

スポット溶接部の非破壊検査技術

An Ultrasonic Testing Method for Spot-welds

高田 一 TAKADA Hajime JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(部長)
 広瀬 智行 HIROSE Tomoyuki JFE スチール 西日本製鉄所 薄板商品技術部自動車室 主任部員(副部長)

要旨

超音波(板波)の透過減衰測定によって薄板スポット溶接部の健全性を評価することを試み、透過波の減衰が大きい部分の空間的な広がりを計測すると、ナゲット径と良い相関があることを見出した。この測定原理に基づく振動子アレイを用いた現場測定用試作機を製作し、ナゲット径を測定可能であることを確認した。

Abstract:

A testing method for nondestructive spot-welds evaluation by use of Lamb wave through-transmission method has been developed. Nugget diameter can be evaluated by measuring the width of the zone where attenuated through-transmitted wave is observed. Measuring system using piezoelectric elements array has also been developed. It has been proved that measurement results using the system well agree with nugget diameters measured by cross-sectional observation.

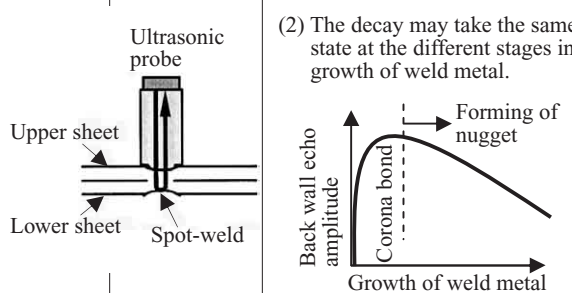
1. はじめに

自動車や家電製品などでは車体や筐体を形成するため、数多くの箇所にスポット溶接がなされている。スポット溶接では、通常、2枚~4枚の薄板を重ねて、数ミリメートルの径の電極チップに挟んで溶接がなされるため、溶接部が凹んだ外観を示す場合が多い。

このスポット溶接部の健全性は、たとえば自動車では車体の強度に直接影響するため、評価を適切に行う必要がある。従来から、スポット溶接部の健全性評価方法として、できあがった溶接部から評価用サンプルを抜き取り、破壊試験によって溶接金属の大きさを確認する方法や積層された板の境界へタガネを差し込んで剥離の有無を確認する方法が採用されている。しかし、これらの方法には、抜き取り試験しかできない、あるいは、製品を傷つけるおそれがあるなどの問題があるため、非破壊試験によってスポット溶接部の健全性評価を行うことが、長年の課題となってきた。

スポット溶接部の非破壊試験方法では、Table 1 に示すとおり、超音波を用いる方法^{1,2)}や電磁気的な方法が試されてきた。しかし、いずれの方法もスポット溶接部の凹んだ形状などの影響によって正確な測定に難しい問題があるため、信頼性高く健全性の評価を行える技術は現存しない。

Table 1 Conventional techniques for spot-weld testing

Method	Technique	Shortcomings
Ultrasonic testing	Decay Technique	(1) Portions under the inclined surface cannot be evaluated. (2) The decay may take the same state at the different stages in growth of weld metal.
		
ECT* Magnetic testing	Measuring permeability and conductivity	Measuring results are influenced by the shape of welds.

*Eddy current testing

このような状況に鑑み、JFE 薄板製品をスムーズにお客様にご使用いただくため、薄板製品のご使用にあたり、お客様が必要とされる評価技術を提供することを目的として、スポット溶接部非破壊評価装置の開発を行ってきた。以下に、この概要を紹介する。

2. スポット溶接部評価の基本原則

本技術におけるスポット溶接部非破壊評価技術の基本原則を Fig. 1 に示す。スポット溶接部の溶接金属(以下、ナ

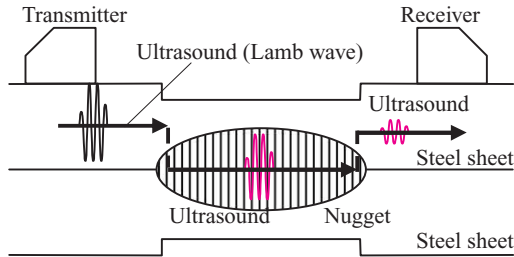


Fig.1 Evaluation method by use of ultrasound (Lamb wave)

