電磁超音波共鳴法による金属薄板の音弾性応力測定*

荻 博次^{*1}, 平尾雅彦^{*2}, 福岡秀和^{*2}Electromagnetic Acoustic Resonance to Measure Stress
in Thin Metal Plates

Hirotsugu OGI, Masahiko HIRAO and Hidekazu Fukuoka

Ultrasonic resonance frequency is measured using noncontacting electromagnetic acoustic transducers (EMATs) for acoustoelastic stress determination. An EMAT consists of a permanent magnet and a coil, which is dynamically driven by high-power rf bursts. It generates bulk waves through Lorentz forces arising from the static magnetic field and the induced eddy current, and detects them with the inversed process. The low efficiency of EMATs is well compensated by bringing the object into resonance. Longitudinal and shear resonance frequencies up to 20 MHz are determined by sweeping the operating frequency and processing the reverberation signals with a superheterodyne receiver linked to a computer. Slight frequency shift with stress application is available with the improved sensitivity on the order of 10^{-6} fractional changes. The main features of the measurement system are demonstrated in an experiment utilizing the uniaxial and plane stress field in 1.2-mm-thick steel and aluminum sheets.

Key Words: Stress Measurement, Acoustoelasticity, Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT), Ultrasonic Resonance, Superheterodyne Receiver

1. 結 言

薄板金属の応力評価を音弾性法則に基づいて行う場合, 従来のシングアラウンド法などによる測定法では, 伝ば時間が短いために音弾性測定に必要な高精度の音速測定(相対精度 $10^{-5} \sim 10^{-6}$)が困難である。

本研究では, 薄板金属に対しても高精度の音速測定が実現できる電磁超音波共鳴法を用いて, 薄板の応力評価を行った。

電磁超音波共鳴法とは, 電磁超音波探触子(以下 EMAT と略す)を用いて, ローレンツ力によって試料内に超音波を発生させ, その定在波の共鳴周波数から材料を評価する方法である。従来の圧電探触子を用いる共鳴法は, 薄板, 小球, 細い棒など小さい試料の音速・弾性定数を求める実際的な測定手段として古くから用いられてきた。周波数を掃引して得られる共鳴ピークから共鳴周波数を求め, その値, あるいはその規則的な間隔と試料寸法から音速を計算する。音弾性応力測定に対しても適用例はある⁽¹⁾。しかし, 従来の共鳴法では圧電探触子を試料に圧着または接着させるた

め, 要求される高い精度で試料の音速を知るには, 試料-結合剤-探触子からなる複合振動体に対する補正⁽²⁾が必要である。ところが, EMAT は, 電磁力(ローレンツ力)によって導体中に超音波を励起・受信するので非接触測定が可能である。したがって, EMAT を共鳴測定に利用すると, 複合振動体の補正をする必要がなくなる。また EMAT の欠点は, 変換効率が通常の圧電探触子に比べて 40 dB 以上も低いことであるが, この欠点は高電力信号で EMAT を駆動して超音波を発生させるとともに, 長いバースト波で共鳴状態(定在波)を作り, 多重エコーをとらえることによって最も適確に補うことができる。電磁超音波共鳴法は EMAT と共鳴法の欠点を互いの長所で補うことでより適用範囲を広げた手法であり, 本研究で示すとおり, 音弾性測定に使用できる高精度測定を非接触で, 簡便に行える。この方法は, シングアラウンド法, パルス重畳法などパルス波の伝ば時間を測定する方法では精度が相対的に低下する, あるいは測定不可能となる薄板でも応力を評価できる⁽³⁾⁽⁴⁾。

2. 共鳴周波数を用いた音弾性法則

超音波の音速が応力に依存して変化する効果を利用し, 音速から応力を評価する手法を音弾性法という。

* 原稿受付 平成 5 年 4 月 22 日。

*¹ 准員, 大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町 1-1)。*² 正員, 大阪大学基礎工学部。

音速は定在波の共鳴周波数から求められるので、直接共鳴周波数から応力を評価できる。ここでは圧延板のように集合組織に起因する直交異方性をもつ材料の音弾性法則⁽⁵⁾⁽⁶⁾を共鳴周波数を用いて表現する。

