

(論文)

複合組織冷延鋼板のミクロ組織に及ぼす焼鈍前加熱速度の影響

Effect of Heating Rate during Continuous Annealing on Microstructure of Multiphase Cold Rolled Steel Sheet



浅井達也*1
Tatsuya ASAI



中屋道治*1
Michiharu NAKAYA



兵頭聖子*2
Seiko HYODO

The effect of the heating rate during continuous annealing on the microstructure of multiphase cold rolled steel sheet was examined. Cold rolled Nb-added steel sheets were heated up to austenite temperature at various heating rates and were subsequently cooled under the same conditions. The results indicated that the microstructure and the mechanical properties of annealed steel sheet had changed with the heating rate. The phenomenon is attributable to the micro-segregation of Mn caused by the redistribution of Mn in austenite during heating. The redistribution of Mn takes place when the interface between the ferrite and austenite migrates slow enough to allow the diffusion of Mn from ferrite to austenite. It was found that the redistribution of Mn affects the transformation behavior of austenite, varying the microstructure of multiphase steel sheet.

まえがき＝近年、地球環境保護の観点から、自動車の車体軽量化による燃費向上が要求されている。また、同時に自動車事故での乗員保護の観点から、車体構造の強化も求められている。使用する鋼板の板厚増加や補強部材の追加により車体の強化は可能であるが、車体重量の増加となる。こうした相反する要求の達成には、センタピラーなどのボデー骨格部材に高強度鋼板の採用が必須となりつつある¹⁾。

一方、鋼板の高強度化はプレス成形性の劣化といった課題を抱えるため、成形性のよい高強度鋼板の開発が求められている。そのため、要求されるプレス成形性に応じた特性を発現させるべく、フェライト－マルテンサイト鋼板やフェライト－ベイナイト鋼板といったミクロ組織を複合化した高強度鋼板が開発されている²⁾。高強度鋼板のミクロ組織を複合化するうえで、冷間圧延後の焼鈍条件が重要であり、その影響を検討した報告は多い³⁾。しかしながら、鋼板を焼鈍温度に保持するまでの加熱速度の影響について検討した報告は少ない。そこで本稿では、ミクロ組織に及ぼす焼鈍前加熱速度の影響について検討した結果を報告する。

1. 実験方法

0.07mass% C-2.3mass% Mn-0.02mass% Nbの化学成分を有する鋼を溶製し、これを熱間圧延、および冷間圧延を行うことによって熱処理実験用の試験片を準備した。熱間圧延における加熱条件は、Nb炭化物をいったん十分に溶解するため1,250℃で30分間保持とし、熱間圧延後のミクロ組織はフェライト＋パーライト組織となるよ

うに巻取温度を調整した。その後、酸洗を行って冷延率50%で冷間圧延を行い板厚1.6mmの熱処理実験用試験片を作製した。

熱処理実験は、フェライトとマルテンサイトおよびベイナイトによるミクロ組織の複合化を想定し、それらミクロ組織が得られやすい溶融亜鉛めっきラインを前提とした条件で行った(図1)。焼鈍温度は供試鋼のAc3点(820℃)以上である单相域温度(860℃)とし、その温度で60秒間保持した。焼鈍温度までの加熱速度は3～12℃/sの間で変化させ、保持後は加熱速度にかかわらず一定条件で処理を行った(熱処理実験1)。熱処理後の試験片に対して板厚 $t/4$ 位置における圧延方向断面のミクロ組織観察(光学顕微鏡)および電界放射型電子プローブマイクロアナライザ(Field Emission-Electron Probe Micro Analyzer, 以下FE-EPMAという)により元素分布状態を調査した。

さらに、加熱過程でのミクロ組織変化を観察するため、1℃/sおよび20℃/sの加熱速度で700℃、750℃さらには800℃まで加熱した後、直ちに40℃/sで急冷する熱

