解 説

色材, 72 [9], 575-580 (1999)

超音波計測技術の進歩と適用

廣瀬徳豊*

1. はじめに

昨年映画でも話題になったタイタニック号の事故は超音波計測技術の発展に大きな意味を持つことになった¹⁾。タイタニック号の事故は視覚では確認しにくい海面下の氷山が原因であったが、潜水艦のような人工物も観察する必要が生じた。浮遊している氷山と異なり、潜水艦は移動することも攻撃することも可能である。攻撃されるほうとしては潜水艦の位置を捕らえるため、音響探査技術の開発は急務となり、超音波計測技術が研究されるようになった。戦争中は軍事的利用が主であったが、戦後は魚群探知機や非破壊検査技術として、さらに近年では音波物性測定技術として発展してきている。

2. 超音波の発生技術

超音波とは耳に聞こえない音であり、周波数が 20 kHz 以上とされている。声あるいは可聴域の音であれば耳で検出可能であるので、我々は日常生活で可聴域の音を用いた非破壊検査を行っている。例えば、スイカの熟れ具合の判断や缶詰の良否判断などにである。また、夜中に旅館などの建物の軋む音を聞いて建物の古さを推定したりする。前者の例は、材料への超音波送受信による評価方法である。後者の例は、物質そのものが発生した超音波を受信する方法であり、アコースティックエミッション (Acoustic Emission : AE) 法²⁾と呼ばれている。AE は塑性変形、クラックの発生と成長および変態などにより、貯えられたひずみエネルギーが解放さ

れ弾性波が放出される現象である。

本稿では材料への超音波送受信による評価方法について紹介する。

音速 (v)、周波数 (f) および波長 (λ) の関係は式 (1) で表わされる。

$$v = f \cdot \lambda \quad (1)$$

伝播媒質中の音速が一定ならば、分解能の向上には式 (1) より高周波数の超音波を用いて波長を短くする必要がある。

人間の可聴域以上の超音波を送受信するには超音波を発信する道具すなわち超音波振動子が必要である。現在の超音波振動子は圧電効果の発見がもとになっている。

圧電素子は発信時に電気的信号を振動に変換し、受信時に振動を電気的な信号に変換する。水晶の圧電効果は 19 世紀に発見され³⁾、水晶以外にも圧電効果を有する材料が使われるようになってきている。最近では圧電素子を用いず、レーザにより超音波を励起する方法も報告されている⁴⁾。

3. 超音波を用いた評価手法

本稿では超音波利用による材料の内部と表面近傍の評価について示す。

媒質中を伝播している超音波は、界面部で反射するものと透過するものに分かれる。界面での超音波の反射と

平成 11. 6. 15 受理

Progress and Application of Acoustic Measurement Technique

Norimitsu HIROSE

* 東京都城東地域中小企業振興センター
東京都葛飾区青戸 7-2-5 (〒125-0062)

〔氏名〕ひろせ のりみつ

〔現職〕東京都城東地域中小企業振興センター 主事

〔趣味〕スポーツ観戦 (主に格闘技系)

〔経歴〕平成元年東京農工大学工学部材料システム工学科卒業、平成 2 年東京都立工業技術センター勤務、平成 9 年より現職、平成 11 年博士 (工学)

図-1 超音波の伝播モデル図

図-3 超音波パルス法での超音波波形

図-2 底面での超音波反射モデル

図-4 $V(z)$ 曲線の形成原理図

透過は材料の音響インピーダンス（密度×音速）の影響を受ける。例えば図-1に示すように、媒質1と媒質2の界面で垂直に超音波が入射した場合、界面での反射率（ R ）は式(2)⁶⁾で表わされる。

$$R = (\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1) / (\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1) \quad (2)$$

本稿では主に反射型超音波顕微鏡での実例を示し、界面での反射率の違いを像の濃淡として示す。

3.1 内部評価

内部評価は物性の評価と欠陥の検出に分けられる。物性の評価には、通常音速や減衰係数測定が行われる。これらは素材によっても異なる。また、鋼を熱処理した場合のように組織が異なる場合でも変化する⁶⁾。超音波のパルス波を用いて音速や減衰係数を求める基本的な方法を以下に示す。