ゲット)の一方のわきから超音波(板波)を入射させ、反対側で超音波透過波(以下、透過波)を受信する。ナゲットには超音波を大きく減衰させるデンドライト組織が発達するため、板の表面に沿って伝搬する超音波は、ナゲットの径に比例した減衰を受ける。

この方法においても、スポット溶接部の端部に形成される段差によって超音波の伝搬が乱され、その影響が減衰測定結果に現れることが懸念される。しかし、超音波(板波)には数多くの伝搬モードが存在する³⁾ので、板の内部の変位が大きいモードを選択することにより、段差の影響を最小にすることができる。

3. 水浸測定による評価方法の確立

減衰測定は超音波探触子と被検体との接触状態の変化によって精度が低下しやすい。そこで、ナゲットによる超音波の減衰が観察される部位の空間的な広がりを検出することにより、ナゲット径を評価する技術の開発を行った。

3.1 実験方法

原理確認を目的とした本実験では、音響結合変化の影響を排除するため、水浸法を用いて実験を行った。

Fig. 2に示すように、水浸型プローブ2個で超音波(板波)の送受波子を構成し、水浸法にて送受波子を2次元走査することにより、透過波振幅の二次元マップを作成し、比較検討した。サンプル上での超音波入射点および超音波受波点の軌跡をFig. 3に示す。

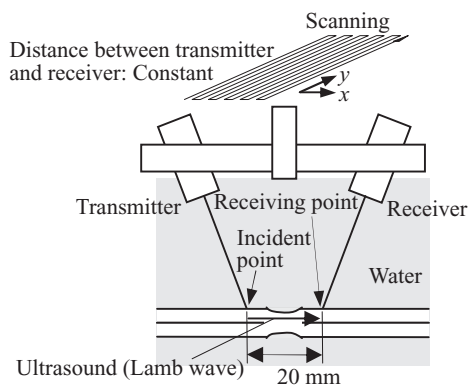


Fig.2 Test method in laboratory experiment

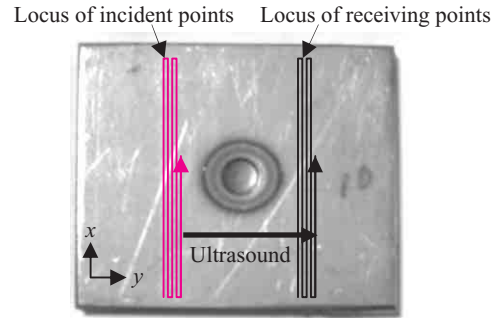


Fig.3 Loci of incident and receiving points on the specimen

Table 2 Test specimens

Sample number	Welding Current		Thickness of weld (mm)	Diameter of nugget (mm)
	Set (kA)	Measured (kA)		
P2	6.0	6.12	5.15	2.4
P4	6.5	6.68	4.99	3.9
P6	7.0	7.06	5.02	4.1
P8	7.5	7.55	4.96	5.0
P10	8.0	7.97	4.88	6.2
P12	8.5	8.45	4.68	6.5
P14	9.0	8.98	4.21	8.2

供試材として、Table 2に示すサンプルを用いた。これらは板厚2.6 mmの薄板を2枚重ねて、スポット溶接したサンプルである。溶接電流を加減することによって、ナゲットの大きさを変化させた。サンプルは2組製作し、1組は破壊試験によってナゲット径を測定した。Table 2の一番右の欄にこの測定結果を示した。

