

討14

厚板・熱延計算機制御における圧延荷重の推定

住友金属工業(株)中央技術研究所 美坂佳助 横井玉雄 高橋亮一 永井 博

1. まえがき

著者の一人は「落下ハンマ法による普通鋼の熱間平均変形抵抗」と題して下記の如き、平均変形抵抗を計算する数式を提案したが、限定された条件範囲内での普通鋼についてはほぼ満足すべき精度で実測値との一致を示すものの、①低炭素鋼において顕著に現われる800°C~900°C以下での変形抵抗の低下の問題、②C以外の化学成分の影響についての系統的な検討の問題が残されていた。更に近年は歪の未回復現象に基づく問題など複雑な現象の研究が進められているが著者らは必ずしもそれらの諸問題に継続的な研究を進めているわけではない。従ってここでは下記の基本式をどのようにmodifyして実際の計算機制御に用いているかの実態を概略報告させていただくこととする。

$$K_{fm} = g \times f \times \exp\left(0.126 - 1.75C + 0.594C^2 + \frac{2851 + 2968C - 1120C^2}{T_k}\right) \times \epsilon^{0.21} \times \dot{\epsilon}^{0.13} \quad (1)$$

K_{fm} : 平均変形抵抗 kg/mm², C: 炭素量%, T_k : 絶対温度 °K, ϵ : 対数ひずみ, $\dot{\epsilon}$: 歪速度 1/sec
f: 成分の影響を示す項 (普通鋼では 1)

表1 A3変態補正

C	$H_{TK} - 273$	$L_{TK} - 273$	g
~0.02	967	871	0.800
~0.04	947	864	0.820
~0.06	927	854	0.835
~0.08	912	850	0.855
~0.10	897	843	0.870
~0.14	872	831	0.895
~0.18	842	817	0.930
~0.22	817	802	0.955

2. 低炭素鋼のA3変態以下での平均変形抵抗の低下

実測の平均変形抵抗は図-1の点線の如くであるがこれを実線の如く近似し、 L_{TK} 以下の温度についてはgによって補正する事とし、 $L_{TK} \sim H_{TK}$ 間の温度については一定の平均変形抵抗とみなすことにより大巾なくいちがいを避ける事が出来る。

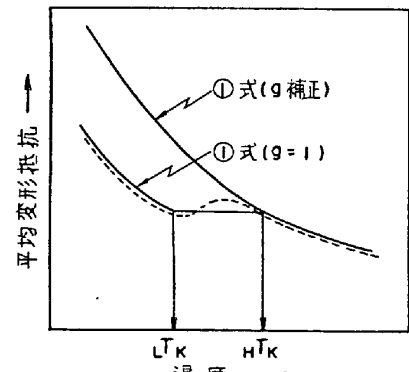


図1 A3変態補正

3. C以外の化学成分の影響

以前の報告ではMnの影響は0.3~1.8%の範囲では少ないとしたが、ホットストリップミルなどの荷重の実側からはMnの影響は無視し得ないと考えられていた。その後ホットストリップミル粗圧延終了の圧延材からサンプルを切出し落下ハンマによる測定を行なったが、これを(1)式による計算値と対比したものが図-2であり、Mn 1%増に対し平均変形抵抗の18%増を認めた。

更に試験的に溶製したサンプルによりV, Mo, Niの影響を求め結局成分の影響として(1)式のfとして次式を用いている。

$$f = 0.916 + 0.18Mn + 0.389V + 0.191Mo + 0.004Ni$$

なお、Cu (~0.6%), Al (~0.05%)について調査した範囲では有意な影響を認める事は出来なかった。

以上は約10年以上前の検討の結論であるがこれを基に最近の現場採取データにあてはめてその精度について検討する。

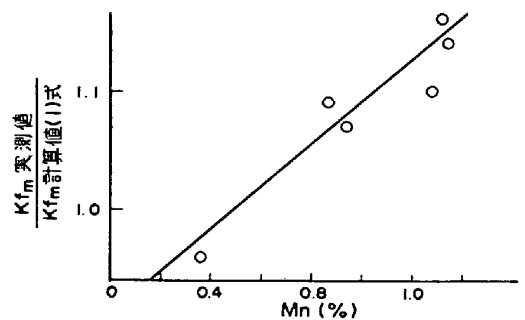


図2 Mnの影響

4. 材料温度の推定

圧延中の材料は板厚方向に温度分布が存在するので(1)式の変形抵抗を計算するに際しては、材料の板厚方向の平均温度を用いなければならないが、実際の圧延において測定可能なのは表面温度のみであり、従って材料内部の温度分布を計算より求めなければならない。そこで板厚方向1次元熱伝導方程式(2)を境界条件(3)のもとに解く。