図-2のように試料の底面からの第1反射波と第2反射波は、オシロスコープ上で図-3のように示される。第1反射波および第2反射波の到達時間を T_1 、 T_2 とし試料の厚さを L とすれば音速（ v ）は

$$v = 2L / (T_2 - T_1) = 2L / \Delta t \quad (3)$$

となる。また第1反射波と第2反射波は振幅が異なり、それぞれの振幅を I_1 、 I_2 とすれば減衰係数（ α ）は

$$\alpha = 20 \log_{10}(I_1 / I_2) / 2L \quad (4)$$

となる⁷⁾。材料固有の超音波の減衰ばかりでなく組織の影響や気孔の影響で減衰係数は変化する。減衰係数をデシベル／超音波の伝播距離（dB/m や dB/cm）で表現する場合と単純に振幅（電圧）比で表す場合もある。本稿での超音波顕微鏡では振幅比に対応した濃淡あるいはカラーで画像化している。

音速とヤング率（ E ）や剛性率（ずれ弾性率： G ）、ポアソン比（ σ ）との関係⁸⁾は、縦波音速（ v_l ）および横波音速（ v_s ）から以下の式で計算される。

$$E = \rho v_s^2 (3v_l^2 - 4v_s^2) / (v_l^2 - v_s^2) \quad (5)$$

$$G = \rho v_s^2 \quad (6)$$

$$\sigma = (v_l^2 / 2 - v_s^2) / (v_l^2 - v_s^2) \quad (7)$$

音速や減衰係数の求め方にはいろいろな方法があり、さらにフーリエ変換などの信号処理を用いて詳細な物性評価が行われている⁹⁾。

3.2 表面近傍の評価

固体あるいは液体の表面には、表面を伝播する弾性表面波が発生する。この波のエネルギーは表面近くに集中

し、1 波長程度といわれている¹⁰⁾。つまり、表面波の音速や減衰を調べることで表面近傍の音波物性を評価することができる。さらに超音波顕微鏡を用いることで微小部位の弾性表面波を測定することが可能である。通常、超音波顕微鏡の場合は音波伝達用の接触媒質“カップラー”に水を使用しており、試料表面の弾性波は水中にエネルギーを漏洩するので漏洩弾性表面波の音速を測定している。超音波顕微鏡で表面波音速を測定する場合、 $V(z)$ 曲線法¹¹⁾が用いられる。 $V(z)$ 曲線とは、試料表面と音響レンズの焦点との距離（デフォーカス量） z を変化させたときに得られる反射波振幅 V を記録したものである。超音波顕微鏡では、図-4 に示すような音響レンズを用いる。試料に音響レンズを近づけると臨界角 θ_R で入射した縦波は表面波にモードが変わり、表面を伝播する。表面波のエネルギーの一部がカップラー中に漏洩し θ_R で一部が音響レンズに戻る。

媒質 1 から媒質 2 に θ_1 で超音波が入射し、 θ_2 で屈折すれば、Snell の法則から $v_1/v_2 = \sin\theta_1/\sin\theta_2$ の関係を得る。 θ_R で入射した縦波（音速 v_w ）が、表面波（音速 v_R ）に変わる場合、屈折角が 90° になるので $v_w/v_R = \sin\theta_R$ となる。内部探傷のような場合、表面波は画像を複雑にするため、表面波が発生しない狭い開口角の音響レンズを用いる。

図-4 において、経路 1 と経路 2 を通る成分はそれぞれ干渉し合う。幾何光学的にこれらの経路差（ Δz ）を計算すると次の関係が導ける。

$$\Delta z = \lambda/2(1 - \cos\theta_R) = v_w/2f(1 - \cos\theta_R) \quad (8)$$

ここで、 λ はカップラー中を伝播する超音波の波長、 f は超音波の周波数、 θ_R は臨界角、 v_w はカップラー中を伝播する超音波音速である。また、 $v_w/v_R = \sin\theta_R$ の関係から式(8)は

$$v_R = v_w/[1 - (1 - v_w/2f\Delta z)^2]^{1/2} \quad (9)$$

となる。これらの関係は幾何光学的に Weglein らによって提案され^{12, 13)}、Pamon ら¹⁴⁾によって図-4 のように修正された。

図-5 に $V(z)$ 曲線の例を示す。図中のデフォーカス量とは図-4 での z 量である。試料表面が音響レンズの焦点と一致しているとき $z = 0$ とし、音響レンズが試料に近づく方向を負の方向とする。反射波振幅 V は表面波速度計算には直接関係がないが、横軸デフォーカス量での山と山あるいは谷と谷の間隔が式(9)での Δz であり、弾性表面波音速を計算することができる。

