

音響ホーン素材の音速測定

義岡 秀晃*, 堀川 悠介**, 白川 博樹***, 飯田 祐也***, 八賀 正司*

Measurement of Sound Velocities in Acoustic Horn Materials

Hideaki YOSHIOKA, Yusuke HORIKAWA,
Hiroki SHIRAKAWA, Yuya IIDA and Tadashi HACHIGA

Abstract

The sound velocities, C_{sv} , of duralumin, stainless steel and machinable ceramic have been studied at the temperature ranges of $0 \sim 300^\circ\text{C}$. The results can be represented by the equations:

$$C_{sv} \text{ in duralumin (A2017)} = -6.054 \times 10^{-3} T^2 - 0.6017 T + 6382 \text{ m/s (accuracy: } -0.7\% \sim +1.0\%)$$

$$C_{sv} \text{ in stainless steel (SUS303)} = -10.59 \times 10^{-3} T^2 - 1.686 T + 5689 \text{ m/s (accuracy: } -2.2\% \sim +4.0\%)$$

$$C_{sv} \text{ in machinable ceramic (Mica ceramic)} = -0.3878 T + 5281 \text{ m/s (accuracy: } -0.4\% \sim +0.8\%)$$

In conclusion, it is shown that machinable ceramic is best suited for acoustic horn material under non-uniform temperature conditions due to the negligible impact of temperature on sound velocity.

1. 緒 論

音響ホーンは、超音波を発するところの振幅拡大器であり、エキスポネンシャルホーン、コニカルホーン、ステップホーン等⁽¹⁾が代表的な形式である。これらは、形状と振動分布に違いがあるものの、支持部位を変位振幅の節とし、両端面が腹となるよう設計される点では共通するものと言える。

近年、材料製造におけるマイクロ組織の層改質・ファイン化・均質化・複合化に関連して、超音波技術の高温環境への応用が試案されている⁽²⁻⁴⁾。このようなシステムにおいて、超音波振動子とホーンとを組み合わせる場合、高熱源と低熱源の間で加熱・冷却されるホーンが非定常かつ非一様な温度状態となり、結果としてホーン中の音速（あるいは波長）が時空間的な分布を持ったものとなる。したがって、周波数と波長に基づき、非一様温度場を前提としたホーンを設計する際には、音速の温度依存性に関する基礎データが不可欠である。

本研究は以上の観点から、固体材質を対象とした比較的簡単な音速計測システムを組み上げ、その妥当性を検証するとともにホーン材質の音速の温度依存性について追究するものである。

2. 実験装置と方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。装置は被験物、音波送受信系統、温度制御・測定系統から構成される。以下に詳細を記述する。

2・1 被験物の性状

被験物として、ジュラルミン (A2017)、ステンレ

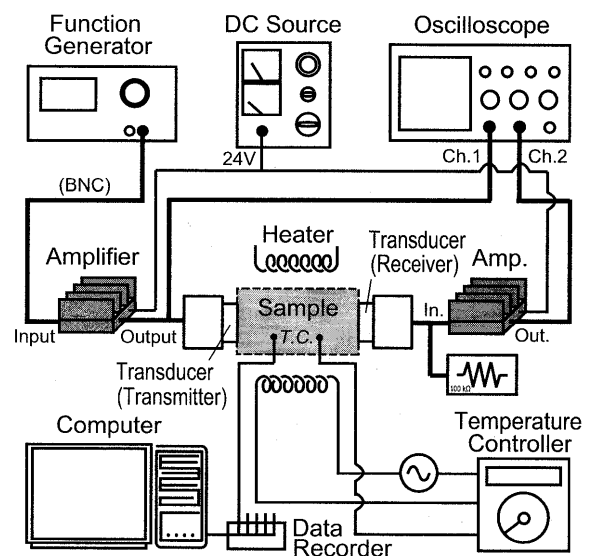


Fig. 1 Apparatus

Table 1 Configurations of three test samples

Material	Configuration	(Size)
Duralumin	Rectangular parallelepiped	(17×30× <u>27.03</u> mm)
Stainless steel	Plate	(34×35× <u>8.05</u> mm)
Machinable ceramic	Cylinder	(ϕ 20× <u>27.97</u> mm)

