

音波よもやま話 (その19)

BED と探触子設計

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

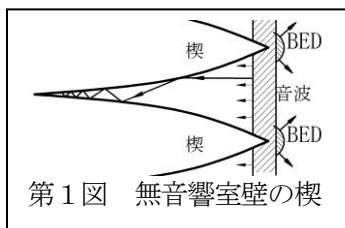
前回に続き、BED の話をする。探触子特に斜角探触子等遅延材付探触子を設計する際に、探触子の内部で発生する妨害エコーを除く事が重要となる。遅延材丸棒の遅れエコー対策など、探触子設計を BED から考える。

◆無音響室

スピーカやマイクの性能試験に無音響室が使われる。床はグレーチングなど網で出来ており、その下に床がある。この床も含め壁、天井 6 面に吸音の為に沢山の楔形状の構造が配置されている。これは音が平面壁で反射されるのを避ける為である。第 1 図の様に、楔面は曲面である。楔間に入った音は楔面を何度も反射して、奥に伝搬するが、楔に吸収されたり、楔面で何度も反射して方向、位相の異なる音が重ね合って、

速やかに熱に変わる。

楔先端では、音は切断されるので、楔に入るメイン波面から強い BED が発生するが、無音



響室の楔面は直線的でないで、直線面での切断より BED は弱く広がり、音響計測上で BED は僅かしか影響しない。

◆楔での反射、BED

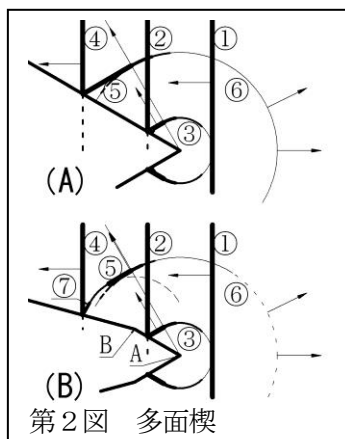
楔の先端での反射や BED の発生状況をもう少し詳しく述べる。第 2 図 (A) の様に先端角 60 度の単純な三角楔での状況を考える。平面波が①の様に楔に垂直に入射する場合である。②の楔に当たるとメイン・ビームは 2 つに分割され、それぞれにビームの端が発生する。ビームの端(楔面)から③の BED が発生する。④まで進む

と楔で反射した波⑤が引き続き、この端から更に BED にエネルギーを供給する。⑥の強い BED が拡散する事になる。⑤はメインビームの反射で①と強度は殆ど変わらない。

次に図 (B) の様に楔途中で面の角度が変わる

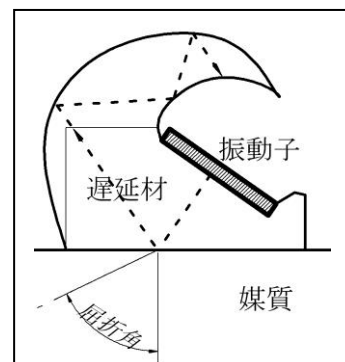
場合、点 B を通過後反射波は⑤と⑦に分かれる。⑤は左右端で BED へエネルギーを供給し、直ぐに図 (A) ⑤より弱くなる。従って BED ⑥も (A) より弱くなる。ビームが分割する分、BED も含め全

体に広がり薄まったと考えられる。(B) 図では 2 面の場合を考えたが、細かい多くの面で楔を作りメインビームを細かく切断した方が楔の残響減衰効果が上がるのである。多くの場合曲面を使う事に成る。

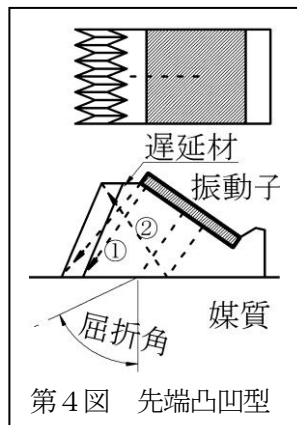


◆通常の斜角探触子の遅延材形状

非破壊検査用の各種方式の探触子中で、探触子内の残響音が探傷性能に影響するのは斜角探触子である。第 3 図の様な形にした探触子が半世紀前には多かった。現在でも一部で



使われている。ツノ部を伝わると、分断された多数の平面波と BED がごちゃ混ぜに成っている、エコーとして振動子で検出が出来ない音、即ち熱（雑音）に変わるのである。この構造は曲面形状加工が難しく、探触子全体を小さく出来ない欠点がある。

