

## 実用化研究報告

# 固体接触界面における高周波数超音波伝達とその材料評価への応用

東北大学大学院工学研究科  
准教授 燈明 泰成

## 1. はじめに

金属材料同士を接触させ、一方より音波を入射した場合、音波は接触界面でほとんど反射される。これは固体同士の接触界面が一般的に部分接触しており、界面には薄い空気層が存在するためである（図 1a）。したがって音波のこの性質を利用して、材料内部のはく離や、材料同士の接合状況が検査できる。中でも波長の短い超音波（周波数 20kHz 以上の音波であって、人間の耳に聞こえない程の高い声）を利用して高分解能な検査が実施できるが、上述のとおり超音波は空気層を嫌うため、検査時には超音波探触子と検査対象物との間に固体以外の媒体が必要となる。

工業製品（電子部品、等）の検査では通常、水が媒体として用いられる。当然のことながら、液体と固体との界面には空気層が存在しないので、超音波は固体に良好に伝達できる（図 1b）。また人体の超音波検査では粘度の高いゲルが用いられるが、十分な流動性を有するゲルを用いた場合も空気層が排除でき、超音波を良好に伝えることができる。ところで工業製品の検査において、例えば電子部品は水を嫌う。そこでこのような対象に対して、超音波検査はその利用が制限されることがある。

そこで我々は水と検査対象物との間に薄膜を介し、薄膜（固体）／検査対象物（固体）なる固体接触界面を介して高周波数超音波を伝達するドライコンタクト超音波法（図 1c）を開発した<sup>(1)</sup>。最近、理論モデルを構築して当該超音波伝達系で音響共鳴現象が生じることを見出し、これを利用してさらなる伝達効率の向上を実現すると共に、実用化に向けた研究を実施しているので報告したい。

## 2. 固体接触界面を介した超音波伝達

上述のとおり、従来の超音波法では液体媒体を利用することによる制約がある。そこで水等の媒体を用いず超音波を送受信する手法の研究が世界的に進められているが、そのような手法では高分解能検査に不可欠な十分な強度を有する広帯域高周波数超音波を利用することが困難な状況にある。検査時にサンプルが水に濡れる問題は、例えば、

水と検査対象物との間に薄膜を挿入してやることで解決できそうであるが、この場合は超音波伝達時の固体接触界面の変位不連続（空気層の存在）が問題となる。

Drinkwater らがラバー膜を用いて行った実験によると、このような固体接触界面を介して超音波を入射するには非常に高い圧力（対象サンプルによっては破損するほど）の付与が不可欠である<sup>(2)</sup>。そこで我々は視点を変え、挿入する固体薄膜の材質を選定すると共に、薄膜／サンプル界面に存在する空気を真空ポンプにより排気し、同時に同界面に負圧力（0.1MPa）を作用させることで、広帯域高周波数超音波の送受信にはじめて成功した<sup>(3)</sup>。

### 3. 固体接触界面を介した超音波伝達の理論モデル

固体薄膜を介する超音波伝達様式の理論モデルを考える。固体薄膜のない、従来水没時と比較した、固体薄膜挿入時の超音波伝達効率 $\gamma$ は次式で与えられる。

$$\gamma = \varphi_1 / \varphi_2 = \theta \xi \psi \quad \dots (1)$$

式中の $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ はそれぞれ薄膜挿入、非挿入下で得た目的界面からの反射エコーの振幅スペクトルである。この $\gamma$ は値が大きいほど超音波伝達効率が良いことを意味する。 $\xi$ は薄膜内での超音波減衰損失、 $\psi$ は薄膜／サンプル界面での信号損失を表し、共に1以下の値（損失因子）である。そこで超音波伝達効率を向上させるためには、薄い膜を用いて $\xi$ を1に近づけること、また、薄膜を対象サンプルの表面に密着させて $\psi$ を1に近づけることが重要である。一方、 $\theta$ は音響インピーダンス整合に関する項であり、薄層を通過する波の式<sup>(4)</sup>を参照して、次式を得る<sup>(5)</sup>。

$$\theta = [\cos^2(0.5 \pi f / f_r) + \theta_r^{-1} \sin^2(0.5 \pi f / f_r)]^{-1} \quad \dots (2)$$