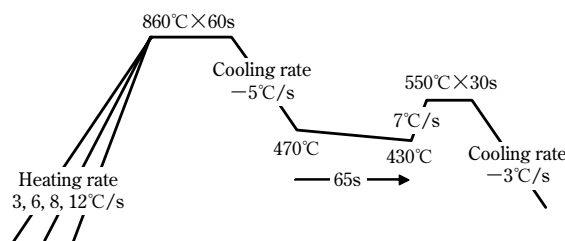


図1 熱処理条件

Fig. 1 Heat treatment conditions

*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部 *2 鉄鋼事業部門 技術開発センター薄板開発部 (現 鉄鋼事業部門 薄板商品技術部)

処理実験(焼鈍実験2)を行った。熱処理後の試験片に対して熱処理実験1と同様のマイクロ組織観察および元素分布状態を調査した。

2. 実験結果

2.1 加熱速度による機械的特性およびマイクロ組織の変化：熱処理実験1

図2に示すように種々の加熱速度で熱処理をした試験片の機械的性質は、加熱速度の変化に対して降伏強度(YS)と降伏比(YR)が顕著な変化を示した。また、図3に示すように、加熱速度の変化に応じてマイクロ組織にも変化が観察された。すなわち、加熱速度が遅い場合、速い場合と比較してレペラ腐食で白く見えるマルテンサイトの分率が多くなる傾向が見られた。このように、加熱速度が変化することによって、その後の熱処理条件が同じであっても得られる機械的性質やマイクロ組織が変化した。

これら試験片に対してFE-EPMAによりC、Mnの濃度分布を測定した。図4に示すように、Cはいずれの加熱速度においても濃化部が形成されていた。一方でMnは、遅い加熱速度(3°C/s)では、図中の点線で囲まれたところに代表されるような1μm程度の大きさで濃化が起こっていた。しかしながら、速い加熱速度(12°C/s)ではそのようなMn濃化は見られなかった。このように、加熱速度は熱処理後の試験片の機械的性質やマイクロ組織、さらにマイクロ組織中のMn分布に強い影響を及ぼしていた。

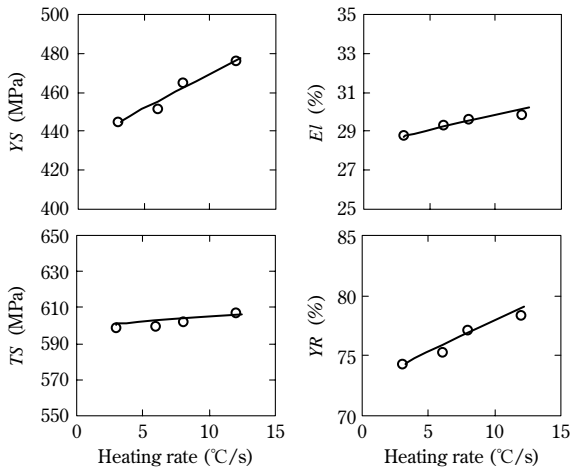


図2 複合組織鋼板の機械的性質におよぼす加熱速度の影響
Fig. 2 Effect of heating rate on mechanical properties of multiphase steel sheet

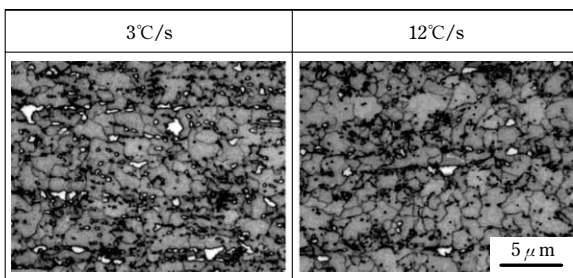


図3 焼鈍後のマイクロ組織におよぼす加熱速度の影響
Fig. 3 Effect of heating rate on microstructure after heat treatment