ス鋼 (SUS303), 快削性セラミックス (マイカセラミックス) の3種を供試した。それぞれの常温における形状 (寸法) の実測値を Table 1 に示す。測定長を表中の下線部で示す。

2・2 超音波の送受波

超音波の送波については, まずファンクションジェネレータ (Tektroix 社製 AGF3022) により発したパルス形信号をゲイン約27 (dB) のアンプ (Mini-Circuits 社製 ZHL-32A) によって増幅した後, Lead Zirconate Titanate (PZT) 型の圧電セラミックス振動子に投入し, その波形をオシロスコープ (Agilent 社製 54622D) で観測した。アンプ投入前の信号波形の設定値を Fig. 2 に示す。受波側についてもほぼ同様の構成とし, 振動子で受けた信号をアンプによって増幅し, オシロスコープで観測した。送波振動子には直径15mm ϕ , 共振周波数1MHzのPanametrics社製V603を, 受波振動子には直径15mm ϕ , 共振周波数2MHzの富士セラミックス社製C-213材 (キュリー点315°C) を用いた。

2・3 温度の制御と測定

温度の制御と測定のため, 直径1.0mm ϕ のK型サーモ熱電対2点を試料内部に設置した。設置箇所については, 熱電対が音波進行の障害とならぬよう, 発振面から試料への投影領域圏外に設置した。試料内温度の均一性と恒常性を確保するため, 試料をヒータ (約50W) で加熱し, その外周を断熱材で覆った。ヒータ発熱量の制御と試料の恒温維持には, 温度調節計 (TOHO 社製 CT-602-KX) を用いた。温度データをレコーダ (KEYENCE 社製 GR-30000) に取り込み, パソコンで記録した。

2・4 試験方法

まず, 温度調節計を用いて試料を所望の温度に設定した後, アンプに電源 (DC24V) を投入し, ファンクションジェネレータから信号を送波振動子に送る。次いで, 送波・受波用それぞれの振動子を試料の測定間表面に強く押し当て, オシロスコープで信号を記録

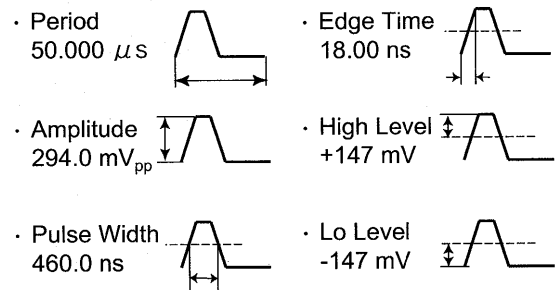


Fig. 2 Pulse setting on a function generator

した。ここで, 試料と振動子との接触面にはグリス状シリコンコンパウンドを塗り, 空気層による音波透過率の低下を軽減させた。特に高温時の測定においては, 熱伝導により加熱された振動子の温度がキュリー点 (正確にはキュリー点の半値程度) を超えないよう, 記録後速やかに試料から振動子を離脱させた。

3. 結果と考察

試験によって得られた結果を解析し, 本手法の妥当性を検証するとともに, 超音波振動子の高温場への適用上必須となる固体材音速の温度依存性について議論する。

3・1 観測結果

温度23°C, 測定長27.03mmのジュラルミンの場合を例として, オシロスコープで得られた送波(T)と受波(R)を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)は, 送波振動子と受波振動子を直接接させた場合の波形データを示したものであり, (b)は送波振動子と受波振動子の間に試料を挟んだ場合のものである。図中, 縦軸は電圧振幅, 横軸は時間を表す。縦軸の目盛線は, 送波(T)に対しては1分割5V, 受波(R)に対しては1分割2Vで表現されている。また, 横軸の目盛線は, (a)に対しては1分割500 ns, (b)に対しては1分割1 μ sで表現されている。

Fig. 3(a), (b)の送波(T)から, 振幅約15Vのパルス形波が発振されていることが判る。受波(R)については, 一様な状態からまずマイナス方向に変調し, その後, 周期的な振幅が減衰していく様相を呈している。最初の変調は送波信号を受信したことに因ると推測されるから, 送波(T)におけるパルス開始点から受波(R)における変調開始点までの間隔が超音波伝搬の所要時間であると考えられる。

