

報 文

圧延加工の挙動把握の一例について

—薄板圧延における摩擦係数の推定—

川内職業訓練短期大学校 下土橋 渡

An example of analysis of behavior of strip rolling.

—Estimation of coefficients of friction in light gauge strip rolling—

Wataru Shimotsuchibashi

要 約 圧延加工は金属材料の重要な加工手段である。圧延加工は、その特徴として、基礎となる技術領域が広く多くの専門要素を含むため、加工の挙動とそれに影響を及ぼす各因子との関係について把握ができていようかが非常に重要である。本報は、圧延加工の挙動とそれに影響を及ぼす各因子とのかかわりを理解する一助とするため、薄板圧延における摩擦係数を推定する解析について報告するものである。解析は、まずロール間隙における発熱および伝熱モデルを考え加工中の発熱量を計算し、つぎに発熱量の計算結果と実圧延で実測される圧延動力とを比較することによってロールと材料間の摩擦係数を逆算するものである。解析の精度を上げるため、発熱、伝熱、ロール冷却、加工温度および加工速度の材料の変形抵抗に及ぼす効果、ロールの弾性変形の影響および圧延機駆動系の機械損失などを考慮に入れた。本報で報告したモデルによりロール間隙における発熱量の計算が精度良くできること、極薄板圧延における摩擦係数は 0.02~0.06 の値であること、圧延速度の上昇にともなって出側の板厚が薄くなる現象の原因は、圧延速度の上昇による摩擦係数の減少にあることを示す。

I はじめに

ほとんどの金属材料の一次加工が圧延を経て行われ、また、二次加工以降においてもリードフレーム材のような冷間圧延製品の製造など、圧延加工の果たす役割は大きい。後述するように圧延加工は、被加工材の材料特性のみならず加工機械（圧延機）の特性に左右され、材料特性と機械の特性はさらに加工条件、および加工中の熱や摩擦・潤滑などの変化の影響を複雑に受ける。すなわち、機械の特性を含む加工特性を把握すること、加工の瞬間瞬間の微妙な状況変化を敏速に検出すること、そしてそれに対して的確に機械を制御することが、圧延加工技術が追求してきたテーマであった。圧延は塑性加工の中でも理論解析および加工の自動化の進んだ分野であり、最後まで人間の経験と勘に頼ってきた作業領域も近年、コンピュータの導入により ME 化が達成されつつある。すなわち、板圧延における板の形状（平坦度）の制御⁽¹⁾⁽²⁾は熟練オペレータの最も重宝がられる作業領域であったが、自動形状制御装置の開発により形状品質の向上のみならず、生産性の改善が達成された⁽³⁾。孔型圧

延のロール製作に対しては、ロール成形された製品の寸法・形状を計測するための 3 次元測定機とロール設計・製造のための CAD/CAM をオンライン化したシステムが開発された⁽⁴⁾。一方、圧延加工は量産を特徴とする加工法であるが、製品要求への多様化に対応するため、生産様式の FMS 化すなわち多品種少量生産の自動化が今後の重要な課題として検討されている⁽⁵⁾。

製造現場での ME 化が進むにつれて、最適な加工条件や制御パラメータの設定、あるいは生産された製品の品質や原価の評価・吟味といったレベルでの生産ノウハウの管理・運営および開発などが製造部門における人間の主たる役割となってきつつある。それにともない、加工の挙動とそれに影響を及ぼす各因子との関係について把握がなされているかどうかということが以前にも増して重要になってきている。加工プロセスの改善あるいは自動化のためには、定量的レベルで把握ができていようが必要がある。本報は、薄板圧延時の摩擦係数を推定する解析について報告し、圧延加工の挙動とそれに影響を及ぼす各因子とのかかわりを理解する一助にしようとするものである。まず、圧延加工の基礎となる技術領域と加工に

