



Title	超音波による音響異方性材料の溶接欠陥評価に関する研究
Author(s)	裏垣, 博
Citation	大阪大学, 1992, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3065970
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

超音波による音響異方性材料の 溶接欠陥評価に関する研究

平成 4 年 9 月

裏 垣 博

目次	頁
第1章 緒論	1
第2章 圧延した金属材料における音響異方性とその特徴	7
2.1 緒言	7
2.2 音速及び振動方向の弾性波動論的解析	8
2.2.1 圧延集合組織モデル	8
2.2.2 法線速度と振動方向の解析方法	9
2.2.3 立方晶における音速の方向依存性	12
2.2.4 音響異方性材料の弾性スチフネスの推定	14
2.3 音速の測定方法	16
2.3.1 試験片	16
2.3.2 使用装置及び探触子	17
2.3.3 音速の測定方法	19
(1) 音速の方向依存性	19
(2) 任意の位置における局所的音速測定	21
2.4 圧延した金属材料中の音速分布 (TMCP鋼板及びアルミニウム合金板の場合)	26
2.4.1 板厚方向の深さ位置による音速分布	26
2.4.2 伝搬方向による音速分布	31
2.4.3 圧延組織の観察及び硬さと音速	34

2. 5	音速分布と振動方向の弾性波動論的解析方法の評価	36
(1)	弾性スチフネス	36
(2)	音速分布	37
(3)	振動方向	38
2. 6	結言	39
第3章	音響異方性材料中における超音波の伝搬挙動と反射特性の解析	41
3. 1	緒言	41
3. 2	均質な音響異方性材料中における超音波の伝搬	42
3. 2. 1	音響異方性材料界面におけるスネルの法則	42
3. 2. 2	音響異方性材料中における波面法線方向と音線方向	44
3. 2. 3	斜角探触子から音響異方性材料への超音波の伝搬	46
3. 2. 4	探傷方向による音線方向及び横波の振動方向の変化と 斜角探傷に及ぼす影響	47
(1)	弾性波動論的解析	47
(2)	実験的検討	51
3. 3	板厚方向に不均質な音響異方性材料中における超音波の伝搬	55
3. 3. 1	板厚方向の深さ位置による波面法線方向と 音線方向の変化	55
3. 3. 2	不均質な異方性材料中における音線の屈曲	57
3. 3. 3	音線の屈曲による超音波の拡散減衰の変化	59
3. 3. 4	不均質な音響異方性材料におけるエコー高さの解析	61
(1)	解析方法	61
(2)	解析結果及び考察	65

3.4	音響異方性材料中の欠陥による超音波の反射	69
3.4.1	均質な音響異方性材料	69
3.4.2	板厚方向に不均質な音響異方性材料	72
3.5	結言	73
第4章	音響異方性を有する部材中の欠陥の定量的評価法の確立	75
4.1	緒言	75
4.2	実験方法	75
4.2.1	屈折角の測定及び反射源位置の推定	75
(1)	試験片及び装置	76
(2)	屈折角及びビーム路程の測定	77
4.2.2	平面欠陥の向き及び寸法の推定	78
(1)	模擬欠陥試験片及び装置	78
(2)	欠陥エコー高さの測定	79
4.3	横穴を用いた屈折角の測定	80
4.3.1	音響異方性材料中の横穴による超音波の反射	80
4.3.2	横穴の直径及び深さが屈折角測定に及ぼす影響	81
4.3.3	近距離音場が屈折角測定に及ぼす影響	83
4.4	反射源位置の推定	84
4.5	欠陥の向きと寸法の推定	87
4.5.1	欠陥寸法とエコー高さの関係	87

4.5.2	エコー高さによる欠陥寸法の推定	92
4.5.3	欠陥の向きの推定	93
4.6	結言	94
第5章 音響異方性材料溶接部への超音波斜角探傷の適用 95		
5.1	緒言	95
5.2	模擬欠陥を有する溶接試験体の作製	95
5.3	溶接試験体の超音波探傷試験と切断試験	96
5.3.1	超音波探傷試験方法	96
5.3.2	切断試験による欠陥の確認	97
5.4	超音波探傷試験結果並びに音響異方性材料溶接部の 超音波探傷試験における縦波斜角法の位置付け	97
5.5	結言	102
第6章 結論 103		
謝辞 106		
参考文献 107		
本論文に関する発表論文 110		

第1章 緒 論

1970年代に始まった天然ガス用低温槽やLNG運搬船の建造に伴って、アルミニウム合金の溶接部の非破壊検査が重要な課題となった。超音波探傷試験法もその一つであり、とりわけ試験結果の等級分類を規格化するにあたって、その基礎資料としてのアルミニウム合金の超音波特性が問題となった。

溶接部の超音波探傷試験では多くの場合斜角法が適用される。鋼溶接部の斜角探傷では、校正用試験片として J I S Z 2345 (超音波探傷試験用標準試験片) に定められている標準試験片 S T B - A 1 を用いて、斜角探触子の入射点及び屈折角を測定し、併せて探傷器の時間軸の調整が行われる。¹⁾

これにならって、アルミニウム合金の場合も S T B - A 1 と同形の A 1 形アルミニウム試験片を作製してその超音波特性が調査された。²⁻⁴⁾ その結果、①アルミニウム合金板 (A 5 0 8 3 P - O) により作製した A 1 形試験片では、鋼製の標準試験片 S T B - A 1 により測定した斜角探触子の入射点に比べて、最大 10 mm を超えるずれを示すこと、②圧延方向に対する超音波の伝搬方向の相対角度により超音波の音速が変化する音響異方性を有していること、などが明らかにされた。しかし、当時入射点のずれと異方性との因果関係が十分解明されるまでには至らなかった。このため、暫定的に鋼製の S T B - A 1 を用いて入射点・屈折角の測定と時間軸の調整を行い、アルミニウム合金中の平均音速を 3 1 5 0 m / s とし、屈折角及びビーム路程を鋼中の値からアルミニウム中の値に換算することが J I S Z 3080-1976 (アルミニウム溶接部の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法) に採用された。⁵⁾

同時期に一部の圧延鋼板においても、標準試験片 S T B - A 1 の作製時に、アルミニウム合金と同様の音響異方性による入射点位置のずれが認められるとする報告がある。⁶⁾

その後、圧延のままで優れた低温靱性を有し、溶接性の良い T M C P (Thermo-Mechanical Controlled Process) 鋼板が開発され、船舶や海洋構造物などに広く使用されるようになってきた。⁷⁾ これらの溶接構造物の健全性を確認する非破壊試験方法の一つとして、超音波探傷試験は放射線透過試験とともに重

要視され、一部のTMCP鋼板で、探傷方向によって屈折角やエコー高さが変化することが問題となった。そこで、鉄鋼協会非破壊検査小委員会を中心として、この種の鋼板中における超音波の伝搬特性が調査され、音響異方性を前提とした探傷方法が検討された。⁸⁻¹⁰⁾ その成果は、JIS Z 3060-1988 (鋼溶接部の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法) に取り入れられている。

しかし、音響的異方性を有するTMCP鋼板の圧延方向の斜角探傷で、しばしば問題となった公称屈折角 70° の横波探触子の使用が望ましくないとされているだけで、欠陥からの超音波反射特性については十分検討されていない。つまり、探傷方法に音響異方性材料中における超音波の伝搬特性及び反射特性が十分に反映されているとは言い難い。

M. J. P. Musgrave¹¹⁾ は種々の結晶系に属する材料の音響異方性をその弾性定数と結び付けて議論しており、結晶軸を含む面内における弾性波動の伝搬速度及び伝搬方向について明らかにしている。伊庭ら¹⁰⁾ は、TMCP鋼板における音響異方性の原因が圧延集合組織に基づく弾性異方性にあると考えて、集合組織モデルを用いてTMCP鋼板の弾性スチフネスが斜方晶系と同じになることを明らかにし、圧延方向と板厚方向を含む断面、及び圧延方向に垂直な断面、におけるそれぞれの音速の方向依存性を解析した結果が測定値とよく対応しているとしている。また、宇田川ら¹²⁾ はTMCP鋼板について、特定の方向の縦波、横波音速から弾性スチフネスを求め得ると指摘している。しかしながら、圧延方向及びそれに垂直な方向以外の任意の方向に斜角探傷する場合の超音波の伝搬特性、とくに、欠陥エコーの現れ方に及ぼす音響異方性の影響についての研究は報告されていない。

さらに、これらの異方性に着目した超音波の伝搬特性に関する検討は、材料中のいずれの位置においても異方性の程度が等しい（ここでは、“均質な異方性媒質”と表現する。）と考えて進められたものである。しかし、一部のTMCP鋼板についてはその表層部と内部すなわち板厚方向の深さ位置によって音速が異なるという報告がある。¹³⁾ 深さ方向の位置によって、音速が異なる媒質中における超音波の伝搬については、海中の水中ソナーに関連して、海水の温度分布及び静水圧による音速の変化が超音波の伝搬経路（音線）に及ぼす影響について検討されている。¹⁴⁾ TMCP鋼板のように不均質な（板厚方向の位置により音速

が異なる。) しかも、音響異方性を有する媒質中における超音波の伝搬に関しては、これまで全く検討されていないのが現状であった。

溶接部の超音波探傷試験は、通常、横波を用いた斜角法によって行われている。その際、欠陥の位置は、探傷に先立って測定しておいた斜角探触子の入射点位置及び屈折角と、欠陥エコーを検出したときの探触子の位置及びビーム路程とから幾何学的に算出される。

欠陥寸法の推定には、ドリル穴のような標準反射源からのエコー高さを基準として、欠陥からのエコーの相対高さにより評価する方法が適用されている。また、溶接部の開先面に発生する融合不良のような平面欠陥を超音波探傷により検出する場合、音響異方性のない材料中では、開先角度が分かっているものについては、超音波が開先面に垂直に入射するような屈折角の探触子を使用すると欠陥エコーが大きく、位置の測定誤差も小さいことが分かっている。¹⁵⁾

しかるに、音響異方性材料中では、STB-A1中の屈折角と材料中の伝搬方向が異なり、さらに、伝搬方向(音線方向)についてスネルの法則が成り立たない。したがって、斜角探傷の場合、等方性鋼材(STB-A1)で求めた屈折角(STB屈折角)を使用したり、STB屈折角をスネルの法則を用いて音速比により換算した屈折角を使用すると欠陥の位置推定に誤差を生じることになる。また、一般に超音波探傷試験では面状欠陥の検出が容易であると考えられているが、音響異方性材料中に存在する平面欠陥の検出・評価に適した探触子の選定方法についてこれまで検討されていない。

以上が音響異方性材料における超音波の伝搬特性に関する従前の研究状況である。欠陥評価とくに欠陥の位置及び寸法の評価に関連する問題点を整理すると次のようになる。

- ①板厚方向に不均質な音響異方性材料における“不均質さ”を把握するための局所的音速測定法が確立されていない。また、この不均質さが超音波の伝搬経路に及ぼす影響が解明されていない。
- ②アルミニウム合金板及びTMCP鋼板などの音響異方性材料の溶接部の斜角探傷について、横波の適用しか検討されていない。縦波も含めて検討する必要がある。

- ③圧延方向及びこれに垂直な方向以外の方向の斜角探傷における超音波の伝搬と欠陥エコーの現れ方について十分な解析が行われていない。
- ④音響異方性材料における各種超音波の伝搬・反射特性を考慮した探傷方法・定量的な欠陥評価方法が検討されていない。

本研究は以上のような背景のもとに、上述の問題点を解明することを目的として着手したものである。本論文は、均質な音響異方性及び不均質な音響異方性を有する圧延された金属材料を対象として、音響異方性材料中における超音波の伝搬挙動を明らかにし、溶接欠陥の定量的な評価を可能にするための超音波斜角探傷試験法を検討した結果をまとめたものである。なお、ここでいう欠陥の“評価”とは、欠陥の位置及び寸法の定量を意味しており、欠陥の機械的強度に及ぼす影響等を含むものではない。

本論文は、図1-1に示すように、6章で構成されている。各章の概要を以下に示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、まず、音響異方性が存在する材料中の超音波の挙動を明らかにするために、圧延集合組織モデル（斜方晶モデル）によって弾性波動論的に縦波及び横波の音速、横波の振動方向の解析を行い、音響異方性材料の超音波探傷試験における縦波の優位性を示している。次に、対象とする圧延板の音響的特性（異方性の程度）を把握するために、圧延面において主圧延方向をL、これに垂直な方向をC、板厚方向をZで表すことにし、ZL、ZC、LC面内で伝搬方向を変化させて横波及び縦波の音速を測定している。このとき、板厚方向の音速分布を測定するために、ウェーブガイドを用いる方法を考案し、精度の良い局所的な音速測定を可能にしている。測定結果をもとに、板厚方向の位置による音速分布及び音速の方向依存性を表す近似式を導き、次章以降における超音波の伝搬挙動の解析に供している。

第3章では、まず、均質な音響異方性材料中における超音波の基本的な伝搬挙動を検討し、音速分布の近似式を用いて、超音波の伝搬方向を明らかにしている。横穴及び球面反射源を加工した試験片を用いて種々の方向から探傷したときの結果と弾性波動論的解析結果とを比較検討し、音響異方性材料における欠陥エ

コーの現れ方の特徴を抽出している。次に、板厚方向に不均質な音響異方性材料について、各方向及び各種類の超音波の伝搬方向（音線方向）及び波面法線方向の深さ位置による変化を検討し、超音波の伝搬経路（音線）を解析している。超音波の伝搬に伴う音圧変化を、音線の拡がりによって検討し、不均質な異方性がエコー高さに及ぼす影響を探傷方向、超音波の種類によって比較している。

さらに、音響異方性材料中の欠陥を想定して、その反射面における超音波の反射特性を音速分布の近似式を用いて解析している。その結果をもとに、欠陥によって最も有効に超音波が反射され、探触子に受信されるための条件を検討している。

第4章では、開先面の融合不良のモデルとして種々の向きの帯形平面欠陥を考え、第3章の結果をもとに、欠陥の向きとその欠陥の検出に適した屈折角の関係を調べている。また、そのときのエコー高さから欠陥寸法を推定し、音響異方

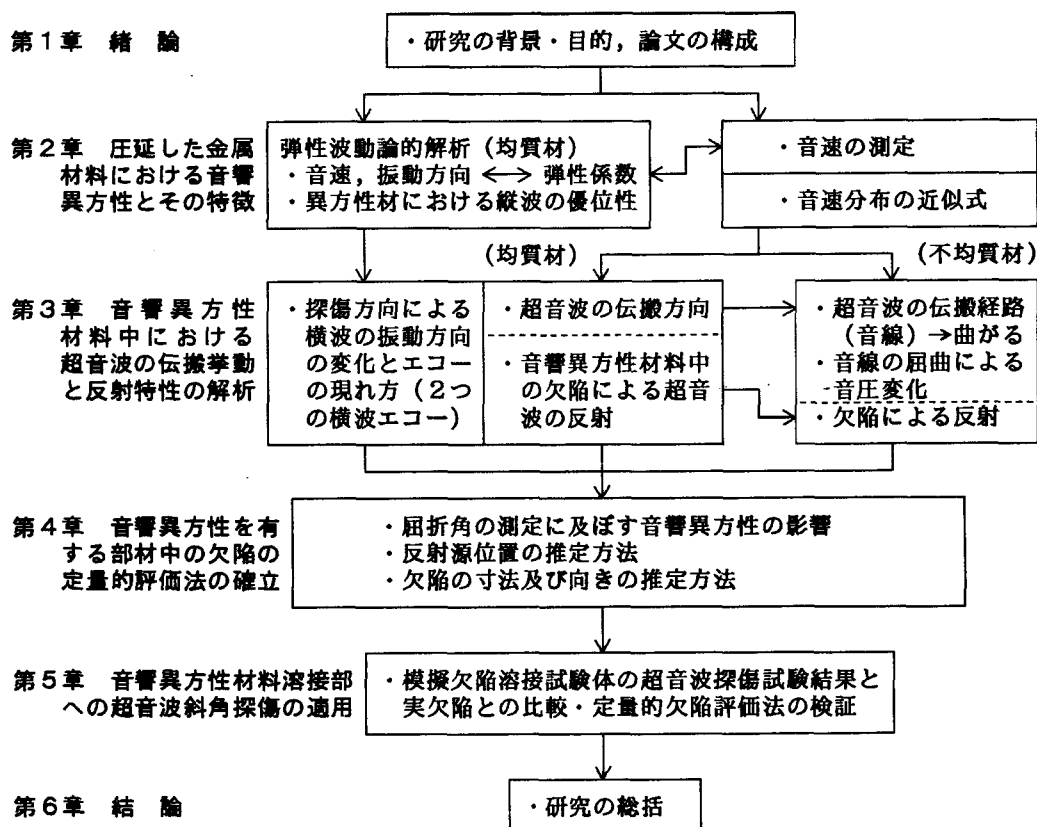


図 1 - 1 論文の構成

性が欠陥の寸法及び位置の推定に及ぼす影響を明らかにして、欠陥の定量的評価法を確立している。

最後に、第5章において、第4章で得られた欠陥の検出・寸法推定方法を実溶接部において検証するため、模擬欠陥を有する溶接試験体を作製し、その探傷結果により、本研究で明らかにした欠陥の評価方法が妥当であることを確認している。

第6章では、本研究で得られた結果をまとめて結論としている。

第2章 圧延した金属材料における音響異方性とその特徴

2.1 緒言

圧延によって製造された金属材料に音響異方性が生じるのは、圧延集合組織による弾性異方性が原因と考えられており、“均質な”集合組織モデルを用いた弾性波動論的解析も行われている。¹⁰⁾しかしながら、一部のTMCP鋼板では板厚方向に“不均質な”音響異方性を有しており、その実態を明らかにするためには、まず、伝搬方向及び板厚方向の位置を変化させて、縦波及び横波の音速を詳細に測定する必要がある。

音速は、通常、試料を平板に加工し、その厚さ方向あるいは長さ方向に超音波を往復伝搬させたときの伝搬時間と、試料の厚さあるいは長さから求めている。均質な材料の場合、あるいは、平均的な音速の測定を目的とする場合、試料を大きくとることによって測定精度の向上が期待できる。

しかし、素材の板厚方向の深さ位置を限定して、しかも、伝搬方向を変化させて音速を測定するためには、次のような問題点がある。

- ①通常の探触子は小さなものでも振動子の直径が5～10mmあるが、これより狭い範囲にだけ超音波を伝える必要がある。
- ②伝搬方向を変化させ、かつ、局所的な測定を行うためには、試料を薄くしなければならない。このとき、多重反射エコーが現れるが、正確な測定にはエコーの分解能と時間の測定精度が極めて重要になる。

本章では、まず、均質な音響異方性材料中の任意の方向における超音波の伝搬挙動を、圧延集合組織モデル（直交異方性モデル）を用いて弾性波動論的に解析している。最も単純な異方性材料のモデルとして立方晶系単結晶における横波音速及び縦波音速の方向依存性を求め、縦波音速の方向依存性が横波音速に比べて小さいことを指摘している。また、音速の測定値から弾性スチフネスを定め、圧延方向及びこれに直交する方向以外の方向における音速及び振動方向の解析に

有効であることを明らかにしている。

音速測定に関しては、①の問題についてはウェーブガイドを用いて目標の位置だけに超音波を伝える方法を考案し、②の問題についてはデジタルストレージスコープを用いて0.5 ns 単位の精度の時間測定を行っている。ついで、音速の測定結果から、深さ位置及び伝搬方向による音速分布を表す近似式を導き、次章以降における超音波の伝搬挙動の解析に供している。

2. 2 音速及び振動方向の弾性波動論的解析

2. 2. 1 圧延集合組織モデル

TMCP鋼板の集合組織は、柚島ら¹⁶⁾ や渡辺¹⁷⁾ によれば、{圧延面} - <圧延方向> が {1 1 2} - <1 1 0>, {1 1 3} - <1 1 0>等の<圧延方向> // <1 1 0>を軸とする回転を伴う集合組織が支配的であるとされる。

伊庭ら¹⁰⁾ はこの事実をもとに、立方晶の離散的集合組織モデルを考え、TMCP鋼板の弾性スチフネスが斜方晶系のものと同じ対称性を有することを導いている。図2-1に示すように、圧延面内で圧延方向をL、これに垂直な方向をC、板厚方向をZで表すことにすると、上述の指摘は、見方を変えれば、圧延集合組織がZL面、ZC面及びLC面に関して対称性を有しているという直交異方性を仮定していることに他ならない。そこで、いまL方向、C方向、Z方向をそれぞれx, y, z軸にとると、弾性スチフネス〔c〕は次のように表すことができる。¹⁸⁾

$$[c] = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

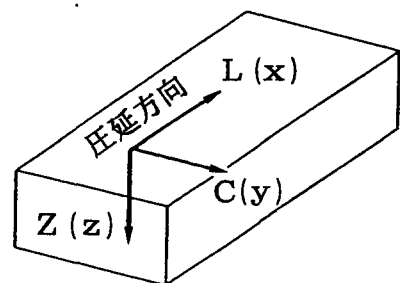


図2-1 座標のとり方

2.2.2 法線速度と振動方向の解析方法^{19, 20)}

平面弾性波が、図2-2に示すように、方向余弦 (ℓ, m, n) の方向に波長 λ ，速度 V で進む場合を考える。波面が原点から p の距離にあるときの波面上の点 (x, y, z) の粒子変位を $\vec{U} (u_1, u_2, u_3)$ とし、その方向余弦を (α, β, γ) とすると、 $\vec{U}$ の各成分及び波面の方程式は次のように表される。

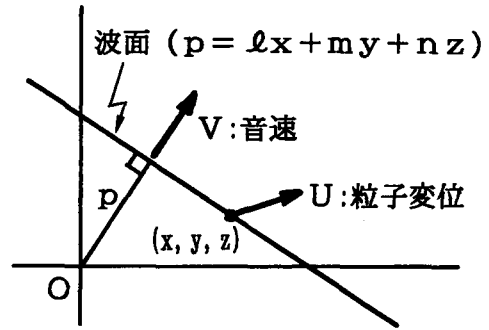


図2-2 平面弾性波の進行方向と粒子変位

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U\alpha \\ U\beta \\ U\gamma \end{pmatrix} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (Vt - p)} \quad (2-2)$$

$$p = \ell x + m y + n z \quad (2-3)$$

また、微小体積 $dx \cdot dy \cdot dz$ の運動方程式は、外力を $\vec{F} (F_1, F_2, F_3)$ とすると、次のように表される。

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} dx dy dz = F_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-4)$$

いま、微小体積に働く応力成分を、例えば図2-3に示すように、 T_{xx} ($dy dz$ 面に働く x 方向の垂直応力)， T_{xy} ($dx dz$ 面に働く x 方向の剪断応力)， T_{xz} ($dx dy$ 面に働く x 方向の剪断応力)のよう表すと、 x, y, z 方向の合力は次のように表される。

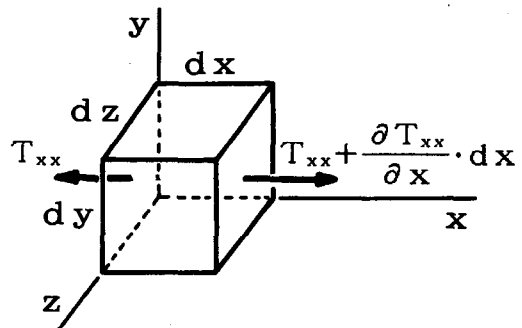


図2-3 微小体積に働く応力成分

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz \\ F_2 &= \left(\frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} \right) dx dy dz \\ F_3 &= \left(\frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \right) dx dy dz \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

また、フックの法則は、弾性スチフネスとして斜方晶系のものを用いると、次式で表される。

$$\begin{pmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{zz} \\ T_{yz} \\ T_{zx} \\ T_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x} \\ \frac{\partial u_2}{\partial y} \\ \frac{\partial u_3}{\partial z} \\ \frac{\partial u_3}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial z} \\ \frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial x} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

(2-5)，(2-6) 式を (2-4) 式に代入し，(2-3) 式の p により整理すると，次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{12} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & \lambda_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 u_1}{\partial p^2} \\ \frac{\partial^2 u_2}{\partial p^2} \\ \frac{\partial^2 u_3}{\partial p^2} \end{pmatrix} \quad (2-7)$$

ここで， $\lambda_{11} = \ell^2 c_{11} + m^2 c_{66} + n^2 c_{55}$ ， $\lambda_{12} = \ell m (c_{12} + c_{66})$
 $\lambda_{22} = \ell^2 c_{66} + m^2 c_{22} + n^2 c_{44}$ ， $\lambda_{13} = n \ell (c_{13} + c_{55})$
 $\lambda_{33} = \ell^2 c_{55} + m^2 c_{44} + n^2 c_{33}$ ， $\lambda_{23} = mn (c_{23} + c_{44})$
 (ℓ, m, n) ：波面法線方向の方向余弦

(2-2) 式を (2-7) 式に代入すると、 α, β, γ に関して次の連立 1 次方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} (\lambda_{11} - \rho V^2) \alpha + \lambda_{12} \beta + \lambda_{13} \gamma &= 0 \\ \lambda_{12} \alpha + (\lambda_{22} - \rho V^2) \beta + \lambda_{23} \gamma &= 0 \\ \lambda_{13} \alpha + \lambda_{23} \beta + (\lambda_{33} - \rho V^2) \gamma &= 0 \end{aligned} \right\} (2-8)$$

ここで、 (α, β, γ) : 振動方向の方向余弦

ρ : 密度

V : 波面法線方向の速度 (法線速度)

(2-8) 式が、 $(\alpha, \beta, \gamma) = (0, 0, 0)$ 以外の解を持つためには、次式が成り立たなければならない。

$$\begin{vmatrix} \lambda_{11} - \rho V^2 & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{12} & \lambda_{22} - \rho V^2 & \lambda_{23} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & \lambda_{33} - \rho V^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2-9)$$

(2-9) 式は、 ρV^2 に関する 3 次方程式であり、得られる 3 つの根が法線速度 V を与える。その値を (2-8) 式に代入して (α, β, γ) について解くことにより、それぞれの法線速度に対応する振動方向が得られることになる。

まず、法線方向が ZL 面内に含まれる場合を考える。

法線方向の Z 軸方向に対する角度を θ とすると、その方向余弦は、 $m=0$ 、 $l=\sin\theta$ 、 $n=\cos\theta$ であり、(2-9) 式を解くと次のようになる。

$$ZL \text{ 面内; } \rho V^2 = \lambda_{22}, \quad (2-10)$$

$$= \frac{(\lambda_{11} + \lambda_{33}) \pm \sqrt{(\lambda_{11} + \lambda_{33})^2 - 4(\lambda_{11}\lambda_{33} - \lambda_{13}^2)}}{2} \quad (2-11)$$

振動方向は、例えば、 $\rho V^2 = \lambda_{22}$ のとき、(2-8) 式は、

$$\begin{aligned} (\lambda_{11} - \lambda_{22}) \alpha + 0 \cdot \beta + \lambda_{13} \gamma &= 0 \\ 0 \cdot \alpha + 0 \cdot \beta + \lambda_{13} \gamma &= 0 \\ \lambda_{13} \alpha + 0 \cdot \beta + (\lambda_{33} - \lambda_{22}) \gamma &= 0 \end{aligned}$$

となり、 $(\alpha, \beta, \gamma) = (0, 1, 0)$ 、すなわち、 y (C) 方向の振動をする横波であることが分かる。同様に考えると、他の2根は、複合の+をとると縦波、-をとると xz (LZ) 面内で振動する横波となる。

ZC面内、LC面内についても同様にして解くと、次のようになる。

$$\text{ZC面内； } \rho V^2 = \lambda_{11}, \frac{(\lambda_{22} + \lambda_{33}) \pm \sqrt{(\lambda_{22} + \lambda_{33})^2 - 4(\lambda_{22}\lambda_{33} - \lambda_{23}^2)}}{2} \quad (2-12)$$

$$\text{LC面内； } \rho V^2 = \lambda_{33}, \frac{(\lambda_{11} + \lambda_{22}) \pm \sqrt{(\lambda_{11} + \lambda_{22})^2 - 4(\lambda_{11}\lambda_{22} - \lambda_{12}^2)}}{2} \quad (2-13)$$

以上のように、ZL面内では(2-10)式で表される面に垂直な振動成分を持つ横波と(2-11)式で表される面内の振動成分を持つ縦波(複合の+側、すなわち、音速が速い方)及び横波(複合の-側、すなわち、音速が遅い方)に分離する。同様に、ZC、LC面内でも3つの波動の音速が計算できる。さらに、これらの面内以外の任意の方向に伝搬する超音波の波面に対する法線方向の速度(法線速度)を(2-9)式により計算することができ、その根を(2-8)式に代入することにより振動方向が求まる。

2.2.3 立方晶における音速の方向依存性

音響異方性材料のモデルとして最も単純であり、かつ、異方性が最も強く現れる材料の一例として、単結晶の鉄を考えると、その弾性スチフネスは、 $c_{11} = c_{22} = c_{33} = 2.331 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、 $c_{12} = c_{13} = c_{23} = 1.354 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、 $c_{44} = c_{55} = c_{66} = 1.178 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ である。²¹⁾ 例えば、 $\{100\}$ 面及び $\{110\}$ 面内における横波音速及び縦波音速の方向依存性は、(2-9)式により、それぞれ図2-4及び図2-5のように計算される。(a)は横波音速、(b)は縦波音速であり、横軸の伝搬方向 θ_H はZ軸を基準とする角度で表している。音速は波動モード及び振動方向により800～1500 m/sの変化を示

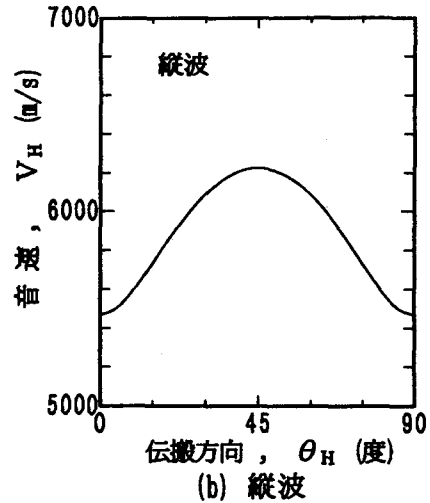
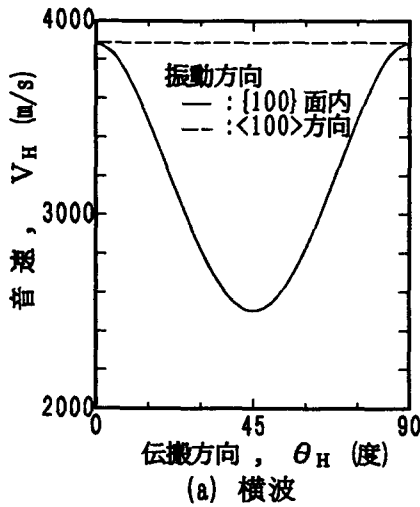


図2-4 {100} 面内における音速の方向依存性 (Fe単結晶)

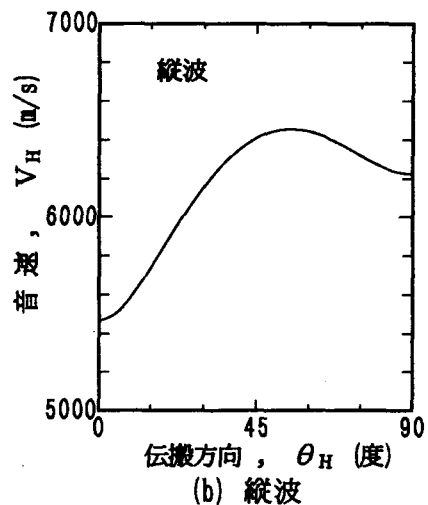
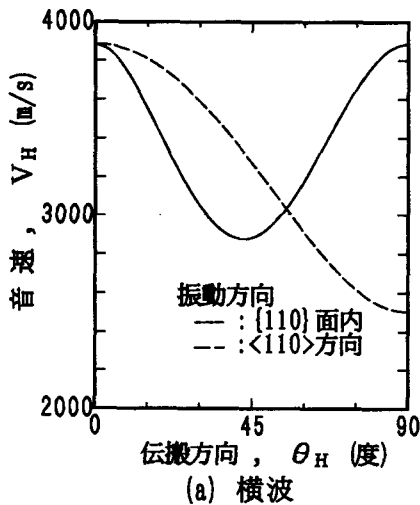


図2-5 {110} 面内における音速の方向依存性 (Fe単結晶)

しており、縦波と横波を比べると、ほぼ同程度又は縦波の方が少し変化が小さい程度である。しかし、縦波は横波に比べて音速が約2倍であり、音速の変化率で表すと、縦波の方が小さいと言える。

本研究で対象としている圧延材料の弾性係数は、集合組織の発達程度に応じて、完全にランダムな、すなわち、マクロ的に等方性に見なせる状態と単結晶の状態との間にあると考えられる。したがって、音響異方性の顕著な材料の場合、縦波を使用して超音波探傷試験を実施することによって、音響異方性の影響を軽減できるものと推測される。

2.2.4 音響異方性材料の弾性スチフネスの推定

ZL, ZC及びLC面内を伝わる超音波の音速分布は, 2.2.2に示したように, 弾性スチフネスによって, 比較的簡単な式で表される。そこで, 逆に, 特定の方向 ($\theta_H = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) の法線速度を実測することによってTMCP鋼板の弾性スチフネスを推定することを考える。

ZL面内では, (2-10), (2-11)式により, $\theta_H = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の方向の法線速度は次のように表される。

$$\theta_H = 0^\circ \quad ; \quad \rho V^2 = c_{44}^\perp, c_{33}^\perp, c_{55}^\parallel$$

$$\theta_H = 90^\circ \quad ; \quad \rho V^2 = c_{66}^\perp, c_{11}^\perp, c_{55}^\parallel$$

$$\theta_H = 45^\circ \quad ;$$

$$\rho V^2 = \frac{(c_{44} + c_{66})^\perp}{2}, \frac{(c_{11} + c_{33} + 2c_{55}) \pm \sqrt{(c_{11} - c_{33})^2 + 4(c_{13} + c_{55})^2}}{4}$$

(+側: *, -側: //)

なお, 右辺の式中の上付添字は, 振動方向を示したもので, それぞれ, 次のとおりである。

*: 縦波 (ZL面内振動)

⊥: 横波 (C方向振動)

//: 横波 (ZL面内振動)

ZC, LC面内についても, 同様に表すと次のようになる。

ZC面内では,

$$\theta_H = 0^\circ \quad ; \quad \rho V^2 = c_{55}^\perp, c_{33}^\perp, c_{44}^\parallel$$

$$\theta_H = 90^\circ \quad ; \quad \rho V^2 = c_{66}^\perp, c_{22}^\perp, c_{44}^\parallel$$

$$\theta_H = 45^\circ \quad ;$$

$$\rho V^2 = \frac{(c_{55} + c_{66})^\perp}{2}, \frac{(c_{22} + c_{33} + 2c_{44}) \pm \sqrt{(c_{22} - c_{33})^2 + 4(c_{23} + c_{44})^2}}{4}$$

(+側: *, -側: //)

LC面内では、

$$\theta_H = 0^\circ \quad ; \quad \rho V^2 = c_{55}^\perp, c_{11}^\perp, c_{66}^\parallel$$

$$\theta_H = 90^\circ \quad ; \quad \rho V^2 = c_{44}^\perp, c_{22}^\perp, c_{66}^\parallel$$

$$\theta_H = 45^\circ \quad ;$$

$$\rho V^2 = \frac{(c_{44} + c_{55})^\perp}{2}, \frac{(c_{11} + c_{22} + 2c_{66}) \pm \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4(c_{12} + c_{66})^2}}{4}$$

(+側：＊， -側：//)

これらより、弾性スチフネスは次のように決まる。

$$c_{11} = \rho V_{L-L}^2, \quad V_{L-L} : \text{縦波音速 (L方向伝搬)} \quad (2-14)$$

$$c_{22} = \rho V_{L-C}^2, \quad V_{L-C} : \text{縦波音速 (C方向伝搬)} \quad (2-15)$$

$$c_{33} = \rho V_{L-Z}^2, \quad V_{L-Z} : \text{縦波音速 (Z方向伝搬)} \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned} c_{44} &= \rho V_{\tau_{12}Z-Z}^2, \quad V_{\tau_{12}Z-Z} : \text{横波音速 (C方向振動, Z方向伝搬)} \\ &= \rho V_{\tau_{11}C-C}^2, \quad V_{\tau_{11}C-C} : \text{横波音速 (Z方向振動, C方向伝搬)} \end{aligned} \quad (2-17)$$

$$\begin{aligned} c_{55} &= \rho V_{\tau_{12}C-Z}^2, \quad V_{\tau_{12}C-Z} : \text{横波音速 (L方向振動, Z方向伝搬)} \\ &= \rho V_{\tau_{11}C-L}^2, \quad V_{\tau_{11}C-L} : \text{横波音速 (Z方向振動, L方向伝搬)} \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$\begin{aligned} c_{66} &= \rho V_{\tau_{12}Z-L}^2, \quad V_{\tau_{12}Z-L} : \text{横波音速 (C方向振動, L方向伝搬)} \\ &= \rho V_{\tau_{12}C-C}^2, \quad V_{\tau_{12}C-C} : \text{横波音速 (L方向振動, C方向伝搬)} \end{aligned} \quad (2-19)$$

$$c_{12} = \frac{\sqrt{(4\rho V_{L-L}^2 - c_{11} - c_{22} - 2c_{66})^2 - (c_{11} - c_{22})^2}}{2} - c_{66} \quad (2-20)$$

