

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

静的陽解法有限要素法による チューブハイドロフォーミングに関する研究

Simulation of tube hydroforming
by static explicit Finite Element Method

申 請 者

浜 孝之

Takayuki Hama

機械工学 専攻 材料力学 研究

2003 年 11 月

地球環境問題に対する世界的な関心が高まりを見せているのに呼応する形で、自動車業界においては車体の高強度化を図りつつ、同時に軽量化を達成することが急務となっている。そうしたなかで近年では、ULSAB プロジェクトにおいて採用されたことをきっかけとしてチューブハイドロフォーミング(以下、THF)が大きな注目を集めている。これは中空構造部品の新たな成形方法であり、部品の軽量化や高強度化、コスト削減などの様々な要求を同時に達成できる加工技術として注目されている。しかし THF ではこれまでに培ってきた成形ノウハウだけでは対応できない問題が数多く発生しており、広範な基礎知識が欠如しているのが現状である。その結果実際の現場では金型/工程の設計にはトライアンドエラーによる解決が余儀なくされており、多くの労力と多大なコスト、エネルギーが必要となる。従って今後のさらなる利用拡大には、有限要素法(以下、FEM)を用いたデジタル生産システムによる THF 成形性の事前予測が必須となっている。

これまでに、THF 解析に対応したソフトウェアはいくつか開発されている。しかしそのほとんどが動的陽解法に基づくものであり、準静的な変形過程をたどるプレス加工や THF 解析に対しては精度の観点から十分とは言えない。その問題の一つとして、スプリングバックの解析精度が挙げられる。THF 自体はスプリングバックがほとんど生じないことが大きな魅力であるが、予備成形として行う管の曲げ加工においては高精度なスプリングバック予測が必要となる。そのため THF には、予備成形工程からの一連の工程全てを精度良く解析できるソフト、すなわち静的解法に基づくソフトウェアが適している。しかしその一方で、静的解法に基づく THF 解析プログラムはほとんどないのが現状である。

以上のような状況を踏まえて本研究では、THF に関する静的解法 FEM 解析プログラムの開発、および FEM 解析を援用した THF 成形特性の究明、の 2 つのフェーズに分けて研究を進めることにより、この両者の観点から THF 解析に関連した体系的な研究を行った。本論文は以下に示す 8 章から構成されている。

- 第1章 序論
- 第2章 弾塑性有限要素法における力学モデリング
- 第3章 静的陽解法有限要素法の定式化
- 第4章 接触問題の定式化
- 第5章 円管の型張り出し成形解析
- 第6章 自動車用実部品解析と成形性の検討
- 第7章 内圧を振動させたハイドロフォーミング解析
- 第8章 結論と今後の展望

第 2 章から第 4 章では高精度 THF 解析プログラムの開発に主眼をおき、骨子となる連続体力学に基づく基礎理論およびその離散化手法について述べている。本研究では静的陽解法に基づく板成形シミュレーションプログラム ITAS3D をベースとして THF 解析プログラムの開発を行った。またここでは塑性加工プロセスの解析において解析精度を大きく左右する接触問題の取り扱いについて、本研究で新たに提案したアルゴリズムを中心にその定式化手法を論じている。第 5 章から第 7 章では本研究で開発した THF 解析プログラムによる解析事例を通して、解析プログラムの解析精度、また自動車用実部品解析を通じた THF 成形性の検討を行っている。以下に、各章で述べている内容の概要を示す。

第 2 章では、ITAS3D および本研究の骨子となる連続体力学に基づく力学モデリング手法について示している。まず連続体力学の枠内における平衡方程式を弱形式化することで仮想仕事の原理式を導いた。そしてそれを増分分解することにより不釣り合い力補正項を考慮した速度形 updated Lagrangian 形式の仮想仕事の原理式が導かれる過程を詳細に示した。また Lee の弾塑性分解に基づいて変形速度テンソルの弾塑性加算分解を行い、それに基づいて物質客観性の原理を満たす微小弾性 有限塑性構成式を導出し

