The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	フォーカス型空中超音波法による鋼板間接着剤塗布領域の画像化
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. 1163-1167
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/84493
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

フォーカス型空中超音波法による鋼板間接着剤塗布領域の画像化*

林 高弘[1)] 村瀬 守正[2)] 北山 綱次[3)] 足立 裕[4)]

Imaging of Adhesive Regions between Steel Plates by Focus Type Air-coupled Ultrasonic Technique

Takahiro Hayashi Morimasa Murase Tsunaji Kitayama Hiroshi Adachi

Our previous study showed that images of adhesive regions between auto body steel sheets can be obtained using air-coupled ultrasonic sensors in oblique beam setting. This study introduced focus type sensors to improve spatial resolution and to reduce spaces required sensor arrangement. First, flat type and focus type sensors were compared in through transmission tests. Secondly, in the imaging tests of square holes with various sizes, it was confirmed that spatial resolution was improved using focus type sensors. Then, images of adhesive regions were obtained with high resolution by scanning the focus type sensors.

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

1. はじめに

スポット溶接打点を補強しボデー剛性を向上させるため，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．その際，接着剤が適切に塗布されている面積が接合箇所の剛性に直結することが知られているが，接着後の外観からは接着面積どころか，接着剤の有無すら判別することはできない．

そこで，前報[(1)]では，空中超音波法[(2)-(6)]による接着部の画像化を行い，接着領域評価への適用可能性を示した．空中超音波法は，鋼板のような音響インピーダンスの高い材料には適用が難しいとされており，鋼板－接着剤－鋼板という三層構造においては非常に困難であると予想されたが，送受信空中超音波センサを斜めに設置する斜角入射・斜角受信により透過波を効果的に検出できることが分かった．さらに，二軸スキャナーと連動してその透過波形を受信することで，接着剤の塗布領域に対応する超音波振幅分布画像を得た（図1）．

本報では，この空中超音波法による接着剤塗布領域の非破壊評価法を，ボデーの溶接組立ラインで利用することを想定し，小型フォーカス型センサを使った空間分解能の向上とセンサ設置に必要な空間の縮小に関する検討を行う．

*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）

2. フラットな振動面を持つ空中超音波センサを用いて斜角入射する場合の問題点

2.1. 空間分解能

前報[(1)]で用いた斜角入射・斜角受信による透過波の計測では，鋼板－接着剤－鋼板という三枚構造であっても良好なSN比で波形が検出でき，センサを走査することによって図1のような接着領域画像を得ることが可能となった．図1は図2に示すように，フラットな矩形振動面を持った空中超音波センサを接着領域（両面テープ）に対し縦置きにした場合に得られた透過波振幅分布図である．図1中の破線は，両面テープを接着した領域であり，おおむね良い位置に両面テープによる接着領域の画像が得られた．しかしながら，接着部端部の画像は明瞭ではなく，その接着領域の面積を評価するためには空間分解能が不十分であることが分かる．

これは，前報での実験において用いた空中超音波センサの振動面（14mmx20mm）の広い超音波の伝搬経路により画像が平均化されたことが原因である．

2.2. センサ設置空間

空中超音波センサを斜めに設置する場合，センサを設置するためには図2中の四角面のように大きな空間が必要となる．しかしながら，ボデーの溶接組立ラインにおいて評価対象となる鋼板接着領域の多くは，図3のように上下面が狭い空間中に露出している程度であり，センサを設置できる空間は大きくない．そのため，センサの小型化および設置空間の縮小が求められる．

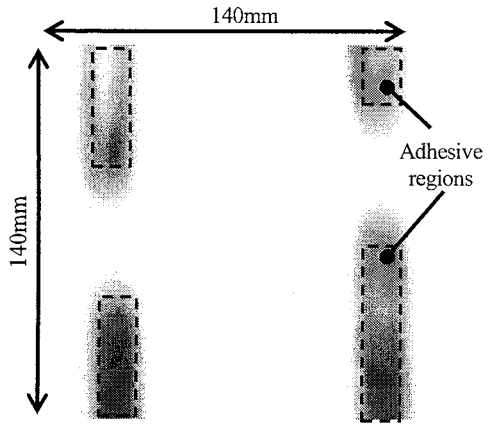


Fig.1 Images of adhesive regions with oblique sensors in our previous paper[1]

