

定常板圧延解析における入り側計算領域長さが板厚分布に及ぼす影響

豊島史郎(工博)*・森賀幹夫**

*技術開発本部・機械研究所 **株式会社コベルコ科研

Effects of Entrance Zone Length on 3-dimensional steady State Analysis Thickness Distribution for Strip Rolling

Dr. Shiro Toyoshima・Mikio Moriga

In the analysis of strip rolling, entrance zone deformation (pre-deformation) must be properly evaluated to understand strip behavior and precisely predict thickness distribution. This study focused on how the length of the entrance zone computational domain as a modelling parameter affects the distribution of thickness, together with various material properties. It was found that the effect can not be ignored for materials dependent on strain rate such as hot strip rolling.

まえがき = 均一な板厚および板端部トリミングしるの低減に代表されているような寸法精度および歩留り向上に対する強い要請より、計算による板クラウン予測にも高精度が要求されている。近年では、ロール変形モデルと剛粘塑性材に対する FEM を連成させた三次元解析が主流となっている^{1)~7)}。そこでもちいられるロール変形計算と被圧延材の変形計算は、着実に精度を向上させ、板端部に向けて板厚が減少する「エッジドロップ」の予測についてはかなりの成果をえてきた。しかし板端部よりある程度離れた部位で板厚が増える「エッジアップ」については、前者ほど良い結果はえられておらず、その解明は今後の問題として残されている。

これまでの計算モデルの取り残された課題は、計算をおこなう際の境界条件、とくにロール入り側における境界条件と材料特性であると考えられる。

被圧延材はロールと接触する以前から変形(予変形)することが知られているが、計算で予変形について体系的に論じられることは、筆者の知る限りではない。

本稿では、予変形が生じる入り側計算領域長さが計算結果に及ぼす影響に着目し、その具体例として、エッジアップが生じた実験を対象とし、入り側計算領域および

材料パラメータが板厚分布に及ぼす影響について報告する。

1. 圧延条件および計算モデル

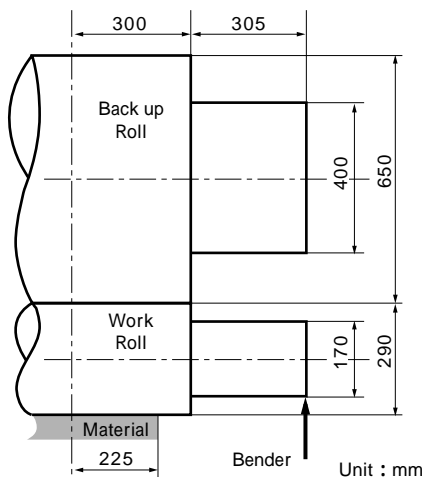
第1図に実験でもちいた4Hiミルのロール諸元、第1表に圧延条件、第2表に計算における各種許容値(被圧延材の剛域とみなす許容歪み速度値 $\dot{\epsilon}_{tol}$, 接触面の固着とみなす許容相対滑り速度値 S_{tol} , 速度の収束判定値 v , 流線位置の収束判定値 d), 第2図に計算フローの大略を示す。また、被圧延材の計算領域および各方向の初期要素分割数または要素数を第3図に示す。ここに、板幅方向分割数は $NX = 15$, 圧延方向総要素数は $NY = NI + NR + NO$ (ロール入り側領域の要素数 $NI = 2 \sim 192$, ロールバイト領域の分割数 $NR = 16$, ロール出側領域の要素数 $NO = 4$), 板厚方向分割数は $NZ = 2$ である。

