

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360318

研究課題名(和文)次世代輸送機器軽量化材料の準高ひずみ速度二軸応力試験システムの開発

研究課題名(英文)Development of a multiaxial stress testing system with quasi-high strain rate for light weight materials for next generation transportation vehicles

研究代表者

桑原 利彦 (Kuwabara, Toshihiko)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60195609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：準高ひずみ速度下で二軸応力を受ける金属板材の、二軸応力-ひずみ曲線を測定することができるサーボ制御二軸応力試験機を開発した。金属板材を型曲げ加工した後、板縁を溶接した円管を試験片として用いた。この試験機を用いて、冷延IF鋼板、アルミニウム合金板および高強度鋼板の加工硬化挙動、成形限界ひずみおよび成形限界応力の測定に成功した。さらに、これら材料の異方硬化モデルを構築した。測定結果は、Marciniak-Kuczynskiモデルによるひずみ局所化解析による計算値と定量的に一致した。以上より、開発した材料試験方法が、金属板材の高精度な材料モデルの構築に有用であることが立証された。

研究成果の概要(英文)：A servo-controlled biaxial stress testing machine was developed for the accurate measurement of the biaxial stress-strain curves of sheet metals under quasi-high strain rates. Tubular specimens were fabricated by bending sheet samples and welding the sheet edges. The deformation behavior and forming limit stresses and strains of a cold rolled IF steel sheet (SPCE), an aluminum alloy sheet and a high strength steel sheet were successfully measured. Moreover, a differential work hardening model that is capable of reproducing the work hardening behavior of the test materials under biaxial tension has been successfully developed. The experimental results quantitatively agreed with those calculated using a strain localization analysis based on the Marciniak-Kuczynski approach. Thus, it has been verified that the proposed multiaxial material testing method is useful for determining accurate constitutive models for sheet metals.

研究分野：塑性力学，材料加工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：ひずみ速度 異方硬化 材料試験 成形限界 降伏関数 異方性 金属板材 塑性加工

1. 研究開始当初の背景

輸送機器の軽量化には、高張力鋼板、アルミニウム合金、チタン合金、マグネシウム合金など軽量化材料の適用率向上が必須である。しかしこれら軽量化材料は、延性に乏しく破断しやすい、加工後の弾性回復量（スプリングバック）が大きい、などの難加工性を示す。これら軽量化材料の機械的特性や成形性に関する研究報告は多くあるが（例えば Banabic ほか、2010）、ほとんどの研究が準静的試験に基づいており、実際のプレス加工速度相当の準高ひずみ速度域（0.1/s）における研究報告は極めて少ない。また、実際のプレス加工の応力状態に相当する二軸応力状態に対する材料構成則や成形限界に関する研究としては、Kelley・Hosford (1968)や本申請者の研究グループによる報告があるが（Kuwabara ほか、2005；伊敷ほか、2009）、いずれも準静的なひずみ速度（10⁻⁴/s）における実験研究であり、高ひずみ速度域における二軸応力試験に関する研究報告はほとんどない。

一方、ものづくりの現場では計算機シミュレーションが急速に普及している。シミュレーションによる成形不具合の予測精度向上のためには、材料構成則（材料変形特性をシミュレーション上で再現するための数学モデル）と成形限界判定のためのデータベースの高精度化が必須である（Kuwabara, 2007）。従って、軽量化材料に対して、実際のプレス加工状態と同じ二軸応力状態かつ準高ひずみ速度域での変形特性を評価するための標準試験方法の確立が渴望されている。ドイツを中心とする欧州大学・企業連合は、液体を作業媒体とした液圧バルジ試験法の ISO 化を推進しているが、これは静的材料試験法である。また任意の二軸応力状態を再現できる試験法ではない。

本申請者は、金属材料の二軸応力試験の方法として、円管試験片に軸力と内圧を同時に負荷する試験方法を考案し、アルミニウム合金管（桑原ほか、2005）、機械構造用低炭素鋼管（吉田・桑原、2007）、純チタン（伊敷ほか、2009）を対象として研究を展開し（H15-16 基盤研究 C、H17-18 基盤研究 C、H20-22 基盤研究 B）。次の二項目を目的として、研究を推進してきた：

