

超音波スペクトロマイクロスコピーによる 微小領域の弾塑性特性評価

長岡技術科学大学 工学部 機械系

助手 井原郁夫

(平成4年度奨励研究助成 AF-92034)

1. 研究の背景

材料の開発および加工技術の開発においては、各プロセスでの材料評価が不可欠である。近年では、材料の複合化、微小化にともない局所領域での材料評価のニーズが高まっている。これは材料の巨視的特性が微視的特性に密接に関連しているからである。特に材料の表面は外力や雰囲気の影響を顕著に受けるクリティカルな箇所であるため、表面近傍における微小領域の材料特性評価、特に力学特性の定量的評価は重要な課題となっている。本研究はこのようなニーズに応えるべく超音波法によるアプローチを行ったものである。超音波の音速および減衰特性は材料の弾性特性のみならず塑性特性の評価に対しても有効なパラメータとなることはよく知られている⁽¹⁾。これに着目した超音波による弾塑性特性評価に関する研究が数多く行われているが、測定精度、測定の空間分解能、さらには測定値の周波数依存性など多くの問題が残されており、実用レベルには達していないのが現状である。このような表面微小領域の評価の基礎となるのは精度の高い表面波速度および減衰特性の測定であることは言うまでもない。そこで本研究では、弾塑性特性評価のための基礎技術の確立を目的として、超音波反射率の局所的測定に基いた微小領域の表面波速度と減衰の評価に関する基礎的実験を行い、その周波数依存性評価を交えて本手法の測定精度、空間分解能および測定値の妥当性について検討し、力学特性評価法としての有効性を示した。

2. 表面波速度および減衰の評価法と実験方法

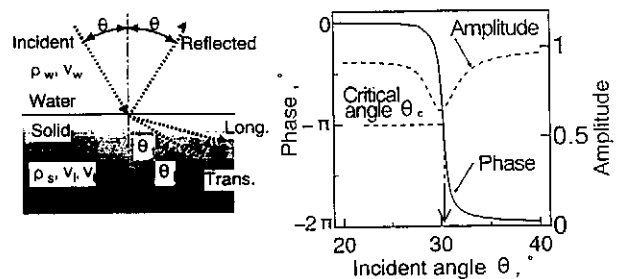
図1(a)に示すような液体/固体界面における液中からの平面波の反射を考える。このとき、入射波と反射波の振幅比として表される超音波反射率は、入射角 θ が縦波、横波に対する臨界角以上になると複素数となり、その位相と強度は入射角の変化とともに図1(b)のような挙動を示す。入射角約 30° 付近での位相と強度の急激な変化はその角度付近での表面波の励起によるものであり、位相変化が $-\pi$ radとなる入射角度が表面波の臨界角 θ_c に相当する。このとき表面波速度 v_{sw} は、この臨界角 θ_c と水の音速 v_w を用いてスネルの法則

$$v_{sw} = v_w / \sin \theta_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

より求められる。なお、 v_{sw} は反射率の強度変化から求めることもできる⁽²⁾。また、この反射率の強度変化の周波数依存性より表面波の減衰を評価できる。この評価法の詳細は文献⁽³⁾に譲るが、反射率強度が最小値を示す臨界周波数 f_c での減衰値 α_{sw} は近似的に

$$\alpha_{sw} = f_c v_w \rho_w / v_{sw}^2 \rho_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

