

板材成形加工における数値解析の現状

仲町 英治*

Eiji NAKAMACHI

State of Numerical Analysis for Sheet Metal Forming

1 はじめに

板材成形加工の数値解析の目標は、成形加工における材料の変形、ひずみおよび応力を解析し、成形不良予測および成形性評価を行うことで最適な材料および成形加工工程を設計することである。この目標に向けて、最近の板材成形数値解析技術は急激な発展を遂げつつある^{1)~4)}。

現状のコンピュータ援用の板材成形技術は、

- (1) 解析過程—材料・摩擦の物理モデルの精緻化を主テーマとする数値解析手法—
- (2) 創造過程—CAD/CAM/CAE/CG技術の複合・統合化技術としての生産工程最適設計手法—

の高度化・高機能化が基本課題となっており、ここでもこの2点を主な話題とする。さらに、板材成形では、しわ・スプリングバックなどの応力に関係する不安定変形・残留応力評価などが主要な課題となることが多いことから弾塑性有限要素解析を主に取り上げる。

2 数値解析の進歩²⁾

従来、板材成形数値解析は、材料および幾何学非線形に加えて、接触非線形を含むために、実験結果との一致を得ることが困難とされてきた。数値解析の歴史的推移を要約するとつぎのように言える。1975-1980年は、黎明期であり、球頭ポンチによる張出しおよび絞り問題の静的陰解法および陽解法、弾塑性および剛塑性有限要素解析手法の開発が試みられた。単純な境界条件下での解析であった。1980-1985年は、解析手法に画期的な展開は見られず、応用技術としての有限要素解析技術の進歩がみられた。弾塑性、Updated Lagrange定式化、膜体近似、クーロン摩擦則が定着し、ほかに、材料モデルとして、速度効果を考慮した剛粘塑性・

弾粘塑性モデル、熱の影響を考慮した熱粘弾塑性モデル、構成式の修正モデルとして、移動硬化、ボイド成長生成、後藤の高次降伏関数(J2G)、J2コーナーなどの材料モデルが採用された。単純な形状の工具による張出しおよびしぼり成形が安定して解けるようになった。1985-1990年は、殻体近似の改良、接触アルゴリズムの改善、非線形解析法の進歩などの数値解析技術の飛躍的な発展と、コンピュータの能力向上およびCADの浸透により複雑形状の成形シミュレーション結果が見受けられるようになった。1989年の生産加工数値解析に関する国際会議“NUMIFORM'89”において、衝撃問題の解析に用いられてきた動的陽解法有限要素法がオイルパンの絞り問題に適用されしわ変形の記述が可能であることが発表された⁵⁾。1990年代に入り、静的および動的陽解法弾塑性有限要素法による複雑形状工具による板材成形シミュレーションが多くみられるようになり、実用化の段階を迎えた。CAD/CAE/CAMシステムにこの加工シミュレーション・モジュールを組み込みコンピュータ仮想空間内で生産を実現する。仮想生産(Virtual Manufacturing)・仮想工場(Virtual Factory)が21世紀に向けてのキーテクノロジーと言われるに至った。

3 数値解析の現状

材料・摩擦の物理モデル、複雑形状工具・絞りビード・板材形状などの幾何学境界条件、さらには機械プレス・油圧プレスなどの力学境界条件は得られる解に大きな影響を及ぼす。現状では、高次非線形の3次元板材成形問題を安定して解くことに成功したシミュレーション手法は陽解法有限要素法

- (1) 静的陽解法: ROBUST, ITAS-3D
- (2) 動的陽解法: PAM-STAMP, LS-DYNA, ABAQUS/Explicit, OPTRIS, RADIOSS

平成5年5月7日受付 平成5年7月2日受理 (Received on May 7, 1993; Accepted on July 2, 1993) (依頼解説)