た．これにより，THF 解析を行う上で必要となる力学的な枠組みを示した．また同時に，これら力学モデリング上で残っているいくつかの問題点を示すことで，今後の課題を明らかにした．

第 3 章では，第 2 章で導いた速度形 updated Lagrangian 形式の仮想仕事の原理を有限要素離散化する過程を示している．ソリッド要素およびシェル要素の定式を示し，また THF 解析上問題となりうる点を明らかにしたうえで，これらを克服するための定式を示した．また本研究で新たに導入した圧力に起因する表面力ベクトルの離散化過程を示した．これより THF 解析では荷重剛性マトリクスの影響により全体剛性マトリクスが非対称となる場合があることを明らかにした．続いて静的陽解法 FEM 解析を行う上で不可欠となる，アダプティブな増分制御アルゴリズム r_{\min} 法について示した．それにより非線形性をもたらす各種要因を明らかにし，その制御方法を示した．またそれでも発生しうる不釣り合い力を，静的陽解法の枠組みの中で陽的に補正するアルゴリズムを示した．最後に本研究で開発したプログラムのフローチャートを示し，本解析プログラムの枠組みを明らかにした．

第 4 章では，従来から ITAS3D で用いられてきた接触問題の定式化手法を見つめ直すことにより，さらなる解析パフォーマンスの向上を目指して検討を行っている．まず変分原理に基づく接触による仮想仕事の統一的な定式化を行い，それに基づいてこれらの離散化過程および取り扱い手法を示した．本研究では静的陽解法の枠内において接触に関連する 3 つの新しいアルゴリズムを提案した．()consistent tangent stiffness matrix の概念に基づいて三角形メッシュで記述された剛体工具に特化した新たな工具曲率に伴う接触力補正アルゴリズムを提案した．そして板材のハット曲げ成形のスプリングバック解析を行った結果，本アルゴリズムは本論文で示した接触力補正アルゴリズムのなかで最も有効な手法であることを示した．()静的陽解法の枠組みにおいて，定式上ローカルサーチに求められる全ての要件を満足する高精度かつ高速な接触探索アルゴリズムを提案した．自動車用実パネルを対象としてその成形過程の解析を行ったところ，本接触探索アルゴリズムは計算速度，計算精度，および頑健さの全ての観点から高い解析能力を有することを示した．()シェル要素を用いた THF 解析においては従来の離脱判定アルゴリズムが適用できないことを示し，その上で力学的に明解な新たな離脱判定アルゴリズムを提案した．これらの研究により，ITAS3D をベースとした THF 解析プログラムを開発し，さらに ITAS3D における接触問題の取り扱いのさらなる高精度化および高速化を実現することができた．

第 5 章では，本研究で開発した THF 解析プログラムの解析精度および妥当性を検討するために，円管の型張り出し成形を対象として解析を行っている．ここでは内圧と変形の関係，各変形段階における円周ひずみ分布，および肉厚ひずみ分布に関して実験結果と詳細に比較検討を行った．その結果，シェル要素，ソリッド要素のいずれの要素による解析結果も実験結果とよい一致を示し，それにより本解析プログラムの妥当性，および高い解析精度を示すことができた．またこれらの結果から実用的にはシェル要素による解析が適していることを示した．さらに，THF 解析を行ううえで静的陽解法弾塑性 FEM は十分有効な解析手段であることを明らかにすることができた．一方で本解析では管端部付近において実験結果とのずれが見られ，より高精度な解析を行うにはこの部位も含めたより厳密なモデリングを行う必要があることを明らかにした．

第 6 章では，本研究で開発した解析プログラムを用いて多工程を要する自動車用ハイドロフォーム部品の成形解析を行っている．全ての工程を対象とした連続シミュレーションを行い，最終成形品における肉厚ひずみ分布を実験結果と比較したところよい一致が見られた．それにより，本解析プログラムは実部品レベルの複雑形状に関する解析に対しても十分有効であることを示した．また本部品に関しては，摩擦係数 $\mu=0.05$ とすることで肉厚分布に関して実験結果と非常に一致を示すことを明らかにし，今後の THF 解析における一つの指針を示した．さらに電縫鋼管を素材とした部品の成形解析を行う場合，

