【報告】

多孔質材料の吸音率予測モデルの研究
― 圧縮したメラミンフォームの物性パラメータの予測 ―

電子科　　木野直樹

Study on prediction models for absorption coefficient of porous media
－Prediction of physical parameters of compressed melamine foams－

Naoki Kino

A series of careful non-acoustical parameters measurements using melamine foam samples have been made. Flow resistivity, tortuosity, porosity, viscous characteristic length and thermal characteristic length of compressed melamine foam materials have been investigated. It has been found that it is possible to predict the flow resistivity and two characteristic lengths of compressed melamine foam materials using the Kino-Allard model. This paper also discusses the non-acoustical parameters using the Castagnède model and the Foam-X

１．はじめに

多孔質材料の吸音率を予測する音響モデルには、Flow resistivity によるSingle parameter models[1－3]やFlow resistivityに加えてPorosity、Tortuosity とCharacteristic lengths を用いるJohnson-Allard model[4、5]がある。また、それらの物性パラメータに加えてせん断弾性率とポアソン比を用いる Biot-Johnson-Champoux-Allard model[6－8]がある。

本報告では、圧縮によって変化するメラミンフォームのFlow resistivityとCharacteristic lengthsを予測するために開発したモデル[9、10]による予測値を計測値と比較しながら紹介する。また、フランスのメーヌ大学のモデル[11]とFoam-X[12]を用いて計算した値との比較も紹介する。

２．実験方法

熱プレス加工を施して圧縮したメラミンフォームのFlow resistivityは、ISO9053規格に基づき、直流の空気を流して試料前後の微差圧の計測を行った[13]。Tortuosity とCharacteristic lengthsは、試料を透過する超音波の音速を計測することで導出した[14、15]。フランスのメーヌ大学のモデルによる予測値は、論文に従い、材料の圧縮率と圧縮のない材料の計測した物性パラメータを用いて計算した。また、Foam-Xによる計算値は、ユーザーズガイドに従い、音響管で計測した複素インピーダンス、複素反射率と吸音率の狭帯域周波数依存データをCSVファイルにして計算した。

３．結果

３．１　メーヌ大学のモデルとの比較

フランスのメーヌ大学は、Uniaxial compression（１D model）或いはSurface-like compression（２D model）の予測式を発表している[11]。圧縮率nは、圧縮前の試料の厚さ$b_{(1)}$と圧縮後の試料$b_{(n)}$の厚さによって式(1)で表す。圧縮後のFlow resistivity $\sigma_{(n)}$は、圧縮前のFlow resistivity $\sigma_{(1)}$を使った計算式が示されている。これらの式を使って予測した値と計測したFlow resistivityの値の比較を図１と２に示す。

$$n = b_{(1)} / b_{(n)} \tag{1}$$

どちらのモデルも２を超える圧縮率の場合には適用出来ないことが解った。彼らの論文では、圧縮率が２より小さい繊維材料について、計測値と予測値の比較が行われているが、圧縮率が２を超えるものについては提示されていない。

圧縮後のViscous characteristic length $\Lambda_{(n)}$は、圧縮前のViscous characteristic length $\Lambda_{(1)}$を使って示されている。この式を使って予測した値と計測

したViscous characteristic lengthの値の比較を図3に示す。2D modelによる予測値は有効であったが、この報告で行った圧縮は、1D modelに相当する厚さを低減したものだった。

