

熱延鋼板端部の混粒組織制御

脇田 淳一*・土師 純治*・河野 治*・中本 武広*²・上尾 英孝*²・高橋 学*³・江坂 一彬*⁴

Control of Duplex Grain Structure at Edge of Hot Rolled Steel Sheets

*Jun-ichi WAKITA, Junji HAZI, Osamu KAWANO, Takehiro NAKAMOTO, Hidetaka AGARIO,
Manabu TAKAHASHI and Kazuyoshi ESAKA*

Synopsis : The conditions which prevent the occurrence of duplex grain structure of hot rolled steel sheets have been studied by using a model which can predict the strain induced transformation of ferrite from hot worked austenite. The obtained results are the following.

The occurrence of duplex grain structure depends upon the temperature schedule during finish rolling and it occurs in case that the sum of the consumption of fractional incubation time becomes 1.0 before the last reduction of finish rolling. The critical temperature for preventing the duplex grain structure reduces with increasing C and Mn, reducing the strip thickness and decreasing the rolling speed. The close agreement between these tendencies and the values calculated by a newly developed model to prevent the duplex grain structure has been obtained. On the basis of these results, a control technique of edge heating machine for preventing the duplex grain structure has been developed.

Key words : strain induced transformation ; incubation time ; recrystallization ; low carbon steel ; duplex grain structure ; simulation ; modelling ; hot rolling.

1. 緒言

低炭素鋼の熱間圧延の際、仕上圧延温度の低下にともないエッジ表層部から粗大なフェライトが発生し、板厚方向に粗大粒と整粒の二層組織、いわゆる混粒組織が発生する事がある。この混粒は鋼板の延性劣化の原因になり、機械加工時の耳割れや冷間圧延での形状悪化をもたらす。混粒組織は仕上圧延中にフェライト変態が開始し、そのフェライトが充分再結晶せずに低炭素鋼特有の粒成長をおこし粗大化したものと考えられている。そこで従来から混粒防止のためには仕上温度管理が必須とされ、その下限温度として化学成分の関数として実験的に決定された「静的な変態点」を基準として設定するのが通常であった。しかし変態点は正確には、熱間加工時のオーステナイト粒径の変化や加工ひずみの変化等に依存する動的なものである。よって混粒を完全に防止するためには、これらの点を考慮して精度良く変態点を予測する技術の確立が必要である。筆者らは既に熱間圧延工程とその後の冷却工程に適用できる一貫材質予測モデルを作成し¹⁾、さらにその後そのモデルを改良し、変態域圧延時のフェライト変態の開始と進行を精度良く予測できるモデルを報告した²⁾。このモデルは上記の動的な変態点の予測を可能にし、従来の静的な変態点管理に代

わる新しい変態点予測モデル、すなわち混粒発生予測モデルとして使えるはずである。

一方、この混粒発生防止のための有力な設備であるエッジヒーターは、現在国内の主要なホットストリップミルのほとんどに導入され今や必須の設備となっている。このハード設備としてのエッジヒーターとその制御ソフトとしての混粒発生予測モデルの組み合わせは、コイル長手方向に昇温量を可変とするいわゆるインコイル制御を可能とすることから、高加速圧延ミルにおいても、加熱不足あるいは無駄な加熱を極限にまで削減してコスト的にも最適な混粒発生防止技術を提供することができる。本報告は大分製鉄所のホットストリップミルにおいて確立された、エッジヒーターを用いた熱延鋼板エッジ部の混粒発生防止技術について述べるものである。

2. 混粒発生の予測

2・1 混粒発生予測モデル

混粒発生予測モデルは基本的に二つのモデルから構成されている。一つはオーステナイトの再結晶を予測するモデルであり、もう一つはフェライトの変態を予測するモデルである。この内特に重要なのはフェライト変態予測モデル

平成7年4月6日受付 平成7年5月26日受理 (Received on Apr. 6, 1995; Accepted on May 26, 1995)

* 新日本製鐵(株)大分技術研究部 (Oita R&D Lab., Nippon Steel Corp., 1 Oaza-Nishinosu Oita 870)

* 2 新日本製鐵(株)大分製鐵所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)

* 3 新日本製鐵(株)大分技術研究部 (現: 技術開発企画部) (Oita R&D Lab., now Technical Development Div., Nippon Steel Corp.)

