

# 熱間押出鋼管内面しわ模様発生のカEシミュレーション

吉田忠継 \*1・濱野利幸 \*2・尾崎勝彦 \*2

CAE Analysis of Occurrence of Inner Surface Wrinkles on Hot Tube Extrusion

Tadatsugu Yoshida, Toshiyuki Hamano and Katsuhiko Osaki

Synopsis: CAE analysis combined with plasticine simulation called S.H.P.S.S. has been developed to study steel deformation processes. In this work, S.H.P.S.S. is applied to tube extrusion processes in view of occurrence of wrinkles on the extruded tube surface. Knowledge obtained is as follows:

- 1) Behavior of extrusion load and metal flow obtained from numerical analysis correspond to that from plasticine simulation.
- 2) Occurrence of inner surface wrinkles can be simulated by plasticine experiments where Vaseline is used as lubricant.
- 3) Strain concentration point corresponds to wrinkle occurrence point.
- 4) Wrinkles on the inner surface can be reduced by high speed extrusion.
- 5) Direct observations of inner surface on the deformed tube show that the lubricant flow gives great influence on occurrence of wrinkles on the inner surface.

Key words: CAE(computer aided engineering); axially symmetric; process simulation; rigid plastic finite element method; plasticine; plasticine simulation; metal flow; Ugin-Sejournet extrusion process; lubricant.

## 1. 緒言

近年の国際化、グローバル化に伴う低コスト製造要求が一段と厳しさを増しつつあるなか、1997年末のCOP3の決議に見られるように地球環境保全対応の一環として、我国の製造業に対してCO<sub>2</sub>ガスなどの削減に直接効果のある省エネルギー技術の推進が課題とされてきている。我国の進んだ省エネルギー環境下でコストアップを避けながらのそれに対する対応は、技術者にとって新たな挑戦的課題となっている。

継目無鋼管に関しては、例えば発電プラントの高効率化によるエネルギー削減要求などから高温特性や耐環境性に優れる高合金鋼管のニーズが増加するものと考えられる。しかし、一般的に高合金鋼は製造面から見た場合硬くて脆い難加工性材料であり、製造工程が長く複雑な継目無鋼管では、表面欠陥が発生しやすい。高合金鋼管の製造実績が多いユージン・セジュールタイプの熱間押出しでは、各種の表面欠陥の発生が報告されており<sup>1)</sup>、特に鋼管内面に生じることがある微細なしわ模様の発生に関して、製造現場的な知見はあるが<sup>2)</sup>、発生機構に不明な点が多く、その解明が課題になっていた。

当社では塑性加工プロセス研究の一環として剛塑性有限要素法の柔軟性とプラスチックシミュレーションの信頼性を組み合わせた塑性加工CAEシステムS.H.P.S.S. (Sanyo Hybrid Plasticity Simulation System) を拡充中である<sup>3,4)</sup>。本システムを用いると実験だけでは行えない材料のひずみや応力分布を可視化できるだけでなく、解析では取扱いが困難な微細構造の変形解析にも適用できる可能性がある。そこで、これを検証する一環として、標記の課題に対して、モデル実験を行いその場観察を行った。

### 1・1 熱間押出工程

当社は昭和34年にユージン・セジュールタイプの熱間押出プレスを導入して以来、本邦の特殊鋼専門メーカーとしては唯一継目無鋼管の製造を行ってきた。その製造工程をFig.1に示す。

一般に鋼は銅やアルミニウムなどの非鉄金属に比べて変形抵抗が大きい(硬い)ので、1100℃以上の高温に加熱して変形抵抗の減少を図るが、ユージン・セジュールタイプの熱間押出しでは材料と工具間の潤滑剤として熔融ガラスを用いることにより、工具と被加工材との焼付を防止して鋼の押出加工を可能にしたことに特徴がある。潤滑ガラスの供給方法としては外面はガラス粉末を散布した傾斜台を

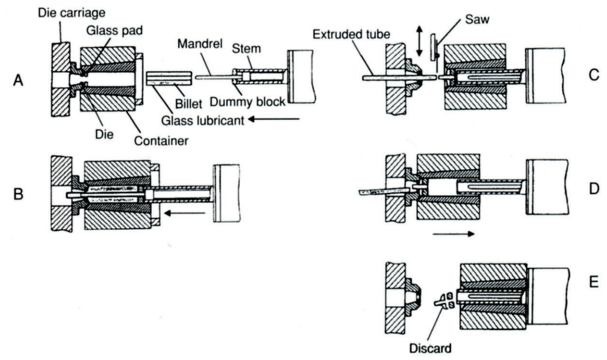
\*1 技術研究所プロセス研究グループ, 工博

\*2 技術研究所プロセス研究グループ

転がす回転法、内面は長尺スプーンによる挿入法で、ダイスとビレットの間の潤滑用にはガラスパッドをダイス前面に装着する方法で行っている。高温に加熱されたビレットに直接接するガラス粉末やガラスパッドが軟化溶融してビレットを覆うため潤滑の効果が得られる。

実際の押し工程は素材ビレットの切断、ビレットの穴あけ加工（ボウリング）、ビレットの予熱および誘導加熱、潤滑ガラスの供給など前処理を行った後、Fig.2に示すように押し出しを行う。即ち、加熱したビレットの穴にマンドレルを貫通挿入し、このマンドレルを支持するステムで押し込むことによりビレットを耐圧性のコンテナに挿入するとともにコンテナ前面のダイスから被加工材を押し出す（Fig.2B）。押し出終了後、コンテナとダイス間に空間をとり、鋸で製品部分と押し止部分を切断する（Fig.2C）。押し止部分を除去し、コンテナを清掃して次の押し出しに備える。

押し出しの特徴は、加工の際にコンテナに閉じ込められることにより被加工材に生じる高い静水圧のため被加工材の割れ発生が抑制されるという点であり、マンネスマン穿孔とエロンゲータの組み合わせによる熱間圧延では製造出来ない高合金鋼管などの製造に適用されている。



Extrusion Load : 2000 ton & 1250 ton  
Product Range : OD 25 to 148mm  
WT 3 to 36mm

Fig.2. Process flow for hot extrusion.