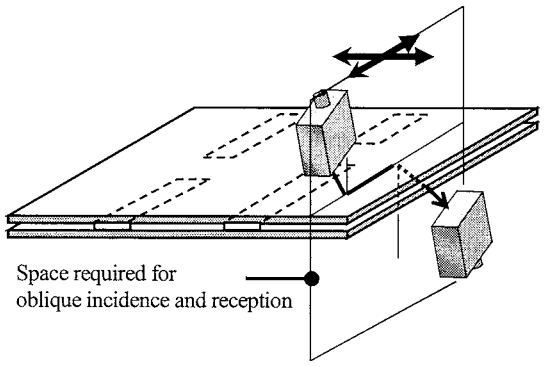


Fig.2 Required space for oblique incidence and reception

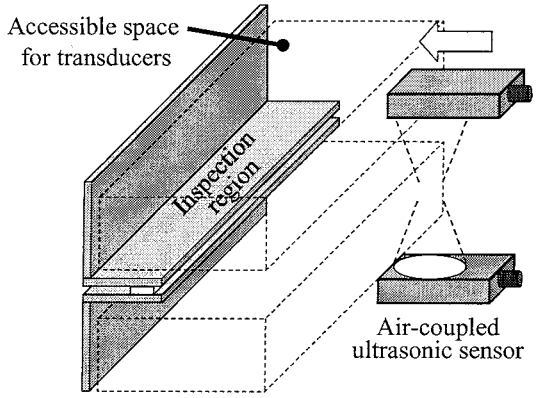


Fig.3 Supposed inspection region and small accessible spaces

3. フォーカス型センサによる高分解能化と小型化

3.1. フォーカス型センサの試作

本研究では，上述の二つの問題点を解決するために，フォーカス型センサを利用する．フォーカス型センサは振動面が凹面になっており，振動面からある距離において超音波エネルギが集束するように設計された超音波センサである．フラットな振動面を持つ超音波センサに比べ，焦点位置において超音波ビームが狭くなるため，空間分解能が向上するものと考えられる．さらに，センサを試験平板を挟んで正対させて使用するため，センサ設置空間を小さくすることが可能である．

ここでは，フォーカス型センサを図 4 のように試作した．このフォーカス型センサは，図 3 のように上下空間の狭い突き出した鋼板接着領域に対しセンサを横から挿入して利用することを想定しており，センサ高さ（図 4 の 10mm の方向）をできるだけ小さくし，コネクタを側面に取り付けることとした．

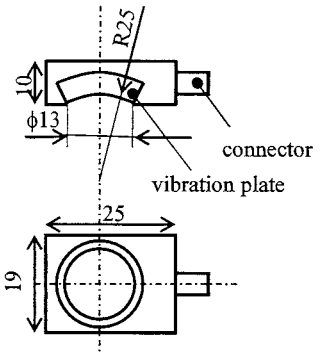


Fig.4 Focus type air-coupled sensor used

3.2. フォーカス型センサの性能評価用実験装置の概要

試作したフォーカス型センサの性能を評価するため，様々な条件で透過波を取得する実験を行った．実験システムの概要は図 5 のとおりである．後の実験では条件によって受信される波形の大小が全く異なるため，パルサーの出力電圧とプリアンプやレシーバー内のアンプを適宜変更して透過波の測定を行っている．また，透過波分布の画像化を行う場合には，センサを保持しているステージの移動制御と波形収録を同期した[1]．

