

磁場による配向組織の形成

Aligned Microstructures in Steels

下斗米道夫 千葉大学 大学院自然科学研究科 客員教授
Michio Shimotomai

1 磁場配向と理科の実験

外部から加えた磁場の方向に配列した鉄鋼材料組織を作ることは、磁場を用いた研究の目標の一つであった。配向組織形成によって、集合組織や機械的性質を制御できると期待されるからである。配向組織の形成には、永久磁石にいくつものゼムクリップが鎖のようにぶら下がる理科の実験でおなじみの磁気双極子相互作用を利用することになる。これは、磁気誘導によってゼムクリップの両端にN極とS極が現れて小磁石となり、小磁石どうしが作用して鎖となるものである。他に同様の現象としては、磁性流体や磁気粘性流体に磁場を印加すると、油に分散している酸化鉄微粒子が鎖状あるいはカラム状に配列することが挙げられる¹⁾。分散粒子を常磁性、媒体を強磁性とした場合でも配向組織が形成されることも知られている²⁾。

鉄鋼材料は好都合なことに、常磁性の γ 相と強磁性の α 相の混合組織を持つことが出来る。しかし、磁性流体とは異なり媒体は固態であるから、磁化された結晶粒子が簡単に移動や回転をすることは出来ない。したがって、配向組織を作るチャンスがあるとすれば、 γ 相の母相から α 相が核発生する $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態や、その逆の $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態における初期段階であろうと見当がつく。

2 $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態と配向組織^{3,4)}

まず、Fe-C二元合金の逆変態時に磁場を印加して配向組織を形成する実験について述べる。Fe-0.1 mass % C合金の板状試験片を γ 域から水焼入れしてマルテンサイト相(M相)とした後、8Tの磁場を印加した状態で α 相と γ 相が共存する温度(1073K)にまで加熱して2.7 ks保持してから、水焼入れする。その試験片を光学顕微鏡で観察した結果が、図1(a), (b)である。図1(a)は、磁場(その向きは紙面の上下方向)に平行な断面、図1(b)は磁場に垂直な断面である。 γ 相に逆変態し、その後の焼入れでM相になったのが黒い組織であり、焼き戻されて α 相となった組織は白く見えている。高温の変態時に常磁性の γ 相が磁場の方向に鎖状に形成され、しかも鎖列は相互に離散して分布している。比較のために、磁場を印加しない場合の組織を図1(c)に示す。鉄のキュリー温度よりも30K高い1073Kで磁場を印加したにも

かかわらず、磁気双極子相互作用が働くのは、外部磁場によって熱力学的に見かけのキュリー温度が上昇したためである⁵⁾。配向組織の形成は磁場の方向できまり、試験片の圧延などの前歴とは無関係である。圧延面に垂直に印加すれば、その方向に配列した組織が形成される。磁場配向組織の形成は、Fe-0.4 mass % Cや0.6 mass % Cの合金でも観察されている。

α 相(焼き戻しM相)の格子不整点やブロック境界などが γ 相への変態の核発生サイトになっていると考えられる。また、室温で加工してから磁場中逆変態させると短時間で配向組織が形成されるので、核発生後の成長に関しては拡散が律速していると考えられる。

3 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態と配向組織⁶⁾

常磁性の γ 相から強磁性の α 相が現れる正変態においても磁場を印加すると、配向組織が形成されるであろうか? 磁場中で正変態の実験は1960年代より数多く行われているにもかかわらず、配向組織を観察したという報告はほとんど無い。その理由として、 α 相が主として γ 相の粒界で核発生し、その結果、粒界の幾何学形状に邪魔されて磁場方向に並んで核発生することが難しいことが考えられる。上記した $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態における磁場配向の成功例は、 γ 相の粒内に多くの核発生サイトをあらかじめ用意しておけば磁場配向組織を作れるこ

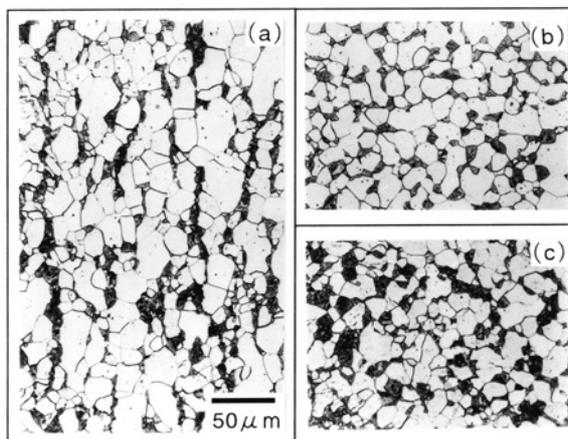


図1 Fe-0.1mass % C合金の磁場中逆変態組織
(a)は8Tの磁場に平行な断面の組織、ただし、磁場の方向は紙面の上下方向である。(b)磁場に垂直な断面の組織。比較のために、磁場をかけなかった場合の組織を(c)に示す。