1・2 鋼管内面しわ模様

鋼管内面に製品欠陥として発生することがあるしわ模様は、ビレットの内面凹凸や潤滑ガラス量の過多が発生原因とされている<sup>2)</sup>。しかし、これらの知見は主に操業や実機試験などから得られたものであり、実機条件では耐圧性の鋼鉄製コンテナの中でわずか数秒間で加工が終了するために、

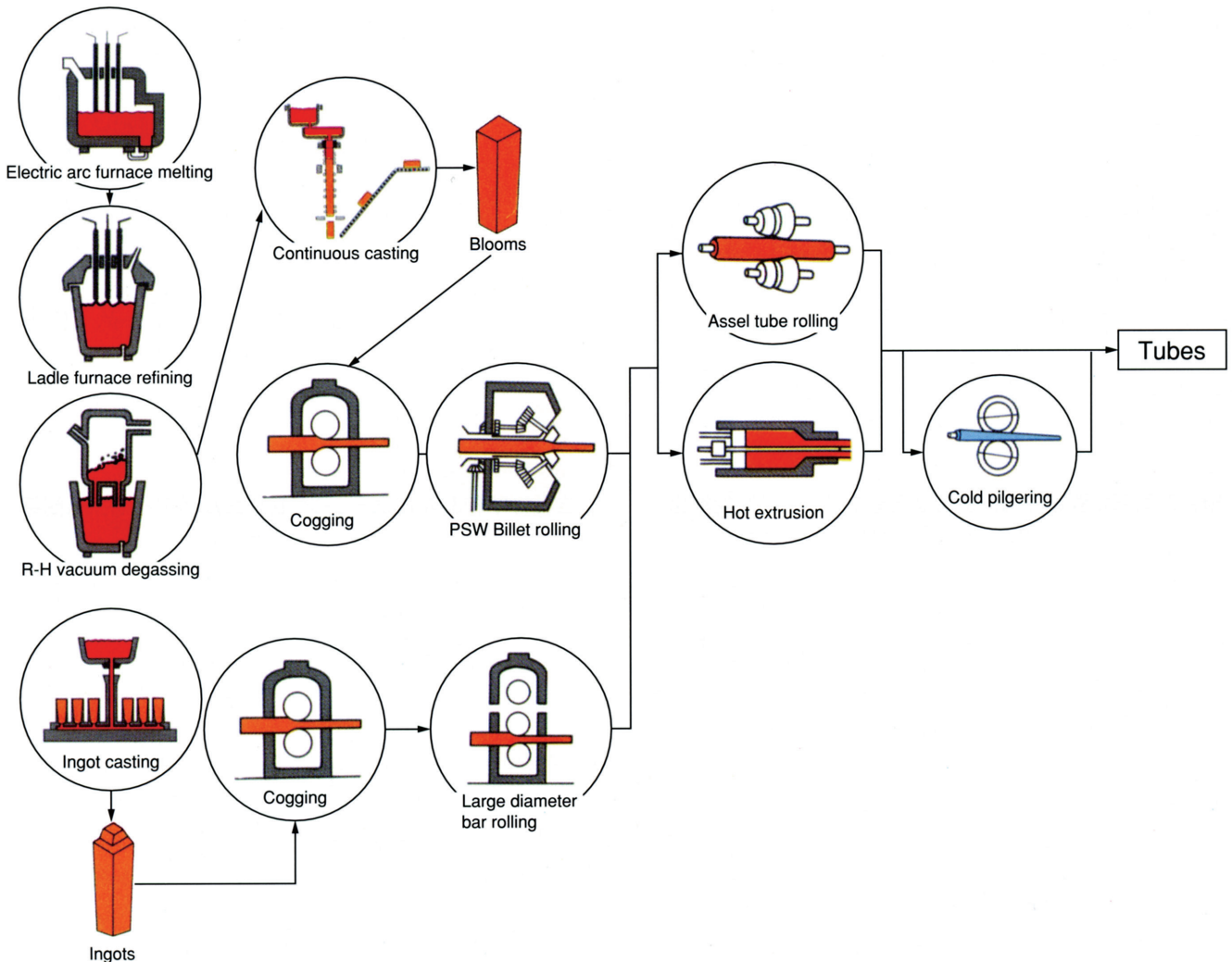


Fig.1. Billet making processes for tubes.

加工中の詳細な観察が不可能であり、しわ模様発生機構にも不明な点が多々あった。特に、潤滑剤として用いるガラス粉末に関して、加工中に軟化溶解が生じること、溶解したガラスが工具とピレットの間で加工圧力を受け流動すること、特にベアリング部（ダイス最小径部）では延伸されるピレットと変形しない工具間で短時間に大せん断ひずみおよび超高压を受けるなど複雑な変形履歴を受けるため、加工中の潤滑剤の流動特性についてはほとんど調査がなされていないようである。

そこで、著者らの一人が潤滑剤の流動特性の把握および内面しわ模様発生機構の解明を目的として管内面のメタルフローのその場観察方法を発案し、これに基づき塑性加工CAEシステムを利用して以下の検討を実施した。

## 2. 試験方法

### 2.1 CAE解析

押出工程の解析に関しては加工1回当たりの変形量が極めて大きいため、すべり線場法や上界法などの古典解析手法の適用が主であり、押出荷重などの巨視的な知見は得られるものの、変形域での応力、ひずみの分布などの欠陥発生に直接関係する詳細な知見が不足していた。しかし、近年、有限要素法による解析が試みられメタルフローが実験結果と良く合うことが注目されている<sup>5)</sup>。そこで、本報では、CAE解析手法として圧縮特性法に基づく剛塑性有限要素法<sup>6)</sup> RIPLS-FORGEの適用を試みた。

