの解明

Investigation of snoring mechanics caused by OSAS using collapsible tube as a model of
obstructed oropharynx .

学 ○井上 大輔（関大院）正 田地川 勉（関大工）正 板東 潔（関大工）

Daisuke INOUE, Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita, Osaka
Tsutomu TAJIKAWA, Department of Mechanical Engineering, Kansai University
Kiyoshi BANDO, Department of Mechanical Engineering, Kansai University

Key words : OSAS, Collapsible tube, Self excited oscillation, Oropharynx model, Fundamental frequency

1. はじめに

閉塞型睡眠時無呼吸症候群 (Obstructive Sleep Apnea Syndrome :OSAS) は比較的治りやすい病気であるが、いびきや睡眠時の無呼吸は自身では気づきづらく、早期発見が難しい病気である。OSAS に起因するいびき音は、単純いびき症のいびき音と比べると異なった周波数特性を示すことから、いびき音の音響解析により OSAS のスクリーニング法の開発が期待できる。そこで、我々は OSAS の主な原因である舌根の沈下に着目し、その中咽頭モデルをコラプシブルチューブを使って作製し、生体外模擬実験により得られる発生音、チューブ下流圧、チューブ自励振動に対して周波数解析を行い、三者を比較することによって互いの関係を調べ、OSAS 患者のいびき音の発生メカニズムの解明を目指した。

2. 実験装置・方法

OSAS の主な原因である舌根の沈下に着目した中咽頭モデルをコラプシブルチューブとアクリル管を使って作製した。図 1 に作製した中咽頭モデルとその寸法を示す。このモデルの特徴として、アクリル管の一部を切り取っているため上面が座屈しやすく、また下面はアクリル管(剛体壁)を残しているため、実際の OSA 患者の中咽頭部が舌根沈下により閉塞する様子が模擬できる構造となっている。

Fig. 1 Oropharynx model.

続いて、図 2 に実験装置の概略図を示す。作製した中咽頭モデルを密閉容器内に取り付け、圧縮空気によって外圧を印加することで、座屈閉塞させた。なお、密閉容器内を水で満たすことで、チューブに質量負荷を与え、ヒトの舌部を模擬した。いびきは、絶えず吸気時に発生すること、またヒトの就寝時の呼吸周期から求まる Wormsly 数が十分に小さいことから、気流の時間変動を無視し、ヒトの吸気を模擬するために中咽頭モデル下流側に吸引ポンプをつなげることでチューブ内に空気を流し、そのときに発生する音圧(p_s)をマイクロフォンによって測定すると同時に、チューブ下流圧(p_d)を半導体トランスデューサで、チューブにかかる外圧(p_e)を U 字管マンオメータで、チューブ内を流れる空気の流量(Q)を熱式気体流量計でそれぞれ測定した。また、発生音とチューブ自励振動の関係を調べるために、レーザー変位計を用いてチューブの振動挙動も同時に測定した。図 3 に今回使用した

軸の定義を示す。中咽頭モデルのコラプシブルチューブとアクリル管の接合部を $z=0$ mm とし、アクリル管の下面を $y=0$ mm とした。

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 3 Defined coordinate system.

これまでの研究において、本モデル中に気流を流した時に、模擬いびき音が発生する領域が調べられていることから、既知のいびき音が発生する条件に対して、レーザー変位計を使ってチューブそのものの振動波形を測定した。実験方法としては $z=0$ mm の位置から $z=60$ mm まで 1 mm 間隔で移動させ、各測定点において音圧、下流圧、チューブ振動を同時測定し、それぞれを周波数解析して音圧スペクトル、下流圧スペクトル、振幅スペクトルを求めた。表 1 に実験条件を示す。ここで、本研究においては、管内外圧力差 $p_r (=p_d - p_e)$ を変化させることで、チューブの座屈の程度を変化させた。

Table 1 Experimental conditions.

p_r [kPa]	-26.6	-19.7	-13.5	-11.4	-8.09
Q [L/min]	1.9	1.5	9.5	9.9	11.7

3. 実験結果

本原稿には結果の一例として $p_r = -8.09$ kPa, $Q = 11.7$ L/min のものを示す。図 4(a) に発生音の波形と音圧スペクトル、図