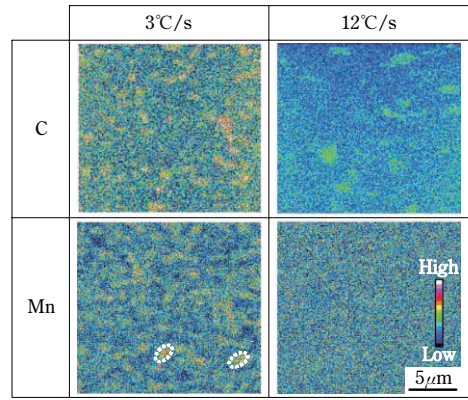


図4 CおよびMn分布状態におよぼす加熱速度の影響
Fig. 4 Effect of heating rate on C and Mn distribution

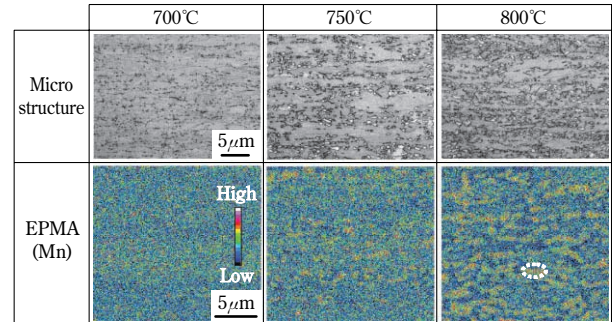


図5 加熱過程(1°C/s)におけるマイクロ組織およびMn分布状態の変化
Fig. 5 Change of microstructure and Mn distribution during heating with 1°C/s

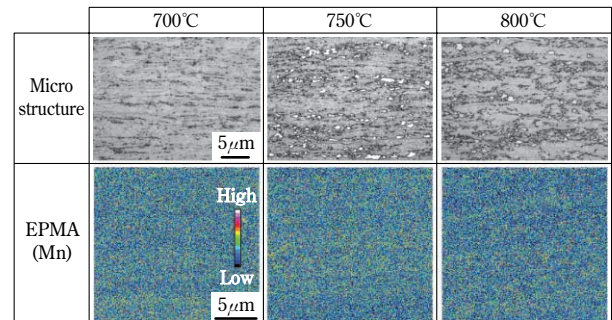


図6 加熱過程(20°C/s)におけるマイクロ組織およびMn分布状態の変化
Fig. 6 Change of microstructure and Mn distribution during heating with 20°C/s

2.2 加熱過程におけるマイクロ組織変化とMn分布状態：熱処理実験2

加熱過程でのマイクロ組織変化およびFE-EPMAによるMn分布状態の変化を調査した結果を示す。加熱速度が遅い場合(図5)では、マイクロ組織中にマルテンサイトが観察される750°C以上に加熱して急冷した試験片においてMn濃化が生じていた。このことからMn濃化は、少なくとも加熱過程においてオーステナイト変態が生じる温度域で生じていたと推定される。一方、加熱速度が速い場合(図6)は、オーステナイト変態が生じる温度域まで加熱してもMn濃化は生じていなかった。

以上のことから本実験条件においては、Mn濃化が加熱過程で発生し、かつ加熱速度の遅い場合にオーステナイト変態が生じる温度域(二相域)で生じていたと判断した。

3. 考察

3.1 Mn 濃化とマイクロ組織の関係

オーステナイト中の Mn 拡散係数は非常に小さく⁴⁾、加熱過程でいったん形成された Mn 濃化は、その後のオーステナイト温度域での保持においても容易には解消されず、焼鈍後の冷却過程に引継がれると考えられる。

ここで、冷却過程におけるマイクロ組織変化を考えると、冷却停止温度である 470℃ までは主にオーステナイトはフェライトに変態し、冷却停止温度以降 (470~430℃) においては、フェライトへ変態しなかった未変態オーステナイトがベイナイトに変態する。ここでオーステナイト中の Mn 量が増えると、フェライトへの変態やベイナイトへの変態が遅延する⁵⁾。そのため、Mn 濃化が生じたオーステナイトは、濃化していないオーステナイトよりも変態に時間を要するため、最終的に未変態のまま Ms 点以下の温度まで冷却されてマルテンサイトとなる。したがって、Mn 濃化が生じた場合は、生じなかった場合と比較してマイクロ組織中のフェライトやベイナイトが減少し、マルテンサイトが増加する傾向を示すと考えられる。このことは図 3 に見られたマイクロ組織の変化と一致する。

