

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289269

研究課題名(和文) モーター用高配向電磁鋼板の創生-新しい集合組織制御原理の検証と応用-

研究課題名(英文) Production of oriented electrical steel for motor application -Examination and application of the new principle for texture control-

研究代表者

福富 洋志 (Fukutomi, Hiroshi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90142265

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：申請者等が提唱する新しい集合組織の形成機構「優先動的結晶粒成長機構」の実験的検証ならびにその応用によるモーター用電磁鋼板の製造を行った。高温での加工速度、加工ひずみ量、加工温度が集合組織に及ぼす影響を系統的に調べ、先鋭な<001>繊維集合組織を発達させる最適の条件を定めた。変形応力の解析などにより、提唱する機構の妥当性を確認した。実用化のための薄板製造を意図して、多層材の圧縮加工法の開発も併せ行った。さらにこの機構が様々な合金系での集合組織の制御に応用できることから、形状記憶合金や磁歪合金の高性能化のための集合組織制御に応用した。いずれの合金種においても先鋭な集合組織の付与を実現した。

研究成果の概要(英文)：The new mechanism “Preferential Dynamic Grain Growth Mechanism” of texture development proposed by the authors is experimentally examined and the production of electrical steel sheets for the motor application is challenged. The effects of strain rate, amount of strain and deformation temperature on the texture development are systematically studied and the condition suitable for the development of a sharp <001> fiber texture is determined. The analysis on the flow stress supports the Preferential Dynamic Grain Growth mechanism. In order to produce the electrical steel sheets necessary for the commercial application to electrical motors, uniaxial compression of multi layered electrical steel sheets is investigated. In addition, the high temperature deformation for the texture control is examined on shape memory steels and magnetostrictive steels. In both kinds of steels, it is seen that texture control is possible by the high temperature deformation.

研究分野：材料組織制御

キーワード：&lt;001&gt;繊維集合組織 無方向性電磁鋼板 新規集合組織付与技術

### 1. 研究開始当初の背景

結晶の有する異方性を積極的に活用するために、集合組織の付与技術が開発されてきた。代表的な成功例が方向性電磁鋼板とよばれる{110}<001>集合組織を有するFe-Si合金である。<100>方向の磁化が他方位に比して著しく容易である特性を活用した変圧器用鉄心材料として、二次再結晶に立脚する先鋭な{110}<001>集合組織方位を持つ方向性電磁鋼板薄板の製造技術が我が国で開発され、製品が全世界で使用されている。この材料は、かつては10%を超えていた変圧器での電力損失を2%程度まで低減し、世界のエネルギー損失の低減に大きく貢献した。

電磁鋼板の容易磁化方向<100>は、変圧器の場合には板材の一方向に配列させることが重要であるが、モーターのような回転磁場を利用する場合には、板面内に360°まんべんなく<100>が分布していることが重要である。これを目的に多くの研究がこれまでなされてきたが未だにこのような配向の制御に成功した例はない。それゆえ、磁化が困難な<111>の存在率の低減を目的に、結晶配向をランダムにした無方向性電磁鋼板が製造され現在使用されている。

集合組織の制御技術は優先方位を冷間加工で付与し、再結晶により新たな優先方位を生み出すのが基本的な構成である。しかし、冷間加工により形成される集合組織は、すべり系と変形様式に依存して大枠が定まるために、従来とは異なる集合組織を付与するのは困難である。

申請者はFCCの固溶体合金であるAl-Mg合金に高温変形下で形成される集合組織について研究を進めてきた。その結果、高温変形においては、室温での変形集合組織と同一の集合組織が一旦形成された後、ひずみの増大と共に冷間加工と再結晶の組み合わせでは出現したことがない新たな集合組織に変化する場合があることを見出した。そして、(1)変形に対して安定かつ(2)蓄積エネルギーの低い結晶方位の結晶粒が変形中に成長して集合組織の遷移をもたらすと考えられること、さらにこの現象は純金属では生じず、Al-Mg固溶体において転位の溶質原子雰囲気ひきずり運動が律速機構となる変形条件を中心として生ずることから、(3)溶質原子雰囲気の効果により転位が亜結晶粒を形成し難くなると、再配列による転位のひずみ場の緩和が小さくなって、蓄積エネルギーの結晶方位依存性が高くなり、特定方位の結晶粒が他方位結晶粒を消費して成長して、一旦形成された変形集合組織を変えるのではないかと(1)~(3)で構成される仮説を提示するに至った。

