

ステンレス鋼管の熱間押し出し加工の変形特性

古堅 宗勝*・松尾 洋*・福安 富彦*・中西 哲也*²・柳本 潤*³

Characteristics of Deformation in Hot Extrusion Process of Stainless Steel Tube

Munekatsu FURUGEN, Hiroshi MATSUO, Tomihiko FUKUYASU, Tetsuya NAKANISHI and Jun YANAGIMOTO

Synopsis : Effect of glass lubrication on metal flow in hot extrusion of stainless tube in an example of Ugine-Sejournet process has been investigated experimentally and theoretically, which has been closely related to the surface defect of products. First, a relationship between viscosity of glass lubricants and friction coefficient is measured with a hot friction test. Friction coefficient is proportional to logarithmic viscosity of glass lubricant. Glass lubrication for hot tube extrusion is found in hydrodynamic condition. Then finite element analyses of metal flow during hot tube extrusion is carried out to simulate metal flows, strains and stresses. Computed extrusion forces and metal flows are in good agreement with experimental measurements. Quantitative flow characteristics such as redundant work and abrupt change of metal flow in bearing portion are evaluated with finite element analyses. It may be possible to optimize an extrusion condition of hot tube extrusion to reduce surface defects such as transversal crack of products.

Key words : extrusion; glass; lubrication; tube; metal flow; simulation; FEM.

1. 緒言

ステンレス鋼や高合金材料等の熱間加工性の悪い材料の継目無鋼管は一般的に熱間押し出し法で製造されている。この加工法の特徴は潤滑剤にガラスを用いることである。熱間押し出し法に関する研究は、J. Sejournet によるガラス潤滑法¹⁾の開発以来比較的多い^{2,3)}。しかしガラス潤滑特性の基礎的調査をもとに押し出しの力学的解析さらに押し出し材の品質との関連について系統的に研究した例は少ない。

本報では、ステンレス鋼管(丸管)の熱間押し出し変形特性を明確にするために、焦点を次の3点「(1)ガラス潤滑剤の潤滑特性を熱間摩擦試験により定量的に把握する。(2)ガラスの潤滑特性をもとに、3次元剛塑性有限要素法により押し出し材内部のメタルフロー、応力、ひずみ速度の分布等を解析し、熱間押し出し加工の変形特性を明らかにする。(3)この解析により、加工性の悪いステンレス鋼や高合金材料で発生しやすい外面疵や溶融割れ等の欠陥の予測とその対策指針を得る。」に絞って実験と解析の両面から総合的に考察する。

2. 熱間押し出し用のガラス潤滑特性

熱間押し出しガラス潤滑の主な作用は、溶融状態のガラスが押し出し工具とピレットとの間に供給されて摩擦を軽減し潤滑性を良好にするとともに、工具とピレット間の断熱材にもなっている。潤滑ガラスの成分は押し出し温度における

粘度および溶融ガラスと押し出し材の酸化スケールとの化学反応を考慮して設計される。

溶融ガラスは複雑な分子間力やイオン間力から生ずる網目構造を有し、粘度はその構造に依存する。網目構造を有するガラスの粘度推算式については飯田らのネットワークパラメーターを用いる半理論式⁴⁾が提案されている。SiO₂、Al₂O₃は粘度上昇に、B₂O₃やNa₂O、K₂Oのアルカリ成分は粘度下降に効果がある。ガラスの成分は酸化物であり押し出し材のスケールの主成分であるFeOと共晶点を持つ。特にB₂O₃はFeOとの共晶点が1073~1273Kと押し出し温度以下になるためスケールの溶融作用が強く、スケールによる疵発生防止に効果がある。ステンレス鋼の押し出し用ガラス潤滑剤としてはアルミナホウケイ酸塩ガラス(SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-CaO)やケイ酸塩ガラス(SiO₂-Na₂O-CaO-MgO)のような成分系が用いられている。

2・1 摩擦係数測定方法

実際の押し出し加工での摩擦係数の測定は極めて困難であるから、ここでは圧延法式の摩擦試験を採用した。Fig. 1に本報で用いたガラス潤滑剤の摩擦係数を測定するための熱間摩擦試験機⁵⁾を示す。本試験機は片側ロール駆動方式で、また移動工具の速度を任意に設定できる構造になっている。