V_{L-LC} : 縦波音速, LC面内 45° 方向伝搬

$$c_{23} = \frac{\sqrt{(4\rho V_{L-LC}^2 - c_{22} - c_{33} - 2c_{44})^2 - (c_{22} - c_{33})^2}}{2} - c_{44} \quad (2-21)$$

V_{L-ZC} : 縦波音速, ZC面内 45° 方向伝搬

$$c_{13} = \frac{\sqrt{(4\rho V_{L-ZC}^2 - c_{11} - c_{33} - 2c_{55})^2 - (c_{11} - c_{33})^2}}{2} - c_{55} \quad (2-22)$$

V_{L-ZL} : 縦波音速, ZL面内 45° 方向伝搬

9つの弾性スチフネスは、3軸（L、C、Z）の方向の縦波音速と横波音速及び軸間の 45° 方向の縦波音速から（2-14）～（2-22）式を用いて求めることができる。

2.3 音速の測定方法

2.3.1 試験片

音速の測定には、素材の厚さが20mm及び35mmのTMCP鋼板（SM50），並びに、厚さが25mm及び50mmのアルミニウム合金板（A5083P-O）を使用した。図2-6に示すように、圧延面内において、圧延方向をL、これに垂直な方向をC、圧延方向から 45° 方向をQで表し、また、板厚方向をZで表す。また、超音波の伝搬方向を、ZL及びZC面内ではZ方向を基準として、LC面内ではL方向を基準として、それぞれの軸方向からの角度 θ_H で表す。

各々の素材から、例えば図2-7に示すように、超音波の伝搬方向（図中の角度 θ_H で表す。）が、ZL、ZC及びLC面内で $10\sim15^\circ$ 間隔となるように向きを変化させた一辺 T_s の立方体の試験片を切り出した。立方体の寸法は、素材の厚さにより $T_s = 14\sim30\text{mm}$ とした。また、素材の厚さ35mmのTMCP鋼板ではZQ面内についても同様の試験片を作製した。これらの試験片は、素材全体がほぼ均質であると見なして平均的な音速の方向依存

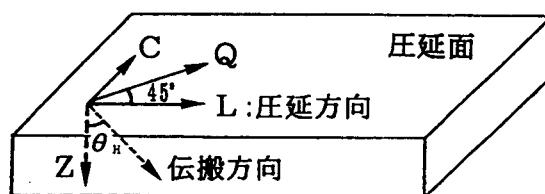


図2-6 測定方向の表し方

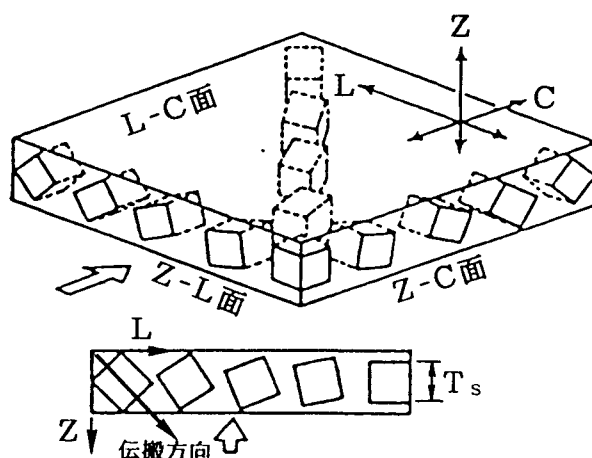


図2-7 音速測定用試験片1

性を把握するために使用した。

板厚方向の音速分布を測定するために使用した試験片を図2-8及び図2-9に示す。素材はTMCP鋼板である。図2-8(a)は、圧延方向(L方向)及びZL面内でZ軸及びL軸から45°の方向(ZL-45°方向)の音速測定に用い、また、図2-8(b)は、圧延方向に垂直な方向(C方向)及びZC-45°方向の音速測定に用いた。いずれの試験片も音速測定方向の厚さを $T_s=2.0\text{ mm}$ とした。図2-9は、板厚方向(Z方向)の音速測定に用いた試験片であり、素材の板厚 $T=20\text{ mm}$ から順に1.0 mmずつ9.0 mmまで研削したものである。表面側及び裏面側から研削した同一形状のもの2個を作製した。各試験片の音速測定方向の厚さは、マイクロメータにより各5箇所において測定し、その平均値を採用した。5箇所における測定値のばらつきは $10\text{ }\mu\text{ m}$ であった。

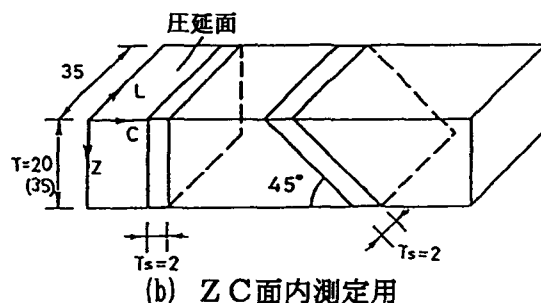
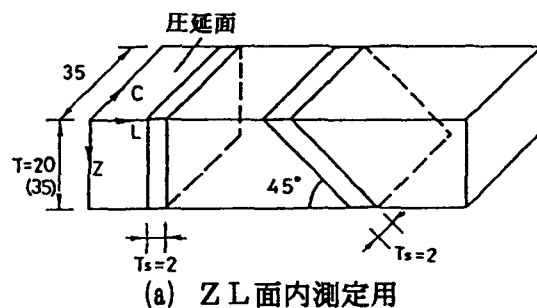


図2-8 音速測定用試験片2

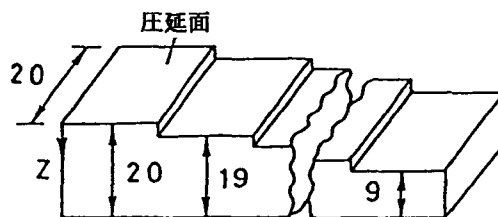


図2-9 音速測定用試験片3

2.3.2 使用装置及び探触子

音速の測定に使用した装置及び探触子を表2-1に示す。また、ブロック図を図2-10に示す。それぞれ、(a)は図2-7に示した一辺14~30 mmの試験片による音速の方向依存性の測定(測定方法1)に使用した装置及び探触子であり、(b)は図2-8及び図2-9に示した試験片による局所的な音速測

定(測定方法2)に使用したものである。

測定方法1に使用した探触子は周波数5MHz、振動子寸法10×10mmの横波垂直探触子及び10MHz、直径10mmの縦波垂直探触子である。シンクロスコープは2現象の波形表示が可能で、これによる時間

間隔の公称測定誤差は、測定値の±3%であるため、精度の高いカウンターを用いて時間間隔を測定した。カウンターによる時間の測定精度は、±5nsである。一辺14mmの試験片を横波が2往復する時間はおおよそ20μs前後であるため、測定精度は、測定値の0.025%に相当し、音速で表すと±1m/sの測定ができることになる。

測定方法2に使用した探触子は周波数5MHz、振動子寸法10×10mmの横波垂直探触子及び10MHz、直径6mmの縦波垂直探触子である。時間の分解能を高めるために、いずれも、パルス幅を狭くした高分解能形探触子を用いた。

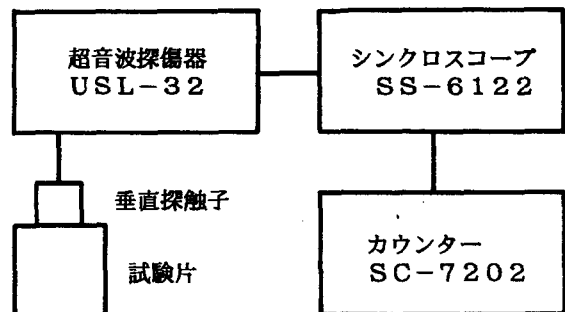
表2-1 使用装置及び探触子

(a) 方向依存性の測定

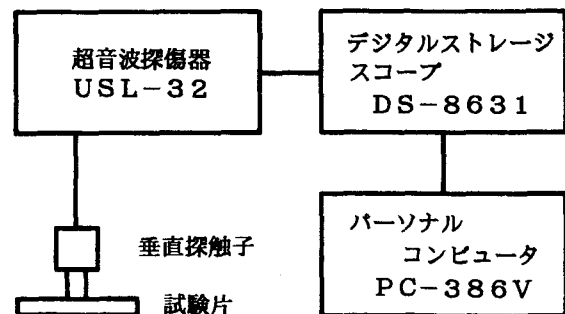
超音波探傷器		USL-32 (クラウトクレマ製)
シンクロスコープ		SS-6122 (岩崎通信機製)
マルチカウンター		SC-7202 (岩崎通信機製)
垂直探触子 (普通形)	横波用	5Z10×10SN (ジャパンプロープ製)
	縦波用	10Z10N (ジャパンプロープ製)

(b) 深さ位置による音速分布の測定

超音波探傷器		USL-32 (クラウトクレマ製)
デジタルストレージスコープ		DS-8631 (岩崎通信機製)
パーソナルコンピュータ		PC-386V (エプソン製)
垂直探触子 (高分解能形)	横波用	5Z10×10SN (ジャパンプロープ製)
	縦波用	10C6N (パナメトリクス製)



(a) 方向依存性の測定



(b) 深さ位置による音速分布の測定

図2-10 測定装置のブロック図

横波探触子の場合について，STB-A1の厚さ25mmの部分における第1底面エコーB₁のAC波形を図2-11に示す。波数は約2波であり，これを時間表示すると， $0.45\mu\text{s}$ となる。横波の音速を $V_s \div 3200\text{m/s}$ とすると，図2-8

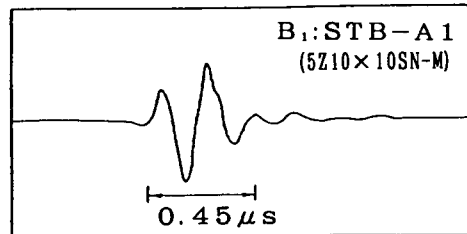


図2-11 底面エコーの波形

に示した厚さ $T_s = 2.0\text{mm}$ の試験片における底面多重エコーの時間間隔は $\Delta t_s = 2T_s/V_s \div 1.3\mu\text{s}$ となる。したがって，底面多重エコーを十分に分解して計測することができる。

超音波探傷器は高分解能形探触子の性能を生かすために，広帯域の増幅器及びフィルタを備えたものを使用した。

デジタルストレージスコープは，底面エコーのAC波形を記録するために用いた。サンプリング周期は 0.5ns とし，サンプル数は16k点（16384点）とした。デジタルストレージスコープによる時間測定の精度は 0.5ns であり，厚さ2mmの試験片を横波が往復する時間は約 $1.3\mu\text{s}$ ，縦波が往復する時間は約 $0.7\mu\text{s}$ であるから，音速の測定精度はそれぞれ 0.04% 及び 0.07% に相当することになる。

2.3.3 音速の測定方法

(1) 音速の方向依存性

音速の方向依存性の測定方法を図2-12に示す。一辺 T_s の立方体試験片に横波垂直探触子を当て，振動方向を変化させたときの多重反射図形の一

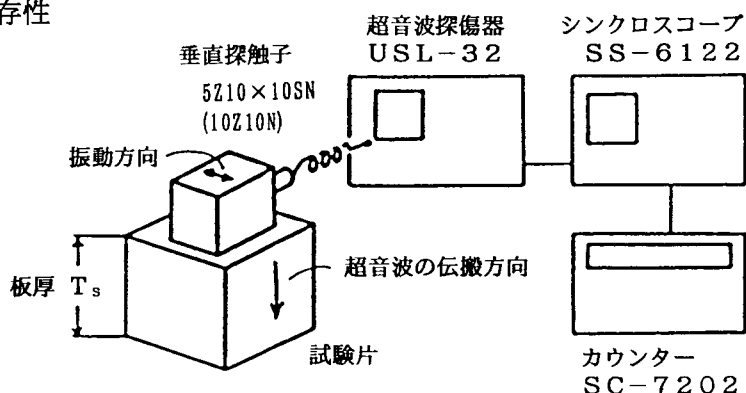


図2-12 音速の測定方法

例を図2-13に示す。これは、Z方向の横波音速を測定したものであるが、振動方向を(a)に示すように、圧延方向に対する角度 φ で表している。 $\varphi=0^\circ$

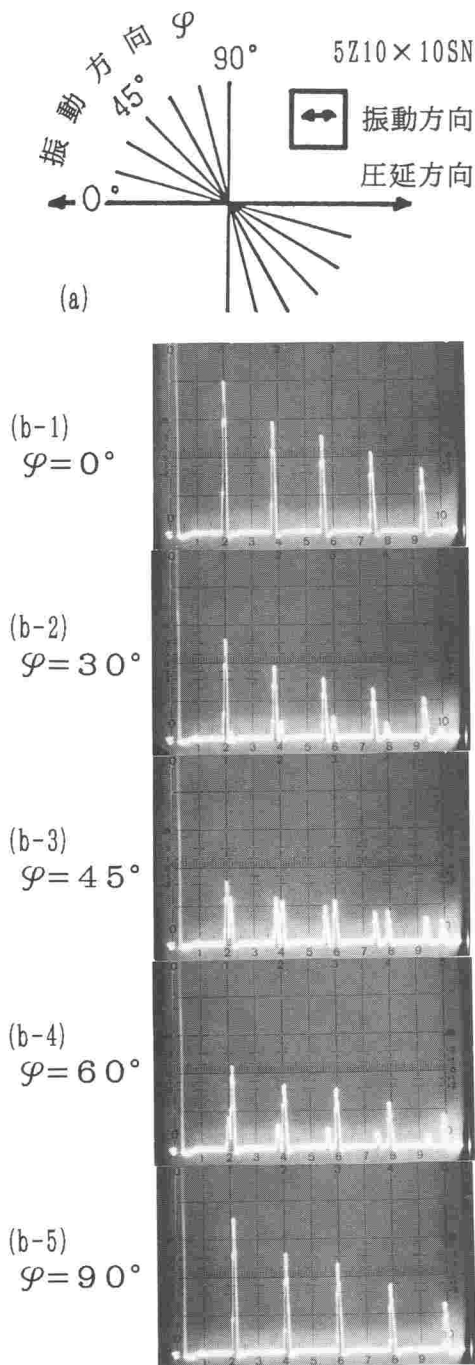


図2-13 多重反射図形

(b-1)及び $\varphi=90^\circ$ (b-5)ではそれぞれ単純な多重反射図形となっているが、(b-3)に示す $\varphi=45^\circ$ では2種類のエコーが重畳した多重反射図形となっている。2つのエコーの間隔は反射回数の増加と共に広がっており、音速の異なる2つの波が伝搬していると考えられる。(b-1)では、そのうちの速い方の横波によるエコーが、また、(b-5)では遅い方の横波によるエコーのみが現れている。それぞれの横波の振動方向がL及びC方向にそれぞれ一致していることが分かる。他の伝搬方向においても同様の探傷図形が観察された。

そこで、図2-14に示すように、すべての伝搬方向で、直交する2方向（例えば、ZL面で伝搬方向を変化させた試験片では、振動方向がZL面に平行な場合とこれに垂直な場合の2通り）について音速を測定した。これらの横波は

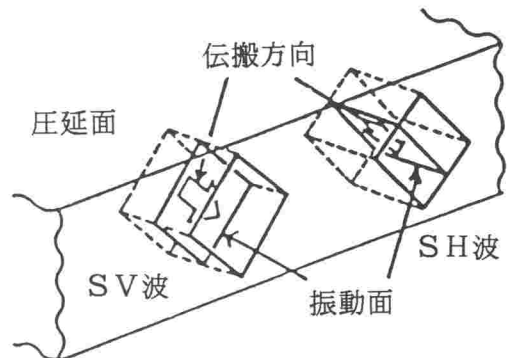


図2-14 超音波の伝搬方向と振動方向

通常の超音波斜角探傷試験に対応させると、SV波及びSH波に相当する。

具体的な音速の測定方法は次のとおりである。すなわち、図2-13の(b-1)又は(b-5)に示したような底面多重反射図形において、底面エコーB₁及びB₃の時間差tをシンクロスコープ及びマルチカウンタを用いて読み取る。例えば、A1形標準試験片の横波音速測定では、シンクロスコープ上に表示される波形が図2-15のようになる。これは、一つの探触子から得られた全く等しいAC波形を2現象シンクロスコープ上に表示したもので、2つのAC波形のうち、一方の波形に遅延を掛け、振幅の大きなB₁エコーに振幅の小さなB₃エコーを重ね合わせた状態である。これにより、B₁エコーとB₃エコーの対応するピークを見付け出し、この状態に対応する遅延時間tをマルチカウンタにより測定する。B₁エコーとB₃エコーの間に超音波は板厚を2往復するので、伝搬距離は板厚T_sの4倍に相当する距離となる。したがって、このときの横波音速は(2-23)式のように求まる。

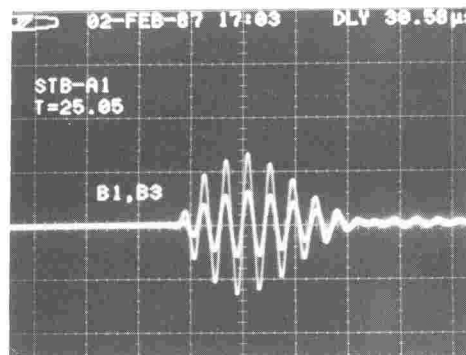


図2-15 A1形標準試験片の板厚方向の底面エコー

$$V_{A1} = \frac{4 \cdot T_s}{t} \quad (2-23)$$

ここで、 T_s : マイクロメータにより測定した板厚

同様に、立方体試験片を用い、ZL, ZC, LCの各面内において超音波の伝搬方向 θ_H を変化させたときの横波音速を測定した。

(2) 任意の位置における局所的音速測定

素材の板厚方向の任意の深さ位置における音速とその分布を正確に知るためには、試験片をできるだけ薄くし、かつ、狭い範囲の音速を測定する必要がある。しかしながら図2-11に示したように超音波の送信パルス幅が $0.45 \mu s$ で

あるので、底面エコーの間隔が少なくともこの2倍以上となることが望ましい。そこで、試験片の厚さ T_s を2.0mmとすることにした。測定方法を図2-16に示す。(a)はL方向、ZL-45°方向、C方向及びZC-45°方向の測定方法である。(b)はZ方向の測定方法で、厚さ $(T-d_1)$ 及び $(T-d_3)$ の部分に探触子を当てて、両者の第2底面エコーの時間間隔 Δt_s を測定

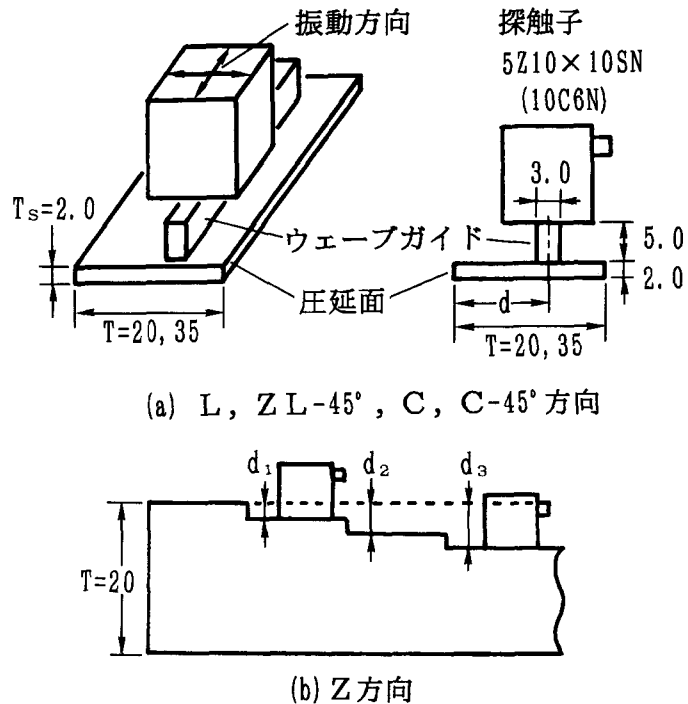


図2-16 音速の測定方法

し、深さ $(d_1 \sim d_3)$ の範囲の音速を求める。

ここで、(a)の測定に当たって、使用探触子の振動子寸法が 10×10 mmであり、これより狭い範囲の局所的な音速を測定するため、幅の狭いウェーブガイドを用いる方法を考案した。超音波の伝搬特性に加え、加工の容易さも考慮して、ウェーブガイドの素材としてアクリル樹脂を用いることとした。

アクリル樹脂中の横波及び縦波の音速は、 $V_{TA} \doteq 1300 \text{ m/s}$ 、 $V_{LA} \doteq 2700 \text{ m/s}$ であり、ウェーブガイドの厚さを T_A とすると、ウェーブガイド中での多重反射エコーの時間間隔 Δt_{TA} 及び Δt_{LA} は、 $\Delta t_{TA} = 2T_A/V_{TA}$ 、 $\Delta t_{LA} = 2T_A/V_{LA}$ で表される。 Δt_{TA} 、 Δt_{LA} が、厚さ $T_s = 2.0 \text{ mm}$ の試験片中の多重反射エコーの間隔 Δt_s ($\Delta t_{TS} \doteq 1.3 \mu\text{s}$ 、 $\Delta t_{LS} \doteq 0.7 \mu\text{s}$)に比べて十分大きくなるようにすると、ウェーブガイド中での多重反射エコーの影響を受けずに Δt_s が測定できる。

また、後に示すように、縦波の音速測定においてはウェーブガイド中の遅れエコーが現れる。この遅れ時間 Δt_{LD} は、ウェーブガイドの幅を W_A とすると、

$$\Delta t_{LD} = W_A \sqrt{\frac{1}{V_{TA}^2} - \frac{1}{V_{LA}^2}} \quad \text{で表される。}$$

Δt_{TA} , Δt_{LA} , Δt_{LD} のいずれも Δt_{TS} 又は Δt_{LS} の3倍以上となるようにウェーブガイドの厚さ T_A 及び幅 W_A を定める。一例として示すと、 $T_A \geq 1.5 \times T_S = 3 \text{ mm}$, $W_A \geq 1.5 \times T_S = 3 \text{ mm}$ となる。本研究では狭い範囲の音速測定を目的としているのでウェーブガイドの幅を3mmとし、厚さは多重反射エコーが明瞭に観察できる範囲であれば上限はないので余裕をみて5mmとした。

圧延面からウェーブガイドの幅の中心までの深さ d を測定位置とし、アセトン洗浄を施した試験片の測定箇所にウェーブガイドを瞬間接着剤で固定し、その上に探触子を当てた。

試験片中における多重反射エコーを探傷器で増幅し、そのAC波形をデジタルストレージスコープに取り出す。AD変換に際して等価サンプリングを適用してサンプリング周期を0.5nsとし、GP-IBを介してパーソナルコンピュータに転送した。

10回の測定値の平均値を記録したAC波形の一例を図2-17に示す。図中に I_1 , I_2 の記号をつけて示したエコーは、ウェーブガイドと試験片の境界面で反射された第1回目及び第2回目のエコーである。この時間間隔は、横波の場合で約 $7.0 \mu\text{s}$ 、縦波の場合で約 $3.7 \mu\text{s}$ であり、試験片中を1往復するのに要する時間はそれぞれ $1.3 \mu\text{s}$, $0.7 \mu\text{s}$ であるから、試験片の裏面で反射された試験片中だけを往復したエコー $B_1, B_2 \dots$ は、横波、縦波いずれの場合も5個現れることになる。しかし、横波の場合、

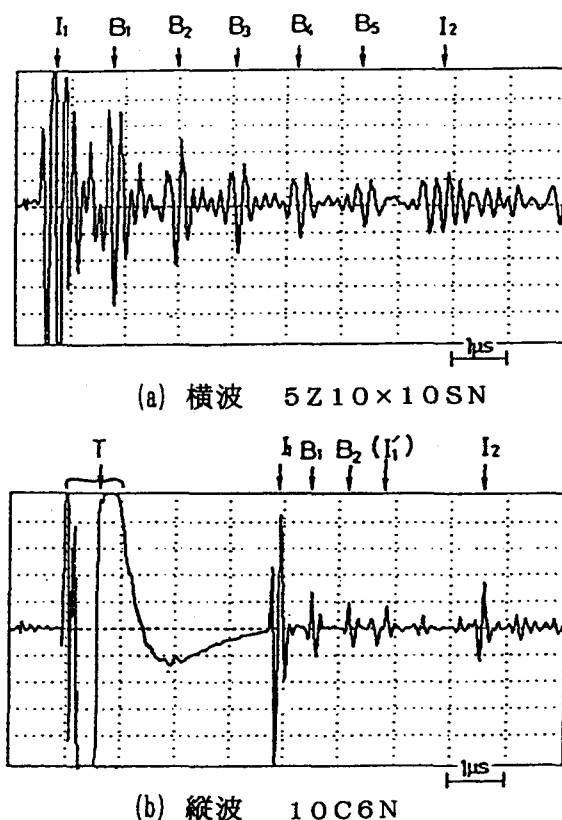


図2-17 サンプルング波形の例

(a) 図に見られるように、第1回目の底面エコー B_1 がウェーブガイドからの I_1 エコーと一部重なって歪んでいるので対象から除外して、 $B_2 \sim B_5$ の間で時間間隔を測定した。また、縦波の場合、パルス幅が狭く、 I_1 と B_1 が分離していること、アクリルのウェーブガイド中において縦波から横波にモード変換してアクリル中を横切ったいわゆる遅れエコー I_1' が B_2 の後に現れたことから、 B_1 と B_2 の時間間隔を測定した。

2つの多重反射エコーの時間間隔の測定原理をまとめて示したのが、図2-18である。(a)はいま測定しようとする2つのエコーのパルス波形 S_1, S_2 を表している。(1)で述べた音速の測定方法では、(a)図のピークからピークまでの時間間隔 Δt_s をシンクロスコープの時間差測定用カーソル又は掃引遅延時間を用いて測定している。このため、測定精度(読取りの詳しさ)はカーソルの最小単位又は遅延時間の最小単位で決まり、 10 ns 単位での読取りが限界である。しかるに、デジタルストレージスコープを用いてサンプリング周期を 0.5 ns とすれば20倍の精度の測定が可能になる。しかし、試験片中での超音波の減衰や表裏面での反射などによる波形の歪によりピーク位置がずれたり、カーソルの操作に伴う誤差が入る。特に、厚さが薄い試験片を対象とする場合、誤差が大きくなり易い。

そこで、時間差を測定しようとする2つの波形を比較して、波形全体として重なる時間差を決定するため、相互相関関数法²²⁾を適用する。この手順は以下

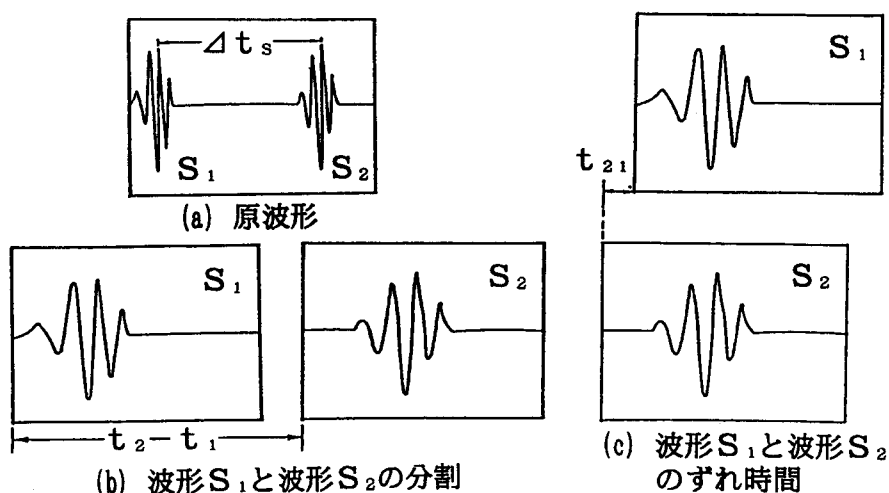


図2-18 相互相関関数法による時間間隔の測定

のとおりである。まず、図2-18 (b) に示すように、対応する2つの波形をデジタルストレージスコープの画面上に取り出し、パーソナルコンピュータによりデータを記録する。このとき、各波形を採取したときの遅延時間（各パルス波形の開始時刻 t_1 、 t_2 ）も同時に記録しておく、(c) のように、 S_1 の波形と S_2 の波形を最もうまく重ね合わせるには S_2 の波形をどれくらいずらせばよいのか、すなわち、2つの波形のずれの時間 t_{21} を調べることに帰着する。

相互相関関数 $R_{12}(\tau)$ は次式で定義される。

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) \cdot f_2(t-\tau) dt \quad (2-24)$$

ただし、 $f_1(t)$: 波形 S_1

$f_2(t)$: 波形 S_2

(2-2) 式のフーリエ変換をとる。

$$\mathcal{F}[R_{12}(\tau)] = F_1(\omega) \cdot F_2^*(\omega) \quad (2-25)$$

ただし、 $F_1(\omega) = \mathcal{F}[f_1(t)]$

$F_2(\omega) = \mathcal{F}[f_2(t)]$

$F_2^*(\omega)$: $F_2(\omega)$ の共役複素数

(2-25) 式の逆フーリエ変換を行えば $R_{12}(\tau)$ が求まり、 $R_{12}(\tau)$ が最大となるときの τ が t_{21} となる。 t_{21} が分かれば、波形 S_1 と波形 S_2 の時間間隔 Δt_s は次式で求まる。

$$\Delta t_s = (t_2 - t_1) + t_{21} \quad (2-26)$$

ただし、 t_1 : 波形 S_1 の遅延時間

t_2 : 波形 S_2 の遅延時間

t_{21} : 相互相関関数によって求めたずれの時間

以上の時間間隔 Δt_s の測定結果により、深さ位置 d における厚さ T_s の部分（Z方向の場合は $T_s = d_3 - d_1$ とする。）の音速 V は、次式で求められる。

$$V = 2 T_s / \Delta t_s \quad (2-27)$$

ただし、 T_s : 試験片の厚さ（Z方向では $T_s = d_3 - d_1$ ）

Δt_s : 2つの波形の時間間隔

2. 4 圧延した金属材料中の音速分布

(TMCP鋼板及びアルミニウム合金板の場合)

2. 4. 1 板厚方向の深さ位置による音速分布

TMCP鋼板について、測定方法2により測定した板厚方向の深さ位置による音速分布を図2-19～図2-26に示す。横軸は深さ位置を圧延面から測定位置までの深さ d を板厚 T で規準化し d/T で表示してある。図2-19～図2-21は素材の厚さが $T=20\text{ mm}$ の試験片でのZL面内における横波(SV波, SH波)及び縦波の音速であり, 図2-22～図2-24はZC面内における横波及び縦波の音速である。また, 図2-25と図2-26は, それぞれL方向及びC方向の横波音速分布を, 素材の厚さ $T=20\text{ mm}$ と $T=35\text{ mm}$ の試験片について比較したものである。伝搬方向は, いずれも, Z軸を基準とする角度 θ_H で表した。 $\theta_H=0^\circ$ は板厚方向, $\theta_H=90^\circ$ は圧延面に平行な方向である。

曲線は, 実験値を近似するため周期が板厚 T ($d/T=1$) 及び $T/2$ ($d/T=0.5$) の余弦関数の和で表した近似式の計算値である。この近似式は, 測定結果が例えば図2-19のように概ね周期 T の関数で近似できるものと, 図2-20のように周期 $T/2$ の関数で近似できるものとがあるので,

$$V_H = a \cdot \cos(2\pi x) + b \cdot \cos(4\pi x) + c \quad (x = d/T) \quad (2-28)$$

の形に整理したもので, 係数 a , b , c は最小2乗法により, それぞれ表2-2のように定まる。近似の程度は, 近似誤差 ($= |\text{測定値} - \text{近似値}|$) の標準偏差 σ で表して表中に示した。誤差の標準偏差は, Z方向の音速 ($\theta_H=0^\circ$) で最大 20 m/s (音速の 0.6%) で, 多くの場合は 10 m/s (0.3%) と評価できる。

図2-19に示したZL面内における横波SV波の音速についてみると, 板厚方向の深さ位置によって3～6%の音速変化がみられるのに対して, SH波及び縦波では1～2%とSV波の1/2程度である。

図2-20に示したZC面内では, SH波の場合, 深さ位置によって2～4%の変化がみられるが, 実用的な斜角探傷に用いられているSV波や縦波の場合, 1%以下の変化であり, 深さ位置による音速変化がないと考えてよい程度である。

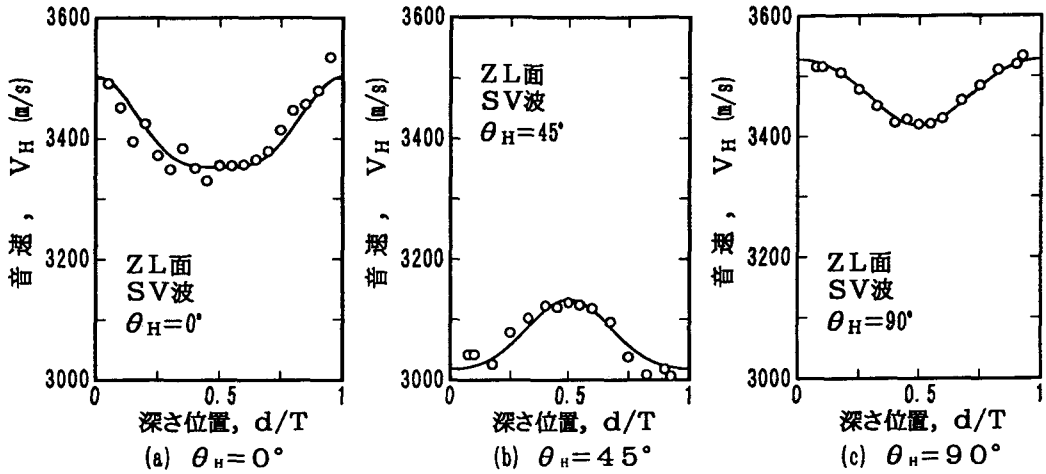


図2-19 ZL面内における横波(SV波)の音速分布 ($T=20$)

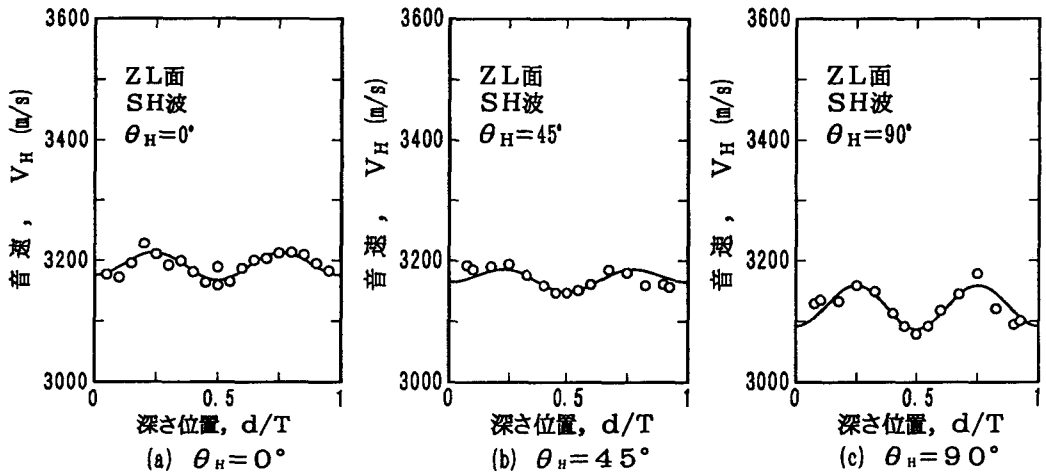


図2-20 ZL面内における横波(SH波)の音速分布 ($T=20$)

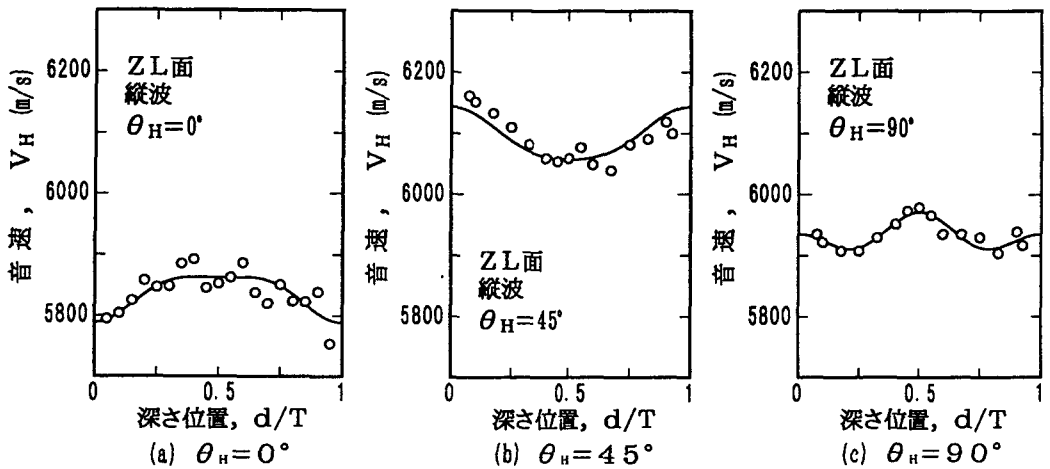


図2-21 ZL面内における縦波の音速分布 ($T=20$)

