特別講演

□第159回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演 (平成22年3月29日)

材料モデルとその塑性加工シミュレーションへの応用

Material Modeling and Its Application to Numerical Simulation for Metal Forming Processes

吉田総仁 ^{広島大学} 大学院工学研究科 Fusahito Yoshida



し はじめに

近年の塑性加工技術の発展は有限要素解析を代表とする 数値シミュレーション技術の進歩に大きく支えられている。 塑性加工の数値シミュレーションにより加工荷重の推定、材 料流れ、成形品の寸法精度、割れやしわといった成形不良の 予測、さらに加工熱処理過程の解析による材質予測まで行わ れるようになってきている。ところで、塑性加工の数値シミュ レーションの高精度化のためには、材料の弾(粘)塑性変形 における応力ーひずみ関係を高精度に記述する構成モデルが 不可欠である。

本稿では、材料の塑性挙動のモデリングとその塑性加工へ の応用に関する著者らの研究の中で鉄鋼およびチタン系材料 に関する主だったものを紹介させていただく。これらの材料 モデルで取扱う材料挙動としては、異方性、バウシンガー効 果、繰返し硬化、ラチェット変形(繰返し負荷に伴うひずみ 進行現象)、降伏点現象、変形抵抗の温度・速度依存性など がある。こうした材料モデルを用いることにより、板材成形 におけるスプリングバック、テンションレベラー板矯正、調 質圧延などの高精度な弾塑性解析が可能となっている。

(粘) 塑性構成モデル

2.1 バウシンガー効果、異方性、繰返し塑性変形のモデル 金属材料に引張り・圧縮のような繰返し負荷が作用すると きの応力--ひずみ挙動とその構成モデルに関する研究は繰返 し塑性問題 (cyclic plasticity) と呼ばれ、1970年代から最近 まで多くの研究があり、著者自身もこうした研究に深く関わっ てきた¹⁻⁶⁾。しかし、これらのほとんどは、機械要素や構造物 の低サイクル疲労やラチェット変形³⁻⁶⁾の解析を主な目的とし ていたため、微小変形を対象としており、材料の初期異方性 (集合組織による異方性)についてはほとんど関心が払われて こなかった。一方、塑性加工とりわけ板材成形のための材料 モデルにおける最大の関心事は変形抵抗(加工硬化)と異方 性であり、多くの異方性降伏関数⁷⁻¹⁰⁾が提案されてきた。し かし、応力反転におけるバウシンガー効果や繰返し硬化のモ デル化の重要性が塑性加工シミュレーション分野において認 識されはじめたのはごく最近のことといってよい。

著者らは、板材成形とりわけスプリングバックの解析には バウシンガー効果や繰返し硬化のモデル化が重要であるこ とを早くから主張し¹¹⁾、新しい大ひずみ弾塑性構成モデル (Yoshida-Uemori model^{12,13)})を提案した。この概要は以下 のとおりである。Fig.1に模式的に示すように、降伏曲面は 塑性変形に伴って拡大および移動する限界曲面 (bounding surface)の中を移動するものとする。初期降伏条件が $f = \phi$ (σ) -Y = 0で与えられるとき、





* 昭和47年3月東エ大工学部機械物理工学科を卒業後、東工大精密工学研究所助手、55年8月広島大工学部助教授、平成6年6月同教授となり、 現在は同工学研究科長・工学部長を務めている。日本機械学会フェロー、日本塑性加工学会フェロー・理事・副会長などを歴任している。 降伏曲面: $f = \phi (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{a}) - Y = 0$ (1)

限界曲面:
$$F = \phi (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\beta}) - (B + R) = 0$$
 (2)

ここで、Y:降伏曲面の大きさ(初期降伏強さ)、α:降伏曲 面の中心(背応力)、B:限界曲面の初期の大きさ、R:限界 曲面の等方硬化、β:限界曲面の中心である。これらの内部 状態変数の発展式は次のように与えられている。

限界曲面の拡大: $\dot{R} = k (R_{sat} - R) \dot{\varepsilon}$ (5)

限界曲面の移動:
$$\mathring{\boldsymbol{\beta}}' = k \left(\frac{2}{3} b D^{\flat} - \boldsymbol{\beta}' \stackrel{\cdot}{\varepsilon}\right)$$
(6)