* 大阪大学・工学部助教授 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

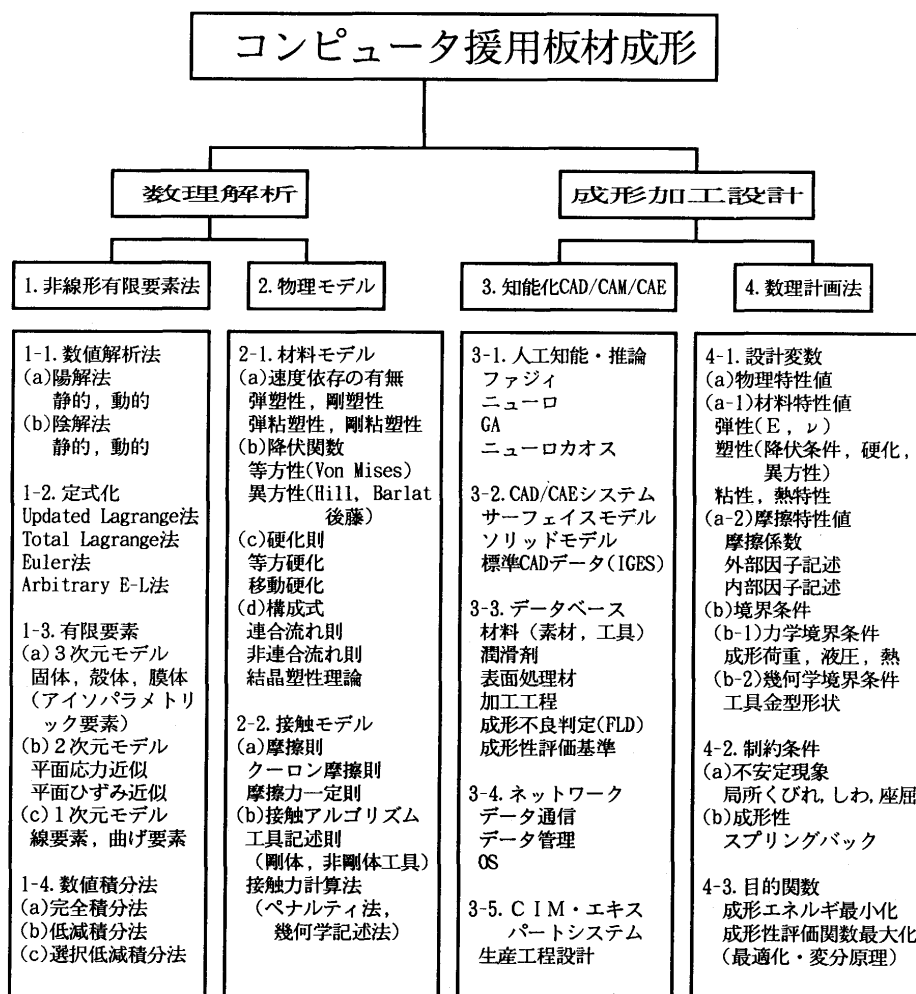
Key words: sheet metal forming; finite element simulation; elastic-plastic; numerical analysis; CAD/CAM/CAE; process optimization; formability; FLD; wrinkle; spring back; virtual factory.

と言える。解の信頼度が最も高い陰解法有限要素法(MARC, ABAQUS, NIKEなど)は、接触境界の高次非線形性のために収束解を安定して得ることが困難であり、実用化の面から生産現場での利用には至っていない。

1991年および1992年に開かれた板材成形加工問題の数値解析に関する国際会議で発表された解析結果によって現状を概説する^{6)~9)}。とくに、1991年5月のスイスのチューリッヒでの“NUMISHEET '91:自動車産業における板材成形過程の3次元有限要素シミュレーション国際会議,”⁶⁾では、数理モデルおよび加工工程設計についての先駆的な発表がみられた。図1は、Aoh, H. & Nakamachi, E.らの静的陽解法殻膜弾塑性有限要素法(ROBUST)による自動車リヤフロアパンの成形解析結果である¹⁰⁾。第1段階:CADからのオリジナルデータを用いた成形シミュレーションでは“破断”(図1(a))が生じた。第2段階:絞り込みを容易にするオープンドロウ成形を行ったところ“しわ”が生じた(図1(b))。第3段階:金型形状の修正,プレス押圧の修正,および絞りビードの設定をCAD上で実現し,最適な加工工程を技術者の経験に基づいて決定し,シミュレーション結

果をFLD(成形限界線図)によって検討して成形が可能であることを確認した(図1(c))。以上の“ROBUST”による仮想生産の検証のための実験を行った結果を,第1段階(図1(d)),第2段階(図1(e)),および第3段階:実際の成形加工(図1(f))について示す。かなりの精度で実験結果をシミュレートできることが示された。図2には,図1と同じ問題を動的陽解法弾塑性有限要素法(OPTRIS; Dynamic Software)によって解析した結果である¹¹⁾。成形途中および終了後のシミュレーション結果を示す。図1および図2ではCG出力がシミュレーション結果の検討に強力な道具となることがわかる。この試みは,金型の最適形状と加工のプロセスをコンピュータ上で仮想実現し,現実の生産に移行した自動車産業では画期的な試みとして評価された。1992年においては,市販の動的陽解法プログラム(PAM-STAMP, OPTRIS, LS-DYNA, ABAQUS-explicit, RADIOSなど)による板材成形シミュレーションが自動車産業および鉄鋼産業において活発に行われるようになった¹²⁾。図3は, PAM-STAMP(仏ESI社)によるフロントフェンダーおよびドアインナーの成形シミュレーション結果であ