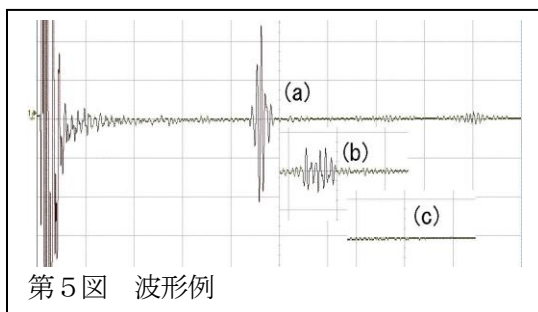


第4図 先端凸凹型

溶接部への接近や狭い部分へのアクセスには不利である。探触子外径寸法を小さくするには、ツノ部分を一点鎖線で切ることになるが、当然切断された前面と上面から反射がある。探触子前上面に沢山の楔を配した探触子も作られている。各楔先端で音が切断されるので多くの BED が発生する。楔が同じ面に整列配置されており、各楔で発生した BED の位相が同じなので強くなり SN が高い探触子とならない。そこで凸凹面はメインビームが垂直に当たらない様に傾斜配置される事が多い。第4図の様な構造だと、主にコーナからの反射波①②などが妨害エコーとして僅かに観測される。

振動子からのメインビームが切断されないと、BED が発生しない事から、音速と音響インピーダンスが遅延材に近く、且つ音を減衰する材料を第4図の凸凹に埋めた構造が使われる。多くの市販品は灰色や黒色の硬いゴム状減衰用物質が使われる。ゴムの中に硬い散乱粒子を混ぜる方法も使われる。凸凹間隔は波長より広い方が減衰はよりすみやかである。あまり細かいと凸凹がない状態、即ち単純平面に近づく。一般に凸凹のピッチは使う周波数領域の下限波長より長くする。

斜角探触子は媒質に対して目的の角度で屈折する様に設計される。一般的には鋼に対して、

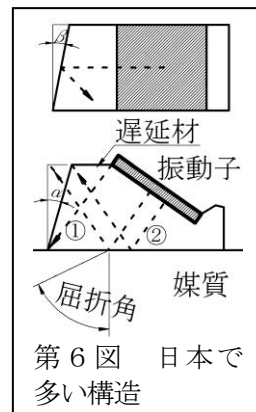


第5図 波形例

横波屈折角 45,60,70,90 度が多いが、縦波屈折角 40,45 度なども作られる。同じ屈折角でも対象が鋼材（音速 5920m/s 前後）とアルミ（音速 6400m/s 前後）では入射角が異なる。多くの入射角の異なる探触子を生産する様な場合は、遅延材の素材の側面を凸凹にして、予め減衰材料を埋め込んだ遅延材素材を在庫し、必要な時に切り出し使う生産方式がとられている。

第5図に遅延材の前上面に凸凹を付けなかった場合(a)、凸凹を付けた場合(b)、その溝に減衰材を埋めた場合(c)の妨害エコー波形例を示す。中央の波形(b)が第4図①②相当である。

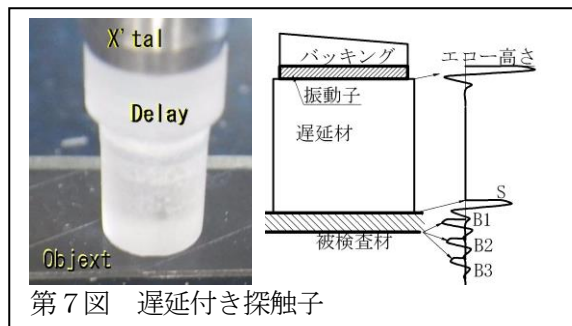
日本では地震が多いこともあり、建築鉄骨溶接部の探傷用斜角探触子のニーズが他国に比べ高く、70 度屈折角探触子が生産の大半である。第6図の様に前面を縦横に両方に角度を付け、凸凹にしない方法が使われている。振動子に波面が傾いて入ると感度が低くなる現象を利用している。それぞれの入射角に対して最適な α 、 β の角度がある。この場合第5図(c)同等のノイズ・レベルにする事ができる。面を斜めにすると言う事は使う周波数領域の下限波長より十分長い凸凹を使うのと同じ事になる。



