

塑性変形で発生した点欠陥による 微視組織構造変化と超音波縦波伝搬速度との相関*

小林道明*¹, 橋場 翔*², 青山尚弘*²
三浦節男*³, 柴野純一*³

Correlation of Ultrasonic Wave Velocity with Microstructural Change due to Point Defects Caused by Plastic Deformation

Michiaki KOBAYASHI*⁴, Shou HASHIBA, Naohiro AOYAMA,
Setsuo MIURA and Jun-ichi SHIBANO

*⁴ Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

In the authors' previous studies, the dependence of ultrasonic wave velocity on the microstructural properties of solid materials under plastic deformation was investigated both theoretically and experimentally. From the results obtained, it has been found that the changes of longitudinal wave velocity under simple and pure shear states are quite different, on the other hand transverse wave velocity changes under both shear states are almost same. These results suggest clearly that the propagating character of ultrasonic waves is dependent upon the interaction between the propagating mode of ultrasonic waves and micro-structural material changes induced by damages due to plastic deformation. In this paper, therefore, to identify the dependence of longitudinal wave velocity on the point defect, the longitudinal wave velocity propagating in a pure Aluminum single crystal under the pure shear plastic deformation is examined for several combinations of crystal orientations and shear slip directions which are determined by the difference of the amount of point defect calculated by the finite element polycrystal model (FPEM).

Key Words: Longitudinal Wave Velocity, Intersected Cross Slip, Point Defects, Pure Shear State, Crystal Model of FEM, Single Crystal, Crystal Orientation

1. 緒 言

著者らは、超音波非破壊材料評価法の定式化に関する一連の研究において、塑性損傷による材料の微視組織変化を超音波の伝搬速度変化から推定する試みを進めている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。その定式化においては、超音波伝搬速度は物理的非線形性効果、いわゆる応力依存性効果(音弾性効果)と幾何学的非線形性効果、および変形誘起異方性による効果とに密接な関係を有することを明らかにしている。なお、超音波は弾性波であるゆえ、この場合の変形誘起異方性とは、例えば集合組織形成などの塑性変形による弾性力学特性変化を意味する。

さて、せん断変形状態においては、塑性変形に伴う

超音波縦波の伝搬速度変化は変形誘起異方性だけに依存するため、塑性損傷に伴う材料の微視組織変化と超音波の伝搬速度変化との相関を調べるには好都合で、前報⁽⁶⁾において、応力およびひずみ状態は同じであるがスピン状態が異なる単純せん断と純粋せん断状態(それぞれ、ねじりと等二軸引張-圧縮変形状態)のそれぞれにおける、超音波伝搬速度と塑性損傷による材料の微視組織との関連性について検討した。すなわち、単軸引張試験であらかじめ決定した材料定数を用いて、単純せん断および純粋せん断状態の塑性変形下における超音波縦波と横波の伝搬速度の数値シミュレーションを行い、超音波横波の伝搬速度は両せん断状態においてほとんど一致すること、しかしながら、超音波縦波の伝搬速度に関しては、単純せん断状態においては塑性変形の進展によっても変化が生じず、一方純粋せん断状態においては塑性変形の進展に伴い、超音波縦波の伝搬速度が変化する結果が得られた。また、このような超音波横波および縦波の塑性変形によ

* 原稿受付 2006年6月9日。

^{*1} 正員、フェロー、北見工業大学工学部機械システム工学科
(〒090-8507 北見市公園町165)。

^{*2} 学生員、北見工業大学大学院工学研究科。

^{*3} 正員、北見工業大学工学部。

E-mail: kobayasi@mail.kitami-it.ac.jp

る伝搬速度変化に関する数値シミュレーション結果の検証のために、多結晶アルミニウム合金を用いた実験を行い、その妥当性を検証した。

次いで、上記の単純せん断および純粋せん断状態における、超音波横波および縦波の伝搬速度特性に関わる材料微視組織の要因について考察するために、有限要素多結晶モデル⁽⁷⁾(FEPM: Finite Element Polycrystal Model)を用い、両せん断状態において塑性変形の進展に伴い材料に生じるそれぞれの微視組織構造変化を解析し、その相違点についての検討を試みた。

