超音波の音速に及ぼす応力と温度の効果*

小堀修身^{*1}, 岩清水幸夫^{*2}

Effects of Stress and Temperature on Ultrasonic Velocities

Osami KOBORI and Yukio IWASHIMIZU

The effects of stress and temperature on ultrasonic velocities are studied experimentally in order to establish the acoustoelastic law applicable to thermoelastic stress analysis. A specimen for uni-axial tensile test is prepared from a rolled plate of S45C, and the sing-around method is used to measure the round-trip time of ultrasonic waves incident normally to the specimen. Since Salama et al. proposed a non-destructive method for measuring residual stresses based on the stress-dependence of velocity change due to temperature, particular attention is paid to this effect, and two kinds of experiment are carried out to confirm it quantitatively. At first, velocities of longitudinal and transverse waves are measured by varying the temperature under several constant uni-axial stresses, and it is confirmed that the velocity change due to temperature depends linearly on stress. Then the velocities of three waves are measured by varying uni-axial stress under several constant temperatures, and the velocity change due to stress is shown to be linearly dependent on temperature. From both results, the stress-temperature coefficients of velocities are determined together with the acousto-elastic constants and temperature coefficients of velocities, and are compared with those obtained by Salama et al.

Key Words: Elasticity, Material Testing, Ultrasonic Velocity, Acoustoelastic Constants, Acousto-thermoelasticity

1. 緒 言

応力(弾性変形)が音波(弾性波)の伝ばに及ぼす効果は音弾性効果と呼ばれ, これを利用する超音波応力測定(音弾性応力測定)の研究がさかんに行われている⁽¹⁾⁽²⁾. 基本的な音弾性効果は等方性体中を一つの主応力方向に伝ばする音波に対するものであり, 非線形弾性論に基づく解析により, 横波は他の2主応力方向にかたよること, これら2横波の音速差が主応力差に比例することが示され, 横波, 縦波の音速の応力による線形変化が二次および三次の弾性定数を用いて表されている.

しかしながら, 実際が多結晶金属材料を対象とするときには, この音弾性則に集合組織が主因と考えられる弾性異方性(組織異方性)の影響を含めねばならない. 多くの場合このような組織異方性は弱い異方性と考えられるが, 音波のかたより方向, 音速に対しては応力と同程度以上の影響を及ぼす. 例えば, 圧延板中を板厚方向に伝ばする横波の場合, 応力による複屈折

ではかたよった2横波の音速差の割合は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 程度であるのに対し, 組織異方性によるそれは $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度である. このような組織異方性は母材の具体的な製造方法によって異なるほか, 同一母材内でもある程度不均一である. そのために応力零の状態を試料の組織異方性を求めることができない場合, すなわち残留応力の非破壊的測定においては, 超音波測定結果に含まれる残留応力と組織異方性の効果を何らかの方法で分離して応力を決定することが必要である. これに対しては, 音速の伝ば方向依存性を利用する方法(Kingら⁽³⁾, Thompsonら⁽⁴⁾)のほか, 音速比(戸田ら⁽⁵⁾), 音速の周波数依存性(Aroraら⁽⁶⁾), 音速の温度依存性(Salamaら⁽⁷⁾)を利用する方法が研究されている.

これらの内, Salamaらにより提案されている方法は応力による音速変化率すなわち音弾性定数が温度によって変化することを利用するものである. ここで指摘されている音弾性定数の温度依存性は超音波応力測定の熱応力への適用を考えるうえでも重要な問題であるが, これについては研究例も極めて少なく実験的検討が不足している状況にある. 本研究はこの問題を中心にして熱応力測定の基礎となる音弾性則を実験的に検討し, あわせてSalamaらによる残留応力測定法に

* 昭和62年11月3日 北陸信越支部北陸地方学術講演会において講演, 原稿受付 昭和62年4月27日.

^{*1} 正員, 大阪産業大学工学部 (〒574 大東市中垣内3-1-1).

^{*2} 正員, 立命館大学理工学部 (〒603 京都市北区等持院北町56-1).

