

## 棒・線材圧延の温度解析

—圧延加工の温度解析 第5報—

Thermal Analysis in Bar and Wire Rolling

—Thermal Analysis in Hot Rolling /5—

木 内 学\*・柳 本 潤\*・若 松 英 士\*

Manabu KIUCHI, Jun YANAGIMOTO and Eiji WAKAMATSU

Table 1 Employed rolling conditions.

Roll diameter /mm	143
Rolling speed /m min <sup>-1</sup>	2783
Material of workpiece	SWRH62A
Initial wire diameter /mm	7.0
Groove radius /mm	8.5
Nominal reduction in height /%	32.8
Flow stress	Shida's formula
Friction coefficient $\mu$	0.3
Distance from exit to next stand /mm	635
Workpiece temperature /°C	
surface	935
average	1006
center	1062
Thermal conductivity /W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	26.755
Specific heat /J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	628.35
Density /kg m <sup>-3</sup>	7860
Convection heat transfer coefficient /W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1163.0
Contact heat transfer coefficient /W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	30000.0
Roll temperature /°C	20
Thermal conductivity /W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	45.2
Specific heat /J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	452
Density /kg m <sup>-3</sup>	7860
Convection heat transfer coefficient /W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	10000.0

## 1. 緒 言

薄板・厚板などの板材圧延ならびに棒・線・形材などの異形材圧延に用いる圧延機・ロール・加工工程などの設計・製作・運用には、被圧延材の三次元塑性変形の解明と同時にその温度変化の解明が不可欠である。被圧延材とロールとの接触による拔熱や摩擦発熱、変形に伴う発熱、スタンド間の冷却による拔熱等により、圧延中の被圧延材の温度は大きく変化する。筆者らは、これまで板圧延について温度解析を行ってきた<sup>1)~4)</sup>が、本報では棒・線材圧延を対象として、スタンド間を含めたオイラー表示による3次元上流有限要素法を用いて温度解析を行った結果を示す。

## 2. 解析条件

通常の圧延工程においては、被圧延材の温度は表面ではロールによる拔熱により低下し、内部では塑性変形に伴う発熱により上昇する。しかし、例えば線材の仕上げ圧延の後段側においては、内部のみならず表面においても温度が上昇することが知られている。それは、接触によるロールへの拔熱よりもロールとの摩擦発熱が勝ることによる。本研究は、このような現象も含めて棒・線材圧延時の被圧延材の温度変化をより正確に把握することを目指している。

研究を進めるにあたり、結果の妥当性を確認するため、野口らの実験および解析結果との比較を行った。なお、スタンド間の冷却の熱伝達係数は野口らと同じ値を用いた<sup>5)</sup>。以下、代表的事例として線材  $\phi 5.5$  圧延の24番スタンドのラウンド・オーバルパスに関する解析結果について示す。解析条件を Table 1 に示す。

## 3. 解析手法

## 3.1 表面層の要素の大きさ

数値計算1ステップ当たりの温度の変化する深さは  $\sqrt{(\kappa \Delta t) / (\rho c)}$  で求められるので、本解析ではロールおよび被圧延材の表面の要素の厚さはこの関係を考慮して定められている。ただし、 $\kappa$  は熱伝導係数、 $\Delta t$  は刻み時間、 $\rho$  は密度、 $c$  は比熱を表す。

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

3.2 初期温度分布の与え方

被圧延材の形状の表示に際しては、節点間を直線補間しているため、Fig. 1 に示すように、C 断面はその表面を表示する各線分とその両端の節点と原点とを結ぶ線分とでなる n 個の三角形の集合とみなすことができる。そこで、Fig. 2 に示すようにそのうちの一つの三角形を取り出し、その初期温度分布関数として

$$f(r/R) = \alpha_1 + \alpha_2(r/R) + \alpha_3(r/R)^2 + \alpha_4(r/R)^3 \dots (1)$$

を考える。今、中心温度  $T_c$ 、表面温度  $T_s$ 、平均温度  $T_m$  が与えられており、中心での温度勾配が 0 という条件から

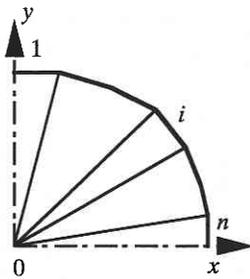


Fig. 1 Schematic illustration of wire's cross-section.

