The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	空中超音波センサによる非接触非破壊評価法の鋼板接着部への適用性検討
Author(s)	林, 高弘; 村瀬, 守正; 北山, 綱次 他
Citation	自動車技術会論文集. 2012, 43(5), p. 1157-1162
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/84492
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

空中超音波センサによる非接触非破壊評価法の鋼板接着部への適用性検討*

林 高弘[1)] 村瀬 守正[2)] 北山 綱次[3)] 足立 裕[4)]

Non-contact Non-destructive Evaluation for Adhesives between Steel Plates Using Air-coupled Ultrasonic Sensors

Takahiro Hayashi Morimasa Murase Tsunaji Kitayama Hiroshi Adachi

As expanding the usage of adhesives in automotive bodies, non-destructive inspection techniques for them are increasingly required. The aim of this study is to evaluate adhesive regions with non-contact air-coupled ultrasonic technique. First, ultrasonic transmittance of steel plates was investigated theoretically and experimentally. As a result, transmitted waves at adhesive regions can be detected using oblique incidence and reception where the sensor angle is adjusted to the critical angle of A0 mode of Lamb waves. Secondly, images of the adhesive regions were obtained by scanning ultrasonic sensors and taking amplitude distributions of transmitted waves.

Key Words **(Standardized) production, quality control, evaluation** (Free) air-coupled ultrasonic technique (D4)

1. はじめに

ボデーの軽量化が重要視される中，ハイテン材の利用が増大しているが，ハイテン材のスポット溶接には，従来の軟鋼板とは異なる難しさがあり，生産現場の大きな課題となっている．そこでスポット溶接打点の補強およびボデー剛性の向上を主目的として，ボデー鋼板の接合に接着剤が使われるようになってきている．しかし，接着剤による鋼板間の接着部は外表面から全く確認することができず，ボデーの強度に直結する接着部の面積どころか接着剤の有無すら知ることができない．そのため鋼板間の接着部を非破壊的に評価できる手法が求められている．

材料の非破壊評価を行うための手段として，放射線や電磁気，超音波などを用いた手法が用途に合わせて利用されている．中でも超音波は，人体への影響が少なく，材料内部の検査が行えるため，生産現場において導入しやすい方法として広く活用されている．

しかし，超音波を固体材料内へ入射し，固体材料内からの超音波を受信するためには，材料と超音波センサ間に水やジェルなどのカップリング剤を用いなければならないのが常識であった．そのため，製造ライン中での検査であっても，検査対象物全体を水に浸したり（水浸法），超音波センサと対象物間のみに水を吹きかけたり（部分水浸法）する必要があり，その適用は一部の製鋼ラインなどに限られていた．

近年，空中に強力な超音波を伝搬させ材料内へ入射し，材料内を伝搬した後，材料から漏洩する超音波を感度良く受信できる空中超音波センサがいくつかのセンサメーカーによって開発された[(1)-(3)]．空中では高周波ほど減衰が大きいため，水浸法などで利用される周波数帯（1MHz～100MHz）よりも低い周波数帯に制限されるが，検査分解能を向上させるためにできるだけ高い周波数帯を用いる事が望ましく，開発されている空中超音波センサの周波数帯は 50kHz～1MHz 程度となっている．水浸法ほどの高い空間分解能は期待できないものの，非接触で検査が可能となるため，ライン中での全数検査への適用が十分期待できる．

本研究では，この近年開発された空中超音波センサによる非接触非破壊評価法の鋼板間接着部へ適用を検討する．

2. 空中超音波法の特長と計測方法

空中超音波法の鋼板間接着部の評価への適用について論じる前に，古典的な超音波透過率計算によりその可能性を検討する．

2.1. 2つの媒質界面のエネルギ透過率

超音波が媒質 1 から媒質 2 の界面を垂直に透過する場合，そのエネルギ透過率 T_{12} は，媒質の密度(ρ)と音速(c)の積(ρc)で表される音響インピーダンス (Z) と呼ばれる物理量によって以下のように定義される．

*2012 年 5 月 14 日受理.