について考察したものである。特に音弾性定数の温度依存性については、2種類の実験により結果の妥当性を確かめる方法をとった。

2. 熱弾性体の音弾性則

Iwashimizu⁽¹⁰⁾は外力の作用によって均一静的な変形状態にある等方性熱弾性体における音波の伝ばを有限変形論に基づいて解析した。その結果は次のようにまとめられる。等方性体が温度 T_0 、応力零なる基準状態から温度 T 、単軸応力 σ (X_1 軸方向) の状態になっているとする。このとき応力に垂直な方向 (X_3 軸) に伝ばする音波を考え、縦波の音速を v_L 、 X_β ($\beta=1, 2$) 軸方向に偏向する横波の音速を v_β とする。そして基準状態における縦波、横波の音速を V_{L0} 、 V_{T0} とし、 $\Delta v_L = v_L - V_{L0}$ 、 $\Delta v_\beta = v_\beta - V_{T0}$ 、 $\theta = T - T_0$ とすれば、応力と温度による音速変化の割合は次式で与えられる (音弾性則)。

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_L / V_{L0} &= k_L \sigma + l_L \theta \\ \Delta v_\beta / V_{T0} &= k_\beta \sigma + l_\beta \theta \quad (\beta=1, 2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

比例定数 k_L 、 k_β は基準状態における音弾性定数であり、 l_L 、 l_β は温度のみによる音速変化率を表す。これらは二次弾性定数 λ 、 μ (Lamé の定数)、Toupin らの定義による三次弾性定数 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 、熱弾性定数 λ' 、 μ' (二次弾性定数の温度による変化率) および線膨張係数 α を用いて次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} k_L &= \frac{\mu(\lambda + \nu_1 + 2\nu_2) - \lambda(2\lambda + 5\mu + 2\nu_2 + 4\nu_3)}{2\mu(\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)} \\ k_1 &= \frac{\mu\nu_2 + (2\mu + \lambda)(\mu + \nu_3)}{2\mu^2(3\lambda + 2\mu)} \\ k_2 &= \frac{\mu\nu_2 - 2\lambda(\mu + \nu_3)}{2\mu^2(3\lambda + 2\mu)} \\ l_L &= \frac{\alpha(4\lambda + 8\mu + 3\nu_1 + 10\nu_2 + 8\nu_3) + \lambda' + 2\mu'}{2(\lambda + 2\mu)} \\ l_\beta &= \frac{\alpha(4\mu + 3\nu_2 + 4\nu_3) + \mu'}{2\mu} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式(1)は応力 σ および温度 (変化) θ の二次以上を省略した関係である。しかしながら、一般に応力による音速変化に比べて温度による音速変化は大きいと考えられるため、ここでは温度の二次および温度と応力の積の項を考慮して式(1)を次のように拡張しておく。

$$\frac{\Delta v}{V_0} = (k + k'\theta)\sigma + l\theta + m\theta^2 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 Δv 、 k 、 k' の添字 L 、 β ($\beta=1, 2$) と l 、 m の添字 L 、 T は省略した。後述の実験では試料中の伝ば時間を測定して温度と応力の効果を検討するため、式

(3)をこれに適する形に書き直しておく。

基準状態 (応力零、温度 T_0) で厚さ h_0 の試料を考え、温度変化 θ と応力 σ を受けた状態での厚さを h とする。式(3)と同様に $\sigma\theta$ と θ^2 の影響を考慮すれば、この厚さの変化を

$$\left. \begin{aligned} \Delta h &= h - h_0 \\ \Delta h / h_0 &= -(\nu/E)\sigma + \alpha\theta + b\sigma\theta + \alpha'\theta^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

と表すことができる。ここで E はヤング率、 ν はポアソン比、 α' は線膨張係数 α の温度による変化率である。それぞれの状態で音波が試料厚さ h_0 、 h を伝ばするに要する時間を τ_0 、 τ とし、音速を V_0 、 v とすれば、

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= h_0 / \tau_0 \\ v &= h / \tau \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

である。したがって

$$\left. \begin{aligned} \Delta v &= v - V_0 \\ \Delta \tau &= \tau - \tau_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

と表し、やはり $\sigma\theta$ 、 θ^2 の項を考慮して $\Delta h/h_0$ 、 $\Delta v/V_0$ の二次までを残すと

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta \tau}{\tau_0} &= \left(\frac{\Delta v}{V_0} - \frac{\Delta h}{h_0} \right) \left(1 - \frac{\Delta v}{V_0} \right) \\ &= (K + K'\theta)\sigma + L\theta + M\theta^2 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