表1 板材成形における数値解析の分類



1991年

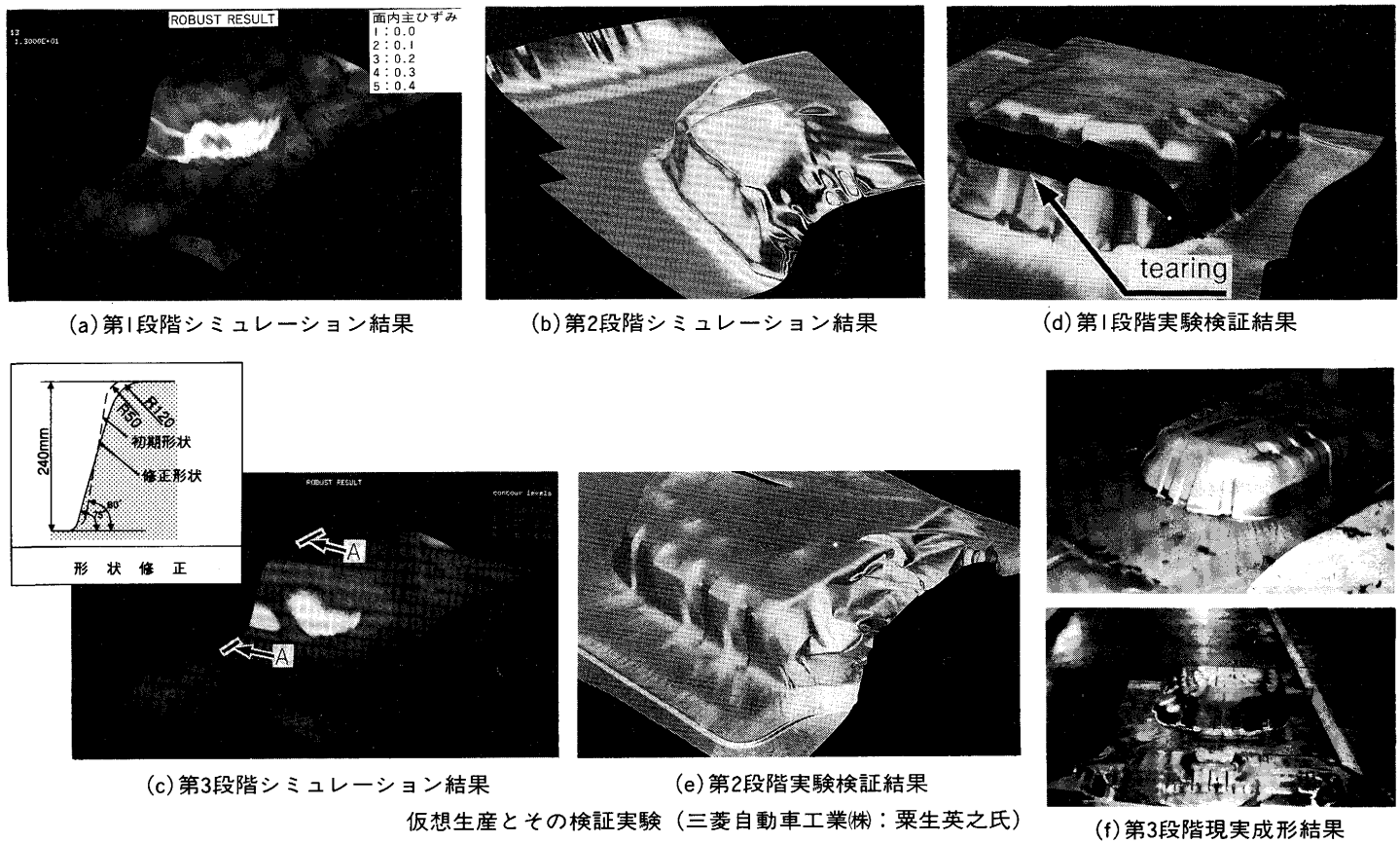


図1 静的陽解法弾塑性有限要素法 (ROBUST) による解析と実験との比較¹⁰⁾

1991年

主ひずみ

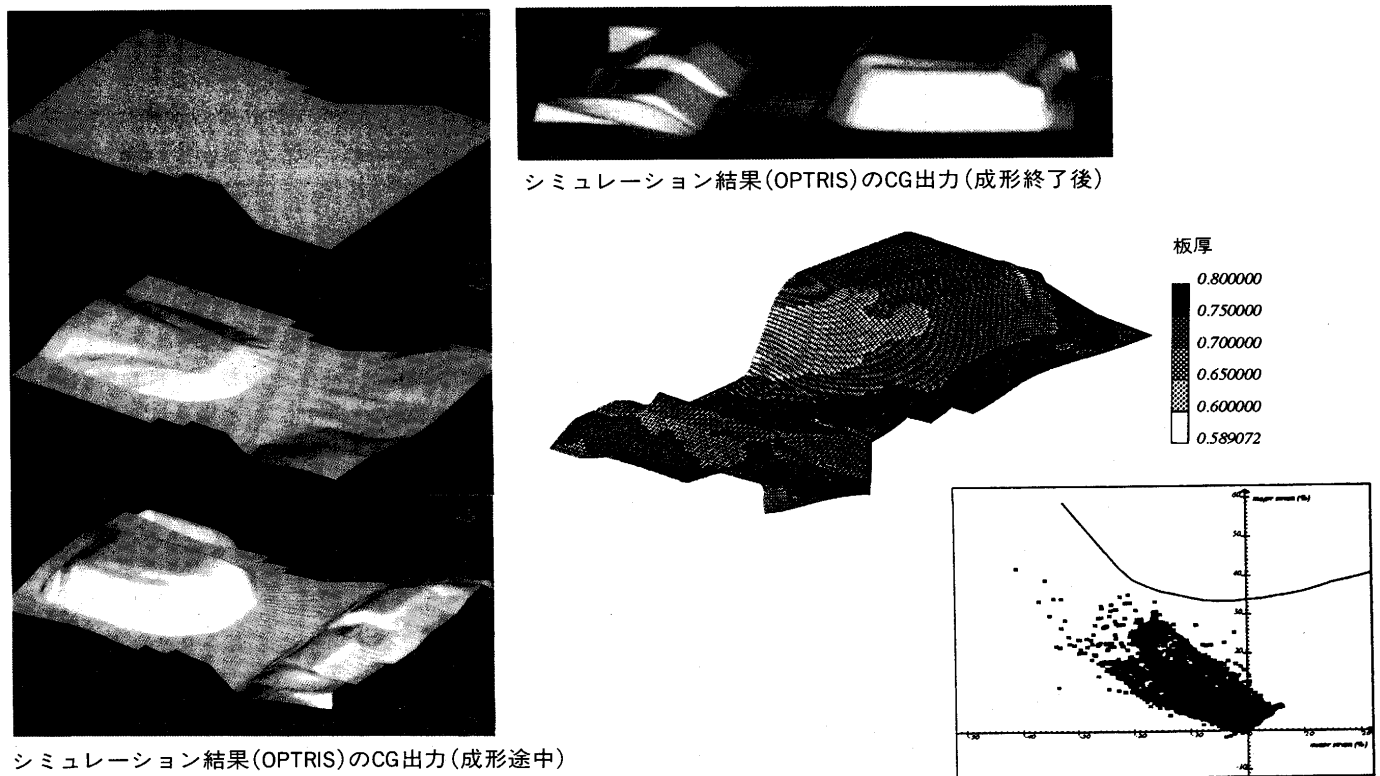
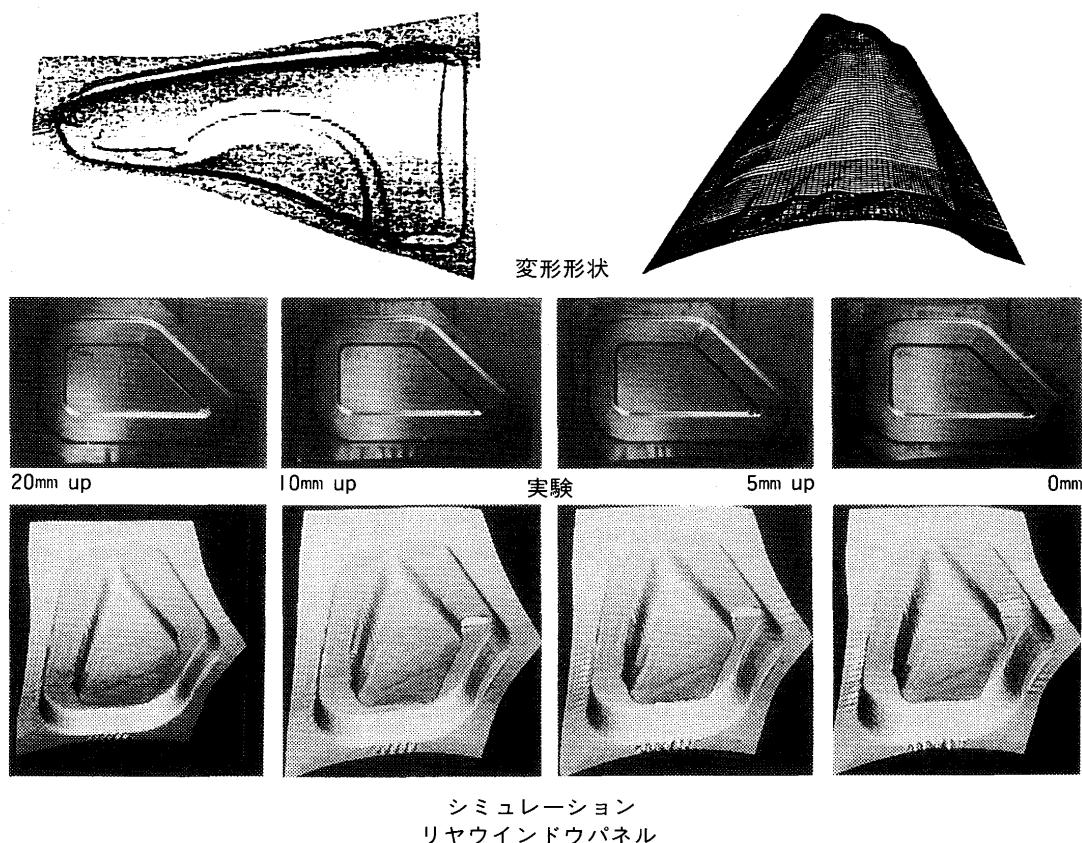


図2 動的陽解法弾塑性有限要素法 (OPTRIS) による解析¹¹⁾

1992年

図3 動的陽解法弾塑性有限要素法 (PAM-STAMP) による解析¹³⁾

る¹³⁾¹⁴⁾。PAM-STAMPは、材料モデルとしては、Hillの異方性降伏条件式およびMaziluによるICT塑性モデル、さらにCowper-Symondsのひずみ速度依存を考慮している。摩擦モデルとしては、外部状態変数表示式を用いた修正クーロン摩擦則を採用している。絞りビードモデルとしては、絞り抵抗力のパンチ進行に対する変化の実験観察結果をシミュレーションに利用することで、実成形をより正確に把握できることを示した。FLDによる破断予測、CG出力によるしわ観察によって現象を把握し、最適設計を実現した。図4はKawkaおよび牧野内らの静的陽解法・弾塑性有限要素プログラムITAS-3Dによる角筒絞り解析結果を示す。殻有限要素しわ変形に関して実験結果と良好な一致を示すことが分かる¹⁴⁾。動的陽解法有限要素法の持つ絶対的な優位性は、連立方程式を解かないために数十万の有限要素による板材のモデル化と高速演算処理が可能であり、さらにはパラレル化が予想されるワークステーションの進歩に適応することが可能である点である。現状では、増分ステップ数を減少させるために準静的問題を動的に解く、つまり、実際の成形スピードの数倍から100倍程度以上のパンチ進行速度によって計算を行うことが要求されており、計算時間短縮と実時間での現象との対応の検討が要求されている。

