

自由鍛造・圧延工程への静水圧積分の適用

中崎 盛彦*1・高須 一郎*2

Application of hydrostatic integration parameter for free-forging and rolling
Morihiro Nakazaki and Ichiro Takasu

Synopsis: It is important to catch deformation behaviors of the forging and the rolling to avoid center porosity due to solidifying contraction. In general, forging has advantage for avoiding center porosity rather than rolling. There are evaluation methods each for rolling itself and for forging itself. There is no evaluation method for both rolling and forging. Authors have a great concern with hydrostatic integration, which is usually used in forging and evaluate the center porosity of bar or billet which was produced both with rolling and with forging, by using CAE analysis and plasticine test. Consequently, we found the hydrostatic integration, Gm, can be applied both to rolling and to forging as an evaluation of center porosity.

Key words: rolling, free-forging, porosity, hydrostatic integration, FEM, temperature, flow stress

1. 緒言

鍛造時の凝固収縮に起因する超音波欠陥防止のため、鍛造及び圧延工程における加工挙動の把握は重要である。一般に鋼片を圧延のみで成形する圧延工程と比べて、圧延前に自由鍛造工程を行う自由鍛造・圧延工程の方が超音波欠陥防止に有利であるが、生産性・コストの面では圧延工程の方が有利な側面を持っている。従来より、圧延工程、鍛造工程各々の内部圧下評価事例は種々存在するが¹⁾、両者を同一の指標の下で定量的に比較評価した調査結果は見られない。

一方、近年のコンピュータの進歩に伴い、CAE解析技術が進歩してきたことから、圧延解析及び鍛造解析に三次元CAE解析が適用されてきている。この三次元CAE解析を用いることにより、鋼材内部の応力及びひずみが精度良く求まり、鍛造・圧延工程の中心部加工度に対し共通の評価を行うことが可能になると考えられる。

そこで本報では、鍛造及び圧延に共通に適用できる評価手段として小野らの考案した静水圧積分²⁾に着目し、三次元解析を用いて圧延工程及び自由鍛造・圧延工程での静水圧積分を算出した。またプラスチック実験と解析結果の比較によりその有意性を確認し、鍛造・圧延の内部加工度についての定量化を試みた。

2. 自由鍛造実験及び解析結果

2.1 実験及び解析条件

Fig.1に自由鍛造のプラスチック実験モデル図を示す。中心にφ10の貫通孔を設けたプラスチック材を石膏金敷で圧下する自由鍛造実験を行った。プラスチックは実鋼と比べて圧着しやすいことから、凝固収縮による空孔を

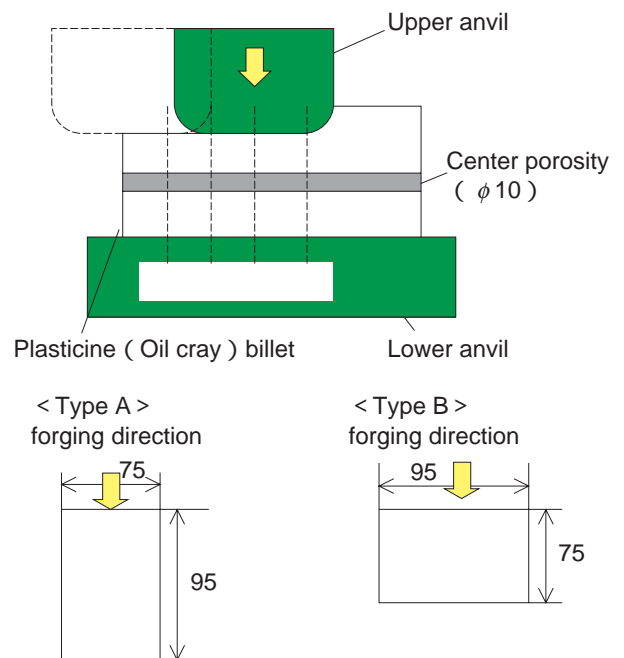


Fig.1. Free-forging simulation model.