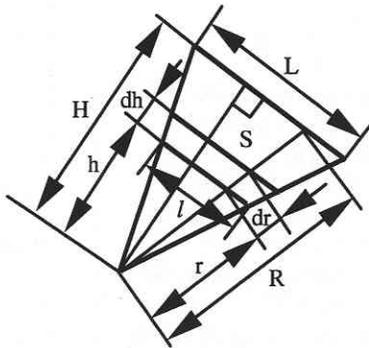


Fig. 2 One of triangles composing wire's cross section.

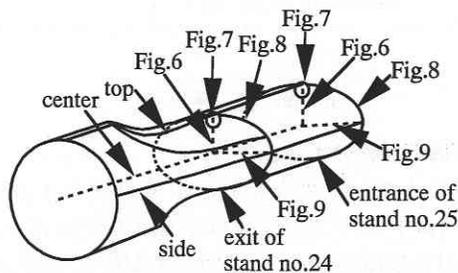


Fig. 3 Flow lines along which calculated temperatures are shown.

$$\left. \begin{aligned} f(0) &= T_c \\ f(1) &= T_s \\ \frac{\sum_{i=1}^n \int_0^R f\left(\frac{r}{R}\right) L \frac{H}{R^2} r dr}{\sum_{i=1}^n \int_0^R L \frac{H}{R^2} r dr} &= \alpha_1 + \frac{2}{3}\alpha_2 + \frac{1}{2}\alpha_3 + \frac{2}{5}\alpha_4 = T_m \\ \frac{\partial f(r/R)}{\partial (r/R)} \Big|_{\frac{r}{R}=0} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

が得られる。式 (2) を解いて、式 (1) に代入すると初期温度分布関数は次式で示される。

$$f(r/R) = T_c + (10T_m - 4T_s - 6T_c)(r/R)^2 + (5T_s + 5T_c - 10T_m)(r/R)^2 \dots (3)$$

4. 解 析 結 果

Fig. 4 には対象とする 24 番スタンド入口から 25 番スタンド入口までの圧延方向の温度分布を示す。黒塗り点が本解析の結果を示し、白抜き点は野口らの結果<sup>5~7)</sup>を示す。また 24 番ならびに 25 番スタンド入口での表面温度、中心温度および平均温度について、野口らの結果との比較を Table 2 に示す。24 番スタンド入口における表面および中心の温度が一致するのは初期条件として与えたためである。平均温度に多少のずれが生じるのは、3.2 節で説明した方法により初期温度分布を与えると、各節点においては仮定した値となるが、節点間では直線補間するために、分布関数が上に凸となる場合には積分値が若干低くなってしまふことによる。野口らの解析結果と実験結果との比較は

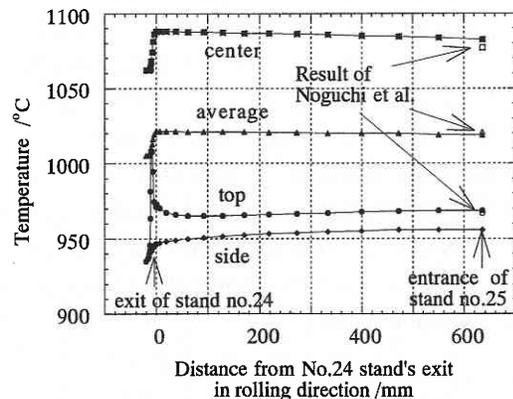


Fig. 4 Temperature change in rolling direction.

参考文献の<sup>5-7)</sup>にある。

ところで、野口らの解析では被圧延材とロールとの熱伝達には接触熱抵抗のモデルを採用しているのに対して、本解析では実験結果から逆算した熱伝達係数を用いている<sup>8)</sup>。両者の解析結果は、モデルの違いがあるにもかかわらずよい一致を示している。これより、板圧延の場合の熱伝達係数  $30000 \text{ W/m}^2\text{K}$  が棒・線材圧延の場合においても妥当であることを知ることができる。

ところで、このスタンド間で表面の温度が下がっていないのは、被圧延材内部から表面へ流れ出る熱量と表面から放出される熱量がほぼ等しくなるためである。

**Fig. 5**には24番スタンドのロールバイトならびにその近傍の圧延方向温度分布を示す。被圧延材先端の温度が当初上昇しているのは摩擦による発熱がロールへの抜熱に勝っているためである。**Fig. 6**には厚さ方向温度分布、**Fig.**

Table 2 Comparison of results.