今、一つの直交異方性の軸から角度 θ だけ傾いた方向に主応力が働く平面応力状態を考える(図1)。この場合、横波の偏向方向は集合組織による異方性と応力による異方性とが合成された方向(ϕ の方向)、およびそれに垂直な方向である。二つの主方向に偏向した横波の音速差をその平均音速で除した量 B を音響異方性と呼ぶ。音弾性法則によれば音響異方性と主応力差とは次式の関係にある。

$$B = \sqrt{B_0^2 + 2B_0C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta + C_A^2(\sigma_1 - \sigma_2)^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 σ_1 と σ_2 は主応力、 B_0 は組織音響異方性、 C_A は複屈折音弾性定数である。また偏向方向 ϕ は、

$$\tan 2\phi = \frac{C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta}{B_0 + C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。とくに、主応力方向と直交異方性の軸方向とが一致する場合($\theta=0$)は式(1)から

$$B = B_0 + C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、2方向に偏向した横波の音速差と主応力差は線形関係にある。

また、縦波速度と平均横波速度は主応力の和に比例する。板厚変化の影響を取り除くために両者の比 R を音弾性測定に用いると、

$$R = R_0 + C_R(\sigma_1 + \sigma_2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 R_0 は無応力時の音速比、 C_R は音速比音弾性定数である。

一方、弾性波の音速 V と両端自由の定在波の n 次共鳴周波数 f_n との関係は

$$f_n = nV/2d \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表される。 d は板厚である。共鳴の次数が高いほど音速変化が敏感に、すなわち音弾性効果を感度よく測定できる。式(5)を用いると B と R は異方性に関する第一近似の範囲内で板厚を含まない次式で表さ

れる⁽¹⁾。

$$B = \frac{2(f_n^{(1)} - f_n^{(2)})}{f_n^{(1)} + f_n^{(2)}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R = \frac{2nf_m^{(3)}}{m(f_n^{(1)} + f_n^{(2)})} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $f_n^{(1)}$ 、 $f_n^{(2)}$ はそれぞれ二つの主方向に偏向した横波の n 次共鳴周波数、 $f_m^{(3)}$ は縦波の m 次共鳴周波数である。したがって、従来の音弾性測定と同じように単軸引張負荷実験($\theta=0$, $\phi=0$, $\sigma_2=0$)によって音弾性定数(C_A , C_R)と初期値(B_0 , R_0)とを較正しておき、同一点で三つの共鳴周波数(縦波と二つの横波)を測定することで、式(1)と(4)より二つの主応力を分離して求めることができる。

3. 電磁超音波共鳴法

3.1 電磁超音波探触子 EMAT には、静磁場と励起渦電流の相互作用から生じるローレンツ力を用いて超音波を送受信するローレンツ型と、静磁場と駆動電流が作る動磁場との相互作用によって強磁性体中の磁区を変動させ(磁わい効果)、超音波を送受信する磁わい型がある。本研究で製作した EMAT はすべてローレンツ型である。製作した EMAT には大別して横波だけを送受信する横波用 EMAT と、縦波と横波の両方を同時に送受信できる縦波横波両用 EMAT がある。さらに、一つのコイルで送信・受信を兼ねる送受信兼用タイプと送信・受信をそれぞれ別のコイルで行う送受信別タイプがある。兼用タイプの EMAT は別タイプの EMAT に比べて小形化できるが、受信信号が別タイプより小さい。

EMAT の作動原理を図2に示す。横波用 EMAT はトラック形のコイルと試料表面に垂直な静磁場を与える NEOMAX 永久磁石〔住友特殊金属(株)製〕とで構成されている。縦波横波両用 EMAT は、渦巻形コイルと円柱形磁石が作る放射状に広がる静磁場構造をもつ。コイルに高周波交流電流が流れると金属表面に渦電流が励起され、この渦電流と静磁場との相互作用によって、水平方向のローレンツ力 F_t と F_r および、垂直成分のローレンツ力 F_z が発生する。 F_t と F_r が横波を、 F_z が縦波を励起する。受信原理はこの逆過程に従う。実験に使用した EMAT の仕様を表1に示す。

縦波横波両用 EMAT はコイル形状によって発生する弾性波のモードを選択できる。表1の EMAT ④は永久磁石の外縁部にコイルを位置することで F_z を増大させ、縦波専用 EMAT として使用した。EMAT ①～③はコイルに線径 0.2 mm のエナメル線を使用し、コイルと磁石を樹脂にモールドして固定した。EMAT