- 二軸応力下における塑性変形挙動の測定と異方性降伏関数による定式
- 線形応力経路および複合応力経路における成形限界予測手法の考案

高精度な材料モデリングを行うには、素材の塑性変形挙動を精密に測定するための材料試験機の開発が不可欠と考え、サーボ制御二軸応力試験機を設計製作した（桑原ほか、2005）。本試験機の特長は：□サーボ制御フィ

ードバック回路により、円管に作用する応力もしくはひずみ経路を任意に制御する機能を有する、□自動車用大型円管の高精度な材料試験が可能、など世界最高性能を有する。

本試験機を用いて、アルミ合金（桑原ほか、2005）、鋼管（吉田・桑原、2007）、純チタン（伊敷・桑原ほか、2009）の材料構成則（異方性降伏関数の同定）や成形限界の定量的な評価に成功した。

【未解決の課題】上記研究成果はすべて 10⁻⁴/s オーダーの準静的なひずみ速度域での研究成果である。しかしプレス加工現場で材料に実際に付与される二軸応力かつ準高ひずみ速度域（0.1/s）における軽量化材料の材料特性は、実験技術上の難しさもあって、いまだ実験的に解明されていない。

2. 研究の目的

本研究では、次の 3 項目を研究目的とする。

- (1) 高荷重かつ準高ひずみ速度（0.1/s）を達成可能なサーボ制御二軸応力試験システムの開発
- (2) 軽量化材料の代表候補である、アルミ合金および高張力鋼板を対象として、静的（10⁻⁴/s）～準高ひずみ速度（0.1/s）において適用可能な材料構成則の構築
- (3) 二軸応力下におけるこれら軽量化材料の材料構成則および成形限界のデータベース化

3. 研究の方法

1) 平成 23 年度

準高ひずみ速度油圧サーボ制御二軸応力試験機の設計・製作

準高ひずみ速度油圧サーボ制御二軸応力試験機を新規に設計製作する。円管試験片に軸力と内圧を作用させて、管軸方向応力 σ_{θ} と円周方向応力 σ_{ϕ} の二軸応力を発生させる。

大変形用ひずみ計測器の設計と製作

申請者は、これまでの研究において、ひずみゲージを使って円管のひずみ計測を行ってきた。しかし、ひずみゲージの測定可能ひずみ範囲は高々 10% であるため、試験片を破断させるまで試験を行うには、ひずみゲージの張り替えを行わなければならない、実験効率が非常に悪い。そこで、図 1 に示す変位計を用いた大変形用ひずみ計測器を新規に設計製作し、変形初期から破断に至るまでの応力 - ひずみ曲線を連続して計測する。

図 1 (a) は円周方向ひずみ計である。円周方向 3 箇所に変位計を配置し、時々刻々の管外壁の変位量を測定する。それらの平均値として管の半径を決定し、変形前の半径からの増分を計算して円周方向ひずみを決定する。図 1 (b) は管軸方向ひずみ計であり、本研究では自作する。測定原理は通常のひずみゲージ式

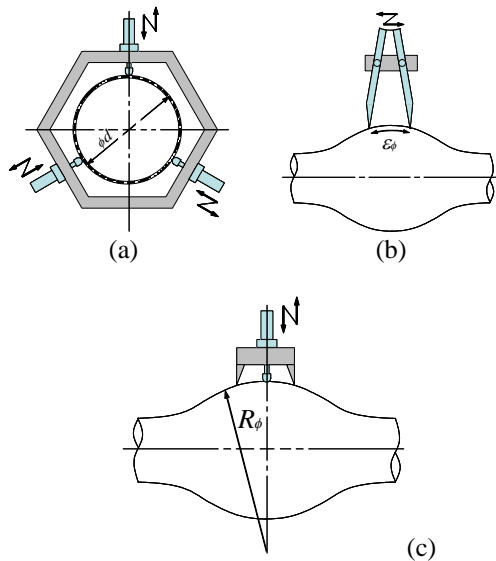


図1 大変形用ひずみ計測器 .(a) 円周方向ひずみ計測器 .(b) 管軸方向ひずみ計測器 .(c) 管軸方向曲率計 .

の伸び計と同一である . 図 1 (c)は管軸方向曲率計である . 前述のように , 管材の応力を測定し制御するためには , バルジ変形した管の管軸方向の曲率半径を測定する必要があるが , これまでの研究で用いてきた曲率計がそのまま使えるので流用する .

