

微視組織の異方性を考慮した有限要素法解析

FEM analyses of the elastic medium considering the anisotropic microstructures

鈴木 拓雄¹⁾, 小沢拓弥²⁾, 宮川 睦巳³⁾, 田宮 高信⁴⁾

Takuo Suzuki¹⁾, Takumi Ozawa²⁾, Mutsumi Miyagawa³⁾, Takanobu Tamiya⁴⁾

Abstract : In general, metallic materials are treated as isotropic materials. However, the crystal grains and textures show preferential crystallographic orientation due to heat treatment and deformation processing. It is conceivable that the influence of the crystal anisotropy on the metallic material can be increased. For example, internal damage occurs in the heat-affected zone of the welded joint. The anisotropy of crystal grains has been pointed out as the cause of internal damage by preceding studies.

In this study, stress analyses in the elastic region is carried out based on a model considering individual crystal grain shape, various number of crystal grains and crystal anisotropy orientation by using FEM. Thus, it is the purpose to investigate the influence of anisotropic microstructure on entire mechanical properties of materials. In these analyses method, the average elastic constants and the stress distributions of the entire models are calculated with simplified shape and actual approximated shape grain models.

Keywords : FEM, Anisotropic, Elastic medium, Microstructure

1. 緒言

機械や構造物に使用される大多数の金属材料は、数十 μm 程度の非常に小さな結晶粒の集まりからなる集合体であり、個々の結晶粒はその構造に特有な異方性を示す。一方で、広く利用されているような機械や構造物に用いられる部品のサイズは結晶粒のサイズと比較して十分に大きいことから、そうした部品を構成する結晶粒個々の異方性が相殺されて、全体として方向によらず平均的な挙動を示す等方性として扱われることが一般的である。

しかし、塑性加工や製造過程で、結晶粒がある方向に優先的な配向を示す集合組織を形成することがあり、それらの集合組織の集積の程度に応じて様々な異方性を示すと言われている。例えば、溶接継ぎ手に使われるオーステナイト系ステンレス鋼では、優先成長方位を有し、溶接・凝固過程において、最大温度勾配方向に $\langle 001 \rangle$ 方向が配向することが知られている¹⁾。また改良 9Cr 鋼では、熱影響部(HAZ)の細粒域内で微視組織の異方性を原因として応力集中が発生し、内部損傷が発生すると指摘されている²⁾。そのため、微視組織が材料全体の弾性特性に与える影響を把握しておくことは、構造物の品質や信頼性を確保するために非常に重要であると考えられる。

そこで本研究では、有限要素法により結晶粒個々の異方性微視組織を考慮した弾性域の材料挙動の解析を行うことにより、微視組織が巨視的な弾性定数にどのような影響を及ぼすのかについて検討する。

2. 解析方法

2・1 2次元有限要素モデル

結晶粒個々の配向および形状を考慮して xy 面内で異方性を有するモデルを作成し、結晶粒形状や結晶粒数の相違によるモデル全体の平均的な弾性定数および相当応力分布の比較を行う。さらに、立方晶系に属するアルミニウムモデルと、Voigt 近似したモデルおよび実験値と比較する。また、平均値に対するデータのばらつきを相対的に評価する指標である変動係数を用いて、銅薄膜の巨視的な弾性特性を示すのに必要な結晶粒数を推定する方法が芹沢

1),3) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 ロボット工学コース

2) 国立研究開発法人 土木研究所

4) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 医療福祉工学コース

ら⁴により提示されており、これによりアルミニウムにおける巨視的な弾性特性を示すのに必要な結晶粒数を推定する。

本研究では、汎用有限要素法プログラム ANSYS により、図 1(a), (b)および(c)に示す結晶粒形状を簡略化したもの（以後簡略化モデルと称する）および図 1(d)に示す実際の結晶粒を模擬したもの（以後実形モデルと称する）を設定した。簡略化モデルは、結晶粒形状を六角形、四角形およびひし形とした形状であり、実形モデルはボロノイ分割により作成している。なお以降では、これらの結晶粒形状モデルをそれぞれ Hex., Rec., Rho. および Re. と表記する。また、要素分割には6節点の三角形要素を用いた。

