

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2007～2011

課題番号：19106013

研究課題名(和文) 材料磁気科学の新展開と実用材料技術への応用

研究課題名(英文) Innovation in Electromagnetic Science of Materials and Its Application to Practical Materials Processing

研究代表者

連川 貞弘 (TSUREKAWA SADAHIRO)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：40227484

研究代表者の専門分野：材料界面物性学，粒界工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：極限環境場プロセス，組織制御

### 1. 研究計画の概要

磁場作用が再結晶，相変態，析出などさまざまな金属学的現象に対して興味ある影響を及ぼすことが見出されてきた。しかし，観察される磁場効果の起源は必ずしも明らかになっていない。“磁場効果”の起源について検討し理解するためには，固体内の拡散，界面・表面エネルギー，粒界磁気モーメント，相安定性などの基礎的物理現象に対する磁場の影響についての知見が不可欠であるが，このような基礎的現象と磁場との関連に関する研究は非常に少なく，決定的に基礎データが不足している。また，電磁材料プロセスは残念ながら工業的応用まで至っていないのが現状である。

本研究では，『材料磁気科学』の基礎を確立し学問体系を構築するとともに，“磁場効果・磁場機能”を実用材料技術へ応用展開するための先導的研究を行うことを目的とし，下記の諸点について研究を行っている。

#### (1) 材料磁気科学の基礎

微細組織制御に関する速度論的現象に対する磁場の影響（固体内の拡散，核生成・成長，粒界移動）

微細組織制御に関する平衡論的現象に対する磁場の影響（相変態，粒界エネルギー，粒界偏析，粒界構造変態）

磁場効果に対する直流磁場と交流磁場の相違

粒界磁性に関する実験研究

#### (2) 実用材料技術への応用展開

### 2. 研究の進捗状況

#### (1) 固体内の拡散（体拡散，表面拡散）に及ぼす磁場の影響：

磁場作用下において $\alpha$ 鉄および $\gamma$ 鉄いずれにおいても炭素の拡散が抑制されることを明らかにした。磁場による拡散の抑制効果は，強磁性の $\alpha$ 鉄の方が常磁性の $\gamma$ 鉄より顕著である。炭素の拡散の活性化エネルギーは，磁場印加の有無にかかわらず， $\alpha$ 鉄および $\gamma$ 鉄いずれにおいても明瞭な相違は認められなかった。このことより，鉄中の炭素の拡散に対する磁場の効果は，拡散の活性化エネルギーではなく，主に振動数項に影響を及ぼすと考えられる。ディアルキルハフマンモデルに基づいて解析したところ，磁場印加によって生じる磁歪に起因して，炭素原子の八面体格子位置の占有確率が高くなるのが拡散速度の低下の原因である可能性が高いことを明らかにした。

一方，磁場勾配作用下においては，均一磁場とは異なり，逆に炭素の拡散が促進されることを見出した。

#### (2) 粒界エネルギーに対する磁場効果：

粒界エネルギーは粒界の力学的，物理的および化学的性質を決定する重要な因子である。したがって，粒界エネルギーに及ぼす磁場の影響を明らかにすることは，磁場を用いた微細組織制御ばかりでなく磁場環境下において用いられる材料の特性を理解するためにも重要である。本研究では，磁場作用下における鉄および鉄合金の粒界エネルギーに対する温度，粒界性格および磁気変態の影響に着目して研究を行ってきた。粒界溝発達法を利用して粒界エネルギーの温度依存性を調査した結果，無磁場下においては，温度の上昇とともに粒界エネルギーが高くなる

正の温度依存性を示すのに対し、6T の均一磁場下においては、逆に負の温度依存性を示すことを明らかにした。現在、熱力学的観点からその原因を検討している。また、磁場作用下においては、磁気変態点近傍において粒界エネルギーが不連続的に変化し、常磁性温度域からの外挿値よりも低下することを初めて明らかにした。

