

損傷を受ける材料及び粉体の非局所的変形挙動の モデル化とシミュレーションに関する研究 (Choi HonSeak)

神戸大学 工学部 機械工学科

教授 富田佳宏

(平成7年度外国人技術者養成援助助成 AF-95046)

1. 研究の目的と背景

塑性加工を受ける延性材料は、引張り変形が優勢な場合、材料内部に空孔が発生しそれが成長あるいは合体し成形限界に至る場合が多い。また、近年広範に利用されるようになってきている粉体の圧縮による成形においては、成形品の内部の密度分布あるいは材料の流れの予知はその強度評価においてあるいは加工過程の設計において重要である。通常、このような材料の変形に対して、圧縮性塑性理論を用いて解析・シミュレーションが行われる。しかしながら、構成式は局所形のものに限定されており、極めて大きいひずみあるいは応力勾配が存在する場合において、材料の微視的構造あるいは粉体の粒子の大きさ依存性、いわゆる非局所性、は考慮されていない。

本研究では、上記のようなひずみあるいは応力勾配が極めて大きい所に存在する空孔あるいは損傷の発生及び空隙の消滅の非局所性に注目し、それを表現可能な非局所形構成式を提案することにより、関連する塑性加工過程の限界あるいは材料の破壊の予知を可能ならしめることを目標とする。そのために、焼結体や損傷を受けている材料をポイド材として近似して、Gurson 型構成式^{(1),(2)}をひずみ速度・温度依存性を考慮できる形式へ一般化し、相当粘塑性ひずみの第2次勾配を流れ応力に導入することによって非局所形式の熱粘弾塑性構成式を定式化する。つぎに、平面ひずみ下で圧縮を受ける焼結体ブロックの変形挙動のシミュレーションを行い、ポイド材における試料形状及び寸法が変形挙動に及ぼす影響を検討する。加えて、

有限要素法を用いて上記のような局所化領域の解析を行った場合に発生する、いわゆるメッシュ依存性^{(3),(6)}の除去の可能性についても検討を加える。

2. 研究の方法

2.1 基礎理論

ここでは、従来の Gurson 材^{(1),(2)}の構成式を、母材の流れ応力のひずみ速度・温度依存性ポイド材に適用できる形式に一般化する。いま、ポイド材を含む材料の降伏関数 ϕ を母材の流れ応力 σ_M が温度 T の関数であるとして、以下のように示す。

$$\phi = (\sigma / \sigma_M(T))^2 + 2fq_1 \cosh(q_2 \sigma_M / 2 \sigma_M(T)) - (1 + q_3 f^2) = 0 \quad (1)$$

全ひずみ速度 d_{ij} は、弾性ひずみ速度 d_{ij}^e と塑性ひずみ速度 d_{ij}^p の和であるとし、熱弾性理論と降伏関数 ϕ をポテンシャルとする流れ法則を用いて全ひずみ速度を表し、それを逆変換することにより次の構成式を得る。

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = D_{ijkl}^p d_{kl} - P_{ij}^{\nabla} + \beta'_{ij} \dot{T} \quad (2)$$

上式で、 σ_{ij}^{∇} は Cauchy の応力の Jaumann 速度である。本研究では、材料の非局所的応答特性を考慮するために、通常材料において導入したと同様に、ポイド材に対してもつぎのように構成式にひずみの第2次勾配項のみを含んだ形式に一般化したものを用いる。

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \bar{\sigma}(T, \bar{\epsilon}^p, \dot{\bar{\epsilon}}^p) - C \nabla^2 \bar{\epsilon}^p \\ \bar{\sigma} &= \sigma_0(T) (1 + \bar{\epsilon}^p / \epsilon_y)^n (1 + \dot{\bar{\epsilon}}^p / \dot{\epsilon}_y)^m \quad (3) \\ \sigma_0(T) &= 0.00215 T^2 - 2.63 T + 991 \text{ (MPa)} \\ C &= 2.06 \times 10^6 \sigma_0^2 \end{aligned}$$