この仮説は、固溶体硬化の大きい合金系であれば結晶構造を問わず成立するはずである。そこでBCC構造のFe-Si系固溶体合金を対象として研究に着手した。この合金の高温変形機構は未だ確定していないが、仮説の

前提となるSiの固溶強化が大きいだけでなく、仮説に基づけば、単軸圧縮変形においては変形に対して安定でかつTaylor因子が小さいことから蓄積エネルギーが低いと考えられる{001}(圧縮面)繊維集合組織の発達が期待されるが、前述のように、この集合組織の工業的意義が高いからである。BCC材料の単軸圧縮変形では{111}(主)+{001}(副)二重繊維集合組織が発達することがこれまでの他者による研究により明らかにされている。変形集合組織の主方位{111}はTaylor因子が高いことから消費され、{001}繊維集合組織が発達すると予測される。

Fe-3.0mass%Si合金を対象としてBCC単相となる温度域で種々条件を変えて単軸圧縮変形を行った結果、予測と一致する集合組織の発達を確認した。圧縮面を投影面とし、平均極密度を1とした{001}極点図において同心円状に極密度が分布し、最大極密度が平均極密度の17倍を超える先鋭な{001}集合組織が形成されることが見出された。このようなFCCならびにBCC固溶体合金に関する成果に基づき、この集合組織形成の機構を「優先動的結晶粒成長機構」と名付けた。

### 2. 研究の目的

優先動的結晶粒成長機構に立脚して電磁鋼板を製造する最適の技術を開発するためには、(1)本合金における変形機構の同定、(2)優先動的結晶粒成長機構の発現条件、などの研究によって優先動的結晶粒成長機構を検証して新しい集合組織の制御原理を確立し、その上で技術化する必要がある。さらに、(3)電磁鋼板として使用するためには薄板製造の方法も開拓する必要がある。また、この機構による新規材料の製造を電磁鋼板の他に形状記憶合金や磁歪合金についても検討し、この機構ならびに新たな材料製造技術としての高温加工の意義を確証する。

### 3. 研究の方法

主たる対象素材をFe-3.0mass%Si合金とした。均質化処理後熱間圧延により板厚20mm程度の板材とした上で1173Kで1時間保持すると、結晶粒径が300 $\mu$ m程度で特定の優先方位を持たない組織が形成されることがこれまでの研究により判明しているため、この組織材を用いて実験を進めることとした。また、形状記憶合金としてFe-28mass%Mn-6mass%Si-5mass%Crを、磁歪合金としてFe-15mass%Ga合金を対象とした。

#### (1)変形応力の成分解析 - 有効応力の評価 -

直径8mm、長さ30mmの平行部からなる引張試験片を用いた引張クリープ試験によるStrain transient dip test、ならびに圧縮試験機を用いたStress transient dip testにより変形応力に占める有効応力の割合を評価した。圧縮クリープ試験ではひずみ速度の

正確な評価が困難であるので Strain transient dip test は引張クリープ試験により計 12 の変形条件で行った。

#### (2)変形の状態方程式の決定

有効応力の測定は変形の律速機構を知る重要な情報であるが、律速機構の特徴は、定常クリープにおける変形の状態方程式にも現れる。そこで引張クリープ試験を条件を種々変えて実施し、状態方程式を決定した。