#### (3) 粒界磁性に関する研究：

連携研究者の M. Šob らによって鉄やニッケルの粒界近傍において磁気モーメントが粒内よりも高くなることが第一原理計算から予測されている。しかしながら、実験的な検証は行なわれていなかった。本研究では最近報告された電子線エネルギー損失分光法 (TEM/EELS) を用いた磁気モーメントの測定方法を応用し、TEM ナノビームを併用して粒界磁気モーメントの評価を行なっている。その結果、純鉄のランダム粒界において粒界磁気モーメントが粒内よりも高くなることを初めて実証した。一方、 $\Sigma 3$ 対応粒界においては磁気モーメントの変化はほとんどないことを明らかにした。

#### 3. 現在までの達成度

おおむね順調に進展している。

##### (理由)

本研究課題が採択された後、研究代表者、研究分担者および連携研究者 5 名の異動があり、研究環境の変化・再スタートにより、計画通りの研究の実行が懸念されたが、前半 3 年間で終了した時点においてほぼ計画通りに研究が進展し、“磁場効果”の起源を理解するための基礎的物理現象に対する磁場の影響についての新しい知見が得られてきている。また、海外の連携研究者とも緊密な協力関係を築くことができたことも本研究プロジェクトの成果としてあげられ、国際的な研究プロジェクトとして展開しながら、当初目的の『材料磁気科学の基礎の確立』に向けた着実な成果が見込まれる。さらに、研究計画当初には研究組織に加わっていなかった材料系企業の研究者が連携研究者として本プロジェクトに参画したことから、『磁場効果・磁場機能の実用材料技術への応用展開』するための協力和産業界からの視点に立った研究展開が可能となった。この点において当初予定以上の成果が期待される。

#### 4. 今後の研究の推進方策

特に大幅な計画修正はない。ほぼ当初予定通り研究を推進する。具体的には下記の通りである。

##### (1) 磁場作用下における固体内の拡散：

鉄中のニッケルおよび窒素の拡散に対する磁場の影響について明らかにする。

##### (2) 粒界偏析に及ぼす磁場の影響：

磁場中焼鈍により鉄中の Sn の粒界偏析が抑制されることを見出した。見出した結果が一般性を持つ現象であるのか否か確認する。

##### (3) 相変態挙動に及ぼす磁場の影響：

種々の組成を有する Fe-C 系および Fe-Co 系合金について、磁場中 DSC 装置を用いて  $\alpha/\gamma$  相変態挙動に及ぼす磁場の影響を調べる。

##### (4) 粒界近傍における磁気モーメントの測定：

純 Fe, Fe-Sn 合金, Fe-Si 合金を用いて、性格の異なる粒界近傍において局所磁気モーメントを測定し、粒界磁気モーメントの粒界性格依存性、粒界偏析の影響を系統的に明らかにする。

##### (5) 実用材料技術への応用：

磁場を利用した高強度高炭素鋼のセメント球状化抑制による強度劣化技術の開発に取り組む。

#### 5. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕(計 31 件)

S. Tsurekawa, K. Inoue, P. Lejček,

Grain boundary migration in Fe-3mass%Si alloy bicrystals under a magnetic field, ISIJ International, 査読有, 50, (2010), 591-595.

H. Fujii, V. A. Yardley, T. Matsuzaki and S. Tsurekawa, Nanocrystallization of Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub> soft-magnetic alloy from amorphous precursor in a magnetic field, J. Mater. Sci., 査読有, 43, (2008), 3837-3847.

V. A. Yardley, S. Tsurekawa, H. Fujii and T. Matsuzaki, Thermodynamic Study of Magnetic Field-Enhanced Nanocrystallization in Amorphous Fe-Si-B(-Nb-Cu), Mater. Trans., 査読有, (2007), 48, 2826-2832.

〔学会発表〕(計 46 件)

S. Tsurekawa, Grain Boundary Energy in Iron under a Magnetic Field, Intern. Conf. on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, 2009/8/27, Berlin.

〔図書〕(計 1 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称：鋼材の材質制御方法

発明者：連川貞弘，西田世紀

権利者：(株)新日本製鐵

種類：特許

番号：特開 2009-228122

出願年月日：2008 年 3 月 28 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.msre.kumamoto-u.ac.jp/~mice/>