

# 塑性変形によって生ずる微視組織変化の超音波による非破壊評価

北見工業大学 工学部 機械システム工学科

教授 小林道明

(平成5年度研究開発助成 AF-93007)

## 1. 研究の背景

一般に用いられている機械構造用材料は、その製造過程で成形加工（圧延、鍛造、押し出し、引抜きなど）されるため特別な処理を施さない限りおもな優先結晶方位を有する多結晶集合体となる。したがって、その後の深絞り加工などの塑性加工において成形性と密接に関係する後続降伏曲面の形状やランクフォード値などの材料の異方性の指標を材料の製造過程において実時間で非破壊的に評価する技術の確立が望まれている。

変形などの材料の機械的挙動は材料を構成している集合組織などの微視組織に密接に依存しており、これらの複雑な挙動を定量的に評価するために異方性降伏条件式にもとづく構成方程式で多数の内部状態変数を導入したり、結晶方位による異方性を極点図で評価することが行われている。

報告者らは材料中を伝搬する超音波の速度や減衰が結晶構造、集合組織、残留応力分布、空孔分布などの材料の微視組織と深く関連していることにより、塑性変形の進展に伴う降伏曲面の形状変化、集合組織の変化や局所すべり帯の発生を超音波を用いて非破壊的に評価する試みに関して系統的な一連の研究を進めている。

本報告においては、単軸引張負荷下の塑性変形における超音波伝搬速度変化を用いて異方性降伏条件式に含まれる内部状態変数を実験的に決定し、この内部状態変数から推定される後続降伏曲面を引張り・圧縮とねじりの複合負荷における降伏曲面の実験結果と比較検討することにより超音波による微視組織評価の可能性を探るとともにその精度の検証を試み、さらに超音波の伝搬速度から結晶粒方位分布関数を算定して材料内部における結晶方位の異方性を超音波極点図で非破壊的に評価することを試みている。

## 2. 超音波による推定降伏曲面の実験的検討

塑性変形により材料には幾何学的形状変化、微視組織変化および結晶粒の回転による結晶方位分布の変化にもとづく集合組織の変化などが生じ、そのそれぞれは弾性定数の劣化の要因となり超音波伝搬速度の変化として観測することができる。超音波伝搬速度変化を定式化するために、自然変形状態（通常、無応力・無ひずみ状態）における弾性定数を測定することにより自然変形状態におけるひずみエ

ネルギー関数を定義できる。このひずみエネルギー関数から弾性の構成方程式が導出でき、ある有限変形をして静的平衡にある状態（初期変形状態と呼ぶ）における弾性構成方程式は自然変形状態から初期変形状態への写像として求めることができる。その際の幾何学的形状変化の影響における弾性変形によるものが、いわゆる超音波伝搬速度変化における応力効果あるいは音弾性効果と呼ばれるものであり、超音波の応力測定への利用の基礎となる原理である。

さて、塑性変形により材料中には転位などの線および面欠陥や空孔などの点欠陥が増加するが、それぞれの欠陥による材料の加工硬化に与える影響には本質的な相違がある。すなわち、転位などの欠陥は塑性ポテンシャル理論で説明されるように長範囲応力場に支配される欠陥であり、その挙動は偏差応力の大きさ、いわゆる偏差応力場に依存するものと考えることができる。一方、空孔などの欠陥は短範囲応力場に支配される欠陥であり、その挙動は偏差応力の方向の変化、いわゆる偏差応力増分に強く依存していると考えることができる。報告者は上述の考察に基づき塑性構成方程式を定式化しており、それがコーナ理論の一種類で、長範囲応力場における欠陥は主に塑性ひずみを生じ、短範囲応力場における欠陥は塑性変形による弾性定数の劣化（弾塑性カップリング効果あるいはYield-vertex効果）と密接に関連していることを明らかにしている。

