

超音波による応力測定について

On the Measurement of Applied and Residual Stresses in Materials Using Ultrasonic Waves

李 孝雄*・鳥飼安生*

Hyounng LEE and Yasuo TORIKAI

最近超音波横波を用いて光弾性法における応力測定と全く類似の原理による応力測定が注目されており、この方法を *acoustoelasticity*, *sonoelasticity* と呼んでいる。この方法は音波が伝播するような媒質ならば金属、非金属に限らず適用することができ、被測定物の応力を直接測定することが可能である。しかし、いまだ研究の緒についた段階であり、応力を測定する確実な方法が確立されていない。この分野における測定方法、問題点、これからの見通しについて解説を行なった。

1. はじめに

超音波により応力を測定する試みはここ数年來行なわれるようになり、超音波横波による光弾性法とまったく類似の原理を用いて応力を測定する方法を Benson¹⁾らは音響学と弾性学を結びつけるものとして *acoustoelasticity*, Elicon²⁾は *sonoelasticity* と名づけている。

応力を測定する方法としてはストレングージ、X線、光弾性などいくつかの方法があり、それぞれ長所欠点をもっている。特に残留応力を定量的に測定するには試料のひずみを開放して試料の寸法変化から求める方法が行なわれており、ひずみの開放による寸法変化はストレングージなどによって測定することができる。非破壊的な方法としてはX線回折による方法が広く用いられているが、試料表面下100分の数 mm 程度のごく限られた層内の残留応力を測定するにとどまり、焼きを入れた鋼、冷間圧延した金属では回折像がぼけて測定精度が落ちるのが難点である。

超音波による応力測定はつまるところ応力と音速の関係を明らかにすることであり、このための方式としてはいくつかの方法が考えられている。超音波による方法は被測定物の応力を直接測定することができ、また残留応力を測定する可能性も秘めている。しかし、この方法は用いられてから日が浅く、実用化に当たっては解決されなければならない問題がいくつかある。以下これまでにえられた成果と問題点などについて明らかにする。

2. 応力による音速変化の測定

(1) 音響複屈折法

光弾性法においては、応力によって試料中に生じた光学的異方性を偏光光学系を用いて観測し、応力の分布を求めるのであるが、光の横波の代りに超音波横波を用いると、光弾性法とまったく同じ原理で音響的な応力測定が可能になる。この方法には2とおりの方式が用いられており、1つは光弾性法の偏光子、検光子に相当する送波および受波用の超音波横波振動子をそれぞれ別個に用いる方式であり、他の1つは送波および受波振動子を1

個の振動子で行なう方式である。これら2方式は超音波探傷法における透過法と反射法に相当するものである。

応力を測定する原理としては2方式でならんら変わりは無いが、振動子を2個および1個使用することにより、長

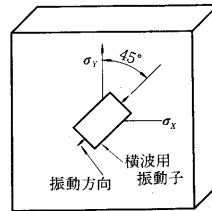


図1 平面応力が存在する試料と振動子の配置の関係

所、短所が生じる。

i) 原理

音響的に等質な平板試料内に平面応力が存在する場合に、互に直角な主応力 σ_x , σ_y (図1)の方向に振動方向をもち、厚み方向に伝播する横波の音速 V_x , V_y が異なる場合には音響的な複屈折を起こす。主応力と45°方向に横波用の振動子を密着して超音波パルスを試料内に入射すると、入射された横波は主応力方向に振動する2つの成分に分かれて試料内を伝播する。この2成分の横波の音速 V_x , V_y は異なるため、試料中を伝播する間に位相差が増大して行き、その結果として横波の粒子振動のモードは図2のように変化する。

透過法の場合には図4に示すように、送波用の振動子から入射された超音波パルスは試料を通過して受波用の振動子で電氣的パルスに変換され、その出力をブラウン管に表示するのであるが、この場合受波用振動子は送波用振動子と同一のものを用い、その振動方向も送波用の振動子と同じく主応力と45°に向けて試料に相対して密着する。受波用振動子に到達する横波のモードは主応力差により変化し、2成分の横波の位相差 δ が0のときには粒子振動は受波用の振動子の方向と一致するために受波振幅は最大となるが、 δ が $\pi/2$ のときには受波振幅は $\delta=0$ の0.71倍になり、この場合には試料を伝播して受波されるまでの間に横波の振動方向が見かけ上45°回転したものとみることでもできる ($\cos 45^\circ=0.707$)。 δ が $3/4\pi$ のときには見かけ上の回転角は67.5°となり、受波振幅は0.38倍となる。したがって透過法による応力測定では応力による受波振幅の変化を測定することになる。しかし、振動子を試料に密着するさいに用いる接着層の厚

* 東京大学生産技術研究所 第1部

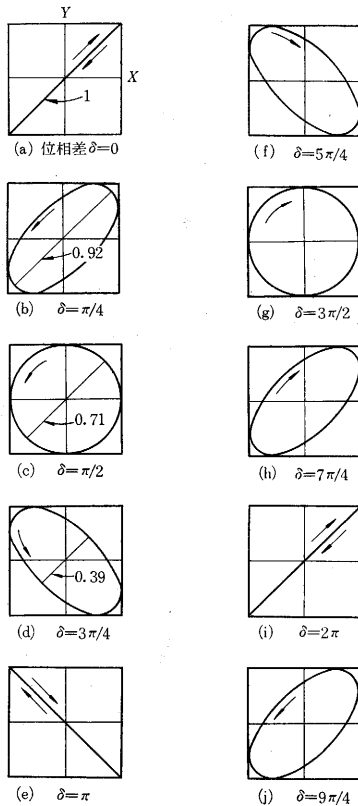


図2 振動方向がたがい直角な横波の合成による粒子振動
(2つの横波は周波数と振幅は等しいが位相が異なる場合)

