熱間圧延後の繰り返し曲げ加工プロセスにおける 鋼板温度解析

中田 直樹^{1)*}・松原 行宏¹⁾・蛭田 敏樹¹⁾

Thermal Analysis of Strip in Multi-Bending Process after Hot Rolling

Naoki NAKATA, Yukihiro MATSUBARA and Toshiki HIRUTA

Synopsis : Thermal histories in multi-bending process after hot rolling were clarified by numerical analysis. Temperature vibrates cyclically at strip surface, whereas relatively small vibration can be seen at center in thickness. Transferring speed and cooling condition characterize temperature distributions in strip thickness. In industrial production, water-cooling equipments would be necessary in order to cancel heat generation during bending deformation and maintain strip temperature in appropriate range.

Key words : fine grain; accumulative bending strain; thermo-mechanical control process; thermal analysis.

1. 緒言

鋼の結晶粒を微細化すると強度、靱性、耐疲労特性、めっき性などが向上することから、微細粒鋼の製造に関する研究が活発に行われている¹⁻⁶⁾。強加工を用いた結晶粒微細化の研究は数多く、中でも熱間圧延で微細粒鋼板を得るためには、比較的低温のオーステナイトに大歪加工を行い急速に冷却することが重要であるとされており⁷⁻¹¹⁾、工業的にはフェライトの平均粒径が $2\mu\text{m}$ 程度の熱延鋼板の製造が可能であるとの報告もある¹²⁾。

微細粒鋼板は、Ti, Nb, Vなどの強化元素を添加して制御圧延¹¹⁾を行って造りこむのが一般的であるが、このような元素を使用すると製造コストが上昇するという問題がある。強化元素を極力添加せずに微細粒鋼を造り込む技術を開発することは、自動車用を始めとする高張力鋼板の価格競争力の確保や、資源安全保障のうえで、極めて重要である。

近年では、PROTEUSプロジェクト¹³⁾において、フェライト粒径 $1\mu\text{m}$ の鋼板製造を可能とするプロセスの確立を目標として、熱間大圧下圧延¹⁴⁾、熱間鍛造¹⁵⁾、熱間圧延後の繰り返し曲げ加工¹⁶⁾などのプロセスが提案された。筆者らは、熱間圧延後の繰り返し曲げ加工による微細粒鋼製造プロセスを提案し、ラボ実験による組織微細化の結果を示すとともに、組織微細化のメカニズムを推定した¹⁶⁾。

ところで、鋼板の製造プロセスにおいて、曲げ歪を付与する加工はテンションレベラーやローラーレベラーなどで見

られるが、これらは薄板の形状を矯正するために行われる加工である。矯正は常温で行われるうえ、付与する歪が大きいので、材料や設備の温度が問題となるようなことはほとんどなく、伝熱解析に関する詳細な報告はなかった。

これに対し、熱間圧延後に繰り返し曲げ加工を行うプロセスでは、鋼板に付与される累積歪が比較的大きく、かつ歪付与によって生じる加工発熱が板厚方向に異なるという特徴を考慮しなくてはならない。さらに、鋼板にとっては曲げロールとの接触熱伝達と水冷や空冷が組み合わせり、それらがごく短い時間で繰り返されるという複雑な伝熱現象を呈する。歪付与時の温度条件は組織微細化に強く影響を及ぼすので、歪の形態や量を正確に把握し、議論する必要があるが、板厚方向それぞれの位置における温度履歴を精度よく予測し、制御することも重要になってくる。

本研究では、熱間圧延後に繰り返し曲げ歪を与えるラボ実験によりフェライト組織の微細化、具体的には表層でのフェライト粒径 $2\mu\text{m}$ 以下の実現を試みた。また、プロセスにおける鋼板温度履歴の詳細を明らかにするため、ラボ実験における鋼板温度の測定実績から熱境界条件を求め、実機操業を想定した解析を行った。

2. ラボ実験における鋼板温度の測定および解析

2・1 実験装置

Fig.1に実験設備の概要を、Table 1に実験設備の仕様を

平成24年7月2日受付 平成24年8月11日受理 (Received on Jul. 2, 2012; Accepted on Aug. 11, 2012)

1) JFEスチール スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260-0835)