* 4 新日本製鐵(株)大分技術研究部 (現: 名古屋製鐵所) (Oita R&D Lab., now Nagoya Works., Nippon Steel Corp.)

であるが、これは式(1)に示すJohnson-Mehl型のモデルを用いている。

$$X = 1 - \exp\{-K(T) \cdot (t - \tau_p)\} \dots\dots\dots (1)$$

ここでXはフェライト変態率、K(T)は変態速度係数、 τ_p は潜伏期である。また、加工による変態の促進効果については種々報告があるが³³⁾⁻⁶⁾、本報告ではK(T)、 τ を式(2)、(3)、(4)と定式化して用いた¹⁾²⁾。

$$K(T) = \xi \cdot k(T) \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_p = \tau / \xi \dots\dots\dots (3)$$

$$\xi = \frac{\{2.24/d \cdot q + 0.114(\Delta\epsilon)^2\} \cdot \{1 + 4\Delta\epsilon\}}{2.24} \dots\dots\dots (4)$$

ここでk(T)、 τ は無加工材の変態速度係数、潜伏期である¹⁾²⁾。また、dはオーステナイト粒径、 $\Delta\epsilon$ は変態直前にオーステナイト粒が保持するひずみであり、qは $\Delta\epsilon$ の関数として幾何学的に決定される係数である²⁾⁵⁾。加工による変態促進効果は ξ というパラメータ一つによって表示される¹⁾²⁾。ところで、dと $\Delta\epsilon$ はオーステナイトの再結晶モデル¹⁾により計算される。すなわちオーステナイトの再結晶モデルとフェライトの変態モデルをこれら2つの因子で結びつけることにより、加工による変態促進効果を定量的に記述することができるわけである。ところで上述した動的な変態点は微小時間における潜伏期の消費率(dt/ τ_p)を熱履歴に沿って加えたその総和が1になった時に変態が開始するという、式(5)に示すいわゆるScheilの法則⁷⁾を利用して求めた。

$$\int \frac{dt}{\tau_p} = 1 \dots\dots\dots (5)$$

なお実際の計算に当たっては、微小時間におけるdと $\Delta\epsilon$ の変化を計算しつつ、熱履歴に沿って式(5)の左辺のいわゆる潜伏期の消費率を計算することにより精度の良い変態点の予測が可能となる。

2・2 モデルによる混粒発生予測

2・2・1 実験方法

Table 1に供試鋼の化学成分を示す。仕上げ板厚は3.0, 2.0, 1.8, 1.2mmの4水準で、3.0mm材は一定速度圧延のみ、2.0mm材と1.8mm材と1.2mm材については加速圧延の試験も行った。次に混粒発生予測モデルによるシミュレーション計算は、鋼板の板厚方向に10分割、幅方向はエッジから10, 20, 40, 60, 80, 100mmの交点位置で行った。各位置の熱履歴は、大分製鉄所で開発した温度モデルでの計算値を使用した。この計算温度は、実機実験において製造ライン温度計により実測された、幅センター部における粗圧延終了温度、仕上圧延の出側の仕上温度計位置での表面

Table 1. Chemical compositions of steel.(mass%)

C	Mn	Si	P	S	T.Al	T.N
0.045	0.28	0.009	0.016	0.011	0.020	0.0031

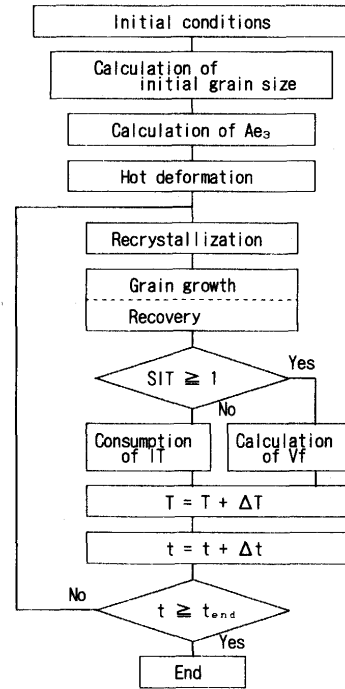


Fig. 1. Flow chart for calculation of sum of the consumption of fractional incubation time.
 IT: incubation time
 SIT: sum of the consumption of fractional incubation time
 Vf: volume fraction of ferrite