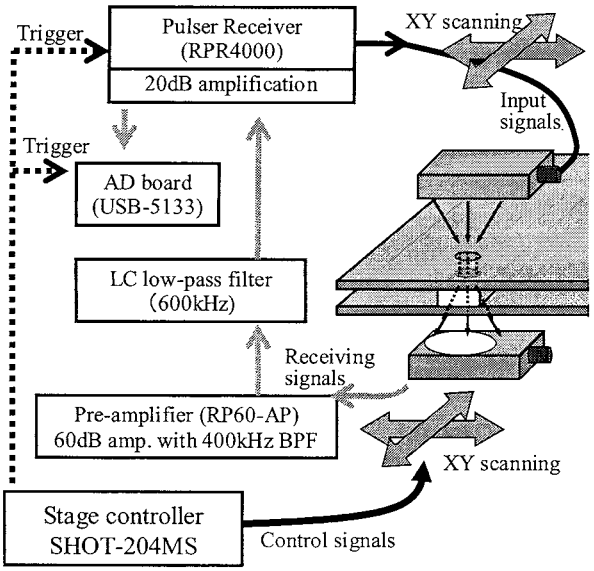


Fig.5 Experimental set-up

3.3. センサ間距離と空中伝搬超音波振幅の関係

はじめに，二つの空中超音波センサを正対させて空中を伝搬した超音波の送受信実験を行い，そのセンサ間距離と受信振幅の関係を調べた．この空中伝搬超音波の振幅は，後の実験における鋼板から漏洩する透過波に比べ非常に大きいため，表1のようにパルサー出力と受信側アンプ（プリアンプとレシーバー）の増幅率を小さくして収録波形の電圧を調整した．

図6にセンサ間距離と空中伝搬超音波振幅の関係をデシベル表示で示す．フラット型センサの場合，おおむね距離が大きくなるにつれ受信振幅が減少した．これは，センサから放射された超音波が広がる拡散と空中での超音波減衰によるものである．一方フォーカス型センサの場合には，センサ間距離L=40mm付近で振幅が最大になった．これは，円弧より放出される超音波を解析的に計算した結果と概ね一致する傾向を示している[7]．

L=40mmにおける受信波形は図6bのようになっており，フラット型の方がフォーカス型よりも約4dB（1.6倍）振幅が大きかった．これは，フラット型センサ内部にある超音波振動子の面積がフォーカス型よりも大きいことが影響している．すなわち，センサ（振動子）を小型にすると感度の低下は免れず，鋼板接着部評価の際には，十分な感度で受信可能な上，センサ設置可能空間に入りこむことのできる程度に小さい最適なサイズのセンサを作成する必要がある．

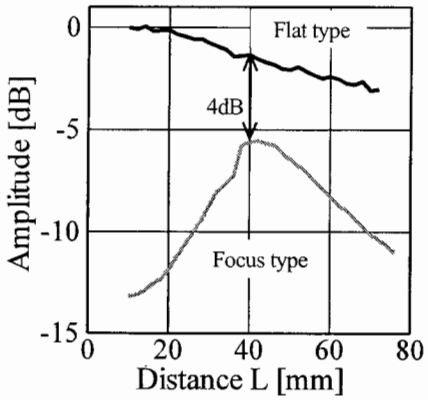
3.4. 鋼板での透過特性

次に鋼板での透過特性を調べるため，センサ間に軟鋼板（SPC270厚み0.8mm）を1枚挿入したときの透過波を測定した．図7に示す通り，(a)フラット型センサによる垂直入射・受信，(b)フラット型センサによる斜角入射・受信，(c)フォーカス型センサによる垂直入射・受信，(d)フォーカス型センサによる斜角入射・受信の4通りに対し透過波の計測を行った．実験システムにおける各種パラメータは表2の通りである．