Table 1に解析方法、Fig.3に有限要素分割の一例を示す。自動リメッシュ機能を用いることにより、ダイス近傍でのひずみ集中による要素の潰れと、これに起因する計算停止の回避を図った。ピレットの先端がダイスを通る際に押出荷重が変動する部分を非定常部、押し出しが進行した後の荷重変化が少なくなる部分を定常部として、主に定常部に達するまでの解析を実施した。

Table 2に解析条件を示す。今回の解析では、単位面積当たりの要素数を多くするためにピレット長さを定常部が得られる最小値とし、先端部がダイスを通して定常部となるまでを解析対象とした。

なお、結果の表示に際しては、式(1)を適用して押出荷重を無次元化した。

$$\left. \begin{aligned} L^* &= L / L_0 \\ L_0 &= \sigma_0 \cdot S \\ S &= 0.25\pi(D_o^2 - D_i^2) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $L^*$ は無次元化押出荷重、 $L$ は押出荷重、 $L_0$ は摩擦が無視できる平行工具を用いてピレットと同じ断面の円筒を押し出し初期のひずみ速度で据え込んだ時の荷重である。 $\sigma_0$ はその時の変形抵抗、 $\pi$ は円周率、 $D_o$ はピレットの

外直径、 $D_i$ はピレットの内径であり、 $S$ はピレットの横断面積である。

また、式(2)で無次元化ストローク率 $C^*$ を定義した。

$$C^* = C / D_o \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $C$ はラムのストロークである。

Table 1. Method of numerical analysis.

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Soft ware                 | RIPLS-FORGE   |
| Method                    | Rigid-plastic finite element method<br>for slightly compressible material <sup>6)</sup> |
| Element type              | Axially symmetric 4-node isoparametric square element                                   |
| Initial number of element | 678   |

Table 2. Calculating conditions.

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Dimensions of analysis model (mm) | Outer diameter × Inner diameter × Length: 95 × (20,32,36) × 17   |
| Dimensions of tools (mm)          | Diameter of container: 100<br>(Inner diameter of die, Diameter of mandrel)<br>Standard: (40,20)<br>Comparison: (27,20), (40,36), (40,32) |
| Extrusion ratio                   | standard: 8<br>comparison: 15,29   |
| Equation of flow stress           | $\sigma / \text{MPa} = 91.92 \times \dot{\epsilon}^{0.1}$ (hot steel)  |
| Coefficient of Coulomb friction   | $\mu = 0.02, 0.1, 0.2$   |
| Number of step                    | Full stroke is divided into 100 steps  |

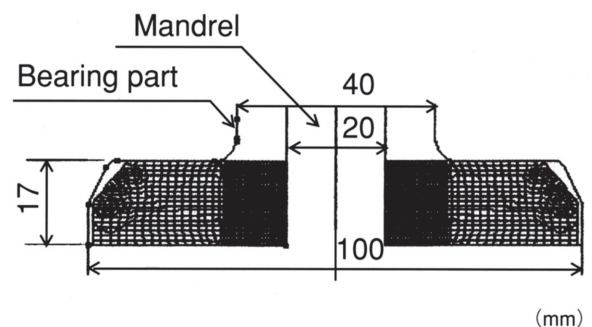


Fig.3. Element partition for analysis.

### 2.2 プラスティシン試験

熱間の鋼の変形抵抗は主に温度およびひずみ速度に依存し、ひずみの依存性が少ないことが知られている。そこで、熱間の加工をシミュレートするためには、加工硬化が少ない材料が適しており、塑性加工の分野では柔らかくて加工

が比較的容易なプラスティシンという油粘土の適用実績が多い。その特徴は、変形挙動が熱間の鋼に近い、メタルフローの観察が比較的容易、工具と材料間の摩擦係数を種々変更可能、変形荷重が小さいので設備費が安価、などである。

Table 3に試験条件を示す。加工中に割れが発生しないように十分脱気・混練したプラスティシンを鍛伸により矩形断面に成形した後、押抜き機で円柱ピレットに仕上げた。これを所定の長さで切断後、木工用ドリルによりマンドレル穴を穿孔し素材ピレットとした。メタルフローを測定する際には白と灰色の材料を5mm間隔で交互に積層したブロックからピレットを切り出して使用した。また、潤滑剤としてピレットの内外面にワセリンを塗布し、マンドレルを穴に貫通させた状態でコンテナに挿入し押出しを行った。押出速度は油量を調整することで予め設定し、加工の際の油圧を測定することにより押出荷重を求めた。メタルフローは積層材を押出した後、中心軸を含む面（L断面）で切断して縞模様の変化から調査した。一方、押出材または押し止材の内面肌については、L断面で切断した後、内面の観察を行うとともに、しわ模様の発生している部分については中心軸方向に光学式の3次元座標測定機で凹凸量を計測した。

Table 3. Experimental conditions of plasticine simulation.

|   |   |
|---|---|
| Billet making process                     | Degassing-Mixture-Forging<br>(111mm square in cross-section)-<br>Cutting(φ95mm)-Piercing                              |
| Piercing tool for inserting mandrel       | Drill for woodwork  |
| Billeting process for metal flow          | Laminating white plate and gray plate<br>of 5mm in thickness  |
| Lubricant                                 | Vaseline  |
| Material of tools                         | S45C  |
| Testing equipment                         | Extrusion machine for plasticine<br>(Maximum extrusion force: 19.6kN)   |
| Measurement of extrusion force            | Calculating based on oil pressure   |
| Adjustment of ram velocity                | Oil valve   |
| Measurement of roughness of inner surface | Micro scope with 3-dimensional coordinate.<br>Focusing on the top of convex part<br>and on the bottom of concave part |

