361 気道を模擬したコラプシブルチューブの座屈形状の可視化

大場 謙吉(関大工)、新見 洋二(SMC(株))、岩崎 正隆[○](関大院)Visualization of buckling form of collapsible tube
in imitation of airway.

Kenkichi OHBA, Youji NIIMI, Masataka IWASAKI

Bronchial asthma is a kind of chronic bronchitis. It causes a narrowing of the airway happen and so makes breathing difficult. It may lead to death. It is important to clarify its mechanism. The interesting characteristic of asthma airway is that its buckling consists of approximately 8 to 5 folds into the airway lumen. It is considered to be caused by rapid constriction of smooth muscle. We paid attention to a rapid change in the transmural pressure as a model of the constriction of smooth muscle. We used collapsible tubes as a model of the airway. We made apparatus which gave a sudden increase in the pressure outside the tube by using a shock tube, and visualized the shape of the cross-section of the tube by a laser sheet method. As a result, it was shown that the number of the buckling model increased with the increase in the rate of the transmural pressure rise, and that it decreased with the increase in the wall thickness.

Keywords: asthma, buckling of airway, Shock tube, Compression wave, Expansion wave

1.はじめに

呼吸器系疾患の1つである喘息は、気道閉塞によって、気流が制限される病気です。気道の構成要素としては、柔らかい外層、それと比べて硬い内層からなり、その周りを平滑筋が覆っている。正常な気道と喘息気道の両方で、平滑筋の収縮によって内層がいくつかのひだを持つ形で座屈することが分かっている(Fig.1)。しかし、喘息気道において、気道粘膜の炎症によって、気道壁が肥厚するため、平滑筋の収縮時にヒダの数が減少する。その結果、喘息気道では、ヒダが気道の内腔まで達し、呼吸困難となる。⁽¹⁾しかし、座屈のメカニズムは明らかになっていない。そこで、本研究においては平滑筋の収縮により、生じる管内外圧差に着目し、気道を模擬したコラプシブルチューブに対し、衝撃波管を用いて、急峻な管内外圧差を与えた。その時のチューブの座屈形状を可視化することで、座屈のメカニズムを解明しようと考えた。

Fig.1 Buckling form of the airway

2.実験装置図

実験装置として、前述したチューブに急峻な管内外圧差を与えるために、衝撃波管(Fig.2)を作成した。実験方法としては、高圧源から圧縮空気を引きエアフィルタを通し、手動バルブとブルドン管圧力計を用いて高圧部の圧力を調節する。任意の圧力になった時に、

高圧部と低圧部とを区切る薄膜を激針を用いて、破ることでテストセクション付近に衝撃波を発生させ、テストセクション(Fig.3)に取り付けたチューブに急峻な管内外圧差を与えた。

また、テストセクション内の圧力を半導体圧力変換器を用いて測定し、チューブの軸方向に対して90°の方向から、レーザーライトシートを照射することで、チューブ断面を可視化し、ハイスピードビデオカメラで座屈形状を撮影した。

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.3 Test section.

3.実験結果及び考察

本研究で使用したコラプシブルチューブは、チューブ独自の癖等を考慮し、シリコンゴムを用いて自作した。また、用いたチューブの外径(d_o)20.0、7.0mmとし、各々の外径に対して肉厚(h)を1.0、0.5、0.4mmと変化させることで、喘息気道の肥厚した気道壁と正常な気道壁を模擬した。⁽³⁾

まず、我々は喘息発作時の平滑筋の収縮が座屈形状に及ぼす影響について調べた。Fig.4 と Fig.5 に $d_o=20.0\text{mm}, h=0.4\text{mm}$ のチューブに対して、衝撃波管の高圧部と低圧部との差圧(p_h-l)を9.8、49.0kPaと変化した時のチューブに印加される管内外圧差と断面積変化との時間変化の関係図、チューブの座屈形状を可視化した画像を示す。

我々は潰れ始めのモードに注目し、チューブの座屈画像から座屈点と座屈モード数を決定し、Fig.4 は13とした。座屈するまでの圧力上昇が座屈モード数に対し重要と考え、圧力と時間との関係図を用いて、座屈点までの圧力変化から圧力上昇速度(dp_{tr}/dt)を一次の最小二乗法で線形近似することで求めた。Fig.5 に関しても同様に画像から座屈モード数を10と決定し、圧力上昇速度を求めた。その結果、圧力上昇速度が増加すると、座屈モード数が増加した。

また、喘息気道に見られる気道壁の肥厚が、座屈に対してどの様に影響があるかを調べるために外径と肉厚を変化させ実験を行った。Fig.6 は、その実験結果をまとめたもので、縦軸に座屈モード数、横軸に管内外圧差を

$$p_{tr} = p_{ir} \frac{12(1-\nu^2)}{E} \left(\frac{R}{h} \right)^3$$

で無次元化して、無次元圧力上昇速度とした時の関係図です。ここで R はチューブ半径、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。

この結果、肉厚が厚くなると座屈モード数が減少し、肉厚が薄くなると座屈モード数が増加するという結果が得られた。これは、正常な気道と喘息気道におけるモード数の増減と一致する。

4.まとめ

圧力上昇速度が増加すると、チューブの座屈モード数が増加することが分かった。これより、平滑筋の収縮による管内外圧差の増加速度が気道の座屈モード数に影響していると考えられる。

チューブの肉厚が厚くなると、座屈モード数が減少し、肉厚が薄くなると、座屈モード数が増加する結果が得られた。これは、正常な気道と喘息気道における座屈モード数の増減と一致する。

5.参考文献

- (1) Barry.R.Wiggs, et al ; On the mechanism of mucosal folding in normal and asthmatic airways
- (2) 新見、大場 他 ; 機構論 No.01-1 Vol. IV,(2001),89-90
- (3) Alan L.James, et al: The Mechanics of airway Narrowing in Asthma

Fig.4 Experimental results : (a) Relation between pressure and time. (b) Relation between cross sectional area and time. (c) Buckling shapes of tube : $d_o=20.0\text{mm}, h=0.4\text{mm}, p_h=9.8\text{kPa}$.

Fig.5 Experimental results : (A) Relation between pressure and time (B) Relation between cross sectional area and time. (C) Buckling shapes of tube : $d_o=20.0\text{mm}, h=0.4\text{mm}, p_h=49.0\text{kPa}$.

Fig.6 Relation between mode number and dimensionless pressure rising speed.