#### (3)多層材の圧縮変形による薄板材の製造

従来実施してきた単軸圧縮加工では、加工治具と試料の間の摩擦がひずみ量の増大と共に大きくなり、電磁鋼板のうず電流損の低減に必要な薄板化が困難な問題点がある。研究室レベルでは単軸圧縮加工により最高 0.7mm 程度までの薄板化に成功している。この水準での実用も可能であるが、0.5mm 厚以下の薄板化が望ましい。それゆえ、板材を積層して多層化した状態での圧縮加工を試みた。

#### (4)鉄系固溶体合金における集合組織制御

著者等が提唱している「優先動的結晶粒成長機構」は固溶体硬化の大きい合金系で成立する。それゆえ、Fe-Si 合金以外の固溶体においても高温加工下での集合組織の発達を期待できる。そこで、前述の形状記憶鋼 Fe-28mass%Mn-6mass%Si-5mass%Cr ならびに鉄系磁歪合金である Fe-15mass%Ga 合金を対象として高温変形挙動と集合組織形成について調査した。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 変形機構

図 1 は四種の温度で Strain transient dip test を実施した結果である。いずれの温度においても、有効応力が存在していることが分かる。すなわち、転位の溶質原子雰囲気引きずり運動がこれらの変形条件での変形の律速過程であることが示唆される。

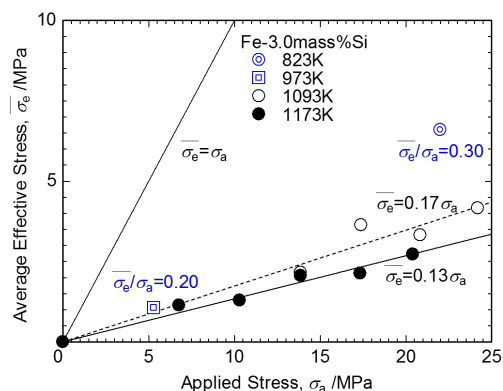


図 1 Strain transient dip test による Fe-3.0mass%Si 合金の内部応力測定結果

そこで、引張クリープ試験により、定常クリープ領域における変形の状態方程式の決定を試みた。図 2 は結果の一例である。定常

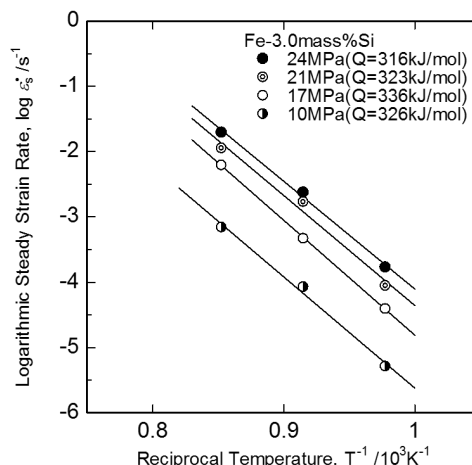


図 2 定常クリープ速度とクリープ温度の関係

クリープ速度をアレニウスプロットしてある。

定常クリープ速度の対数と温度の逆数の間に直線関係が成立していることがわかる。直線の勾配から変形の活性化エネルギーを求めると  $326 \pm 10 \text{ kJ/mol}$  となる。併せて評価したクリープの応力指数は 4 弱で、典型的な固溶体合金である Al-Mg 合金などで報告されている 3 程度の値と比べると高いものとなった。

#### 4. 2 多層材の圧縮加工による薄板材の製造

固溶体硬化の効果を強くするために Fe-3.0mass%Si に 0.1mass% の P を添加した材料を対象に、薄板を 5 枚～9 枚積層した上で 1173K において圧縮加工し、薄板材の製造を試みた。圧縮変形によって新生面が生成されるために多くの場合は圧接したが、潤滑剤を選ぶことで圧縮変形時の接合が回避できた。そして、最小で 0.5mm 以下の厚さの薄板を製造することができた。

