

圧延加工の温度解析 第3報

Thermal Analysis in Hot Rolling/3

木内 学*・柳本 潤*・若松 英士*

Manabu KIUCHI, Jun YANAGIMOTO and Eiji WAKAMATSU

1. 緒言

圧延の三次元温度解析を有限要素法で完全に実行した事例は少なく、解析上の問題点とその解決法について報告した事例も少ない。この問題について筆者らは移流項の影響により生じる空間的解の振動現象を回避し、なおかつ現実の使用に堪え得る条件（計算時間、メモリー）を満足する解析手法について論じてきた^{1),2)}。本報においてはその解析プログラムを用い、三次元解析によってのみ考察可能な板材とくにエッジ部における温度の挙動について報告する。

2. 計算手法

2.1 解析範囲

被圧延材はロールとの接触により表面から多くの熱量がロールへと流れ、圧延終了と同時に被圧延材内部からの復熱により表面温度が上昇し下流へ行くに従い一定の範囲で温度は回復する。そこで復熱後、板厚方向の温度勾配が表面から一定となるところまでを解析範囲とした。

2.2 境界条件^{3)~5)}

被圧延材ならびにロールの境界における冷却条件を Fig. 1

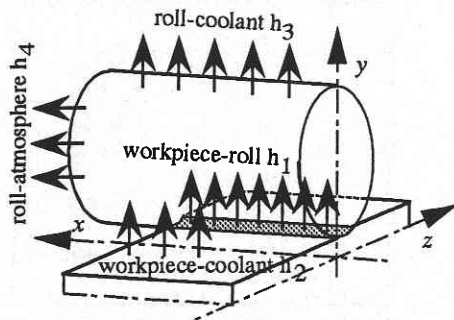


Fig. 1 Boundary condition

*東京大学生産技術研究所 第2部

Table 1 Employed heat transfer coefficient

boundary	W/m ² K
workpiece-roll h ₁	30000
workpiece-coolant h ₂	300
roll-coolant h ₃	10000
roll-atmosphere h ₄	50

に示す。被圧延材は自由表面において冷却水に接している状態、ロールの外周部は強制冷却されている状態、ロールの側面は空冷の状態を想定している。また、ロールと被圧延材の接触部における熱伝達係数は接触領域内で一定としている。具体的数値は Table 1 に示す。（ただし対称面は断熱面とした）

2.3 加工発熱^{6)~8)}

塑性変形による発熱量を以下のように評価した。

$$\dot{Q}_d = a\sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = a \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} = a \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \frac{3}{2} (\dot{\bar{\epsilon}})^2 = a\bar{\sigma} \cdot \dot{\bar{\epsilon}}$$

a は発熱効率を表し、0.9とした。

2.4 摩擦による発熱^{9)~11)}

摩擦による発熱は次式のように表される。

$$\dot{Q}_d = \mu \sigma_N |\dot{u}|$$

μ は摩擦係数、 σ_N は作用面に働く垂直応力、 \dot{u} は被圧延材とロールとの相対速度を表す。熱の半分をロール表面、残る半分を被圧延材表面に生じるものとした。

3. 計算条件

3.1 圧延条件

圧延速度、初期板厚、圧下率を変化させて解析を行った。

Table 2 Employed rolling condition

Rolling speed /m min ⁻¹	100,300,600
Initial thickness of workpiece /mm	5,10,20
Reduction in thickness /%	10,20,30
Initial width of workpiece /mm	1200
Rolling temperature /°C	1000
Test material	SS400
Flow stress	Shida's equation
Friction coefficient μ	0.3
FEM mesh system	Nx=11,Ny=10 Nz=4+8+19
Roll temperature /°C	20
Diameter of roll /mm	800

圧延条件を Table 2 に示す。アンダーラインは標準条件を表す。

3.2 被圧延材の初期温度分布 (板幅方向にのみ温度分布を与えた場合)

薄板を想定し、板厚方向には温度一定として、幅方向に温度分布を与えた。その条件を Table 3 に示す。この場合、他の圧延条件は Table 2 の標準条件に等しいものとした。