とを示唆している。従って、正変態では、 γ 域で圧延を施して転位セルや双晶などを導入すればよいのではないかと考えつく。

そこで、高周波加熱→引抜圧延→磁場中正変態→冷却のプロセスをインラインで行える図2のような装置を作成して研究を行った。磁場の発生には、最大磁場12Tの超電導マグネットを用いた。正変態磁場配向実験はFe-0.6 mass % C二元合金でも成功しているが、ここでは実用鋼組成 (Fe-0.2 mass % C-0.2 mass % Si-1.3 mass % Mn-0.1 mass % Ti) についての結果を4枚の光学顕微鏡写真で示す。図3 (a) は、 γ 域で30%の圧延を行った試験片を12Tの磁場中に設置した1028Kの炉に移動させて30 s間保持して部分的に変態させた後、焼入れた場合の組織である。明るい組織はフェライト、暗い組織はM相 (変態温度では γ 相だった) である。印加磁場方向と圧延方向はともに、紙面の水平方向である。フェライト粒子が磁場方向につながって伸びていることがわかる。図3 (b) は圧延が無い以外は同じ条件で実験した場合

の写真である。 γ 相粒界でフェライト粒が核発生して粗大に成長していることがわかる。磁場と平行な粒界で発生したフェライトは磁場方向に伸びている傾向が見られる。図3 (c) は、30%の圧延は行うが、磁場は印加しなかった場合である。12Tの印加磁場が無いと変態温度が10K程度低下するので、変態は1018Kで行わせてある。フェライト粒は γ 相の粒内と粒界で多数発生しており、その分布はほぼランダムである。この微細なフェライト粒が磁場方向に配列したのが図3 (a) であると考えることが出来る。圧延も磁場も無い場合の結果が図3 (d) である。変態温度は1018Kである。フェライト相の分布は図3 (b) に類似しているが、特定方向に伸張する傾向は見られない。

このように、正変態の場合は、 γ 相未再結晶域での圧延加工と磁場印加を組み合わせないと配向組織を作れないことがわかった。配向組織形成に必要な圧延量は25%以上である。磁場強度としては2T以上が望ましい。

4 磁場中変態粒の形態と優先結晶方位

磁場中で強磁性相が新たに核発生して成長することが許される場合、その形態は、磁場方向に長軸をもつ回転楕円体となることが予想される。それは、静磁エネルギーを小さくする観点からは細長い円柱体が望ましく、界面エネルギーの項からは球体が良いからである。そのような事例をFe-0.6% C合金について図4 (a) に、実用鋼については図4 (b) に示す。注目されるのは、図4 (a) にAとマークした位置である。3つの楕円状フェライト粒が連なっている。まさしくゼムクリップの鎖形成と同じ事象である。これらの楕円体フェライト粒の軸比は上述の簡単な考えで説明することが出来る⁶⁾。