塑性構成方程式を定式化する際に相当応力を用いているが、塑性異方性などの複雑な変形挙動を定量的に表現するためにShrivastavaらの提案による異方性降伏条件式をYoshimuraの定義による4階のテンソル $C_{ijkl}$ および強い初期異方性を表現する係数 $\alpha_{ij}$ を用いて拡張した形により相当応力を定義している。したがって、塑性構成式には4個の内部状態変数が含まれることになり、これらの内部状態変数を超音波の伝搬速度変化から決定する。超音波は一方方向に伝搬する波動モードに関して縦波およびそれぞれ主応力方向に偏向して伝搬する2種類の横波がある。したがって、これらの波動モードを利用することにより単軸引張り試験のような簡単な負荷状態であっても内部状態変数を塑性ひずみの関数として精度良く決定できる。このようにして決定した内部状態変数を用いてランクフォード値や後続降伏曲面を推定できる。

一例としてアルミニウム合金 (A6061) の後続降伏曲面に関して超音波の伝搬速度変化を用いて推定したシミュレーション結果と薄肉円管について引張り、圧縮、ねじり、引張り・圧縮とねじりの複合負荷の条件下で計測した降伏曲面の実験結果とを比較検討 (図1) を行った。その結果、予負荷方向の反対側で若干の相違が生じているものの全体的に良い一致が得られることがわかった。なお、詳細は文献 [1] を参照されたい。

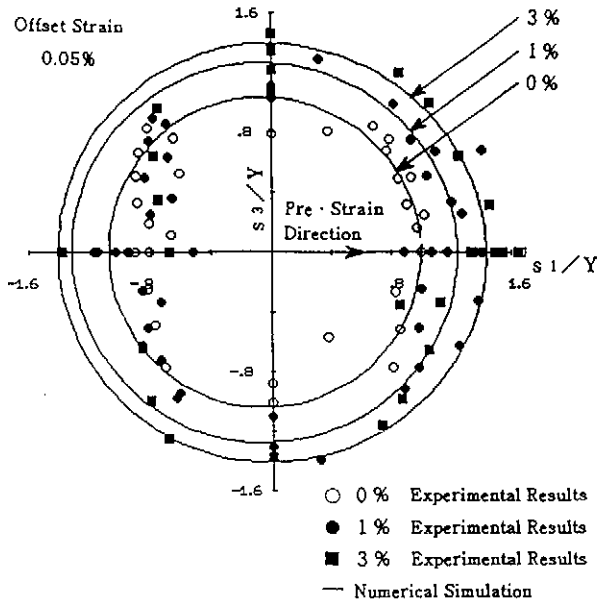


図1 予ひずみ値に関する降伏曲面の推移

### 3. 超音波極点図

Roe と Bunge は、多結晶材料の結晶方位による異方性の定量的記述の方法として結晶粒方位分布関数を用いた級数展開法を定式化しており、この結晶粒方位分布関数により近似的には Voigt 平均、Reuss 平均、あるいは Hill 平均を用いて多結晶材料の巨視的弾性定数の算定が可能である。したがって、弾性定数の異方性を超音波伝搬速度により精度良く測定できれば結晶粒方位分布関数の算定、さらに材料内部における結晶方位の異方性を超音波極点図で実時間、非破壊的に評価することが可能である。

本節においては、単軸引張り変形下における超音波縦波および横波の伝搬速度変化に関する実験結果を用いて結晶粒方位分布関数の有用性および適用範囲を検討し、あわせて超音波極点図についても考察する。なお、実験に用いた材料は焼きなまし処理を施さない場合がアルミニウム合金 A6063 で、焼きなまし処理を施した場合がアルミニウム合金 A6061 である。

