

100-20095055 非接触空中超音波探傷検査法の開発*

高橋 雅和¹⁾ 星野 秀和¹⁾ 小倉 幸夫¹⁾

Development of Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing

Masakazu Takahashi Hidekazu Hoshino Yukio Ogura

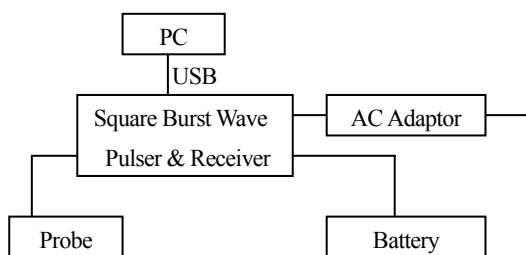
We have developed non contact air coupled ultrasonic testing (NAUT) by the powerful square burst wave pulser and receiver. This paper describes the optimum selection of frequency, wave number, the incident angle and probes by NAUT. And it also describes the applications of the defect detection in the thin plate in the weld.

Key Words: Square Burst wave, Non Contact, Air Coupled, Ultrasonic Testing, Plate Wave^④

1. まえがき

ハイパワー矩形バースト波を用いた非接触空中超音波検査技術(Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing : NAUT)を開発した。矩形バースト超音波はパルス超音波に比較して強力なパワーが出せること、周波数や波数が容易に可変でき最適探傷条件を見だし易いなどの利点がありハイパワーで送受信が必要な NAUT に適している。本報告では矩形バースト波を用いた NAUT について原理、適正な周波数、波数、入射角及び探触子の選定方法及び薄板のきず検出、溶接部の欠陥探傷などの応用例について述べる。

2. バースト波・チャープ波を発生させる複合装置



(a) System structure



(b) Ultrasonic pulser & receiver

Fig.1. Outside appearance of pulser & receiver and system structure
バースト波を発生させる装置としてファンクション・ジェネ

*2009年5月20日自動車技術協会春季学術講演会において発表,

1) ジャパン・ロープ (株) 232-0033 横浜市内南区中村町 1-1-14

レータ、ファンクション・シンセサイザ、トーンバーストジェネレータなどがある。しかし、高出力のバースト波を発生するものは少ない。最近、著者らは¹⁾²⁾、矩形バースト波・チャープ波複合装置を開発した。この装置は小型・軽量でパソコンによる制御及びデータ管理が出来ること、600V までの矩形バースト波・チャープ波を発生させることができ、また発信周波数は 30KHz~10MHz、バースト波の波数は 1~31 波まで 1 ステップ毎に容易に可変できて、電源は DC12V、バッテリー駆動が可能などの特長がある。図 1 はバースト波・チャープ波パルサ・レシーバの外観とシステム構成を示す。

3. NAUT の原理⁴⁾

通常の超音波探傷では図 2 に示すように超音波を伝搬させるため探触子と試験体の間に油、水等の接触媒質(超音波を伝搬させる媒質)が必要であるが、NAUT では図 3 に示すように空気を媒体とするので、非接触で超音波探傷が可能である。

しかし、探触子から空中に超音波が伝搬する場合に、探触子と空気の音響インピーダンス(音速と密度の積)の相違によって、大きなエネルギー損失(金属で約 90dB)が生じ、この大きな損失をカバーする必要がある。

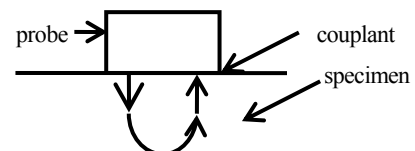


Fig.2. Conventional method

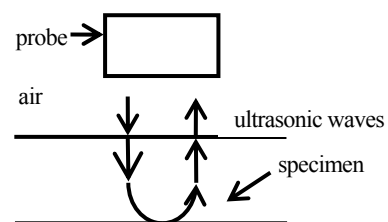


Fig.3. NAUT

3.1. NAUT の距離特性

距離特性とは送信及び受信探触子間距離と透過波の大きさの関係を表したもので、図4に示す透過法で探触子間距離 L と透過波の大きさの関係を測定した。探触子は0.2K25×25N、0.4K14×20N、0.8K14×20Nの3種類で、振動子材質はコンポジットである。周波数は公称周波数200KHz、400KHz及び800KHzのものを用いた。図5に透過法における距離特性の結果を示す。