影響を及ぼす因子について簡単にふれておく。

II 圧延加工の基礎となる技術領域と加工に影響を及ぼす因子

塑性加工のうちでも圧延はその特徴の一つとして、基礎となる技術領域が広く、多くの専門要素を含んでいる。すなわち、塑性力学・材料工学に始まり、加工発熱および伝熱の問題、材料と工具間におけるトライボロジー(摩擦・摩耗・潤滑)の問題、圧延機の機械的特性、および圧延作業の計測と制御の問題など広範に及んでいる⁽⁶⁾。この中で、摩擦の問題は理論的把握が最も難しく、立ち遅れている領域であり、今後の課題とされている。計測技術においては、計測の対象である材料が 1,000℃ 以上の高温であったり、100m/sec 近くに達する高速で走行したり、あるいは振動を伴う場合があることや、測定精度や分解能にきびしい要求が課せられるなどの点に難しさがある。また、制御技術においては、被制御特性の中に加工される材料の特性のみならず機械の特性が入ってきて制御が複雑になる。自動化のためには、まず被制御特性の解明が必要である。圧延加工に影響を及ぼす各因子とその相互作用の様子を図 1 に示す。

III 薄板圧延における摩擦係数の推定

わが国の圧延産業は、かつての量の時代から質の時代に入った。鉄ニッケル合金および銅合金に代表される IC リードフレーム材料、銅チタン合金・ベリリウム銅等のばね材料、さらにパーマロイのような磁性材料など先端産業を支える付加価値の高い圧延板材の需要が今後増えていくものと思われる。これらの板材の圧延は製品

厚さが薄いところでは10 μ m 以下という薄物圧延の領域である。圧延は、塑性加工の中でも理論解析と加工の自動化が進んでいる分野であるが、板厚が0.2mm 以下のいわゆる、はく(箔)圧延の領域に関しては、理論解析や自動形状制御装置の導入がなされ始めて未だ10年経たない⁽⁷⁾。

材料とロール表面間の摩擦係数は、フリクション・ヒル(ロール間隙弧に沿う圧延圧力の分布)を決定し、それによって圧延に必要な荷重(圧延荷重あるいは圧下力とよぶ)が決まる。また、摩擦状態の変化は、圧延板の形状不良を招いたり、板の表面性状を害したりする。摩擦係数は圧延理論の上でも、また実操業の上でも極めて重要でありながら、未だ理論的把握が十分になされていない因子である。したがって、摩擦係数の値はもっぱら、実測される圧延荷重から圧延荷重式を用いて逆算されている現状である。逆算によって求められた摩擦係数の値には当然、圧延荷重式の理論の不確かさや材料の変形抵抗の見積り誤差などが含まれる。極薄圧延ではロール間隙における全発熱量に占める摩擦発熱の割合が大きいこと、出側板厚が60 μ m より薄い圧延領域に対しては適用できる圧延荷重式が見あたらないことを踏まえて、本報では実測された圧延動力と発熱量の計算値とを比較して摩擦係数を逆算する新しい試みを行った。解析の精度を上げるため考慮に入れた影響因子は次の通りである。

- (1)塑性変形による発熱および摩擦発熱,
- (2)材料によるロール間隙への熱の持込みおよび持ち出し,
- (3)材料からワークロールへの伝熱,
- (4)ロール冷却材(ロールクーラント)によるワークロールの冷却,
- (5)材料の変形抵抗に及ぼす変形温度の影響,
- (6)材料の変形抵抗に及ぼす圧延

