

# ロール形状を最適化するための コールドピルガーミル解析モデル

Analysis Model of Cold Pilger Mill for Optimizing Shape of Roll

山田 麻由\*<sup>1</sup> 中崎 盛彦\*<sup>2</sup>

YAMADA Mayu and NAKASAKI Morihiko

**Synopsis:** The cold pilger mill is a process where hot-rolled or hot-extruded tubes are cold-rolled to reduce their diameters and adjust their dimensions accurately. The productivity of this process is very high since a large reduction in area can be obtained through one rolling process (a series of sequential forging). However, this also means that the work load on the tools for this process is quite intense, causing early breakage of them.

Precise prediction of tool life is important to achieve a stable production. However, the prediction method has not been established. This is because the stress distribution on tool surface, which is considered as the cause for the breakage of the tools, has not been studied nor reported yet.

In this study, the stress distribution on tool surface was visualized and quantified with a 3-D FEM. Thereafter, the tool lives were relatively evaluated with the viewpoint of fatigue fracture theory, where stress amplitude and stress ratio were considered.

“Life evaluation curve” was obtained by organizing the stress ratio and the stress amplitude data from the stress analysis results of tool surface. The slope of the tangent line from the fatigue limit of alternating-stress to the life evaluation curve was employed to compare the tool lives. The prediction results with this method were consistent with the life trends of the actual rolls.

**Keywords:** pilger mill ; roll ; fatigue ; stress amplitude ; CAE analysis

## 1. 緒言

継目無鋼管は、溶接部がないことから一般に特殊な配管用、油井用、ボイラ用熱交換器用の鋼管として用いられている。また、配管用としての用途のみならず、軸受などの各種機械部品の素材としても使用される。

当社では、この継目無鋼管を、①熱間圧延方式（マンネスマン方式アツセルミル）、②熱間押し方式（ユージンセジュールネ方式熱間押しプレス）及び③冷間圧延方式（コールドピルガーミル）により製造している。コールドピルガーは、①②の熱間製造鋼管を素管として、さらに小径薄肉鋼管を製造するプロセスである。

Fig.1 にコールドピルガーミルの模式図を示す。コールドピルガーミルは素管内部に挿入されたマンドレルおよび一対のロールにより素管が圧伸される。

ロールには、Fig.2 に示すように素管入側から出側方向

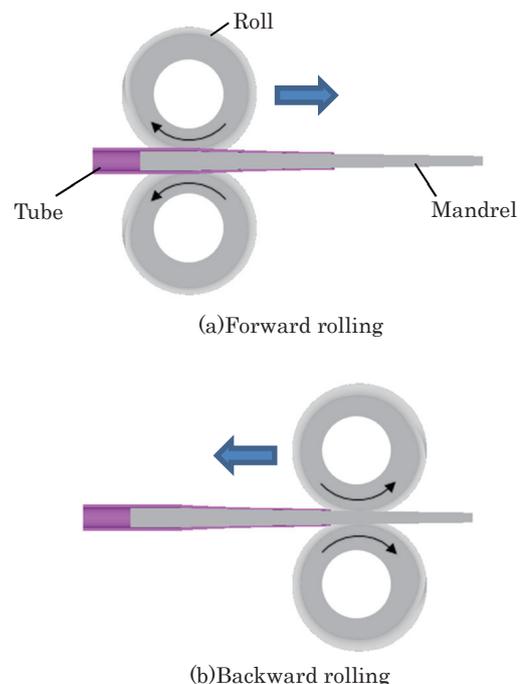


Fig.1 Schematic diagram of pilger mill.

