

討19

圧延および冷却条件の制御による熱延鋼板材質の最適化設計

川崎製鉄 技術研究所 伊藤 庸 坂元祥郎 佐伯真事 船越督巳
水島製鉄所 荻野泰司 齊藤吉弘 東野建夫 青柳伸男

1. 緒言

目標材質の熱延板を得る製造条件の設定手法については、従来は過去の実績からの類推や必要に応じての試行にたよっている面が多かった。しかし、この問題は要因が複雑多様でかつその影響の定量化が困難であるという制約は大きいけれども、本質的には最適化問題として取扱うべき性質のものである。

本報ではその検討に使用する目的で作成したホットストリップ仕上圧延以降の圧延条件、変態現象のシミュレーションとそれに結合した材質予測式で構成される材質設計モデルとその適用例について報告する。

2. モデルの構成

本モデルは試行錯誤形式で設定条件をインプットしてその妥当性のチェックと材質の予測を行うもので、仕上圧延セットアップモデル、オーステナイト粒度モデル、冷却-温度予測モデル、変態計算モデルおよび材質予測モデルで構成されており小型桌上電子計算機(12 KWords)用としてプログラムされている。図1にそのフローチャートを示す。

2.1 オーステナイト粒度モデル

オーステナイト粒度の予測については本来は動的再結晶、静的再結晶、未再結晶の判断を行い、それに適合したモデルを用いるべきであるが、現在は次の3種類のモデルを用意し、この中で粒径最大の値を便宜的に採用している。

(1) 動的再結晶モデル

圧延の各パスで動的再結晶が生じたとして Zener-Hollomon の変数、 $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ をパラメーターとして粒度を計算するモデルで関根らの実験結果¹⁾を数式化したものである。このモデルは成分の影響としては Nb 添加の有無しか考慮していない。

(2) 加熱実験結果を数式化したモデル

成分の異なる鋼を温度を変えて加熱し、オーステナイト粒度を調べた実験結果は数多く報告されているが、高温領域から冷却されてくるといふ条件に対応して AlN の影響を除いて解析できるデータは少ない。その中から藤田ら²⁾³⁾、荻野ら⁴⁾および西田らのデータ⁵⁾について解析を行ってモデルを作成した。なお前者の報告は、広範囲な成分について体系的に調査されているが一定長時間であり、後2者の報告は時間は変化させているがデータ数が少ないため成分と時間の交互作用は考慮していない。

(3) 未再結晶モデル

このモデルは Nb 含有鋼では約 950℃ 以下、普通鋼でも熱延過程の中、後段における未再結晶領域において、圧延によって見かけのオーステナイト粒度が小となる効果を圧下ひずみの関数として数式化したものでその係数は丸山らの報告⁶⁾を参考にして定めた。

