

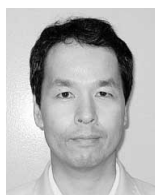
(論文)

電磁超音波による非破壊耳率計

Nondestructive Measurement of Earing Using Electro-Magnetic Acoustic Transducer



福井利英*1
Toshihide FUKUI



和佐泰宏*1
Yasuhiro WASA



重岡和隆*2
Kazutaka SHIGEOKA

A highly accurate acoustic velocity measurement system using the Electro-Magnetic Acoustic Transducer (EMAT) has been developed in order to evaluate the texture of aluminum plate. A good correlation between acoustic velocity anisotropy and earing is found for various kinds of aluminum plates, and earing can be estimated to be at 0.5% by measuring the anisotropy of the acoustic velocity. This system is applicable to in-line and all-length inspection and can be used instead of the conventional offline destructive measurement.

まえがき＝私たちが生活する上でよく目にする飲料缶や食品容器のふた、鍋釜、自動車のアルミ製ホイールキャップなどはアルミ板の深絞り加工品である。これらの製品は1枚のアルミ板を何回もの型押し（カップ成形）によって製造されるため、素材となるアルミ板の板厚精度はもちろん、塑性変形性が均質かつ等方的であることが必要である。一般に、カップ成形時にカップ端部の高さが周方向で均一にならず、「耳」と呼ばれる凹凸形状となる。その寸法割合を数値化した「耳率」は、加工メーカーなどでの製品歩留り、成形工程や後工程でのライントラブルなどに関係するため、深絞り加工における素材の品質保証項目の一つとなっている。

耳の発生は素材の集合組織に起因するため、素材メーカーである当社では、材料の視点から圧延や熱処理条件による組織制御による品質改善に努めてきたが、オフラインの組織観察・分析にとどまるため、全数、全長の品質保証にはならない。そこで、電磁超音波による非接触超音波を用いて、板材中の音速の異方性を高精度に測定することによって加工後の「耳率」を予測する技術を開発したので報告する。

1. 耳の発生要因

出荷されたアルミ板は、加工メーカーで円形打抜き、ダイスおよびポンチによる深絞り加工、しごき／へらしごき加工などの成形工程を経て所定のカップ形状に加工される。昨今の開け閉め可能なボトル缶はその典型例である。アルミ板の最も単純な深絞り加工とその際に生じる耳、耳率の規定された測定方法を図1に示す。アルミ板材からパンチングによって円形に切出したサンプルを深絞り加工し、缶端部に発生する山谷状の耳の高さを測定する。圧延方向を0度として45度ごとに高さを測定した

とき、式(1)によって耳率値が定義される¹⁾。

$$\text{耳率} = \frac{(H_{45} - H_{0-90})}{(H_{45} + H_{0-90})/2} \times 100(\%) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 H_{0-90} は圧延方向および幅方向の4方向の平均耳高さ、 H_{45} は圧延方向に対して45度傾いた4方向での平均耳高さである。耳には圧延方向(0°)およびこれに直交する方向(90°)に伸びが大きい「マイナス耳」と、圧延方向に対して45度方向に伸びが大きい「プラス耳」の二種類が存在する。この二種類の耳の概念図を図2に示す。

耳の発生原因は、アルミ板を構成する集合組織であることが知られている^{2),3)}。単結晶は原子や分子が規則的に配列し異方性が生じるが、多結晶では一般に、単結晶で見られる異方性は互いに打消し合って巨視的には

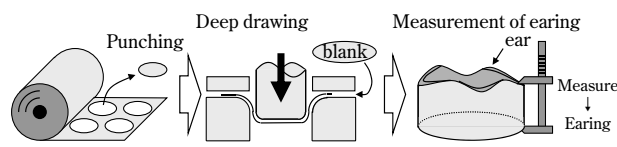


図1 深絞り加工と耳率
Fig. 1 Deep drawing and earing

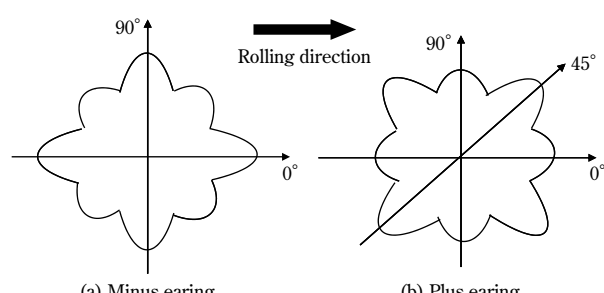


図2 二種類の耳の形の概念図
Fig. 2 Two types of earing shape image

*1 技術開発本部 生産システム研究所 *2 神鋼検査サービス(株)