* Corresponding author : E-mail : n-nakata@jfe-steel.co.jp

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.99.26>

示す。実験設備は、加熱炉、圧延機、3台の繰返し曲げ加工装置、冷却装置の順に配置している。圧延機の入側および出側と、繰返し曲げ加工装置および冷却装置の出側には放射温度計を取り付け、加工および冷却前後の鋼板温度を測定した。

2・2 実験方法

C 0.15mass%, Si 0.01mass%, Mn 0.75%を含有する板厚10mmの熱延鋼板から、幅100mm、長さ1200mmの大きさの試料を切り出して、加熱温度をモニターするために表面に熱電対を取り付けた。

実験では、試料を900℃～1200℃まで電気炉にて30分程度加熱した後、これを取り出して、表面を金具でたたいて加熱中に成長した酸化スケールを落とした。ラボ圧延機入側の放射温度計が所定の温度を示すと同時に圧下率70%で1パスの圧下を加え、板厚を3mmとした。この後、ロールを21～23本配置した繰返し曲げ加工装置3台を通過させて、最大で表層部累積曲げ歪2.2を付与した。この時、曲げロールの締め込み量（上下のロール群を鋼板に接触させただけで曲げを与えない状態から締め込んだ量：Vertical offset）は、7～8mmとした。さらに、スプレーノズルを配した水冷装置を通過させて冷却した。圧延機出側速度は1.0m/sとし、冷却終了まで一定速搬送を行った。

2・3 実験結果

Fig.2に、圧延温度と曲げ歪の付与量と、実験後に得られた表層でのフェライト粒径 $d\alpha$ （ μm ）との関係を示す。フェライト組織は、圧延と繰返し曲げ加工の温度が低いほど、また歪を多く蓄積するほど、微細化が進むことが確

認された。

Fig.3に、累積曲げ歪2.2を与えた条件での表層組織のSEM写真を示す。圧延温度を850℃、800℃とした時、いずれも微細なポリゴナルフェライト組織が得られており、フェライトの平均粒径は1.8 μm 、1.4 μm であった。

Fig.4に、フェライト粒径1.4 μm が得られた条件での鋼板表面温度を放射温度計で測定した結果を示す。800℃の鋼板は、1パスの圧延でほぼ30℃低下して770℃になった後、3台の繰返し曲げ加工装置を通過することにより730℃まで、さらにスプレー冷却により550℃程度まで低下した。

Matsubaraらは、本実験材のAr3点は、750℃程度であり、750～770℃程度で繰返し曲げ加工を行うことが組織微細化に最も有効であることを示している¹⁶⁾。Fig.4に示すように、No.1からNo.3までの歪付与装置の入側温度 $T_1\sim T_3$ を、微細化に最適な温度とすることができた。

水冷は、フェライト粒が成長しない550℃以下を目標として行い、ほぼ目標通りの温度が得られた。水冷後の温度ばらつきがやや大きいのが、これはラボ実験特有の現象であると考えられる。実機と比べて搬送速度が遅いためにスプレーの冷却能力が冷却面内で平均化されにくいということ、周囲への飛散防止のために閉空間とした装置内での水の跳ね返りの影響があったこと、試料表面のスケールが厚く、しかもその付着状態にもばらつきが大きかったことなどが原因であると推察される。

Fig. 2. Effect of rolling temperature on ferrite grain size at surface.

Table 1. Experimental condition in laboratory tests.

Strip	Thickness	3mm
	Rolling temperature	800～1050℃
	Transferring speed	1.0m/s
Bending Roller	Diameter	50mm (No.1,2), 70mm (No.3)
	Roller pitch	65mm (No.1,2), 90mm (No.3)
	Maximum vertical offset	7mm (No.1,2), 8mm (No.3)
	Maximum total pass	19 × 2 + 21 = 59
	Maximum total strain at surface	$0.0446 \times 38 + 0.0259 \times 21 = 2.2$

Fig. 1. Schematic illustration of laboratory facility.