*1 技術研究所 プロセス開発グループ

*2 技術研究所 プロセス開発グループ長, PhD

再現し、かつ圧下後に空孔を残存させるため大きめの空孔を設定した。圧下方向の影響を見るため、幅狭面から圧下したものをType A、幅広面から圧下したものをType Bとして実験を行った。鍛造後、図中 ~ の箇所で切断し、空孔の断面積減少率を測定した。と は上金敷の中心となる位置、一方 と は上金敷の端で圧下された位置に相当する。以下空孔の断面積減少率を空孔減面率Raと呼称する。Table1にプラスチック実験条件を示す。

Table1. Free-forging conditions of plasticine simulation

Billet dimension /mm	95 × 75 × 200
Anvil length /mm	upper : 120 lower : 250 (plaster)
Reduction of height /%	10, 12, 21, 25
Total pass number	1

一方、小野らはCAE解析を用いて空孔の体積減少率と静水圧積分Gmの関係を明らかにしている²⁾。静水圧積分Gmは以下の式(1)のように示される。

$$Gm = \int_{\epsilon} - \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} d\epsilon \quad \dots (1)$$

ただし、 σ_m : 静水応力 σ_{eq} : 相当応力

このGmは空隙の圧着度合いを示すパラメータとなる。すなわち、静水圧積分と呼ばれ、Gm値が大きいほど、空隙の体積減少率は大きくなる。この式は従来自由鍛造で使用されているが、本報告ではその有効性の確認と圧延での適用の可能性を探るためGmの算出を試みた。

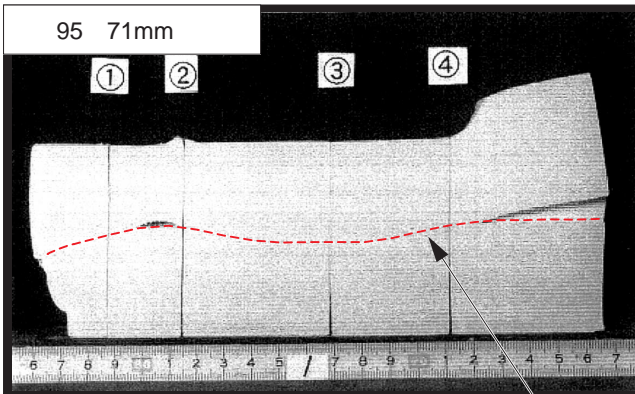
2・2 実験及び解析結果

このパラメータGmの値を求めるため、汎用解析コードDEFORM-3Dを用いて自由鍛造の三次元CAE解析を行い、中心部の応力・ひずみ履歴を調査した。自由鍛造の解析条件をTable2に示す。解析モデルは空隙のない中実材とし、中心部分の応力及びひずみのデータを抽出した。

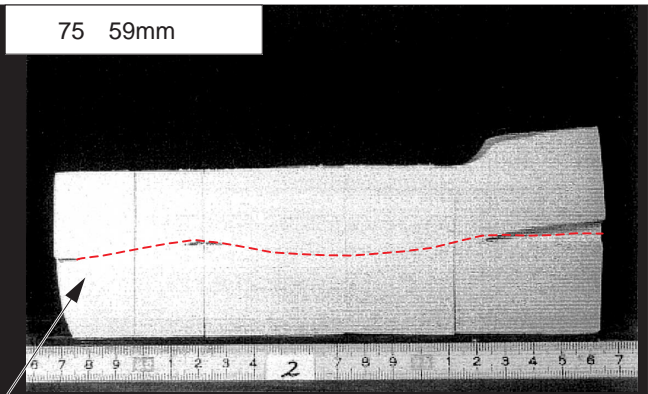
Table2. Calculation conditions of free-forging

CAE code	Deform 3D
Total pass number	1
Steel, temperature	S20C, 1273K
Flow stress / MPa	Misaka's formula ⁶⁾ $\sigma = 115.9 \epsilon^{0.21} \dot{\epsilon}^{0.13}$
Type of elements	4 node tetra hedral element
Friction coefficient	$\mu = 0.20$