温度(以下、仕上温度(FT7)と表す)、およびサーモトレーサーによるエッジ100mm点での仕上表面温度の実測値と最大±10°Cの精度で一致した。モデル計算のフローをFig. 1に示す。まず加熱炉の加熱条件を使って加熱オーステナイト粒径予測モデル¹⁾により初期粒径を計算する。その後、粗及び仕上圧延の条件からオーステナイトの再結晶を計算する。圧延温度が二相域に入るとオーステナイトの再結晶、粒成長の計算とともにフェライト変態の潜伏期の消費を計算し、式(5)より変態点を求めた。このような計算は上記の鋼板の交点位置のそれぞれについて行った。計算に当たっては、圧延により付与されるひずみは板厚方向、幅方向で均一としたが、鋼板の各部位の熱履歴の相違により、ひずみの回復や再結晶挙動が異なることになる。そしてその結果としてフェライトの変態挙動が異なり、混粒が発生する部位と発生しない部位ができることになる。なお式(5)により潜伏期の消費率を計算に当たっては以下の仮定を前提とした。

- (1)潜伏期の消費中に温度が Ae_3 以上になった場合は、それまでのフェライト変態の潜伏期の消費はそのまま保持される。
- (2)フェライトからオーステナイトへの逆変態は考慮しない。

2・2・2 実験結果と考察

(1)混粒発生温度に及ぼす板厚の影響

Fig. 2は3mm材を700m/min一定速度圧延した場合の、コイル長手方向ミドル代表部エッジ60mm点の厚み方向1/10

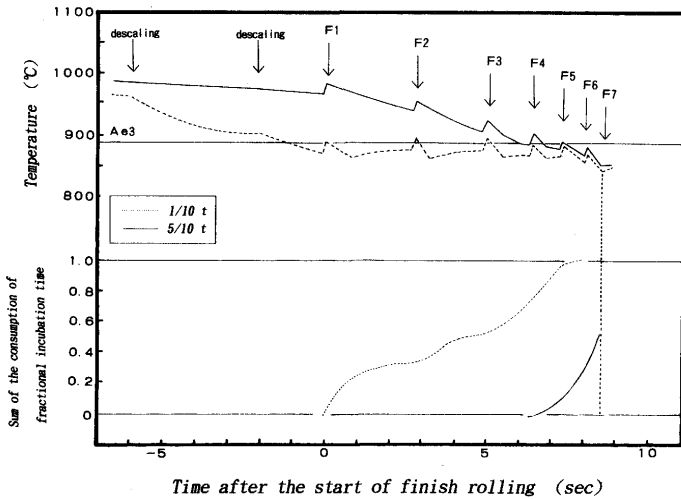


Fig. 2. Effect of temperature schedule on the consumption of fractional incubation time.

tと中心部(5/10t)について計算熱履歴を示したものである。仕上圧延前にデスケリングを2回行っているためその直後に1/10tの温度は大きく低下している。また7パス圧延の各パス直後に温度が上昇しているのは加工発熱の影響である。供試鋼の Ae_3 はKirkaldyらの式⁹⁾で計算すると880°Cであり、1/10tは仕上第一段(F1。以下n段目をFnと表す)圧延直後から二相域圧延となっている。一方、厚み中心部はF4以降で Ae_3 を切っている。Fig. 2には潜伏期の消費率も示してあるが、1/10tと中心部では大きな違いがある。1/10tはF5~F6でフェライト変態が開始するのに対し、中心部はF7でも潜伏期の消費率が1にならず、変態は圧延中に起きない。この位置の鋼板のミクロ組織をFig. 3に示す。1/10tは明らかに圧延中にフェライトが変態開始しており、粗大なフェライトを含む混粒組織となっている。一方、5/10tは健全な整粒組織である。この様にモデルにより混粒組織の発生が予測できるわけであるが、ここで注意すべきことは、混粒発生はいわゆる仕上温度だけでは制御できないということである。Fig. 2からわかるように、1/10tと5/10tの仕上温度はほとんど同一である。それにもかかわらず混粒発生状況に差があるということは、成分のみの関数として決定された変態点による混粒制御の限界を示すものといえる。なお幅方向のその他の位置においても同様な方法で、精度良く混粒発生を予測できることが判明した。

