

非線形構造力学

Non-linear structural mechanics

主任研究員：小川清六

分担研究員：小松定夫 楯列俊夫 小堀修身 太田 修 前川佳徳

本年度の中間報告をまとめると、コンピュータシミュレーションが4件、調査研究、実験的研究がそれぞれ1件である。一般に工学部系の研究は、実験的研究、理論的研究、調査研究に分けることができるが、非線形構造力学の研究組織の特徴として、コンピュータシミュレーションがある。特にコンピュータの演算高速化、ワークステーション級コンピュータの普及を考えると、この分野の研究がますます重要になってくることは容易に想像できる。

内容的には、高強度鋼材または高張力鋼板が開発され、船舶、自動車ボディ、ドアパネル、フェンダー、トランクリッドらの外板、橋梁、長大化構造物らの軽量化を目的として、従来よりも薄肉または部材断面形状の小寸法の高強度鋼材が使用されてきている。それに伴って、種々の問題が生じてきている。

一つは溶接上の問題である。高強度鋼は溶接施工が困難であり、高度の溶接施行技術が要求される。この溶接上の問題を緩和したTMCP鋼（Thermo Mechanical Control Process Steel）の開発によって著しくその問題は改善された。しかしTMCP鋼を船体部材として使用したとき、3～4年の就航で、従来の材料とは異なった亀裂が生じて、応力集中、船体としての構造上の応力分布らの一層の研究が必要となってきている。

一方、高強度鋼が自動車外板に用いられるとき、走行に対するガソリンの省エネを目的として、従来よりも薄板の高強度鋼を用いても強度的には問題はない。しかし、自動車外板がプレス加工によって成形されるとき、板厚が薄いため成形が困難で、成形中材料が破断したり、製品にしわが生じたりする。自動車外板のプレス金型のダイス、ポンチの製作費は莫大で、加工中、しわ破断が生じたために金型を修正、または再製作するのはコスト、製作期間の点からできるだけ避けたいことである。この問題を設計段階で予測、あるいは対策をとるべく、種々のコンピュータシミュレーションが試みられている。

また、高強度鋼を長大化構造物に適用するとき、部材の薄肉化によって圧縮強度、曲げ強度が低下し、局部挫屈を起こし、崩壊する場合がある。これは安全対策上重要な問題であり、強度設計を保証するためには、大型模型による破壊実験、またはコンピュータによる複雑な構造解析が必要となる。

このような鋼構造重量骨組の限界点および限界後の挙動に対して、対象骨組み構造物の一部の梁に局部的過荷重が漸増的に負荷される場合、負荷が作用する梁の局部的崩壊にとどまらず、骨組全体の崩壊をも生ぜしめる極めて危険な状態もありうることを、コンピュータシミュレーションで見い出している。

非線形解析は構造物の強度に対するシミュレーションと、材料が大変形するときの変形シミュレーションの二つに大別できる。特に、後者は材料非線形はもちろんであるが、さらに材料の形状が大きく変化する幾何学的非線形であり、ときには境界条件が刻々と変わる境界非線形問題である。素材がある形状に加工されるときシミュレーションとして、冷間鍛造加工を取り上げた。冷間加工の金型の強度、寿命を検討するために、CAEシステムを用いて前方押し加工の解析を行っている。さらに、ブロー成形、真空成形など、熱可塑性樹脂板を高温（170℃）で加工するときの成形過程を粘弾性／粘塑性有限要素法を適用したコンピュータシミュレーションによって解析し、成形後の残留応力、そり変形の予測を検討している。

実験研究としては、材料にかかる応力または残留応力を材料を破壊せずに測定する方法として、超音波法を取り上げた。この手法は、これまでに一般に金属について音弾性効果がいくつ報告されているが、セラミックスについては殆どなされておらず、マシナブルセラミックスについて本年度は実験し、音弾性定数はアルミニウムのそれと類似していることがわかった。

以上、長期的共同研究の初年度としては、各分担研究の進行状況は順調であり、3－4年のでかなりの研究成果が期待できるものと思われる。 楯列俊夫（工学部）

分担研究報告

溶接構造物の強度と変形

小川清六（工学部）

研究の目的

溶接構造物の軽量化要求に伴う高強度材（高張力鋼）の使用による溶接構造物（船舶、橋梁等）の強度と変形挙動を明らかにすることを目的としている。

中間報告

船舶、橋梁等の溶接構造物の軽量化の要求が高まるにつれ、高張力鋼の使用が盛んになっている。

構造物の軽量化のためには使用鋼材の降伏応力ないしは引張強さを高めれば部材断面が減少するからその結果、目的を達成することが可能となる。しかし断面減少による剛性の低下により線形力学に基づく構造物の強度上予期し得ない種々な問題をしばしば発生している。

溶接構造物の軽量化を目的として従来から調質型高張力鋼が使用されていた。しかしこの種の鋼材は、工作上的溶接性の難点から溶接施工が非常に難しく、高度な施工技術を要求されてきた。

近年その溶接施工上の問題点を緩和した TMCP 鋼（Thermo Mechanical Control Process Steel）の開発により溶接施工上の難点が著しく改善されてきた。

しかし、溶接構造物への TMCP 鋼の採用により、特に VLCC（スパータンカー）の船体に

多数の損傷が発見され問題となっている。

これらのき裂損傷の発見された時点までの平均就航年数は、3～4年であり、いずれも溶接継手部に発生した疲労き裂である。

本研究で収集した多数の損傷に関するデータの解析結果から損傷原因は、つぎのように推定される。

- (1) 静強度に対する軟鋼の許容応力に高張力鋼（TMCP鋼）係数をかけて部材寸法を低減した場合、局部の応力集中緩和に対して特に配慮しない限り、局部変動応力が軟鋼の場合より高くなる。
- (2) 高張力鋼（TMCP鋼）の多用による溶接構造物（船の縦通肋骨端部）の剛性低下により2次的な変動応力が大きくなる。
- (3) 実験室における単純な疲労試験片により得られた高張力鋼（TMCP鋼）の疲労強度と実船の疲労損傷が発生した縦通肋骨の溶接継手部の疲労強度とは異なる。
- (4) 想定している最大荷重に対して変動荷重が比較的大きい比率を占めるような部材では、端部の応力緩和に特に配慮する必要がある。疲労は、局部的な応力振幅が支配されるから端部の疲労強度は著しく低下する可能性がある。

以上のような観点から、本研究では、現在までの調査結果に基づき、先づTMCP鋼の母材ならびに溶接継手の疲労特性を来年度以降から詳細に検討する予定である。

弾塑性増分理論による応力、ひずみ解析

楯列俊夫（工学部）

研究の必要性および目的

金属材料の塑性変形を解析するためには、弾塑性または剛塑性増分理論が用いられる。しかしその手法は一様でなく、材料、ダイス、ポンチの形状によって、その都度適当な方法を考えなければならない。

現在、金属板材をプレス加工によってコップ状容器に成形するときの応力、ひずみ解析を行っている。自動車のボディー、フロントパネル、ドアパネルなどの複雑な形状のプレス加工では、製品にしわ、破断が生じるトラブルがある。その対策はトライアンドエラー法であり、しわ、破断が生じると少しダイス、ポンチの形状を変えて再度トライして、少しずつ修正していく方法が取られている。しかし、ポンチ、ダイス型の製作費が高価であるため、ポンチ、ダイス型の設計段階で、弾塑性または剛塑性理論によるコンピュータシミュレーションによって、しわの発生、破断を予測しようとする動きがある。この解析は材料が降伏後加工硬化する、いわゆる材料非線形であり、かつ材料の形状が刻々変化する幾何学的非線形問題である。

一般には、市販の板成形有限要素法シミュレーションソフトが用いられているが、満足な結果が得られないのが現状である。このような観点から、しわの発生、破断に対して、より実用

的でかつ効果的なシミュレーションソフトが要求されている。

研究経過としては、最も簡単な形状である、円板から円筒容器を製作する円筒深絞りまたは張り出し変形に対するシミュレーションを行った。材料がダイス肩を通過するとき、材料が曲げ、曲げ戻しを受け、材料の性質が板厚方向に分布する。このプログラムはその板厚方向の材料性質の分布の効果も考慮している。また変形中のボディーしわの発生の原因である円筒方向応力も計算できるため、実加工または実験結果を考察するのに有効に利用できる。板材プランクの大きさ、ダイス、ポンチ間のクリアランス、ダイス、ポンチ肩の曲率半径、しわ押え力など多くのパラメータがあり、これらのパラメータの変化によって成形性が左右され、幅広いパラメータの違いの組合せに対して計算する必要があり、計算時間の短いことが重要となる。絞り込み完了までを約700ステップに分割して計算しているが、オハイオ州立大学のスーパーコンピュータ、クレイを用いれば700ステップの計算のcpuタイムは5秒程度である。

鋼骨組の弾塑性安定問題

太田 修 (工学部土木工学科)

研究の必要性および目的

鋼構造重量骨組の限界点および限界後の挙動に関する既往の研究は、一般論的立場から極限点型と分岐点型に分類できる。分岐点型の研究としては、対称形状を持つ骨組に対称な比例漸増荷重群が作用する場合の対称分岐挙動を扱ったものがほとんどである。以上の分岐点型の研究に対して、定鉛直荷重の作用する対称骨組内の一部の梁に局部的過荷重が漸増载荷される場合、過荷重の作用する周辺部に生じた過大な変形がその部分のみの崩壊に留まらず、延いては骨組全体の崩壊をも生ぜしめる極めて危険な状況もあり得ることが、数値解析研究において見出され、局部的過荷重载荷梁のケーブル作用に起因して生じる全体的な崩壊挙動は腰くびれ横ゆれ型と分類された。特に不均等な定鉛直荷重が作用する場合の終局状態に至るまでの挙動について、「一定軸力下で同一の制御点変位増分に対して、複数の異なる変位増分モードが存在し得る」という条件で特徴づけられる一対の腰くびれ横ゆれ型の全体的崩壊挙動が実験研究で示された。非対称因子としては定鉛直荷重の不均等性の一種類だけであったにもかかわらず非対称分岐点の存在を想像させる。

一定荷重郡および比例漸増荷重群が同時に作用する2パラメータ载荷系において生じる臨界現象を解明することは、従来主として採用されてきた1パラメータ系に比べて载荷系が現実的であるという実際上の意味に加えて、1パラメータ系の分岐とは異なる分岐挙動を解明するという理論的意義もある。構造物や荷重系に何等の非対称因子が混入すると、弾塑性域の挙動は非常に複雑な様相を呈する。現実の骨組においては何等かの非対称因子が含まれている方が一般的であるから、非対称系の挙動特性を特に臨界点近傍および臨界点後の過程に着目して、更に解明することは重要な課題である。

2層1スパン鋼骨組の左右の第2層柱頭に不均等な定鉛直荷重を作用させた後、1層梁中央点鉛直変位を漸増させる数値解析を、定鉛直荷重をパラメータとして、1次元複合非線形有限要素法を用いて行う。数値解析によって得られるであろう特定の崩壊モードを呈する骨組に対して、鋼骨組模型による実験を行う。

分担研究課題の中間報告

数値解析において、終局的に高軸力側柱の方向に横ゆれする新しい腰くびれ横ゆれ崩壊挙動を見出した。現在、進行中である。実験研究も現在進行中である。

弾塑性／剛塑性有限要素法による鋼材の大変形シミュレーションおよび 粘弾性／粘塑性有限要素法による熱可塑性樹脂板の大変形シミュレーション 前川佳徳（工学部 情報システム工学科）

1. 研究の必要性および目的

高精度・高品質製品への要求は常に存在するが、対象製品の機能・性能評価のためだけでなく、最近では高精度・高品質製品実現のための成形検討に、非線形構造力学を応用した成形シミュレーションが広く用いられるようになってきている。