Fig. 3. Microstructure Photograph.
(Bending at No.1-3 zone after rolling)

2・4 温度解析モデル

圧延および曲げ加工に要する時間は非常に短いので、搬送方向および板幅方向伝熱は無視し、板厚方向1次元熱伝導差分解析で鋼板内部の温度変化を求めた。

これまでの圧延温度解析では上下対称モデルで行われるのが一般的であったが¹⁷⁾、本実験で行われる繰返し曲げ加工は曲げロールとの接触が上下交互に行われるので、上下非対称のモデルとした。鋼板内部の温度 T は、板厚中央からの位置を Y (m) として、熱伝導方程式 (1) で表す。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{cp} \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{q}{cp} \quad (1)$$

ここで、 t は時間 (s)、 λ は熱伝導率 (W/m K)、 c は比熱 (J/kg K)、 ρ は密度 (kg/m³)、 q は加工発熱による単位体積当たりの発熱速度 (W/m³) である。熱伝導率、比熱および密度には0.23%のCを含有する鋼について報告されている値¹⁸⁾を用いた。

表裏面には、曲げロールとの接触時の熱伝達と非接触時の空冷または水冷が繰返される境界条件を与えた。板厚 h (3mm) の鋼板表裏面 ($Y = \pm h/2$) での熱流束 Q は (2) 式で表せる。

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \quad (2)$$

空冷または水冷での Q は (3)～(5) 式で、鋼板との接触時の Q は (6) 式で与えた。

$$Q = Q_{rad} + Q_1 \quad (3)$$

$$Q_{rad} = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_a^4) \quad (4)$$

$$Q_1 = \alpha (T_s - T_a) \quad (5)$$

$$Q = Q_2 = \alpha (T_s - T_x) \quad (6)$$

Fig. 4. Measured Temperature in laboratory test.

ここで、 Q_{rad} は輻射熱流束 (W/m²)、 Q_1 は空冷または水冷の熱流束 (W/m²)、 Q_2 は曲げロールとの接触時の熱流束 (W/m²)、 σ はステファン・ボルツマン定数 (5.67×10^{-8} W/m² K⁴)、 ϵ は輻射率 (0.8で一定)、 T_s は鋼板表面温度 (K)、 T_a は冷媒 (空気または水) の温度 (K)、 T_x は曲げロールの表面温度 (303K)、 Δt は1ステップの計算時間 (s) である。なお、熱伝達係数 α_1 、 α_2 は時間的に変化しないものとした。

(1) 式中の加工による発熱速度 q は、板厚方向の位置によって異なる歪 ϵ を用いて (7) 式で与えた。曲げ歪の板厚方向分布は、Matsubaraらが行った変形解析¹⁶⁾の結果を近似して、(8) 式で与えた。

$$q = k_m \epsilon / \rho \quad (7)$$

$$\epsilon = \epsilon_c + (\epsilon_s - \epsilon_c) |2Y/h| \quad (8)$$

ここで、 k_m は変形抵抗 (Pa)、 ϵ_c および ϵ_s は曲げにより板厚中央と表面で付与する相当塑性歪、 h は板厚 (3mm) である。変形抵抗は、ラボの圧延荷重から逆算した値である196MPaを与えた。

2・5 温度解析結果

Fig.5に、繰返し曲げ加工中の鋼板温度履歴の解析結果を示す。曲げロールとの接触時の熱伝達係数を3000W/m²Kと与えて解析を行った結果は、ラボ実験で測定した温度実績と良好に一致した。

表裏面では、ロールとの接触熱伝達による温度降下と復熱が繰返されており、14°Cの温度振幅が見られる。繰返し曲げ加工装置を通過する時間は1s弱であるが、この間の温度降下はNo.1,2繰返し曲げ加工装置で4°Cであるのに対し、No.3繰返し曲げ加工装置では14°Cと大きい。これは、No.3繰返し曲げ加工装置のロール径と締め込み量が他と比べて大きく、鋼板と曲げロールとの接触が長く

Fig. 5. Comparison of bending temperature between simulation and measurement.

Fig. 6. Simulated thermal histories in laboratory test condition.