その結果、単純せん断と純粋せん断状態における集合組織の進展は面内、面外ともに、両状態において塑性ひずみが中程度まではほぼ同じ発達を示しており、したがって超音波横波の伝搬速度変化が単純せん断と純粋せん断の両状態において、数値シミュレーション結果および実験結果がともにほぼ一致しているのは、超音波横波の伝搬速度が集合組織と密接な関係にあることが背景としてあるとの結論が得られた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

一方、単純せん断と純粋せん断状態における超音波縦波伝搬速度変化の相違に関しては、単純せん断状態に比較して純粋せん断状態においては、スピンの拘束されることによりすべり変形において多重すべりが生じやすく、その際に転位間の切合いによる点欠陥発生の割合が増加するのではないかと考えた。したがって、この推定を確かめるために有限要素多結晶モデルにおいて、主すべり系とそれに交差する二次すべり系のそれぞれのせん断ひずみ増分の積を算定し、単純せん断と純粋せん断状態におけるその比較を試みたところ、純粋せん断状態においては多重すべりによる転位間の切合いと、それによる点欠陥発生の確率が非常に高いことが予想された⁽⁸⁾。また、同様の数値シミュレーションを単結晶の純粋せん断状態の場合について行った結果では、特定の結晶方位においては、純粋せん断状態でも塑性変形初期に単一すべりにより転位間の切合いが生じず、点欠陥の発生が抑えられたこと、したがって、超音波縦波の伝搬速度が変化しないであろうことが予想された。そこで、以上の推定を実験的に検証するため、純アルミニウム単結晶を用いて純粋せん断状態における塑性変形下での超音波縦波の伝搬速度測定を試みた。その結果、純粋せん断変形状態においても、塑性変形初期の単一すべり状態では塑性変形の進展にかかわらず、超音波縦波の伝搬速度が変化しないことを実験的に検証し⁽¹⁰⁾、塑性変形状態における超音波縦波の伝搬速度が、点欠陥と密接に関連していることを明らかにした。

本研究においては、前報⁽¹⁰⁾での単一すべり状態に

おける超音波縦波伝搬速度が、塑性変形の進展に伴っても変化が生じないことの実験的検証からさらに一歩進めて、多重すべりによる転位の切合いで生じる点欠陥の量と、超音波縦波の伝搬速度変化との相関の検証を目的としている。すなわち、種々の結晶方位を有する単結晶での点欠陥発生量をFEPMでシミュレーションし、その中から点欠陥発生量の異なる結晶方位を選択することで、その結晶方位を持つ単結晶純アルミでの超音波縦波伝搬速度測定により、塑性変形による点欠陥発生量と超音波縦波伝搬速度との相関の実験的検証を試みる。

2. 塑性損傷超音波伝搬速度の数理モデル

著者らの一人は、塑性変形下における材料の力学的挙動に関して数理モデルを提案し、そのモデルに基づき塑性損傷超音波伝搬速度の定式化を試みている⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾。提案の数理モデルにおいては、塑性変形による弾性力学特性の損傷(弾塑性カップリング効果: d_{ij}^p)を考慮し、Il'iusinの指摘⁽¹¹⁾にあるように塑性ひずみ増分 d_{ij}^p がその損傷分だけ降伏曲面の垂直則からのずれを生じるものとし、塑性構成方程式を前報⁽¹²⁾で定義した。

ここで、せん断ひずみ状態を想定し、 x_1 - x_2 平面内のせん断変形を考えれば、 $\sigma_1 = -\sigma_2$, $\sigma_3 = 0$, $\varepsilon_1^p = \varepsilon_2^p = 0$ となる。したがって超音波縦波を x_3 方向に入射した場合、その伝搬速度 V_L は式(1)となる。

$$\rho_0 V_L^2 = \lambda + 2G - \frac{4}{9}G^2(\lambda_{11}^p + \lambda_{22}^p) - \frac{16}{9}G^2\lambda_{33}^p \quad \dots\dots\dots(1)$$