より計算できる。ただし、 ρ_w は水の密度、 ρ_s は材料の密度である。図2は反射率の測定に用いた超音波スペクトラ



(a) 固体/液体界面での平面波の反射と屈折 (b) 反射率の位相と強度の変化

図1 表面波臨界角の測定原理

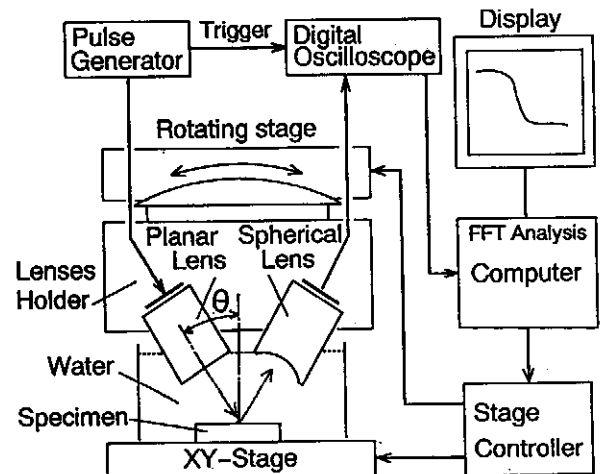


図2 超音波スペクトラム顕微鏡の構成図

顕微鏡⁽²⁾の構成図を示す。反射率は、平面レンズによりインパルス波を試料面上に照射し、その反射波を球面レンズにより受信することにより測定される。このとき、平面レンズによる高い角度分解能と、球面レンズによる高い空間分解能が得られる。すなわち、球面レンズの集束性と圧電体面での電氣的位相干渉により焦点領域からの特定方向の反射波のみが検出される。この反射波信号は材料表面の超音波反射率に比例することが明らかにされているので⁽²⁾、各入射角に対する反射波信号をFFT解析することにより、反射率の位相と強度を周波数 f と入射角 θ の関数として得ることができる。本研究では入射角 θ を 26° から 34° まで 0.1° 間隔で変化させて反射波を測定した。

3. 実験結果

図3は炭素鋼S45C焼入れ材の反射率の位相を測定した結果である。各周波数ごとの位相曲線から臨界面角を決定し、式(1)を用いて表面波速度 v_{sw} を求めることにより、 v_{sw} の周波数依存性が評価できる。ここで用いた材料は均質な等方性材料であるため v_{sw} は周波数によらず一定であるが、もし表面に顕著な加工層が存在していれば v_{sw} は周波数依存性を示すことになる。ところで、材料中での超音波

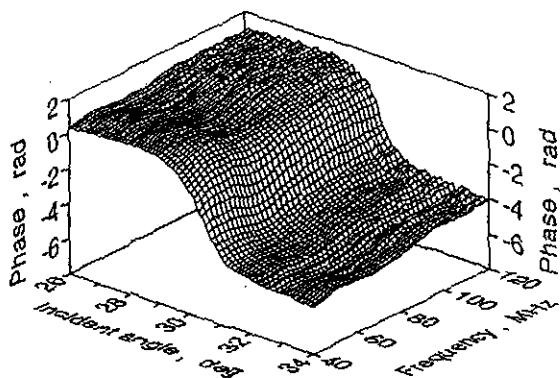


図3 測定した反射率の位相曲線

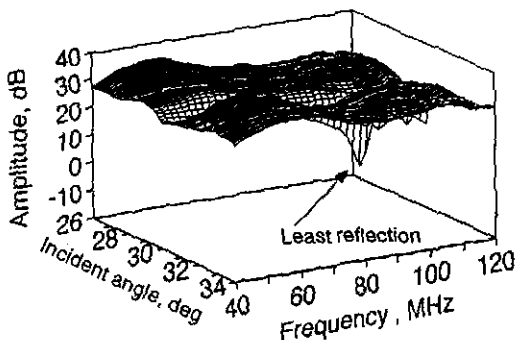


図4 測定した反射率の強度曲線

減衰が大きいときには臨界面角での位相変化が不明瞭になり v_{sw} を求めることが困難になるが、このような場合は反射率の強度を利用できる⁽²⁾。図4はS45C焼鈍材の反射率の強度の測定結果で、入射角 30° 付近で強度の低下が全周波数帯域にわたって見られる。この強度の極小位置が表面波の臨界面角であるので、これより式(1)を用いて v_{sw} を求めることができる。また、最小強度を示す臨界面角 f_c を求めることにより、 f_c での減衰が式(2)より計算できる。

ところで、 v_{sw} の測定精度を向上させるには、臨界面角をいかに精度よく決定するかがポイントとなる。本研究ではそのために次のような手法を提案した。図5はその説明図で、図中には測定した位相曲線とその位相曲線の勾配 $\Delta\phi/\Delta\theta$ を示してある。ただし、この各入射角における勾配 $\Delta\phi/\Delta\theta$ は、その角度位置の前後2点を含めた位相データから最小二乗法により求めた直線の勾配とした。図5からわかるように、この勾配はある入射角で明確なピークを示している。そこで、このピーク付近の数点に対し最小二