ここで、1:解析モデルの初期要素幅、C:力の単位を持つ定数、n:加工硬化指数、m:ひずみ速度感度指数である。

つぎに、構成式(2)、(3)を運動方程式の弱形式表示⁽⁷⁾に導入し有限要素微分方程式を得る。微分を中心差分で近似し増分的に解析を行う。衝撃問題では弾性波の縦波の伝播速度を c_1 、要素の最小長さを1とすると、時間増分 Δt は次式を満足するとき数値的に安定な解析ができる⁽⁸⁾。

$$\Delta t \leq 1/c_1, \quad c_1 = \{(1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu)\rho\}^{1/2} \quad (4)$$

本研究においても、時間増分 Δt は常に式(4)を満足するように決定した。ただし、質量密度 ρ 、弾性係数 E はポイド率 f に依存しているため、通常の弾性波とは違った速度になる

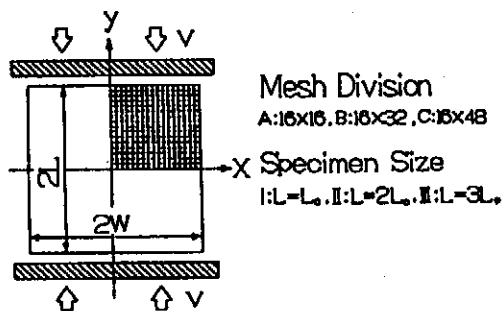


Fig. 1 Computational Model

2. 2 解析モデル

本研究では、高速圧縮を受ける焼結体の变形挙動を調べるために、Fig.1に示すように、熱粘弾塑性平面ひずみブロックに端面変位速度 $\dot{u}/l=2000.0/s$ を与えて解析を行う。変形の対称性を考慮して第一象限のみ解析する。図中の四角形要素はそれぞれ、4つの三角形により分割された Crossed-triangles 要素からなる。さらに、塑性仕

事の95%が熱に変わるとし、局所断熱状態を仮定した。なお、解析結果の比較を容易にするため、図中のように要素分割はA, B, C 試料寸法はI, II, IIIとして表すことにする。また、試料は次式で表される初期不整を与えている。

$$\sigma_0(x, y) = (1 - 0.2 \exp(-100(x^2 + y^2))) \times \sigma_0(T) \quad (5)$$

その他の材料定数及び解析に用いた定数を Table 1 に示す。

Table 1 Material and Computational Parameters

E_0	Elasticity modulus	200.0 GPa
σ_y	$= E_0 \cdot \epsilon_y$	400.0 MPa
ν	Poisson's ratio	0.333
T_0	Initial temperature	296 K
n	Work hardening exponent	0.1
ρ	Mass density	$7.87 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
m	Strain rate sensitivity exponent	0.01
α	Thermal expansion coefficient	$11.7 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
f	Initial void volume fraction	0.3
\dot{u}/L	Nominal strain rate	2000 1/s.
T_r	Rise time	10^{-7} s

3. 研究成果

3. 1 試料形状の变形の局所化への影響

ポイド材の变形の局所化のブロック形状依存性を調べるため、 $F=0, 0.3$ 及び $L/W=1.0, 2.0, 3.0$ の場合における圧縮変形シミュレーションを行った。Fig.2はブロックの端面変異 u/L と荷重 $\tilde{\sigma}/\sigma_y$ の関係を、Fig.3はポイドの無い材料(左)とポイド

