

# 高強度中空構造部材を実現する ハイドロフォーミングにおける強制潤滑技術

東海大学 工学部 機械工学科  
 講師 窪田 紘明

(2019 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2019040-C2)

キーワード：チューブハイドロフォーミング，強制潤滑，成形特性

## 1. 研究の目的と背景

チューブハイドロフォーミングは一体成型が可能である，形状凍結性が良い，加工硬化が得られるなどの利点がある一方で金型と管材の間で生じる摩擦により肉厚が不均一になりやすいという課題がある<sup>1)</sup>．本課題の解決策として固体潤滑膜を用いて摩擦を低減する方法<sup>2)</sup>や金型を成形中に移動させることで摩擦力の方向を変更する方法<sup>3)</sup>が提案されている．

また，T字成形時の金型内面に多数の潤滑剤供給口を設けて管端から遠い位置へ軸押し効果を波及させる方法<sup>4)</sup>が提案されている．この方法は金型数の増加や複雑な機構の必要がない簡便な方法の一つであると考えられる．

本研究では，減肉や割れ発生が問題となりやすい管端から遠く軸押し効果が得られにくい部位において，周方向に材料を効率よく流動させることを目的に新たな強制潤滑技術を開発した．本報では，考案技術の概要と成形実験から得られた変形挙動の詳細を報告する．

## 2. 考案技術

過去の研究<sup>5)</sup>において管と金型の接触域では材料流動が抑制されることが示されている．そこで，図1(a)に示すように金型と成形初期に接触する位置に高圧の潤滑剤を供給する方法を考案した<sup>6)</sup>．また，複数の穴を設定すると非接触部の穴から潤滑剤が漏れて潤滑剤の圧力が高まらないと考えたため，1つの圧力源に対して1つの供給口を設定することにした．図1(b)には装置構成と縦断面で見た変形状態の模式図を示す．潤滑剤は内圧用の圧力媒体と同じもので良い．

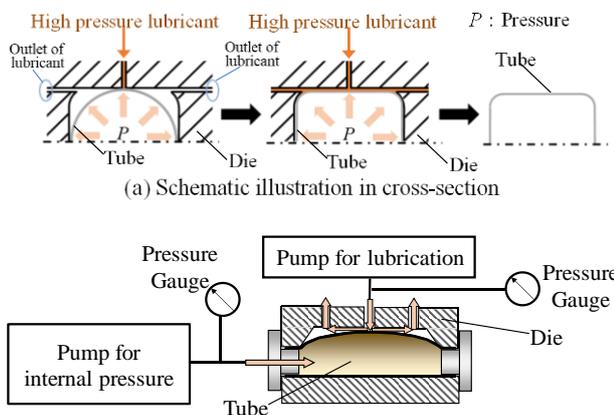


図1 強制潤滑ハイドロフォーミングの模式図

## 3. 実験方法

### 3・1 実験装置および材料

図2に実験装置を示す．内圧発生用と潤滑剤供給用に2台の油圧ポンプ（理研機器製 SMP-3016BR，最高圧力：70 MPa，高圧時の吐出量：0.2 L/min）を用いた．内圧の圧力媒体と潤滑剤はともに動粘度 32 cSt の油圧機器用作動油を使用した．圧力の制御のためには手動操作型のリリーフ弁を使用した．被加工材は外径  $\phi 50.8$  mm，公称板厚  $t=1.2$  mm の鋼管（JIS STKM11A）を長さ 300 mm に切断して使用した．表面は入荷時の防錆油がついたままとした．

図3に製作した金型を示す．上下型と管端部を塞ぐふたの4部品で構成されている．金型材料には S45C 調質材を用い，上型内面にはラップ処理を施した．上型部分のみを角形に成形できるようにしており，ここを評価部とした．図中にキャビティ形状も示した．管端部から 50 mm より内側の部分を膨出させる．中央断面(C-C')の位置に潤滑剤供給用の穴を，B-B'断面の位置に潤滑剤の逃げ穴を配置した．

