表面波による微小領域の異方性評価*

(弾性異方性評価のための超音波反射率測定法の適用に関する基礎的研究)

井原 郁夫^{*1}, 相澤 龍彦^{*2}
古口 日出男^{*1}, 木原 諄二^{*2}

Anisotropy Detection in Small Area of Materials using Surface Acoustic Waves (Basic Research on Utilization of Ultrasonic Reflectivity Measurement for Estimating Elastic Anisotropy)

Ikuo IHARA, Tatsuhiko AIZAWA,
Hideo KOGUCHI and Junji KIHARA

An ultrasonic reflectivity measurement technique is applied to anisotropy detection within a small area of material. The ultrasonic reflectivity is microscopically measured using an ultrasonic microspectrometer with spherical-planar-pair lenses. The acoustic reflection coefficients of small area on a water-cubic (111) interface were measured for an incident wave at an angle θ to the normal and ϕ to some direction lying in the (111) surface. The reflection coefficients measured as a function of θ and ϕ were in good agreement with the theoretical calculation. This reveals that the microscopically measured reflection coefficient is reasonable and can be used as a promising detector of anisotropy in a small area. Furthermore, a mean reflection coefficient is defined for quantitative evaluation of elastic anisotropy in a small area of polycrystalline materials. It has been confirmed that, by performing numerical and experimental examinations with texture-controlled steels, the reflection coefficient measured in polycrystalline materials corresponds to the mean reflection coefficient.

Key Words: Nondestructive Inspection, Anisotropy, Ultrasonic Inspection, Surface Wave, Small Area, Elasticity, Ultrasonic Reflectivity, Measurement

1. 緒 言

単結晶はもちろんのこと多結晶材料でも加工や熱処理により何らかの異方性を示す。また、機能や強度の向上を目的とした種々の複合材料、あるいは表面改質を目的とした種々のコーティング薄膜なども異方性を示すものが多い。このような集合組織あるいは結晶粒や介在物の分布状態に基づく弾性的異方性は、材料強度に密接に関連した特性であるため、その定量的評価は極めて重要である。

一般に多結晶材料の異方性は評価の尺度、すなわち微視的か巨視的かによって異なる特性を示すので、その評価においてはこの点に注意を払わなければならない。工業材料の多くはミクロンオーダーの結晶粒から構成される多結晶体であり、このような材料に対する巨視的レベルでの異方性評価、すなわちミリメートルオーダーでの評価に関しては、X線や超音波による評価法が確立されており、既に多くの成果が挙げられて

いる⁽¹⁾⁽²⁾。これに対し微視的レベルでの評価はやや立ち後れているきらいがあるが、最近では、超音波顕微鏡により数十から数百ミクロンの領域での異方性評価も可能になってきた⁽³⁾⁽⁴⁾。一般に、超音波顕微鏡による異方性評価では、音速や減衰特性あるいは超音波画像のコントラストが指標として用いられるが⁽⁵⁾、これらはいずれも材料の異方性に対する超音波反射率の変化を反映したものである。したがって、この超音波反射率を直接的に観察することにより、異方性をより詳細に評価できると考えられる。また、超音波顕微鏡による測定結果に対する理解を深めるためにも、異方性材料の超音波反射率を評価することは重要である。この点に着目し、超音波顕微鏡により測定された複素 $V(z)$ 曲線をフーリエ逆変換することにより超音波反射率を求めることも試みられている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

ところで、著者らは一対の音響レンズを用いて材料表面の数十ミクロンの領域での超音波反射率を測定し、その位相あるいは強度データに基づいて表面波速度や減衰の評価を行った⁽⁸⁾⁽⁹⁾。この反射率測定手法は高い方位分解能を有しているため、異方性材料の評価に

* 原稿受付 平成6年9月26日。

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学工学部 (〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)。