ここで([°]) は客観性のある速度 (objective rate) を示す。 R_{sat} 、bはそれぞれ限界曲面の等方硬化と移動硬化の収束値、 kは材料定数である。なお β 'は β の偏差成分を表す。

降伏曲面の移動硬化は転位の運動に対して方向性を持つ 長距離障害物(比較的大きな第2相や介在物、結晶粒界など) による硬化を表しており、これらの障害物により運動を阻止 された転位は反転負荷により容易に可動性を回復する。応力 反転時における早期降伏と急速な加工硬化率の変化に特徴づ けられる遷移的バウシンガー効果の機構はこのように説明で きる。限界曲面はランダム配置された短距離障害物(固溶原 子、微細析出物など)および転位壁やセルなどによる比較的 安定な転位組織による硬化を表している。反転負荷における 硬化休止現象は単調負荷により形成された転位壁やセルが反 転負荷によりその一部が分解され再構築される過程であるこ とが実験観察により明らかにされているが、本モデルではこ れを限界曲面の拡大の一時停止、さらに非硬化領域の発展と してモデル化している(詳細は文献12)を参照)。なお、本モデ ルは降伏曲面の大きさと形状は常に一定と仮定しているが、 大きな塑性変形後の除荷における応力ーひずみ曲線を詳細に 観察してみると、除荷直後からバウシンガー効果によりわず かな塑性変形が生じていることがわかる。著者らはこれを表 現するために、「ヤング率の塑性ひずみ依存性」の式¹⁴⁾を提 案している。

Fig.2には一例として、780MPa級高張力鋼板の繰返し応力 ーひずみ応答の実験結果と本モデルによるシミュレーション 結果を比較して示す。このように、本モデルはバウシンガー 効果、硬化休止現象、応力振幅の繰返し塑性ひずみ幅依存 性を精度良く表現できる。なお、このモデルの特長のひとつ は任意の異方性降伏関数を用いることができることである。 Fig.3は980MPa級ハイテン板のハット曲げスプリングバック 実験結果とシミュレーション結果を比較して示している。バ ウシンガー効果を無視した等方硬化モデルによる解析ではか なり少なめのスプリングバックを予測している。一方、バウ シンガー効果を表現するYoshida-Uemoriモデルを用いて計 算した結果は実験結果でみられる大きなスプリングバックを 予測している。

2.2 鋼およびチタンの降伏点現象のモデル化

鋼の降伏点現象はコットレル雰囲気により固着されていた 転位が応力作用により解放され急速に増殖する過程であると 説明されている。またJohnston-Gilmanによれば、転位速度 の強い応力依存性により転位の急速な増加が降伏降下をもた らすとされている。このような素過程を意識することにより 以下のような構成モデルを考えることができる¹⁵⁻¹⁹⁾。

$$\overline{\sigma}_{eff} = \overline{\sigma} - (Y + R) \dots (7c)$$



Fig.2 Cyclic stress-strain responses on high strength steel sheet of 780MPa-DP



Fig.3 Springback of HSS980MPa-DP: experimental result and simulations (a) Experiment; (b) Isotropic hardening model; (c) Yoshida-Uemori model

ここで、sは偏差応力、 α 'は偏差背応力、bはバーガースベ クトルの大きさ、 ρ_m は可動転位密度、MはTaylor因子であ る。D、nは材料定数である。塑性ひずみに伴う可動転位密 度 ρ_m の急激な増加は次式で表す。

$$\rho_{m} = f_{m} \rho_{t}, \quad \rho_{t} = \rho_{o} + C \overline{\varepsilon}^{a}$$

$$f_{m} = f_{mo} + (f_{ma} - f_{mo}) (1 - e^{-\lambda \overline{\varepsilon}}) \dots (8)$$

ここで、ρ_tは全転位密度でρ_oはその初期値、f_mは可動転位 率、f_{mo}はその初期値、f_{ma}は収束値である。なお、降伏段以 降の加工硬化域の表現は背応力αと等方硬化応力Rの発展式 で与えられるが、これらの詳細は著者の既報¹⁵⁻¹⁹⁾を参照され たい。

本構成モデルの特徴は、材料の持つ鋭い上降伏点、その 後の降伏降下現象と引続く加工硬化挙動を表現できることで ある。また、降伏応力および塑性流動応力のひずみ速度依存 性も記述できる。Fig.4は、鋼板の調質圧延後の引張りにおけ る降伏点の除去効果について、本モデルを用いたFEMシミュ レーションを行った例を示している¹⁸⁾。降伏点現象はβチタ ンの高温引張り試験でも観察され、温度の効果も含めた同様 なモデルを提案している²⁰⁾。