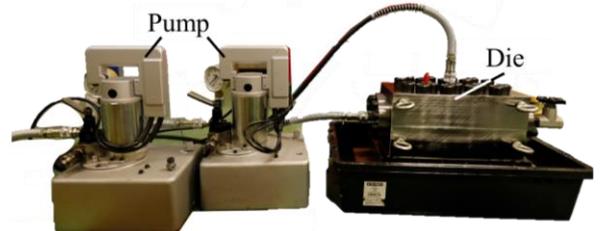


図2 実験装置

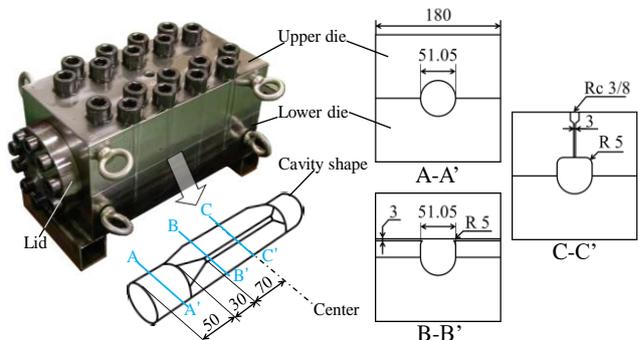


図3 金型形状

### 3・2 実験手順

以下の手順で強制潤滑の実験を行った．

①金型に鋼管をセットして，鋼管を圧力媒体で満たす．

②潤滑剤供給用のポンプを作動させ、最高圧力設定（70 MPa）にする。

③続いて、内圧発生用のポンプを作動させて約 60 s の時間をかけて手動で内圧を 70 MPa まで上昇させる。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 強制潤滑効果の実証

図 4 に内圧および潤滑剤圧力の時間履歴を示す。潤滑剤圧力は約 20 s の時刻で急激に立ち上がっている。これは、鋼管が内圧により降伏して膨出をはじめ、潤滑剤供給口を塞いだためと考えられる。また、20 s から試験終了までの間については、潤滑剤圧力は内圧にほぼ連動して推移することが見て取れる。

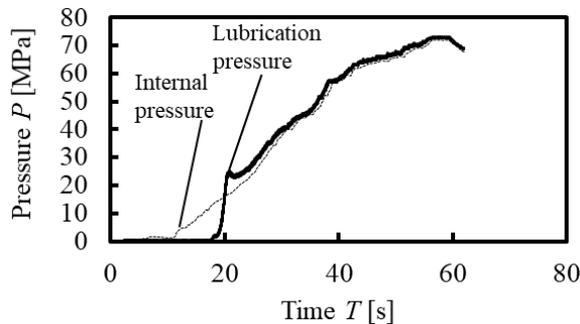


図 4 強制潤滑ハイドロフォーミングにおける内圧・潤滑圧履歴

図 5 に内圧のみで成形した場合（従来法, Conventional）と強制潤滑を行って成形した場合（開発法, Proposed）の外観写真を示す。従来法では稜線部近傍で割れが発生しているが、開発法では割れが生じなかった。なお、従来法は内圧 65 MPa で割れが発生して瞬間的に減圧した後 70 MPa まで到達した。また、従来法、開発法とも成形により鋼管の全長が約 3 mm 短くなった。

図 6 に鋼管中央の断面写真を示す。また図 7 に肉厚測定結果を示す。肉厚はポイントマイクロメータを用い 1 mm 間隔で測定した。従来法は中央部（図 7 の  $C=50$  mm 付近）において初期肉厚から変化が少なくコーナー部近傍（図 7 の  $C=65$  mm 付近）で減肉して割れが発生している。すなわち摩擦により材料流動が妨げられている様子が見取れる。一方、開発法は従来法にくらべて平面部中央部において減肉が進行しているが、それ以外の部位では減肉が抑制されており肉厚が均一化している。すなわち、強制潤滑による肉厚の均一化効果が確認された。

つぎに強制潤滑の長手方向への効果を確認するために、図 5 に示した Center の位置に加えて Sec. 1 および Sec. 2 の肉厚分布も調べた。その結果を図 8 に示す。当初潤滑剤供給口に近い部分のみしか効果が得られないと考えていたが、65 mm 離れた Sec. 2 においても、開発法は従来法より肉厚が均一化しており広い範囲での効果が認められた。

