

討7 ホットストリップミル仕上圧延のセットアップに使用する 圧延荷重式と変形抵抗式についての検討

川崎製鉄(株) 技術研究所 吉田 博 伊藤 庸
水島製鉄所 ○ 浜田 至一 広瀬 勇次 須藤 象洞

1. 緒言

ホットストリップミル仕上圧延のコンピューター制御によるセットアップは、圧延機の能力から定まる制約条件下で形状、フラウンの制御さらにはAGCとの関係において選ばれる最適の荷重配分を与えるものであることが理想である。さらにその場合、潤滑油を用いた圧延あるいはNb含有鋼のコントロールローリングなどの特殊な条件についても対応し得るものであることが望ましい。これらの目的にかなったセットアップ計算システムを開発するためには、まずそれに使用する圧延荷重式と変形抵抗式がともに物理的意味が明確で発展性に富み、さらに絶対値というまでもなくその微係数まで高い精度を研っていることが必要となる。

2. 圧延荷重式の検討

2.1 Sims の圧延荷重式の数学的近似による簡略化

熱間圧延における荷重の予測は、単位幅荷重 ($P \text{ kg/mm}$)、変形抵抗 ($k \text{ kg/mm}^2$)、入側板厚 ($H \text{ mm}$)、出側板厚 ($h \text{ mm}$)、ワークロール半径 ($R \text{ mm}$)、ヘン平ワークロール半径 ($R' \text{ mm}$)、ワークロールヘン平定数 ($\alpha \text{ mm/kg}$) および圧下力関数 (Q_p) から、

$$\text{圧延荷重式} \quad P = k \cdot Q_p \sqrt{R(H-h)} \quad (1)$$

$$\text{ロールヘン平式} \quad R' = R \left\{ 1 + \alpha P / (H-h) \right\} \quad (2)$$

を連立させて求める方法が一般に行なわれている。ここにホット仕上圧延において(1)式に用いる Q_p としては、Orowan¹⁾ が導いた付着摩擦圧延の基礎式を解いたSimsの式²⁾ が物理的意味が明確で精度も良好なため適用されている例が多い。³⁾ Sims の式の Q_p は圧下率 (r) および中立点板厚 ($h_0 \text{ mm}$) とすれば、

$$Q_p = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1-r}{r}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} - \frac{\pi}{4} - \sqrt{\frac{1-r}{r}} \sqrt{\frac{R'}{h}} \left\{ \ln \frac{h_0}{h} + \frac{1}{2} \ln(1-r) \right\} \quad (3)$$

$$\frac{h_0}{h} = 1 + \tan^2 \left\{ \frac{1}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} + \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{R'}{h}} \ln(1-r) \right\} \quad (4)$$

で表わされる。しかしこの式は(1)および(2)式の連立解として直接 P を求めることができないため繰り返し計算を行なわねばならず、オンライン用の圧延荷重式としては演算時間の制約などの点で問題がある。そのためこのSimsの式を基本とした種々の簡略式^{4,5,6)} が発表されているが、今回著者らも新たにSimsの式から数学的近似を行なって導出した簡略式について検討を加えた。

すなわち、(4)式において

$$y = \frac{1}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} + \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{R'}{h}} \ln(1-r) \quad (5)$$

と置いて、 $y \ll 1$ と仮定し、 $\ln(h_0/h)$ を Taylor展開すると、

$$\ln \frac{h_0}{h} = y^2 + \frac{1}{6} y^4 + \dots \approx y^2 \quad (6)$$

となる。この(1)および(2)式の連立解 P および R' は2次方程式の解として求めることができ、繰り返し計算は不要となる。通常のホット仕上圧延の圧延条件の範囲においては $0 < y < 0.3$ 程度の値であり、 $y \ll 1$ の仮定によって大きな誤差を生じることはない。

2.2 他の簡略式との比較

表1に従来報告されているSimsの式を基本とした Q_p の簡略式と著者らの近似式をまとめ、さらに通常の圧延条件の範囲内でSimsの式に対する各簡略式の圧延荷重とその微係数の相対誤差を比較した