^{*2} 正員, 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

も有効であると考えられる。また、測定周波数を高くすることによって測定の空間分解能を向上させれば、ミクロンオーダーの異方性評価も可能になると考えられる。

そこで本研究では、表面波による微小領域の異方性評価を目的として、超音波反射率の局所的測定法の適用について検討した。まず、異方性材料の超音波反射率を理論計算した。次いで、単結晶を用いてその反射率の局所的測定を行い、測定結果と理論値との比較から測定の妥当性を検証するとともに、異方性評価のための反射率測定法の有効性について検討した。さらに、このような局所的評価手法の多結晶材料への適用について検討した。また、反射率測定による簡便な弾性異方性評価法を提案した。

2. 異方性材料の超音波反射率

測定された超音波反射率の妥当性を検討するためには、その理論値を把握しておくことが重要である。そこでまず、超音波反射率の解析方法について説明する。

2.1 単結晶材料の反射率 異方性材料における弾性波の伝搬特性は一般にChristoffel方程式により記述される⁽⁹⁾。異方性弾性体における応力—ひずみ関係、ひずみ—変位関係を運動方程式に代入することによってChristoffel方程式は

$$[k^2 \Gamma - \rho \omega^2 \mathbf{I}] \mathbf{a} = 0 \quad (1)$$

と表される。ただし、波動方程式の変位場の解を

$$\mathbf{u} = \text{Re} \{ A \mathbf{a} \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \} \quad (2)$$

とおいた。ここで、 A は振幅、 $\mathbf{a}$ は単位変位ベクトル、 ω は角周波数、 $\mathbf{k}$ は波数ベクトル、 $\mathbf{r}$ は位置ベクトルである。また、 Γ はChristoffel行列と呼ばれ、材料の弾性定数と波の伝搬方向に依存する行列で

$$\Gamma = \mathbf{L}^T \mathbf{c} \mathbf{L} \quad (3)$$

の関係にある。ここで

$$\mathbf{L}^T = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 & 0 & l_z & l_y \\ 0 & l_y & 0 & l_z & 0 & l_x \\ 0 & 0 & l_z & l_y & l_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

であり、 l_x, l_y, l_z は $\mathbf{k}$ の方向余弦、 $\mathbf{c}$ は材料固有の弾性スティフネス行列(6×6)、上添字 $\mathbf{T}$ は転置を意味する。また $\mathbf{I}$ は単位行列である。Christoffel方程式(1)が $\mathbf{a}$ の非自明な解を持つためには

$$|k^2 \Gamma - \rho \omega^2 \mathbf{I}| = 0 \quad (5)$$

でなければならない。また、このとき $\mathbf{a}$ は Γ の固有ベクトルとなる。

図1 水／異方性材料界面での平面波の反射と屈折

さて、本研究での反射率測定状況を想定し、図1に示すような半無限異方性材料と水との界面における水中からの平面波の反射について考える。ここで、 x - y 平面が材料と水との界面となっている。単位振幅をもつ平面波が入射角 θ 、 x 軸との方位角 ϕ で材料に入射するとき、入射波の変位場は

$$\mathbf{u}^I = (\mathbf{k}^I / k_0) \exp[j(\omega t - \mathbf{k}^I \cdot \mathbf{r})] \quad (6)$$

と表される。ここで、 $\mathbf{k}^I$ は入射波の波数ベクトル、 k_0 は水中での波数である。また、反射波および材料中への三つの屈折波に対する変位場は、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}^R &= A^R (\mathbf{k}^R / k_0) \exp[j(\omega t - \mathbf{k}^R \cdot \mathbf{r})] \\ \mathbf{u}^L &= A^L \mathbf{a}^L \exp[j(\omega t - \mathbf{k}^L \cdot \mathbf{r})] \\ \mathbf{u}^{S1} &= A^{S1} \mathbf{a}^{S1} \exp[j(\omega t - \mathbf{k}^{S1} \cdot \mathbf{r})] \\ \mathbf{u}^{S2} &= A^{S2} \mathbf{a}^{S2} \exp[j(\omega t - \mathbf{k}^{S2} \cdot \mathbf{r})] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

