

機関番号：12605  
 研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360324  
 研究課題名（和文） 複合変形経路における異方性鋼管の成形限界予測手法の確立と実験検証  
 研究課題名（英文） Development of forming limit prediction method for anisotropic steel tube subjected to combined loading paths and experimental validation  
 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

## 研究成果の概要（和文）：

大ひずみ二軸応力下における金属素板の弾塑性変形挙動を除荷を伴わずに測定することができる軸力-内圧型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、線形および複合二軸応力径路下における冷延 IF 鋼板および高強度温間縮径鋼管の弾塑性変形挙動および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、これらの測定結果は、Marciniak-Kuczyński モデルによるひずみ局所化解析による計算値と定性的に一致した。

## 研究成果の概要（英文）：

A servo-controlled biaxial tensile tenting machine for sheet metals was developed to measure the biaxial stress-strain curves of test samples in a strain range up to fracture with no unloading. The sheet sample was bent and welded to make a tubular specimen and combined tension-internal pressure was applied to it using the testing apparatus. The deformation behavior and forming limit stresses and strains of cold rolled IF steel sheet (SPCE) and high strength steel tube under linear and combined stress paths were successfully measured. The experimental tendencies were in qualitative agreed with those calculated using the strain localization analysis based on the Marciniak-Kuczyński approach.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2009 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011 年度			
2012 年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

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：チューブハイドロフォーミング，鋼管，異方性降伏関数，降伏曲面，成形限界ひずみ，成形限界応力，材料試験，複合負荷経路

## 1. 研究開始当初の背景

自動車台数の急激な増大は地球環境を悪化させている。この対策として、車体の軽量化技術による燃費向上が渴望されている（車体重量が 10%軽くなると、CO2 排出量は約 5%低減される）。

車体の軽量化技術として最も注目されている加工技術がチューブハイドロフォーミングである。チューブハイドロフォーミングとは、直管を曲げ、金型に挿入した後、軸力を負荷しつつ高圧の液体で円管を膨張させて金型形状を転写し、所望の形状の中空部品を製

造する塑性加工法である。利点として、部品の中空化による軽量化，高剛性化，材料の加工硬化による高強度化，部品の一体化によるコストダウン効果などの効果がある。

チューブハイドロフォーミングの普及の妨げとなっているのが，成形性（管材の破断）の予測の難しさである。この原因として，①材料が複雑な変形履歴をたどること，②新しい成形技術であるため，加工のノウハウがほとんどない，ことがあげられる。そのため，加工条件や金型形状の検討は試行錯誤で行われているのが現状である。この対策として，有限要素法による成形シミュレーションの活用があるが，実用管材（φ40～80mm，肉厚2～4mm）の成形限界（ひずみと応力）や塑性変形特性を表現するための材料モデル（異方性降伏関数）は，実験技術の難しさもあり，国内外でほとんど解明されておらず，信頼性のある成形シミュレーションを実現するまでに至っていない。

申請者らは，自動車軽量化用材料として有望視されているアルミニウム合金管および機械構造用鋼管を対象として，次の二項目を解明することを目的として，研究を展開してきた（H15-16 基盤研究C，H17-18 基盤研究C）。

- ① 二軸応力下における塑性変形挙動の詳細測定と異方性降伏関数による定式（材料モデリング）
- ② 線形応力経路および複合応力経路における破断時期予測手法の確立

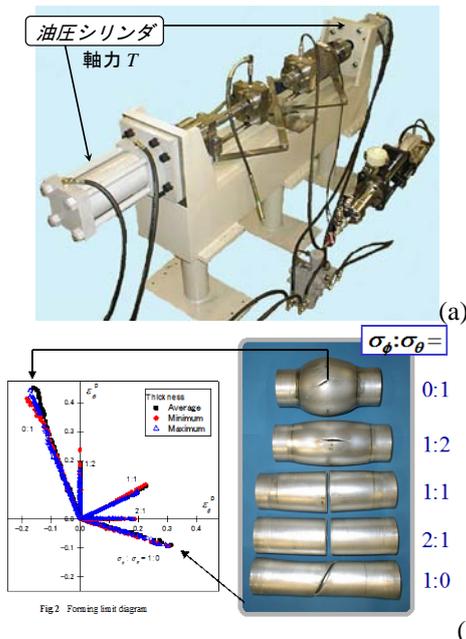


図1 (a)サーボ制御二軸応力試験機と(b)アルミニウム合金管の成形限界線の測定例。  
 $\sigma_\phi$ ：管軸方向応力， $\sigma_\theta$ ：円周方向応力