須藤らは^{6), 7)} フェライト、ベイナイトおよびマルテンサイトを含むマイクロ組織において、ベイナイトに対してマルテンサイト比率が相対的に増えることによって降伏比が低下することを報告している。図 2 に見られた降伏比の変化は、加熱速度が遅いほど、マルテンサイトが増加しベイナイトが減少したことを反映したものと考えられる。

3.2 Mn 濃化の発生メカニズム

2.2 節で説明したように、Mn 濃化は比較的遅い加熱速度で二相域温度以上において形成される。そこで、700℃ から 800℃ に加熱する過程において Mn の移動可能な距離として、フェライト中の Mn 拡散係数⁴⁾ からこの温度間での平均自由行程を計算した。その結果を図 7 に示す。当然のことながら加熱速度が遅いほど Mn の拡散距離は長くなり、加熱速度 3℃/s での拡散距離は 12℃/s

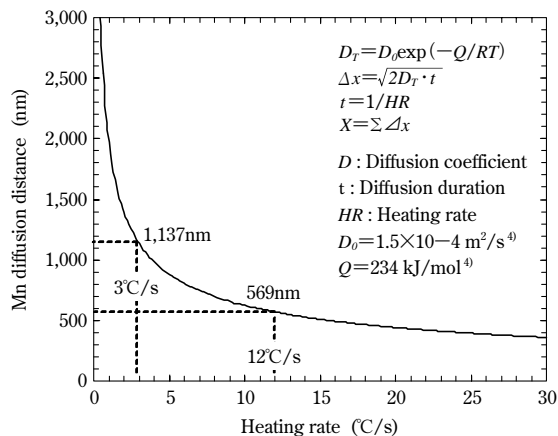


図 7 700℃ から 800℃ までの温度域における加熱速度とフェライト中の Mn 拡散距離の関係

Fig. 7 Relationship between heating rate from 700℃ to 800℃ and Mn diffusion distance in ferrite

での 2 倍程度となった。一方で、加熱途中で試験片を急冷することで、加熱過程でのオーステナイト量を測定すると、図 8 に示すように加熱速度 12℃/s では短時間で変態が進行していたが、3℃/s では 12℃/s より 3 倍以上の時間をかけてゆっくりと変態が進行していた。

温度が上昇しフェライトからオーステナイトへの変態が開始されるとフェライト中の Mn はオーステナイトへ分配する。このときオーステナイト変態速度 (フェライトーオーステナイト界面移動速度) が速いと、フェライトからオーステナイトに Mn が分配することなく変態が進行することになる (図 9 (a))。一方で加熱速度が遅く

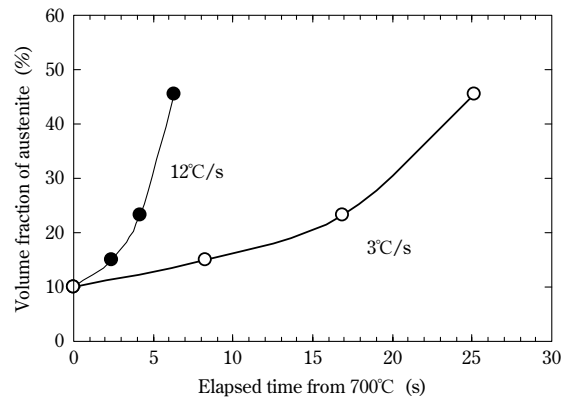


図 8 加熱過程でのオーステナイト量に及ぼす加熱速度の影響
Fig. 8 Effect of heating rate on volume fraction of austenite during heating