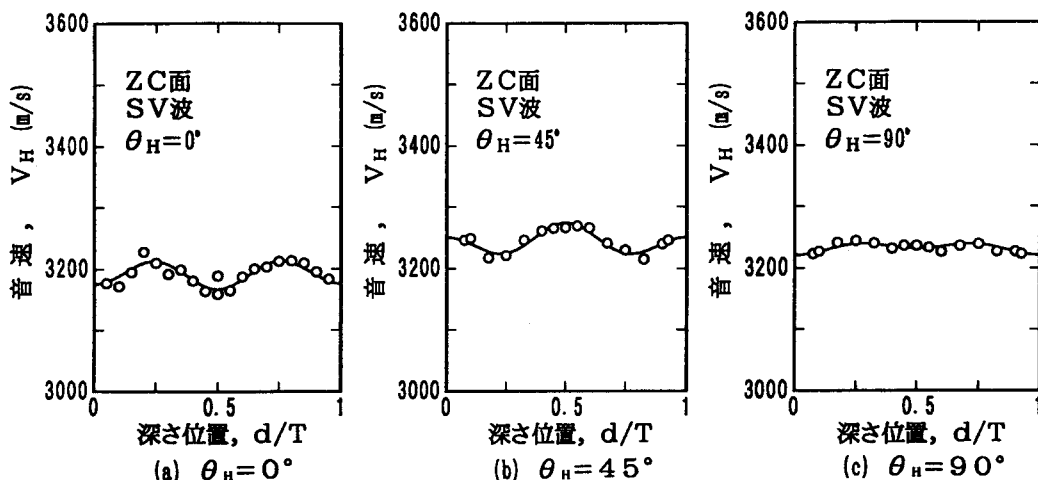


図2-22 ZC面内における横波(SV波)の音速分布 ($T=20$)

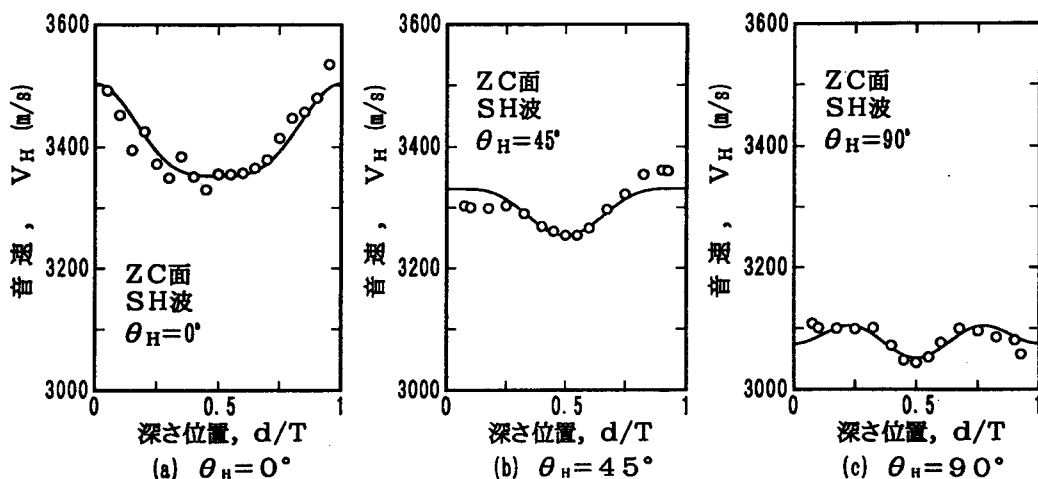


図2-23 ZC面内における横波(SH波)の音速分布 ($T=20$)

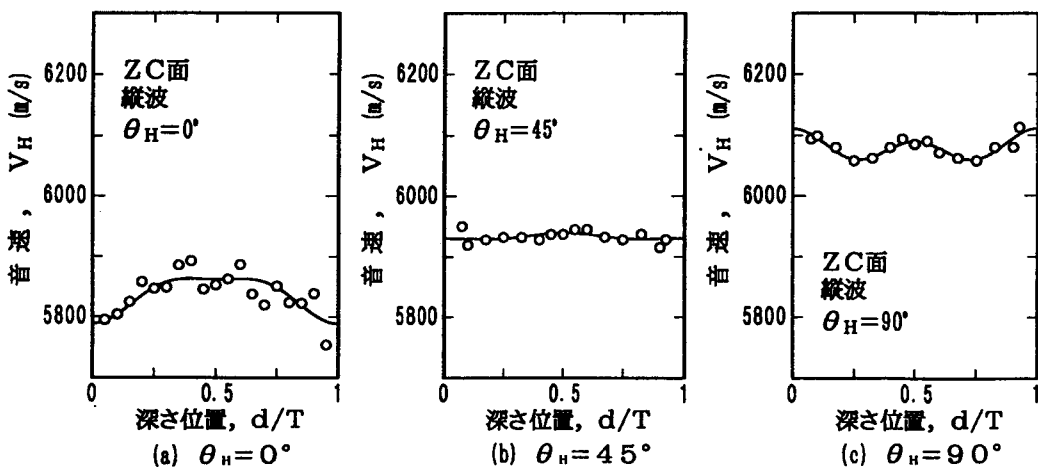


図2-24 ZC面内における縦波の音速分布 ($T=20$)

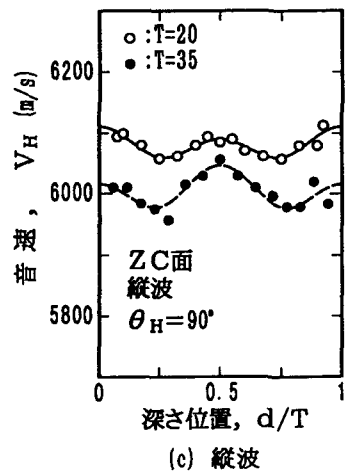
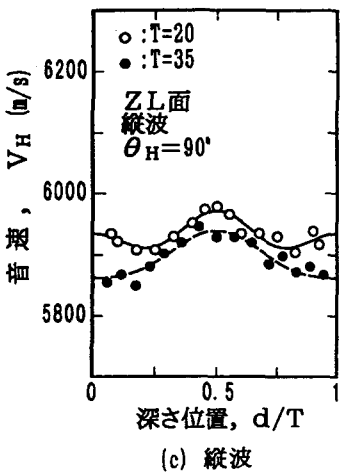
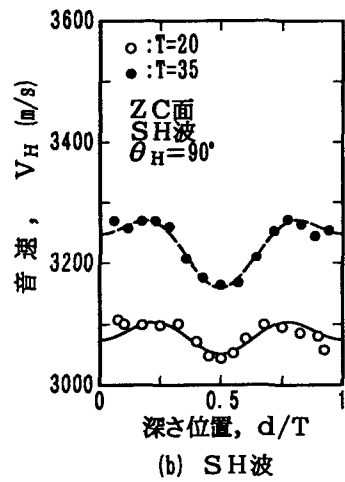
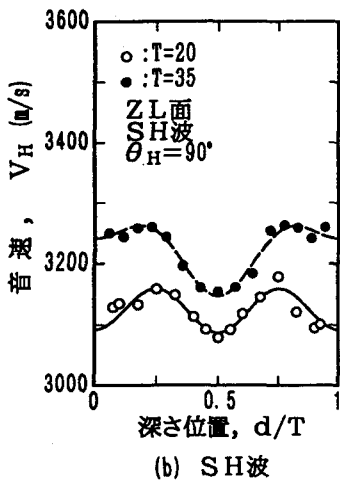
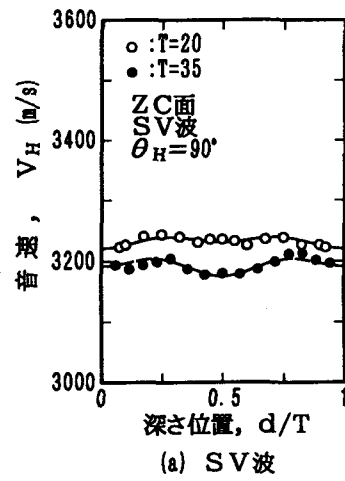
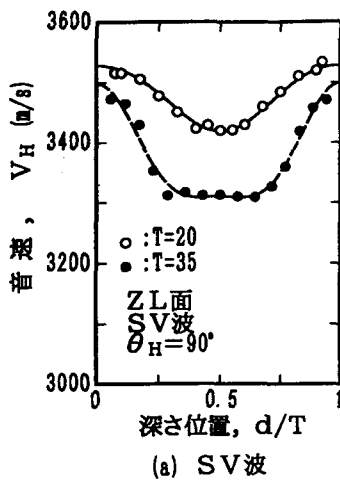


図2-25 L方向の音速分布

図2-26 C方向の音速分布

表2-2 音速分布の近似式の係数と近似度

素材 厚さ T	測定 面	波の 種類	方向 θ_H	近似式の係数			近似 度 σ	測定値		
				a	b	c		V_{max}	V_{min}	V_{max}/V_{min}
20	ZL	SV	0	72	17	3410	21	3554	3355	1.06
			45	-59	9	3067	15	3135	3017	1.04
			90	56	-4	3478	5	3530	3418	1.03
		SH	0	8	-20	3193	10	3213	3165	1.02
			45	11	-14	3171	11	3185	3146	1.01
			90	9	-33	3125	14	3158	3092	1.02
		L	0	-35	-11	5837	20	5861	5791	1.01
			45	43	6	6093	20	6142	6056	1.01
			90	-22	19	5933	10	6020	5885	1.02
	ZC	SV	0	8	-20	3193	10	3213	3165	1.02
			45	-15	18	3243	7	3276	3225	1.02
			90	-4	-6	3233	4	3239	3223	1.00
		SH	0	72	17	3410	21	3499	3355	1.04
			45	41	-10	3303	19	3334	3252	1.03
			90	15	-19	3084	13	3103	3050	1.02
		L	0	-35	-11	5837	20	5861	5791	1.01
			45	-5	3	5932	9	5940	5929	1.00
			90	7	19	6080	8	6106	6061	1.01
35	ZL	SV	90	92	27	3377	11	3496	3312	1.06
		SH	90	50	-29	3223	9	3252	3144	1.03
		L	90	-39	6	5884	10	5939	5861	1.01
	ZC	SV	90	9	-10	3193	6	3203	3174	1.01
		SH	90	47	-29	3234	8	3263	3158	1.03
		L	90	-18	26	6005	13	6049	5979	1.01

以上の結果をまとめると、ZL面内ではSV波が深さ位置による音速変化の割合が大きく、ZC面内では、SH波の変化の割合が大きい。また、縦波はZL面内及びZC面内のいずれにおいても変化の割合は小さい。したがって、通常の斜角探傷で使われているSV波では、圧延方向（L方向）の探傷において板厚方向の不均質さ（音速が一定でないこと）の影響を大きく受けることになる。

次に、同じ伝搬方向、波の種類で素材の厚さが異なる試験片の音速分布を図2-25及び図2-26において比較すると、ZL面内及びZC面内いずれも変化の仕方（近似曲線の形）は似ているが、最大値と最小値の比は大きくなっていた。これは、圧延時に表層部ほどより強度の塑性加工を受けるため、板厚の厚いもの（ $T=35\text{ mm}$ ）ほど表層部と内部とで集合組織の程度（集積度）に違いが現れるのではないかと考えられる。

2. 4. 2 伝搬方向による音速分布

素材の厚さが $T=20$ 及び 35 mm のTMCP鋼板について、立方体の試験片による横波の音速分布の測定結果を図2-27及び図2-28に示す。いずれも(a)はZL面内、(b)はZC面内、(c)はLC面内で伝搬方向を変化させたものである。○印、△印で示した測定値は、振動方向が、それぞれの面内にある横波(SV波)、及び、それぞれの面に垂直な横波(SH波)の音速である。

これらの測定値から、各振動方向の横波音速は周期性を持つことが分かる。いま、 $\theta_H=0^\circ$ 、 45° 、 90° 方向の音速をそれぞれ V_0 、 V_{45} 、 V_{90} で表すと、振動方向がZL、ZC及びLC面内の横波音速は、周期が 90° の余弦曲線であり、およそ $(V_0+V_{90}+2\cdot V_{45})/4$ を中心として、振幅が $(V_0+V_{90}-2\cdot V_{45})/4$ に相当する。また、振動方向が、L、C及びZ方向のものについては、周期 180° の余弦曲線であり、振幅は $(V_0-V_{90})/2$ としてよい。したがって、音速分布は(2-29)式で表せる。

$$V_H = \frac{V_0+V_{90}+2V_{45}}{4} + \frac{V_0+V_{90}-2V_{45}}{4} \cos 4\theta_H + \frac{V_0-V_{90}}{2} \cos 2\theta_H \quad (2-29)$$

ただし、 V_H ：音速（波面法線速度）

V_0 、 V_{45} 、 V_{90} ： $\theta_H=0^\circ$ 、 45° 、 90° 方向の音速

θ_H ：伝搬方向で、波面に対する法線方向で表す。

各図中の曲線は(2-29)式による計算結果であり、測定値からのずれは最大で 12 m/s である。すなわち、測定面及び振動方向が異なっても、伝搬方向 $\theta_H=0^\circ$ 、 45° 及び 90° の3方向の音速 V_0 、 V_{45} 、 V_{90} から、(2-29)式により音速分布を近似してよいと判断できる。したがって、異方性材料中の音速の方向依存性は、3方向の音速 V_0 、 V_{45} 、 V_{90} を測定するだけで、音速分布全体を推定できる。

溶接部の斜角探傷を行う場合、あらかじめその材料が音速異方性を示すかどうか確認しておく必要がある。もし異方性があれば、板厚方向に横波を伝搬させたとき、図2-27、図2-28のように、L方向振動の横波音速 V_L とC方向

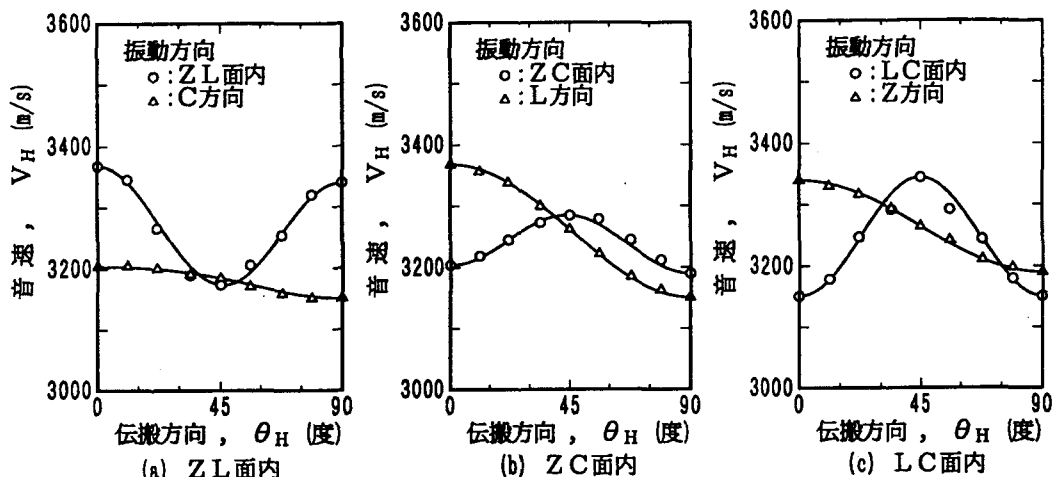


图 2-27 横波音速分布 (TMCP 钢板, $T=20$)

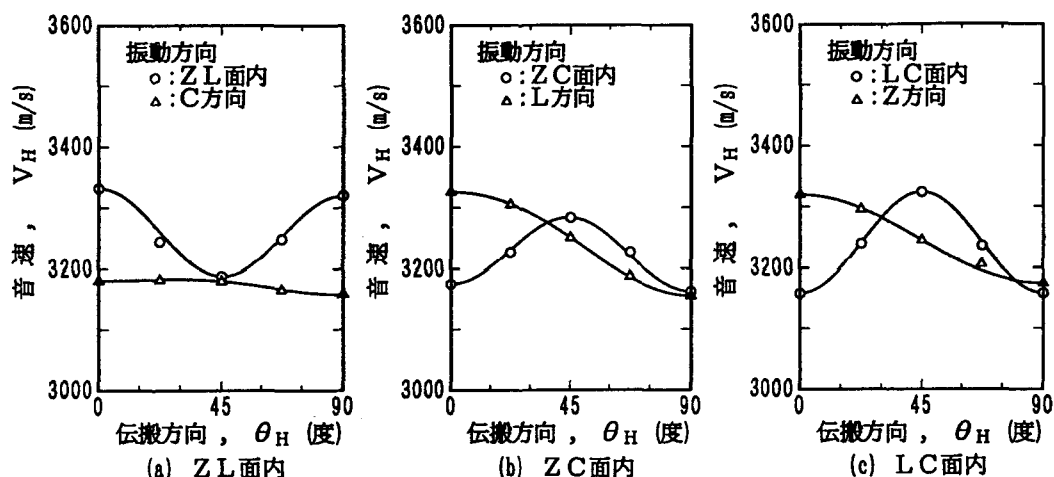


图 2-28 横波音速分布 (TMCP 钢板, $T=35$)

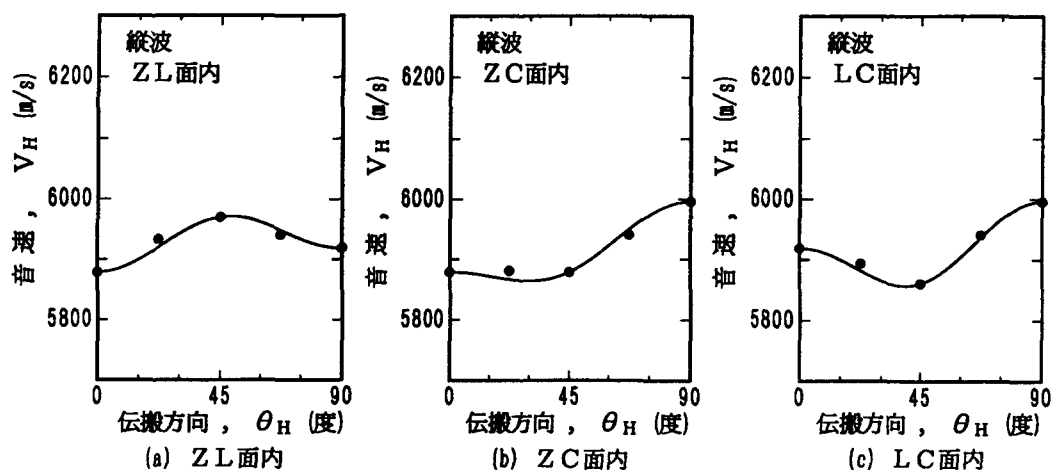
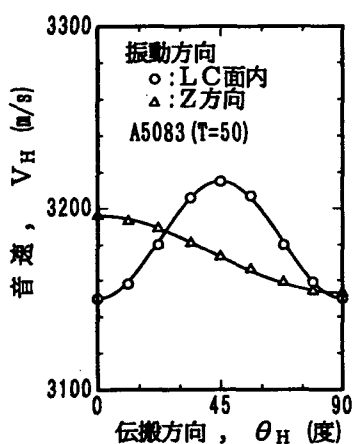


图 2-29 纵波音速分布 (TMCP 钢板, $T=35$)

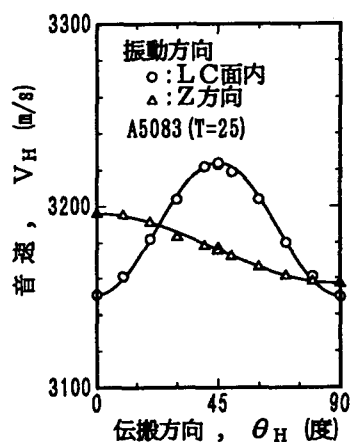
振動の横波音速 V 。とに差を生じることから、この差の有無から異方性の有無を判定できる。

図2-29は、板厚 $T=35\text{ mm}$ のTMCP鋼板中の縦波の音速分布である。曲線は(2-29)式による計算値であり、縦波の場合も音速分布を(2-29)式で近似できることが分かる。

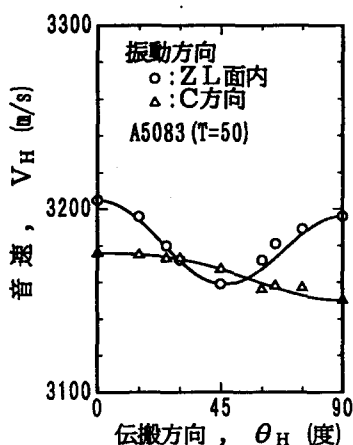
図2-30は、板厚 $T=25, 50\text{ mm}$ のアルミニウム合金板中の横波の音速分布である。図2-27, 図2-28に示したTMCP鋼板に比べると、音速の方向依存性(異方性の程度)は小さいが、変化の様子はよく似ており、圧延材料中では共通して、ZL面内ではSV波の異方性が大きく、ZC面内ではSH波の異方性が大きく現れるようである。



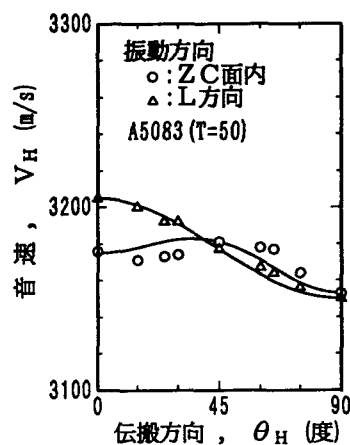
(a) LC面内 ($T=50$)



(b) LC面内 ($T=25$)



(c) ZL面内 ($T=50$)



(d) ZC面内 ($T=50$)

図2-30 横波音速分布 (アルミニウム合金板)

2. 4. 3 圧延組織の観察及び硬さと音速

2. 4. 1において、制御圧延鋼板が音響異方性を有すること、特に、板厚方向の深さ位置によって音速が異なることが明らかになった。そこで、圧延方向及びこれに垂直な方向の断面における組織観察と硬さ測定を行った。

試料は音速測定を行ったものと同じTMCP鋼板（厚さ20mm）から採取し、ZL面及びZC面を測定面とした。測定面はいずれも1200番の研磨紙で研磨し、10%硝酸アルコールで腐食し、次に、測定面上において、圧延面から板厚方向に0.5～1mm 間隔にピッカース硬さを測定した。荷重は500gで、保持時間は15秒とした。また、圧痕近傍の組織を光学顕微鏡により観察した。

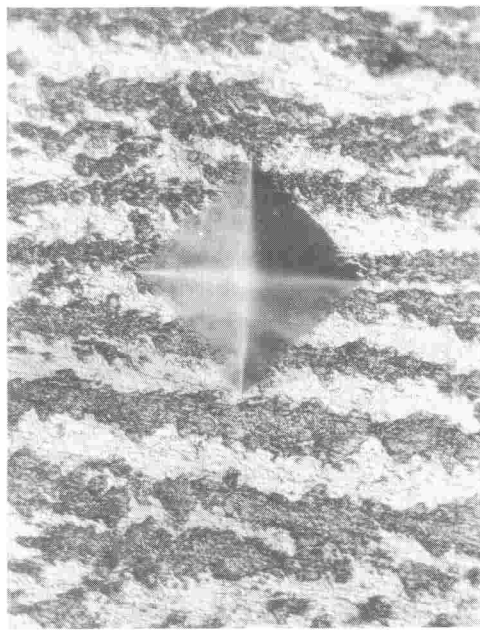
図2-31及び図2-32は圧延面近傍と板厚中央部の組織の代表例である。図2-31はZL断面の組織であるが、白く見えるフェライト組織と黒く見えるパーライト組織がほぼ平行に圧延方向に延ばされている。また、(a)の表層部（深さ1mm）では、(b)の中央部（深さ9mm）に比べて、より組織が薄く延ばされているのが分かる。図2-32はZC断面のものであるが、組織がC方向に伸びていないことを除いて、深さ位置に対して図2-31と同様の傾向が見られる。すなわち、表層部ほどより強い加工を受けて圧延集合組織が強く現れるために、図2-19～図2-26のような音速分布が現れたものと考えられる。

図2-33は、板厚方向の硬さ分布である。(a)はZL面、(b)はZC面における測定結果であるが、いずれも $H_v = 150 \sim 180$ の範囲でほぼ一定していた。

深さ位置による音速変化のもっとも大きかった板厚方向に伝搬する横波（図2-19(a)及び図2-20(a)）について、硬さと音速の関係を整理したのが図2-34である。(a)はL方向に振動する横波の音速、(b)はC方向に振動する横波の音速により整理したものであり、○印によりZL面における硬さとの関係を、●印によりZC面における硬さとの関係を表している。いずれの場合もピッカース硬さの分布と音響異方性との明瞭な相関は認められない。

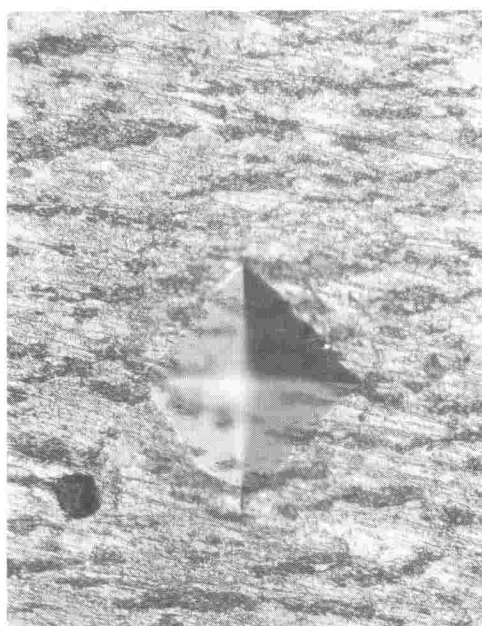


(a) 深さ: $d = 1 \text{ mm}$ $50 \mu\text{m}$

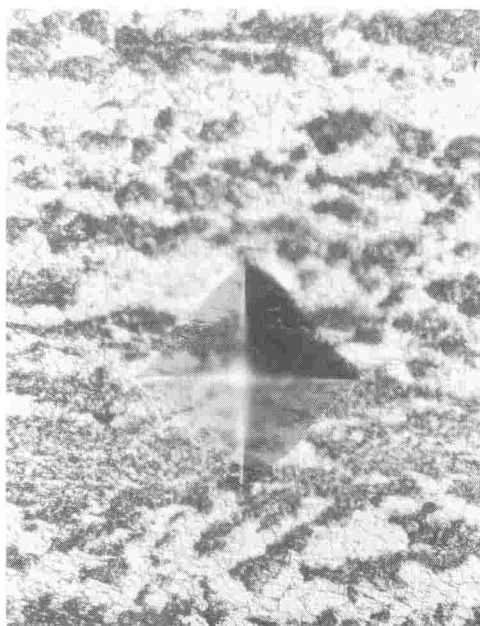


(b) 深さ: $d = 10 \text{ mm}$ $50 \mu\text{m}$

図2-31 圧延組織 (ZL面)



(a) 深さ: $d = 1 \text{ mm}$ $50 \mu\text{m}$



(b) 深さ: $d = 10 \text{ mm}$ $50 \mu\text{m}$

図2-32 圧延組織 (ZC面)

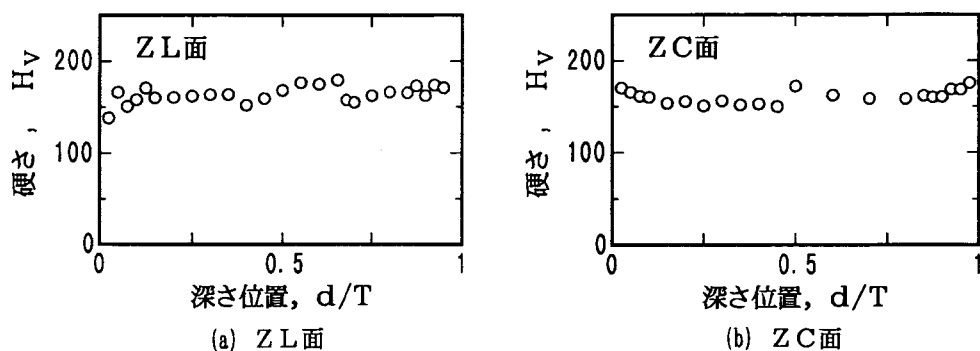


図2-33 板厚方向の硬さ分布

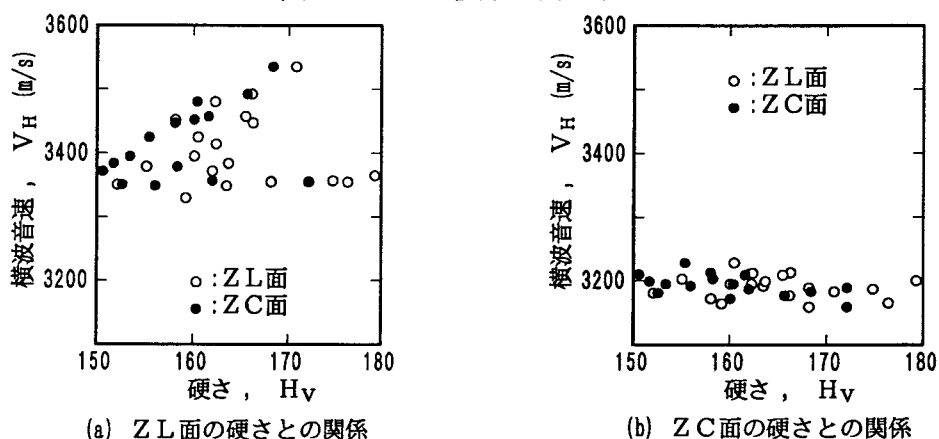


図2-34 硬さと横波音速の関係（伝搬方向; Z, 振動方向; L）

2.5 音速と振動方向の弾性波動論的解析方法の評価

(1) 弾性スチフネス

2.2.4に述べたように、9つの弾性スチフネスは、3軸（L, C, Z）の方向の横波音速と縦波音速及び軸間の45°方向の縦波音速から（2-14）～（2-22）式を用いて求めることができる。この方法を適用して、図2-28, 29に示した音速の測定値から求めたTMCP鋼板（ $T=35\text{ mm}$ ）の弾性スチフネスを表2-3に示す。

表2-3 弾性スチフネス
(TMCP鋼板, $T=35$)

C_{11}	$= 27.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
C_{22}	$= 28.0$
C_{33}	$= 27.0$
C_{44}	$= 7.86$
C_{55}	$= 8.63$
C_{66}	$= 7.79$
C_{12}	$= 10.3$
C_{23}	$= 10.7$
C_{13}	$= 11.2$

(2) 音速分布

図2-35にTMCP鋼板の横波音速分布を示す。(a)はZL面内、(b)はZC面内、(c)はLC面内でそれぞれの伝搬方向を変化させたものである。○印、△印で示した測定値は、図2-28と同じである。また、縦波の音速分布を図2-36に示す。図中の各曲線は、弾性スチフネスから(2-9)式によって求めた計算結果であり、測定値からのずれは最大で15 m/sであり、ほぼ対応していた。すなわち、測定面及び振動方向が異なっても弾性スチフネスから

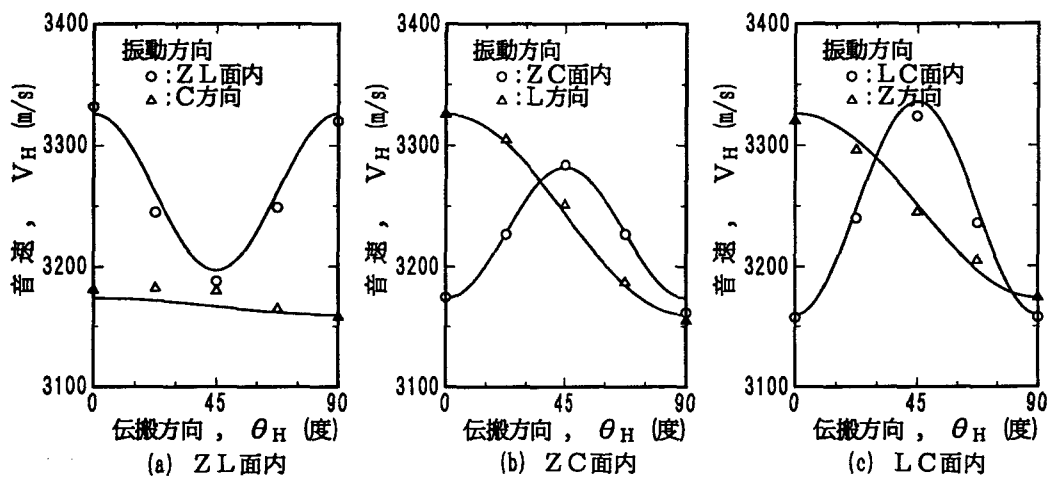


図2-35 横波音速分布 (TMCP鋼板, $T=35$)

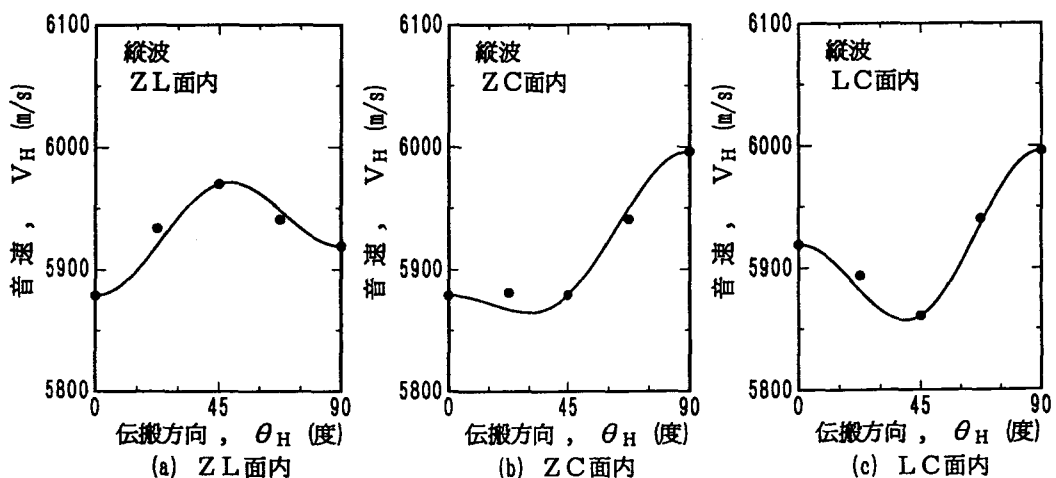


図2-36 縦波音速分布 (TMCP鋼板, $T=35$)

(2-9) 式により、音速分布を推定できると考えられる。

次に、圧延方向に対して 45° 方向の断面 (ZQ面) 内における音速分布を図2-37に示す。実線は弾性スチフネスから求めた計算結果であり、破線は(2-29) 式による計算結果である。ZQ断面内の音速分布を知るためには弾性スチフネスに基づいた計算をすれば十分信頼できる結果を得ることができる。

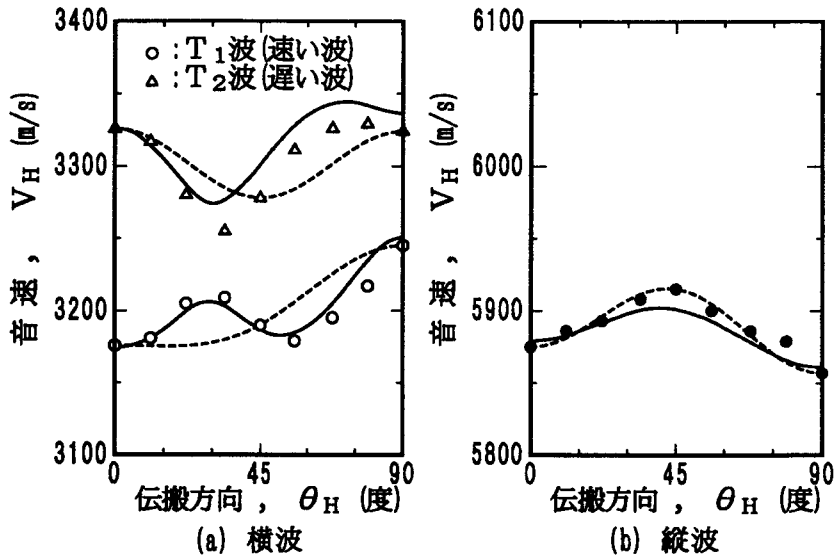


図2-37 ZQ面内における音速分布 (TMCP鋼板, $T=35$)

(3) 振動方向

圧延方向に対し 45° 方向 (Q方向) の断面内で、伝搬方向を変化させたときの振動方向を示したのが図2-38である。○印, △印は測定値である。曲線は弾性スチフネスから求めた振動方向を示している。これからみて、計算値も2つの波の振動方向の差が 90° となっており、また、測定値とのずれは最大で 8° , 平均 3.6° であり、よい対応を示している。

ZL, ZC及びLC面内を伝搬する横波超音波は、それぞれ、面内で振動する横波 (SV波)

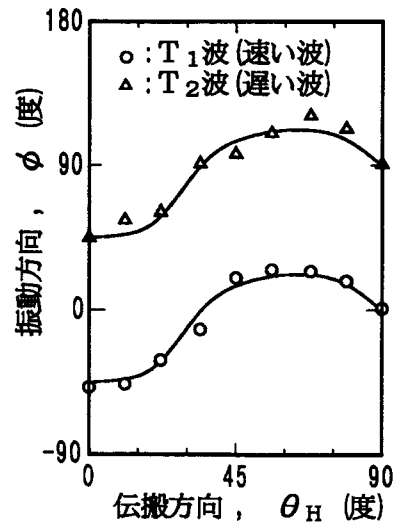


図2-38 ZQ面内における横波の振動方向の変化

と面に垂直に振動する横波（SH波）だけであつたが、例えば、ここに示したQ方向の断面のように、任意の方向に伝搬する横波の振動方向は互いに直交しているが、純粋なSV波とSH波ではない。このため、通常のSV波用の斜角探触子を用いても、音速の異なる振動方向をもつ2つの横波が伝わることに注意しなければならない。