ρ_0 : 未変形状態における密度

V_L : 縦波伝搬速度

G, λ : Lamé の定数

上式において λ_{ij}^p は弾塑性カップリング効果から導出された垂直塑性ひずみに依存する項⁽¹²⁾で、単純せん断状態においてはすべて零であり、したがって単純せん断状態での塑性変形下において、超音波縦波の伝搬速度は塑性変形の進展によっても変化しないことが理論的に予測され、実験的にも検証されている⁽⁶⁾。また、純粋せん断状態では λ_{ij}^p は零にはならず、超音波縦波の伝搬速度が塑性変形とともに変化することを実験的に検証した⁽⁶⁾。

3章において、 λ_{ij}^p に密接に関連することが推定される転位間の切合い量のFEPMによる算定方法について論述する。

3. FEPM によるすべり変形の 理論的検討

結晶のすべり変形において、転位が交差するすべり面ですべて変形する際に転位の切合いが生じる場合があり、この切合いの際にジョグが形成され点欠陥が発生するという事は前報⁽¹⁰⁾でも述べた。本研究では、点欠陥の影響を調べるために FEPM を用いて、点欠陥量に確率的に比例すると考えられる転位間の切合いによる交差すべり量を算出する。

3.1 転位間の切合いによる交差すべりの解析

FCC 結晶構造においては一つの結晶格子内に 12 個のすべり系が存在し、一つのすべり系に対して、互いが切合うように交差してすべりを生じる可能性を有するすべり系が 8 個存在する。そこで、FEPM におけるある要素 i の主すべり系のせん断ひずみ増分を γ_i^s とし、二次すべり系の中で主すべり系と交差する可能性のあるすべり系のせん断ひずみ増分を $\gamma_i^s (s=1\sim 8)$ とする。そして、それぞれのひずみ増分の積を全要素にわたって加算したものを、転位間の切合いによる交差すべり量 Γ で定義し、式(2)で表す。

$$\Gamma = n\Gamma_{av.} = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^8 \gamma_i^s \gamma_i^s \dots\dots\dots (2)$$

n : 要素数

$\Gamma_{av.}$: 一要素当たり平均化した転位間の切合いによる交差すべり量

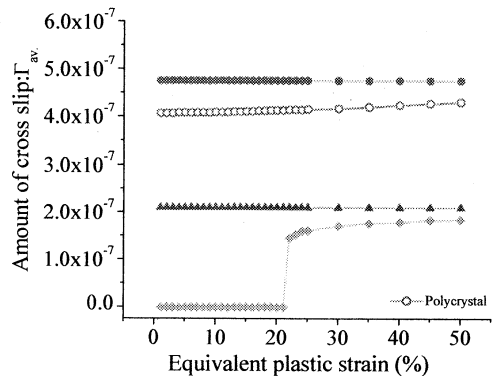
なお、単結晶の場合においては結晶内部をより細かく分割し、詳細に解析できるようにしている。本研究では要素数を 729 個とし、各要素の初期結晶方位を同一にして単結晶モデルとした。そして、変形段階ごとに生じる転位間の切合いによる交差すべり量を式(2)により求める。なお、数値計算では材料を純アルミニウムとし、材料定数は加工硬化指数 $N=0.25$ 、塑性係数 $F=6.43$ MPa、縦弾性係数 $E=62.4$ GPa および等方硬化を仮定して、Taylor 因子 $M=3.07$ を用いた。また、純粋せん断状態とするため、境界条件は立方体の境界面においてひずみ増分を $\epsilon_1 = -\epsilon_2, \epsilon_3 = 0$ とするように変位成分を与えている。

3.2 単結晶の純粋せん断状態における転位間で切合う交差すべり量 任意の結晶方位を有する単結晶について、種々の負荷方向での純粋せん断塑性変形状態の一要素当たりの平均の転位間で切合う交差すべりに関する量を、FEPM を用いて算出した結果を図 1 に示す。なお、比較のため結晶方位を乱数で与えた場合の、多結晶体における転位間で切合う交差すべり量も図示した。図 1 においては、式(2)で示した転位間

の切合いによる交差すべり量を要素数で除し、一要素当たりの平均した交差すべり量で示している。図 1 より、単結晶体の純粋せん断状態においては結晶方位と負荷方位との関係で、転位間の切合いでの交差すべりが発生しない塑性変形領域が存在し、この領域は単一すべり状態であると推定できる。また、転位間で切合う交差すべりの発生している負荷方位や塑性変形領域は、交差するすべり系の活動による多重すべりによるものと推定でき、結晶方位と負荷方向の組合せにより、転位間で切合う交差すべり量に顕著な相違が生じることがわかる。

