

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目： 基盤研究 (C)
 研究期間： 2007~2009
 課題番号： 19560660
 研究課題名 (和文) 鉄合金の α/γ 界面移動に及ぼす Si、Mn 複合添加の効果
 研究課題名 (英文) Effects of Multiple Addition of Si and Mn on the Migration of α/γ Interphase Boundary
 研究代表者
 榎本 正人 (ENOMOTO MASATO)
 茨城大学・工学部・教授
 研究者番号： 70241742

研究成果の概要 (和文)：本研究は 2 相鋼や TRIP 鋼に添加される Si と Mn がフェライト変態に及ぼす効果とそのメカニズムをオーステナイトの加工や強磁場中の熱処理を行って検討した。その結果、Si と Mn の分配による成長抑制とフェライト/オーステナイト界面への共偏析による遅滞効果を見出し、局所平衡とソリュートドラッグ理論による定量的検討を行なった。

研究成果の概要 (英文)：The effects of Si and Mn, contained in dual-phase (DP) steel and Transformation-Induced-Plasticity (TRIP) steel, on ferrite transformation and the mechanism through which these elements produce the effects were studied in a high-purity Fe-C-Si-Mn quaternary alloy by deformation of austenite prior to transformation and magnetic heat treatment (the field strength is 8 Tesla). Results were compared with calculation taking into account the co-segregation of Mn and Si caused by the interaction between Mn and Si by means of the solute-drag theory. Diffusion of Mn and Si and segregation (or accumulation) at α/γ phase boundaries both delay the transformation and are likely to produce the characteristic three stages of ferrite growth reported in the literature.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属物性

キーワード：鉄合金、オーステナイト、フェライト、合金元素、強磁場、成長

1. 研究開始当初の背景

(1) オーステナイト分解に及ぼす合金元素の効果は単独添加については多くの研究があるが、2 種類以上添加された場合の効果については経験的なデータの集積のみでメカニ

ズムはあまり研究されていない。

(2) 近年、希少元素の有効利用や、豊富に存在する元素による代替技術確立する必要が認識されている。鋼に添加される Ni, Mo, Cr

などはこのような元素戦略の対象元素になっており、これらが鋼の組織形成に及ぼす効果や、他の元素への代替の可能性などを明らかにすることは時代の要請に沿うものである。金属材料の拡散型組織形成における合金元素の効果についてはこれまで多くの研究があり、多くの合金系でバルクの熱力学効果はひとまず解明されたと言ってよい。しかし、実用的な組織予測にはほど遠いのが実情である。本研究は、このような状況をふまえ、複合添加された置換型合金元素が拡散型フェライト変態に及ぼす影響とそのメカニズムを明らかにする目的で行う。

2. 研究の目的

(1) 合金元素の単独添加の効果として、特徴的なのは、鋼に Mo を添加すると、中温域にベイが現れ、見かけ上 2 つの C 曲線に分離する。これは、Mo の α/γ 界面偏析による可能性が大きく、Cr, W, V, Nb, などでも同様のメカニズムで類似の効果が期待できる。

(2) Fe-C-Mn および Fe-C-Ni 合金で、フェライト変態速度が遅いモードから速いモードに遷移する温度が、局所平衡理論で予想される PLE/NPLE 遷移温度*よりも高い、Fe-C-Si 合金においては、フェライト変態速度が局所平衡理論で説明され、ソリュートドラッグ効果はないと言われているが、Si と Mn を複合添加した Fe-C-Si-Mn 合金では TTT ベイが現れることなどである。

(3) Fe-C-Mo 合金のように TTT ベイを形成する鋼では、連続冷却により強度と靱性の良好な組み合わせを有するベイナイト組織を得やすくなる。Si と Mn の地殻存在度(クラーク数)はそれぞれ、Mo や Cr の 10^{+6} 倍と 10^{+3} 倍である。そこで、本研究では高純度 Fe-C-Mn-Si 合金を溶製し、Mn と Si の複合添加により、変態挙動において、Mo や Cr 単独添加と類似の効果が発現するメカニズムを解明したい。

3. 研究の方法

(1) 磁場中熱処理の活用

強磁場はフェライト変態を促進する作用がある。合金元素の分配および界面偏析はいずれも変態を抑制する方向に働く。そこで、強磁場 (~8 Tesla) 中で等温保持し、磁場が変態挙動にどのような影響を及ぼすか調べる。

(2) STEM-EDX による界面の組成分析

加工フォーマスターにより ($\alpha+\gamma$) 2 相領域で熱間加工を施し、その後の等温保持によって生成するフェライトとその周辺の組成分析を行なう。当初は、アトムプローブ(LEAP)による組成分析を計画したが、マシンタイム