以上を踏まえて, (a)を見てみると, 送・受波用の振動子を直接接させたにも拘わらず, 超音波の伝搬に $t_0=0.33 \mu$ sの時間を要していることが判る。この理由は, 送波振動面に素子を保護するためのディレイ

材が装填されているからである。(b)の場合には、受波振動子が送波信号を捉えるまでに $t_1=4.58\mu\text{s}$ の時間を要している。

なお、上記伝搬時間は発振周期を $10\mu\text{s}$ から 100ms の範囲で変化させた場合においても同一の結果を示した。

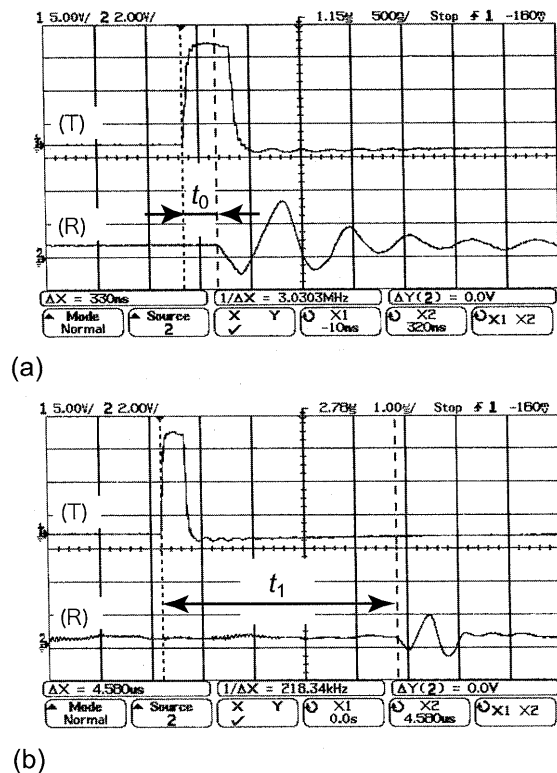


Fig. 3 Signal waveforms observed with an oscilloscope, (a) when the transmission transducer and the transducer acting as a receiver directly contact each other, and (b) when the sample duralumin of 23°C is put in between those.

3・2 音速の計算方法

観測結果をもとに、音速を次式で算出する。

$$C_{sv} = \frac{L}{t_1 - t_0} \dots (1)$$

ここで、 L は試料の測定長、 t_1 は送波信号と受波信号の遅れ時間、 t_0 はディレイ材の遅れ時間 ($0.33\mu\text{s}$) である。

式(1)に基づき、Fig. 3の場合を例に計算すると $C_{sv}=6360\text{ m/s}$ となる。超音波便覧⁽⁵⁾によると、室温におけるジュラルミン17Sにおける波長より幅の広い無限媒質(以降、自由固体と呼ぶ)中の縦波速度は 6320 m/s であり、波長より十分細い棒を伝わる縦波速度は 5150 m/s である。前者が本研究の測定値と近い値を示していることから、ここでの取り扱いの妥当性が伺える。

さらに精度について言及すると、制御精度を含む温度の測定誤差が最大 $\pm 5^\circ\text{C}$ 程度、振動子と試料の接着にグリス状シリコンコンパウンドを用いたことによる厚み誤差が最大 $+0.1\text{ mm}$ 程度、オシロスコープでの読取誤差が最大 $\pm 0.02\mu\text{s}$ 程度である。これらを供試したジュラルミンの音速に換算すると測定精度 $-0.7\% \sim +1.0\%$ 程度となる。同様に、ステンレス鋼の場合には $-2.2\% \sim +4.0\%$ 程度、快削性セラミックスの場合には $-0.4\% \sim +0.8\%$ 程度の精度と推測される。

3・3 音速の温度依存性

Table 2~4にそれぞれ、本研究で得られたジュラルミン(A2017)、ステンレス鋼(SUS303)、快削性セラミックス(マイカセラミックス)の諸物理量と温度 T との相関を示す。低温におけるデータは試料を氷水で冷やして測定された。密度 ρ は室温における実測値を基本とし、熱膨張を考慮して次式により補正された。

Table 2 Measured data for duralumin (A2017)