2. 6 結言

音速の測定方法及び板厚方向の深さ位置による音速分布、伝搬方向による音速分布について行った一連の実験で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) TMCP鋼板の音響異方性は圧延集合組織によるものであり、その弾性スチフネスの対称性は斜方晶系と同じである。これら9つの弾性スチフネスは、Z、L、Cの各軸方向に伝わる横波音速と縦波音速、及び、各座標軸間の 45° 方向の縦波（又は横波）音速から求めることができる。また、求めた弾性スチフネスによって、ZL、ZC、LC面内だけでなく、これら以外の任意の方向に伝搬する超音波の波面に対する法線速度を計算することができる。また、振動方向の計算も可能であることを示した。
- (2) 板厚方向に横波を伝搬させたとき、圧延方向に振動する横波音速 V_L とこれに垂直な方向に振動する横波音速 V との差を生じる場合、その材料は音響的異方性を有していると考えてよい。
- (3) 板厚方向の深さ位置による音速分布の測定に際して、試験片の局所的な音速測定が必要となる。そこで、アクリル樹脂製のウェーブガイドを使用する方法を考案し実験した結果、振動子寸法よりも狭い範囲での音速測定が可能であることが明らかになった。

なお、厚さ T_s の鋼試験片の場合、ウェーブガイドの厚さ及び幅を $1.5 \times T_s$ 以上とすることにより、ウェーブガイド内の多重反射エコー及び遅れエコーの干渉を受けずに試験片中の多重反射エコーを得ることができる。

(4) 本研究に用いたTMCP鋼板における板厚方向の深さ位置による音速分布を求めた。なお、これらの値は、周期が板厚 T 及び $T/2$ の余弦関数の和で近似でき、近似による誤差の標準偏差は最大で 20 m/s 、多くの場合 10 m/s 程度である。

深さ位置による音速の変化は、ZL面内ではSV波が $3\sim6\%$ と大きく、縦波は $1\sim2\%$ と変化が少ない。ZC面内では、SV波及び縦波共に 1% 以下であり、音速変化がないと考えてもよい。

(5) 音速分布は伝搬方向に対して周期性を持つことが分かった。また、3方向の音速、すなわち、板厚方向を基準として、伝搬方向が $\theta_H = 0^\circ$ 、 45° 、 90° の音速を測定するだけで、余弦関数の一次結合として音速の方向依存性を推定することができる。近似式は次のとおりである。

$$V_H = \frac{V_0 + V_{90} + 2V_{45}}{4} + \frac{V_0 + V_{90} - 2V_{45}}{4} \cos 4\theta_H + \frac{V_0 - V_{90}}{2} \cos 2\theta_H$$

ただし、 V_H ：音速（波面法線速度）

θ_H ：波面法線方向（基準は板厚方向で、 $\theta_H = 0^\circ$ ）

V_0, V_{45}, V_{90} ： $\theta_H = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ のときの音速

伝搬方向による音速の変化はZL面内ではSV波が $9\sim16\%$ 、ZC面内ではSH波が $10\sim12\%$ と変化の割合が大きい。縦波はいずれの面内においても変化が少なく、 $4\sim5\%$ であった。

第3章 音響異方性材料中における

超音波の伝搬挙動と反射特性の解析

3.1 緒言

超音波斜角探傷においては、従来、等方性の鋼製標準試験片を用いて斜角探触子の入射点及び屈折角の測定を行っている。しかし、音響異方性を有する材料で作製した同一形状の試験片では入射点が大きくずれたり、探傷方向によって屈折角が変化する、などの新たな問題が生じる。

本章では、まず、“均質な”音響異方性材料中における超音波の基本的な伝搬挙動を明らかにする。等方性材料におけるスネルの法則と対比させながら、音速の方向依存性と超音波の伝搬方向との関係を明らかにしている。

第2章において弾性波動論的解析により、音響異方性材料中では、1つの伝搬方向に伝わる横波超音波は特定の直交する2方向に振動する横波しか存在し得ないことを示した。従来の検討では圧延方向又はそれに直交する方向の斜角探傷に関するものが多く、これら以外の方向ではエコー高さが若干低下することが指摘されている¹⁰⁾にとどまっている。そこで、横穴及び球面反射源を有する試験片を用いて、これを種々の方向から探傷したときの結果と弾性波動論的解析結果とを比較検討し、異方性材料における欠陥エコーの現れ方の特徴を抽出している。

また、第2章において指摘しているように、一部のTMCP鋼板では板厚方向に“不均質な”分布を持つ音響異方性を有している。そこで、その音速分布を基に、超音波の伝搬方向の深さ位置による変化を検討し、超音波の伝搬経路（音線）が屈曲していることを明らかにしている。さらに、斜角探傷における超音波ビームの中心軸上の音圧分布を解析し、実験結果と比較検討している。

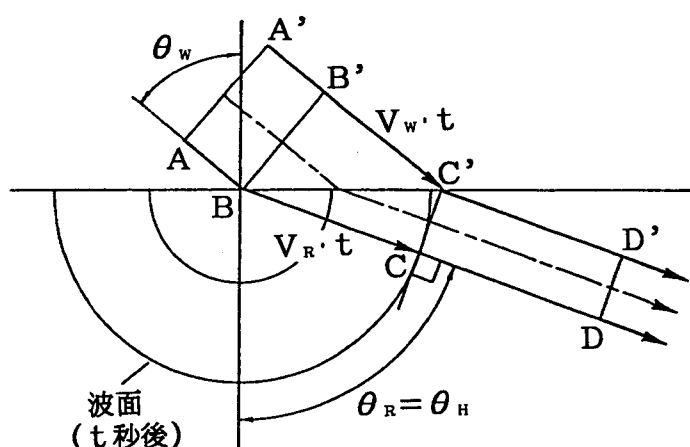
最後に、異方性材料中の欠陥を想定して、その反射面における超音波の反射方向を解析し、実験により確認している。これにより、溶接部に発生が予想される面状欠陥の検出に適した探触子の屈折角を明らかにしている。

3.2 均質な音響異方性材料中における超音波の伝搬

3.2.1 音響異方性材料界面におけるスネルの法則

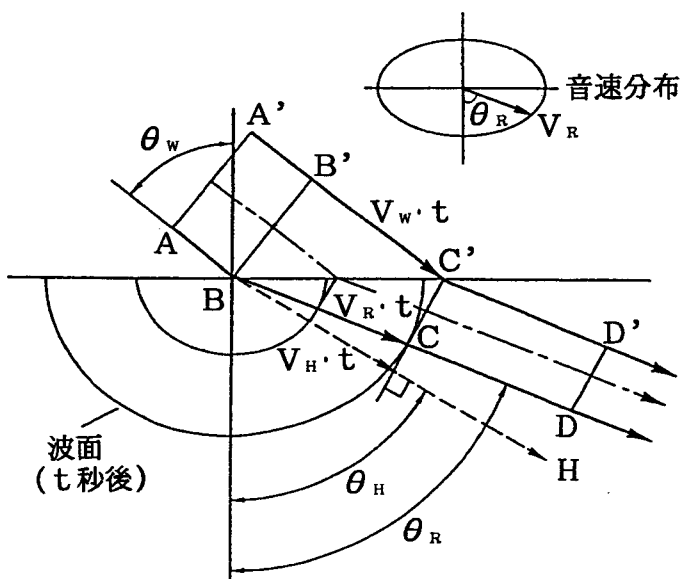
斜角探触子の振動子から発射された超音波が、探触子のくさび中を伝搬した後、音響学的に等方性を有する材料及び異方性を有する材料中へ進行する様子を

図3-1に示す。図3-1(a)は、等方性材料中の場合で、振動子AA'から発射された超音波は平面波的に進行するものと考えられるから、振動子AA'を出た超音波の波面はBB'まで進み、点B側から順次試験材料中へ進行する。



(a) 均質な等方性材料

いま、くさび中の点B'から点C'に達するまでも秒かかったとする。(すなわち、 $\overline{B'C'} = V_w \cdot t$) ホイヘンスの原理を適用するために点Bを点音源とみなすと、点Aを出た超音波は点Bを通過して、そのt秒後に図3-1(a)に示す点Cを通る波面に達する。試験体中の音速を



(b) 均質な異方性材料

図3-1 超音波の伝搬方向の解析

V_R とすると、この波面は半径 $V_R \cdot t$ の円となる。点 C' からこの波面曲線に接線を引き、その接点を点 C とすると、 $\overrightarrow{BC}$ は試験材料中における超音波の伝搬方向を表している。光と同じように、音（振動）の伝搬経路を音線と呼び、その方向を音線方向、また、音線方向に沿った伝搬速度を音線速度と呼ぶことにする。音線方向を図中の角度 θ_R （音線方向角と呼ぶことにする。）で表し、音線速度を V_R で表す。接線 CC' は振動子 AA' による超音波の波面であり、時間の経過とともに、波面は $CC' \rightarrow DD'$ のように進行する。このとき、波面に対する法線方向は音線方向に一致する。したがって、 $\triangle BB'C'$ と $\triangle BCC'$ を考えると、超音波の入射角 θ_w 及び屈折角（音線方向角） θ_R とくさび及び試験体中の音速 V_w 、 V_R について（3-1）式が成り立つ。これは、スネルの法則としてよく知られている原理である。

$$\frac{V_w}{\sin \theta_w} = \frac{V_R}{\sin \theta_R} \quad (3-1)$$

ただし、 θ_w : 入射角
 θ_R : 屈折角（音線方向角）
 V_w : くさび中の縦波音速
 V_R : 試験体中の音速（音線速度）

一方、音響学的に異方性をもつ試験体中でも同様にして、超音波の伝搬方向を求める。いま、図3-1（b）に示すように、異方性の試験材料中における音速分布を楕円で近似することにする。また、異方性の程度は、試験体全体にわたって一様、すなわち、均質であるとする。点音源 B による t 秒後の波面は、 $r = V_R \cdot t$ の楕円で表される。点 C' から波面曲線に接線を引き、超音波の伝搬方向 $\overrightarrow{BC}$ 及び波面 CC' を求める。超音波振動は図中の角度 θ_R で表される方向に $B \rightarrow C \rightarrow D$ と伝搬し、その伝搬速度（音線速度）は V_R である。このとき、波面は $CC' \rightarrow DD'$ のように進行するが、超音波の音線方向 $\overrightarrow{BC}$ とは直交せず、ある傾きを持つ。波面に対する法線方向は $\overrightarrow{BH}$ であり、これを角度 θ_H （法線方向角と呼ぶことにする。）で表す。法線方向への波面の移動速度を法線速度と呼び、記号 V_H で表すことにする。

音速が等方性を示す材料中では超音波の伝搬方向と波面法線方向が一致するのに対して、異方性の試験体中では伝搬方向（音線方向角 θ_R ）と波面法線方向（法線方向角 θ_H ）が一致しない。このとき、法線速度 V_H は、

$$V_H = V_R \cdot \cos(\theta_R - \theta_H) \quad (3-2)$$

で表され、

$$\frac{V_W}{\sin \theta_W} = \frac{V_H}{\sin \theta_H} \neq \frac{V_R}{\sin \theta_R} \quad (3-3)$$

となる。 θ_H 、 V_H についてスネルの法則が成り立つが、 θ_R 、 V_R については成り立たない。また、異方性を有していても材料全体にわたって均質であれば、超音波は図3-1 (b) のように θ_R の方向に直進する。

3. 2. 2 音響異方性材料中における波面法線方向と音線方向

音響異方性材料の場合、(3-3) 式に示したように、超音波の音線方向に対してスネルの法則が成り立たない。このため、図2-22に示したような音速分布をあらかじめ測定しておいても超音波の伝搬方向を直接求めることはできない。

そこで、まず超音波の波面法線方向と音線方向（伝搬方向）の関係を解析する。いま、図3-2において、原点Oを点音源とし、単位時間後の波面（波動曲面と呼ばれている。）を考えると、音線速度 V_R を音線方向

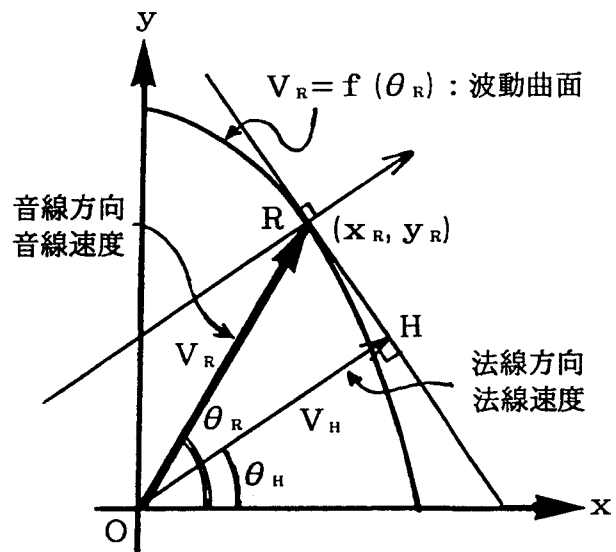


図3-2 法線方向と音線方向

角 θ_R の関数 $f(\theta_R)$ として、波動曲面は $V_R = f(\theta_R)$ と表される。波面法線方向は、点Rにおける波動曲面の法線方向に他ならないから、法線方向角 θ_H は次式で表される。

$$\theta_H = \tan^{-1} \left\{ \frac{f(\theta_R) \cdot \tan \theta_R - f'(\theta_R)}{f'(\theta_R) \cdot \tan \theta_R + f(\theta_R)} \right\} \quad (3-4)$$

また、法線速度は(3-2)式で表されている。

次に、図3-3に示すような法線速度 V_H の逆数で表される反速曲面

$$S_H = \frac{1}{V_H} = \frac{1}{f(\theta_R) \cdot \cos(\theta_R - \theta_H)} \quad (3-5)$$

を考える。反速曲面上の点 H' における法線方向角 θ_N は次式で表される。

$$\theta_N = \tan^{-1} \left(\frac{S_H \cdot \tan \theta_H \cdot \theta'_H - S'_H}{S'_H \cdot \tan \theta_H + S_H \cdot \theta'_H} \right) \quad (3-6)$$

ここで、 $S'_H = \frac{\partial S_H}{\partial \theta_R}$, $\theta'_H = \frac{\partial \theta_H}{\partial \theta_R}$

(3-6)式に(3-4)、(3-5)式を代入して整理すると、

$$\theta_N = \theta_R$$

なる関係が得られ、音線方向角 θ_R は反速曲面の法線方向角 θ_N に等しいことが分かる。

ところで、第2章の方法により実測される音速は法線速度 V_H であり、(2-7)式のように、波面法線方向角 θ_H の関数として表されて

いる。そこで、 $V_H = g(\theta_H)$ と表記すると、(3-2)、(3-6)式より、

$$\theta_R = \tan^{-1} \left\{ \frac{g'(\theta_H) + g(\theta_H) \cdot \tan \theta_H}{g(\theta_H) - g'(\theta_H) \cdot \tan \theta_H} \right\} \quad (3-7)$$

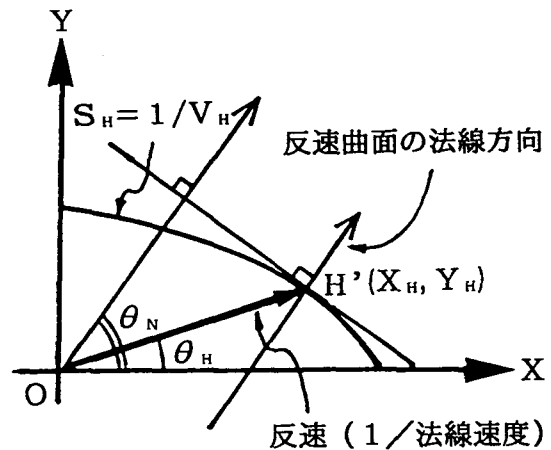


図3-3 反速曲面の法線方向

$$V_R = \frac{g(\theta_H)}{\cos(\theta_R - \theta_H)} \quad (3-8)$$

と求まる。このようにして、法線方向角 θ_H 及び法線速度 $V_H = g(\theta_H)$ を定めると、対応する音線方向角 θ_R 及び音線速度 V_R が定まる。

3. 2. 3 斜角探触子から音響異方性材料への超音波の伝搬

2. 4. 5において、1つの波面法線方向に対して振動方向の異なる2つの横波が存在し得ることを述べたが、ここでは、3. 2. 1 及び 3. 2. 2 において得られた結果をもとに、斜角探触子から異方性材料へ屈折通過するときの超音波の伝搬挙動を考える。

図3-4は斜角探触子のくさびと異方性材料との境界面におけるスネルの法則と超音波の伝搬方向を示したもので、この図では圧延方向（L方向）に横波を用いて斜角探傷する場合を示している。図中の第3象限の曲線はZL面における法線速度 V_H の分布（方向依存性）を表している。2. 4. 5で述べたように、1つの波面法線方向に対して振動方向が直交する2つの横波が存在し得るが、そのうち音速の速い方の横波を T_1 ，遅い方の横波を T_2 で表示している。ZL面

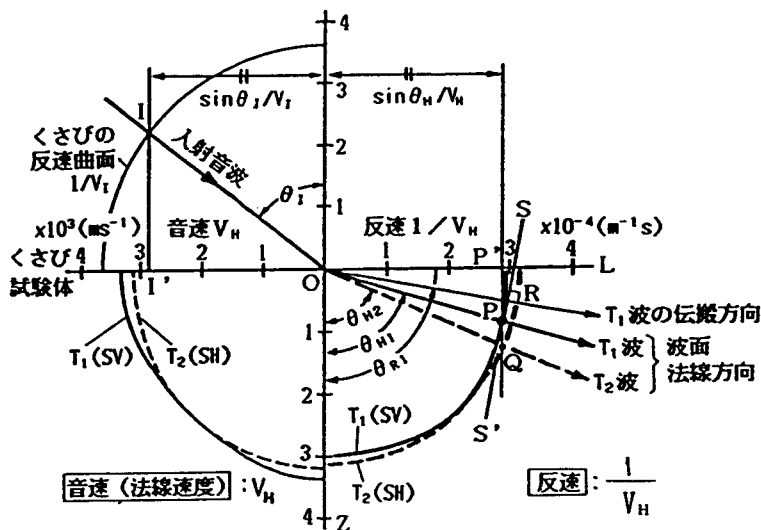


図3-4 異方性材料におけるスネルの法則と超音波の伝搬方向

内ではそれぞれSV波及びSH波に相当する振動方向をもっている。また、第4象限にはこれらの逆数(反速) $1/V_H$ を、第2象限にはくさび中の法線速度の逆数(反速)を示している。

いま、左上の方向から入射角 θ_I の超音波が界面に入射する場合を考えると、試験体中の法線速度 V_H 及び法線方向角 θ_H との間にはスネルの法則が成り立つので、次のように屈折波の波面法線方向を求めることができる。

くさび中の反速曲面と入射音波との交点をIとし、点Iから境界面へ垂線を下ろしてその足をI' とすると、 $\overline{OI'} = \sin\theta_I / V_I$ である。次に、スネルの法則を満足するように境界面上に $\overline{OP'} = \overline{OI'} = \sin\theta_I / V_I$ となる点P' をとり、点P' から境界面に垂線を立てる。T₁ 波及びT₂ 波の2つの反速曲面との交点をそれぞれP、Qとすると、 $\overline{OP}$ 、 $\overline{OQ}$ がそれぞれT₁ 波及びT₂ 波の屈折波の法線方向を表している。このとき、 $\overline{OP'} = \sin\theta_H / V_H$ であり、スネルの法則を満たしている。

したがって、屈折横波T₁ の伝搬方向(音線方向)は、点Pにおける反速曲面の接平面SS' への法線方向 $\overline{OR}$ として求まる。屈折横波T₂ についても同様に求めることができる。

3. 2. 4 探傷方向による音線方向及び横波の振動方向の変化と 斜角探傷に及ぼす影響

2. 4. 4に述べたように、横波を用いてL方向又はC方向に斜角探傷する場合、純粋なSV波、SH波が伝わるが、これ以外の方向では振動方向が変化している。そこで、横波に限定して、探傷方向による音線方向と振動方向の変化を調べる。

(1) 弾性波動論的解析

超音波の音線方向及び振動方向の表示方法を図3-5に示す。試験体のL、

C, Z方向をX, Y, Z軸にとり,これを極座標表示して,天頂角(屈折角に相当する。)を θ ,方位角を φ で表す。 $X \geq 0, Y \geq 0, Z \geq 0$ に半径1の球殻を考え,法線方向($\theta = \theta_H, \varphi = \varphi_H$)及び音線方向($\theta = \theta_R, \varphi = \varphi_R$)と球殻との交点をそれぞれP, Rとする。すなわち,球殻上の1点は1つの方向を表す。また,振動方向は,点Rにおける球殻の接平面に投影して表す。

波面法線方向(θ_H, φ_H)を定めたときの法線速度 V_H は,2.4.3に述べたように,弾性スチフネス(表2-3)を用いて(2-16)式により計算することができる。さらに,音線方向(θ_R, φ_R)は,3.2.2,3.2.3に従って計算することができる。また,1つの法線方向に対して,存在し得る横波の振動方向は2つあり,それぞれの振動方向は(2-15)式により計算される。

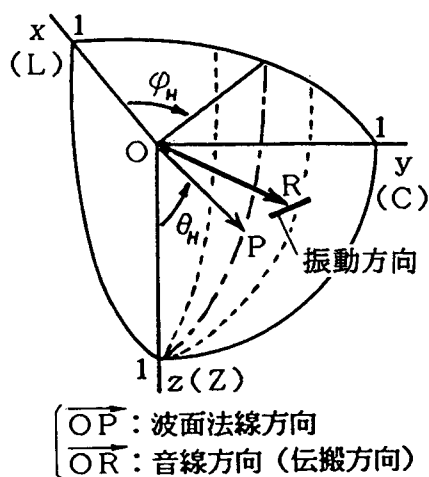


図3-5 伝搬方向及び振動方向

種々の波面法線方向に対する計算結果を図3-6~図3-8に示す。なお,それぞれ法線方向を表す点Pの軌跡を含む接円柱面又は接円錐面に音線方向を表す点R及び振動方向を投影して表示している。

図3-6は,波面法線方向の方位角 φ_H を一定とし,屈折角 θ_H を変化させたときの音線方向の軌跡と $\theta_H = 0, 10, 20, \dots, 90^\circ$ のときの振動方向を示したものである。2つの横波のうち,音速の速いものを T_1 波,遅

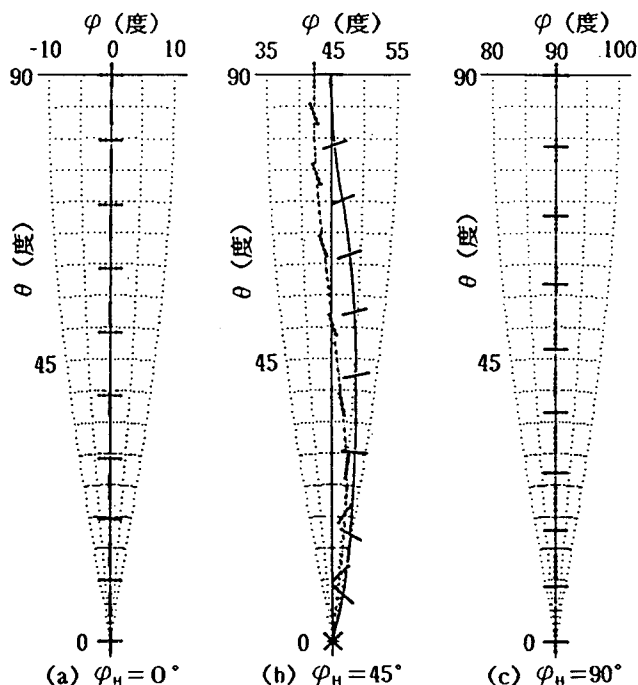


図3-6 法線方向と音線方向(φ_H :一定)

いものを T_2 波と呼ぶことにし、 T_1 波を実線で、 T_2 波を破線で示している。 $\varphi_H = 0^\circ$ では音線方向の方位角は変化せず、法線方向のそれに等しい。また、 θ 方向について見ると、 T_1 波（SV波）の音線方向は $\theta = 45^\circ$ から遠ざかる方向に最大約 6° ずれている。 T_2 波（SH波）は全体にずれが小さい。

$\varphi_H = 45^\circ$ では、 φ 方向に最大約 10° のずれがみられる。 θ 方向のずれは最大約 5° である。また、音線方向の法線方向からのずれの向きは、一部を除いて、振動方向に近いという特徴がある。

$\varphi_H = 90^\circ$ では音線方向のずれは、 $\varphi_H = 0^\circ$ のときと同様 θ 方向のみである。 T_1 波（SH波）は θ の小さい方向にずれ、 $\theta_H = 40^\circ$ で最大約 4° のずれとなる。 T_2 波（SV波）は $\varphi_H = 0^\circ$ と逆に、 $\theta = 45^\circ$ に近づく方向にずれる。

$\varphi_H = 0^\circ$ （L方向）及び $\varphi_H = 90^\circ$ （C方向）の超音波の音線方向の法線方向からのずれは、 θ 方向だけである。 $\varphi_H = 45^\circ$ （Q方向）の場合、 θ 方向だけでなく φ 方向にもずれるため、欠陥位置の推定において注意が必要である。

例えば、ビーム路程が50 mmで φ 方向のずれが $\Delta\varphi = 5^\circ$ の場合、欠陥の位置推定が4 mmずれることになる。

図3-7は、法線方向の屈折角 θ_H を一定とし、方位角 φ_H を変化させたときの音線方向の軌跡と振動方向である。 $\theta_H = 70^\circ$ の場合、音線方向は $\varphi_H = 20 \sim 30^\circ$ の間で急変し、振動方向も大きく変化している。 φ 方向の振動成分（SH成分）の大きな波で大きく、 θ 方向のずれは θ 方向成分（SV成分）の大きな波で大きい。 $\theta_H =$

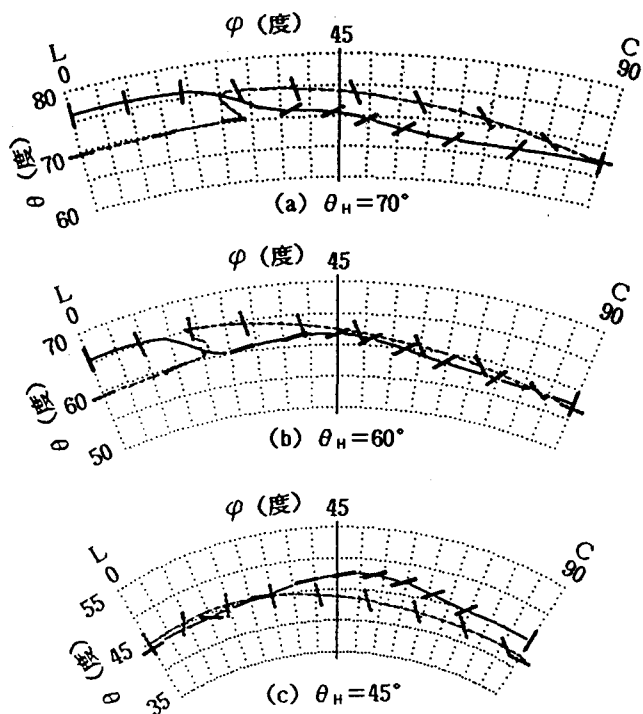


図3-7 法線方向と音線方向（ θ_H ：一定）

60°，45°でも同様の傾向が認められる。

図3-8は，STB-A1中の屈折角が70°，60°，45°の探触子を用いて，圧延方向に対する探触子の向き，すなわち方位角 φ_H を変化させたときの音線方向と振動方向を整理したものである。これはスネルの法則によりSTB-A1中の屈折角 θ_{A1} に対応する波面法線方向角 θ_H を求め，さらに， θ_H ， φ_H から，先に述べた手順によって， θ_R ， φ_R を計算して得られたものである。屈

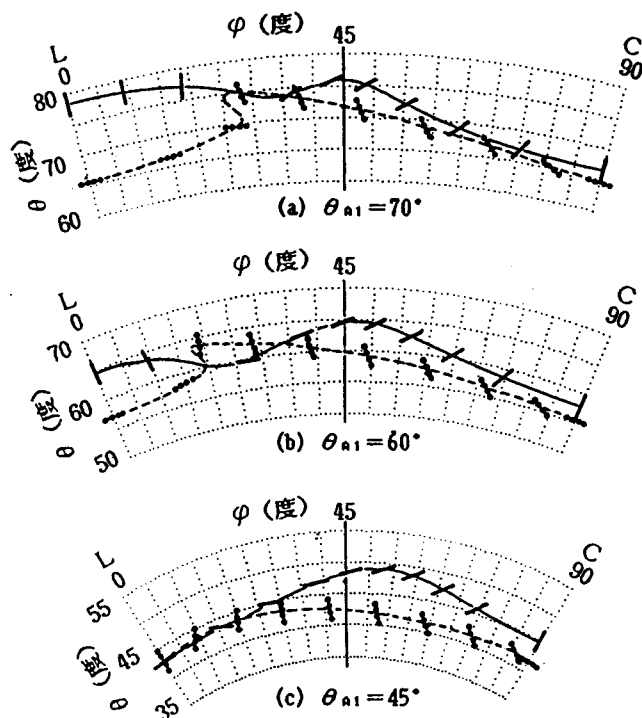


図3-8 探傷方向と音線方向 (θ_{A1} :一定)

折角 $\theta_{A1}=70^\circ$ の場合，図3-7 (a) に比べて， T_1 波は θ の大きい方へ， T_2 波は θ の小さい方へ平行移動したように見えるが，これはスネルの法則により定まる法線方向がそれぞれ θ_{A1} に比べて大きく，又は，小さくなることによる。振動方向に注目して図を見ると， T_1 波はL方向ではSV波であり， φ が20°を超えるとSV波の成分が小さくなり， $\varphi \doteq 45^\circ$ ではSH波の成分が大きい。さらに， φ が大きくなると，また，SV波の成分が大きくなり，C方向ではSV波となる。 T_2 波はほぼ逆の変化をたどる。

通常の斜角探傷に用いられるSV波により斜角探傷する場合，圧延方向 (L方向) では T_1 波 (純粋なSV波) が試験体中を伝搬し，超音波の伝搬方向は $\theta \doteq 78^\circ$ とかなり大きくなる。 φ を大きくすると， $\varphi=20^\circ$ までは T_2 波のSV成分が小さいのでほぼ T_1 波のみが伝わると思われるが， $\varphi \doteq 25^\circ$ では T_1 波と T_2 波の両方が， $\varphi=45^\circ$ 近傍では主に T_2 波， $\varphi=70^\circ$ 近傍では T_1 波と T_2 波の両方が， $\varphi=90^\circ$ では T_1 波が送受されることになる。すなわち， $\varphi \doteq 25^\circ$ 及び $\varphi \doteq 70^\circ$ の方向では欠陥が1つだけであっても，音速の速い T_1 波

によるエコーと音速の遅い T_2 波によるエコーとが異なる屈折角の方向に現れる可能性があることを示している。また、両者の音速が近い値の場合、2つの波の干渉によりエコー高さが不安定になる可能性もあり、注意が必要である。

$\theta_{A1} = 60^\circ$ 、 45° についても同様の複雑な変化を示す。

(2) 実験的検討

L方向及びC方向以外の方向に斜角探傷する場合のエコーの現れ方を調べ、図3-8の計算結果と比較するために、図3-9に示すような横穴及び球状反射源を有する試験片を作製し、横波（SV波）による斜角探傷を実施した。素材は厚さ35mmのTMCP鋼板である。直径3mmのドリル穴（貫通横穴）は圧延方向から 45° の方向の探傷用である。試験片中央部の直径8mmのドリル穴はボールエンドミルによって先端をR4mmの球面に加工し、L方向からC方向まで探傷方向を変化できるようにしたものである。

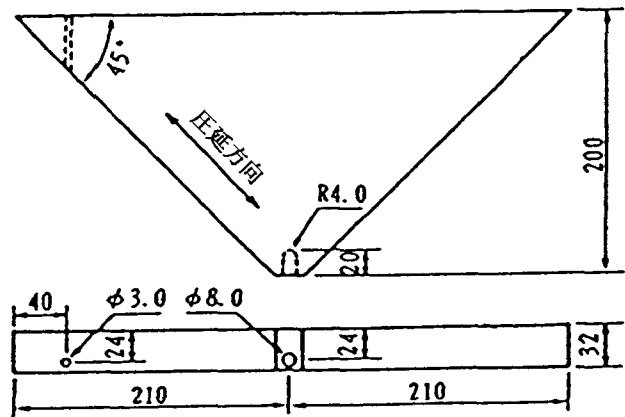


図3-9 使用試験片

表3-1 使用装置及び探触子

超音波探傷器	USIP-11 (クラウトクレマ製)
探 触 子	5 Z10×10A60 ($\theta_{A1}=60.1^\circ$) 5 Z10×10LA60 ($\theta_{A1}=60.3^\circ$) (ジャバンプローブ製)
走査用治具	可 動 範 囲 150mm×200mm

実験に使用した装置を表3-1に示す。探触子は、STB-A1による実測屈折角が 60.1° のSV波の斜角探触子である。また、探触子の向き（探傷方向）を固定するため、2軸方向に走査可能な治具を用いた。

実験配置を図3-10に示す。横穴（深さ $d=24$ mm）を直射法で狙い、エコー高さが最大となるように探触子の向きを固定した。次に、探触子を1mmずつ前方及び後方に走査しながら、最大エコー高さから約20dB低下する範囲

について、ビーム路程及びエコー高さを記録した。なお、測定範囲はS T B - A 1 を用いて100mmに調整し、エコー高さは表示器上で40%になるように調整したときのゲインの値を記録した。また、比較のため等方性材料を用いて作製した横穴試験片（直径3mm、深さ $d = 24\text{ mm}$ ）を用いて同じ測定を行った。

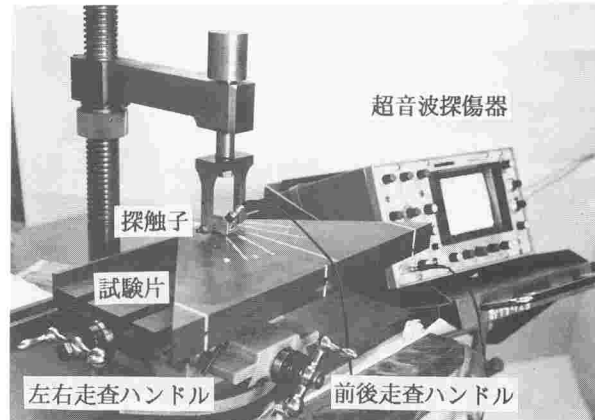
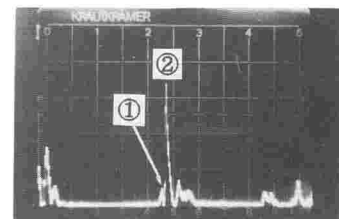


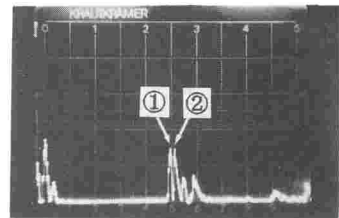
図3-10 探傷配置

球面反射源（深さ $d = 24\text{ mm}$ ）に対しては、L方向からC方向まで 15° ずつ探触子の向きを変化させて探傷し、エコー高さの極大値が得られたときの探触子位置及びビーム路程、エコー高さを記録した。

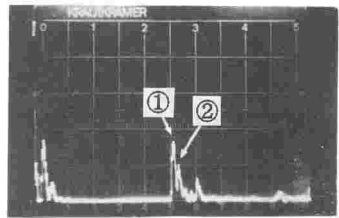
横穴からのエコーをとらえたときの探傷図形（CRT）を図3-11に示す。（a）は探触子距離（探触子の入射点から横穴中心までの水平距離）が $y = 39.5\text{ mm}$ において最大エコー高さ（図中の②のエコー）が得られたときで、これより後方に走査すると、例えば $y = 44.2\text{ mm}$ において、（b）に示すように②のエコーの前に①のエコーが現れた。更に後方に走査すると、①のエコーが $y = 46.3\text{ mm}$ において最大となった。①のエコーは、同じ探触子位置において、②のエコーに比べてビーム路程が短く、（1）で述べた T_1 波（音速の速い横波）に対応し、②のエコーが T_2 波（遅い横波）に対応していると考えられる。



(a) $y = 39.5\text{ mm}$



(b) $y = 44.2\text{ mm}$



(c) $y = 46.3\text{ mm}$

図3-11 横穴の探傷図形

これらのエコーの前後走査グラフを図3-12に示す。横軸は探触子距離 y 及び横穴の深さ d により求めた見掛けの屈折角($\theta = \tan^{-1}(y/d)$)によって表した。○及び△はそれぞれ①及び②のエコーである。また、●によって等方性材料中の横穴による測定値を示した。図中の点線はこの等方性材料中における前後走査グラフを平行移動したものであり、異方性材料における①及び②のエコーはいずれも同じ指向特性を示すことが分かる。