3.3 最大分解せん断応力方位の回転 純粋せん断状態での負荷方位 Type I ~ Type III における、外部最大分解せん断応力の塑性変形の進行に伴う方位回転のようすを、標準ステレオ三角形により図 2 に示す。Type I においては、最大分解せん断応力の方位が $[\bar{1}11]$ と $[011]$ を結ぶ辺上にあり共面すべり系が活動しているが、主すべり系と同一すべり面上でのすべりであり、転位間で切合う交差すべりは生じていない。

Type II, Type III の場合には、最大分解せん断応力の方位がステレオ三角形の角に位置しており、塑性変形が進行しても方位は回転していない。この位置では、複数のすべり系が活動する多重すべり状態にあることがわかる。よって Type II, Type III の方位では転位間で切合う交差すべりが生じている。



Crystal orientation	Euler angle [radian]		
	ϕ	θ	ψ
Type I	1.571	0.393	2.356
Type II	1.571	0.000	3.142
Type III	1.571	5.498	3.142

Fig. 1 Intersected cross slips among dislocation under various types of crystal orientation

4章では Type II, Type IIIの結晶方位と負荷方向に関して、塑性変形下の超音波縦波伝搬速度測定実験を行い、本節の転位間で切合う交差すべり量のシミュレーション結果から推定される点欠陥発生量との相関について、考察を試みる。なお、Type Iに関する超音波縦波伝搬速度測定結果は前報⁽¹⁰⁾で報告した測定結果である。

4. 超音波縦波伝搬速度測定による 実験的検証

4.1 試験片および実験装置 3章で行ったシミュレーション結果と超音波伝搬速度との相関を検証するため、試験片は純アルミニウム単結晶材料(純度99.999%)を用いる。試験片形状および結晶方位と負荷方向を図3に示す。また、実験装置は前報⁽¹⁰⁾と同じ装置を用い、 x_1 軸と x_2 軸のひずみ比を制御することにより、Type II, Type IIIと同様の負荷方位で等二軸引張・圧縮試験を行う。

なお、ひずみが小さい範囲において測定点を多くするために、ひずみ計測の分解能を向上させる改良を計測装置に施している。

超音波伝搬速度測定は、試験片の中央において板厚方向に入射した5 MHz 超音波縦波の伝搬速度の変化を、ゼロクロス法を用いて測定している。

4.2 実験結果と考察 超音波縦波伝搬速度の変化の実験結果を図4に示す。超音波縦波の伝搬速度は塑性損傷の進行とともに低下し、とりわけ単結晶においてはその傾向が明瞭である。図5は点欠陥依存性の影響が明瞭なひずみが5%までの範囲における超音波縦波の伝搬速度を示しており、点欠陥が発生すると推測される領域において、Type Iは塑性変形初期に縦

波伝搬速度の変化が見られない領域があった。図1に示した同負荷方位のFEM解析結果では、初期塑性変形領域において単一すべり状態にあることが推定され、この領域においては転位間の切合いが生じず、点欠陥が発生しないものと推測される。

一方、図1より塑性変形初期から転位間で切合う交差すべりが生じ、点欠陥の発生が想定される負荷方位 Type II, Type IIIにおいては、図5に示すように、塑

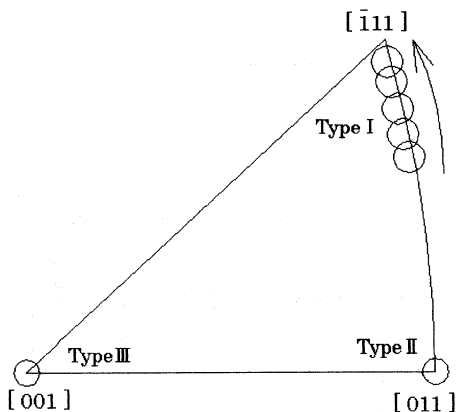


Fig. 2. Shear stress direction in standard stereo triangle under pure shear state

