

# 複合板の圧延における荷重を求めるプロセス モデル式の開発について

柳本 左門\*・高橋 肇\*・三木 武司\*\*・青木 至\*\*

## Predicted Rolling Load in the Rolling of the Double Layered Sheet

Samon YANAGIMOTO, Hajime TAKAHASHI, Takeshi MIKI  
and Itaru AOKI

### Abstract

The rolling load was derived by a slab method and modified to practical use in the rolling of the double layered sheet. Good agreement was obtained within the accuracy of five percent between the measured and the predicted value. The experiment was carried out in the case of the composite sheet which was composed of aluminum and copper.

### 1. はじめに

複合材料を安価に、しかも量産加工する技術の開発は、今日の高技術産業を支える素材供給の見地より極めて重要なものとなっている。

本報告は、第一段階として2枚の性質の異なる板を圧延により圧着させて素材を製造する工程について、その荷重を推定するプロセスモデル式を開発し、更に圧延後の異なった性質の板が有する厚さを推定する方法についてもふれたものである。

### 2. 研究方法

プロセスモデル式の精度の検討とその向上を目的として実験を実施した。

実験は銅材(硬い材料の例として用いた)とアルミニウム材(軟い材料の例として用いた)を用い、ロール径50mmの2段小型試験圧延機を3種類の潤滑条件のもとで稼動した。各々の材料の初期厚さは何れも1mmであるとした。

種々の圧下率を与えて圧延をおこない、荷重をロードセルにて読み取り、また圧延後の板厚を実測して開発した理論との比較検討をおこなった。

### 3. 平行板圧縮の理論による圧延後の 板厚配分の推定について

幅  $b$ 、厚さ  $h$  の板を平行板工具で圧縮する場合の荷重  $P$  は、初等理論によると<sup>1)</sup>

$$P = \frac{2khb}{\mu} \left\{ \exp\left(\frac{\mu b}{h}\right) - 1 \right\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで  $\mu$  は工具との間の摩擦係数、 $k$  は平均変形抵抗である。

異なる特性をもつ材料を重ね合わせて圧縮する場合に拡張すると、この場合には圧縮後の板厚は変化しても荷重は等しい筈である。

板幅は十分に広いと仮定すると、幅  $b$  は圧縮前後で近似的に不変であるとみてよい。すると式(1)より、

$$\frac{k_1 h_1}{\mu_1} \left\{ \exp\left(\frac{\mu_1 b}{h_1}\right) - 1 \right\} = \frac{k_2 h_2}{\mu_2} \left\{ \exp\left(\frac{\mu_2 b}{h_2}\right) - 1 \right\} \quad (2)$$

となる。ここで、1 は軟かい材料の板(本実験ではアル

平成2年9月28日受理

\* 機械工学科

\*\* 新日鉄㈱

ミニウムとした)に用いる記号であり, 2は硬い材料の板(本実験では銅とした)に用いる記号であるとする。

ここで, 圧縮後の全圧下率(銅とアルミニウムを重ねたときの値を示す)を $\eta_t$ とし, 初期の板厚( $h_{01}$ ,  $h_{02}$ )は軟, 硬材ともに等しいとおく。

個々の板の圧下率を $\eta_1$ ,  $\eta_2$ とすると,

$$\eta_1 = (h_{01} - h_1) / h_{01} \tag{3}$$

$$\eta_2 = (h_{02} - h_2) / h_{02} \tag{4}$$

$$\eta_t = \{ (h_{01} + h_{02}) - (h_1 + h_2) \} / (h_{01} + h_{02}) = (\eta_1 + \eta_2) / 2 \tag{5}$$

となる。

(3)~(5)式を(2)式に用い, 整理すると

$$k_1(1 - \eta_1) \left[ \exp \left\{ \frac{\mu_1 b}{h_{01}(1 - \eta_1)} \right\} - 1 \right] = k_2(1 - \eta_2) \left[ \exp \left\{ \frac{\mu_2 b}{h_{02}(1 - \eta_2)} \right\} - 1 \right] \tag{6}$$

となる。したがって, 式(5)と式(6)より圧縮後の圧下

率配分 $\eta_1$ ,  $\eta_2$ および更に式(3), (4)を介して圧縮後の板厚 $h_1$ ,  $h_2$ を知ることができる。

図1に圧延実験による潤滑油なし, 鉱物油, 植物油の3種類の状態について圧下率配分 $\eta_1$ (アルミニウム: 軟い材料とした),  $\eta_2$ (銅: 硬い材料とした)を示した。明らかに軟い材料の圧下率が大きく, しかも潤滑状態が良好なほど $\eta_1$ と $\eta_2$ の差が大きくなるのがわかる。また, 図中に併記した圧縮理論による圧下率配分も定量的にもかなり良く一致していることがわかる。この場合には, 圧延実験における摩擦係数よりも更に良好な工具の表面仕上の状態の摩擦係数値でsimulateできることがわかった。その値は圧延時の摩擦係数の1/3~1/4の値がよいことがわかった。