(2)平成 24 年度 : アルミニウム合金板の二軸応力試験と材料モデリング

自動車や航空機の軽量化材料として , 将来有望視されているアルミニウム合金板の二軸応力 - ひずみ曲線および , 等塑性仕事面を求める . そして , 代表的な異方性降伏関数による計算値と比較することにより , 本供試材に最も適した材料構成則 (異方硬化モデル) を同定する . さらに破断時のひずみを 2 次元ひずみ空間にプロットし , 成形限界線のデータベースを構築する .

金属板材に任意の二軸応力を発生させる方法を図 2 に示す . 供試板材を曲げ , 溶接により板縁を接合して円管試験片を製作する . この円管試験片の両端を閉じて , 軸力 T と内圧 P を同時に作用させることで , 管壁に二軸応力状態を発生させる .

(3)平成 25 年度 : 高強度鋼板の二軸応力試験と材料モデリング

590MPa高強度鋼板の二軸バルジ試験を行い , 異方硬化挙動を精密に測定し , 高精度な材料モデルを構築する . これまでの研究成果をさらに発展させるため , M-K解析に異方硬化モデルを導入し , FLCおよびFLSCの予測精度向上を図る . 本研究ではさらに , 降伏関数の異方性パラメータ決定方法及び影響について検証した . さらに , ひずみ速度 $10^{-4}/s$ と $10^{-2}/s$ にて二軸応力試験を実施し , 材料構成則と成形限界データベースを構築する .

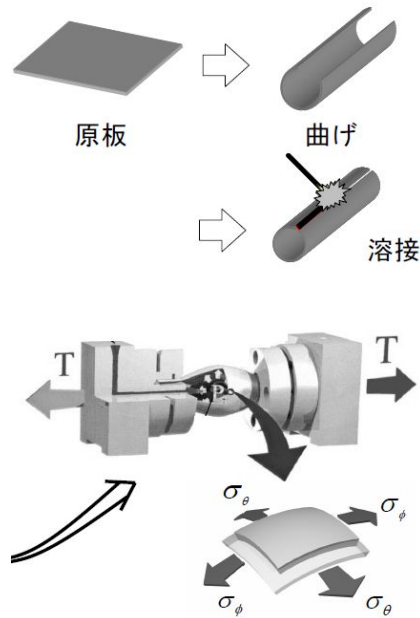


図2 板材から円管試験片を製作する方法と二軸応力試験方法の模式図

4 . 研究成果

(1) 冷延 IF 鋼板の二軸バルジ試験結果

板厚 0.8mm の冷間圧延鋼板 (SPCE) を用いて , ひずみ速度 $10^{-4}/s$ と $10^{-2}/s$ の二水準で二軸バルジ試験を行い , 加工硬化挙動および成形限界ひずみのひずみ速度依存性を調査し以下の知見を得た .

二軸応力下かつ大ひずみ域における金属板材の加工硬化挙動のひずみ速度依存性を測定する方法として二軸バルジ試験方法の有用性を確認した .

ひずみ速度の上昇に伴う二軸応力下の塑性流動応力の変化の割合は , 応力比によって異なる .

ひずみ速度 $10^{-2}/s$ における等塑性仕事面の形状は , ひずみ速度 $10^{-4}/s$ のそれと比べてわずかに外側に膨張した . この結果は降伏曲面の形状とひずみ速度との間に相関があることを示唆している .

二軸バルジ試験により得られた応力比 (圧延方向 : 圧延直角方向) = 1:0, 2:1, 1:2, 0:1 における成形限界ひずみは , ひずみ速度の変化に関わらずほぼ一致した .

(2) アルミニウム合金板の二軸バルジ試験結果

板厚 1.0 mm の 6000 系アルミニウム合金板を用いて二軸バルジ試験を行い , 加工硬化挙動および成形限界ひずみのひずみ速度依存性を調査し以下の知見を得た .