等、実行できなかった。

(3) Hillert-Sundman の理論により、Fe-C- X_1 - X_2 合金におけるソリュートドラッグ効果の計算を行なう。この理論は、これまで Fe-C-X 3 元合金に適用されたが、4 元合金への拡張を試みる。

4. 研究成果

(1) Fe-C-Mn-Si 合金の α/γ 界面における Mn と Si の集積(accumulation)を計算する手法を開発した。炭素(C)を含むすべての溶質原子の相互作用を取り入れており、フェライト変態挙動を考察するときの基礎データを提供する。

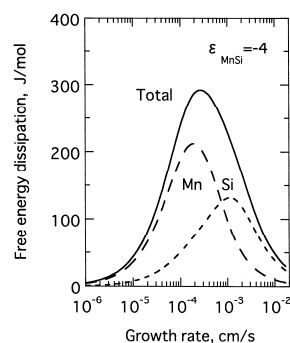


図1 Mn と Si が偏析した界面の移動に伴う自由エネルギーの散逸。

(2) ソリュートドラッグモデルを Fe-C-Si-Mn 4 元合金に適用して、移動界面における Mn と Si の偏析(集積)を計算した。図中の数字を界面の移動速度(規格化)を示す。双方とも 3 元合金に比べ、偏析量が増大していることを示す。

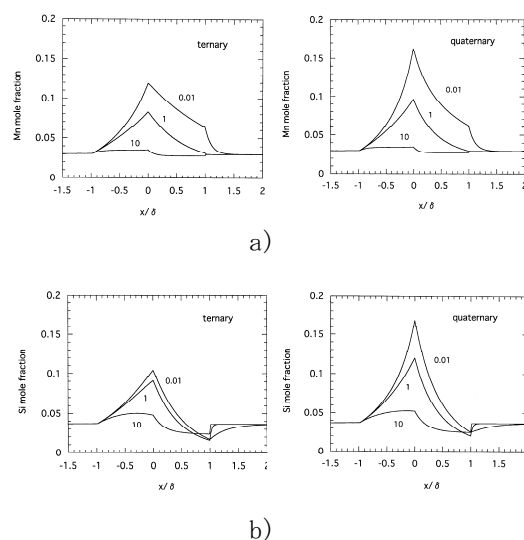


図2 a)Mn と b)Si の界面内付近の濃度プロ

ファイル。'ternary' はそれぞれ、Fe-0.1C-3Mn と Fe-0.1C-1.9Si 合金を示す。

(3) 前項の界面偏析を考慮して、Fe-0.04C-3Mn-1.9Si 合金で報告された3つの成長段階を拡散律速成長理論によりシミュレートした。図3 a)は成長の第1段階(バルクの分配も界面偏析も起こらない炭素の拡散に律速された速い成長)、図3 b)と c)は成長の第3段階(合金元素の分配が起こる遅い成長)における界面付近の C, Mn および Si の濃度プロファイルを示す。

