

# 塑性加工における摩擦非線形性の 数値解析に関するベンチマークテスト

名古屋大学 工学部 材料プロセス工学科

教授 神馬 敬

(平成2年度研究開発助成 AF-90013)

## 1. 研究の背景と目的

高度の非線形性問題では解析結果の妥当性の評価は困難であるため、複数の研究者が異なるプログラムを用いて独自に計算した結果を比較するベンチマークテストが重要である。塑性加工解析のベンチマークテストは工藤英明氏(1978年)によるものが最初で、本研究代表者らの日本塑性加工学会・塑性力学分科会の共同研究報告書(1986年)及び平成元年文部省科学研究費(総会研究A)研究成果報告書(1990年)が続いた。これらの報告は塑性大変形問題の標準解として国内外の研究者の解析プログラム検定と計算条件の設定に役立っているが、摩擦を含む問題など複雑な変形についての検討が十分でない。そこで本研究では高度に非線形の塑性変形問題について標準解を得るための調査研究を行った。

## 2. 従来のベンチマークテストについての評価

これまで実施した4題のベンチマークテスト、引張り、せん断、リング圧縮、V曲げ問題の解析結果を見直し、再評価と問題点の指摘を行い、結果を塑性と加工誌に掲載した<sup>1)2)3)4)</sup>。要約すると次のようである。

- ①低減積分を施さない4節点要素BLは変形の自由度に対する拘束が大きく shear band を形成して塑性変形が局所化する平面応力引張りに対しても厳しい変形の集中を追従できない可能性がある。
- ②1ステップの増分量をかなり大きくとれる陰解法でも増分量を著しく大きくとらない限り得られ

る結果は陽解法とほぼ同等である。

③リング圧縮の場合、解析条件によって解析結果の一致の度合いが異なり、特にクーロン・アモントン則を用い加工硬化指数が小さい場合の計算はばらつきが大きく、検討の余地がある。

④単純せん断の計算では、本来変形の対称性を有する問題でも対称性を仮定しなければ数値計算の過程で対称性が失われ、厳しい変形の集中する問題では非対称性が著しく助長されて本来と異なる結果が得られる危険性がある。

## 3. 塑性加工の数値シミュレーションの高機能化

2章に述べた問題点整理を行った結果、平成4年度より3ヶ年計画で「各種塑性成形プロセスの数値シミュレーションの高機能化・実用化に関する官産学協同研究」を企画し、天田金属加工機械技術振興財団の研究助成(AF-91002)を得ることができた。

研究目的は、3次元の板材成形、圧延、鍛造を対象として計算精度、計算効率の向上とプログラム機能の拡大を図ることにある。研究内容を表1に示す。

## 4. 剛体球/円柱の押込みベンチマークテスト

### 4.1 問題の設定

#### 4.1.1 問題の解説

変形の程度が桁違いに異なる二つの問題(A、B)を設定する。また、圧子を押し込んだ後、表面

に平行に強制的に変位（撓動）させる問題へと進むことを考慮し、圧子が球の場合に加え、剛体圧子が円柱の場合を扱う。

問題AはHertzの弾性接触問題の延長線上に位置付けられ、弾性ひずみと塑性ひずみが同じorderと考えられるもので、押し込みを進めると剛体圧子直下の内部に出現した塑性域が進展しやがて表面まで到達する。このとき内部に弾性coreを残すことなく圧子直下を塑性域で覆い尽くすものと予想される。本問題の主目的は弾性coreが消滅することの確認である。以下の問題Bのように大きな押し込み量まで解くとき、比較的粗いmeshを用いると、表面に接している要素が最初から降伏する。もし弾性coreが永遠に残るのではあれば粗いmeshによる解析の妥当性が疑われかねないから、その根拠を確認しておこうとするものである。

参考までにHertz接触問題の弾性解の概略を表2に示しておく（問題設定者自身の別の著作物からの引用ゆえ記号が不統一のところあり）。

問題BはBrinell硬さあるいはMeyer硬さ試験のsimulationに相当する。Brinell硬さは押し込み荷重を除荷後の窪み（を球面と仮定して）の表面積で除した値、Meyer硬さは荷重を押し込み軸と垂直な面に射影した窪みの面積で除した値である。この問題に関連して、硬化率が小さければ窪みの外側に盛り上がり（種々の呼びかたがあるようであるがここではridgeと呼ぶ）が生じ、硬化率が大きければridgeは形成されないといわれていること、非硬化材ではどれほど押し込んでも平均面圧のupper limitはせいぜい3Y（Vickers硬さの場合2.8Y）であることなどが従来定説である。

表1 精度および計算効率の向上と機能拡大の研究項目

精度向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 板成形シミュレーション用シェル要素の改良</li> <li>● アダプティブ・メッシング法の確立</li> <li>● 接触摩擦条件の処理のアルゴリズムの確立</li> </ul>
計算効率向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 陽・陰解法の改良</li> <li>● 3次元用高能率要素開発</li> <li>● 演算のベクトル化・パラレル化</li> </ul>
機能拡大	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 対象材質の広範化</li> <li>● 構成式改良</li> <li>● 破壊予測法開発</li> <li>● 摩擦法則改良</li> <li>● 熱連成・流体連成</li> </ul>

