慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	複層鋼板の多軸応力場における塑性変形挙動の解明と材料モデル構築
Sub Title	Material model for multiaxial and anisotropic plastic deformation of multilayer steel sheets
Author	大家, 哲朗(Oya, Tetsuo)
Publisher	
Publication year	2016
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2015.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究では, 強い異方性を示す薄板材を用いた成形シミュレーションの精度向上および破壊予測精度向上を目的とした材料モデル構築を行い, 複層鋼板およびアルミニウム合金板を用いた検証を行った。本モデルは異方性表現能力の向上を達成するために, 降伏応力異方性と変形異方性を独立評価できる非関連流れ則に基づいた定式化が行われた。SUS304とSUS420J2からなる複層鋼板とアルミニウム合金板A6016-T6を用意し, 破壊予測シミュレーションと材料パラメータを決定するための実験を行った。これらの解析と実験の結果, 従来モデルでは不可能な力学特性の分析が可能となり, 提案モデルの有用性が明らかとなった。 In this study, a novel material model have been developed for advanced metallic sheets with multilayer structure and anisotropy. The proposed material model is based on non-associated flow rule to describe the yield surface and plastic potential surface independently. This treatment is expected to work well with metallic sheet with strong anisotropy. The developed model was evaluated through experiments with multilayer steel sheets, stainless steel sheets and aluminum alloy sheets. These experimental investigations proved the effectiveness of the model so far. In addition, fracture prediction analysis has been conducted by using 3D bifurcation theory. In this analysis, it was revealed that the orders of the yield and the plastic potential function have influence on the shape of fracture limit curves. Although some problems remain unsolved, the majority of the original plans was carried out and fruitful results were obtained.
Notes	研究種目：若手研究(B) 研究期間：2014～2015 課題番号：26820023 研究分野：塑性力学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_26820023seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ６ 月　 ３ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2014～2015
課題番号：２６８２００２３

研究課題名（和文）複層鋼板の多軸応力場における塑性変形挙動の解明と材料モデル構築

研究課題名（英文）Material model for multiaxial and anisotropic plastic deformation of multilayer steel sheets

研究代表者
大家　哲朗（OYA, Tetsuo）

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：１０４１０８４６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では，強い異方性を示す薄板材を用いた成形シミュレーションの精度向上および破壊予測精度向上を目的とした材料モデル構築を行い，複層鋼板およびアルミニウム合金板を用いた検証を行った．本モデルは異方性表現能力の向上を達成するために，降伏応力異方性と変形異方性を独立評価できる非関連流れ則に基づいた定式化が行われた．SUS304とSUS420J2からなる複層鋼板とアルミニウム合金板A6016-T6を用意し，破壊予測シミュレーションと材料パラメータを決定するための実験を行った．これらの解析と実験の結果，従来モデルでは不可能な力学特性の分析が可能となり，提案モデルの有用性が明らかとなった．

研究成果の概要（英文）：In this study, a novel material model have been developed for advanced metallic sheets with multilayer structure and anisotropy. The proposed material model is based on non-associated flow rule to describe the yield surface and plastic potential surface independently. This treatment is expected to work well with metallic sheet with strong anisotropy. The developed model was evaluated through experiments with multilayer steel sheets, stainless steel sheets and aluminum alloy sheets. These experimental investigations proved the effectiveness of the model so far. In addition, fracture prediction analysis has been conducted by using 3D bifurcation theory. In this analysis, it was revealed that the orders of the yield and the plastic potential function have influence on the shape of fracture limit curves. Although some problems remain unsolved, the majority of the original plans was carried out and fruitful results were obtained.