\*1 研究・開発センター プロセス開発室 塑性加工グループ

\*2 品質保証部 部長 博士（工学）

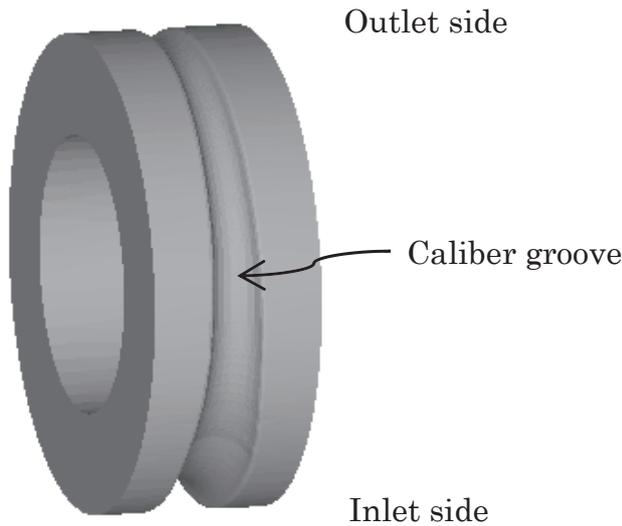


Fig.2 Schematic drawing of roll.

に向かって孔の大きさ（深さ）が徐々に小さくなっていく半円カリバーが加工されていることから、圧伸の進行により素管は細径化していく。ロールは回転しながら素管出側方向へ平行移動する往路と、逆回転しながら素管入側の初期位置へ戻る復路の往復運動をする。ロールの1往復毎に素管が一定角度回転、一定の送り量分送られる工程を繰り返しながら進行する逐次加工である。

コールドピルガーミルは1回の圧伸（一連の逐次加工）で75%程度の大きな減面率がとれるため、同一減面率で比較すると加工途中で数回の焼なまし、脱脂、矯正を必要とする引抜よりも生産性が良い<sup>1)</sup>。

一方、圧伸による高い面圧が働く中での繰り返しの往復運動により、ロールのカリバー底付近で疲労破壊による割れが発生し、生産性の阻害や品質悪化に繋がることもある。この割れの防止のため、素管長手方向での圧下率を適切に設定する必要があるが、カリバー形状の設計にあたり、実機で試行錯誤的にロールの寿命を確認しては過大な時間やコストを要する。

コールドピルガーミルに関する計算手法は過去にも試みられている。古堅らは、ピルガーミル工程における複雑な鋼管の変形について理論計算を用い、鋼管のひずみや応力を算出し、ロールカリバー設計の基本となるような鋼管の圧延特性を明らかにしている<sup>2)</sup>。村岡らは、ピルガーミルの有限要素法による解析モデルの構築に取り組み、テーパ状の成形形状を初期値として与える準定常モデルの構築により、解析時間の短縮および解析精度向上を確認した<sup>3),4)</sup>。Leeらは、理論計算による圧延荷重予測や鋼管断面の形状比較結果から、カリバー形状の評価を行っている<sup>5)</sup>。以上のように、数値計算を用いたピルガーミルにおける鋼管の成形性や圧延荷重に関する評価はいくつか行われているが、ロールの疲労破壊に着目した寿命比較技術は

確立されていない。

本報では、カリバー面における疲労破壊に対する評価を行うため、カリバー面にかかる応力分布を把握する3次元有限要素モデルについて検討した。また、上記モデルから得られる3次元的情報をもとに、応力振幅および応力比に着目し、ロール寿命の相对比较方法について検討した。

## 2. 解析条件

### 2.1 鋼管の圧伸解析条件

今回、寿命評価方法を検討する上で、「鋼管の圧伸解析」および「ロールの応力解析」の2ステップに分けて解析を実施した。解析条件をTable 1に、解析モデルをFig.3に示す。実機と同様にロールの1往復毎に鋼管を60°回転させ、一定距離送る工程を繰り返し、弾塑性体の鋼管を素管から製品寸法まで圧伸した。なお、計算の収束性を良くするためロールとマンドレルは剛体として計算した。

Table 1 Analysis conditions about deformation of tube.