4(b)に下流圧の波形と下流圧スペクトル, 図 4(c)にチューブの自励振動波形と振幅スペクトルを示す. ただし, 図 4(c)についてはチューブの振幅が最大であった $z=5$ mm の位置の結果を示す. それぞれの周波数スペクトルより基本周波数を調べると, 発生音の基本周波数は 309 Hz, 下流圧波形の基本周波数は 309 Hz, チューブの自励振動波形の基本周波数は 309 Hz と三者の基本周波数が一致した. しかし, それぞれの周波数スペクトルを比較すると, 発生音の周波数スペクトルには高周波数帯にもピークが存在するが, 下流圧スペクトルとチューブの振幅スペクトルには高周波数帯にピークが見られず, また発生音の周波数スペクトルの高周波数帯のピークは基本周波数の倍音となっていたことから, この高周波数帯のピークは音の共鳴現象によるものと考えられる.

発生音とチューブ下流圧, チューブ自励振動の基本周波数が一致したことから, 発生音の音源として, チューブが変形することでチューブ同士もしくはチューブと剛体壁が接触すること, 座屈部の生じた隙間を気流が流れることで発生した流体音が原因であることが示唆された.

Fig. 4 Waveform(left) and frequency spectrum(right) of sound pressure and downstream pressure, tube oscillation.

図 5 に今回の実験条件におけるチューブ管軸方向断面の潰れ形状を示す. プロットは各位置での自励振動中のチューブの時間平均形状を表し, 各部での自励振動振幅を表すために振幅スペクトルの最大値を 100 倍したものをエラーバーとして示した. なお, レーザー変位計がチューブ外形界面(肉厚 1.35 mm)を検出していたことから, 最大閉塞位置でも完全閉塞 $y=0$ mm になっていないことに注意されたい.

図 5 から分かるように, $z=0\sim 2$ mm ではアクリル管とコラプシブルチューブの接合部のため, 振動は測定されなかった. チューブは $z=17$ mm の位置で最も閉塞し, 自励振動はそれ

よりも下流側の $z=3\sim 16$ mm の位置で測定され, $z=5$ mm の位置で最も振動していた. 最大閉塞位置である $z=17$ mm よりも上流側ではチューブは振動していなかった. 以上のことから, チューブ座屈部下流側における圧力変動が, チューブの自励振動に影響を及ぼしていることが示唆された.

Fig. 5 Longitudinal tube profile.

4. まとめ

OSAS に起因するいびき発生メカニズムの解明のためにその主要因である舌根の沈下を模擬したヒトの中咽頭モデルをコラプシブルチューブを使って作製し, 生体外模擬実験によって発生音とコラプシブルチューブ下流圧, チューブ自励振動を同時に測定した結果, 以下のことが分かった.

- 発生音とチューブ下流圧, チューブ自励振動の基本周波数は全て 309 Hz となり, 一致していた.
- チューブ自励振動は最大閉塞位置よりも下流側で発生していた.
- チューブ自励振動の振幅が一番大きな位置は, 最大閉塞部と中咽頭モデルの接合部との中間位置($z=5$ mm)だった.

以上より, 発生音の音源としてチューブが変形することでチューブ同士もしくはチューブと剛体壁が接触すること, 座屈部の生じた隙間を気流が流れることで発生した流体音が原因であることが示唆された.

参考文献

- (1) 大塚富裕: いびきの発生機序に関する模擬実験 —コラプシブルチューブ内の気流により生じる自励振動と自励音—, 第 50 回日本生体医工学会 抄録集, 演題 10215, (2011).
- (2) 井上雄一: 睡眠時呼吸障害 Update 2006. 日本評論社, (2006).
- (3) 本間栄: 睡眠時無呼吸症候群 Sleep Apnea Syndrome, 克誠堂出版株式会社, (2009).
- (4) 山内基雄: 閉塞型睡眠時無呼吸症候群患者におけるいびき音圧と頻度の解析, 第25回肺音(呼吸音)研究会抄録集, 演題8, 東京, (2000).
- (5) 原浩貴: 周波数分布からみたいびき音の音響解析—終夜睡眠中のいびき音の再現性の有無に関する検討—, 耳鼻臨床 51, pp59-65, (2005).