となる。ここで

$$\left. \begin{aligned} K &= k + \nu/E \\ L &= l - \alpha \\ K' &= (k' - b) - l(k + \nu/E) - k(l - \alpha) \\ M &= m - \alpha' - l(l - \alpha) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

である。以後

$$\Delta V / V_0 = -\Delta \tau / \tau_0 \quad (V_0 = h_0 / \tau_0) \dots\dots\dots (9)$$

とおき、 $\Delta V / V_0$ を見掛けの音速変化率と呼ぶ^{**1}。式(7)を式(9)に代入すれば、見掛けの音速変化率で表した音弾性則として次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta V_L}{V_{L0}} &= (K_L + K'_L\theta)\sigma + L_L\theta + M_L\theta^2 \\ \frac{\Delta V_\beta}{V_{T0}} &= (K_\beta + K'_\beta\theta)\sigma + L_\beta\theta + M_\beta\theta^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここに K_L 、 K'_L 、 L_L 、 M_L は式(8)の k 、 k' 、 l 、 m をそれぞれ k_L 、 k'_L 、 l_L 、 m_L としたものであり、 K_β 、 K'_β 、 L_β 、 M_β についても同様である。

^{**1} 見掛けの音速 V を $V = h_0 / \tau$ と定義する場合、見掛けの音速変化率 $(V - V_0) / V_0$ は $(V - V_0) / V_0 = -(\Delta \tau / \tau_0) + (\Delta \tau / \tau_0)^2 + \dots$ となる。したがって $\Delta \tau / \tau_0$ が十分小さくその二次以上を省略してもさしつかえない場合には、 $\Delta V = V - V_0$ が成り立ち、 ΔV は見掛けの音速変化となる。

式(10)において $\sigma=0$ とおけば温度のみによる音速変化率が

$$\Delta V/V_0 = L\theta + M\theta^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

で表される。また、 $\theta=0$ とおけば応力のみによる音速変化率を表す通常の音弾性則

$$\Delta V/V_0 = K\sigma \quad \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。式(10)から応力による音速変化率、すなわち音弾性定数 $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\sigma$ および温度による音速変化率 $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\theta$ は

$$\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right) = K + K'\theta \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right) = L + 2M\theta + K'\sigma \quad \dots\dots\dots (14)$$

であり、前者の温度依存性、後者の応力依存性は同じ定数 K' で定まる。以後、定数 K' を音速の応力-温度係数、 K を基準温度における音弾性定数（音速の応力係数）、 L を音速の温度係数と呼ぶ。また $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\sigma$ を音弾性定数（応力-音速変化率）、 $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\theta$ を温度-音速変化率と呼ぶ。以下では温度をパラメータにした応力-音速変化率の測定と応力をパラメータにした温度-音速変化率の測定について述べる。

図1 実験装置のブロック線図

3. 実験

供試材は市販の S 45 C 板材で圧延方向と平行に切り出し引張試験片（厚さ 8.00 mm、平行部の幅 30 mm 長さ 160 mm）に機械加工した。振動子は共振周波数 5 MHz のチタン酸バリウムで縦波用および横波用 30 mm のく形素子から 5 mm 角に切り出し、鉛の粉末を混合した接着剤で背板を作り金属ケースに固定した。試料と振動子の密着にはカプラント ZGY（クラウトクレマー製）を使用し、縦波用 1 個と横波用 2 個の振動子を図 1 に示すように試料中央表面に金具で押し付けた。このとき横波素子の振動方向は負荷方向に平行および垂直である。伝ば時間の測定にはシングアラウンド（SA）測定装置（超音波工業製）を用い、切換スイッチにより選択した振動子を励振して試料中にパルスを入射させ、ゲート回路を用いて選択した二つの反射波の繰返し周期 τ_{R1} 、 τ_{R2} を測定した。パルスが試料中を 1 往復するに要する伝ば時間 τ は

$$\tau = (\tau_{R2} - \tau_{R1})/n \quad \dots\dots\dots (15)$$

である（ n は反射回数差）。実験中の試料温度コントロールには、内部に断熱シートを張り、小穴のあいた仕切板で二つの槽に区切った恒温箱を使用した（図 1）。一方の槽の中央部に試料が入るようにし、その温度をサーミスタ表面温度計で測定した。他の槽には温度調節用に温風の送風口とドライアイス投入口を設け、実験中の試料表面温度の変動が $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 以内となるようにした。