FEM code		DEFORM 3D
Roll	Material type	Rigid
Mandrel	Material type	Rigid
Tube	Material type Material	Elastic-plastic SUJ2
Feed between shots/mm		10
Rotation angle of tube/deg		60
Coefficient of friction		0.3

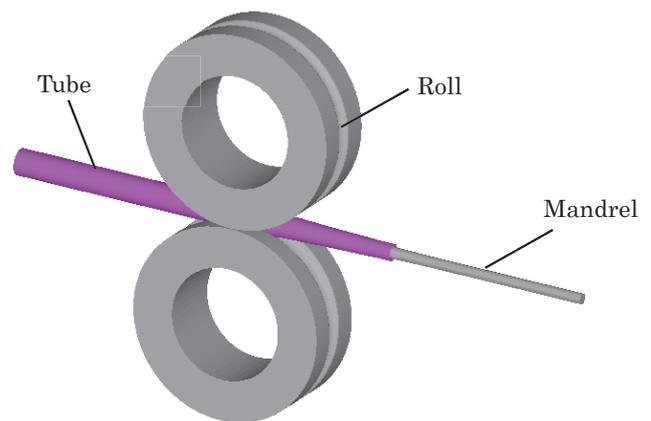


Fig.3 Numerical simulation model of elastic-plastic tube deformation in pilger mill process.

ロールは溝型のカリバーにより鋼管が圧伸加工されるワーキングゾーン（WZ）、これに続いて仕上げを行うサイジングゾーン（SZ）、素管および加工された鋼管には接触しない非接触部から構成される。なお、WZ入側にも非接触部が存在する。

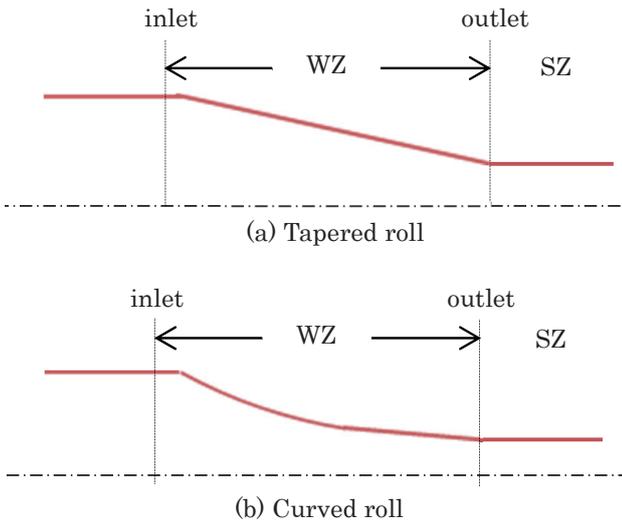


Fig.4 Tube outer profile during pilger mill process.

今回、ロール寿命に及ぼす溝形状の影響を検証するため、素管から所定製品までの圧下の掛け方を変更した2種類のロールについて比較した。

Fig.4に各ロールで圧伸した場合の鋼管のプロフィールを示す。(a)はWZ入側の素管から出側の製品寸法まで一定の減面率で変化するテーパロール、(b)は減面率が曲率的に変化するカーブロールにより得られるプロフィールである。なお、この2種類のロールでの加工において、素管寸法、製品寸法は等しく、マンドレルは同一とした。

### 2.2 ロールの応力解析条件

前節 2.1 の鋼管の圧伸解析結果から鋼管圧伸時の面圧を弾性体のロールに転写し、ロールのカリバー面底の応力分布を算出した。解析条件を Table 2 に示す。

Table 2 Analysis conditions about elastic roll.

Roll	Material type	Elastic
	Young's modulus	207 GPa
	Poisson's ratio	0.3

本報では、WZにおける鋼管の入側に対応する側を0%、出側を100%とし、各断面位置を%表記する。Fig.5にテーパロールのWZ50%断面の解析のモデルを示す。WZ50%断面を中心とし、ダイス周方向に対して両側±8%の範囲の要素を細かく分割した。同様に、他の断面についても要素を分割し、複数断面について解析を実施した。

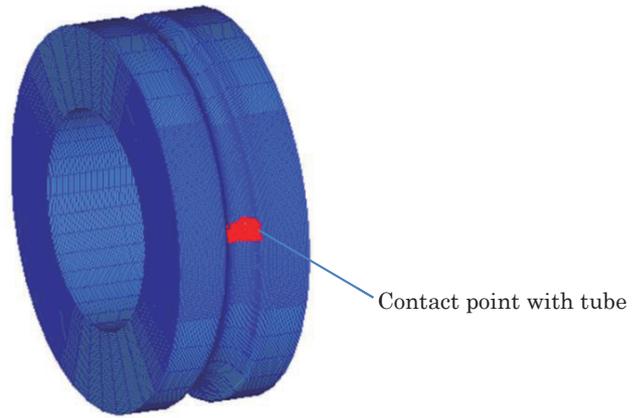


Fig.5 Numerical simulation model of elastic roll in pilger mill.

