

パワーケプストラムによる音弾性複屈折法*

村上芳則^{*1}, 平尾雅彦^{*1}, 福岡秀和^{*1}
矢田高広^{*2}, 横山雅哲^{*3}

Acoustoelastic Birefringence Experiments with Power-Cepstrum Analysis

Yoshinori MURAKAMI, Masahiko HIRAO, Hidekazu FUKUOKA
Takahiro YATA and Masanori YOKOYAMA

Acoustoelastic birefringence is measured with a computerized cepstrum analysis. An ultrasonic transducer emits a broad-band shear wave pulse, polarized about 45° from the principal axes, into the stressed material. Due to the stress-induced anisotropy, it splits into a pair of shear waves polarized along the principal directions, which propagate with different velocities. The same transducer receives them together and sends the resultant signal to a microcomputer, where the signal is Fourier-transformed twice to reduce the power-cepstrum as a function of quefreny. The quefreny where the cepstrum takes the maximum peak gives the transit-time difference of the polarized shear waves. The experiment is done by uniaxially loading the specimens of aluminum alloy 7075-T 651. The results of the cepstrum analysis agree with the conventional sing-around measurements.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Acoustoelasticity, Birefringence, Cepstrum Analysis, Aluminum Alloy

1. ま え が き

弾性波の伝ば速度が材料中の応力に依存して変化する現象は、音弾性効果としては知られている。この効果を利用すれば、材料内部の残留応力を非破壊的に評価することが可能であるため、その実用化が急がれている。特に、偏向横波は偏光波の光弾性に類似した複屈折現象を示すことから、応力測定には最も多く利用されている⁽¹⁾。すなわち、一つの主応力方向に伝わり、残りの二つの主応力方向に偏向した横波の伝ば速度差はその主応力差に比例して異なる。

音弾性複屈折測定に用いられている「音速差測定法」の一つに位相干渉法がある⁽²⁾。この方法による測定では、主応力方向からほぼ45°方向に偏向した狭帯域の超音波横波を被測定板材中に入射する。応力によって発生した異方性が存在するため、この横波は二つの主応力方向に分極して、それぞれ異なる速度で伝ばし、材料内で反射を繰返す。受信振動子は二つの分極波を再合成して受信する。このとき、分極波の位相差が π 、

すなわち、合成波の振幅が極小となる反射波の到達時間を時間軸上で求めることにより、音速差を決定する。最近では、広帯域パルスの受信合成波をスペクトル解析し、パワースペクトルが極小になる周波数成分を求め、音速差を測定するスペクトル解析法も試みられている^{(3)~(5)}。

しかし、これらの方法では原理的に音弾性複屈折測定の適用範囲が限定され、また伝ば時間差が小さいために分極波信号が重なった場合やノイズが大きい場合には、測定が不可能となる問題点がある。さらに、コンピュータを用いた測定の自動化も困難である。

本研究では、これらの問題点を克服する試みとして、スペクトル解析法をさらに発展させたパワーケプストラム法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を音弾性複屈折測定に適用し、その有効性と問題点を検討した。ケプストラム法によれば、分極波の伝ば時間差が小さい場合やノイズが多い場合にも複屈折の測定が可能となる。振動子を回転することなく二つの偏向横波の伝ば時間差を1回の測定で求めることができるため、シングアラウンド法などの「音速測定法」で問題となる振動子と試料の接触状態の変化による誤差などを排除できる。さらに、第一反射波のみから複屈折量を測れることから、厚肉、あるいは減衰の大きい材料でも応力測定ができるものと期待され

* 昭和63年11月25日 関西支部第248回講演会において講演、原稿受付 昭和63年5月23日。

*1 正員、大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-1)。

*2 大阪大学大学院。

*3 三菱電機(株) (〒617 長岡京市馬場岡所1)。

る。

ここでは、パワーケプストラム法によって複屈折音弾性測定が可能であることを確認するため、アルミニウム合金 7075-T 651 を用いて基礎的な単軸負荷実験を行った。その結果はシングアラウンド法から求めた組織音響異方性と音弾性定数の値と比較した。