図1 直交異方性をもつ平板の平面応力状態

④はコイルに線径 0.26 mm のホルマル線を使用した。

3・2 スーパーヘテロダイン位相測定装置 共鳴周波数は、ある範囲内で等間隔に周波数を掃引し、各周波数のパースト波(正弦波信号の一部を取り出し、ゲートアンプで増幅した超音波駆動信号)を試料に送り、個々の周波数における“振幅スペクトル”(以下に詳述)を周波数の関数として測定し、それがピークを示す周波数として決定できる。しかし、振幅スペクトルの測定に必要なゲートアンプやレシーバ等の測定機器は、測定周波数の影響を受けやすく、周波数の関数として振幅スペクトルを正確に測定するためには測定装置自身の周波数特性を考慮しなくてはならず、音弾性応力測定に要求される高精度の測定が困難である(音弾性法で 1 MPa の応力評価を行うためには、アルミ合金で 10^{-5} の相対精度の共鳴周波数測定を行わなければならない)。本研究では共鳴周波数の測定にスーパーヘテロダインによる位相干渉原理を用いた⁽⁷⁾。これによって、装置内を通過する信号は一定の周波数(Intermediate Frequency ; IF)に固定され、測定系の周波数依存性が除去される。この結果、アルミ合金で 10 MHz 付近の共鳴周波数が 30 Hz の精度(相対精度 10^{-6})で測定可能となった。図 3 にその測定原理を示す。

ある測定周波数 F を設定するとシンセサイザから周波数 $F+IF$ の連続波信号 $\cos 2\pi(F+IF)t$ が出力される。ここで、IF は一定値の 25 MHz に固定されている。これと IF 発信器からの周波数 IF の信号 $\cos 2\pi IF t$ とが Mixer ①に入力される。Mixer ①では両信号の積を出力する。この積はそれぞれの位相の和と差の成分(周波数は F と $F+2IF$)に分解できる。

$$\begin{aligned} & \cos 2\pi(F+IF)t \cdot \cos 2\pi IF t \\ &= \frac{1}{2} \cos 2\pi(F+2IF)t + \frac{1}{2} \cos 2\pi Ft \\ & \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

この信号のうち、次の Low-Pass フィルタ (20 MHz) で周波数 $F+2IF$ の信号が除かれる。Low-Pass フィルタを通過した周波数 F の信号はゲートアンプによってパースト波(最大長さ 200 μ s)に成形され、High-Power アンプによって増幅された後、Duplexer (高電力の入力を EMAT へ、受信信号を Preamp へ導くとともに、微小ノイズを除去する機能をもつ)を経て、EMAT を励起し、試料に超音波振動を生じさせる。

励起に続いて、試料内を通過し底面で反射した多重信号 $A_m \cos(2\pi Ft + \phi_m)$, $m=1, 2, 3, \dots$, から成る残

表 1 EMAT の仕様

	Mode	Wire	Size	Turn	Frequency Band (MHz)	
					Al	SS41
EMAT①	S-Wave	Double	5×3 mm	8	0.25~17	0.25~8
EMAT②	S-Wave	Single	5×6 mm	5	0.25~16	0.25~10
EMAT③	Dual Mode	Single	10 mm (Diameter)	7	0.25~12	0.25~9
EMAT④	L-Wave	Double	34 mm (Diameter)	10	0.25~15	0.25~10

(a) 横波用 EMAT

(b) 縦波横波両用 EMAT

図 2 EMAT の構造と作動原理
(B : 磁束密度, F : ローレンツ力)

図 3 スーパーヘテロダイン位相干渉原理による共鳴周波数測定(各過程での信号の位相も示す)

響を同じ EMAT が受信する。ここで A_m と ϕ_m は試料を m 回往復した反射信号の振幅と位相遅れを示す。 ϕ_m は EMAT における送受信と試料内の伝ばを反映して、次式の値をもつ。