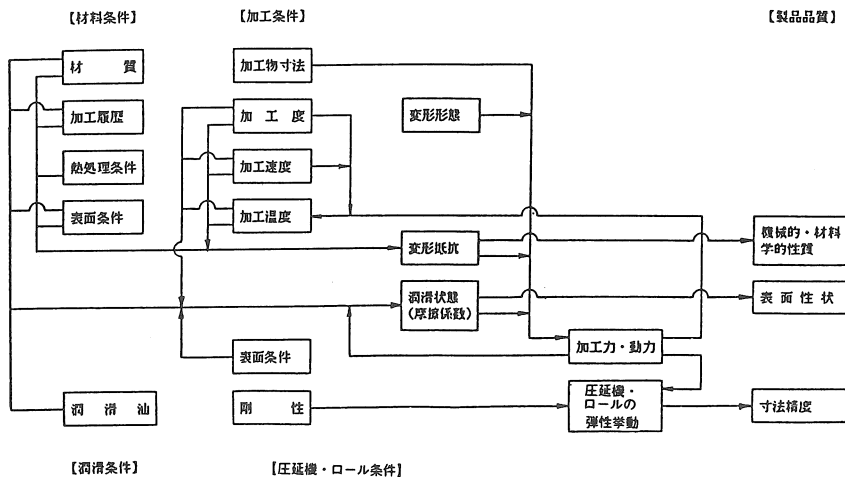


図 1 圧延加工に影響を及ぼす因子

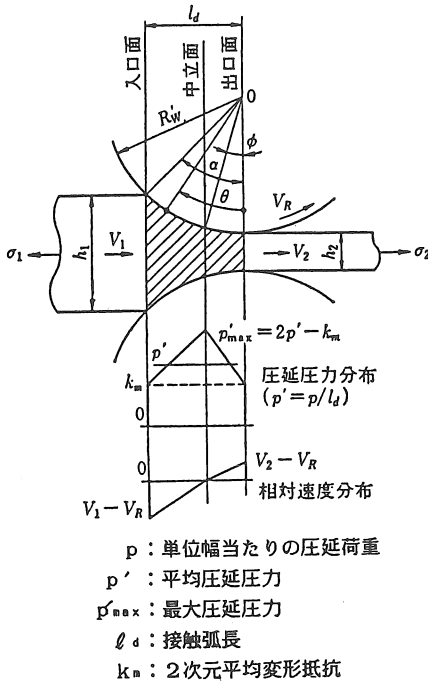
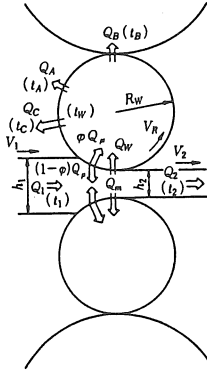


図2 接触弧上における圧延圧力および相対速度の分布



$$\begin{aligned}
 Q_A &= \alpha_A (t_w - t_A) \\
 Q_B &= \alpha_B (t_w - t_B) \\
 Q_C &= \alpha_C (t_w - t_C) \\
 Q_1 &= c \rho t_1 h_1 V_1 / (2\pi R_w) = \alpha_F t_1 \\
 Q_2 &= c \rho t_2 h_2 V_2 / (2\pi R_w) = \alpha_F t_2 \\
 Q_w &= \alpha_w \left(\frac{t_1 + t_2}{2} - t_w \right) \\
 \alpha_A &: \text{ワークロール・大気間の熱伝達率} \\
 \alpha_B &: \text{ワークロール・バックアップロール間の等価熱伝達率} \\
 \alpha_C &: \text{ワークロール・ロールクーラント間の熱伝達率} \\
 \alpha_w &: \text{ワークロール・圧延材料間の等価熱伝達率} \\
 c &: \text{圧延材料の比熱} \\
 \rho &: \text{圧延材料の密度}
 \end{aligned}$$

図3 ロール間隙における伝熱モデル

速度の影響、(7)ワークロールのロールキス（ロールの弾性変形により上下ワークロールが板幅の外側で接触する現象）⁽⁸⁾、(8)バックアップロール軸受の摩擦損失および圧延機駆動系の機械損失。

本報ではまず、発熱量の計算式および解析手順について述べた後、厚さ0.5mmのアルミニウム素材を5パスで厚さ17μmのはくに圧延する場合を例にとって計算を行い、各パスの摩擦係数を推定し、考察を加えた。

1 発熱量の計算式

ロール間隙における発熱は、材料の塑性変形による発熱および材料・ワークロール間の摩擦発熱からなる。塑性変形によるロール単位面積・単位時間当たりの発熱量 Q_m は、変形エネルギーがすべて熱に変わると仮定すると

$$Q_m = \frac{1}{2\pi R_w} k_m \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) V_1 h_1 \quad (1)$$

となる。ここで、 V_1 は入側材料速度であり

$$V_1 = V_2 \frac{h_2}{h_1} \quad (2)$$

$$V_2 = \left(1 + \frac{h_1 - h_2}{h_2} \varepsilon^2\right) V_R \quad (3)$$

ロール単位面積・単位時間当たりの摩擦熱 Q_μ については、接触弧上の圧延圧力分布および材料とワークロール間の相対速度分布を図2のように近似すると次式が導びかれる。

$$\begin{aligned}
 Q_\mu &= \frac{1}{2\pi R_w} \cdot \frac{h_1 - h_2}{3 h_1} \left(1 - \varepsilon - \varepsilon^2 + \frac{h_1 + h_2}{h_2} \varepsilon^3\right) \\
 &\quad \times \mu \left(\frac{p}{\ell_d} + \frac{1}{2} k_m\right) V_R \ell_d \quad (4)
 \end{aligned}$$