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + Q \quad (2)$$

$$\text{境界条件 (表面において)} \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = q \quad (3)$$

- ここで c 比熱 (Kcal/kg°C), ρ 密度 (kg/m³)
 λ 熱伝導率 (Kcal/m hr°C), θ 温度 (°C)
 x 厚み方向座標 (m), t 時間 (hr)
 q 表面からの放熱量 (Kcal/m²hr)
 Q 加工熱 (Kcal/m²hr)

ところで、放熱量 q は対流、輻射、デスケーラーによる水冷及びロールへの接触伝熱を考慮する。すなわち、

$$\text{放熱量} \quad q = q_a + q_e + q_w + q_R \quad (4)$$

$$\text{対流による放熱} \quad q_a = ha(\theta_s - \theta_a)$$

$$\text{輻射による放熱} \quad q_e = 4.88 \times 10^{-8} \epsilon [(\theta_s + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4]$$

$$\text{デスケによる水冷} \quad q_w = hw(\theta_s - \theta_w)$$

$$\text{ロールへの接触伝熱} \quad q_R = 2 / \sqrt{\pi t_D} \times (bs b_R) / (bs + b_R) \times (\theta_s - \theta_R)$$

- ここで、 ha 対流熱伝達係数 (Kcal/m²hr°C) hw 水冷の熱伝達係数 (Kcal/m²hr°C)
 ϵ 輻射率 (-) t_D 圧延材とロールの接触時間 (hr)
 bs, b_R 圧延材及びロールの熱浸透率 ($b = \sqrt{\lambda c \rho}$)
 θ_s 材料表面温度 (°C) θ_a 雰囲気温度 (°C)
 θ_w 水温 (°C) θ_R ロール表面温度 (°C)

また、加工熱 Q は(5)式の通りである。

$$\text{加工熱} \quad Q = 2.34 \times 10^{-8} G / (HW(1+f)R t_D) \quad (5)$$

- ここで、 G 圧延トルク (kg·m) H 板厚 (m)
 W 板巾 (m) R ロール半径 (m)
 f 先進率 (-)

このような計算方法をオンライン計算機にて計算しているが、計算結果と表面温度測定値との比較を厚板、熱延について各々図3、図4に示すが両者とも満足すべき精度であり、平均温度の算出もこの方式で妥当と考えている。

5. 普通鋼の場合の計算の精度

著者らは既報により熱延⁽¹⁾、厚板圧延⁽²⁾の圧延荷重の実測値と計算値の比較を行い、その精度について報

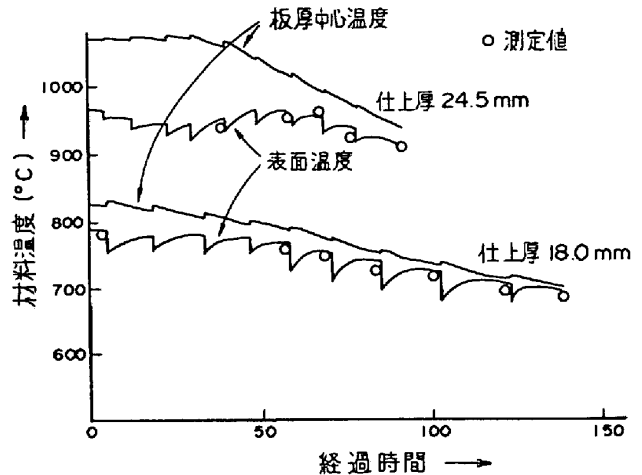


図3 厚板圧延の実測温度と計算温度の比較

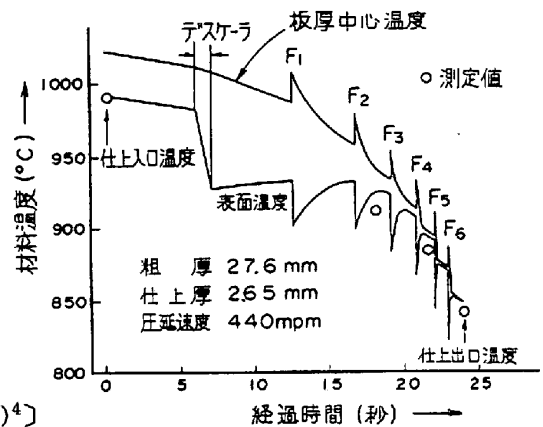


図4 熱延の実測温度と計算温度の比較

表2. 温度計算用数値

対流	$ha = 10 \text{ Kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$
水冷	$hw = 1000 \sim 2000 \text{ Kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$
輻射率	$\epsilon = 0.7$