第6図 日本で多い構造

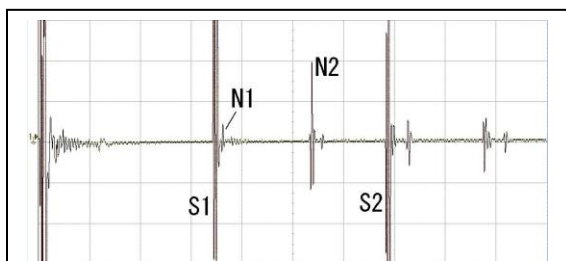
◆垂直遅延付き探触子

精密肉厚測定には 10~25MHz の遅延付き広帯域探触子が使われ、探触子の公称周波数を超える共振周波数の対象物の厚さまで高精度で測定できる。25MHz の探触子を使って鋼で 0.1 mm 程度の厚が μm 程度の精度で測定できる。探傷に於いても表面直下の分解能が必要なきずの検出には、二振動子法或いは一振動子法の遅延付



第7図 遅延付き探触子

き探触子が使われる。一振動子法の場合の製品例と波形の関係を第7図に示す。遅延材には非検査材より音響インピーダンスが低いものが使



第8図 遅延部分のみの波形

われ、表面波 S エコーと裏面 B エコーの位相が逆になる様にして表面分解能を上げている。厚い非検査材厚さ測定や探傷では S-B1 間の時間を測定するが、精密肉厚測定では B1 と B2 間、Bn と Bm 間の時間を測定し、精度を上げるなどの構造が用いられる。

この方法で SN を劣化させる要因は主に遅れエコーで、2 つある。第8図に実測波形を示す。探傷や肉厚計測で通常使える範囲は表面エコー S1 とその 2 回目の反射エコー S2 の間である。探傷ではモード変換遅れエコー N2 が邪魔になる。これは連載 17 で説明した底面でのモード変換と同様な現象である。もう一度発生原理を説明する。第9図の様に有限幅平面縦波①が境界に達するとせん断応力②を発生する。図では変位を大げさに書いた。このせん断歪を初期値として横波③が発生する。平面縦波縦波ビームの端の狭い範囲から横波がドーナツ波状に広がる事に成る。

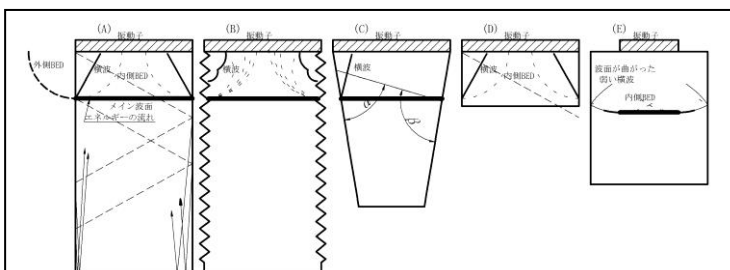
これと同様、第10図の様に平面縦波が側面

一般にヘッドウェーブと呼ばれる。縦波が縦波音速 V_l で伝搬しながら直線状の側面で横波を発生するので、一定の角度 θ の波面を形成する。横波音速を V_t とすると

$$\sin \theta = \frac{V_t}{V_l} \quad \text{式(1)}$$

である。

遅延材の反対側面に横波④が伝わると、引っ張り又は圧縮応力⑤が側面に発生し、今度は横波が①の縦波と同じ方向の縦波を側面近傍に発生する。遅れエコー N2 の波形は主に遅延材周囲を伝わる事になります。横波は⑥の様に側面反

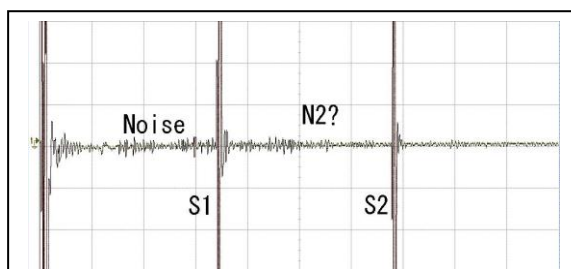


第11図 遅延探触子の遅延材内エコー経路図

射するので、径を何回も反射し多重エコーとなる。第11図 (A) に音波経路を示す。

側面での横波発生は連続的に起き、また反対面で再び縦波に変わる事から、側面の平滑度が良く、遅延材側対面が平行な正多角形や円形の場合に強く観測される。遅延材断面を平行面が無い様にしても遅れエコー N2 を消す事ができる。