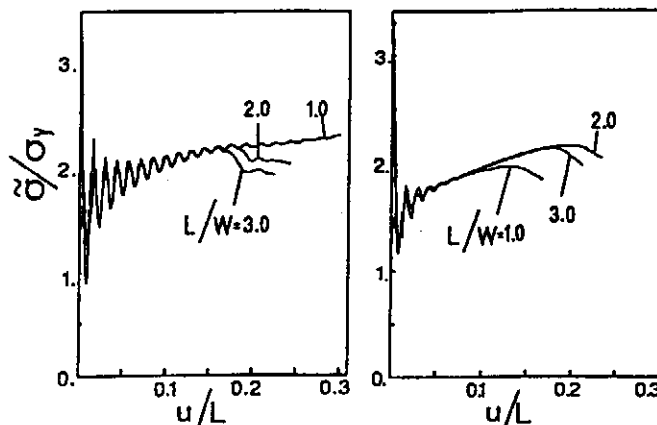


Fig. 2 Displacement u/L vs. load $\tilde{\sigma}/\sigma_y$

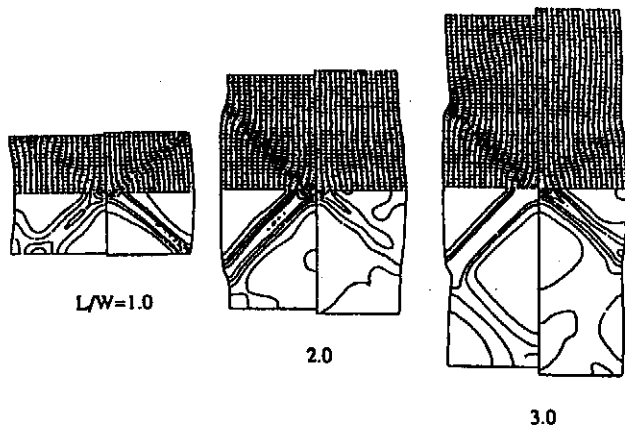


Fig.3 Distribution of representative strain.

left: non-void material ($u/L=0.22$), right: void material ($u/L=0.16$), intervals of contour line are 0.1.

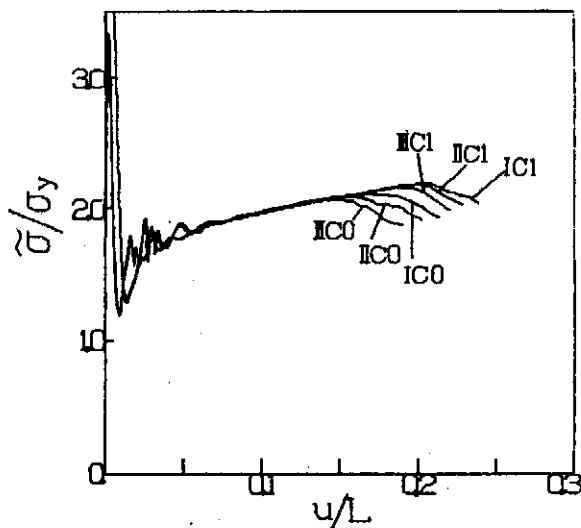


Fig.4 Displacement u/L vs. load $\tilde{\sigma}/\sigma_y$

材 (右) の相当ひずみの分布を表している。ポイドがない材料では、Fig.3に見られるように、ブロックの長さの变化にも関わらずせん断帯の傾きはほぼ 45° で、幅も等しい。従って、 u/L を一定とすると、せん断帯で吸収する変形量は L/W の増加と共に増大する。よって見かけ上、 L/W が大きいブロックの荷重低下が早くなる。これに対してポイド材では、せん断帯の傾きは L/W によって変化している。 $L/W=1$ の場合、ポイドがない材料はせん断帯が中央部から端面に成長しながら端面で工具に反射するような形となっている。しかしポイド材では、中央と角においては大きな変形が発生しそれを結合する形式でせん断帯が成長している。