Table 4に試験条件を示す。ピレットは外径95mm、内径21mm、長さを17mmと100mmの二水準とし、前者をCAE解析結果との比較、後者を内面肌の観察に用いた。押出比は8となるように各工具の寸法を設定し、押出速度（ラム速度）を2水準変化させ、内面肌に及ぼす影響を調査した。なお、マンドレルの挿入時に穴内面に塗布した潤滑剤の一部がマンドレル先端部から穴の外部に押出されるので、予め余分な量の潤滑剤を塗布し、ピレットとマンドレル間のクリアランス0.5mmに潤滑剤をほぼ充填させることにした。

Table 4. Experimental conditions of plasticine simulation.  
(Metal flow investigation and inner surface observation)

|  |  |
|--|--|
| Dimensions of billet (mm)                            | Outer diameter × Inner diameter ×<br>Length: 95 × 21 × (17,100)                            |
| Dimensions of tools (mm)                             | Inner diameter of container: 100<br>(Inner diameter of die, Diameter of mandrel) : (40,20) |
| Extrusion ratio                                      | 8  |
| Effective quantity of lubricant (g/mm <sup>2</sup> ) | 0.8 × 10 <sup>+</sup>  |
| Ram velocity (mm/s)                                  | standard: 0.5, comparison: 13.8  |

### 2・3 管内面のメタルフローその場観察試験

プラスティシンシミュレーションにおいて、押出し時のピレット内面の様子をその場観察するために、Table 5の方法およびFig.4に示す装置で試験を実施した。即ち、鋼製のコンテナと透明アクリル製マンドレルを作製し、マンドレル先端より工業用ファイバースコープのプロープを挿入してダイス最小径部（ベアリング部）付近のピレット内面を観察するとともに、ファイバースコープの他端に設置したビデオカメラで画像を記録した。ビデオ編集機能を用いることにより記録した映像の任意のコマにアクセスできるので、目視観察が困難な押出速度が大きい場合でも精度の高い情報が得られる。また、押出し時の潤滑剤の流れを見やすくするために、潤滑剤を赤色の塗料で着色した。

Table 5. Conditions of direct observation of metal flow on inner surface of deforming tube (Other conditions are the same as those in Table 3).

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Equipment for observation | Fiber scope for industrial use with halogen lamp<br>and adapter for side view (φ6mm) |
| Recording media           | Video tape (SVHS)  |
| Tool materials            | Container: S45C  |
| Mandrel                   | Acrylic resin tube of 3.5mm in wall thickness  |

Table 6に試験条件を示す。潤滑剤の塗布量を二水準変化させたこと以外はTable 4の条件と同じである。

Table 6. Experimental conditions of plasticine simulation.  
(Direct observation of inner surface)

|  |  |
|--|--|
| Dimension of billet (mm)                             | Outer diameter × Inner diameter<br>× Length: 95 × 21 × 100                                   |
| Dimension of tools (mm)                              | Inner diameter of container: 100<br>(Inner diameter of die, Diameter of<br>mandrel): (40,20) |
| Extrusion ratio                                      | 8  |
| Effective quantity of lubricant (g/mm <sup>2</sup> ) | 0.8 × 10 <sup>+</sup> , 0.4 × 10 <sup>+</sup>  |
| Ram velocity (mm/s)                                  | 0.5, 13.8  |

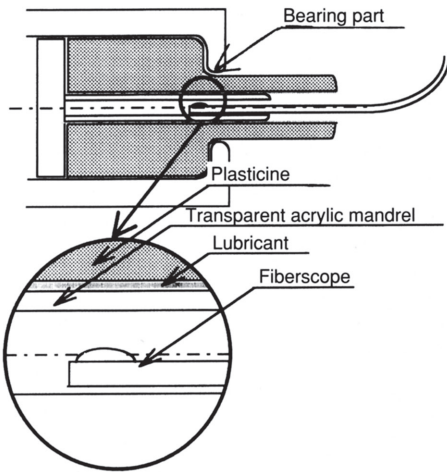


Fig.4. Schematic illustration of extrusion equipment.

### 3. 結果と考察

#### 3・1 CAE解析

Fig.5にCAE解析結果を示す。図中の実線はCAE解析結果である。縦軸に式(1)の無次元化押し出し荷重 $L^*$ 、横軸に式(2)の無次元化ストローク率 $C^*$ をとり、押し出比をパラメータとした。押し出し荷重は押し出比が大なる程高く、何れの押し出比の場合でも押し出し初期に荷重が急激に増加した後、一定の荷重に収束している。前者は非常部、後者は定常部であると考えられることにより荷重変化が理解できる。

Fig.5の破線は押し出比が8の場合のプラスティシン試験結果であり、非常部と定常部の境界で荷重が最大値をとることが分かる。これは押し出し開始時にダイスおよびマンドレルとピレットの隙間から潤滑剤が押し出され、先端部の潤滑剤の膜厚が薄くなるために局部的に摩擦係数が高くなるためと考えられる。CAE解析結果ではこのような先端部の潤滑不良を考慮していないので荷重のピークは見られない。

先端部の特異な挙動を無視すればCAE解析結果と試験結果は良く一致するので、本解析手法が荷重の予測に有効であることが分かる。

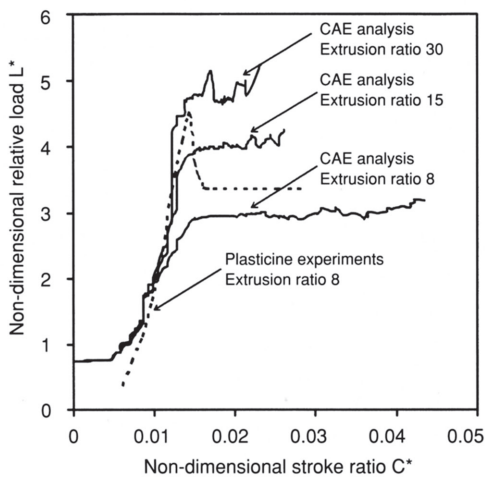


Fig.5. Effect of stroke and extrusion ratios on load of extrusion.

