

背後空気層を設けた多孔板の大音圧入射時における  
音響インピーダンスの計測と吸音特性

Measurement of Acoustic Impedance and Sound Absorption Performance  
of a Perforated Plate with a Backing Cavity at a High Sound Pressure Level

○学 白神 大資 (鳥取大院) 赤松 真児 (三菱日立パワーシステムズ) 三井 悠生 (三菱重工)  
正 西村 正治 (鳥取大院) 正 中井 唱 (鳥取大院) 正 後藤 知伸 (鳥取大院)

Daisuke SHIRAGA, Masaharu NISHIMURA, Tonau NAKAI, Tomonobu GOTO

Tottori University, 4-101 Koyama-minami, Tottori, Tottori, 680-8552 Japan

Shinji AKAMATSU, Mitsubishi Hitachi Power Systems, 2-1-1, Shinhamara-arai, Takasago, Hyogo, 676-8686 Japan

Yuki MITSUI, Mitsubishi Heavy Industries, 2-1-1, Shinhamara-arai, Takasago, Hyogo, 676-8686 Japan

Perforated plates are effective for sound absorption and often used for noise control. In the present study, we measured the acoustic impedances of perforated plates with backing cavities of different depths when the incident sound pressure level was around 100-150 dB. The measured acoustic impedances were compared with the values predicted by an equation proposed by Guess. As the Mach number of the particle velocity through the orifice in the equation, we adopted the root mean square value of the particle velocity calculated from the measured sound pressure on the plate's surface and the measured acoustic impedance. When the backing cavity is deep, the predicted acoustic impedance agrees with the measured value. However, apparent difference appears when the backing cavity is shallow. Some modifications on the equation are proposed.

**Key Words** : Sound absorption, Acoustic impedance, Perforated plate, Backing cavity, High sound pressure level

1. 緒言

機械・環境騒音において、多孔板の吸音原理を用いた騒音対策がある。建築分野では、内装吸音材料として使用され、航空機のジェットエンジンやガスタービンなど、大音圧かつ気流を伴うような環境下においても、多孔板は大きな吸音効果を発揮することが知られている。

Guess<sup>(1)</sup>, Melling<sup>(2)</sup>らは、単層多孔板の吸音性能評価に、開孔率・板厚・孔径・背後空気層深さの4つのパラメータを導入し、多孔板の音響インピーダンス予測式を提唱している。

吸音性能の特性として、背後層が浅いほど、吸音率曲線のピークは高周波数帯域に立ち、加えて入射音圧依存性を示すことが報告されている<sup>(3)-(6)</sup>。

本稿では、特にターボ機械に搭載する吸音ライナを想定し、130 dB 以上の大音圧入射かつ高周波数帯域における多孔板の吸音特性に注目した。背後層を浅くした際の吸音機構に関して、多孔板表面の音響インピーダンスを2マイクロホン法により計測した。予測式には Guess<sup>(1)</sup>の式を採用し、得られた計測結果との比較を行い、予測式の有効性について議論する。

特に多孔板孔部における粒子速度の影響を考慮する場合は粒子速度の実効値を採用し、Guess<sup>(1)</sup>の式中の入射音圧依存項に補正を加えると計測値と一致することを示す。

2. 試験方法

図1に試験装置の模式図を示す。

矩形断面の1辺が24.2 mm の SUS304 製のインピーダンス管 (図1(a)) を使用する。インピーダンス管本体の一端にはドライバーユニット (UNIPEX 社 P-1000) , 他端には多孔板取り付け用の背後層キャップ (図1(b)) を固定する。背後層キャップには背後層深さに対応した窪みが設けてあり、このキャップに多孔板をはめ込んで固定する。多孔板から 226

mm の位置には管内温度計測用の熱電対 (山里産業 社 TMB-KS16 II) を設けている。

計測には 1/4 インチコンデンサマイクロホン (RION 社 UC-29) を使用する。インピーダンス管上面および側面に設けた計測座 (図1(c)) を、ドライバーユニット側から順に①-③と名付ける。マイク①②間の音圧伝達関数を計測し、多孔板表面の音響インピーダンスを得る。多孔板から 6 mm の位置にある計測座③は、多孔板直前の音圧レベル計測に用い、③の OA レベルを多孔板への入力音圧レベル  $p_{b,OASPL}$  とする。