なったことが影響している。

Fig.6に、No.1繰返し曲げ加工装置を通過中の鋼板温度履歴の詳細を示す。曲げロールは、上段10本、下段11本を配置しているので、上表面温度の急激な温度降下は、上段ロールと接触する10回現れる。表面温度変化は、ロールとの接触開始から次のロールへの接触開始までを1サイクルとして繰り返されるが、各サイクルはFig.7に示すように4つのステップからなることが明らかになった。まず、鋼板が上ロールとの接触を開始すると、(a)に示すように、上表面温度はロールとの熱伝達によって急激に降下する。接触終了後は(b)に示すように復熱によって温度上昇に転じるが、途中、裏面が下段のロールに接触する際に曲げ歪が与えられ、(c)に示すように、加工発熱の影響によって温度上昇が加速される。加工発熱は表面に近いほど大きいので、裏面の接触が終了する時点では、上表面付近の温度勾配が小さくなっており、その後の温度上昇は(d)に示すように鈍化する。

曲げ歪付与による加工発熱の影響は板厚中央でも見られるが、温度上昇は $0.2^{\circ}\text{C}/\text{pass}$ と小さい。

3. 実機操業条件における鋼板温度の解析

実機では、ラボよりも高速で通板を行うので、ロールとの接触時間が短くなり、1パスあたりのロールへの熱伝達が減少する。したがって、曲げ加工中の鋼板の温度上昇を

Fig. 7. Cyclic change in upper surface temperature.

抑え、 Ar3 点直上または過冷オーステナイト温度域で歪を蓄積するためには、曲げロール間での冷却をラボよりも強化する必要がある。実機操業条件での鋼板温度解析を行い、温度履歴をラボと比較することによって、実機固有の課題を明らかにすることを試みた。

Table 2に、温度解析条件を示す。板厚は3mmとし、仕上圧延温度を 785°C として、その1s後から繰返し曲げ加工が始まるものとした。搬送速度は10m/s、20m/sとしてその影響を調べた。

実機では板幅1m以上の鋼板を製造するので、曲げロールがたわまないよう、ロール径をある程度太くしなければならないことを考慮して125mmとした。押し込み量を20mmとして変形解析¹⁶⁾を行った結果、表層には1パスあたり0.0193の曲げ歪が与えられることがわかった。曲げ加工は1つのユニットで21パス行うものとし、1ユニット通過後は空冷として、板厚方向の熱拡散も比較することとした。Fig.2に示した結果からは、表層で $1\mu\text{m}$ の結晶粒径にするには累積歪を2.5~3程度は与える必要があると考えられ、そのためには上記のユニットを5~8基程度設置して、合計100~160パス程度の曲げ加工を与えることが想定される。

鋼板と曲げロールとの接触熱伝達係数は、ラボ実験で合わせこんだ $3000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ とした。水冷時の熱伝達係数には、熱延ランアウトで得られる標準的な値である $1000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ を用いた¹⁹⁾。

Fig.8に、繰返し曲げ加工中の鋼板の上表面と深さ0.75mm、板厚中央の3点の温度履歴を示す。

搬送速度10m/sで空冷しながら繰返し曲げ加工を行う場合のFig.8 (a)では、表面では加工を繰り返すたびに 8°C

Table 2. Analysis condition for industrial production.

Strip	Thickness	3mm
	Initial temperature	785°C
	Deformation resistance	196 MPa
	Transferring speed	10, 20m/s
Bending Roller	Diameter	125mm
	Roller pitch	150mm
	Vertical offset	20mm
	Total pass	19
Heat Transfer Coefficient	Total strain	$0.0193 \times 20 = 0.386$
	Contact with roll	3000 W/m ² K
	Air Cooling	Emissivity 0.8
		Convection 10 W/m ² K
	Water Cooling	1000 W/m ² K

の温度振幅をしながら、徐々に温度低下していく。これに対して板厚中央の温度は、繰返し曲げ加工により3.3°C上昇している。板厚平均での温度上昇は1.8°Cであり、繰返し曲げ加工による発熱と曲げロールとの接触や空冷による抜熱はほぼ拮抗しているといえる。

生産性の高いミルでの製造を想定して、Fig.8 (b) に搬送速度20m/sで空冷しながら繰返し曲げ加工を行う場合の温度履歴を示す。鋼板と曲げロールが接触する時間がFig.8 (a) の条件の半分になり、表面温度は上昇傾向に転じた。板厚中央では加工発熱に対して熱拡散が追いつかず、5.0°C上昇している。繰返し曲げ加工中、早い段階で板厚中央よりも深さ0.75mmでの温度が高くなり、この状態が続く。この加工が複数ユニット続けば、組織微細化のために適正な温度域からはずれてしまうので、繰返し曲げ加工中、ないしは繰返し曲げ加工装置のユニット間で水冷を行う必要があると考えられる。