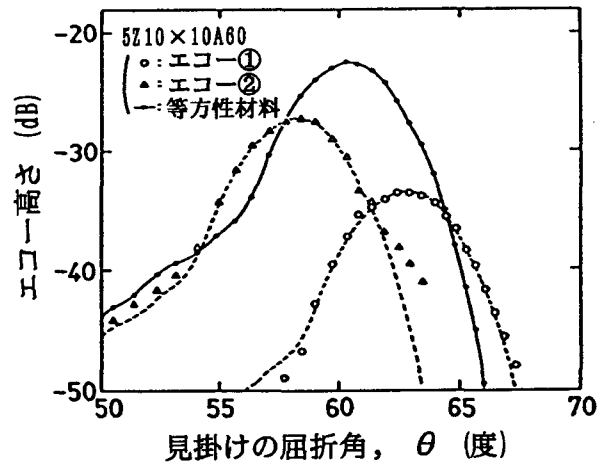


図3-12 横穴エコーの前後走査特性

探触子の向き（圧延方向に対する方位角 φ で表す。）を変化させて球状反射源を探傷して得られた結果を整理したのが図3-13である。（a）はSV波探触子による測定結果である。見掛けの屈折角はピークエコーが得られたときの探触子距離及び反射源の深さから求めたものである。○は T_1 波（速い横波），△は T_2 波（遅い横波）によるエコーである。方位角 $\varphi = 0^\circ$ ， 90° ではエコーが1つだけしか認められない。これはL及びC方向では完全なSV波及びSH波が伝わるため、SV波探触子（通常の斜角探触子）ではSH波が伝わらないためである。 $15^\circ \leq \varphi \leq 75^\circ$ では2つのエコーが認められ、見掛けの屈折角は T_1 波と T_2 波で $3 \sim 5^\circ$ の差であった。図中の曲線は、図3-8（b）に示した音線方向の計算値である。計算値と測定値のずれは最大 2° であり、ほぼ対応していた。

次に、エコー高さに注目してみると、 $\varphi = 15^\circ$ では T_1 波の方がエコーが高く、 $30^\circ \leq \varphi \leq 75^\circ$ では T_2 波の方が高く現れた。これは T_1 波と T_2 波の振動方向の違いによるものであり、弾性スチフネスに基づく解析（図3-8（b））と比較すると、 T_1 波又は T_2 波のうち振動方向がSV波に近い方の横波によるエコーが高く現れていることが分かる。

以上のように、横波を用いて斜角探傷を行う場合、圧延方向及びそれに垂直

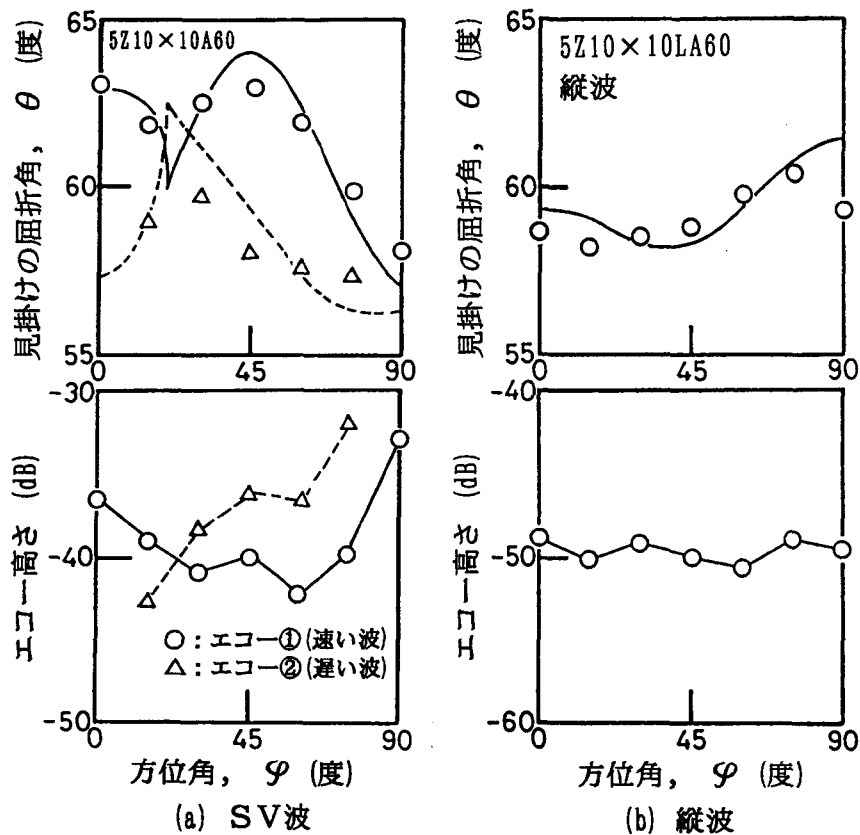


図3-13 球状反射源の探傷結果

な方向の探傷では、純粋なSV波及びSH波が伝搬するが、これら以外の方向の探傷では、通常のSV波用又はSH波用探触子のいずれの探触子を用いても、振動方向及び音速の異なる2つの横波に分解されて伝搬するため、1つの反射源でも2つのエコーが発生し、このため、エコーも低くなる可能性がある。

これに対して、図3-13 (b) に示す縦波斜角探触子を用いて探傷を行う場合、1つのエコーしか発生せず、しかも、エコー高さも探傷方向によらずほぼ一定しており、欠陥の定量的評価に適していることが明らかになった。

3.3 板厚方向に不均質な音響異方性材料中における超音波の伝搬

3.3.1 板厚方向の深さ位置による波面法線方向と音線方向の変化

3.2では、均質な異方性を有する試験材料中における超音波の伝搬方向（音線方向） θ_R と波面法線方向 θ_H について検討した。次に、板厚方向の深さ位置により音響異方性の程度が変化する不均質な材料について解析する。

図3-14に示すように、深さ $x = x_i$ の位置における法線方向 θ_{Hi} の法線速度 V_{Hi} が、 x_i 及び θ_{Hi} の関数として $V_{Hi} = V_H(x_i, \theta_{Hi})$ で表されるものとする。材料中に入射した直後の深さ位置 $x = 0$ における波面法線方向角及び法線速度をそれぞれ θ_{H0} 、 V_{H0} とし、ある深さ位置 $x = x_i$ におけるそれらを θ_{Hi} 、 V_{Hi} とする。このとき、任意の深さ位置において、法線速度 V_{Hi} 及び法線方向 θ_{Hi} はスネルの法則を満たしている。すなわち、次式が成り立つ。

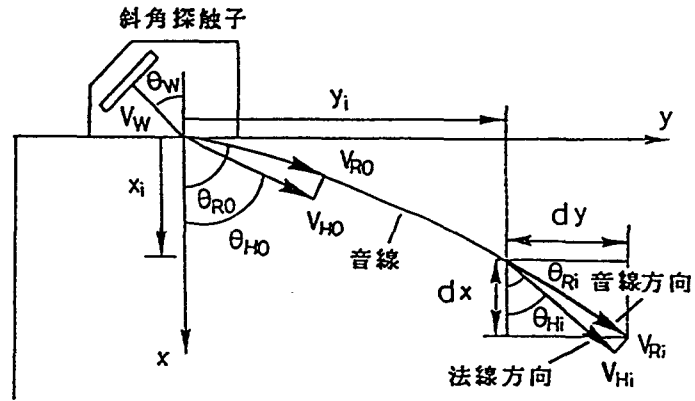


図3-14 不均質な異方性材料における超音波の伝搬

$$\frac{V_{Hi}}{\sin \theta_{Hi}} = \frac{V_{H0}}{\sin \theta_{H0}} \quad (3-9)$$

ただし、 θ_{H0} 、 V_{H0} ：入射直後の波面法線方向角及び法線速度

θ_{Hi} 、 V_{Hi} ：任意の深さ位置 $x = x_i$ での法線方向角及び法線速度

(3-9)式より、任意の深さ位置 $x = x_i$ における法線方向 θ_{Hi} が定まる。また、深さ x_i における法線方向角 θ_H の関数として表されているので、 θ_{Hi} に対応する音線方向角 θ_{Ri} は(3-7)式により求めることができる。試験材料中における法線速度が第2章で示した(2-28)式及び(2-29)式で表され

る場合について、深さ位置 x ($=d/T$) による法線方向 θ_{Hi} 及び音線方向 θ_{Ri} の変化を図3-15～図3-18に示す。それぞれ、L方向又はC方向にSV波又は縦波を用いて斜角探傷したときに相当しており、試験材料中へ通過直後の法線方向 θ_{H0} が $\theta_{H0}=40^\circ$ 、 70° の場合について整理したものである。

L方向のSV波の場合、 $\theta_{H0}=40^\circ$ 、 70° のいずれも法線方向 θ_{Hi} はほぼ一定であるが、音線方向 θ_{Ri} が土約 4° の範囲内で変化しており、音線が大きく曲がっているといえる。すなわち、不均質な異方性の影響を大きく受けている。L方向のSV波以外(図3-16～図3-18)については、 θ_{Ri} の変化は $1\sim 2^\circ$ と小さく、超音波はほぼ直進しているといえる。

また、 θ_R と θ_H の差は、やはりL方向のSV波が特に大きく、更に、その差の変化も大きい。C方向及びL方向の縦波がこれに次ぐがその差の変化は小さい。そして、C方向のSV波ではほとんど差がない。

これらのことから、本研究に用いた程度の、音響異方性を示すTMCP鋼板については、実際の斜角探傷試験に際して、C方向のSV波はほぼ等方性材料、C方向及びL方向の縦波は均質な異方性材料とみなすことが出来る。ただし、L

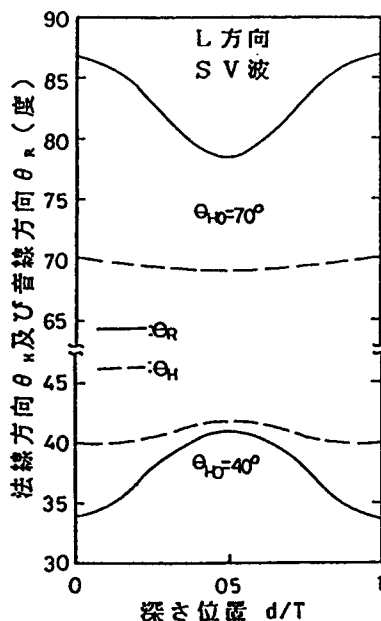


図3-15 深さ位置による法線方向と音線方向の変化 (L方向, SV波)

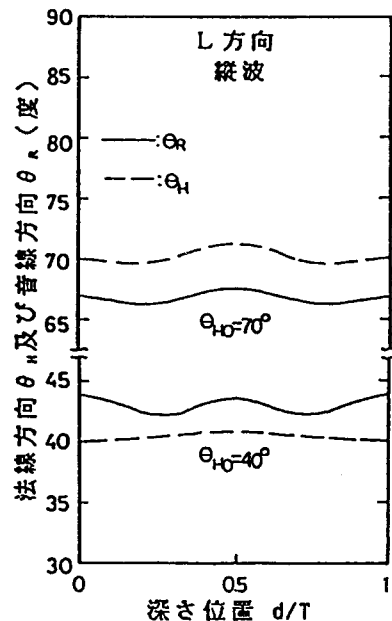


図3-16 深さ位置による法線方向と音線方向の変化 (L方向, 縦波)

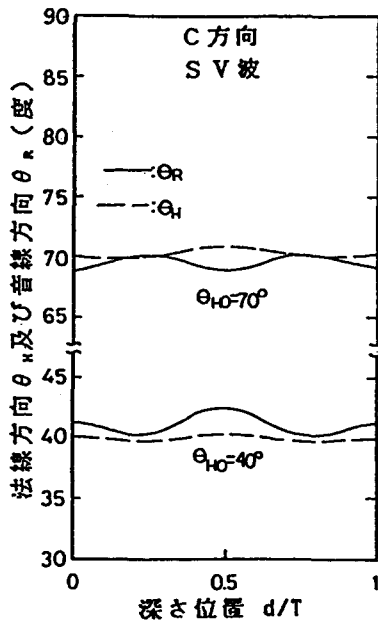


図3-17 深さ位置による法線方向と音線方向の変化 (C方向, SV波)

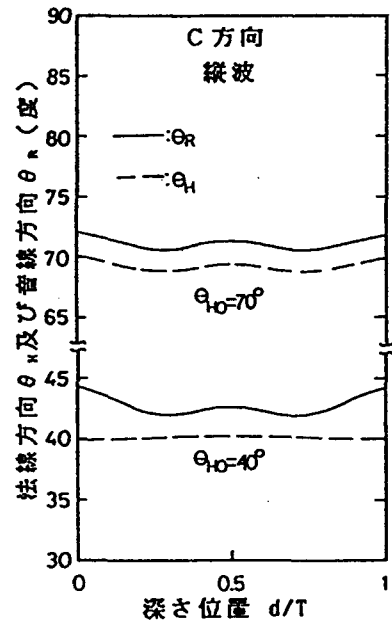


図3-18 深さ位置による法線方向と音線方向の変化 (C方向, 縦波)

方向のSV波に関しては、異方性の不均質さを十分考慮して検討する必要があるといえる。

3.3.2 不均質な音響異方性材料中における音線の屈曲

3.3.1において求めた超音波の音線方向を基に、不均質な異方性材料中における超音波の伝搬経路（音線）を求める。図3-14において、深さ位置 $x = x_i$ から微小深さ dx の範囲では深さによって、音速が変化しない（すなわち、均質な異方性媒質である。）と考えると、 dx の範囲では音線方向角 θ_{Ri} が一定である。したがって、微小深さ dx の間に水平距離

$$dy = dx \cdot \tan \theta_{Ri} \quad (3-10)$$

だけ進むことになり、超音波は点 (x_i, y_i) から $(x_i + dx, y_i + dy)$ まで進む。板厚全体を十分小さい dx に分割し、材料表面から通過点 (x, y) を

順次追って行くと、超音波の伝搬経路、つまり音線を求めることができる。

$$y = \int_0^{x_1} \tan \theta_{Ri} dx \quad (3-11)$$

試験材料中における法線速度が(2-28)式及び(2-29)式で表される場合について、(3-11)式を用いて求めた超音波の伝搬経路(音線)を、図3-19及び図3-20に示す。図3-19は圧延方向(L方向)に探傷する場合に相当し、図3-20はC方向に相当する。いずれも、横波(SV波、SH波)及び縦波について、材料中に入射した直後の屈折角を $\theta_{H0} = 40^\circ \sim 70^\circ$ として計算したものである。ZL面におけるSV波の $\theta_{H0} = 60^\circ \sim 70^\circ$ 付近で音線は大きく曲がっているが、その他は音速分布の板厚方向の不均質さの影響が小さく、ほぼ直線的に進む。

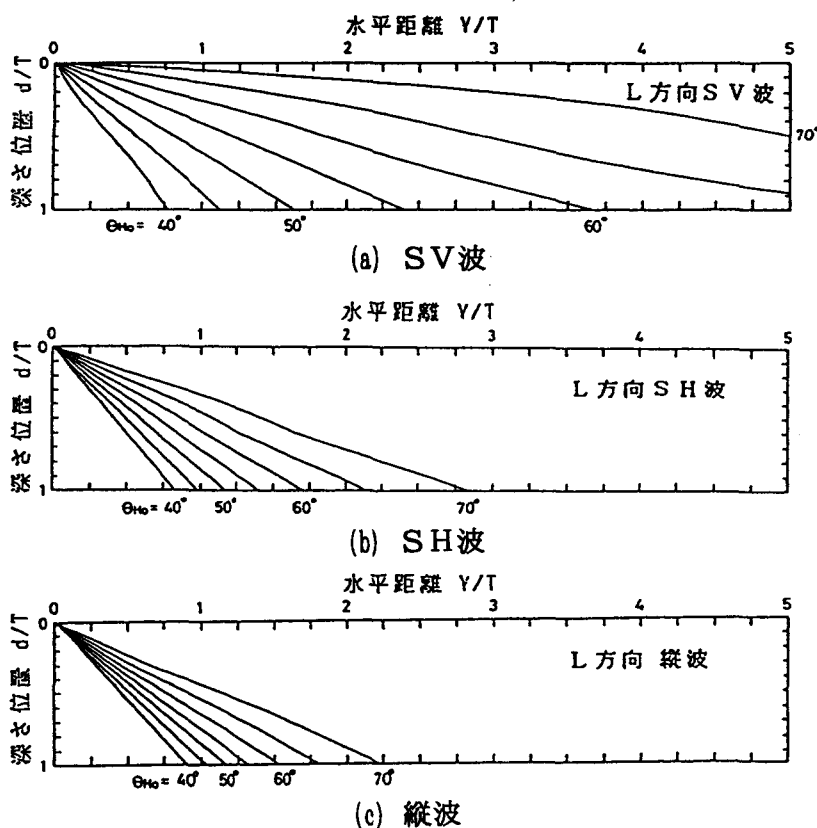


図3-19 ZL面における超音波の伝搬経路(TMCP鋼板, T=20)

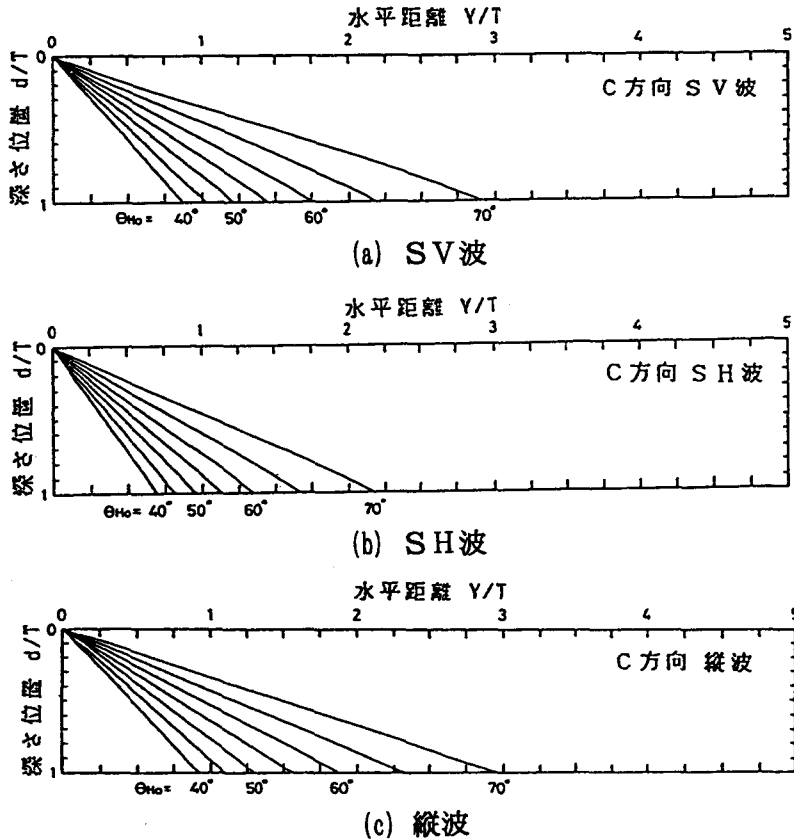
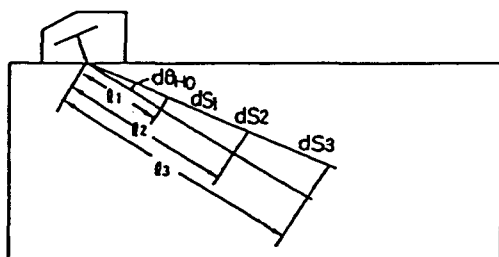


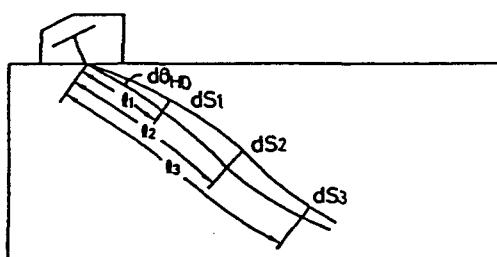
図3-20 ZC面における超音波の伝搬経路 (TMCP鋼板, $T=20$)

3.3.3 音線の屈曲による超音波の拡散減衰の変化

超音波が伝搬する場合、通常は距離の増加とともに徐々に拡がっていく。図3-21 (a) の様に音波が直進する場合、その拡がりの断面積 dS は距離 ℓ に比例して増加し、 $dS_1 < dS_2 < dS_3$ の関係を示すが、(b) の様に音線が曲がって伝搬する場合には $dS_1 < dS_2 < dS_3$ の関係が成り立つとは限らない。いま、図3-21において紙面に垂直な方向には超音波が拡がらないような2次元的な音場を考える。超音波の音圧は拡がりの断面積に反比例する。入射直後の法線方向角を θ_{H0} とし、その音線と微小角度 $d\theta_{H0}$ だけ加えた法線方向角 θ_{H0}' ($=\theta_{H0} + d\theta_{H0}$) の音線との間隔 dS を計算し、深さ位置 (d/T) と ($1/dS$) の値の関係を整理したのが図3-22及び図3-23である。音圧と



(a) 音線が直線の場合 (均質材)

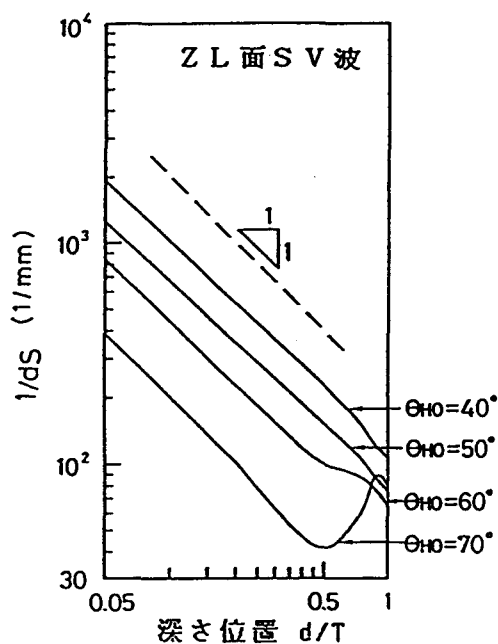


(b) 音線が曲がる場合 (不均質材)

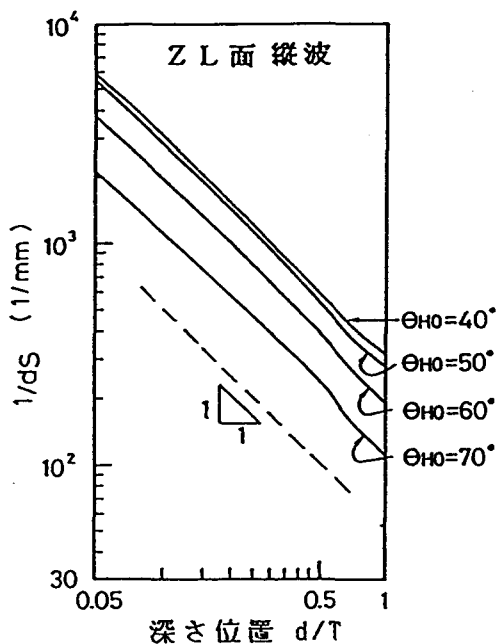
図3-21 音線の形状と拡がり

$\sqrt{1/S}$ は比例関係にあるので、この線図は深さ位置による音圧の変化を表していることになる。図3-22はL方向にSV波及び縦波により探傷する場合で、図3-23はC方向の探傷である。比較のために、破線で示したのは等方性材料の場合で、傾き-1の直線となり、音圧が深さ d/T (距離 l) の平方根に反比例して変化することを表している。

図3-22から分かるように、 $\theta_{H0}=70^\circ$ の場合、 $d/T < 0.5$ で極小値を取り、 $d/T > 0.5$ で傾きが正となっている。これに対して、縦波による



(a) SV波



(b) 縦波

図3-22 深さ位置による音圧の変化 (L方向)

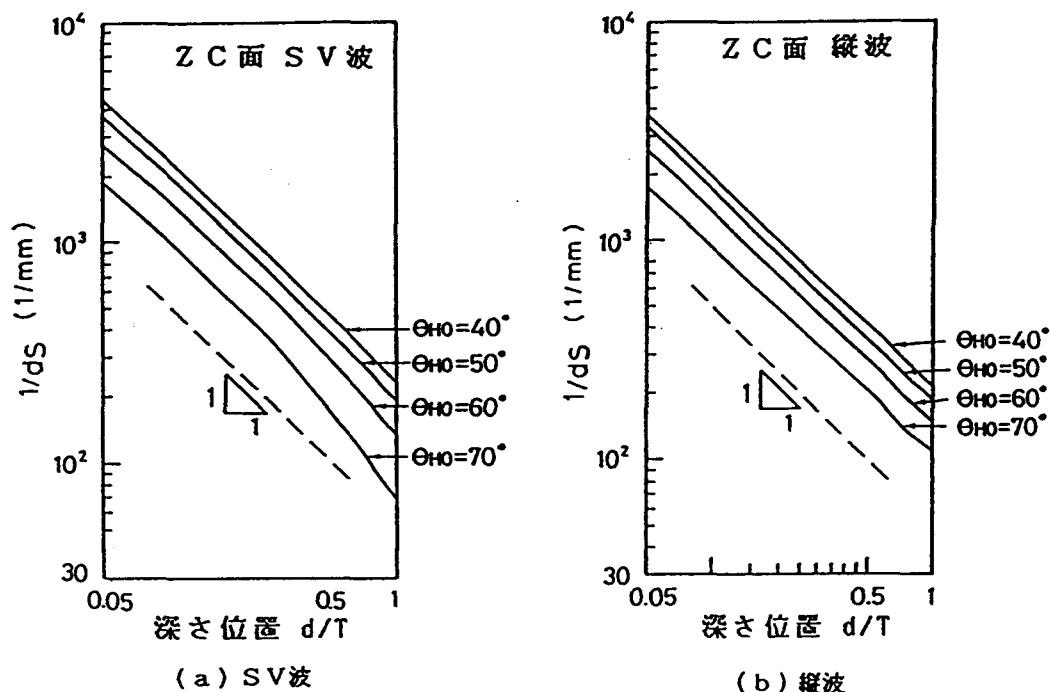


図3-23 深さ位置による音圧の変化 (C方向)

L方向の斜角探傷では、 $\theta_{H0} = 40^\circ \sim 70^\circ$ の範囲で、傾きがほぼ-1となっており、距離による音圧変化は等方性材料中に類似していることがわかる。また、C方向の斜角探傷では、通常のSV波と縦波による違いはなく、いずれの場合も等方性材料に近い。

3.3.4 不均質な音響異方性材料におけるエコー高さの解析

(1) 解析方法

不均質な異方性を有する試験体の斜角探傷試験におけるエコー高さの解析方法を検討する。まず、図3-24に示すように等方性材料中において、斜角探触子により1個の反射源をとらえたときのエコー高さを考える。解析を容易にするため、図3-24の紙面内における超音波の拡がりのみを考え、紙面に垂直な方向には拡がりがない、すなわち二次元的な音場を考えることにする。また、境界

面における音圧透過率が入射角によらず一定であると仮定する。斜角探触子の振動子を微小に分割し、その一つを線音源（微小振動子） dS とすると点Aから出た超音波は点Bで屈折する。

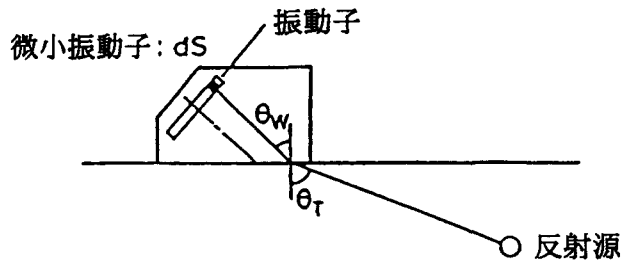


図3-24 斜角探傷の模式図

入射点Bでの入射角を θ_w ，屈折角を θ_T とする。図3-25に示すように，線音源 dS から出た超音波はくさび中を拡がりながら進行し，点Aで屈折し，点Bへ進行していく。点Aまでは，媒質がアクリルであるから線音源 dS から境界面上の点Aまでの距離 ℓ_w を音場

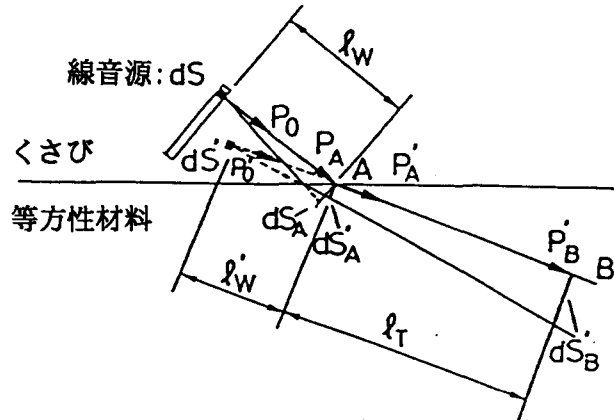


図3-25 均質な材料中における超音波の拡がり

的に等価な試験体中の距離 ℓ_w' に換算し，見掛けの線音源 dS' を考える。換算した距離 ℓ_w' は(3-12)式で表せる。

$$\ell_w' = \frac{V_w}{V_T} \left(\frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_w} \right)^2 \ell_w \quad (3-12)$$

ただし， V_w ：くさび中の音速（2730m/s）

V_T ：試験体中の音速

θ_w ：入射角

θ_T ：屈折角

試験体中に入射した直後の断面積を dS'_A ，そのときの音線に沿った距離を ℓ_T とする。このときの点Bにおける音圧 P'_B は，円筒面波における音圧の距離特性を考えればよく，(3-13)式で表される。

$$P'_B = \frac{P'_0}{\lambda_T} \cdot \frac{\exp \{-j(k_w \ell_w + k_T)\}}{\ell'_w + \ell_T} dS' \quad (3-13)$$

ただし, $k_w = \frac{2\pi f}{V_w}$

$$k_T = \frac{2\pi f}{V_T}$$

f : 探触子の周波数 (5MHz)

λ_T : 試験体中の波長

ℓ_w : くさび中の音線距離

ℓ_T : 試験体中の音線距離

P'_0 : 見掛けの送信音圧

j : 虚数単位

図3-25より, 音圧比は断面積に反比例するから次式が成り立つ。

$$\frac{P'_A}{P_A} = \frac{dS_A}{dS'_A} = \frac{\cos \theta_w}{\cos \theta_T} \quad (3-14)$$

ただし, P_A : 点Aにおける屈折前の音圧 (線音源 dS による音圧)

P'_A : 点Aにおける屈折後の音圧 (線音源 dS' による音圧)

dS_A : 点Aにおける屈折前の微小断面積

dS'_A : 点Aにおける屈折後の微小断面積

送信音圧が P_0 の線音源 dS から距離 ℓ_w の点Aにおける音圧 P_A は次式で表される。

$$P_A = \frac{P_0}{\lambda_w} \cdot \frac{\exp(-jk_w \ell_w)}{\ell_w} dS \quad (3-15)$$

ただし, P_0 : 実送信音圧

λ_w : くさび中の波長

同様に, 線音源 dS と等価な dS' を考えると P'_A は次のように表される。

$$P'_A = \frac{P'_0}{\lambda_T} \cdot \frac{\exp(-jk_w \ell_w)}{\ell'_w} dS' \quad (3-16)$$

したがって、

$$\frac{P'_A}{P_A} = \frac{P'_0}{P_0} \cdot \frac{V_w}{V_T} \quad (3-17)$$

(3-14) , (3-17) 式より、見掛けの線音源 dS' の送信音圧 P'_0 は、実音源の送信音圧 P_0 により次のように表される。

$$P_0 = P'_0 \frac{V_w}{V_T} \cdot \frac{\cos \theta_w}{\cos \theta_T} \quad (3-18)$$

また、見掛けの線音源の寸法 dS' は次式で表される。

$$dS' = \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_w} dS \quad (3-19)$$

(3-13) 式に、(3-12) , (3-18) 及び (3-19) 式を代入すると (3-20) 式が得られる。

$$P'_B = \frac{P_0}{\lambda_w} \cdot \frac{\cos \theta_w}{\cos \theta_T} \cdot \frac{dS'_A}{dS'_B} \cdot \frac{1}{\ell_w} \times \exp \{-j(k_w \ell_w + k_T \ell_T)\} dS \quad (3-20)$$

ただし、 dS'_B : 点 B' における微小断面積

P'_B は入射角 θ_w と屈折角 θ_T , 及び入射直後の線音源 dS'_A の拡がり と点 B における拡がりの比によって表される。

この関係を図3-26に示すように異方性材料中に適用する。異方性材料中では、(a) に示すように音線方向が深さ位置により変化するため、 θ_T を境界面で屈折した直後の音線方向 θ_{R0} とする。また、音線を微小に分割して考えているため、(b) に示すような音線に沿った経路で位相を考える必要がある。以上のことを考慮すると (3-20) 式は (3-21) 式で表せる。

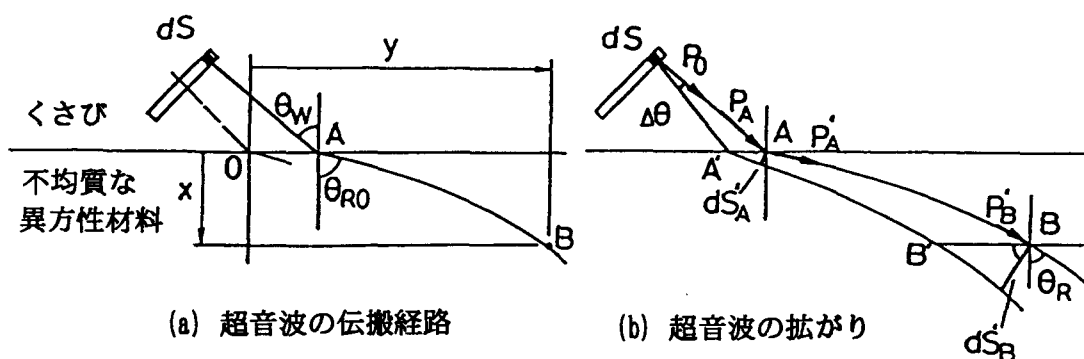


図3-26 不均質な異方性材料中における超音波の伝搬

$$P'_B = \frac{P_0}{\lambda_w} \cdot \frac{\cos \theta_w}{\cos \theta_{R0}} \cdot \frac{dS'_A}{dS'_B} \cdot \frac{1}{\ell_w} \times \exp \{ -j (k_w \ell_w + \sum_i k_{Ti} \ell_{Ti}) \} dS \quad (3-21)$$

ただし、 $k_{Ti} = \frac{2\pi f}{V_{Hi}}$

ℓ_{Ti} : 試験体中の微小音線距離

θ_{R0} : 境界面で屈折した直後の音線方向

これを面積分し、対数をとると平面振動子によるエコー高さが得られる。ここでは、同じ経路で往復すると考えて2乗をとる。

$$H = 20 \cdot \log \left\{ \int_S P'_B dS \right\}^2 \quad (3-22)$$

ただし、 H : エコー高さ (dB)

(2) 解析結果及び考察

通常の斜角探傷試験では、探触子を前後に走査させて欠陥からのエコー高さが最大となる位置で、エコー高さを求めている。そこで、探触子の前後走査に対応させるため、深さ位置 $x (=d/T)$ の欠陥から探触子までの水平距離 Y を変

化させて、(3-22)式によりエコー高さを計算した。深さ x の欠陥からの最大エコー高さを求めて整理したのが、図3-27である。(a)はSTB-A1による屈折角が 60° ，(b)は 65° ，(c)は 70° の場合に相当している。実線は異方性の試験体の場合で、破線は比較のために示した等方性の試験体の場合である。それぞれの曲線で極大値を示す最大の深さが近距離音場限界距離である。通常の斜角探傷は遠距離音場で行われており、ここでは、遠距離音場のみを考えることにする。(a)及び(b)の場合、深さ x が大きくなるにつれて、エコー高さは小さくなっているが、(c)の場合は、逆に大きくなる傾向を示している。

また、欠陥の深さを変化させて最大エコーが得られる探触子位置を求めて順に結ぶと、試験体中における超音波ビームの中心線が得られる(図3-28)。

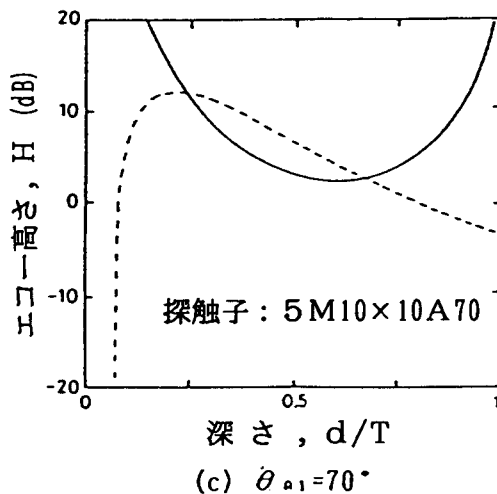
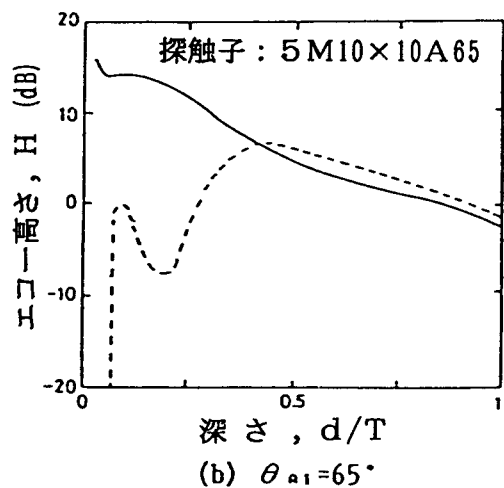
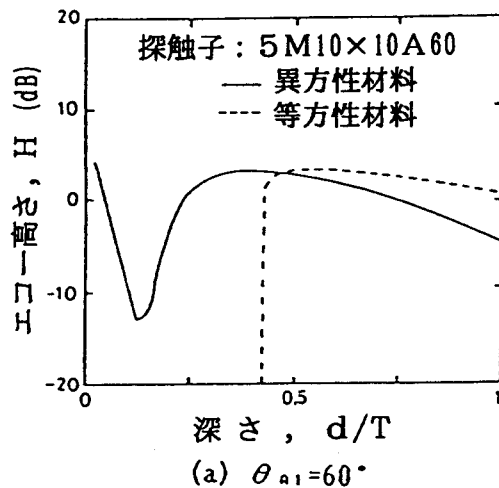