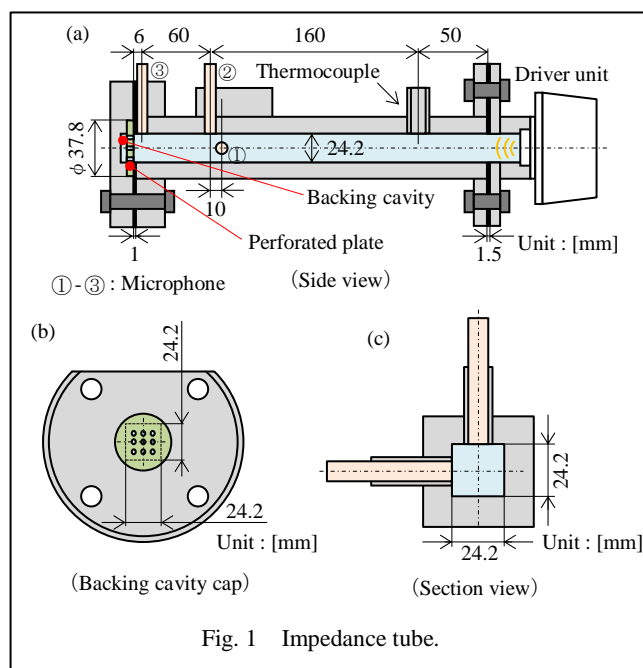


Fig. 1 Impedance tube.

ノイズジェネレーター (RION 社 SF-06) に接続されたドライバユニットからホワイトノイズを発生させ、計測座①-②間の音圧伝達関数  $H(\omega)$  を用いて、多孔板表面の無次元音響インピーダンス  $\zeta$  (式(1)) および吸音率  $\alpha$  (式(2)) を算出する。ここで、 $\zeta$  の実部  $\theta$  はレジスタンス、虚部  $\chi$  はリアクタンスと呼ばれる。  $r$  は反射率、  $k$  は波数、  $\Delta x$  はマイク間距離 (10 mm)、  $l$  は計測座②と多孔板間の距離 (66 mm) を表す。

$$\zeta = \theta + i\chi = -i \frac{H(\omega) \operatorname{sinc}(\Delta x + l) - \operatorname{sinc} l}{H(\omega) \operatorname{cos} k(\Delta x + l) - \operatorname{cos} k l} \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2 = \frac{4\theta}{(1 + \theta)^2 + \chi^2} \quad (2)$$

### 3. Guess<sup>(1)</sup> のインピーダンス予測式

多孔板の吸音メカニズムは、主に孔 (オリフィス) 管路部での摩擦による粘性減衰と、オリフィス内の空気が交差的に往復運動することで音響エネルギーを消散する粒子速度の 2 乗形減衰 (非線形効果) によって構成される。

背後空気層を有する多孔板の無次元音響インピーダンスを  $\zeta$  とすると Guess<sup>(1)</sup> によれば式(3)のように表せる。

$$\begin{aligned} \zeta &= \theta + i\chi \\ &= \frac{\sqrt{8\nu\omega}}{\sigma c} \left(1 + \frac{t}{d}\right) + \frac{(kd)^2}{8\sigma} + \frac{1 - \sigma^2}{\sigma} (|M_0| + 0.3|M|) \\ &\quad + i \left[ \frac{\sqrt{8\nu\omega}}{\sigma c} \left(1 + \frac{t}{d}\right) + \frac{k(t + \delta)}{\sigma} - \cot kb \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\delta$  は多孔部での開口端補正值であり式(4)で与えられる。

$$\delta = \frac{8d}{3\pi} \frac{1 - 0.7\sqrt{\sigma}}{1 + 305M^3} \frac{1 + 5 \times 10^3 M_0^2}{1 + 10^4 M_0^2} \quad (4)$$