1) (株)豊田中央研究所(480-1192 愛知県長久手市横道 41-1) 現 京都大学
2)・3) (株)豊田中央研究所 (同上)
4) トヨタ車体(株)(448-8666 愛知県刈谷市一里町金山 100 番地)

$$T_{12}=\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \tag{1}$$

ここで，添え字 1，2 は，それぞれ媒質 1，2 の物理量を示す．このエネルギ透過率は，Z_1 と Z_2 の差（2つの媒質の音響インピーダンスの差）が大きいほど小さい値を持ち，水－鋼間では約 0.12，空気－鋼間では約 3.5×10^{-5}，樹脂－鋼間では約 0.25 である．このことから空中を伝搬させた後に鋼中へ超音波振動を入力することは，従来の接触法や水浸法によるものと比べ，はるかに難しいことが分かる．

2.2.　薄板の垂直入射および斜め入射による透過率

薄板の場合，板厚内での共振が起こりうるため，前述の2媒質間の界面のエネルギ透過率に比べ，飛躍的に大きくなることがある．図 1 のように空気や水などのせん断剛性を持たない媒質（密度ρ_a，音速 c_a）から，固体の薄板（板厚 d，密度 ρ_s，縦波音速 c_l，横波音速 c_t）に角度θで周波数 f の調和振動が入射し，反対側の界面から漏洩する場合のエネルギ透過率は以下のように導出されている[(4)-(5)]．

$$T=\frac{4N^2}{(M^2-N^2+1)^2+4N^2} \tag{2}$$

ただし，

$$N=\frac{Z_l}{Z}\frac{\cos^2(2\theta_t)}{\sin k_{ly}d}+\frac{Z_t}{Z}\frac{\sin^2(2\theta_t)}{\sin k_{ty}d},$$

$$M=\frac{Z_l}{Z}\frac{\cos^2(2\theta_t)}{\tan k_{ly}d}+\frac{Z_t}{Z}\frac{\sin^2(2\theta_t)}{\tan k_{ty}d},$$

$$Z=\frac{\rho_a c_c}{\cos\theta},\quad Z_l=\frac{\rho_s c_l}{\cos\theta_l},\quad Z_t=\frac{\rho_s c_t}{\cos\theta_t},$$

$$\theta_l=\arcsin\left(\frac{c_l}{c_a}\right),\quad \theta_t=\arcsin\left(\frac{c_t}{c_a}\right),$$

$$k_{ly}=\frac{\omega}{c_l}\cos\theta_l,\quad k_{ty}=\frac{\omega}{c_t}\cos\theta_t,\quad \omega=2\pi f$$

となり，エネルギ透過率 T は，二媒質の密度や音速以外に，入射角(θ)，周波数と板厚の積(fd)の関数となっている．

ここで，鋼板（ρ_s=7800kg/m^3, c_l=5900m/s, c_t=3200m/s）に空気中（ρ_a=1.3kg/m^3, c_a=340m/s）から垂直入射した場合の透過率の fd 依存性と，同じ鋼板に fd=1.0 [MHz mm]の調和波を斜めから入射したときの透過率の入射角依存性をそれぞれ図 2a, b に示す．図 2a を見ると，完全に透過する（透過率が 0dB となる）周波数が周期的に現れている．これは，以下で表される縦波の板厚方向の共振周波数に対応している．

$$fd=n\frac{c_l}{2} \tag{3}$$

また，図 2b では周期的ではないが，固有の入射角において完全透過となっている．これは，ラム波の A0 モード，S0 モードと呼ばれる共振モードの臨界角に対応している．

実際には，入射波として用いる信号はある周波数帯域を持っており，完全な単一周波数の調和波ではない．また，斜角入射する際の入射角もある幅を持っている．そのため，いずれの場合においても完全透過はありえないが，垂直入射の場合，式(3)で表される共振周波数で，斜角入射の場合，各モードの臨界角において透過率が大きくなることが推測できる．