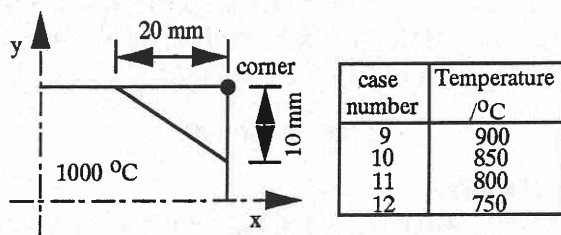
3.3 被圧延材の初期温度分布 (板厚方向にも温度分布を与えた場合)

厚板を想定しコーナー近くで幅方向ならびに板厚方向に温度勾配のある場合を解析をした。その条件を Table 4 に示す。圧延条件は初期板厚 30 mm、圧延速度 100 m/min である。その他の条件は標準条件に等しいものとした。

Table 3 Analysis condition

case number	Distance from the edge where temperature drop starts /mm	Temperature at the edge /°C
1	10	950
2	↓	900
3	↓	850
4	↓	800
5	↓	750
6	20	800
7	30	
8	40	↓

Table 4 Temperature at the corner



4. 解析結果

4.1 圧延条件を変化させた場合

それぞれ条件を変化させた場合の被圧延材上表面の幅中央ならびにエッジにおける圧延方向の温度分布を Fig. 2, 5, 8 に、上表面幅方向を Fig. 3, 6, 9 に、エッジ板厚方向を Fig. 4, 7, 10 に示す。幅方向、板厚方向の図については白ヌキが出口、黒ヌキが復熱後の分布を表す。速度が速いほど、板厚が小さいほど圧延後の温度は高い。速度が遅いほど接触時間が長く、