Table 1に実験条件を示す。見かけの摩擦係数 μ は圧延ロール垂直方向荷重 P と移動工具にかかる圧延方向荷重 F をロードセルにて測定し、 $\mu=F/P$ で算出した。荷重 P をロールと圧延材の接触面積で除した平均面圧 p は100~130

平成11年5月27日受付 平成11年8月18日受理 (Received on May 27, 1999; Accepted on Aug. 18, 1999)

* 住友金属工業(株)関西製造所(Kansai Steel Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1 Nishino-cho Higashi-mukojima Amagasaki 660-0856)

* 2 住友金属工業(株)和歌山製鉄所(Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 3 東京大学生産技術研究所(Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)

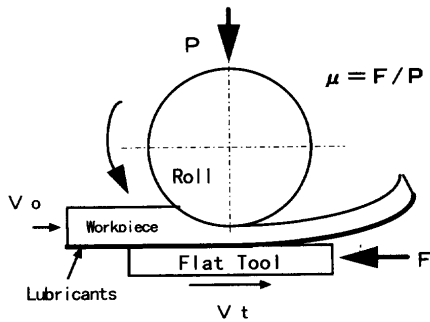


Fig. 1. Schematic view of friction test apparatus at high temperature.

Table 1. Test condition in friction test.

Workpiece material	: SUS304
Workpiece (mm)	: w20×t10×L250
Roll material	: SKD61
Roll (mm)	: φ 150×L100
Tool material	: SKD61
Tool (mm)	: w50×t60×L500
Inlets temperature	: 1273~1473K
Workpiece inlet velocity	: 0.4 m/s
Tool sliding velocity	: 0.05 m/s
Reduction of workpiece	: 10%

Table 2. Chemical composition of glass lubricants.

Mark	(mass %)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO
G1	56	15	6	0.5	0.2	22	0.6
G2	72	2	-	13	1	8	4
G3	33	2	36	16	1	8	4
G4	67	-	33	-	-	-	-
G5	76	-	24	-	-	-	-
G6	81	-	19	-	-	-	-

MPa程度であった。実験に供した圧延材はステンレス鋼 SUS304, 移動工具はSKD61である。両者の表面粗さは $Ra=0.5\ \mu\text{m}$ 程度に研削仕上げした。潤滑剤は Table 2 に示すガラス3種類(G1, G2, G3)および珪酸ソーダ3種類(G4, G5, G6)を用いた。潤滑剤を圧延材の片面に塗布し, その膜厚は潤滑剤が熔融した状態で約 $40\ \mu\text{m}$ となるようにした (約 $200\ \text{g}/\text{m}^2$)。潤滑剤を塗布した被圧延材を電気炉内に装入し, 大気雰囲気中で所定の温度 (本実験では 1473 K) で 15 分間均熱した。圧延材は炉出し後, 潤滑剤塗布面を移動工具側となるようにして圧延した。圧延材の温度は圧延中に約 100 K 低下した。なお, 圧延後のガラス膜厚は $20\ \mu\text{m}$ 程度であった。

2.2 実験結果

Fig. 2 にガラス系潤滑剤の加熱温度と粘度の関係の実験結果を示す。加熱温度の上昇とともに粘度は急激に低下している。高温粘度の測定は白金球引き上げ法により行った。Fig. 3 に圧延材加熱温度が 1473 K のときの摩擦係数を各ガラスの 1373 K のときの高温粘度に対して示した。この実験条件は, 実操業におけるステンレス鋼の熱間押し時の

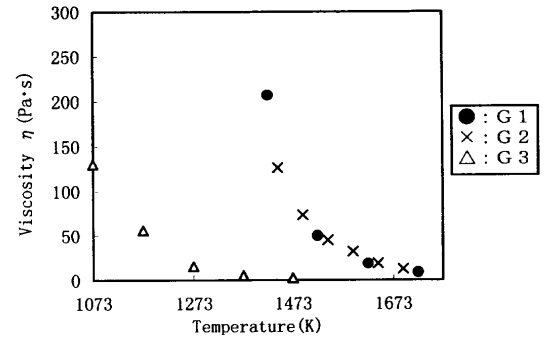


Fig. 2. Relationship between viscosity of glass lubricants at high temperature.