このように斜角入射により超音波の透過率が上昇するという現象は，これまで実験的にも確認されており，空中超音波による配管検査への適用が検討されている[(6)]．

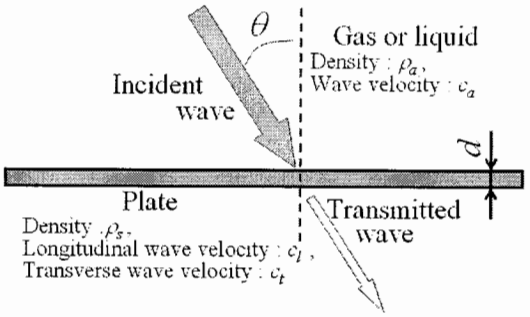
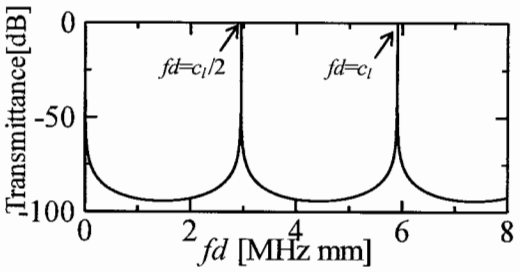
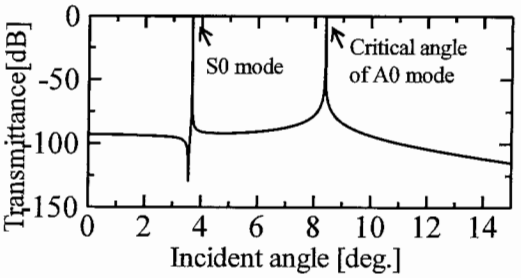


Fig.1 Ultrasonic wave transmission by oblique incidence.



(a) Variation with fd for normal incidence



(b) Variation with incident angles for fd=1 MHz mm

Fig.2 Transmittance for normal and oblique incidences

2.3.　様々な板厚の鋼板に対する透過率の解析

一般に，空中超音波センサは，大きなエネルギを得るため，用いる周波数を限定して設計されている．たとえば，後の実験に用いる空中超音波センサは 370kHz の中心周波数特性を持っている．垂直入射の場合，用いる周波数 f が決まると，板厚 d による透過率の変化が推定できる．

図 3 は，図 2a に対し f=370kHz を代入し，横軸が板厚 d のグラフとしたものである．共振によって透過率が大きくなる

板厚は約 8.0mm となっている．一般に，自動車ボデーに使用される鋼板は 0.7mm～2.6mm の薄板であり，この範囲では透過率は-80dB 以下と非常に小さくなってしまうことが分かる．

次に，斜角入射の場合に透過率の大きくなる臨界角について考える．臨界角は，平板の音速や板厚などから計算されるラム波の位相速度分散曲線と空中の音速から求めることができる．図 4 は f=370kHz の場合に様々な板厚 d に対して各ラム波モードの臨界角を描いたものであり，この線上では図 2b のピーク位置のように透過率が大きくなる．A0 モードや S0 モードの場合，非常に広い板厚範囲に渡って臨界角が存在しており，0.7mm～2.6mm の鋼板を対象とした場合にも，空中超音波において効果的に透過波を検出できると考えられる．

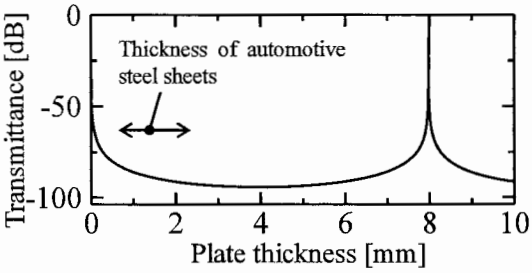


Fig.3 Plate thickness versus transmittance for 370kHz and normal incidence

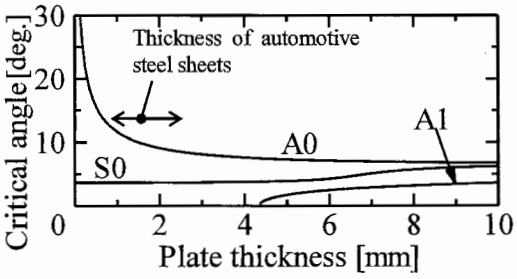


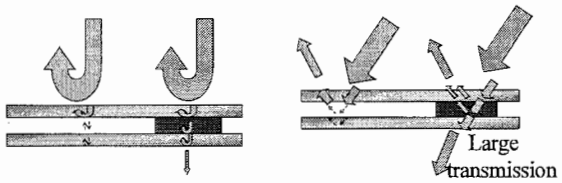
Fig.4 Plate thickness versus critical angle of Lamb waves