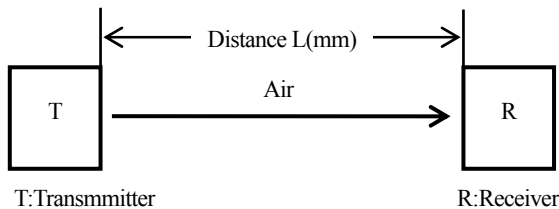


Fig. 4. Experimental method of distance amplitude characteristic

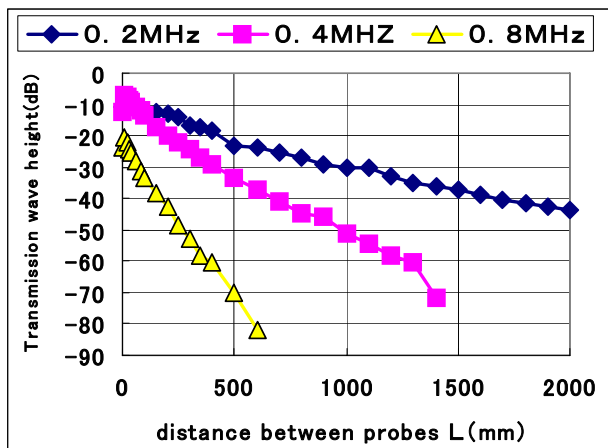


Fig. 5. Distance amplitude curve of transmission wave in NAUT

Table 1 The apparent attenuation

Probe type	Attenuation coefficient(dB/m)
0.2K25 × 25N	16.5
0.4K14 × 20N	39.5
0.8K14 × 20N	97.7

表1に空気中の見かけの減衰係数(図5における各透過波の勾配)を示す。各種の探触子の距離特性を検討した結果、①周波数によって距離特性は異なる。距離特性には、ビームの拡散損失と、空気中の超音波の減衰が影響する。②周波数が200KHzでは、空気の見かけの減衰は無視できる程度で小さく距離特性は拡散損失で決まる。即ち遠距離では透過波は距離に逆比例する。③周波数が400KHz～800KHzでは、拡散損失以外に空気中の減衰が無視できない。特に周波数が800KHzでは空気中の見かけの減衰は大きい。

3.2. 探触子の指向性

図6に探触子の指向性測定方法を示す。受信探触子の前面に、厚さ2mmのSUS板にφ1mmの貫通穴を加工した遮蔽板を取り付けた。送信探触子Tから送信された超音波がφ

1mmの穴を透過し受信探触子Rで受信するようにした。測定に用いた探触子は表1に示す公称周波数0.4MHz、振動子寸法14×20mmである。探触子間距離 L は、 $L=10$ 、50、120mmである。図7～図8に指向性の測定例を示す。

①寸法20mm方向(Y-Y方向)の指向性は、近距離($L=10\sim 50$ mm)ではほぼビームは平行に近く、-6dBビーム幅は18～19mmである。距離が $L=120$ mmと遠くなるとビームは広がり始める。この時の-6dBビーム幅は約20mmである。20mm方向の近距離音場限界距離は117.6mmである。②寸法14mm方向(X-X方向)の指向性は、近距離($L=10\sim 50$ mm)ではほぼビームは平行に近く、-6dBビーム幅は12～14mmである。距離が $L=120$ mmと遠くなるとビームは広がり、-6dBビーム幅は約17mmである。