Temperature $T(^{\circ}\text{C})$	Density $\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	Length of sample $L(\text{mm})$	Time lag $t_1 - t_0(\mu\text{s})$	Sound velocity $C_{sv}(\text{m}/\text{s})$	Acoustic impedance $\phi \times 10^6(\text{Kg}/\text{m}^2\text{s})$
2.3	2802	27.02	4.23	6388	17.9
23(T_R)	2798	27.03	4.25	6360	17.8
47.8	2793	27.05	4.27	6335	17.69
93.4	2784	27.07	4.33	6252	17.41
145	2774	27.11	4.37	6204	17.21
194	2765	27.14	4.49	6045	16.71
242	2756	27.17	4.65	5843	16.1
293	2746	27.2	4.77	5702	15.66

Table 3 Measured data for stainless steel (SUS303)

Temperature $T(^{\circ}\text{C})$	Density $\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	Length of sample $L(\text{mm})$	Time lag $t_1-t_0(\mu\text{s})$	Sound velocity $C_{sv}(\text{m}/\text{s})$	Acoustic impedance $\phi \times 10^6(\text{Kg}/\text{m}^2\text{s})$
5	7885	8.05	1.41	5709	45.02
20(T_R)	7880	8.05	1.43	5629	44.36
54	7869	8.05	1.45	5552	43.69
105	7851	8.06	1.49	5409	42.47
151	7835	8.07	1.56	5173	40.53
207	7815	8.07	1.65	4891	38.22
252	7797	8.08	1.74	4644	36.21
277	7788	8.08	1.85	4368	34.02

Table 4 Measured data for machinable ceramic (Mica ceramics)

Temperature $T(^{\circ}\text{C})$	Density $\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	Length of sample $L(\text{mm})$	Time lag $t_1-t_0(\mu\text{s})$	Sound velocity $C_{sv}(\text{m}/\text{s})$	Acoustic impedance $\phi \times 10^6(\text{Kg}/\text{m}^2\text{s})$
2.3	2738	27.96	5.27	5306	14.53
28(T_R)	2736	27.97	5.33	5248	14.36
46.8	2734	27.98	5.33	5250	14.35
100	2729	27.99	5.35	5232	14.28
150	2724	28.01	5.35	5236	14.26
200.3	2720	28.03	5.37	5220	14.2
245.5	2715	28.04	5.41	5183	14.07
270	2713	28.05	5.43	5166	14.02

$$\rho = \frac{\rho_R}{\left(1 + \int_{T_R}^T a dT\right)^3} \quad \dots (2)$$

ここで、 a は線膨張係数であり温度 $T(^{\circ}\text{C})$ に依存する。また添字の R は室温における値を表す。材料の線膨張係数を文献^(6,7)から次のように与えた。

[ジュラルミン]

$$a = 23.2 \times 10^{-6} \quad (\text{at } 27^{\circ}\text{C})$$

[ステンレス鋼]

$$a = -1.0 \times 10^{-5} T^2 + 0.0148 T + 13.37 \quad (\text{at } 27 \sim 727^{\circ}\text{C})$$

[快削性セラミックス]

$$a = 11.7 \times 10^{-6}$$

測定長 L についても同様に、次式により補正した。

$$L = L_R \left(1 + \int_{T_R}^T a dT\right) \quad \dots (3)$$

音響インピーダンス ϕ は、音波を伝える「手ごたえ」を代表しており、

$$\phi = \rho C_{sv} \quad \dots (4)$$

で定義される。2物質間の音響インピーダンスの差異は物質間の音波の透過率に影響する。各試料の音響インピーダンスを比較すると、ジュラルミンとセラミックスがほぼ同等の値を示し、それに比してステンレス鋼では3倍ほど大きな値となる。

以上の結果を整理して音速 C_{sv} と温度 T の関係をFig. 4に示す。いずれの試料においても、音速は温度上昇に従って減少するが、磁器質のものは金属質の2つと異なる特性を示している。セラミックスの音速は、およそ 100°C の温度上昇に対して1%足らず低下したにすぎず、その変化は線形かつほぼ一様であると言える。一方、金属質においては、氷点近傍からの 300°C 程度の温度上昇に対して、ジュラルミンで約12%の速度低下、ステンレス鋼では約25%の速度低下を示しており、それらの変化は放物線形である。