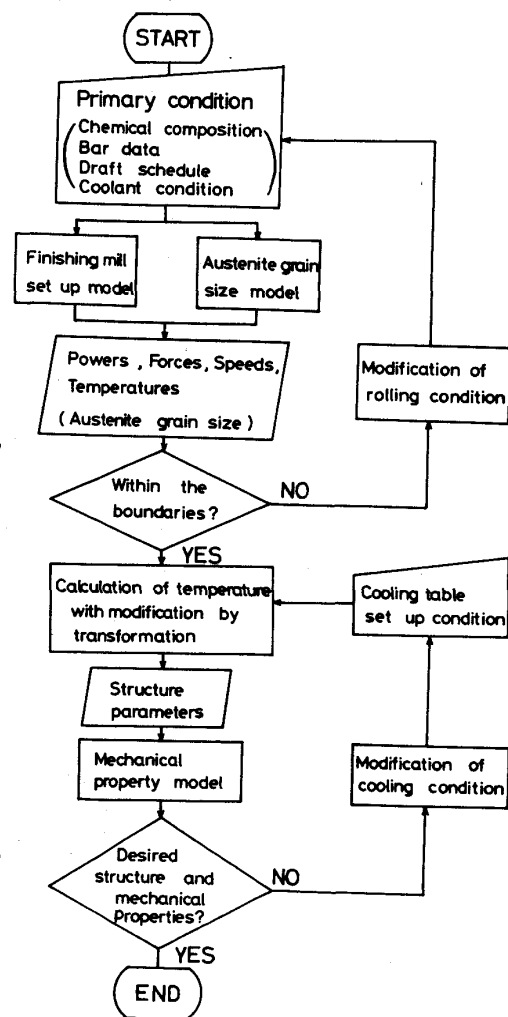


図1. シミュレーションモデルのフローチャート

2.2 仕上圧延セットアップモデル

仕上圧延条件を材質、寸法、形状、クラウンなどの製品品質を総合した最適化問題の解としてセットアップすることを目的として広範囲の圧延条件変動、圧下配分変更に対する形式の圧延荷重式、変形抵抗式⁷⁾ および温度予測式を開発し、オンラインの実機制御用として使用しているが、本モデルではその必要部分をそのまま流用している。その詳細な内容については吉田らの仕上圧延機制御用のシミュレーションモデルについての報告⁸⁾を参照されたい。

2.3 冷却モデル

仕上圧延開始から巻取までの熱履歴は設備単位長で分割した階段状の温度-時間曲線として計算する。その1ステップごとと併行して計算される変態量を用いて変態潜熱の影響の補正を行う。クーリングテーブル上の冷却モデルはオンライン計算機制御用として開発、実用化したモデル⁹⁾の空冷式を積分形式から微分形式にあらため、さらにローラテーブルへの伝熱式を付け加えたものである。なお巻取後の冷却条件については現在は一定値を与えている。

2.4 変態計算モデル

変態計算については伊藤らが開発した計算T T T曲線を利用して任意の冷却曲線に対する変態挙動を計算する手法¹⁰⁾を適用する。この計算の基礎となるT T T曲線モデルはU.S.Steel社のデータ¹¹⁾についての解析から出発しMPIEのC O T図¹²⁾に適合するように修正を加えたものを使用している。表1にモデル式とその係数を示す。このモデルによつて温度Tiにおける各相の変態量(ΔFi, ΔPi, ΔBi, ΔMi)を求め、これから次式で定義される組織パラメータを計算する。

$$\left. \begin{aligned} F &= \sum \Delta F_i, \quad P = \sum \Delta P_i, \quad B = \sum \Delta B_i, \quad M = \sum \Delta M_i \\ TF &= \sum \left(\frac{T_{P0} - T_i}{T_i} \right) * \Delta F_i, \quad TP = \dots \\ TVF &= \sum \left(\frac{T_{P0} - T_i}{T_i} \right) * \beta_n (1 + \alpha V_i) * \Delta F_i, \quad TVP = \dots \end{aligned} \right\} (5)$$

(Vi: 温度Tiにおける冷却速度, To, α: 定数)

表1 モデル式とその係数

$$\left(\frac{S - S_0}{S_n - S_0} \right) = \frac{1}{\exp(-1/2)} * \left(\frac{U - U_0}{U_n - U_0} \right)^2 * \exp \left\{ \frac{1}{2} * \left(\frac{U - U_0}{U_n - U_0} \right) \right\} \quad \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{1000}{T + 273}, \quad U_0 = \frac{1000}{T_0 + 273}, \quad U_n = \frac{1000}{T_n + 273} \\ S &= \text{Int}, \quad S_0 = \text{Int}_0, \quad S_n = \text{Int}_n \end{aligned} \right\} \quad \dots (2)$$

$$f(h=1 \text{ TO } 20) = \sum_{k=1}^{10} \{ B(h,k) * B(h,k * 10) * (0.8 - C(2)) * C(k) \} \quad \dots (3)$$

$$f(h=21) = \sum_{k=1}^{10} \{ B(h,k) * B(h,k * 10) * W \} * C(k) \quad \dots (4)$$

C(1)=1 C(2)=C%

C(3)=Mn%, C(4)=Si%

C(5)=Ni% C(6)=Cr%

C(7)=√Mo%-0.008%

IF Mo<0.09%
THEN C(7)= $\frac{10}{9}$ *Mo%

C(10)=2^(GS/2)