2.4. ラム波透過法による鋼板間接着部の評価

鋼板間にある接着部の評価に空中超音波法を利用する場合を考える．

接着剤は鋼板片側に適正量塗布され，二枚張り合わせることで接着部は約 0.4mm 以下の厚さになる．図 5a のように，接着剤が良好に密着している領域と接着剤が無い領域に超音波を垂直に照射した場合，これらの透過波の通過する経路には中間の空気層の有無による差が存在している．先に示したとおり，垂直入射による音響インピーダンス差から計算されるエネルギ透過率（式(1)）は，樹脂－鋼間で 0.28，空気－鋼間で 3.8×10^{-5} となっており，その差が非常に大きいことが分かる．ただし厳密な議論には，前節のように，樹脂，空気層の厚みによる共振を考慮する必要がある．

また，前節に示したとおり，垂直入射では適切な周波数を使った場合にのみ，板厚共振によって透過率が上昇するが，斜角入射の場合には，角度をラム波の各モードの臨界角に合わせることで透過率が大きくなる（図 5b）．そのため，斜角入射法を利用することで，様々な板厚条件下であっても，適切な入射角に調整することにより透過波を受信でき，接着部の評価が可能となることが期待できる．



(a) Normal (b) Oblique

Fig.5 Differences in ultrasonic transmission by adhesives conditions

3. 空中超音波透過法による基礎実験

前章の理論的検討では，空中超音波法によって薄板中を伝搬した透過波を検出する場合，ラム波の臨界角で斜角入射・受信するときに大きな透過波が得られることを示した．ここでは，その性質を実験的に検証する．

3.1. 実験装置と実験方法

図 6 に用いた実験装置の模式図を示す．送受信センサにはジャパンプローブ社製空中超音波センサ（最大中心周波数 370kHz，振動面 14mmx20mm）を用い，送信波の駆動はパルサレシーバ(RITEC, RPR4000)により，電圧約 270Vp-p, 370kHz, 5 波の正弦波を印加した．受信信号は，プリアンプ（ジャパンプローブ社製，RP60-AP，60dB）およびパルサレシーバ内（20dB）で合計 80dB 増幅し，AD ボードにより収録した．プリアンプには 400kHz を中心周波数とするバンドパスフィルタが内蔵されており，さらに 600kHz の LC ローパスフィルタによって高周波成分を除去した．鋼板は図 6 に示すように，送受信探触子間中央に挿入し，角度θ=0°から 20°間を 1°ずつ変えて波形を収録した．このとき，送受信探触子間の上下方向の距離は 32mm で固定し，左右方向の距離 L は波形が最も大きくなった距離に適宜調整した．はじめに板厚 0.8mm の軟鋼板（SPC270）を用いて角度を変更した際の波形収録を行い，その後，軟鋼板を両面テープ(ニチバン,ナイスダック NW-U15, 厚み 0.6mm，幅 15mm）によって接着した試験片によって同様の実験を行った．

3.2. 透過率の計測結果

収録した波形の振幅最大値を角度ごとに dB 表示したものが図 7 である．図中の曲線は，式(2)より求めた軟鋼板 fd=370 [kHz] x 0.8 [mm]に対する音圧透過率を示したものであり，図中○が軟鋼板に対する実験で得られた透過率，X が両面テープで接着した試験片の透過率である．図中の破線 -110dB がノイズレベルであり，それ以下の計測値は透過波が得られていないことを意味する．

軟鋼板における○印は，理論透過率に非常によく合ってお

り，A0 モードの臨界角近傍の入射角 13°の場合の方が垂直透過（0°）の場合よりも約 16dB 透過率が大きかった．ただし，理論曲線に見られるような A0 モードの臨界角における全透過や S0 モードの臨界角付近の透過率の増減は角度を慎重に調整しても得られなかった．これは，実際に送受信される波形が調和波ではなく周波数帯域を有すること，また空中超音波センサ振動面の大きさが有限であることなど，理論計算との違いが影響していると考えられる．

両面テープにより接着された試験片（X）では，垂直入射（0°）では，波形が得られなかったものの，11°～16°において透過波が得られた．これらの値は軟鋼板の場合に比べ約 20dB～30dB 小さいが，最大値がおおむね 13°～14°で得られる傾向は一致した．

すなわち，間に接着剤層が存在する場合においては，垂直入射・受信による透過法では波形が得られないが，適切な角度で斜角入射・受信することによって波形が検出できるようになりうる．