図3-27 横穴の距離振幅特性
(TMCP鋼板, $T=20$)

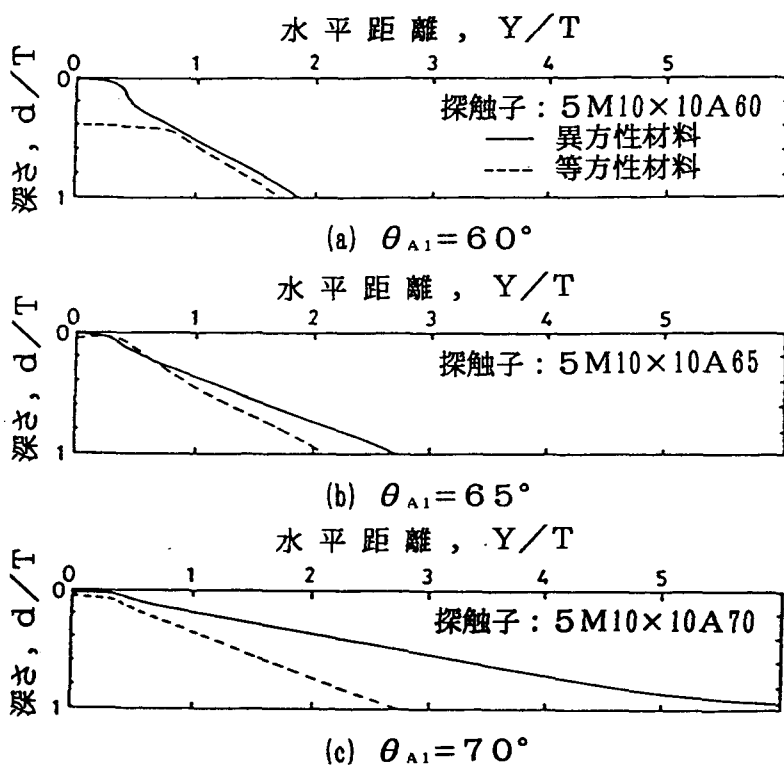


図3-28 異方性材料中における超音波ビームの中心線

屈折角 70° における表裏面の近傍を除いていずれの場合も、ビームの中心線としてみるとあまり曲がらず、ほぼ直線とみてよい。

図3-29は横穴の距離振幅特性の実験値と計算値を比較したもので、 $T/$

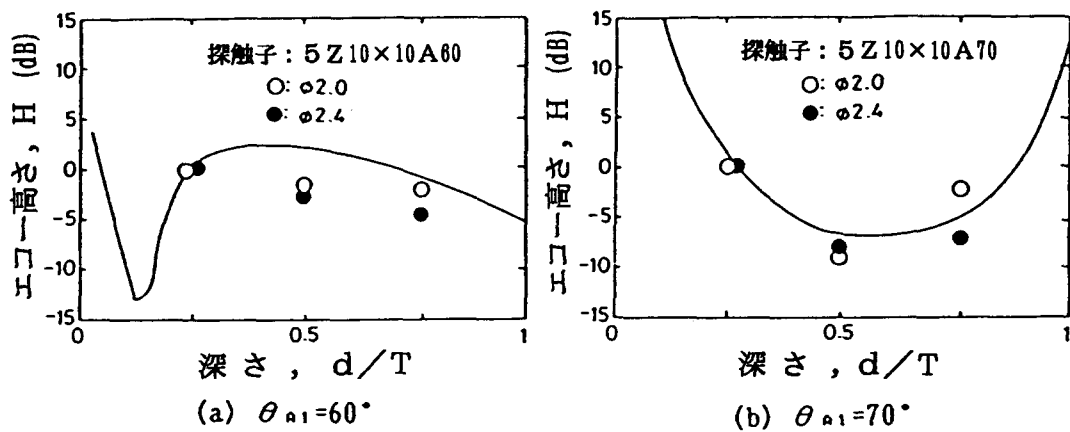


図3-29 横穴の距離振幅特性の測定結果 (TMCP鋼板, $T=20$)

4の深さの横穴からのエコー高さを基準として整理した。(a)は $\theta_{A1}=60^\circ$ ，(b)は $\theta_{A1}=70^\circ$ であるが，(a)，(b)とも計算値は実験結果とよい対応を示しており，(1)に述べたエコー高さの解析方法の妥当性が確認された。すなわち， $\theta_{A1}=70^\circ$ の実験結果で認められたエコー高さの変化の特異性が，不均質な異方性に基づく音線の屈曲によるものであるといえる。

図3-30は超音波ビームの中心線を比較したものである。(a)は $\theta_{A1}=60^\circ$ ，(b)は $\theta_{A1}=70^\circ$ の場合であるが，計算値はほぼ実験値に対応しており直線を示している。異方性材料中と等方性材料中を比べると， $\theta_{A1}=60^\circ$ の場合より， $\theta_{A1}=70^\circ$ の方がずれが大きい。

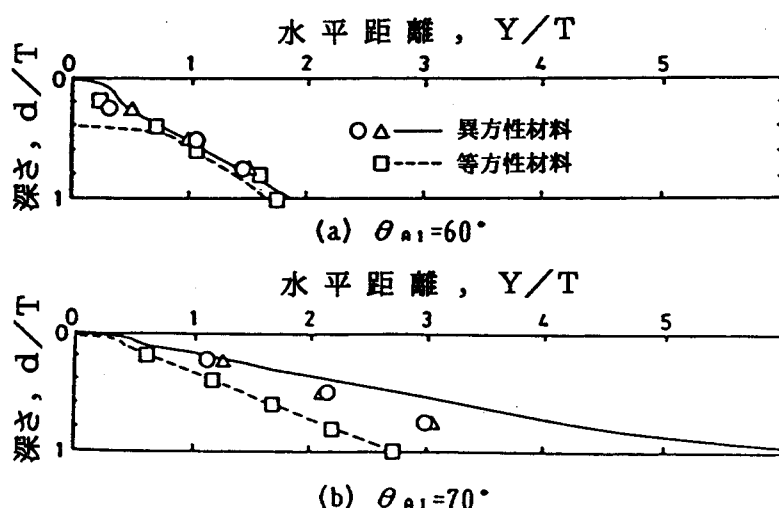


図3-30 超音波ビームの中心線の測定結果

このことをさらに確かめるため，水平距離と深さを屈折角に直して整理したものを図3-31に示す。(a)における $\theta_{A1}=60^\circ$ の場合計算値は実験結果とよく対応しており，中央部では屈折角が一定に近く，超音波ビームは直線となる。(b)における $\theta_{A1}=70^\circ$ の場合は，(a)に比べると，実験値は計算値より屈折角の小さい側（ビーム路程の短い側）に約 2° ずれている。これは，計算では試験体中における散乱による超音波の減衰を考慮していないことによるものと考えられる。すなわち，屈折角の大きな 70° の場合，ビーム路程が長くなるため，特に散乱による減衰が大きくなり，ビーム中心から屈折角の小さい側にビーム路程の短い位置で最大エコーが得られるものと考えられる。

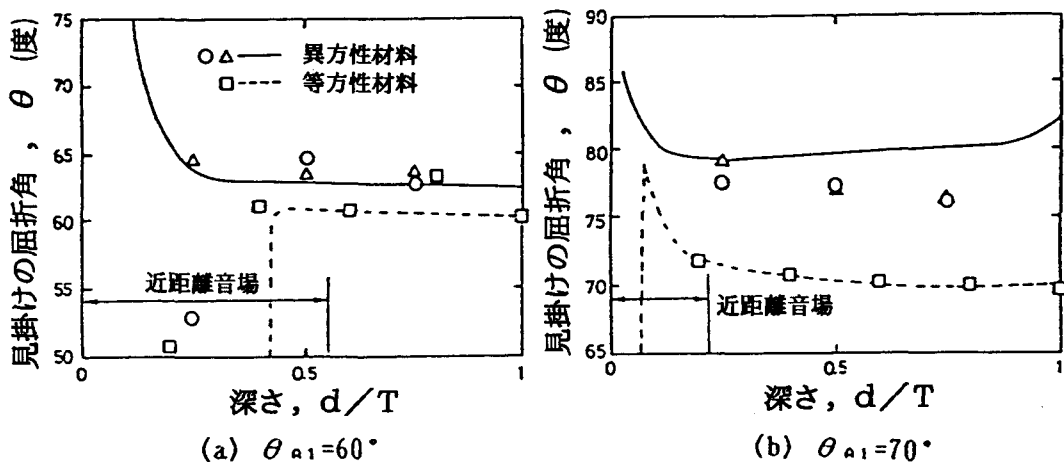


図3-31 不均質な異方性材料中における見掛けの屈折角

これらの結果を総括すると、あらかじめ異方性材料中における超音波ビームの中心線方向（平均的な屈折角）を測定しておけば、斜角探傷を実施して最大エコーが得られたときの探触子位置とビーム路程とから反射源位置を推定できる、と考えてよい。

3.4 音響異方性材料中の欠陥による超音波の反射

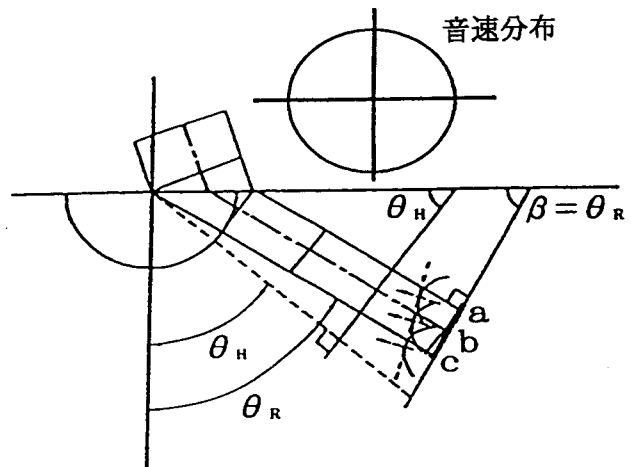
3.4.1 均質な音響異方性材料

図3-32は超音波が均質な異方性材料中を伝搬し、平面欠陥で反射される様子を模式的に示したものである。(a)図に示すように、超音波の伝搬方向（音線方向 θ_R ）が欠陥の反射面（向き β ）に垂直なとき、すなわち、 $\beta = \theta_R$ の場合、波面は反射面に対して傾きを持ちながら接近するので、反射面上の点a、b及びcに波面が到着する時刻にずれを生ずる。いま、材料中の音速分布を図中に示した楕円で表し、点a、b及びcで到着時間を考慮して波面曲線を描くと、a、b、cの順に波面曲線が小さくなる。ホイヘンスの原理を適用して、これらの曲線群の共通接線から超音波の反射方向を求めると、図中の破線のようになり、反射面が入射波の伝搬方向に垂直であるにも関わらず、超音波は元の方

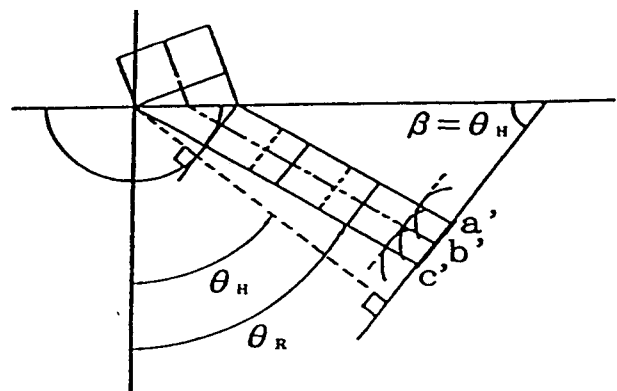
らない。

これに対して、(b) 図に示すように、波面法線方向 θ_H と反射面（向き β ）が垂直な場合、すなわち、 $\beta = \theta_H$ の場合、波面は反射面に対して平行に接近し、波面は反射面上の点 a' 、 b' 、 c' に同時に到着するので、点 a' 、 b' 、 c' において、反射後の波面曲線の大きさは等しくなり、超音波は元の方に反射されることになる。したがって、異方性材料中の平面欠陥においては、超音波の波面法線方向 θ_H が欠陥の向き β に等しくなるような探触子を使用すれば、超音波は元の方に反射され、このとき最大エコーが得られると考えられる。

異方性材料中での平面欠陥による超音波の反射方向を確認するため、半径 100 mm の半円形試験片を作製した。図 3-33 に示すように、曲率の中心付近において探触子を前後走査させ、R 100 面からのエコーが最大となる探触子位置において、曲率の中心から入射点までの距離 Δx を測定した。最大エコー高さの得られる探触子位置



(a) 音線方向が反射面に垂直な場合



(b) 波面法線方向が反射面に垂直な場合

図 3-32 異方性材料中における超音波の反射

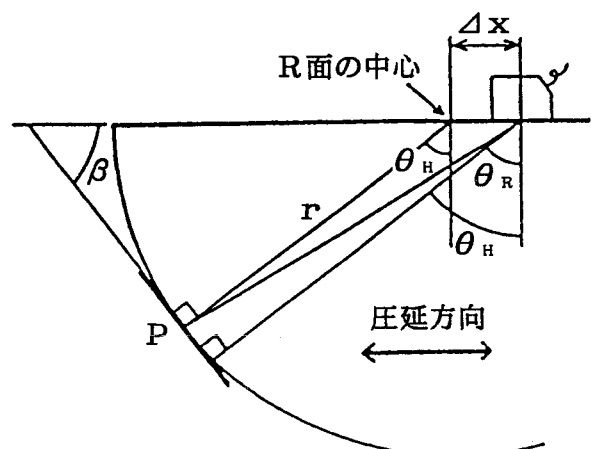


図 3-33 半円形試験片による波面法線方向の測定

では、図3-32 (b) に示したように、波面法線方向 θ_H と反射面の向き β とが等しいと考えられるため、図3-33の点Pの近傍を平面欠陥と考えると、波面法線方向 θ_H は、幾何学的な関係から伝搬方向 θ_R 及び Δx により(3-23)式のように表される。

$$\theta_H = \theta_R + \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x \cdot \cos \theta_R}{r} \right) \quad (3-23)$$

ここで、
 θ_H : 波面法線方向
 θ_R : 音線方向
 Δx : 曲率の中心から入射点までの距離
 r : 半円形試験片の半径
 ($r = 100 \text{ mm}$)

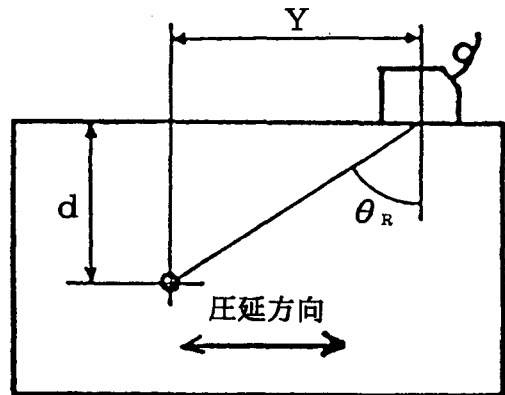


図3-34 横穴試験片の形状

測定結果を図3-35に示す。測定値の整理に当たって、伝搬方向角 θ_R は、図3-34に示すように、材料の圧延方向が半円形試験片に等しくなるような横穴試験片により測定した。この θ_R と Δx を(3-23)式に代入して θ_H を求め、 θ_R と θ_H の関係を整理した。

図中の曲線は(3-7)式により求めたもので、計算には、LC面内における法線速度分布 $g(\theta_H)$ を用いた。伝搬方向角 θ_R と波面法線方向角 θ_H の関係をを見ると、計算値と測定値がよく一致している。これにより、

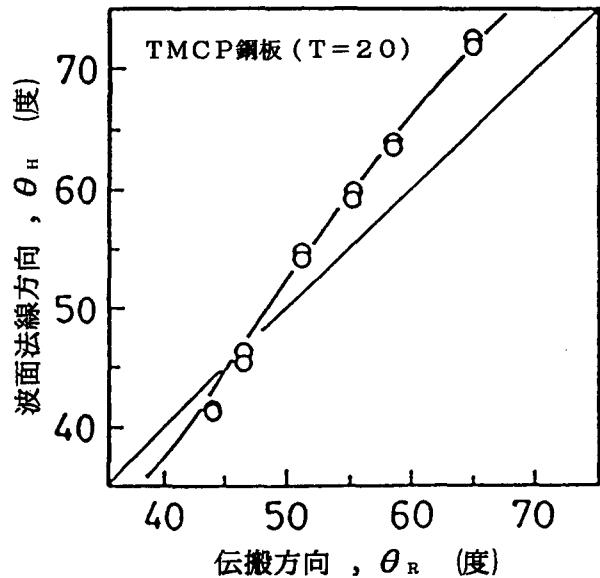


図3-35 伝搬方向と波面法線方向

異方性材料中での超音波の反射において、波頭面の向き θ_H と欠陥の向き β が等しいときに、超音波はもとの方向に反射されるのが確認できた。

また、それ以外の場合、つまり波頭面の向き θ_H と欠陥の向き β が等しくない場合について考える。このとき、波頭面の向き θ_H と欠陥の向き β のずれがビームの指向角程度の十分小さいずれと仮定すると、入射波と反射波の横波音速の違いは無視できる程度と考えられ、波面法線方向については、反射面の法線方向に対して、入射角と反射角は対称になると考えられる。

3. 4. 2 板厚方向に不均質な音響異方性材料

不均質な音響異方性材料について考えると、3. 3. 2で明らかにしたように、音線は曲がって伝搬する。このときの反射の様子を示したのが図3-36である。この場合、波面の法線方向 θ_{Hi} は深さとともに変化するが、欠陥のごく近傍では均質であると考えることができるので、均質材料と同様

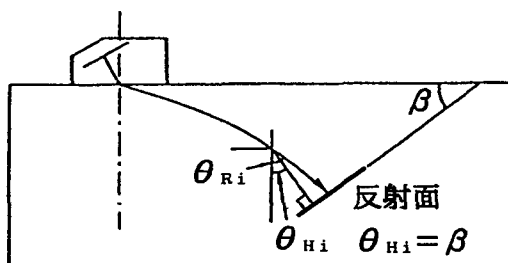


図3-36 不均質な異方性材料における超音波の反射

に、欠陥の向き β と欠陥が存在する深さ位置に対する θ_{Hi} が等しいときに、超音波は元の方に反射される。すなわち、このとき最大エコーが得られる。

一般に、超音波探傷試験では、STB-A1を用いてSTB屈折角 θ_{A1} を測定する。したがって、不均質な異方性材料中の欠陥に対し最大エコーを得るには、STB屈折角 θ_{A1} と波面法線方向 θ_{Hi} の関係を明らかにしておく必要がある。3. 1. 2に述べた方法により、 θ_{A1} と θ_{Hi} の関係を求め、深さ位置 d/T をパラメータにして整理したのが図3-37及び図3-38である。

例えば、図3-37 (a)において、深さ位置 $d/T = 0.5$ 、向きが $\beta = 40^\circ$ の欠陥を対象として探傷する場合、 $\theta_{Hi} = 40^\circ$ に対応するSTB屈折角 $\theta_{A1} = 42^\circ$ の探触子を用いたとき最大エコーが得られることになる。したがって、これらの線図を用いて、監視しようとする欠陥の位置及び向きに適する屈折

角の探触子を使用することにより、欠陥を最も効率よく検出し、更にエコー高さから欠陥寸法を推定することが可能になる。

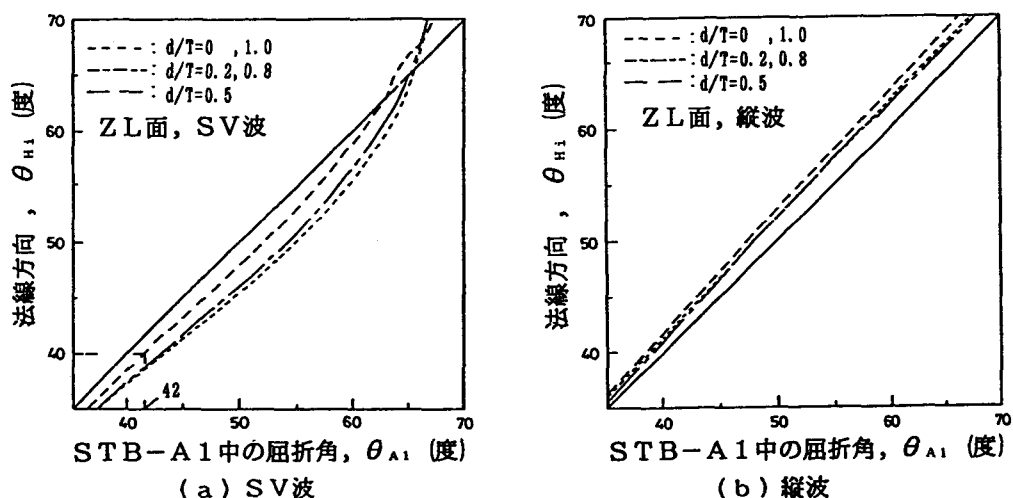


図3-37 θ_{A1} と θ_{H1} の関係 (TMCP鋼板, $T=20$; L方向)

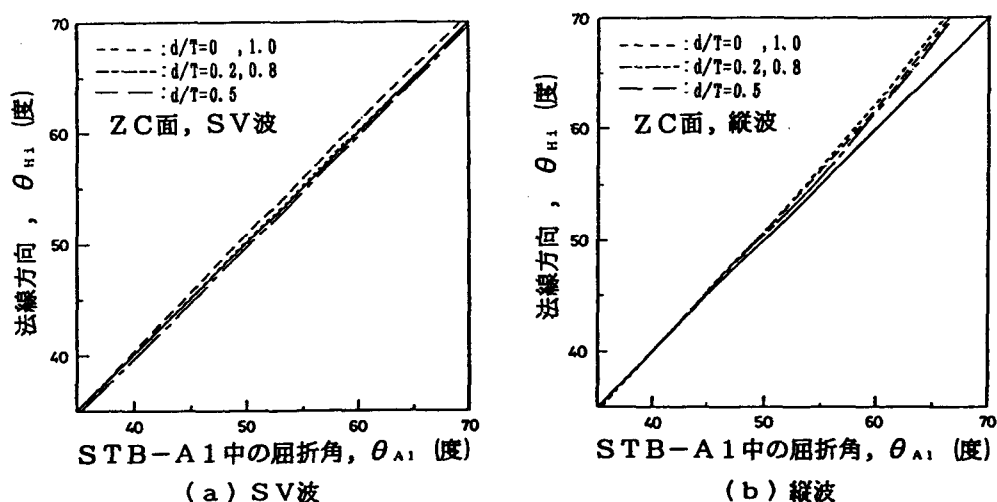


図3-38 θ_{A1} と θ_{H1} の関係 (TMCP鋼板, $T=20$; C方向)

3.5 結言

本章では、等方性材料中と異方性材料中における超音波の伝搬特性の相違を明らかにし、第2章で求めた板厚方向の音速分布の近似式を用いて超音波の伝搬

経路（音線）を求めた。また、斜角探傷におけるエコー高さの数値解析を行い、距離振幅特性をその測定結果と比較した。得られた結果を要約すると次のようになる。

（１）異方性材料中においては、等方性材料中とは異なり、超音波エネルギーの伝搬方向（音線方向）と波面法線方向とは一致しない。この伝搬方向（音線方向）は、法線速度の逆数で表される曲面（反速曲面）の法線方向と一致する。

（２）弾性波動論的解析により、波面法線方向に対応する横波の音線方向及び振動方向を求めた結果、波面法線方向からの音線方向のずれの向きは、一部を除いて、振動方向に近いという特徴がある。

また、SV波の斜角探触子を用いてL及びC方向以外の方向に斜角探傷する場合、振動方向と音速の異なる２つの横波に分解して伝搬するため、１つの反射源であっても２つのエコーが現れる可能性がある。縦波を用いればこのようなことは起こらず、しかも、エコー高さは探傷方向によらずほぼ一定しており、欠陥の定量的評価に適している。

（３）板厚方向に音速分布を有する不均質な異方性材料中では、超音波の波面法線方向 θ_H と音線方向 θ_R が深さ位置によって変化する。このため、音線が屈曲している。SV波を用いてL方向に斜角探傷する際に特にこれが顕著であり、とくに、STB屈折角 70° の探触子の場合、距離振幅特性が $d/T=0.5$ で極小値をとるという特異な現象が現れることがある。

（４）縦波を用いて斜角探傷を行えば、L方向及びC方向いずれに探傷する場合にも $\theta_H=40^\circ \sim 70^\circ$ の範囲で音線の曲がりは少なく、超音波がほぼ直進する。

（５）不均質な異方性材料中では、欠陥の向き β と欠陥が存在する深さ位置における超音波の波面法線方向 θ_{H1} が等しいときにエコーが最も高くなる。したがって、欠陥の向きが予測される場合、欠陥の存在する深さ位置における超音波の波面法線方向角が $\theta_{H1}=\beta$ となるSTB屈折角 θ_{A1} を持つ探触子を用いることが望ましい。

第4章 音響異方性を有する部材中の 欠陥の定量的評価法の確立

4. 1 緒言

超音波斜角探傷試験によって欠陥位置を推定する場合、探傷に先立って屈折角すなわち超音波の伝搬方向を測定し、探傷により検出された欠陥エコーのビーム路程すなわち欠陥までの距離を測定する必要がある。音響異方性を有する試験体の場合、第3章で明らかにしたように、超音波の伝搬方向（音線方向）と波面法線方向が異なるため、これらが屈折角測定及び欠陥位置推定に及ぼす影響を明らかにしておかなければならない。

本章では、超音波の音線方向と波面法線方向の違い、さらに音線速度の方向依存性に注目して、欠陥位置のより正確な推定方法とその推定誤差について検討している。また、屈折角（音線方向）の測定に及ぼす対比試験片の横穴の直径及び深さ位置の影響についても検討している。

開先面の融合不良の典型的なモデルは帯形平面反射源であると考えられる。そこで、反射源の向きを種々変化させて加工した人工欠陥試験片を用いて、異方性材料中における平面反射源の超音波反射特性を実験的に調べ、開先面の融合不良の検出に適した探触子の屈折角を決定している。また、このとき得られた最大エコー高さから、すでに仙田らが提唱している形状反射能率²³⁾を用いて欠陥寸法を推定できることを示している。

4. 2 実験方法

4. 2. 1 屈折角の測定及び反射源位置の推定

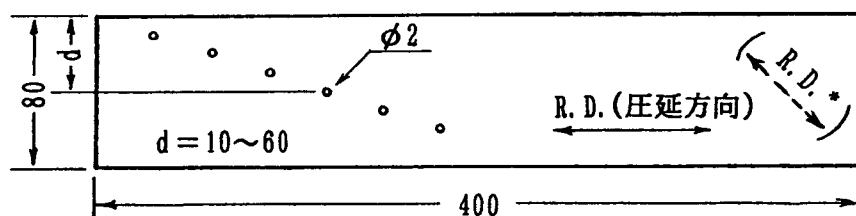
斜角探触子の屈折角は、標準試験片STB-A1の $\phi 50$ 横穴や対比試験片

RB-4の横穴等を用いて測定することができる。そこで、まず超音波の伝搬方向に対する素材の圧延方向を変化させた横穴試験片を作製して、横穴の直径及び深さ位置が屈折角の測定値に及ぼす影響を調べ、音響異方性材料に対する屈折角測定用試験片の必要条件を検討する。

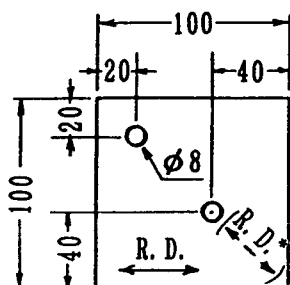
また、欠陥位置の推定に必要なビーム路程の測定は、標準試験片STB-A1を用いてSTB中の音速にあらかじめ調整した時間軸により直読できるが、異方性材料では超音波の伝搬方向によって音速が変化するため、実際の音速（音線速度）により補正する必要がある。そこで、横穴を欠陥に見立ててその位置情報から、実際の欠陥位置推定におけるビーム路程と音速補正の相関性を調べる。

(1) 試験片及び装置

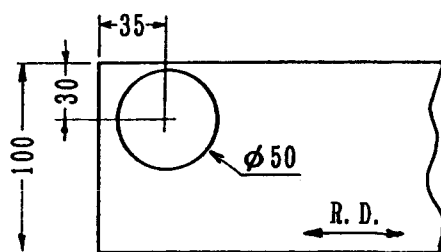
実験に使用した試験片の素材は、厚さ25mmのアルミニウム合金板(A5083P)であり、この素材のSV波の音速分布は図2-25に示したとおりである。圧延面(LC面)に平行な面内で音速の変化が最大となっているので、異方性の影響を明瞭に検出するために、試験片は、図4-1に示すように、



(a) TP-L2 (TP-Q2*)



(b) TP-L8 (TP-Q8*)



(c) TP-L50

図4-1 横穴試験片の形状・寸法

圧延面が試験片の側面となるように作製した。また、試験片の圧延方向は、図中に示すように、探傷面（探触子を当てる表面）に平行なもの、すなわちZL面を探傷面とするもの（TP-L2, L8, L50）と45度傾けたもの、すなわちZQ面を探傷面とするもの（TP-Q2, Q8）の2種類作製した。各試験片には直径及び深さ位置を変化させて探傷面に平行な穴（横穴）を加工してある。

使用した機器装置及び探触子を表4-1に示す。併せて、探触子のSTB屈折角 θ_{STB} 及びアルミニウム合金中への換算屈折角 θ_{AL} を示している。なお、 θ_{AL} は標準試験片（STB）中とアルミニウム合金中の音速をそれぞれ3245 m/s, 3150 m/sとして、スネルの法則により換算した値である。

表4-1 使用装置及び探触子

超音波探傷器	USL-32 (クラウトクレマ製)
斜角探触子	5Z10×10A45 ($\theta_{STB}=45.5'$, $\theta_{AL}=44.1'$) 5Z10×10A60 ($\theta_{STB}=60.9'$, $\theta_{AL}=58.4'$) 5Z10×10A70 ($\theta_{STB}=71.2'$, $\theta_{AL}=67.4'$) (ジャバンプローブ製)
実測屈折角 (θ_{STB} , θ_{AL})	

(2) 屈折角及びビーム路程の測定

図4-2に示すように、特定の深さ d （=10～70mm）に横穴を加工した試験片を用いて、各横穴からの超音波エコーが最大となる探触子位置において、横穴の中心の直上から探触子の入射点までの距離 Y を測定し、併せてビーム路程 W_{STB} を記録した。なお、探傷器の時間軸はSTB-A1を用いて鋼中の横波音速に調整し、音速比によるアルミニウム合金中のビーム路程 W_{AL} への換算は測定後のデータ整理の際に行った。屈折角 θ （正しくは、見掛けの音線方向とでも呼ぶ方がよい。）は、横穴の深さ d 及び探触子距離 Y により、

$$\theta = \tan^{-1} (Y/d)$$

として求めた。

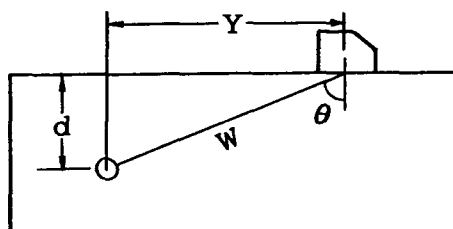


図4-2 探触子位置の測定

4. 2. 2 平面欠陥の向き及び寸法の推定

溶接部の開先面に発生する融合不良のような平面欠陥を超音波試験により検出する場合、等方性材料では、開先角度が分かっているものとする、超音波が開先面に垂直な方向から入射するような屈折角の探触子を選べばエコーが大きく、位置の測定誤差も小さい。しかし、異方性材料中では等方性材料中とは異なり、反射波が最も有効に戻る条件は、3.4で述べたように、欠陥の向きと材料中の波頭面の向きが等しくなることであり、このとき、最大エコーが得られることを確かめている。そこで、開先面の融合不良欠陥の検出に及ぼす材料の音響異方性の影響を調べるために、開先面の融合不良のモデルとして帯形平面欠陥を考え、欠陥の向きを変化させた模擬欠陥試験片を作製して実験を行っている。その結果、開先面の融合不良の検出に適した探触子の屈折角が存在することを明確にしている。

(1) 模擬欠陥試験片及び装置

実験に使用した試験片の形状及び寸法を図4-3、図4-4に示す。これらの試験片は、第2章で横波音速を測定した試験片と同じ素材のTMCP鋼板である。帯形平面欠陥は、図4-3に示すように、厚さ20mmのTMCP鋼板に直線溝を加工し、この直線溝の先端を帯形平面欠陥に近似する。また、溶接線の方法は素材の圧延方向（L方向）又はそれに垂直な方向（C方向）になることが多いと考えられるので、これらに対応させて、探傷方向が素材のC方向及びL方向に一致するように作製した。欠陥の向

探傷：L，C方向

$\beta: 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$

一回反射法

y_1

$t_s = 2, 4 \text{ mm}$

β

θ_R

w_l

w_b

直射法

y_0

10

20

図4-3 帯形平面欠陥の試験片とその探傷

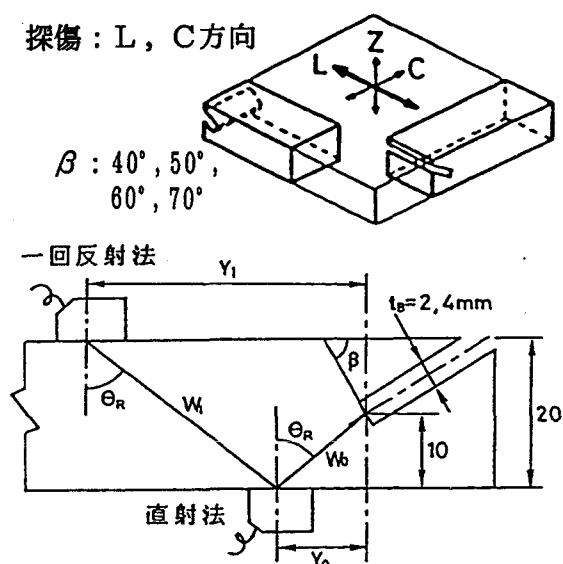


図4-3 帯形平面欠陥の試験片とその探傷

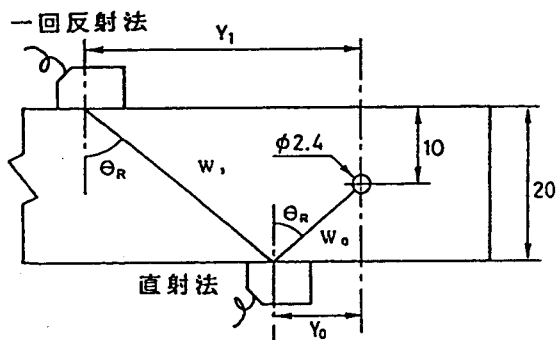


図4-4 横穴欠陥の試験片とその探傷

表4-2 使用装置及び探触子

超音波探傷器	USIP11 (クラウトクレマ製)
可変角探触子	5Z10×10VA (東京計器製) (実測周波数: 4.0MHz)
縦波斜角探触子	5Z10×10LA45 (4.5MHz) 5Z10×10LA60 (4.5MHz) 5Z10×10LA70 (4.5MHz) (ジャパンプローブ製)

き β は $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ の範囲で 10° ごとに変化させ、欠陥の幅は2mm及び4mmに加工している。図4-4は、エコー高さの基準に用いた直径2.4mmの横穴試験片である。この試験片も探傷方向が素材のC方向及びL方向に一致するように作製した。材料中の伝搬方向はこの横穴を用いて測定した。

実験に使用した探傷器及び探触子の形式と実測周波数を表4-2に示す。可変角探触子は、横波(SV波)による探傷に使用した。

(2) 欠陥エコー高さの測定

図4-3に示したように、反射源の向き β に対して $\pm 5^{\circ}$ の範囲でSTB屈折角 θ_{STB} を $1 \sim 2^{\circ}$ ずつ変化させて探傷した。屈折角の調整は、横波(SV波)による探傷に使用した可変角探触子は入射角調整ダイヤルで、縦波斜角探触子については斜めに研磨したアクリル製くさびを探触子のくさびに接着して行った。探傷器の測定範囲はSTB-A1を用いて100mmに調整し、屈折角を変化させることにSTB屈折角 θ_{STB} を測定した。反射源までの距離が近距離音場限界距離以上となるように、SV波による探傷では一回反射法により、縦波による探傷では直射法により行った。探触子を前後走査したときの各反射源からの最大エコー高さを記録した。このとき、ビーム路程 W 、探触子-欠陥距離 Y も同時に記録し、反射源位置の推定に使用した。