表1. Q_p についての各種簡略式の比較

報告者名	志田 ⁴⁾	伊佐早ら ⁵⁾	黒津 ⁵⁾	著者ら
Q_p の形	$Q_p = 0.8 + (0.45r + 0.04) \times (\sqrt{\frac{R}{H}} - 0.5)$	$Q_p = 0.8062 - 0.3023r + (0.0419 + 0.4055r - 0.2246r^2) \cdot \sqrt{\frac{R}{h}}$	$Q_p = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1-r}{r}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} - \frac{\pi}{4} - \sqrt{\frac{1-r}{r}} \sqrt{\frac{R}{h}} \left[\ln \left\{ (1+\chi) \sqrt{1-r} \right\} \right]$ $\chi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} + \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{R}{h}} \ln(1-r)$	$Q_p = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1-r}{r}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} - \frac{\pi}{4} - \sqrt{\frac{1-r}{r}} \sqrt{\frac{R}{h}} \left\{ y^2 + \frac{1}{2} \ln(1-r) \right\}$ $y = \frac{1}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} + \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{R}{h}} \ln(1-r)$
仮定と導出	Taylor展開と直線近似	r と $\sqrt{\frac{R}{h}}$ による回帰分析	中立点板厚は R に關係なく R と置き χ を得る $\frac{R}{h} = 1 + \tan^2 \chi \approx 1 + \chi^2 (\chi \ll 1)$	$\ln(\frac{R}{h})$ をTaylor展開 $\ln(\frac{R}{h}) = y^2 + \frac{1}{6} y^4 + \dots \approx y^2 (y \ll 1)$
Sims式との相対誤差	$\frac{\partial P}{\partial H}$ -0.7% ~ +0.7% $\frac{\partial P}{\partial R}$ -10.0% ~ +5.0%	-0.5% ~ +0.5% -5.0% ~ +2.0%	0% ~ +4.0% 0% ~ +8.0%	0% ~ +1.0% 0% ~ +1.5%
	$\frac{\partial P}{\partial r}$ -15.0% ~ +5.0%	-5.0% ~ +3.0%	0% ~ +10.0%	0% ~ +2.0%
	$\frac{\partial P}{\partial h}$ -1.0% ~ +1.0%	-0.5% ~ +0.5%	0% ~ +5.0%	0% ~ +1.5%
	$\frac{\partial P}{\partial R}$ -2.0% ~ +1.0%	-1.0% ~ +1.0%	0% ~ +13.0%	0% ~ +1.5%

結果を併せて示す。これからわかるように、著者らの近似式が与える圧延荷重は近似の方法に起因して絶対値としてはSimsの式に対して常に正の偏差を帯びているが、その相対誤差は1%以下で精度は良好である。さらにこの近似式が他の簡略式と異なるところは、圧延荷重に対する各種圧延条件の微係数のSimsの式に対する相対誤差が2%以内と優れており、Simsの式が持つ物理的意味が微係数まで保証されていることである。従って著者らの近似式は圧延現象のシミュレーションや影響係数を計算するモデル式にそのまま適用が可能であるということが大きな特長である。

3. 変形抵抗式の検討

著者らの圧延荷重式を用いて現場圧延データ ($n=500$, 仕上厚: 1.5~6.5mm, 板中: 750~1850mm, $C: 0.02 \sim 0.55\%$, $Si: trace \sim 0.30\%$, $Mn: 0.20 \sim 1.00\%$, $Al: trace \sim 0.070\%$, 特殊元素は含有せず) について変形抵抗を求め、それによれば各要素の影響を記述するモデル式を作成した。

3.1 モデル形式

変形抵抗モデル式の作成に当たっては、要因として

- (1) 温度と化学成分に依存する形式のひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) 項。
- (2) 温度と成分に依存し、さらに動的再結晶の影響あるいは結晶粒微細化や加工硬化などそのパス以前のひずみ履歴の影響をも表現し得る形式のひずみ (ϵ) 項。
- (3) 温度項。 (i スタンドの圧延温度, T_i (K) は仕上圧延機入, 出側の実測値から内挿)
- (4) 温度依存性を考慮した化学成分の影響を表現する固溶硬化項。
- (5) 変態による変形抵抗の低下を表現する変態項 (TRCF)。
- (6) 中方向の温度の不均一の影響を考慮した板幅修正項 (WCF)。

を取り上げ、その取捨の検討と必要な要因についての適切な関数表現の選取を行ない、最終的に(7)式に示す種形式でまとめ、その必要最小限の係数 (k_0, m, n, B, β は定数, a, b は成分に依存する係数) を各スタンドごとに定めた。

$$R = k_0 \cdot \dot{\epsilon}_i^{(m, T_i)} \cdot \left(\epsilon_i + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ji} \cdot \epsilon_{lj} \right)^{(n, b_i, T_i)} \cdot \exp(B_{1i} \cdot T_i \cdot \epsilon_i) \cdot \exp \left\{ \left[B_{2i} + B_{3i} \cdot \ln(1 + \beta_1 \cdot C) \right] / T_i + B_{4i} \cdot \ln(1 + \beta_1 \cdot C) + B_{5i} \cdot \ln(1 + \beta_2 \cdot Si) + B_{6i} \cdot \ln(1 + \beta_3 \cdot Mn) + B_{7i} \cdot \ln(1 + \beta_4 \cdot Al) \right\} \cdot TRCF \cdot WCF \quad (7)$$