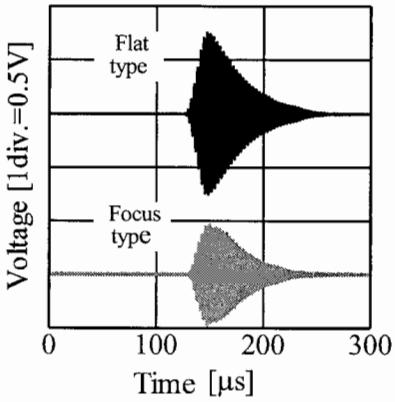
図8に得られた透過受信波形を示す．上下方向のセンサ間距離Lはすべて40mmとし，斜角の場合には，左右方向に最も受信波形が大きくなる位置に移動して測定した．また斜角の場合の角度は，前報で求めた最適角度の約13°とした．それぞれ波形の右に書かれている数字は，フラット型斜角による受信波形の振幅を基準とした場合の，デシベル表示による振幅値である．図8中に示された時間において100μs～200μs間に現れる大きな第一波が測定対象の波形であり，200μs～300μs間の小さな第二波は鋼板表面を反射しセンサ表面間を往復した後に透過した波形である．

Table 1 Parameters in direct pitch-catch measurements

Pulser output (Ultrasonic signal)	About 100V, 330kHz, 5 cycle-sinusoidal wave
Pre-amplifier and low-pass filter	Not used
Amplifier in receiver	20dB
Averaging	10 times



(a) Amplitude changes in distance



(b) wavefroms at L=40mm

Fig.6 Amplitude changes and waveforms for flat and focus type sensors

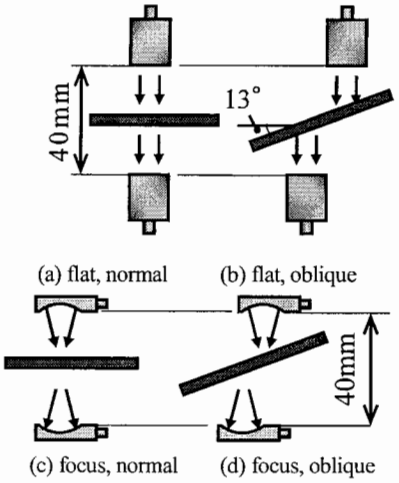


Fig.7 Sensor set-up for transmission tests

Table 2 Parameters in the experiments at a single steel sheet

Pulser output (Ultrasonic signal)	About 250V, 330kHz, 5 cycle-sinusoidal wave
Pre-amplifier and low-pass filter	60dB,400kHz BPF & 600kHz LPF
Amplifier in receiver	20dB
Averaging	10 times*

*No averaging used in imaging experiments in the next section.

(a)フラット型垂直と(c)フォーカス型垂直を比較すると，その振幅値はほぼ同じであった．図 6 のように空中を伝搬して直接到達する受信波形には両者に 4dB の差があったことを考慮すると，鋼板の挿入により，フォーカス型では見かけ上受信効率が向上したと言える．これは，フォーカス型センサによる超音波の入射・受信角が 0°（垂直）を中心に分布を持っており，斜め入射・受信の成分も含むことに由来するものと考えられる．図 4 で示した試作フォーカス型センサは，斜角入射・受信の最適角度 13° を含む 0° ～15° の範囲をカバーしており，このことから フォーカス型センサの利用により，鋼板を挟んだ場合に見かけ上受信波の振幅が増大したと考えられる．

図 8d はフォーカス型センサでの斜角入射・受信における透過波形である．フラット型の場合には，斜角にすることにより 18dB 程度の増幅効果があるが，フォーカス型の場合は増幅せず，垂直の場合とほぼ同じレベルの波形が得られた．これはフォーカス型センサでは入射・受信角に分布を持っているため，センサを斜めに傾けても最適角度成分がわずかであり，斜角の効果が無かったためである．