h	i	j	f(L)	1(Const)	2(C)	3(Mn)	4(Si)	5(Ni)	6(Cr)	7(Mo)	10(GS)	11(const)	12(C)	13(Mn)	14(Si)	15(Ni)	16(Cr)	17(Mo)	20(GS)
1	1	1	ToFS	727		-13	9	-17	22	35	0	229		-30	66	-22	-70	5	0
2	1	2	TnFS	572		-33	44	-9	25	50	-1.01	48		57	-25	-15	-15	-25	390
3	1	1	IntFS	10.13		2.50	2.84	0.46	4.80	5.90	0.0950	-192		2.80	-355	150	-300	-3.50	0.0096
4	2	1	IntnFS	-1.04		0.60	0.19	0.07	4.80	5.90	0.0380	-258		0.20	-1.10	-0.04	-2.55	-3.50	0.0210
5	1	1	ToFS	727		-13	9	-17	22	35	0	0		0	15	-5	-5	22	0
6	2	1	TnFS	572		-33	44	-9	25	50	-1.01	48		32	-20	-5	-27	-23	320
7	1	1	IntFS	10.13		2.50	2.84	0.46	4.80	5.90	0.0950	-192		10.12	-355	3.30	-3.00	4.20	0.0096
8	2	1	IntnFS	-1.04		0.60	0.19	0.07	4.80	5.90	0.0380	-258		1.31	-0.20	0.20	-2.55	2.50	0.0410
9	1	1	ToF1	727		-13	9	-17	22	35	0	0		0	15	-5	-5	22	0
10	2	1	TnF1	577		2	35	-7	53	58	-0.52	6		4	5	-5	-36	25	131
11	1	1	IntF1	10.55		6.86	3.00	1.81	4.80	12.31	0.0950	-0.03		14.08	-0.76	1.99	-3.00	-4.35	0.0096
12	2	1	IntnF1	0.15		2.00	0.19	0.07	2.65	10.57	0.0380	-0.03		1.31	-1.56	0.65	-0.98	-4.35	0.0210
13	1	1	ToBS	570		-12	16	-12	20	-22	0	107		-12	-5	-5	-5	-4.0	0
14	2	1	TnBS	485		-12	2	-7	40	-32	-0.50	107		-30	-35	-5	-36	-2	0.37
15	1	1	IntBS	352		2.14	1.07	0.05	2.30	3.10	0.0710	-5.44		-1.66	-1.64	0.40	-3.49	-3.00	0.0626
16	2	1	IntnBS	-0.96		1.30	0.30	0.02	2.20	2.20	0.0235	-1.60		-1.29	-1.64	-0.20	-2.04	-6.60	0.0248
17	1	1	ToB1	570		-12	16	-7	22	-22	0	76		-12	-5	-7	-5	-51	0
18	2	1	TnB1	488		-42	25	-7	47	-61	-0.52	76		-30	-28	-7	-40	96	0.37
19	1	1	IntB1	690		5.23	2.80	0.70	6.20	9.50	0.0710	-7.37		-0.75	-5.64	0.60	-0.90	-6.88	0.0813
20	2	1	IntnB1	-0.15		3.00	2.80	0.70	3.00	5.92	0.0235	1.98		-1.17	-5.84	0.02	-2.47	-4.00	0.0340
21	6	1,2	TmW	535	364	-32	-5	-19	-20	-16	0	-42	-82	-6	-3	-19	-10	-8	0

2.5 材質予測モデル

材質の予測には化学成分、オーステナイト粒度、組織パラメータを要因とする回帰分析可能な形式の線形モデルを用いる。図2にMPIEのCOT¹²⁾に記載されている硬度について解析した例を示す。これから本手法によって非常に広範囲の成分と冷却条件に対して、少ないパラメータでかなり高い精度が得られていることがわかる。同様に現場圧延材についてのデータを本モデルで解析して得た材質予測式についての1例を図3に示す。

3. 適用例

以上のモデルを用いて材質、熱延条件の検討を行った例について述べる。

3.1 巻取温度制御システムの問題点

従来熱延後の冷却の制御、管理は巻取温度の精度を高めることに重点がおかれてきた。図4はその目的で最終バンクで最大50℃程度の制御量をもつフィードフォワード、フィードバック制御を適用した例で、これから巻取直前の温度調整の有(HF, LF), 無(HN, LN)によって、巻取温度が同じであっても、最終組織としてはほとんど同じである高温巻取材(HN, HZ)においても中間空冷時における変態の進行による変態温度の上昇のために、さらに低温巻取材ではベイナイト量の変化がこれに加わって表2に示すように強度が低下する。この変化量は巻取温度の影響に換算して約20~40℃に相当するものでこれから見かけ上の温度精度を高める意味が薄いことがわかる。表2に示すように本モデルはこのような冷却履歴の影響の予測を可能としている。