3.2 実験結果

透過波振幅の二次元マップの例をFig. 4に示す。Fig. 4では透過波の振幅を輝度変調によって表示している。明るい部分ほど透過波の振幅が大きい。中央にみられる受波振幅の小さい部分(黒い部分)が、透過波の減衰部である。

Fig. 4に示すようにスポット溶接部における透過波の二次元マップに現れる減衰部を減衰帯と称することとし、減衰帯の幅を測定して、ナゲット径との比較を行った。ナゲット径として、Table 2の一番右の欄に示した同条件で溶接したもう1組のサンプルの破壊試験による測定値を用い

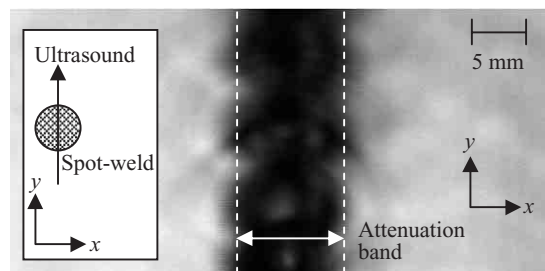


Fig.4 An attenuation band in C-scope

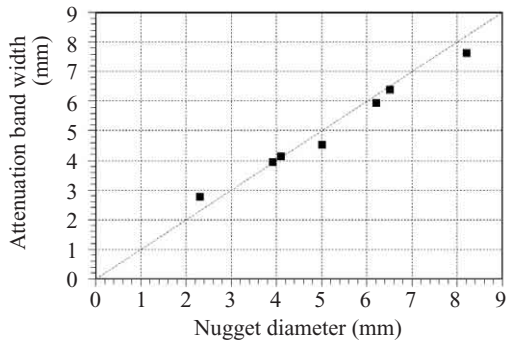


Fig. 5 Relation between attenuation band widths and nugget diameters

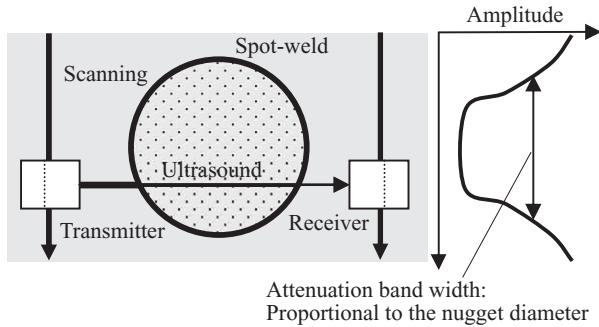


Fig. 6 Evaluation of the nugget diameter by probe scanning

た。
減衰帯の幅とナゲット径との関係を Fig. 5 に示す。両者の間には良好な相関があること、 ± 0.4 mm 程度の精度で両者が一致していることが判明した。なお、減衰帯の幅と、スポット溶接部の凹み（幅および深さ）には何ら相関がみられなかった。

以上から、Fig. 6 に示すように、探触子対を 1 次元走査することによって透過波振幅の走査グラフを測定するようにし、走査グラフにあらわれる振幅低下部 (Fig. 6 右図参照) の幅を求めることによりナゲット径を測定することができると考えられる。

4. 振動子アレイを用いた測定技術

Fig. 6 に示した方法では探触子対の機械走査を行うことから、この方法をそのまま、製造現場におけるスポット溶接部非破壊評価に用いることは難しい。そこで、探触子として振動子アレイを備えた探触子を用いることにより、機械走査を行うことなく、探触子対の 1 次元走査を行えるようにした。

4.1 振動子アレイを用いた試作機

試作機の外観を Photo 1 に示す。1 台の超音波送受信器とアレイ探触子との間にリレー回路を介在させ、超音波送受信器とアレイ探触子の素子との接続を変更する。受波された透過波の信号はすべて A/D 変換されてパソコンへ送