メラミンフォームの繊維等価半径6.5μmを使い式(2)に示すKino model[9、10]で予測したFlow resistivityσ_{Kino}を図4に示す。

$$\sigma_{Kino} d_{Kino}^{2} \rho_1^{-1.53} = 11.5\times10^{-9} \qquad (2)$$

d_{Kino}は、メラミンの等価繊維直径を示す。また、ρ_1は、メラミンフォームの嵩密度を示す。

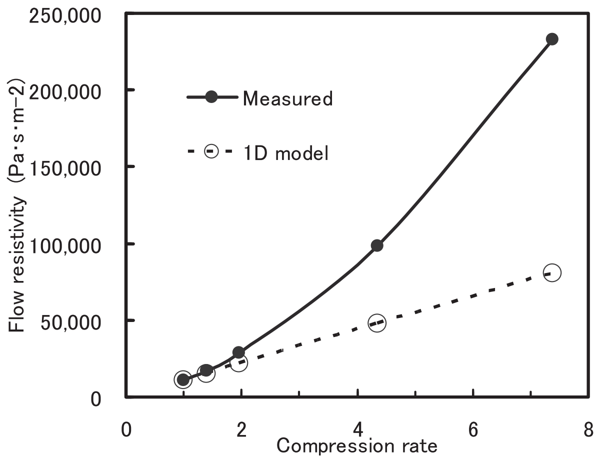

図1 Flow resistivityの計測値と予測値（1D model）の比較

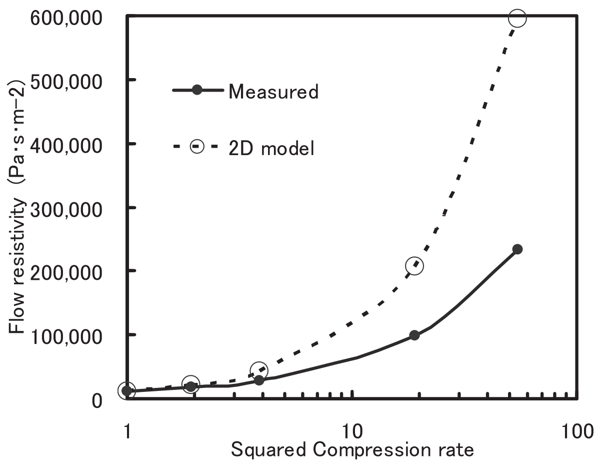

図2 Flow resistivityの計測値と予測値（2D model）の比較

Kino-Allard model[9、10]で予測したViscous characteristic length を図5に示す。計測値との食い違いは小さいことから、これらの予測式は、実用可能と考える。メーヌ大学の予測式は、圧縮の無いViscous characteristic length の計測値$\Lambda_{(1)}$を使うが、Kino-Allard modelは、Viscous characteristic length の計測値を使用しない。