さが受波振幅に影響を与えるので測定にあいだ接着層の厚さを一定に保つ必要がある。また振動子を2個必要とし、試料をはさんで相対するように振動子を密着するなどの不便もある。この方法の感度としては横波の周波数と音波が伝播する距離に依存することは明らかであり、比較的厚い試料の測定に適している。

一方、反射法の場合には送波および受波兼用の振動子1個を用いるのであるが、その振動方向は図1の場合とまったく同様であり、試料に入射された超音波パルスは主応力方向に振動方向をもつ2成分に分かれて試料内で多重反射する。多重反射を繰返す間に横波の粒子振動のモードが変化するのは透過法の場合とまったく同様である。このようなモードをもつ多重反射波を振動子で受波し、その出力を増幅、検波してブラウン管上に表示すると、図3(a)のように振幅にmin.をもったパルス図形がえられる。図2から明らかなように位相差が π またはその奇数倍されると粒子振動の方向は振動子の振動方向と直角になる。振動子は振動方向に直角なモードをもつ横波には感じないので電気的な出力は0になる。図3(a)のmin.は2成分の横波の位相差が丁度 $\pi, 3\pi$ となるような伝播時間にあたるわけである。振動子の振動

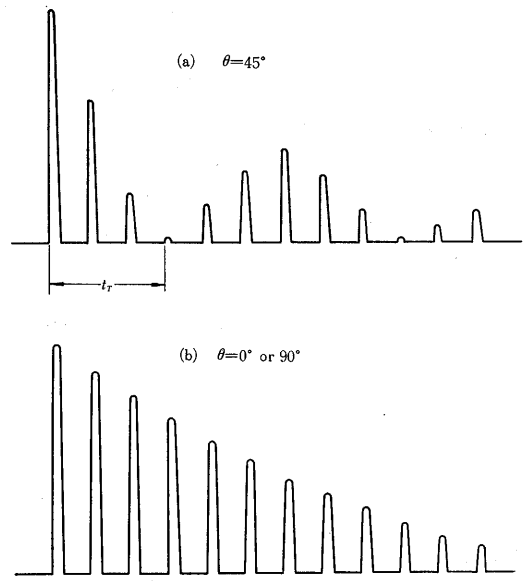


図3 応力により複屈折を生じている試料における横波の振動方向とパルス図形

方向を主応力方向に向けると複屈折性の影響を受けないので図3(b)に示すような減衰波形となる。

単結晶の適当な方向に超音波横波のパルスを伝播させると図3(a)と同様なmin.をもった複屈折によるパルス図形がえられ、主軸の方向に振動方向をもつ横波の音速の変化分 $\Delta V/V$ はパルス図形の最初のmin.までの時間から計算することができることをWatermanとTeutonico³⁾は次のような式を導いて論議を行なっている。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{2ft_r} \tag{1}$$

ここに f は横波の周波数、 t_r は $\delta=\pi$ となる最初のmin.までの時間である。Watermanらはパルス図形に現われる最初のmin.は必ずしも $\delta=\pi$ を満足する場合に限らないことを指摘しているが、周波数を変えることにより t_r を求めることができることを明らかにしている。この結果を応力による複屈折の場合に適用するために $\Delta V/V$ を次のように定義する。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_x - V_y}{\bar{V}} \tag{2}$$

ここに V_x, V_y は主応力方向に振動方向をもつ横波の音速であり、 \bar{V} は V_x と V_y の平均値である。

反射法による応力測定では応力による $\Delta V/V$ の変化を測定することになるが、 $\Delta V/V$ は t_r を測定することにより求めることができる。反射法の場合には透過法と違って振動子と試料間の接着層の厚さによる振幅の変化はほとんど問題にならない。試料が厚くなるとパルス図形のパルス間隔が広がりブラウン管上での t_r の測定精度は落ちるが、比較的薄い試料ではパルス間隔が縮まり、 t_r の測定精度はよくなる。この方法による測定では、

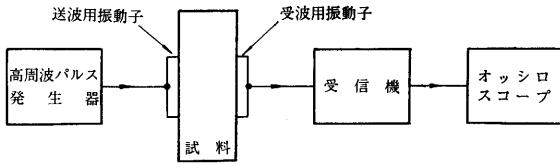


図4 透過法による測定の実験図

$\Delta V/V$ を 10^{-5} 程度まで測定することが可能である。

ii) 測定装置

透過法で測定を行なうための原理図を図4に示す。超音波パルスを生じさせるための高周波パルス発生器、受波した電気出力を増幅する受信機、その出力を指示するオシロスコープがあればよく、普通に用いられている超音波探傷器により測定を行なうことができる。反射法で行なう場合の原理図は図5に示す。装置としては透過法と変わらないが、反射法ではパルス図形の min. までの時間を測定する必要があるので時間軸が $0.1\mu s$ 程度まで測定可能な指示器があれば都合がよい。この他に実験に必要なものとしては圧縮、引張り荷重が行なえる試験機があればよい。横波用の振動子としては水晶の Y-cut, AC-cut または圧電セラミック PZT(横波用) が普通用いられている。振動子と試料の接着にはサロール(m. p. $42^{\circ}C$)、またはエポキシ系樹脂接着剤の主剤のみ(硬化剤は使用しない)を用いる方法が普通行なわれている。エポキシ系樹脂は試料の表面からの振動子の着脱が簡単に行なえるので便利であるが、挿入損失はサロールにくらべて大きくなる。しかし、エポキシ系樹脂を用いてパルスの振幅が不足して問題になることは割合に少ない。