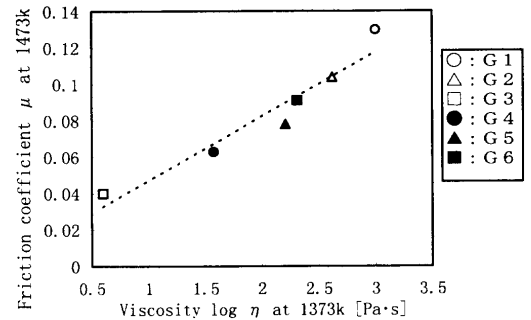


Fig. 3. Relationship between friction coefficient and logarithmic viscosity of glass lubricants.

ピレット加熱温度は 1473 K 程度であること, また押し加工中の潤滑膜の平均温度はピレットの温度より 100 K 低いと想定して設定した。

Fig. 3 の実験結果では潤滑剤の粘度の上昇とともに摩擦係数も上昇しており, これはストライベック線図における流体潤滑領域と同じ挙動を示している。ガラス潤滑には冷間加工用潤滑油で耐焼付性向上のために用いられる極圧添加剤に相当する成分はなく, また意図的に境界潤滑条件 (例えば, ガラス塗布量を減らし潤滑膜厚を薄くしたり, あるいは低粘度の潤滑ガラスを用いた) となる押し出し条件では焼付きが発生する。これらの現象の考察から, 正常な熱間押し出しでのガラス潤滑は流体潤滑状態になっていると推察した。なお, ステンレス鋼の熱間押し出し後の残留ガラス膜厚は $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 程度である。残留膜厚が $10\ \mu\text{m}$ 以下ではダイスの R 部からベアリング部に焼付きを発生することが経験的に知られている。

なお通常ステンレス鋼の熱間押し出しで用いられるガラス G1 や G2 の場合は摩擦係数 μ は 1373 K にて約 $\mu=0.08$ である。したがって実押し出しでも μ は 0.05 から 0.12 程度の範囲にあると推定した。

3. 解析と実機押し出し試験

3.1 解析手法

押し出しの解析には, ラグランジェ乗数法に基づく 3 次元

剛塑性FEM解析プログラムCOPRESS⁶⁾を用いた。COPRESSは塑性加工時の3次元定常・非定常変形解析のために開発された汎用ソフトウェアであり、すでに各種の異形断面材押し出し加工における材料流動特性の解明にも適用されている。本報に示すステンレス鋼管押し出し加工の解析では、素材の周方向流れを拘束することにより解析を行ったが、得られた結果が軸対称条件を完全に満足することを確認している。

解析は、まず材料の流動応力がひずみ、ひずみ速度、温度に依存しない剛完全塑性体であると近似し、さらにその条件下での定常塑性流動特性を対象として実施した。

後述するひずみは、解析の結果求められたメッシュ各位置でのひずみ速度を、流線に沿って積分することにより求めた。なお、相当ひずみ速度を流線に沿って積分し、さらに節点座標を流線に沿って再配置することにより、ひずみ依存形の流動応力を利用した解析を実施することも可能である。しかし、本報にて対象とする1273K以上の鉄鋼材料の流動応力は再結晶・回復等の金属組織変化の影響を受け複雑に変化するため⁷⁾、あえて剛完全塑性体近似を利用し、塑性流動特性のみを解明することを主眼として解析を実施した。これと同じ理由により本報では熱解析を省略したが、ガラス潤滑膜には少なからず断熱効果があることを考えると、塑性流動特性については妥当な近似解が得られているものと判断して、実験結果との比較検討を実施した。