2. 音弾性法則

非線形弾性論より導かれる音弾性法則によれば、等方性弾性体の弾性変形場において、主応力方向に偏向した横波の相対速度差は主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) に比例する⁽⁸⁾。

$$\Delta V_T / V_{T0} \equiv (V_{T1} - V_{T2}) / V_{T0} = C_A (\sigma_1 - \sigma_2) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V_{T1} , V_{T2} は、主応力方向に偏向した二つの横波の伝ば速度、 $V_{T0} (= \sqrt{\mu/\rho})$; μ は剛性率、 ρ は密度) は、無応力状態における横波の伝ば速度である。音弾性定数 C_A は 3 次の弾性定数 ν_3 を用いて、 $C_A = (1 + \nu_3/\mu)/2\mu$ と書ける。 C_A の値は鉄鋼で $-0.7 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ 、アルミニウムでは $-4.0 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ のように微小(いずれも概略値)であるために、高い測定精度が要求される。

金属材料には一般に製造中の塑性加工や熱処理に起因して集合組織が存在するため、無応力状態でも $V_{T1} \neq V_{T2}$ となり、音響的な異方性を示す⁽⁹⁾。この異方性の大きさは音弾性効果と同程度、あるいは、それ以上であるため無視できない。これを考慮すると、式(1)は $\Delta V_T / V_{T0} = \alpha + C_A (\sigma_1 - \sigma_2) \dots\dots\dots (2)$ と修正される⁽¹⁰⁾。ここで、 α は組織音響異方性と呼ばれる。 $C_A (\sigma_1 - \sigma_2)$ は応力音響異方性で、音響異方性 $\Delta V_T / V_{T0}$ は両者の和として測定される。

二つの偏向横波の伝ば経路は同じであるので、 σ_1 , σ_2 方向に偏向した横波の伝ば時間 T_{T1} , T_{T2} と平均伝ば時間 T_T を用いて、式(2)の左辺は

$$(V_{T1} - V_{T2}) / V_{T0} = (T_{T2} - T_{T1}) / T_T \dots\dots\dots (3)$$

のように近似できる。このように複屈折音弾性法では伝ば時間の測定値から直接主応力差が得られる。さらに、 L を無応力時の伝ば距離とすると、上式において T_T は、 $T_0 = L / V_{T0}$ で置き換えることができる。以上の近似による誤差は 2 次の微小量であるので無視できる。ゆえに、パワーケプストラム法で測定される横波の伝ば時間差は、次式により主応力差に関係付けられる。

$$(T_{T2} - T_{T1}) / T_0 = \alpha + C_A (\sigma_1 - \sigma_2) \dots\dots\dots (4)$$

3. ケプストラム法

未知の波束が時間的に多数重なり合った信号から、個々の波束を分離する信号処理方法としてケプストラム (Cepstrum) 法がある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この方法の応用は、地震波の解析に始まり、現在では音声波、レーダ波、脳波などの解析に幅広く用いられている。

ケプストラムには、波束間の遅れ時間と振幅比が得られるパワーケプストラムと個々の波束を分離して再生できる複素ケプストラムがある。これらの独立変数はケフレンシ (Quefrensy) と呼ばれ、時間の単位を持つ。ここでは、“パワースペクトルの対数のスペクトル”として定義されているパワーケプストラムを用いる。

ある時系列信号 $s(t)$ と時間 τ だけ遅れた信号 $as(t - \tau)$ が重なり合った合成波 $x(t)$ を考える。

$$x(t) = s(t) + as(t - \tau) \dots\dots\dots (5)$$

$s(t)$ のパワースペクトルを $F_s(\omega)$ とすれば、 $x(t)$ のパワースペクトル $F_x(\omega)$ は

$$F_x(\omega) = F_s(\omega) (1 + a^2 + 2a \cos \omega\tau) \dots\dots\dots (6)$$

この対数をとれば、

$$\log F_x(\omega) = \log F_s(\omega) + \log(1 + a^2 + 2a \cos \omega\tau) \dots\dots\dots (7)$$