3.2 制御冷却システム

上記の例からも示唆されるように、ホットストリップ圧延後の冷却システムはその過程で生ずる変態現象そのものを設定目標通りに制御するものでなければならない。現在水島製鉄所のホットストリップミルについては冷却速度制御を可能とする設備⁸⁾となっており、本モデルはそのオフライン検討に使用される。図5はその制御の方法を示したもので、T₂をピボット点として温度T₁, T₂, 冷却速度α₂, α₃を制御、管理することができる。その例としてフェライト-パーライト鋼でT₂をパーライト変態開始温度近傍に設定すれば、α₂によってフェライト相、α₃によってパーライト相の性質をある程度独立に制御することができる。

3.3 直接焼入れ

本モデルは過去のデータを内挿して得たものではなく、本質的に組織の変化から材質を推定するものであるため、従来の経験外の条件であっても高い精度で予測を可能としている。図4のDQ材はホットストリップミルで直接焼入れを行うことを狙って本モデルで条件を決定したもので、それに従って製造し

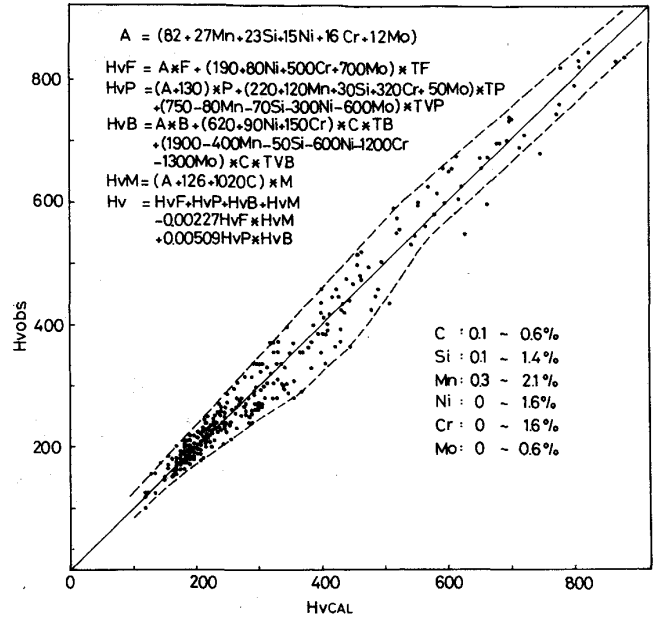


図2 硬度予測式とその精度

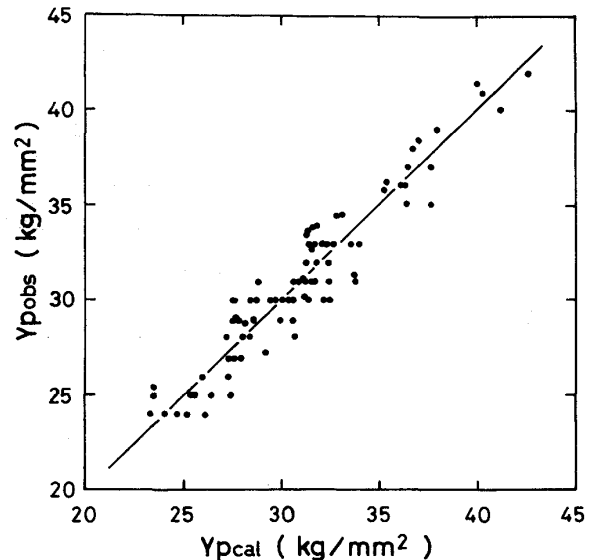


図3 降伏点の予測値と実測値の比較

た試材は、予測通りの組織（写真1）、硬度（表2）で幅、長手方向に均質な材質となった。この直接焼入材は表3に示すように焼戻し処理によって任意の温度水準を得ることができ、また延性も良好である。

4. 結言

熱延鋼板の製造条件を最適化設計する目的で開発した計算モデルとその適用例について述べた。このモデルはオーステナイト粒度予測モデル、仕上圧延セットアップモデル、冷却モデル、変態現象を定量化するモデルそして変態モデルで定量化される組織パラメータを用いた材質予測モデルで構成されており、これによって従来の巻取温度に重点を置いた試行-標準化手法から一歩進んだ制御圧延と制御冷却の組み合わせから直接焼入れに至る新しい材質設計技術の定量的な最適化検討が可能となった。