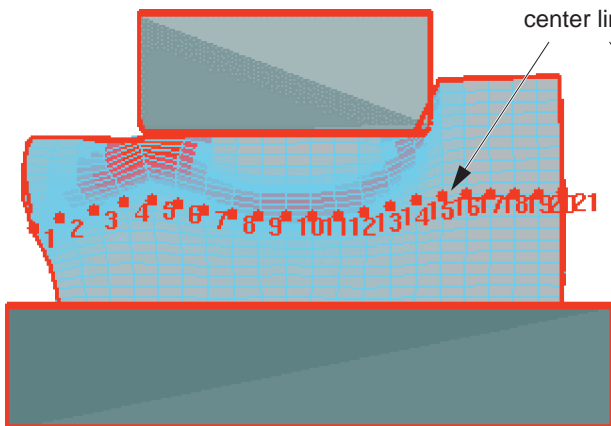
(a) Type A, plasticine



(c) Type B, plasticine



(b) Type A, CAE analysis



(d) Type B, CAE analysis

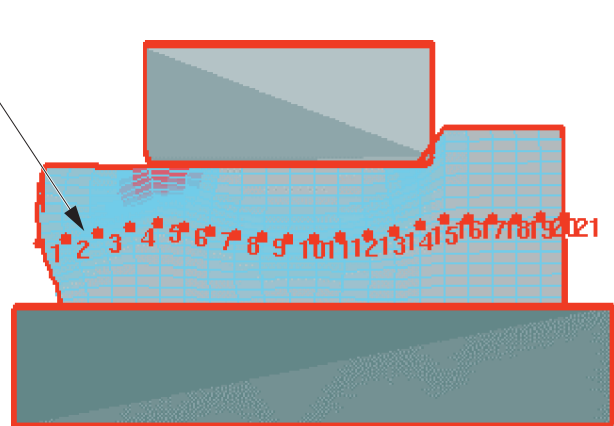


Fig.2. Results of plasticine simulation (upper) and CAE analysis (lower) in free-forging.

Fig.2にプラスティン実験及びCAE解析の結果を示す。Type A, Bの圧下面による影響は, Type Aの方がやや効果があったが, 大きな差は見られなかった。CAE解析から, Type A, Bともに素材の中心線は圧下時の金敷と材料の摩擦の影響により圧下方向に蛇行していることがわかる。これは, プラスティン実験の結果にも一致しており, 解析が実機を模擬したプラスティン実験をよく再現していることがわかる。

自由鍛造は非正常変形であるため, 材料長手方向に圧下のばらつきがあり, Fig.2 (a)の付近において空孔の残存が見られる箇所がある。この位置は前述の通り金敷の端に相当し, 解析結果からもひずみ及び応力が小さい位置であった。空孔減面率RaとGmの値を比較した結果をFig.3に示す。Gmの値は金敷中心位置(図1の及びに相当)で最も高く, 反対に金敷の端(及びに相当)に近づくほど低くなっている。Raの値が低く空孔の残存が見られる位置は, 金敷の端に相当するのでGmの値も低く, RaとGmの傾向はよく一致している。このことから, 本実験でも自由鍛造時の空孔減面率RaとGmに相関があることが確認された。

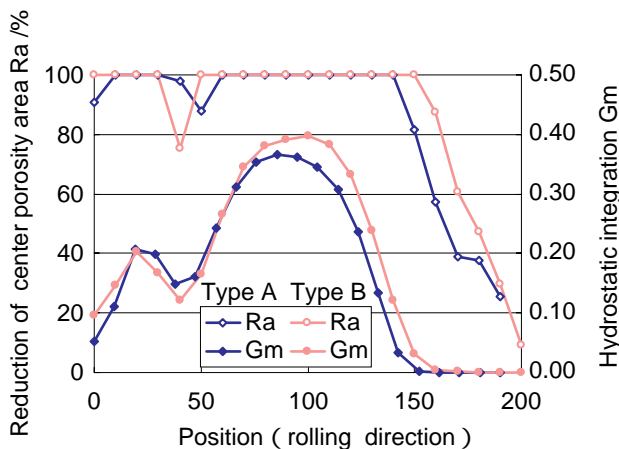


Fig.3. Reduction of center porosity area and hydrostatic integration Gm for each point.

3. 圧延実験及び解析結果 (単パス)

3.1 実験及び解析条件

圧延定常部において, 圧延長さ方向のひずみ及び応力は同一であるため, 静水圧積分Gm及び空孔減面率の値は自由鍛造と異なり実験条件1条件につき1つの値となる。圧延も自由鍛造と同様に貫通孔を設けたプラスティン材の圧延実験を行い, 圧延後, 長手方向に垂直な面で切断し, 空孔減面率を測定した。Table3に圧延実験条件を示す。

また, 三次元解析コード「CORMILL」³⁾を用いて圧延のCAE解析を行った。解析では材料を中実材とし, 解析が

Table3. Rolling conditions of plasticine simulation

Billet dimension /mm	80 × 60 × 200
Roll diameter /mm	220 (flat caliber)
Reduction of height /%	8.3, 16.7, 25, 33.3
Total pass number	1