また、 $\nu$  は内部気体の動粘性係数、 $M_0$  は孔内粒子速度のマッハ数、 $M$  は多孔板表面に沿う定常流のマッハ数、 $\omega$  は角振動数、 $t$  は多孔板の板厚、 $d$  は孔径、 $\sigma$  は開孔率、 $b$  は背後空気層の深さである。

式(3)に示す Guess<sup>(1)</sup> の予測式では、実部第 1 項が粘性抵抗、実部第 2 項はオリフィスからの音響放射抵抗を表している。実部第 3 項は粒子速度変動に伴う非線形効果を表しており、孔内粒子速度および定常流のマッハ数で考慮される。

式(4)において、入射音圧が小さいときには、開口端補正值  $\delta$  はほぼ多孔板パラメータ (板厚  $t$ 、孔径  $d$ 、開孔率  $\sigma$ ) で決まるが、大音圧や気流を伴う場合、 $M_0$  や  $M$  の増加に伴って  $\delta$  の値は減少し、吸音率曲線は高周波数帯域にピークをもつような周波数特性を示す。

### 4. $M_0$ の評価方法

式(3)、(4)において、レジスタンス  $\theta$ 、リアクタンス  $\chi$  にはそれぞれ、孔内粒子速度のマッハ数  $M_0$  が含まれている。大音圧の音が入射したときには、この項の影響が現れることが予想される。非線形効果のため、 $M_0$  の大きさを評価するには、周波数毎の値よりも広い周波数帯域での評価値を用いた方が計測結果と一致することが示されている<sup>(2),(4)-(6)</sup>。

多孔板表面の音圧  $p_b$  と、計測によって得られたインピーダンス  $\zeta$  の値を用いて  $M_0$  を式(5)のように算出し、式(2)、(3)から求められる吸音率  $\alpha$  と比較した。

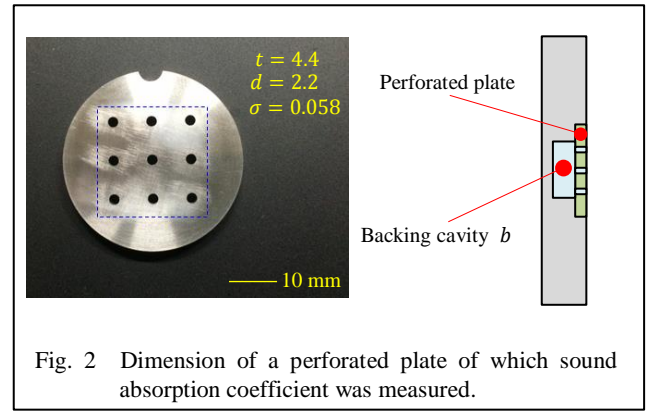


Fig. 2 Dimension of a perforated plate of which sound absorption coefficient was measured.

