



東京大学 THE UNIVERSITY OF TOKYO

# 初等理論による冷間圧延の数値解析 及び圧延制御シミュレーション

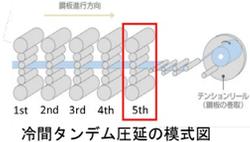
東京大学大学院工学系研究科 機械工学専攻 柳本研究室

Chair of Engineering Materials  
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
Keigo Uchida and Prof. Dr.-Eng. Jun Yanagimoto



## 序論

### 冷間圧延タナダム圧延



- 鉄鋼製造の最終工程
- 寸法精度が非常に重要 (数μm)
- 第5スタンドでは数10m/sと速度が最も速く、スリップを避ける制御が必要

### 冷間圧延制御の課題

生産効率

寸法精度

### 主に第5スタンド

圧延スリップに起因した機械振動の影響によって、生産効率が低くなる (普通鋼・高強度材)

寸法精度に著しく影響を与える圧力分布・圧延荷重の予測精度が低い (高強度材)

### 目的

- ① 普通鋼の圧延で圧延スリップ現象の発生する圧延条件を特定し、冷間圧延制御のMBDIに応用
- ② 高強度材圧延のMBDを見据え、高強度材の圧延に適用できる圧延制御モデルを構築

### 手法

- ① 圧延理論と簡易的なロール扁平式の数値計算による連成解析、その連成解析結果の圧延シミュレーターへの適用
- ② 圧延理論と流動応力に依らないロール扁平式の連成解析

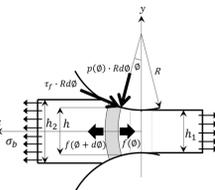
## 圧延スリップ限界の数値解析

Orowanの微分方程式:

$$\text{パラメータ: } a = \frac{-q + \sqrt{q^2 + 4(1-\frac{1}{2})\frac{f(0)}{2k}}}{2(1-\frac{1}{2})}, \quad q = \frac{1}{2\mu} \left[ 1 \mp \mu \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\tan \phi} \right) \right]$$

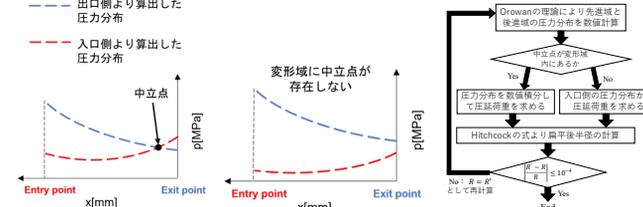
$$\text{固着 (} a \geq 1 \text{): } \frac{df}{d\theta} = 2R \left[ -\frac{f}{h} + 2k \left( \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\tan \phi} \right) \right) \right] (\sin \phi \mp \mu \cos \phi), \quad p(\theta) = -\frac{f}{h} + 2k \left[ \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\tan \phi} \right) \right]$$

$$\text{滑り (} a < 1 \text{): } \frac{df}{d\theta} = 2R \frac{-f + 2k(1 - (1-\frac{1}{2})a^2)}{1 \pm \mu \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\tan \phi} \right)}, \quad p(\theta) = \frac{-f + 2k(1 - (1-\frac{1}{2})a^2)}{1 \pm \mu \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\tan \phi} \right)}$$



Orowanの理論の力の釣り合い

Hitchcockのロール扁平式:  $R' = \left(1 + \frac{C'}{h_2 - h_1} \cdot p'\right) \cdot R$ ,  $C' = \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E}$ ,  $p'$ : 単位幅あたりの圧延荷重



摩擦係数:  $\mu = 0.01, 0.02, 0.03, \dots, 0.10$

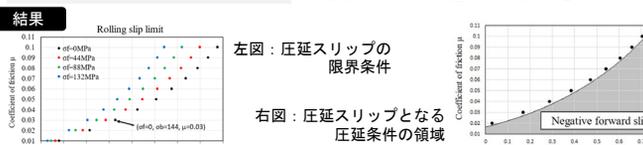
$\sigma_f = 0, 44, 88, 132 \text{ MPa}$

ロールポアソン比:  $\nu_R = 0.3$

ロールヤング率:  $E_R = 210 \text{ GPa}$

板厚:  $h_2 = 0.86 \text{ mm}, h_1 = 0.80 \text{ mm}$

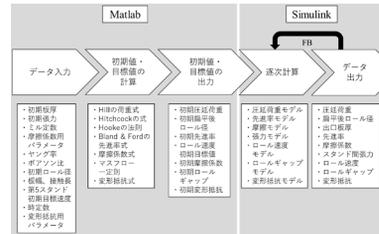
ロール半径:  $R = 300 \text{ mm}$



左の解析条件で反復計算終了時、ぎりぎり中立点を持つ圧延スリップの限界圧延条件(後方張力)を求めた結果、以下の通りであった

## 圧延シミュレーターへの適用

- ✓ 数値解析で求めた圧延スリップ限界を、最小二乗法を用いて連続化し、摩擦係数・前方張力・後方張力の3条件からなる圧延スリップ限界を表す3次多項式  $\mu_{limit}(\sigma_f, \sigma_b)$  を取得
- ✓ 圧延スリップ限界を冷間タナダム圧延制御のシミュレーターに適用し、板厚やロール速度の応答を確認



実験的な意味合いでの圧延制御シミュレーション

圧延制御モデルによってブロック線図を構築(※)

(※) 日本製鉄、JFEスチール、神戸製鋼所らによる共同開発

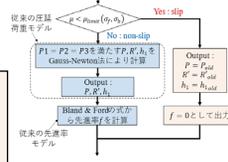
圧延制御シミュレーションの流れ

- 第5スタンドについて、以下のような組み換えを実行

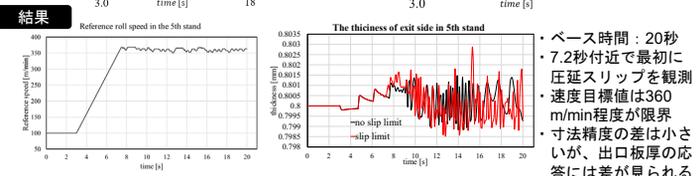
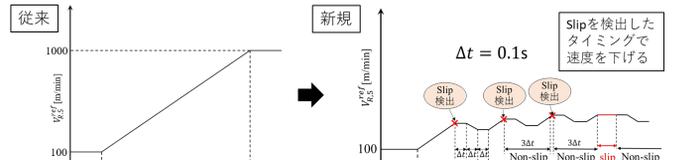
- ① 圧延荷重モデル、先進率モデル  $\mu < \mu_{limit}(\sigma_f, \sigma_b)$ : 圧延スリップ状態

圧延荷重モデル:  $P, h_1, R'$  は、直前の値  $P_{old}, h_{1old}, R'_{old}$  とする

先進率モデル:  $f = 0$  とする



- ② ロール速度モデル (目標値)



## 非円弧扁平理論による解析

Hitchcockの扁平理論は、被圧延材がハイテンなどの硬質材である場合、必ずしも適用が推奨されない

松本らが提案したロール非円弧扁平式:

$$h'(x) = \frac{(x-x_p)^2}{R} - 2KR \int_0^x \ln|x-x'| \cdot p(x') dx' + c$$

- ✓ 被圧延材の流動応力、圧下率 $r$ の違いによるHitchcockの解析結果との違いを確認
- ✓ 板厚分布・圧力分布を比較