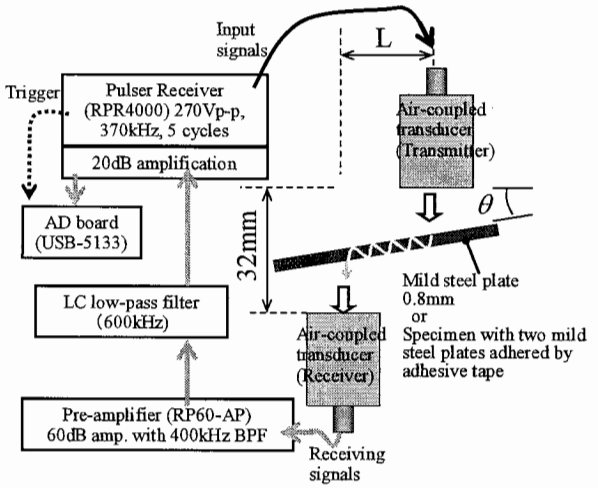


Fig.6 Schematic figure of experimental set-up

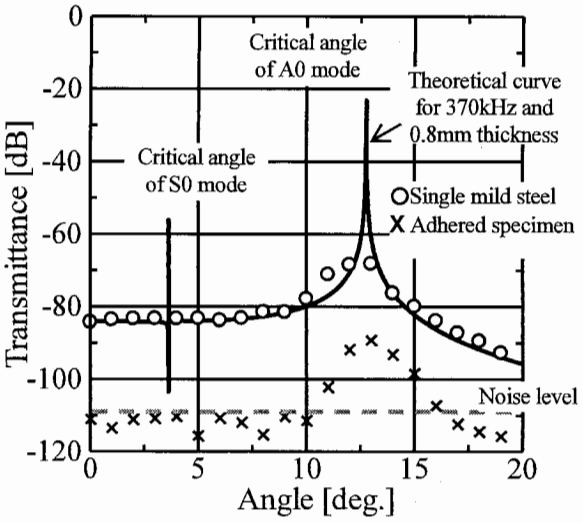


Fig.7 Relationship between angle and transmittance

4. 空中超音波スキャンによる接着部の画像化

4.1. スキャニング画像化システム

従来の超音波映像装置では，試験体を水中におき，超音波センサを X,Y の二軸に高速でスキャンすることにより超音波振幅分布などの二次元画像を取得している．このとき，X または Y 軸モータのパルス出力をトリガ信号として，超音波の駆動，収録を行うことで，位置と超音波計測の同期を取る．ここでは，シグマ光機ステージコントローラ（SHOT-204MS）とステージ（SGSP33-200(XY)，ストローク 200mm）を二軸スキャナーとして用い，従来の水浸型超音波映像装置同様，そのトリガ出力端子からトリガ信号を得た（図 8）．ステージコントローラより出力されるトリガ信号が位置情報を表すので，その位置に対し計測された超音波振幅を表示することによって，透過波の強度分布が得られた．空中超音波センサは，透過率の最も大きい角度である 13°に設定した．

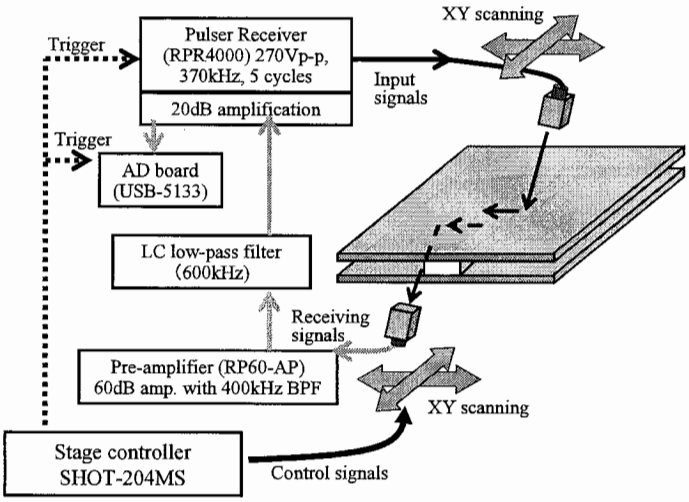


Fig.8 Experimental set-up for adhesive imaging

4.2. 両面テープで張り合わせた軟鋼板の接着部の画像化結果

図 9 に，ここで用いた試験体の模式図を示す．前述の基礎実験同様，厚さ 0.8mm の軟鋼板を両面テープで張り合わせた構造とした．両面テープは図 9 に示す位置に貼り付け，二枚の軟鋼板を手で押さえつけることにより接着させた．