図5には、1991年にドイツ機械学会 (VDI) が主催した複雑形状金型工具による板成形シミュレーションのベンチマ

ークテスト結果の比較を示す。(チューリッヒの工科大学ETHのJ.R.Reissner教授が文献6の国際会議に並行して行ったFEMプログラムのコンペティション) 図5(c)に示す線C上の板厚ひずみ分布の比較から、それぞれのFEMプログラムが相違は認められるものの実験結果にかなり近い値を示すようになってきたことが確認された。

4 数理解析モデル

実用化の段階を迎えたと記したが、現状では、加工中に発生する破断あるいはスプリングバックを正確に把握するまでに至っていない。表1に示した材料・摩擦の物理モデルが完成したとは言えない。有限要素プログラムに比較的容易に組み込むことのできる材料・摩擦の物理モデルの構築が要求されている。そこで、角筒あるいは球頭のポンチなどの単純形状工具による張り出しおよび絞り変形の解析とその実験との比較によって、提案された材料・摩擦モデルの検証が行われたので紹介する。

(a) 材料モデル¹⁵⁾

材料モデルの確立は古典的課題であり、且つ永遠の課題ともいえる。現在、結晶あるいは分子レベルからの材料モデル化の試みがなされているが、板材成形数値解析の分野で成果を得るまでに至っていない。塑性ポテンシャル理論に