高精度な材料モデリングを行うには，実用管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独自に設計製作した（図1）。本試験機の特長は，①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経路もしくはひずみ経路を任意に制御する機能を有する，②最大荷重200kN，最大内圧60MPaと大出力であるため，自動車用大型円管の高精度な材料試験が可能である，など世界最高性能を有する。

本試験機を用いて，アルミニウム合金管や機械構造用炭素鋼管の材料モデリング（異方性降伏関数の同定）に成功した。さらに破断時の応力を応力空間にプロットして得られる成形限界応力線は，変形経路にほとんど依存しないことを立証し，複雑な変形経路における管材の成形限界指標になり得ることを世界で初めて実験的に立証した。

しかし課題が残った。上記の研究では，線形応力経路もしくは二つの線形応力経路の間に除荷を含む複合応力経路が用いられたが，チューブハイドロフォーミングで管材が実際に受けるであろう，除荷を含まない複合応力経路に対して，成形限界ひずみや成形限界応力を実測したり，材料の塑性変形挙動の定式の妥当性を立証するまでには至っていない。

## 2. 研究の目的

本研究では，これまでの研究をさらに発展させ，除荷を含まない複合応力経路における鋼管の塑性挙動と成形限界を実測し，塑性異方性（r値）がそれらに及ぼす影響を，実験および解析の両面から明らかにすることを目的とする。研究動機はつぎのようである。チューブハイドロフォーミング部品の形状は年々複雑化しており，より成形性の高い鋼管のニーズが高まっている。一般にr値が高い鋼管ほど成形性がよい（成形限界ひずみが多い）との実験報告がある（水村・栗山，2000）。しかしその塑性力学的根拠は解明されていない。実際，板厚の初期不整を考慮した，いわゆる Marciniak-Kuczynski (MK) モデルで計算すると，r値の向上は成形限界ひずみの向上に寄与しないことがわかっている（Friedman and Pan，2000）。そこで本研究では，r値の異なる鋼管を研究対象として，次の3項目を明らかにすることを目的とする。

- (i) サーボ制御二軸応力試験機による初期降伏曲面および後続の塑性変形挙動の測定と定式
- (ii) サーボ制御二軸応力試験機による線形および複合応力経路における成形限界の測定

(iii) (i)で得られた材料モデルに基づく理論成形限界ひずみの計算

3. 研究の方法

(1) 大変形用ひずみ計測器の設計と製作

これまでの申請者の研究では、ひずみゲージを使って円管のひずみ計測を行ってきたが、測定可能なひずみ範囲が高々10%であった。このため、本研究で用いるような高延性の鋼管を破断させるまでには、最低でも5回の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、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できるように、変位計を用いた大変形用ひずみ計測器を設計製作する。その概念図を図2に示す。