第1表 圧延条件
Table 1 Rolling conditions

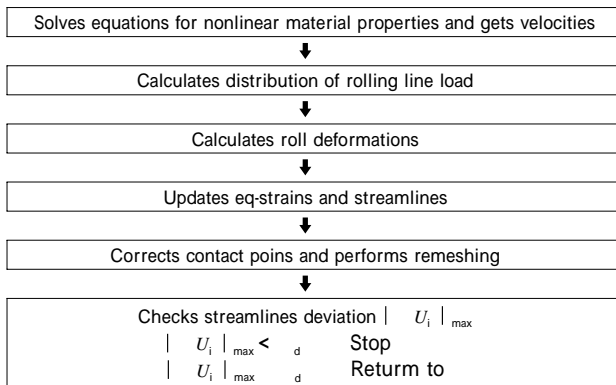
Plate	Thickness=4.83mm, Width=450mm
Reduction	18.6%
Flow Stress	$150 \bar{\epsilon}^{0.238} \dot{\epsilon}^{0.06}$ MPa
Temperature	900
Roll Material	$E = 205$ GPa, $\nu = 0.3$
Roll Velocity	743mm/s
Tension	Front Tension = 0.0N, Back Tension = 0.0N
Bender Load	154MN

第2表 各種許容値
Table 2 Computational conditions

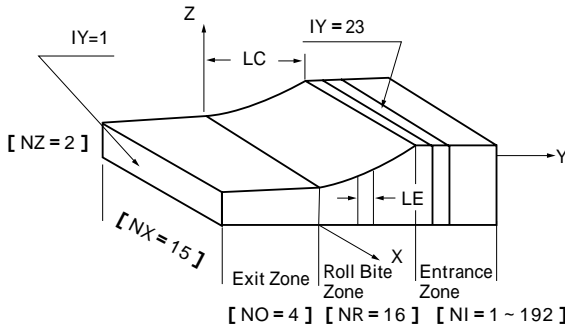
Rigid Parts : $\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_{tol}$
$\dot{\epsilon}_{tol} = \dot{\epsilon}_{min} + \alpha_R (\dot{\epsilon}_{max} - \dot{\epsilon}_{min})$
Stick Parts : $S < S_{tol}$
$S_{tol} = S_{min} + \alpha_S (S_{max} - S_{min})$
Check of Velocity Norm :
$[(\sum V_i^2)(\sum V_i^2)]^{1/2} < v$
Check of Deformation Norm :
$ U_i _{max} < d$
$\alpha_R = 10^{-4}, \alpha_S = 10^{-2}, v = 10^{-4}, d = 10^{-4}$ mm



第1図 試験用圧延機の寸法
Fig. 1 Test mill size (4-high)



第2図 計算のメインフロー
Fig. 2 Main flow of computation



第3図 初期FEM要素分割
Fig. 3 Initial FEM Mesh

なお、初期投影ロール接触長をLCとして、初期の圧延方向要素長さは場所によらず同じ長さLE ($LE = LC / NR$, LC = 初期投影ロール接触長)を設定した。

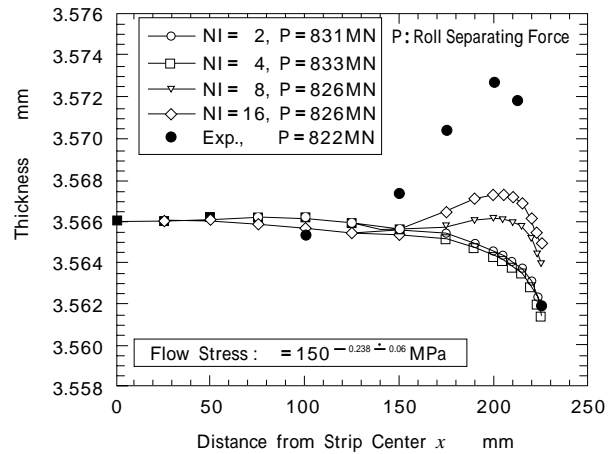
2 入り側計算領域が短い場合の計算結果

通常の三次元定常圧延解析では、入り側計算領域サイズとして、初期接触長以下の短い長さをもちいることが多い。第4図は、このように従来よくもちいられる入り側計算領域 (NI = 16) を設定した場合の板厚分布および圧延荷重の計算結果であり、比較として実験結果を●印で示している。