測定にあたって注意を要するのは、実験条件によっては複屈折によらないでも図3(a)のような min. をもった干渉図形がえられることがあることで、次のような点に注意する必要がある。すなわち (a) 超音波ビームの拡散と指向性、(b) 試料の側面による反射、(c) 試料の平行度、(d) 回折の効果、(e) 装置の追込現象などである⁴⁾。

iii) 測定結果

透過法を用いたアルミニウムの圧縮試験による測定を Benson と Raelson¹⁾ が行っており、最近では Day と Brewer⁵⁾ によるアルミニウム合金、軟鋼の圧縮試験による測定がある。Day らの研究によると試料の厚さを 7/8 インチから 1/8 インチずつ $1\frac{3}{4}$ インチまで種々変えた場合、受波振幅が荷重とともに減少しないで逆に増大するものも観測されている。この現象は荷重 0 の状態でも試料には応力によらない音響的な異方性が存在することを示しており、この現象は Benson らによっても観測されている。Day らによる測定結果を図6に示す。応力の小さい側で受波出力が若干上昇しているのは試料の音響的な異方性によるためである。光弾性における stress-optical 定数に相当する stress-acoustical 定数を求めると、

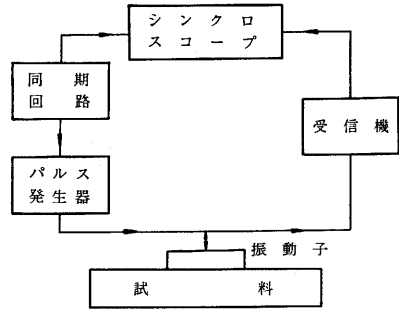


図5 反射法による測定の実験図

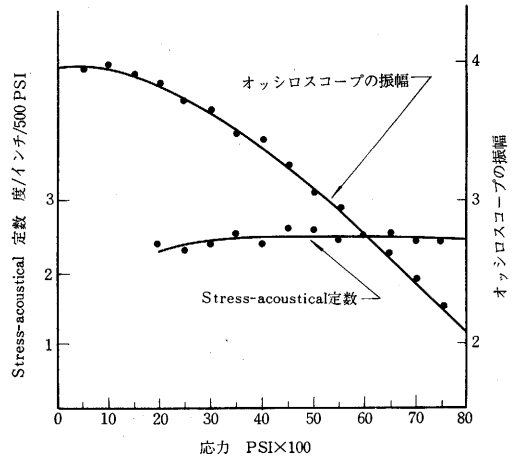


図6 アルミニウムの応力による受波振幅の変化⁵⁾

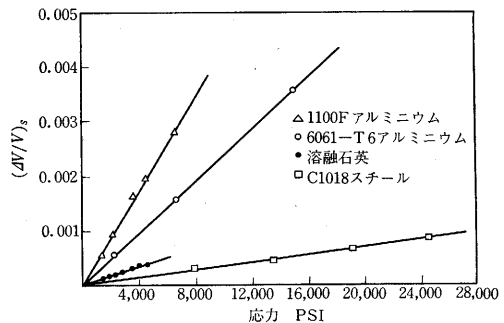


図7 各種媒質の応力による $(\Delta V/V)_s$ の変化⁶⁾

$2.4/in/500$ PSI となる。つまり音波が伝播する距離が1インチのとき、単軸な応力 500 PSI により横波がみかけ上 2.4° 回転することを意味している。しかし、試料の厚さを種々変えた場合に stress-acoustical 定数は一定にならない結果をえている。反射法を用いた圧縮試験による一連の測定は Rollins⁶⁾ が行っており、アルミニウム、軟鋼、熔融石英による測定結果を図7に示す。縦軸の $(\Delta V/V)_s$ は次のようなものである。ここに $(\Delta V/V)_T$