次にFig. 4は、2mm材と1.2mm材について圧延速度を720 m/min一定として圧延した場合の鋼板エッジ10mm点での混粒率を、当該部の計算温度(仕上出側のライン温度計位置でのエッジ10mm点の計算温度で FT_{E-10} と表す)で整理したものである。ここで混粒率とは、Fig. 2のような粗大粒が発生した領域の厚みの全厚に対する割合をいう。Fig. 4からわかるように、温度低下とともに混粒率が増加するが、2mm材に比較して1.2mm材の方が混粒発生温度域が低いのが特徴である。混粒観察部の1/10t~5/10tの5ヶ所について、表面

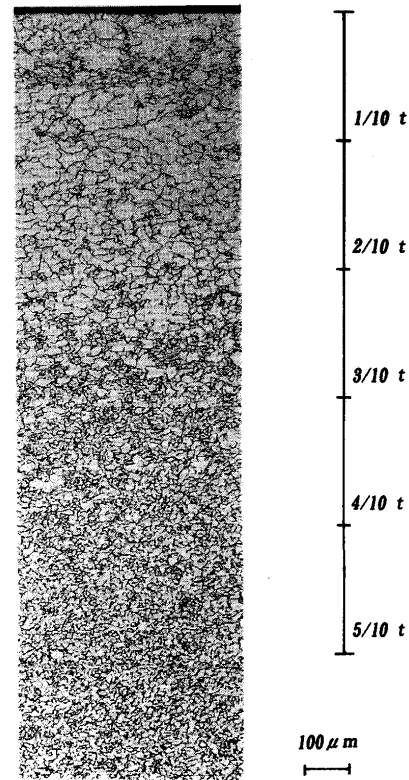


Fig. 3. Difference of microstructures from the surface to the center of thickness.

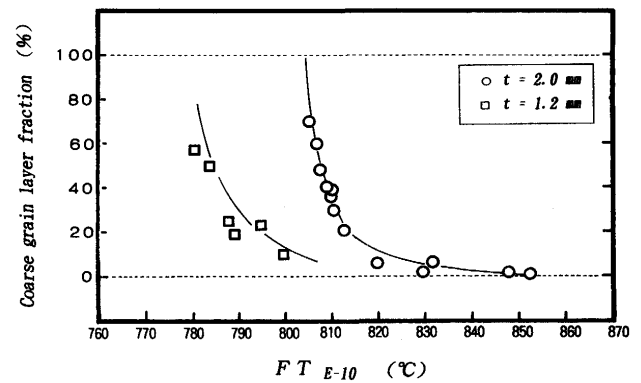


Fig. 4. Relation between coarse grain layer fraction and finish rolling temperature. lines: values calculated by eq. (5) plots: experimental values

温度を種々変えた時の熱履歴を計算で求め、混粒発生予測モデルによる計算を行い、式(5)の潜伏期の消費率が1になる点を滑らかに結んだのがFig. 4の実線である。ここでもモデルは精度良く混粒発生を予測できているといえる。

混粒発生温度が板厚により異なるのは次のように説明できる。Fig. 5はエッジ10mm点の板厚方向2/10tの位置における圧延中の計算熱履歴を2mm材と1.2mm材について比較して示したものである。いわゆる仕上温度を780°C一定とした場合を示したが、これから明らかにわかるように、同一仕上温度を確保するためには、板厚が薄い方が圧延開始温

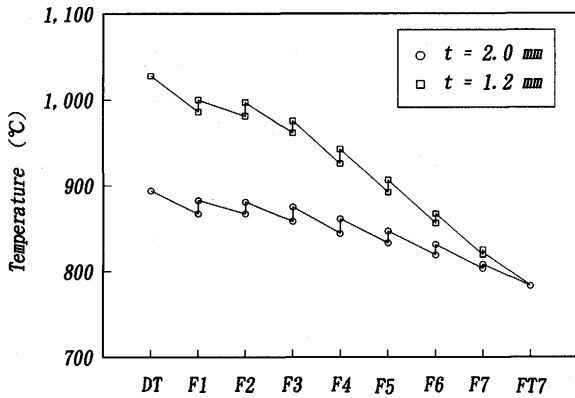


Fig. 5. Effect of strip thickness on the temperature schedule for finish rolling.
DT: Temperature just after descaling

度を高くする必要がある。これは各スタンド間での鋼板の冷却速度が板厚が薄い程大きいためである。前述したように供試鋼の A_{e3} は 880°C であるので、2mm材はF1以降、1.2mm材はF6以降で潜伏期の消費が始まる。このように同一仕上温度条件で考えると、1.2mm材よりも2mm材の方がより前段から潜伏期の消費が開始されるため、変態点すなわち混粒発生温度が高くなるといえる。