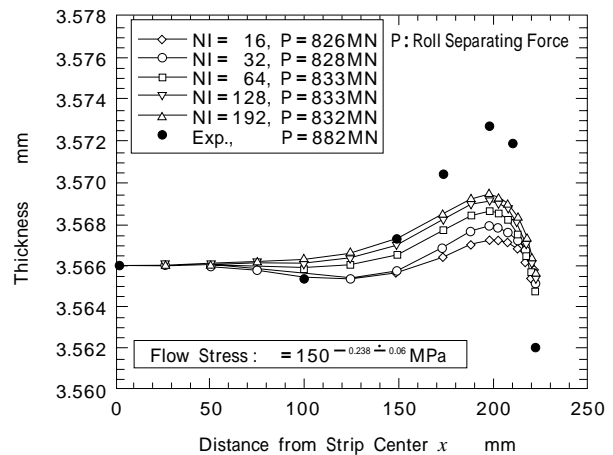
実験の板厚分布は、板幅中央からの距離 $x = 150\text{mm}$ 離れた位置から急激に増え、 $x = 200\text{mm}$ 近傍で最大となり、 $x = 200\text{mm}$ で急激に減少し、板端部で最小となっており、いわゆる「エッジアップ」現象が生じていることがわかる。なお、その最大板厚と中央板厚との差(以降、最大板厚偏差と呼ぶ)は $7\mu\text{m}$ 程度である。

いっぽう、計算結果の板厚分布は次のようになっている。

- 1) NI = 2 (初期接触長の0.125, 0.25倍)の場合、板厚分布は、 $x = 100\text{mm}$ まではフラット、 $x = 100 \sim 200\text{mm}$ の部位で緩やかに減少し、 $x > 200\text{mm}$ で急激に減少しており、「エッジドロップ」となっている。
- 2) NI = 8 (初期接触長の0.5倍)の板厚分布は、 $x = 50\text{mm}$ まではフラット、 $x = 50 \sim 150\text{mm}$ で緩やかに減少し、 $x = 150 \sim 200\text{mm}$ で若干増加し、 $x > 200\text{mm}$ で急激に減少している。最大板厚は $x = 200\text{mm}$ の位置にあり、その値は板中央における板厚と同程度である。
- 3) NI = 16 (初期接触長の1.0倍)の板厚分布は、 $x =$



第4図 短い入り側領域長さ (NI = 16: 初期接触長さ以下) に対する板厚分布の計算結果
Fig. 4 Distributions of calculated and experimental plate thickness, for NI = 16 (less than initial contact length)



第5図 入り側領域長さ (NI=16, 32, 64, 128, 192) に対する板厚分布の計算結果
Fig. 5 Distributions of plate thickness for several entry zone size (NI=16, 32, 64, 128, 192)

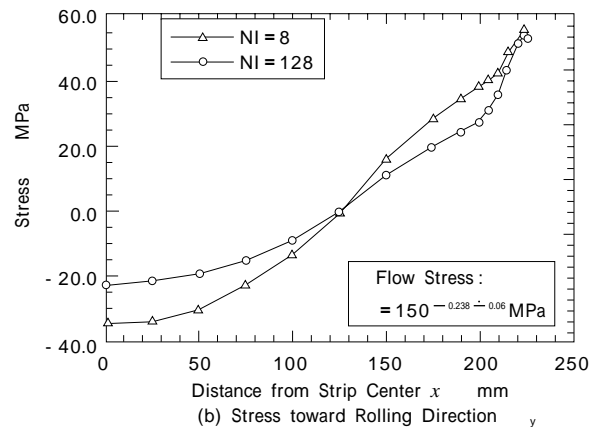
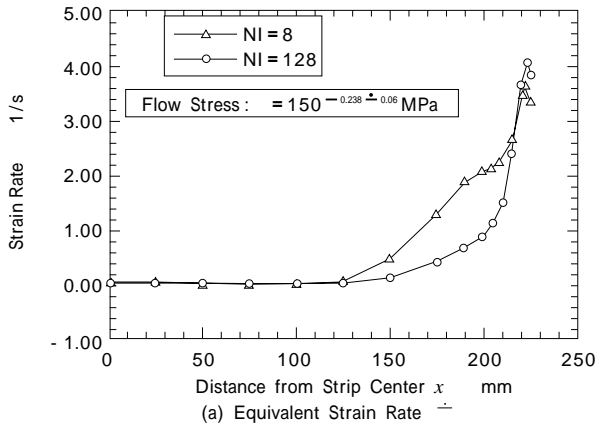
50mm まではフラット、 $x = 50 \sim 125\text{mm}$ で緩やかに減少し、 $x = 125 \sim 200\text{mm}$ で若干増加し、 $x > 200\text{mm}$ で急激に減少している。最大板厚は $x = 200\text{mm}$ の位置にあり、最大板厚偏差は $1.5\mu\text{m}$ 程度であった。