3 弾塑性逆解析による 材料パラメータ同定

構成式に含まれる材料パラメータを材料試験から求めるの はかならずしも簡単ではない。そのひとつのケースは構成式



Fig.4 FE simulation of temper rolling using a model of yieldpoint: (a) non-uniform plastic deformation pattern in temperrolled sheet; (b) stress-strain curves after temper rolling

中の材料パラメータの数が多く、その決定に数種類の異なった材料試験(例えば単軸引張りと繰返し引張り・圧縮など)が必要となる場合である。もうひとつのケースは、均一な応力 ーひずみ状態における材料試験が困難となる場合である。著 者らはこうしたケースを想定して、材料試験データと対応す る数値シミュレーション結果が最も近くなるような材料パラ メータを逆問題として求める方法を提案している。例えば、 板材の面内圧縮試験は板の座屈のため困難であるので、それ に代わるものとして繰返し曲げ試験を採用し、曲げモーメン トと曲率のデータを用いて材料パラメータを求める方法²¹⁾を 提案している。さらに、異種金属からなる2層クラッド材のそ れぞれの層の材料パラメータを、各層を分離することなく、 単軸引張りと曲げ試験のデータから求める方法²²⁾も示した。



塑性加工過程シミュレーションおよび弾塑性構造解析にお ける新しい技法の提案を行った。主な成果は以下のとおりで ある。

- ●板材成形については、金型の変形を考慮した動的陽解法 数値シミュレーションの新しいアルゴリズム²³⁾を提案し、 スプリングバック予測に及ぼす金型のたわみの影響を明 らかにした。
- ●テンションレベラーのFEM解析の定常解析法の新しいア ルゴリズム²⁴⁾を提案した。これはレベラー矯正の定常解 を求めるもので、塑性変形履歴は板の流線に沿って計算 される。この解析法ではロール接触位置は板に固定して いるため計算時間のかかる接触問題を回避できている。 これにより、非定常解析に比べ100~1000倍もの高速計 算を実現している。また、残留曲率の高精度予測のため には遷移的バウシンガー効果の考慮が重要であることを 示した。また、この解析を用いたレベラーの最適工程設 計(ロール配置とロールインターメッシュ)についても報 告している²⁵⁾。

5 塑性加工工程の最適プロセス設計

数値シミュレーションを基礎とした塑性加工過程の最適化 については、板材成形ブランク形状決定²⁶⁾、中間金型形状 決定²⁷⁾などの枠組みを提案した。塑性加工分野での最適化 問題の報告はあまり多くないが、その理由のひとつに加工シ ミュレーションは一般に計算時間が膨大となり、種々の加工 条件で同じシミュレーションを繰返さねばならないため最適 化問題には不向きだという事情がある。そこで、著者ら²⁸⁾は 計算時間を短縮するための新しいアルゴリズム(低精度・高 精度モデルの相関性定式化など)を導入することにより、大 規模シミュレーションも取扱えるようにしている。とくに板材 成形に関しては、高張力鋼板の割れやスプリングバックを予 測し、それを回避するためのブランク形状、金型形状見込み、 最適ビード配置などを決定している。

6 おわりに

平成22年度日本鉄鋼協会学術功績賞の対象となった塑性 挙動と材料モデルとその塑性加工シミュレーションへの応用 に関する著者の主な研究内容を紹介させていただいた。これ らの研究成果は国内外の学術誌に発表されており、それらの うちの代表的なものについては参考文献に掲載させていただ いた。材料特性決定、塑性加工の最適プロセス設計などにつ いての研究成果が直接工業界で応用された例も少なくない。 Yoshida-Uemori modelは最近、板材成形シミュレーション市 販コード²⁰⁾にも採用されている。今後、この分野における基 礎と応用研究をさらに発展させてゆきたいと思う。なお最近 では、結晶塑性理論をベースとして材料のミクロ組織が弾塑 性挙動にどのように関連しているかについての研究も進めて おり、材料モデルについても材料組織や変形の素過程をより 深く考慮したものに進化させたいと思っている。