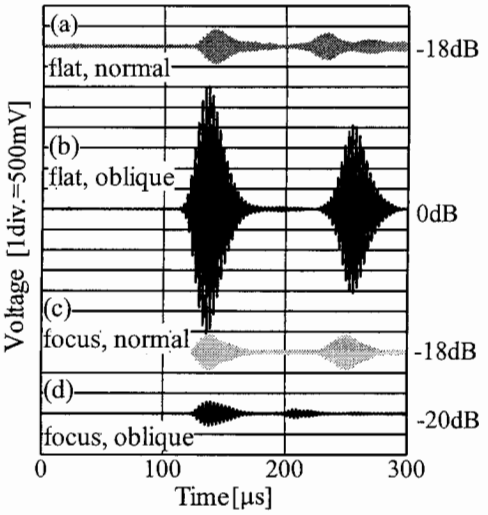


Fig.8 Transmitted signals for various sensor settings

3.5. フラット型センサとフォーカス型センサでの空間分解能の比較

次に，各センサおよびセンサ配置による空間分解能を比較するため，鋼板表面に遮蔽板を置いて超音波振幅画像を取得する．遮蔽板は，プラスチックフィルムと紙を重ねてハサミで穴を開けたものであり，穴の位置においてのみ超音波が透過できるようにしている．穴は四辺が 2mm ，5mm, 10mm, 15mm, 20mm の正方形とした．画像を取得する超音波センサの走査領域は 120mmx35mm であり，縦横ともに 0.4mm ピッチで波形計測を行った．実験システムの設定は，表 2 と同様であるが，走査速度を上げるため，平均化処理は行っていない．

図 9 は様々なセンサおよびセンサ配置に対して得られた振幅分布画像である．それぞれの計測領域における波形の最大振幅値を 0dB として黒で示し，−40dB までを濃淡で表した．フラット型斜角（図 9b）においては他に比べて SN 比が良いため，ノイズが相対的に小さくなった結果，遮蔽板のある領域は白で表示されている．逆に，フラット型垂直（図 9a）やフォーカス型斜角（図 9d）などでは SN 比が悪く，遮蔽領域におけるノイズが大きく現れている．

空間分解能については，予想通りフォーカス型を利用することで向上が図られている．例えばフラット型（図 9a, b）では，2mm の正方形画像は全く得られておらず，5mm の正方形画像についても振幅が減少し不鮮明である．一方，フォーカス型（図 9c, d）では 2mm の正方形も示され，5mm の正方形は鮮明に現れている．また，10mm 以上の大きな正方形についてもフォーカス型垂直（図 9c）において輪郭が最も鮮明に現れているが，フラット型ではぼやけた画像になっている．また，フラット型斜角の場合には，センサの長辺側（縦方向）において伸びた画像になっている．

フォーカス型垂直（図 9c）と斜角（図 9d）については，わずかに図 9c の方が輪郭が明瞭に現れているものの空間分解能に関する大きな差は見られない．しかし，SN 比がフォーカス型垂直（図 9c）の方が良好である上，センサ設置空間を考慮すると，フォーカス型垂直（図 9c）が車体の接着部評価には有効である．