溶接部を考慮することが高精度な解析においては非常に重要であることを明らかにした．そして本研究では一つの有効なモデリング手法を示した．

本部品は，プリベンド工程で圧縮変形を受ける部分(曲げ部の内側)において，割れが発生する場合がある．そこで割れの発生原因について解析を用いて検討した結果，以下のことが明らかとなった．()割れ発生が見られる曲げ部内側では，曲げ部外側と比べて大きな周方向の伸びが必要であり，その結果非常に大きな周方向引張りひずみが発生する．()割れ発生部位は管端から遠く，また曲げ部付近であるため，端部からの軸押し込みの影響を受けづらい．その結果，軸方向圧縮ひずみが発生しにくい．これらの原因が複合的に作用した結果，この部位は割れが発生するほど厳しい変形となったことを明らかにした．

以上の結果から，管端部からいかに軸方向へ材料を送り，軸方向圧縮ひずみを生じさせるかが割れ発生抑制のキーポイントとなることを明らかにし，割れ発生対策への一つの指針を示した．

また本部品の場合，プリベンド工程で曲げ部内側に発生する軸方向圧縮ひずみは，ハイドロフォーム工程で発生するひずみに比べて相対的に非常に小さいため，プリベンド工程における圧縮変形は成形性には大きな影響は及ぼさないことを示した．一方でプリベンド工程において引張りひずみが発生する曲げ部外側では，比例負荷的なひずみ経路をたどる場合よりも成形限界が向上しうることを明らかにした．

また摩擦係数を変化させた数値実験を行った結果，割れ発生が見られる部位付近では摩擦状態の違いによって成形性が大きく異なることを明らかにした．これより実成形中に起こる摩擦状態の微妙な変化により，割れが発生しないまま成形終了する場合や，成形途中で割れが発生し始める場合があることを示した．

第 7 章では，第 6 章で対象とした部品に対して近年注目を集めている内圧を振動させたハイドロフォーミングを適用し，その成形解析を行っている．その結果，振動成形解析の結果は，実験結果と肉厚ひずみ分布に関して定性的によい一致を示し，本解析プログラムによる振動成形解析の有効性を示すことができた．また振動成形において成形性が向上する原因を検討した．その結果振動成形では，圧力を振動させない慣用成形よりも低い圧力履歴で慣用成形と同程度の拡張量が得られるという特長を有することを示した．この結果より，振動成形では第 6 章で示した成形性向上のためのキーポイントである部品全体にわたる軸方向材料流動の改善が実現され，結果として割れ発生が抑制されることを明らかにした．また振動成形の結果と，慣用成形で摩擦係数のみを変化させた解析の結果を比較した結果，振動成形を行うことにより慣用成形における摩擦係数低減と同様の効果が得られることを明らかにした．

以上の研究より得られた成果をまとめると，以下ようになる．まず本研究で開発した静的陽解法弾塑性有限要素法に基づく THF 解析プログラムは，研究レベル，実用レベルのいずれにおいても高い解析精度を有していることを示した．また本解析プログラムを用いて THF 成形性について検討したところ，次の知見が得られた．1)THF では管端部からの軸押し込みをどれだけ効率よく送ることができるかが成形性向上のキーポイントとなる．2)振動成形では，圧力を振動させて慣用成形よりも低い圧力履歴を用いることにより，このキーポイントを実現している．これにより，成形性向上への一つの有効な指針を示すことができた．

本研究で開発したプログラムは，THF で必要となる全ての工程を静的解法により連続的にシミュレーションすることのできる，これまでにない全く新しいソフトウェアである．また本研究により THF 解析を行う上でいくつかの有効な指針を示した．これによりこれまで以上の解析精度の向上が期待でき，その結果 THF のさらなる利用拡大につなげることができると考える．今後さらなる解析精度の向上を目指して，接触問題の取り扱いを中心とした定式レベルでの詳細な検討を進めていきたい．

以上