表2 強度の予測値と実測値の比較

	TS (kg/mm ²)	
	observed	predicted
HN	52.0	51.8
HF	50.2	51.0
LN	56.5	56.3
LF	53.0	54.0
DQ	H _v = 363	H _v = 354

表3 直接焼入材の機械的性質

DQ	YS _{0.05} (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	EI (%)
As Rolled	1034	1155	9.6
400°Cx1hrTemper	1013	1075	10.2
500°Cx1hrTemper	789	833	15.6

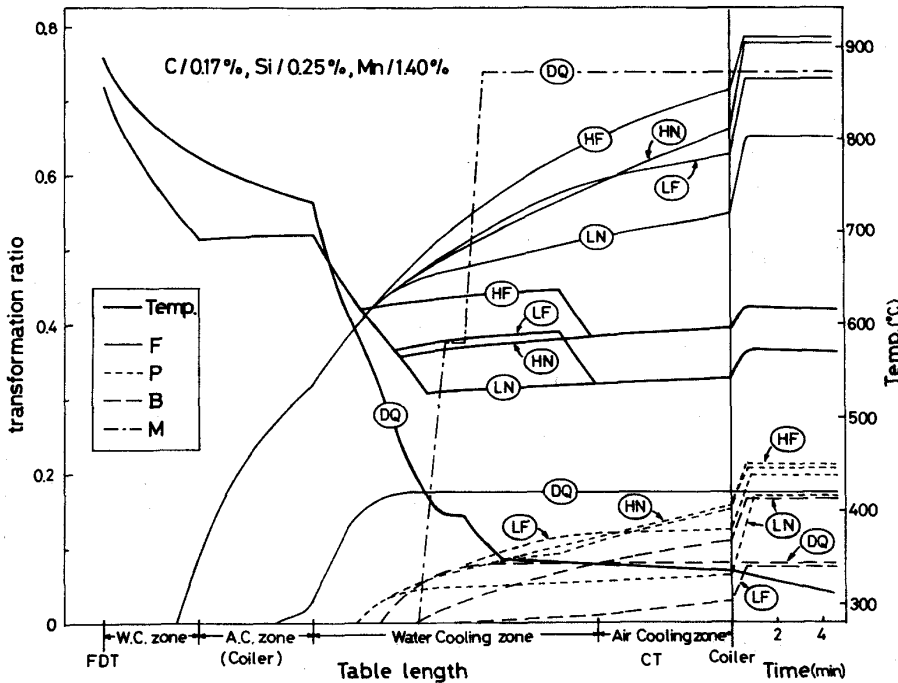


図4 冷却曲線と変態挙動の計算結果

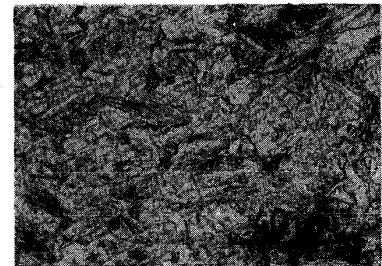


写真1 直接焼入材の組織

参考文献

- 1) 関根他；鉄と鋼，59(1973)A45
- 2) 藤田他；鉄と鋼，59(1973)764
- 3) 藤田他；鉄と鋼，59(1973)929
- 4) 荻野他；鉄と鋼，57(1971)533
- 5) 西田他；鉄と鋼，63(1977)1116
- 6) 丸山他；鉄と鋼，57(1971)S624
- 7) 吉田他；鉄と鋼，63(1977)A25
- 8) 吉田他；第30回塑性加工連合講演会発表予定
- 9) 三宅他；川崎製鉄技報，10(1978)58
- 10) 伊藤他；鉄と鋼，64(1978)S806
- 11) I-T Diagrams；U.S.Steel(1966)
- 12) Atlas zur Wärmebehandlung der Stäle, M.P.I.E (1961)

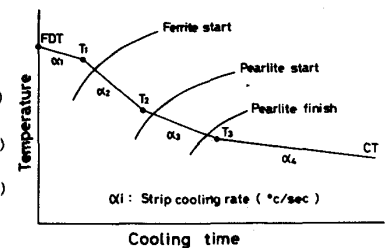


図5 制御冷却模式図