		Result of Noguchi et al.	Our result
entrance of No.24 stand	surface	935 °C	935 °C
	center	1062 °C	1062 °C
	average	1006 °C	1005.1 °C
entrance of No.25 stand	surface	967 °C	968.8 °C
	center	1077 °C	1082.7 °C
	average	1021 °C	1018.6 °C

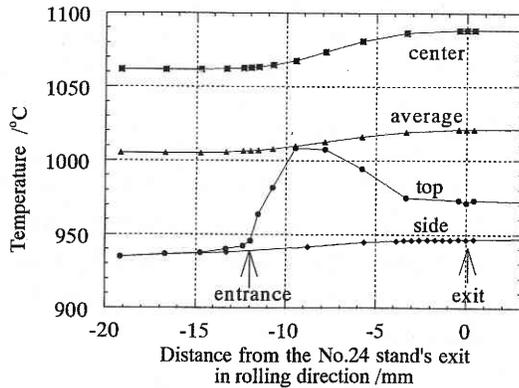


Fig. 5 Temperature change in rolling direction.

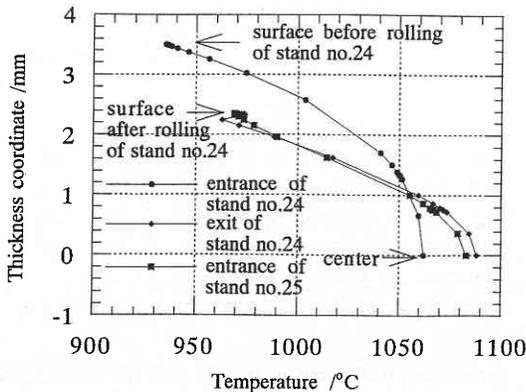


Fig. 6 Temperature distribution in thickness direction.

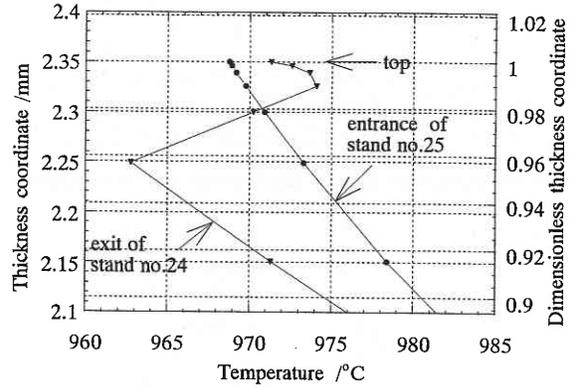


Fig. 7 Temperature distribution in thickness direction.

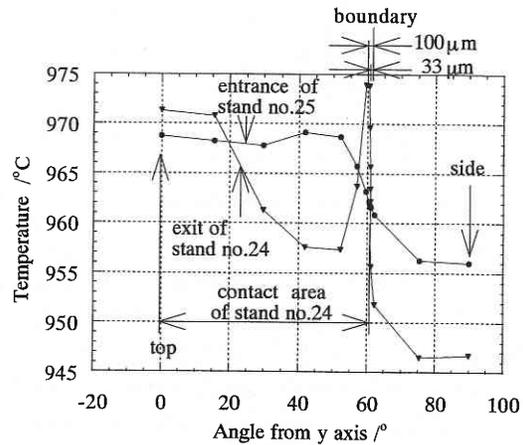


Fig. 8 Wire surface temperature distribution in peripheral direction.

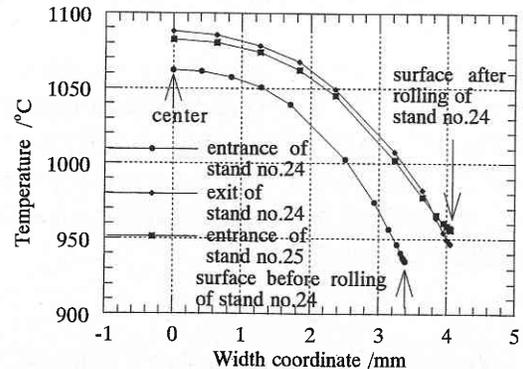


Fig. 9 Temperature distribution in width direction.