ε は中立点角 ϕ とかみ込み角 α との比であり、近似的に $\varepsilon = \phi / \alpha \approx 0.5$ と考えた。

ワークロールの表面は、大気、バックアップロール、ロールクーラントおよび圧延材料の4つの熱媒体に接触している。この4つの熱媒体による熱交換と式(1)、(4)で得られる発熱エネルギーの流れに関して図3に示すモデルを考えた。すなわち、

- ① 塑性変形熱 Q_m はそのすべてがいったん、圧延材料へ吸収される。
- ② 摩擦熱 Q_μ はいったん、その ϕQ_μ がワークロールへ吸収され、残りの $(1 - \phi) Q_\mu$ が圧延材料へ吸収

される (ただし, $0 \leq \varphi \leq 1$)。

このモデルに基づくと, つぎの熱平衡式が成り立つ。

圧延材料について (ただし, 定常状態に対して)

$$Q_m + 2(1 - \varphi)Q_\mu + Q_1 - Q_2 - 2Q_w \quad (5)$$

ワークロールへの正味の入熱量 Q_R について (ただし, 非定常状態に対して)

$$Q_R = \varphi Q_\mu + Q_w - Q_c - (Q_A - Q_B) \quad (6)$$

式(5), (6)を図 3 に示す記号を用いて書き直し, 両式から t_2 を消去すると

$$Q_R = \varphi \left(1 + \frac{1 - \varphi}{\varphi} \cdot \frac{\alpha_R}{\alpha_F} \right) Q_\mu + \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_R}{\alpha_F} Q_m - \alpha_R(t_w - t_1) - \alpha_A(t_w - t_A) - \alpha_B(t_w - t_B) - \alpha_C(t_w - t_C) \quad (7)$$

ただし, $\alpha_R = \frac{\alpha_F \alpha_w}{\alpha_F + \alpha_w}$

式(5), (7)より, 定常状態におけるワークロール表面温度 t_w および出口材料温度 t_2 を与える式が得られる。

$$t_w = \frac{1}{\alpha_A + \alpha_B + \alpha_C + \alpha_R} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_R}{\alpha_F} \cdot \left[2\varphi \left(\frac{1 - \varphi}{\varphi} + \frac{\alpha_F}{\alpha_R} \right) \times Q_\mu + Q_m \right] + \alpha_A t_A + \alpha_B t_B + \alpha_C t_C + \alpha_R t_1 \right\} \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{Q_m + 2(1 - \varphi)Q_\mu + (\alpha_F - \alpha_w)t_1 + 2\alpha_w t_w}{\alpha_F + \alpha_w} \quad (9)$$

ワークロールと材料間の等価熱伝達率 α_w は, 半無限固体の接触問題として取り扱い, 次式を用いた。

$$\alpha_w = \frac{2\lambda_F \alpha_w^{-\frac{1}{2}} \sqrt{T_s} V_R}{2\pi R_w \sqrt{\pi \alpha_F} (\lambda_F \alpha_F^{-\frac{1}{2}} + \lambda_w \alpha_w^{-\frac{1}{2}})} \quad (10)$$

ただし, $T_s = \frac{\ell_d}{V_R}$

摩擦熱のワークロールへ吸収される割合は $\varphi = 0.5$ と考えた⁽⁹⁾。また, ワークロール・バックアップロール間の等価熱伝達率 α_B は, α_w およびワークロール・クーラント間の熱伝達率 α_C に比較して小さい値であり無視

し, ワークロール・大気間の熱伝達率 α_A は α_C に含めて考えた。

2 変形抵抗および圧延荷重

出側板厚の比較的厚い領域 ($60 \mu\text{m}$ 以上の領域) に対しては Stone の式を用いて圧延荷重を計算した。すなわち, 単位幅当たりの圧延荷重 p は,

$$p = p' \ell_d \quad (11)$$

$$\text{ここに, } p' = k_m \left[\frac{e^{\mu \ell_d / h_m} - 1}{\frac{\mu \ell_d}{h_m}} \right]$$

極薄圧延の場合, 圧延材料の弾性回復域に働くロールと材料間の摩擦力によって張力が減殺されるため, k_m の減少に寄与する有効張力は実際の張力の 30~50% くらいであると報告されている⁽¹⁰⁾。そこで, 張力を考慮に入れた見かけの 2 次元平均変形抵抗 k_m は,

$$k_m = 1.15 \sigma_m - 0.4 \cdot \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (12)$$