$$(\Delta V/V)_s = |(\Delta V/V)_T - (\Delta V/V)_0| \quad (3)$$

は応力を加えた場合の全体としての $\Delta V/V$ を表わし、 $(\Delta V/V)_0$ は応力 0 の場合、つまり応力によらない異方

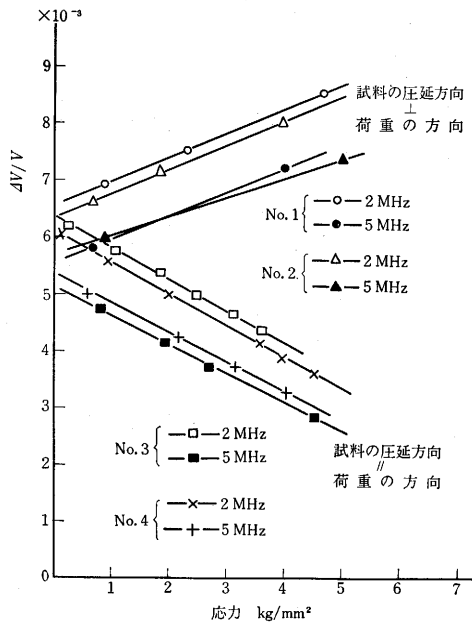


図 8 (a) アルミニウムの応力による $\Delta V/V$ の変化

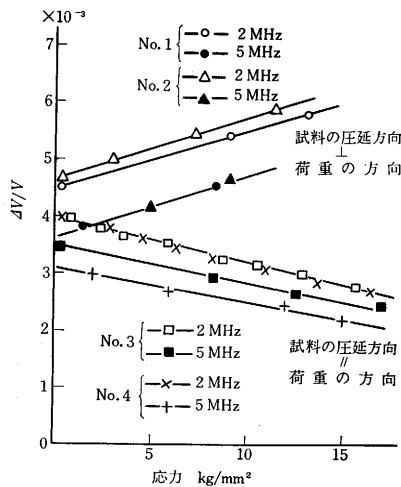


図 8 (b) 軟鋼の応力による $\Delta V/V$ の変化⁷⁾

性 $\Delta V/V$ を表わしている。したがって $(\Delta V/V)_s$ は応力のみによる $\Delta V/V$ を表わす。引張り試験による測定はわれわれ⁷⁾が行っており、平行部の長さ 66 mm、幅 25 mm のアルミニウム、軟鋼試料による結果を図 8 (a), (b) に示す。図中応力 0 における $\Delta V/V$ の値は $(\Delta V/V)_0$ に相当する。図 7, 8 は応力とともに $\Delta V/V$ の変化が弾性限内では直線的に変化することを示しており、塑性域に入ると $\Delta V/V$ はほとんど変化しない結果をえている。図 7 はアルミニウムの種類により勾配 (stress-acoustical 定数) が異なることを示しており、試料の成分、履歴の影響を示している。また図 7, 8 はアルミニウムの方が軟鋼よりも応力に対する $\Delta V/V$ の変化が大きいことを示している。Rollins によるアルミニウムの $\Delta V/V$

一応力特性における 2 MHz と 5 MHz の結果はよく一致しており、周波数による依存性を否定しているが、われわれによる図 8 の結果は勾配は一致するが、 $\Delta V/V$ の値に若干差が認められる。また図から明らかなようにに圧延方向と荷重の方向により勾配に正負を生ずる結果をえている。

(2) V_x, V_y の直接測定

さきに述べた音響複屈折法では主応力方向に振動方向をもつ 2 成分の横波の音速 V_x, V_y の大小関係は明らかにされない。 V_x, V_y を別々に求めてから $\Delta V/V$ を算出する方法もあるわけで、この方法は音響複屈折法にくらべて $\Delta V/V$ を 10^{-5} 程度の精度で求めるには装置が複雑になるのが欠点であるが、応力による V_x, V_y の変化を直接明らかにすることができる点ですぐれている。

音速の精密測定にはパルス重量法⁸⁾、パルスエコー重量法⁹⁾、周波数変調を行なった連続波による方法¹⁰⁾、絶対測定という点では問題があるが sing-around¹¹⁾ 法などいく多の方法がある。Crecraft¹²⁾ は sing-around 法を用いて圧縮および引張荷重によるニッケル・スチール、銅、アルミニウムの V_x, V_y の変化を測定しているので次に sing-around 法の原理を簡単に述べる。

i) sing-around 法の原理

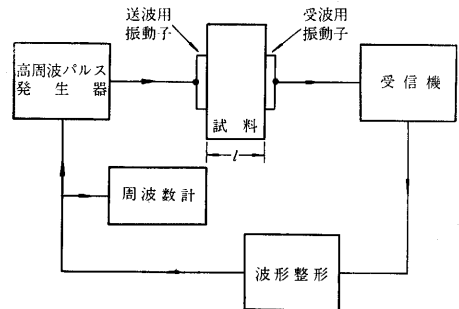


図 9 Sing-around 法の原理図

sing-around 法の原理図を示すと図 9 のようになり、試料の主応力方向に振動方向を向けて送受波振動子を相対して試料表面に密着させる。送波用の振動子から試料に入射された超音波パルスは試料中を通過して受波用振動子で電気的パルスに変換され、その出力は増幅、検波されたのち、成形回路を経て再びパルス発生器を動作させ、試料中に超音波を入射するという具合にパルスが図のような閉じた回路を繰返し回るので Hanson によって sing-around 法と名づけられている。このようなパルスの繰返し周波数 f を周波数計で測定し、音波が伝播する距離を l 、音速を V とすれば

$$\frac{1}{f} = \frac{l}{V} + t_e \quad (4)$$

となる。 t_e は電気回路および送受波用振動子の立上りに起因する遅延時間である。試料の温度を一定に保てばこのような装置で音速の 5 桁ぐらゐの測定値は比較的容易

