

1. まえがき

延性材料が破壊に至るまでの変形履歴において、弾性領域はごく小さなひずみレンジに限られ、変形の大半は塑性的である。塑性変形は 0.1 % のオーダーから破壊直前には数百%に及ぶ。塑性挙動をモデル化する試みは、過去数十年の間精力的に行われ、様々な理論が提唱され、また用いられてきた。しかし、その適用ひずみレベルの範囲については、明確でないことが多い。例えば、直下型の地震による変形を追跡する場合などでは、局所的にひずみが大きくなることも十分に考えられ、適用を考えている理論がどのひずみレベルにおいて妥当かという予備知識が必要であろう。本発表では、代表的な塑性理論の検証を簡単なテスト問題の解析を通して行い、塑性変形のモデル化と使用において残されている問題点について検討を加えることとする。材料としては金属を考えているが、ここでの議論は他の材料にも及ぶ可能性がある。

2. 移動硬化モデルと応力速度方向依存型モデル（変形理論など）に関するコメント

最も基本的な塑性理論は、Von Mises の降伏条件を用いた等方硬化モデルであろう。これに加えて、繰返し载荷による挙動を表す目的としては移動硬化モデル、材料（構造）不安定の予測に対しては変形理論あるいはこれをベースとしたコーナー理論などが有効とされている。特に移動硬化理論は比較的小さなひずみ域ではその有効性は広く認められてきた。これらの大ひずみ領域での適用性はどうか。テスト用の問題として図1の非拘束せん断問題を考える。この問題は応力成分（空間固定座標参照）は $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ のみであるが、図にあるように伸び縮みが許され、材料変形のみでなく剛体回転も含まれる。せん断応力のみによって伸縮が誘起されるということは、応力テンソル σ と塑性ひずみテンソル D^p とが非共軸になることを意味する。この変形は、軸方向伸びを解放した円管のねじり試験に相当する。ねじりにつれて試験片は伸び、ねじり方向を反転すると一旦縮んで、さらに反転を進行させると再び伸びに転じることは Swift¹⁾ 効果として知られている。図2は、移動硬化モデルと変形理論によるせん断ひずみ γ と伸び（図2の U ）の関係である。反転直後の「縮み」は全く予測されず、これらの理論の大ひずみ領域での信頼性には大いに疑いがある。変形理論（コーナー理論）は、文献2)以来、大ひずみ域における材料破断の予測に有効と考えられてきたが、大ひずみ領域における妥当性そのものを疑わなければならないことを図2が示している。これらは反転载荷を

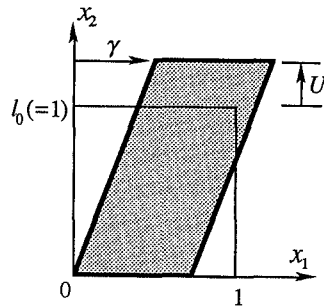


図1 非拘束せん断問題

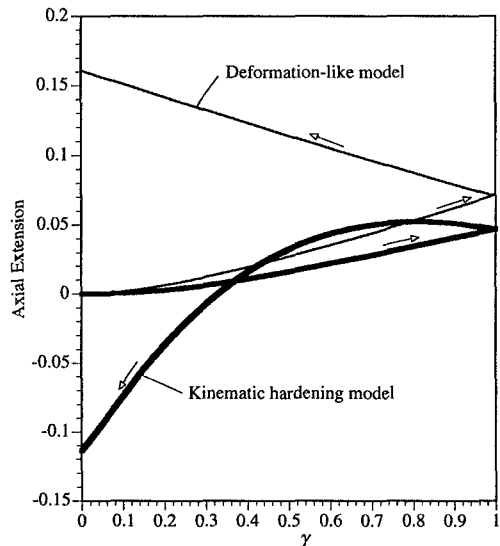


図2 移動硬化モデルと変形理論によるせん断ひずみと伸びの関係

Keywords: Large Strain, Kinematic Hardening, Deformation Theory, Corner Theory, Anisotropy

〒326 足利市大前町268 Tel. 0284-62-0605 Fax. 0284-64-1061 Email: kuroda@ashitech.ac.jp

シミュレートしてみて初めてわかったことである。

3. 応力と塑性ひずみ速度の非共軸性と異方性の発達について

古くから金属材料の結晶構造に立ち入ったモデルが考案されており、近年、計算機の発達とともにこれを用いた数値シミュレーションが盛んである。現状では構造解析に結晶モデルを用いることは困難であるので、計算の主流は巨視的塑性論ということになろう。しかし、結晶塑性論は材料構造の物理に立脚しているために、その意味で信頼性は高いと考えられている。ここでは、結晶モデルによる材料挙動を観察することによって巨視的塑性論に取り込むべき因子に関する洞察を得ることを試みた。