3・2 解析条件

実押し出しでの潤滑は、中空ビレットの外面と内面には押し出し前にガラス粉末を塗布し、ビレット前端面はダイスに装着したガラスパッドにより潤滑している。押し出し中のビレット前端面と接触しているガラスパッドの表層部分は溶融しており、真のビレット前端面形状を特定することは困難である。そのため本報の解析では、ビレット前端面形状を押し出し途中止め材の実測値をもとに決定し、かつその形状をダイス形状と仮定した。Fig. 4に解析で用いたビレットの後端面から前端面(ダイスベアリングの出口)までの1/2縦断面の形状を示す。同図はビレット全長の約80%を押し出した状態である。またガラスの条件としては工具と材料間の摩擦係数 μ を仮定して解析した。COPRESSでのメッシュ分割数は半径方向:10、周方向:3として、軸方向は形状変化の大きい部分では細分化した(コンテナ部a:3、ビレットR部b:5、ダイスアプローチ部c:8、ダイスR部d:8、ダイスベアリング部e:3)。計算用の押し出し条件は後述の実機試験と同一のTable 3に示す条件とし、また潤滑ガラスの摩擦係数 μ はビレットの内外面および端面ともに $\mu=0.08$ とした。なお、 μ が0.05~0.15の範囲内では押し出し荷重やひずみ速度分布等の変形状態の解析結果にはほとんど影響がないことを確認している。

SUS304の流動応力(以下、変形抵抗 k_f と称す)につい

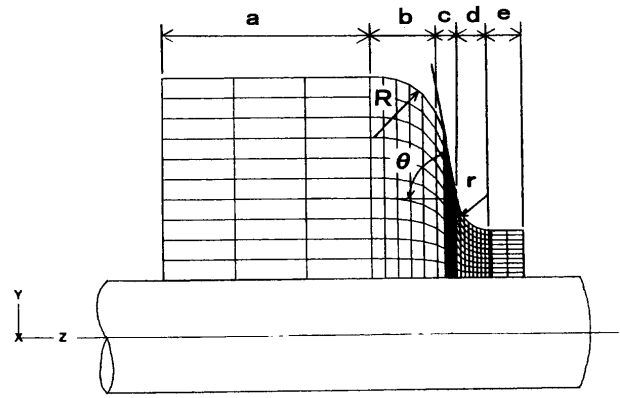


Fig. 4. Finite element mesh of workpiece for computation.

Table 3. Extrusion process condition for computation and experiment.

Billet material	: SUS304
Billet (mm)	: ϕ 174 \times ϕ 53 \times L600
Container (mm)	: ϕ 182
Extruded tube (mm)	: ϕ 80 \times ϕ 50 \times L4525
Extrusion ratio ρ	: 7.85
Die (mm, deg)	: R=20, r=10, θ =80
Mandrel (mm)	: ϕ 50
Ram speed	: 100 m/s
Billet heating temperature	: 1473K
Friction coefficient μ	: 0.08

ては、H. Suzuki等の実験結果⁸⁾において加熱温度1473K、塑性ひずみ ϵ ($=\ln\rho$)=2.02、ダイス直下での平均相当ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=40$ (1/s)を考慮し、 $k_f=130$ MPaを採用した。以下の説明では押し出し方向(軸方向)をz、半径方向をy、周方向をxとする。解析結果は後述の考察の項で述べる。

3・3 実機押し出し試験

3・3・1 押し出し時のメタルフロー

押し出し時のメタルフローの可視化は異材質埋込み法によった。異材質として $\phi 8 \times L50$ のS45C炭素鋼丸棒(以下バーと称す)を用いた。素材のSUS304ビレットに軸方向バーをビレット両端面に3本および半径方向バーをビレット両端付近および中央部にそれぞれ5本埋込み押し出した。押し出し条件は解析と同じくTable 3の条件とした。潤滑ガラスはガラスパッド: G1、外面ガラス: G2、内面ガラス: G3を用いた。Fig. 5にメタルフローの測定結果を示す。同図では押し出し断面の下側に半径方向バー、上側に軸方向バーの挙動を示してある。

