

# 双ロール式直接板圧延における最適加工条件の決定

大阪大学 基礎工学部 機械工学科

助手 塩見誠規

(平成7年度奨励研究助成 AF-95036)

## 1. 研究の目的と背景

双ロール式直接板圧延は熔融金属から直接薄板を製造する加工方法であり、熱間圧延工程を省略できる方法として現在実用化が進められている<sup>(1)</sup>。この方法では、回転する二つのロールの間に熔融金属を流し込み、ロールによる冷却で熔融金属を凝固させ、その後圧延効果によって凝固層の圧着および内部欠陥発生を防止を行っている。直接板圧延では、ロール間での熔融金属の流動および凝固層の変形が製造される板材の品質に大きく影響するため、加工条件の設定が重要な課題である。しかしながら、非常に高温の加工であるため湯溜まり内での現象を測定することが困難であり、加工条件は試行錯誤実験によって決定されているのが現状である。

直接板圧延において材料流動、温度分布、凝固現象などの湯溜まり内での挙動を求めるために、有限要素法および差分法による数値シミュレーションが行われている。巨ら<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>は弾粘塑性有限要素法によって材料流動を、凝固を考慮した熱伝導有限要素法によって温度分布を、定常状態を仮定して計算している。Kimら<sup>(4)</sup>は熔融金属の部分に差分法を、ロール部に有限要素法をそれぞれ用いて計算を行っており、差分法の使用によって計算時間を短縮している。しかしながら、加工限界付近では流動が不安定になるため、非定常挙動を対象とした計算が必要である<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup>。また、数値シミュレーションでは加工条件の決定に対して有益な情報が得られるが、実際に加工を行う場合、それらの情報を基にして加工条件を決定するという試みが必要である。

本研究では、双ロール式直接板圧延の加工条件の一つであるロール速度を決定するための、有限要素シミュレーションを用いた方法と簡易的方法を提案する。モデル材料であるパラフィンとステンレス鋼板を対象とし、良質な板材を得るためのロール速度の範囲を求める。また、ロール間隙をロール荷重に応じて変化させる場合も取扱い、ロール速度の決定を行う。

## 2. 研究方法

### 2.1 粘塑性有限要素法

図1のような双ロール式直接板圧延では材料流動、温度分布、凝固現象が互いに影響するため、それらの影響を考慮したシミュレーションが必要となる。凝固層の変形および熔融金属の流動の計算に粘塑性有限要素法を、温度分布の計算に凝固を考慮した熱伝導有限要素法をそれぞれ使い、各変形ステップごとにそれらの計算を交互に行うことによって相互作用を考慮する。シミュレーションでは非定常状態を想定し、材料流動および温度分布が安定するまで計算を続ける<sup>(6)</sup>。

凝固層および熔融金属はひずみ速度に依存する粘塑性材料であるとして、粘塑性有限要素法を用いて熔融金属の流動および凝固層の変形をシミュレーションする。この場合、熔融金属は変形抵抗が小さい粘塑性材料として取扱う。本研究で用いる粘塑性有限要素法は、圧縮特性法に基づいて定式化が行われている<sup>(7)</sup>。シミュレーションでは、板厚に対して板幅が十分長いとして平面ひずみ変形を仮定し、流れの対称性から板材の半分だけを計算する。粘塑性材料の変形抵抗は次式によって近似する。

$$\bar{\sigma} = F \dot{\epsilon}^m \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $F$ 、 $m$ は材料定数であり、要素ごとに固相率から求める。

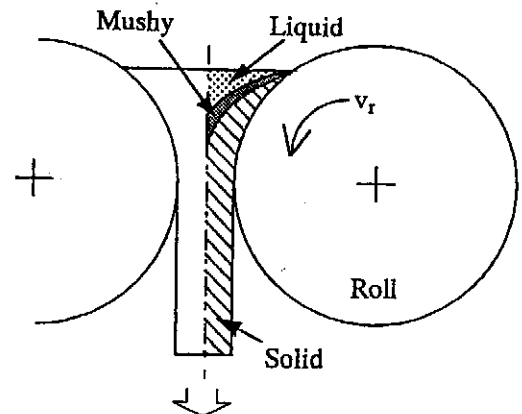


Fig. 1 Schematic view of direct rolling.