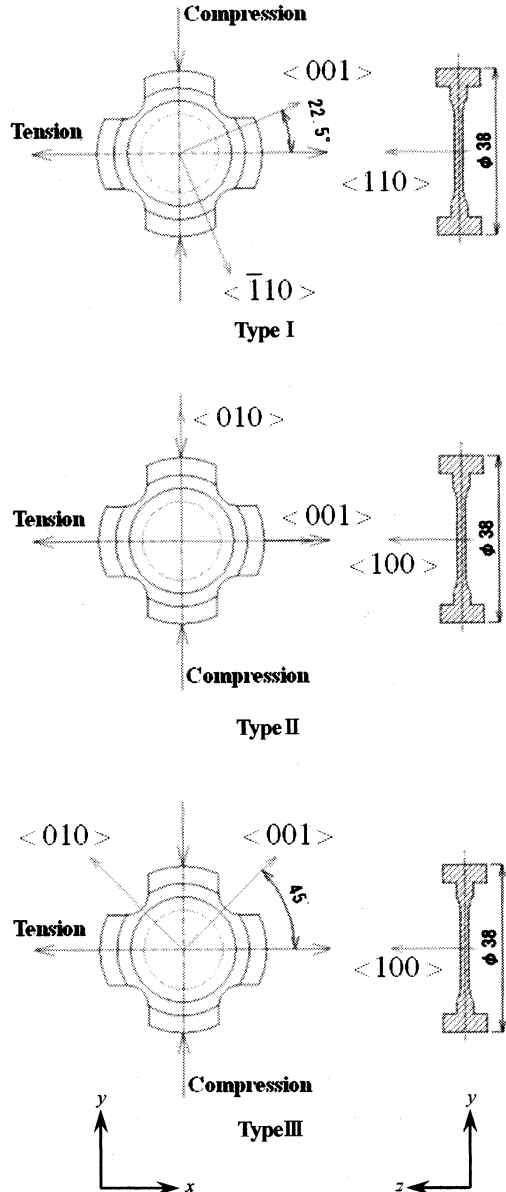


Fig. 3. Geometry of specimen, crystal orientation and the loading direction

性変形初期より縦波伝搬速度に塑性変形の進展に伴う音速変化が観察された。なお、Type II と Type III とでは転位間で切合う交差すべり量が異なり、その大小による縦波伝搬速度変化への影響に注目すると、転位間で切合う交差すべりが大きい Type III のほうが、縦波伝搬速度の増加・減少の変化量が大きかった。したがって、塑性変形状態において転位間で切合う交差すべりにより生じる点欠陥は、超音波縦波伝搬速度と密接な相関にあることがわかる。

ところで、図1において、乱数で結晶方位を分布させた場合の多結晶体に生じる転位間で切合う交差すべり量は単結晶 Type III と同程度で、両場合の点欠陥発生量も同程度と考えられる。ゆえに、多結晶体と単結晶 Type III の縦波伝搬速度変化は同程度であろうと予測されたが、縦波伝搬速度の測定結果(図4, 5)は、多結晶体のほうが伝搬速度の変化が明らかに大きかった。

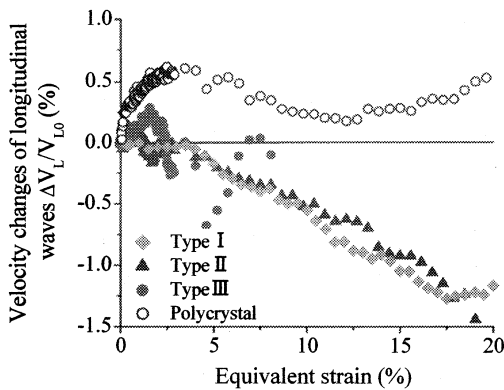


Fig. 4 Velocity changes of longitudinal waves under pure shear state (0~20%)

