

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15061

研究課題名（和文）プレス成形シミュレーション高度化に資する薄鋼板の流動則の研究

研究課題名（英文）Study on Flow Rule of Thin Steel Sheet for Advanced Press Forming Simulation

研究代表者

箱山 智之（Hakoyama, Tomoyuki）

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：20799720

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：プレス成形シミュレーションの精度向上を目指して、力と変形を関係づける流動則を中心として軟鋼板や高張力鋼板の変形挙動について調査した。単軸引張試験を用いて、様々な変形速度（ひずみ速度）における軟鋼板の変形挙動を調査し、それに及ぼすひずみ速度の影響を評価した。金属薄板の単軸圧縮試験を可能とする治具を製作し、高張力鋼板の単軸引張試験および単軸圧縮試験を行った。引張と圧縮の降伏応力の差を評価した。さらに負荷方向を変化させることで、その方向依存性（異方性）を調査した。円板圧縮シミュレーションに及ぼす材料変形モデルの影響を明らかにするため、円板圧縮シミュレーションを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車を始めとして工業製品の部品の多くはプレス加工によって製造されている。プレス加工のシミュレーション精度向上によるプレス加工現場のトライアンドエラーレス生産実現は重要な課題である。本研究で得られた軟鋼板や高張力鋼板の変形挙動に関する知見はシミュレーション精度向上に繋がることから、工業的に意義がある。

材料の変形挙動に関する研究は降伏関数（力の異方性）やその発展を示す硬化則と呼ばれるものについて、これまで数多くの研究がなされている。一方で、力の異方性と変形の異方性をつなぎ合わせる流動則の研究は未だ不十分であり、本研究はその点を中心に変形速度や変形モードの影響などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to improve the accuracy of sheet forming simulation, deformation behavior of a mild steel sheet and high tensile steel sheet was investigated. Uniaxial tensile tests were conducted to measure the deformation behavior of a mild steel sheet at various deformation rates (strain rates). The effect of strain rate on the deformation behavior was also investigated. A testing apparatus was fabricated to enable uniaxial compression test of thin metal sheets. Uniaxial tensile and compression tests were conducted for a high-strength steel sheet. The difference in yield stress between tension and compression was evaluated. The directional dependence (anisotropy) was also investigated by changing the loading direction. Plate compression simulations were performed to clarify the effect of the material deformation model on the plate compression simulations.

研究分野：塑性加工学

キーワード：金属薄板 降伏応力 SD効果 円板圧縮 異方性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

輸送機器を始めとして工業用品の製造で広く使用されるプレス成形では、金型設計にプレス成形シミュレーションによる事前加工予測が活用されている。プレス成形シミュレーションの予測精度には、適用する材料モデルが大いに影響する。

材料モデルについて、加工硬化式や降伏関数、加工硬化に伴う降伏曲面の変化（異方硬化則や移動硬化則）に対する研究はこれまで様々報告されている。一方で、流動則（応力増分と塑性ひずみ増分の関係式）の研究は未だ不十分である。一般に塑性加工では関連流動則（塑性ひずみ増分が降伏関数と関連づく）を仮定するが、静水圧応力に依存して降伏応力が変化する材料においては、関連流動則が成立しない可能性が実験的に示唆されており、流動則のモデル高精度化に向けて、さらなる検討が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、金属薄板の特に材料組織が比較的単純な軟鋼板を主な対象として、以下の目的を掲げた。

- (1) 単軸引張試験を用いて、様々なひずみ速度における軟鋼板の等塑性仕事面および r 値を測定し、等塑性仕事面と塑性ひずみ増分の関係に及ぼすひずみ速度の影響を明らかにする。
- (2) 高張力鋼板を用いて、単軸引張試験および単軸圧縮試験を行い、静水圧応力依存性を計測するとともに、その異方性を明らかにする。
- (3) 円板圧縮シミュレーションに及ぼす材料モデルの影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 軟鋼板の材料モデリング

市販の冷間圧延軟鋼板（SPCC 相当）を供試材として引張試験を行なった。試験片形状は図1に示す JIS13B 試験片（JIS Z 2241）とした。圧延材料であることからその異方性を評価するため、圧延方向を 0° とした時に、 $0, 45, 90^\circ$ 方向の材料を切り出した。さらに、その引張速度（ひずみ速度）が異方性に及ぼす影響を明らかにするため、各方向に対して、 $10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ における試験を行った。

応力-ひずみ曲線から同一の塑性仕事における応力の組み合わせである等塑性仕事面および r 値を測定した。等塑性仕事面および r 値の測定結果に基づいて、Hill '48 降伏関数の材料パラメータを同定した。ひずみ速度依存性をモデル化するため、指数則に基づき加工硬化曲線を定式化した。さらにそのモデルを引張試験のストップモーション試験結果と比較した。