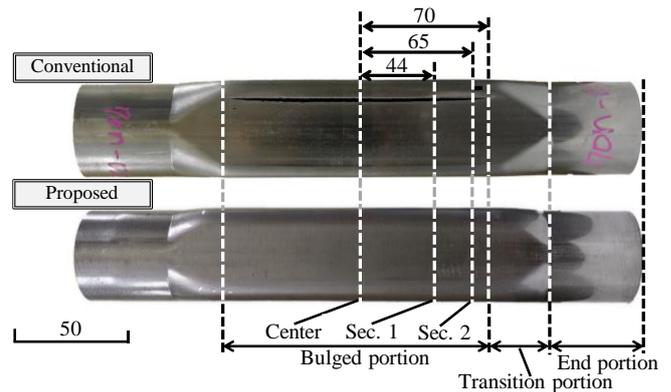


図 5 成形後の鋼管の外観

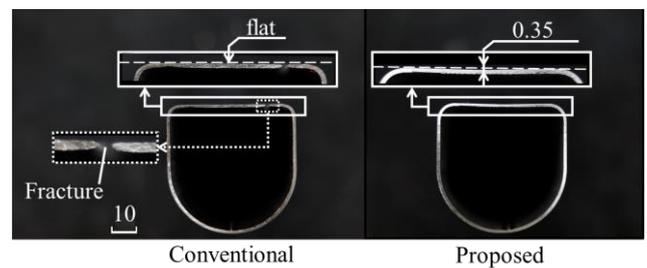


図 6 成形後の中央断面

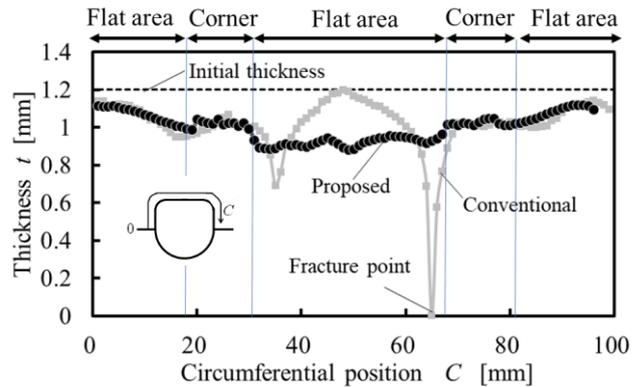


図 7 中央断面における肉厚分布

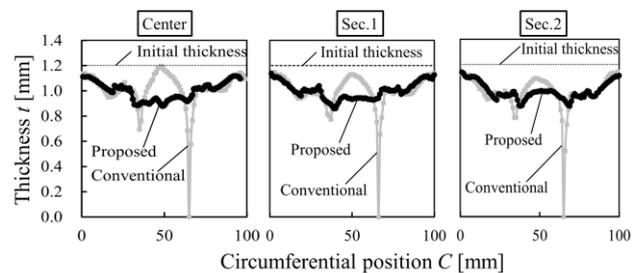


図 8 各断面における肉厚分布

##### 4.2 途中止め試験による変形過程の評価

ここでは途中止め試験を行うことにより変形過程の詳細を明らかにする。本実験では昇圧を 5 から 10 MPa 刻みで途中停止させて中央部を切断し、肉厚分布を計測した。また圧力毎に金型と鋼管の接触位置を調べた。図 9 に従来

法の肉厚測定結果を示す。図中の Contact area は金型上面部と鋼管の接触域を示している。圧力を上昇させると金型と鋼管の接触域が広がり、その接触域の端部では肉厚が急激に減少していることが見て取れる。特に 50 MPa 以上の加圧において肉厚減少が加速する様子が見て取れる。一方で、接触域内の端部を除く大部分の領域では圧力を上昇させても肉厚の変化が生じていない。これは金型と接触した材料が流動できなくなることを意味している。