式(7)の右辺第 1 項は別途求めておいた参照信号のパワースペクトルを用いて消去する。次に、第 2 項は振幅比 a が $|a| < 1$ であるならば、

$$-2 \sum_{m=1}^{\infty} [(-a)^m / m] \cos m\omega\tau \dots\dots\dots (8)$$

で表すことができる。そこで、式(8)のフーリエ変換で与えられるパワーケプストラム $C_x(t)$ は、ケフレンシ $t = m\tau$ において各々高さ $2a^m / m$ のピークを持つ。最大のピークは $t = \tau$ に出現し、そのケフレンシが求める遅れ時間 τ を与えることがわかる。

同じ目的で用いられる信号処理方法として、“パワースペクトルの逆フーリエ変換”で定義される自己相関関数がよく知られている。しかし、自己相関関数を用いる方法には、結果が個々の波束の周波数成分の差に大きく影響されるという欠点がある。これに対し、パワーケプストラム法では上記のように合成信号のスペクトルの対数値を取るにより、個々の波束のスペクトル成分の差が鈍化され、自己相関関数を用いても検出できない場合でさえ、解析が可能である⁽⁷⁾。

4. 実験装置と方法

圧縮および引張試験片の寸法を図1に示す。これらは板厚 25 mm のアルミニウム合金 (7075-T 651) 圧延板から応力軸が圧延方向と平行になるように切り出したものである。供試材の降伏応力は約 470 MPa, ヤング率は約 73.0 GPa であった。

ケプストラム音弾性実験装置のブロック線図を図2に示す。横波用圧電振動子 (PANAMETRICS 社製, V 221, 素子直径 6.4 mm, 共振周波数 10 MHz) を振動方向が試験片の主応力軸に対してほぼ 45° 方向に圧着させ, 送受信子として使用した。パルサ/レシーバ (超音波工業, UVM-2) より発生した広帯域のパルスは振動子を励振し, 被測定材中に横波が入射される。材料中を伝ばし, 反射を繰返した横波は振動子で再び電気信号に変換される。受信された一連の多重反射信号のうち一組の偏向横波からなる反射信号をゲート回路によって選択し, 一定振幅に増幅した後, A-D 変換器 (エヌエフ, BX-531) に入力した。ここで, 信号を一定のサンプリングタイム (2/1 022 μ s) でデジタル化した後, 128 回のアンサンブル平均により SN 比の向上を図った。この波形データ (1 024 点) をパーソナルコンピュータに転送した。

転送された波形データを自作のパワーケプストラム解析プログラムで処理した。解析手順のフローチャートを図3に示す。波形データに, まず前処理 (DC 成分の除去と 4 096 点へのデータ長拡張) を施した後, FFT プログラム⁽⁵⁾によりパワースペクトルを算出する。次に, その対数值 (対数スペクトル) と参照波形の対数スペクトルの差を求める。このとき, ナイキスト周波数は 255.50 MHz であるが, 送受信子の周波数特

性を考慮し, 参照波形の対数スペクトル分布が最大値からなだらかに減衰している範囲を有効周波数帯域と考え, 本実験では 2.2~17.4 MHz の値をパワーケプストラムの計算に用いた。2 回目の前処理により 1 024 点に拡張した周波数系列を時系列とみなし, FFT 演算を再度実行することによりパワーケプストラムを求めた。このパワーケプストラムが最大となるケフレンシの値が複屈折した二つの横波の伝ば時間差である。