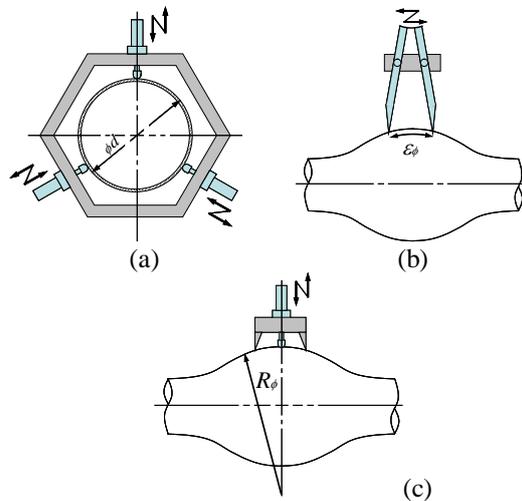


図2 大変形用ひずみ計測器. (a) 円周方向ひずみ計測器. (b) 管軸方向ひずみ計測器. (c) 管軸方向曲率計

図2(a)は円周方向ひずみ計測器である。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2(b)は管軸方向ひずみ計測器である。測定原理は通常のひずみゲージ式の伸び計と同一である。市販の伸び計は高価であるうえ、管材への適用は取り付け上の不都合が多いので、本研究では管軸方向ひずみ計測器を自作する。

図2(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) 線形応力経路試験と材料モデル同定

管軸方向応力 $\sigma_\phi$ と円周方向応力 $\sigma_\theta$ の比率を一定に保持した線形二軸応力経路を供試材に付与し、管軸方向および円周方向の応力ひずみ曲線を測定する。次に測定された応力ひずみ曲線から、単位体積あたりに消費された塑性仕事を求め、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異方性降伏関数を同定する。

(3) 線形および複合応力経路における塑性変形挙動および成形限界の測定結果と異方性塑性理論に基づく数値解析結果との比較

チューブハイドロフォーミングにおいて、管材が受けるひずみ経路は一般的に直線（ひずみ比一定）ではない。そこで、二つの直線ひずみ経路からなる除荷を含まない種々の複合負荷経路に対して管材をバルジ変形させ、そのときの塑性変形挙動と成形限界を測定する。さらに各種異方性降伏関数による計算値と測定値を比較し、異方性塑性理論の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 大ひずみ複合二軸応力経路における冷延IF鋼板の塑性変形挙動の測定と解析

①実験方法

供試材は板厚0.8mmの冷延鋼板SPCEである。同素板をロール曲げ後、端部を突き合わせTIG溶接して、外径46.2mmの円管試験片を製作した。素板の圧延方向(RD)を管軸( $\phi$ )方向に採った。硬さは、母材が90HV、溶接部が平均120HV、HAZ軟化量5HVであった。

二軸応力を受ける供試材の塑性変形挙動を定量的に評価するために、供試材に線形応力経路を負荷し、等塑性仕事面を測定した。応力比は $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 0:1$ の7通りとし、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta=1:0, 0:1$ の試験はJIS13号B型を用いた。一応力経路当たり2回の試験を行った。まず圧延方向の単軸引張試験を行い、既定の対数塑性ひずみ $\epsilon_0^p$ に達した瞬間における単軸引張応力 $\sigma_0$ と、 $\epsilon_0^p$ に達するまでになされた単位体積あたりの塑性仕事 $w$ を求める。さらに二軸引張試験および圧延直角方向の単軸引張試験では、 $w$ と等量の塑性仕事消費された時点での応力点 $(\sigma_1, \sigma_2), (0, \sigma_{90})$ を求め、それらを主応力空間にプロットして、 $\epsilon_0^p$ に対する等塑性仕事面を決定した。

円管試験片は造管に伴う予ひずみを受けている。そこで本供試材の塑性変形初期の応力ひずみ線図を正確に測定するため、十字形試験片を用いた二軸引張試験も合わせて行ない、1~4%以下のひずみ域における、予ひずみを受けていない処女材の応力-ひずみ曲線も精

密に測定した。

線形応力経路以外の応力経路に対して、等方硬化理論の適用可能性を検証するために、二つの線形応力経路から構成される複合二軸応力経路試験を行った。まず第1負荷として応力増分比  $d\sigma_\phi:d\sigma_\theta = 1:1$  で負荷し、規定の応力に達した瞬間に  $d\sigma_\phi:d\sigma_\theta = -1:1$  及び  $1:-1$  に急変させた。急変点は、 $\epsilon_0^p = 0.04$  及び  $0.08$  に対応する応力点とした。