図 10 に開発法の肉厚測定結果を示す。図中の金型上面部と鋼管の接触域 (Contact area) では、従来法に比べて肉厚が均一に減少していくことが確認できる。強制潤滑により中央部の材料が流動可能となり周方向に均一な引張応力が付加されていることが示唆される。また、内圧 25 MPa においても中央部において肉厚減少が生じていることから成形初期から潤滑効果が得られていることが確認できる。加工圧力 70 MPa では従来法と比較して約 0.15 mm 肉厚が厚くなっており局部的な減肉を抑制可能であることが確かめられた。

図 11 には内圧とコーナー部半径の関係を示す。開発法と従来法では成形されるコーナー部半径に差はない。したがって強制潤滑の有無に応じて最大内圧を変更する必要はないと言える。

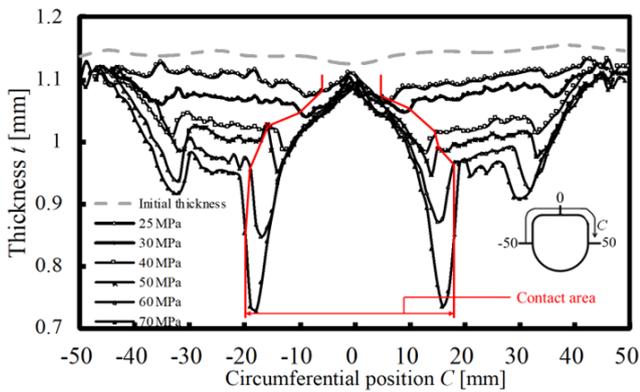


図 9 中央断面における従来法の肉厚分布測

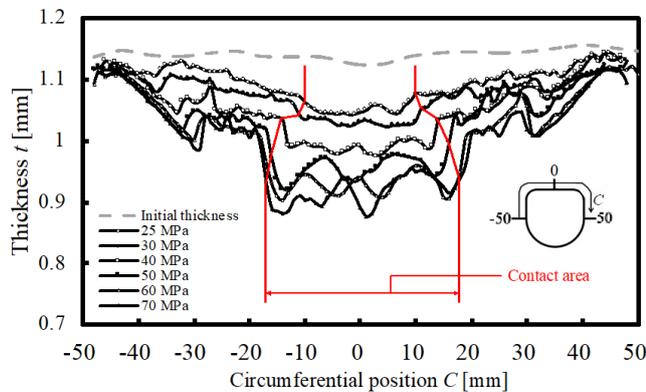


図 10 中央断面における開発法(強制潤滑)の肉厚分布測

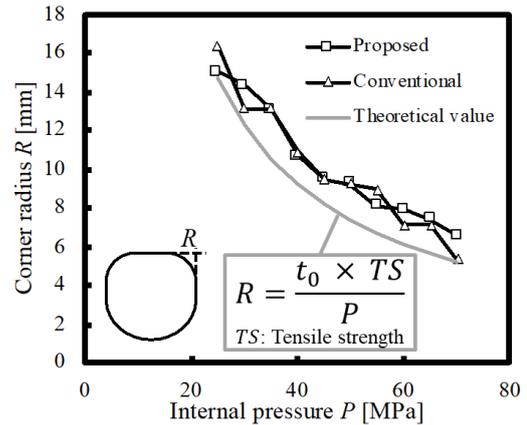


図 11 従来法と開発法におけるコーナー部半径の比較

## 5. FEM 解析を用いた変形挙動の考察

### 5.1 解析方法

詳細な変形挙動を考察するために静的陰解法弾塑性有限要素法 (FEM) を用いて解析を行った。ソルバーには MSC Marc 2021 を用いた。図 12 にモデル形状を示す。本モデルは対称性を考慮して 1/2 モデルとした。鋼管の初期寸法は外径  $\phi$  50.8 mm, 初期肉厚  $t=1.15$  mm とした。初期肉厚は公称値ではなく実測値とした。金型コーナー部半径は 5 mm とし、金型と鋼管の間の初期クリアランスを 0.1 mm とした。要素には四辺形平面ひずみ完全積分ソリッド要素を用いた。要素サイズは板厚方向に 0.0767 mm, 周方向に 0.147 mm とした。要素数は 8100 要素である。