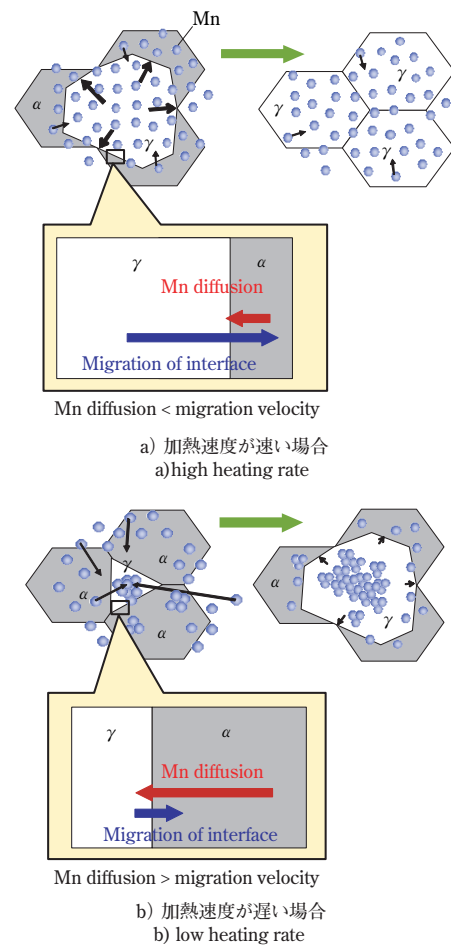


図 9 連続焼鈍時における Mn 濃化形成の模式図

Fig. 9 Schematic of formation of Mn micro-segregation during continuous annealing

なると、図7に示すようにMnの拡散距離が大きくなる
うえ、界面の移動速度が緩やかなため、結果としてオーステナイトへのMn分配が促進されると考えられる(図9
(b))。本稿の実験結果において加熱速度が遅い場合にのみMn濃化が観察されたのはこのためと考えられる。
ただし、本稿の供試鋼はNbを含有しているため組織が微細化しており、組織が微細化していない場合と比べてフェライトからオーステナイトへの拡散距離が短くなっていることがMn濃化部の形成に寄与している可能性があり、今後の検討課題である。

むすび＝冷間圧延後の鋼板をオーステナイト単相域まで加熱し焼鈍する熱処理において、焼鈍前加熱速度が熱処理後のミクロ組織に及ぼす影響を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 加熱速度は熱処理後のミクロ組織に影響を及ぼし、加熱速度が遅くなると、速い場合と比較してミクロ組織中のマルテンサイトが増加する。
- (2) マルテンサイトの増加は加熱過程で生じるオーステナイトへのMn濃化が関与している。Mn濃化が生じると、その後の冷却過程でオーステナイトのフェライトやベイナイトへの変態が遅延し、未変

態のままMs点以下まで冷却されるオーステナイトが増え、それらがマルテンサイトとなるためと考えられる。

- (3) オーステナイトへのMn濃化は加熱速度が遅い場合に生じやすい。その理由は、加熱速度が遅いとフェライト/オーステナイト界面移動速度が緩やかとなり、かつフェライト中のMn拡散距離が大きくなるため、フェライトからオーステナイトへのMn分配が進むためと考えられる。

本知見は、高強度冷延鋼板やめっき鋼板の複合組織制御技術として重要であり、これら知見を活用し高性能な高強度鋼板の開発を進めていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブッカー第3版一，pp.1-23.
- 2) 自動車用材料共同調査研究会編：ハイテンハンドブック，pp.53-56.
- 3) 中沢 吉ほか：鉄と鋼，Vol.68, No.9 (1982)，p.1263.
- 4) 日本金属学会編：金属データブック改訂4版，(2004)，p.21.
- 5) Bertram Ehrhardt et al.：AHSS PROCEEDINGS, (2004)，p.39-50.
- 6) 須藤正俊ほか：鉄と鋼，Vol.68, No.9 (1982)，p.1185.
- 7) M. Sudo et al.：Trans. ISIJ, Vol.21 (1981)，p.820.