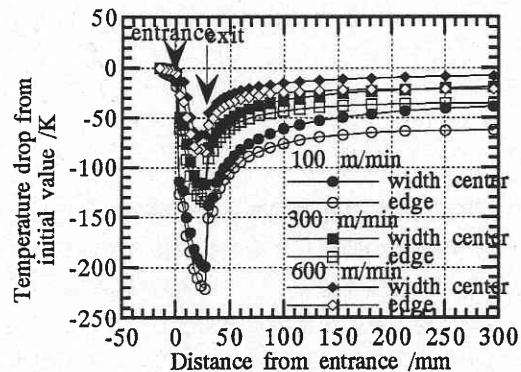


Fig. 2 Upper surface temperatures in rolling direction

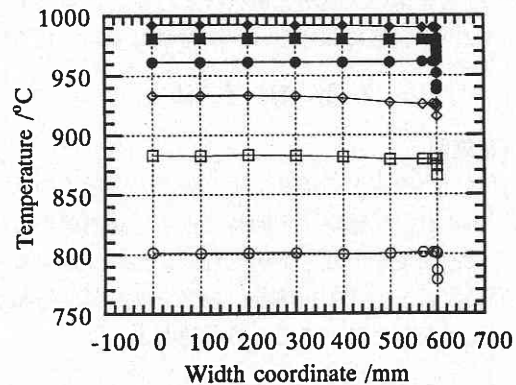


Fig. 3 Upper surface temperatures in rolling direction

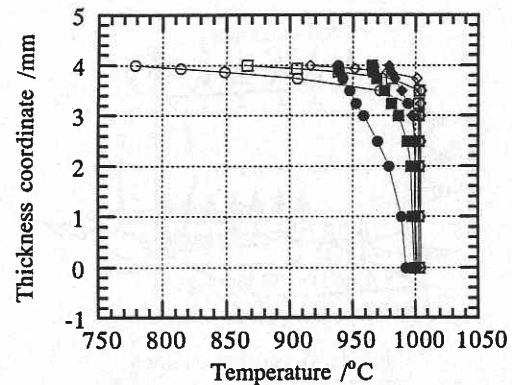


Fig. 4 Upper surface temperatures in rolling direction

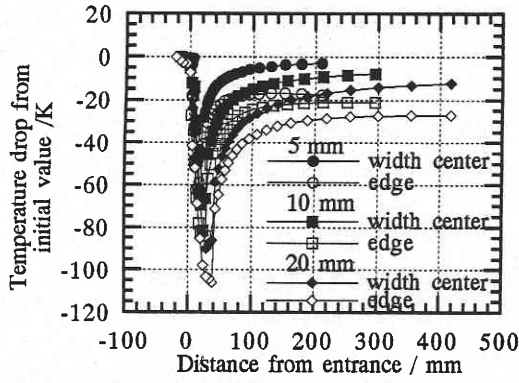


Fig. 5 Upper surface temperatures in rolling direction

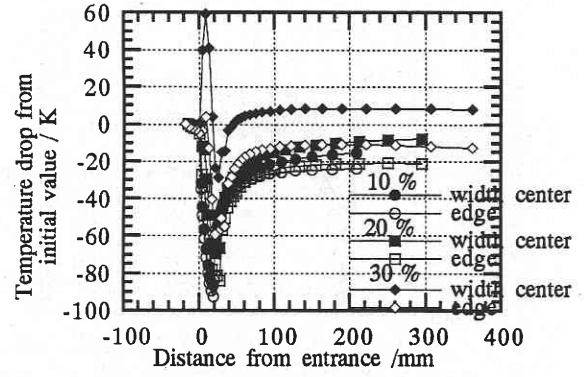


Fig. 8 Upper surface temperatures in rolling direction

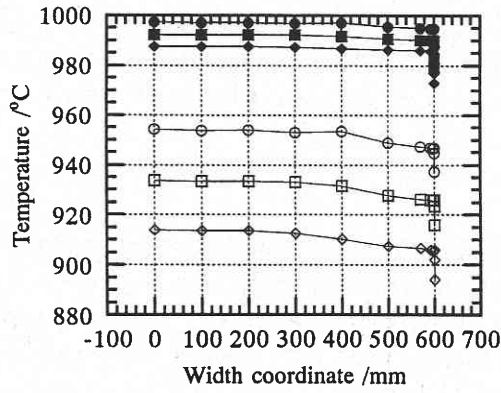


Fig. 6 Edge of upper surface temperatures in rolling direction

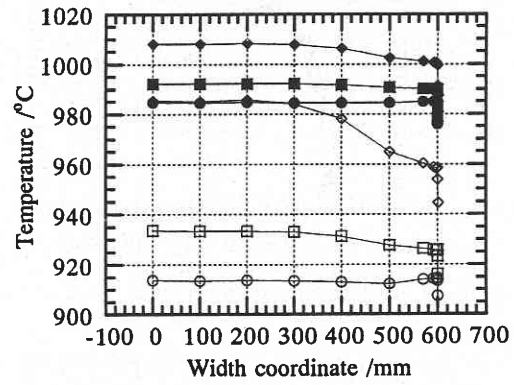


Fig. 9 Upper surface temperatures

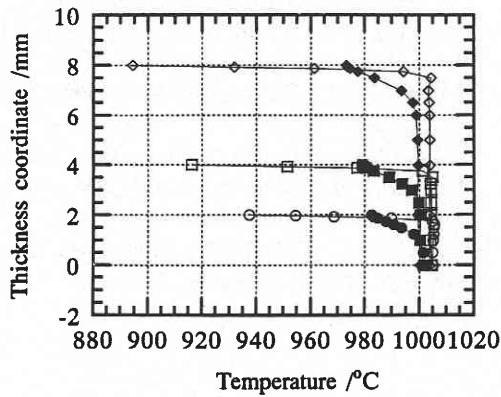


Fig. 7 Edge of upper surface temperatures in rolling direction

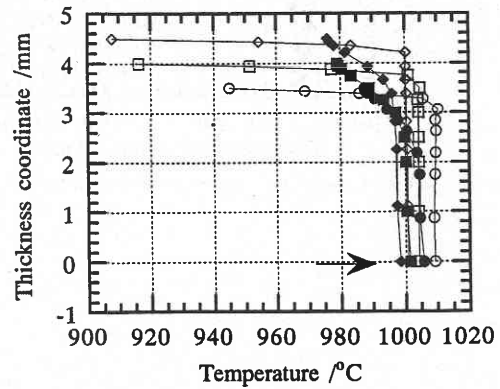


Fig. 10 Edge temperatures

研 究 速 報

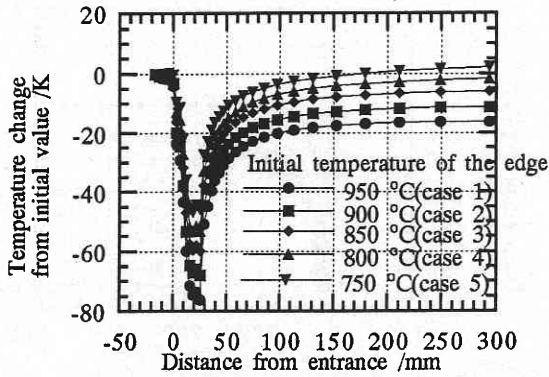


Fig. 11 Edge of upper surface temperatures in rolling direction

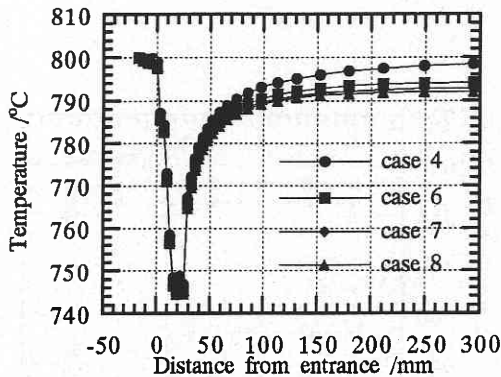


Fig. 12 Edge of upper surface temperatures in rolling direction

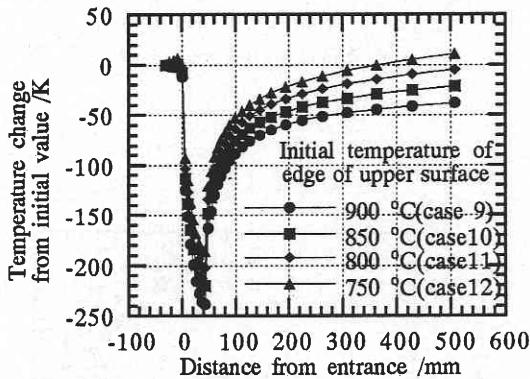