表2 Hertz接触問題の弾性解の要約

	球と球の接触	円柱と円柱の接触（平面ひずみ） $\epsilon_y = 0$
①垂直荷重	$N_i = \frac{4E_a}{3R} a^{*3}$	$N_i = \frac{\pi E_a}{4R} a^{*2}$ (単位長さ当り)
②接触面上の面圧分布	$p = p_0 \left(1 - \frac{r^{*2}}{a^{*2}}\right)^{*0.5}$	$p = p_0 \left(1 - \frac{x^{*2}}{a^{*2}}\right)^{*0.5}$
③最大圧力	$p_0 = \frac{3N_i}{2\pi a^{*2}} = \frac{2E_a}{\pi R} a$	$p_0 = \frac{2N_i}{\pi a} = \frac{E_a}{2R} a \quad \epsilon_y = 0$
④対称軸に沿う応力分布	$\frac{\sigma_r}{p_0} = \frac{\sigma_z}{p_0} = \frac{1}{2(1+h^{*2})} - (1+\nu)(1-h^{*2} \text{ATAN}(1/h))$ $\frac{\sigma_t}{p_0} = \frac{1}{1+h^{*2}}$	$\frac{\sigma_z}{p_0} = 2h - 2 \frac{1}{1+h^{*2}} (1+h^{*2})^{*0.5}$ $\sigma_r/p_0 = -1/(1+h^{*2})^{*0.5}$ $\frac{\sigma_t}{p_0} = -2\nu((1+h^{*2})^{*0.5} - h)$

注) a: 接触半径（接触半幅）、 $p_0$ : 中心（対象面上）の最大圧力、\*はべき乗を表わす。

$$h = \frac{z}{a} \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \frac{1}{E_0} = \frac{1-\nu_1^{*2}}{E_1} + \frac{1-\nu_2^{*2}}{E_2}, \text{ 添字 } 1,2 \text{ は二物体を表わす。}$$

4. 1. 2 問題の記述

(a) 記号の説明

R: 剛体圧子の半径, a : 接触半径 (接触半幅)

E: 縦弾性係数  $\nu$ : ポアソン比 (0.3)

Y: 初期降伏応力  $H'$ : ひずみ硬化率

F: indentation load (節点荷重の合計)

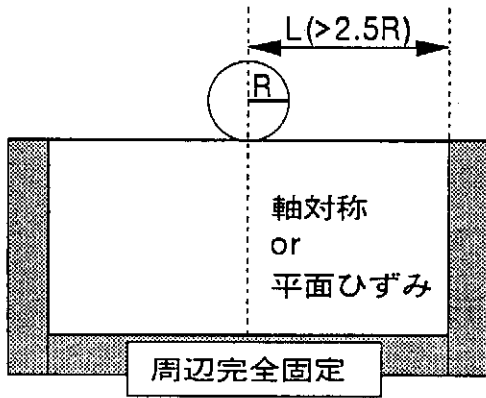
h: indenter travelling stroke

\* : 降伏開始の時の値に付ける superscript

(例、F\*は降伏荷重)

(b) モデル

正方形領域あるは四分の一の領域、周辺部はすべて両成分を固定とする。



節点総数: 500 ~ 600 程度

(モデル外形は円形としてもよい)

(c) 材料定数

非硬化材および直線硬化材の2ケースとする。

$$\bar{\sigma} = Y + H' \bar{\epsilon}^n$$

$$\frac{Y}{E} = 0.002, \nu = 0.3$$

$$\frac{H'}{E} = 0(\text{case 1}), \quad 0.05(\text{case 2})$$

(d) 接触面上の状態: 摩擦なし

(e) 問題A (Hertz弾性接触の延長線上の問題)の記述

球または円柱の剛体圧子を平らな弾塑性体に押し込んで圧子直下が表面まで降伏することを確認する。可能であれば弾性域が消滅する瞬間を捉える。圧子が円柱の場合は平面ひずみの条件で解析

する。

(f) 問題B (Brinell硬さ、Meyer硬さ試験のシミュレーション)の記述

問題Aと同じ条件であるが、圧子を  $h/R = 0.045$  まで押し込む。

出力は、 $h/R = 0.00125, 0.005, 0.02, 0.045$  とのところとする。可能であれば最後に圧子を取り除き残留応力を求めるものとする。