図中の破線は空中超音波センサのスキャン領域であり，横方向に 0.75mm，縦方向に 1mm のピッチでセンサをスキャンした．センサは試験体に対し縦置きと横置きの二つの場合（図 9 中のセンサ配置参照）に対して画像を取得した．

図 10 は，センサが両面テープで接着されたある地点に位置したときの収録波形である．50μs～150μs 間にある波形が透過波であり，その後，250μs 辺りにも波形が得られた．これは，表または裏いずれかの平板の端面で反射した波形であり，センサ位置に接着部が無い場合にも検出された．

そこで，収録された波形の 50μs～150μs 間の最大値を透過波振幅とし，図 11 のような振幅分布図を作成した．図 11a がセンサを縦置きに設置した場合に得られた分布図, b が横置きに設置した場合に得られた分布図であり，図中破線が実際に両面テープが存在する位置である．いずれもおおむね両面テープ位置において振幅が大きくなっており，接着部の画像化ができていることが分かる．ただし，センサ幅があるため，両面テープの端はなだらかに振幅が変化し，この画像だけでは端部位置を特定することができない．特に，センサを横置きで計測した場合には，端部の画像が不明瞭になる傾向を示した．

4.3. 実接着部の画像化結果

次に，実際に使われている接着剤（フェルコ 5000）を使って軟鋼板を接着し硬化した後に画像化した結果を図 12a に示す．図 12b の写真は，実験後に二枚の薄板を剥がしたときの内面の写真である．図 11 の場合同様，端部の輪郭は明瞭でないものの，接着部の大小がおおむね画像に再現されており，本手法が実際の接着部の評価にも有効であることが示された．

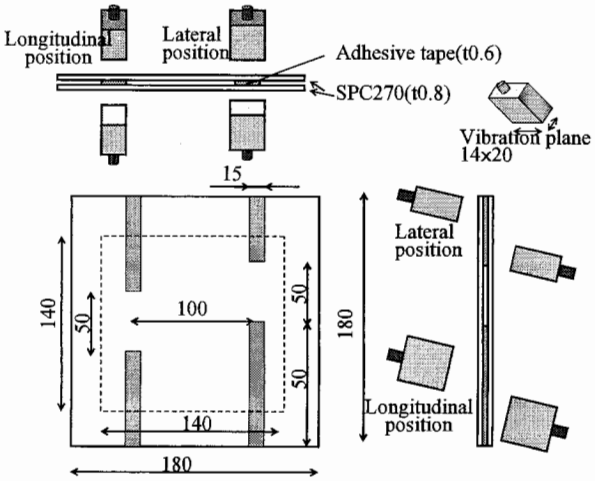


Fig.9 Schematic figure of a specimen used and sensor positions (Unit:mm)

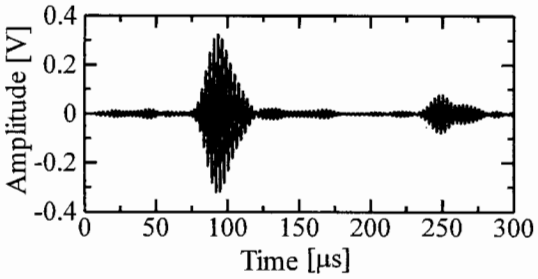
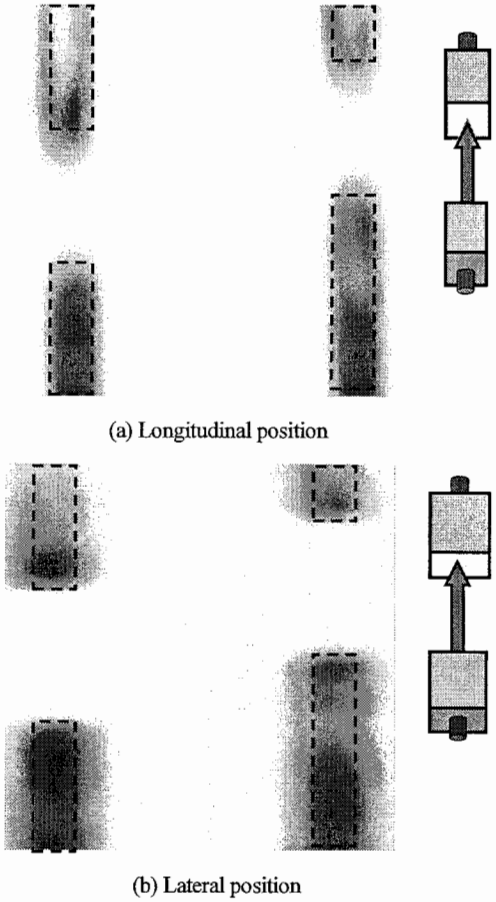