(2) 混粒発生温度に及ぼす圧延速度の影響

薄手材の圧延においては、圧延効率の向上と圧延中の鋼板の温度低下の抑制のため、加速圧延を行うのが通常である。よってコイル全長にわたって混粒発生を防止するためには、混粒発生温度に及ぼす圧延速度の影響を明確にしておく必要がある。Fig. 6は2mm材のエッジ10mm点における混粒率を同部計算表面温度で整理し、圧延速度の影響を明確にしたものである。これからわかるように、圧延速度が速くなると混粒率は高くなり、混粒を防止するために確保すべき仕上温度も高くなる。Fig. 7は2mm材のエッジ10mm点の厚み方向1/10tの位置での温度履歴と潜伏期消費が圧延速度によってどのように異なるかを示したものである。な

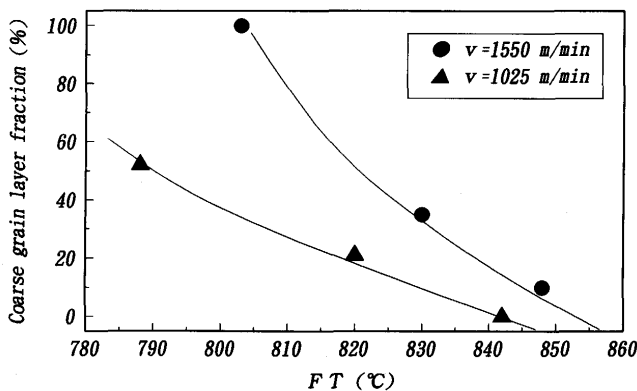


Fig. 6. Effect of rolling speed on coarse grain layer fraction (t=2.0mm).
plots: experimental values

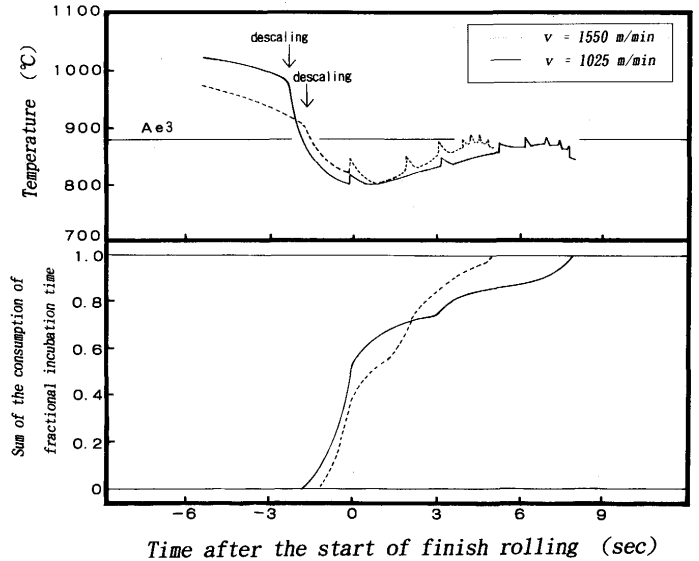


Fig. 7. Effect of rolling speed on the consumption of fractional incubation time.

おこの図では潜伏期の消費率がF7でちょうど1になる条件にしている。まず熱履歴であるが、これは高速圧延も低速圧延も、デスケリングにより大きく温度低下し、その後加工発熱により徐々に昇温するパターンは共通している。しかし、圧延が後段になると、板厚低減による冷却速度の上昇と圧下率の減少で加工発熱の効果が低減し、あるところでピークをとるようになる。例えばFig. 7でいえば、 $v=1550\text{m/min}$ ではF6以降で、 $v=1025\text{m/min}$ ではF5以降で明らかに温度は低下している。このようなピークを示す位置は、低速圧延になればなる程前段に移行する。またこのピーク温度は圧延速度が速いほど高くなるのが容易に推定できる。一方、潜伏期の消費状況を比較すると、圧延の前段は高速圧延も低速圧延もあまり差がないといえる。しかし後段になると高速圧延の方が潜伏期の消費速度があまり変わらずにその消費を完了するのに対し、低速圧延の場合は消費速度が遅くなり消費の完了に要する時間が長くなっている。しかも高速圧延の方が圧延後段の全般において温度が高いことを考えると、これは高速圧延によりひずみの蓄積効果が顕著になったことが原因と推定できる。このように高速圧延は加工発熱が大きく、温度が比較的高いにもかかわらず潜伏期の消費速度が速いという特徴があり、このことが混粒発生温度を高くしていると考えられる。