金型は剛体とし、鋼管 (STKM11A) は等方弾塑性体とした。鋼管のヤング率  $E$  は 213 GPa, ポアソン比  $\nu$  は 0.3 とした。また、本解析で用いた流動応力曲線を図 13 に示す。塑性ひずみが約 0.3 までは JIS 12B 号弧状引張り試験片 (G. L. = 50 mm) による管軸方向の引張り試験から取得した曲線を、塑性ひずみが約 0.3 以上は Swift の式 (式(1)) を用いて外挿した曲線を用いた。

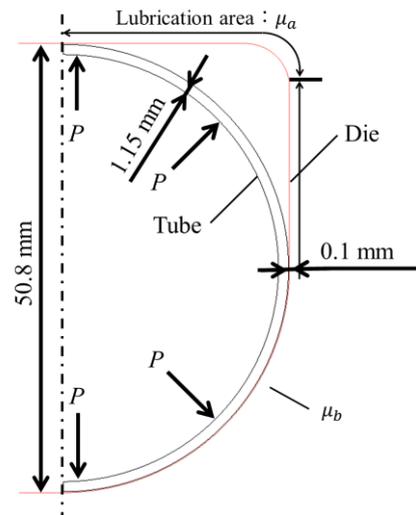


図 12 解析モデルの形状

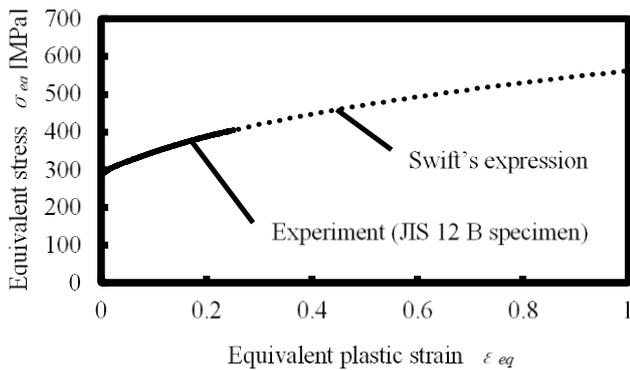


図 1.3 FEM 解析に用いた流動応力曲線

$$\sigma_{eq} = 545 (0.11 + \epsilon_{eq})^{0.29} \quad (1)$$

境界条件として、鋼管の内面に対して面圧  $P$  を 0 MPa から 30 MPa まで比例的に付加した。成形の中間段階である 30 MPa 時の状態を評価する。対称面においては節点変位を  $x$  方向に固定し、 $y$  方向には自由とした。金型と鋼管の間の摩擦係数は強制潤滑面（金型上面部）の摩擦係数を  $\mu_a$ 、それ以外の面の摩擦係数を  $\mu_b$  と定義した。

### 5.2 摩擦係数が肉厚分布におよぼす影響

ここでは開発法の摩擦低減効果を検証するために実験結果と FEM 解析結果を比較する。図 1.4 に従来法の内圧 30 MPa における肉厚分布と種々の摩擦係数を用いた FEM 解析結果を示す。どの摩擦係数を用いた場合においても実験結果と FEM 解析結果には差が生じた。この原因は FEM 解析において平面ひずみ要素を用いており軸方向のひずみを考慮していないことが一因と考えられる。そこで、摩擦力の影響が大きいと考えられる鋼管と金型の接触部（図中の Contact area）の肉厚の周方向の勾配に着目する。そうすると、摩擦係数  $\mu_a = \mu_b = 0.04$  を用いて解析を行った場合に実験における周方向の肉厚勾配を再現できていることが分かる。したがって、従来法の加工圧力 30 MPa における摩擦係数は約 0.04 であると推定した。

つぎに開発法を想定した FEM 解析を行った。即ち  $\mu_b$  を上記解析で同定した 0.04 に固定した上で  $\mu_a$  を種々変更して解析を行った。図 1.5 に実験結果と FEM 解析結果を比較する。実験において潤滑面（金型上部）では肉厚が周方向に均一になっていることが分かる。一方、FEM 解析においては  $\mu_a$  を 0 に近い  $\mu_a = 0.001$  にした場合に潤滑面の肉厚が均一になり実験の傾向が再現できた。したがって強制潤滑を実施した場合に潤滑剤供給口直下の位置では摩擦係数はほぼ 0 であると推定される。

