

氏名(本籍)	佐藤 浩一 (栃木県)
学位の種類	博士(情報科学)
学位記番号	情 第 30 号
学位授与年月日	平成15年9月11日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
最終学歴	平成8年3月 東北大学大学院情報科学研究科情報基礎科学専攻 博士課程前期2年の課程
論文題目	チューブハイドロフォームにおける成形性評価に関する研究
論文審査委員	(主 査) 東北大学教授 伊藤 耿一 東北大学教授 猪岡 光 東北大学教授 庄司 克雄 宇都宮大学教授 淵澤 定克 (工学研究科)

論文内容要旨

1. はじめに

今日、自動車用材料としての鋼管の用途は多岐にわたり、側面衝突時の補強部材であるドアインパクトビームやエンジンのトルクを後輪へ伝えるプロペラシャフトなど幅広く適用されている。一方近年、自動車を取り巻く環境は大きく変化しつつあり、地球環境への配慮から、エンジン効率化の為に、ハイブリッドシステムの採用や、ボディーやシャーシ部品の軽量化などが急速に進められている。しかし、板材をプレスした後の溶接や組み付け工程の効率化や走行安定性や乗心地向上のための高剛性化なども並行して進める必要があり、自動車メーカーのみならず素材メーカー含め検討を進めている。

このような背景の中、これまで板材をプレスし、後にそれらを溶接することにより製造していた、フレームなどの閉断面構造部品を、電縫溶接鋼管などの管材を素材として成形する「チューブフォーミング」の加工技術とそれにより製造される部品への関心は高まり、高圧の液体(水)をチューブの中に負荷して、外側の金型に押し付けることにより、形状を作りこむ「ハイドロフォーム」加工技術が欧米を中心に適用される例が増加している。

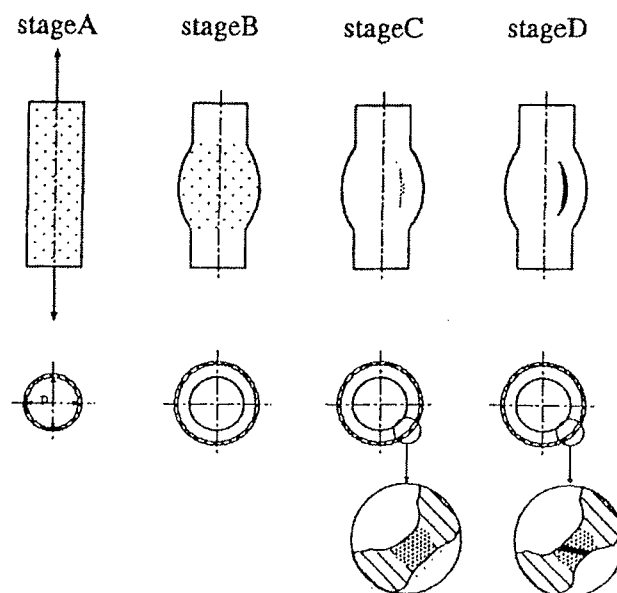
ハイドロフォーミングは今から50年ほど前、1951年に Cincinnati 社が開発した板成形法で、その後、航空機産業への適用や管楽器の製造などにも用いられてきた。また、国内においても、1950年代後半から、名古屋工業試験所と自転車技術研究所にて自転車のフレーム結合部への適用を目的とした開発が行われていた。しかし、大量の部品を高速でかつ複

雑な加工品の製造を要求される自動車産業への適用は、コスト・安定製造の面から見送られてきた経緯があった。

ところが、1990 代年に入り、鋼材の加工性の向上やメカトロニクス技術の発展を背景に、加工性、設計自由度の向上と設備の高速化による部品一品あたりの設備投資の安価化により欧米を中心に急速にハイドロフォーム加工技術の適用が進み、日本国内でも 1990 年代後半より、ハイドロフォームへの適用が開始され、年々その量は増え、量産化技術に加え、部品設計技術への対応要求が高まっている。

このように適用が進むハイドロフォームであるが、液圧加工前にその素材としての形状を最適化するため曲げ加工やプレス加工を必要とする場合が多く、それゆえ複雑な成形工程を強いられるため、加工工程全体つまり加工にともなうひずみや応力の履歴を把握することは難しい。それゆえ、成形の可否判断や最適材料の選定が困難となり、現状では十分な予測精度を得られていない。それら成形過程を確実に把握するためには、プレス成形にて多く用いられている FEM 解析技術による加工解析が有効であるが、一方で、その過程において成形の可否判定の予測精度を高めるためには、データベースの構築や理論予測が不可欠といえる。

本研究では、上記の点を考慮し、ハイドロフォームにおける成形過程の把握と成形限界の評価を行い、それらと FEM 解析結果を組み合わせることにより、加工性評価を行い、精度の検証と問題点の整理、さらには課題の解決を図った。また、電縫溶接鋼管を素管としたハイドロフォームを行う際に問題となる材料因子、鋼管製造因子などを抽出し、それらを基に新たな加工方法の構築を行った。具体的な章構成については下記の通りである。