Fig.8 (c) に、搬送速度20m/sで水冷しながら繰返し曲げ加工を行う場合の温度履歴を示す。曲げロールとの間欠的な接触と水冷が繰返されるので、鋼板表面温度の降下は15°Cと最も大きい。しかし、表面温度の振幅は小さく、ロールと接触していない間の復熱も小さい。深さ0.75mmでの温度上昇は、Fig.8 (b) と比べるとやや小さく、加工開始0.04s程度経ってから鈍化している。これは、板厚が3mmと薄く、比較的短い時間で熱拡散の影響が出てくるためである。板厚平均では1.1°Cの温度降下があり、その程度は小さいので、Fig.8 (a) と同様に繰返し曲げ加工による発熱と曲げロールとの接触や空冷による抜熱はほぼ拮抗しているといえる。Fig.8 (a), (c) のような加工と冷却の組み合わせが繰返されれば、組織微細化に適正な温度域内に保持しながらの繰返し曲げ加工が実現可能であると考えられる。

Fig.9に、ロールとの接触の前後での板厚方向温度分布の変化を示す。21パスの繰返し曲げ加工のうち、最後の接触について表した。Fig.8に示したのと同様に、接触面では、

(a) Air cooling at 10/s

(b) Air cooling at 20m/s

(c) Water cooling at 20m/s

Fig. 8. Analyzed thermal histories in industrial condition.

は、接触の前後での温度振幅は搬送速度が速く、接触と非接触の熱伝達係数の差が小さいFig.9 (c) で最も小さく、3°Cである。また、いずれも接触の反対面では接触終了後に、1°C程度とわずかな温度上昇している。

次に、各条件での温度分布の概形を比較する。Fig.9 (a) では、なだらかな放物線状のカーブを描いているのに対し、Fig.9 (b) では板厚の中ほど半分程度は平坦に近い形状である。温度の極大を示す位置は、板厚中央から0.7mmの位置であり、板厚中央に比べて最大で0.9°C高い。これは、表面からの深さによって発熱量が異なる影響によるものである。一方、Fig.9 (c) では、表層から0.6mmまでの深さでは、他と比べて急峻な温度勾配をもつ。

4. 考察

実機に繰返し曲げ加工設備を導入する場合の温度履歴

Fig. 9. Analyzed temperature distributions in thickness direction.

と設備設計項目について考察し、全長全幅で均一な高品質の鋼板を製造するための課題を述べる。

3章で述べたように、実機ではラボ実験設備に比べて搬送速度が非常に速いので、繰返し曲げ加工で蓄積される加工発熱を随時放出して、組織微細化に適正な温度を維持しなければならない。そのためには、水冷と繰返し曲げ加工を同時に行うのが望ましい。ただし、曲げロール間の狭い範囲で冷却水の供給と排水を円滑に行い、幅方向に均一に冷却することは相当に難しく、繰返し曲げ加工装置のユニット間で水冷を行うということもありえる。

一般の熱間圧延設備ではライン幅が1.5m以上あるので、 $\phi 100 \sim 150$ 程度の細い曲げロールを設置すると大きなたわみが生じてしまうという懸念がある。曲げロールの締め込み量が幅方向で一定でなくなると、歪を均一に与えられなくなり、高品質の鋼板を造りこむできなくなる恐れが生じてくる。

今回の解析では、ロールへの抜熱による冷却効果も考慮に入れたが、これを製品全長で維持するためにはロールの冷却も行わなくてはならない。ロールへの抜熱が時間とともに変化するようであれば、曲げロールや鋼板の水冷も変化させる必要がある。

水冷を行いながら加工を続ける場合は、空冷の場合と比べて板厚方向の温度差が大きい。Fig.9 (c) に示した例では、表面と板厚中央温度の差は 23°C まで拡がり、空冷の場合と比べると板厚方向の組織の傾斜がますます大きくなる傾向にある。このような特徴を考慮したうえで鋼板の熱加工履歴の最適化を図り、それを実現するための繰返し曲げ加工装置および冷却装置を設計することが、今後の実機化を図っていくためには重要である。