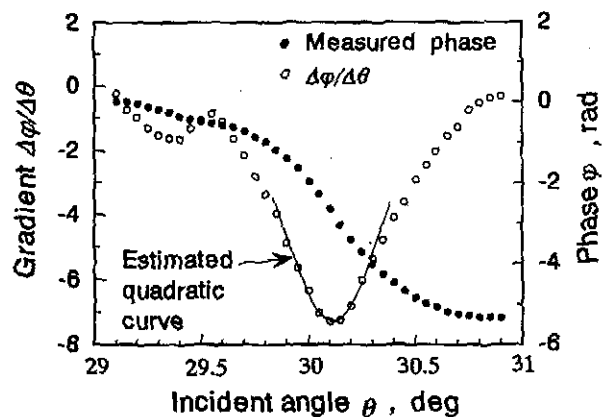


図5 位相曲線からの臨界面角の決定法

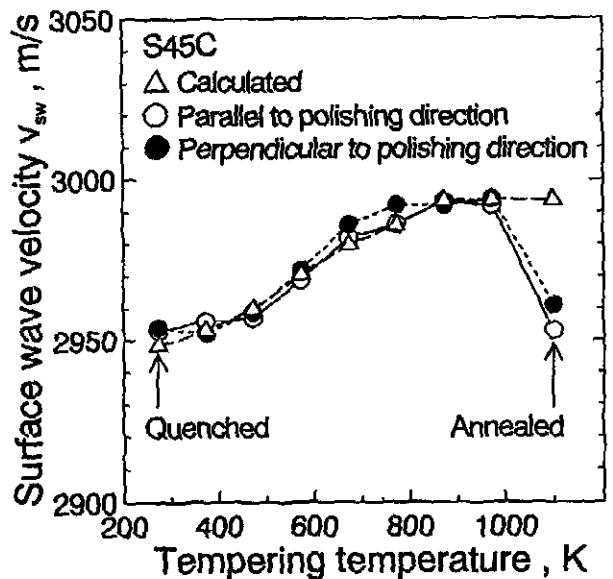


図6 炭素鋼の熱処理にともなう表面波速度の変化

乗法で二次曲線をあてはめ、その二次曲線のピーク位置を臨界角とした。二次曲線のあてはめには6~8点のデータを用いた。この手法による ν_{sw} の測定精度は周波数によらず0.03%程度であり、 ν_{sw} による弾塑性特性評価のためには十分な精度であると考えられる。また、測定の空間分解能は周波数に依存し、本実験における有効周波数帯域40~120MHzでは約25~85 μm であった⁽²⁾。

図6はS45Cの熱処理にともなう表面波速度の変化を測定した結果である。図中には巨視的弾性定数を用いて計算した各熱処理材の表面波速度の理論値を示してあるが、焼鈍材以外はこの計算結果と測定結果とがよく一致している。両者のこのような一致は、本手法による測定値の妥当性を示している。このような表面波速度の測定により、熱処理にともなうわずかな弾性率の変化をも正確に捕えることができることがわかる。焼鈍材の測定値が計算値と一致していないのは、この材料の組織がフェライトとパーライトの粗い二相混合組織であることに起因している。すなわち、フェライトおよびパーライト相の大きさが約10~20 μm であるのに対し、音速測定領域の大きさがこれと同程度であるため、各相による音速の違いや異方性の影響が現れたものと考えられる。この結果は、本手法により結晶粒オーダーの異方性の評価が可能であることを示唆している⁽²⁾。

S45C焼鈍材の表面波の減衰を評価したところ、 $\alpha_{sw} = 0.599\text{dB}/\lambda$ という結果が得られ、この値の妥当性も実証された⁽³⁾。このようにして評価された ν_{sw} や α_{sw} は材料の微小領域における弾塑性特性や応力状態を評価するための有効なパラメータとなると考えられる。

4. 結言および今後の課題

超音波反射率の局所的測定により表面微小領域の表面波速度の周波数依存性および減衰を精度よく評価する手法を確立した。これらの測定値は微小領域の弾性特性および塑

性変形量の定量的評価に有効なパラメータとなると考えられる。今後、弾塑性域での系統的な応力負荷実験を行い本手法の実用性を確認するとともに、結晶粒オーダーの力学特性評価を行う予定である。このような表面波によるスペクトロスコーピーは、材料の微視的特性に関する新しい情報を我々に提供してくれるものと期待される。

謝 辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団の奨励研究助成により行われたものであり、ここに財団に対し厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) 御子柴・生嶋、超音波スペクトロスコーピー「応用編」、(1990), 147, 培風館。
- 2) 井原、相澤、木原、日本機械学会論文集、59-564A (1993), 1909。
- 3) Ihara, I., Aizawa, T. and Kihara, J., Electron. Lett., 29 - 22 (1993), 2999。

本研究に関連した発表論文

- 1) 井原郁夫、相澤龍彦、木原諄二：日本機械学会論文集、59-564A(1993), 1909。
- 2) 井原郁夫、相澤龍彦、木原諄二：日本機械学会第70期通常総会講演会論文集(I)、930-9(1993), 525。
- 3) 井原郁夫、相澤龍彦、木原諄二：日本機械学会北陸信越支部第30期総会講演会論文集、937-1(1993), 57。
- 4) Ikuo IHARA, Tatsuhiko AIZAWA and Junji KIHARA : Sixth International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials Final Program and Abstracts, (1993), 18。