となると仮定する。平均変形抵抗 σ_m は, その圧延前に材料がすでに受けた全圧下率を r_1 , 圧延後の全圧下率を r_2 とすると

$$\sigma_m = \frac{1}{r_2 - r_1} \int_{r_1}^{r_2} \sigma dr \quad (13)$$

で求められる。 σ は, 圧下率 r における単軸変形抵抗であり, ひずみ速度および加工温度の関数として取り扱った。

$$\sigma = A_1 \sigma_0 (\bar{\epsilon})^m \quad (14)$$

ただし, $\bar{\epsilon}$ は平均ひずみ速度であり, 次式で与えられる。

$$\bar{\epsilon} = \frac{1000}{60} V_R \sqrt{\frac{r}{R'_w h_1}} \quad (15)$$

室温における静的単軸変形抵抗 σ_0 については, 圧延したままのアルミニウムはくを引張試験して得た引張強さ σ_B と 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ より推定した値 (図 4) を,

表1 アルミニウム(99.5%)の温度依存係数 A_t の値⁽¹²⁾

圧下率 /%	A_t の 値				
	0 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C
20	1.000	0.855	0.590	0.330	0.230
30	1.000	0.800	0.520	0.280	0.170

表2 アルミニウム(99.5%)のひずみ速度依存指数⁽¹¹⁾

温 度 / °C	m の 値		
	圧下率10%	圧下率30%	圧下率50%
18	0.013	0.018	0.020
350	0.055	0.073	0.080
550	0.130	0.141	0.155

温度依存係数 A_t については 99.5%Al に関する引張試験結果⁽¹¹⁾より求めた表1 の値を、ひずみ速度依存指数 m については Alder ら⁽¹²⁾が報告している表2 の値を用いた。なお、入口材料温度と出口材料温度の平均値を材料の平均温度 t_m と考えた。すなわち、

$$t_m = \frac{1}{2}(t_1 + t_2) \quad (16)$$

出側板厚がほぼ60 μm より薄い領域に対しては有効な圧延荷重式が見あたらないため実測の圧延荷重を用いる以外にない。しかし、この領域ではほとんどの場合ワークロールキスが生じており、実測されるブッシュアップ力をそのまま純圧延荷重と見なすことができない。そこで、圧延ロールの弾性変形からロール間隙形状を計算する力学モデル⁽⁸⁾を用いてブッシュアップ力に占める純圧延荷重の割合を推定する方法を用いた。

3 解析手順

繰返し数値計算により式(9)~(16)を解くフローチャートを図5に示す。数値計算の手順は図に示すように、出口材料温度を仮定して材料の変形抵抗・圧延荷重、発熱量・伝熱量および出口材料温度の順に計算を進め、出口材料温度の仮定値と計算値とが一致するまで計算を繰り返す方法を用いた。