Fig.6は縦軸に定常部における式(1)の無次元化押し出し荷重 $L^*$ 、横軸に押し出比をとり、実線でCAE解析結果、破線で古典荷重式<sup>7)</sup>による計算結果を示す。古典荷重式は変形抵抗をパラメータにして、押し出比が15の時の荷重をCAE解析結果に一致させた。何れの結果も単調増加であり、両者は全体として良い一致を示す。この場合、古典式による計算結果とCAE解析結果とが一致するように定めた変形抵抗をTable 2の変形抵抗式に適用して求めたひずみ速度は平均値より大であり、これはCAE解析結果のひずみ速度分布における被加工材のベアリング部近傍の値に相当する。即ち、古典式でも摩擦係数や変形抵抗を適当に合わせ込めば押し出比の影響を検討できることが判明した。

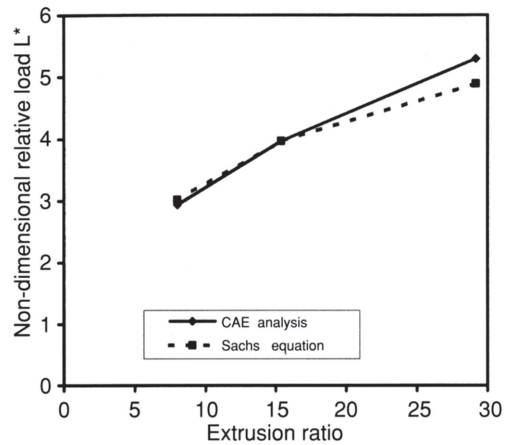


Fig.6. Relationship between load and extrusion ratio (comparison of load obtained from CAE analysis and Sachs equation).

Fig.7は縦軸に式(1)の無次元化押し出し荷重 $L^*$ 、横軸にピレットとコンテナ間のクーロン摩擦係数 $\mu_c$ をとり、ピレットとマンドレル間のクーロン摩擦係数 $\mu_m$ を0.02, 0.2およびピレットとコンテナ間の摩擦係数が等しい場合のCAE解析結果を示す。押し出し荷重は $\mu_c$ の増加とともに単調増加し、また、 $\mu_m$ の増加とともに増加する。また、押し出し荷重の増加に対して $\mu_c$ および $\mu_m$ ともほぼ同程度の影響があることが分かる。

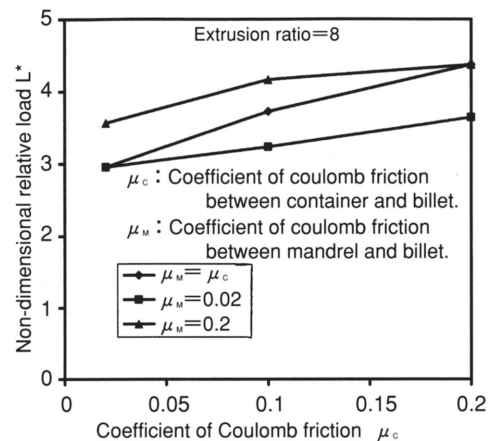
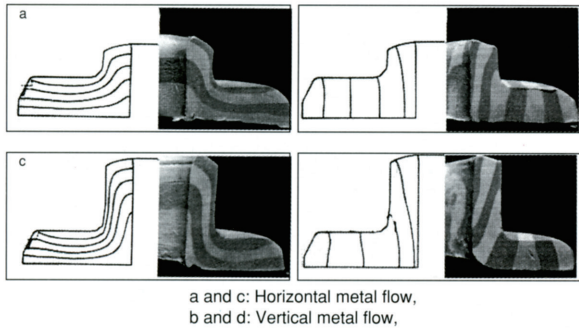


Fig.7. Effect of coefficient of friction at each part on extrusion load.

Fig.8は先端非定常部のL断面メタルフローを示しており、右半分がプラスティン試験結果、左半分がCAE解析結果である。両者は良く一致しており、このことから本解析手法がメタルフローの予測に有効であることが分かる。



a and c: Horizontal metal flow,  
b and d: Vertical metal flow,

Fig.8. Metal flow comparison of plasticine experiments and CAE analyses.

Fig.9は荷重が定常状態に達した際の先端非定常部のメタルフローに及ぼす押出比の影響を調べたものである。a,b,dはピレット外径が100mm、製品内径を20mmと固定した場合に、ピレット外径を変えて押出比を変化させた際の結果である。何れの場合も先端部がベアリング部を既に通過しており、このことから押出初期の非定常状態はピレットの先端部がベアリング部を通過するまで続くものと考えられる。

cとdはピレット外径が100mm、押出比を29と固定した場合に、製品の内外径を変化させた際の先端部のメタルフローを示す。

Fig.10はFig.9と対応した条件で相当塑性ひずみの分布を調べたものである。cとdの比較から押出比は同じであっても製品の肉厚・直径比が大きい程 (Fig.10d)、ひずみの集中部がピレット側へ入り込む傾向が見られる。このことから内面のひずみの集中位置は製品の肉厚・直径比により異なるので内面欠陥発生位置もこの影響を受けると考えられる。

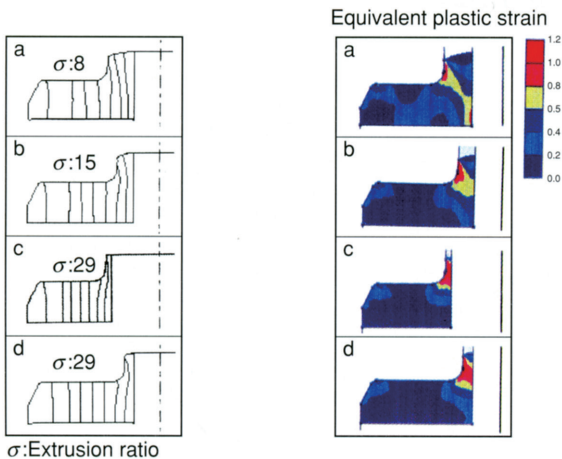


Fig.9. Metal flow at non-stationary rear end at various extrusion ratios.