3.1 温度-音速変化率とその応力依存性 まず試料に一定の単軸引張応力を加えて温度による伝ば時間変化を測定した。一定応力は $\sigma=0, 20, 41, 61, 82$ MPa の 5 段階とし、温度は 5°C に 5 min 間以上保持した後 $0.3^\circ\text{C}/\text{min}$ 以下の割合で 28°C までゆっくり上昇させた。直接測定される 1 往復の伝ば時間の変化を図に整

図2 温度による伝ば時間変化 ($\sigma=0$)

図3 温度による縦波の伝ば時間変化

図4 温度による横波の伝ば時間変化

理する際には、各 σ で最低温度 $T=5^{\circ}\text{C}$ における伝ば時間 τ^* からの変化 $\Delta\tau^*$ を用いた。また結果の最終表示には、基準状態を $\sigma=0$, $T_0=20^{\circ}\text{C}$ にとり、見掛けの音速変化率 $\Delta V/V_0$ を用いた。これと $\Delta\tau^*$ との関係は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{\Delta\tau^*}{\tau_0} + \delta_0 \left(\delta_0 = \frac{\tau_0 - \tau^*}{\tau_0} \right) \dots\dots\dots (16)$$

図2は無負荷の状態 $\sigma=0$ で温度 T のみによる伝ば時間変化 $\Delta\tau^*$ を求めた結果である。 $\sigma=0$ でも試料の集合組織が主因と考えられる。組織異方性により横波は負荷方向と負荷に垂直方向とにかたよっており、これら2横波と縦波のいずれについても $\Delta\tau^*$ は温度 T とともに直線的に変化している。したがってこの温度範囲では音速変化率 $\Delta V/V_0$ は T の一次式で表され、式(11)で $M=0$ とした関係 $\Delta V/V_0 = L\theta$ が成り立つ。表1には基準状態 $\sigma=0$, $T_0=20^{\circ}\text{C}$ における音速 V_0 と図2の直線こう配から求めた音速の温度係数 L を示した。かたよった2横波の音速 V_{10} と V_{20} とは約0.9%異なり、試料の組織異方性は比較的強いと言える。また L_1 と L_2 にも約10%の差があり、温度変化のみの影響にも異方性が表れている。

図3, 4は $\sigma=0$, 82 MPa における $\Delta\tau^*$ を比較したものである。 $\sigma=82$ MPa においても縦波、横波いずれの $\Delta\tau^*$ も温度とともに直線的に増加しているが、直線の傾き $\partial(\Delta\tau^*)/\partial\theta$ には σ による違いがみられる。図3の縦波の場合この傾きは σ の増加にともなって増大

している。負荷に垂直にかたよった横波の場合も同様であり、負荷に平行にかたよった横波の場合(図4)にはこれと逆の変化が生じている。別の応力のもとで行った実験も同様の結果となっており、傾き $\partial(\Delta\tau^*)/\partial\theta$ から求めた温度-音速変化率 $[\partial(\Delta V/V_0)/\partial\theta]$ と応力の関係を図5に示した。温度-音速変化率は縦波、横波いずれにおいても σ とともに直線的に変化しており、式(14)で $M=0$ とした関係

$$\partial(\Delta V/V_0)/\partial\theta = L + K'\sigma$$

が成り立つ。図5の直線のこう配として得られる応力-温度係数 K' を K' と表すことにして表3にその値を示した。このように一定応力のもとで音速変化率が温度とともに直線的に変化し、その直線のこう配が応力と一次関係にあることは Salama らによっても示されている。