等方性となる。しかし、多結晶体の金属板であっても、製造工程における加工や熱処理によってある特定の結晶方位に偏りが生じ、いわゆる集合組織が形成されることがある。この集合組織が深絞りによって代表される塑性加工時の変形において異方性を生じさせ、結果として耳が発生する。板加工と集合組織の相関には次のようなものがある⁴⁾。

【再結晶集合組織】(100)<001>：Cube方位、

(110)<001>：Goss方位など

【圧延集合組織】(123)<634>：S方位、

(112)<111>：C方位、(110)<112>：Brass方位など

アルミニウムは面心立方格子構造の金属であるため、加工時の塑性変形においては、すべり面(111)/すべり方向<110>のすべり系にしたがって変形が進む。集合組織に深絞り加工を行うと、その方向性を反映した異方性が生ずる。多結晶モデルを用いた有限要素法解析に基づき、深絞り時のフランジ部とカップかべ部の応力の釣合い条件のみから耳高さを計算し、集合組織と耳の関係が報告されている⁴⁾。その結果から、Cube方位やGoss方位で0-90度方向が高くなるマイナス耳に、S方位やC方位で45度方向が高くなるプラス耳になることがわかる。

実材では複数の集合組織が混在して集積しており、それら集合組織の加重平均的な分布の結果として耳形状が決まる。さらに深絞りの各種条件や材料強度などの影響も受け、最終的な耳はこれらが総合して生じることになる。

2. 測定原理

集合組織と弾性異方性との関係に基づき、集合組織の分布が音速異方性を示すことに着目した。図3に集合組織と加工、弾性異方性の関係を示す。先に述べたように、深絞り加工によって発生する耳は集合組織が要因であるため、深絞りによる塑性加工時に方向性が現れる。超音波を伝播（でんぱ）させる場合にも同様に、集合組織の偏りが基で原子間の距離が方向によって異なり、超音波の伝播速度が変化する音速異方性が現れる。破壊法においては、実際に耳を発生させて塑性異方性から耳率を計測していたが、この弾性異方性に着目して耳率を計測する手法として、アルミ板の各方向の音速異方性を計測する装置を開発した⁴⁾。

音速異方性により耳率を計測するためには、超音波の

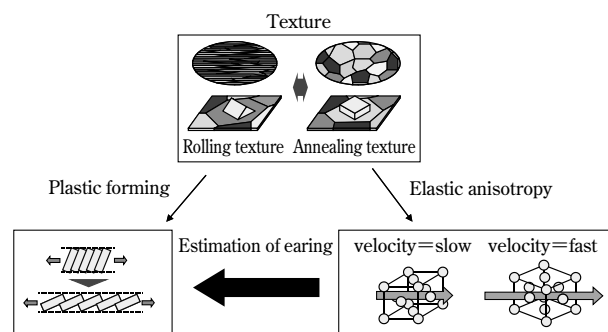


図3 集合組織と加工、弾性異方性の関係

Fig. 3 Relationship between texture, plastic forming and elastic anisotropy

伝播方向による音速の違い、すなわち伝播距離が同じ場合には伝播時間の変化を計測すればよい。そこで、音速異方性を評価する評価値として式(2)を定義した。

$$E = (T_{-45} + T_{+45}) - (T_0 + T_{90}) \text{ (ns)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、圧延方向を0°の方向としたとき、θ方向に一定距離伝播する超音波の伝播時間を T_θ としている。

超音波には縦波、横波やこれらの混成からなる種々の伝播形態があるが、対象とするアルミ板全体の音速異方性を計測する必要があるため、板全体が振動する板波(Lamb波)を適用した。板波のなかにも種々の振動モードが存在し、また各振動モードは、板厚×周波数に応じて速度分散を示すことが知られている⁵⁾。図4に理論計算により得られた超音波の伝播モードにおける板厚×周波数と速度の関係(縦波6,400m/s、横波3,040m/sで計算)を示す。超音波の伝播時間を安定かつ精密に測定するためには、他の振動モードの超音波波形と弁別でき、かつ低分散域での測定が必要となる。これらの観点から、振動モードが重ならずさらに速度分散が小さいS0モードを選択した。