Fig. 13 Edge of upper surface temperatures in rolling direction

初期板厚が大きいほど接触弧長が大きく、ロールに奪われる熱量が大きくなるからである。圧下率が大きい場合、接触弧長が長くなるが圧延圧力も大きくなる。上記の条件下では圧延圧力の影響の方が大きく、圧下率が大きいほど温度が高くなるが、圧下率の影響についてはもう少し検討する必要がある。

4.2 板幅方向にのみ温度分布を与えた場合

Fig. 11 は板縁の温度が圧延後に初期温度よりも低くなる場合と、高くなる場合とがあることを示している。Fig. 12 は幅方向の温度勾配が大きいほど板縁の温度が圧延前より上昇しやすいことを示している。

4.3 板厚方向にも温度分布を与えた場合

Fig. 13 は板厚方向にも温度分布を与えた場合にも、板縁コーナーにある温度以上の初期温度を与えると圧延後にコーナー部の温度は初期温度よりも低くなり、ある温度以下の初期温度であれば圧延後にその初期温度よりも高くなることを示している。

5. 結 言

三次元温度解析プログラムによってこれまで解析できなかった板縁の温度の挙動が解析できるようになり、今までにない新しい知見を得ることができた。スタンド間の有効な冷却や加熱の方法を提示できるようにさらに研究を進めていく予定である。
(1996年9月20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) 山田ほか：昭和62年塑加春講論，(1987)，91.
- 4) W.C. Chen et al.: *Metall. Trans. A.*, 24A, (1993), 1307.
- 5) 日本鉄鋼協会：板圧延の理論と実際，(1984)，147.
- 6) Y.Y. Zhu et al.: *Comput. Struct.*, 53-2, (1994), 275.
- 7) S. Kobayashi et al.: *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, (1989), 222.
- 8) W.S. Farren et al.: *Proc. R. Soc.*, 107 (1925), 422.
- 9) 八田ほか：第43回塑加連講論，(1992)，695.
- 10) 辛ほか：平成3年塑加春講論，(1991)，593.
- 11) 戸澤ほか：第36回塑加連講論，(1985)，73.