ここで $f$ は周波数、 $f_r (= c_L / 4d)$ は共鳴周波数、 $c_L$ は薄膜内での縦波音速、 $d$ は薄膜厚さである。 $\theta_r$ は $f = f_r$ において現れる $\theta$ の最大値であり、

$$\theta_r = [m(1+\zeta)]^2 / [\zeta(1+m^2)^2] \quad \dots (3)$$

で与えられる。ここで $\zeta = Z_S / Z_W$ 、 $m = Z_L / \sqrt{Z_W Z_S}$ 、 $Z_W$ 、 $Z_S$ および $Z_L$ はそれぞれ水、サンプル、薄膜の音響インピーダンスである。

図2aに $\theta_r$ の等高線図を $\zeta$ と $m$ の関数として示す。 $\theta_r$ は $\zeta > 1$ 、かつ $1 / \sqrt{\zeta} < m < \sqrt{\zeta}$ の領域において1を上回る。こ

のことは、固体薄膜を介することでサンプルを水に濡らさないことに加えて、水没時よりも高効率に超音波が伝達できる可能性があることを意味する。例として、水からシリコンへの超音波伝達を考える。シリコンの音響インピーダンスは ( $Z_s = 21.8 \text{ MNm}^{-3}\text{s}$ ) 水のそれ ( $Z_w = 1.5 \text{ MNm}^{-3}\text{s}$ ) と比べて高く、 $\zeta = 14.5$  となる。高分子膜の中でも音響インピーダンスが大きなポリ塩化ビニリデン (PVDC) 膜 ( $Z_L = 3.2 \text{ MNm}^{-3}\text{s}$ ) を挿入した場合の  $m$  は 0.56 であり、 $\theta_r = 3.0$  となる。図 2b にこの場合の  $\theta$  と規格化周波数  $f/f_r$  との関係を示す。図より  $\theta$  は、 $f/f_r$  が 0 から 2 において 1 を上回り、 $f_r$  近傍の  $2f_r$  で与えられる広い周波数帯域において周波数成分を増幅する周波数フィルタとして機能することがわかる。

#### 4. 高分解能な非水没超音波材料評価技術

ドライコンタクト超音波検査の実施例を図 3 に示す<sup>(6)</sup>。検査した電子部品はシリコンチップを微細なはんだボール (直径 0.35mm) によりプリント基板と接続したものであり、チップ実装前に裏面のはんだボールの 1 つを欠落させてあった (図 3a)。ドライコンタクト超音波検査には厚さ  $9\mu\text{m}$  の PVDC 膜 ( $c_L = 1964 \text{ m/s}$ ) を用いた。したがってこの場合の共鳴周波数は  $f_r = 54.6 \text{ MHz}$  となり、挿入した膜は 0 ~ 109.1 MHz において図 2b に示す広帯域周波数フィルタとして機能することが期待できる。

図 3b、c はそれぞれ、公称周波数 100MHz の広帯域超音波探触子を用いて PVDC 膜挿入下と従来水没下で得た音響画像である。いずれも図中矢印で示す欠陥接合部を可視化できているが、全体的にドライ音響画像の方が水没画像と比べて鮮明である。これは期待した通りに PVDC 膜が音響整合層として機能し、シリコンチップ下部の目的界面からの反射エコー強度が増大したことで SN 比が向上したためと考えられる。実際にドライ超音波検査では水没検査より高強度の反射エコー (およそ 12dB の差) が目的界面より得られた。

音響整合層が広帯域高周波数超音波の高効率伝達に寄与することは知られており、医療用超音波探触子の設計等で利用されているが<sup>(7)</sup>、超音波探触子とサンプルとの間の超音波伝達系内において、接着層を用いることなく固体音響整合層を実現した例はおそらく我々が初めてである。