3.2 音弾性定数(応力-音速変化率)とその温度依存性 次に同一試料を一定温度に保持し、単軸応力 σ を変化させて1往復の伝ば時間 τ の変化を測定した。一定温度としては $T=5, 10, 15, 20, 25, 28^{\circ}\text{C}$ の6段階をとり、各温度で $\sigma=0$ から約16 MPa ごとに $\sigma=100$ MPa までの負荷と除荷を行った。ここでは無負荷時からの伝ば時間変化を $\Delta\tau^*$ とし、 $T=5^{\circ}\text{C}$ における応力による変化を図6に示した。 $\Delta\tau^*$ は σ に対して直線的に変化し、負荷と平行にかたよった横波では σ とともに増加し、負荷と垂直にかたよった横波および縦波では σ とともに減少する。これらの直線のこう配 $\partial(\Delta\tau^*)/\partial\sigma$ から求めた5, 20 $^{\circ}\text{C}$ の音弾性定数 $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\theta$

表1 音速 V_0 と音速の温度係数 L (S 45 C)

	Velocity (20 $^{\circ}\text{C}$) V_0 m/s	Temp. coef. L 1/ $^{\circ}\text{C}$	Kobori ⁽¹¹⁾	
			V_0 m/s	L 1/ $^{\circ}\text{C}$
Longitudinal	6.066×10^3	-1.16×10^{-4}	5.911×10^3	-1.49×10^{-4}
Transverse //	3.230	-1.54	3.167	-1.27
Transverse $\perp$	3.202	-1.38	3.170	-1.22

表2 5, 20 $^{\circ}\text{C}$ における音弾性定数 K (S 45 C)

		$(\times 10^{-7}/\text{MPa})$		
		Present 5 $^{\circ}\text{C}$	Present 20 $^{\circ}\text{C}$	Kobori ⁽¹¹⁾ 20 $^{\circ}\text{C}$
Longitudinal	K_L	41	28	29
Transverse //	K_1	-107	-83	-63
Transverse $\perp$	K_2	31	21	9

図5 温度-音速変化率の応力依存性

図6 応力による伝ば時間変化 (5 $^{\circ}\text{C}$)

$V_0/\partial\sigma$ を表2に示す。表2が示すように、音弾性定数の値は温度の増加とともに小さくなっている。各温度で得られた音弾性定数をプロットした図7は温度によるこの変化が直線的であり

$$\partial(\Delta V/V_0)/\partial\sigma = K + K'\theta$$

が成り立つことを示している。図7の直線のこう配として得られる音速の応力-温度係数 K' を K'_{II} と表すことにし、表3にその値を示した。

表3の K'_I , K'_{II} の値は含まれている誤差の検討がまだ不十分なものである。そこで実験した状態のうち応力差と温度差が最も大きい ($\sigma=0$, $T=5^\circ\text{C}$) と ($\sigma=82\text{ MPa}$, $T=28^\circ\text{C}$) を考えると、両状態での伝ば時間差のうち $K'\sigma\theta$ によるものは縦波、負荷と平行にかたよった横波、負荷に垂直にかたよった横波でそれぞれ約 26 , 70 , $38 \times 10^{-2}\text{ ns}$ である。これに対して今回のSA測定では伝ば時間変化の測定精度が $\pm 3 \times 10^{-2}\text{ ns}$ 程度であり、これは K' の値に対してそれぞれ ± 12 , ± 4 , $\pm 8\%$ 程度の誤差を生ずる。得られた K'_I と K'_{II} はこの誤差範囲では一致しており、また対応する K'_I と K'_{II} の大小関係には波による違いがあることから両者の平均値を K' の値とし、その誤差を上述のものとして表3に示した。

4. 考察と結論

温度-音速変化率 $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\theta$ の実験では $\Delta V/V_0$ が温度の一次式で表されることを明らかにした (結論1)。無負荷時における単位温度あたりの音速変化を表

表3 音速の応力-温度係数 K' (S45C)

	K'_I (Fig.5)	K'_{II} (Fig.7)	K' (mean)
Longitudinal	-1.04	-0.87	-1.0 $\pm$ 0.1
Transverse //	1.43	1.49	1.46 $\pm$ 0.06
Transverse $\perp$	-0.81	-0.71	-0.76 $\pm$ 0.06