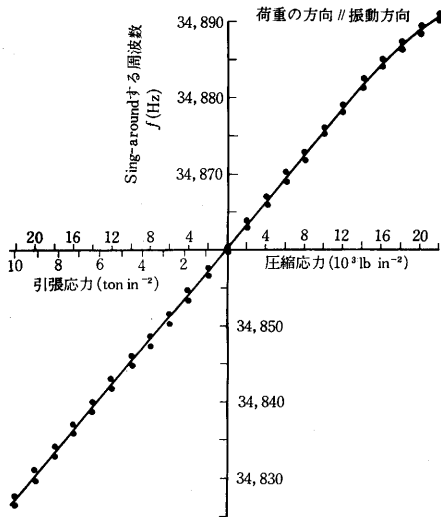


図10 (a) ニッケルースチールの応力による“Sing-around”周波数の変化¹²⁾

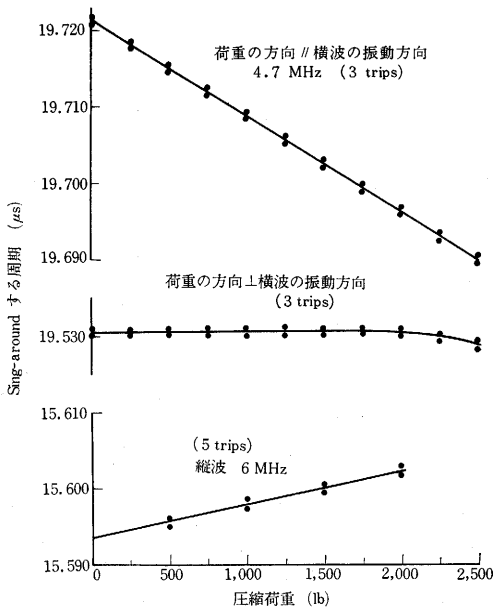


図10 (b) アルミニウムの応力による“Sing-around”周期の変化¹²⁾

にえられる。

ii) 測定結果

Crecaft¹²⁾によるニッケルースチール、アルミニウムの測定結果を図10(a), (b)に示す。いずれの場合もsing-aroundする周波数、およびsing-aroundする周期は弾性限内では応力とともに直線的に変化しており、図10(a)では引張り応力では音速は減少し、圧縮応力では増加している。圧縮と引張りで勾配が若干異なっているのは多分、試験機を校正するさいの誤差にもとづくものであると指摘されている。図10(b)には縦波による測定も行なっている。

3. 応力による音速の変化

媒質に応力を与えるとき媒質中の超音波の減衰や音速が変化することはしばしば観測される事実であるが、これらの現象を説明する正確な機構についてはいまだ不明な点が多い。等方媒質中の音速については周知のように次のような式で表わすことができる。

$$V = C^{1/2} \rho^{-1/2} \tag{5}$$

ここに ρ は密度、 C は縦波、横波の場合の弾性定数である。(5)式を微分することにより

$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{2} \left(\frac{dC}{C} - \frac{d\rho}{\rho} \right) \tag{6}$$

がえられる。圧縮、引張荷重により媒質の密度は変化するから縦波、横波の音速は応力によって変化することが期待される。FirestoneとFrederick¹³⁾はレイリー波の音速が表面応力によって影響を受けることを最初に報告している。BergmanとShabender¹⁴⁾のアルミニウムを用いた実験によると、縦波の場合には応力による音速の変化は弾性率は一定として密度の変化だけで説明することができるが、横波の場合には密度の変化だけでは音速の変化を説明することができないので、弾性率の変化を考慮する必要があることが指摘されている。応力による弾性率の変化は密度の変化にくらべて複雑である。もちろん弾性限内の弾性率は単軸な応力のもとでは一定であると定義されているものである。弾性限内での弾性率に関する研究は比較的最近のことであり、GranatoとLücke¹⁵⁾はKoehlerにより提唱された転位モデルの理論を進展させ、振動応力による転位の運動のダンピングによるエネルギー損失、音速の変化を定量的に表わす式を導いている。干潟、その他多くの研究者¹⁶⁾はGranato-Lückeの理論を用いて単結晶および多結晶金属の塑性変形中における超音波の吸収と音速の変化に関する実験結果の説明を行なっている。

転位による弾性率の変化などのミクロな機構はさしおいて、3次の弾性定数を用いた現象論的な理論により、応力と音速の関係を表わすと次のようになる。HughesとKelly¹⁷⁾はMurnaghan¹⁸⁾の有限変形の理論を用いて等方媒質における静水圧と単軸荷重の微小な応力により縦波と横波の音速を表わす式を導いている。えられた式のうちで単軸応力をX軸にとり、音波の伝播方向をY軸とする場合に限定すると次ぎのような式になる。

$$\rho_0 V_L^2 = (2\mu + \lambda) - \frac{P}{3K_0} \left[2l - \frac{2\lambda}{\mu} (2\mu + \lambda + m) \right] \tag{7}$$

$$\rho_0 V_{S1}^2 = \mu - \frac{P}{3K_0} \left[2\mu + \lambda + m + \frac{\lambda}{4\mu} n \right] \tag{8}$$

$$\rho_0 V_{S2}^2 = \mu - \frac{P}{3K_0} \left[m - 2\lambda - \frac{\mu + \lambda}{2\mu} n \right] \tag{9}$$

ここに V_L は縦波の音速、 V_{S1} と V_{S2} は横波の振動方向がX方向とZ方向の場合の音速、 ρ_0 は応力0における密度、 K_0 は応力0における体積弾性率、 l, m, n

は3次の弾性定数, λ と μ は Lamé の定数, P は応力である。

一般に $V = V_0(1 - \Delta V/V_0)$ とおかれ, 応力による音速の変化分はもっとも大きい場合で 10^{-3} 程度であるから

$$V^2 = V_0^2 \left(1 - 2 \frac{\Delta V}{V_0} \right) \quad (10)$$

となる。それゆえ (7)~(9) 式で与えられる音速は応力により直線的に変化することになるが, 図10の実験結果は理論の正当性を証明している。

一軸方向の応力に垂直に横波を伝播させた場合, すでに述べたように等方的な媒質は複屈折を起こし, 主応力方向に振動方向をもつ横波の音速 V_x, V_y は (8), (9) 式を用いて表わすことができる。(8)から (9) 式を引いて $K_0 = (2\mu + 3\lambda)/3$ を用いて整理すると

$$\rho_0 V_{s1}^2 - \rho_0 V_{s2}^2 = \frac{P}{4\mu} [4\mu + n] \quad (11)$$

$V_{s1} + V_{s2} \approx 2V_0$ であるから

$$V_{s1} - V_{s2} \approx -\frac{P}{8\rho_0 V_0 \mu} [4\mu + n] \quad (12)$$

$(V_{s1} - V_{s2})/V_0 = \Delta V/V$ とおくと

$$\frac{\Delta V}{V} \approx -\frac{P}{8\mu^2} [4\mu + n] \quad (13)$$

となり, $\Delta V/V$ は応力と直線的な関係にある。実験結果もすでに図7, 8でみたように理論の結果と一致している。(7)~(9)式を用いるに当たって注意しなければならないのは, これらの式を導くのに媒質は弾性体とみなしていることである。しかし, 実在の媒質に応力を加えてひずませた場合, 弾性ひずみの他に擬弾性ひずみを生じさせるような機構が存在するので問題はより複雑になる。Granato と Lücke による転位のダンピングによる理論も擬弾性ひずみに関与している。