#### 5. 高精度な極薄材料の材料評価技術

固体接触界面を介した高周波数超音波の伝達実験で観察された音響共鳴現象を利用して、薄膜材料の評価が可能

である。ここでは例として両面塗装鋼板の膜厚測定について紹介したい<sup>(8)</sup>。

通常、車両フレームの鋼板の両面には防錆、耐食性の向上を目的として塗料が施工される。広く普及している超音波膜厚計は塗膜の表裏面エコーを収録し、両エコーの伝搬時間差から膜厚を算出するものであるが、塗膜が薄い場合はエコーの重畳により測定が困難となる。一方、開発した新しい膜厚測定原理は、塗膜の表裏面エコーが重畳した場合に観察される音響共鳴現象を活用する点に特徴があり、従来の超音波膜厚計とその原理と適用範囲が全く異なるものである。

図 4a に示す、水、サンプル、空気からなる超音波伝達系を考える。サンプルの両表面は塗膜で覆われている。超音波探触子から発せられた超音波が水を介してサンプルに到達し、サンプルの裏面で反射したエコーが再び探触子で受信される。表面および裏面の塗膜厚さがそれぞれ 15、20 $\mu\text{m}$  の両面塗装サンプルから得た裏面エコーと、参照サンプル（塗装なし）から得たそれとの振幅スペクトル比の計算例を図 4b に示す。有効な周波数帯域において振幅比が極大値と極小値を取っている。極大値は表面塗膜に対する共鳴周波数であり、図 2b と同じである。また極小値は裏面塗膜に対する共鳴周波数である。先述のとおり共鳴周波数は膜厚と関係する ( $f_r = c_L / 4d$ ) ので、塗膜の音速が既知であれば、測定した共鳴周波数より塗膜の厚さを求めることができる。

図 4c、d に実際にサンプルを作製して測定した両面同時膜厚測定結果を示す。図 4c は塗膜厚さの厚い面を表として両面塗膜厚さ測定を行った結果であり、図 4d は当該サンプルを裏返して（即ち塗膜の厚い面を裏として）測定を行った結果である。図中●印は表面膜厚、○印は裏面膜厚のデータである。また図中横軸はいずれも実験終了後にサンプルを切断して顕微鏡観察により測定した塗膜の実測値である。両図共にデータは傾き 1 の直線上に分布しており、両面塗膜の厚さが本手法により高精度に同時測定できたことがわかる。

## 6. 実用化に向けて

固体接触界面における高周波数超音波伝達について研究してきた成果を実用化すべく、ドライコンタクト超音波法については科学技術振興機構 平成 23 年度研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) の支援を得て JFE テクノリサーチ (千葉県) と試作機を開発し、実用化を進めている。また音響共鳴現象を利用した膜厚計測法については、

関東自動車工業株式会社（岩手県）との共同研究の成果であり、現在同社と試作機を開発するなど、実用化に向け研究を進めている。

### 謝辞

本稿の執筆に際し有益なご討論をいただいた東北大学坂真澄教授に感謝の意を表します。また本研究の一部が（財）インテリジェント・コスモス学術振興財団 平成 22 年度実用化研究への助成により行われたことを記し、ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) 燈明・坂, 特許第 3709559 号 (2005).
- (2) B. Drinkwater, R. Dwyer-Joyce & P. Cawley, *J. Acoust. Soc. Am.* 101 (1997) 970.
- (3) H. Tohmyoh & M. Saka, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* 50 (2003) 661.
- (4) L.M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, Academic, New York, (1960).
- (5) H. Tohmyoh, *J. Acoust. Soc. Am.* 120 (2006) 31.
- (6) H. Tohmyoh & M. Saka, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* 51 (2004) 423.
- (7) C.S. Desilets, J.D. Fraser & G.S. Kino, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* SU-25 (1978) 115.
- (8) H. Tohmyoh, T. Sunaga & M. Suzuki, *Rev. Sci. Instrum.* 83 (2012) 034903.