と表される。ここで、上添字 R は反射波、 L は縦波屈折波、 $S1, S2$ は横波屈折波を意味し、 A は振幅、 $\mathbf{a}$ は単位変位ベクトル、 $\mathbf{k}$ は波数ベクトルである。

界面での境界条件として、変位の z 方向成分に対して

$$(u_z^I + u_z^R)|_{z=0} = (u_z^L + u_z^{S1} + u_z^{S2})|_{z=0} \quad (8)$$

また、応力の z 方向成分に対して

$$(T_J^I + T_J^R)|_{z=0} = (T_J^L + T_J^{S1} + T_J^{S2})|_{z=0}, \quad J=1, 2, 3 \quad (9)$$

が成立する。ただし、 $T_1=T_{zz}$, $T_2=T_{yz}$, $T_3=T_{xz}$ である。さらに、波数の界面方向成分に対して

$$\left. \begin{aligned} k_x^I &= k_x^R = k_x^L = k_x^{S1} = k_x^{S2} = l_x k_0 \\ k_y^I &= k_y^R = k_y^L = k_y^{S1} = k_y^{S2} = l_y k_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

が成立する。

反射率 R は入射波と反射波のエネルギー比として定義される。したがって R は、界面での境界条件式(8)(9)(10)を考慮して式(1)(6)(7)より反射波の振幅 A^R を

決定することによって求められる。ここではAtalarによる手法を踏襲して振幅 A^R を求めた⁽¹¹⁾。まず、反射波と屈折波のそれぞれの波数の z 方向成分を求めるために、式(5)を

$$\left| \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 & k_z & k_y \\ 0 & k_y & 0 & k_z & 0 & k_x \\ 0 & 0 & k_z & k_y & k_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{21} \\ c_{22} \\ c_{23} \end{bmatrix} - \rho \omega^2 \mathbf{I} \right| = 0 \quad (11)$$

のように変形し、この6次方程式より k_{zn} ($n=1\sim 6$)を求める。これらの6個の解から屈折波として適切なものを選択するために、固体中でのポインティングベクトルの z 方向成分 P_z を次式より求める。

$$P_z = -(\dot{v}_x^* T_{zx} + \dot{v}_y^* T_{yz} + \dot{v}_z^* T_{zz})/2 \quad (12)$$

ここで、 $\dot{v}_x^*$, $\dot{v}_y^*$, $\dot{v}_z^*$ はそれぞれ共役粒子速度である。この P_z を計算するために、まず、 k_{zn} ($n=1\sim 6$)に対して固有ベクトル $\mathbf{a}_n$ を求め、これを用いて粒子速度ベクトル $\mathbf{v}_n$ およびその共役成分 $\mathbf{v}_n^*$ を求める。さらに、応力の z 方向成分を次式

$$T_{iz} = -(Z_{ix} \dot{v}_x + Z_{iy} \dot{v}_y + Z_{iz} \dot{v}_z), \quad i=x, y, z \quad (13)$$

より求める。ここで Z は z 方向のインピーダンスである。このようにして応力成分と粒子速度成分を求めることにより、 P_z を計算することができる。例えば、本研究で対象とする立方晶(111)面の反射率の解析に用いるためのポインティングベクトル P_z は

$$\begin{aligned} P_z = & -(c_{15}k_x + c_{44}k_z)a_x^2 + c_{15}k_y a_y a_x - c_{44}k_x a_x a_z \\ & + c_{15}k_y a_y a_x - (c_{44}k_z - c_{15}k_x)a_y^2 - c_{44}k_y a_y a_z \\ & - c_{13}k_x a_x a_z - c_{13}k_y a_y a_z - c_{33}k_z a_z^2 / 2 \end{aligned} \quad (14)$$