4. stress-optical 定数と stress-acoustical 定数

光弾性法では stress-optical 定数 S と縞応力定数 F を次のように定義している。

$$S = \frac{V_1 - V_2}{V_0(P - Q)} \quad (14)$$

$$F = \frac{(P - Q)Z}{N} \quad (15)$$

ここに V_1, V_2 は主応力方向に振動する2成分の光の速さ, V_0 は応力0の光の速さ, Z は試料の厚さ, N は等色線次数, P, Q は光の伝播方向に垂直な面内の主応力である。すなわち stress-optical 定数 S は主応力差による応力複屈折の生じやすさの尺度となる定数で物質の種類, 処理状態によって定まるが温度によっても広く変化する。縞応力定数 F は単位厚さの試料に1次の等色線縞を生ずるに必要な応力を表わしており, 感度のよい材料ほど低い値をとる。音響複屈折法においても stress-acoustical 定数 S と縞応力定数 F を光弾性法の場合と同様に定義することができ各種媒質についてえられた結果

表1 Potoelastic 定数と Acoustoelastic 定数

	試料	$S(\text{in}^2\text{lb}^{-1})$	$F(\text{lb}\text{in}^{-2})$	備考
Potoelastic Value	ガラス	1.87×10^{-8}	1.24×10^8	Heywood $\lambda = 5893 \text{ \AA}$
	セルロイド	9.45×10^{-8}	2.45×10^8	
	ゼラチン	1.66×10^{-4}	1.4×10^{-1}	
Acoustoelastic Value	ニッケル	5.94×10^{-8}	4.75×10^8	Crecraft (4.7 MHz)
	銅	9.0×10^{-8}	2.15×10^8	
	アルミニウム	2.41×10^{-7}	1.08×10^8	
	6061Fアルミ	2.3×10^{-7}		Rollins 5 MHz
	1100Fアルミ	5.2×10^{-7}		
	C1018スチール	3.9×10^{-8}		
	溶融石英	8.0×10^{-8}		
アルミニウム軟鋼	3.7×10^{-7} 7.7×10^{-8}		鳥飼, 李 2 MHz	

を表1に示す。セルロイドと銅の S の値はほぼ一致するが, F の値を比較するとセルロイドの方が銅よりも1000倍ほど感度のよいことがわかる。これは $F = \lambda/S$ (λ :波長) という関係から明らかのように波長の差に起因する。それぞれの波長を求めてみるとセルロイド中の光の波長は $6 \times 10^{-7} \text{ m}$, 銅の中の 4.7 MHz の横波の波長は $6 \times 10^{-4} \text{ m}$ になる。音響複屈折法において縞応力定数を小さくするため, 波長の短い横波を用いると試料中での音波の散乱と吸収が増大するので用いる周波数にはおのずから限界がある。

5. 媒質中の異方位

(1) 優先方位

これまでにも述べたように, 各種金属において音響的な複屈折は応力によってのみ起こるのではなくて, 応力が0の状態でも生ずる。この現象は金属の組織と密接に結びついていることが予想され, 特に圧延した金属の板では圧延方向に優先方位をもった集合組織を形成し, 圧延方向とそれに直角な方向では弾性的性質が異なるようになる。Firestone と Frederick¹³⁾の研究によると圧延した鋼板では圧延方向に垂直(板の幅方向)に伝わる超音波の横波の速度は振動方向が圧延方向に垂直(板の厚さ方向)のものが振動方向が圧延に平行(板の長さ方向)のものより1~3%程度低い。Sullivan と Papadakis¹⁹⁾は4150鋼の圧延した板の表面に18 MHzの横波振動子を密着し, その振動方向を圧延方向と45°に向けて試料内に超音波パルスを入射することにより, 図3(a)のような複屈折による干渉図形をえている。この現象は圧延により圧延方向に優先方位をもった結晶粒が試料中に生ずることによるものと想定して, ランダムな方位をもった結晶粒中に特定の優先方位をもった結晶粒が存在するモデルを考え, 次のような式を導いている。

$$t_x - t_y = l\kappa(v_y - v_x)(v_x v_y)^{-1} \quad (16)$$

ここに v_x, v_y は, 優先方位をもった結晶中の横波の伝播方向が z 軸の場合に, 振動方向が x 軸と y 軸方向の音速, l は横波が伝播する z 方向の試料の厚さ, κ は優先