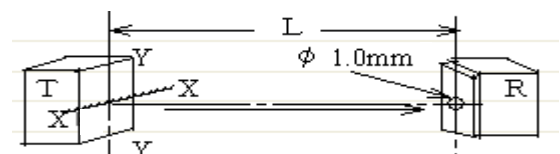


Fig. 6. The method of measuring probe directivity

— $L=10$ mm(0dB) — $L=50$ mm(-1.9dB) — $L=120$ mm(-5.9dB)

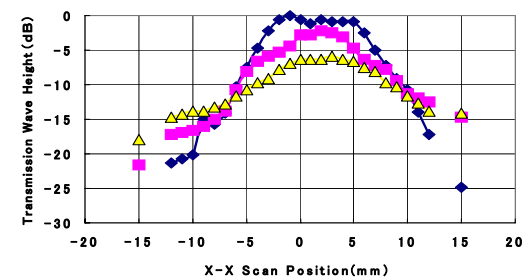


Fig. 7. Probe directivity in 14mm direction

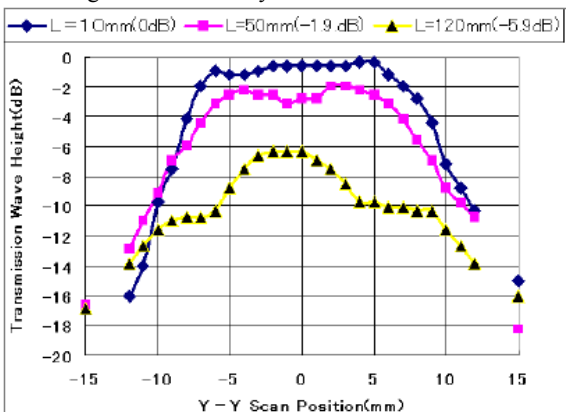


Fig. 8. Probe directivity in 20mm direction

3.3. 垂直入射の透過率

図9に示すように探触子⇒空気⇒試験体⇒空気⇒探触子の経路を考え、空気と試験体の音響インピーダンスを Z_1 、 Z_2 とすると、超音波が空気を伝搬してA面で試験体を透過して再びB面で空气中に透過する透過率 t_{1-2-1} は、超音波が空気⇒試験体に透過する透過率 t_{1-2} とB面で再び試験体⇒空気に透過する透過率 t_{2-1} の積で表わされる。

t_{1-2} 、 t_{2-1} は式(1)、空気⇒試験体⇒空気の透過率 t_{1-2-1} は式(2)で与えられる³⁾。

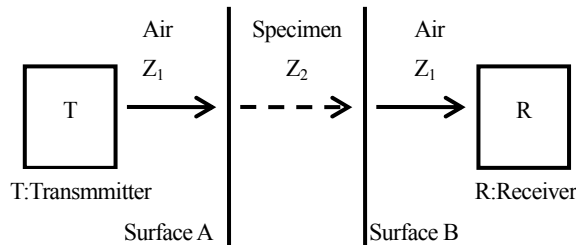


Fig.9. Propagation pass from air to specimen to air in transmission method

$$t_{1-2} = \frac{2Z_2}{(Z_1+Z_2)} \quad t_{2-1} = \frac{2Z_1}{(Z_1+Z_2)} \quad (1)$$

$$t_{1-2-1} = t_{1-2} \cdot t_{2-1} = \frac{2Z_2 \cdot 2Z_1}{(Z_1+Z_2)(Z_1+Z_2)} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \quad (2)$$

例えば、空気と鋼の場合は $Z_1=340\text{m/s} \times 0.0013\text{g/cm}^3=0.442 \text{ m} \cdot \text{g/s/cm}^3$ 、 $Z_2=5900\text{m/s} \times 7.8/\text{cm}^3=46020 \text{ m} \cdot \text{g/s/cm}^3$ 、従って、式(2)の透過率は $0.0000399(-88.0\text{dB})$ 、又 CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の場合には、 $Z_2=4483 \text{ m} \cdot \text{g/s/cm}^3$ 程度であるからその透過率 t_{1-2-1} は $0.000394(-68.1\text{dB})$ となる。実験した結果では鋼で -90.2dB 、CFRP で -71.3dB であり計算値とよく一致した。以上の検討結果、この損失をカバーするには①ハイパワーで送受信できる矩形バースト波パルサ・レシーバ、②高感度の NAUT 用探触子、③本体にインピーダンスと周波数をマッチングさせた 60dB の外部プリアンプが必要である¹⁾⁴⁾。