となる。

6個の k_z のうち、 P_z の値を正の実数あるいは正の虚数とするようなものは、固体中から水中へのエネルギーの放出、あるいは波の伝搬にともなうエネルギーの指数的增加を意味するので解としてふさわしくない⁽¹²⁾。したがって k_z のうち、 P_z の値を負の実数とするもの、あるいは P_z の虚部を負の数とするようなものが適切な解であり、そのような三つの解を選択することにより、波数 k_z^L , k_z^{S1} , k_z^{S2} および変位ベクトル $\mathbf{a}^L$, $\mathbf{a}^{S1}$, $\mathbf{a}^{S2}$ を決定することができる。このとき、式(8)(9)に示した4つの境界条件式から振幅 A^R 、すなわち反射率 R が求められる。

2・2 多結晶材料への適用 多くの工業材料は多

結晶体である。したがって、局所領域の反射率の測定といえども、その測定領域の大きさと結晶粒径によっては必ずしも単結晶の反射率を測定することにはならず、多結晶体としての評価が要求される。その場合、結晶粒の数が十分に多くそれぞれがランダムに配置されているなら、等方性材料とみなして評価すればよいが⁽⁸⁾、配向性を有する材料の場合や局所領域のため結晶粒が十分に多く存在しない場合には、等方性理論はもちろんのこと、上述した単結晶に対する異方性理論もそのままでは適用できない。そのような場合の対応策の一つとして、反射率の平均化手法の適用が考えられる。反射率の平均化は、もともと、超音波顕微鏡による球面レンズを用いた単結晶材料の評価のために提案された手法であるが⁽¹²⁾、本研究ではこの手法を多結晶材料の評価に適用することを試みた。すなわち、測定領域内にある結晶粒の配向性とその数を考慮して、測定にあずかる個々の結晶粒からの反射率を平均化して評価する。今、簡単のために立方晶の多結晶材料を考え、測定面内にある結晶粒は全て $\{hkl\}$ 面であるとすると、その平均反射率 R_{hkl}^m は

$$R_{hkl}^m = \int_0^{2\pi} \xi(\phi) R_{hkl}(\theta, \phi) d\phi / \int_0^{2\pi} \xi(\phi) d\phi \quad (15)$$

より計算できる。ここで、下添字 hkl は (hkl) 面の反射を意味し、 $\xi(\phi)$ は結晶方位分布関数である。測定領域内で面内等方性である場合には $\xi(\phi) = 1$ となり平均反射率 R_{hkl}^m は

$$R_{hkl}^m = \int_0^{2\pi} R_{hkl}(\theta, \phi) d\phi / 2\pi \quad (16)$$

となる。なお、一般の多結晶材料の場合には測定面内にある種々の結晶面についてその存在割合を考慮した平均化が必要となるが、それについては別の機会に報告する。

3. 超音波反射率の測定

反射率の測定に用いた超音波スペクトラム顕微鏡⁽⁸⁾⁽¹³⁾の構成を図2に示す。反射率は、超音波発信用の平面レンズと受信用の球面レンズから成るレンズ系を用いて、試料面上にインパルス波を照射するとともに、その反射波を受信することにより測定される。このレンズ構成によりインパルス波の送受信における高い空間分解能と角度分解能が得られる。すなわち、任意角度からの超音波入射に対して、球面レンズの集束性と圧電体面での電氣的位相干渉により焦点領域からの鏡面反射方向の反射波のみが検出される。この反射波信号は材料表面の超音波反射率に比例する⁽¹³⁾。本研究では試験片表面上の任意の方位角 ϕ において、入射角 θ を 24°

図2 超音波スペクトラム顕微鏡の構成図

から 40° まで 0.2° 間隔で変化させて反射波を測定し、受信した信号をFFT解析することにより、各方位角 ϕ に対する反射率の位相と強度を入射角 θ と周波数 f の関数として得た。

本測定装置では音響レンズを用いているため、測定領域の大きさは周波数に依存する⁽⁶⁾。後の第4章では20MHz、80MHz、120MHzでの測定結果を示すが、その場合の測定領域の大きさを前報と同様にして調べた結果⁽⁶⁾、それぞれの周波数に対して直径 $140\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 程度であった。

