

氏名(本籍)	吉田亨 (千葉県)
学位の種類	博士(情報科学)
学位記番号	情博第42号
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程) 情報基礎科学専攻
学位論文題目	板材成形のCAEシステムへの適用を目的とした成形限界の予測に関する研究
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 加藤 正名 東北大学教授 池田 圭介 (工学研究科) (工学研究科)

論文内容要旨

板材成形のなかでも代表的な加工法であるプレス成形法は、自動車や家電などの幅広い分野で用いられている。プレス成形に使用される素材としては板厚の薄い金属板が一般的であり、その薄さ故に加工中の破断という問題が昔からつきまとっている。プレス成形時の破断現象は材料特性・部品形状・成形条件に依存し、それぞれの要因が複雑に影響し合うため、その主要因を特定することは困難であった。特に自動車分野におけるプレス成形は形状が非常に複雑な場合が多く、破断時の対策として、現状では経験に頼ったトライアンドエラーによる対応を余儀なくされている。プレス不良の発生は、金型修正工程や作業の増大、素材費増大、設計変更による工期遅延など、マイナス面が非常に大きい。そのため、型形状や成形条件の最適化や使用材料の適正化を行い、成形時の不良を解消することは重要な課題である。一方、近年、自動車会社をはじめとする製造会社ではコンピュータの支援により設計から生産までを効率的に行うCAD/CAM/CAE化が広まっており、一層のコスト低減や工期短縮が要求されている。プレス成形では、その事前評価が困難であるため、加工してはじめて成形不可であることが判り、設計変更となる問題もしばしば生じていた。設計段階でプレス不良を予測できるようになれば、部品の設計変更の頻度が減り、その金型コスト低減のみでなく、工期短縮に大きな効果が期待される。

本研究の主たる目的は、これまで定量評価されておらず、経験にたよってきた3次元板成形問題の破断不良について、合理的かつ定量的な予測を可能とする成形性評価システムの構築及びその実用化である。これを達成するために、①有限要素法を中心とした3次元板成形問題への適用が可能なシステムの構築、②計算機による解析で破断限界まで評価し得るシステムの開発、③精度良い破断予測を可能にし得る材料モデルの厳密化及び材料特性抽出法の確立、をねらいとして理論的研究及びその検証を行った。

以上に本論文の各章の概要を示す。

第1章では、薄板材の最も代表的な成形技術であるプレス成形において、本研究の背景や必要理由、目的について言及した。特に、生産工程のCAD/CAM化の進んだ現在において定量的な客観評価を可能にする板成形のCAEシステムの必要性を述べた。

第2章では、有限要素法により成形過程のひずみの予測を行い、理論的に予測された破断限界ひずみ曲線(FLD)により成形限界を予測する、図1のフローとなる実用的な破断評価手法を提案した。代表的なモデル成形試験である球

頭張出し成形と角筒深絞り成形に適用し、球頭張出しでは、これまで得ることの難しかった3次元変形に関して材料ごとの破断予測が図2に示すように可能であること、角筒深絞りでは、成形限界高さに及ぼす材料特性の影響や金型形状の影響を定量的に得られることを明らかにした。しかしながら、システムを構成する要素技術である破断限界ひずみ予測理論、有限要素法解析、材料構成式、材料特性の同定に、まだ問題が多く残されていることを同時に示した。破断限界ひずみの予測に関しては、従来理論の中で最も評価が高いと思われる Stören らの手法を用いても、予測される限界ひずみと実測値の間に無視できない開きがあることを示し、これより材料の延性の指標として用いている加工硬化特性 n 値の厳密な評価や n 値以外の延性パラメータの必要性、 r 値や変形経路の影響の考慮が重要であると考えた。次に、FEM 解析を用いた成形過程のひずみの予測について述べ、汎用的かつ高精度なシステムを確立するためには、ひずみの局所化の程度に大きく影響する n 値の評価方法の再検討と材種に依らず局部変形特性を厳密に反映できる構成式の有限要素法プログラムへの導入が必要であると考えた。