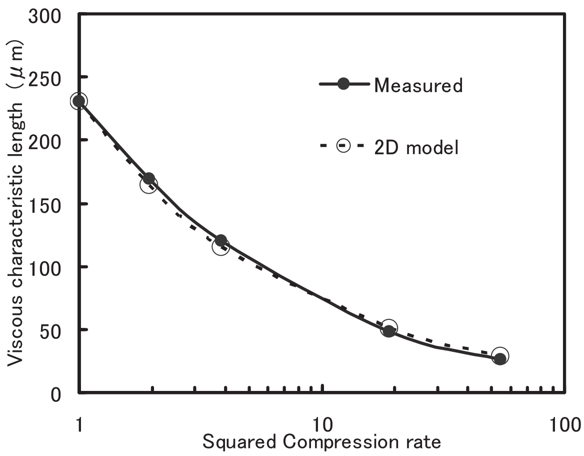

図3 Viscous characteristic length の計測値と予測値（2D model）の比較

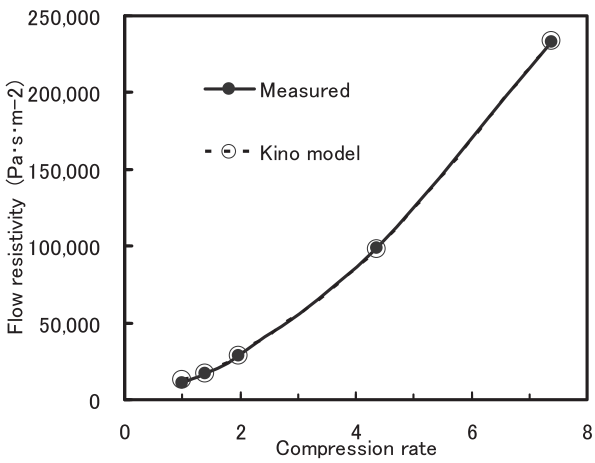

図4 Flow resistivityの計測値と予測値（Kino model）の比較

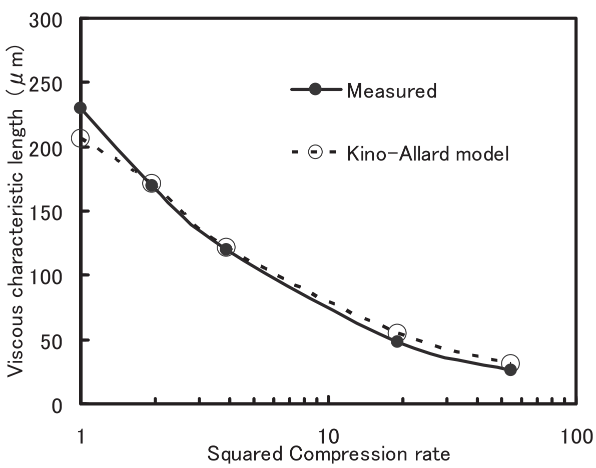

図5 Viscous characteristic length の計測値と予測値（Kino-Allard model）の比較

Viscous characteristic length と Thermal characteristic lengthの計測[14、15]は、一般的な実験室では難しいが、Kino-Allard modelを使うことに

【報告】

よって、２つのCharacteristic lengthsとFlow resistivityの計算による導出が可能である。

Tortuosityについては、メーヌ大学の予測式と計測結果が合わなかった。そこで、試料の圧縮率と伝搬経路の圧縮率が異なる条件を用いた実験式[10]を提案した。

３．２　Foam-Xによる計算値との比較

文献[12、16]には、音響管で計測するインピーダンスのデータから非音響パラメータを推定するInverse methodや音響管で計測する複素密度と複素体積弾性率から非音響パラメータを推定するIndirect methodが発表されている。彼らの論文では、２つのCharacteristic lengthsの計算値と計測値の比較検証が無く、Inverse methodとIndirect methodの計算値同士の比較と最終的な解である吸音率の比較が行われている。これで検証になるのか疑問に思うのである。これでは、計算された物性パラメータ並びに、Johnson-Allard とLimp modelsの有効性が見えないのではないだろうか。このカナダの大学のInverse methodを利用した多孔質吸音材料の物性パラメータを計算するソフトウェアFoam-XがESIグループから販売されている。実際にどの様な結果が得られるのか計算を行ったので紹介する。図６に、ソフトのGUIを示す。ここで採り上げる試料は、実験した複数の中のSample 53で、圧縮率n＝1.9669のメラミンフォームである。Sample 53の計測した物性パラメータを表１と２に示す。表１には、５つの物性パラメータすべてをFoam-Xで計算させた結果も示す。表２には、Flow resistivityとPorosityの計測値を入力して３つの物性パラメータのみをFoam-Xで計算させた結果を示す。表１のFlow resistivityの計算値は、計測値の1.8～4.4倍であった。表２のTortuosityの計算値は、計測値の1.3～1.4倍であった。