$$\phi_m = \phi_1 + 2\pi F \cdot 2d \cdot (m-1)/V \quad \cdots \cdots (9)$$

ϕ_1 は第 1 反射信号の位相遅れである。これらの反射信号と先のシンセサイザからの信号 $\cos 2\pi(F+IF)t$ とが Mixer ②に inputs され、両信号の積を出力する。この積は再び和と差の周波数成分に分解でき、次の IF アンプによって周波数 IF の信号(位相が $2\pi IF t - \phi_m$) のみが増幅され、他の信号はバンドパスフィルタで除かれる。IF アンプからの信号はさらに Mixer ③と④に inputs される。Mixer ③には IF 発信器からの信号 $\cos 2\pi IF t$ が、Mixer ④には IF 発信器の信号と位相が 90° ずれた $\sin 2\pi IF t$ の信号がそれぞれ inputs され、IF アンプを通過した反射信号との積がそれぞれ出力される。これらの積の成分のうち和の成分はともに次の Low-Pass フィルタで除かれ、差の成分である $B_m \cos \phi_m$ と $B_m \sin \phi_m$ の値のみが出力として得られる。ただし、 B_m は Mixer ③および④を通過した m 番目の反射信号の振幅である。これらの出力をインテグレートにより、設定したゲート幅にわたって積分する。ゲート幅は、励振後数 μs 後から残響が消滅するまでの幅をとる。両積分値は DT ボードを経由してコン

ピュータに取り込まれ、必要な演算を行う。その二乗和の平方根をこの測定周波数 F での振幅スペクトルとする。

F が共鳴周波数のとき(超音波が板厚に沿って 1 往復する時間が周期 $1/F$ の整数倍になる)、 F は式(5)で表されるので、これを式(9)に代入すると、

$$\phi_m = \phi_1 + 2\pi N \quad (N \text{ は整数}) \quad \cdots \cdots (10)$$

となり、 $\cos \phi_m$ および $\sin \phi_m$ の値は m とは独立な一定値になる。その結果、振幅スペクトルは大きな値となる。一方、 F が共鳴周波数からずれると、 $\cos \phi_m$ や $\sin \phi_m$ が m に依存して正負にランダムな値をとるため、出力の積分値は相殺し、振幅スペクトルは小さな値となる。例を図 4 に示す。同図は、厚さ 6 mm の炭素鋼板での一つの共鳴周波数とその近くの周波数での $B_m \cos \phi_m$ と $B_m \sin \phi_m$ を示す。共鳴周波数からずれた周波数では、多重エコー相互間の位相干渉によって残響は弱く、積分値も小さい [図 4(c)]。共鳴周波数に近づくと、干渉による振幅低下はほとんどなくなるが、残響振幅は“うなり”の結果としてゆるやかに変調されるため、積分ゲート内で相殺し合い、出力はやはり小さい [図 4(b)]。減衰の少ない材料であれば、この振動は長く続き、相殺が十分行われるため、周波数がわずかにずれていても出力は小さくなる。このようなとき、共鳴ピークは鋭く、その結果共鳴周波数の測定精度が向上する。この振幅変調の周期は共鳴周波数に近づくに従って長くなり、共鳴周波数で振動は消滅し、振幅は単調に減少して積分結果(振幅スペクトル)は大きくなる [図 4(a)]。

こうして得られたスペクトル曲線をガウス分布に近似し、その対称軸を共鳴周波数として決定する。

このアナログ信号処理装置は高速の共鳴周波数測定を可能にした。これに接続したパーソナルコンピュータは、すべての測定条件(周波数範囲と周波数間隔、励起バースト波の長さや強度、増幅率とバンド幅、平均回数、積分ゲートの長さ、など)の設定と積分結果のサンプリング、および必要な数値演算を行う。測定条件に依存するが、500 個程度の周波数に対する振幅スペクトルの測定と表示に 20 秒ほど要する。また、測定精度は、試料と板厚に依存するが、1.2 mm 程度のアルミニウム合金で 10 MHz 付近の共鳴周波数測定が約 30 Hz の精度(相対精度 10^{-6} 程度)で行える。

4. 薄板での音弾性応力測定

本法の応力および空間分解能を調べる目的で、図 5 に示す薄板円孔帯板を x 軸方向に引張り、音弾性法則に基づいて平面応力分布を測定し、理論値との比較を

図 4 振幅スペクトルと三つの周波数での出力例

行った。

単軸負荷応力実験から得られた音弾性定数 (C_A , C_R) と初期値 (B_0 , R_0) を用いて, (1) y 軸 (最小断面積部), (2) x 軸, (3) 帯板の縁 ($y=b$), および (4) 円孔周辺, に沿って EMAT を移動し応力分布を求めた。試験片には, アルミニウム合金 (Al 2017 S, $670^1 \times 150^w \times 1.215^t$ mm³) と軟鋼 (SS41, $670^1 \times 147.8^w \times 1.145^t$ mm³) の圧延板を用いた。圧延方向はアルミニウム合金が y 軸方向, 軟鋼が x 軸方向である。試験片は同じものが 2 枚ずつあり, 一方は音弾性定数の較正のため単軸負荷応力実験に用い, もう一方は中央に円孔をあけ, 平面応力分布の測定を行った。板幅と円孔の径の比 r/b はアルミニウム合金が 0.300, 軟鋼が 0.454 である。