また、新しい素材の利用、新しい成形法の適用が増加しているが、この場合これまでに成形ノウハウの蓄積がないので、それを補うためのものとしての成形シミュレーション技術への期待が大きい。

上記成形シミュレーションに必要な手法は、材料非線形、幾何学的非線形、境界非線形を取り扱う、非線形性の強い構造解析手法であるが、それでも現実の現象を忠実に表現することは困難で、得られた解の信頼性が大きな問題となっている。

本研究の目的は、種々の成形シミュレーション手法を実際の成形に適用して、解析結果を常に実験結果で検証しながら、各成形シミュレーション手法の適用可能性と課題を明確にすることである。

2. 研究成果

本研究では、分担研究課題名に示すように、弾塑性／剛塑性有限要素法による鋼材の大変形シミュレーションおよび粘弾性／粘塑性有限要素法による熱可塑性樹脂板の大変形シミュレーションを研究対象として取り上げた。

2-1 鋼材の大変形シミュレーション

鋼材の大変形シミュレーションの具体的対象としては、冷間鍛造成形を取り上げた。今年度は剛塑性有限要素法の適用を試み、軸対称成形品の成形過程を軸対称問題として、非軸対称成

形品の重要断面の成形過程を平面ひずみ問題として解析した。

また、成形過程の解析結果から、金型に負荷される荷重分布を求め、それを用いて金型の強度・寿命検討を線形解析（ただし、境界非線形を扱っている）で行った。

研究成果の詳細については、速報として以下の2つの講演論文で公表しているので、参照していただきたい。

前川・濱家・岡嶋：エキスパートシステムおよびCAEの冷間鍛造金型設計への適用、
型技術者会議'91講演論文集、P66（1991-6）

前川・岡嶋・濱家：CAEによる冷間鍛造金型の強度・寿命検討、
第42回塑性加工連合講演会論文集、P559（1991-9）

2-2 熱可塑性樹脂板の大変形シミュレーション

熱可塑性樹脂板の大変形シミュレーションの具体的対象としては、ブロー成形、型突き上げ成形、真空成形を取り上げた。粘弾性/粘塑性有限要素法を適用するには、使用材料の構成式の材料定数を（170℃一定、高速引張り）試験によって（時間依存性を考慮して）適切に求める必要があり、今年度はこれに取り組みながら、とりあえず扱い易い超弾性体に近似的にモデル化して、超弾性有限要素法で解析を試みた。軸対称成形を主として扱っているが、一部非軸対称成形を3次元解析している。

研究成果の詳細については、速報として以下の2つの講演論文で公表しているので、参照していただきたい。

前川・柳：熱可塑性樹脂板のブロー、型突き上げ、真空成形過程の数値シミュレーション
その1、第42回塑性加工連合講演会論文集、P231（1991-9）。

前川・柳：熱可塑性樹脂板のブロー、型突き上げ、真空成形過程の数値シミュレーション
その2、第42回塑性加工連合講演会論文集、P235（1991-9）。

— 補 足 —

平成4年度は、受託協力研究組織（大歪・大変形解析および熱解析による高精度製品のための成形過程シミュレーション技術の研究）に所属することになり、本長期的共同研究組織と同様の研究に取り組んでいくが、一人が同時に異なる研究組織に所属することはできないという規定があるので、1年間本組織から離れる。

来年度は、受託協力研究組織の研究完了に伴い、再度本長期的共同研究組織に参加したいと考えているので、今年度の報告を中間報告という形にさせていただく。

エキスパートシステムおよびCAEの冷間鍛造金型設計への適用

[Application of Expert System / CAE to Cold Forging Dies Design]

大阪産業大学 前川佳徳*

(株)ニチダイ 濱家信一**

岡嶋一晃***

1. はじめに

冷間鍛造金型設計実務への、エキスパートシステム（略してESとする）、CAEの適用を進めているが、適用の考え方について紹介したい、

図1に、冷鍛型の設計・製造のコンピュータ利用のなかでのES、CAE利用の位置づけを示す。ここで成形CAEとは、成形工程での被加工材変形解析の適用であり、金型CAEとは金型強度解析の適用をいう。

2. ESの適用について

多段成形での中間工程生成を、ESを用いて自動的に行わせる試みはすでに多く発表されている。軸対称形状を対象としており、最終成形品形状をいくつかの基本形状に分割して、各部分の前工程形状を知識ベースに基づいて各種制約条件を満足し、かつ体積一定を満足するように決定していく。この手続きを素材形状にいたるまで推論していくが、得られる解は複数の場合もあり、ある評価項目で最適工程を決定する。

オーソドックスには、上記のようなシステムとするが、汎用性を有したシステムにするとすると、知識ベースの量がかなり必要となる。そこで、対象形状を簡易なものに限定し、高度な推論を行わせるというよりも、わかりきった工程ではあるが、最小限の入力で、あとは寸法計算を自動で行い、中間形状作成をしてくれるESシステムの構築を試みている。図2は、そのシステムによる中間工程作成例で、工程決定の手順は、最終成形品のいずれかの径を素材径として選択し、最終成形品から前工程へ推論していくのではなく、素材側から後工程を決定していくようにした。また、前方押し、据込み、穴あけの順に、優先順位をあらかじめ指定しておき、その順に、制約条件に基づき工程を決定していくようになっている。このシステムのねらいは、いわゆる設計のエキスパートに代わるシステムとすることではなく、簡単な対象品について、自動的に中間工程生成を行わせることをねらったものであるが実務的には有用なものと考えている。ただし、設計の省力効果をねらう観点から、出力結果が直接CADデータになっていくようなシステムにすることが重要である。

* Yoshinori Mackawa：工学部情報システム工学科助教授

〒574 大阪府大東市中垣内3-1-1、TEL(0720)75-3001

** Shinichi Hamaya：技術開発部開発課

*** Kazuaki Okajima：同課長

〒610-03 京都府綴喜郡田辺町薪、TEL(07746)2-3481

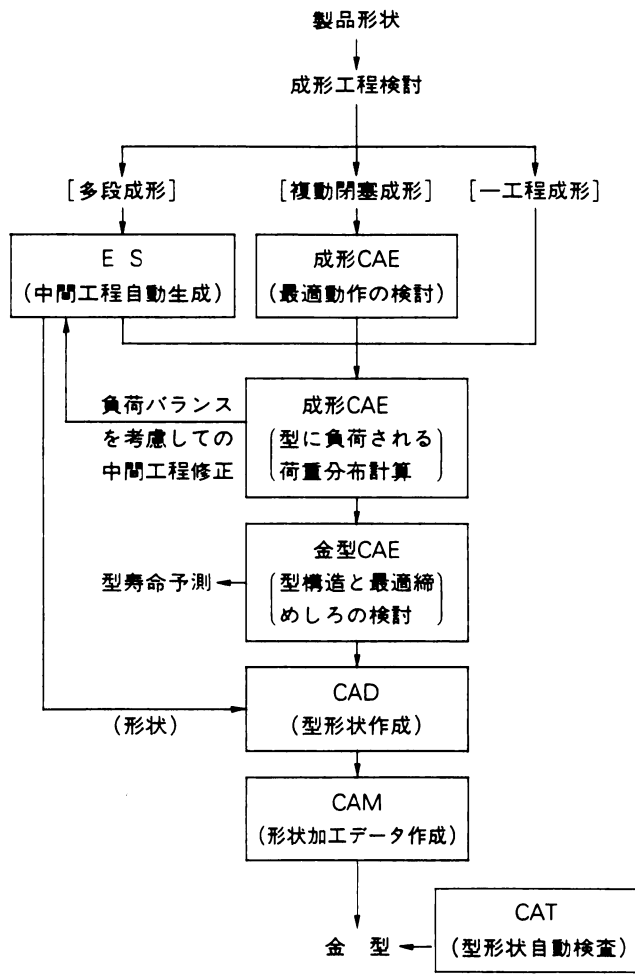


図1 ES, CAE 利用の位置づけ

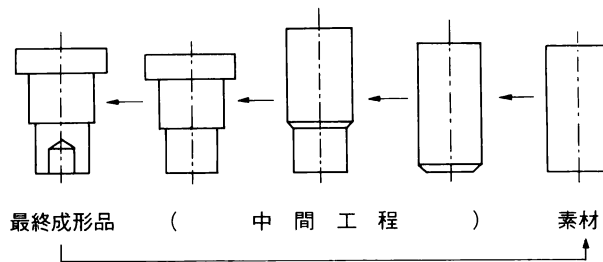


図2 ESによる中間工程作成順序

3. 成形 CAE の適用について

図 1 に示したように成形 CAE には、複動閉塞成形での上下パンチの最適動作を検討するような課題、型強度検討に必要な型に負荷される荷重分布を求める課題などがある。いずれも、成形工程での被加工材の変形を解析した結果を用いる。この解析は非線形解析で、コンピュータ容量、計算時間をかなり要するので、複雑 3 次元形状品に対しては、課題の意味を損なわない範囲で軸対称問題、あるいは平面歪み問題に近似し、2 次元的に解析する必要がある。したがって、解の信頼性保障のために、解析経験と、解の検証データの蓄積が要求される。

複動閉塞成形の最適動作検討事例として、スパイダの軸部の変形過程をシミュレーションした結果を図 3 に示す。この場合は、近似的に平面歪み問題として解析している。図 3 の場合は、上下パンチ速度が同じ場合であるが、図 4 は上のパンチ速度を 2 倍にしたときの変形結果の一例で、変形の様相に差が出る。いくつかの条件で変形過程を予測することによる最適動作制御

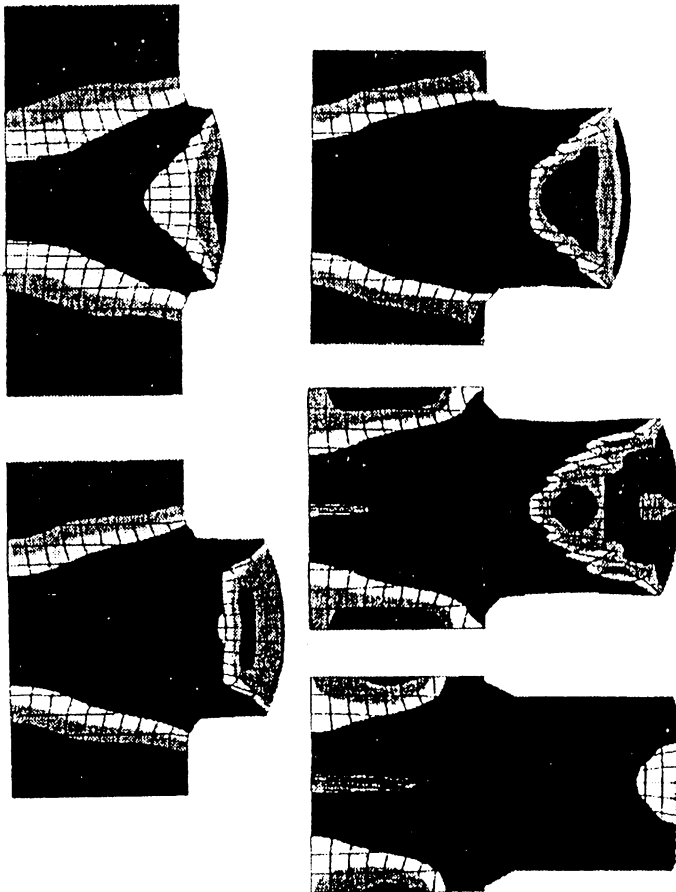


図 3 スパイダ軸部変形過程の解析結果

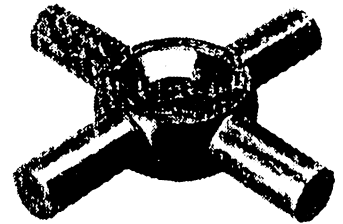


図 4 上下パンチの速度差がある場合の変形例

の決定、応力分布からの型開き量の予測などに役立つものとなっている。なお、解の検証については、一部実成形を行い、外形変形状態や加工荷重測定値と比較することで行っている。このようなシミュレーションの利用効果は、実験ではわからない内部応力状態などを、ビジュアルな結果として得られることである。したがって、ソルバーに加えて、プリ・ポスト・プロセッサの機能も重要なものとなる。