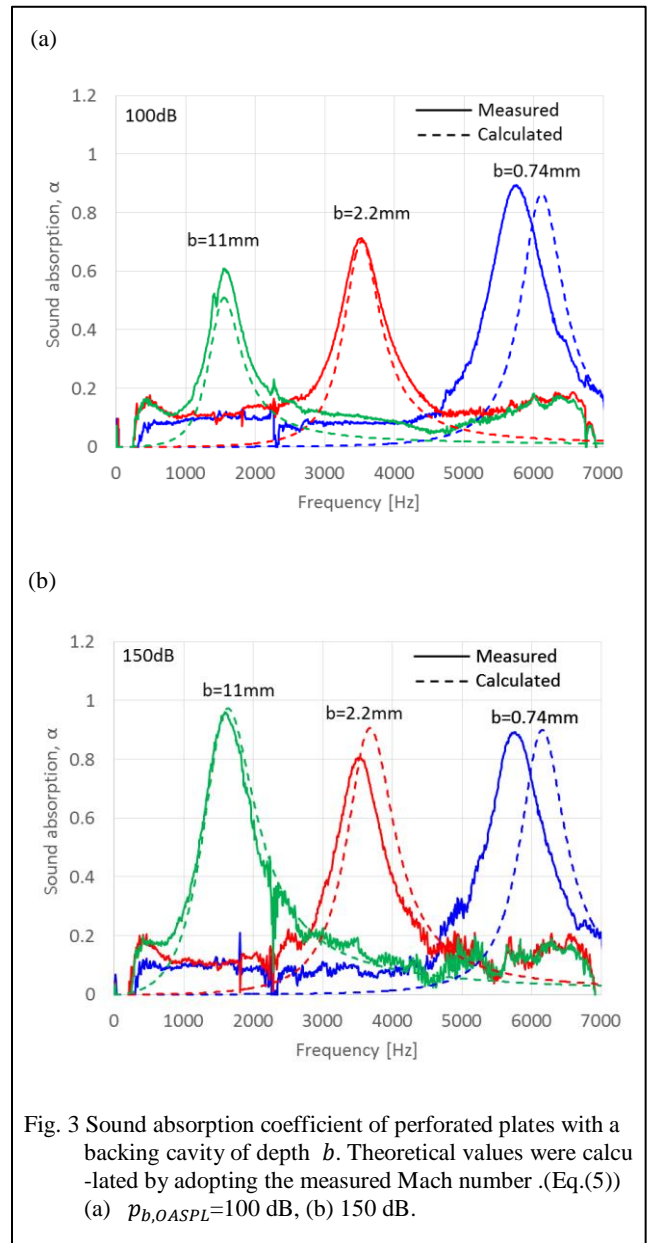


Fig. 3 Sound absorption coefficient of perforated plates with a backing cavity of depth  $b$ . Theoretical values were calculated by adopting the measured Mach number (Eq.(5)) (a)  $p_{b,OASPL} = 100$  dB, (b) 150 dB.

$$M_0 = M_{0,rms} = \frac{1}{\sigma \rho c^2} \sqrt{\sum_f \frac{p_b^2(f)}{|\zeta(f)|^2}} \quad (5)$$

図 2 に示す多孔板に、深さ  $b = 0.74$  mm、2.2 mm、11 mm の背後空気層を設け、多孔板表面の音圧レベル  $p_{b,OASPL}$  を 100

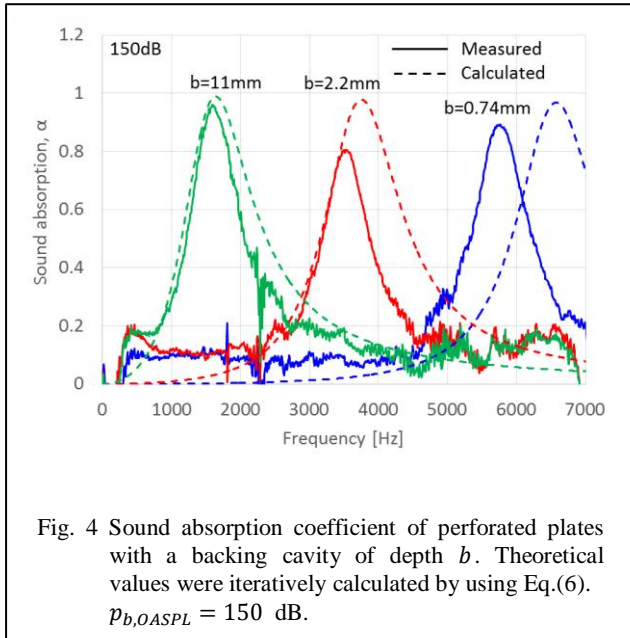


Fig. 4 Sound absorption coefficient of perforated plates with a backing cavity of depth  $b$ . Theoretical values were iteratively calculated by using Eq.(6).  $p_{b,0ASPL} = 150$  dB.