線形応力経路下において本供試材は異方硬化を示すが , その等塑性仕事面は Yld2000-2d 降伏関数で精度良く再現できる . (図 3)

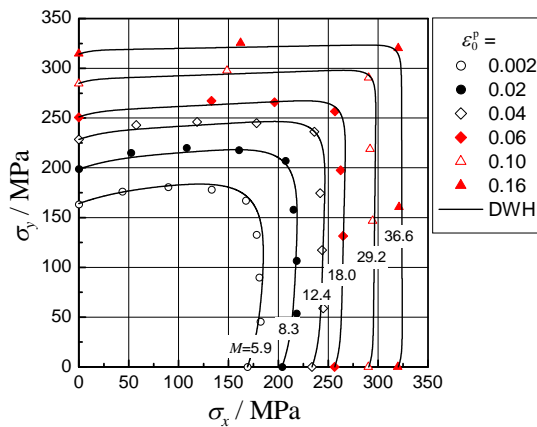


図3 6000系アルミニウム合金板の異方硬化挙動と Yld2000-2d 降伏関数による材料モデリング (DWH)

異方硬化挙動を表現できる材料モデリング手法を考案し、有限要素解析ソフトウェアに搭載した。

液圧バルジ試験を行い、頂点部板厚ひずみ-内圧曲線を測定した。実験値は、異方硬化を考慮した有限要素解析結果とほぼ一致し、異方硬化挙動のモデル化の有効性を立証した。

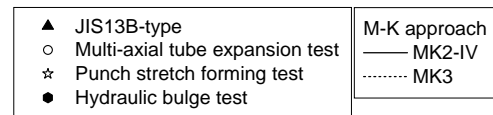
- (3) 590MPa 高張力鋼板の二軸バルジ試験結果
板厚 1.2mm の 590MPa 級析出強化型高張力鋼板 (JSC590R) を用いて二軸バルジ試験を行い、二軸引張試験に基づく材料モデルの決定方法が、M-K モデルによる成形限界の予測精度に及ばず影響を検証した。その結果、以下の知見を得た。

M-K 解析の精度向上には二軸バルジ試験により大ひずみ域にわたる二軸応力状態を測定し、降伏関数の異方性パラメータを決定する必要がある。

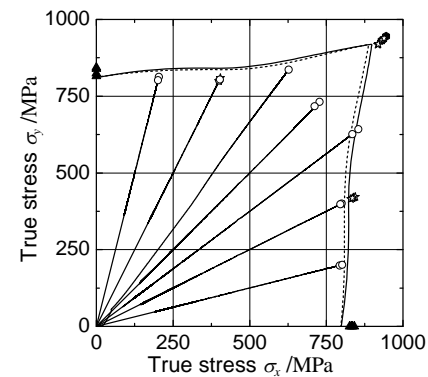
成形限界の予測精度を向上させるためには、降伏関数の異方性パラメータの決定に際し、等塑性仕事面の形状と塑性ひずみ速度方向の両方の再現精度に優れた材料モデルを用いることが必要である。

異方硬化モデルは等方硬化モデルよりも成形限界の予測精度が向上した。

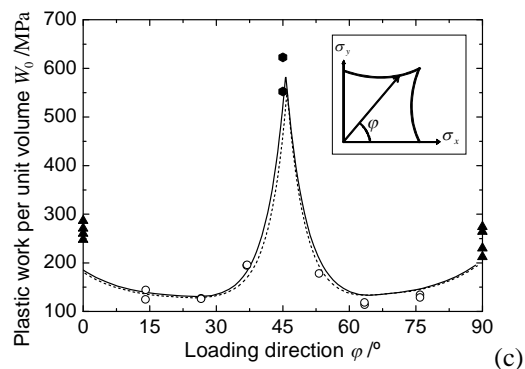
本供試材のように異方硬化の度合いが小さな材料では、成形限界の予測精度に及ばず異方硬化挙動の影響は小さい (図4)。



(a)



(b)



(c)

- 図4 590MPa 高張力鋼板の二軸バルジ試験結果と MK 解析結果との比較。(a)成形限界線 (b) 成形限界応力線, (c) 成形限界塑性仕事線。実線: $\epsilon_p^0 = 0.12$ の等塑性仕事面より決定された材料モデルによる M-K 解析結果。破線: 異方硬化モデルによる M-K 解析結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- (1) 彌永大作・瀧澤英男・桑原利彦: 6000系アルミニウム合金板の異方硬化の定式と有限要素解析への適用, 塑性と加工, 55-636 (2014), 55-61. (査読有)
(DOI: <http://dx.doi.org/10.9773/sosei.55.55>)
- (2) 箱山智之・菅原史法・桑原利彦: 二軸バルジ試験法による高強度鋼板の加工硬化特性の測定と材料モデリング, 塑性と加工,