通常の圧電素子による超音波プローブを使用する場合、超音波を対象材に伝播させるために水や油などの接触媒質が必要になる。したがってこの場合、伝播時間の測定値には、アルミ板内での伝播時間に加えて接触媒質中の伝播時間が含まれることになる。すなわち、組織起因の音速異方性を十分な精度で測定するには、サブミクロンで接触媒質の厚みを管理する必要があり、実用性に欠ける。そこで、接触媒質が不要で、さらにインライン測定を目指すには必要な非接触計測が可能という利点をもつ電磁超音波⁶⁾(Electro-Magnetic Acoustic Transducer, 以下EMATという)を用いた。

非磁性であるアルミにも適用可能な、図5に原理を示したローレンツ型のEMATを使用する。磁石とコイルから構成され、磁石直下に設置されたコイルに高周波電流を流すと材料に誘導電流が励起され、磁石からの静磁場とのローレンツ力により超音波が発生する。コイルはメアンダコイルと呼ばれる櫛(くし)型形状をしており、隣合う電流は対向しているためローレンツ力も反転した向きに発生し、板全体が振動する板波が発生する。超音波の受信は、電磁誘導の法則により材料表面の超音波振動、および磁石の静磁場によりコイルに誘起される起電力が受信信号として検出される。この板波を用いてアルミ板での伝播方向による伝播時間を検出する。

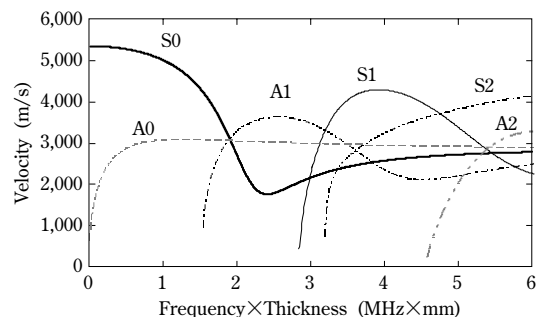


図4 周波数と板厚、群速度の関係

Fig. 4 Relationship between frequency, thickness and velocity

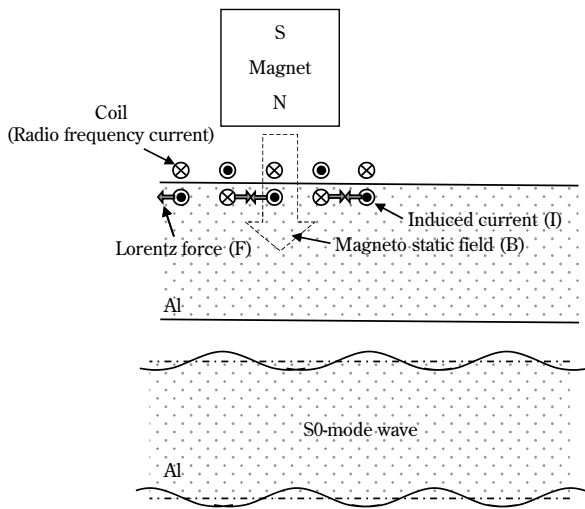


図5 EMATによるS0モード板波発生
Fig. 5 Generation of S0-mode wave by EMAT

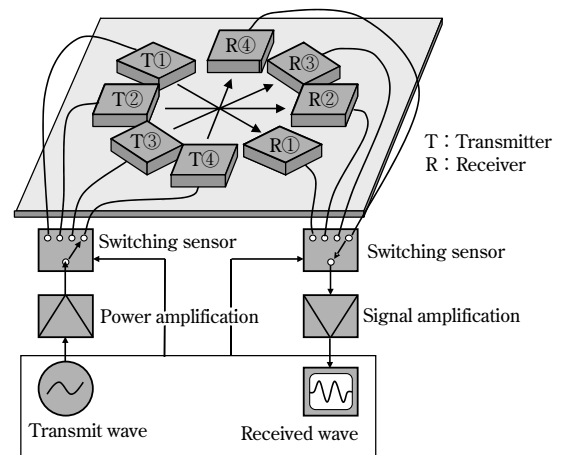


図6 EMATによる耳率の測定
Fig. 6 Measurement of earing by EMAT

3. 装置構成

3.1 EMATセンサ

図4の板波分散特性より、S0モードのみを発生させるためには周波数×板厚が1.5(MHz×mm)程度以下が必要であることがわかる。一方、音速測定の高精度化の面からは、超音波周波数は高い方が望ましい。以上のことから本装置では、対象とするアルミ板の厚さを1mm以下とし、超音波周波数を1.35MHzに設定した。