これらの各結晶粒モデルを図 2 に示すように長さ L mm, 高さ H mm の矩形モデルの内部に充填し、それを異方性モデル部と称する。さらに、右端には一辺の寸法を H mm とした正方形剛体板を接続した。異方性モデル部の寸法は表 1 で示す SS, S, M, L, LL および 3L サイズまでの 6 サイズを用意し、充填する結晶粒数はそれぞれのサイズで 10 個, 45~47 個, 150~153 個, 315~319 個, 540~545 個および 825 個とする。

また、本解析では x 軸方向と y 軸方向の弾性定数をそれぞれ $E_x=200$ GPa, $E_y=100$ GPa とし、ポアソン比 $\nu=0.3$ に設定した xy 面内異方性材料と、単結晶の弾性スティフネスの値が $G_{11}=106.8$ GPa, $G_{12}=60.4$ GPa および $G_{13}=28.3$ GPa であるアルミニウム⁴を対象とした。

2・2 境界条件

平面応力状態とした図 2 に示すモデルに対して、異方性モデル部の左端の全節点の x 方向変位を 0 とし、中央付近の 1 点のみ y 方向変位を 0 とし、右端に接続した剛体板の x 軸方向に 100 MPa の引張応力 σ_x を加えた。各結晶粒の方位は、 z 軸まわりの角度 θ が $0\sim 180^\circ$ の範囲で 1° 刻みにランダムとなるように設定した場合と、図 3 に示すように各形状間に対応する結晶粒の方位を一致させた場合を適用した。すなわち、図 3(a) および(b)には、例としてそれぞれ六角形およびひし形の形状を示しており、この図に示す I の位置に対応する I' の方位を同一とし、II の位置に対応する II' の方位を同一にしている。

2・3 平均的な弾性定数の計算方法

図 2 に示す剛体板中央付近の節点の x 方向の変位量から縦ひずみ ε_x を求め、これを異方性モデル部の平均化された縦ひずみ ε_x とみなす。また、異方性モデル部の上面と下面における各節点での変位量を平均した値から横ひずみ ε_y を求め、これを異方性モデル部の平均化された横ひずみ ε_y とみなす。そして、これらのひずみ ε_x および ε_y と引張応力 σ_x から、異方性モデル部の全体が等方性であるとみなして縦弾性定数とポアソン比を算出する。

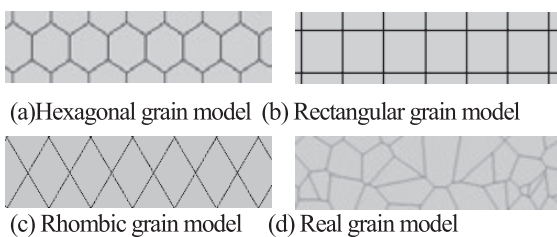


Fig.1 Crystal grain models

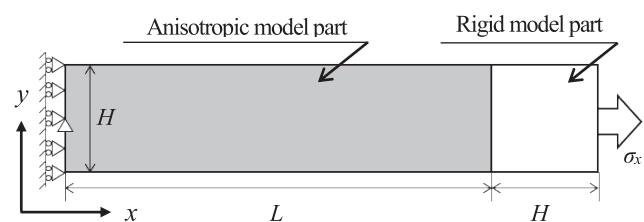


Fig.2 Analyses model filled with the crystal grains

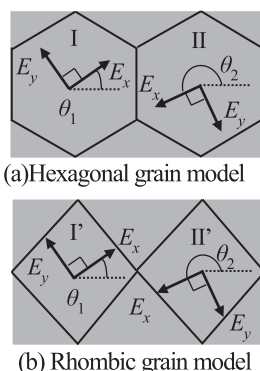


Fig.3 Orientation conditions of crystal grains

Table 1 Each model size and number of crystal grains

Size	Each model size		Number of crystal grains			
	L [mm]	H [mm]	Hex.	Rec.	Rho.	Re.
SS	18	2	-	-	-	10
S	54	6	47	45	47	47
M	108	12	153	150	153	150
L	162	18	319	315	319	315
LL	216	24	545	540	545	540
3L	270	30	-	-	-	825