共鳴周波数の測定条件は, 試料や EMAT の大きさとタイプ, 測定周波数などで異なる。表 2 に上の試料に対する各 EMAT の使用測定条件を示す。軟鋼はアルミニウム合金より電気抵抗が大きく超音波の伝達損失も大きいので受信信号が弱くなる。また EMAT が小形化するほど受信信号が弱いため, より振幅が大きく, 長いバースト波が必要となる。

4.1 単軸負荷応力実験 従来の音弾性測定と同じように単軸負荷応力実験から音弾性定数 (C_A , C_R) と初期値 (B_0 , R_0) を求める。単軸負荷応力 ($\sigma_2=0$) の場合, 式 (3) と (4) から B と R は負荷応力 σ_1 と線形関係にある。したがって, その傾きから C_A と C_R が, 無応力状態の B と R から B_0 と R_0 が得られる。

表 2 測定条件

	Sample	Burst Wave Width (μ s)	Burst Wave Amplitude (V)	Gate Width (μ s)	Gain (db)
EMAT①	Al SS41	30~40 35~40	300~700 500~1200	250~350 100~150	30~38 34~42
EMAT②	Al SS41	30~40 30~45	100~300 200~800	300~450 200~250	26~36 28~38
EMAT③	Al SS41	36~40 38~42	300~700 1000~1500	250~350 100~150	30~38 36~42
EMAT④	Al SS41	10~30 20~35	5~10 10~30	400~700 150~250	22~24 26~32

図 5 平面応力状態にある円孔をもつ帯板

B の測定には横波用の EMAT ②を使用した。 B を求める際に圧延方向に 0° 方向と 90° 方向に偏向した二つの横波共鳴周波数が必要となる。異方性 (B) が小さい場合は 2 方向の周波数スペクトルが重なり合うため別々に共鳴周波数を測定しなければならないが, 異方性の大きな場合, 横波用 EMAT をほぼ 45° 方向に位置することで, 両偏向横波の共鳴周波数を同時に測定することができる。このとき, 2 方向のスペクトルが, 測定可能であればよいので, EMAT の角度 (偏向方向) には高い精度は要求されず, EMAT の回転は手動で行った。 B の測定にはアルミニウム合金で 12 次, 軟鋼で 4 次の横波共鳴周波数を用いた。

R の測定には縦波と二つの横波の共鳴周波数が必要である。アルミニウム合金は EMAT ③で同時にこれらの共鳴周波数を測定した。軟鋼試料は縦波と横波の周波数スペクトルが重なり合うため, 同時に R の測定ができなかった。これは試料の縦波の音速が横波の約 2 倍であったため, 縦波共鳴周波数がその 2 倍の次数をもつ横波共鳴周波数とほぼ一致するからである。したがって, 軟鋼試料については, 横波共鳴周波数を EMAT ②で, 縦波共鳴周波数を EMAT ④で別々に測定し, R を求めた。 R の測定には, アルミニウム合金が 4 次の縦波と 8 次の横波共鳴周波数を, 軟鋼が 3 次の縦波と 4 次の横波共鳴周波数を用いた。測定周波数間隔はアルミニウム合金が 600 Hz, 軟鋼が 667 Hz である。アルミニウム合金について EMAT ③で測定した共鳴周波数の応力による変化を図 6 に示す。応力の増加に伴って縦波の音速と応力と垂直方向に偏向した横波の音速は増加するが, 応力方向に偏向した横波の音速は減少する。

軟鋼試料について較正結果例を図 7 と図 8 に示す。また得られた音弾性定数と初期値を表 3 に示す。表中下段の () 内の値は回帰直線の相関係数である。

軟鋼については C_A が従来知られている値 ($-0.6 \sim -0.8 \times 10^{-5}$ [1/MPa]) よりも大きくなった。シングア

図 6 単軸応力によるスペクトルの変化 (Al 2017 S)