## 3. 解析結果

### 3.1 鋼管の圧伸解析結果

解析で求めた鋼管圧伸時の荷重の推移を Fig.6 に示す。カーブロールでは、テーパロールに比べて相対的にWZ前半の加工率が大きいいためWZ前半の荷重が高くなった。また、テーパロールでは、相対的にWZ後半の加工率が大きいことと鋼管の加工硬化の影響により、WZ後半での荷重の増加が顕著であった。

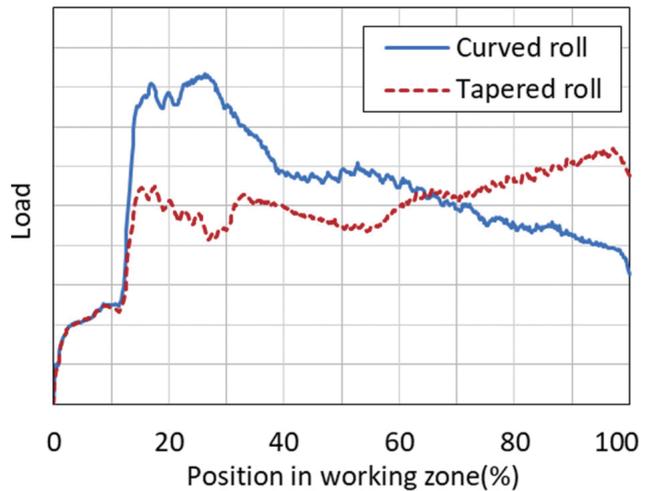


Fig.6 Rolling load during pilger mill process.

### 3.2 ロールの応力解析結果

今回、疲労寿命の観点から、一般に疲労破壊評価に用いられる応力振幅 $\sigma_a$ および応力比Rによりピルガーロールの破損要因を評価した。

テーパロールの応力解析結果から応力振幅および応力比を算出する方法を示す。Fig.7は、WZの50%断面位置を接触範囲の中心とした最大主応力および最小主応力分布図である。図中の点線はカリバー溝底の流線を示している。点線上の最大主応力および最小主応力の分布を Fig.8 に示す。鋼管との接触部には圧縮応力が、その周辺には引

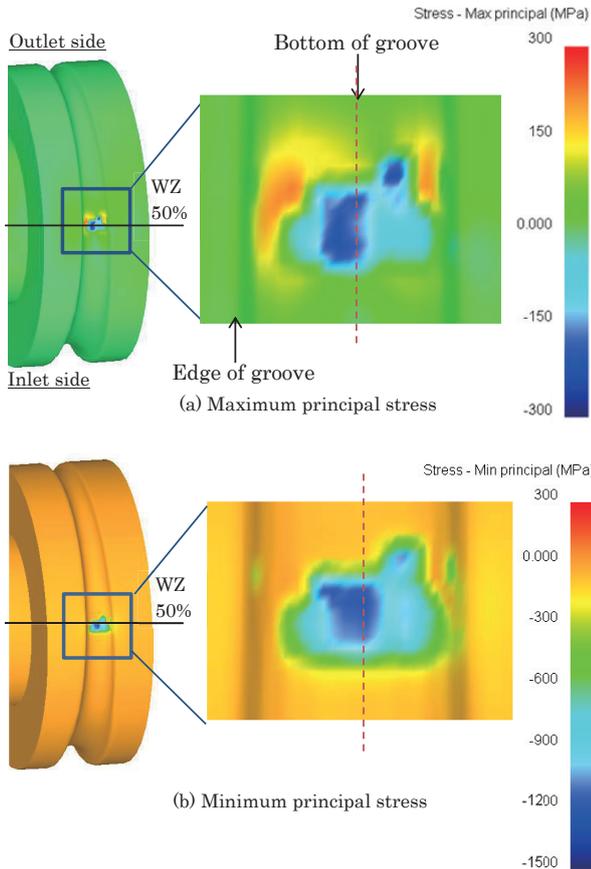


Fig.7 Contact stress at 50% in working zone of tapered roll.