特定モードの板波を効率良く送受するためには、EMATセンサと位相整合させる必要がある。上記設定周波数(1.35MHz)において板厚1mm以下の場合に音速はおよそ5,000~5,400(m/s)となる。上述した周波数と板厚の関係と、音速=周波数×波長の関係式からS0モードの板波の波長を4mmと定めた。以上よりEMATセンサコイルは、対向するコイルピッチ2mm、ターン数9の櫛形状コイルで送受信コイルの間隔90mmとし製作した。

耳率測定におけるEMATセンサの配置構成を図6に示す。再結晶集合組織および圧延集合組織の組成比率を評価するため、0度、±45度、90度方向の4方向にセンサ(T①~④：送信センサ、R①~④：受信センサ)を配置し、板波S0モードをアルミ板の4方向に伝播させる。

3.2 システム構成

図7に製作した装置構成を示す。コンピュータ(PC)からの制御信号によって信号発生器(Function generator)で超音波振動波形が生成され、最大出力5kWのアンプ(RF power amp)で増幅した後、信号波形が信号切替器(Ch switch)を通してセンサヘッド内の送信用EMATセンサに送られ、対象材(Al plate)に超音波を発生させる。同センサヘッド内の受信用EMATセンサで受信した超音波信号波形はプリアンプ(Amp)を通してレシーバ(Receiver)で受信される。受信信号はデジタル信号に変換され、PCでの波形解析により伝播時間が測定される。

コンピュータによる信号切替器の制御により、4方向の超音波伝播時間が自動的に測定され、その測定時間は、1箇所あたり約2秒である。

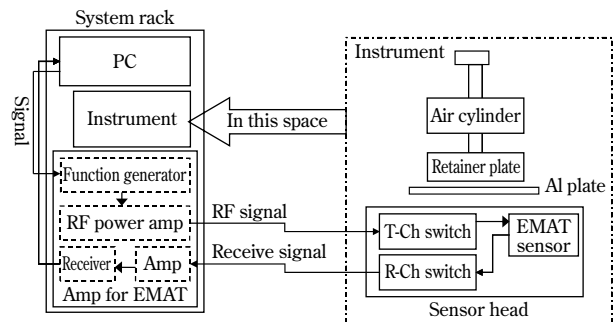


図7 装置構成図
Fig. 7 Configuration of system

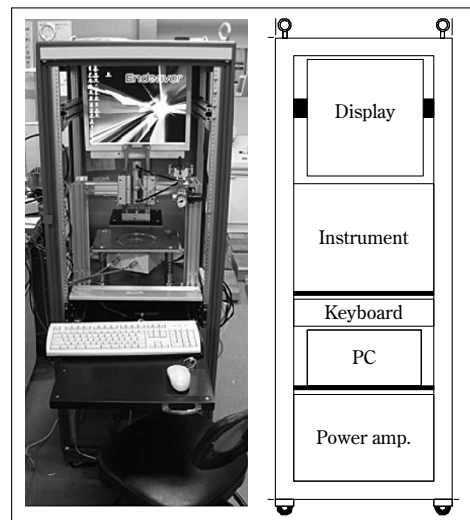


図8 装置概要
Fig. 8 Measurement system

図8に装置外観を示す。19インチラック内に測定系と信号処理系の両方を収納している。

4. 性能評価実験結果

4.1 音速異方性の測定結果

本装置で測定した受信信号波形の例を図9に示す。図9からS/N=25程度で受信信号を検出できている。また、超音波の伝播方向を圧延方向とした場合、および45度傾けた場合の伝播時間の違いを図10に示す。この例では伝播時間の差が30ns程度である。耳率計に要求される繰返し精度は耳率値で0.1%であり、破壊法による耳率