4. 結果および考察

4.1 単結晶の弾性異方性評価 測定手法の妥当性を検証するために、典型的異方性材料である単結晶の弾性異方性を評価した。まずはじめに、GaAs立方晶の(111)面の反射率の計算結果を図3に示す。これは[10-1]方向を基準に方位角 ϕ を 0° から 50° まで 10° 間隔で変えて計算したもので、図中には反射率の強度と位相をそれぞれ表示してある。なお、計算に用いたGaAsの弾性定数は $c_{11}=119.0\text{GPa}$ 、 $c_{12}=53.8\text{GPa}$ 、 $c_{44}=59.5\text{GPa}$ 、密度は 5317kg/m^3 とした⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。さて、図3(c)に示す $\phi=20^\circ$ の結果に注目すると、入射角が 37° を越えた付近で急激な位相変化が見られる。この約 $2\pi\text{rad}$ の位相変化はレーリー波の励起を表しており、位相変化の最も急峻な角度がレーリー波臨界角に相当する。また、入射角が 28° 付近でわずかな位相変化と急激な強度の低下が見られるが、これは擬似レーリー波の励起を表している。この強度の低下は固体中へのエネルギーの漏洩によるもので、材料の弾性異方性の影響を顕著に示すものである。図3(a)~(f)を観察すると、高入射角側に現れるレーリー波臨界角と低入射角側に現れる擬似レーリー波臨界角がともに方位角 ϕ に依存して顕著に変化しているのがよくわかる。

図4は、図3の各図に対応した反射率の測定結果を示す。測定周波数は80MHzである。強度の測定結果には多少のノイズが含まれているが、全体の様相は図3の計算結果とほぼ一致している。特に、位相の測定結果は細部にわたり計算結果とよく一致している。これらの結果は、本測定手法の妥当性を示すと同時に、このようにして測定された反射率が異方性評価のための有効な指標となることを示している。

図5は、測定した反射率の位相データより求めたレーリー波モードの表面波臨界角、およびそれを用いてスネルの法則より計算した表面波速度⁽⁶⁾の方位角依存性を示す。図中の実線は図3のような計算結果より求めたそれぞれの理論値である。測定結果がこの理論値によく一致していることから、このような臨界角や表面波速度を用いても、結晶の弾性異方性を精度よく評価できることがわかる。

4.2 炭素鋼結晶粒の評価 図6(a)は炭素鋼中の一個の結晶粒を対象として、その反射率を測定した結果である。用いた試験片は冷間圧延後、調質圧延した極低炭素鋼板で、1173Kで60秒間焼鈍することにより結晶粒を約 $300\mu\text{m}$ 程度の大きさに成長させた。この結晶粒はND(試料面法線方向)// $\langle 111 \rangle$ の強い配向性をもっている⁽¹⁶⁾。なお、測定周波数は120MHzで、そのときの測定領域の大きさは直径 $30\mu\text{m}$ 程度である。図6(b)は測定結果に対応した計算結果を示したものである。計算に用いた炭素鋼の弾性定数は $c_{11}=232\text{GPa}$ 、 $c_{12}=135\text{GPa}$ 、 $c_{44}=117\text{GPa}$ ⁽¹⁷⁾、密度は 7860kg/m^3 とした。図6の両者を比較すると、反射率の強度に大きな違いが見られる。すなわち、測定結果には入射角 35° 付近での急激な強度の低下が見られるが、計算結果には見られない。この強度の低下は材料中での表面波の減衰に基づくもので、多くの実用工業材料に見られる特徴でもある⁽⁹⁾。計算では減衰を考慮していないため、図6(b)にはこのような強度の低下は再現されていない。強度データに関するこのような相違はあるものの、位相データを含めると全体的には測定結果は計算結果とよく一致している。図7は、この炭素鋼結晶粒の表面波臨界角と表面波速度の方位角依存性を示したものである。測定結果と理論値とがよく一致していることから、本手法により、このような多結晶中の特定の結晶粒の弾性異方性をも精度よく評価できることがわかる。