このように、入り側計算領域が短い (NI = 8: 初期接触長の半分以下) 場合には、計算結果は実験結果の兆候をも示唆していないことがわかる。ただし、初期接触長程度 (NI = 16) の計算結果は、若干ではあるが、「エッジアップ」の傾向を示していることがわかる。

3 入り側計算領域長さが板厚分布に及ぼす影響

2章の結果より、精度よく板厚分布を予測するためには、入り側の計算領域長さを増やしていき、それともなう板厚分布の収束状況を見きわめる必要があると考えられた。そこで、入り側の計算領域長さに関する一連のパラメータスタディ (NI = 32, 64, 128, 192: 初期接触長の2, 4, 8, 12倍) をおこなった。板厚分布の計算結果を第5図に示す。

これより、入り側長さを増やしていくと、計算においても「エッジアップ」の傾向が示されていることがわかる。ただし、定量的な最大板厚偏差は、NI = 64 (初期



第6図 接触開始前（接触点から2要素長上流位置）における歪み速度・圧延方向応力分布（入り側領域長さパラメータ NI=8, 128）

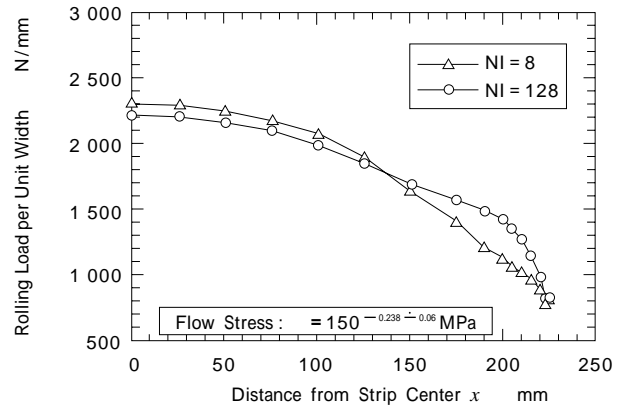
Fig. 6 Distributions of strain rate and stress toward rolling direction at entry line IY=23 located 2-elements length upwards from contact line for NI=8 and NI=128

接触長の4倍)の場合 $2.5 \mu\text{m}$, NI=128 (初期接触長の8倍)の場合でも $3.0 \mu\text{m}$ 程度であり, 実験値の $7 \mu\text{m}$ と比較すると計算結果は十分に満足できるものではないと判断できる。この最大板厚偏差については, 材料モデル(変形抵抗)パラメータとも関連していると考えられるので, 後述の5章で再度検討する。