熔融金属および凝固層の温度分布は、非定常熱伝導有限要素法によって計算する。ロール表面の温度は既知として、ロールへの熱伝達を考慮する。粘塑性有限要素法により計算される素材の変形および摩擦エネルギーを発生熱として取扱う。凝固潜熱の取扱いには温度回復法<sup>(8)</sup>を用いる。

## 2.2 シミュレーションによるロール速度範囲決定方法

有限要素シミュレーションを用いて湯溜まり内の材料流動、凝固などを計算し、得られた情報を基にして最適なロール速度の範囲を決定する。ロール速度が大きい場合に板材が形成されないのは凝固層の厚さが十分でないためである。凝固層の厚さが十分となるのは、図2に示すように凝固層厚さがロール間隙の半分になるときであり、凝固層の圧着が始まるキス点がロール出口に位置するときである。この時のロール速度を上限値とする。有限要素シミュレーションにおいて、ロール速度を変化させて上限値を求める。

有限要素シミュレーションによって得られた凝固層の形状を図3に示す。ロール速度が小さい場合、湯溜まり内に凝固層の盛り上がり現象が観察される。湯溜まり内での凝固層の盛り上がりは、生成された凝固層がロール間を全て通過することができなくなり、その一部が湯溜まり側に絞り出されることによって生じたものである。この場合、凝固層は過大に圧延され、表面性状は低下すると考えられる。そこで、盛り上がり現象が観察される直前のロール速度を下限値とする。シミュレーションではキス点における速度の方向が湯溜まり側を示している場合を盛り上がりと判断する。

## 2.3 簡易的ロール速度範囲決定方法

有限要素シミュレーションでは、大規模な計算が必要となり、しかもシミュレーションに必要な各種の材料特性を測定しなければならない。そこで、簡易的にロール速度の範囲を決定する方法を提案する。

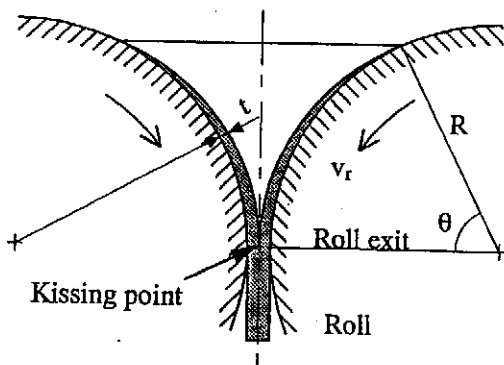


Fig. 2 Determination of upper limit of roll speed from thickness of solidified shell.

先ずロール速度の上限値は、凝固層の厚さがロール出口においてロール間隙の半分になったときとし、その際のロール速度を求める。凝固現象は熱的な条件に大きく依存するが、凝固定数 $K$ を用いて熱的な条件を考慮し凝固層の厚さ $t$ を次のような簡単な式で表す<sup>(9)</sup>。

$$t = K\sqrt{T} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $T$ はロールとの接触時間である。凝固定数は熱的な条件を全て含んでおり、実際の加工条件の下で測定される必要がある。加工が安定している場合、湯面でロールと接触した後ロール出口でロールから離れるまでの間に形成される凝固層の厚さは式(2)より次のように表わされる。

$$t = K\sqrt{\frac{R\theta}{v_r}} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $R$ はロール半径、 $v_r$ はロール速度(周速)、 $\theta$ は図2に示す湯面からの角度である。式(3)より、凝固定数が求めればロール速度の上限値が決定されることになる。

次にロール速度の下限値は凝固層が圧延できる限界から求める。ロール速度が小さい場合、凝固層が湯溜まり内で圧着されて板材となるが、凝固層が過大になるとロール表面ですべて圧延できなくなる。そこで、図4に示すように、凝固層の圧着が始まるキス点における間隙と等しい厚さを持つ板材(破線)の圧延を考える。板材がロール間にかみ込まれて圧延されるための条件は次式のように表される。

$$\tan \alpha \leq \mu \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\alpha$ はロール速度により変化するキス点における角度であり、 $\mu$ は摩擦係数である。式(4)の等式が

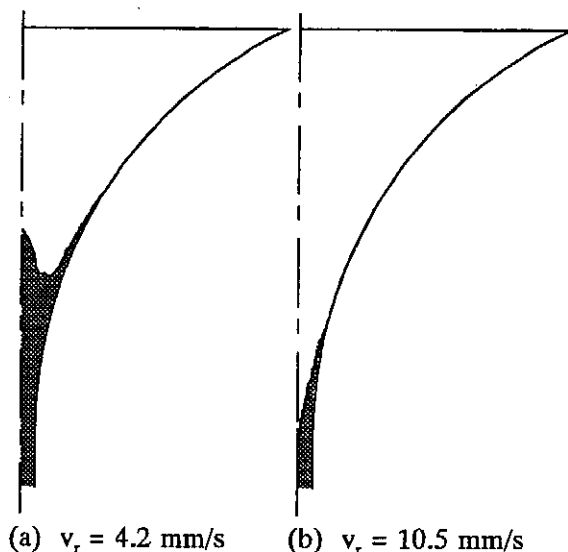


Fig. 3 Calculated profile of solidified shell in direct rolling of paraffin wax.