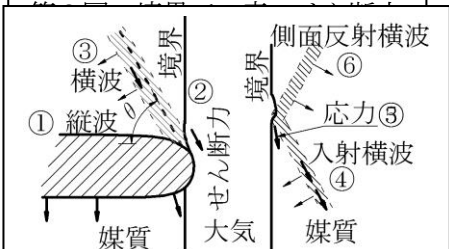
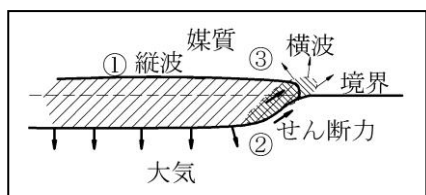
工業的には加工が簡単な側面を凸凹 (B) 或いは、円錐状 (C) にする。凸凹の代わりに全体に音響インピーダンスの近い物質を周りに貼り付ける事も行われる。第12図に第11図 (B) の場合の波形例を示す。遅れエコー N2 は消えた



第12図 遅延材側面が凸凹の場合の波形

が側面凸凹の為ベースノイズは増えている。

また、発生した横波が対面に到達しないと遅れエコー N2 は発生しないので、遅延材の「長さ／径」の比を小さくしても N2 を消せる (D)。

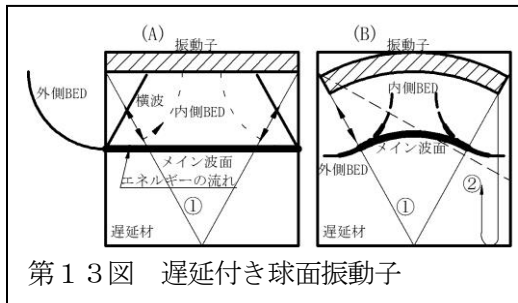


第10図 側面境界でのせん断力

に当たりながら伝播すると、側面が変形し、せん断力が発生する。これを初期条件として横波が発生する。

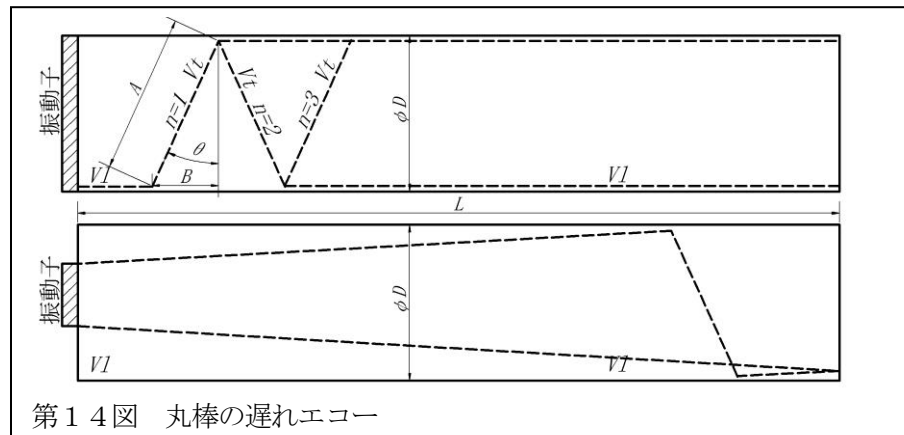
振動子径が遅延材径より小さい場合、ビームが十分広がるまでは遅れエコーN2 の伝搬経路長が変化する為 N2 は弱まる (E)。

精密探傷や高分解能肉厚計測では極薄厚対象では遅れエコーN1 のエコーも邪魔である。これらの遅れエコーの経路を第13図の (A) の①に



第13図 遅延付き球面振動子

示す。振動子周囲で発生した内側BEDが底面中央で反射した波形である。振動子径と遅延材径が近い場合には外側BEDが内側に反射し、内側と重なるので、更に強くN1が観測される。平面振動子を使う限りこれを奇麗に除くのは難しい。第13図の (B) の様に球面振動子を使うと、全ての内側BEDが底面に当たる経路とメインビーム経路が同じになり解決できる。欠点は内側BEDが中心に集まって強くなるので、波数が増え分解が悪くなる。球面振動子では②の経路の波形が底面反射①の前に観測される