2. 論文内容

第1章 序論

第一章では hidrofoam 技術の背景の述べ、現状の問題点を整理し、その解決手段としての本論の概要を説明した。

第2章 hidrofoamの成形限界評価システムの開発

複雑な成形過程を取る hidrofoam において、材料の適正化や FEM 解析結果の成形限界評価を行うためには、加工中の履歴を考慮し、且つ応力・ひずみを独立に測定する技術が成形履歴の把握の点からは不可欠といえる。そこで、管材に対し、軸方向への引張・圧縮と内圧をサーボモータで制御することによるひずみもしくは応力のコントロールを可能とする装置を開発した。これにより任意のひずみ・応力経路に対する制御を実現し、さらに鋼管表面に描かれた基準点群を CCD カメラによる画像処理を行うことで、オンラインでのひずみ測定を実現した。本章ではその装置の概要と、基本スペックの評価を行った。

第3章 hidrofoam成形性評価実験およびその結果

hidrofoam における成形限界評価においては、広範囲でのひずみ比に対して評価を行う必要がある点や、複雑なひずみ履歴を取る可能性があるなど、より多機能かつ高精度なデータを要求される。また、成形限界を評価する上で、ひずみ値としての限界値だけでなく、加工中の材料特性の変化や応力曲面での評価などを行う必要もある。そこで本章では、第2章で述べた開発装置により、hidrofoam の評価には不可欠といえる基本的な破断限界評価に加え、特定のひずみ経路における破断限界、応力-ひずみ曲線、応力曲面の評価を行い、本装置の有効性を確認し、さらには得られたデータを分析することで、hidrofoam 特有の加工形態や特徴を考察した。

第4章 hidrofoam成形限界評価のための基準式及び解析

FEM 成形解析を実際に自動車部品を設計・製造する際に用いるためには、解析によって得られたデータをどのように分析し、成形不良を評価するかが問題となる。具体的には各要素情報を現実の成形と照らし合わせ、どの段階でシワ、破断といった成形不良が発生するかを予測することになる。それら評価基準の確立と活用における問題は未だ多い。そこで本章では、近年適用が進んでいる薄板材のプレス成形限界の理論予測について冒頭で触れ、その後 hidrofoam への理論予測の適用を試み、その問題点について述べる。また、hidrofoam 特有の内圧負荷状態による座屈の発生についての理論予測とそれらに与え

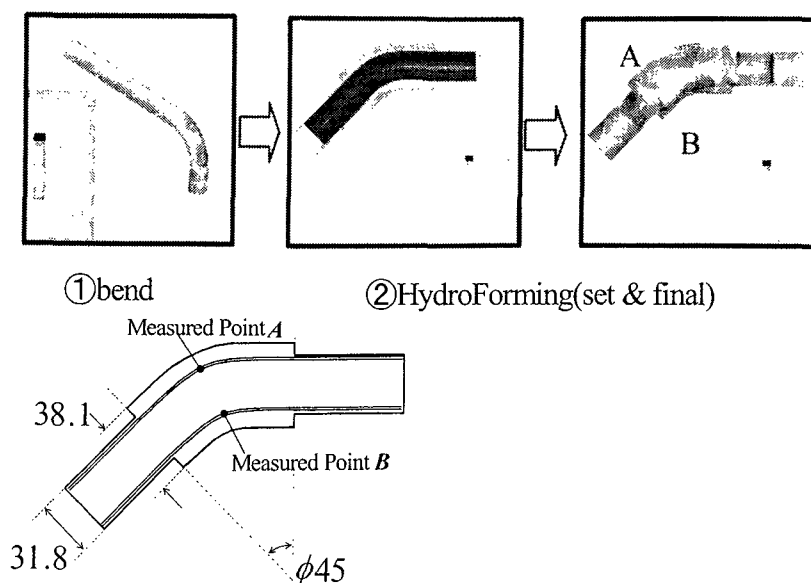
る材料の影響についても検討した。

第5章 3次元破断限界理論とハイドロフォームへの適用

円管を素材として用いるハイドロフォームにおいては、曲率や板厚方向に加えられる高水圧の影響が破断限界に及ぼすため平面応力を仮定した2次元での破断基準に基づく予測理論(S-R理論)では限界がある。本章では、板厚方向の応力を考慮することが可能となる平面応力下で2次元を仮定したS-R理論を3次元に拡張し、そのくびれモードを規定することにより破断限界を行う3次元破断理論を提案する。さらには、それを鋼管の曲率をも考慮できるモデルとするため、円筒座標系にて破断限界予測を行い、管の径や板厚を考慮した精度の高い理論予測を行った。