変態粒が磁場中で核発生し成長するのであるから、磁場方向に優先的な結晶方位を示すのではないかと期待される。電

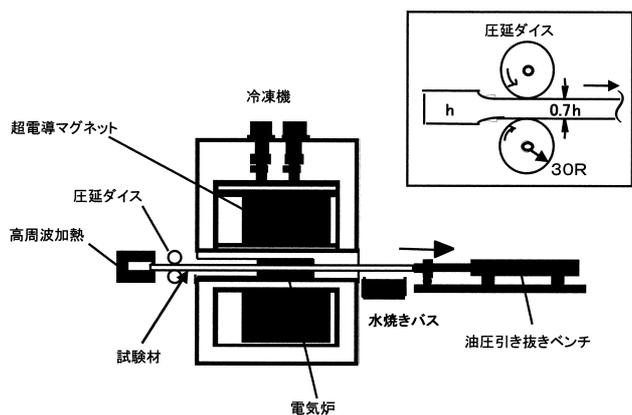


図2 磁場中加工熱処理装置

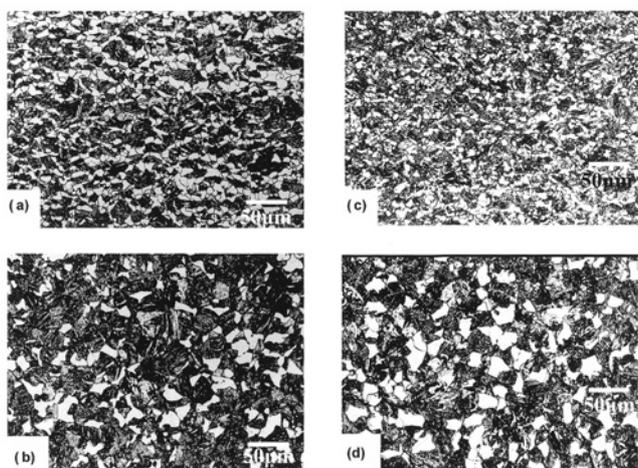


図3 磁場中で正変態させた炭素鋼の組織
 (a) γ 域で圧延後、12Tの磁場中で変態させた場合
 (b) 圧延しないで12Tの磁場中で変態させた場合
 (c) 30%の圧延は行うが磁場は印加しない場合
 (d) 圧延も磁場も無い場合
 いずれの写真でも、磁場方向も圧延方向も紙面の水平方向である。



図4 磁場中変態で生まれた楕円体状結晶粒
 (a) Fe-0.6% C合金の正変態で生じた α 相粒子
 (b) 炭素鋼の正変態によって粒内に発生した α 相粒子

子線回折を用いて、図3 (a) と (d) の試験片のフェライト粒の方位分布を測定したが、両者に有意の差は見られなかった。高温のキュリー温度近傍では磁気異方性が小さいためと考えられる。磁場によって集合組織を直接に制御することは出来ないようである。

5 配向組織の実用性

それでは、鉄鋼材料における配向組織の実用的意味は何であろうか？ 構成相の応力-歪曲線が異なっていれば、特定方向に配列した複相組織が異方的かつ、不均質な変形をするはずである。換言すれば、加工方向によって歪の蓄積量と分布が異なることが予想される。すでに述べた逆変態や正変態の実験では、 α 相とM相とからなる配向組織試験片を作ることが出来ている。これらの試験片に室温で加工を加え、再結晶させてから結晶粒サイズと分布を測定したところ、配向組織を座屈させる方向に変形を加えると、その他の場合に比べ格段に低い加工率で微細かつ均一な結晶粒が得られた。

さて、高温では γ 相と α 相の変形抵抗が異なることは良く知られている。それであるプロセスの計算シミュレーションを行うこととした⁷⁾。あるプロセスとは、図2の正変態インライン実験設備を改造して、鋼板の板厚方向に磁場を印加出来る対向型のマグネットを設置し、さらにマグネット直後に圧延ロールと再結晶炉を設置して、微細粒鋼をインラインで試作するというものである。シミュレーションには配向複相組織の変形に関する有限要素法を用いる。 γ 相と α 相から成る配向組織を座屈させる方向に変形させると、再結晶の核発生サイトとされる歪勾配の大きな領域を効率的に導入できることがわかりつつある。

磁場は、非接触で瞬時に均一に印加できる外場であり、また、鉄の磁性を利用して組織を制御できる唯一の外場でもあ

る。励磁や減磁の時間が60 s以下と短い高温超電導マグネットが近い未来に実用化されれば、使い勝手が良くなり、冷却電力の負荷も著しく軽減されて、磁場による組織制御の工業化が進むと期待される。

謝辞：

本解説は、NEDOが平成9年度より5年間にわたって実施したスーパーメタル（鉄系）プロジェクトの研究において、主として川崎製鉄株式会社技術研究所で得られた成果⁷⁾に基づいている。丸田慶一、山下孝子、米花康典、谷口孝彦のスーパーメタル研究体研究員諸氏の名を記して謝意を表す。

参考文献

- 1) J.M. Ginder: MRS Bulletin, 23, (1998) 8, 26.
- 2) A.T. Skjeltorp: J. Appl. Phys., 57 (1985), 3285.
- 3) M. Shimotomai and K. Maruta: Scr. Mater., 42 (2000), 499.
- 4) K. Maruta and M. Shimotomai: Mater. Trans., JIM, 8 (2000), 902.
- 5) M. Enomoto, H. Guo, Y. Tazuke, Y.R. Abe and M. Shimotomai: Metall. and Mater. Trans., 32A (2001), 445.
- 6) M. Shimotomai, K. Maruta, K. Mine and M. Matsui: to appear in Acta Materialia.
- 7) 山下孝子, 丸田慶一, 下斗米道夫: 第4回スーパーメタルシンポジウム講演集, (財)金属系材料研究開発センター編, (2001), 181.

(2002年12月9日受付)