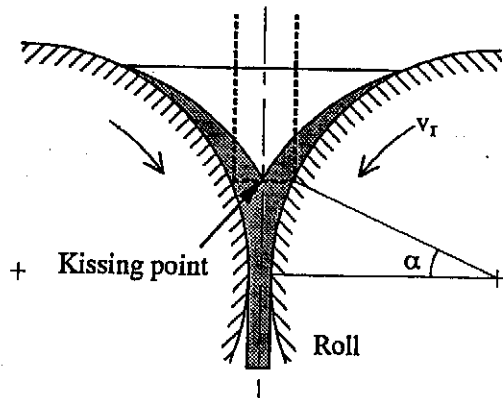


Fig. 4 Determination of lower limit of roll speed from drawing limit of solidified shell into roll gap.

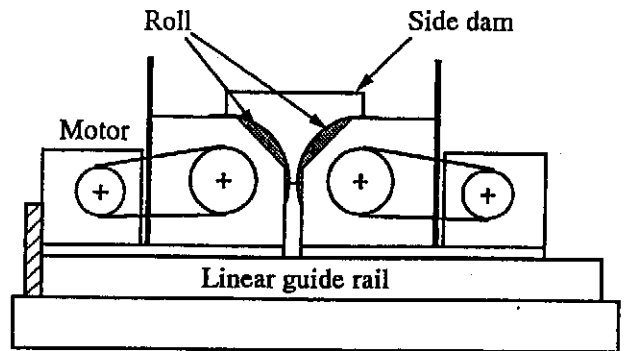


Fig. 5 Experimental equipment using paraffin wax as model material.

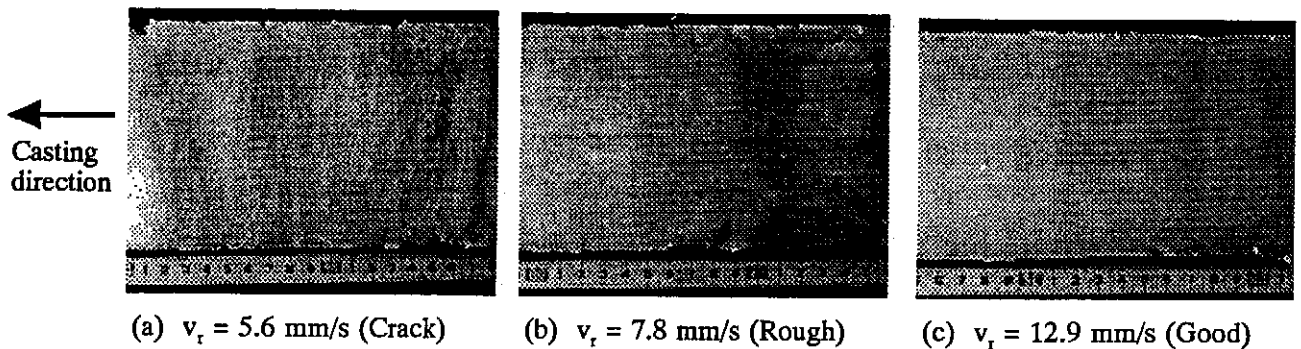


Fig. 6 Strip obtained from model experiment using paraffin wax.

成り立つときがロール速度の下限値である。熱間加工における摩擦係数は0.3程度であるため、その値を用いた。

#### 2.4 モデル実験

図5に双ロール式直接板圧延のモデル実験装置を示す。ロールは直径100mm、幅100mm、S45Cの中実円柱であり、それぞれベルトによりモータと直結されており、逆方向に同一スピードで回転する。ロールはモータとともにリニアガイド上に固定されている。サイドダムは厚さ5mmの透明なアクリル板であり、実験前に熱湯で十分に加熱することによってサイドダム表面での凝固を防止する。