つぎに、成形CAEで金型に負荷される荷重分布を求め、金型強度解析を行うのが金型CAEであるが、これについては続報で述べる。

4. まとめ

ESおよびCAEの適用での問題点と、それを考慮しての実務で効果を出しうる適用の考え方、および適用事例を示した。ESは設計の省力化に、CAEは設計の質向上に効果を出しうる事が確認できたが、適用に当たってはコストが問題となる。とくにCAEではソフトのコストが高く、付加価値の高い、また設計での試行錯誤過程が多くなる金型に適用を図っていく必要がある。

CAEによる冷間鍛造型の強度・寿命検討

塑正 前川 佳徳 (大阪産業大学 工学部)
塑賛 岡嶋 一晃 (株)ニチダイ
塑賛 濱家 信一* (株)ニチダイ

1. はじめに

冷間鍛造金型の強度検討を、経験式でなく、数値解析で行う試みはすでに多くなされてきた。しかし、補強リングによる予圧縮や型分割（接触問題）の表現、ダイキャビティ面に負荷される荷重分布の見積り等の問題があり、境界条件を単純化した解析、たとえばダイの単体解析、均等圧負荷とした解析等がなされている。

しかしながら最近では、複雑形状の成形が多くなってきて、応力集中の様相をより厳密に予測する必要があり、簡略化しない系統的な解析の要請がでてきている。一方、EWSの高性能化に伴い、そのような要請に対し、実務として効果をだせる対応ができるようになってきた。

そこで、金型の強度・寿命を系統的に検討できるCAEシステムを構築し、実際に実務で利用している。ここでは、その効果、問題点を、簡単な前方押し出し工程を例にとって報告する。

2. 構築したCAEシステム

構築したCAEシステム概念図を図1に、成形工程の違いによる検討の流れと、CAD/CAM/CATとの関連を図2に示す。

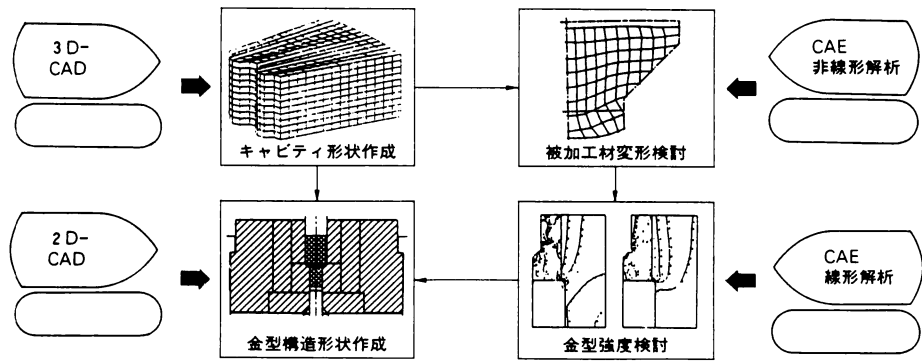


図1 冷間鍛造金型用 CAE システムの概念図

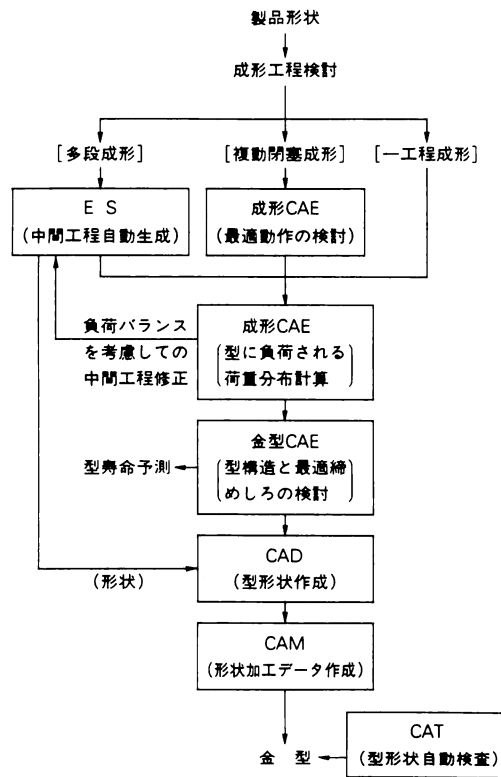


図2 冷間鍛造金型用 CAE システムの構成

金型の強度・寿命検討に先だって、その金型を用いての被加工材の変形検討（成形 CAE）を行い、成形 1 工程中のいくつかのストロークで、型に負荷される荷重分布を求める。

つぎに、その荷重分布を金型に負荷して、1 工程中に型内に生じる最大応力値と最大応力振幅値を求める。

これらの結果から、型構造、締めしろの検討（金型 CAE）が行われ、型寿命予測がなされる。

成形 CAE には非線形解析ソルバー MARC を利用、金型 CAE には接触問題が扱える線形構造解析ソルバー MODEL SOLUTION を用いている。プリ・ポスト・プロセッサには IDEAS を使い、成形 CAE と金型 CAE 間のデータのやりとりができるようにしてある。

3. 強度・寿命検討例

例として、図 3 に示すような軸対称形状の金型で、直径 80mm、長さ 80mm の丸棒素材を前方押し出す工程に、構築 CAE システムを適用する場合を示す。

図 4 は、解析に用いた、被加工材、金型の各要素分割を示す。解析は、軸対称問題として行われる。

3. 1 被加工材の変形解析

被加工材の変形解析と金型の変形解析を連成して解析するのが厳密な解析であるが、実務的な観点から困難であるので、ここではまず金型を剛体とし、被加工材の変形解析を行う。

被加工材には、S20C 焼きなまし材を想定し、それを加工硬化を考慮した剛塑性体とする。

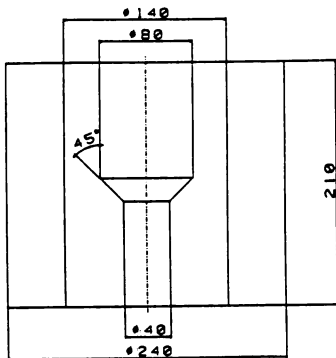


図 3 解析対称金型形状

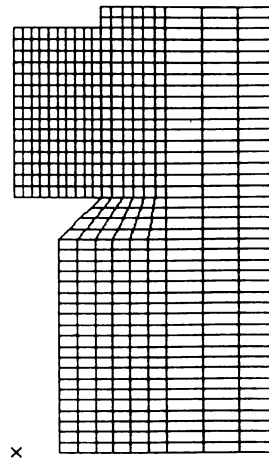


図 4 要素分割

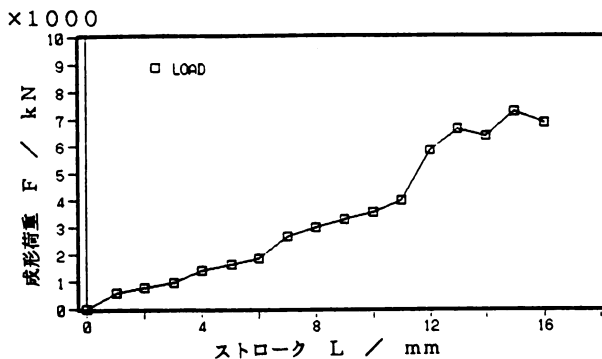


図 5 ストロークに伴う成形荷重の解析結果

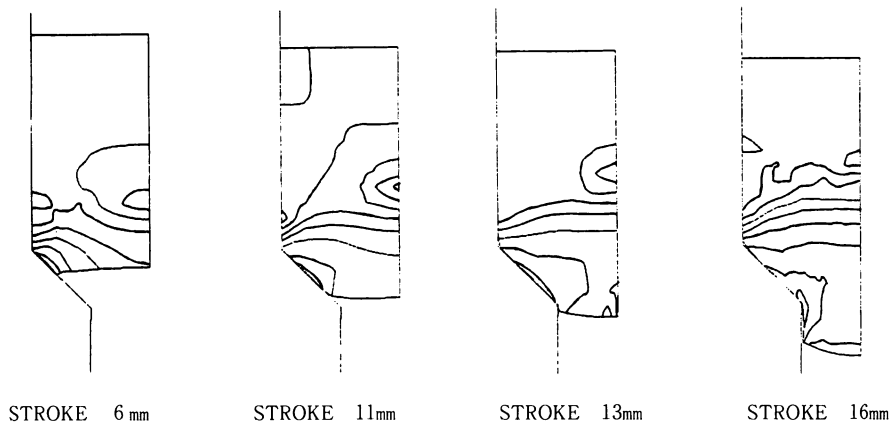


図6 被加工材の変形の進展と内部に発生するミーゼス応力分布の様相

S20Cの変形抵抗—圧縮ひずみ線図から、区分的線形関数として加工硬化係数を求め、材料構成式に入れ込んだ。

解析は軸対称問題とし、四辺形4節点軸対称要素を採用した。要素分割は図4に示すとうりで、要素数150、節点数176である。被加工材と型間の摩擦は考慮できるが、今回は摩擦0の場合の結果を示す。

図5は、成形ストロークに伴う成形荷重の解析結果を示したものである。

図6には、被加工材の変形の進展と、内部に発生するミーゼス応力分布の様相を示す。

図5の解析結果を見ると、経験式から求める成形荷重とほぼ一致しており、したがって型との接触面での節点荷重分布の解析結果も妥当なものと考えて、これを金型の強度解析での荷重条件の入力値として用いる。

3. 2 金型の強度解析

本例では、図3に示すように、型は一重補強とし、ダイにケース（補強リング）を焼きばめすると想定した。

ダイ材はSKH 51（ヤング率=219.5 GPa、ポアソン比=0.3）、ケース材はSKD 61（ヤング率=211.7 GPa、ポアソン比=0.3）と想定する。

ダイ外径（ケース内径）の決定は、従来の設計手法により、またこの時の最適締めしろは0.4%付近と求められている。

そこで、図3の形状の金型構造に対して、締めしろを0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%とした場合の金型内応力分布を求め、検討を行ってみた。

解析は軸対称問題とし、四辺形4節点軸対称要素を採用した。要素分割は図4に示すとおりで、要素数376、節点数471である。

焼きばめの表現は、MODEL SOLUTION が有している MPC（Multi-Point Constraint）機能を用いた。これは、ある複数節点の節点間距離を線形方程式で規定するもので、焼きばめ表現

の場合には、ダイとケースの接触面に同一座標値の2つの節点を設け、この2点間に締めしろ量にあたる距離関係を MPC 機能で規定する。

荷重条件としては、被加工材の変形解析から得られた、型との接触面での節点荷重を、ダイのキャビティ表面の対応する位置に負荷した。

図7に、締めしろを0.4%とした場合の、成形ストローク6mm、13mm、16mmでの、ダイ、ケースそれぞれに生じるミーゼス応力分布の解析結果を示す。

図より、ダイにおいては、内壁の隅角部でまず応力が集中し、成形の進展につれて応力値が大きくなっていくとともに、ショルダ下部の方に応力集中位置が移行していくのが分かる。