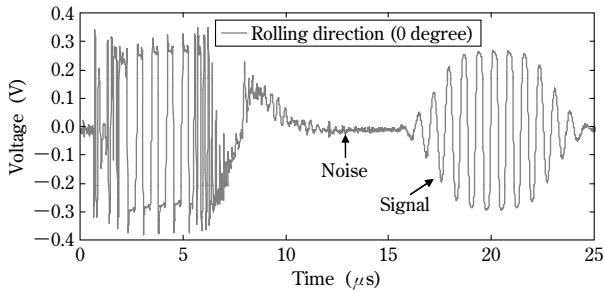


図9 超音波の信号波形
Fig. 9 Example of ultrasonic wave

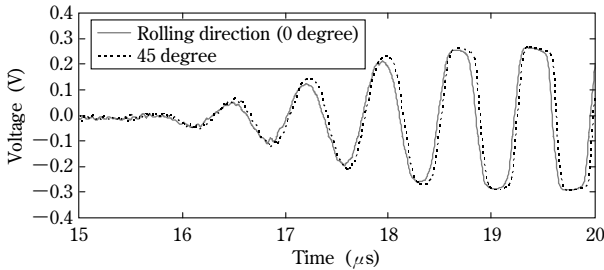


図10 方向による伝播時間の違い
Fig.10 Difference of propagation time in direction

値とEMAT波形の計測時間との相関から換算すると、耳率計では伝播時間2.5nsの時間分解能が必要になる。伝播時間の差を精度よく検出するためにはパルス波が適しているものの、一波のみでは信号強度が弱いという問題があり、パースト波としさらにS/Nを向上させるため加算平均処理を行っている。また伝播時間の差は、基準波形との相互相関をとることで精度よく算出するようにした。これらの信号処理を行っても1サンプル4方向での計測時間は10秒程度である。

4.2 音速異方性と耳率値の評価結果

当社真岡製造所において、品種ごとにロット、チャージを変えたアルミ板の実材サンプルを準備し、破壊法での耳率値とEMAT耳率計で計測した評価値 E に相関があるか確認実験を実施した。EMATでの性能評価が繰返し可能なように、同一箇所から切出したアルミ板サンプルを二分割し、一方をEMATでの評価用サンプル、もう一方を破壊法での耳率値測定用とした。一例として、適切な材質と板厚をキーにグループ化した3000系（飲料缶ボデー材などの用途）を対象に、破壊法での耳率値とEMATでの音速異方性評価値 E との相関を図11に示す。縦軸に破壊法での耳率値を、横軸にEMATでの評価値 E を示し、校正直線からのズレを標準偏差として表している。この結果から、測定対象をグループ化して校正することによって評価値 E は耳率値と直線関係にあり、標準偏差 σ （耳率％表示）が0.05％になることが確認できた。この結果、式（2）で示した音速異方性の評価値 E を用いれば、EMAT耳率値と破壊法との差異が開発目標としていた0.5％以内に入ることが確認できた。さらに、安定性は同一サンプルでの3回繰返し測定精度が0.1％になることで確認できた。

また、純アルミ（1000系：コンデンサケースなどの用途）についての測定結果を図12に示す。図12（a）に示すように、サンプルを一つにグルーピングすると誤差が

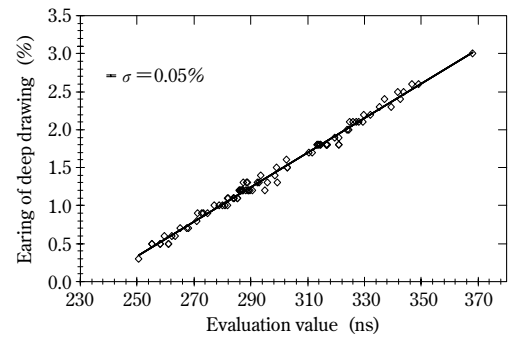


図11 絞り耳率と評価値の相関
Fig.11 Correlation of earing of deep drawing and evaluation value