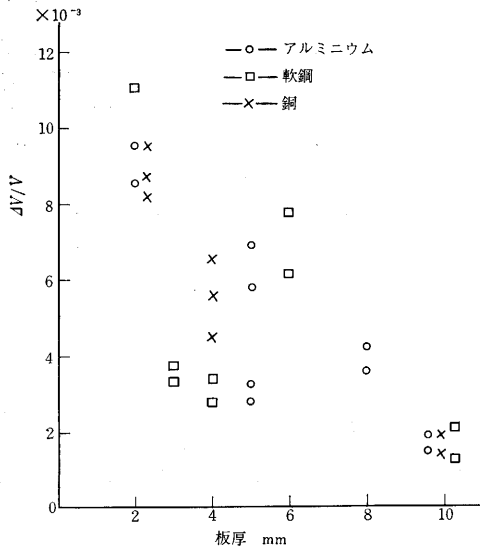


図11 各種圧延板の異方性⁷⁾

方位をもった結晶粒の全体に対する割合、 t_x , t_y は試料の厚さ l を X 軸, Y 軸方向に振動方向をもつ横波が伝播する時間である。 $(t_x - t_y)$ は複屈折の干渉図形から求め、 v_x , v_y には単結晶における粒子振動の向きが [001], [110] で [110] 方向に伝播する音速の値を用いると、圧延した4150鋼板の κ の値として0.1%をえている。X線回折法ではこのような小さな優先方位を検出することはできない。Crecraft¹²⁾ はニッケルスチールを用いた場合に試料の長さ平行な [110] 方向の結晶粒の割合として $\kappa=0.4\%$ をえている。われわれ⁷⁾ は市販のアルミニウム、銅、軟鋼などの圧延板の板厚による異方性の測定を行ない、板が薄くなるにつれて異方性が増大する結果をえている (図11)。またアルミニウムに0.1%のチタンを添加した鋳造インゴットを鍛造したのち、圧延率を4~80%変えた試料を製作して異方性の測定を行なったところ、圧延率の増加につれて異方性が増加するなどの結果²⁰⁾ をえている。

(2) 塑性ひずみ

マクロな残留応力が存在しないように金属を塑性変形させた場合の塑性歪と $\Delta V/V$ との関係をも明らかにする目的で、Crecraft¹²⁾ はニッケルスチールの試験片に数%の塑性ひずみを与えるため引張り荷重による塑性変形を行なったが、実験の途中で試料にくびれが生じたため、4%程度の塑性ひずみを与えるにとどまった。しかし、塑性ひずみを与える前の $\Delta V/V$ は0.20~0.23%であったものが4%程度の塑性ひずみにより0.39~0.42%に増加した。普通このような荷重により、検出しようとする優先方位を試料に生じさせるためには50%程度のひずみを試料に与える必要がある (Doan²¹⁾)。4%の塑性ひずみによる $\Delta V/V$ の増加の原因について Crecraft は試料中の転位の挙動をあげており、変形方向に直角な方向の塑

性ひずみは変形方向のひずみの半分であるから、ピン止めされた転位によるマクロな剛性率の増加は変形方向の剛性率の増加より小さくなると考察している。このような現象は引張りおよび圧縮による塑性ひずみのいずれの場合にも成立するから、塑性ひずみの正負にかかわらず変形方向に振動方向をもつ横波の音速は変形に直角な振動方向をもつ音速よりも常に速くなる。共振法によるアルミニウム圧延板を用いたわれわれ²⁰⁾ の結果でも、圧延に平行な振動方向をもつ横波の音速は圧延に直角なものにくらべて常に速い結果をえている。しかし、弾性限内ではすでに図10 (a) でみたように荷重の方向と平行に振動方向をもつ横波の音速は、ひずみの符号によって増減する。Rollins によると0.36%程度の塑性ひずみではほとんど $\Delta V/V$ の変化を認めていないが、この程度の塑性ひずみでは $\Delta V/V$ は0.01%以下となり装置の精度と同程度になってしまう。またわれわれの測定でも塑性ひずみは0.3%以下と思われるのでききに述べたように塑性域で $\Delta V/V$ の変化が認められなかったものと推定される。

(3) 残留応力

不均一な塑性ひずみによって残留応力は生ずるのであるが、残留応力を測定するには応力を測定する場合と同様、優先方位をもった組織、塑性ひずみなどによる異方性を分離する必要がある、これはかなり困難な問題である。Crecraft¹²⁾ は断面積1平方インチのニッケルスチールの角棒に曲げ荷重を加え、塑性変形により弯曲した試料を用いて残留応力の測定を試みている。荷重により塑性ひずみが生じている状態での応力の分布を図12 (a),

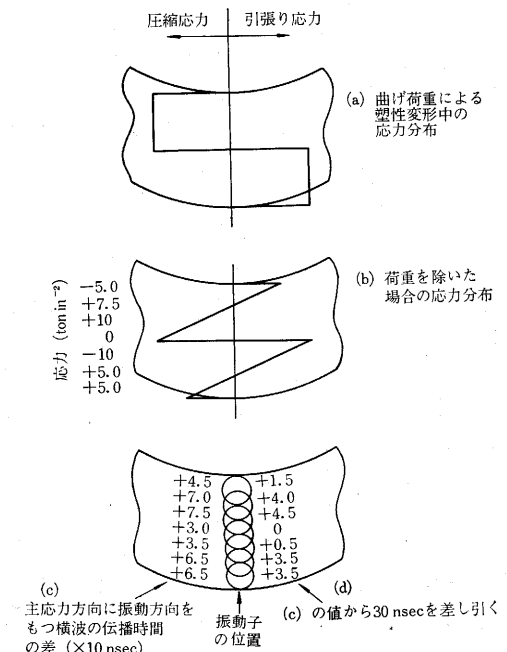


図12 曲げ荷重による残留応力の測定例¹²⁾

変形荷重を除いた状態での応力の分布を図12 (b) に示す。試料中央部を横切って主応力の方向に振動方向をもつ横波の2成分の伝播時間の差を求めた結果を図12(c) に示す。試料に初めに存在していた異方性による値 30 nsec をこれらの値から差引くと図12(d) のようになる。応力が釣合っていないので図11 (d) の真中の値を除いてさらに 25 nsec を差引いて応力の値に直すと (10 nsec は 5 ton in^{-2} に相当する) 図12 (b) に示すような値となり、応力が釣合っている系とみなすことができるような結果をえている。