バルク体の圧縮変形では、表層付近はせん断変形によって板厚中心部とは異なる集合組織が形成されるため、単純に薄板を重ねた場合に中心部でバルク体中心部と同様の集

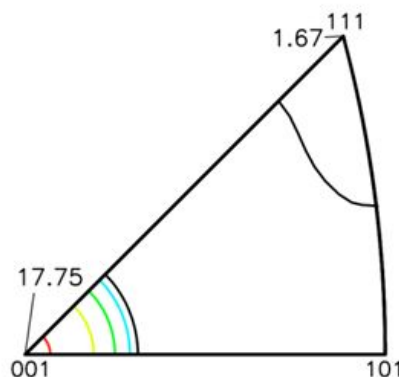


図 3 7 枚の薄板を積層した状態で圧縮加工した際の 4 枚目の薄板の結晶方位分布。圧縮軸の軸密度を平均軸密度を 1 として等高線が描かれている。

合組織が形成されるかが懸念されるため、集合組織測定を行った。7枚の薄板を圧縮加工した場合の板厚の中心位置にある4枚目の薄板部での測定結果が図3である。〈001〉での軸密度は平均軸密度の17倍を超える高い値であるのに対し、〈111〉での軸密度は平均軸密度と大差なく、優先動的結晶粒成長機構による集合組織制御が有効に機能していることが分かる。

#### 4.3 鉄系形状記憶合金に高温平面歪み圧縮加工で形成される集合組織

優先動的結晶粒成長機構は結晶構造によらず活動すると考えられる。そこで供試材を Fe-28mass%Mn-6mass%Si-5mass%Cr とし、加工モードも平面歪み圧縮変形として集合組織制御を試みた。結果の一例が図4である。本合金は FCC 構造であり、立方体集合組織の形成が予測される。図4に示す  $\varphi_2=0^\circ$  断面から、最大方位密度が平均方位密度の76倍を超える先鋭な立方体集合組織の発達が確認される。

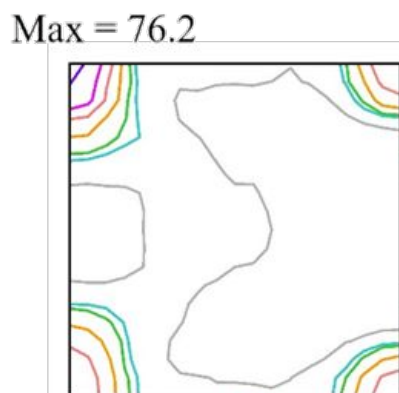


図4 FCC の Fe-28mass%Mn-6mass%Si-5mass%Cr 合金を 1173K で平面歪み圧縮変形した場合に形成された集合組織を示す  $\varphi_2=0^\circ$  断面。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

Yusuke Onuki, Shun Fujieda, Shigeru Suzuki and Hiroshi Fukutomi: “Improvement of Magnetostrictive Properties of Fe-15mol%Ga Alloy by Texture Formation during High Temperature Uniaxial Compression Deformation”, ISIJ International, Vol57(2017), No4. 755-757. 査読あり

[学会発表](計 2件)

Hiroshi Fukutomi: “Effect of high temperature deformation on the texture development in alloys and oxides”, International Conference on Processing and Manufacturing of

Advanced Materials, Graz, Austria, May 29<sup>th</sup> -June 3<sup>rd</sup>, 2016.

Yusuke Onuki, Shun Fujieda, Shigeru Suzuki and Hiroshi Fukutomi: “Enhancement of Magnetostrictive Properties of Polycrystalline Fe-Ga Alloys by High-temperature Deformation Process”, Plasticity 2016, Sheraton Kona Resort & Spa at Keauhou Bay, Big Island, Hawaii, January 3<sup>rd</sup> -9<sup>th</sup>, 2016.

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者  
福富 洋志 (FUKUTOMI HIROSHI)  
横浜国立大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：90142265

(2)研究分担者  
鈴木 徹也 (SUZUKI TETSUYA)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号：70261740

(3)連携研究者  
なし

(4)研究協力者  
なし