#### 4. 二層材(2枚の板を重ね合わせたもの)の圧延における圧延荷重を求める近似理論について

本研究の目的としたプロセスモデル式の開発においては, 可能な限り単純化されたものでかつ余り精度を失わない解析解を得る必要があった。

したがって, かなりの仮定の上に立つスラブ法を導入し解析を試みた。得られた解は多少の誤差はやむをえないので実験結果により修正をおこない, 最終的なプロセスモデル式とした。以下その概要を示す。

図2に2枚の板を圧延する場合の略図と記号を示した。上下ロールと材料の間の接触形状は円弧の一部である筈であるが, 解析を容易にするために,  $O'_{01}$ と $O'_{11}$ および $O'_{02}$ と $O'_{12}$ を結ぶそれぞれの直線で近似されると仮定した。

その結果が作用応力との関連で図3に示されている。

図3の上側に軟かい材料側の応力記号を示し, 下側に硬い材料のそれを示した。図中で摩擦応力( $\mu_1 p_1$ ,  $\mu_2 p_2$ ,  $\mu_0 p_0$ の各値)の作用方向が逆転することは良く知られている現象である<sup>2)</sup>。また, 軟, 硬両材料が圧延

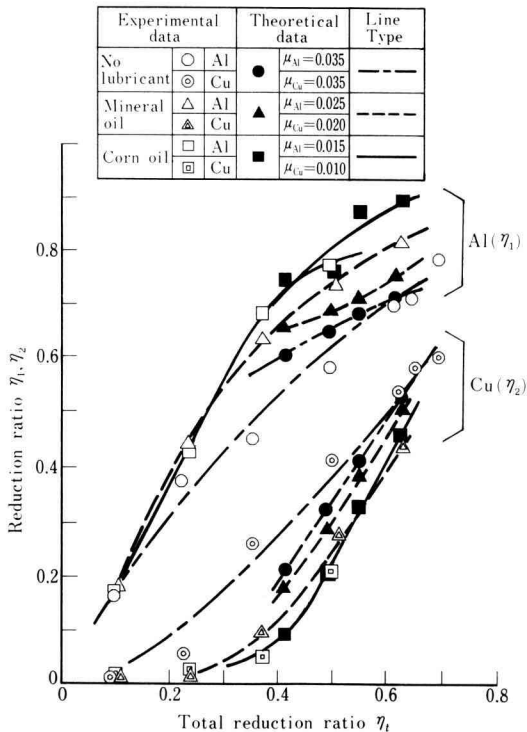


Fig. 1. Comparison of reduction ratio between the calculated and the measured value.

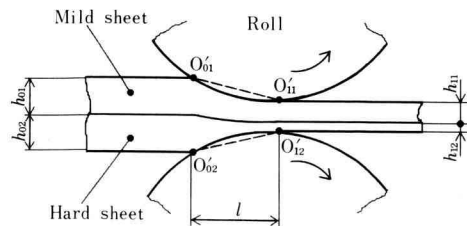


Fig. 2. Rolling of the double layered sheet.



がそれぞれ得られる。

したがって、中立点（摩擦応力が逆転する位置）を接触弧長の中間点と近似できるものと仮定すると、全圧延荷重（ $P_1$ ）は、

$$P_1 = B_0 \int_{l/2}^l p_1(\text{入口}) dx + B_0 \int_0^{l/2} p_1(\text{出口}) dx$$