1992年

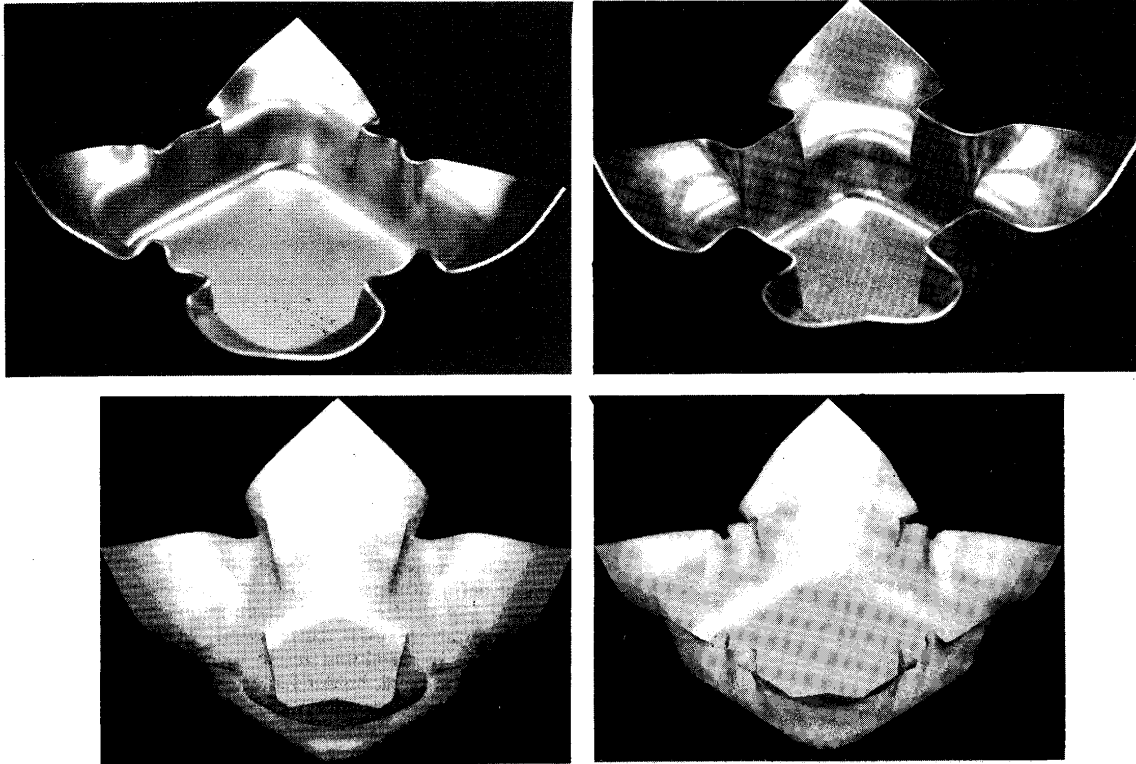


図4 静的陽解法弾塑性有限要素法 (ITAS-3D) による解析

1991年

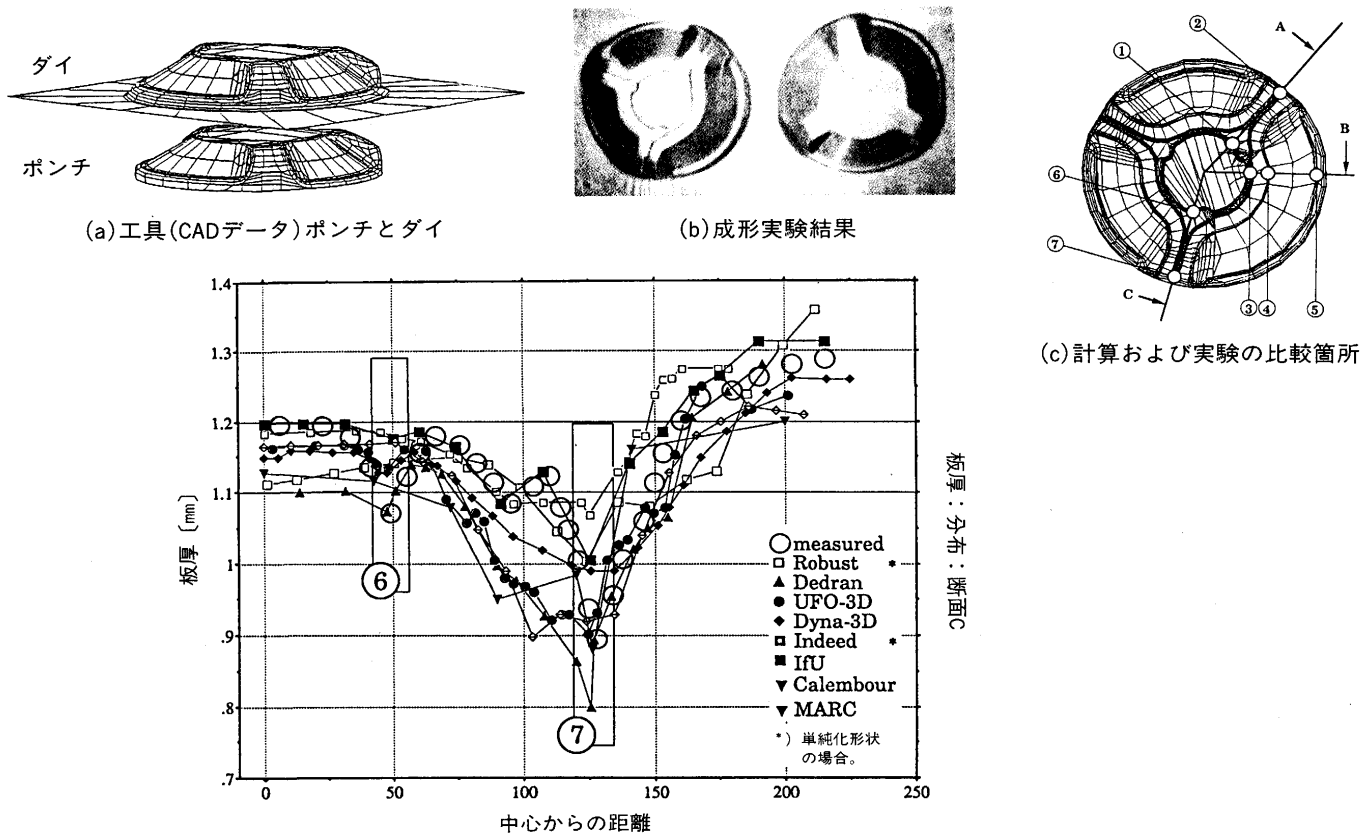


図5 ドイツ機械学会主催のベンチマークテスト結果⁶⁾

基づくマクロなモデル(連続体)による解析が主流である。板材がその圧延成形時に異方性を持つことから生じる初期の異方性降伏曲面の記述,さらには成形加工中の誘起異方性を記述するための後続降伏曲面の定式化が最大の課題である。現在ではHill(6パラメータ),後藤(8パラメータ)¹⁶⁾およびBarlat(4パラメータ)¹⁷⁾の異方性塑性材料モデルが良く用いられている。構成関係式は,塑性ひずみ速度ベクトルが塑性降伏曲面の法線方向に生じるとする流れ則が一般に良く用いられるが,材料のくびれあるいはしわの発生,つまり塑性不安定問題の解析のためには,塑性ひずみ速度ベクトルが塑性降伏曲面接線方向にも生じるとする非法線則,たとえば後藤の“J2N”モデル,の採用が必要となる¹⁸⁾¹⁹⁾。図6に示す岩田による後藤の4次異方性降伏関数および非法線則を用いた角筒絞り解析とその実験との比較は,局所くびれ判定を成形シミュレーションに導入した例として評価される²⁰⁾。筆者は,1989年にBarlatにより提案された異方性降伏関数を用いた異方性板材の角筒絞り解析を行い,図7に示すように非対称ひずみ分布を得た²¹⁾。図8には,Dawsonらが行った結晶塑性モデルによる液圧バルジ解析結果を示す²²⁾。変形と共に回転する結晶格子に関する情報も示されており,今後はこの種のミクロ構造を反映した解析が増加すると考えられる。

(b) 摩擦モデル

材料と同様にクーロン摩擦則に代表される古典的な理論が現在も主流である。しかし,最近,摩擦抵抗力を垂直力,摺動速度,潤滑粘性,さらには板材の変形,ひずみ,相対す

べり量などを状態変数として外部関数表示する手法²³⁾,および,流体潤滑,境界潤滑および固体接触に分類した上でせん断抵抗力を直接得る内部関数表示法²⁴⁾などを採用して板材成形をシミュレートする試みが見受けられるようになってきた。接触抵抗力を塑性構成式と同様に接触接面上の滑り速度ベクトルと関係付ける摩擦構成則の利用も見られる²⁵⁾²⁶⁾。摩擦モデルも材料モデルと同様にミクロ構造の観察(マイクロトライボロジー)が進んでいるが,ミクロな観察結果がシミュレーションに利用できる形式,つまり数式