以上の操作を試験片に負荷する荷重を段階的に変え, 第一反射波と第二反射波について行った。測定結果より応力-音響異方性の回帰直線を求め, その無応力状態での音響異方性から α を, また傾きから C_A の値を求めた。

5. 実験結果と検討

5.1 波形, 対数スペクトル, パワーケプストラムの出力結果 各荷重において得られた第一, 第二反射波の波形およびその対数スペクトルとパワーケプストラムの例を, 第一反射波の場合を図4(a)~(e)に, 第二反射波の場合を図5(a)~(e)に示す。両図において, (c)は伝ば時間差が測定できなかった場合, (d)は測定可能最小伝ば時間差の場合を示す。図中において, 対数スペクトルは参照波形の対数スペクトルとの差を示している。また, パワーケプストラムは, 最大値が1となるように規格化して表示されている。なお, 信号のサンプリングタイム (2/1 022 μ s) および前処理によって, 対数スペクトルの周波数間隔は 0.12 MHz, パワーケプストラムのケフレンシ間隔は, 7.89 ns である。各パワーケプストラムの図の上には, 放物線近似 (三点近似) により求めたパワーケプストラムのピークに対応するケフレンシの値, すなわち伝ば時間差が記されている。

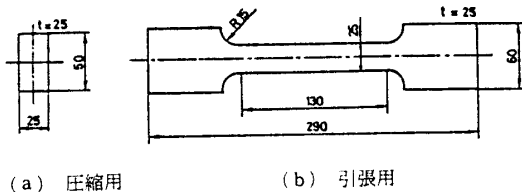


図1 試験片の形状

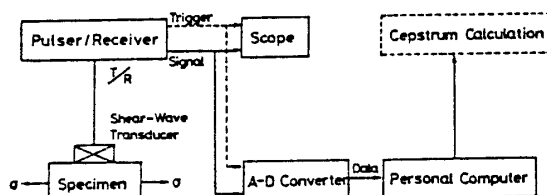


図2 実験装置のブロック線図

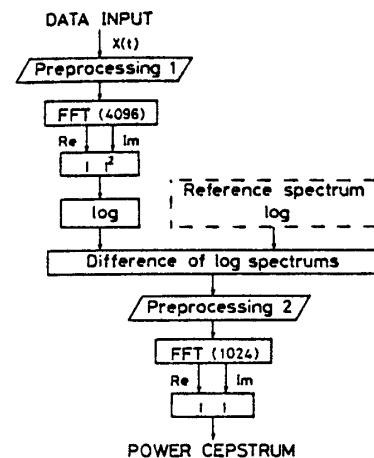


図3 パワーケプストラム解析のフローチャート

5.2 α と C_A 第一反射波の解析から求めた応力による音響異方性の変化を図6に、第二反射波によるそれらを図7に示す。また、表1にはパワーケプストラム法とシングア라운드法⁽¹¹⁾から求めた組織音響異方性 α と音弾性定数 C_A を比較して示す。

5.3 検討 表1に示した α と C_A をシングア라운드法で求めたそれらと比較すると、ほぼ一致していることがわかる。また、図6、7において圧縮応力に対する音響異方性の変化を見ると、線形性が良く、良好な結果が得られているが、第一反射波(図9)の結果

より第二反射波(図7)の方がばらつきが少ない。これは、第二反射波の場合には伝ば時間差が大きく、有効周波数帯域内のスペクトル変動が短周期となるので、パワーケプストラムのピークが相対的に大きくなり、精度が向上するためである。

図6、7において、第一反射波(図6)については157.0 MPa (10 t) から219.7 MPa (14 t)、第二反射波(図7)については172.7 MPa (11 t) と188.4 MPa (12 t) の引張応力に対する音響異方性が示されていない。これは、これらの応力範囲における音響異方性の変化