4 解析結果および考察

厚さ0.5mmの素材を表3に示すパススケジュールで厚さ17 μm に圧延する場合について計算を行った。

まず、実圧延データより各パスの摩擦係数を逆算した

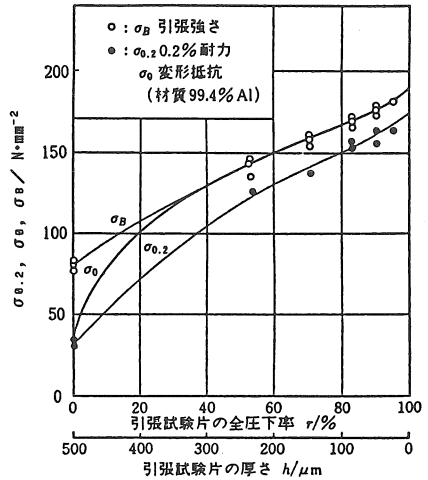


図4 アルミニウムはくの室温における静的引張変形抵抗

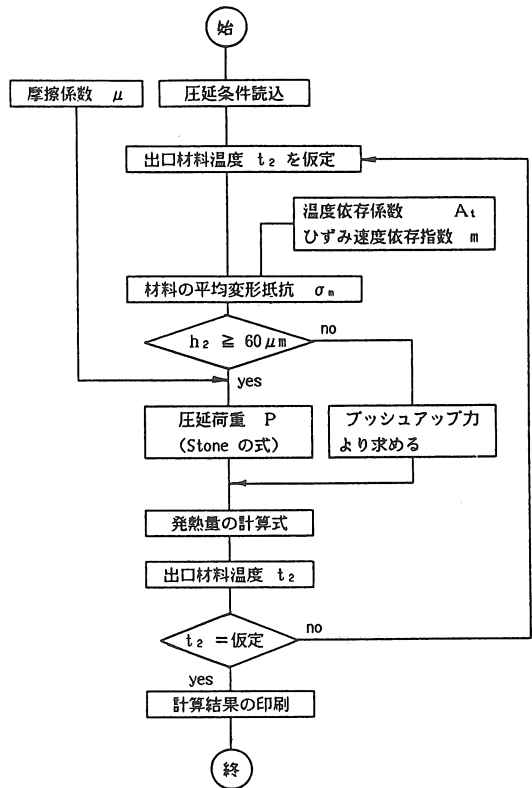


図5 発熱量計算のフローチャート

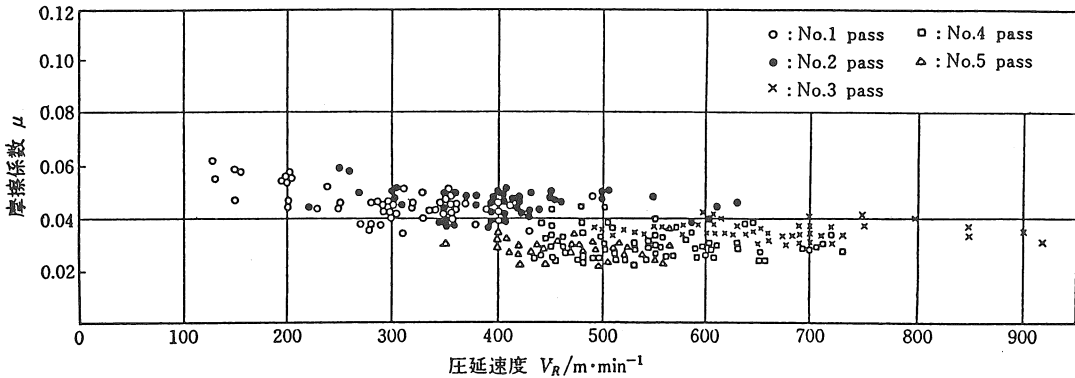


図 6 圧延速度と摩擦係数の関係

結果が図 6 である。第 1, 2 および第 3 パスの摩擦係数は、図 5 に示す数値計算法により Stone の式を用いて実測のプッシュアップ力（圧下力）より計算した。図 7 は、同時に計算した発熱量を圧延動力に換算した値 W_t と、実測の圧延動力 W_a との比較を行ったものである。 W_a は、バックアップロール軸受の摩擦損失および駆動系の伝達損失を考慮して次式より求めた。すなわち

$$W_a = \eta N_e - N_f$$

ただし、

$$N_f = \frac{\mu_f P_t \pi d n_f}{60}$$

ここに、

- N_e : 電動機の出 力 [W]
- N_f : 軸受のころがり摩擦による損失動力 [W]
- η : 圧延機駆動系の伝達効率 (=0.95~0.90)
- μ_f : 円筒ころ軸受の動摩擦係数 (=0.001)
- d : 軸受内径 [mm]
- n_f : バックアップロールの回転数 [rpm]

なお、ワークロール軸受に作用するラジアル荷重は数 10KN 程度（バックアップロール軸受に作用するラジアル荷重の数%程度）であるため、ワークロール軸受における摩擦損失は無視して考えた。