ケースでは、ダイとの接触面で応力が高くなるが、極度な応力集中は見られず、成形が進むと高い応力の位置が上部の方へ移行する。

図8は、ダイに発生するミーゼス応力値の最大値を縦軸に、成形ストロークを横軸にとり、各締めしろ値別に、成形の進展に伴う最大応力値の変化を示したものである。また図9は、図8と同様のものを、ケース側について示したものである。なお、ストローク0は、ダイキャビティ面への負荷が無い時で、焼きばめによる負荷のみを受けている時の応力値を示す。

図8より、成形の進展に伴い、ダイでは最大応力値が大きくなり、一方、締めしろによる差は大きくないことがわかる。ここで、得られた最大応力値は、かなり大きな値で、すべてダイ内壁の隅角部で発生する応力値である。とくに、ストロークが10mmを過ぎるあたりから発生する最大応力値は、ダイ材の降伏点を越えた値で、経験的に知られる値よりかなり高いものとなっている。

これは、解析では、実際に発生する応力よりもかなり高い応力を示すことになると考えられる。

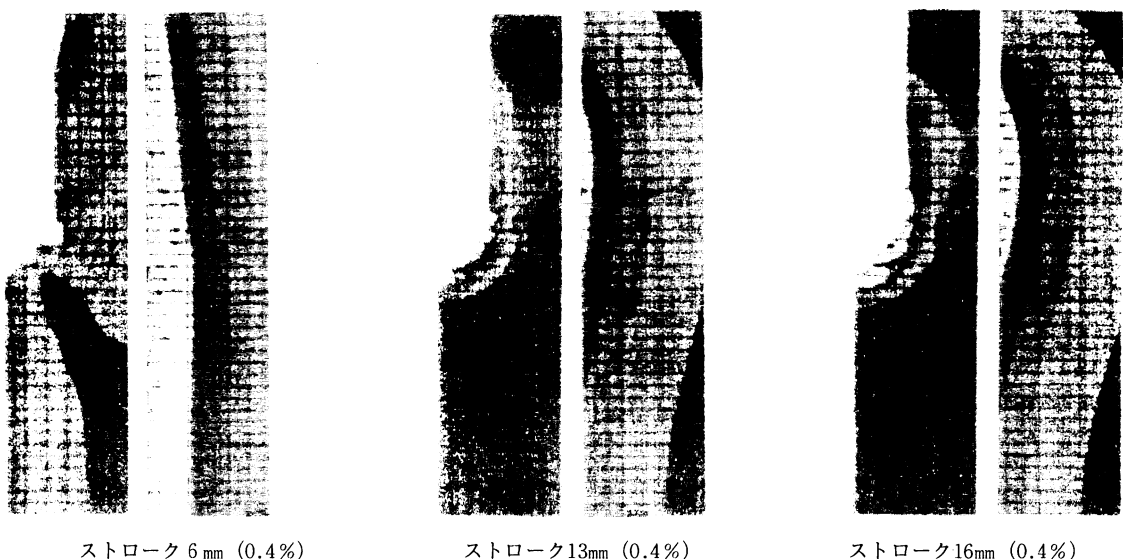


図7 ダイ、ケースに生じるミーゼス応力分布の解析結果（締めしろ0.4%）

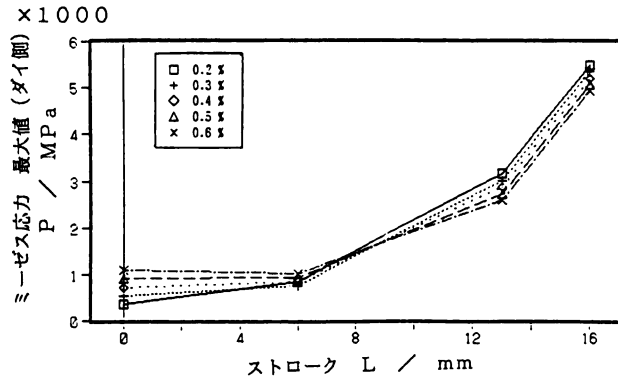


図8 成形の進展に伴うミーゼス応力の最大値の変化

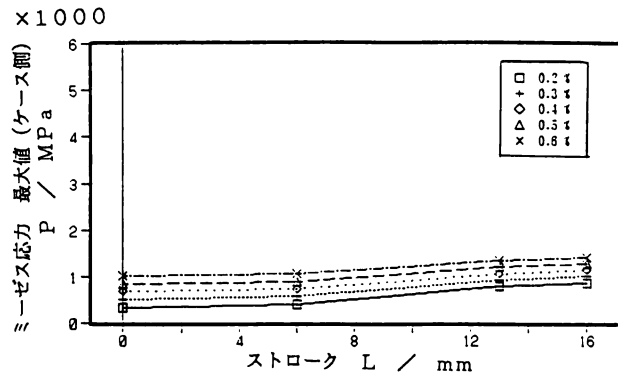


図9 成形の進展に伴うミーゼス応力の最大値の変化

そこで、隅各部にRを設けて解析してみたが、隅角部分の要素分割をかなり細かくしないと、応力の低下は見られなかった。ここで問題となるのが、どの程度の細かさの要素分割で、実際に発生する応力に近い値が得られるのか把握で、これに関しては実験と合わせた解析値の検討が必要となる。

図9のケース側の解析結果では、妥当な結果が得られた。

3. 3 金型の強度・寿命の評価

解析で得られたミーゼス応力、最大主応力の各最大値と締めしろの関係を、ストローク別に示す。図10、図11はダイ側の結果、図12、図13はケース側の結果である。なお、各応力値は、それぞれの材料の引張り強さ（SKH 51=1.76 GPa、SKD 61=1.47 GPa）で除して、無次元化して示した。

このように整理すると、各締めしろ別に、1工程中での最大応力値と、最大応力の振幅値を知ることができる。

最大応力値は型強度に関連し、破損の形態にしたがって、ミーゼス応力か最大主応力のどちらかをを用いて型強度を評価する。

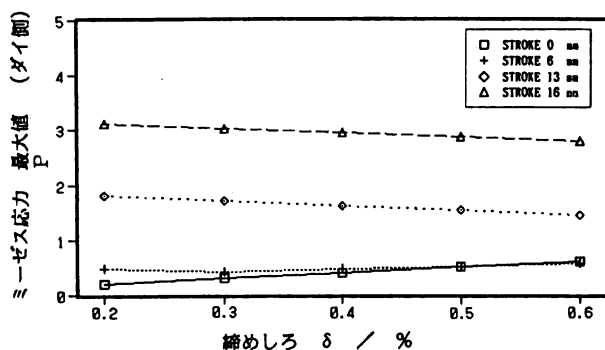


図10 ミーゼス応力の最大値と締めしろの関係

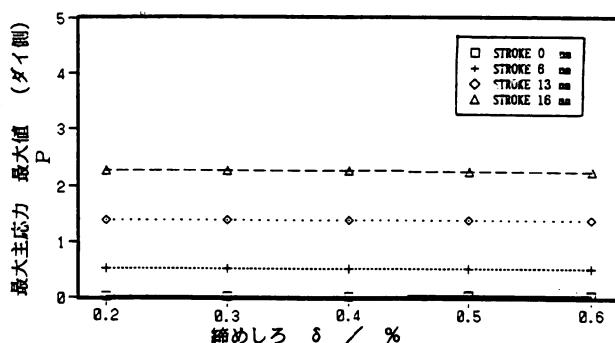


図11最大主応力の最大値と締めしろの関係

最大応力を生じる位置が各ストロークで同じであれば、その振幅値は型寿命に関連するので、型寿命への締めしろの影響を評価することができる。

図10で、ダイ側のミーゼス応力を評価した場合、最大値そのものは締めしろで差が見られないが、締めしろが大きい程、1工程中の最大値の振幅は若干小さくなるのが分かる。したがって、大きな締めしろ値は、型強度の観点からは効果的とは言えないが、型寿命の観点からは効果があると言える。

4. まとめ

冷間鍛造金型の強度・寿命検討を系統的に行うCAEシステムを、前方押し工程を例に取り、紹介を行った。

実務で利用してみて、解析が可能であるということと、解析値が実際の強度検討や寿命検討に使用できるということとの間には、かなりの隔りがあることがわかる。

CAEシステムにとって重要なことは、ダイ内壁隅角部での応力集中の評価のように、解析での弱点を実験結果を取り入れてどう補うかの手法の確立であり、またダイが受ける応力振幅値と型寿命の関係などを、実験データとして整備することである。

型寿命予測について、あまり述べなかったが、回転曲げ疲労試験でのS-N線図を用いて、

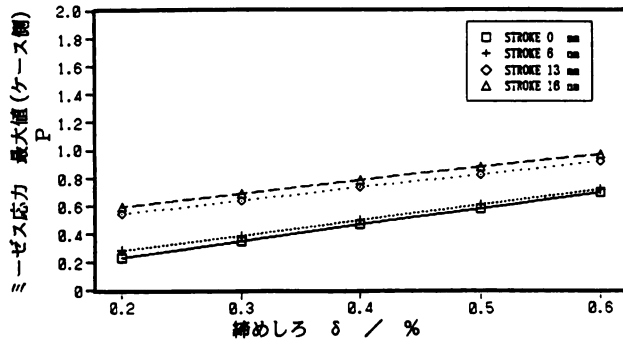


図12 ミーゼス応力の最大値と締めしろの関係

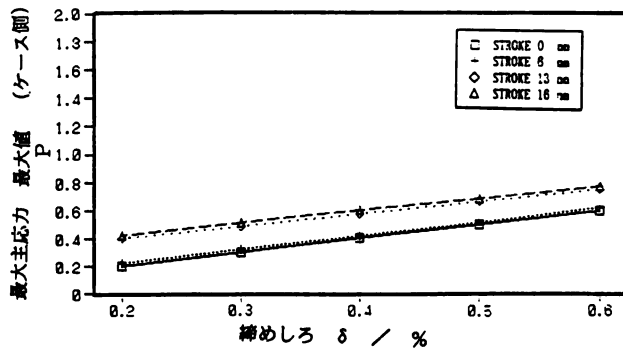


図13 最大主応力の最大値と締めしろの関係

応力振幅値から型寿命を予測しても、実際の寿命とよい一致は示さない。やはり、実際の加工に近いモデル試験でのデータベース作成が必要と考える。

しかし、問題点はあるものの、CAEでは応力分布などを詳細に可視化してくれるので、より厳密な設計を行うには不可欠なツールと言える。

熱可塑性樹脂板のブロー、型突き上げ、 真空成形過程の数値シミュレーション その1

塑正 前 川 佳 徳 (大阪産業大学 工学部)
高賛 柳 秀 夫* (筒中プラスチック工業(株))

1. はじめに

熱可塑性樹脂板を、図1に示すように、ブロー成形し、雄型で予張、ついで真空成形を行う成形法が、ロット数の少ないコンピュータ機器等のハウジングの成形用に利用されている。こ

第42回塑性加工連合講演会 (1991. 9. 25~27 札幌)

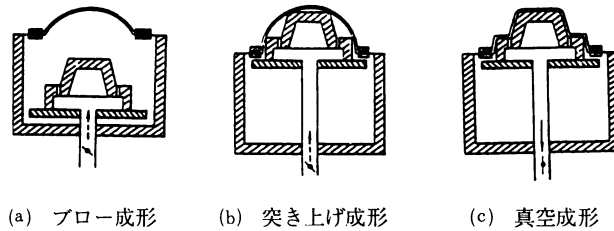


図1 真空成形過程

これらの成形品は、商品としての外観と構造部材としての強度を要求されるため、成形過程における板厚等の制御が重要である。

本研究は、それらの成形過程をコンピュータ・シミュレーションする試みである。ソルバーには、市販汎用ソフト（MARC）を用いている。研究目的は、3次元形状成形品の厚み分布の予測、および応力状態からトリミング後の変形を予測すること等である。