## ②結果と考察

### (a)線形二軸応力試験結果

等塑性仕事面を構成する応力点の値を、当該の塑性仕事に対応する圧延方向単軸応力  $\sigma_0$  で除して無次元化した無次元化等塑性仕事面を図3に示す。各応力比に対して相当塑性ひずみ換算で19%までの無次元化等塑性仕事面の測定に成功した。無次元化等塑性仕事面の形状は、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 2:1, 4:3, 1:1$  においては、 $\epsilon_0^p \leq 0.08$  のひずみ域では膨張傾向を示し異方硬化挙動が確認された。それ以降のひずみ域においてはほぼ相似形状となった。 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 3:4, 1:2$  においては膨張傾向、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 0:1$  においてはわずかに収縮傾向を示した。

$\epsilon_0^p = 0.002$  の測定値に対し、各種降伏関数による計算結果との比較を行うと、von Mises

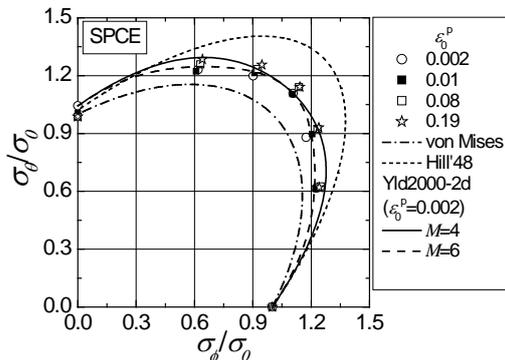


図3 無次元化等塑性仕事面の実験値と理論降伏曲面との比較

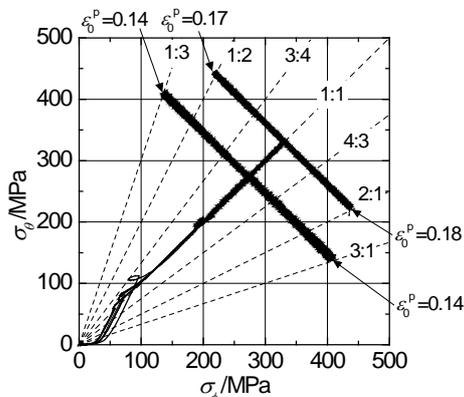


図4 複合負荷経路試験において測定された応力経路

は実験値を平均8%過小評価し、Hill '48は平均19%過大評価している。一方4次の Yld2000-2d は実験値を平均5%過大評価し、6次の場合は実験値との誤差は平均2%程度である。また全体的には、 $\epsilon_0^p$  の増加に伴い4次の Yld2000-2d に近づく傾向がある。

### (b)複合二軸応力試験結果

測定された応力経路を図4に示す。急変点が  $\epsilon_0^p = 0.04$  の場合は、応力比  $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$  から  $3:1, 1:3$  に達するまで、 $\epsilon_0^p = 0.08$  の場合は、応力比  $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$  から  $2:1, 1:2$  に達するまでの連続的な応力ひずみ線図の測定に成功し、ひずみゲージの測定限界により試験を終了した。各経路の終点における  $\epsilon_0^p$  で換算した累積塑性ひずみを同図中に示す。

急変点以降の、塑性変形の進展に伴う無次元化等塑性仕事点の推移の実験値と各種降伏関数による計算値の比較を図5に示す。比較に用いた降伏関数は、 $\epsilon_0^p = 0.04$  の時点材料パラメータを用いて決定した。急変点が  $\epsilon_0^p = 0.04$  および  $0.08$  どちらの場合も、無次元化等塑性仕事点は概ね6次の Yld2000-2d と一致した。

塑性ひずみ速度の方向は、急変点が  $\epsilon_0^p = 0.04$  および  $0.08$  どちらの場合も、 $d\sigma_\phi:d\sigma_\theta = -1:1$  においてはほぼ6次の Yld2000-2d による計算値と一致することを確認した。一方、 $d\sigma_\phi:d\sigma_\theta = 1:-1$  では、急変直後の塑性ひずみ速度の方向は、6次の Yld2000-2d に、それ以降は4次の Yld2000-2d による計算値に近くなった。