ラウンド法では試料の板厚が薄すぎるため、その値の確認ができない。そこで、シングア라운드法でも測定可能な板厚の軟鋼試験片(SS41, 板厚 11 mm)を用いて、電磁超音波共鳴法とシングア라운드法とで単軸応力実験から C_A をそれぞれ求めた。その結果、共鳴法で $C_A = -0.73 \times 10^{-5} [1/\text{MPa}]$, シングア라운드法で $C_A = -0.74 \times 10^{-5} [1/\text{MPa}]$ となりほぼ一致し、電磁超音波共鳴法の妥当性が確認された。

初期値 (B_0 と R_0) は加工履歴を反映した試料固有の定数であり、同じ試料には同一の値を用いることができる。しかし、円孔をあけたことで初期値の値が測定位置によってばらついた。これは、円孔作製時の発熱や塑性変形の影響が大きいと考えられる。したがって、初期値は個々の測定点で無応力状態で求めた値を用いた。

4.2 平面応力分布の測定 試験片を長手方向に引張り、一定荷重に固定し、図 5 の円孔帯板の B と R を測定した。測定は、2~10 mm 間隔で EMAT を移動して行った。軟鋼試料に対しては、応力変化の大き

表 3 音弾性定数と初期値

Sample	C_A /MPa	C_R /MPa	B_0 (%)	R_0
AL 2017S	-3.69×10^{-5} (.99991)	3.93×10^{-5} (.99993)	.00945	2.0298
SS41	-1.39×10^{-5} (.99979)	2.08×10^{-5} (.99952)	2.47	1.9876

図 7 音響異方性の応力による変化 (SS41, 1.15 mm)

図 8 音速比の応力による変化 (SS41, 1.15 mm)

い y 軸に沿った応力分布の測定のみ行った。

4.2.1 y 軸に沿う分布 二つの固定荷重に対して式(3)から y 軸に沿った主応力差 $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ の分布を求めた。EMAT を直交異方性の軸に対し 45° に位置することで2方向に偏向した横波共鳴周波数を同時に測定した。アルミニウム合金に対しては EMAT ①を用い、軟鋼に対しては EMAT ②を用いた。測定結果を図 9 と図 10 に示す。いずれも円孔の両側を測定した平均値で、実線は Howland の理論値⁽⁸⁾である。 T は円孔がない場合の引張応力である。測定結果は、円孔付近で約 13 MPa, 帯板の縁の付近で約 8 MPa, それ以外の点では約 5 MPa 以内のばらつきで理論値と一致した。縁の付近では、縁からの反射波が測定に影響を及ぼすため受信波形のノイズが増大し、測定精度が落ちると考えられる。また、円孔付近では測定値が理論値よりも約 13 MPa 小さい。これは、 y 軸上では応力が円孔付近で急激に変化するのに対し、測定応力は EMAT の有効面積(表 1)内にわたる平均値を検出するためである。

4.2.2 x 軸に沿う分布 式(3)と(4)を用いて、主応力差と主応力和を測定し、各主応力の分布を求めた。 x 軸に沿う応力分布はその絶対値が y 軸に沿う分布よりも小さいため、応力による異方性が小さかった。したがって、2方向の横波の共鳴周波数は EMAT ①を用いて各方向別々に測定し、縦波の共鳴周波数は

図 9 y 軸に沿う主応力差の分布 (AL 2017 S) 図 10 y 軸に沿う主応力差の分布 (SS41)

図 11 円孔に沿う主応力差の分布
(Al 2017 S, $T=53.5$ MPa)

EMAT ③を用いて測定した。引張応力は $T=53.5$ MPa とした。これも円孔両側について測定を行った。各主応力とも 5 MPa 以内のばらつきで Howland の理論値と一致した。 y 軸上に比べると、応力の変化が小さいため、円孔付近でも誤差は小さい。

4・2・3 帯板の縁に沿う分布 帯板の縁 ($y=b$) では $\sigma_{yy}=0$ になるから、式(3)より主応力 σ_{xx} の分布を測定することになる。測定には EMAT ①を用い二つの方向に偏向した横波共鳴周波数を別々に測定した。縁から反射波の影響で受信波形のノイズが多かったが、測定結果は 8 MPa 以内のばらつきで理論値と一致した。EMAT の有効面積を考慮すると、実際の測定値は縁から約 2 mm 内側 ($y < b$) の結果と考えられる。しかし、Howland の理論から、帯板の縁では y 軸方向の応力変化がゆるやかであるため、測定値を縁の値としても大きな誤差はない。例えば、 y 軸上で縁と