告した。本報告では(6)式で表わされる荷重比Zの温度依存性について主として述べる。

$$Z = \frac{P_A}{1.15 \cdot K_{fm} \cdot \ell_d \cdot W \cdot Q_p} \quad (6)$$

ここで、 P_A 実測荷重 (kg), K_{fm} 平均変形抵抗 (kg/mm²)

ℓ_d 接触弧長 (mm), W 板巾 (mm)

Q_p 圧下力関数 (-)

ところで、平均変形抵抗 K_{fm} は(1)式、圧下力関数 Q_p は Sims の式を用いる。

通常の圧延材 (Nb, V を含まない材質) の Z と材料温度の関係を図 3, 図 4 にそれぞれ厚板・熱延について示す。ここで厚板圧延は仕上スタンドで各パス毎に実測したデータを、熱延においては最も誤差が少ないと考えられる最終スタンドのデータを検討の対象とする。図より、厚板・熱延ともに変態点より高温側の圧延においては落下ハンマー法を用いた(1)式の平均変形抵抗値を用いて満足できる圧延荷重の推定値を得る。すなわち、次段(次パス)の圧延に際し、前段(前パス)の影響はない。

6. Nb 入り鋼の場合の計算の精度

制御圧延時、特に Nb 入り鋼圧延時における平均変形抵抗の計算精度について述べる。

図 7, 図 8 に下記の化学成分の材料を圧延した際の Z と材料温度の関係をそれぞれ厚板・熱延について示す。

表 3. 化学成分

	C %	Mn %	Nb %
厚板	0.08~0.10	1.35~1.40	0.025~0.030
熱延	0.10~0.16	0.70~1.01	0.017~0.025

これより、(1) 変態温度以下で Z が 1.0 より 1.3~1.4 と変化する。(2) しかし、大内の報告のように温度の低下とともに Z が連続的に増大するのではなく一定値に飽和する。(3) この Z の変化する温度(折曲り温度)と落下ハンマー法で求めた変形抵抗の変態点近傍の変曲点の温度が厚板圧延のデータではよく一致する。(4) 1回圧縮の落下ハンマー法の変形抵抗は変態点近傍で停留する傾向にあるが、実際データでは逆に増大する。これは、この温度以下では前段(前パス)の圧下歪が回復しないまま、次段(次パス)の圧延が行われるので変形抵抗値が高くなると考えられる。(5) 熱延の Z は折曲り温度が厚板データに比べて高温側に移る。

以上の検討結果を用いて、実際の圧延において圧延荷重を予測する際、前述の Z の傾向を材質・温度

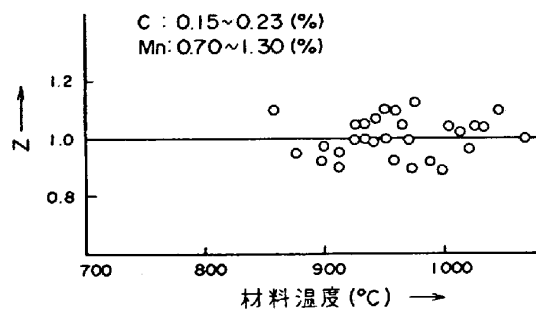


図 5 厚板圧延の Z と材料温度の関係 (普通鋼)

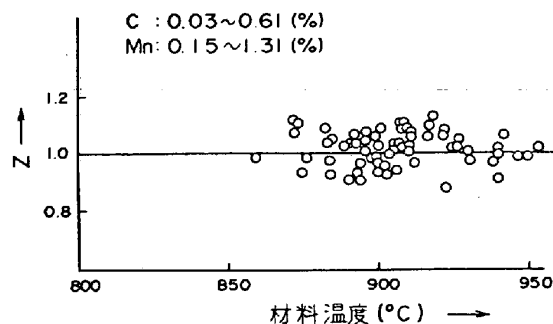


図 6 熱延の Z と材料温度の関係 (普通鋼)

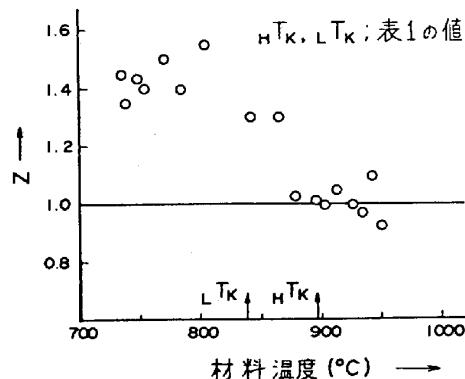


図 7 厚板圧延の Z と材料温度の関係 (Nb 入り鋼)