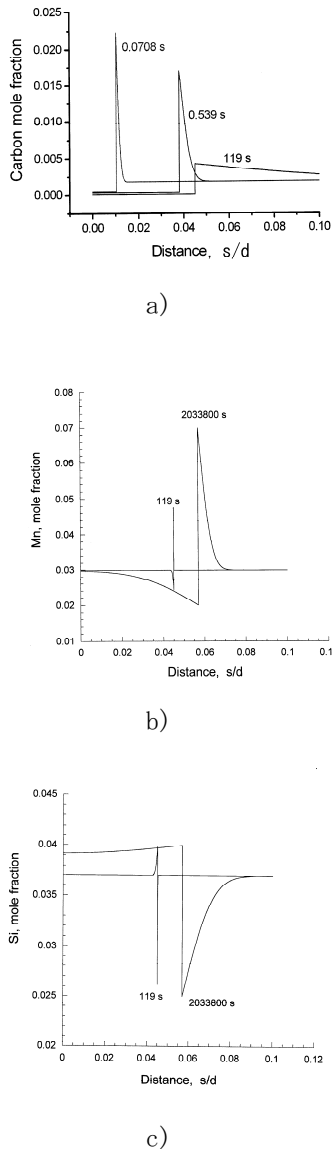


図3 炭素、Mn および Si の界面付近の濃度プロファイルの時間変化。

(4) Weiss 理論によって、強磁場中が合金元素によるフェライトの熱力学的安定性に及

ぼす影響の度合いを計算し、Mn は他の元素に比べ、磁場によるフェライト相を安定化させる作用を最も小さくすることを見出した。

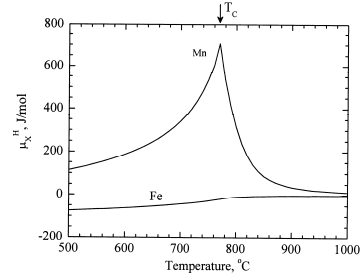


図4 外部磁場との相互作用による Fe と Mn の化学ポテンシャル。T_c は bcc α相のキュリー温度。

(5) Fe-0.1C-3Mn 合金のフェライト変態に及ぼす強磁場の影響を測定し、8 Tesla の磁場の中でフェライトの成長が促進されるデータを始めて示した。

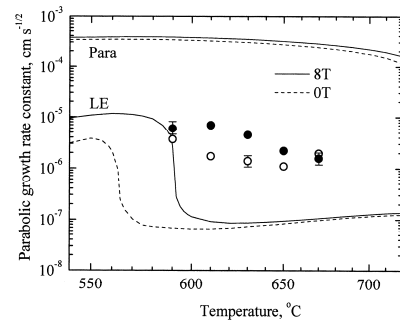


図5 磁場(8 Tesla)オンとオフにおけるフェライトの成長速度定数。

(6) 加工フォーマスターにより、Fe-0.1C-3Mn-1.5Si 合金をオーステナイト化後、2相域で圧縮加工したところ、その後の等温保持で粒径数μm の微細なフェライト粒が旧オーステナイト粒界や粒内に生成した。この組織は、以前 Fe-C-Ni 合金で同様な方法で得られた組織とよく似ており、歪エネルギーの役割が強調された。

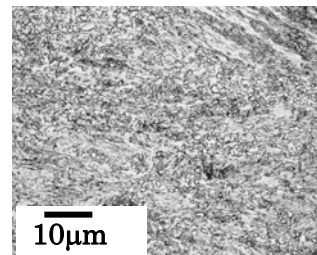
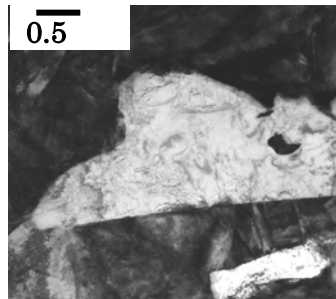
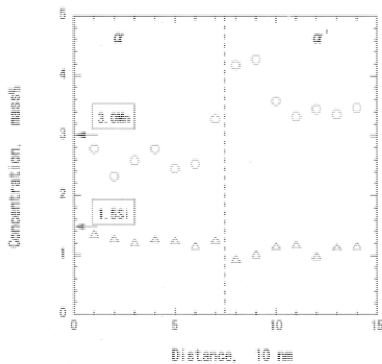


図6 710°Cで50%圧縮加工後、5min保持した試料の光学顕微鏡組織。

(7) 前項の試料のフェライト粒とその周辺の母相領域をSTEM-EDX分析し、MnとSiの分配が確認された。これはフェライト粒の成長がMnとSiの拡散に律速されることを示しており、微細なフェライト粒が生成する原因である。



a)



b)

図7 710°Cで50%圧縮加工後、10min保持した試料のa) TEM組織と、b) STEM-EDX分析。

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2件)

①G. H. Zhang, M. Enomoto, N. Hosokawa, M. Kagayama and Y. Adachi, “Influence of Magnetic Field on Ferrite Transformation in a Fe-C-Mn Alloy”, J. Magn. Magn. Mater., 査読有, vol. 321, 2009, 4010-16

②H. Guo and M. Enomoto, Effects of Substitutional Solute Accumulation at α/γ Boundaries on the Growth of Ferrite in Low Carbon Steels, Metall. Mater. Trans. A, 査読有, vol. 38A, 2007, pp. 1152-61

[学会発表] (計4件)

①M. Enomoto, G. H. Zhang, K. M. Wu, “Influence of Strong Magnetic field on Ferrite Transformation in Fe-C base Alloys”, (Invited) Int. Conf. on Solid-Solid Phase Transformations, 2010 June 6-11, Avignon, France,

②榎本正人, Fe-C-Si-Mn合金における加工オーステナイトからのフェライト変態、日本鉄鋼協会「計算工学による組織と特性の予測技術」研究会成果報告シンポジウム、平成22年5月21, 22日、東京

③張国宏、榎本正人、Fe-C-Ni合金におけるパーライト変態に及ぼす強磁場の影響、日本鉄鋼協会秋季講演大会、平成20年9月23日、熊本

④榎本正人、Fe-C-Si-Mn合金におけるフェライト変態、日本鉄鋼協会春季講演大会、平成20年3月27日、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎本 正人 (ENOMOTO MASATO)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：70241742