以上まとめると、今回の SPCE 材において、線形および複合負荷経路における加工硬化挙動（塑性流動応力の増大）と塑性ひずみ速度は、6次の Yld2000-2d の等方硬化モデルで概ね再現可能であることがわかった。今後、さらに系統的な研究を継続し、複合応力経路における金属板材の弾塑性変形挙動を再現できる高精度な材料モデル構築を目指す。

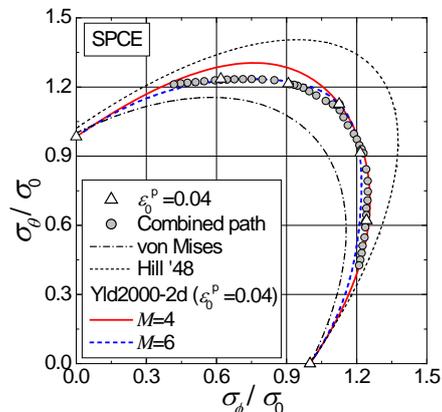


図5 急変点以降の、塑性変形の進展に伴う無次元化等塑性仕事点の推移の実験値と理論降伏曲面との比較。

(2) 大ひずみ複合二軸応力経路における温間縮径鋼管の塑性変形挙動の測定と解析

① 実験方法

供試材には温間縮径圧延鋼管を使用した。肉厚の均一化を目的として円管材に内外削加工を施して試験片を製作した。試験片の寸法を図6に示す。

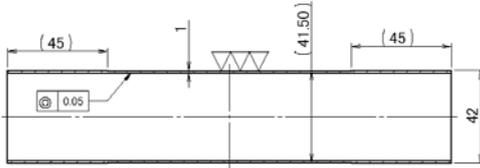


図6 試験片寸法

サーボ制御軸力-内圧型2軸応力試験機を用いて、線形応力経路試験および除荷を含まないひずみ経路急変試験および応力経路急変試験を行い、各々について、成形限界ひずみおよび成形限界応力を測定した。ひずみの測定には、ひずみゲージ及び変位計を用いた大変形用ひずみ測定器を用いた。

② 計算方法

M-Kモデルに基づくひずみの局所化解析を行い、実験値と比較した。降伏関数は

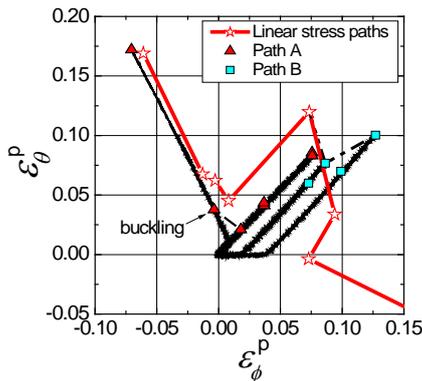


図7 等二軸引張後単軸引張（経路A）および平面ひずみ引張後等二軸引張（経路B）における成形限界ひずみ

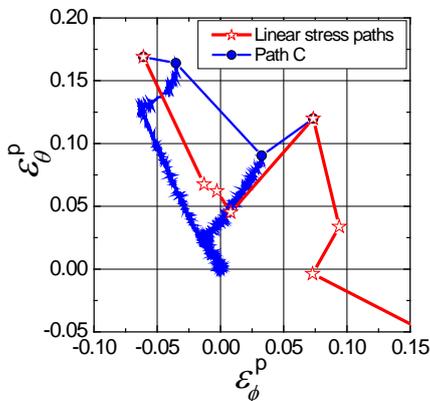
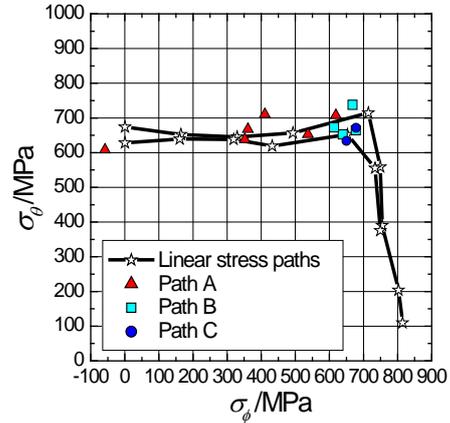