軸方向バーのメタルフローから、ビレット先端面のA、B、C点が押し出し管の外面側にきており、押し出し管の先端部は非定常変形となっていることが分る。半径方向バーのメタルフローから内面側が外面側に比べて変形が先行していることが確認できる。中央部の半径方向バーの傾斜角度から、定常域での剪断ひずみ γ を算出すると $\gamma=1.3$ であり、理想塑性ひずみ $\epsilon=\ln\rho=2.02$ の約65%もあり、大きな余剰仕事を発生していることが分る。また、ダイス半角 θ

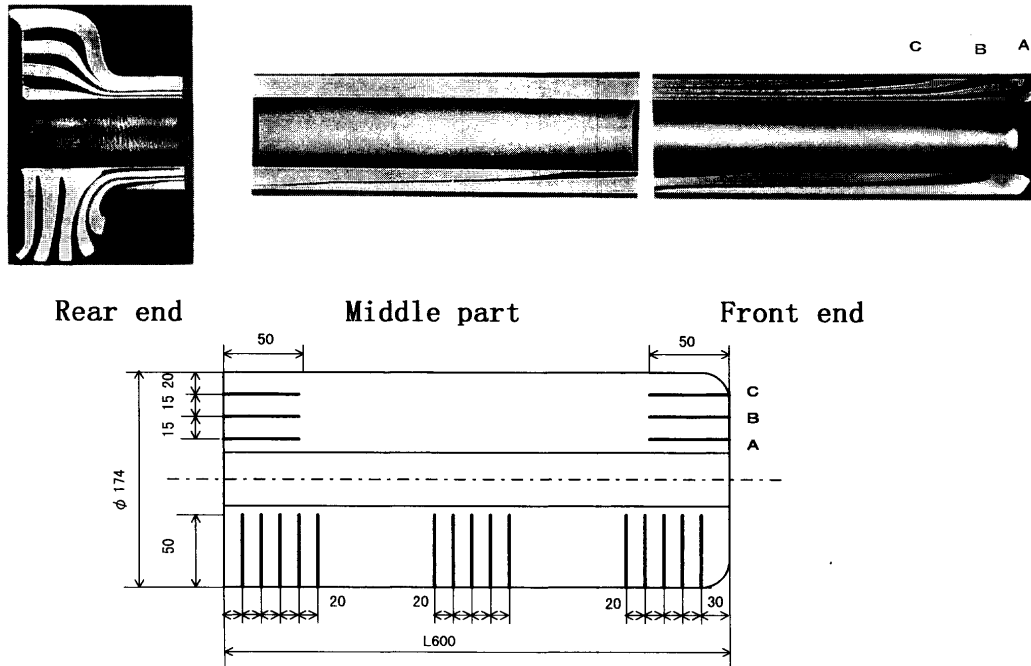


Fig. 5. Stream lines in hot extrusion process of stainless steel tube.

($\approx 80^\circ$)が大きいにもかかわらず、デッドメタルは生じていない。これはガラス潤滑の摩擦係数が低いためである。無潤滑ではデッドメタルが生ずることが知られている¹⁾。

3.3.2 押し出し荷重の推移

Fig. 6に押し出し中の押し出し荷重の推移を示す。押し出し条件はTable 3と同一条件である。ただし、炭素鋼丸棒を埋め込んでない通常ピレットを用いている。

まず押し出し初期のアプセット時にピーク荷重が発生し、次いで定常状態ではほぼ一定の押し出し荷重で推移し、押し出し終期の押し切り時には再度荷重が増大する。アプセット時のピーク荷重が発生する要因としてはピレットがコンテナ内にフィルアップすることに要する荷重および押し出し初期の潤滑ガラスが十分溶融してない段階での静止摩擦力が考えられる。前者の要因についてはピレットとコンテナのクリアランスが小さいほどピーク荷重が低下するという実験事実にも裏付けられている。

3.4 解析結果と考察

Fig. 7(a)に押し出し中のピレット縦断面内での速度 V 、Fig. 7(b)に相当塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、Fig. 7(c)に剪断塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{yz}$ 、Fig. 7(d)に軸方向応力 σ_{zz} の分布の計算値を示す。

速度 V の軸方向成分は常に内面側が肉厚中央部や外面側に比べて大きく、メタルフローが先行していることが分かる。これはFig. 5のメタルフロー分布の実験の傾向ともよく一致している。