3. 解析結果及び考察

3・1 結晶粒形状と弾性定数との関係

図4に xy 面内異方性材料を用いた異方性モデル部全体の平均的な縦弾性定数の値を結晶粒形状ごとに示す。ここで示す値は、S, M, L および LL サイズにおいて結晶粒方位をランダムに定めた 10 パターンずつでの解析から求めたものである。実形モデルを基準にした簡略化モデルの平均的な縦弾性定数の誤差率は六角形, 四角形およびひし形のそれぞれで 0.97%, 1.57% および 0.16% となった。このことから、モデル全体の平均的な縦弾性定数の結晶粒形状による差異は小さいことがわかる。

図5に六角形, 四角形およびひし形の LL サイズに対して、図3で示した要領で結晶粒の異方性の方位を一致させた場合の平均的な縦弾性定数を示す。結晶粒の配向を一致させたことから、いずれの形状間であっても縦弾性定数の値が同様の値を示していることがわかる。また、図6(a), (b) および (c) に各形状間で最も近い縦弾性定数を示した結晶粒の配向での相当応力分布を示しており、いずれの形状間であっても同様な応力集中や緩和を確認できる。これより、応力分布からも結晶粒形状による差異は小さいと考えられる。

3・2 結晶粒数と弾性定数との関係

図7に S, M, L および LL サイズにおける巨視的な縦弾性定数の確立密度分布を示す。図中の破線は各サイズでの縦弾性定数の平均値である。このときの、S, M, L および LL サイズの標準偏差は、それぞれ 5.7, 3.5, 2.4 および 2.2 となった。このことから、縦弾性定数の値の偏りは、結晶粒数の増加に伴いばらつきが小さくなる傾向を示しているため、巨視的な弾性特性に近づくと考えられる。

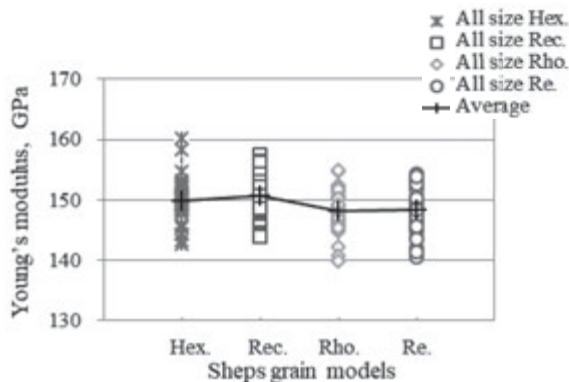


Fig.4 Scatter of Young's modulus with all size models

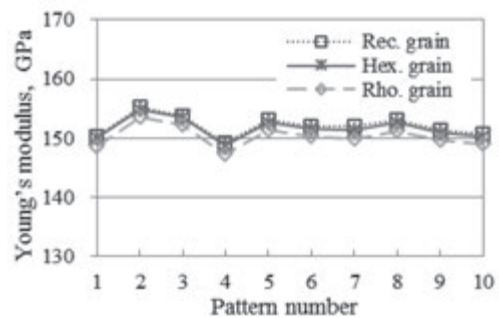


Fig.5 Young's modulus of entire models (LL size)

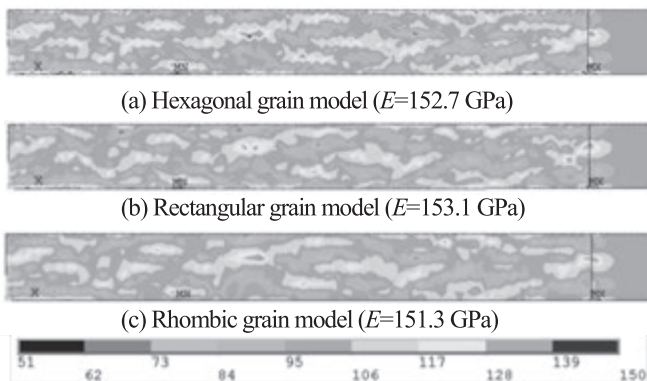


Fig.6 Equivalent stress contours (LL size)