モデル材料としては溶融状態では透明であり、凝固すると白色となるパラフィンを用いた。パラフィンは比較的低温で溶融するため取扱いが容易である。ロール表面は機械油で潤滑し、表面の温度は約20°Cである。ロール間隙を設定した後サイドダムを取付け、ロール間隙を紙で閉じた状態で73°Cに加熱したパラフィンをロール最上部まで注湯し、その後ロールを回転させた。注湯は最初の1回のみとした。なお、得られた板材の厚さはロール間隙と一致していた。

### 3. ロール速度範囲の決定

#### 3.1 パラフィン薄板の表面性状

パラフィンを用いたロール間隙固定のモデル実験において、ロール速度 $v_r$ を変化させた場合の薄板定常部分の表面性状を図6に示す。ロール速度が小さい場合、図6(a)に示すように板材の表面には板幅方向にクラックが多数発生している。また、図6(b)の表面には割れは発生していないが表面があれており、図6(c)は表面のあれはほとんどなく良好な表面性状である。さらに、ロール速度を大きくすると、ロール間での凝固層の厚さが十分でないために、溶融パラフィンがロール出口から流出して板材は形成されない。図6(a)に示す薄板が形成される条件では湯溜まり内に凝固層の盛り上がり現象が観察されたが、図6(c)の薄板が形成される条件では盛り上がり現象は観察されなかった。ロール速度によって得られる板材の品質が変化することがわかる。

#### 3.2 モデル材料

有限要素シミュレーションを用いた方法と簡易的方法によって、パラフィンに対するロール速度範囲を予測する。有限要素シミュレーションに用いた計算条件

を表1に示す。変形抵抗については、固体は高温圧縮試験を行い、溶融、半溶融については固体の変形抵抗を基準に定めた。計算では、固相率 $x$ が0.8~0.99の場合半溶融状態の変形抵抗を用い、それより固相率が大きい場合固体、それより小さい場合液体の変形抵抗を用いた。また、凝固定数を実験より $K = 0.373\text{mm/s}^{0.5}$ とした。

予測および実験から得られたロール速度範囲と板厚の関係を図7に示す。板厚が大きいほど図6(c)のような良好な表面性状が得られるロール速度は小さくなり、その速度範囲も小さくなっている。有限要素シミュレーションを用いた方法では、ロール速度の下限については実験結果とよい一致を示しているが、上限については少し小さな値になっている。一方簡易的方法では、予測されたロール速度範囲は広く、粗い予測に使用できる。

### 3.3 ステンレス鋼

現在直接板圧延において製造が実用化されようとしているステンレス鋼(SUS304)を対象としてロール速度範囲の決定を行う。表1に有限要素シミュレーションに用いた計算条件を示す。凝固定数には、 $K=2.82\text{mm/s}^{0.5}$ を用いた<sup>(9)</sup>。

ロール速度範囲と板厚の関係の予測および実験結果を図8に示す。実験結果は、新井ら<sup>(10)</sup>によって表面割れのない良好な品質の鋼片が安定して得られたものである。有限要素シミュレーションを用いた方法では、速度範囲は板厚に対して余り変化しないが、これはシ

Table 1 Computational conditions used for finite element simulation.

	Paraffin	SUS304
Roll diameter / mm	100	1200
Roll velocity $v_r$ / $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	4.2~12.9	500~1500
Roll gap / mm	1~2	1~5
Height of molten pool / mm	45	385
Flow stress / MPa		
Solid ( $0.99 < \xi$ )	$3.5 \bar{\epsilon}^{0.3}$	$10 \bar{\epsilon}^{0.25}$
Mushy ( $0.8 \leq \xi \leq 0.99$ )	$0.1 \bar{\epsilon}^{0.3}$	$\bar{\epsilon}^{0.3}$
Liquid ( $\xi < 0.8$ )	$0.001 \bar{\epsilon}$	$0.001 \bar{\epsilon}$
Thermal conductivity $\lambda$ / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.234	32.5
Specific heat $c$ / $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1670	630
Density $\rho$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	900	7800
Latent heat $L_a$ / $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	167.4	272
Liquidus temperature / $^{\circ}\text{C}$	68	1450
Solidus temperature / $^{\circ}\text{C}$	66	1420
Pouring temperature / $^{\circ}\text{C}$	73	1460
Temperature of roll / $^{\circ}\text{C}$	20	700
Temperature of air / $^{\circ}\text{C}$	15	30
Heat transfer coefficient $h$ / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$		
Material - roll	500	25000
Material - air	50	500