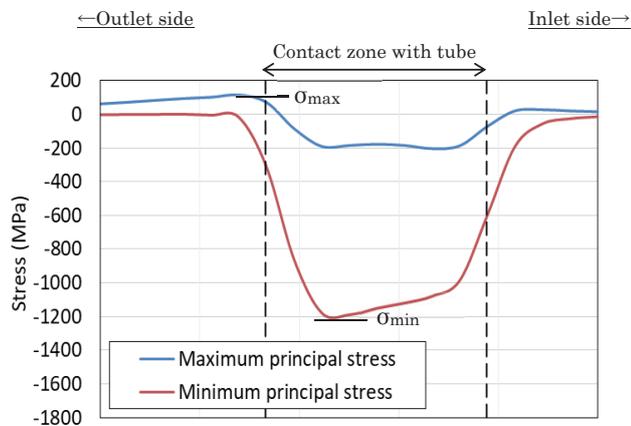


Fig.8 Stress distribution of groove bottom at 50% cross section in working zone of tapered roll.

張応力が働いている。

応力振幅 $\sigma_a$ および応力比Rは式(1)、(2)に従い、算出した。

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \dots(1)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad \dots(2)$$

ここで、 $\sigma_{max}$ は最大主応力、 $\sigma_{min}$ は最小主応力である。本検討では、接触部の外側に引張応力が働くことを考

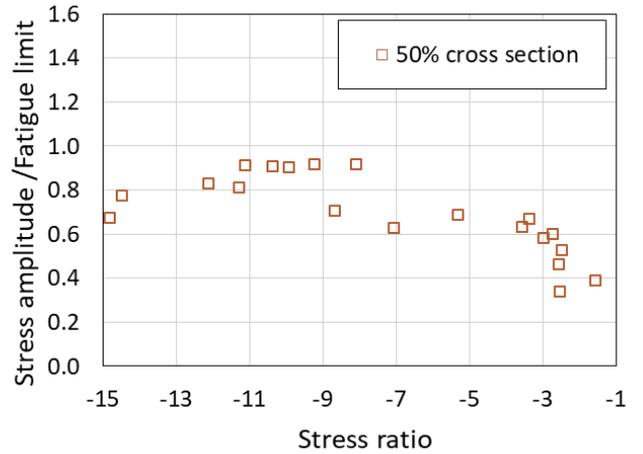


Fig.9 Relationship between stress amplitude and stress ratio at 50% cross section in working zone of tapered roll.

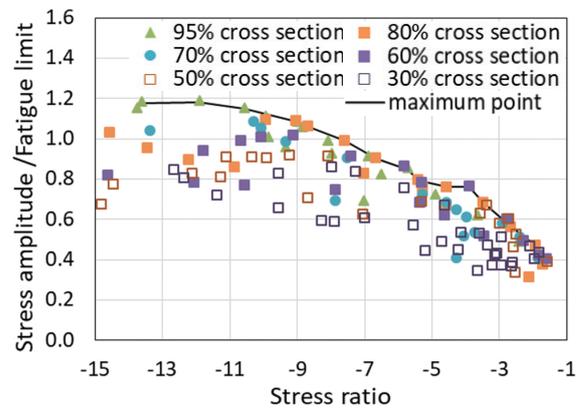


Fig.10 Relationship between stress amplitude and stress ratio at each cross section in working zone of tapered roll.