研究分野：塑性力学

キーワード：材料モデル　成形シミュレーション　異方性　複合材料　破壊予測

１．研究開始当初の背景

自動車に代表される移動体に対し，環境保護や資源の効率的活用の観点から，今後より一層の軽量化が要求されることは想像に難くない．軽量化達成のために必要な，高強度と高延性を高いレベルで両立できる鉄鋼材料として，脆性マルテンサイト鋼が複層化によって高延性化されるメカニズムを利用して作製される複層鋼板の研究開発が近年進められている．これは高強度だが脆性的で塑性加工には向かないマルテンサイト鋼を，高延性材料と交互に積層させ，マクロな積層形態(7～25 層)からなる薄板材として作製されるものである．これまでに，5%以下の伸びで破断する脆性マルテンサイトが複層化によって 20%以上の伸びを示すという驚くべき成果が報告されている．定性的には割れの起点となりうる脆性層の自由界面に高延性層を固着させて脆性層の変形抵抗増加を抑制し，脆性層の早期のくびれ進展と破断が阻害されていると説明できる．単体では密着曲げに耐えられない高強度鋼が，高延性鋼との複層化によって延性向上し，密着曲げ成形が可能になったことが申請者らによって実証されている．このように，複層鋼板は金属材料の新たな可能性を拓くものとして注目されているが，その成形性および塑性力学の観点からの特性解明は進んでいない．また，複層鋼板を含む高張力鋼板などの高強度材料は強い異方性を示す場合が多く，複雑な多軸応力場における材料の変形特性をより高精度にモデル化することが求められている．以上のように，超軽量化を目的とした先進的高強度薄板の適用を拡大していくためには多くの課題がある．

２．研究の目的

申請者は複層鋼板に対して先駆的に基礎研究に取り組み，有用な知見を得てきた．しかし，複層鋼板の塑性力学的特性に関しては，単軸引張り時の挙動を扱ったもののみであり，多軸変形時の変形特性は全く明らかになっていない．そこで本研究では，単軸引張り試験の他に，多軸応力場試験を行い，複層鋼板の高精度な成形シミュレーション実施に必要な材料モデルの構築を行う．具体的には，複層鋼板の加工硬化挙動および降伏挙動を表現できる材料モデルを定式化し，これらを流れ則によって統合して複層鋼板の塑性構成式を構築する．

当初は対象材料を複層鋼板のみに限定していたが，研究がより一般性を追求する方向に推移し，複層鋼板のみならず異方性を示す薄板材全般のための異方性塑性構成式の構築を目的とするに至った．

３．研究の方法

本研究では，(1)複層鋼板を含む数種類の板材に対する材料試験と，(2)異方性塑性構成式構築のための数理的検討が行われる．以下ではそれらの方法の概要について説明する．また本研究の概要を図１に示す．

(1) 実験概要

複層鋼板の構成材料は高延性材としてオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304，高強度材としてマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS420J2 とした．これらを必要枚数購入して圧延業者と熱処理業者に作業を委託して試験片作製を行う予定であったが，予算の都合もあり在庫試験片を活用することとした．また，異方性を示す構造材料としてアルミニウム合金 A6061P-T6 を必要量用意した．実験は引張り試験（面内 3 方向），等二軸試験，平面ひずみ引張り試験の 3 種類である．用意した板材から試験片切り出しを行い，面内引張り試験は自身で実施し，それ以外の 2 種類の実験は材料試験業者への委託により実施した．各試験によって変形抵抗曲線と塑性域数点での Lankford 値(r 値)を取得した．これらを用いて項目(2)で構築する材料モデルの検証を行った．

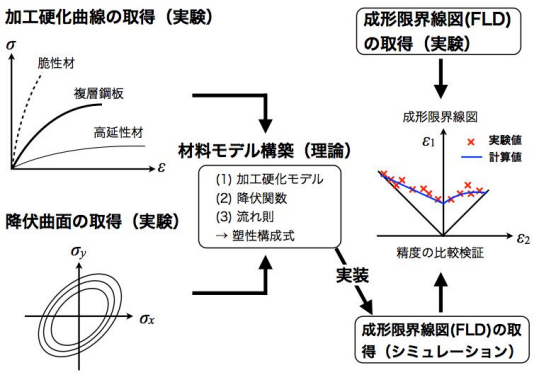

図１　本研究計画の概要

(2) 理論と解析

異方性材料を用いた成形解析の精度向上は工学上重要度が高い．解析精度に影響する項目としてはメッシュ，材料データ，摩擦・接触モデル，解析アルゴリズム等が挙げられるが，材料の変形特性をモデル化した材料モデル（塑性構成式）の寄与がより大きいと考えられ，本研究での主な課題として選ばれている．材料モデルに要求されることとしては幾つかあるが，(1)等方性モデルとの互換性を持つこと，(2)Tresca 型と Mises 型降伏曲面を表現できること，(3)材料試験が簡便であることなどが必要条件である．本研究では更なる一般性および破壊予測につながる塑性不安定・分岐問題を適切に扱えることを企図して非関連流れ則を適用する．これらの条件を満たすモデルを構築するため，Hill48 モデルの形式と導出過程を参考にした定式化を行う．また，Ito-Goya 構成則に提案モデルを適用した 3 次元分岐理論を用いた破壊予測解析を行い，本モデルの特徴について検証す