高沖²²⁾は炭素鋼 ($150\phi \times 447 \text{ mm}$) を焼鈍後 650°C から水焼入して、残留応力を生じさせた試料を長さ 447 $\pm 0.02 \text{ mm}$ に仕上げ、試料端面に 5 MHz の縦波振動子を密着し、半径上の各点から軸方向に超音波パルスを送り、底面エコー (測定中は振幅一定に保つ) のブラウン管上での位置の変化を写真に収め、そのネガフィルムからコンパレータを用いて底面エコーを測定することにより音速の変化を求めた。一方、ザックス法により求めた試料の軸方向の応力成分 σ_z は他の成分 σ_r (半径応力), σ_t (切線応力) にくらべて最も大きく、音波の伝播方向とも一致しているので、この成分による音速の変化を半径方向の各点につき計算を行ない、実験によるものと比較したところ、両者は傾向としてよく一致している。応力成分 σ_z による音速の変化の計算に当っては単純な圧縮および引張り応力の 1 kg/mm^2 に対して音速は 0.01% 増減する実験結果を使用している。

6. む す び

超音波により応力を測定するには以上述べたように応力による複屈折の効果を応力によらないものと分離することが重要であるが現在までのところこれといった決め手はない。しかし、圧延による異方性と金属組織との関係、塑性ひずみによる異方性に関するデータをさらに蓄積することにより、なんらかの手がかりをうる可能性もあるわけである。超音波による応力測定は超音波なるがゆえにいくつかの制約がある。超音波パルスは試料面に垂直入射させる必要があり、斜に入射する場合には試料中を多重反射するさいに縦波などを生じてモードが変化する。このような現象を防止するために試料表面を研磨し、試料表面間の平行度をよくする必要がある。超音波による制約ではないが測定にかかる応力は試料の厚さ方向に存在する応力の平均値になる。しかし、Rollins²³⁾は等方性試料に2方向から適当な角度で超音波ビーム (例えば縦波-縦波) を入射して試料中で交差させると非線型な弾性理論によりビームが交差した部分より、2次的な音波ビーム (1次の差の周波数の横波) が生じることから、3次元の応力解析への適用の可能性を論じている。

試料を透過する横波を光に変換して映像化する方法も Benson¹⁾らによって提案されている。また Sokolov によ

って提案された超音波像を電氣的な像に変換する超音波撮像管を用いて光学的に映像化する装置が開発されている²⁴⁾。このような技術の開発により光弾性の場合と同様に、超音波横波による干涉縞の映像化が可能になるものと思われる。超音波による応力測定は種々制約はあるが、問題とする材料の応力を直接測定することができるのでこの分野での研究が今後とも望まれるわけである。

(1969年4月4日受理)

文 献

- 1) R.W. Benson and V.J. Raelson: Product Engineering 30 No. 29 (1959) 56
- 2) H. A. Elicon: Nondestructive Testing, May-June (1960) 180
- 3) P. C. Waterman and L. J. Teutonico: J. Appl. phys. 28 (1957) 266
- 4) 例えば、日本學術振興会、製鋼第19委員会編: 超音波探傷法, 日刊工業新聞社
- 5) E. E. Day and R. A. Brewer: JISE 1967 Semi-International Symposium. Sept. (1967) Tokyo 147
- 6) F. R. Rollins: Tech. Docum. Rep. No. WADD-TR-61-42, Pt. I (1961)
" " " " -TR-61-42, Pt. II (1963)
- 7) 鳥飼, 李: 日本音響学会講演論文集 (1965年10月) 5
Y. Torikai and H. Lee: Proceedings of the Fifteenth Japan National Congress for Applied Mechanics, (1965) III-1, 209
- 8) J. Mckimin and P. Andreatch: J. Acoust. Soc. Am. 34 (1962) 5
- 9) E. P. Papadakis: J. Acoust. Soc. Am. 40 (1966) 863
- 10) R. L. Melcher, D. I. Bolef and J. B. Merry: Rev. Sci. Instr. 39 (1968) 1618
- 11) R. L. Forgacs: J. Acoust. Soc. Am. 32 (1960) 2
- 12) D. I. Crecraft: J. Sound Vib. 5 (1967) 173
- 13) F. A. Firestone and J. R. Frederick: J. Acoust. Soc. Am. 18 (1946) 200
- 14) R. Bergman and R. Shabender: J. Appl. Phys. 29 (1958) 1736
- 15) A. Granato and K. Lücke: J. Appl. Phys. 27 (1956) 583
- 16) Edited by W. P. Mason: Physical Acoustics Vol. 3, Pt. A (1966) 199 Academic Press
- 17) D. S. Hughes and J. L. Kelly: Phys. Rev. 92 (1953) 1145
- 18) F. D. Murnaghan: Finite Deformation of an Elastic Solid (1951) London: J. Wiley
- 19) P. F. Sullivan and E. P. Papadakis: J. Acoust. Soc. Am. 33 (1961) 1622
- 20) 鳥飼, 李: 日本音響学会講演論文集 (1968年11月) 19
" " : NDI 資料 2322 (1968)
- 21) G. E. Doan: The Principles of Physical Metallurgy, 3rd Ed. (1953)
London: McGraw-Hill
- 22) 高沖: 内部摩擦第133委資料 (1963年11月)
- 23) F. R. Rollins: Tech. Docum. Rep. WADD-TR-61-42 Pt. II (1963) AD 299017
" " " " Pt. III (1963) AD 405046
- 24) A. Korpel: IEEE Spectrum 5, No. 10 (1968) 45
J. E. Jacobs: IEEE Trans. Sonic and Ultrasonics Vol. SU-15, No. 3, July (1968) 146