dB および 150 dB としたときの結果を図 3 に示す。ただし式(5)の計算にあたっては、1–7 kHzの周波数帯域の値を用いた。背後空気層深さ  $b$  が大きいときには、式(2), (3)によって計算される吸音率  $\alpha$  はいずれの  $p_b$  でも (すなわち  $M_0$  が大きくなっても) 計測値とほぼ一致していることがわかる。背後空気層が小さくなると、 $\alpha$  が最大となる周波数  $f_p$  が計測値と計算値で異なってくる。このことについては後述する。

$\zeta(f)$  や  $p_b(f)$  が既知の場合には式(5)によって  $M_0$  を求めることができるが、多孔板の吸音性能を事前に予測したい場合には、これらについて何らかの仮定を置く必要がある。そこで、 $|\zeta(f)|$  の値を  $f_p$  におけるレジスタンスの値  $\theta(f_p)$  に置き換え、

$$M_0 = \frac{1}{\sigma \rho c^2} \frac{p_{b,rms}}{\theta(f_p)} \quad (6)$$

としてみた。式(5)の代わりに式(6)を用いると、多孔板表面の音圧実効値  $p_{b,rms}$  を指定すれば、収束計算によって計測データをいわずに  $\zeta(f)$  を求めることができる。こうして求めた吸音率  $\alpha$  の値を図 4 に示す。  $\alpha$  の大きさと  $f_p$  のいずれも、計測値との差異が、式(5)を用いた図 3(b)の場合よりも大きくなっていることがわかる。式(6)では  $M_0$  を過大に評価しているためである。

### 5. 背後層 $b$ が $M_0$ におよぼす影響

図 3(a) (100 dB 入射) の計測値をみると、  $b=11$  mm では、吸音率  $\alpha$  のピークが 0.6 に対し、  $b=0.74$  mm では 0.9 である。式(3)の実部  $\theta$  をみると、レジスタンス  $\theta$  は周波数  $f$  が高くなるほど 1 に近い値を示すので、特に低・中音圧入射の場合には、  $f_p$  が大きな  $b=0.74$  mm の方が吸音率のピーク値は高くなる。なお、本研究で用いている多孔板では、  $\theta < 1$  である。一方で図 3(b) (150 dB 入射) をみると、吸音率のピークは  $b=11$  mm のとき、およそ 1 を示しており、非線形効果のため図 3(a)の  $\alpha$  よりも大きくなっている。これに対し、  $b=0.74$  mm のときでは 0.9 であり非線形効果が現れていない。このことから、背後層  $b$  の深さが非線形効果 (つまり  $M_0$  の増加) に大きく影響を及ぼしていることがわかる。

150 dB 入射時における  $M_0$  について、式(5), (6)を用いて求

めた結果を背後層深さ  $b$  に対して比較したものを図 5 に示す。図 5 中の  $M_0 \approx 0.03$  の線は、Ingard・Ising<sup>(7)</sup> が示した、非線形効果が現れると予想されるオリフィス部のマッハ数である。

式(6)から計算される  $M_0$  が背後層の浅いものから深いものまで、全てにおいて大きな値を示すのに対し、式(5)から計算される  $M_0$  は、背後層が 11 mm よりも深いときに 0.03 以上を示しているが、浅い背後層では小さな値となっている。この要因として、背後層が狭まることにより、オリフィス部の空気が振動するのに十分な空間が確保されず、粒子速度が増加していないことが挙げられる。