本報告（その1）では、これらの成形過程をシミュレーションするにあたり、成形に供した材料の特性や、実際の成形挙動を把握するためのテストを行い、数値モデル化を検討した内容について報告し、次に続く報告（その2）では、成形過程の解析結果と実験結果の比較検討結果例を紹介する。

2. 現象の把握、解析結果検証のための実験について

(1)材料特性

成形に用いた材料は、変性アクリル塩ビ板（筒中プラスチック工業(株)製のカイダック KDN 1715）の素板（厚み、3mm）である。このシートは、押出板であり、製板時の歪み（応力）が残留している。このため、成形時に、転移点温度以上に加熱すると、押出方向（以後、MD方向と呼ぶ）で収縮、MDと直交する方向（TD方向と呼ぶ）で伸張挙動が発生する。

一般的な成形温度170℃では加熱60分程度で、この寸法変化量は安定し、製板時の残留歪みは、ほとんど解放されると考えられるが、図2、および、表1に示すように無視できない量である。実際の成形時に、素板が転移点温度になる時間は数分程度であり、このような寸法変化量（表1）の全てが効いてくるわけではないが、この挙動は、成形時に、異方性特性として影響してくると予想される。

(2)円柱形成品（軸対称品）での変形挙動

現象を単純化して把えるため、まず、軸対称成形を解析対象として、半径150mmで全周をクランプ固定した円板素材を半球状にブロー成形し（図3）、半径100mmの円柱形状の型を150mmの高さに突き上げて（図4）、ついで円柱状の型に真空引きする（図5）過程を取り上げた。

試料は、押出板のままの素板（非アニール品と呼ぶ）と、170℃×60分でアニールした素板（ア

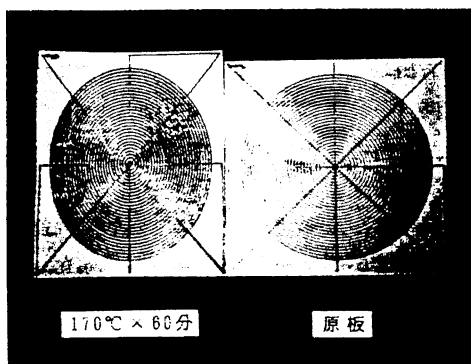


図2 170℃×60分加熱時の寸法変化状況

表1 170℃×60分加熱時の寸法変化量

方向	加熱伸縮量
M D	-13.4%
T D	+ 4.1%

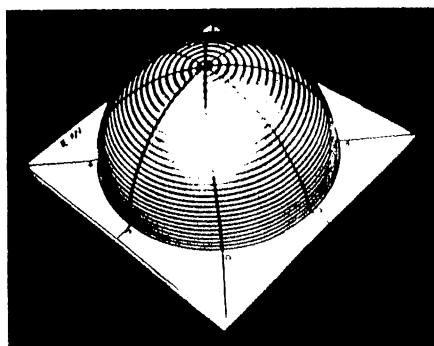


図3 ブロー成形後の形状

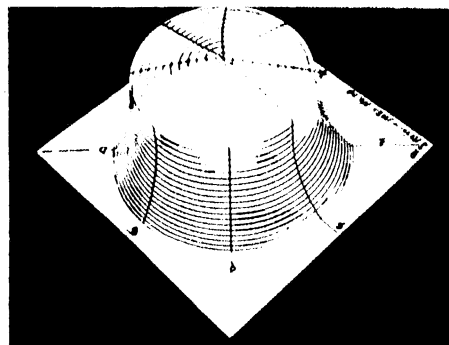


図4 突き上げ成形後の形状

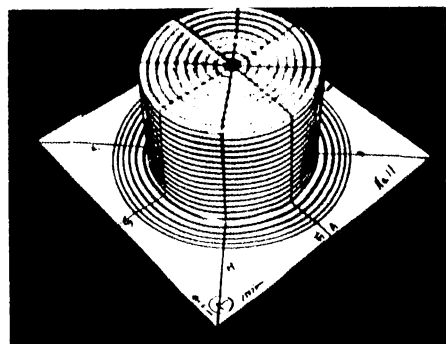


図5 真空成形後の形状

ニール品と呼ぶ)の2種類で実験を行った。素板には5mmピッチで同心円を、また、45度ピッチで基準線をマーキングしてある。成形時の素材加熱温度は170℃、金型温度は70℃とした。

実際の成形においては、加熱が終了し、成形がスタートする時点で、素板の中央部に対し、クランプ固定部付近の温度が15℃程度、低い温度分布をもっており、また、一連の成形過程が終了した段階では、130~150℃まで温度が下がることが、確認されている。

図6は非アニール品について、また、図7はアニール品について、ブロー成形後の成形品の厚み分布実測結果を示している。縦軸の板厚保持率は、変形後の板厚を素板の板厚で割ったものである。

実験結果のO-A、O-B、……、O-Hは、図3に見られるように円周方向に8分割した基準線方向を示しており、各々、MD方向(O-A、O-E)、TD方向(O-C、O-G)、MDとTDの中間方向(O-B、O-D、O-F、O-H)での厚み測定値に対応している。

また、横軸は、成形前の素板において、軸対称中心からクランプ固定側へマーキングされた5mmピッチ同心円上の位置を示している。

実験による板厚分布はアニール品、非アニール品によらず、ある分布幅をもって、ばらついているが、これは今回のテストで、実用成形機を使用したための素材温度のばらつき等の影響と考えられる。

しかし、以上のばらつきはあるものの、図6の非アニール品においては、MD方向と、それに対して、TD方向および、これらの中間方向で板厚分布傾向が異なる点がみられる。

それに対して、図7のアニール品においては、各方向の板厚保持率は、ばらつきの範囲内で、ほぼ同様な分布傾向を示す。

なお、本報では詳細データの紹介を割愛するが、突き上げ成形過程、真空成形過程においても、同様な傾向が確認されている。

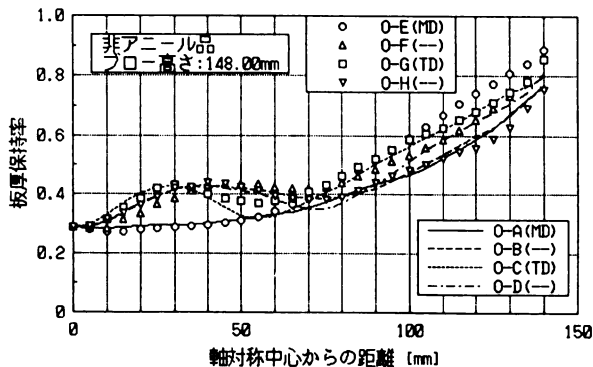


図6 ブロー成形後の厚み分布 (非アニール品、ブロー高さ148mm)

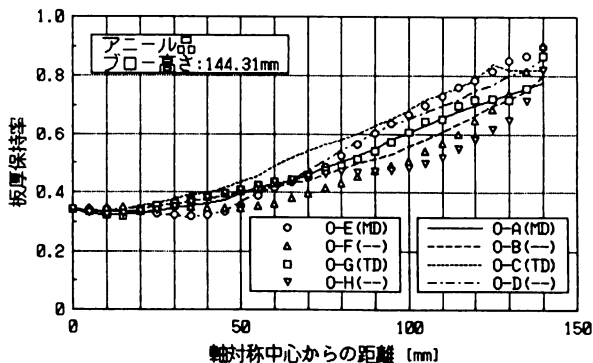


図7 ブロー成形後の厚み分布 (アニール品、ブロー高さ144mm)

これらのことから、材料特性のところで述べた、製板時の残留歪みが転移点温度以上で解放されることに起因する、加熱伸縮挙動上の異方性が、成形品の板厚分布に影響していることが示唆される。

つぎに、170℃でブロー成形した成形品（図3）を、ブロー圧をゼロにし、さらに同温170℃で60分保持した時の素材の挙動を観察した。この場合、ブロー圧をゼロにした時点で永久（塑性）変形が起こっていることが確認され、170℃で60分保持中には少しの変化は見られたが、同様の永久変形が残った。図8は、その永久変形の様相を示すものである。

(3)箱形成品（非軸対称品）の変形挙動

なお、実際の製品として、こうした成形品の多くは、一般に非軸対称な箱形を基本形状としている。

このことから、解析対象として、666mm×333mmの長方形の素板（非アニール品のみ）を、底が280mm×280mm、高さが140mmの箱型に成形する過程を取り上げた。

成形過程は、ブロー成形（図9）、雄型での予張=突き上げ成形（図10）、真空成形（図11）である。素板には5mm角の格子をプリントしてある。素材加熱温度は170℃、金型温度は70℃とした。

図12は、MD方向を長辺方向にとった場合の、各成形過程後の板厚分布測定結果である。

縦軸の板厚保持率は、変形後の板厚を素板板厚で割った値である。結果は図13に示す代表位置でのみ示している。



図8 永久変形の様相

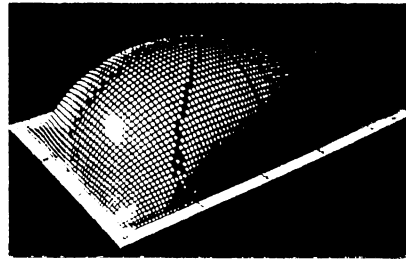


図9 ブロー成形後の形状

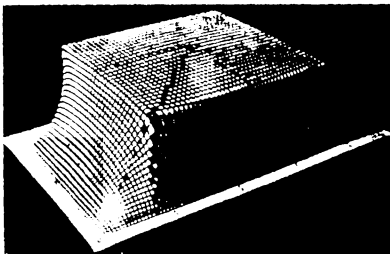


図10 突き上げ成形後の形状

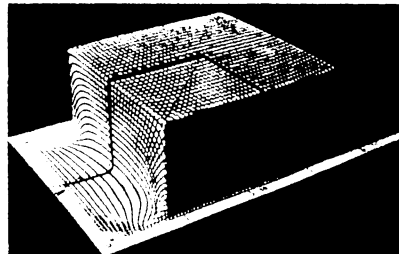


図11 真空成形後の形状

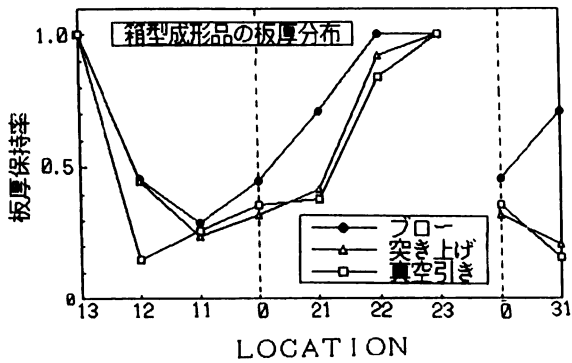


図12 箱型成形品の板厚分布

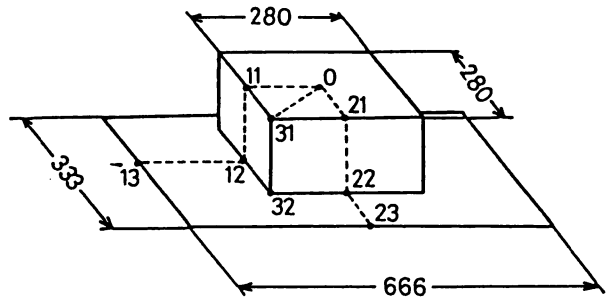


図13 成形品形状と厚み測定箇所

3. 解析モデルの検討

今回の数値解析モデルの検討にあたっては、最初の取り組みとして、単純化したモデルを設定し、まず、第一次近似的な数値シミュレーションを試みることにし、形状モデルの単純化と、材料構成式の単純化の検討について述べる。