4. 1. 3 結果の出力仕様

問題A、Bとも解析を用いたmesh図を示す。以下、問題ごとに次のように指定する。

(a) 問題Aに関する出力

圧子直下の弾性域が消滅した瞬間を subscript Pで表すものとし

(1) 無次元接触半径  $a_p/R$ の値を求めよ。

(2) 無次元押し込み荷重  $F_p / (\pi a_p^2 Y)$ の値を求めよ。

(3) 無次元押し込み深さ  $h_p/R$ の値を求めよ。

(4) 塑性域を図示せよ。

なお、正確にその瞬間を捉えられない場合は、弾性域が消滅した後の最初の出力結果から読み取り、その旨注記する。

(b) 問題Bに関する出力

(1) 無次元の荷重変位曲線を求めよ。

$$F / (\pi a^2 Y) - h/R$$

(2) ridgeの検証: 指定された  $h/R$ のときの  $(z_{max} - z_0) / h$ の値を求めよ。ただし、zは表面上の節点の軸方向座標であり、 $z_{max}$ は表面上の節点の中の最大値、 $z_0$ は表面上で一番外すなわち解析領域の境界における節点の座標。盛り上がりがないければ、 $z_{max} = z_0$ である。

(3) 残留応力場3主応力ごとに、正の値(引張り)をとる領域があれば図示せよ。

(4) 塑性域を図示せよ。

4. 2 計算結果の考察

本ベンチマークテストに対し、以下の6名の委員及びその共同研究者から解析結果が報告された。

1. 伊藤耿一、松岡康司 (東北大学)

2. 加藤和典、金 大慶 (東京工業大学)
3. 後藤 學、山下 実 (岐阜大学)
4. 澤田孚夫 (東京農工大学)
5. 柳本 潤 (東京大学生産技術研究所)
6. 横内康人、錢 愛芬 (電気通信大学)

これらの解析結果は塑性力学分科会において逐次報告され、資料は詳細にデータを含んでいた。

必ずしもよい一致を示したとはいいがたい結果である。解析者の中で十分な検討がなされたものではなく、報告された資料から単純に数値を拾いあげ数値表の形にまとめたり、オーバープロットして解析者にフィードバックしたところである。以下に、代表的な三つの図を示す。いずれも無次元の荷重・変位特性である。本問題のように大部分の領域が弾性あるいはほとんど変形しない状態にあり局所的にごく一部分が塑性変形を起こす場合、はじめからある程度予想されるところであるが、剛塑性理論の苦手な問題となっていることを承知の上で結果を解析する必要がある。また、とりまとめの際の無次元化の手続きにおいても、ばらつきが拡大しやすい形になっているとの意見があり、検討を進めているところである。

## 5. むすび

日本塑性加工学会塑性力学分科会の共同研究として、高度に非線形の塑性変形問題として剛体球/円柱の押込みのベンチマークテストを行うとともに、「塑性加工の数値シミュレーションの高機能化」に関する研究を開始した。本研究を助成された天田金属加工機械技術振興財団に深謝します。

## 参考文献

- 1) 川井謙一：塑性と加工、32-364 (1991), 553.
- 2) 川井謙一：塑性と加工、32-364 (1991), 560.
- 3) 川井謙一：塑性と加工、32-367 (1991), 956.
- 4) 川井謙一：塑性と加工、32-369 (1991), 1212.

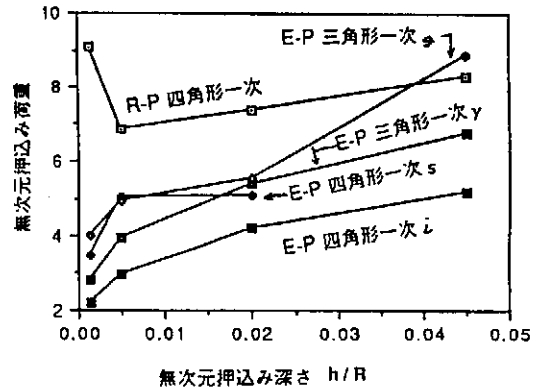


図1 剛体球押込みの荷重変位線図 (硬化材)

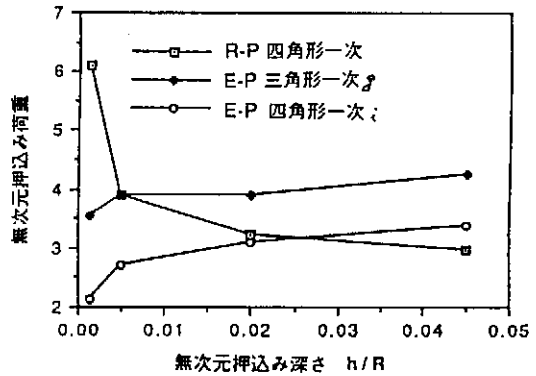


図2 剛体球押込みの荷重変位線図 (非硬化)

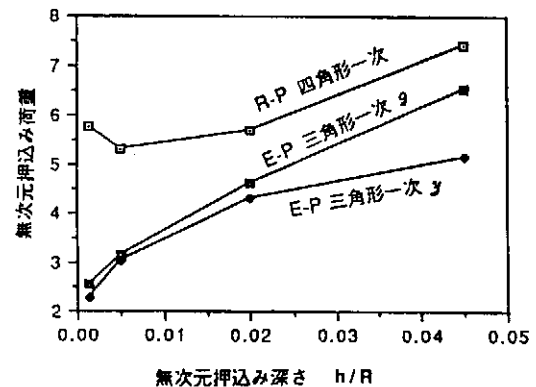


図3 平面ひずみ円柱押込みの荷重変位線図 (硬化材)