図7 応力-音速変化率の温度依存性

す音速の温度係数 L の値は、表1に併記した同じS45C材に対する別の実験結果と比べて縦波で-22%, 横波で21, 13%ほど異なっている。これらのS45C材は母材が異なり、対応する音速にもそれぞれ3, 2, 1%の違いがあることから、 L にも組織異方性が影響を及ぼしていると考えられる。表4には、単位温度あたりの音速変化 LV_0 と二つの横波の L の相違率および組織異方性の程度を表す2横波の音速差率 (複屈折量) を示した。ただし、Chandrasekaran らによるA533B材の横波の L_1 , L_2 の違いは1.8%弱と小さく測定誤差と結論されている。しかしながら、特に今回のS45C材における L_1 と L_2 の違いは、これに対するSA測定誤差と考えられる $\pm 2\%$ 以上のものであり、組織異方性が相対的に強いことを反映していると思われる。表2の 20°C の値からわかるように、S45C材の音弾性定数 $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\sigma$ についても横波に関して母材によるかなりの違いがみられる。複屈折量の音弾性定数 K_1-K_2 で考えても30%近くの違いがあり、組織異方性が大きく影響していると考えられる。

表5には二次および三次熱弾性定数 ($T_0=20^\circ\text{C}$) を示した (結論2)。 λ , μ は音速 V_{L0} , $V_{T0}=(V_{//}+V_{\perp})/2$ より求めた。 ν_1 , ν_2 , ν_3 は表2の K とポアソン比 $\nu=0.30$, ヤング率 $E=21 \times 10^4\text{ MPa}$ を用いて、また λ' , μ' は表1の L と線膨張係数 $\alpha=11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を用いて式(8), (2)より求めた (ただし横波の L_T としては L_1 と L_2 の平均を用いた)。

温度-音速変化率 $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\theta$, 音弾性定数 $\partial(\Delta V/V_0)/\partial\sigma$ の実験ではこれらがそれぞれ σ , θ の一次式で表されることを明らかにし、両実験から求めた音速の応力-温度係数 K'_I , K'_{II} の平均値として K' を決定した

表4 単位温度あたりの音速変化
 $LV_0(\text{S45C})$ (m/s, $^\circ\text{C}$)

	Present	Kobori ⁽¹¹⁾	Chandrasekaran ⁽¹⁰⁾
Longitudinal	-0.70	-0.88	-0.645
Transverse //	-0.50	-0.40	-0.401 -0.474
Transverse $\perp$	-0.44	-0.38	-0.407 -0.483
$\frac{L_1 - L_2}{(L_1 + L_2)/2}$	0.11	0.04	
$\frac{V_{10} - V_{20}}{(V_{10} + V_{20})/2}$	0.009	-0.001	

表5 二次および三次の熱弾性定数 (S45C, 20°C)

Lamé consts $\times 10^4\text{ MPa}$		temperature derivatives $\text{MPa}/^\circ\text{C}$		3rd-order elastic consts $\times 10^4\text{ MPa}$		
λ	μ	λ'	μ'	ν_1	ν_2	ν_3
12.5	8.1	-19	-5	-39	-35	-21

表 6 温度による音速変化の応力依存性 Δ/σ

	($\times 10^{-4}/\text{MPa}$)		
	present (S45C)	Kobori ⁽¹¹⁾ (S45C)	Ref. (8) (A533B steel)
Longitudinal	9.9	7.3	5.88
Transverse //	-10.4	-5.5	5.20
Transverse $\perp$	7.0	5.2	-4.79

(結論 3). 温度-音速変化率の応力依存性を最初に指摘した Salama ら⁽⁹⁾は, これを

$$\Delta = \{(\partial V/\partial \theta)_\sigma - (\partial V/\partial \theta)_0\} / (\partial V/\partial \theta)_0 \\ = (K'/L)\sigma$$