超音波縦波および主応力方向に偏向して伝搬する2種類の超音波横波の伝搬速度は結晶粒方位分布関数における

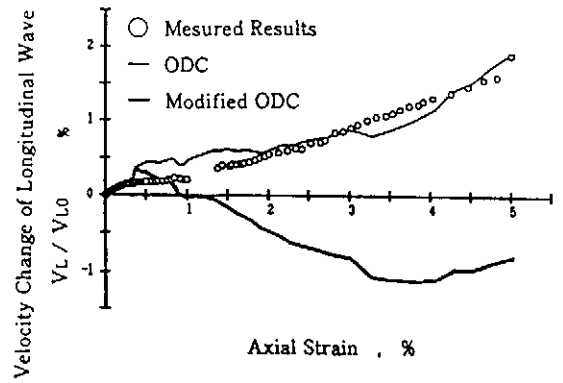


図2 焼きなましを施さない場合の縦波の速度変化の比較

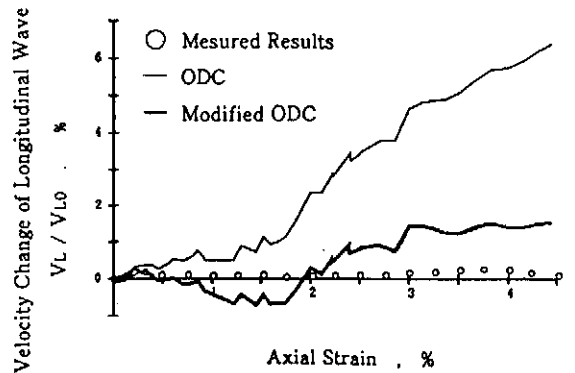


図3 焼きなましを施した場合の縦波の速度変化の比較

$W_{400}$  と  $W_{420}$  の2つの結晶方位分布係数で表すことができる。したがって、横波の伝搬速度変化から2つの結晶方位分布係数を決定し、この係数から縦波の伝搬速度変化をシミュレーションし、実験結果と比較検討することにより結晶粒方位分布関数の適用範囲を明らかにできる。このようにして得た縦波の伝搬速度についてのシミュレーション結果と実験結果の比較を焼きなまし処理を施さない場合の結果を図2に、焼きなまし処理を施した場合の結果を図3に示す。図2および3において細い実線 (ODC) は結晶粒方位分布関数から得られる結晶の回転のみを考慮した場合で、太い実線 (Modified ODC) は結晶の回転と塑性変形による幾何学的形状変化を考慮した場合の結果である。これらの図から十分な成形加工を受けた材料のその後の塑性変形は主として結晶粒の回転により進行することがわかる。一方、焼きなましなどにより再結晶した材料の塑性変形は結晶粒の回転のみならず、幾何学的形状変化や微視組織の変化を伴いながら進行することがわかる。

結晶粒方位分布関数の適用が可能な焼きなまし処理を施さない場合について結晶方位係数から求めた (111) 面の超音波極点図を塑性ひずみの大きさの順に図4から図7に示す。図においてLDは試験片の長手方向で押出し方向にも一致している。また、TDは試験片の板幅方向であり、表1は極点図の最大値を示している。図4~7から明らかのように

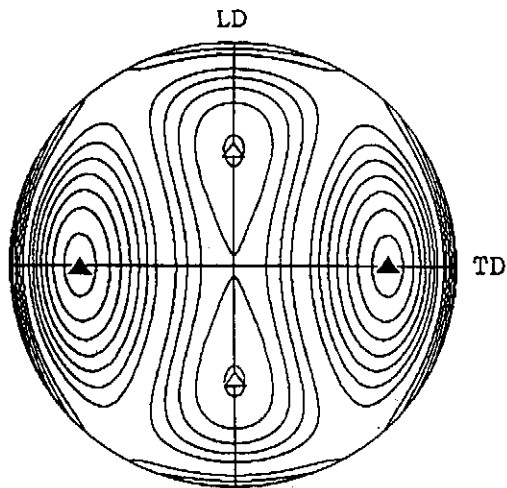


図4 Pole figure (111) at 0.377% (A)