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、 $\dot{\gamma}_{yz}$ の分布より、塑性変形はダイス近傍で生じ、またダイスR部直下付近の外面側で極大値を生じ過酷な変形になっていることが分かる。これは高合金の難加工性材料の押し出し時の疵（通常押し出し方向に垂直に破断

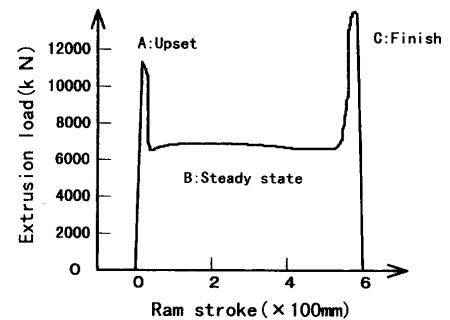


Fig. 6. Transition of extrusion load of stainless steel tube.

し、横切れと称す)が外面で発生することとよく対応している。この疵の対策としては、 $\dot{\epsilon}$ の主な影響因子である押し出し比や押し出し速度等の操業条件を材料の熱間加工性の優劣に応じて管理すればよい。また、難加工材では押し出し管材の肉厚中央部付近に材料の溶融に起因する割れ欠陥（溶融2枚割れと称す）を生じることがあり、これはダイス直下から肉厚中央にかけてが $\dot{\epsilon}$ が大きく加工発熱が大きい領域に対応している。なお、溶融2枚割れ欠陥が肉厚中央部に生ずる理由は、実押し出しではダイスへの抜熱があり、温度のピーク値は外表面より肉厚中央部寄りにあるためと推定される。

軸方向応力 σ_{zz} はピレット後端面ではほぼ一定の値を示し半径方向での差は小さい。またピレット前端面のピレットR部近傍でもっとも大きな値を示し、以降ダイス出側に進むとともに急速に減少しダイスR部を過ぎダイスペアリング部に至りほぼ零となる。ピレット後端面の面圧 σ_{zz} をピレット断面積 A_0 で積分して算出される押し出し荷重の計

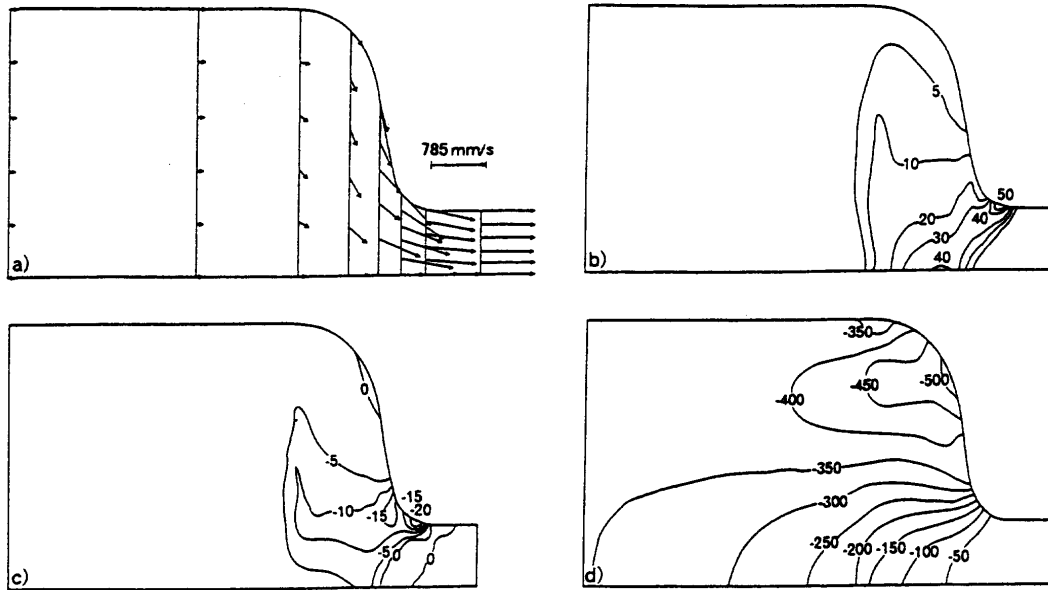


Fig. 7. Analytical results for hot extrusion process of stainless steel tube.
 (a) Velocity along stream line V (mm/s) (b) Equivalent strain rate $\dot{\epsilon}$ (1/s)
 (c) Shear strain rate $\dot{\gamma}_{yz}$ (1/s) (d) Axial stress σ_{zz} (MPa)