弾性表面波を測定することで、加工変質層の厚さ評価

図-5 $V(z)$ 曲線例

¹⁵⁾を行ったり、表面波音速から逆解析により弾性係数を求める研究¹⁶⁾もなされている。

また、この弾性表面波音速は結晶方位で異なり¹⁷⁾、結晶ごとに $V(z)$ 曲線にずれが生じる。その結果、 $V(z)$ 曲線での振幅のずれが大きい z 位置で超音波顕微鏡観察を行うと、個々の結晶を観察することも可能である。

4. 観察および評価例

以下の例は反射型超音波顕微鏡を用いた結果である。

4.1 多孔質体の評価

多孔質体の弾性率は気孔率に依存する¹⁸⁾。多孔質体である焼結鉄を超音波パルス法により測定した結果を図-6¹⁹⁾に示す（使用周波数：5 MHz）。この図には音速測定結果および式(5)―(7)から得たヤング率、剛性率、ポアソン比の結果を示している。図から分かるように気孔率の増加にともない、いずれの値も減少している。還元鉄粉焼結体は噴霧鉄粉焼結体に比べ微細な気孔を多く含む。この影響は音速、ヤング率や剛性率ではわずかであるが、ポアソン比には大きな違いとして表れる。

圧粉成形時の加圧方向（厚さ方向）と超音波伝播方向が同じ場合、試料の厚さの影響は見られない¹⁹⁾。そこで、加圧方向および超音波伝播方向を同一とし、図-6 の関係を引張試験片に適用した結果を図-7 に示す。図-7 は内部像（使用周波数：25 MHz、底面からの反射強度を画像化した超音波顕微鏡像）(a)、各部位の音速測定結果と図-6 を用いて導いた気孔率分布 (b) および引張試験後の破断部位 (c) を示している。(a) においては矢印部が高気孔率部位であり、(b) においては下線のある気孔率が各試料での高気孔率部位である。それらの部位と破断部位とは一致しており、引張破断に対して

図-6 気孔率と音速，弾性率およびポアソン比との関係

気孔率分布が影響している。

4.2 塗膜の膨れ評価

パルス波の場合は図-3のように，反射波を時間で分離することが可能である。この応用例を図-8（使用周波数：25MHz）に示す。この試料はSPCC-SB鋼板上にアルキド樹脂塗料を塗布したものである。この試料を3%食塩水中に浸漬し，所定の時間経過したものを超音波顕微鏡観察した²⁰⁾。ここでは，膨れ部の反射超音波を検出し画像化した。時間の経過とともに膨れの分布は変化しており，72時間浸漬した試料にはほとんど見られない膨れが，240時間浸漬後には認識できるようになった。矢印1のように発生後サイズが変化しないものと，矢印2のように成長しているものが見られた。また，時間の経過とともに新規に発生した膨れ部も見られた。超音波顕微鏡に限らず超音波を用いる場合，一般に水や油などのカップラーを必要とする。腐食試験のように，水中で試験し，観察時に空気に触れることを避けたい場合などに超音波顕微鏡の使用は有効である。

図-7 引張試験前の超音波顕微鏡像と気孔率分布および引張試験後の破断部位との関係

4.3 表面下の欠陥観察

前述したように，分解能を上げるには高周波数の超音波で測定する必要がある。高い周波数は低い場合に比べ超音波の減衰が大きいので，高周波数を用いた場合は，表面近傍を高分解能で観察する場合に使用される。

図-9はスクラッチ試験（引っかき試験）を行ったTiNコーティング試料の観察結果（使用周波数：200MHz）である。図中のモデル図において脱落やはがれた部位（矢印1や3）は光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡で観察可能である。矢印2のような部位を光学顕微鏡で観察するとコーティング膜には変化が見られないが，この部位の超音波顕微鏡像の濃淡は他の部位と異なっている。この場合，図-1において媒質1がTiNであり媒質2が空気層といえる。空気層や真空層の音響インピーダンスは0あるいはそれに近いので，式(2)の界面での反射率は $R \approx 1$ となり全反射する。この反射強度の違いが

図-8 塗料／鋼板界面に発生した膨れの分布状態

図-9 スクラッチ痕の超音波顕微鏡像

図-10 鋼の焼割れ部の超音波顕微鏡像

図-11 繊維強化プラスチックの超音波顕微鏡像
(白部：ガラス繊維，黒部：プラスチック)