これがポイドが無い場合と大きく異なる点であり、ポイドの無い材料とは異なる形式で荷重の低下を早めたものと考えられる。

3. 2 構成式の非局所性が変形の局所化に及ぼす影響

Fig.1における要素分割Cで、3種類の試料寸法 I, II, III について解析を行い、変形の局所化に及ぼす構成式の非局所性の影響を検討した。Fig.4はブロックの荷重 $\tilde{\sigma}/\sigma_y$ と端面変位 u/L の関係を表している。図中 IC0, IIC0, IIIC0 は局所形構成式による結果を、IC1, IIC1, IIIC1 は非局所形構成式による結果を表している。Fig.5は三つのモデル I, II, III に対して最大相当ひずみ値がほぼ同じところでのせん断帯上の相当ひずみの分布を表している。Fig.4より、非局所形構成式を用いた場合局所化進展が抑制されることが分かる Fig.5の局所形構成式による(a)の場合試料寸法が大きくなるにつれて、局所化領域の幅も比例して大きくなっているのに対して、非局所形構成式(b)の場合は試料寸法が変化しても局所化領域の幅はほぼ一定である。これによりポイド材においても非局所形構成式を用いることにより、局所化の抑制及び局所化挙動の寸法依存性除去の可能性が確認された。

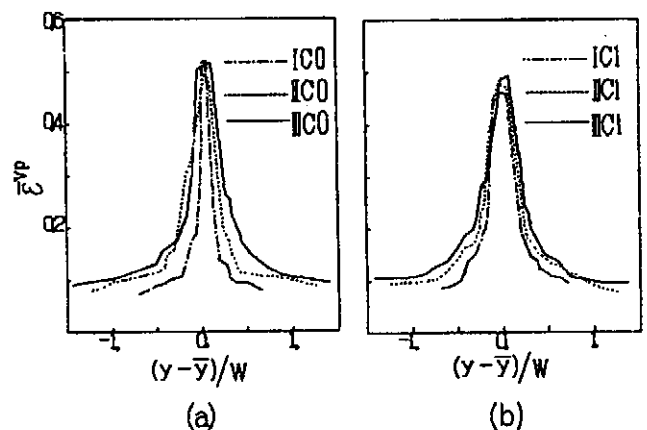


Fig.5 Representative strain distribution in the predominant localization zone.

(a) strain gradient independent flow stress, (b) strain gradient dependent flow stress.

4. 結 言

非局所性を呈するポイド材の変形挙動をモデル化するために、ひずみ勾配を含んだ形式の構成式を新しく提案し、高速変形を受けるポイド材の平面ひずみブロックの変形の局所化挙動の予知に適用した。その結果、非局所形構成式を用いた場合、ブロック寸法が変化しても局所化領域の幅ならびにひずみの分布形が変化しないことが初めて確認された。さらに、有限要素シミュレーションによる結果の有限要素メッシュ依存性が除去され数値的に安定な解析が出来ることが示された。これにより、提案した非局所形構成式を用いたポイド材の変形挙動のシミュレーションの有効性が実証された。

最後に、本研究の遂行に対してご援助頂いた天田金属加工機械技術振興財団に対して感謝する。

参考文献

- (1) Gurson, A., *J. Eng. Mater. Technol.*, 99-1(1977), 2.
- (2) Tvergaard, V., *Int. J. Fract.*, 18-4(1982), 237.
- (3) Tomita, Y., *Appl. Mech. Rev.*, 47-6 (1994), 171
- (4) Tomita, Y., *Modelling Siml. Mater. Sci. Eng.*, 2(1994), 701.
- (5) Tomita, Y., and Higo, T., *Int. J. Mech. Sci.*, 35-12(1993), 985.
- (6) Tomita, Y. and Nakao, N., *Finite Inelastic Deformation, Theory and application Proc. IUTAM. Symp., ed., D. Besdo and E. Stein (1991)*, 179, Springer.
- (7) 富田佳宏, 数値弾塑性力学, (1990), 養賢堂.
- (8) Needleman, A., *J. Appl. Mech.*, 56-1, (1989), 1.