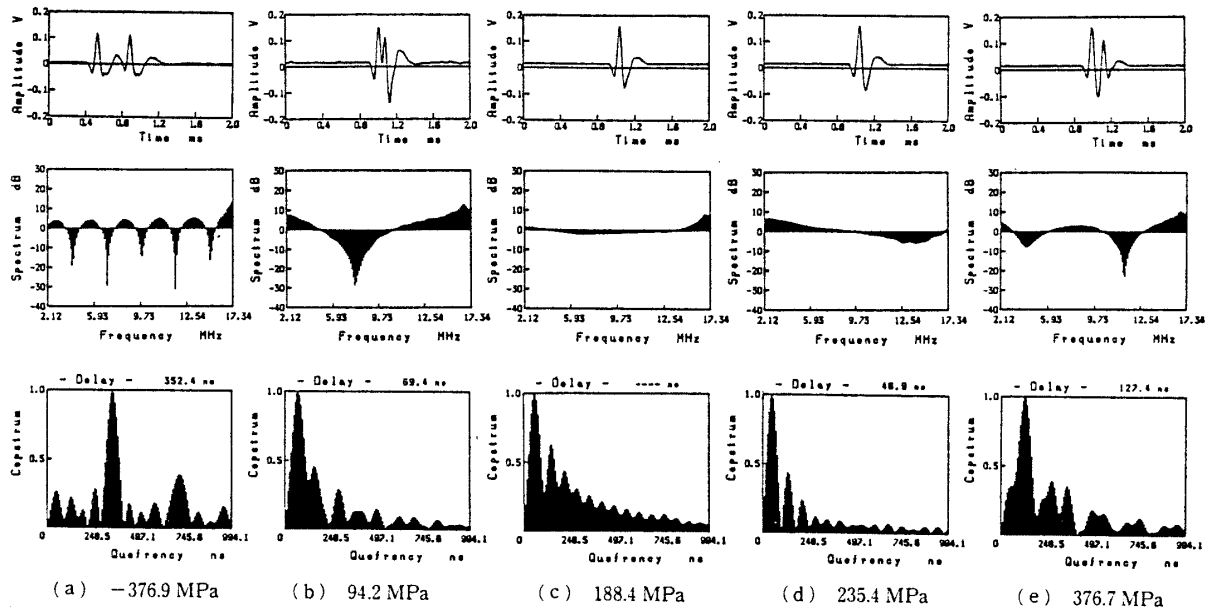


図4 各荷重に対する第一反射波の波形, 対数スペクトル, パワーケプストラム

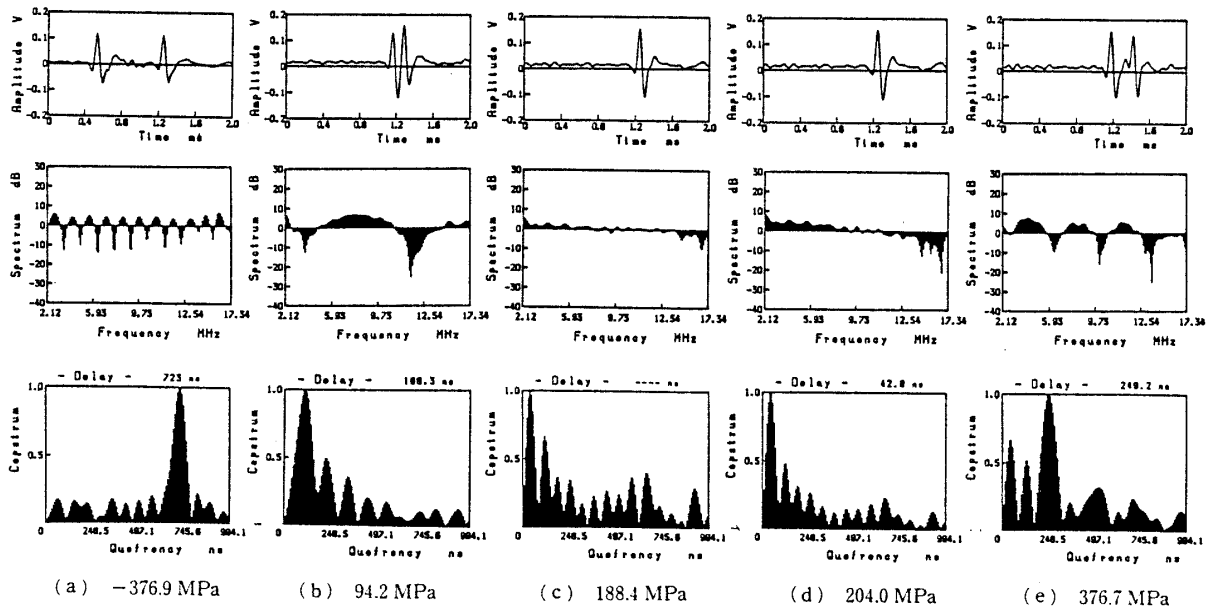


図5 各荷重に対する第二反射波の波形, 対数スペクトル, パワーケプストラム

が他の応力範囲のそれと大きく異なったためである。これらの荷重における波形を示した図4および図5の(c)をみると、伝ば時間差が非常に小さいために、パワーケプストラムの算出に用いた対数スペクトルの有効周波数帯域内に時間差に対応する周期が入りきれないことや、その結果としてパワーケプストラムのピーク値が相対的に小さくなり、ノイズの影響を受けやすくなるため、伝ば時間差を正しく測定できなかったことがわかる。

しかしながら、この前後の荷重での波形、例えば図4および図5の(d)では、二つの横波信号が重なって一つに見えているが、このときでも伝ば時間差を精度よく求めることができた。なお、解析可能な最小伝ば時間差は、主に用いる送受信用振動子の周波数特性と解析する信号のSN比によって定まるが、本実験の場合では測定限度は約40 nsであった。

次に、パワーケプストラム法の精度について考える。この方法では、前章において述べたように波形データのアンサンブル平均、2回の前処理とFFT、その間にはパワースペクトルの対数を取ることも含まれ