ら求めたひずみ及び応力から, 圧延の流線に沿ってGmを計算し, その断面位置でのGmの値とした。Table4に圧延解析条件を示す。CAE解析のパラメータは前報⁴⁾で求めた値を用い, 変形抵抗は美坂の式⁵⁾により求めた0.20%炭素鋼の1000 に相当する値を用いた。

Table4. Calculation conditions of rolling

CAE code	CORMILL ³⁾
Total pass number	1
Steel, temperature	S20C, 1000
Flow stress / MPa	Misaka's formula ⁶⁾ $\sigma = 115.9 \epsilon^{0.21} \dot{\epsilon}^{0.13}$
Type of elements	8 noded three-dimensional brick element
Friction coefficient	$\mu = 0.57$

3.2 実験及び解析結果

Fig.4に実験結果とCAE解析結果を示す。外形のドッグボーン形状など, 両者の変形挙動はよく一致している。また, Fig.5にプラスティン実験より得られた空孔減面率Raと静水圧積分Gmを比較した結果を示す。この図より, 圧延と自由鍛造は共にGmが上昇するとRaが大きくなる挙動を示しており, Gmを用いた空孔減面率評価が可能と考えられる。

以上, 自由鍛造実験と圧延実験について, 計算による静水圧積分Gmとプラスティン実験による空孔減面率Raを比較した結果, 自由鍛造・圧延の違いに関わらず空孔減面率Raは静水圧積分Gmを用いて整理でき, 圧延・自由鍛造は同一のパラメータGmを用いて中心圧下への評価が可能とわかった。また, Fig.5より空孔減面率が全数100%になるのはGmが0.20以上であることがわかった。

4. 静水圧積分Gmに影響を及ぼす因子

4.1 ロール径

一般に自由鍛造においては, 中心部への圧下効果は金敷幅と材料高さの比で表される金敷幅比によって表され, 金敷幅比が大きいと中心部への圧下効果は高い⁶⁾。圧延においてもロール径が大きくなることにより中心部の圧下効果が大きくなると考えられ, ロール径による中心圧下効果の影響について, 解析を用いて調査を行った。解析条件を

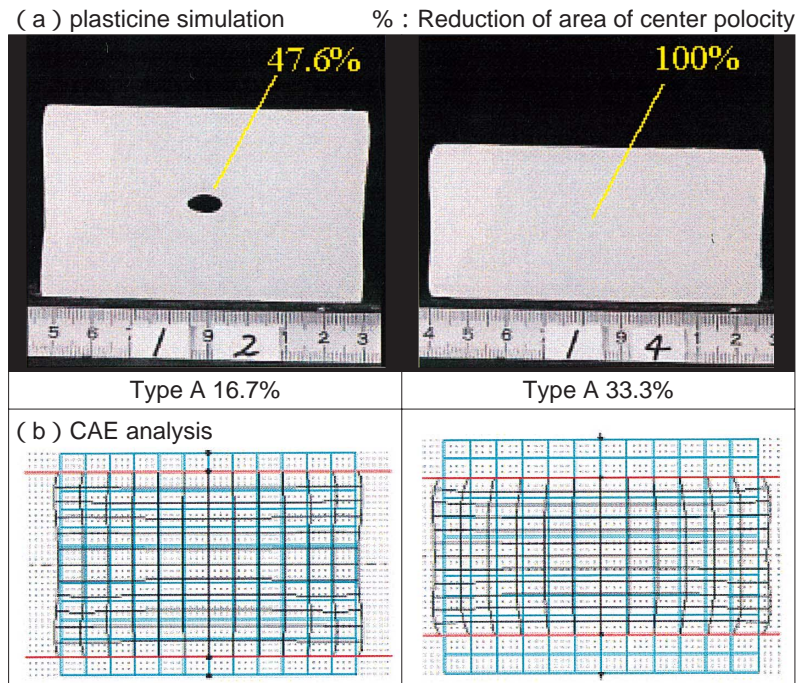


Fig.4. Results of plasticine simulation (upper) and CAE analysis (lower) in rolling.