る．

４．研究成果

本研究の目的は複層鋼板等の異方性を示す薄板材の多軸変形場での変形挙動をより正確に表現することを狙った材料モデルの構築である．計画初年度は異方性塑性構成式の構築などを行い，目的とする成果が得られた．計画最終年度は提案モデルによる破壊予測への適用と実験による評価に取り組んだ．

複層鋼板のように圧延で作製される板材は一般に強い異方性を示すため，異方性塑性構成式が必要となる．申請者が提案する塑性構成式は非関連流れ則に基づいており，多様な材料特性や変形様式に対応できるものである．計画初年度において提案モデルにおける降伏関数および塑性ポテンシャル関数の高次化に取り組み成功している．計画最終年度は提案モデルを用いた実験的評価と破壊予測シミュレーションを実施し，関数の次数等のパラメータの影響について検討を行った．実験的評価では，2 種類のステンレス鋼による複層鋼板 1 種とアルミニウム合金板 1 種における多軸変形試験を実施した．試験内容は面内の 2 方向引張り試験(圧延・圧延直角方向)と等二軸および平面ひずみ引張り試験である．それぞれにおいて応力-ひずみ曲線と r 値を取得した．まず提案モデルの検証および比較対象としてアルミニウム合金板での評価を行い(図 2, 3)，次に複層鋼板での評価を行った．本モデルの特徴として，非関連流れ則であるにも関わらず必要な材料パラメータの数が少ない(3 種類の実験と 7 種類の異方性パラメータ)ことが挙げられるが，今回の実験的検証を通して，確かに上記の実験で得られるデータのみによって降伏曲面と塑性ポテンシャル曲面が独立に決定可能であることが確認された(図 4)．複層鋼板とアルミニウム合金板のいずれの場合においても降伏曲面と塑性ポテンシャル曲面は異なる形状となり，応力異方性と変形異方性の分離評価が必要であることが裏付けられた．また，複層鋼板においてはその 2 種類の構成材それぞれの降伏曲面・塑性ポテンシャル曲面の中間的な曲面形状をとることが示唆された．また，単層のアルミニウム合金板は典型的な延性破壊形態を示したのに対し，複層鋼板は延性破壊と脆性破壊が混在・複合した破壊形態を示すことが観察された．

数値シミュレーションによる破壊予測への適用検討からは，提案モデル中の降伏関数の次数と塑性ポテンシャル関数の次数が破壊予測曲線に及ぼす影響が調べられた(図 5, 6)．すべての特徴が明らかになったわけではないが，特に塑性ポテンシャル関数の次数が破壊予測曲線に与える影響が大きく，高精度な破壊予測のためには両関数の次数を適切に選択する必要があることがわかった．

全体として，材料モデルの基礎的検討は順調に推移し，複層鋼板等における実験的検証まで計画通りに実施され，変形挙動の解明が進んだ．今後はより詳細な実験データの分析と，提案モデルを用いた成形解析精度向上および破壊予測への適用へ取り組む．