ここで示した計測値の検証結果の詳細は、論文[9、10]に発表しているので、ここでは省略する。

素材開発の現場では、もの作りのノウハウと材料の実態をとらえた物性パラメータの情報が伴ってこそ有益である。

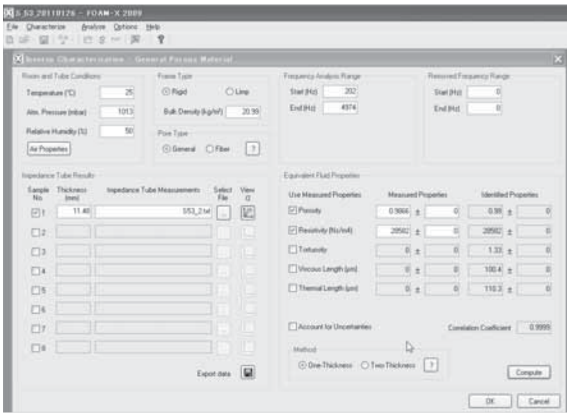

図６　Foam-Xの実行画面

表１　メラミンフォーム試料Sample 53の物性の計測値とFoam-Xを使った計算値の比較その１

	Measured	Foam-X Rigid-General	Foam-X Limp-General
Flow resistivity（Pa s m^{-2}）	28,582	124,366	52,561
Porosity	0.9866	0.75	1
Tortuosity	1.0146	1	1
Viscous characteristic length（μm）	120	270	250
Thermal characteristic length（μm）	266	279	253

表２　メラミンフォーム試料Sample 53の物性の計測値とFoam-Xを使った計算値の比較その２

	Measured	Foam-X Rigid-General	Foam-X Limp-General
Flow resistivity（Pa s m^{-2}）	28,582	28,582	28,582
Porosity	0.9866	0.9866	0.9866
Tortuosity	1.0146	1.33	1.45
Viscous characteristic length（μm）	120	100	110
Thermal characteristic length（μm）	266	110	112

4．おわりに

グラスウールとポリエステル繊維材料について、非音響パラメータであるFlow resistivityとCharacteristic lengthsは、計測しなくても予測できることを論文[13]で示している。今回、圧縮したメラミンフォームのFlow resistivityとCharacteristic lengthsも予測できることを示した。

非音響パラメータのCharacteristic lengthsの計測は、とても難しい。そこで、実験に基づいた予測式を作ることに努めた。次は、ウレタンフォームのCharacteristic lengthsを解明していきたい。また、Foam-Xの計算結果について、さらに考察した結果を示す予定である。

謝辞

本研究のために、材料とFoam-Xによる計算結果を提供していただいた㈱イノアックコーポレーションの鈴木靖宏氏と中野吾郎氏に感謝致します。

参考文献

1）Delany ME, Bazley EN. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Appl Acoust 1970.

2）Miki Y. Acoustical properties of porous materials -Modifications of Delany-Bazley models-. J Acoust Soc Jpn 1990.

3）Komatsu T. Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. Acoust. Sci. & Tech. 2008.

4）Allard JF, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. J Acoust Soc Am 1992.

5）Kino N, Ueno T. Improvements to the Johnson-Allard model for rigid-framed fibrous materials. Appl Acoust 2007.

6）Biot MA. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Ⅰ.low-frequency range. J Acoust Soc Am 1956.

7）Biot MA. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Ⅱ. higher frequency range. J Acoust Soc Am 1956.

8）Allard JF. Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials. Elsevier Applied Science 1993.

9）Kino N, Ueno T. Comparisons between characteristic lengths and fibre equivalent diameters in glass fibre and melamine foam materials of similar flow resistivity. Appl Acoust 2008.

10）Kino N, Ueno T, Suzuki Y and Makino H. Investigation of non-acoustical parameters of compressed melamine foam materials. Appl Acoust 2009.

11）Castagnède B, Aknine A, Brouard B, Tarnow V. Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials. Appl Acoust 2000.

12）Atalla Y, Panneton R. inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. Canadian Acoustics. 2005.

13）Kino N, Ueno T. Experimental determination of the micro- and macrostructural parameters influencing the acoustical performance of fibrous media. Appl Acoust 2007.

14）Kino N. Ultrasonic measurements of the two characteristic lengths in fibrous materials. Appl Acoust 2007.

15）木野直樹，多孔質材料の吸音率予測モデルの研究－非音響パラメータと音響管の計測精度を重視した取り組み－，日本音響学会建築音響研究会，2011.

16）Doutres O, Salissou Y, Atalla N, Panneton R. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. Appl Acoust 2010.