る。このため、これら一連の処理がなされた結果の精度について言及することは困難である。そこで、応力-音響異方性の回帰直線における音響異方性の最大のばらつきを C_A で割った値について見ると、図6、7に示した圧縮試験の第一、第二反射波に対してはそれぞれ0.074%、0.044%、引張試験では0.088%、0.078%である。この中で最大の0.088%を応力に換算すると、約20 MPaに相当する。

6. 結 言

本研究では、音弾性応力解析に必要な高精度の音速差測定に、パワーケプストラム法の利用を試みた。アルミニウム合金(7075-T 651)に対して、単軸負荷(圧縮、引張)実験を行い、パワーケプストラム法とシングア라운드法から求めた α と C_A を比較した。

得られた結果をまとめると、次のようである。

(1) パワーケプストラム法とシングア라운드法により求めた α と C_A の値はほぼ一致した。

(2) 速度差が小さく、二つの偏向横波が重なった場合でも伝ば時間差を正確に求めることができた。ただし、本実験では、伝ば時間差が約40 ns以下になると、パワーケプストラム法でも測定不可能であった。

(3) 応力-音響異方性の回帰直線からの最大のばらつきは、応力換算値で約20 MPaであった。この値は測定系すべての誤差を含んでおり、パワーケプストラム法自体の精度はさらに良いものと考えられる。

以上のように、パワーケプストラム法を高い精度で要求される音弾性複屈折測定に用いることは可能であり、現状の測定法が持ついくつかの問題点を解決することができる。なお、この方法の使用にあたっては、ほかの「音速差測定法」と同じく、伝ば時間差の正負が判定できないという問題点があることに注意すべきである。