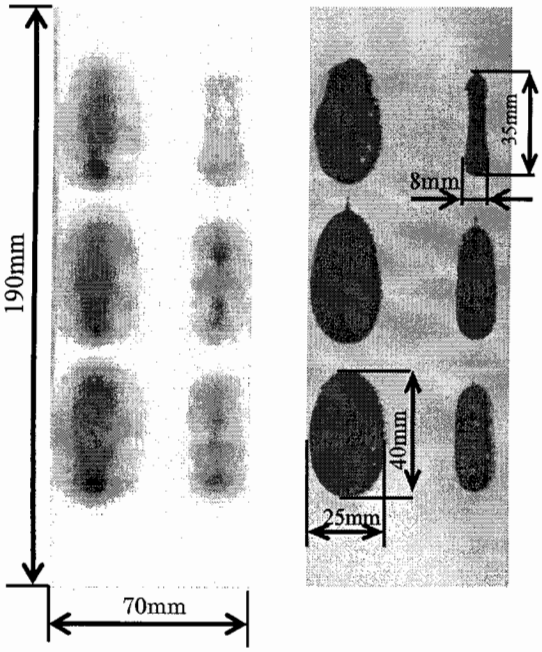
Fig.10 Typical waveform at an adhesive area



(a) Longitudinal position

(b) Lateral position

Fig.11 Adhesive images obtained with two sensor positions



(a) Ultrasonic image (b) Photo after opening

Fig.12 Comparison of an ultrasonic image with a photo after opening the adhesive specimen

5. まとめ

鋼板間の接着部の評価を空中超音波法を用いた透過波振幅分布の画像化により行う手法について検討した．はじめに，薄板におけるエネルギ透過率について理論計算と透過波計測実験を行い，適切な角度での斜角入射，受信による透過波計測が効果的であることを示した．さらに，両面テープのような接着部が存在する場合でも，透過波が計測できることを示した．

次に，二軸スキャナーと超音波発振および収録を同期させて，計測することによって透過波分布を取得した．その画像は両面テープや接着剤の有無に良く対応しており，得られた画像が接着部を定性的に示していることが明らかになった．ただし，センサ幅の影響で，接着部端部の輪郭は不明瞭になり，接着部の幅や長さを精度良く計測するにはセンサの改良や適切な閾値の設定などが必要となる．

参考文献

(1) Schindel D.W. and Hutchins D.A.: Applications of micro-machined capacitance transducers in air-coupled ultrasonics and non-destructive evaluation, IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelec. and Freq. Cont., Vol. 42, No.1, p.51-58 (1995)

(2) Bhardwaj M. C.: High efficiency non-contact transducers and a very high coupling piezoelectric composite, The online journal of nondestructive testing, Vol. 9, No.11, WCNDT2004 Edition, code 63 (2004)

(3) 高橋雅和, 星野秀和, 小倉幸夫: 非接触空中超音波探傷検査法の開発, 自動車技術会, 学術講演会前刷集, NO.20-09, 100, p.13-16 (2009)

(4) 実好純一, 菊池書克, 能本乙彦監修: 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 1966, 1425p

(5) Nishino H. et al.: Theoretical and experimental investigations of transmission coefficients of longitudinal waves through metal plates immersed in air for uses of air coupled ultrasounds. Materials Transactions, Vol.49, No.12, p.2861-2867 (2008)

(6) Nishino H. et al: Efficient transduction of circumferential Lamb waves by a pair of line focus type noncontact air-coupled ultrasonic transducers and its application for accurate measurement of pipe wall thickness, E-journal of advanced maintenance, Vol.2, No.4, p.181-190 (2011)