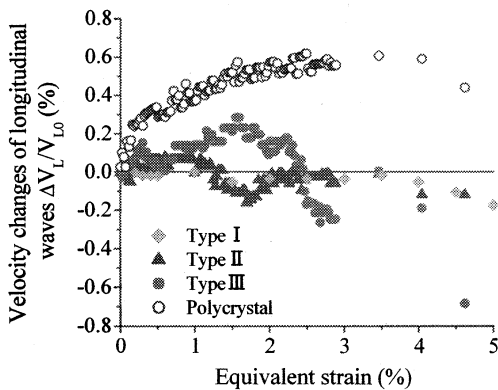


Fig. 5 Velocity changes of longitudinal waves under pure shear state (0~5%)

た。これは多結晶と単結晶の違いによるもので、結晶粒径、結晶粒界や結晶方位の分布が本質的に影響しているものと考えられ、FEMのシミュレーションにおいては現在のところ、これらの影響を考慮したシミュレーションはできていない。したがって、その影響を多数の結晶を有する多結晶体で考察することは困難であるため、双結晶体を用いて結晶方位の影響の考察のみを5章で試みる。

5. 双結晶体における転位間の切合いによる交差すべりへの結晶方位の影響の考察

図6に示すように、FEMの要素分割において表面の最上層一層とその下層全体を別々の結晶方位とした双結晶体を想定する。ここで、下層八層の結晶方位を固定したまま、表面の最上層一層の結晶方位を種々変えた三とおりのケースについて、転位間の切合いによる交差すべり量を算定し、その比較検討を図7に示す。図7からわかるように、双結晶においては表面の結晶方位が転位間の切合いによる交差すべりに顕著に影響し、多結晶体においても同様な現象が生じることが推定される。実験に用いる多結晶試料中の実際の結晶方位分布に基づくFEMのシミュレーションは極めて困難で、図1に示した多結晶体中の結晶方位分布は、乱数で発生させた結晶方位分布を代用したもので、結晶粒径分布も含め実験に用いた試験片のものとは明らかに異なったものとなっている。

したがって、図1でシミュレーションした多結晶体の転位間の切合いによる交差すべり量は、図5に示した多結晶体での塑性変形の進展による縦波伝搬速度変化に対応したものとはいえず、さらに結晶粒径や結晶粒界の影響をも考慮すれば、あくまでも定性的なもので参考の域を出ないものと考えられる。多結晶体にお

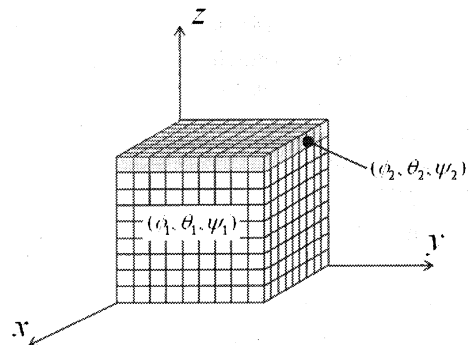
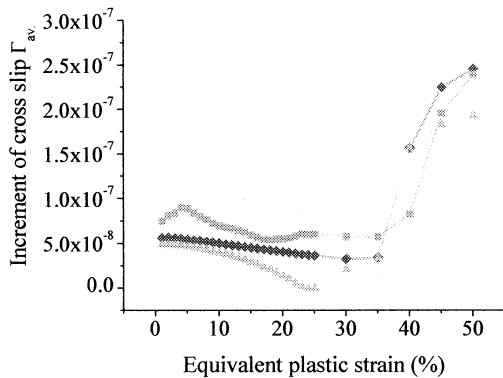


Fig. 6 FEM bicrystal model



Crystal orientation	Euler angle [radian]		
	ϕ_1 ϕ_2	θ_1 θ_2	ψ_1 ψ_2
Case1	1.571 1.339	0.393 5.365	2.356 4.020
Case2	1.571 2.013	0.393 2.674	2.356 4.960
Case3	1.571 1.571	0.393 0.698	2.356 2.356

Fig. 7 Intersected cross slips among dislocations in 3 cases of bicrystal with combined crystal orientations