3.4. 斜め入射の透過率

超音波が試験体に垂直入射した場合よりも斜め入射することで更に効率良く超音波を透過できる。図 10 に示すように、板に斜めに入射して透過するとき、その透過率は理論的に導かれ⁹⁾、入射角 θ におけるエネルギー透過率 T_c は式(3)で与えられる。

$$T_c = \frac{4N^2}{4M^2 + (N^2 - M^2 + 1)} \quad (3)$$

ここに、

$$N = \frac{Z_l \cos^2 2\theta_l}{Z_s \sin k_{ly} d} + \frac{Z_t \sin^2 2\theta_t}{Z_s \sin k_{ty} d}, \quad M = \frac{Z_l \cos^2 2\theta_l}{Z_t \tan k_{ly} d} + \frac{Z_t \sin^2 2\theta_t}{Z_t \tan k_{ty} d} \quad (4)$$

$$Z = \frac{\rho v}{\cos \theta}, Z_l = \frac{\rho_l v_l}{\cos \theta_l}, Z_t = \frac{\rho_t v_t}{\cos \theta_t}, k_{ly} = \frac{\omega}{v_l} \cos \theta_l, k_{ty} = \frac{\omega}{v_t} \cos \theta_t \quad (5)$$

$$\sin \theta_l = \frac{v_l}{v} \sin \theta, \sin \theta_t = \frac{v_t}{v} \sin \theta \quad (6)$$

ここで、 v は空気中の音速、 v_l 、 v_t は板材の縦波と横波の音速、 ρ は空気の密度、 ρ_l は板材の密度、 d は板の厚さ、 θ は入射角、 θ_l 、 θ_t は板中での入射角 θ に対する縦波と横波の屈折角、 k_{ly} 、 k_{ty} は板の厚さ方向の縦波と横波の波数成分、 Z 、 Z_l 、 Z_t は入射角を考慮した音響インピーダンス、 ω は超音波の角周波数をそれぞれ示している。図 11 に厚さ 1mm のアルミニウム板の透過率の実験結果と計算結果の比較⁹⁾を示す。実験結果と計算結果は良く一致している。図 12 に透過率に関