慮して、同一位置での $\sigma_{max}$ と $\sigma_{min}$ ではなく、解析範囲の同一流線上における $\sigma_{max}$ の最大値、 $\sigma_{min}$ の最小値を用いた。

同様に、カリバー溝底からカリバー縁まで約 $3^\circ$ 間隔で同一流線上にて応力振幅および応力比を算出した。縦軸に応力振幅をロール素材の疲労限度で除したものを、横軸に応力比をとり、両者の関係についてFig.9に整理した。

他の断面位置においても同様に算出し、Fig.10に整理した。前述の通り、ビルガーマイルのカリバー形状はWZ内で変化し、各部でロールへの負荷も変化する。その上で寿命評価を行うにはWZ全長で見た最悪条件にて評価を行う必要があると考えた。そこで、各応力比での応力振幅の最大点からテーパロールにおける「寿命評価曲線」を作成した。この曲線は、WZの95%断面や80%断面から形成されており、荷重同様、応力振幅についてもWZ後半で大きい傾向が確認できた。

テーパロールと同様に、カーブロールについても寿命評価曲線を作成し、両者をFig.11に並べた。なお、カーブロールの寿命評価曲線は、主にWZ前半(WZ20%～30%断面)の値から形成された。

応力振幅の大きさのみで寿命を比較した場合、両者の寿

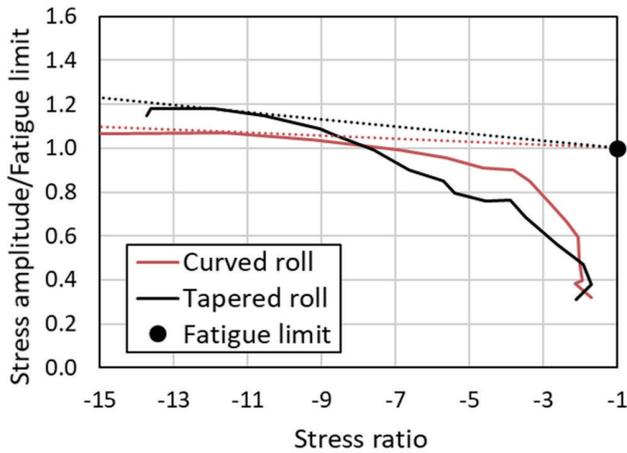


Fig.11 Evaluation line for life comparison.

命評価曲線は交絡していることから、交点の前後で応力振幅の大小関係が異なるため、いずれのロールが疲労寿命に優れるか判断が付きにくい。そこで、疲労限度を考慮した評価方法を検討した。両振り疲労試験 ( $R=-1$ ) におけるロール素材の疲労限度 (応力振幅 / ロール素材の疲労限度 = 1) を通る、各寿命評価曲線に対する接線を引き、その接線の傾きの絶対値を比較することで寿命を比較した。

ピルガーマイルのバリバーにおける疲労寿命の評価範囲は応力比が小さい (圧縮傾向が強い) 範囲であり、実測は困難である。実測可能な両振り疲労試験の結果を使用し、曲線を比較する方法として曲線に対する接線で比較することとした。

この方法において、接線の傾きの絶対値が大きいと負荷が大きく疲労破壊のリスクが高いと判断する。

今回の結果では、テーパロールの寿命評価曲線に対する接線の傾きの絶対値が大きいことから、カーブロールよりもテーパロールの方が疲労破壊のリスクが高いと判断できる。

#### 4. 本寿命比較方法の妥当性検証

次に、実ロールの圧延寿命を本手法により比較し、本手法の妥当性を確認した。

対象のロールは素管寸法、製品寸法が同じロール 1 ~ 3 の 3 種類のロールである。ロール 2, 3 はロール 1 と比べて WZ 前半の一部で断面積の変化が緩やかである。

Fig.12 に結果を示す。寿命評価曲線に対する疲労寿命を通る接線の勾配の絶対値を比較すると、ロール 1 の接線の勾配を 1 とした場合、ロール 2 の勾配は 0.87、ロール 3 は 0.69 であった。よって、ロール 1、ロール 2、ロール 3 の順に長寿命であると推定された。