著者は、日本鉄鋼協会の3つの研究会「調質圧延ミクロ変 形解析」(平成16-19年度、主査:鑓田征雄先生)、「矯正工 程の高精度化・高機能化」(平成17-20年度、主査:阿高松 男先生)、「計算工学による組織と特性予測技術」(平成18-21年度、主査:瀬沼武秀先生)の委員として活動させていた だいた。本稿で紹介させていただいた研究成果にはこれらの 研究会の活動で得られたものも多い。主査・幹事の先生方を はじめ、ご協力いただいた委員の方々、そして日本鉄鋼協会 に深く感謝申し上げます。なお、材料モデルとその塑性加工 シミュレーションへの応用の研究は主に広島大学で行ってき たもので、ご協力をいただいた多くの同僚、学生の皆さんに 感謝いたします。

参考文献

- 1) E.Shiratori, K.Ikegami and F.Yoshida : J. of Mechanics and Physics of Solids, 27-3 (1979), 213.
- 2) T.Inoue, T.Igari, F.Yoshida, A.Suzuki and S.Murakami : Nuclear Engineering and Design, 90 (1985), 287.
- F.Yoshida : Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 44 (1990) , 207.
- 4) T.Inoue, F.Yoshida, Y.Niitsu, N.Ohno, T.Uno and A.Suzuki: Nuclear Engineering and Design, 150

(1994), 107.

- F.Yoshida : European Journal of Mechanics, A/Solids, 14-1 (1995), 97.
- T.Igari, M.Kobayashi, F.Yoshida, S.Imatani and T.Inoue : Int. J. Plasticity, 18 (2002), 1191.
- 7) M.Gotoh, M. : Int. J. Mech. Sci., 19 (1977) , 505.
- 8) R.Hill: J. Mech. Phys. Solids, 38 (1990) 405.
- 9) A.P.Karafillis and M.C.Boyce : J. of Mechanics and Physics of Solids, 41 (1993), 1859.
- 10) F.Barlat.et al. : Int. J. Plasticity, 19 (2003), 1297.
- 11) T.Uemori, T.Okada and F.Yoshida : Metals and Materials, 4 (1998), 311.
- 12) F.Yoshida and T.Uemori : Int. J. Plasticity, 18 (2002), 661.
- F.Yoshida and T.Uemori : Int. J. Mech. Sci., 45 (2003) , 1687.
- 14) F.Yoshida, T.Uemori and K.Fujiwara : Int. J. Plasticity, 18 (2002), 633.
- 15) F.Yoshida : Int. J. Plasticity, 16 (2000), 359.
- 16) H.B.Sun, F.Yoshida, X.Ma, T.Kamei and M.Ohmori: Materials Letters, 57-21 (2003), 3206.
- 17) F.Yoshida : Int. J. Plasticity, 18 (2002), 661.
- F.Yoshida, Y.Kaneda and S.Yamamoto : Int. J. Plasticity, 24 (2008), 1792.
- 19) F.Yoshida, T.Uemori, Y.Kaneda, S.Yamamoto, Y.Goto and G.Sakai : Tetsu-to-Hagane, 94-10 (2008) , 384.
- 20) X.T.Wang, H.Hamasaki, M.Yamamura, R.Yamauchi, T.Maeda, Y.Shirai and F.Yoshida : Materials Transactions, 50-6 (2009), 1576.
- 21) F.Yoshida, M.Urabe and V.V.Toropov : Int. J. Mech. Sci., 40-2 (1998), 237.
- 22) F.Yoshida, M.Urabe, R.Hino and V.V.Toropov: Int. J. Plasticity, 19 (2003), 2149.
- 23) H.Tsutamori and F.Yoshida : J. JSTP, 46-532 (2005), 407.
- 24) F.Yoshida and M.Urabe : J. Materials Processing Technology, 89/90 (1999), 218.
- 25) H.Hamasaki, M.Shigaki, F.Yoshida and V.V.Toropov : Tetsu-to-Hagane, 95-11 (2009), 740.
- 26) R.Hino, F.Yoshida and V.V.Toropov : Archive of Applied Mechanics, 75 (2006.10) 10-12, 679.
- 27) R.Hino, A.Sasaki, F.Yoshida and V.V.Toropov Int. J. Mech. Sci., 50-5 (2008) , 974.
- 28) S.Abe, R.Hino, H.Kondo and F.Yoshida : J. JSTP, 50-579 (2009), 328.
- 29) PAM-STAMP 2G user's guide, ESI Group, (2004)

(2010年6月4日受付)