材料の流動状態を比較するために上記で同定した摩擦係数を用いて従来法と開発法の FEM 解析を行った。図 1.6 に材料の周方向変位を示す。即ち  $dx$  は節点の  $x$  方向（潤滑面に沿う方向）変位である。金型中央部は対称面であるため材料の流動は生じていない。一方で中央から少し離れ

た位置では、従来法 ( $\mu_a = \mu_b = 0.04$ ) に対して開発法 ( $\mu_a = 0.001, \mu_b = 0.04$ ) の材料の変位が大きく材料がよく流動していることが見て取れる。したがって、強制潤滑による摩擦の低減により材料の流動性が向上し肉厚の均一化を図ることができたと言える。

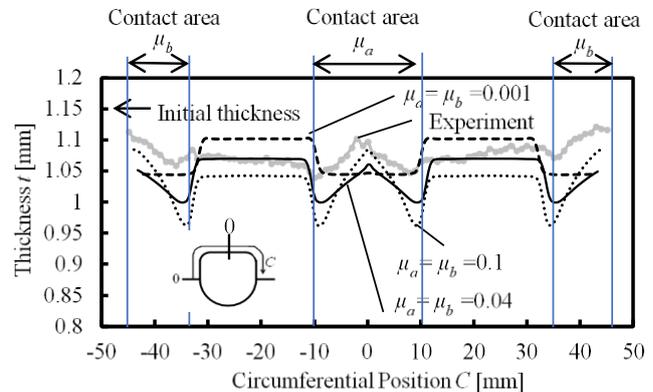


図 1.4 従来法の内圧 30 MPa における肉厚分布の実験結果と FEM 解析結果の比較

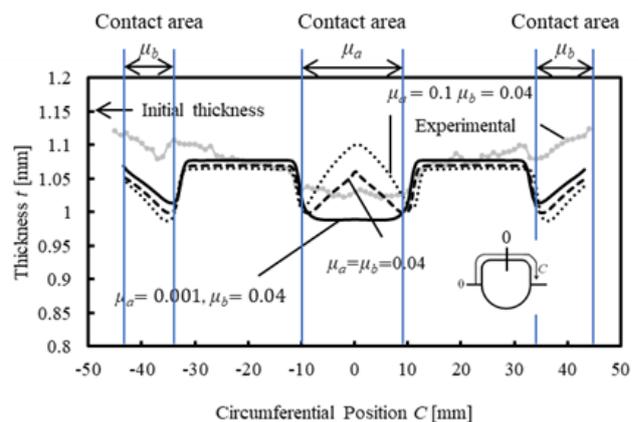


図 1.5 開発法の内圧 30 MPa における肉厚分布の実験結果と FEM 解析結果の比較

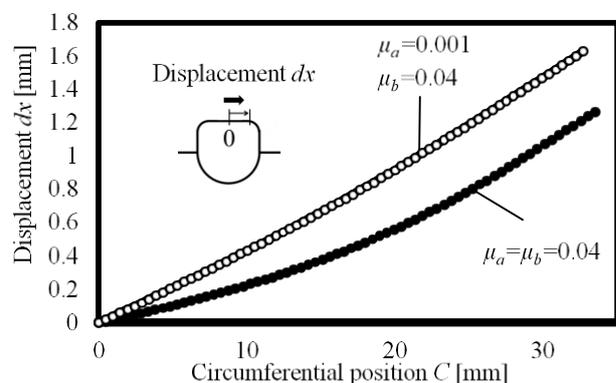


図 1.6 金型上面の材料の  $x$  方向変位の比較

### 5・3 潤滑範囲が広いことに関する考察

図8に示したように1点の潤滑剤供給口によって広範囲で潤滑効果が得られた。ここではその理由を考察する。

図17に開発法を想定した内圧30 MPaにおける金型接触面圧の結果を示す。摩擦係数には $\mu_a=0.001$ ,  $\mu_b=0.04$ を用い、結果は各節点の接触面圧をベクトル表示してベクトル部分に灰色のハッチングを施して表示した。その結果、接触部の端部において局所的に高い面圧(約50 MPa)が生じており、さらにその高面圧部の近傍において低面圧部が形成されていることが明らかになった。この特徴的な面圧分布は図18に示すようにコーナー部で一旦曲げ成形された部分が順次平面部に押し付けられて曲げ戻されることにより発生していると考えられる。