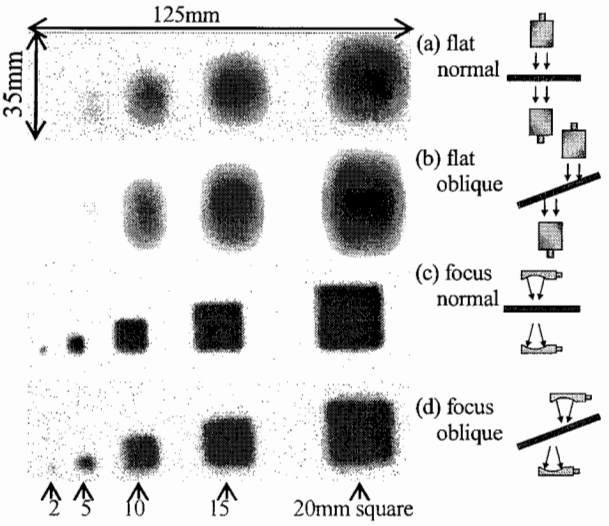


Fig.9 Comparison of spatial resolution for various sensor settings

3.6. 接着領域の画像化による比較

次に，フォーカス型センサの垂直配置を用いて鋼板－接着層－鋼板の三層構造になっている試験体に対し，接着領域の画像化を行った．用いた試験体は図 1 においてフラット型斜角における前報[1]での結果を示した試験体であり，板厚 0.8mm の軟鋼板（SPC270）二枚を両面テープ（ニチバン，ナイスダック NW-U15，厚み 0.6mm，幅 15mm）により接着した構造となっている．間に超音波減衰の大きい両面テープがある三層構造であっても，透過波を受信できるよう，パルサー出力およびレシーバー増幅率を表 3 のように大きく設定した．

図 10 にフォーカス型センサの垂直配置によって得られた透過波振幅画像を示す．濃淡表示は図 1 に合わせ振幅のリニアスケールにより表示した．フォーカス型センサによる透過波分布画像（図 10）は，フラット型斜角（図 1）に比べ空間分解能が飛躍的に向上し，幅 15mm の両面テープの輪郭が鮮明に示されている．さらに，両面テープ内の接着良好部と不良部と考えられる画像の濃淡変化も現れている．

Table 3 Parameters for imaging of adhesives between steel plates

Pulser output (Ultrasonic signal)	About 450V, 330kHz, 5 cycle-sinusoidal wave
Pre-amplifier and low-pass filter	60dB, 400kHz BPF & 600kHz LPF
Amplifier in receiver	30dB
Averaging	Not used

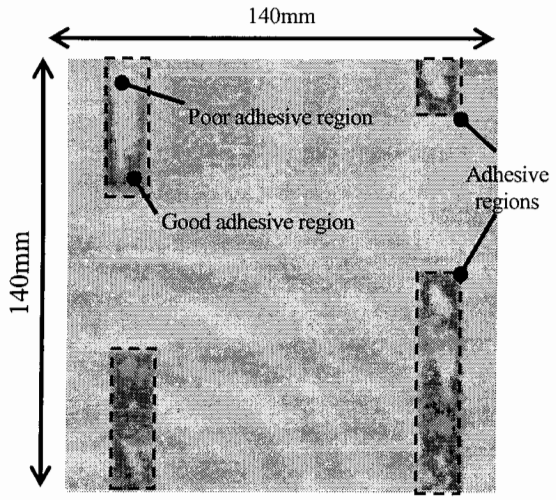


Fig.10 Image of adhesive regions using focus type sensors

4. まとめ

空中超音波法により鋼板間接着領域の画像化を非接触で行う技術について，フォーカス型センサを用いることで，分解能の向上とセンサ設置空間の縮小を図った．

はじめに空中伝搬する直接波および一枚の鋼板を透過する透過波の解析によりフラット型センサとフォーカス型センサの比較を行った。また、鋼板上に穴の開いた遮蔽板を置き，透過波の画像を取得する方法で検討を行った結果，フラット型センサでは約 5mm の正方形穴まで検出することが可能であったが，フォーカス型を利用することで 2mm 角の正方形穴の画像を取得することができた．さらに，両面テープによる接着領域の画像化を行った結果，両面テープの輪郭が明瞭になっただけでなく，両面テープ内の接着性を示すと考えられる振幅変化の画像を得ることができた．

参 考 文 献

(1) 林高弘，村瀬守正，北山綱次，足立裕：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，自動車技術論文集，Vol.43, No.5, p. - (2012)

(2) Schindel D.W. and Hutchins D.A.: Applications of micromachined 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)

(3) 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)

(4) 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)

(5) 林高弘ほか：非破壊検査，空中伝播超音波センサーを用いたプラスチック平板の非破壊検査，非破壊検査，Vol.50, No.2, p.108-113 (2001)

(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)

(7) 日本非破壊検査協会編：超音波探傷試験 III, 2001, p.47-49