図 12 円孔帯板の平面応力分布 (Al 2017 S, $T=53.5$ MPa)

縁から 2 mm 内側の点では応力にして約 10% の違いである。

4.2.4 円孔に沿う分布 図 5 に示すように直交異方性の一つの軸 (y 軸) から θ 傾いた円孔縁上では半径方向の応力成分 σ_{rr} は零であり, θ 方向の応力 $\sigma_{\theta\theta}$ のみが存在する。 $\sigma_{\theta\theta}$ は, 方向が y 軸と $(\pi/2) - \theta$ をなす方向であるから, 式 (1) で $\sigma_1 = \sigma_{\theta\theta}$, $\theta = (\pi/2) - \theta$ とすれば, B の測定値を代入することで得られる。しかし, EMAT はサイズが有限であるため, 実際には円孔より 1.5~2.0 mm 外側の点を測定することになり, 円孔付近の急激な応力変化を考慮すると, 測定点では σ_{rr} を無視できない。したがって, 式 (1) から主応力差の分布を求めた。ただし, 主応力方向は $\sigma_{rr} = 0$ のときと同じと仮定した。横波の偏向方向は応力による異方性と集合組織による異方性の合成方向である。これは横波用 EMAT を測定位置で回転し, 2 方向の横波共鳴周波数が同じ高さのピークを示す方向として決定できる (このアルミニウム合金は B_0 が小さいため, 横波はほぼ応力方向に偏向する)。半径方向に近い方向に偏向する横波の共鳴周波数を $f_R^{(1)}$ として式 (6) から B を求めた。式 (1) からは正負の二つの解が得られるが, B と同符号の解を選択した。測定は EMAT ①を使用し, 10° 間隔で 360° にわたって行った。測定結果を図 11 に示す。実線は円孔縁より 2 mm 外側の点における主応力差の絶対値の理論曲線である。絶対値を比較しているのは, 主応力差が最大せん断応力を表すため, 回転座標系ではその正負に直接意味がないからである。主応力差の理論値と測定結果の平均値は 15 MPa 以内のばらつきで一致した。円孔付近では, 縁からの反射波の影響や応力の急激な変化があり, 測定結果のばらつきが比較的大きかった。

以上の測定結果を $T = 53.5$ MPa について図 12 に

まとめる。

5. 結 論

スーパーヘテロダインによる位相干渉原理を利用することで, 音弾性応力測定に要求される高精度の共鳴周波数測定が可能となった。これを電波超音波共鳴法に応用すると, 薄板の応力評価が高精度で実現できた。アルミニウム合金については円孔を持つ帯板の応力分布が 15 MPa 以内で評価でき, とくに試料の縁以外の点では 5 MPa 以内にまで精度は向上した。軟鋼試料についても同程度の応力評価が実現できた。EMAT は非接触測定が可能であるため, 試料表面が汚れている場合や通常の探触子では測定できない高温の場合, また試料が低速で動いている場合にも適応領域は広がる。

終わりに, 電磁超音波探触子の作製にあたっては大阪大学, 山崎友裕助手の助言を受けた。また, 測定装置の開発について, ソニックス(株)および米国 Ritec Inc. の関係各位から協力を得ることができた。以上の方々に心より謝意を表する。

文 献

- (1) 村上・ほか 3 名, 機論, 58-546, A(1992), 319, 1992.
- (2) Mozurkewich, G., *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(1989), 885.
- (3) 荻・ほか 3 名, 日本機械学会材料力学講演会, No. 920-72(1992-9), 662.
- (4) Fukuoka, H., ほか 5 名, *Rev. of Prog. in QNDE*, 12(1993), 2129.
- (5) 福岡, 機論, 49-400, A(1983), 403.
- (6) Iwashimizu, Y. and Kubomura, K., *Int. J. Solids Struct.*, 9(1973), 99.
- (7) Petersen, G. L., ほか 3 名, *Rev. Sci. Inst.*, (1994), in press.
- (8) Howland, R. C. J., *Phil. Trans. Roy. Soc., A*, 229(1930), 48.