第14図 丸棒の遅れエコー

が、計測上邪魔にはならない。

遅延材径を大きくすると内側BEDの波形のみとなり、少し振幅が減る。遅延材を長くするとSの中に遅れエコーN1が入るが、探触子が長く、安定して非検査材に接触しにくくなる。また振動子周囲を凸凹させると少しは変化する。球面振動子の使用はコストアップになり平面振

動子では根本的解決策はない。その為精密肉厚計ではBn-Bm間測定法が使われる。

◆妨害エコーの検索

一般に超音波試験で、前項の様に、妨害エコーが邪魔な場合、試験片の表面を指で触って、エコー高さが変化するところを見つけ、そこに吸音材を付けたり、形状を変えたりする。しかし、前述の遅れエコーN2の場合、遅延材の側面を指で触っても、或いは全周を手で握っても、ゴムなど吸音材を周囲に巻いても、エコーの変化は殆ど観測できない。原因が単純な特定の場所の反射ではないからである。全体を凸凹にすると振動子から伝搬するビームの周囲の特性が変わって、遅れエコーN2が消える。

妨害エコーの発生原因を探る為、指で触るテクニックは万能でないのである。ゴムなどで全面に接触媒質を塗布して接触させることにより、何とか確認できる。

◆丸棒の遅れエコー

棒状の材料、例えば鉄道車軸を端面から一振動子直接接触法で超音波試験する事は多い。前述遅れエコーN2が妨害エコーとなることが多いし、形状エコーの遅れエコーが発生し、欠陥と間違える事もある。ここで、N2の経路の計算をする。探触子の発振ビーム径と材料は同じ場合

を計算する。材料径が大きい場合は、経路長がそれぞれ異なるので弱く、振動子から離れた側面部分でモード変換が良く起きる。この経路長は振動子と材料が同じ径の場合と殆ど同じである。片道は縦波のみ、片道はn回反対面に横波で伝わった場合を考える。

第14図で θ 、 A 、 B は以下である。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{V_t}{V_l} \right) \quad \text{式(2)}$$

$$A = \frac{D}{\cos \theta} \quad \text{式(3)}$$

$$B = D \tan \theta \quad \text{式(4)}$$

となる。ここに D は材料径、 V_t は横波音速、 V_l は縦波音速である。n回対面を横切ると、エコー往復伝搬時間 $t(n, D)$ は

$$\begin{aligned}
 t(n,D) &= n\left(\frac{A}{V_t} - \frac{B}{V_l}\right) + \frac{2L}{V_l} \\
 &= n\left(\frac{D}{V_t \cos \theta} - \frac{D \tan \theta}{V_l}\right) + \frac{2L}{V_l} \\
 &= \frac{nD\sqrt{V_l^2 - V_t^2}}{V_t} + \frac{2L}{V_l} \quad \text{式(5)}
 \end{aligned}$$

となる。

縦波音速に設定した探傷器画面上で N2 の多重エコーの間隔は概略以下となる。

鋼： $V_l=5920\text{m/s}$ $V_t=3200\text{m/s}$ 0.77D

アルミ： $V_l=6420\text{m/s}$ $V_t=2040\text{m/s}$ 1.5D

アクリル： $V_l=2730\text{m/s}$ $V_t=1420\text{m/s}$ 0.85D

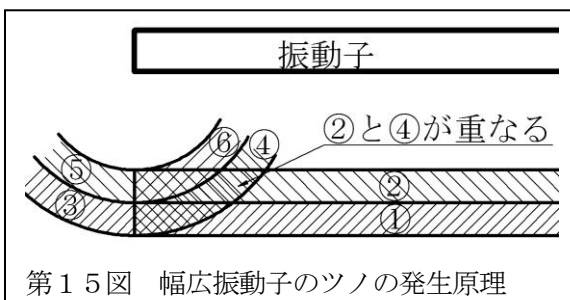
多くの材料は 0.5D~1.5D の間である。アルミや鉛の様に縦波横波の音速差が大きい場合 1.5D 程度になり、ポリエチレンの様に差が少ないと 0.46D となる。異方性材料では例えば 5D とかなり範囲が広く成る。