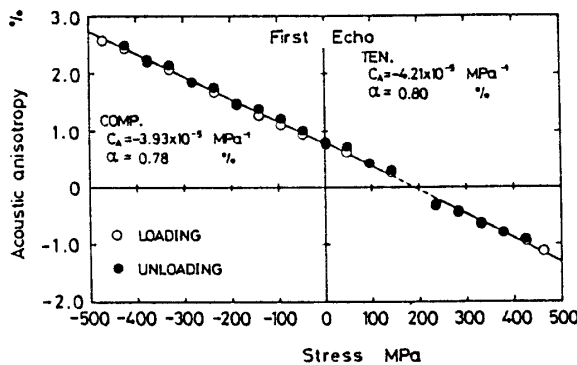


図6 単軸圧縮、引張実験による音響異方性の変化 (第一反射波)

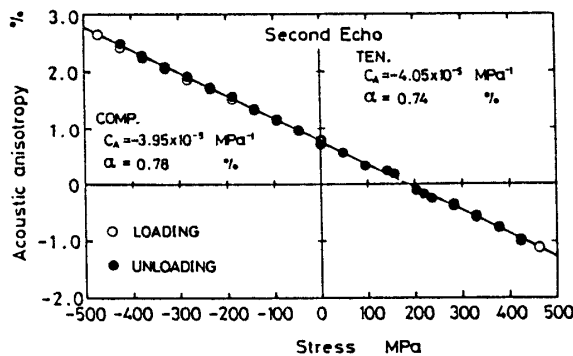


図7 単軸圧縮、引張実験による音響異方性の変化 (第二反射波)

表1 パワーケプストラム法とシングア라운드法から求めた α と C_A の比較

	Texture-induced anisotropy α (X) Ave.	Acoustoelastic constant C_A ($\times 10^{-5}/\text{MPa}$) Ave.
Compression test (First echo)	0.78	-3.93
Compression test (Second echo)	0.78	-3.95
Compression test - Sing around -	0.77	-3.97
Tension test (First echo)	0.80	-4.21
Tension test (Second echo)	0.74	-4.05
Tension test - Sing around -	0.75	-4.14

文 献

(1) 福岡, 機論, 49-440 (昭58), 403.
 (2) Okada, K., *J. Acoust. Soc. Jpn.* (E), 1-3 (1980), 193.
 (3) Blinka, J. and Sachse, W., *Exp. Mech.*, 16-12 (1976), 448.
 (4) 小瀬・岩清水, 機講論, No. 854-1 (昭60), 59.
 (5) 谷口・岩清水, 文献(4)の62ページ.
 (6) 日野, スペクトル解析, (昭52), 朝倉書店.

(7) Kemerait, R. and Childers, D., *IEEE Trans. Information Theory*, 18-6 (1972), 745.
 (8) 徳岡・岩清水, 機械の研究, 27 (昭50), 860.
 (9) Hirao, M., ほか2名, *J. Acoust. Soc. Am.*, 81-5 (1987), 1434.
 (10) Iwashimizu, Y. and Kubomura, K., *Int. J. Solids Struct.*, 9 (1973), 99.
 (11) 翁冠群 (Cornell Univ.), 私信 (1987).

討 論

〔質問〕 伊 達 和 博〔宮城工業高等専門学校〕

音弾性応力解析にパワーケプストラム法を利用したもので、興味ある論文であると思う。以下の点について、お教えいただきたい。

(1) 使用している振動子は 10 MHz で、波形から判断すると広帯域形のもののように思われるが、このような方法を行う場合、用いる振動子は広帯域形のほうがよいと考えられるか、また、5 MHz や 2 MHz での利用で精度はどのように変わると思われるか。

(2) 波形データ処理の際、前処理として 1024 点のデータを 4096 点へデータ長の拡張を行っているが、どのような処理法で拡張しているのか、お教えいただきたい。また、拡張法により測定精度に変化は生じるものか。