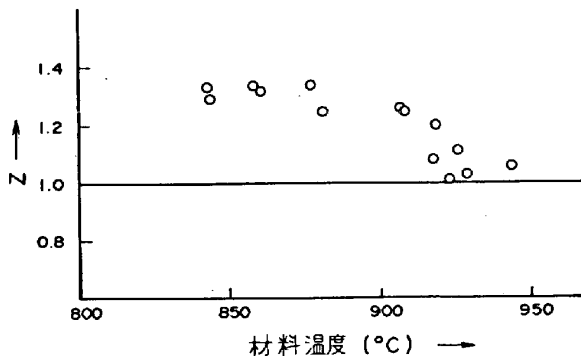


図 8 熱延の Z と材料温度の関係 (Nb 入り鋼)

の関数として記憶し、(1)式で計算した値にZを乗ずることにより圧延荷重の予測を行う。

図9、図10に制御圧延における厚板・熱延の圧延荷重の予測精度を示す。これにより制御圧延においても厚板・熱延とも±10%の精度で圧延荷重が予測できる。

さらに、圧延荷重の予測精度を高めるため、同一材料の圧延においては、前材の圧延結果を次材に反映する bar to bar feedback法、粗圧延のデータに基き仕上圧延の荷重予測値を修正する feed forward法、前パス（前段）の圧延結果に基き次パス（次段）の予測を行う pass to pass feed forward法などの修正制御により圧延荷重の最終的な予測精度は±5%以内に収められる。

7. あとがき

変形抵抗の測定が鉄鋼各社で共同して行なわれ、その数式化の努力が各方面で実施されてからかなりの月日が経った。その間熱間圧延の計算機制御が急速に進展しそこで必要となる圧延荷重・圧延トルクの算出は変形抵抗という物性値を使った理論的アプローチでなされ、若干のくいちがいは逐次補正するという方法でカバーされて来た。

しかし圧延の現状は急速に発展して十年前の遺産のみではもはや不十分のように思われる。今後の展開を考えながら、もう一度基礎的研究に力をそそぐ必要がある。

8. 参考文献

- (1) 美坂・吉本：塑性と加工 vol 8, No 79 (1967-8) P. 414
- (2) 横井・美坂：塑性と加工 vol 16, No 168 (1975-1) P. 10
- (3) 大内：塑性と加工 vol 18, No 201 (1977-10) P. 867

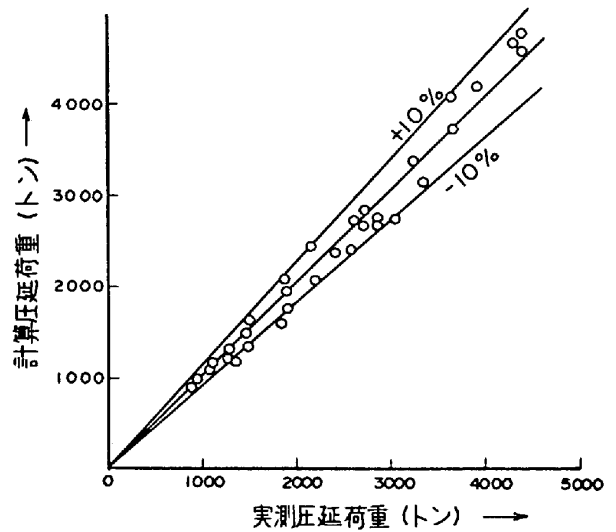


図9 厚板仕上スタンドの圧延荷重予測精度 (Nb入鋼)

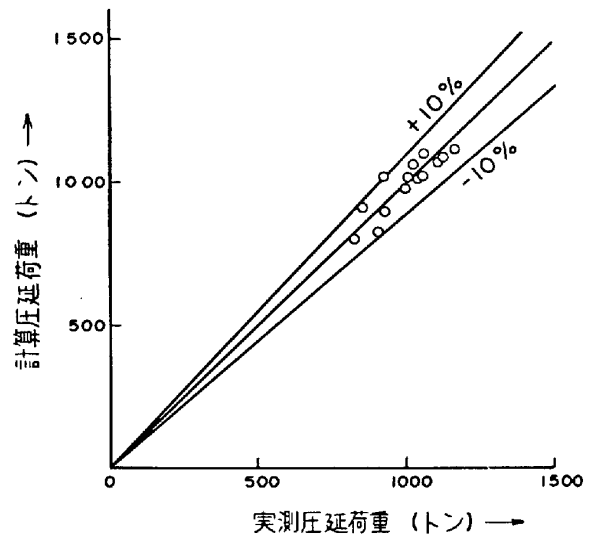


図10 熱延の最終スタンドの圧延荷重予測精度 (Nb入鋼)