けるこれらの影響に関しては、さらなる検討と解明の努力を要するため、今後の取組みが望まれる課題である。

6. 結 言

超音波の伝搬特性は、波動と伝搬する材料の微視組織構造との相互干渉で影響を受け、したがって、伝搬特性から材料の損傷状態を非破壊的に評価しうる可能性を有している。著者らは先に、超音波の伝搬特性に及ぼす材料の微視組織構造変化を解明する目的で、応力およびひずみ状態が同一で、スピン状態が異なる単純せん断と純粋せん断塑性変形状態において、超音波縦波の伝搬速度変化が塑性変形に伴い両せん断状態と極めて異なり、その要因として転位間の切合いによって生じる点欠陥の発生状況が、両状態において異なることを推測した。そこで、本研究においてはその理論的・実験的検証を目的に、多結晶に比較してすべり変形機構がより単純である単結晶を用い、FEMにより点欠陥量に確率的に比例すると考えられる転位間の切合いによる交差すべり量に関して、結晶方位に対し種々の負荷方位の場合についてのシミュレーションを

行い、転位間で切合う交差すべり量が異なる、すなわち点欠陥発生量が異なると考えられる負荷方位を推定した。

次いで、その推定結果を基に、純アルミニウム単結晶に等二軸引張・圧縮荷重を負荷して純粋せん断状態とし、そのときの超音波縦波の伝搬速度変化から、超音波縦波の伝搬速度に及ぼす点欠陥発生量の相関について実験的検証を試みた。さらに比較検討を目的に、アルミニウム多結晶の場合でも同様の実験を行い、考察を試みた。以上の検討結果および考察から以下の知見が得られた。

(1) 塑性変形初期に転位間で切合う交差すべり量が生じず、点欠陥が発生しないと考えられる負荷方位においては、塑性変形初期に縦波伝搬速度に変化が見られなかった。

(2) 塑性変形初期から転位間で切合う交差すべり量が生じ、点欠陥の発生が考えられる負荷方位においては、塑性変形初期より縦波伝搬速度に増加・減少といった変化が見られた。

(3) 転位間で切合う交差すべり量の大小による縦波伝搬速度の違いを調査したところ、転位間で切合う交差すべり量の大きいほうが、縦波伝搬速度の増加・減少の変化量が大きい。

(4) 多結晶の縦波伝搬速度変化の傾向は点欠陥発生量と関連があるものの、縦波伝搬速度の変化量は単結晶の場合と異なっていることがわかった。

文 献

- (1) Kobayashi, M., Acousto-plastic effects caused by elasto-plastic deformation of solids, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 48 (1982), pp. 1072-1081.
- (2) Kobayashi, M., Theoretical study of acoustoelastic effects caused by plastic anisotropy growth, *International Journal Plasticity*, Vol. 3 (1987), pp. 1-20.
- (3) Kobayashi, M. et al., Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural property changes of plastically deformed solid under combined stress states, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 62 (1996), pp. 2810-2816.
- (4) Kobayashi, M., Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation, Part I: Theory, *International Journal Plasticity*, Vol. 14 (1998), pp. 511-522.
- (5) Kobayashi, M. et al., Experimental verification of ultrasonic nondestructive material evaluation method under combined stress states and evaluation of plastic anisotropic growth, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 65 (1999), pp. 2149-2156.
- (6) Kobayashi, M. et al., Texture and cross slip effects on ultrasonic wave velocity changes under simple and pure shear states, *Transactions of the Japan Society of*

- Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 67 (2001), pp. 1402-1408.
- (7) Takahashi, H. et al., Elastic-plastic finite element polycrystal model, *International Journal Plasticity*, Vol. 10 (1994), pp. 63-80.
- (8) Kobayashi, M. et al., Ultrasonic nondestructive material evaluation method and study on texture and cross slip effects under simple and pure shear states. *International Journal*, Vol. 19 (2003), pp. 771-804.
- (9) Kobayashi, M. and Tang, S., Theoretical examination of ultrasonic pole figures via comparison with the results analyzed by finite element polycrystal model, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 115 (2004), pp. 637-650.
- (10) Kobayashi, M. et al., Pure aluminum single crystal study on point defect dependence of ultrasonic longitudinal wave velocity, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 71 (2005), pp. 1459-1464.
- (11) Il'iushin, A. A., On the increments of plastic deformation and the yield surface, *PMM*, Vol. 24 (1960), pp. 663-666.
- (12) Kobayashi, M., Acoustoelastic theory for plastically deformed solids, *JSME International Journal*, Vol. 33 (1990), pp. 310-318.
-