〔回答〕 (1) パワーケプストラムを用いた測定では、波束間の解析可能な最小遅れ時間は、波形データに含まれる周波数成分が広帯域であるほど小さくなる。原理的にはパワーケプストラムの算出に用いた対数スペクトルの有効周波数帯域幅が半波長となるケフレンシが解析可能な最小遅れ時間である。本測定では 10 MHz の広帯域形の振動子を用いたが、振幅の十分な有効周波数帯域幅は 15.2 MHz (2.2~17.4 MHz) であったので、解析可能な最小伝ば時間差は、上記の原理からは $32.9 \text{ ns} [(2 \times 15.2 \text{ MHz})^{-1}]$ となる。

(2) 前処理における信号データ長の拡張にあたっては、1024 点のデータから直流成分を除去した後、1025 点~4096 点まで零データを付加した。1024 点から 4096 点へのデータ長の拡張により対数スペクトルの周波数間隔は 1/4 となる。この周波数間隔の細密化はパワーケプストラム上では解析可能な上限ケフレンシの上昇となる。また、パワーケプストラムを求める前にも、対数スペクトルデータ長の拡張を行い、ケフレンシ間隔を細密化し、伝ば時間差測定の分解能を向上させた。ただし、このデータ長の拡張によって、解析可能な最小ケフレンシ (伝ば時間差) が向上するもの

ではない。

〔質問〕 岡 田 健 一〔徳島大学工業短期大学部〕

一つの反射波のみで複屈折量を精密に測定する方法を提案されている興味深い研究と思う。以下のことをお教えいただければ幸いである。

(1) 式(7)の右辺第1項は参照信号のパワースペクトルを用いて消去することであるが、実験条件の変化の影響はあまりないものか。

(2) 図4(c)、図5(c)から見れば伝ば時間差が測定できるように思えるが、なぜできないのか。

(3) 第二反射波による結果が第一反射波による結果よりもばらつきが少ない結果が出ているが、これは偶然かあるいは意味のあることか。

(4) 振動子の接着状況は測定に影響ないか。

〔回答〕 (1) 本研究では参照波のパワースペクトルとして無応力状態における波形データのそれを用いた。式(7)の右辺第1項 $\log F_s(w)$ の消去に用いる対数スペクトルは分布形状が相似であれば、大きさは異なっても全く問題はない。分布形状が相似でない場合には、その度合により誤差が大きくなり、伝ば時間差が微小な場合ほどその影響は大となる。

(2) パワーケプストラムを用いた測定では、波束間の解析可能な最小遅れ時間は、原理的に算出に用いた対数スペクトルの有効周波数帯域幅 (本研究では 2.2~17.4 MHz) が半波長となるケフレンシ (本研究では 32.9 ns) である。図4と図5(c)の場合は、解析可能な最小伝ば時間差以下の場合であり、これらの図のパワーケプストラムは対数スペクトル上で半波長に満たないケフレンシの成分と式(7)という右辺第1項の残余分によって現れたもので、同図の表示において規格化したために大きく見えるが、実際には非常に小さい値をとる。

(3) 第二反射波のほうが二つの偏向横波の伝ば時間差が大きいために、伝ば時間差を示すパワーケプストラムが相対的に大きく現れることによる〔図4, 5

の(a)参照]。

(4) パワーケプストラムを用いた音弾性複屈折測定では、分極波の伝ば時間差が小さい場合やノイズが多い場合にも複屈折の測定が可能であるばかりでなく、振動子を回転することなく二つの偏向横波の伝ば時間差が測定できるので、この面では振動子の接着状況は測定に影響がない。ただし、回答(1)にも関連するが、式(7)の右辺第1項を消去するためのパワース

ベクトルとして何を用い、またどのような状況で取得するかによって振動子の接着状況が問題となるであろう。しかし、これも対数をとった後のパワースペクトル分布の形状の差が問題となるのであり、スペクトル形状の差は対数をとることによって鈍化されている。この点も音弾性複屈折測定にパワーケプストラムを用いた場合の長所の一つである。