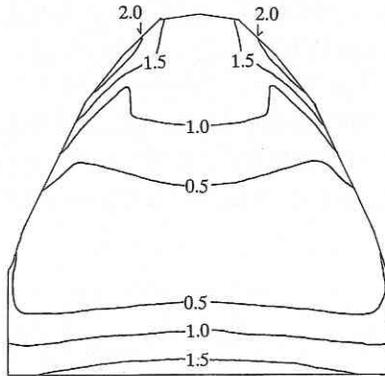


Fig. 10 Distribution of relative slip between roll and workpiece at contact area. m/s

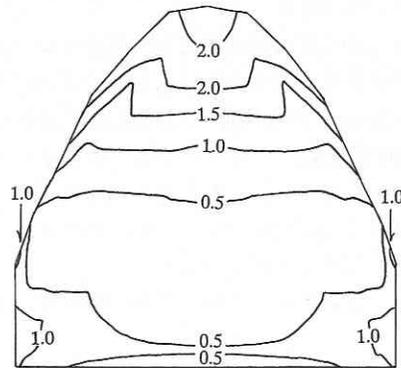


Fig. 12 Frictional heat distribution at contact area. W/m<sup>2</sup>

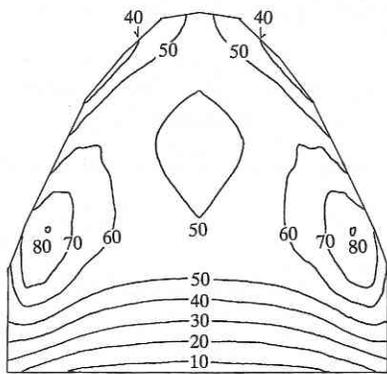


Fig. 11 Contact pressure distribution at roll-wire interface. kgf/mm<sup>2</sup>

7には表面近くを拡大した厚さ方向温度分布を示す。24番スタンド出口において極値を2つ持つ分布をしているのは、噛み込み開始後から生じた摩擦熱が内部へ流入し温度が上昇するが、中立点のあたりからはロールへの抜熱が勝り表面温度が降下するためである。Fig. 8には外周方向温度分布を示す。24番スタンド出口の接触・非接触境界の近くで温度が上昇しているのは接触面内での摩擦発熱分布によるものと考えられる。Fig. 9には幅方向温度分布を示す。

Fig. 10にはロールと被圧延材の相対すべり速度の分布、Fig. 11には面圧分布、Fig. 12には接触面内の摩擦発熱量分布、Fig. 13には被圧延材の接触面内の温度分布を示す。これらより、高速圧延では、面圧および相対すべり速度が大きく、その影響が重なり合うため接触面内における温度分布が複雑となることが分かる。

### 5. 結 言

棒・線材圧延の温度解析の手法の確立と応用について研究を進め、高速圧延条件下においても筆者らが従来板圧延

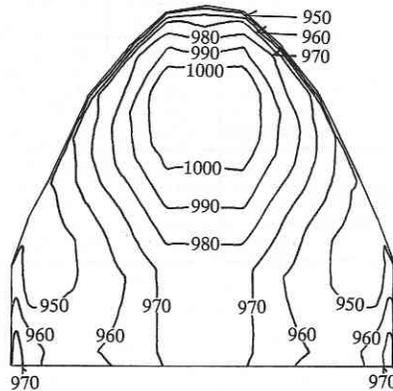


Fig. 13 Temperature distribution at contact area. °C

に用いてきたロールと被圧延材の熱伝達モデルが適用可能であることを確認した。また、摩擦発熱がロールへの抜熱に比べ大きい領域があり、そのために接触面、L断面内に複雑な温度分布が発生することが分かり、3次元解析の有意性を確認できた。

### 6. 謝 辞

研究遂行にあたり貴重な資料をご提供下さった新日本製鐵(株)の野口氏に謝意を表します。

(1997年11月4日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 木内ほか：生産研究第47巻第12号，(1995)，605.
- 2) 木内ほか：生産研究第48巻第6号，(1996)，311.
- 3) 木内ほか：生産研究第48巻第12号，(1996)，581.
- 4) 木内ほか：生産研究第49巻第9号，(1997)，452.
- 5) 野口ほか：第34回塑加連講論，(1983)，169.
- 6) 野口：日本機械学会第73期全国大会講演論文集(III)，(1995)，35.
- 7) Noguchi, et al., Proceedings of the 1st ICTP (1984), 1212.
- 8) W. C. Chen, et al., Metal. Trans. A, (1993), 1307.