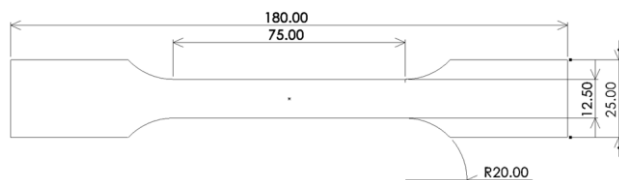


図1 単軸引張試験片形状

(2) 高張力鋼板の引張・圧縮試験

引張の降伏応力と圧縮の降伏応力に差異が生じる（SD 効果）現象は、静水圧依存性により生じると考えられている。そこで、高張力鋼板の引張および圧縮の降伏応力と異方性の関係を調査した。薄板材の単軸圧縮試験を行うために、楯歯型の圧縮試験治具を開発した。その試験装置を用いて供試材から図2の試験片を製作し、単軸引張試験および単軸圧縮試験を行った。

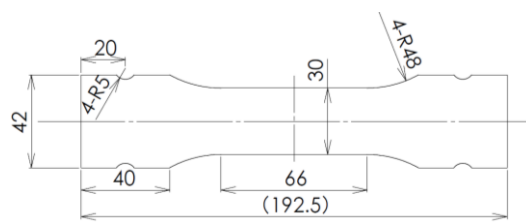


図2 単軸圧縮試験片形状

(3) 円板圧縮試験および解析

図3に示す金型およびセンサー、およびサーボプレス機を用いて、円板圧縮実験を行った。試験片は初期直径 $d_0 = 11.75, 23.75 \text{ mm}$ となるよう切り出した。有限要素解析ソフトウェア

(SimufactForming) を用いて実験を再現し、比較した。

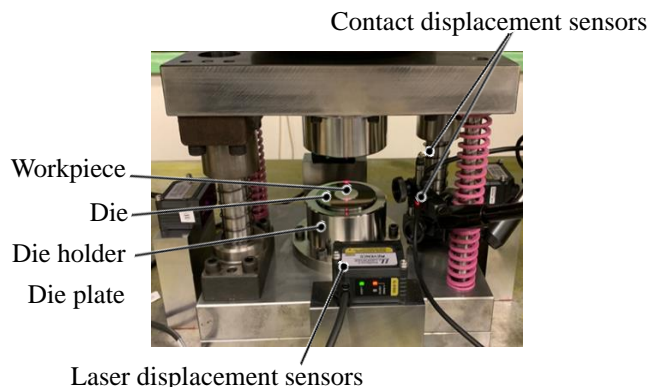


図3 試験金型およびセンサー

4. 研究成果

(1) 軟鋼板の材料モデリング

複数のひずみ速度における引張試験により測定した等塑性仕事面と r 値の関係を図 4 に示す。ここでは、代表例として、 10^{-2} 、 10^{-4} s^{-1} の結果を示す。 r 値はひずみ速度によらず概ね一致した一方で、降伏応力の比（応力の異方性）は差異が現れた。流動則のモデル化にあたっては、ひずみ速度の影響を留意する必要があることが示唆された。

ストップモーション試験における応力-ひずみ曲線を図 5 に示す。ひずみ速度依存型加工硬化式に基づいて数値シミュレーションにより求めた応力-ひずみ曲線を併記した。数値計算決 k は実験結果を概ね再現した。