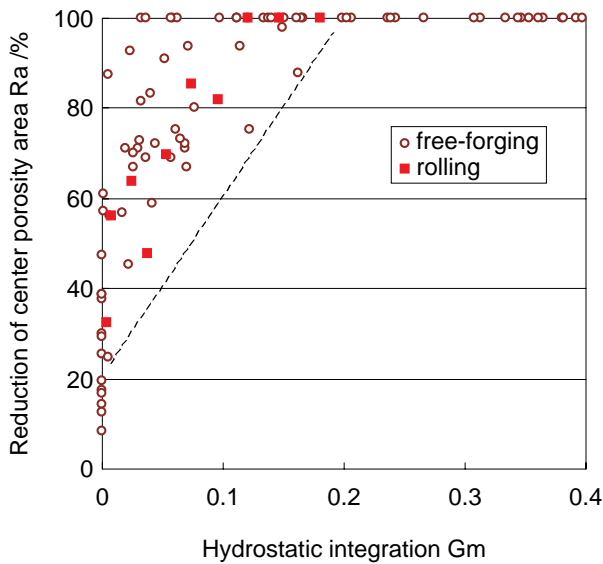


Fig.5. Relationship between hydrostatic integration Gm and reduction of area of center porosity.

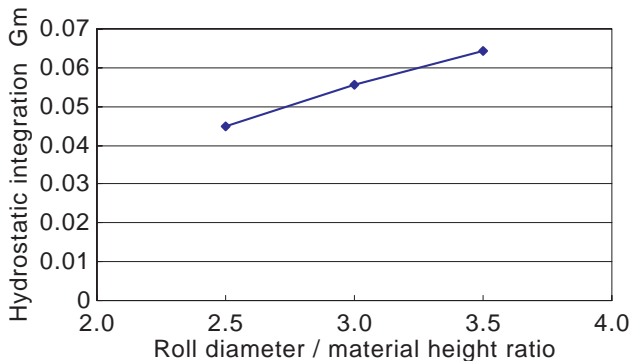


Fig.6. Relationship between Roll diameter and material height ratio and hydrostatic integration Gm.

Table5に示す。金敷幅比と同じ考え方で，ロールと材料の接触長さと材料高さの比を接触長さ比として，Gmの値と比較した結果をFig.6に示す。図より，ロール径が大きくなるとGmの値が比例して大きくなる傾向が確認された。これは自由鍛造の場合と同じであり，ロール径が大きくなる程長手方向への拘束が働き，ロール直下の材料が長手方向に伸びにくくなるためと考えられる。

Table5. Calculation conditions of rolling

Total pass number	1
Billet cross section /mm	80 × 60
Roll diameter /mm	150, 180, 210

4・2 材料の温度分布

温度分布による中心部への影響を調査した。計算条件をTable6に示す。材料は当社ブルーム(490mm × 380mm)とビレット(φ167)を想定し，それぞれの形状と同じ断面積の正方形ビレット(ブルームは432mm × 432mm，ビレットは148mm × 148mm)を平ロールにて高さ圧下率15%で圧延した場合のGmの値を計算した。温度は

Table6. Calculation condition of rolling

Total pass number	1
Billet cross section /mm	432 × 432 148 × 148
Roll diameter /mm	900 500
Temperature difference /K (surface-center)	1373-1373, 1273-1373, 1173-1373