Fig.10. Distributions of equivalent plastic strain at non-stationary rear end at various extrusion ratios.

Fig.11はダイス、マンドレル、ステムおよびコンテナなど工具に作用する負荷を調べたもので、左側が工具への面圧p、右側が材料と工具間の相対すべり速度vであり、材料との境界に垂直な矢印の長さでその大きさをそれぞれ示す。両者の積がpv値、即ち工具への負荷の尺度として用いられており、この値が大きい程、工具の損耗が大であると考えられる。この例ではベアリング部と近傍のマンドレルにかかるpv値が大 (面圧pと滑り速度vの両者が大) であり、工具負荷の厳しい箇所とFig.10に示すひずみが集中する箇所が一致していることが分かる。

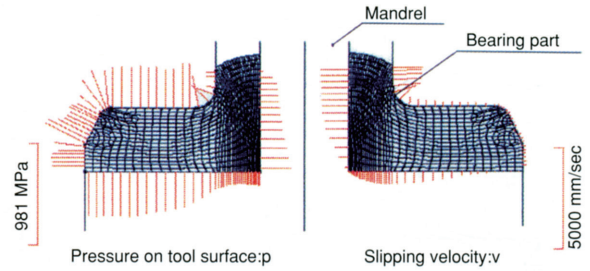
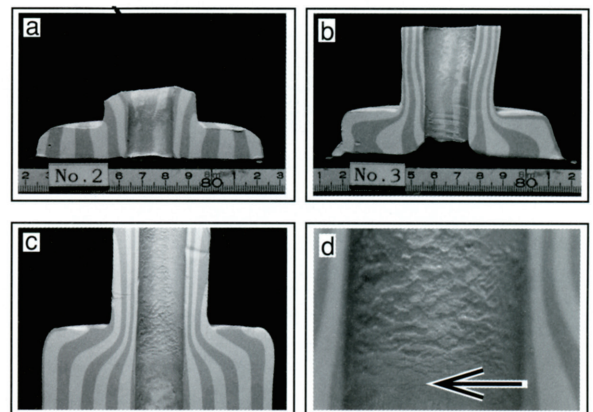


Fig.11. Pressure and slipping velocity on tools.

### 3・2 プラスティン試験

Fig.12は押し止材のL断面のメタルフローを示しており、aは先端非定常部、bは後端非定常部、cは中間部、dは中間部cの内面しわ模様発生位置の拡大図を示す。cよりベアリング部からピレットの方に内面直径程度入った部分を境に製品側で内面しわ模様が発生している。dよりしわ発生部の境界近傍で細い割れが円周状に密に発生しており (Fig.12d矢印部近傍)、ダイス側へ行くに従ってその間隔が急激に拡大していることが分かる。この位置はL断面のしわ模様間隔が密になる部分、即ち、メタルフローが急激に変化する位置に対応しており、内面に近接するしわの幅変化に着目するとこの部分で押出比以上の延伸が生じていることが分かる。



a: Front end of non-stationary state of extruded tube  
b: Rear end of non-stationary state of extruded tube  
c: Middle part of extruded tube  
d: Enlargement of fig. 12c

Fig.12. Metal flow and inner surface conditions of semi extruded billets.

Fig.13はFig.12cの押止材内面の中心軸方向に測定した表面しわ模様の高さ分布であり、図中A,B,C部は図下側写真のしわ模様高さ測定の基準点である。A部の先端非定常部は突起部高さが160 $\mu\text{m}$ 程度で凹凸が少ないが、B部、C部は300 $\mu\text{m}$ 程度の凹凸が観察されることから定常部で凹凸が大となっていることが分かる。即ち、内面しわ模様はベアリング部近傍で内面が大きく延伸された部分から円周状の微細な割れが周期的に密に発生しこれが延伸で引き伸ばされた深さ300 $\mu\text{m}$ 程度の微細凹凸であることが判明した。

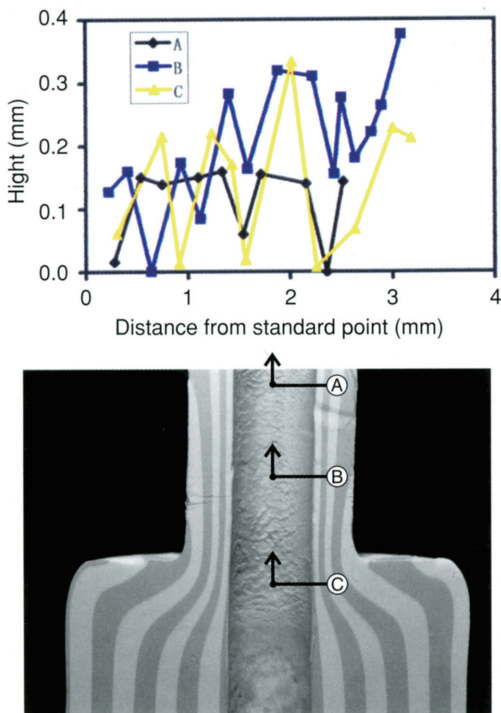


Fig.13. Wrinkles on the inner surface of semi extruded billet.