- 54-630 (2013), 628-634. (査読有)
(DOI: <http://dx.doi.org/10.9773/sosei.54.628>)
- (3) Hakoyama, T. and Kuwabara, T.: Material Modeling of High Strength Steel Sheet Using Multi-axial Tube Expansion Test with Optical Strain Measurement System, Key Engineering Materials, 554-557 (2013), 139-144. (査読有)
(DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.139](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.139))
- (4) Kuwabara, T. and Sugawara, F., Multi-axial tube expansion test method for measurement of sheet metal deformation behavior under biaxial tension for a large strain range, Int. J. Plasticity, 45 (2013), 103-118. (査読有)
(DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.12.003>)
- (5) 菅原史法・桑原利彦：金属板材の大ひずみ二軸応力-ひずみ曲線の連続測定を可能とする二軸バルジ試験機の開発 塑性と加工, 54-624 (2013), 57-63. (査読有)
(DOI: <http://dx.doi.org/10.9773/sosei.54.57>)
- (6) Hakoyama, T. and Kuwabara, T.: Biaxial Tensile Test of High Strength Steel Sheet for Large Plastic Strain Range, Key Engineering Materials, 504-506 (2012), 59-64. (査読有)
(DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.504-506.59](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.504-506.59))
- [学会発表] (計 8 件)
- (1) T. Sumita, T. Kuwabara: Measurement and material modeling of biaxial work-hardening behavior for pure titanium sheet, Proc. NUMISHEET 2014, Melbourne, Australia, 6-10 January, 2014, pp.516-519. (AIP Conference Proceedings, 1567).
- (2) T. Hakoyama, T. Kuwabara: Measurement of the forming limit stress curve using a multi-axial tube expansion test with a digital image correlation system, Proc. NUMISHEET 2014, Melbourne, Australia, 6-10 January, 2014, pp.636-641. (AIP Conference Proceedings, Volume 1567).
- (3) Kuwabara, T., Advanced Material Testing in Support of Accurate Sheet Metal Forming Simulations, The 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM 2013), Shenyang, China, 6-10 July, 2013. AIP Conference Proc. 1532, (2013), pp. 69-80; doi: 10.1063/1.4806810. [KEYNOTE PAPER]
- (4) Kuwabara, T.: Material testing in support of constitutive modeling and forming simulations. In: Narasimhan, K. (Ed.), Proc. IDDRG 2012, November 26-28, 2012, Mumbai, India, pp.24-33. <Plenary Lecture>
- (5) Hakoyama, T., Kuwabara, T.: Measurement and analysis of biaxial deformation behavior of high strength steel sheet using multi-axial tube expansion testing method. Int. Workshop on High Performance Steels, Bengal Engineering and Science University,

November 20-22, 2012, Shibpur, India.

<Invited Lecture>

- (6) Sugawara, F., Kuwabara, T.: Multi-axial tube expansion testing method for measuring forming limit strains and stresses of sheet metals under biaxial tension, Proceedings of the 5th Forming Technology Forum Zurich 2012, June 5-6, 2012, Zurich, Switzerland, 81-86.
- (7) Kuwabara, T., Yoshida K., Yanaga, D., Material testing and modeling of aluminum alloy sheet in support of forming simulations. In: Hasso Weiland, Anthony D. Rollett, William A. Cassada (Eds.), 13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA13), June 3-7, 2012, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), Pittsburgh, USA, pp. 665-674. <Invited lecture>
- (8) Yanaga, D., Kuwabara, T., Uema, N., Asano, M.: Biaxial work hardening characteristics of 6000 series aluminum alloy sheet for large strain range. Proceedings of the ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2012), June 4-8, 2012, Notre Dame, Indiana, USA. (CD-ROM)

[図書] (計 1 件)

Kuwabara, T.: Biaxial Stress Testing Methods for Sheet Metals. In Comprehensive Materials Processing; Van Tyne, C. J., Ed.; Elsevier Ltd., 2014; Vol. 1, pp 95-111.

[その他]

<http://www.tuat.ac.jp/~kuwabara/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

桑原 利彦 (KUWABARA TOSHIHIKO)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：60195609