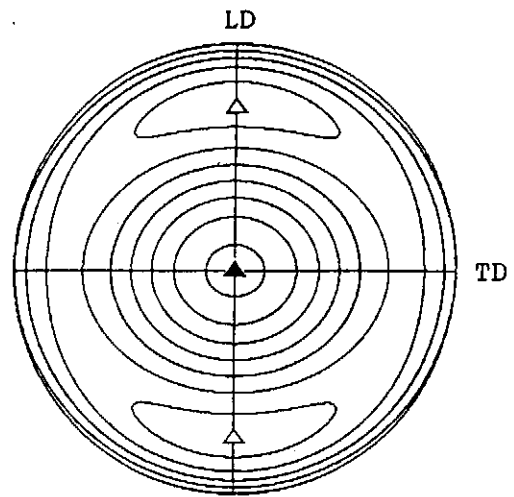


図6 Pole figure (111) at 3.779% (C)

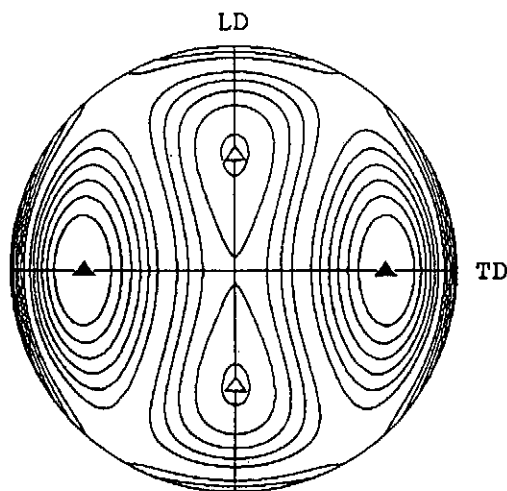


図5 Pole figure (111) at 1.409% (B)

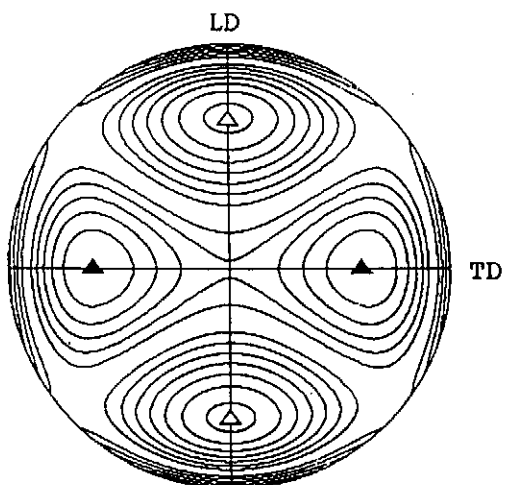


図7 Pole figure (111) at 5.039% (D)

	A		B		C		D	
	▲	△	▲	△	▲	△	▲	△
Latitude	0°	55°	0°	54°	0°	73°	0°	68°
Longitude	68°	0°	68°	0°	0°	0°	60°	0°
Maximum Value	14.92	—	37.29	—	43.15	—	—	367.3

▲ Maximum Point on TD-Axis  
△ Maximum Point on LD-Axis

表1 極点図における最大値の値と生ずる位置

押し出し加工により (111) 面が板幅方向に向いていたものが、その後の長手方向への引張りにより (111) 面は次第に長手方向に傾き、引張りによるせん断面の方向に近づく様子が見て取れる。なお、詳細は文献 [2] を参照されたい。

#### 4. 結論

以上において超音波を用いた非破壊材料評価の試みとして、後続降伏曲面の推定と超音波極点図の作成を行った。その結果、降伏曲面に関しては実験結果とも良好な一致が得られ、超音波による非破壊材料評価の有効性を示すことができた。また、成形加工を受けた材料でその後の塑性変形が主として結晶の回転により進行する場合は結晶粒方位分布関数の適用が可能であり、超音波極点図により変形の状態を推定できることがわかった。

#### 5. 文献

- [1] 小林、他4名、日本機械学会論文集、A編60巻580号、2877 - 2884 ページ
- [2] 小林、島田、日本機械学会論文集、A編61巻590号、2222 - 2228 ページ