

氏 名(本 籍)	かざ ま こう いち 風 間 宏 一 (東京都)
学 位 の 種 類	博 士 (情報科学)
学 位 記 番 号	情 第 35 号
学位授与年月日	平成16年 3 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 3 年 3 月 芝浦工業大学工学部機械工学第二学科
論 文 題 目	板材成形における形状不良予測精度向上に関する研究
論文審査委員	(主 査) 東北大学教授 伊藤 耿一 東北大学教授 大林 茂 東北大学教授 井上 克己 (工学研究科)

## 論 文 内 容 要 旨

近年、自動車業界において環境問題、乗員安全問題から軽量化、高強度化への要望が強く、新材料の適用が進んでいる。またコスト低減の要求から部品の大型化、さらに工程数の削減などから1工程内の複雑化が進んでいる。これらの要求から、板材成形加工、プレス加工分野においては不具合の事前予測が非常に困難になってきている。

板材成形加工における不具合は「われ」「しわ」「スプリングバック(弾性回復による形状不良現象)」と大別できる。前述の事前予測が困難となったことから、1990 年代にコンピュータを利用した有限要素法(以下 FEM)による成形シミュレーションが適用され始め、現在では広く普及し「われ」「しわ」の予測についてはある程度の評価を得ている。しかし「スプリングバック」をはじめとする形状不良、寸法不良現象においては、実用的な解析事例も少ない。

これは形状不良現象がスプリングバック変形によって発生することが多く、スプリングバック変形は、第 1 に塑性変形を伴う大変形、大回転後の微小な変形であること。第 2. に「われ」「しわ」はひずみ分布により予測可能であるが、「スプリングバック」は成形の下死点時における応力の開放から発生するモーメントに原因があるため、成形下死点時の応力分布を求める必要があること。第 3 に、現在の成形加工シミュレーションは変位法を基にしたシェル要素を使用することが多く、シェル要素は板厚方向応力をゼロとしているため応力分布の精度が低いこと。以上 3 つの原因があげられる。

そこで、本研究において、上記 3 つの問題点を解決し、スプリングバックを始めとした形状不良の予測精度向上を目的として研究を行う。また研究を行うにあたり、以下の目標を設定した。

- I, 生産現場で要求されているスプリングバック予測精度を満たす。
- II, 実生産品を解析対象とするため、3 次元の板材成形過程をシミュレート可能とする。
- III, 現状のシェル要素による解析と同等な解析時間を目標とする。
- IV, スプリングバックによる形状不良変形が顕著に現われる「曲げ」変形を対象とする。

これらの目標を達成すべく、以下に示すとおり研究を遂行した。

### 第 1 章 序論

板材成形における不具合現象である「われ」「しわ」「スプリングバック」について説明し、それぞれの不具合予測の現状について述べた。FEM による成形シミュレーションが普及し、「われ」「しわ」の不具合予測は実用的に行われているが、「スプリングバック」を始めとした形状不良現象については、現状のシミュレーションでは予測困難である。この問題を解決する研究の目的を明らかにし、その概略を記した。

## 第2章 形状不良のメカニズム

ここでは、現状では最も簡便な方法の一つである、解析的な形状不良予測方法と2次元ソリッド要素によるシミュレーションを用いて、形状不良の発生メカニズムについて検討を行う。

実用的な形状不良予測方法として、解析的な手法があげられる。ここでは曲げのスプリングバック予測、および曲げによって発生する「端部反り」「長手反り」について解析的検討を行い、それらの発生メカニズムを考察し、新たな予測方法を提案する。

次に、スプリングバック変形における成形下死点での応力分布と、スプリングバック変形に影響を与える因子をより正確に把握することを目的に2次元L曲げを細密にメッシュ分割したソリッド要素によってシミュレーションを行う。ここでは  $R/t$  を変化させた際の、板厚方向垂直応力分布および、その応力から発生する曲げモーメント分布による評価およびその影響の考察を行う。

## 第3章 板材成形 FEM シミュレーションの基礎定式

本研究において、汎用性の広さと波及効果の高さから新型形状不良予測用 FEM 新要素の開発を目的とした。この章では、そのために必要な知識として変形の力学モデルにおける、ひずみ、応力およびその関係の取り扱い、さらに仮想仕事の原理およびその離散化過程を記し、最後に要素剛性行列を求めるまでを記した。そして従来の Mindlin-Reissner 型のシェル要素において板厚方向応力が常にゼロであると仮定していることを述べた。

## 第4章 新型板材成形シミュレーションスプリングバック予測用要素の提案

本章において、従来の Mindlin-Reissner 型シェル要素を板材成形シミュレーションに適用する際に発生する問題点について考察を行った。そして、その問題点を解決すべく、新たな板材成形のスプリングバック予測精度向上を目的とした、有限要素法(以下 FEM)シミュレーション用新要素の提案を行った。

既存の FEM シミュレーションの問題点を解決すべく、

- 1)3次元形状での板材成形シミュレーションに適用できる
- 2)成形下死点での正確な応力分布の把握ができる
- 3)板厚方向応力を導入する
- 4)計算時間を可能な限り長くしない
- 5)要素上下面に境界条件を個別に取り扱うことを可能とする。
- 6)応力を独自に内挿したハイブリッド要素も検討する。