ミュレーションに用いた材料定数の精度に問題があるものと思われる。一方簡易的方法では、実験結果を含んでいるが、パラフィンの場合と同様に広い範囲を予測している。

### 4. まとめ

双ロール式直接板圧延において、良好な表面性状の板材を得るためのロール速度を決定する方法を提案した。有限要素シミュレーションを用いた方法と簡易的方法であり、溶融金属の凝固および凝固層の変形を予測してロール速度範囲を予測した。有限要素法によって湯溜まり内の挙動をシミュレーションし、凝固層の厚さからロール速度の上限値を、凝固層の盛り上がりから下限値をそれぞれ求めた。また、簡易的方法では凝固定数から上限値を、凝固層のかみ込み限界から下限値をそれぞれ求めた。予測された結果は、パラフィ

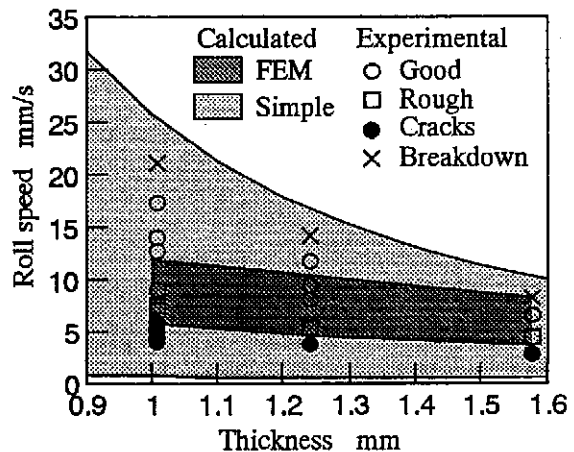


Fig. 7 Relationship between roll speed and strip thickness for paraffin wax.

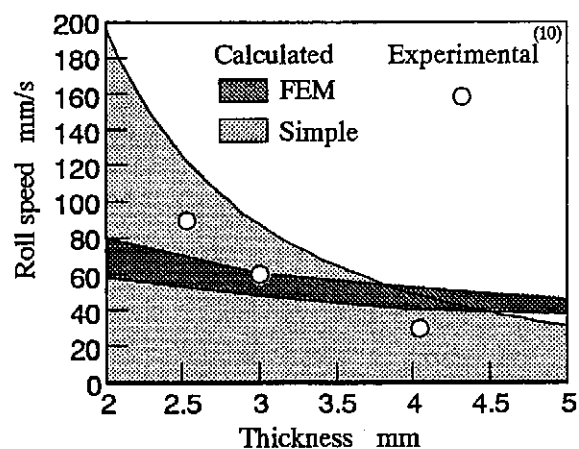


Fig. 8 Relationship between roll speed and strip thickness for stainless steel.

ンをモデル材料とした実験結果とほぼ一致した。有限要素シミュレーションを用いた方法では、詳細な情報が得られるが、各種の材料特性を測定しなければならない。一方簡易的方法では、材料特性の測定は比較的簡単であるが、広い速度範囲しか予測できないことがわかった。

#### 謝 辞

本研究の一部は平成7年度天田金属加工機械技術振興財団奨励研究助成によることを記すとともに、同財団に感謝の意を表します。また、実験にご協力いただいた大阪大学大学院桶谷直弘氏、卒研生平見匡氏に感謝します。

#### 参考文献

- (1) Tanaka, S., ほか4名, Proc. 3rd Int. Conf. Semi-Solid Processing Alloys and Composites, (1994), 327-336.
- (2) 巨・井上, 機論, 57-537, A (1991), 1147-1154.
- (3) 巨・井上, 機論, 59-565, A (1993), 2189-2195.
- (4) Kim, Y. D., Kang, C. G. and Ha M. Y., Proc. 3rd Int. Conf. Semi-Solid Processing Alloys and Composites, (1994), 347-356.
- (5) Shiomi, M., Mori, K. and Osakada, K., Proc. 4th Int. Conf. Numer. Methods Ind. Forming Processes, (1992), 829-834.
- (6) 塩見・森・小坂田, 機論, 61-589, C (1995), 3728-3733.
- (7) Osakada, K., Nakano, J. and Mori, K., Int. J. Mech. Sci., 24-8(1982), 459-468.
- (8) 大中逸雄, コンピュータ伝熱・凝固解析入門, (1990), 202, 丸善.
- (9) Mizikar, E. A., Trans. Metall. Soc. AIME., 239(1967), 1747-1753.
- (10) 新井, ほか7名, 材料とプロセス, 6 (1993), 254.