と, σ の比例関係として報告している. 表 6 は表 1, 3 の L, K' より Δ/σ を求めて他と比較したものである. 今回の結果はいずれの値も大きさが他より大きく, 特に負荷方向にかたよった横波では 2 倍ほど大きくなっているがこれも相対的に強い組織異方性によるものと思われる. S 45 C 材に関する両結果は負荷方向にかたよった横波のみで $\Delta_1/\sigma < 0 (K'_1 > 0)$ となっており, 従来報告されている音弾性定数で K_1 のみが $K_1 < 0$ であるのと同じ傾向を示している. これに対して A 533 B 材の結果⁽⁸⁾では負荷に垂直にかたよった横波のみで $\Delta_2/\sigma < 0$ となっているが, 音弾性定数についても $K_2 < 0$ と判定できるデータを示しており, 使用した材料では二つの横波に関する傾向が従来報告されているものと逆になっている可能性が強い. 以上より, 材料および組織異方性の違いを考慮すれば, 表 6 で比較した温度-音速変化率の応力依存性 (音弾性定数の温度依存性) は同じ程度であると言える. なお, 式(8)で縦波を一例にして $(k_L + \nu/E)l_L = -0.29 \times 10^{-10}$, $k_L(l_L - a) = 1.6 \times 10^{-10}$, $b=0$ を用いて $K'_L \approx k'_L$ が示されることをつけ加えておく.

温度-音速変化率が応力の一次式

$$\partial(\Delta V/V_0)/\partial \theta = K'\sigma + L$$

で表されることは本研究でも明らかにされた.

Salama ら⁽⁷⁾はここに現れる音速の過度係数 L および応力-温度係数 K' が材料の特性値であるとして, 上の関係を残留応力の非破壊的測定に利用することを提案している. すなわち, まず同じ材料の L と K' を別に測定しておく. そして残留応力 σ_r が生じている試

料に適当な温度変化 $\Delta\theta$ を加え, これによる音速変化 $\Delta(\Delta V/V_0) = (K'\sigma_r + L)\Delta\theta$ を測定する. これより $\Delta(\Delta V/V_0)/\Delta\theta = K'\sigma_r + L$ を求め, すでに求めている L, K' を代入して残留応力 σ_r を決定する. しかしながら, この提案には温度変化 $\Delta\theta$ の与え方の問題以外に本質的問題点が存在する. それは表 1, 6 が示すように L, K' が材料の特性値ではなく, 母材によって異なると考えられる点である. L の違いは K' のそれに比べれば小さいが, これも応力の決定には極めて大きく影響する. 例えば負荷方向にかたよった横波に関して $K'\sigma + L$ を考えれば, $L_1 \approx -1.5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ に比べて $K'_1\sigma$ は $\sigma = 100 \text{ MPa}$ でも $K'_1\sigma \approx 0.15 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ と 1 けた小さいため, L の値に 10% の差異を許容すれば σ を決定することができなくなる.

L には音弾性定数 K と同様に三次の熱弾性定数が関係し, K' には四次の熱弾性定数も関係する. このような高次の熱弾性定数は同じ材料でも組織異方性により影響されると考えられるが, これについては試料の十分な熱処理も含めて今後より系統的に研究することが必要である.

文 献

- (1) Pao, Y. H., Sachse, W. and Fukuoka, H. (Mason, W. P. and Thurston, R. N. ed.), *Physical Acoust*, XVII (1984), Chap. 2, Academic.
- (2) 福岡・戸田, 材料, 35-396 (昭 61), 961.
- (3) King, R. B. and Fortunko, C. M., *J. Appl. Phys.*, 54-6 (1983), 3027.
- (4) Thompson, R. B., Smith, J. F. and Lee, S. S., *Rev. Prog. QNDE*, 2B (1983), 1339, Plenum.
- (5) Toda, H., Fukuoka, H. and Aoki, Y., *Jpn. J. Appl. Phys. Suppl.*, 23-1 (1984), 86.
- (6) Arora, A. and James, M. R., *J. Test. Eval.*, 10 (1982), 212.
- (7) Salama, K., Wang, J. J. and Barber, G. C., *Rev. Prog. QNDE*, 3B (1984), 1355, Plenum.
- (8) Chandrasekaran, N. and Salama, K. (Ruud, C. O and Green, R. E. ed.), *Nondestructive Methods for Material Property Determination*, (1983), 399, Plenum.
- (9) Salama, K. and Ling, C. K., *J. Appl. Phys.*, 51 (1980), 1503.
- (10) Iwashimizu, Y., *Proc. 17th Jpn. Congr. Mater. Res.*, (1974), 250.
- (11) 小堀, 文部省科研費成果報告書 (総合 A, 代表福岡秀和, 58350005), (昭 61), 61.