Fig.14は押出材の内面しわ模様発生に及ぼす押出速度の影響を、ラム速度を0.5mm/sと13.8mm/sの二水準に変化させて調べたものである。図中で赤色の部分は潤滑剤であるワセリンを、黄色色の部分はプラスティシンを示す。押出速度が小の場合は周期的な円周割れが先端部側に片寄って発生しており、割れ部にワセリンが充満している。

一方、押出速度が大の場合は、ほぼ全面にワセリンが付着しており、しわ模様の発生は認められない。この結果から、しわ模様の発生にはビレットに対する潤滑剤の相対流動が重要な役割を果たしており、相対流動が生じやすい場合はしわ模様が発生しやすく、相対流動の自由度が制限される場合には発生が防止または緩和されることが予測される。即ち、潤滑剤に加わるせん断ひずみ速度が大の場合には、見掛けの粘度が上昇してベアリング部のビレット表面に軸方向の圧縮応力が発生し、微小割れの発生を防止する機構が働くものと考えられる。

Table 7は押出荷重に及ぼす押出速度の影響を示してお

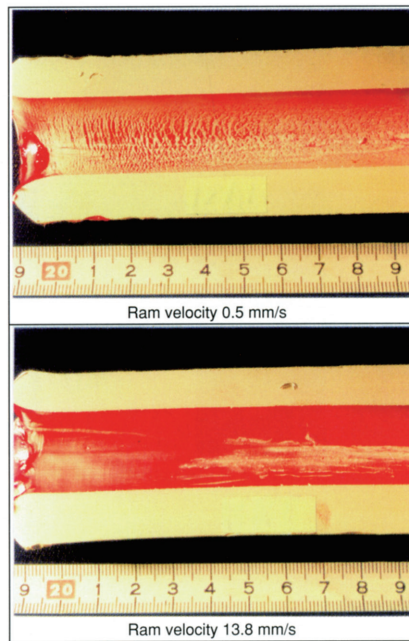


Fig.14. Effect of extrusion velocity on occurrence of inner surface wrinkles.

り、速度が27倍に変化しても荷重はただか4%程度しか増加しない。これに対して熱間の鋼材の変形抵抗はTable 2の式のようにひずみ速度の依存性があり、押出速度が27倍になれば荷重は $27^{0.1}$  (=1.39) 倍程度になると推定される。これはプラスティシンが結晶構造の無い油粘土であるのに対して、鋼材は熱間でオーステナイトの結晶構造を持つため変形の機構が異なることによる。即ち、鋼材はひずみ速度が大であれば転位密度が増加し加工硬化するが、プラスティシンでは転位が無いのでその影響が無いと考えられる。

Table 7. Effect of extrusion velocity on extrusion load.

| Extrusion velocity<br>(mm/s) | Extrusion load<br>(N) |
|------------------------------|-----------------------|
| 0.5                          | 6377                  |
| 13.8                         | 6622                  |

### 3・3 管内面のメタルフローその場観察試験

Fig.15にファイバースコープによるビレット内面観察結果及びCAE解析による相当ひずみ分布を示す。ダイス最小径部から24mm奥側では良好な内面が観察される。16mm奥側では、これを境にビレット側(図のA部)は良好な内面であるが、製品側(図のB部)でしわ模様が発生し、ダイス最小径部(図のC部)でしわ模様の間隔が拡大している状況が観察された。これは、Fig.12の押止材の結果と良く一致している。図の斜線部分、即ちベアリング部近傍について変形抵抗をプラスティシンと同様ほぼ一定としたモデルと、Table 2の式のようにひずみ速度依存性を持つモデルでCAE解析を行った結果、何れの場合にもひずみの集中す

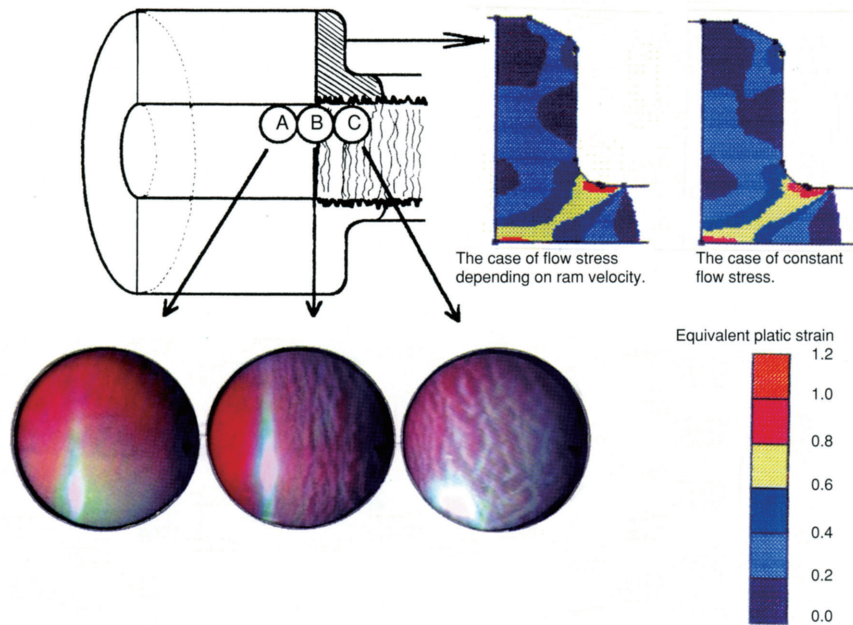


Fig.15. Relationship between occurrence of inner surface wrinkles and strain distribution.