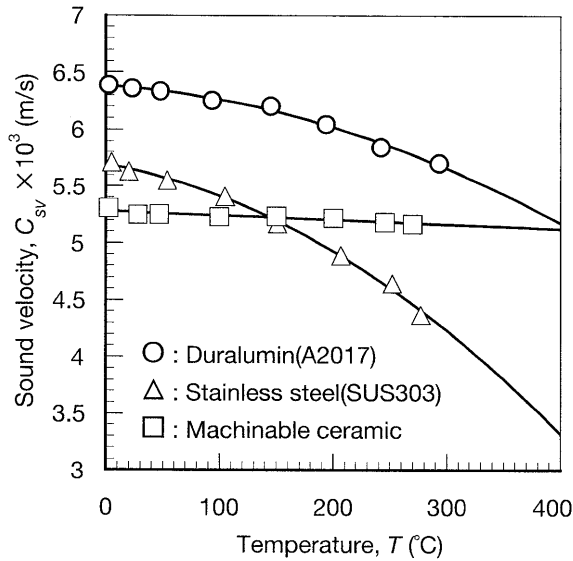


Fig. 4 Relationship between sound velocity and temperature

一般的に自由固体の縦波速度は,

$$C_{sv} = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad \dots (5)$$

で整理される。ここで、 E は縦弾性係数(Pa)、 σ はポアソン比である。式(5)より、温度上昇による ρ の低下は C_{sv} を増大させる方向に働くため、 C_{sv} 低下の原因には繋がらない。 σ の温度依存性が小さいとすると、 E の影響が大きいことが推測される。特に金属質においては、高温における弾性率が軟化によって低下するため、このことが温度上昇とともに C_{sv} を急激に低下させた原因と考えられる。

以上の結果をもとに、供試ホーン素材の高温環境における適性について検討する。まず、金属質については、音速の温度依存が大きいので、これらを温度勾配の在る場に適用する際にはホーンの音速空間分布を考慮した設計が必要となる。一方、脆性材料のセラミックスでは、高出力時の応力集中や疲労限度に対して若干の不安があるものの、温度の分布と変化に対して安定した性能を示しており、高温環境下のホーン素材として優位性が認められる。

4. 結 論

超音波振動子を高温環境に適用するための基礎データを取得することを目的として、音響ホーン素材の音速測定を行った。結論を要約して以下に示す。

- (1) PZT振動子を使用した高温固体の音速計測システムを構築し、その妥当性が示された。
- (2) 温度変化を伴う自由固体の音速として、次の実験式を得た。

$$C_{sv} = c_1 T^2 + c_2 T + c_3 \quad (\text{at } 0^\circ \sim 300^\circ\text{C}) \quad \dots (6)$$

[ジュラルミン]

$$c_1 = -6.054 \times 10^{-3}, c_2 = -0.6017, c_3 = 6382 \quad \dots (6. a)$$

[ステンレス鋼]

$$c_1 = -10.59 \times 10^{-3}, c_2 = -1.686, c_3 = 5689 \quad \dots (6. b)$$

[快削性セラミックス]

$$c_1 = 0, c_2 = -0.3878, c_3 = 5281 \quad \dots (6. c)$$

(3) 快削性セラミックスはジュラルミン相当の音響インピーダンスを示し、音速の温度依存性が極めて小さいことから、温度変化を伴う場のホーン素材に適することが明らかとなった。

文 献

- 1) 高木勝雄, 高木堅志郎: 超音波技術, 東京大学出版会, pp.39-41.
- 2) V. Abramov, O. Abramov, V. Bulgakov and F. Sommer: Solidification of aluminium alloys under ultrasonic irradiation using water-cooled resonator, Materials Letters, 37 (1998) pp.27-34.
- 3) Georgy I. Eskin: Effect of ultrasonic (cavitation) treatment of the melt on the microstructure evolution during solidification of aluminium alloy ingots, Z. Metallkd. 93 (2002) 6, pp.502-507.
- 4) 義岡秀晃, 山田健太郎, 多田幸生, 八賀正司: 超音波を付与した微粒子懸濁液のマイクロ凝固, 熱工学コンファレンス講演論文集, 06-2 (2006) pp.257-258.
- 5) 超音波便覧編集委員会編: 超音波便覧, 丸善.
- 6) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂第4版, 丸善.
- 7) 日本特殊陶業株式会社: マイカセラミックス.