と与えられる。したがって、式(16)、(17)を代入し整理すると、

$$\begin{aligned} P_1 = & B_0 H_{11} \left[ \left\{ \frac{H_{11} + l/2}{H_{11}} + \frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} \cdot \frac{H_{11} + l/2}{H_{11}} \right. \right. \\ & - \left. \frac{1}{1 - \gamma_{11}} \cdot \frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} \left( \frac{H_{11} + l/2}{H_{11}} \right)^{1 - \gamma_{11}} \right\} k_1 \\ & - \left. \left\{ 1 + \frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} - \frac{1}{1 - \gamma_{11}} \cdot \frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} \right\} k_1 \right] \\ & + B_0 (H_{11} + l) \left[ \left\{ \left( 1 + \frac{\delta'_{11}}{\gamma'_{11}} \right) k_1 + \left( \frac{1}{1 - \gamma'_{11}} \right) \right. \right. \\ & \times \left. \left( \sigma_p - \frac{\delta'_{11}}{\gamma'_{11}} \cdot k_1 \right) \right\} - \left. \left\{ \left( \frac{H_{11} + l/2}{H_{11} + l} \right) \cdot k \right. \right. \\ & + \left. \frac{\delta'_{11}}{\gamma'_{11}} \cdot k_1 \left( \frac{H_{11} + l/2}{H_{11} + l} \right) \right. \\ & + \left. \left( \sigma_p - \frac{\delta'_{11}}{\gamma'_{11}} \cdot k_1 \right) \left( \frac{1}{1 - \gamma'_{11}} \right) \right. \\ & \left. \left. \times \left( \frac{H_{11} + l/2}{H_{11} + l} \right)^{1 - \gamma'_{11}} \right\} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \beta_{11} &= \tan \alpha_1 + \mu_1 + \mu_0 (1 - \mu_1 \tan \alpha_1) \\ \gamma_{11} &= (\tan \alpha_1 - \beta_{11}) / \tan \alpha_1 \\ \delta_{11} &= \beta_{11} / \tan \alpha_1 \\ H_{11} &= h_{11} / \tan \alpha_1 \\ \beta'_{11} &= \tan \alpha_1 - \mu_1 - \mu_0 (1 + \mu_1 \tan \alpha_1) \\ \gamma'_{11} &= (\tan \alpha_1 - \beta'_{11}) / \tan \alpha_1 \\ \delta'_{11} &= \beta'_{11} / \tan \alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

である。

同様の解析を下側（図3参照）の硬い材料について実行すると、前述と同一形式の解を得ることができる。以下結果のみを示すと次のようになる。硬質材の下側の材料が圧延される時に誘起される全荷重は、 $P_2$ として

$$\begin{aligned} P_2 = & B_0 \cdot H_{22} \left[ \left\{ \frac{H_{22} + l/2}{H_{22}} + \frac{\delta_{22}}{\gamma_{22}} \cdot \frac{H_{22} + l/2}{H_{22}} \right. \right. \\ & - \left. \frac{1}{1 - \gamma_{22}} \cdot \frac{\delta_{22}}{\gamma_{22}} \left( \frac{H_{22} + l/2}{H_{22}} \right)^{1 - \gamma_{22}} \right\} \cdot k_2 \\ & - \left. \left\{ \left( 1 + \frac{\gamma_{22}}{\gamma_{22}} \right) - \frac{1}{1 - \gamma_{22}} \cdot \frac{\delta_{22}}{\gamma_{22}} \right\} \cdot k_2 \right] \end{aligned}$$

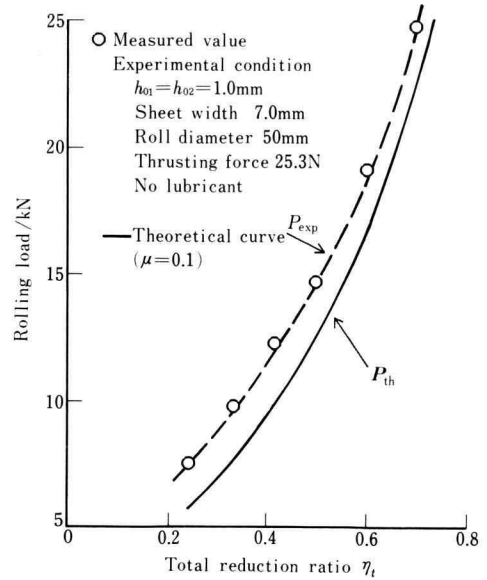


Fig. 4. Comparison of the rolling load value.

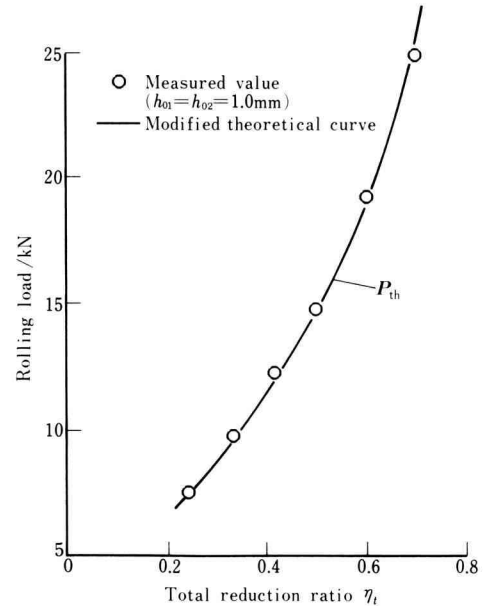


Fig. 5. Comparison of the rolling load between the predicted and the measured value.