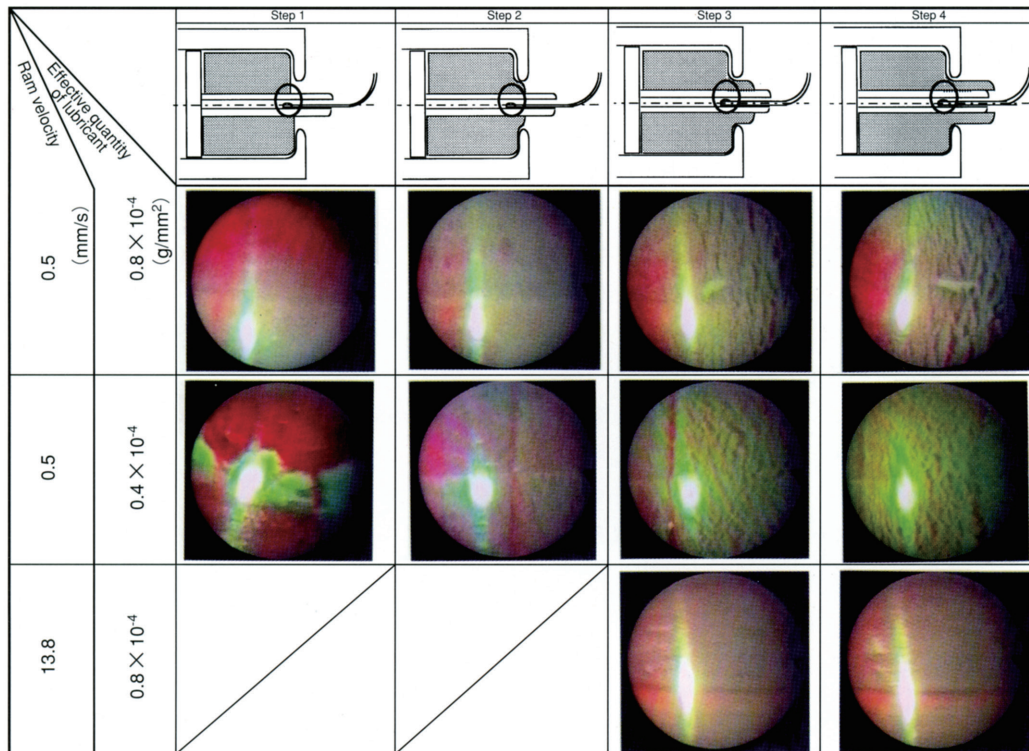


Fig.16. Relationship between occurrence of inner surface wrinkles and quantity of lubricant.



る場所とプラスティシン実験によるしわ模様発生場所が一致した。即ち、しわ模様は自由表面の延伸という不安定変形に伴って生じた割れが発達してできた凹凸であることが分かった。

Fig.16は観察位置をFig.15のB部、即ち割れ発生部に固定して押出開始から定常部までピレットの内面を連続的に観察した結果である。表の1段目はピレットの変形状態(Step 1: 押出前, Step 2: アップセット, Step 3: 押出初期, Step 4: 押出中) 模式図, 2段目は押出速度が0.5mm/sでワセリン塗布量が $0.8 \times 10^{-4} \text{g/mm}^2$ の基準条件, 3段目は基準条件に対してワセリン塗布量が半分の場合, 4段目は基準条件に対して押出速度が27倍の場合の内面の観察結果を示す。Fig.14の結果と同様に、押出速度が小の場合は割れが発生し、大の場合は割れが生じていないことが分かる。その場観察結果から、押出速度が小の場合に潤滑剤がピレットより大きな速度で移動していることが観察され、Fig.14のように潤滑剤がピレットの中心軸方向に不均一に分布することに対応している。また、割れが発生すると破面の隙間に潤滑剤が容易に入り込んでいくこと、割れが拡大しても十分潤滑剤がその溝に供給され溝に充満していることが判明した。

一方、割れが発生する場合でも潤滑剤の塗布量が異なる場合は、Fig.16の2段目と3段目を比較することにより、潤滑剤の量が少ない方が割れ発生が緩和されることが判明した。これは、ベアリング部での潤滑膜厚さが減少すると潤滑剤に加わるせん断ひずみ速度が増加するために見掛けの粘度が増加し、ピレット表面に軸方向の圧縮応力が作用するためと考えられる。

以上の結果から、押出鋼管内面のしわ模様の発生機構は、ピレットがベアリング部近傍で中心軸方向に急激に延伸され、その際ピレット内面に発生した微細な表面き裂が大きく開口するものであると推定される。しわ模様の発生を防止するためには延伸時に表面割れの発生を防止すれば良い。そのためには、延伸時にピレット内面の中心軸方向垂直応力を圧縮にすることが効果的であると考えられる。この観点から、ベアリング部近傍でピレット内面に作用する中心軸方向の表面せん断応力を増加することが圧縮応力の発生に有効である。即ち、ピレットとマンドレル間に介在する軟化・溶融潤滑ガラスの粘度を高めること、潤滑膜厚さを

減少すること、押出速度を増加させることなどがレオロジ一的考察により有効であると推定される。なお、本報のプラスティシンシミュレーション結果もこの推定を支持するものであることが分かる。

#### 4. 結言

CAE解析とプラスティシンシミュレーションを組み合わせることにより解析精度の向上を図った塑性加工CAEシステムS.H.P.S.S.を、鋼管の熱間押出工程の変形解析および内面しわ模様発生機構の検討に適用し、以下の知見を得た。

- (1) 荷重およびメタルフローに関して計算結果と実験結果が良く一致することから、本手法を鋼管の熱間押出工程の検討に適用することの妥当性が示された。
- (2) 潤滑剤としてワセリンを用いたプラスティシンシミュレーションにより、内面しわ模様の発生を再現出来ることが判明した。
- (3) CAE解析により加工ひずみはベアリング部よりやや材料側に入ったところに集中し、プラスティシンシミュレーションによりこの部分で内面しわ模様が発生することが観察された。
- (4) 押出速度を増加することにより内面しわ模様の発生を緩和できることが判明した。
- (5) 加工中の管内面のその場観察から、潤滑剤の流動特性が内面しわの発生に深く関与していることが推定された。

#### 文 献

- 1) 日本塑性加工学会編、「押出し加工 基礎から先端技術まで」、92、コロナ社、164
- 2) 日本鉄鋼協会編：鉄鋼便覧Ⅲ (2)、丸善、(1980)、1024
- 3) 吉田忠継、尾崎勝彦、中崎盛彦、矢野正和、笠原義夫：山陽特殊製鋼技報、3 (1996)、25.
- 4) 吉田忠継、尾崎勝彦、中崎盛彦、矢野正和、濱野利幸、笠原義夫：山陽特殊製鋼技報、4 (1997)、23.
- 5) 文献1)、26
- 6) 森謙一郎、島進、小坂田宏造：日本機械学会論文集A、45 (1979)、965
- 7) Sachs, G. et al.: Mitt. Materials, 16 (1931)、67