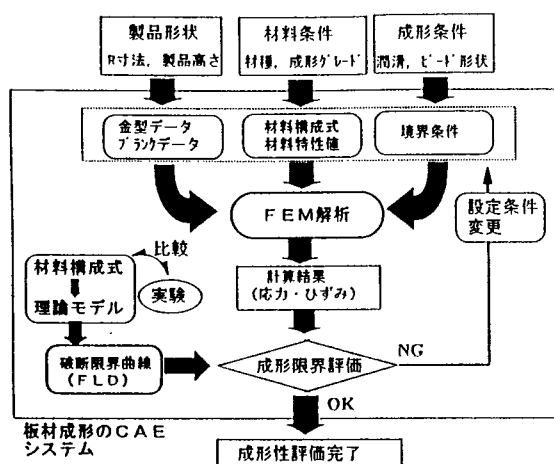


図1 提案した成形性評価システム

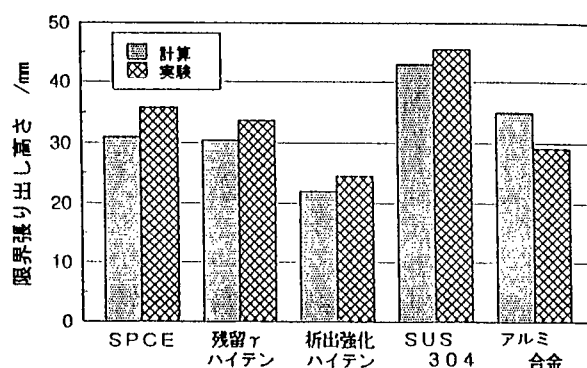


図2 各材種の限界張出し高さの予測

第3章では、本解析システム全体の最重要な構成要素と考えられる塑性構成式に言及した。本研究で使われる構成式に求められることは、ひずみ増分解析である有限要素法と塑性不安定問題である破断限界理論解析の両方に妥当な解析結果を与えることである。このような条件を満たす構成式として、J2-流れ則からJ2-角点則への自然な拡張を示している、伊藤-呉屋によるひずみ増分方向の応力増分依存性を考慮した構成式を選択した。しかし、提案されている構成式は等方性に関する一般形が与えられているのみであり、板成形に用いる形式としては不十分であった。そこで、採用した構成式の特徴を活かしつつ板成形問題に重要なファクターとなる異方性について検討し、従来の構成式では不可能であった、降伏強度と変形の異方性を同時に精度良く表現できる新たな異方性構成式の提案を行った。これにより、変形解析及び破断限界解析の両方の精度向上が期待され、また、材料特性の面内異方性の影響を調べる際に変形と強度の異方性の影響を独立に調査することを可能とした。また、破断限界ひずみの予測を行う分岐理論に適用するために、応力増分依存性を有する線形比較体構成式の新たな定義を行った。ここで定義した構成式のパラメータ Kc はひずみの局所化及び分岐問題に大きな影響を持つ新たな材料パラメータと考えられる。

第4章では、破断限界ひずみの理論的予測に関し、3章で提案した線形比較体構成式を局所くびれ基準に導入し、材料の異方性や変形経路依存性の影響を考慮した高精度の予測評価を可能にした。構成式の材料パラメータである Kc が破断限界ひずみに及ぼす影響が大きいことを明らかにし、 Kc の決定を等二軸の限界ひずみから決定する手法を提案すると共に、それにより妥当な結果が得られることを確認した。次に、加工硬化指数では、ラインセンサカメラを用いた応力・ひずみのリアルタイム評価可能な液圧パルジ試験機の試作により、引張試験では測定不可能な大ひずみ領域での n 値の評価を可能にし、それを理論に用いれば破断限界ひずみの予測精度が向上することを明らかにした。また、提案した異方性構成式を導入することで、はじめて可能となった、破断限界ひずみ予測に及ぼす r 値と降伏応力の面内異方性の影響について独立評価を行った。その結果、①降伏強度の大きい方向に主応力が加わる場合は小さい方向に負荷する場合に比べ、全体的に破断限界ひずみが小さくなる傾向にあるが、等二軸変形から単軸引張相当の変形になるほど低

下幅が大きい、② r 値の小さい方向に主応力が加わる場合は、大きい方向に加わる場合に比べ、単軸引張相当のひずみ比で破断限界ひずみが低下し、逆に、張出し変形領域では増加する傾向となる、ことを示した。また、従来整理されていなかった板面内の主応力方向と圧延方向の角度 θ が成形限界ひずみに及ぼす影響を解析し、その傾向を定量的に明らかにすると共に、図3に示すように実験との比較から、ここで提案した解析手法及び結果の妥当性も明らかにした。

第5章では、精度の高い破断評価結果を得るために、ひずみの局所化過程を厳密に予測することを目的として、シェル要素有限要素法プログラムに第3章で提案した異方性構成式の導入を図った。新たな構成式が導入された要素では、応力経路を途中で変化させた解析を行った場合に、構成式のパラメータ Kc が大きくなるとひずみの変形経路が大きく変化する結果を得、 Kc というパラメータを通してひずみ増分方向の応力増分依存性を表す、新たな特性を示す FEM 解析を可能にした。これを3次元板成形問題について適用し、成形限界の決定に重要なひずみのピーク値に及ぼす Kc の影響が大きいことを確認した。また、実成形問題の解析では素材ごとに Kc を決定する必要があるが、ここではすべりモデルの考察から相当ひずみに依存する形式として具体的に決定する手法を提案した。第4章で定めた材料パラメータを用いて解析を行い、J2流れ則に比べ、最大主ひずみのピーク値が大きくなることが得られ、実験に近づく傾向を得た。また、 Kc が大きいアルミ合金の場合にひずみ分布に関する J2流れ則との差が顕著であった。