する fd (周波数 f と試験体の板厚 d の積)と入射角 θ の関係を示す⁹⁾。図中○、□及び△は最大透過率を示す実験値で計算値と良く対応している。

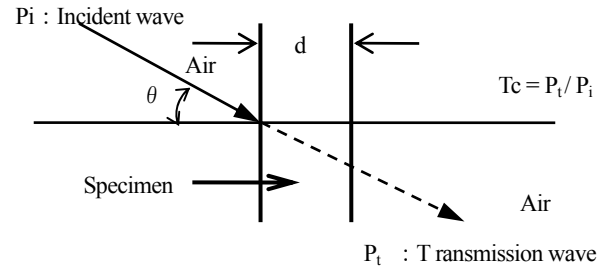


Fig.10. Calculation method of oblique transmission coefficient

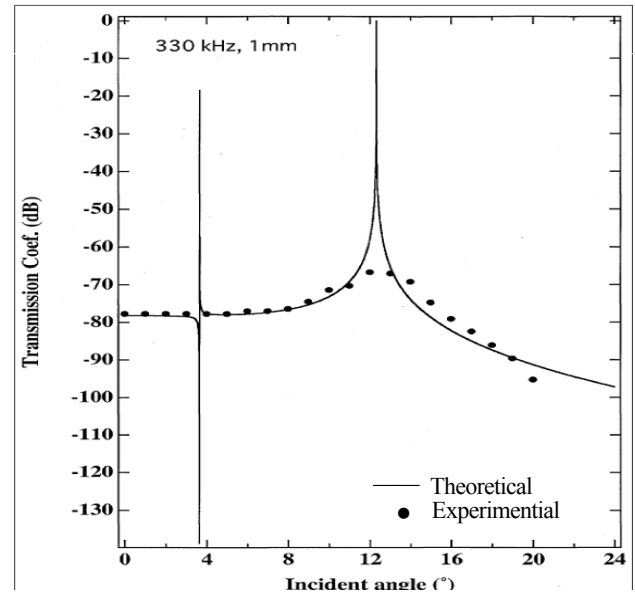


Fig.11. Comparison between experiment and calculation of transmission coefficient in incident angle(330KHz)

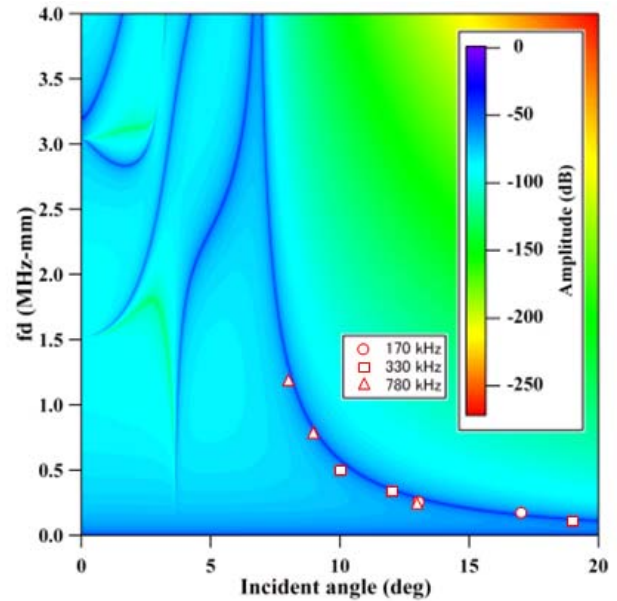


Fig.12. Relationship between $f \cdot d$ and incident angle θ in transmission coefficient

4.NAUT の応用例

4.1.CFRP(炭素繊維強化プラスチック) の探傷例

図 13 は厚さ 3mm の CFRP の中央部に衝撃荷重を加えて生じた層間剥離を透過法で探傷した透過波の分布例を示す。図 14 は健全部(a)と層間剥離部(b)の透過波の例を示す。剥離部分では透過波は減少する。