図8 単軸引張後等二軸引張における成形限界ひずみ

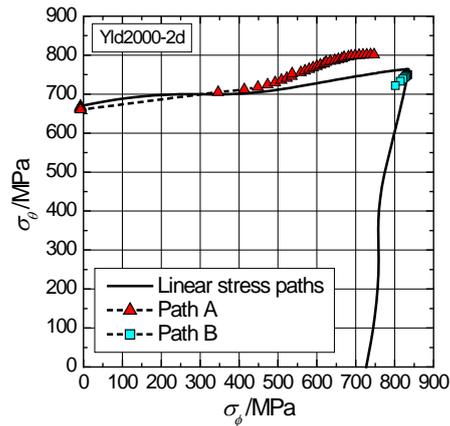
Yld2000-2dを用い、板厚の初期不整は0.98と仮定した。

③ 結果と考察

ひずみゲージを用いたひずみ速度比制御試験により、ひずみ経路急変試験を行った。経路A： $\dot{\epsilon}_\phi:\dot{\epsilon}_\theta = 1:1 \rightarrow -1:2$  ( $\Delta$ )、経路B： $\dot{\epsilon}_\phi:\dot{\epsilon}_\theta = 1:0 \rightarrow 1:1$  ( $\square$ )により得られた破断までのひずみ経路と線形応力経路により得られ



(a)



(b)

図9 複合負荷経路の破断時の応力と線形応力経路により得られた成形限界応力線との比較。(a)実験結果。(b) M-K法による計算結果。

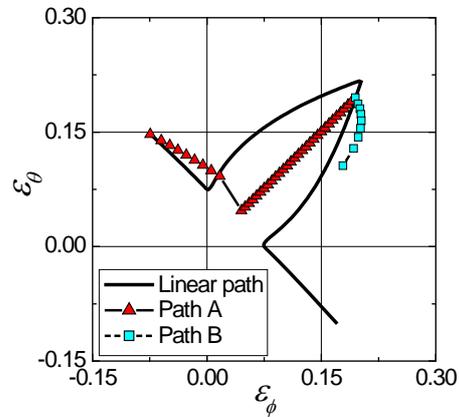


図10 6次のYld2000-2d降伏関数を用いて、M-Kモデルにより計算された成形限界線

た成形限界線（☆）との比較を図7に示す。経路Aの試験においては $\dot{\epsilon}_\theta = \dot{\epsilon}_\phi = 0.02$ 以上のひずみが付与されるとひずみ速度比急変直後に破断した。一方、経路Bでは、 $\dot{\epsilon}_\phi : \dot{\epsilon}_\theta = 1:0$ における予ひずみが大きい場合（ $\epsilon_\theta = 0.038$ ）は、急変後も円周方向ひずみが進展していることが確認された。

大変形用ひずみ測定器を用いた真応力制御試験により応力経路急変試験を行った。経路C：応力速度比 $\dot{\sigma}_\phi : \dot{\sigma}_\theta = 0:1$ （ $\sigma_\theta = 575, 625\text{MPa}$ まで） $\Rightarrow 1:0$ （ $\sigma_\theta = \sigma_\phi = 575, 625\text{MPa}$ まで） $\Rightarrow 1:1$ により得られた破断までのひずみ経路と線形応力経路により得られた成形限界線との比較を図8に示す。 $\epsilon_\theta = 0.125$ 付近で応力増分比を急変させた場合、円周方向の成形性が向上する傾向が確認された。この傾向はMK理論による成形限界線のひずみ経路依存性の傾向（Nakajima et al., 1968）と定性的に一致する（経路Cは $\dot{\sigma}_\phi : \dot{\sigma}_\theta = 1:0$ の区間では弾性域に入る。従って $\dot{\sigma}_\phi : \dot{\sigma}_\theta = 0:1$ で負荷した後一度除荷してから $\dot{\sigma}_\phi : \dot{\sigma}_\theta = 1:1$ で再負荷する試験方法と等価である）。