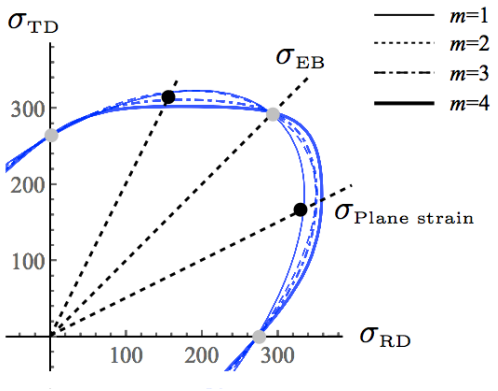

図 2　降伏曲面の次数 m に関する実験的検討

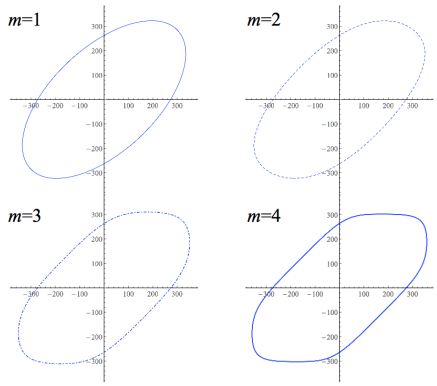

図 3　降伏曲面の次数 m による変化

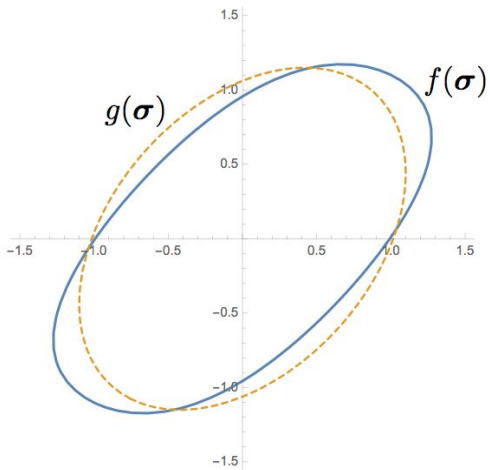

図 4　降伏曲面と塑性ポテンシャル曲面

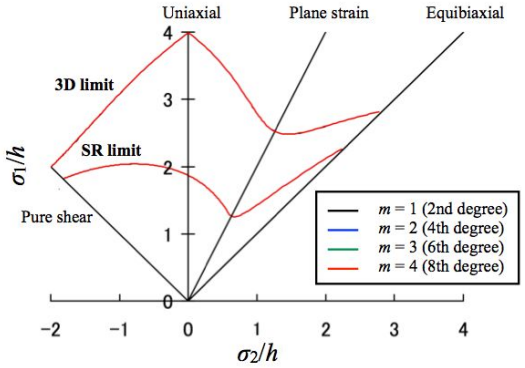

図 5　降伏曲面の次数 m を変化させた場合の破壊予測曲線（上：3D 分岐による判定，下：SR 分岐による判定）

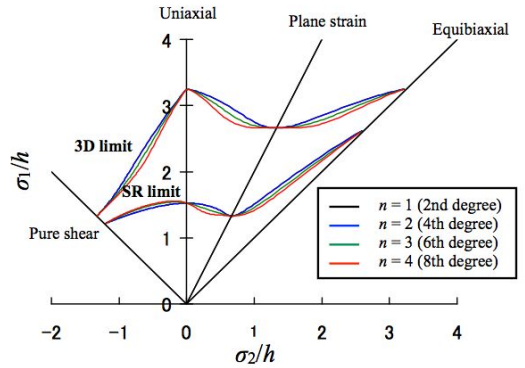

図 6　塑性ポテンシャル曲面の次数 n を変化させた場合の破壊予測曲線（上：3D 分岐による判定，下：SR 分岐による判定）

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計　3　件）

1.大家哲朗，伊藤耿一：関連流れ則に基づく塑性構成式の問題点とその解決策，塑性と加工，Vol.57，No.622，pp.188-193，2016，査読無し.

2.大家哲朗，伊藤耿一：金属塑性加工における破壊予測理論の展望，塑性と加工，Vol.56，No.658，pp.914-919，2015，査読無し.

3.T. Oya（他４名，１番目）：Material Model based on Non-Associated Flow Rule with Higher-Order Yield Function for Anisotropic Metals，Procedia Engineering，Vol. 81，pp.1210-1215，2014，査読有り.

〔学会発表〕（計　4　件）

1.大家哲朗：非関連流れ則に基づく塑性構成式，日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス，2015 年 11 月 21 日，慶應義塾大学(神奈川県横浜市).

2.Boxun Wu，大家哲朗，柳本潤：Application of Constitutive Equation based on Non-Associated Flow Rules for the Plastic Deformation of Anisotropic Sheet Metals，第 66 回塑性加工連合講演会，2015 年 10 月 31 日，いわき文化センター(福島県いわき市).

3.大家哲朗，柳本潤，伊藤耿一，植村元，森尚達：高次降伏関数と塑性ポテンシャル関数が破断限界に及ぼす影響，平成 27 年度塑性加工春季講演会，2015 年 5 月 30 日，慶應義塾大学(神奈川県横浜市).

4.大家哲朗，柳本潤，伊藤耿一，植村元，森尚達：応力増分方向依存性流れ則への高次順方向ポテンシャルの導入による塑性異方性の表現，第 65 回塑性加工連合講演会，2014 年 10 月 12 日，岡山大学(岡山県岡山市).

〔図書〕（計　0　件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計　0　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計　0　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織
(1)研究代表者
大家　哲朗（OYA TETSUO）
慶應義塾大学・理工学部・講師
研究者番号：10410846