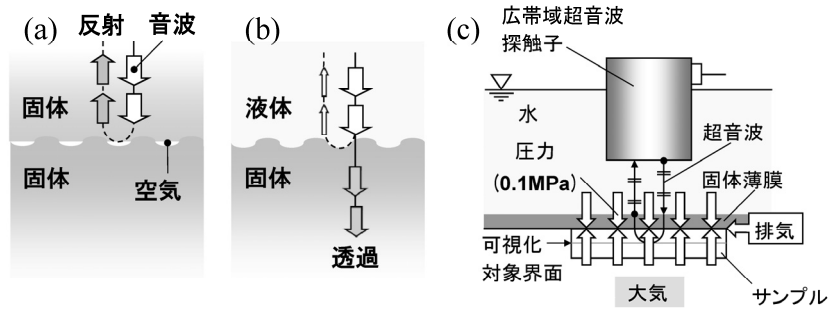


図 1 固体接触界面を介した高周波数超音波伝達について：(a) 固体と固体との接触界面、(b) 液体と固体との接触界面、(c) ドライコンタクト超音波法の原理

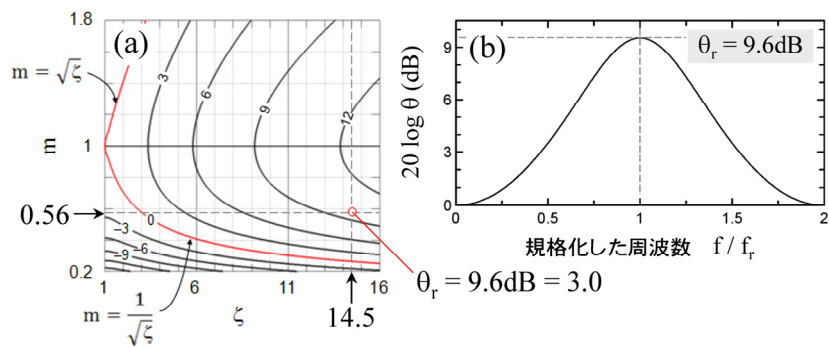


図 2 超音波伝達系の音響整合について：(a)  $\theta_r$  の等高線図 (dB 表示)、(b)  $\theta$  の周波数特性 ( $\theta_r = 9.6\text{dB}$ )

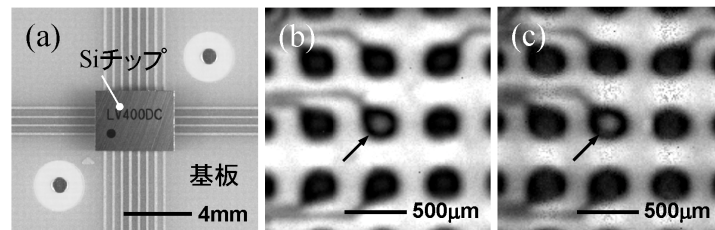


図 3 シリコンチップ下部の検査について：(a) 検査した電子部品サンプル、(b) ドライ音響画像、(c) 従来水没音響画像

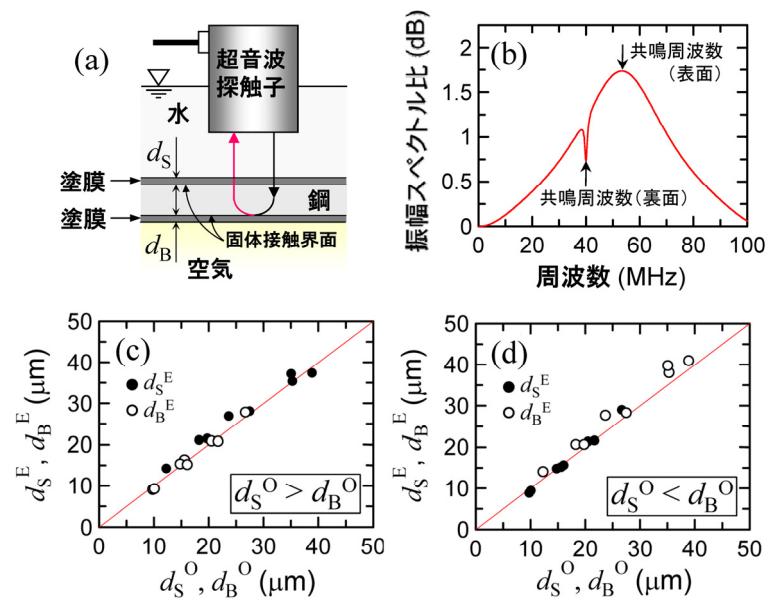


図4 両面塗装鋼板の膜厚測定について：(a) 超音波伝搬モデル、(b) 振幅スペクトル比の一例、(c) 塗膜厚さ測定結果