また、健全部の透過波は空中のみの透過波に対して、約 60dB 低くなる。

4.2. 板波によるステンレス鋼板の探傷例

板波(薄い板状の固体を伝搬する波)を用いて厚さ 1mm のステンレス鋼板を探傷した例を図 15 に示す。

送信探触子 T より放射された超音波が鋼板に斜め入射すると板波が発生し、ステンレス鋼板を伝搬して受信探触子 R でエコーを受信できる。

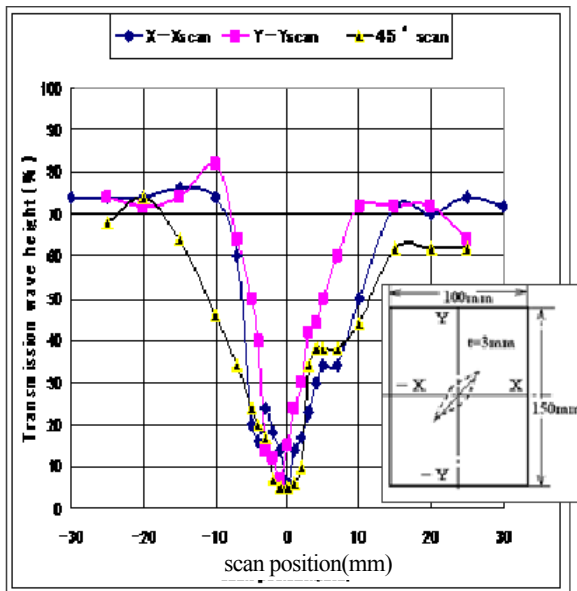


Fig.13. The echo distribution of CFRP in detection by the transmission method

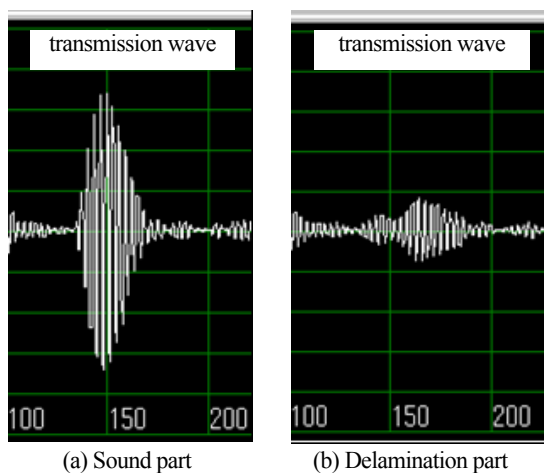


Fig.14. Ezample of he transmission echo

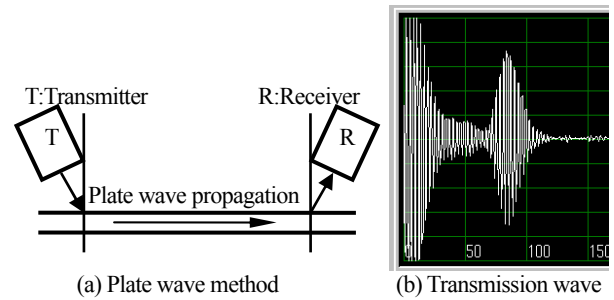


Fig.15. Transmission method by plate wave in one side for stainless steel plate

4.3. 薄板の溶接部の探傷例

図 16 にタンデム法による薄板の溶接部の探傷例を示す。

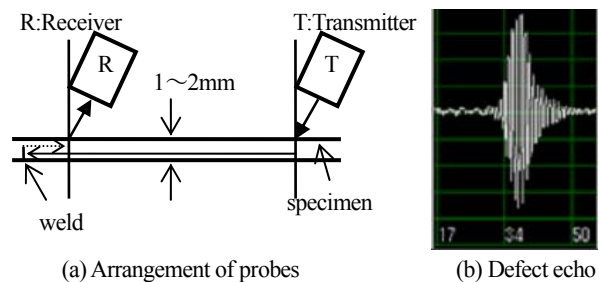


Fig.16. Example of tandem method for detecting weld defect in thin plate joint

送信探触子 T より超音波を斜め入射させ板波を発生させる。板波は薄板内を伝搬して溶接部のきずで反射する。この反射エコーを受信探触子 R で受信する。この方法では、探触子と試験体との距離(ギャップ)変化の影響、即ちリフトオフ効果を受けにくいという特長がある。

5.まとめ

高感度の探触子とハイパワーの矩形バースト波パルサ・レーザ及びプリアンプを用いて NAUT の適用を試みた。その結果、薄板のアルミニウム、鋼板、鋼板の溶接部などの応用が可能であることが分かった。

参考文献：例えば

- (1)高橋雅和、馬場比路志：やさしい解説、バースト波(その1)、非破壊検査誌 Vol54(11), PP.591-592,(2006)
- (2)高橋雅和、馬場比路志、小倉幸夫、鎌田康寛、川嶋紘一郎：矩形バースト波・チャープ波複合装置の開発とその応用、第16回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、PP. 7-11,(2009)
- (3)非破壊検査協会：超音波の反射と透過、超音波探傷試験Ⅲ、PP.24-25,(2004)
- (4)高橋雅和、馬場比路志、小倉幸夫：矩形バースト波を用いた空中超音波計測技術、第14回超音波による非破壊評価、シンポジウム講演論文集、6-1、PP.94-104,(2007)
- (5)A. Safaeinili et al, Materials Eval., Oct.PP. 1186-1190,(1995)