$$\begin{aligned}
 &+ B_0(H_{22} + l) \left[ \left\{ \left( 1 + \frac{\delta'_{22}}{\gamma'_{22}} \right) k_2 + \left( \frac{1}{1 - \gamma'_{22}} \right) \right. \right. \\
 &\times \left( \sigma_p - \frac{\delta'_{22}}{\gamma'_{22}} \cdot k_2 \right) \left. \right\} - \left\{ \left( \frac{H_{22} + l/2}{H_{22} + l} \right) \cdot k_2 \right. \\
 &+ \frac{\delta'_{22}}{\gamma'_{22}} \cdot k_2 \left( \frac{H_{11} + l/2}{H_{11} + l} \right) + \left( \sigma_p - \frac{\delta'_{22}}{\gamma'_{22}} \cdot k_2 \right) \\
 &\left. \left. \times \left( \frac{1}{1 - \gamma'_{22}} \right) \left( \frac{H_{22} + l/2}{H_{22} + l} \right)^{1 - \gamma'_{22}} \right\} \right] \quad (20)
 \end{aligned}$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned}
 \beta_{22} &= \tan \alpha_2 + \mu_2 + \mu_0(1 - \mu_2 \tan \alpha_2) \\
 \gamma_{22} &= (\tan \alpha_2 - \beta_{22}) / \tan \alpha_2 \\
 \delta_{22} &= \beta_{22} / \tan \alpha_2 \\
 H_{22} &= h_{12} / \tan \alpha_2 \\
 \beta'_{22} &= \tan \alpha_2 - \mu_2 - \mu_0(1 + \mu_2 \tan \alpha_2) \\
 \gamma'_{22} &= (\tan \alpha_2 - \beta'_{22}) / \tan \alpha_2 \\
 \delta'_{22} &= \beta'_{22} / \tan \alpha_2
 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

で与えられる。

以上の結果を用いて、二層材としたときの圧延荷重は式(18), (20)の平均値で与えられると仮定し,

$$P_t = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (22)$$

とした。

### 5. 実験結果との比較とプロセスモデル式の提唱

実験に用いた軟質材としてのアルミニウムと硬質材としての銅の各々の変形抵抗は次の式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$K_1 = 7.81 + 5.93\eta_1 \quad (23)$$

$$K_2 = 23.48 + 23.40\eta_2 \quad (24)$$

これらの値を用い、初期の板厚  $h_{01}$ ,  $h_{02}$  にそれぞれ 1.0 mm を与え、種々の圧下率  $\eta_i$  を与えて実験をおこなう。この場合の圧延後の板厚  $h_{11}$ ,  $h_{12}$  は実測値を用いた。また、図4の実線は式(22), (20), (18)によって理論計算されたときのものである。

図より実測値の方が理論値より大き目で、その差は15%ほどである。理論の誘導の時に用いた仮定を考慮

すると、理論はかなり良く実際を説明できると考えてもよい。

しかしながら、更に精度を向上させるために、理論を実験的に修正した結果が図5に示されている。

その修正式は一般式で

$$P = P_{th} / (C_1 + C_2 \cdot \eta_i) \quad (25)$$

と表現され、本研究では

$$C_1 = 0.694, C_2 = 1.055 \quad (26)$$

が良い一致をみた。結果は図5に示されている。ただし、式(25)中の  $P_{th}$  の値はすでに導いた理論荷重  $P_t$  と等しいものである。

したがって、プロセスモデル式は式(25)で与えられるもので十分実用に耐えられるものであることがわかる。

### 6. おわりに

本研究により従来提唱されていた2層圧延の理論<sup>4)</sup>をはるかに単純化した、実用され易い形式のプロセスモデル式が見出された。

このモデル式はかなり精度の良いものであり、この種の素材圧延時のプロセス制御に良好に使用できるものと思われる。

なお、圧延後の板厚配分も論文中に示したように簡単な圧縮理論の導入により推定できるので、本論文中に用いられている圧延後の板厚も前もって知ることができる。

したがって、実際には圧縮理論と本研究で導いたプロセスモデル式を併用するとよい。

### 文 献

- 1) たとえば、鈴木 弘編、塑性加工 (昭55), p. 71
- 2) E. Orowan, Proc. Instn. Mech. Engrs., 150 (1943), 140
- 3) 益田森治、塑性加工 (1953-1), 19, 共立全書
- 4) 鈴木 弘 外2名、塑性と加工 (日本塑性加工学会), 3-133 (1972-2), 114