図 5 において、圧延動力の計算値 W_t と実測値 W_a とはよく一致しており、前述した計算式で発熱量を精度よく計算できることがわかる。

そこで、圧延荷重より摩擦係数が逆算できない第 4, 5 パスについては実測の圧延動力に基づき摩擦係数を逆算した。すなわち、発熱量の計算値が圧延動力の実測値

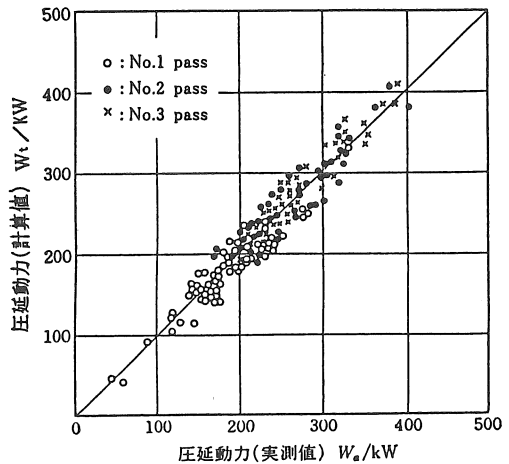


図 7 圧延動力の実測値と計算値の比較

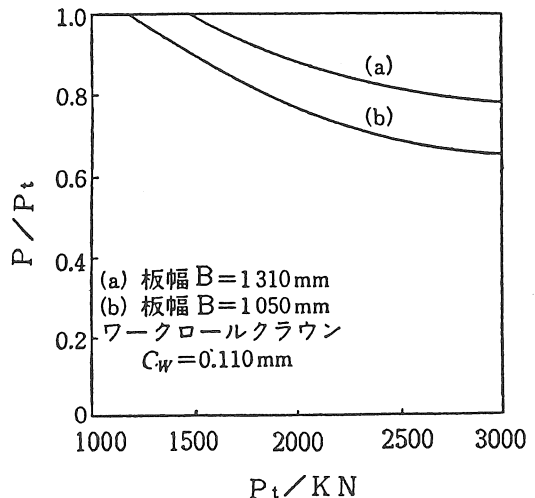


図 8 プッシュアップ力に占める純圧延荷重の割合（第 4 および第 5 パス）

に一致する摩擦係数を求めた。なお、力学モデルの計算により推定したブッシュアップ力に占める純圧延荷重の割合 P/P_t を図8に示す。

本解析で得られた結果をまとめると次の通りである。

- 1) 実圧延データより摩擦係数を逆算すると同時に、計算した発熱量と実測の圧延動力との比較を行い、両者がよく一致することを確認した。本報で報告した熱モデルによりロール間隙における発熱量を精度よく計算できることがわかった。
- 2) 圧延荷重式からの逆算が適用できない極薄圧延領域については本報で試みた実測の圧延動力より摩擦係数を逆算する方法が有効である。
- 3) 摩擦係数は、低速圧延域で圧延速度の増大とともに減少しながら0.06~0.02の範囲に分布している。粗圧延・中間圧延領域における圧延速度の上昇にもなると出側板厚が薄くなる、いわゆる速度効果の原因は、圧延速度の上昇にもなると摩擦係数の減少にあると判断される。
- 4) 摩擦係数は後段のパスほど小さい。

IV むすび

圧延加工の挙動把握の一例として、薄板圧延における摩擦係数の推定について報告した。数10 μ m厚さのステンレス鋼のはく圧延も商業ベースで実施されており、圧延業界では、今後ますます薄肉化が指向されて行くものと考えられる。圧延板幅の広幅化と圧延速度の高速化による極薄圧延の生産性向上への要求は、当然圧延機の自動制御によりきびしい性能要求を課することになるであろう。被制御特性の把握の精度向上のネックになっているロール間隙弧に沿う摩擦係数の変化などの未知の部分についての定量的追求が待たれるところである。圧延加工に携わる者にとって大切なことは、加工の挙動あるいは加工された製品品質とそれらに影響を及ぼす多くの因子との因果関係に常に興味を持ち、加工の実際を凝視することだと思う。本報が、圧延加工の挙動とそれに影響を及ぼす因子とのかかわりを理解する上での一助になれば幸いである。

(注)

- (1) 下土橋渡：技能と技術，1988年3月，P31-36.
- (2) 下土橋渡：同上，1988年5月，P49-54.
- (3) 下土橋渡：同上，1988年9月，P50-54.
- (4) 小園東雄 他：昭和59年度精機学会春季大会学術講演会論文集，1984年5月，P547-550.

- (5) 木内 学：塑性と加工，1988年9月，P911-P918.
- (6) 鈴木弘編：塑性加工，裳華房，1985年，P1-20.
- (7) 下土橋渡：塑性と加工，1988年4月，P390-397.
- (8) 下土橋渡：同上，1981年9月，P661-668.
- (9) 小門純一：塑性と加工，1970年11月，P816-821.
- (10) Kerth, W., Amann, E., Raber, X. & Weber, H. : Int. Metall. Rev., 1975, May, P185-207.
- (11) 鈴木弘 他：東京大学生産技術研究所報告，1968年3月，P40-50.
- (12) Gelegi, A. 著，五弓勇雄訳：金属塑性加工の計算(上)，コロナ社，1969年，P57-59.