4.3 多結晶材料の反射率 局所領域の反射率の測定においては、測定領域内に複数の結晶粒が存在する場合も多い。そのような場合には、2.2節で述べたような平均化手法を適用すればよいと考えられるが、平均反射率を実測した例はほとんどなく、その平

図3 GaAs (111) の反射率の計算結果

図4 GaAs (111) の反射率の測定結果

図5 GaAs (111) における表面波臨界角と表面波速度の方位角依存性

(a) 測定結果

(b) 計算結果

図6 炭素鋼結晶粒の反射率

図7 炭素鋼結晶粒における表面波臨界角と表面波速度の方位角依存性

均化手法の有効性も不明確である。そこで、多結晶材料を用いて複数結晶粒からの反射率、すなわち平均反射率の測定を試みた。

用いた試験片は、冷間圧延後焼鈍し、0.8%調質圧延したものをさらに焼鈍した極低碳素鋼板で、ND// <111>の再結晶集合組織となっている⁽¹⁶⁾。なお、比較のためにランダムな結晶方位をもつ熱間圧延鋼板も用意した。今後、前者をB材、後者をA材と呼ぶ。図8および図9にそれぞれの組織写真およびX線極点図を示す。極点図はMo管球による(222)正極点図である。組織写真からA材、B材ともに15~40 μm程度の結晶粒が混在しているのがわかる。また、極点図からA材の結晶方位がランダムであるのに対し、B材はND// <111>の強い配向性をもつ面内等方性であることがよくわかる。

図10、図11はそれぞれA材、B材の反射率の測定結果を示す。測定周波数は20MHzで、測定領域の大きさは直径140 μm程度である。したがって、A材、B材ともに測定領域内には約30~40個の結晶粒が存在すると考えられる。さて、まず図10に示すA材の結果を見ると、入射角約30°付近で急激な位相変化と強度低下が生じており、この角度でのレーリー波の励起がよく表れている。これは鋼の巨視的な等方性弾性特性を反映した典型的な結果である⁽⁹⁾。これに対し、図11に示すB材の結果は位相変化および強度低下の程度が小さく、その発生位置も32°を越えた付近であり、A材の結果とは大きく異なっている。特にこの入射角32°付近での位相や強度の変化

(a) A材 (熱間圧延材)

(b) B材 (冷間・調質圧延材)

100 μm

図8 組織写真

(a) A材 (熱間圧延材)

(b) B材 (冷間・調質圧延材)

図9 (222) 正極点図

は、鋼の巨視的な等方性弾性特性からは考えられない現象である。B材のこの特異な反射率は、測定領域内にある30~40個の{111}面の反射率が平均化された結果であると考えられる。そこで、30個の結晶粒が面内等方的に配置していると仮定し、式(16)を用いて平均反射率を計算した結果を図12に示す。ただし、積分は方位角 $0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲を30分割して行った。図12において特徴的なことは、入射角が 32° を越えた付近でわずかな位相変化が現れていることで、これは図11の測定結果によく対応している。位相だけでなく強度もまた図12は図11とよく似た傾向を示していることから、図11に示された特異な反射率は、約30個の結晶粒からの反射率が平均化された結果生じたものであると考えられる。また同時に、この結果は、式(16)がこのような平均反射率の計算に有効であることを示すものでもある。このように平均反射率は、非等方性を示す結晶集合体の平均的材料特性を反映するものであり、多結晶体の微小領域における異

図10 A材の測定結果

図11 B材の測定結果

図12 平均反射率の計算結果

方性評価ならびに力学特性評価において有効な指標となると考えられるが、詳細は今後の研究に委ねられる。

4・4 弾性異方性の簡便評価法 入射角 θ の関数として求めた反射率が方位角 ϕ に依存して変化することは、図3および図4に示したとおりである。また、そのような反射率より求められる表面波臨界角や表面波速度は図5および図7に示したように顕著な ϕ 依存性を示すため、異方性評価のための有効な指標となる。このように反射率を θ の関数として求めること