3. エッジヒーターによる混粒発生の防止

以上述べたように混粒は、熱履歴に沿って潜伏期の消費率を計算し、仕上圧延中に消費率が1になるかどうかでその発生が予測できる。この方法を使って、混粒発生を避ける作業方法を提示することができる。それがここで述べる

エッジヒーターのインコイル制御による混粒発生防止方法である。大分製鉄所の場合エッジヒーターは仕上圧延のデスクレーン装置の前に設置されている。このエッジヒーター

ター通過直後の鋼板の温度を与えると、仕上温度計位置の温度 (FT7) は、ある一定の操業条件の下では上述の温度モデルにより予測できる。ここで予測された熱履歴に基づき潜伏期の消費を計算し、混粒発生を防止するための限界仕上温度 (FT_e) を求めることができる。このFT_eは混粒発生を防止するために確保すべき仕上温度の下限値といえる。エッジヒーターはこのFT_eを確保するために必要な最小限の昇熱を行えばよい。ところでこのFT_eは前節で述べたように、鋼板の化学成分、板厚、圧延速度によって変化するが、混粒発生予測モデルによるシミュレーション計算値を示したのがFig. 8～Fig.10である。混粒が問題となる低炭素鋼の成分範囲でC, Mn量を変化させたが、この範囲ではFT_eの変化は小さいもののいずれもほぼ直線関係を示すことから、FT_eは式(6)に示す簡単な1次式で近似的に表すことができ、最小二乗法でその係数を決定した。

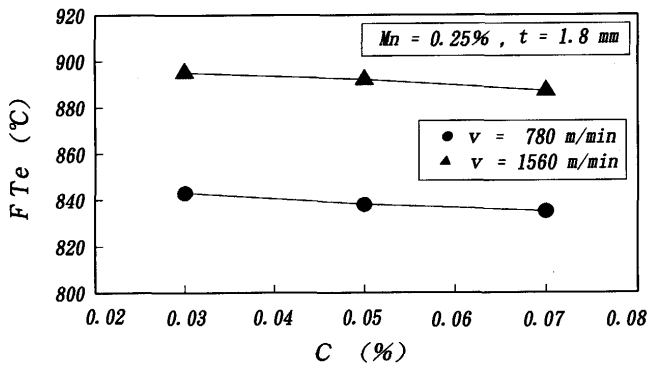


Fig. 8. Effect of C content on the finishing temperature for preventing duplex grain structure, FT_e. plots: values calculated by eq. (5)

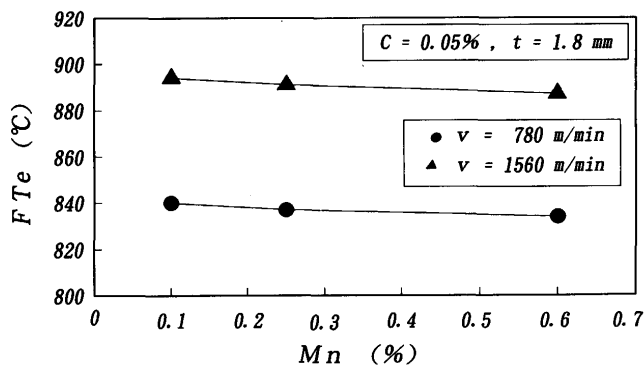


Fig. 9. Effect of Mn content on the finishing temperature for preventing duplex grain structure, FT_e. plots: values calculated by eq. (5)