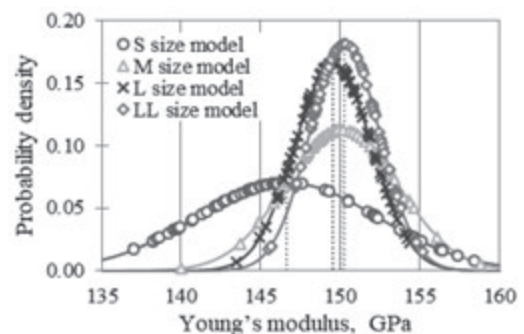


Fig.7 Comparison of probability density of Young's modulus with all size models

3・3 巨視的な弾性特性を示すために必要な結晶粒数についての検討

図8および9にアルミニウムを用いた異方性モデル部全体の平均的な弾性定数と、Voigt近似のモデル⁶⁾および実験値⁶⁾と比較したものを示す。ここで示す平均的な弾性定数の値は、実形モデルでのSS, Lおよび3Lサイズにおいて結晶粒方位をランダムに定めた100パターンずつでの解析から求めたものである。Voigt近似のモデルでは、実際の平均化された弾性係数よりも高い値を示すことが知られており⁶⁾、本解析結果においてもそのことを確認できる。また、本解析結果と実験値の誤差率は、縦弾性定数およびポアソン比のそれぞれで4.44%および6.85%となり、近い値を示している。

図10に平面応力状態におけるアルミニウムでの弾性定数から算出した変動係数CVの値を示す。ここで用いた変動係数CVは、標準偏差を平均値で割って算出した値であり、平均値に対するデータのばらつきを相対的に評価できる。この図から、結晶粒数と変動係数CVは線形関係であることがわかる。この関係から、芹沢らは銅薄膜における弾性定数の平均値からのばらつきが±2%以内で巨視的な弾性特性を示すと考えると、縦弾性係数については結晶粒数が147個以上、ポアソン比については結晶粒数が2986個以上で巨視的な特性を有すると推定している⁶⁾。そこで条件を厳しくして、アルミニウムにおける弾性定数の平均値からのばらつきが±1%以内で巨視的な弾性特性を示すと考えると、縦弾性係数については結晶粒数が24個以上、ポアソン比については結晶粒数が530個以上で巨視的な特性を有すると推定した。

また図11には、平面ひずみ状態に設定した場合のアルミニウムに対して、図10と同じ要領で巨視的な弾性特性を示す結晶粒数を推定した結果を示す。その結果、平面ひずみ状態の場合は、縦弾性係数では結晶粒数が33個以上、ポアソン比では結晶粒数が89個以上で巨視的な特性を示すと推定した。

ここでアルミニウムにおいては、平面応力状態および平面ひずみ状態のいずれの場合であっても、銅と比較して巨視的な弾性特性を示すのに必要な結晶粒数が多くなっていることがわかる。その理由は、異方性の程度を示す非等方性因子 $2C_{44} / (C_{11} - C_{12})$ の値が、銅は3.21、アルミニウムは1.22であることから、銅の異方性の程度が大きいためであると考えられる。