データの解析に際して、ひずみ項およびひずみの関数でもあるひずみ速度項の係数の決定を回帰分析によることは、原因を結果で記述する誤りを生み合理性を欠くと考えたので、それらの係数は実験で求めた値を使用し、温度および成分の影響について最小2乗法による統計解析を主とした検討を加えた。

3.2 解析結果

他の圧延条件および化学成分に代表値を与えた時の各スタンドについての温度および化学成分の影響係数を図1に、変形抵抗におよぼす成分濃度の影響の代表例を図2に示す。

温度依存性の係数は前段および後段スタンドで大きく中段スタンドでは小さいが、これは圧延温度の計算に際して板厚および加工による発熱の影響を考慮していないためであり、 $\exp(A/T)$ の形による全スタンドの平均値、 $A = 4500$ は従来報告⁷⁾されている3500~7000の範囲内でやや低い値である。

化学成分の中でその影響がもっとも大きいのはC(精度を高めるために取鍋分析値をもとにしマリミングによる脱C、鋼塊頭部および底部の偏析の影響を補正した推定値を用いた)、その総合的な影響係数は#1スタンドから圧延の進行とともに急激に増加し、#3、#4スタンドで#1スタンドの約4倍の値となり、#5、#6さらに#7スタンドと逆に低下する。その内容を見ると前段スタンドでは温度が高くなるほどその影響が小さくなる温度依存性を示すが、この傾向はスタンドの進行とともに消失し#4スタンド以降は無視できるようになる。かわりに#3スタンド以後はそれ以前のスタンドで与えたひずみとの正の交互作用が出現する。Cは連続圧延において加工歪の回復をさまたげることが知られており⁸⁾この機構が圧延の進行、すなわち温度の低下とともに変形抵抗にきわめて顕著な影響をおよぼしていると考えられる。そして#6、#7スタンドでは低C鋼であっても回復が一部不完全となるために見掛上その影響係数が小となるのであろう。熱間圧延時に回復が阻止される現象はNbを含有する鋼についてよく知られており、さらにホット圧延で微量のBの存在によっても同様な効果が生じることが見出されているが⁹⁾このような特殊元素を含有していない普通炭素鋼であっても、パス間の時間が短いホット仕上げ圧延においては、変形抵抗は本質的に成分に依存するひずみ履歴の影響を受けるとする形式で記述すべきであることをこれらの結果は示唆している。