4. 入り側計算領域長さが各種状態量に及ぼす影響

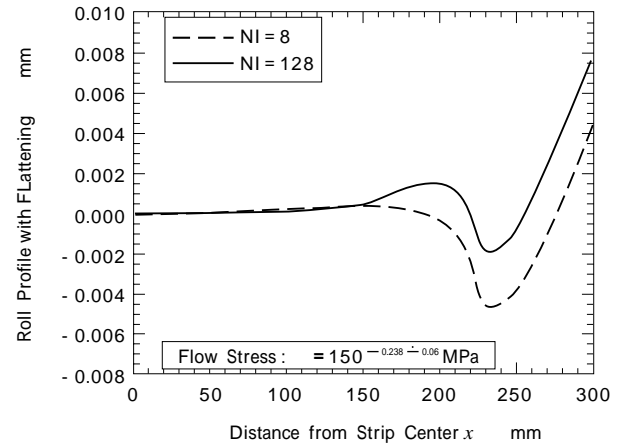
3章の計算結果より, 材料の歪み速度依存指数 m が小さい場合 ($m=0.06$) でも, 入り側計算領域は出側板厚分布に影響を及ぼしており, より精度の高い板厚分布を予測するためには, ある程度の長さ以上の適切な入り側計算領域が必要であることがわかった。ここでは, その理由を調べるために, 入り側計算領域が短い場合 (NI=8: 初期接触長の0.5倍, 半板幅の0.025倍) と長い場合 (NI=128: 初期接触長の8.0倍, 半板幅の0.4倍) を対象として, 接触開始直前の歪み速度・応力(板厚方向の平均値)の幅方向分布や単位幅圧延荷重分布およびロール偏平変形を比較した。

被圧延材がロールと接触する直前 (IY=23: 接触開始線の2要素上流側の位置) の相当歪み速度分布および圧延方向応力分布を第6図, 単位幅圧延荷重分布を第7図, ロール偏平変形を第8図に示す。これらの図より, 入り側計算領域パラメータ NI を8から128に増やす



第7図 圧延線荷重分布 (NI=8, NI=128)

Fig. 7 Rolling loads per unit width for NI=8 and NI=128



第8図 変形後のロール表面形状 (NI=8, 128)

Fig. 8 Roll profiles for NI=8 and NI=128

と, 板中央から $x=130 \sim 215\text{mm}$ の部位で以下に述べるようなことが生じている。

接触開始直前の相当歪み速度が最大 $1.2 (1/\text{s})$ 程度低下する。〔第6図(a)参照〕

接触開始直前の圧延方向応力が最大 $9.8 (\text{MPa})$ 程度低下する。〔第6図(b)参照〕

単位幅圧延荷重が最大 $294 (\text{N}/\text{mm})$ 程度増加する。〔第7図参照〕

偏平変形量が最大 $3.0 (\mu\text{m})$ 程度増加する。〔第8図参照〕

これらより, 入り側の計算領域を増やしていくと, 歪み速度の緩和は入り側全域において生じるのではなく, 特定の部位において生じることがわかる。すなわち, ここでの計算条件では板中央から $x=130 \sim 215\text{mm}$ の部位において, 入り側部の歪み速度が緩和され, これにともなって入り側部の圧延方向応力(後方張力)も緩和されることがわかる。なお, この応力は張力側であるため, 緩和されるということは相対的に圧縮応力が付加されることに相当する。それゆえ, この特定部位における単位幅圧延荷重が増大し, そこでのロール偏平変形も増え, 板厚分布に影響が及ぶことになる。

5. 材料モデルのパラメータと入り側計算領域の影響

これまで, 次式(1)で表される変形抵抗のパラメータとして, $a=150 [\text{MPa} \cdot \text{sec}^m]$, $n=0.238$, $m=0.06$

をもちいて、入り側計算領域についてのパラメータスタディをおこなってきた。

$$= a \cdot \bar{\epsilon}^n \cdot \dot{\bar{\epsilon}}^m \dots\dots\dots (1)$$

ここでは、これらの材料パラメータと入り側計算領域とが板厚分布にどのような影響を及ぼすかについて調査した。第3表に計算でもちいた材料パラメータを示す。

なお、表中の材料2,3,4のパラメータ a は、設定した n, m 値に対して圧延荷重を計算した場合、それらが材料1の圧延荷重(約833 MN)にほぼ等しくなるように決定している。

材料2をもちいた場合の入り側計算領域についてのパラメータスタディによる板厚分布を第9図に示す。

また、各材料に対して、入り側計算領域を $NI=64$ (初期接触長の4.0倍, 半板幅の0.2倍)および $NI=128$ (初期接触長の8.0倍, 半板幅の0.4倍)とした場合の最大板厚偏差を第3表中に付加した。