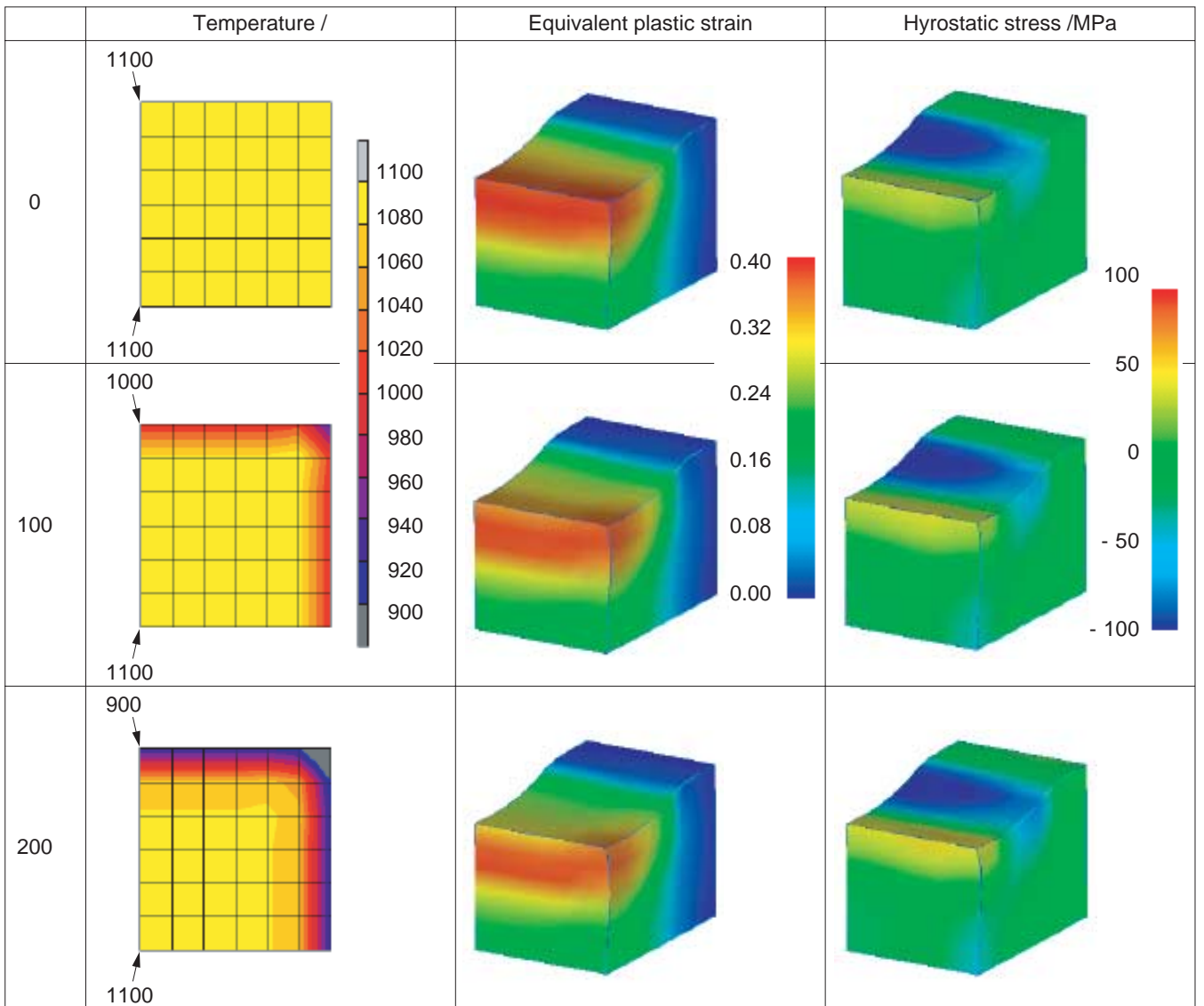


Fig.7. Influence temperature distribution in steel on equivalent plastic strain and hydrostatic stress.

1100 均一条件から空冷した場合の温度分布を計算し、表面中央と内部の温度差がそれぞれ100, 200 に到達した時点での温度分布を入力して解析を行った。なお、加工発熱による影響はここでは考慮していない。

ブルーム、ピレットにおけるそれぞれの温度差での相当ひずみ・静水応力分布をFig.7に示す。温度均一条件では材料表面のひずみが高いが、温度差が大きくなるに従い内部のひずみが大きくなるのがわかる。

また、表面と内部の温度差によるGm値の推移をFig.8に示す。温度差が大きくなるに従いGm値が上昇し、内部への圧下効果が高まっていることが分かる。これは、表面が温度低下することにより表面の変形抵抗が増大して変形しにくくなり、それにより内部の変形が大きくなったためと考えられる。

4・3 変形抵抗

母材硬さや鋼種の違いにより、材料の変形挙動に違いがあることは、経験上言われていることである。これらの違

いは材料の変形抵抗の違いという形で表すことが出来る。そこで、この違いが中心部の変形及び中心圧下にどの程度影響を及ぼすか、調査を行った。CORMILLを用いて、変形抵抗の比例定数(k値), 加工硬化指数(n値), 速度依存

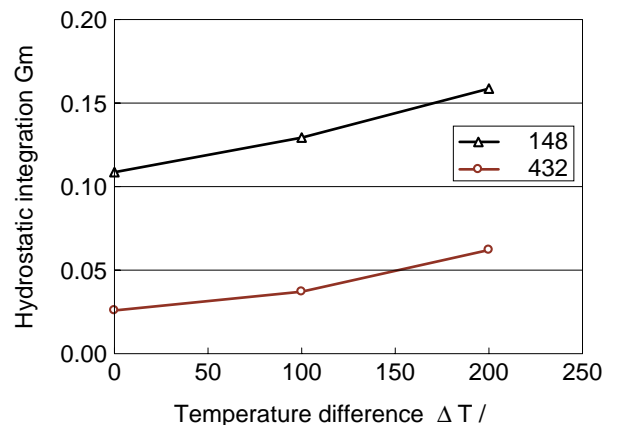


Fig.8. Gm transition by temperature distribution.