は、より精度の高い異方性評価のためには有益ではあるが、その測定にはそれ相応の時間を要する。そこで、多少の評価精度を犠牲にするならば、特定の θ に対する反射率の ϕ 依存性を調べることで、時間の短縮が計られると考えられる。例えば、GaAs(111)において $\theta=27.5^\circ$ として反射率の強度を ϕ の関数として計算すると図13(a)のようになり、この場合にも弾性異方性を反映した顕著な ϕ 依存性を示すことがわかる。図13(b)はこれを実測した結果であり、計算結果とよく一致している。したがって、このような簡便法によって得られたデータもまた弾性異方性を評価するための有効な指標となると考えられる。なお、反射率の位相データを用いても同様の評価ができる。

5. 結 言

表面波による微小領域の異方性評価を目的として、超音波反射率の局所的測定法の適用について、実験的、理論的に検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 単結晶の局所領域において測定された反射率の位相および強度データは弾性異方性を反映した顕著な方位角依存性を示す。また、この反射率の位相データ

より求めた表面波臨界角や表面波速度は、弾性異方性を精度よく評価するための有効な指標となる。

(2) 周波数120MHzの測定では直径30 μ m程度の空間分解能が得られるので、それ以上に粗大化した結晶粒であれば、その異方性評価が可能である。

(3) 測定領域内に複数の結晶粒が存在する場合、測定される反射率は個々の結晶粒からの反射率が平均化されたものとなる。この反射率は式(15)または式(16)で定義された平均反射率として近似的に評価できる。

(4) 特定の入射角に対する反射率の方位角依存性を利用することにより、弾性異方性を簡便に評価することができる。

終わりに、本研究の遂行にあたり、試験片を提供していただいた新日本製鐵(株) 技術開発本部 君津技術研究部の潮田浩作博士、鈴木隆昌氏ならびに長岡技術科学大学の飯田誠之教授に感謝する。また、X線計測に協力していただいた(株)リガクの小飯田靖氏ならびに実験に協力された長岡技術科学大学学生の西岡正博君に感謝する。本研究は文部省科学研究費(試験研究B)による援助を受けたことを記して謝意を表す。

文 献

- (1) 長嶋, 集合組織, (1984), 丸善.
- (2) 福岡・戸田・平尾・音弾性の基礎と応用, (1993), オーム社.
- (3) Kushibiki, J., and Chubachi, N., *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, SU-32-2(1985), 189.
- (4) Yamanaka, K., ほか2名, *Electron. Lett.*, 21, (1985), 165.
- (5) 御子柴・生嶋, 超音波スペクトロスコピー「応用編」, (1990), 157, 培風館.
- (6) Liang, K. K., ほか2名, *IEEE, Trans. Sonics. Ultrason.* SU32-2., (1985), 213.
- (7) Endo, T., ほか3名, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31-1, (1992), 160.
- (8) 井原・相澤・木原, 機論, 59-564, A(1993), 1909.
- (9) Ihara, I., ほか3名, *Electron. Lett.*, 29-22, (1993), 1999.
- (10) Auld, B. A., *Acoustic Fields and Waves in Solids.*, (1973), 210., Wiley Interscience.
- (11) Atalar, A., *J. Acoust. Soc. Am.*, 73-2, (1983), 435.
- (12) Somekh, M. G., ほか2名, *Philos. Mag.*, A49-2, (1984), 179.
- (13) Tsukahara, Y., ほか2名, *IEEE, Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, 38-5, (1991), 468.
- (14) Modelung, O., *Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series 22*, (1987), 89., Springer-Verlag.
- (15) 文献(14)の88ページ.
- (16) 吉永, ほか3名, 鉄と鋼, 80-1, (1994), 60.
- (17) Hellwege, K.H. and Modelung, O., *Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series 19*, (1986), 28., Springer-Verlag.

図13 一定入射角における反射率の強度の方位角依存性