(1)形状モデルの単純化の検討

3次元形状品の成形を3次元で解析するにはコンピュータ負荷が大きいので、できれば2次元問題に単純化して、近似的にでも各成形過程のシミュレーションを試みたい。

軸対称の成形品については、2次元断面を取り出し、単純に、軸対称要素を使用して解析することとした。

しかし、非軸対称の3次元形状成形品については、この点について、どのような仮定を行うかが、解析上のポイントとなる。

ここで、箱形状成形品の成形過程を2次元的に解析しようとする、図13の13,12,11,0の素板の長辺方向と、0,21,22,23の素板の短辺方向の、代表的な2つの断面について解析し、その結果を組み合わせる3次元形状の変形状態を把握する方法が考えられる。

この方法による解析を検討した結果、箱型成形品の成形過程シミュレーションで問題となるのは、ブロー成形後の形状をどうシミュレーションするかにあるということがわかった。

図12の結果からわかるように、ブロー成形後の素板長辺方向と短辺方向では板厚分布の様相は異なっており、長辺方向での板厚分布では11の位置で板厚が最も薄くなっている点が、特徴的である。本報では結果を示さないが、TD方向を長辺方向にとった場合についても、図12と同様に、11の位置で板厚が最も薄くなる特徴を示す。

また、ブロー成形後の、長辺方向11での低い板厚保持率は、その後の成形過程でも同様の傾向で残っており、あまり大きな変化が見られない。

したがって、この様相さえ、正確に表現できれば、後の突き上げ成形過程、真空引き成形過程のシミュレーションは、2次元的な解析でも問題なく行えるのではないかと考えられる。

このため、本報では箱型成形品のブロー成形過程については、ソリッド要素を用いて3次元解

析し、その後の成形過程については2次元解析を採用することにした。

(2)材料構成方程式の検討

先述の軸対称成形品の挙動確認テストでは、一連の成形プロセスが無視できない量の永久(塑性)変形を伴うことを、確認した。

しかし、一連の成形過程を考えると、ブロー成形から突き上げ成形に移る過程で、ブロー圧を一瞬止める際の僅かな収縮、また、真空成形過程での一部の円周方向への僅かな収縮を除き、各過程の成形品の各部分は、延伸する一方であると言える。

このことから、第一次近似としては、塑性の影響は無視できると考え、本報では熱成形での変性アクリル塩ビ板を超弾性体とし、非圧縮性であるとしてハーマン/ムーニイ材として取り扱った。

ムーニイ材の構成式であるひずみエネルギー関数は、

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3)$$

で表される。

なお、今回は、使用した材料のムーニイ定数を、実際には測定しておらず、解析にあたっては、文献値¹⁾より、各定数 C_1 、 C_2 には

$$C_1 = 1.223 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$C_2 = 7.212 \times 10^2 \text{ Pa}$$

の値を採用した。

なお、ムーニイの定式化においては、材料は等方性であるとしている。また、今回の解析では、製板時の残留歪みの効果や、粘性(時間依存性)についても考慮しない。

(3)成形過程の仮定

一連の成形過程を通じて、材料は、等温に保たれ、成形品の内部で温度分布を持たないとし、また、成形は静的な変形として、等温モデル、静的モデルを採用した。

また、実際の成形過程では、加熱された素板は熱膨脹により垂れを生じ、そこが成形の出発点になるが、解析では垂れを考慮せず、完全にフラットな状態から、変形がスタートすると仮定した。

4. まとめ

真空成形での各成形過程、および、材料の変形挙動を詳細に観察し、その結果として単純化した解析モデルを提案した。なお、本報で把握した現象のいくつかは、単純化した解析モデルには採用されていないが、その影響については、次報(その2)の、解析結果と実験結果との比較検討において考察する。

5. 参考文献

1) Schmidt, L. R. & Carley, J. F.: Polymer Eng. & Sci., 15-1 (1975), 51.

熱可塑性樹脂板のブロー、型突き上げ、 真空成形過程の数値シミュレーション その2

塑正 前 川 佳 徳* (大阪産業大学 工学部)
高賛 柳 秀 夫 (筒中プラスチック工業(株))

1. はじめに

熱可塑性樹脂板を、ブロー成形し、雄型で予張、ついで真空成形を行う成形過程をコンピュータ・シミュレーションするにあたり、前報(その1)では、成形に供した材料の特性や、実際の成形挙動を把握するためのテストを行い、比較的簡単な解析モデルを提案した。

続く本報(その2)では、前報で説明した、軸対称形状成形品や、非軸対称の箱形成品での数値解析結果と実験結果の比較を行い、解析モデルの検討を行った。

2. 数値計算モデルについて

(1)要素特性、要素分割

数値解析は有限要素法(MARC)によるが、超弾性の変形解析では選択する要素特性が重要と言われている。

軸対称成形品では、4節点四角形軸対称要素を採用し、要素分割は、半径方向150mmを50分割、板厚方向3mmを3分割した。

箱形成品については、ブロー成形過程の3次元解析結果のみを示すが、この場合は8節点、および、20節点低減積分のソリッド要素を採用し、 $\frac{1}{4}$ 対称モデルについて、色々な要素分割ケースで解析を行った。

(2)各成形過程の解析手続き

各過程の解析手続きは、以下の通りである。

- ブロー成形過程；

ブロー圧が、常に素板面に垂直に、等分布荷重として作用するようにし、荷重増分解除法で、所定のブロー高さまで計算を行う。

- 突き上げ成形過程；

型を剛体定義し、突き上げ方向に移動して、半球状に変形した素板との接触、摩擦を考慮しながら、所定の突き上げ高さまで計算を行う。

- 真空成形過程；

ブロー成形過程と同様な荷重増分解析を行い、円柱形状の型を剛体定義し、素板が型に密着するまで計算を行う。

3. 解析結果と実験結果との比較検討

(1)円柱形状成形品（軸対称品）

図1は、非アニール品における、また、図2はアニール品におけるブロー成形後の成形品の厚み分布について、解析結果と実験結果を比較したものである。

非アニール品の実験による板厚分布は、MD方向とTD方向で分布傾向が異なるが、解析結果はそれらのうち板厚保持率が低い方に比較的好く一致している。

それに対し、アニール品（図2）では、軸対称中心から10mm～50mm間のMD方向とTD方向での板厚分布に差が少なく、また解析結果はそれらと良好な一致を示している。

今回の解析値は、等方性材料で、製板時の残留歪みの解放による異方性効果を考慮していないという仮定のもとで得られたものであり、そのため、非アニール品におけるMD方向とTD方向での板厚分布傾向の違いを予測できてはいないものの、基本的なブロー成形時の素板の挙動は、表現できていると考えられる。

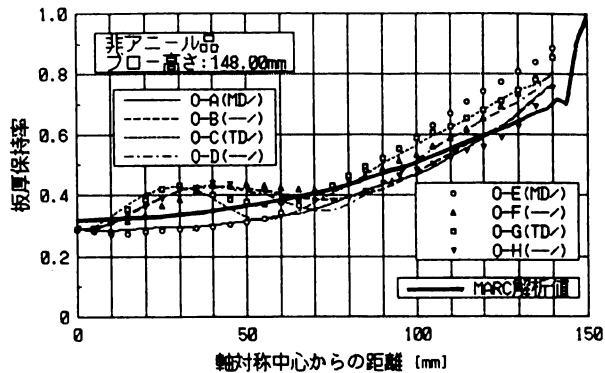


図1 ブロー成形後の厚み分布（非アニール品、ブロー高さ148mm）

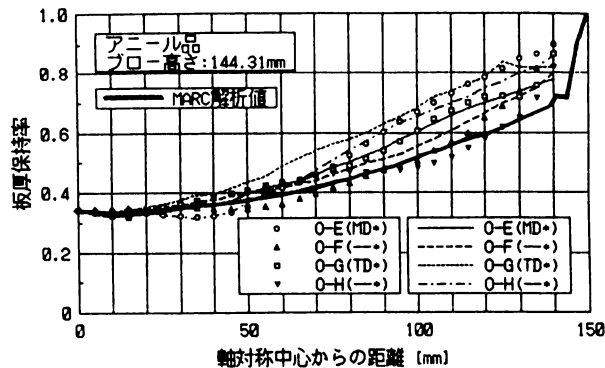


図2 ブロー成形後の厚み分布（アニール品、ブロー高さ144mm）

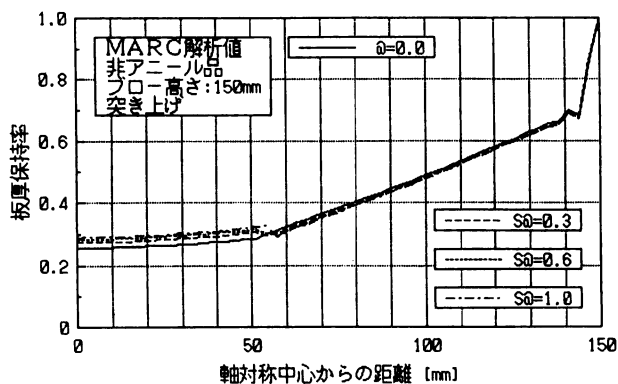


図3 摩擦係数を変えた、突き上げ成形過程の解析（ブロー成形後）

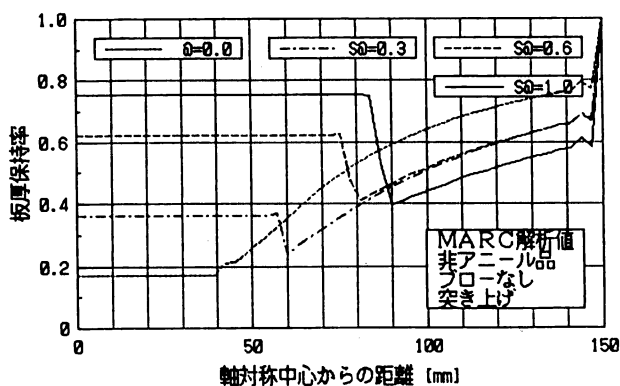


図4 摩擦係数を変えた、突き上げ成形過程の解析（ブロー成形、無し）

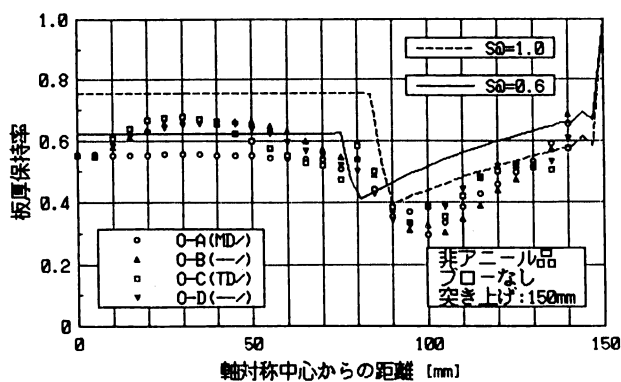


図5 摩擦係数の評価結果（ブローなし、突き上げ）

突き上げ過程、および、真空成形過程シミュレーションでは、成形中に素板と型が接触後、かなりのすべりを伴うことになるので、解析にあたっては摩擦係数をどの程度に設定すればよいか問題となる。そこで、解析では4種類のせん断摩擦係数(0.0, 0.3, 0.6, 1.0)でシミュレーションを行い、実験結果と比較することにより、適切な摩擦係数を検討した。図3は、ブ

ロー成形後に突き上げ成形をした時の、図4は、ブロー成形無しで突き上げ成形をした時の、摩擦係数を変えて解析した結果である。あらかじめブロー成形を行ったものでは、突き上げ時の素板と型とのすべり量が少ないため、摩擦係数の違いが厚み分布にあまり影響を与えていない(図3)が、一方、すべり量が大きい、ブロー成形を行わない場合(図4)には、摩擦係数が厚み分布結果に大きな影響を与えることがわかる。図5は、ブロー成形をしないケースの解析結果(図4)を、実験結果と重ね合わせて示したもので、摩擦係数として0.6~1.0あたりの値を採用すればよいことがわかった。したがって、突き上げ成形過程や真空成形過程のシミュレーションにおいては、摩擦係数として、1.0を設定して解析を行った。