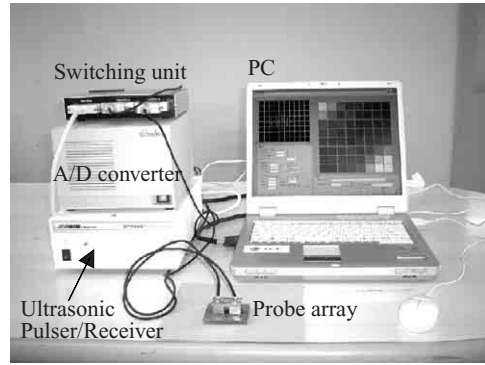


Photo 1 Developed measuring system

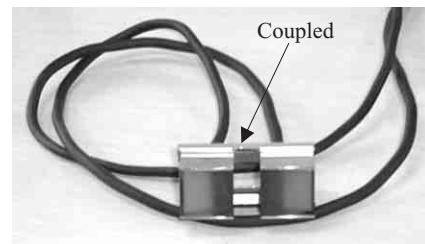


Photo 2 A transmitting probe array and a receiving probe array coupled together

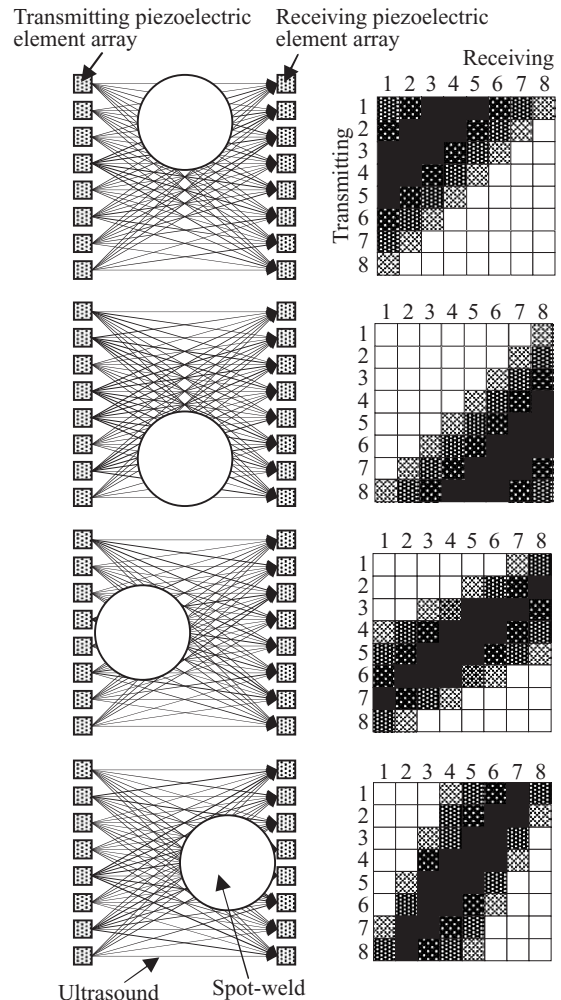


Fig. 7 Detection of miss-alignment by use of matrix display

られる。パソコンを用いた信号処理により所定到達時間内の透過波の振幅を検出して表示する。

アレイ探触子の外観を **Photo 2** に示す。送波用アレイ探触子、および受波用アレイ探触子とも、周波数 5 MHz、素子幅 1.5 mm、素子間隙 0.1 mm、8 素子の振動子アレイを内蔵している。

この装置では、透過波の振幅を全素子の組み合わせについて測定する。**Fig. 7** に示すように、送波用アレイ探触子の i 番目 ($i = 1, 2, \dots, 8$) の素子（以下、送波素子）から送信された透過波を受波用アレイ探触子の 1～8 番の全素子（以下、受波素子）で受波して、その振幅を検出するようになっている（斜めパスの透過波の振幅も検出する）。

測定された透過波振幅は 2 次元のマトリックスに表示される。個々の表示は透過波の振幅によって輝度変調されている。明るい方が透過波の振幅が大きい。このマトリックス表示の利点は、**Fig. 7** に示すように、アレイ探触子とスポット溶接部との相対的な位置関係を知ることができることである。アレイ探触子のスポット溶接部への位置合わせに便利である。