Fig.13 に実機のロール寿命および接線の勾配について整理した。圧延寿命はロール 1 を 1 とした場合、ロール

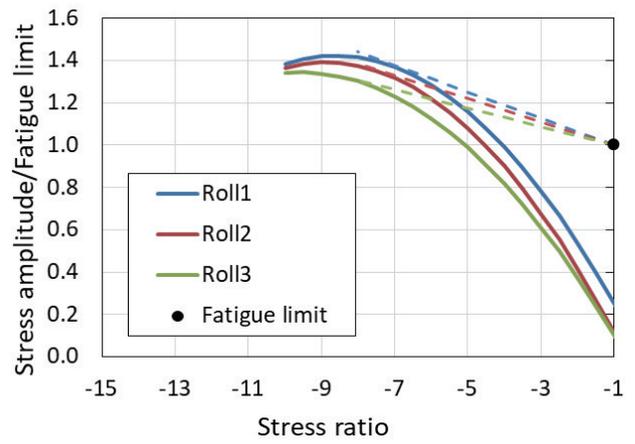


Fig.12 Roll life comparison of used rolls.

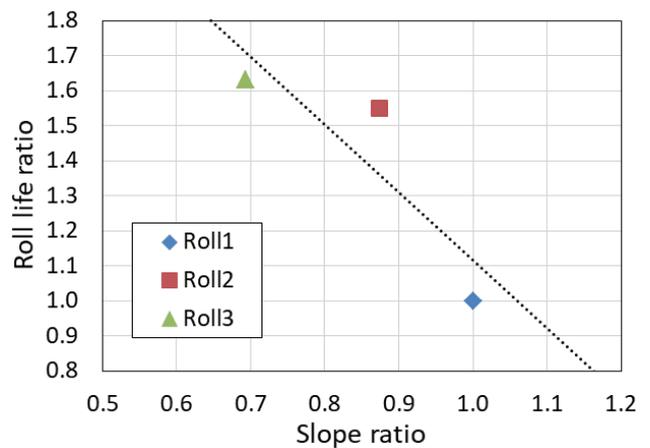


Fig.13 The relation between roll life ratio and slope ratio.

2 は 1.55、ロール 3 は 1.63 であった。以上から、3 種類のロールの圧延寿命と寿命評価曲線の接線の傾きには関係があり、本寿命比較方法が妥当であることが確認された。

#### 5. 結言

本報では、コールドピルガーマイル工程に関し、「剛体ロールでの鋼管変形解析」および「弾性体ロールの面圧転写解析」を行い、ロールのバリバー面上の割れに対し、各セクションにおける応力振幅ならびに応力比を計算、評価した結果、以下の知見を得た。

- (1)テーパロールおよびカーブロールの相对比较により、鋼管の変形解析の荷重と応力振幅のいずれにおいても、カーブロールでは WZ 前半、テーパロールでは WZ 後半で高いことが確認できた。
- (2)ピルガーマイルの寿命を疲労寿命の観点から評価した。各応力比における応力振幅の最大値から、「寿命評価曲線」を作成した。本曲線に対し、疲労限度から引いた接線の傾きの大小で寿命比較ができ、その結果は実機の寿命傾向と合致した。接線の傾きが大きいと負荷が大きく、寿

命が短くなることを示していると考えられるからである。  
以上の結果、ビルガーマイルロールの形状の評価に有効な  
3次元有限要素解析モデルおよび寿命比較方法を確立する  
ことができた。

### 参考文献

- 1) 坪田一一，大西公雄，坂上高志，石原晟好:鉄と鋼,70  
(1984) ,854.
- 2) 古堅宗勝，林千博：住友金属 ,37 (1985) 3,317
- 3) 村岡剛，久保木孝，梶川翔平，彌永大作，黒田浩  
一：平成 28 年度塑性加工春季講演会講演論文集，  
(2016) ,293
- 4) 村岡剛，久保木孝，梶川翔平，彌永大作，黒田浩一：  
第68回塑性加工連合講演会講演論文集,(2017),389
- 5) Sang-Kon Lee and Kyung-Hun Lee : Appl.  
Sci.2021,11 (2021) ,11265

### ■ 著者



山田 麻由



中崎 盛彦