画像の濃淡として表れる。

図-10 は鉄鋼材料の焼割れ部（矢印1）を観察（使用周波数：400MHz）したものであり、矢印2の部位は表面下に存在している微小亀裂である。同一観察倍率の光学顕微鏡では矢印2のような表面下の欠陥の観察はできない。超音波顕微鏡を用いると、表面の状態だけでなく、表面下の状態も観察できるので擬似的な三次元状態を把握することが可能である。

4.4 繊維強化プラスチックの繊維配向観察

図-11 はガラス繊維強化プラスチックの観察結果（使用周波数：400MHz）である。繊維強化プラスチックは、繊維が一方に配向すると強度の異方性が生じる。

プラスチック部とガラス繊維部の光学的な反射では区別がつかないが、プラスチックとガラス繊維部では音響インピーダンスが異なるので超音波顕微鏡では反射強度の違いとして画像化される。この超音波顕微鏡像と標準的な干渉縞モデルとの比較から配向状態を評価する方法も検討されている²¹⁾。

5. おわりに

本稿では超音波計測技術として超音波顕微鏡の適用例を示した。超音波顕微鏡以外にも多くの研究がなされており、国内外を問わず超音波に関するシンポジウムや国際会議が行われている。また、学会誌や商業誌にも超音波を用いた評価手法が紹介されている。

超音波計測技術では、必ずしも高価な装置が必要というわけではなく簡単な自作システムでも試験が可能である。また、超音波計測技術に必要な波形解析や画像処理方法の研究は日々進歩している。それ以上にそれら进行处理するコンピュータの開発速度は速いので評価や解析の速度も向上している。

問題は、画像が複雑であったり、なぜそのような画像が得られるか不明な場合がある。モデルがあり、観察した結果とそのモデルと一致する場合もあるが、多くの研究ではまず画像が得られ、その画像が得られた理由を検討している。そのため筆者は超音波顕微鏡像を光学顕微鏡像、走査型顕微鏡像、X線透過像などと比較し検討している。

それゆえ多くの研究者により多くの分野で利用され多くの事例が紹介されることが、超音波計測技術の発展につながると考えられる。

文 献

- 1) 高木堅志郎：金属，**68**，673 (1998)。
- 2) 志波光晴，米山弘志，佐藤正信：金属，**68**，717 (1998)。
- 3) 本多敬介：“超音波の世界”，p. 12，日本放送出版協会 (1994)。
- 4) K. Yamanaka : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 2939 (1997)。
- 5) 和田八三久：“音波物性”，p.17，共立出版 (1969)。
- 6) E. P. Papadakis : *J. Appl. Phys.*, **35**, 1474 (1964)。
- 7) Measurement of the Apparent Attenuation of Longitudinal Ultrasonic Waves by Immersion Method, ASTM E664-83.
- 8) 金属材料の高温ヤング率試験方法, JIS Z 2280, (1993)。
- 9) 福岡秀和，戸田裕己，平尾雅彦：“音弾性の基礎と応用”，p. 33，オーム社 (1993)。
- 10) 福岡秀和，戸田裕己，平尾雅彦：“音弾性の基礎と応用”，p. 17，オーム社 (1993)。
- 11) 福岡秀和，戸田裕己，平尾雅彦：“音弾性の基礎と応用”，p. 43，オーム社 (1993)。
- 12) R. D. Weglein and R. G. Wilson : *Electron Lett.*, **14**, 352 (1978)。
- 13) R. D. Weglein : *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 179 (1979)。
- 14) W. Parmon and H. L. Bertoni : *Electron Lett.*, **15**, 684 (1979)。
- 15) I. Ishikawa, K. Kanda and K. Katakura : *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, **21**, 27 (1987)。
- 16) Y. Xu, T. Aizawa and J. Kihara : *Material Transactions, JIM*, **38**, 536 (1997)。
- 17) J. Kushibiki, N. Chubachi and E. Tejima : *Ultrasonics International 89 Conference Proceedings*, 736 (1989)。
- 18) J.C. Wang : *J. Mater. Sci.*, **19**, 801 (1984)。
- 19) 廣瀬徳豊，浅見淳一，棚木敏幸，湯浅真，関根功：粉体および粉末冶金，**45**，1116 (1998)。
- 20) A.M. Monsada, Y. Sekiyama, S. Hayashi, M. Yuasa, I. Sekine, N. Hirose and T. Tanaki : *SHIKIZAI*, **72**, 209 (1999)。
- 21) 川村宗弘，守田了，田中稔，橘輝夫：テレビジョン学会技術報告，**20**，1 (1996)。