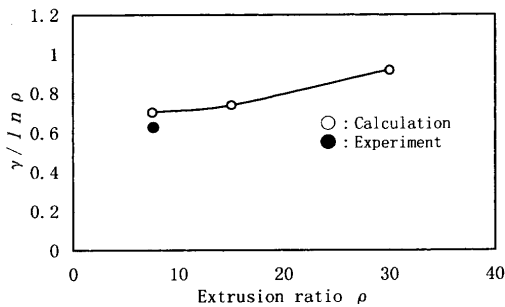


Fig. 8. Relationship between extrusion ratios and shear strains.

算値 8800 kN は定常域の実測押し出し荷重 9300 kN の約 95% と実測値より若干小さいが、変形抵抗 k_f の推定誤差も影響しているものと思われる。計算値の押し出し荷重 8800 kN は理想押し出し荷重 $P_0 (=k_f A_0 \ln \rho = 6300 \text{ kN})$ の約 1.4 倍と大きく、余剰仕事が多いことが分る。押し出し荷重は計算値でも実測値でもピレット長さの影響をほとんど受けない。これはコンテナとピレットの摩擦係数が極めて小さいためと考えられる。

Fig. 8 に押し出し比 ρ と押し出し後の肉厚中央部の工学剪断ひずみ $\gamma (=2\gamma_{yz})$ の関係の解析結果を示す。 γ は剪断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_{yz}$ を流線に沿って積分して求めた。同図は γ を $\ln \rho$ で無次元化 ($\gamma / \ln \rho$) して表示してある。 ρ の増大とともに剪断ひずみ γ 、すなわち Fig. 5 のメタルフローの傾斜が大きくなる。また実測のメタルフロー (Fig. 5) から求めた $\gamma / \ln \rho (=0.64)$ も付記してある。計算値と実測値は良く一致している。

4. 結言

ガラスの潤滑特性の把握と 3次元剛塑性 FEM 解析および実機熱間押し出し実験を行い、ステンレス鋼管の熱間押し出し加工の変形特性を明らかにし、以下の知見を得た。

- (1) 熱間摩擦評価試験の結果、ガラスの粘度と摩擦係数の定量的な関係を明らかにした。
- (2) ガラス潤滑を用いる熱間押し出し加工は流体潤滑状態である。
- (3) ガラス潤滑の摩擦係数を用いて 3次元 FEM 解析を行い、メタルフロー、ひずみおよび押し出し荷重の計算値と実測値はよく一致していることを確認し、解析の妥当性が実証された。
- (4) 外面横切れ疵、溶融 2 枚割れ等の押し出し欠陥の発生をひずみ速度分布から予測することができた。

文 献

- 1) J.Sejournet and J.Delcroix: *Lubr. Eng.*, **11** (1955), 382.
- 2) 押し出し加工, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1992), 107.
- 3) T.Yosida, T.Hamano and K.Osaki: *Sanyo Tech. Rep.*, **5** (1998), 40.
- 4) 飯田孝道, 酒井英典, 栗原靖享, 川島 健: 日本学術振興会製鋼第 19 委員会資料 (No. 1634), (1996).
- 5) T.Nakanishi, K.Kawamoto, K.Sato, H.Hara and T.Iida: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 1022.
- 6) K.Kiuchi, J.Yanagimoto and V.Mendoza: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **37** (1996), 213.
- 7) J.Yanagimoto, A.J.Braud, K.Karhausen and R.Kopp: *Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng.*, **120** (1998), 316.
- 8) H.Suzuki, S.Hasizume, Y.Yabuki, Y.Ichihara, S.Nakajima, K.Kenmochi: *Rep. Inst. Ind. Sci., Univ. Tokyo*, **18** (1968) 3, 98.