◆大面積探触子とツノ

大きな面積、一般的なのは長方形でペイントブラシ型と呼ばれる。例えば 10x50 mm と言った長い探触子の場合、振動子長手 50 mm の端付近に感度の高いツノが出る。この主な原因は

- 1) 送信音の音波波形に隣り合う正負半波の振幅が近い
- 2) 振動子平面波から出る内側 BED が次の半波に重なる
- 3) 反射体の特性
- 4) 受信アンプ入力で音圧波形が疑似微分された信号に変換される
- 5) 探傷器が全波整流方式の為、正負信号のピークを表示している

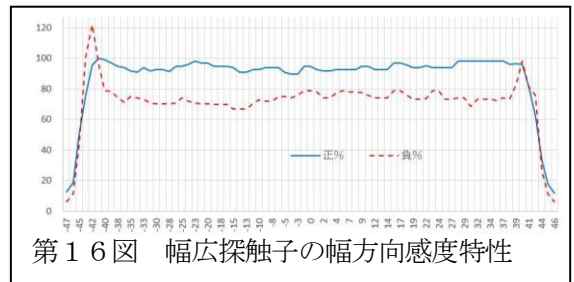
等である。使う探触子と探傷器とその調度で観測されなかったりもする。1) が発生しないとツノも観測されないの、この場合について示



す。第15図の様に一波の波の場合を考えよう。先端正半波と次の負半波の振幅は必ずしも同じでない。保護膜などの影響で 1.5 波目が最大だったりする。同図は波数が長い場合、一番高い

波付近の正音圧から始まる一波分と思ってほしい。

先端の正半波が①で、そこから正の BED③と



負の BED④が発生する。次の負半波が②で、そこから負の BED⑤と正の BED⑥が発生する。平面波②と BED④が重なり、音圧が強くなる。ここに反射体があると、大きな反射が戻ってくる。②④が重なった部分で④の波面が傾いているので、垂直より少し傾いた面反射体ではより強いエコーが受信される。第16図は 10MHz10x95 mm の広帯域のペイントブラシ探触子で鋼材中の Φ1 の欠陥を狙った一探触子法の結果である。正音圧のピークを 100% としている。正音圧では振動子幅方向で感度はほぼ一定である。一方負音圧（点線）では振動子の端内側に明らかな感度の高いツノが観測される。通常の探傷器では全波整流なので、正音圧より高い負音圧のツノが観測される。半/全波の切り替え機能のある探傷器側で正の半波しか使わない半波整流の状態にすればツノは観測されない。自動探傷器ではツノが出るときによく使う方法である。探触子側でツノが出ない様にするには、①に対して②をもっと低くすればよい。一般的には広帯域とする。振動子に付けるバックিংをもっと効き目を高めたり、保護膜の整合をよくすると解決できる。

なお、第16図の右側は左側に比べツノが低い。振動子形状を左側端部は直角に、右側端部は少し斜めにした為で、凸凹の電極にしても同様にツノは低くなる。が、有効ビーム幅が狭くなり、良い解決策とはならない。

◆あとがき

今回は実際の探触子設計に当たって BED の考え方がどう役立つかの話をした。

◆今回知った事

- (1) 音は単純平面三角楔面より、多面又は曲面楔の方が、音がより薄まる。

- (2) 音を散乱させる為に、単に凸凹にすることは逆効果の場合がある。
- (3) ビーム側面に凸凹を配置するのは効果がある
- (4) 凸凹には音速と音響インピーダンスが遅延材と同じ減衰材料で埋めると良い
- (5) 振動子に垂直に入射しない様に反射面を傾ける方法も使える。
- (6) 遅延付き探触子では側面を凸凹や傾斜にすると、遅れエコーの強度が弱くなる。
- (7) 妨害エコーの発生原因を探る、指で触るテクニックは万能でない。面全体で発生する場合があります、面全体に吸音材を付ける必要がある。
- (8) 幅広振動子の両側振動子端のツノは内側の BED と次の半波が重なって発生する。
- (9) ツノは探触器を半波整流に設定すると、除くことができる。

<参考文献>

超音波技術入門―発信から受信まで(2015/04初版2刷、日刊工業新聞社)

Analysis of transient acoustic radiation field from pulse-driven finite(2015 International Congress on Ultrasonics, 2015 ICU Metz)

端部波の詳細伝搬挙動と超音波計測 宇田川義夫、三原 毅、田代 2009/1 NDI シンポジウム