本装置による測定時間は 1 点当たり、3 s 未満である。

4.2 性能評価結果

Fig. 8 に代表的なサンプルにおけるマトリックス表示の例を示す。右下がりに並んでいる灰色～黒の表示が減衰帯に相当する。ナゲット径（図中では ND と表示）が大きいものほど、減衰帯の幅が大きくなっている。

減衰帯幅の測定では、測定された透過波振幅の中から、 i 番目の送波素子と i 番目の受波素子 ($i = 1, 2, \dots, 8$) の組み合わせの測定値、すなわち、正対する素子間の透過波振幅測定値を選ぶ。これら測定値を補間することによって **Fig. 6** と同等の走査グラフ（透過波振幅プロファイル）を作成して、透過波振幅プロファイルが所定のしきい値を下回る部分の幅を減衰帯として測定する。

Table 2 に示したサンプルを対象として測定を行い、上記方法により求めた減衰帯幅とナゲット径との関係を **Fig. 9**

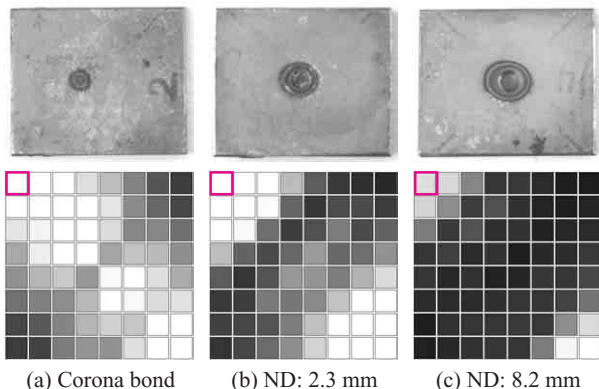


Fig. 8 Examples of matrix display

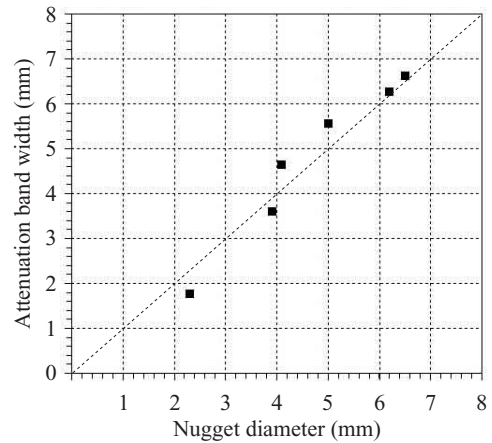


Fig. 9 Relation between attenuation band widths measured using the system and nugget diameters

に示す。減衰帯測定値はナゲット径とほぼ ± 0.5 mm の精度にて一致した。したがって、減衰帯幅をナゲット径として表示することが可能である。

5. おわりに

超音波（板波）の透過減衰測定によって薄板スポット溶接部の健全性を評価することを試み、以下の結果が得られた。

- (1) 透過波の減衰が大きい部分の空間的な広がりを見測すると、ナゲット径と良い相関がある。
- (2) 振動子アレイを用いた現場測定用試作機を製作し、ナゲット径を測定可能であることを確認した。

本方法を用いた評価装置を製品化し、自動車メーカーをはじめとする薄板のお客様に提供していく予定である。

参考文献

- 1) 超音波探傷試験Ⅲ. 日本非破壊検査協会編. 日本非破壊検査協会. 東京, 2001, p. 235.
- 2) 松島勤. 次世代超音波システムによるスポット溶接検査. 平成 13 年秋季大会講演概要集. 日本非破壊検査協会. 2001, p. 57-58.
- 3) Rose, J. L. Ultrasonic waves in solid media. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1999, p. 101-126.



高田 一



広瀬 智行