当初、図19(a)に示すように潤滑剤は最短経路を通り排出される可能性があると考えていた。しかし以上のFEM解析結果から接触領域の端部において高面圧部が形成され、これにより潤滑剤がシールされて図19(b)に示すように平面部の長手方向に潤滑剤が誘導されて広い範囲で潤滑効果が得られたと考えられる。

本考察を支持するもう一つの結果が図6の上部の平面部の形状である。開発法においては潤滑部直下の平面部が0.35 mm凹んでいた。これは、接触部端部において潤滑剤がシールされて軸方向に誘導されたことを示す形跡であると考えられる。

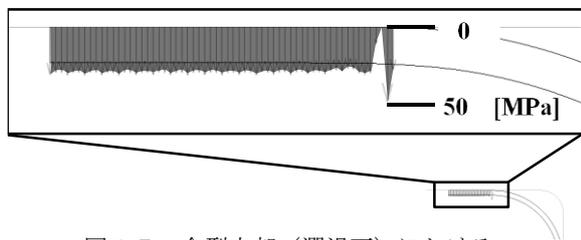


図17 金型上部(潤滑面)における接触面圧のFEM解析結果

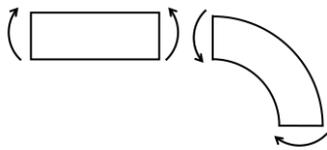


図18 コーナー部近傍の変形の模式図

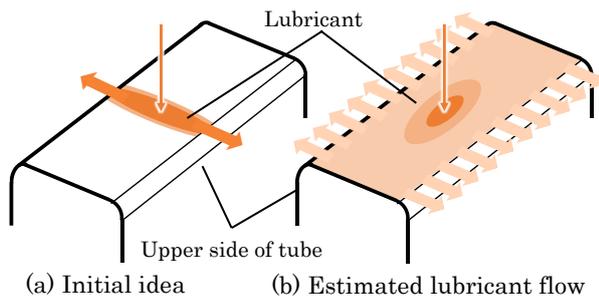


図19 潤滑剤の流れの模式図

長尺の部品を成形する場合には潤滑剤供給口を長手方向に複数配置することが想定される。本考察は、そのような場合における潤滑口配置を設計するために有用である。

### 6. 結言

チューブハイドロフォーミングにおける強制潤滑実験とFEM解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 金型平面部の中央部の供給口から金型と鋼管の間に高圧の潤滑剤を注入することにより肉厚の均一化と割れ発生の防止が可能である。
- 2) 潤滑剤供給口から長手方向に65 mm離れた位置においても潤滑効果が得られた。
- 3) 従来法の内圧30 MPaにおける摩擦係数は0.04であることが推定された。また、強制潤滑を行った場合の潤滑剤供給口付近での摩擦係数は0に近いことが推定された。
- 4) 鋼管と金型の接触部の端部では接触面圧が局所的に高くなっており、これにより潤滑剤がシールされて長手方向に誘導されて広い範囲で潤滑効果が得られたと考えられる。

### 謝 辞

電気通信大学 久保木孝教授、梶川翔平准教授には装置製作についてご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) Manabe K. & Amino M.: J. Mater. Proc. Technol., 123(2002), 35-39.
- 2) 白寄: 特許第4392504.
- 3) 富澤 他: 塑性と加工, 56-648. (2015), 40-46.
- 4) 菱田 他: 特開2001-150049.
- 5) 富澤 他: 塑性と加工, 53-614. (2012), 236-240.
- 6) 窪田 他: 特願2021-143672.