第6章では、板成形に非常に重要なファクターではあるが、その煩雑さより3次元成形問題の解析には殆ど考慮されていなかった塑性異方性に視点を当てて、本システムの適用を行った。鋼板のように r 値の板面内の方向性が比較的大きい材料では、素材の板取り方向によってプレス成形性が大きく異なることが考えられるが、従来の解析では考慮されていなかった。本解析法により成形限界高さに及ぼす面内異方性の影響を評価でき、 r 値が圧延方向からV字型の分布を示す場合の球頭張出し成形性は、主応力方向と圧延方向の角度が45°となる場合に限界張出し高さが最も大きくなることを明らかにした。また、従来、定量的な整理がされていなかった張出し成形性に及ぼす r 値の影響について調査を行い、球頭張出し成形では r 値が小さい方が限界成形高さが大きくなる結果を得、そのメカニズムとして、 r 値が小さい方が破断危険部の変形が等二軸に近づき成形限界までのひずみの余裕度が大きくなることを解析より明らかにした。これにより、Schneiderらによる r 値が小さい場合に材料として優れた張出し特性を有するという報告が必ずしも正しくないことを客観的な評価から指摘した。以上のような異方性に関する独自の知見を新たに得ることができ、本研究で提案している全体の枠組である成形評価システムと、それを構成している破断限界ひずみの予測及び成形過程ひずみの予測の高精度化の有効性を確認することができた。

第7章は本研究の総括である。

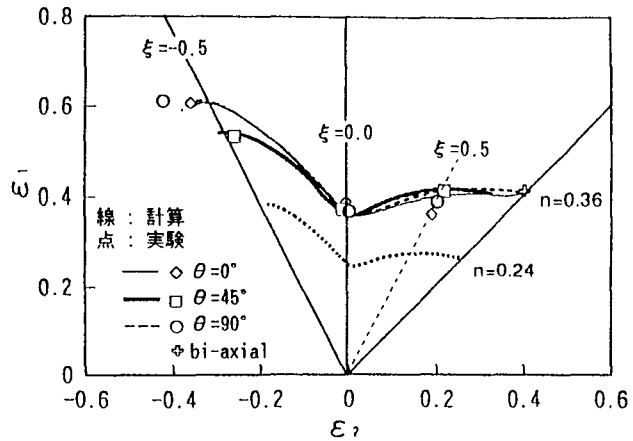


図3 FLD に及ぼす異方性主軸と応力主軸のなす角度の影響

審査結果の要旨

板材成形では、その成形過程での材料の破断の発生を的確に事前予測し、これを回避するための成形条件を金型および生産工程の設計段階で確定できることが強く求められているが、成形過程での材料の破断限界は金型形状・工程・材料特性などによる非線形現象が複雑に影響し合うため材料破断を律する因子の客観的な同定が困難であり、試行錯誤的な手法を取らざるを得ないのが現状である。本研究はこの現状を打破することを目的として、弾塑性有限要素法を中核として、これとデータを有機的に共有する破断の理論モデル、材料特性の力学モデルにより構成される板材成形のCAEシステムの提案と、その予測精度を支配する個々の要素モデルの改善と新たなモデルの提案を行ったものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、プレス加工の現状を分析して研究課題を整理している。

第2章では、有限要素法と破断限界理論の連結による成形限界評価システムを提案し、これを複雑な3次元成形問題である実部品成形に適用し、破断現象を支配する各種の要因を定量化し成形不良を回避するための最適成形条件の設定が可能であることを示している。これは板材成形の計算機援用仮想生産システムの実用性を示唆したものであり、有用な成果である。

第3章では、応力増分依存性を有する構成式をもとに、変形異方性と降伏強度異方性を独立に表現できる異方性構成式を提案し、そのなかで、成形性評価に密接に関連する新たな材料パラメータを導入している。これにより従来の材料特性では識別し得なかった成形限界ひずみの材料間の差異を表現することが可能となった。これらは成形性評価の精度向上に大きく寄与する成果である。

第4章では、第3章で新たに導入した材料パラメータを応力比の関数として扱い、これを実験により具体的に決定する手法を提案し、その実用性を実験と理論の比較により示している。さらに、破断限界に及ばず板材の面内異方性の影響に視点をあてた解析を行い、変形異方性と降伏強度異方性は破断限界ひずみ値に対してそれぞれ異なった影響を与えることを初めて明らかにしている。これは材料の最適ランキングを決定する場合に有用な成果である。

第5章では、第3章で展開した構成式を3次元大変形弾塑性有限要素法プログラムのシェル要素に組み込み、さらに、結晶塑性学的な考察から、塑性ひずみ増分方向の応力増分方向依存性の程度が塑性変形の進行に伴い増加するモデルを提案し、これによりひずみのピーク値およびその位置の予測精度が向上することを実験との比較により実証している。これは、シミュレーション結果から成形限界を予測する上で貴重な成果である。

第6章では、前章までに展開した成形性評価システムの実用性を実証するために、異方性材料を対象とした3次元実成形問題の成形性評価を行い、特に張出し成形においては材料特性としてのランクフォード値の大きい方が成形性が悪いという経験的知見を解明し、この現象は材料特性の影響ではなく、ひずみ経路の影響であることを示して従来の知見の誤りを指摘している。これにより、本研究で提案した成形性評価のためのCAEシステムでは、与えられた成形問題に対して成形性向上のために変更すべき最適パラメータを客観的に判断できることを実証しており、生産技術分野において価値の高い成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、板材成形の計算機援用仮想生産システムの実用化への道を拓いたものであり、金属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。