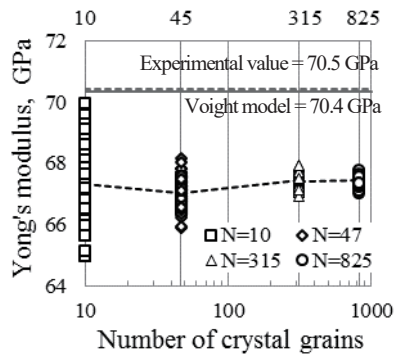


Fig.8 Comparison of Young's modulus with Voigt model

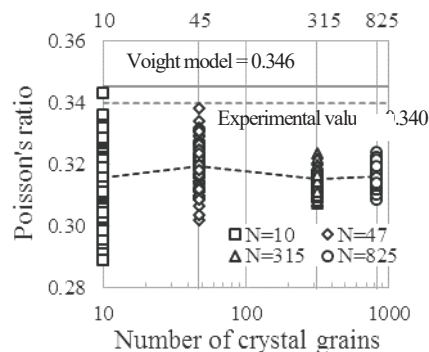


Fig.9 Comparison of Poisson's ratio with Voigt model

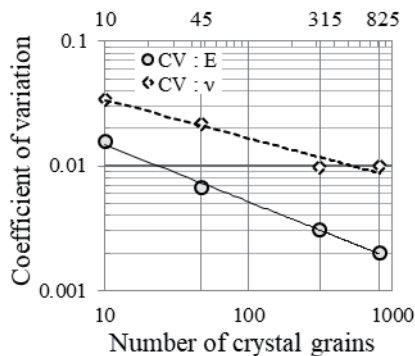


Fig.10 Change of coefficient of variation with number of grains (plane stress)

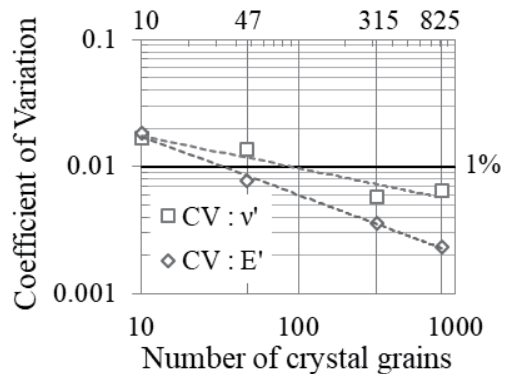


Fig.11 Change of coefficient of variation with the number of grains (plane strain)

4. 結 言

本研究では、汎用有限要素法プログラム ANSYS により異方性微視組織を考慮した 2 次元モデルを作成し微視組織が巨視的な弾性定数にどのような影響を及ぼすのかについて考察した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 結晶粒形状による比較では、 xy 面内異方性材料を用いた簡略化モデルと実形モデルでの巨視的な縦弾性定数の両者間では 0.16 %~1.57 %の範囲で一致することを確認し、相当応力分布による比較でも類似性が認められた。
- (2) 巨視的な縦弾性定数から標準偏差を算出すると、結晶粒数の増加に伴い縦弾性定数の値が安定する傾向が見られたため、巨視的な弾性定数への影響は結晶粒数による依存性が高いと考えられる。
- (3) アルミニウムの単結晶の弾性スティフネスを用いた解析結果では、*Voigt* 近似モデルおよび実験値での弾性定数と近い値を示した。
- (4) アルミニウムの弾性定数のばらつきが 1 %以内で巨視的な変形挙動を示すと仮定した。その結果、巨視的な弾性特性を示すのに必要となる結晶粒数は、平面応力状態の場合は縦弾性定数で 24 個以上、ポアソン比で 530 個以上であり、平面ひずみ状態の場合は縦弾性係数では結晶粒数が 33 個以上、ポアソン比では 89 個以上であると推定した。
- (5) 銅とアルミニウムを比較すると、巨視的な弾性特性を示すのに必要となる結晶粒数に相違がある理由は、非等方性因子の相違が原因であると考察した。

文 献

- [1] 三上欣希, 望月正人: 鋼溶接金属の結晶方位異方性を考慮した微視的応力分布特性の数値解析, 鉄と鋼, Vol. 100, No. 10, pp. 1281-1288, 2014
- [2] 中曽根祐司, 鈴木拓雄: 改良 9Cr 鋼の溶接部の微視組織を考慮した FEM クリープ解析, 第 23 回計算力学講演会, Vol. 10, No. 12, pp. 156-157, 2010
- [3] 芹澤一史, 田中啓介, 來海博央, 秋庭義明: <001>繊維配向した立方晶多結晶薄膜の弾性変形の有限要素法による解析, 材料, Vol. 53, No. 2, pp. 150-156, 2004
- [4] 萩博次: 弾性力学, 共立出版, pp. 45-56, 2011
- [5] 阿部武治: 多結晶体の弾性変形, 日本機械学会論文集, vol. 41, No. 352, pp. 3356-3365, 1975
- [6] 辛島誠一: 金属・合金の強度, 社団法人日本金属学会, pp. 1-9, 1972
- [7] S. Bhagavantam: Crystal Symmetry and Physical Properties, Academic Press, pp. 136, 1966