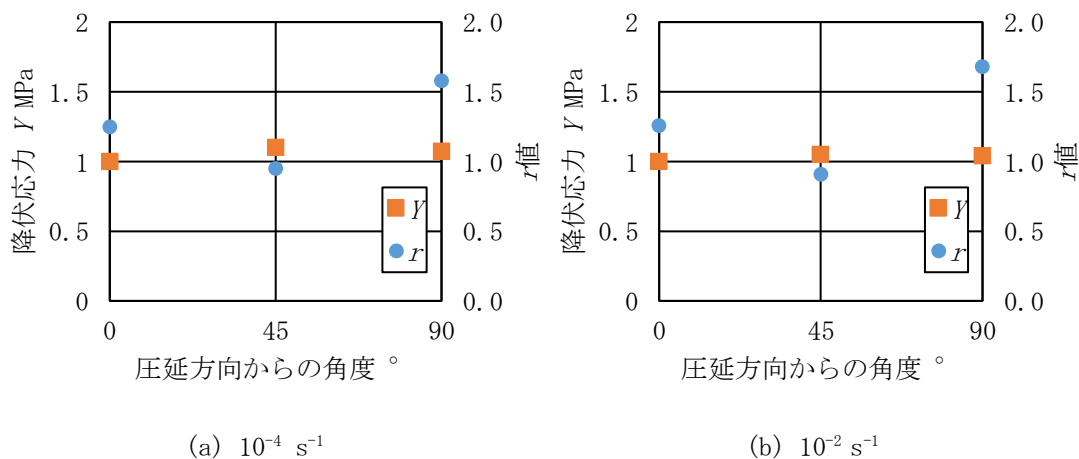


図4 降伏応力と r 値の測定値

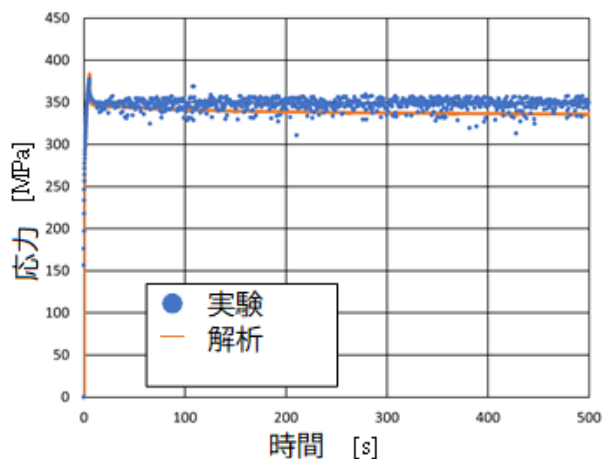


図5 ストップモーション試験における応力-ひずみ曲線の比較

(2) 高張力鋼板の引張・圧縮試験

高張力鋼板の引張および圧縮における単軸応力-ひずみ曲線を図 6 に示す。材料の切り出し方向によって、SD 効果の大きさは異なっており、SD 効果の異方性が確認された。

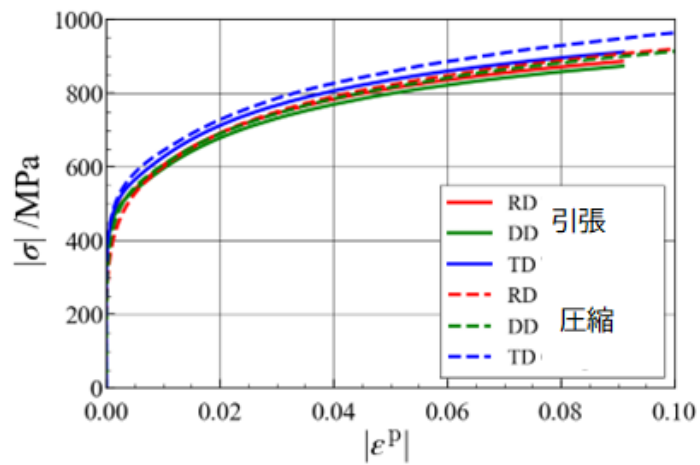
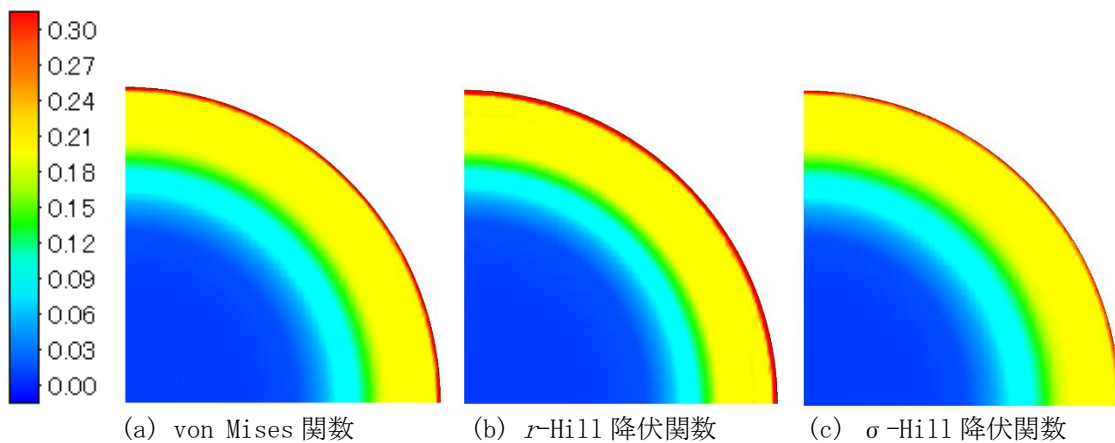


図 6 高張力鋼板の応力-ひずみ曲線

(3) 円板圧縮試験および解析

円板圧縮解析で得られた相当ひずみ分布の一例を図 7 に示す。異方性降伏関数を導入することで、ひずみ分布に差異が現れた。さらに、異方性パラメータの決定方法によって、差異が現れた。



(a) von Mises 関数 (b) r -Hill 降伏関数 (c) σ -Hill 降伏関数

図 7 円板圧縮シミュレーションにおける下死点での相当ひずみ分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 箱山智之, 桑原利彦
2. 発表標題 非関連流れ則と異方硬化を考慮した5000系アルミニウム合金板の材料モデリングと成形限界解析
3. 学会等名 2020年度第1回塑性加工学会東海支部発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Hakoyama, Y. Yoshikawa, Z.G. Wang
2. 発表標題 Interaction Between Tool and Workpiece in Plate Compression
3. 学会等名 54th ICFG Plenary Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Hakoyama, K. Jo, Y. Yoshikawa, Z.G. Wang
2. 発表標題 Deformation Behavior of Tool and Workpiece in Plate Compression
3. 学会等名 14th International Conference on the Technology of Plasticity (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------