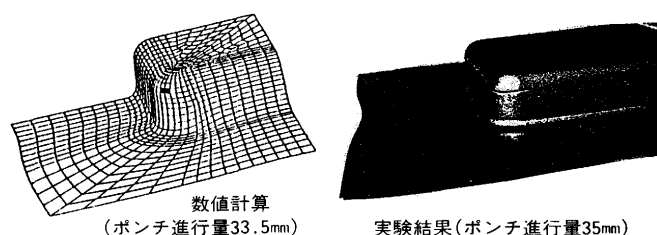


図6 JNIKEによる角筒絞り破断の解析結果と実験結果との比較²⁰⁾

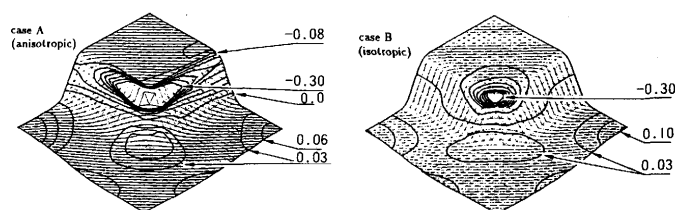
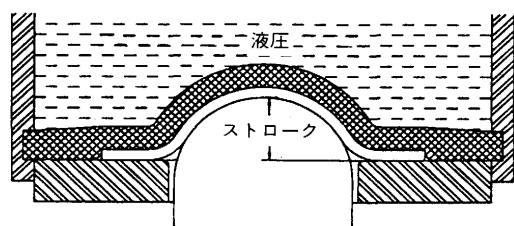
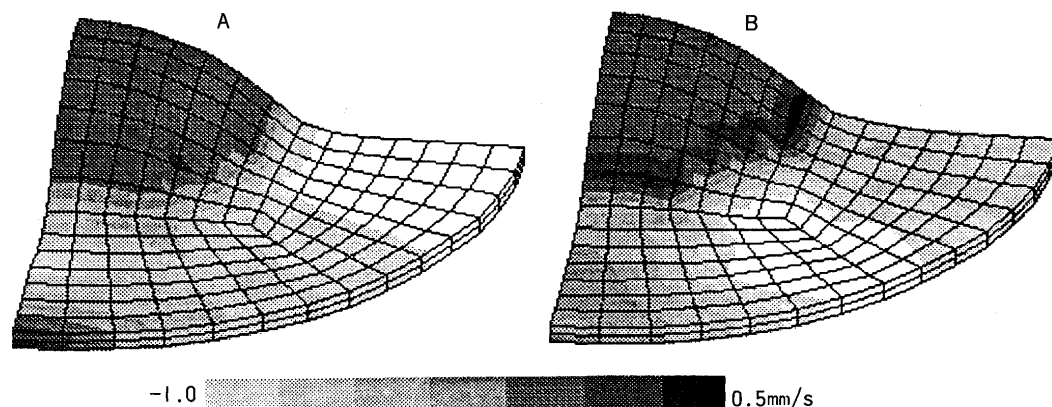