4.3 横穴を用いた屈折角の測定

4.3.1 音響異方性材料中の横穴による超音波の反射

斜角探触子の屈折角の測定には通常横穴試験片を用いている。そこで、まず横穴における超音波の反射について考える。図4-5は深さ d 、直径 t_H の横穴からのエコーが最大となったときの探触子の配置を示

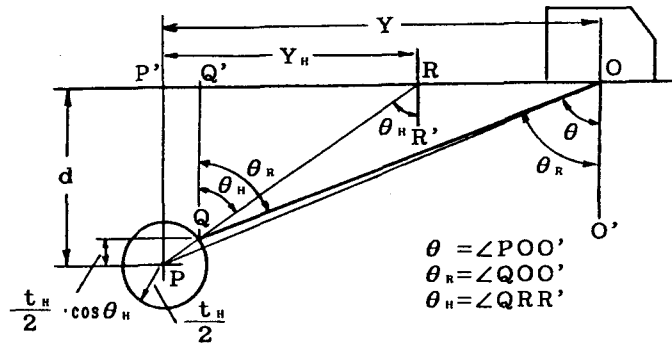


図4-5 横穴による屈折角の測定

している。探触子の入射点を O 、横穴の中心を P 、その直上の試験片表面の点を P' 、ビーム中心の反射点を Q 、その直上の試験片表面の点を Q' とする。 $\overrightarrow{OQ}$ は超音波ビームの中心線（音線方向）を表しており、 $\angle QOO' = \theta_R$ で表す。また、反射点 Q において、波面法線方向が反射面に垂直になるので、 PQ の延長線と OP' の交点を R とすると、 $\overrightarrow{RQ}$ が波面法線方向を表しており、 $\angle QRR' = \theta_H$ で表す。

屈折角 θ は、図4-5の配置より、 $\theta = \tan^{-1}(\overrightarrow{OP'}/\overrightarrow{PP'})$ と求まるが、図からも分かるように、音線方向 θ_R から少しずれている。

$$\overrightarrow{OP'} = \overrightarrow{OQ'} + \overrightarrow{Q'P'} = \left(d - \frac{t_H}{2} \cos \theta_H\right) \cdot \tan \theta_R + \frac{t_H}{2} \sin \theta_H$$

であるから、測定される屈折角 θ は次のように表される。

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \tan \theta_R + \frac{t_H}{2d} (\sin \theta_H - \cos \theta_H \cdot \tan \theta_R) \right\} \quad (4-1)$$

ここで、 t_H ：横穴の直径 θ_R ：音線方向角
 d ：横穴の深さ θ_H ：波面法線方向角

したがって、音響異方性に基づく音線方向角 θ_R 及び波面法線方向角 θ_H の

差が大きいほど、また、横穴の直径 t_H と深さ d の比が大きいほど横穴試験片により測定される屈折角 θ は超音波ビームの中心線方向(θ_R)からずれることになる。

4.3.2 横穴の直径及び深さが屈折角測定に及ぼす影響

圧延方向が探傷面に平行な試験片 (TP-L2, L8, L50) を用いて、直径が $t_H = 2, 8, 20, 50$ mmの横穴により屈折角を測定した結果を図4-6に示す。横軸は横穴の直径と深さの比 (t_H/d) で整理し、併せて(4-1)式による計算値を示している。なお、(4-1)式中の音線方向角 θ_R 及び法線方向角 θ_H は、STB-A1による実測屈折角 θ_{STB} に対応させて、図2-25 (b)の音速分布から(3-7)式及び(3-3)式を用いて求めた。計算値は測定値とほぼ対応しており、異

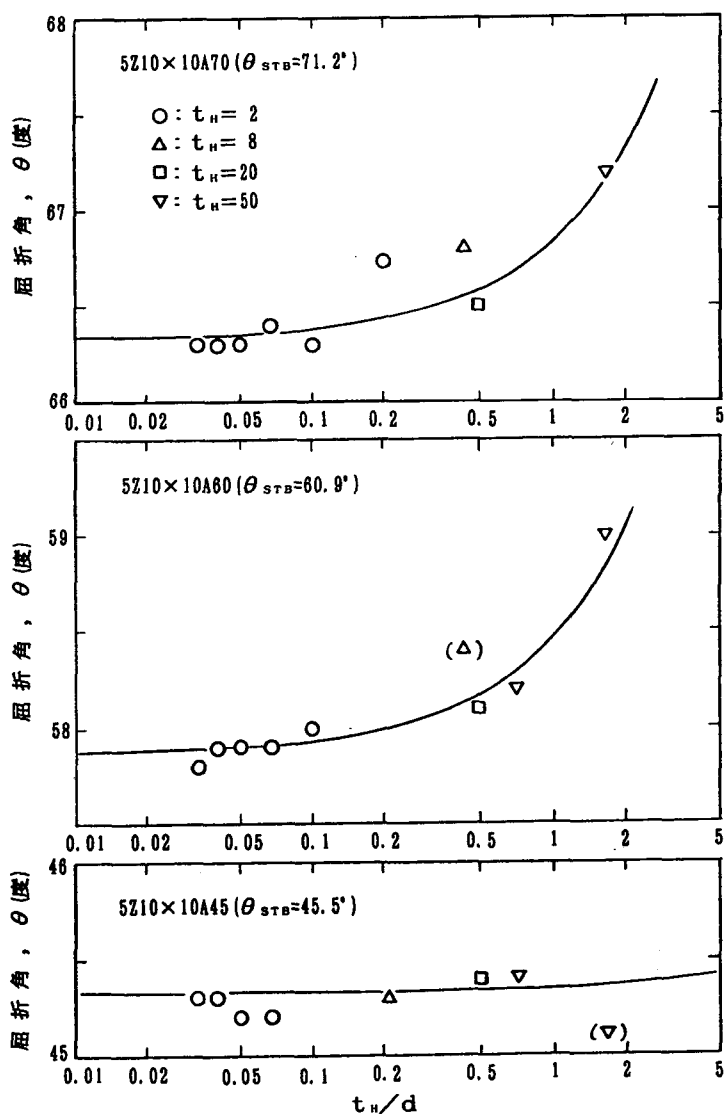


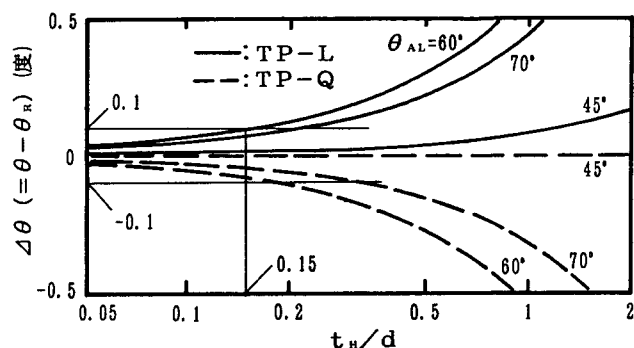
図4-6 横穴試験片による屈折角の測定結果 (TP-L)

方性材料で作製した横穴試験片による実測屈折角は(4-1)式で表せることが明らかである。計算値によると、屈折角 θ の音線方向角 θ_R からのずれ $|\Delta\theta|$ は、換算屈折角 $\theta_{AL} \div 60^\circ$ で最大となっているが、 $(t_H/d) \leq 0.2$ であれば $|\Delta\theta| \leq 0.1^\circ$ となる。

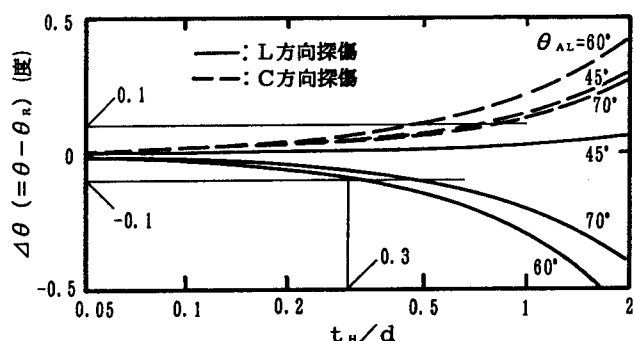
素材の圧延方向に対する試験片の採取方向を変化させた場合の屈折角のずれ $\Delta\theta_R$ を(4-1)式により求めた結果を図4-7に示す。

(a) 図は、実験に用いた試験片のように、試験片の側面が圧延面となるように採取し

た場合で、(b) 図は、通常の斜角探傷のように圧延面を探傷面としてL方向(圧延方向)及びC方向に探傷する場合に相当している。いずれの場合も、 $\theta_{AL} = 60^\circ$ で $|\Delta\theta|$ が最大となっており、 $|\Delta\theta| \leq 0.1^\circ$ となる測定を行うためには、(a) 図の場合で $(t_H/d) \leq 0.15$ 、(b) 図の場合で $(t_H/d) \leq 0.3$ となる横穴を用いる必要があるといえる。JIS Z 3080-1988に規定されている対比試験片RB-A4ALに合わせて、横穴の直径を $t_H = 5\text{ mm}$ とすると、適合する横穴の深さは、それぞれ、 $d \geq 33\text{ mm}$ 、 $d \geq 17\text{ mm}$ となる。



(a) TP-L, TP-Qの場合



(b) L方向, C方向探傷の場合

図4-7 横穴の直径及び深さ位置が屈折角測定に及ぼす影響 (A5083)

4. 3. 3 近距離音場が屈折角測定に及ぼす影響

試験片 TP-L2 及び TP-Q2 の直径 2 mm の横穴を用いて、横穴の深さによる屈折角の変化を整理したのが図 4-8 である。(3-7) 式による音線方向角 θ_R の計算結果を図中に実線で示しているが、それぞれの探触子の近距離音場限界距離に対応する深さ d' よりも浅い横穴の場合に音線方向角 θ_R からのずれが大きくなっている。 d' は仙田らによれば振動子寸法及び屈折角により (4-2) 式のように表されている。²⁴⁾

$$d' = \ell_{01} \cdot \cos \theta = \frac{\cos^3 \theta}{1 - \left(\frac{V_w}{V} \right)^2 \cdot \sin^2 \theta} \cdot \frac{4d_{01}^2}{\pi \lambda} \quad (4-2)$$

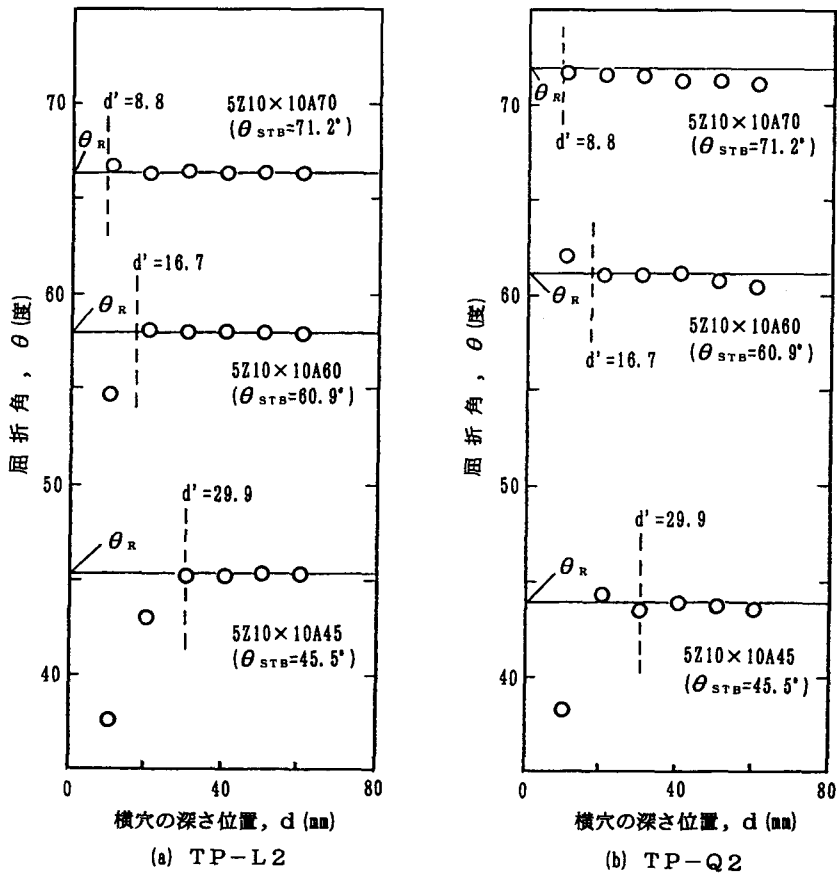


図 4-8 横穴の深さ位置と屈折角の関係

ここで、 l_{o1} : 近距離音場限界距離
 $2d_{o1}$: 振動子の縦寸法
 θ : 屈折角
 λ : 試験体中の波長
 V_w : くさび中の縦波音速
 V : 試験体中の横波音速

d' よりも深い横穴では、屈折角 θ が一定値に収束し、その値は音線方向角 θ_R にほぼ一致していた。したがって、屈折角の測定には、近距離音場限界距離に対応する深さ d' よりも深い位置にある横穴を使用しなければならない。また、音響異方性を有する材料であっても、均質材であれば遠距離音場では超音波は直進しており、屈折角（音線方向角）は一定となる。

4. 4 反射源位置の推定

反射源位置の推定には屈折角とビーム路程の測定が必要である。屈折角として、STB-A1により測定したSTB屈折角 θ_{STB} を音速比によりアルミニウム合金中に換算した換算屈折角 θ_{AL} 、及び、試験体と同じ素材で作製した横穴試験片を用いて測定した実測屈折角 θ を用いた。なお、横穴の直径と深さの比(t_h/d)が十分小さい横穴を用いるものとする、この実測屈折角 θ は音線方向 θ_R に等しい。また、ビーム路程として、STB-A1により時間軸を調整し、アルミニウム中の平均音速 V_{AL} により換算した値 W_{AL} 及び試験体中の実際の伝搬方向の音速（音線速度） V_R により換算した値 W_R を用いた。これらの換算式は次のとおりである。

$$\theta_{AL} = \sin^{-1} \left(\frac{V_{AL}}{V_{STB}} \cdot \sin \theta_{STB} \right)$$

$$W_{AL} = \frac{V_{AL}}{V_{STB}} \cdot W_{STB}$$

$$W_R = \frac{V_R}{V_{STB}} \cdot W_{STB}$$

これらの組合せとして、① (θ, W_R) , ② (θ, W_{AL}) , ③ (θ_{AL}, W_{AL}) の3種類の方法で反射源位置を推定し、その推定誤差を求めた。

反射源として横穴を考えると、最大エコー高さが得られたときの配置は図4-9のようになる。いま、屈折角 θ 及びビーム路程 W_{STB} の測定が理想的に誤差なく行われるものとする、方法①では位置の推定誤差が0となる。方法②ではビーム路程 W_{AL} を用いることによる誤差 $(\overline{P_2 P_3} = W_{AL} - W_R)$ を生じ、方法③では更に屈折角 θ_{AL} を用いることによる誤差を生じる。これらをまとめると、次のとおりである。

$$\text{方法①} \begin{cases} \Delta d = 0 \\ \Delta Y = 0 \end{cases} \quad (4-3)$$

$$\text{方法②} \begin{cases} \Delta d = (W_{AL} - W_R) \cos \theta \\ \Delta Y = (W_{AL} - W_R) \sin \theta \end{cases} \quad (4-4)$$

$$\text{方法③} \begin{cases} \Delta d = \left(W_{AL} + \frac{t_H}{2}\right) \cos \theta_{AL} - \left(W_R + \frac{t_H}{2}\right) \cos \theta_R \\ \Delta Y = \left(W_{AL} + \frac{t_H}{2}\right) \sin \theta_{AL} - \left(W_R + \frac{t_H}{2}\right) \sin \theta_R \end{cases} \quad (4-5)$$

ここで、 t_H : 横穴の直径

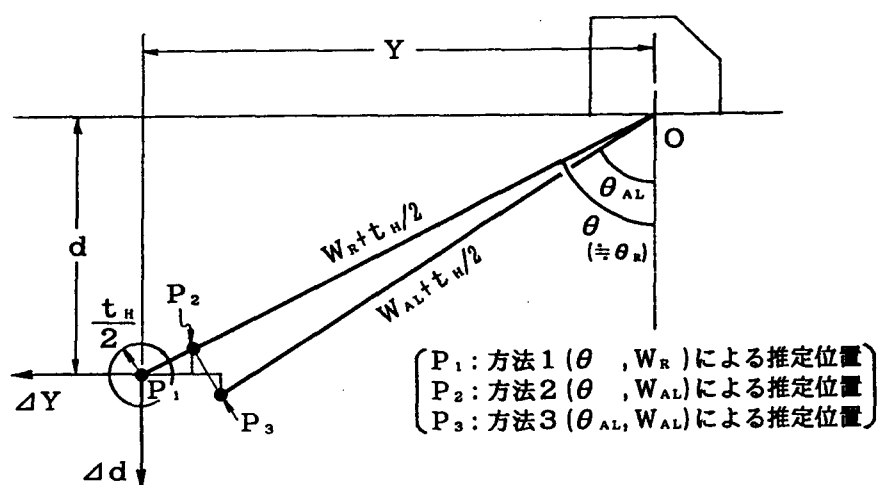


図4-9 反射源位置の推定と誤差

測定結果を図4-10及び図4-11に示す。それぞれ、試験片がTP-L2及びTP-Q2の場合で、公称屈折角 45° 、 60° 、 70° の探触子と方法①から③の組合せによる結果である。直径2mmの横穴の中心を原点とし、第1象限の方向から探傷したときの推定位置をプロットして示した。なお、近距離音場にある横穴による測定値は Δ 印で示した。

方法①では、測定点は図中に示した半径1mmの円内にほぼ収まっており、測定誤差は約1mmである。これは、屈折角 θ 、ビーム路程 W_{STB} 、探触子位置 Y の測定にともなう誤差を表していると考えられる。方法②及び方法③では、方法①に比べて、更に、(4-4)式、(4-5)式で表されるだけ誤差が大きくなり、誤差範囲はそれぞれ図中の長円のようなになると考えられる。3つの方法を比べると、特に試験体中における実測屈折角を用いるのが重要であることが分かる。方法①が最も精度の高い推定方法であるが、ビーム路程の音速補正が煩雑になる。実用的な位置推定方法として、方法②を採用すると、実験を行った深さ60mm以内の場合で、約2~3mmの誤差になることが期待される。

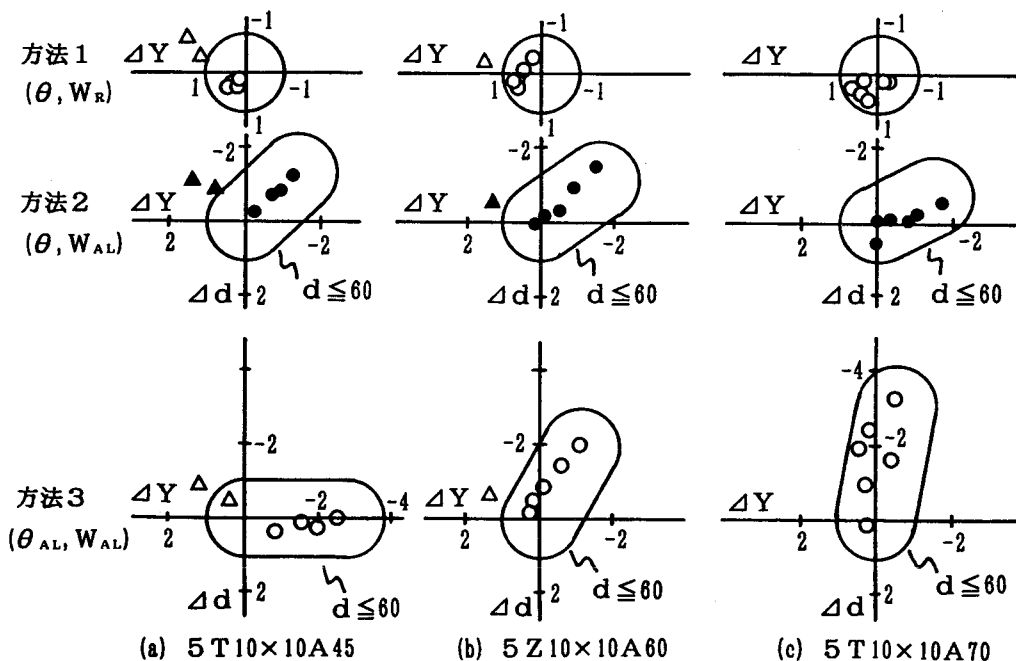


図4-10 反射源位置の推定結果 (TP-L2)

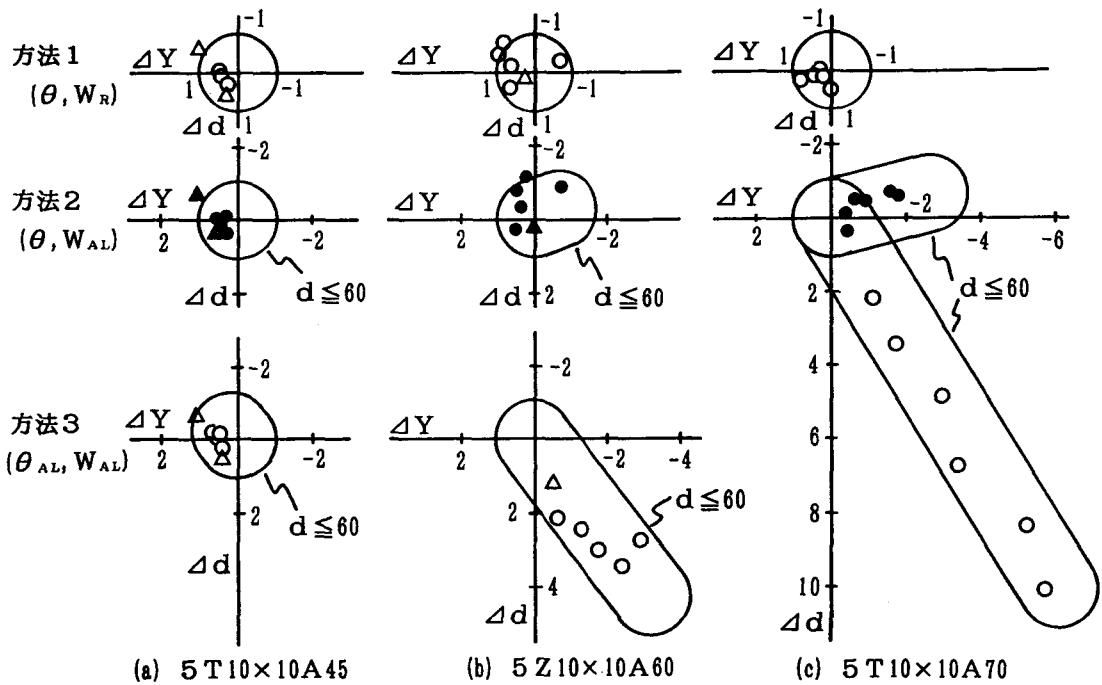


図4-11 反射源位置の推定結果 (TP-Q2)

4.5 欠陥の向きと寸法の推定

4.5.1 欠陥寸法とエコー高さの関係

等方性材料中では、対象とする欠陥の基準反射源に対する相対エコー高さは、それぞれの形状反射能率の比によって求まる。本実験の場合、基準反射源が横穴、対象とする欠陥が帯形平面であるので、相対エコー高さ h_F/h_S は次式で表されている。²³⁾

$$t_B \leq t_{cr} \text{ の場合 ; } \frac{h_F}{h_S} = \frac{\gamma_F}{\gamma_S} = \frac{\sqrt{\frac{t_B^2}{\lambda \ell}} \sqrt{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\frac{t_H}{4 \ell}} \sqrt{\frac{1}{2}}} = \frac{2 t_B}{\sqrt{\lambda t_H}} \quad (4-6)$$

$$t_B \geq t_{cr} \text{ の場合 ; } \frac{h_F}{h_S} = \frac{\gamma_F}{\gamma_S} = \frac{\frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{t_H}{4\ell}} \sqrt{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\frac{2\ell}{t_H}} \quad (4-7)$$

ここで, $t_{cr} = \sqrt{\frac{\lambda \ell}{2}} = \sqrt{\frac{\lambda d}{2 \cos \theta}}$

γ_S, γ_F : 横穴及び帯形平面欠陥の形状反射能率

λ : 超音波の波長

t_H : 横穴の直径

t_B : 帯形平面欠陥の幅

ℓ : 欠陥から振動子までの距離

(4-6) 式及び (4-7) 式により帯形平面模擬欠陥の寸法 (幅) とエコー高さの関係を整理すると図4-12のようになる。これは、深さ位置が $d = 10 \text{ mm}$ にある欠陥を、横波 (SV波) を用いて直射法によりとらえた場合を想定して計算したものである。

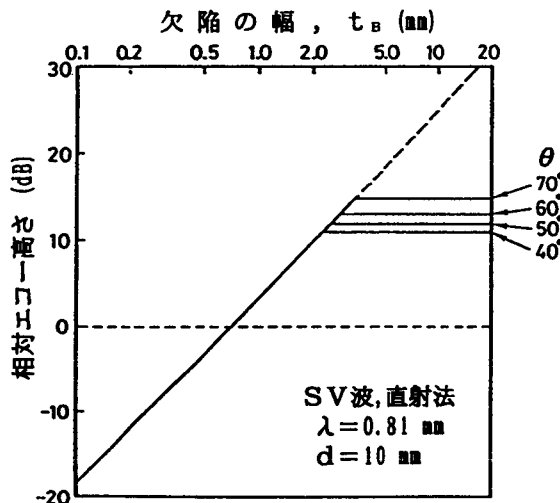


図4-12 帯形平面欠陥の寸法とエコー高さの関係

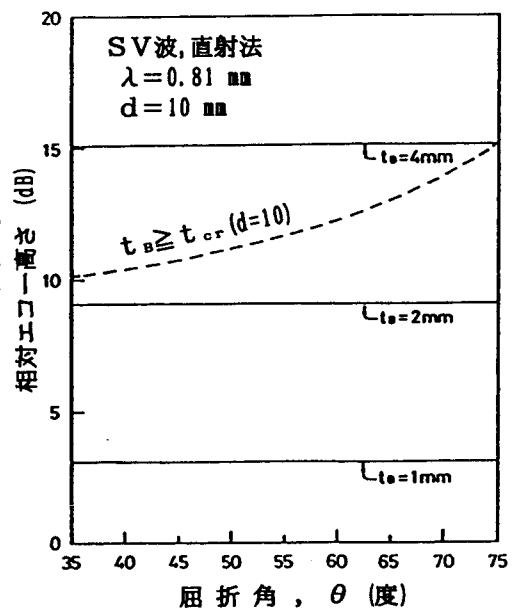


図4-13 屈折角と相対エコー高さの関係

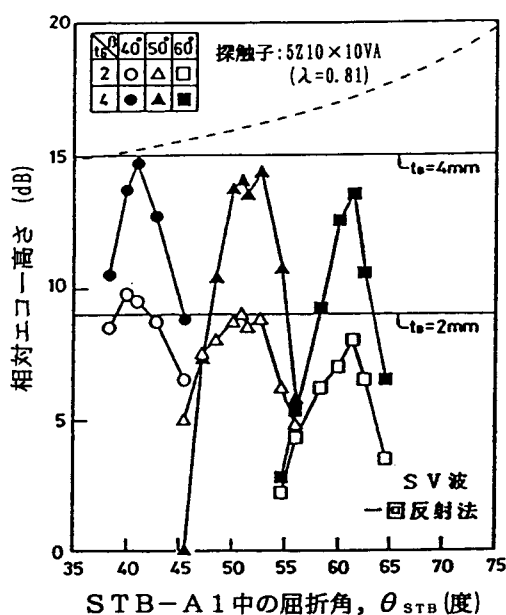
超音波の波長及び距離によって定まる限界寸法より小さな欠陥ではエコー高さは欠陥幅に比例して増加するが、欠陥幅が限界寸法を超えるとエコー高さは一定値に収束する。したがって、限界寸法より小さな欠陥の場合、相対エコー高さから欠陥寸法の推定が可能である。限界寸法を超えると限界寸法に等しくなり、推定を誤る。なお、図4-12では、実験に用いた試験片に合わせて欠陥までの深さを一定としているので、屈折角 θ によって距離が変化し、これに伴って限界寸法と相対エコー高さが変化する。

次に、欠陥の寸法が $t_B = 1, 2, 4 \text{ mm}$ の場合に、屈折角 θ と相対エコー高さの関係を整理すると図4-13のように一定値となる。図中に破線で示したのは、 $t_B \geq t_{cr}$ の欠陥の相対エコー高さで、(4-7)式による計算値である。

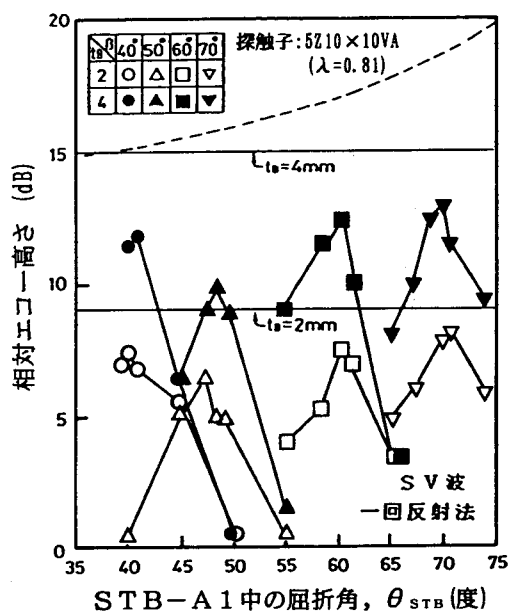
なお、図4-13は帯形平面欠陥に対して、超音波ビームが垂直に入射した場合の相対エコー高さを表している。探触子の屈折角を変化させて探傷し、同じ欠陥からの相対エコー高さを測定すると、欠陥に対して超音波ビームが垂直入射するときに相対エコー高さが最大値を示し、それより屈折角が大きくても小さくても欠陥の反射指向性のために相対エコー高さが低くなる。したがって、相対エコー高さの最大値から(4-6)式によって欠陥寸法が、また、そのときの屈折角 θ_{STB} から欠陥の向き β が推定できる。

欠陥の向き β をパラメータとして、STB-A1中での屈折角 θ_{STB} と相対エコー高さ $H_F - H_S$ (dB)の関係を、図4-10と同様の線図中に整理して示したのが図4-14及び図4-15である。図4-14はSV波による一回反射法の結果で、(a)にL方向に探傷したときの相対エコー高さを、(b)にC方向に探傷したときのエコー高さを示す。また、図4-15は縦波の直射法によるL方向探傷の結果である。1つの欠陥に対してSTB屈折角を変化させたときの相対エコー高さを整理すると、山形をなしており、その最大値は欠陥寸法から期待される相対エコー高さ(計算値)とほぼ対応している。なお、図4-15に示した縦波の直射法では、 $t_B = 4 \text{ mm}$ の欠陥は屈折角 $\theta_{STB} \leq 60^\circ$ のとき限界寸法 t_{cr} を超えており、相対エコー高さの最大値は破線と対応している。

また、表4-3は各欠陥で最大エコーの得られた探触子について、そのときの超音波の伝搬方向(音線方向) θ_R と波面法線方向 θ_H を示したものである。これらから、欠陥からのエコー高さが最大となるときの伝搬方向 θ_R ではなく、



(a) L方向探傷



(b) C方向探傷

図4-14 屈折角と相対エコー高さの関係 (SV波, 一回反射法)

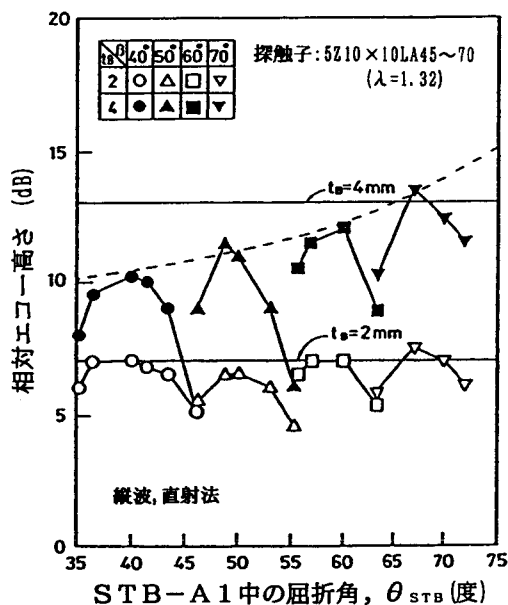


図4-15 屈折角と相対エコー高さの関係
(L方向探傷, 縦波, 直射法)

波面法線方向 θ_H が欠陥の向き β にほぼ対応しているのが分かる。したがって、異方性材料中の開先面の融合不良を検出する場合、波頭面の向きが開先面に平行になるような探触子を選定する必要がある。

図4-14 (a) のL方向の探傷において、 $\beta=70^\circ$ の向きに対する測定は、 $\theta_H=70^\circ$ となる探触子を使用すれば、相対エコー高さが計算値に近くなることが期待されるが、エコー高さがノイズレベルと重なり測定できなかった。この原因として、3.3で示したように、法線方向が $\theta_H=70^\circ$ となる屈折角

では音線方向が $\theta_R \doteq 80^\circ \sim 85^\circ$ とかなり大きくなるため、探触子のくさびから試験体へ超音波が通過する際の音圧通過率が著しく低下すること、また、同じ深さ位置の欠陥に対してビーム路程が著しく長くなるため、拡散による減衰と散乱による結晶粒界での減衰が大きくなることが考えられる。

これに対して、図4-15に示す縦波によるL方向の斜角探傷では、 $\beta = 70^\circ$ の欠陥まで明瞭にエ

コーが検出された。これは次のような理由によるものと考えられる。深さ $d/T = 0.5$ において $\theta_H = 70^\circ$ となる屈折角は、図3-37より $\theta_{STB} = 66.2^\circ$ であり、図3-16より音線方向も $\theta_R \doteq 67^\circ$ とほぼ一定している。すなわち、超音波の伝搬経路はほぼ直線であり、等方性材料と同様の探傷結果が期待できる。このため、それぞれの欠陥からの相対エコーの最大値は、形状反射能率による計算値とよく対応していた。

しかし、縦波による斜角探傷では、図4-16に示すように、縦波と同時に横波も伝搬する。更に、底面で反射するときモード変換によって縦波の大部分が横波に変換され、探傷器の表示器に現れるエコーが縦波によるものか横波によるものか判定できないため、一回反射法を適用することは適していない。²⁵⁾

表4-3 欠陥検出に適した屈折角
(SV波, $t_B = 4\text{ mm}$)

欠陥の傾き (度)	L 方向 探 傷		C 方向 探 傷	
	音線方向 θ_R	法線方向 θ_H	音線方向 θ_R	法線方向 θ_H
40	39.5	42.4	41.6	41.1
50	50.1	48.3	48.5	49.5
60	64.0	59.0	56.8	59.3
70	—	—	66.2	70.0

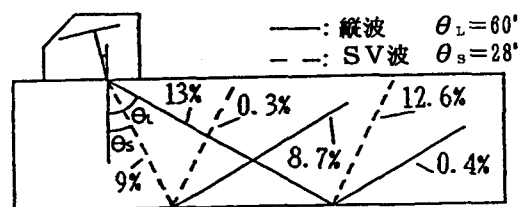


図4-16 縦波斜角探傷における
超音波の伝搬と反射

4.5.2 エコー高さによる欠陥寸法の推定

屈折角を変化させて、相対エコー高さを測定し、最大値が得られたとき、超音波ビームの波面法線方向が欠陥に対して垂直になっていると考えることができる。欠陥寸法は、そのときの相対エコー高さから推定可能となる。帯形平面欠陥に対する斜角探傷の結果、得られた相対エコー高さの最大値より、(4-3)式を用いて計算した推定寸法を整理したのが図4-17である。(a)図は横波(SV波)の一回反射法、(b)図は縦波によるもので、いずれもL方向に探傷した場合である。また、(c)図は横波(SV波)によるC方向探傷の結果である。なお、限界寸法 t_{cr} を超える欠陥についてもこの推定方法をそのまま適用したので、図中に(*)をつけて示した。

$t_B=2\text{ mm}$ の欠陥については、SV波及び縦波のいずれでも、誤差が最大 $\pm 10\%$ であり、実寸法とほぼ対応していた。 $t_B=4\text{ mm}$ のものについては、縦波($\beta=70^\circ$ のものを除く。)による探傷ではビーム路程が短く、欠陥寸法が限界寸法を超えているので、推定値は最大30%程度の過小評価になっているが、SV波では、 $t_B=2\text{ mm}$ の欠陥と同様、 $\pm 10\%$ の誤差で実寸法に近い値が得られた。