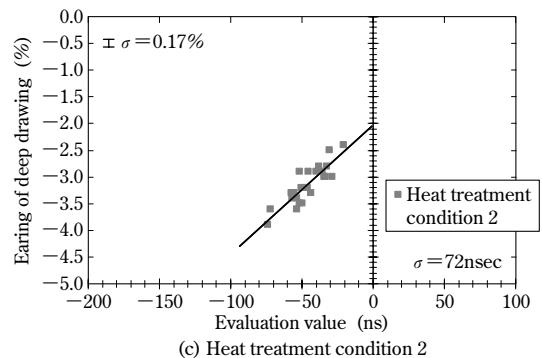
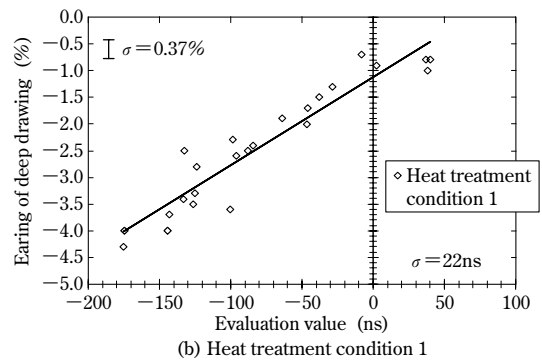
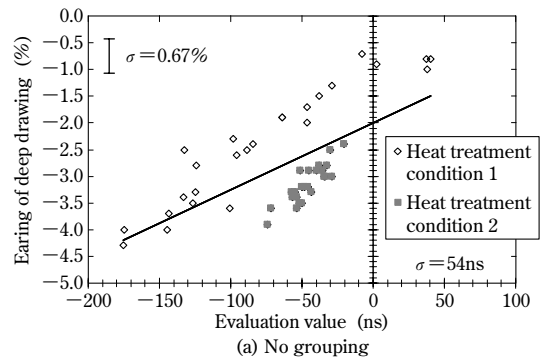


図12 純アルミでの評価値と耳率の相関
Fig.12 Correlation evaluation value and earing of 1000 series

大きくなるが、図12（b）、（c）に示すように熱処理の条件で分類することで精度向上の可能性があることを確認した。

5. 考察

品種や処理の異なる各種アルミ板において音速異方性と耳率との間に相関が得られたことから、耳率は母材集合組織の弾性異方性に強く依存しているといえる。したがって、母材の弾性特性と耳率（塑性変形量）との関係

を明らかにすることにより、耳率を音速の測定値から普遍性をもって評価できる可能性がある。

しかしながら深絞りにおける塑性変形量は、材質のみならず加工条件（潤滑油やしわ押え力など）およびこれらの組合せ条件によって変化すると考えられるため、実用的には材質や加工条件に対して校正する手段が現実的と考える。図11における3000系アルミ板に対しては、耳率と評価値 E の校正直線は式 (3) で表される。

$$\text{耳率}(\%) = 0.0228 \times \text{評価値} E(\text{ns}) - 5.361 \quad \dots\dots(3)$$

耳率値0.5%変化に対する評価値 E の変化量は22nsとなる。一方、本装置での送受信の伝播時間は、送受信距離(90mm) / 音速(5,000m/s) = 18,000nsであることから、耳率を0.5%の分解能で評価するためには、音速を0.1%の精度で安定に測定する必要がある。図4の分散特性に示すように、板波の音速は集合組織のみならず板厚にも依存することから、板厚変動が誤差要因となる。EMATでは、通常の圧電センサと異なり、超音波周波数を容易に変えることができることから、音速の周波数依存性から板厚変動を補正することができる。

むすび＝真岡製造所の品質保証室で校正データの取得、確認作業を進めた結果、塑性異方性から耳率を計測する深絞り加工の代替可能な技術として、音速異方性に着目したEMAT耳率計の製作を行った。その結果、品種と製

造条件ごとに校正直線を設定することにより、破壊法による耳率値を0.5% (1σ) で予測することが可能となった。また、飲料缶ボデー材で利用され生産量の多い3000系では同様に0.05% (1σ) での予測できることが確認できた。今後も各品種・明細について破壊試験との精度確認を行い、EMAT耳率計への代替可能かどうか検証していく。

開発した装置は、媒質が不要で迅速な測定ができることが最大の特長である。より多くの箇所を検査ができるようになるほか、全量検査、全長検査への展開や、製造工程後半のインライン・モニタリングの利用も期待される。さらに、アルミ以外にも鉄や銅への展開や、超音波の音速が媒質の応力状態によりわずかに変化することを利用して応力を測定する音弾性法⁷⁾への適用など、今後広く応用展開について検討したい。

参 考 文 献

- 1) 日本塑性加工学会. プレス加工便覧. 丸善, p.340.
- 2) D. Altenpohl. アルミニウム金属加工学入門. 1971, p.94-95.
- 3) 金武直幸ほか. 軽金属. 1982, Vol.32, No.5, p.241-246.
- 4) 小川岳夫ほか. 第7回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集. 2000, p.47-54.
- 5) 日刊工業新聞社. 超音波探傷法. p.65-71.
- 6) 村山理一. 非破壊検査. 2009, Vol.58, No.7, p.262-268.
- 7) 福岡秀和ほか. 音弾性の基礎と応用, オーム社, 1993, 200p.