図7 Barlat異方性塑性材料モデル²¹⁾による角筒絞り解析結果

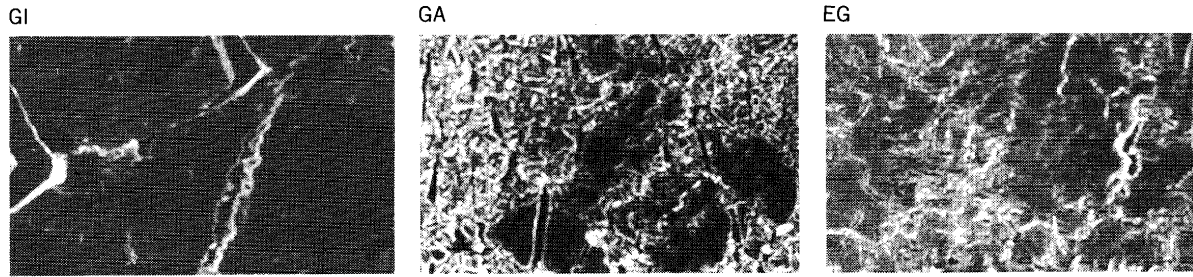


シミュレーションに用いた初期組織の(111)極点図 -A)圧延組織 B)立方組織



半径方向速度(3秒後)-A)圧延組織-B)立方組織

図8 結晶塑性モデルによる円板の絞り問題の解析結果²²⁾



20%引張りひずみでの表面処理層の割れ状態のSEM観察結果

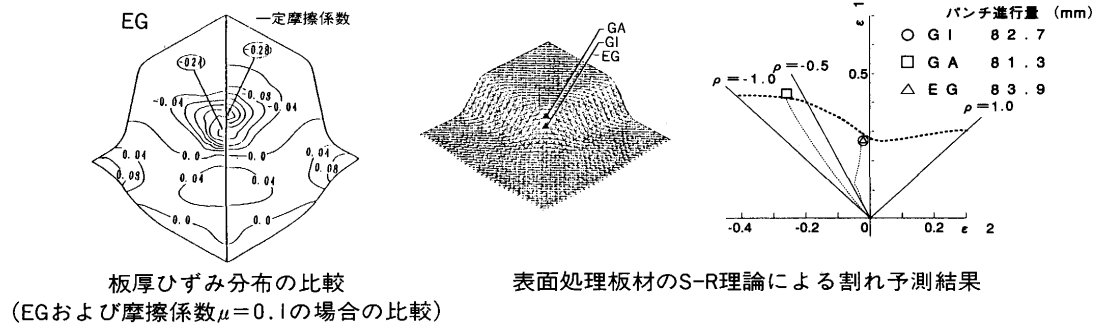


図9 表面処理板材の角筒絞りの割れ予測解析結果²³⁾

表示されるまでには至っていない。今後、実験観察がすみデータベースの構築が進むであろうが、成形シミュレーションに利用できる形式でデータが蓄積されることが必要である。筆者は自動車用表面処理板材 (GI, GA, EG) に対して、表面処理による摩擦特性の変化を実験に基づいて板材のひずみおよび接触摺動量によって関数表示し、図9に示すように角筒絞りにおけるS-R理論に基づく破断の相違を検討した²³⁾。

して今後さらに適用領域を拡大展開するものと考えられる。

文 献

- 1) プレス成形難易ハンドブック (薄鋼板成形技術研究会編), (1987), [日刊工業新聞社]
- 2) 富田佳宏: 数値弾塑性力学, (1990), [養賢堂]
- 3) 仲町英治: 塑性と加工, **30** (1989), p.187
- 4) 仲町英治: 塑性と加工, **31** (1990), p.311
- 5) E.G.Thompson, R.D.Wood, O.C.Zienkiewicz and A.Samuelsson: NUMIFORM89, Numerical Methods in Industrial Forming Processes, (1989), [A.A.BALKEMA]
- 6) VDI BERICHTE: FE Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes in the Automotive Industry, (1991), [VDI VERLAG]
- 7) D.R.J.Owen, E.Oñate and E.Hinton: Computational Plasticity, (1992), [Pineridge Press]
- 8) S.Chengxu: Proc. of 17th IDDRG Biennial Congress, Advanced Sheet Metal Forming Technology, (1992)
- 9) J.-L.Chenot, R.D.Wood and O.C.Zienkiewicz: Numerical Methods in Industrial Forming Processes, NUMIFORM92, (1992), [A.A.BALKEMA]
- 10) H.Aoh and E.Nakamachi: 文献6), p.357
- 11) F.Aberlenc and J.-L.Bebeau: 文献9), p.397
- 12) K.Schweizerhof and J.O.Hallquist: 文献6), p.405
- 13) F.El Khaldi, S.Aita, L.Penazzi, T.Tamada, T.Ogawa, S.Tasaka and O.Horie: 文献8), p.213, p.262
- 14) M.Kawka and A.Makinouchi: 文献9), p.491
- 15) 橋口公一: 最新弾塑性学, (1990), [朝倉書店]
- 16) M.Gotoh: Int. J. Solids Structures, **21** (1985) 11, p.1
- 17) Barlat, L. and Lian, J.: Int. J. Plasticity, **5** (1989), p.51
- 18) 後藤 学: 機論, **55** (1989) 518(A), p.2080
- 19) 仲町英治: 機論, **58** (1992) 549(A), p.753
- 20) N.Iwata, M.Matsui and M.Gotoh: 文献7), p.1311
- 21) E.Nakamachi and R.H.Wagoner: 文献7), p.1263
- 22) P.R.Dawson, A.J.Beaudoin and K.K.Mathur: 文献9), p.25
- 23) 仲町英治, 駒田 淳: 機論, **58** (1992) 551(A), p.1228
- 24) W.R.D.Wilson and L.G.Hector: J. of Tribology, **113** (1991), p.659
- 25) 瀬口靖之, 進藤明夫, 富田佳宏: 塑性と加工, **14** (1973), p.796
- 26) P.Wrigger and C.Miehe: 文献7), p.325
- 27) K.Chung and O.Richmond: 文献9), p.455
- 28) Y.Q.Guo, J.L.Batoz, M.El Mouatassim and J.M.Detraux: 文献9), p.473

5 おわりに

表1に示した板材成形加工設計に関する研究はまだ少なく、具体的な成果を紹介できなかった。しかし、材料・生産工程に関するデータベースおよび有限要素シミュレータを用いることで、成形限界および要求される成形性を制約条件として目的関数を最適化する非線形数値計画法の開発が進むと考えられる。成形過程を最少のエネルギー消費で実現するための理想成形加工工程を逆解法有限要素法によって求める手法を開発することも課題のひとつであり、いくつかの試みもある²⁷⁾²⁸⁾。

現在, CAD/CAM/CAEの構成モジュールごとに機能の高度化が進んでおり、それを繋ぐ巨大なネットワークが実現しつつある。コンピュータのダウンサイジングによるハードウェアの高機能化が著しいが、数値解析技術はスーパー・パラレルコンピュータからワークステーション、パソコンに至る階層的なコンピュータの利用を可能にするネットワーク技術、および人工現実の世界を仮想空間上に実現するコンピュータシミュレーション技術の両者の発展を背景に