図6に突き上げ成形過程での素板変形シミュレーション結果を、図7に真空成形過程での素板変形シミュレーション結果を示す。

図8は突き上げ成形後の、また図9は真空成形後の、各成形品の厚み分布について、解析値と非アニール品での実験結果を比較したものである。

これらの比較においても、先述のブロー成形過程での検討結果と同じく、解析値は実験値と比較的に良く一致しており、基本的な挙動の表現はできていると考えられる。

しかし、細かい点に注目すると、まず、ブロー成形後(図1、図2)と突き上げ成形後(図8)の結果において、軸対称中心からの距離が150mm付近で、解析結果の方が実験値より板厚保持率が低くなる傾向が見られる。

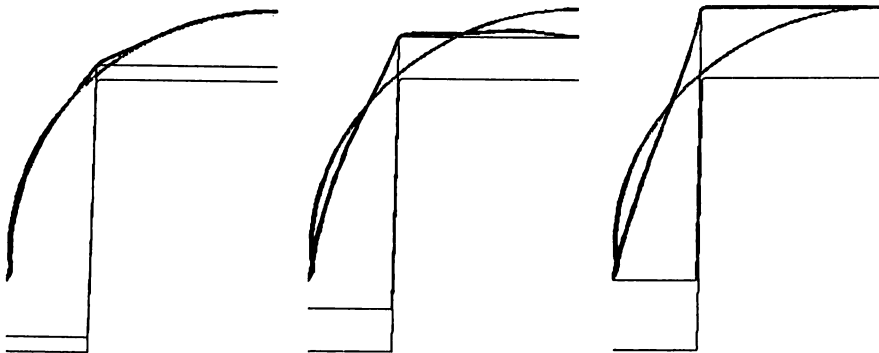


図6 突き上げ成形過程での素板変形のシミュレーション結果

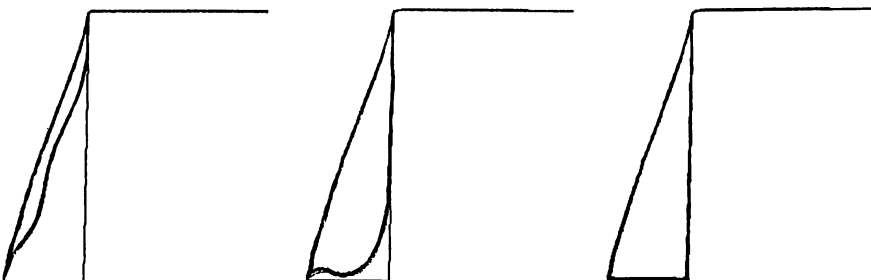


図7 真空成形過程での素板変形のシミュレーション結果

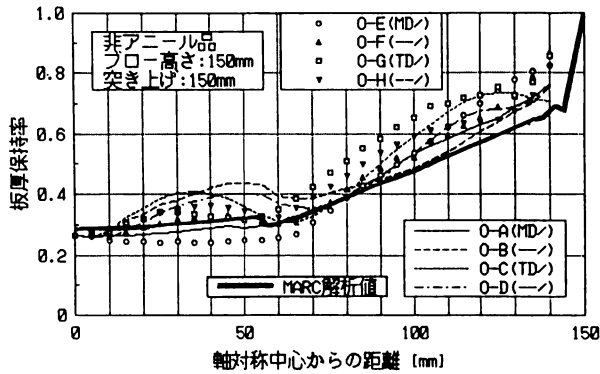


図8 突き上げ成形後の厚み分布 (非アニール品)

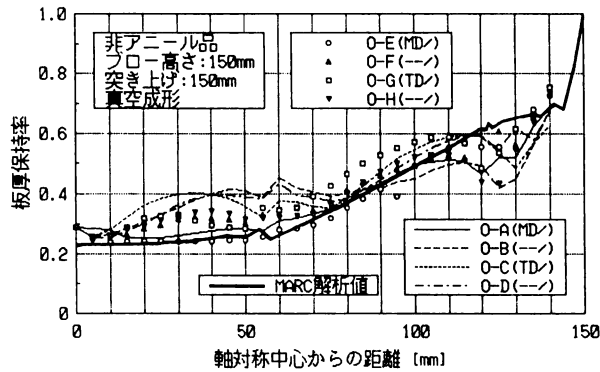


図9 真空成形後の厚み分布 (非アニール品)

前報 (その1) で述べたように、クランプ部の近くでは、素板の中央部に対し、成形がスタートする時点において、すでに15℃程度、低い温度分布をもっている。

したがって、実際の成形では、この部分は素材の中央部に比べて、変形し難くなっている。一方、解析では素板を等温としているので、クランプ部付近も素板の中央部と同程度、変形しやすいため、解析結果では、実験結果より板厚保持率が低くなっていると考えられる。

また、真空成形後 (図9) の結果において、軸対称中心からの距離が120mm~130mm付近で、実験結果の板厚保持率が低くなっている点を、解析結果では表現できていない。この部分は、図7の右側のシミュレーション結果における円柱形状型の下側コーナに相当する。

今回の解析では、一連の成形過程を通じて、材料は等温 (170℃) に保たれるという仮定を設けているのに対し、前報 (その1) でも示したように、実際の素板の温度は、一連の成形が終了する過程で、130~150℃まで下がること確認されている。すなわち、成形過程に、外気に対する放熱や、型との接触による素材の温度降下が起こるにつれ、素材の挙動は、一部異なってくると予想される。たとえば、素材の型とのすべりの様相も変化していき、温度が降下したところでは、材料の型の表面に固着するような挙動をとっていると考えられる。

したがって、真空成形時には、円柱形状型の上側コーナ部で、素材は型に対してあまりすべ

らず、そのぶん、円柱形状型の下側コーナーでの素材の変形量は大きくなり、板厚も薄くなる。

しかし、解析においては、温度の降下による影響を全く考えず、適当な摩擦係数を設定することのみにより、素材と型のすべりを表現しているため、円柱形状型の下側コーナーでの板厚が、そう薄くならず、実験結果との相違を生じていると考えられる。

今回のシミュレーションの目的として、板厚の予測をおこなう場合、このコーナー部分のような、板厚分布の薄くなる箇所の板厚が、安全サイドで予測できていないと、外観や強度を満足する成形品を設計するという点で、意味がなくなる。

このことから、将来的には、より実際の挙動をうまく表現できる解析モデルを確立していくために、温度変化の影響を、検討していく必要があると考える。

(2)箱形成形品（非軸対称品）

前報（その1）に示したように、箱形成形品では長辺方向断面の板厚分布において、成形品の中央部より、やや離れた箇所、板厚がもっとも薄くなるという特徴をもっており、まず、ブロー成形過程の解析で、この様相を表現することを当面の目標として挙げている。

今回の解析では、表1に示すような6通りのケースで、要素の種類と要素分割の方法を組合せ、解析結果の検討を行った。

素材の変形シミュレーション結果の一例として、図10にケース1での変形図を、また、図11にケース2での変形図と、ミーゼス相当応力の分布図を示す。

要素分割数は素材の変形状態に影響を与えており、分割が粗いケース1（図10）では、クランプ部付近で素材がシャープに立ち上がり、実際の成形品とは異なる形状となっているが、それ以外の解析ケースでは、図11(a)のような実際の成形品形状と同じ、変形状態となる。

また、図12には、ケース2での解析値と、実験値とを比較した板厚分布データーを示す。板厚分布データーについても、ケース3～6は、ケース2とほぼ同じ結果でとなる。これらのことから、ケース2程度の要素分割を行えば、8節点要素を使用して、安定した解析結果が得られることがわかった。

しかしながら、今回の解析では、長辺方向断面の板厚分布において、解析値が実験値よりかなり高い板厚保持率を残しており、また、成形品中央部より、やや離れた箇所板厚がもっとも薄くなるという挙動も、表現できていない。

軸対称品の2次元解析では、細かい部分での実験結果との不一致はあったが、基本的な点で

表1 ソリッド要素の種類と要素分割の組合せ

ケース	要素の種類	要素数	板厚方向の要素分割
1	8 節点	200	無 し
2		450	
3		1250	
4		900	
5	20節点 低減積分	200	無 し
6		450	

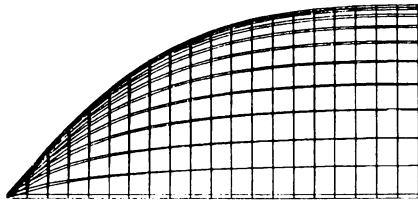


図10 ケース1でのブロー成形シミュレーション結果

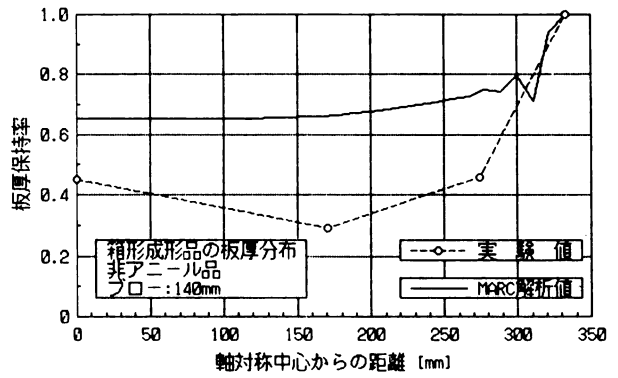
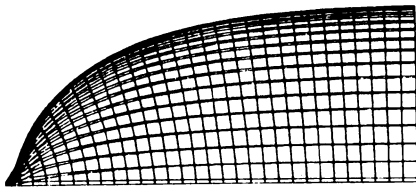
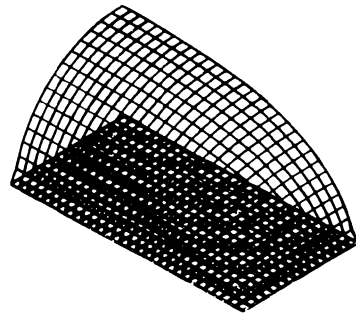


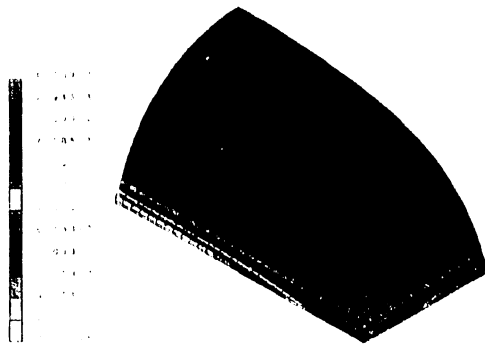
図12 ブロー成形後の厚み分布 (解析ケース2)



(a) 素材変形状態



(b) 素材変形状態



(c) ミーゼス相当応力

図11 ケース2でのブロー成形シミュレーション結果

は良好な一致が、見られた。しかし、非軸対称品のブロー成形での3次元解析では、解析結果と実験結果にかなりの差が見られる。

その原因については、いくつかの点が考えられるが、使用した材料定数の問題が一番大きいと考えている。

5. まとめ

前報（その1）で提案した比較的簡単な解析モデルにより、ブロー成形、突き上げ成形、真空成形の各工程の数値シミュレーションを試み、解析結果を実験結果と比較してみて、非軸対称品のブロー成形の3次元解析を除いて、基本的な点では、良好な一致を得られることを確認できた。