を目標に検討を行った。

その結果、

- ・応力を独自に内挿するハイブリッドシェル要素
  - ・変位法を基に Pseudo 節点により板厚方向ひずみを内挿したシェル要素
- を提案し、変位法による板厚方向ひずみを独自に内挿し、Pseudo 節点により要素上下面に独立した境界条件を設定可能なシェル要素が本研究の目的に一致することがわかった。

前章までに、静的有限要素法について、その基礎定式について調査、検討を行った。また板材成形用 FEM シミュレーションプログラムにおいては幾つかの解法が採用されているのにも関わらず、使用されている要素は殆どが Mindlin-Reissner 型のシェル要素である。そこで本研究において、改善の波及効果が高いと考えられる板材成形過程における形状不良予測を目的とした新たな要素を開発することとする。そこで本章では開発目標を具体化し、新要素を提案することが目的である。前述の通り、現在、板材成形過程シミュレーションにおいて使用されている要素は殆ど板厚方向に縮退した Mindlin-Reissner 型のシェル要素である。これは、製品開発という過程においては時間的な制約が大きく、その精度と解析時間の効率からの選択であると言える。しかし Mindlin-Reissner 型シェル要素の板厚方向縮退の仮定により、板厚方向垂直応力が常にゼロと仮定し、面外のせん断応力も要素内に一定となる。この仮定が応力予測精度を低下させ、スプリングバック変形による形状不良予測精度を低下させている。

そこで本研究においては、実用性を重視する観点から3次元、変位法を基本とした新たな Pseudo 節点による新シェル要素を提案した。

新シェル要素は Pseudo 節点により板厚方向ひずみを独自に内挿し、同方向の応力を精度よく求めることが可能となり、高精度な応力分布予測が可能となる。また板厚方向の応力を考慮可能となったことから、より実際に

近い応力のつり合いを満足し、さらに、Pseudo 節点から要素上下面の境界条件を考慮可能となったこととあわせて、板厚方向への金型や流体による負荷の影響をシミュレートすることが可能とした。また従来要素シェル要素では不可能であった、成形下死点での「決め押し」のように板厚方向に加わる応力を表現できる。

## 第5章 提案要素の検証

本章では第4章で提案した新たなシェル要素が、所期の性能を満足しているか、確認および検討を行った。

形状不良の原因となるスプリングバック変形は、成形下死点において負荷されていた応力が開放した際にモーメントを発生することが原因である。その開放される応力は金属の弾性回復により発生することから、スプリングバック変形もほぼ弾性変形と言える。そこで、本研究により提案した新シェル要素における線形微小弾性変形における変形特性を調査し、その後、スプリングバック変形も含めた弾塑性大変形における変形特性の調査を行った。

それぞれの調査により、本研究により提案された新シェル要素は、弾性、弾塑性に関わらず、板厚方向ひずみから同方向の応力を妥当な精度で解析可能であることを確認する。あわせて、スプリングバック変形への板厚方向の境界条の影響も精度良く予測可能であることが確認した。

## 第6章 結論

ここまでの各章で述べて来た、調査および研究内容をまとめ、本研究の結論を導き、本研究内容の意義について記した。

本研究により、スプリングバックを始めとした形状不良現象を予測する手法について研究を進め、汎用的に使用できる有限要素法による板材成形シミュレーション用シェル要素を提案した。本提案要素を用いることにより、実用的にスプリングバック変形予測の実現を目指す。

以上

## 論文審査の結果の要旨

板材成形過程で発生する種々の不具合は、金型の製作以前にシミュレーションで予測することが期待され、その一部は既に実用に供されている。しかしながらスプリングバックに代表される形状不良の予測精度は極めて不十分なのが現状である。本論文はその予測精度向上を目的として、その発生メカニズムの解析と実験による形状不良現象の要因分析を行うとともに、その結果に基づいた板成形シミュレーション用の新たなシェル要素の開発を行ったものであり全編6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、初等理論ならびに平面ひずみソリッド要素による板曲げ加工の数値解析により、そのりおよびスプリングバックの評価を行い、特に通常のシェル要素では考慮されない板厚方向垂直方向応力の存在により、加工完了時の曲げモーメントならびに離型後のスプリングバックが著しく減少することを明らかにしている。

第3章では、大変形弾塑性有限要素法のための基礎理論を概観し、後の章で提案される板材成形過程シミュレーション用シェル要素の定式化のための理論的基盤を整理している。

第4章では、構造解析用として提案されている従来型のシェル要素の板材成形過程のシミュレーションにおける問題点を明らかにし、スプリングバックの予測精度向上のために必要な、板厚方向垂直応力を考慮した3次元シェル要素の新たな提案とその定式化を行っている。これは板材成形シミュレーションに有効かつ新たな提案である。

第5章では、提案したシェル要素を用いた板材曲げ加工過程およびスプリングバックのシミュレーションを行い、板厚方向垂直応力の影響を反映した妥当な結果が得られることを検証している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、板材成形の形状不良現象のメカニズムを解明するとともに、スプリングバック予測精度向上のための新たなシェル要素を開発して、その有用性を検証したものであり、金属加工を対象とした情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文を博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。