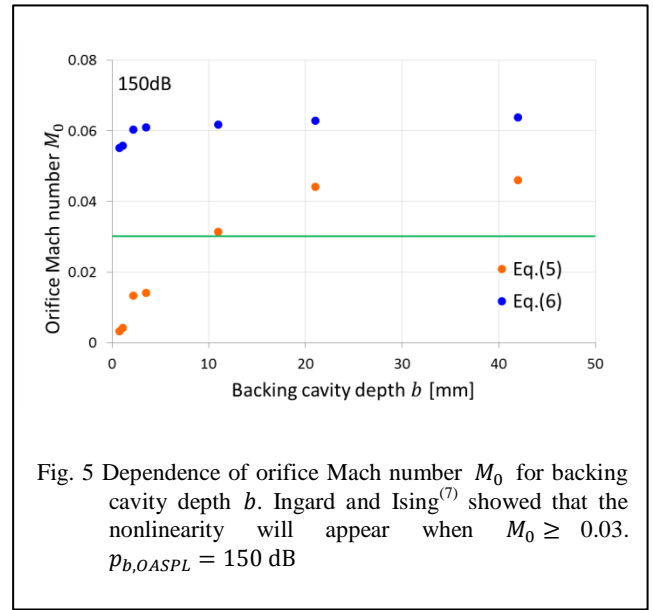


Fig. 5 Dependence of orifice Mach number  $M_0$  for backing cavity depth  $b$ . Ingard and Ising<sup>(7)</sup> showed that the nonlinearity will appear when  $M_0 \geq 0.03$ .  $p_{b,0ASPL} = 150$  dB

### 6. Guess<sup>(1)</sup> の式の補正

背後空気層深さ  $b = 2.2$  mm において、  $p_{b,0ASPL} = 100$  dB の場合 (図 3(a)) には、計測値と計算値がよく一致しているのに対して、  $p_{b,0ASPL} = 150$  dB の場合 (図 3(b)) には  $f_p$  に差異が生じている。  $f_p$  はリアクタンス  $\chi$  が 0 となる周波数なので、式(4)の  $M_0$  に依存する部分の補正を試みた。

図 6(a) は背後空気層深さ  $b$  や形状の異なる様々な多孔板について、計測された  $f_p$  において、式(5)によって求めた  $M_0$  を用いて計算された  $\chi$  を示したものである。  $b$  が非常に小さい ( $b=0.74$  mm, 1.1 mm) 場合を除いて、概ね  $\chi = 0$  となっているが、  $M_0 = 0.015$  のあたりでは、  $\chi$  が負に大きな値を示しており、  $f_p$  の計測値と計算値に差異が生じていることがわかる。これを補正するため、式(4)に代わる一候補として、

$$\delta = \frac{8d}{3\pi} \frac{1 - 0.7\sqrt{\sigma}}{1 + 305M^3} \frac{1 + 2 \times 10^6 M_0^4}{1 + 4 \times 10^6 M_0^4} \quad (7)$$

を用いて計算した  $\chi$  を図 6(b) に示す。式(7)による補正を加えることで  $\chi$  が 0 に使づくことが確認できる。しかし依然として、背後層が浅い場合 ( $b=0.74$  mm, 1.1 mm) は  $\chi$  が負に大きな値を示している。

背後空気層深さ  $b$  が非常に小さい場合には、別の補正が必要なものと考えられる。しかし、適当な補正の仕方が見つかっておらず、検討を続ける必要がある。

7. 結言

背後空気層を設けた多孔板の、大音圧入射時における吸音特性に関して、音響インピーダンスを計測し、次の結果を得た。

1. 背後空気層が小さい場合、大音圧入射に伴う非線形効果が現れず、多孔板の吸音性能が音圧依存性を示さなくなる。
2. 孔内粒子速度の影響を考慮する場合、周波数毎の値よりも、実効値を用いて評価した方が計測結果と一致する。
3. Guess<sup>(1)</sup>の式における、孔内粒子速度に依存する項について、粒子速度の影響が小さくなるような補正を加えると計測値と一致する。しかし、背後層が非常に小さい場合、多孔板の形状パラメータを用いて更なる補正を検討する必要がある。