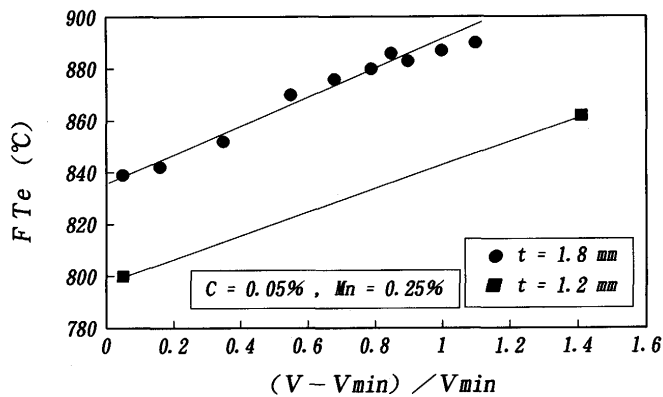


Fig. 10. Effects of rolling speed and strip thickness on the finishing temperature of finish rolling for preventing duplex grain structure, FT_e. plots: values calculated by eq. (5)

$$FT_e = a_1 + a_2 \cdot [C] + a_3 \cdot [Mn] + a_4 \cdot t + a_5 \cdot \frac{(V - V_{min})}{V_{min}} \dots \dots \dots (6)$$

ここでtは板厚、Vは圧延速度(最終圧下スタンドF7の出側速度)であり、V_{min}は圧延速度の最小値である。またFT_eが与えられた時のエッジヒーター位置の温度を計算する簡易式も別途作成した。エッジヒーター前の温度をライン温度計にて計測し、この簡易式で計算した温度との差が必要昇温量である。このような計算をコイル内で細かなピッチで行い、エッジヒーターのパワーを圧延中にリアルタイムで変更していく制御システムを構築した。Fig.11にこの方法で混粒発生を制御した一例を示す。図中の実線は式(6)で予測されたFT_eである。この限界線以上の温度を確保する限り混粒は皆無であり、この限界線以下になった時初めて混粒が発生することがわかる。

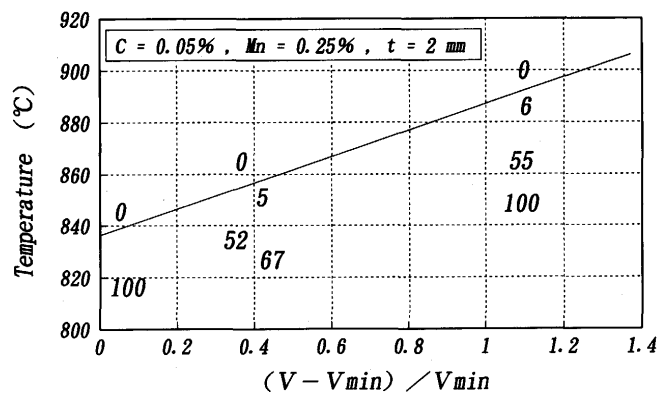


Fig. 11. Control of duplex grain structure by eq. (6) line: limiting temperature for preventing duplex grain structure calculated by eq. (6) values: observed coarse grain layer fraction (%)

4. 結言

熱延鋼板のエッジ部の混粒発生条件について、オーステナイトの再結晶モデルと、フェライトの変態モデルを組み合わせた材質予測モデルを使って検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 混粒は仕上圧延中の熱履歴に依存し、いわゆるフェライトの潜伏期の消費率が最終仕上圧下以前に1になった場合に発生する。

(2) 混粒が発生する限界の仕上温度は、C, Mnが高いほど、板厚が薄いほど、圧延速度が遅いほど低くなり、この傾向はモデルによる予測と精度良く一致した。

これらの知見を基礎に、混粒発生限界仕上温度の簡単な予測式を求め、エッジヒーターによる混粒発生防止モデル

を作成した。

終わりに、本研究に対し終始ご指導、ご助言をいただいた元新日本製鐵(株)第一技術研究所関根寛博士に心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) 江坂一彬, 脇田淳一, 高橋 学, 河野 治, 原田慎三: 製鉄研究, **321** (1986), p.92
- 2) 脇田淳一, 土師純治, 河野 治, 高橋 学, 江坂一彬: 鉄と鋼, **81** (1995), p.649
- 3) 田中智夫, 田端綽久: 鉄と鋼, **64** (1978), p.1353
- 4) 松浦清隆, 伊藤洋一, 成田敏夫: 鉄と鋼, **79** (1993), p.968
- 5) 梅本 実, 大塚秀幸, 田村今男: 鉄と鋼, **70** (1984), p.557
- 6) 梅本 実, 大塚秀幸, 田村今男: 鉄と鋼, **70** (1984), p.238
- 7) E.Scheil: Arch. Eisenhüttenwes., **8** (1935), p.565
- 8) J.S.Kirkaldy and E.A.Baganis: Metall. Trans. A, **9A** (1978), p.495