以上の複合負荷経路の破断時の応力を線形応力経路により得られた成形限界応力線と比較したものを図9(a)に示す。実験値のばらつきはあるものの、成形限界線ほどの著しいひずみ経路依存性がないことが確認できる。M-Kモデルにより計算された成形限界応力線を図9(b)に示す。実験値との定性的な一致は得られた。

6次のYld2000-2d降伏関数を用いて、M-Kモデルにより計算された成形限界線を図10に示す。図7の実験値と比べると、経路Aにおいては、 $\epsilon_\theta \geq 0.045$ においてひずみ経路を急変させた場合には急変直後にひずみの局所化に至ること、経路Bにおいては、線形応力経路の場合よりも成形限界ひずみが大きくなることなど、定性的な傾向は再現されている。

以上まとめると、線形応力経路および除荷を含まない複合負荷経路における、成形限界ひずみおよび成形限界応力の測定に成功した。実験値は、M-Kモデルによるひずみ局所化解析の結果と定性的に一致した。今後は、円周方向の肉厚と機械的性質がより均一な試験片を用いて、実験の精度を高める予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- (1) Banabic D., Barlat, F., Cazacu, O. and Kuwabara, T.: Advances in anisotropy and formability, Int. J. Mater. Form., 3 (2010), 165-189. (査読有り)

〔学会発表〕（計8件）

- (1) 山岸駿介・桑原利彦：連続複合負荷経路における鋼管の塑性変形特性と成形限界，平23 塑加春講論，(2011)，53-54。（早

稲田大学，平成23年5月27日）

- (2) 江夏亮太郎・桑原利彦・山岸駿介・菅原史法：大ひずみ複合二軸応力経路下における冷延 IF 鋼板の塑性変形挙動の測定と解析，平23 塑加春講論，(2011)，267-268。（早稲田大学，平成23年5月27日）
- (3) R. Enatsu and T. Kuwabara, Biaxial tensile test of cold rolled if steel sheet for large plastic strain range, Proc. NUMISHEET 2011, (2011) (Seoul, August)
- (4) S. Yamagishi, K. Yoshida and T. Kuwabara, Forming limit evaluation of steel tube subjected to combined loading paths, Proc. 5th Int. Conf. on Tube Hydroforming, TUBEHYDRO 2011, (2011) (Noboribetsu, July)
- (5) 江夏亮太郎・桑原利彦・山岸駿介：大ひずみ線形二軸応力経路における冷延 IF 鋼板の塑性変形挙動，61 回塑加連講論，(2010)，439-440。（山形大学，平成22年10月15日）
- (6) 山岸駿介・桑原利彦・江夏亮太郎：大ひずみ非線形2軸応力経路における冷延 IF 鋼板の塑性変形挙動，61 塑加連講論，(2010)，439-440。（山形大学，平成22年10月15日）
- (7) 山岸駿介・桑原利彦：中間除荷を含まない複合負荷経路を受ける鋼管の成形限界，CAMP-ISIJ（日本鉄鋼協会第160回秋季講演大会），23-2 (2010)，1094。（北海道大学，平成22年9月26日）
- (8) 山岸駿介・桑原利彦：サーボ制御大ひずみ円管バルジ試験機による鋼管の成形限界評価，平成22年度塑性加工春季講演会論文集，(2010)，193-194。（電気通信大学，平成22年5月28日）

〔図書〕（計1件）

桑原利彦：3-1 塑性異方性，ひずみ経路依存性，二軸応力負荷でのSS曲線，鉄鋼材料の加工硬化特性への新たな要求と基礎研究—加工硬化研究の最前線—，(社)日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 加工硬化特性と組織研究会，(2011)，pp.159-169.

## 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

### (2) 連携研究者

吉田 健吾 (YOSHIDA KENGO)

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70436236