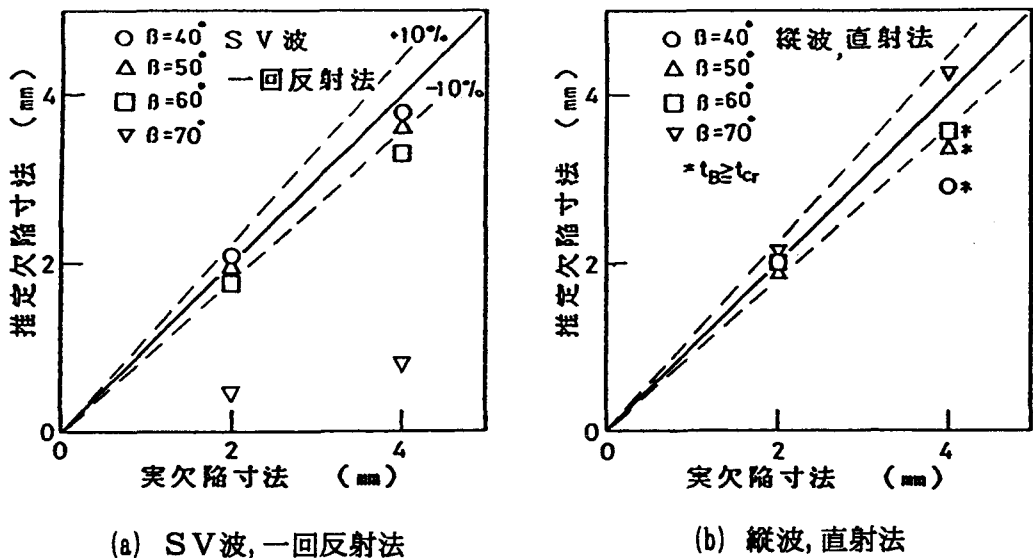
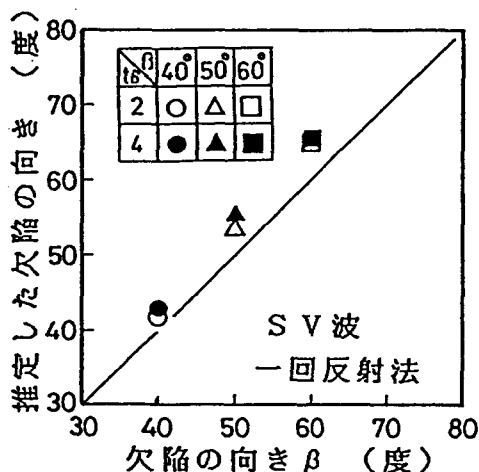


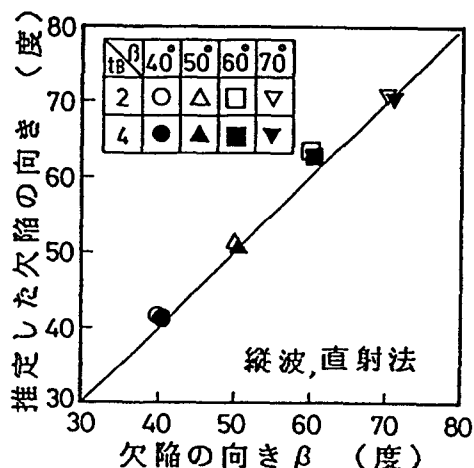
図4-17 欠陥寸法の推定結果

4. 5. 3 欠陥の向き の推定

3. 5. 2では、不均質な異方性材料中の平面欠陥に対して斜角探傷試験を行う際に、予めSTB-A1で測定した屈折角 θ_{STB} と各深さ位置での波面法線方向角 θ_H の関係を明らかにしておき、欠陥の向き β と波面法線方向角 θ_H が等しくなるように探触子の屈折角 θ_{STB} を選べば最大エコーが得られることを述べた。逆に考えると、斜角探傷試験で最大エコーが得られたときの探触子の屈折角 θ_{STB} に対応する法線方向 θ_H を図3-32及び図3-33から読み取ることにより、欠陥の向き β を推定することが可能である。図4-18に推定結果を示す。誤差は、SV波の一回反射法では $\pm 6.0^\circ$ 、縦波では $\pm 4.0^\circ$ であった。



(a) SV波, 一回反射法



(b) 縦波, 直射法

図4-18 欠陥の向き の推定結果

4. 6 結言

本章では、均質な異方性材料を用いて反射源位置の推定精度について検討し、さらに、不均質な異方性材料中における欠陥寸法、向き、及び位置の推定を行った。結果をまとめると次のようになる。

- (1) 異方性材料中における超音波の伝搬方向（見掛けの屈折角 θ_R ）を測定する場合、横穴の直径と深さの比（ t_H/d ）が十分小さく、かつ、近距離音場限界距離以上となる横穴を用いる必要がある。
- (2) 圧延方向の斜角探傷において、 70° の向きの欠陥に対して、SV波による探傷が不可能であっても、縦波斜角法を適用することにより、欠陥の寸法、向き及び位置の推定が可能となる。
- (3) 欠陥の反射面に対して波面法線方向が垂直になるSTB屈折角のときに相對エコー高さが最大値を示すという考えに基づいて、欠陥の向きを推定できることを明らかにした。
- (4) 欠陥位置の推定は、STB-A1で測定した屈折角 θ_{A1} ではなく、横穴対比試験片で測定した屈折角 θ_R' により行う必要がある。更に、ビーム路程が長くなる場合には音線方向 θ_R に対応する音線速度 V_R で補正したビーム路程 $W_R (=W_{STB} \times V_R / V_{STB})$ を用いて推定するのが有効である。

第5章 音響異方性材料溶接部への超音波斜角探傷の適用

5.1 緒言

第4章では、機械加工により作製した種々の向きの帯形反射源を用いて、反射源の寸法及び位置の推定方法を検討した。本章では、実溶接部への適用性を検討するため、開先面の融合不良を発生させた模擬欠陥溶接試験体を作製して、これに超音波斜角探傷を実施している。その後、欠陥部の切断試験を行い、超音波探傷試験による欠陥寸法の推定結果と比較し、推定方法の妥当性を検証している。

5.2 模擬欠陥を有する溶接試験体の作製

実験に用いた溶接試験体の形状・寸法を図5-1に示す。母材は、第4章までで使用したのと同じTMCP鋼板（厚さ： $T=20\text{mm}$ ）であり、圧延方向が探傷方向に一致するように作製している。開先形状はV形で、発生する欠陥の向きを変化させるため、ベベル角を $\alpha=20^\circ$ 及び 30° とした。これらは、図4-3に合わせて欠陥の向き β で表示すると、 $\beta=70^\circ$ 、 60° となる。開先面の融合不良を発生させるため、図中に示しているように、厚さ 3.2mm の鋼片をTIG溶接により開先面に貼り付けた後、手溶接を行っている。貼り付けた

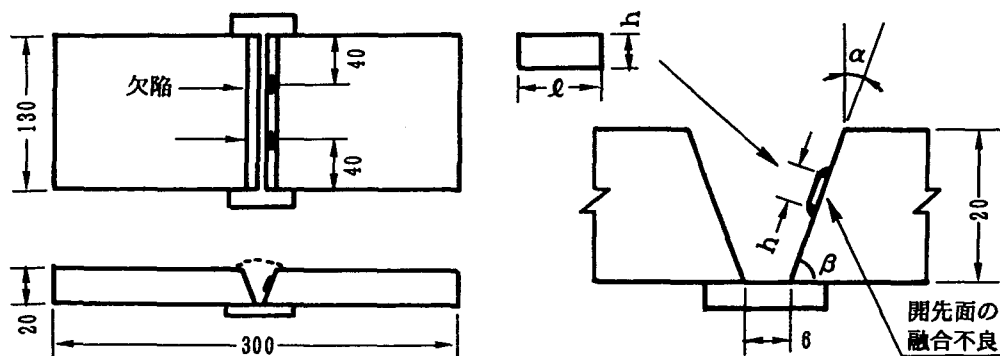


図5-1 溶接試験体の形状及び寸法

鋼片の寸法（幅： h ，長さ： l ）

は、表5－1に示すとおりである。
各試験体に2個ずつ欠陥を挿入し、
順に欠陥番号を1～4とした。

表5－1 欠陥の向き及び寸法

ベベル角 (α)	欠陥番号	欠陥寸法（鋼片の寸法）	
		h (mm)	l (mm)
20°	1	6	28
	2	4	20
30°	3	4	20
	4	4	28

5.3 溶接試験体の超音波探傷試験と切断試験

5.3.1 超音波探傷試験方法

実験に使用した探傷器及び探触子を表5－2に示す。探触子は、公称周波数5MHzの横波及び縦波斜角探触子である。

探触子の屈折角を、溶接開先面の向き β に対して $\pm 5^\circ$ の範囲でSTB屈折角 θ_{STB} を2～3°ずつ変化させて探傷した。屈折角の調整は、横波（SV波）による探傷に使用した可変角探触子は入射角調整ダイヤルで、縦波斜角探触子については斜めに研磨したアクリル製くさびを探触子のくさびに接着して行った。

探傷器の測定範囲はSTB-A1を用いて100mmに調整し、屈折角を変化させることにSTB屈折角 θ_{STB} を測定した。

欠陥までの距離が近距離音場限界距離以上となるように、SV波による探傷では一回反射法により、縦波による探傷では直射法により行った。探触子を前後走査したときの各反射源からの最大エコー高さを記録した。このとき、ビーム路程 W ，探触子－欠陥距離 Y も同時に記録した。欠陥エコーの続く範囲内で、溶接線方向に

表5－2 使用装置及び探触子

超音波探傷器	USL-32（クラウトクレマ製）
可変角探触子	5Z10×10VA（東京計器製） （実測周波数：4.0MHz）
縦波斜角探触子	5Z10×10LA45（4.5MHz） 5Z10×10LA60（4.5MHz） 5Z10×10LA70（4.5MHz） （ジャパンプローブ製）

2 mm ずつ探触子を左右走査しながら上記のような測定と記録を繰り返した。

基準エコーは、4. 2. 2 で用いた直径 2. 4 mm の横穴（深さ位置：d = 5, 10, 15 mm）からのエコー高さを測定し、欠陥エコーのビーム路程に対応する基準エコー高さを内挿により決定した。

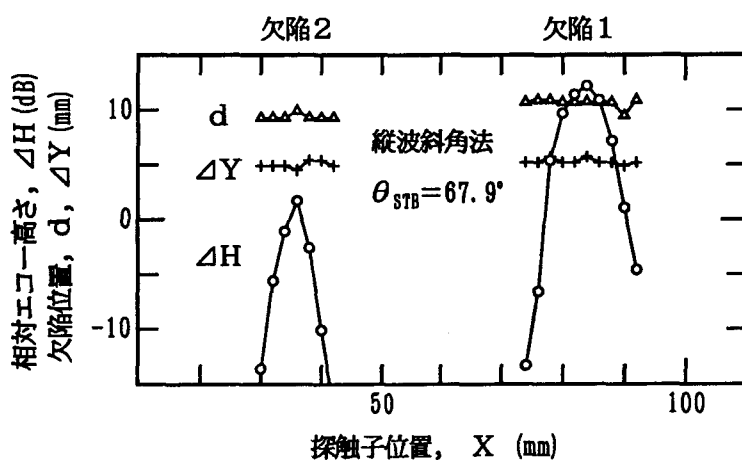
5. 3. 2 切断試験による欠陥の確認

超音波探傷試験により、最大エコー高さが得られた溶接線方向の位置において、切断試験を行った。断面を 1200 番の研磨紙で研磨し、10%硝酸アルコールにより腐食した。マクロ写真を撮影した後、溶剤除去性染色浸透探傷試験を実施して、断面内における欠陥寸法の測定を行った。

5. 4 超音波探傷試験結果並びに音響異方性材料溶接部の

超音波探傷試験における縦波斜角法の位置付け

超音波探傷試験により、相対エコー高さが最大値を示した屈折角における左右走査グラフ（探触子位置とエコー高さの関係）を図 5-2 及び図 5-3 に示す。



(a) ベベル角: $\alpha = 20^\circ$ の試験体

図 5-2 縦波斜角法による左右走査グラフ

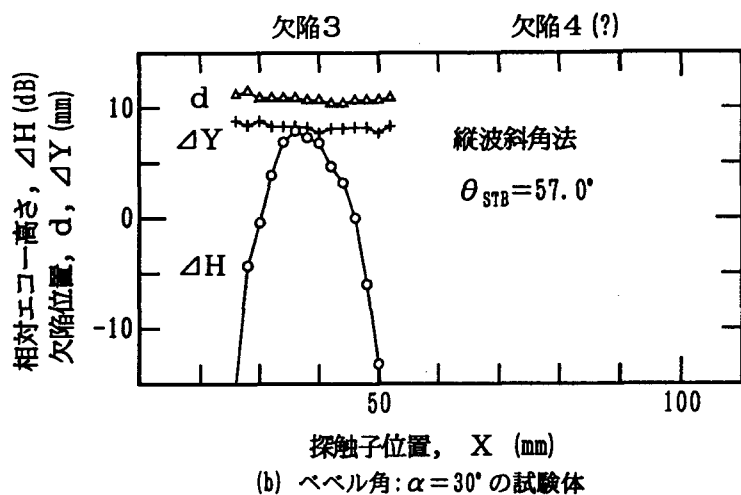


図5-2 縦波斜角法による左右走査グラフ (続き)

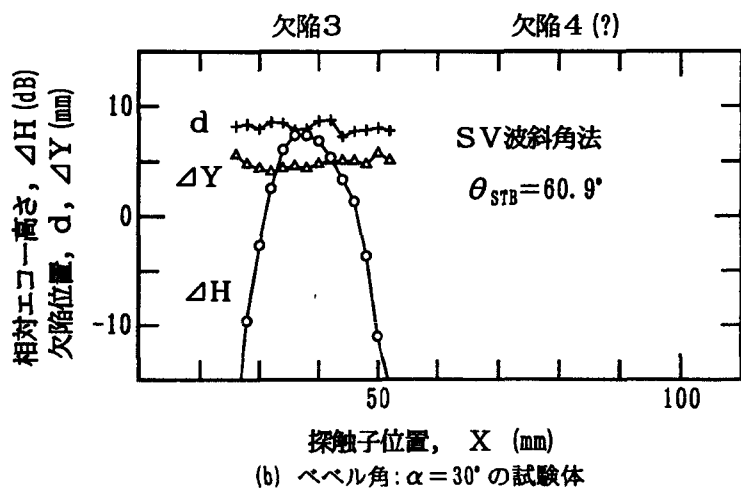
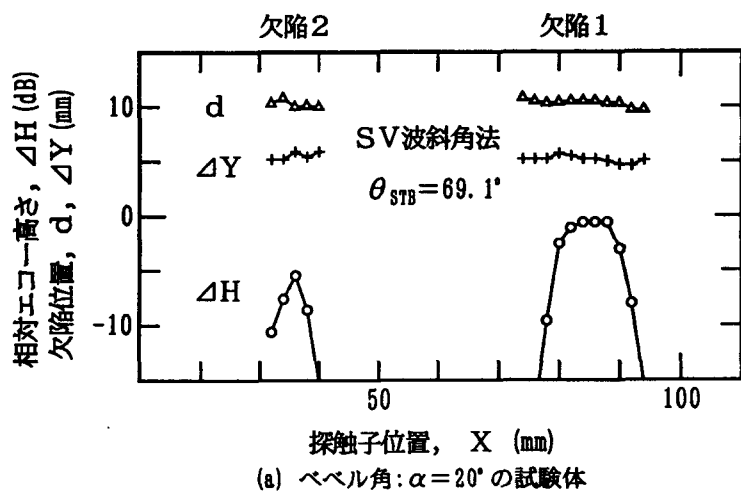


図5-3 横波斜角法による左右走査グラフ

それぞれ縦波及び横波（SV波）による測定結果で、いずれも（a）はベベル角 20° の試験体、（b）はベベル角 30° の試験体の相対エコー高さである。ベベル角 30° の試験体では、欠陥番号4のエコーが認められなかった。また、横波による探傷では、欠陥エコー高さはいずれも縦波によるエコー高さに比べて低くなっており、とくにベベル角 20° の試験体では 10 dB 以上低下していた。

図5-2及び図5-3において相対エコー高さが最大値を示した溶接線方向の位置において、STB屈折角と相対エコー高さの関係を整理したのが図5-4である。（a）は縦波による測定値であり、（b）は横波によるものである。それぞれの欠陥で最大エコー高さを示したSTB屈折角は、縦波では欠陥1及び2の場合 $67\sim 70^\circ$ 、欠陥3の場合 57° となっており、図3-37（b）に示した波面法線方向が欠陥の向き β と対応している。横波では、欠陥3の場合 61° で、図3-37（a）と対応しているが、欠陥1及び2ではエコーが低く、ピークが不明瞭であった。

図5-2において相対エコー高さが最大値を示した溶接線方向の位置において、切断試験を行った。欠陥1のマクロ写真を図5-5に示す。溶接部の左側に $1.5\sim 2\text{ mm}$ の融合不良が見られる。更に、 $1.5\sim 2\text{ mm}$ 下に融合不良があ

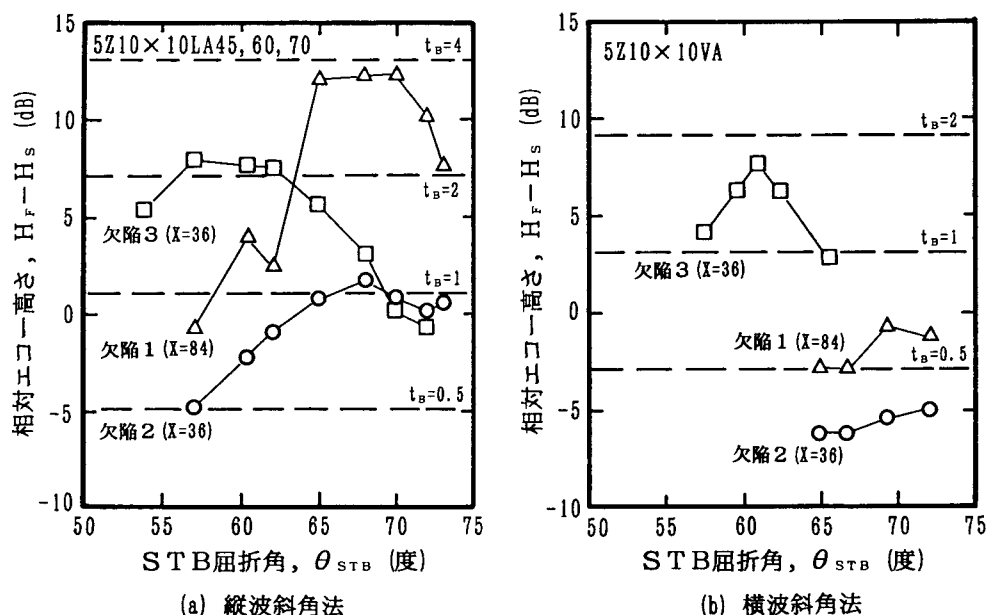


図5-4 STB屈折角によるエコー高さの変化

るようにも見えるが明瞭ではない。そこで、各欠陥部の断面において浸透探傷試験を実施した。その結果が図5-6である。(a)が欠陥1であるが、融合不良が2つに分かれて存在しているのが認められた。断面寸法はそれぞれ2.0mm, 1.8mmである。(b), (c)は欠陥2及び欠陥3であり、それぞれ1.4mm, 2.4mmである。

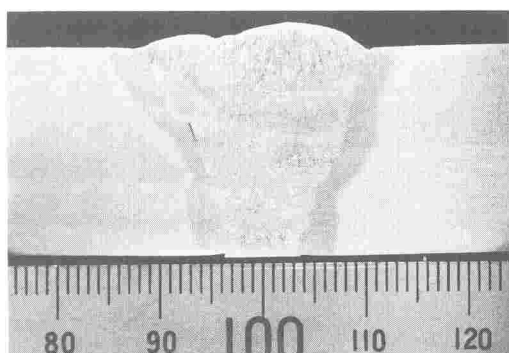
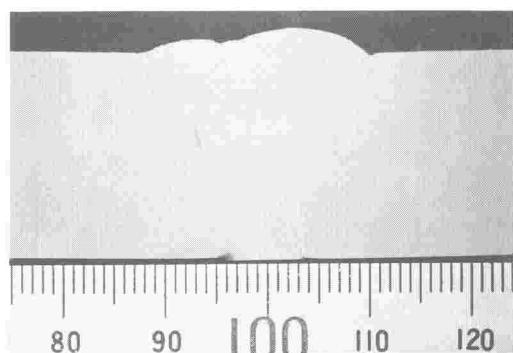
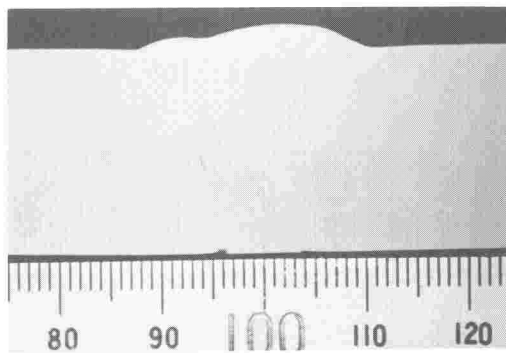


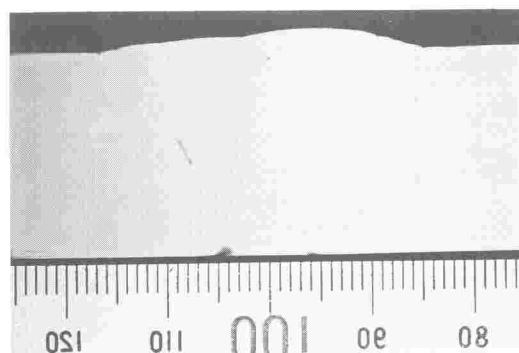
図5-5 欠陥1のマクロ写真



(a) 欠陥1



(b) 欠陥2



(c) 欠陥3

図5-6 浸透探傷試験結果

図5-4における相対エコー高さの最大値から欠陥の断面寸法を推定した結果と切断試験の結果とを比較したのが図5-7である。縦波による推定結果及び $\beta = 60^\circ$ の欠陥の横波による推定結果では、実寸法の20%以内の過小評価で推定できている。 $\beta = 70^\circ$ の欠陥の場合、横波(SV波)による推定では実寸法の約1/4になっており、第4章の実験結果から予想されたとおり、エコー高さによる寸法の推定ができないことが確認された。

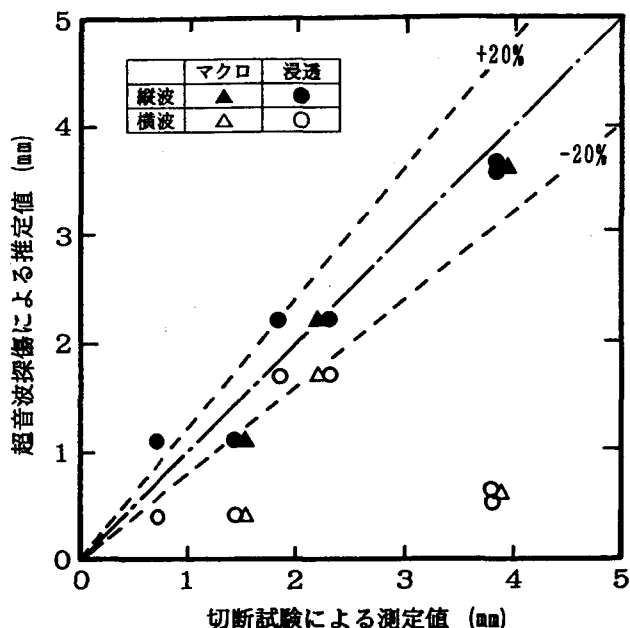


図5-7 欠陥寸法の推定結果

以上、本研究において得られた結果をもとに、音響異方性を有する材料の溶接部への超音波探傷試験の適用方法を整理すると、例えば、図5-8のようになる。

①音響異方性の程度(板厚方向に伝わる2つの横波の音速比 V_L/V_C)、②探傷方向が圧延方向(L)又はそれに垂直な方向(C)に限定されるかどうか、③発生が予想される(あるいは、試験の対象と

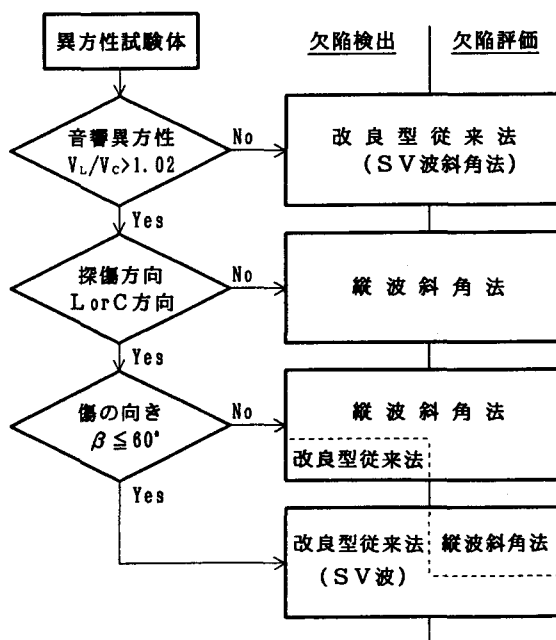


図5-8 音響異方性を有する試験体への超音波探傷試験の適用方法の例

する) 欠陥の向きが $\beta \leq 60^\circ$ かどうか, という3つの条件により, SV波を用いる従来法と縦波斜角法を使い分ける必要がある。

なお, SV波による従来法であっても, 欠陥の位置, 向き及び寸法の推定において, 音響異方性に伴う波面法線方向と音線方向の違いの影響を考慮する必要があるので, 改良型従来法と記している。考慮すべき項目は, 屈折角の測定において横穴の直径と深さの比(t_H/d)が十分小さい(例えば, 本研究に用いたアルミニウム合金の場合, $t_H/d \leq 0.2$) 試験片を使用すること, 欠陥位置の推定にはこの実測屈折角を使用すること, 欠陥の向きの推定は欠陥の相対エコー高さが最大となる屈折角(STB屈折角又は音線方向角)に対応する波面法線方向を図3-38等から読み取ること, 欠陥寸法はこの最大エコー高さから推定すること, である。

超音波探傷試験を実施する場合, 欠陥の有無を調べる予備的な探傷と欠陥の位置・寸法の計測という2段階に分けた適用も考えられるので, 図中に欠陥の検出と欠陥の評価に区分して, 適用可能な試験方法を示している。

5.5 結言

本章では, 異方性材料の溶接部における欠陥寸法の推定を行って, 切断試験の結果と比較した。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 欠陥の寸法を推定する場合, 欠陥の向きが $\beta = 70^\circ$ の欠陥については縦波を, $\beta = 40^\circ \sim 60^\circ$ の欠陥については縦波又は横波(SV波)を用いて得られる相対エコー高さの最大値によって行うのが適している。

寸法の推定結果は, 実寸法の約20%以内の過小評価であった。

- (2) 欠陥の反射面に対して波面法線方向が垂直になるSTB屈折角の時に相対エコー高さが最大値を示すという考えに基づいて欠陥の向きを推定したところ, SV波の一回反射法及び縦波の直射法で最大約 5° の誤差で推定できた。

第6章 結 論

本研究は、均質な音響異方性及び板厚方向に不均質な音響異方性を有する材料の溶接欠陥の定量的評価法の確立を目的として、音響異方性材料中における超音波の伝搬挙動を中心に解析・検討したものである。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、対象とする材料の音響異方性を把握するため、局所的な音速の測定方法を検討し、板厚方向の深さ位置及び伝搬方向による音速分布を明らかにした。一連の実験的研究で得られた知見をまとめると次のようになる。

(1) 板厚方向の深さ位置による音速分布の測定に際して、試験片の局所的な音速測定が必要となる。そこで、アクリル樹脂製のウェーブガイドを使用する方法を考案し、振動子寸法よりも狭い範囲の音速測定が可能になることを明らかにした。厚さ T_s の鋼試験片の場合、ウェーブガイドの厚さ及び幅を $1.5 \times T_s$ 以上とすることにより、ウェーブガイド内の多重反射エコー及び遅れエコーの干渉を受けずに試験片中の多重反射エコーを得ることができる。

(2) TMCP鋼板における板厚方向の深さ位置による音速分布は、周期が板厚 T 及び $T/2$ の余弦関数の和で近似できた。近似による誤差の標準偏差は最大で 20 m/s 、多くの場合 10 m/s 程度であった。

深さ位置による音速の変化は、圧延方向の断面(ZL面)内のSV波が大きく、ZC面内及び縦波は音速変化がないと考えてもよい程度に少ない。

(3) 伝搬方向による音速分布は、伝搬方向角が $\theta_H = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の3方向の音速を測定するだけで、余弦関数の一次結合として次のように近似できる。

$$V_H = \frac{V_0 + V_{90} + 2V_{45}}{4} + \frac{V_0 + V_{90} - 2V_{45}}{4} \cos 4\theta_H + \frac{V_0 - V_{90}}{2} \cos 2\theta_H$$

ただし、 V_H ：音速（波面法線速度）

θ_H ：波面法線方向（基準は板厚方向で、 $\theta_H = 0^\circ$ ）

V_0, V_{45}, V_{90} ： $\theta_H = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ のときの音速

伝搬方向による音速の変化は、深さ位置による音速変化と同様に、ZL面内のSV波が大きく、ZC面内及び縦波は変化が少ない。

第3章では、音響異方性材料中における超音波の伝搬特性及び斜角探傷におけるエコーの距離振幅特性について検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) SV波の斜角探触子を用いてL及びC方向以外の方向に斜角探傷する場合、振動方向と音速の異なる2つの横波に分解して伝搬するため、1つの欠陥であっても2つのエコーが現れる可能性がある。縦波を用いればこのようなことは起こらない。
- (2) 板厚方向に音速分布を有する不均質な異方性材料中では、超音波の波面法線方向 θ_H と音線方向 θ_R が深さ位置によって変化し、このため、音線が屈曲する。SV波を用いて圧延方向に斜角探傷する際にこれが最も顕著であり、特に、STB屈折角 70° の探触子の場合、距離振幅特性が $d/T = 0.5$ で極小値をとるという特異な現象が現れることがある。縦波を用いて斜角探傷を行えば、L方向及びC方向いずれに探傷する場合にも $\theta_H = 40^\circ \sim 70^\circ$ の範囲で音線の曲がりは少なく、等方性材料と同等の探傷が可能である。
- (3) 不均質な異方性材料中では、欠陥の向き β と欠陥が存在する深さ位置における超音波の波面法線方向 θ_{H1} が等しいときにエコーが最も高くなる。したがって、欠陥の向きが予測される場合、欠陥の存在する深さ位置における超音波の波面法線方向角が $\theta_{H1} = \beta$ となるSTB屈折角 θ_{A1} を持つ探触子を用いることが望ましい。

第4章では、均質な音響異方性材料を用いて反射源位置の推定精度について検討し、さらに、不均質な異方性材料中における欠陥寸法及び向きの推定を行った。第5章では、音響異方性材料の溶接部の探傷を行って、推定方法の妥当性を確認した。結果を要約すると次のようになる。

- (1) 異方性材料中における超音波の伝搬方向（見掛けの屈折角 θ_R' ）を測定する場合、横穴の直径と深さの比（ t_H/d ）が十分小さく、かつ、近距離音場限界距離以上となる横穴を用いる必要がある。
- (2) 欠陥位置の推定は、STB-A1で測定した屈折角 θ_{A1} ではなく、横穴対比試験片で測定した屈折角 θ_R' により行う必要がある。更に、ビーム路程が長くなる場合には音線方向 θ_R に対応する音線速度 V_R で補正したビーム路程 $W_R (=W_{STB} \times V_R / V_{STB})$ を用いて推定するのが有効である。
- (3) 欠陥の寸法を推定する場合、欠陥の向きが $\beta = 70^\circ$ の欠陥については縦波を、 $\beta = 40^\circ \sim 60^\circ$ の欠陥については縦波又は横波（SV波）を用いて得られる相対エコー高さの最大値によって行うのが適している。

また、欠陥の反射面に対して波面法線方向が垂直になるSTB屈折角のときに相対エコー高さが最大値を示すという考えに基づいて、欠陥の向きを推定できることを明らかにした。

謝 辞

本研究は、溶接試験工学講座（旧仙田研究室）において超音波探傷試験法の研究に従事するうち、音響異方性材料の探傷試験の特異性に着目したことに始まる。故仙田富男教授の退官後、加工基礎学講座（丸尾研究室）において『超音波による音響異方性材料の溶接欠陥評価に関する研究』としてまとめたもので、大阪大学教授 丸尾 大 博士より、研究全般にわたって格別の御指導と御援助を賜りました。ここに心から厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、大阪大学教授 西口公之博士、黄地尚義博士、座古 勝 博士より有益な御討論と御示唆をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

さらに、大阪大学講師 宮本 勇 博士、平田好則博士、学内講師 廣瀬貞雄 修士はじめ、生産加工工学科の諸先生方より多大の御助言と御激励をいただきました。実験の遂行にあたっては、松本祐治学士、近藤欣卓学士、中田裕之修士、文野敬浩学士、新日本非破壊検査(株) 安永元則氏、西本吉和氏をはじめ多くの卒業生、研究生諸兄から熱心な御協力をいただきました。試験片の作製にあたっては、(株)酒井鉄工所 横山計次博士、呉 尚弘氏、土井知行氏の御協力をいただきました。本論文を終えるにあたり、これらの方々に心から御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば，日本学術振興会編；“超音波探傷法（改訂版）”，日刊工業新聞社，(1974)．
- 2) 仙田，廣瀬；“A5083P-O材の横波音速測定及びSTBの性能試験”，軽金属溶接構造協会超音波探傷試験方法JIS原案作成委員会資料 WU-74-9-1，(1974)．
- 3) 日本造船研究協会（石川島播磨重工業）；“溶接部の超音波探傷検査”，LNG運搬船の安全基準に関する調査研究報告書（その1-2），(1975)，p. 72-75．
- 4) 日本造船研究協会（川崎重工業）；“JIS STB-A1型アルミニウム合金製試験片の検討”，LNG運搬船の安全基準に関する調査研究報告書（その1-2），(1975)，p. 110-114．
- 5) 仙田，裏垣；“JIS Z 3080（アルミニウム溶接部の超音波斜角探傷試験方法および試験結果の等級分類方法）とその解説”，軽金属溶接，Vol. 19 (1981)，p. 544-557．
- 6) 日本非破壊検査協会STB第2小委員会；“音速の異方性について”，NDI資料2934，(1982)．
- 7) 日本造船学会溶接研究委員会；“新しい製造法による鋼材（TMCP鋼）の溶接構造物への適用に関するシンポジウム”，(1983)．
- 8) 日本非破壊検査協会202小委員会；“鋼溶接部の超音波斜角探傷において考慮すべき事項（I）”，非破壊検査，Vol. 35 (1986)，p. 114-115．
- 9) 日本非破壊検査協会202小委員会；“鋼溶接部の超音波斜角探傷において考慮すべき事項（II）”，非破壊検査，Vol. 35 (1986)，p. 116-117．

- 10) 鉄鋼協会品質管理部会非破壊検査小委員会；“音響異方性を有する鋼溶接部の超音波斜角探傷法”，鉄と鋼，Vol. 73 (1987), p. 616-628.
- 11) M. J. P. Musgrave；“The propagation of elastic waves in crystals and other anisotropic media”，Reports on Progress in Physics, Vol. 22 (1959), p. 74-96.
- 12) 宇田川，川島，中山；“厚板異方性の測定（電磁超音波法による異方性測定装置の開発）”，ND I 資料21134, (1987).
- 13) 倉持，矢部；“S T Bとの音速差を有する建築鉄骨溶接部の超音波探傷試験に関する研究（その1，伝搬特性の特異現象）”，ND I 資料21224, (1988).
- 14) 実吉，菊池，能本；“超音波技術便覧”，日刊工業新聞社，(1966), p. 59-62, p. 699-701.
- 15) 仙田，廣瀬，川津；“円形平面傷の傾きとエコー高さの関係について”，非破壊検査，Vol. 22 (1973), p. 96-97.
- 16) 柚島，小川；“制御圧延鋼における変態集合組織の形成”，鉄と鋼，Vol. 65 (1979), p. 1747-1755.
- 17) 渡辺；“低炭素鋼の変態域圧延におけるフェライトの動的再結晶と組織形成”，鉄と鋼，Vol. 71 (1985), p. 1926-1933.
- 18) 山本；“超音波基礎工学”，日刊工業新聞社，(1981), p. 121-127.
- 19) 18) と同じ，p. 139-143.
- 20) 14) と同じ，p. 92-94.
- 21) 日本金属学会編；“金属データブック（改訂2版）”，丸善，(1984), p. 35.

- 22) D. R. Hull, H. E. Kautz, A. Vary ; “Measurement of Ultrasonic Velocity Using Phase-Slope and Cross-Correlation Methods” , Material Evaluation, Vol. 43 (1985), P. 1455-1460.
- 23) 仙田, 廣瀬, 裏垣 ; “一探触子法における模型欠陥エコー高さの計算方法2 (斜角法の場合)” , ND I 資料2760, (1979).
- 24) 仙田, 廣瀬, 裏垣, 西田, 新川 ; “斜角探触子の音場特性と各種反射源の距離振幅特性について” , ND I 資料2695, (1978).
- 25) 木村, 他 ; “オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷” , 非破壊検査, Vol. 29 (1980), p. 239-246.

本論文に関する発表論文

- (1) “音響異方性を有する材料中における超音波の伝搬特性”，非破壊検査，第39巻，(1990)，2号，p. 74-79.
- (2) “アルミニウム合金板における音響異方性と超音波斜角探傷試験に及ぼす影響 第1報 超音波の伝搬方向と反射方向”，軽金属溶接，第29巻，(1991)，2号，p. 56-63.
- (3) “アルミニウム合金板における音響異方性と超音波斜角探傷試験に及ぼす影響 第2報 反射源位置の推定方法”，軽金属溶接，第30巻，(1992)，4号，p. 147-152.
- (4) “Investigation of Ultrasonic Examination of Austenitic Stainless Steel Welds Using Twin Crystal Longitudinal Wave Probe”，9th International Conference on Nondestructive Evaluation in the Nuclear Industry, ASM INTERNATIONAL (1988) 295-302.