これらの結果より、精度の高い予測が望まれる場合には、材料パラメータの同定に注意しなければならないことがわかる

むすび = 圧延解析の精度向上のために、入り側計算領域および材料モデルの影響を解析し検討した。その結果、以下の知見をえた。

1) 入り側計算領域として接触長の0.5倍程度を設定した場合にはエッジアップの兆候さえも再現できなかったが、その領域を増やしていくと、定量的には問題は残っているが、エッジアップを模擬することができた。すなわち、三次元圧延計算(とくに熱間圧延)における板厚を精度よく予測するためには、「入り側計算領域サイズ」が重要であることを確認できた。ただし、「どの程度の領域が必要であるか」ということに関しては、本文の例から推察すると接触長の8倍または半板幅の0.4倍程度必要と思われるが、より力学的な見地から「入り側計算領域サイズ」を決定するためにはさらなる研究が必要と思われる。

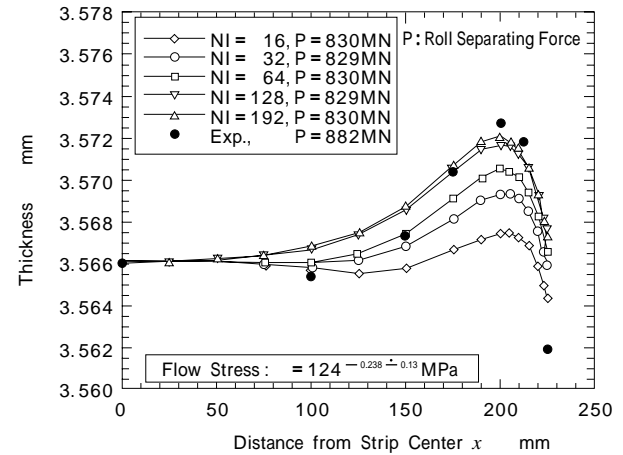
2) 本稿で対象とした圧延条件では、材料モデル(変形抵抗 $= a \cdot \bar{\epsilon}^n \cdot \dot{\bar{\epsilon}}^m$)のパラメータ a および m によっても板厚分布の量が大きく変わることが確認できた。すなわち、精度の高い板厚分布を予測するためには、材料パラメータについても精度ある同定が必要となる。

3) 入り側計算領域を増やしていくと、入り側全領域の

第3表 材料パラメータおよび最大板厚偏差

Table 3 Material properties and computed thickness deviation

Material	Param. of Flow Stress			Dev. of Thickness μm	
	a	n	m	NI(64)	NI(128)
1	150	0.238	0.06	2.5	3.0
2	124	0.238	0.13	4.5	6.0
3	150	0.238	0.13	1.8	2.7
4	174	0.238	0.00	0.7	1.0



第9図 入り側領域長さ (NI=16, 32, 64, 128, 192) に対する板厚分布の計算結果

Fig. 9 Distributions of plate thickness for several entry zone size (NI=16, 32, 64, 128, 192)

歪み速度が緩和されるのではなく、特定の部位において緩和され、そこでの圧延方向張力が低下する。これは相対的に圧縮応力とその部位に付加されることを意味している。それゆえ、単位幅圧延荷重がその特定部位において大きくなり、ロールの偏平変形に影響を及ぼし、最終的にエッジアップが生じたと考えられる。

参考文献

- 1) 佐々木保ほか：平成3年塑加春季講論(1991), p.157.
- 2) 柳本 潤ほか：塑性と加工, Vol.33, No.383(1992), p.1406.
- 3) 石井 篤ほか：CAMP-ISIJ, Vol.9(1996), p.300.
- 4) 豊島史郎ほか：第41回塑加連講論(1990), p.71.
- 5) 山田健二ほか：第41回塑加連講論(1990), p.63.
- 6) 豊島史郎ほか：CAMP-Vol.10(1997), p.312.
- 7) M. Kiuchi et al.: Memorial Symposium of The 100th Rolling Theory Committee, Development and Prospect of Theory and Technology of Steel Rolling (1996), p.179.