変形状態が、ほぼ良好にシミュレーションできれば、成形後の残留応力状態を予測できるので、成形品トリミング後の、そり変形の原因予測が可能になる。

超音波法(音弾性)による構造物の非破壊的な応力測定・材料評価について 小堀修身(工学部)

1. 研究の目的

通常の構造物は十分な安全性を考慮して設計、構築されている。しかしながら長期間又は過酷な使用で破壊(破損)状態に近い応力が発生していることもある。材料内部に発生するこのような残留応力の多くはこれまで破壊法によって調べられてきた。

超音波(音弾性)法は材料を破壊せずに、その状態を調べる方法として注目されている。研究目的は非破壊な応力測定を可能とするためにいくつかの検討を行なっている。

2. 分担研究課題の中間報告

1. 非線形弾性論による音弾性効果のまとめ

透明な固体が外力の作用によって一時的な光学的異方性を示し、この中を通過する光を複屈折させる。

光弾性はこれによって生ずる2つの横波の相対的位相差が主応力差に比例することを利用した応力測定法である。光の場合と同様に、外力によって変形した弾性体中を超音波横波が伝播するときにも、音波の複屈折現象の生ずることが実験的にも確かめられた。これを光弾性にならって、音弾性(Acoustoelasticity)と名づけられた。

この現象は応力・歪の比例関係からの外れと変形による形状変化のために、初期変形と音波による変形の間を重ね合せの原理が成り立たない事に起因している。従って現象論的な解析は非線形弾性論に基づいてなされる。

静的変形を受けて応力が生じている弾性体中を微小振幅弾性波が伝播する場合、運動方程式は非線形弾性論を用いると

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ l_{klmn} \frac{\partial w_m}{\partial x_n} \right\} - \rho \ddot{w}_k = 0, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned}
 l_{klmn} &= \lambda_{klmn} + \mu_{klmn}, \\
 \lambda_{klmn} &= \rho \frac{\partial x_k}{\partial X_p} \frac{\partial x_l}{\partial X_q} \frac{\partial x_m}{\partial X_r} \frac{\partial x_n}{\partial X_s} \frac{\partial^2 F}{\partial E_{pq} \partial E_{rs}}, \\
 \mu_{klmn} &= \rho \delta_{km} \frac{\partial x_l}{\partial X_p} \frac{\partial x_n}{\partial X_q} \frac{\partial F}{\partial E_{pq}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、

X_k : 無応力状態での粒子の位置,

x_k : 静的変形を受けた状態での粒子の位置,

x'_k : 微小振幅の弾性波が重畳されている状態での粒子の位置,

$w_k = x'_k - x_k$,

ρ : 静的変形を受けた状態での密度,

F : 単位質量あたりのひずみエネルギー関数,

$$E_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial x_m}{\partial X_k} \frac{\partial x_m}{\partial X_l} - \delta_{kl} \right).$$

通常の弾性変形では $|E_{kl}| \ll 1$ であるから

F はひずみ E_{kl} の多項式

$$\rho_0 F = \frac{1}{2!} C_{ijkl} E_{ij} E_{kl} + \frac{1}{3!} C_{ijklmn} E_{ij} E_{kl} E_{mn} + \dots \quad (3)$$

で近似できる。式(3)で C_{ijkl} , C_{ijklmn} は 2 次および 3 次の弾性定数であり、等方性体の場合、Lamé の定数 λ , μ および Toupin & Bernstein の定義による 3 次の弾性定数 ν_1, ν_2, ν_3 を用いると

$$\left. \begin{aligned}
 C_{ijkl} &= \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{kj}), \\
 C_{ijklmn} &= \nu_1 \delta_{ij} \delta_{kl} \delta_{mn} + \nu_2 \{ \delta_{ij} (\delta_{km} \delta_{ln} + \delta_{kn} \delta_{lm}) \\
 &\quad + \delta_{kl} (\delta_{im} \delta_{jn} + \delta_{in} \delta_{jm}) + \delta_{im} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \} \\
 &\quad + \nu_3 \{ \delta_{ik} (\delta_{jm} \delta_{ln} + \delta_{jn} \delta_{lm}) + \delta_{jl} (\delta_{im} \delta_{kn} + \delta_{in} \delta_{km}) \\
 &\quad + \delta_{jk} (\delta_{im} \delta_{ln} + \delta_{in} \delta_{lm}) + \delta_{il} (\delta_{jm} \delta_{kn} + \delta_{jn} \delta_{km}) \}.
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(2), (3), (4)を用いてひずみ E_{kl} の 2 次以上の省略すると

$$\left. \begin{aligned}
 l_{klmn} &= \{ \lambda + (-\lambda + \nu_1) e \} \delta_{kl} \delta_{mn} + \{ \mu + (-\mu + \nu_2) e \} \\
 &\quad \times \delta_{kn} \delta_{lm} + \{ \mu + (\lambda - \mu + \nu_2) e \} \delta_{km} \delta_{ln} + 2(\lambda + \nu_2) \\
 &\quad \times \{ \delta_{kl} e_{mn} + \delta_{mn} e_{kl} \} + 2\mu \delta_{km} e_{ln} + 2(\mu + \nu_3) \\
 &\quad \times \{ \delta_{lm} e_{kn} + \delta_{kn} e_{lm} + \delta_{ln} e_{km} + \delta_{km} e_{ln} \}
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 e_{kl} は静的変形による変位 $u_k = x_k - X_k$ を用いて $e_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right)$ と表わされる通常の線形のひずみであり、 $e_{kk} = e$ である。

伝播特性解析のため、単軸応力状態での応力軸方向を座標軸 (x_1 軸) とする直交座標系

0 - x_1 x_2 x_3 を導入する。波の伝播方向は応力軸に垂直で x_3 軸方向とする。
弾性体中を伝播する平面波の解を

$$w = A \exp i(\omega t - k \cdot r) \quad (6)$$

とおく、ここに、 A は振幅ベクトル ($= (A_1, A_2, A_3)$)、 k は波数ベクトル ($= (K_1, K_2, K_3)$)
であり波の速度を v とすれば $v = \omega / k$ である。式(6)を基礎方程式(1)に代入すれば伝播特性を
決定する式は

$$\begin{pmatrix} l_{1m1q} k_m k_q, & l_{1m2q} k_m k_q, & l_{1m3q} k_m k_q \\ l_{1m2q} k_m k_q, & l_{2m2q} k_m k_q, & l_{2m3q} k_m k_q \\ l_{1m3q} k_m k_q, & l_{2m3q} k_m k_q, & l_{3m3q} k_m k_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} = \rho \omega^2 \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix}$$

となり、さらに伝播方向が x_3 軸方向であることを考慮すると、波が存在するための特性方程式は

$$\left. \begin{array}{l} \left| \begin{array}{ccc} \mu + \Delta \Gamma_{11} - \rho v^2 & \Delta \Gamma_{12} & 0 \\ \Delta \Gamma_{12} & \mu + \Delta \Gamma_{22} - \rho v^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + 2\mu + \Delta \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{array} \right| = 0 \\ \Delta \Gamma_{11} \equiv (\lambda - \mu + \nu_2) e + 2(\mu + \nu_3)(e_{11} + e_{33}) + 2\mu e_{33}, \\ \Delta \Gamma_{22} \equiv 2(\mu + \nu_3) e_{12}, \\ \Delta \Gamma_{22} \equiv (\lambda - \mu + \nu_2) e + 2(\mu + \nu_3)(e_{22} + e_{33}) + 2\mu e_{33}, \\ \Delta \Gamma_{33} \equiv (-2\mu + \nu_1 + 2\nu_2) e + (4\lambda + 10\mu + 4\nu_2 + 8\nu_3) e_{33}. \end{array} \right\} \quad (7)$$

ここに、 $\Delta \Gamma_{kl}$ はすべてひずみの 1 次のオーダーである。

式(7)から縦波、横波の音速はこの場合、次のように表される

$$\left. \begin{array}{l} \frac{V_L - V_{L0}}{V_{L0}} = K_L \sigma \quad (\text{縦波}) \\ \frac{V_1 - V_{10}}{V_{10}} = K_1 \sigma \quad (\text{横波 1}) \\ \frac{V_2 - V_{20}}{V_{20}} = K_2 \sigma \quad (\text{横波 2}) \end{array} \right\} \quad (8)$$

ここに添字 1, 2 は応力軸に垂直および平行を表わす。

K_L, K_1, K_2 は 2 次および 3 次の弾性定数を用いて表わされ、これを音弾定数と呼ぶ。

2 セラミックスの音弾性効果測定

これまでに一般の金属 (鋼、アルミ、銅等) について音弾性効果の測定例はいくつか報告されているがこれをセラミックスに適用した研究はこれまで殆んど見当たらない。

昨年度はマシナブルセラミックスを試料として実験を行なった。

超音波縦波、横波を試料面に垂直に入射させて、反射法による音速測定を行なった。はじめに横波を用いて偏り方向を回転させ、試料の初期異方性を調べた。試料は直交異方性体と思わ

れるが、異方性の程度は小さい(0.07%)

次に試料に圧縮力を負荷して、応力-音速の関係を調べた。横波は応力と共に音速が増加し(音弾性定数 > 0)、縦波は減少(音弾性定数 < 0)した。いずれの変化も直線的で音弾性則、式(8)が実験的にも成立つことを確認した。

実験結果の音弾性定数は金属のアルミとよく類似している。セラミックスの成分としてSi, Alがそれぞれ46%、35%含まれていることを考えると妥当と思われる。さらに、セラミックス材料の2次および3次の弾性定数を算出した。

なを、この研究結果を過日平成4年3月28日、日本非破壊検査協会音弾性研究会にて講演した。

弾塑性領域における連成不安定現象に関する研究 小松定夫(工学部土木工学科)

近年、高強度鋼材の開発、溶接工法の発達、構造解析学の進歩、建設施工法の近代化などにより鋼構造物の軽量化および長大化が急速に推進されてきた。

それで、高強度鋼の薄板を溶接集成した長大薄肉部材が主要部材として使用されることがしばしばである。特に、それらが圧縮部材あるいは曲げ部材として使用されると、部材を構成する薄板に板曲げ座屈が生じ、それが原因でその周辺の断面の曲げ剛性が急激に低下して、部材全体が耐荷力を失う場合がある。これは、いわゆる局部座屈が先行して部材が崩壊する場合である。一方、部材全体が曲げ変形を起こし、それに伴い板曲げを誘発して崩壊する場合がある。

実際の構造部材では、これらの崩壊現象ではほとんど弾塑性領域で生じるので、その解明には大型模型による破壊実験またはコンピュータによる複雑な構造解析が必要である。前者については、膨大な費用と労力を要する。そこで、コンピュータによるシミュレーション解析が有用である。

この種の現象を解明することは、長大薄肉部材の強度設計において基本的に重要な問題である。

本研究においては、まず薄肉断面を有する中心圧縮材について、有限要素法による弾塑性有限変位立体解析を実施し、既往の実験結果と対比して解析法の有用性を検証する。

次に、本解析法を適用して、主として次の諸問題について究明し、薄肉中心圧縮材の弾塑性座屈特性を明かにしようとするものである。

- (1) 画像処理により、圧縮応力度の各段階における立体変形モードの変遷を調べる。
- (2) 極限状態付近における部材軸の曲げ変形モードと断面変形モードの関連性についてしらべる。
- (3) 部材の無次元細長比と構成板の無次元巾厚比による座屈特性の変化について調べる。

- (4) 局部座屈領域、連成座屈領域および部材座屈領域にわたって無次元最大座屈応力度がどのように変化するかを調べる。

以上のような諸事項について有用な資料を提供するのが本研究の主な目的である。

分担研究課題の中間報告

数値解析の為のコンピュータプログラムを完成し、解析法の合理性を検証することが出来た。