参考文献

- (1) A. W. Guess, “Calculation of perforated plate liner parameters from specified acoustic resistance and reactance”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 40 (1975), pp. 119-137.
- (2) T. H. Melling, “The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 29 (1973), pp. 1-65.
- (3) 白神大資ほか, “薄い背後空気層を設けた多孔板の吸音特性に関する研究”, 日本機械学会中国四国学生会第46回学生員卒業研究発表講演会(2016),講演番号 1102
- (4) 栗山哲典ほか, “多孔板の非線形音響特性に関する研究”, 日本機械学会中国四国支部総会講演会講演論文集 43 卷 (2005), pp. 177-178.
- (5) 宇津野秀夫ほか, “伝達行列法による多孔板吸音特性の実験的研究”, 日本音響学会誌 59 卷 6 号 (2003), pp. 301-308.
- (6) 渡辺実, “多孔板に対する音響インピーダンスモデルの評価”, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1133 (1991), pp. 1-35.
- (7) Uno Ingard and Hartmut Ising, “Acoustic Nonlinearity of an Orifice”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 42 (1967), pp. 6-17.

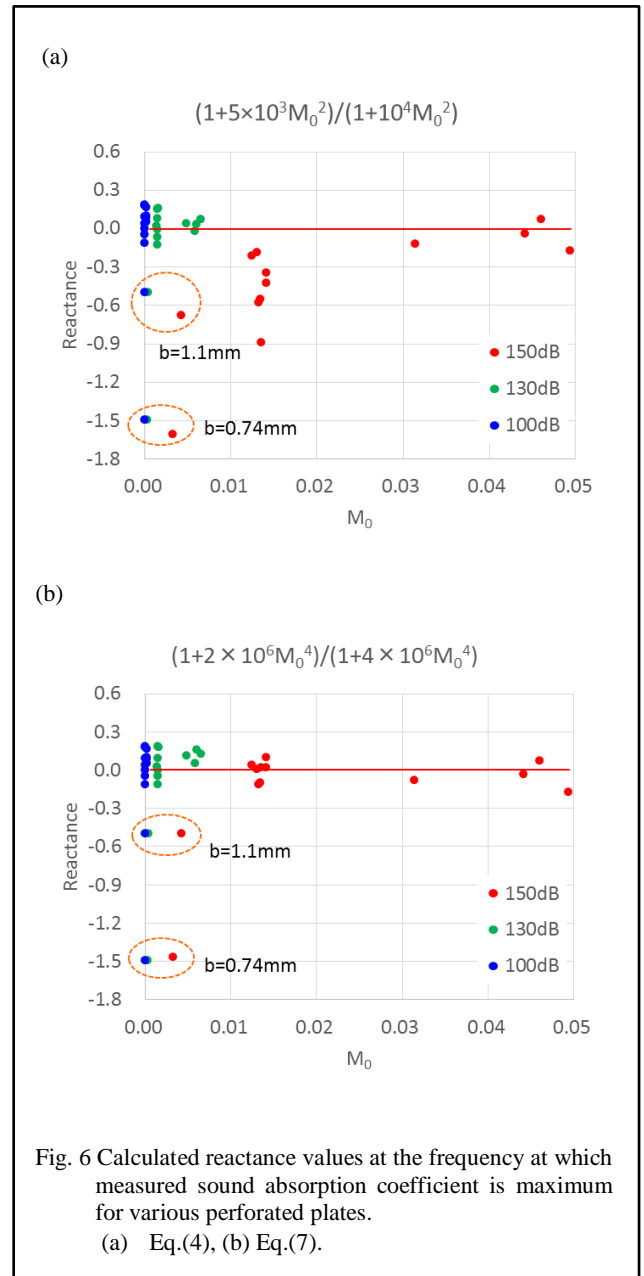


Fig. 6 Calculated reactance values at the frequency at which measured sound absorption coefficient is maximum for various perforated plates.  
(a) Eq.(4), (b) Eq.(7).