Mnについては従来はその影響は小さく無視してよいと一般に考えられてきたが¹⁰⁾最近ホット仕上げ圧延においてCと等価に取り扱った報告¹¹⁾が見られる。今回の解析で

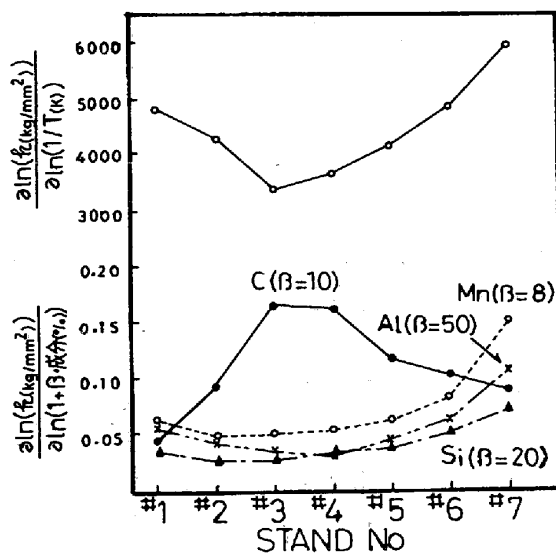


図1. 温度と化学成分の影響係数のスタンド間変化

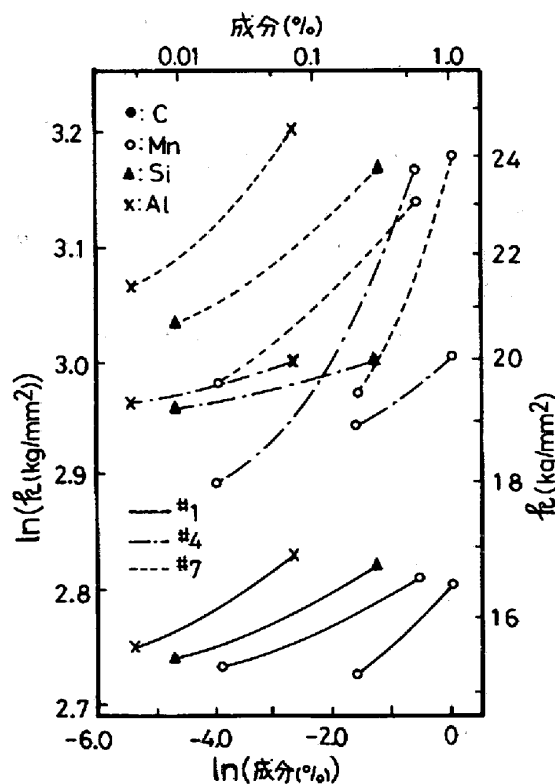


図2. 変形抵抗におよぼす化学成分の影響

MnはCについて重要な要因であり、とくに後段スタンドでその寄与が大きい。すなわち、Mnの影響は#1~#4スタンドの間はほぼ一定で温度依存性も考えなくてよいが、#5スタンドから#7スタンドまでひずみ履歴との交互作用を持ってその係数は急激に増加する。この機構がCと同様に直接的にまたはCとの相互作用を持って間接的に回復を抑制する効果であるのか、あるいは回復が一部阻止された状態において固溶硬化の寄与が大となるものかは不明であるが、いずれにせよMnはホット仕上圧延時の変形抵抗に影響をおよぼす要因として取り上げられねばならないと考えられる。SiとAlの影響はMnに比べて寄与が小さく、温度依存性やひずみ履歴との交互作用もとくに取り上げなくてよいが、変形抵抗式の推定精度を高めるためにはその考慮が必要で、Mnと同様にとくに#6, #7スタンドでその効果が大きい。

4. 総合的な検討

Simsの式はロールと材の接触面全面で付着摩擦を仮定して求められたものであるが、ホット仕上圧延では全スタンドにおいてその仮定が成立するか問題である。さらに最近ではホットストリップミルに油圧延が導入されつつあり、この場合には明らかに圧延荷重の減小が認められることより、付着摩擦のみならずすべり摩擦領域が存在することがわかる。そこで著者らは玉野らの混合摩擦域での圧延荷重式¹²⁾に種々の摩擦係数(μ)を与えてその精度を検討した。#1, #2スタンドでは全面付着摩擦であるといえる $\mu=0.65$ 程度が精度良好であったが、後段スタンドになるほど μ が小さい値で精度良好となり、すべり摩擦領域の存在を示唆している結果が得られた。しかし玉野らの式は全面付着摩擦のSimsの式に対して大巾な精度向上は期待できないことと、圧延荷重を求めるには繰返し計算を必要とするという理由から、ホット仕上圧延のセットアップに使用するには著者らの近似式で十分である。また油圧延のモデル式として $r, \mu, \sqrt{R_n}$ の簡単な修正項を付け加えることにより対応可能である。

さらに形状制御の面から考えれば、形状検出器によるロールベンダーへのフィードバック制御はあくまでも微調整であり、やはりドラフトスケジュールの決定が主要な制御要素である。スケジュールの決定に当たってはロール摩耗、ヒートフラウンを予測し、オンラインで圧延荷重を各スタンドに配分する手法が形状、プロフィールの制御のためには好ましい。荷重配分によるスケジュール決定法については、鈴木ら¹³⁾の報告にもあるように、Newton法により繰返し計算を行う必要があるが、荷重の板厚による微係数 $\frac{\partial \sigma}{\partial \mu}$ 又は $\frac{\partial \sigma}{\partial r}$ の精度が良好でないと実際の圧延現象に合致したスケジュールを作成することができない。著者らの近似式は上述の如く荷重の微係数に至るまで高い精度が保証されているのでオンラインでの荷重配分法によるスケジュールの決定にも適用することが可能である。

著者らの近似式と変形抵抗式をオンラインで使用した場合の精度をまとめて表2に示す。#7スタンドでとくに精度が低下しているが、後段スタンドでは塑性定数が大きく、わずかのスタンド間板厚計算誤差が荷重変化としては大きくなくなるためであろうと思われる。

表2 圧延荷重予測精度 (1σ:%)

スタンド	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
相対誤差	5.2	3.3	4.4	5.4	4.9	5.3	7.9

対象材：低中炭素鋼 仕上厚：1.2~6.5mm

文献

1) E. Orowan: Proc. Inst. Mech. Eng., 149 (1943) p.140	2) R. B. Sims: Proc. Inst. Mech. Eng., 170 (1954) p.191
3) 日本鉄鋼協会: 圧延理論とその応用 (1964) p.427	4) 志田: 日立評論, 47 (1965) 9, p.57
5) T. Isahaya, et al.: 鉄鋼国際オートメーション会議論文集, II (1970) p.201	
6) 黒津ら: 川崎製鉄技報, 3 (1971) 3, p.35	7) 井上: 鉄と鋼, 41 (1955) 6, p.593
8) I. L. Djalilmore, et al.: Metals Tech., 2 (1975) p.294	9) 西田ら: 鉄と鋼, 61 (1975) 4, p.140
10) 美坂: 住友金属, 23 (1971) 4, p.48	10) H. F. Izzo: Arch. Eisenhüttenw., 47 (1976) 2, p.85
12) 玉野ら: 塑性と加工, 16 (1975) 168, p.87	13) 鈴木ら: 塑性と加工, 9 (1968) 85, p.86