性指数（ m 値）を変化させてシミュレーションを行い、 G_m を算出した。断面内での変形抵抗は均一とした。

Fig.9に k 値を、Fig.10に m 値、 n 値をそれぞれ変化させて計算した結果をそれぞれ示す。 k 値の違いによる影響は見られなかったが、 m 値、 n 値を変化させた場合、 m 値及び n 値が大きくなるに従い材料中心部の G_m が増加した。これは、圧延ではロール接触面に変形が集中するが、 n 値の高い材料は表面が加工初期に加工硬化して変形しにくくなり、その結果内部まで変形が及ぶためと考えられる。 m 値でも同様に、表面付近のひずみ速度が高いため、表面の変形抵抗が上昇して変形しにくくなり、内部に変形が及ぶと考えられる。

すなわち、従来言われている変形挙動の違いは、初期硬さによるものではなく、温度分布及び変形抵抗の m 値、 n 値による影響が大きいと考えられる。

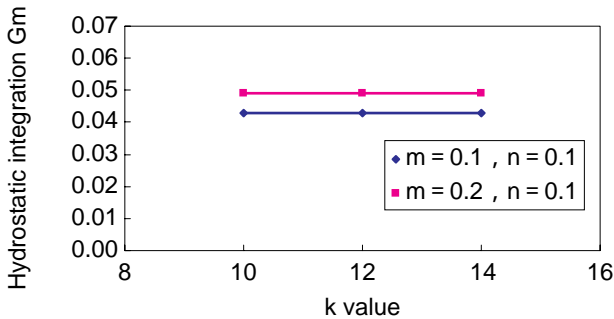


Fig.9. Transition of G_m by k value of flow stress.

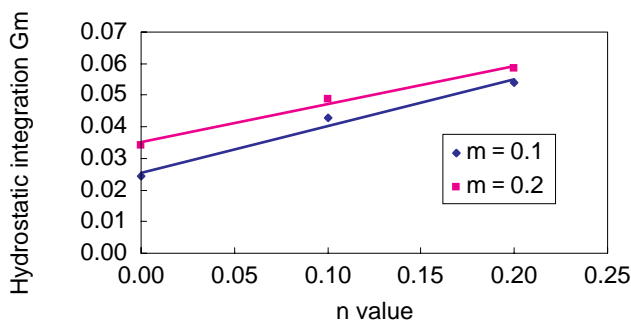


Fig.10. Transition of G_m by m, n value of flow stress.

5. 結言

鍛造及び圧延に共通に適用できる評価手段として、鍛造で提言されている静水圧積分 G_m に着目し、プラスチック実験とCAE解析によって鍛造・圧延の内部加工度について定量化を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 自由鍛造・圧延の違いに関わらず、空孔減面率は静水圧積分 G_m を用いて整理でき、空隙圧着パラメータを用いて自由鍛造と圧延工程の検討に適用可能である。
- (2) 圧延における中心圧下効果は、同一パス及び形状においてもロール径、温度分布、変形抵抗の m 、 n 値によって変化する。

文 献

- 1) 山口喜弘, 津田統, 大砂寛, 朝永満男, 齊藤俊二: 神戸製鋼技報, 33-4 (1983), 32など.
- 2) 小野信市, 南克之, 村井悦夫, 岩館忠雄: 平成5年度塑加春講論 (1993), 693.
- 3) 柳本潤, 木内学, 中村充, 倉橋隆郎: 塑性と加工: 32-367 (1991), 1000.
- 4) 中崎盛彦, 西村信己: 山陽特殊製鋼技報, 8 (2001), 51.
- 5) 美坂佳助, 吉本友吉: 塑性と加工, 8-79 (1976), 414.
- 6) 中島浩衛, 渡辺和夫, 渡辺司郎, 田村至: 塑性と加工, 22-249 (1981), 1035.

著者



中崎 盛彦



高須 一郎