問題は前節と同じ図1である。ランダムな方向を持つ400個の結晶粒（ここでは2重すべりモデル）が同じ変形を呈した場合の平均応力をその材料の応力応答と仮定する（Taylorモデルと呼ばれる）。 $\gamma=1.5$ で反転したときの γ と伸び U の関係は図3のとおりであり、半定量的にSwift¹⁾の実験結果を再現している。図4は初期せん断時の $\gamma=0.1, 0.5, 1.5$ における「降伏面」（一旦、 $\sigma_{12} \rightarrow 0$ に除荷した後、 $\sigma_{11} + \sigma_{22} = 0$ の条件下で種々の方向に再負荷して求めた）を示す。 $\gamma=0.1$ で既に塑性ひずみ速度 D^p と σ が非共軸になり始めている。この時点では降伏面は等方的である。 $\gamma=0.5$ に至ると明瞭に負荷点にとがり点の発生が確認でき、非共軸度も増している。この図はコーナー理論に根拠を与えるであろう。 $\gamma=1.5$ に至ると、非共軸性はコーナーの発達よりは、むしろ異方性の発達に支配されていると解釈するほうが自然に思える。これは、Swift効果は異方性発達の帰結であるとする理論³⁾に根拠を与えるものである。結局、図2と図4は、応力速度方向依存型の変形理論あるいはコーナー理論は、あるひずみ領域にその適用が限定されることを主張している。

以上、移動硬化モデルおよび応力速度方向依存型モデルは大ひずみ域にそのままの形で応用することに無理があること、大ひずみ域ではむしろ異方性の発達が材料挙動を支配している可能性が大きいことを客観的に示した。

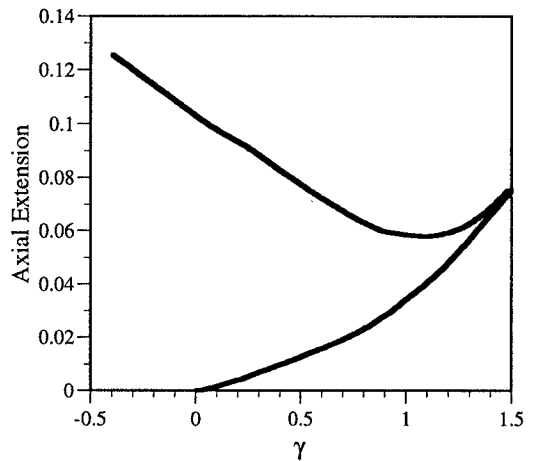


図3 結晶塑性モデルによるせん断ひずみと伸びの関係（ランダム方位を持つ400個の結晶粒による。）

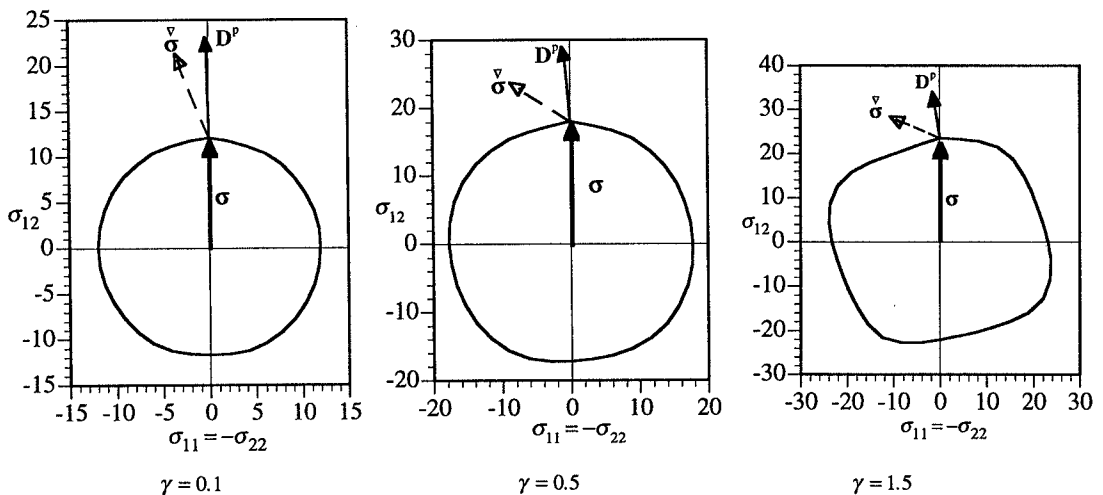


図4 結晶塑性モデルによる降伏面、塑性ひずみ速度方向、応力速度方向

参考文献

- 1) Swift, H.W., "Length Changes in Metals under Torsional Overstrain," Engineering, **163**, p. 253, 1947.
- 2) Tvergaard, V., Needleman, A. and Lo, K. K., "Flow localization in the plane strain tensile test," J. Mech. Phys. Solids, **29**, p. 115, 1981.
- 3) Kuroda, M., "Interpretation of the behavior of metals under large plastic shear deformations: a macroscopic approach," Int. J. Plasticity (in press).