第6章 実部品への理論予測の展開 -ひずみ経路依存性の効果-

実際に自動車部品などに適用されているハイドロフォーム技術は、単に直管に対して液圧を付与して行われるケースは少なく、液圧加工前に曲げ加工やプレス加工のような「予成形」を施すことが多い。これら予成形は複雑な形状を一体成形することのできるハイドロフォームの可能性を拡大する一方で、その成形状態、成形過程をも複雑とし、FEM解析などによる事前評価を混乱させる要因となっている。そこで本章では自動車部品のハイドロフォームにおける予成形として最も実用化例の多い「回転引き曲げ加工」についてFEM解析や実験による分析を行い、それらの影響を踏まえ、ハイドロフォーム成形評価を行うことの重要性と示し、評価技術の有用活用方法について提案する。成形のモデルについては、曲げ+拡管のモデルとして多く用いられる「S字形状」を取り上げた。(下図)



第7章 型移動によるひずみ制御ハイドロフォーム加工技術

自動車メーカーや部品メーカー各社は、自動車の構造として求められる剛性と強度を両立するためには、閉断面構造である鋼管を素材として選択することで、上記の特性に加え、軽量化の可能性もあるとして、ハイドロフォーム加工技術は近年精力的に開発されている。しかし、液圧で鋼管を膨らますことが主たる加工力となるハイドロフォームにおいては、プレスのだいすやパンチさらにはブランクホルダー等の金型類の動きを組み合わせることができるプレス加工に比べ、成形自由度が小さく、しいては部品に対する設計自由度が小さいといった問題点が浮き彫りになってきた。つまり成形自由度の低さが故、現状採用されているプレスした板材を溶接し構造部材とする工法からの置き換えメリットが小さく、またプレス・溶接構造の部品と同等の形状に作りこむことが困難であった。本章では、前章までに得られた知見やアイテムをベースとして、金型をいくつかのパーツに分け、必要な部分の材料を積極的に移動させるべく金型を稼動式とする加工技術を提案し、それにより成形自由度を向上させ複雑かつ大変形を要求される部品の製造を可能にすることを示した。さらに、材料として有利な応力・ひずみ状態や履歴を実現する手法を提案し、その実施例について述べた。

第8章 結言

前章までの流れを整理し、本論をまとめるとともに、今後のハイドロフォーム技術の展開について論じた。

論文審査の結果の要旨

チューブハイドロフォームは、軽量かつ高剛性化を要請される自動車部品製造への適用の期待は大きい成形法である。一方、設計段階での成形性評価のための FEM 解析は必須の生産技術であるが、チューブハイドロフォームは多数の成形性支配因子が複雑に影響し合うために、現状の FEM 解析における予測精度は不十分である。本論文はひずみ履歴の成形性に及ぼす影響と破断モードを考慮できる新たな破断限界ひずみ評価の理論を提案することにより、FEM による成形性評価精度を実用レベルまで向上させたものであり全編 8 章よりなる。

第1章は序論であり本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、円管に任意の負荷経路をあたえることのできる材料試験装置を開発し、これにより材料特性に及ぼす複雑なひずみ経路の影響ならびに破断限界ひずみを実験的に評価することが可能とした。

第3章では、前章で開発した装置を用いて、広範囲なひずみ履歴についての実験を行い、材料特性および破断限界ひずみに関する系統的なデータを分析することにより、チューブハイドロフォームの成形限界線図の特徴ならびに、非比例負荷経路においては最終の応力比が破断限界を支配していることを明らかにしている。これは成形性向上のための最適負荷経路が設定し得ることを示唆するもので、価値ある知見である。

第4章では、従来板材のプレス成形限界の評価に採用されてきた理論の問題点を分析し、チューブハイドロフォームでは素材の形状異方性ならびに内圧負荷に伴う3次元応力場を考慮できるような破断限界ひずみ評価基準式が必要であることを明らかにしている。

第5章では、従来理論の問題点を克服するために3次元応力場を前提として破断モードを選択できるような新たな3次元破断限界予測理論を提案し、これをチューブハイドロフォーミング成形過程の FEM 解析結果に適用し、適切に破断モードを選択することで、実用に耐えうる精度の高い成形限界の予測が可能であることを確認している。これは塑性力学における新たな提案であり、生産技術上価値ある成果である。

第6章では、第3章で得られた破断限界ひずみのひずみ経路依存性に関する知見を実部品の曲げ加工後の液圧成形過程の連続シミュレーション結果に適用して、予成形過程のひずみを適切に制御することにより最終成形量を改善できることを明らかにしている。

第7章では、移動金型の採用により積極的にひずみ経路を制御できる T 字成型用ハイドロフォーム加工機を新たに開発し、従来法に比べて著しい成形性の向上と装置の大巾な小型化を実現した。これは革新的な技術であるとともに、第5章までで得られたチューブハイドロフォームの成形性に関する知見と理論の有効性を示している。

第8章は結論である。

以上要するに、本論文は複雑なひずみ経路をとるチューブハイドロフォーミングの成形限界を精度良く予測するための理論と実験方法を提案し、またそれによって革新的な成形技術を可能としたものであり生産工学ならびに情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。