5. 結言

微細粒鋼板製造のプロセスとして提案した熱間圧延後の

繰返し曲げ加工のラボ実験を行い、鋼板表層で最小粒径 $1.4\mu\text{m}$ のフェライト組織が得られた。さらにラボでの温度測定結果をもとに実機操業条件を想定した温度解析を行い、鋼板の温度履歴と板厚方向の温度分布の変化を明らかにした結果、以下の知見を得た。

(1) 800°C で熱間圧延した鋼板を $770 \sim 730^{\circ}\text{C}$ で表層に累積曲げ歪を最大で2.2付与して水冷した結果、最小の結晶粒径 $1.4\mu\text{m}$ のフェライト組織が得られた。フェライト組織は、圧延と曲げ加工の温度が低いほど、歪を多く蓄積するほど微細化が進むことが確認され、繰返し曲げ加工による微細粒鋼製造プロセスの有効性が実証された。

(2) 繰返し曲げ加工中の鋼板表面温度変化は、曲げ加工時のロールとの接触熱伝達による急激な温度降下、その後の熱拡散（復熱）、非接触での曲げ加工時の熱拡散（温度上昇の加速）、その後の熱拡散（温度上昇の減速）の4つのステップから成る熱サイクルが繰返される。

(3) 鋼板の板厚方向温度分布は、搬送速度や水冷の有無などによって、様相が異なる。水冷を行う場合は、空冷の場合と比べて板厚方向の組織の傾斜が大きくなる傾向にある。

(4) 実機では、搬送速度が速いので繰返し曲げ加工で蓄積される加工発熱を水冷によって随時放出して、組織微細化に適正な温度を維持することが必要である。

文 献

- 1) Y.Saito, H.Utsunomiya, N.Tsuji and T.Sakai: *Acta Mater.*, **47** (1999), 579.
- 2) N.Tsuji, Y.Ito, Y.Saito and Y.Minamino: *Scr. Mater.*, **47** (2002), 893.
- 3) R.Z.Valiev, N.A.Krasilnikov and N.K.Tsenev: *Mater. Sci. Eng. A*, **A137** (1991), 35.
- 4) S.Matsuno, M.Takami and K.Ameyama: *J.Soc. Mater. Sci., Jpn.*, **53** (2004), 765.
- 5) T.Sakai, A.Belyakov and H.Miura: *Metall. Mater. Trans. A*, **39A** (2008), 2206.
- 6) S.Torizuka, H.Nagai and A.Satou: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **42** (2001), 287.
- 7) Y.Shirota and K.Nagahama: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **42** (2001), 280.
- 8) N.Tsuji: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 359.
- 9) 長井寿, 大森章夫, 鳥塚史郎, 井上忠信: 第177・178回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (2002), 109.
- 10) S.Torizuka, Y.Adachi, K.Tsuzaki, I.Chikushi and T.Shintomi: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 1346.
- 11) 小指軍夫: 制御圧延・制御冷却, 地人書館, 東京, (1997), 17.
- 12) I.Chikushi, S.Torizuka, T.Shintomi, T.Ohtoni and K.Tsuzaki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **49** (2008), 216.
- 13) M.Kiuchi: *ISIJ Int.*, **48**(2008), 1133.
- 14) M.Etou, S.Fukushima, T.Sasaki, Y.Haraguchi, K.Miyata, M.Wakita, T.Tomida, N.Imai, M.Yoshida and Y.Okada: *ISIJ Int.*, **48** (2008), 1142.
- 15) T.Kuroki, N.Matsuzawa, M.Miyake and Y.Sodani: *CAMP-ISIJ*, **17**(2004), 282.
- 16) Y.Matsubara, N.Nakata and T.Hiruta: *Tetsu-to-Hagané*, **97** (2011), 19.
- 17) K.Takebayashi, S.Saeki and H.Yoshida: *Kawasaki Steel Giho*, **33**, (2001), No.3, 122.
- 18) 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法, 日本鉄鋼協会編, (1971), 80.
- 19) M.Mitsutsuka: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), N412.