

工業用JIS1種チタン薄板と鋼板の成形性比較 および成形シミュレーション技術

Comparison of Formability between Commercially Pure Titanium JIS Class1 Sheet and Steel Sheets and Forming Simulation Technology

三好 遼太郎*
Ryotaro MIYOSHI

伊丹 美昭
Yoshiaki ITAMI

抄 録

JIS1種純チタンの成形性を理解するため、同強度レベルの深絞り用鋼板とSUS316を比較材に種々の試験を行った。引張試験では鋼板、SUSと比較してチタンの異方性は大きく、強度、延性ではチタン≒鋼板<SUS、 r 値ではSUS<鋼板<チタンとなった。種々の矩形ブランクを用いた張出し試験の張出し高さは鋼板≒チタンとなり、ブランク形状次第でSUS<チタンとなった。深絞り試験では限界深絞り比(LDR)がSUSで2.2、鋼板で2.3、チタンで2.6となり、チタンでは Δr からの予測と異なる方向に大きな耳が形成された。Hillの直交異方性の2次の降伏関数でチタンの角筒絞り成形シミュレーションを行い、板厚分布が良く一致した。今後、異方硬化を考慮した構成則を開発し、さらなる精度向上を目指す。

Abstract

To understand the formability of commercially pure titanium JIS class1 sheet, we conducted various tests with steel sheets for deep drawing having the same level of strength and SUS316. The results of the tensile test show that the titanium has higher anisotropy than the steel sheet and SUS, and has almost the same level of strength and ductility as the steel sheet but has lower ductility than the SUS. Also, the titanium has the largest r value while the SUS has the smallest one. The results of the punch stretch forming test with various blanks show that the limiting dome height of the titanium is equal to or greater than that of the steel sheet, and depending on the blank shape, the titanium has a larger stretching height than the SUS. At the deep drawing test, the limiting drawing ratios (LDR) of the SUS, steel sheet, and titanium are 2.2, 2.3, and 2.6, respectively and the titanium had a large ears formed in a direction different than that estimated based on Δr . With Hill's quadratic orthotropic yield function, we performed square deep drawing simulation for the titanium, where the same plate thickness distribution was obtained. In the future, we will develop a constitutive law that takes into account anisotropic hardening, aiming for further improvement in accuracy.

1. 緒 言

チタンは地殻中に9番目に多く存在する元素だが、精錬が難しく工業化から僅か数十年と歴史は浅い。しかし、軽くて強い、耐食性が高い、発色が容易で意匠性に優れるなどの優れた特長を武器に適用の範囲を拡大し¹⁾、近年、一般的な金属として広く認知されるようになった。一方、チタンの軽くて強いという強烈な印象やチタンを構成する六方最密充填構造(hcp)は低延性を連想させ、成形が難しい材料とイメージされることがある。実際にはチタンは強度、

延性バランスにも優れており、代表的な適用先である板式熱交換機や自動車、建材、高級民生品などでは、厳しいプレス成形を施されたJIS1種純チタンが使用されている。今後、このような成形を必要とする市場にチタンを展開していくには、まず、JIS1種を中心とした純チタンが成形性の良い材料として広く認知されていくことが肝要である。さらに、その成形性を活かすために、hcp起因の強い異方性やそれに伴う計算シミュレーションの難しさ^{2,3)}、高い摩擦係数といった課題の解決手法の拡充が必要である。本報では、JIS1種純チタンの高い成形性と異方性を直感的に理解

* 鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 チタン・ステンレス研究室 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

できるデータの取得に向け、自動車向け深絞り用鋼板および汎用ステンレス鋼 SUS316 を比較材に引張試験、球頭張出し試験、および円筒深絞り試験を実施した。また、チタンの異方性を加味した計算シミュレーションの精度向上に対する取り組み例について紹介する。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には表 1 に示す化学成分の、厚さ 0.49mm のプレス成形用 JIS1 種純チタン薄板 (以下、CP-Ti)、表 2 に示す化学成分の厚さ 0.50mm の自動車向け深絞り用鋼板 JAC 270D (以下、LC-Steel) および厚さ 0.54mm の汎用のステンレス鋼 SUS316 (以下、SUS316) 薄板を用いた。図 1 に供試材毎のマイクロ組織を示す。CP-Ti のマイクロ組織は平均粒径 60 μ m 程度の等軸であり、テンションレバラーで導入されたひずみで僅かに双晶が形成されていた。LC-Steel および SUS316 のマイクロ組織は 10~15 μ m 程度の等軸であった。

2.2 引張試験、球頭張出し、円筒深絞りおよびひずみ解析方法

各供試材について引張試験、球頭張出し試験および円筒深絞り試験を行った。LC-Steel については液圧バルジ試験も行った。引張試験では圧延方向 (以下、L 方向)、45° 方向 (以下、D 方向)、圧延幅方向 (以下、T 方向) に JIS13B 試験片 (評点間距離 50mm) を作製し、ひずみ速度を 0.2% 耐力まで 0.3%/min、その後、30%/min とした。また、公称ひずみ 4% 時点での r 値を測定した。球頭張出し試験では、ひずみモードを変化させるため、ブランク形状を 30L \times 90T mm、40L \times 90T mm、50L \times 90T mm、60L \times 90T mm、70L \times 90T mm、90L \times 90T mm、90L \times 70T mm、90L \times 60T mm、90L \times 50T mm、90L \times 40T mm、90L \times 30T mm とした。90L \times 90T mm の正方形ブランクでは等 2 軸ひずみ変形、その他の長方形ブランクでは長軸方向が主ひずみとなり、短軸長が短いほど、短軸方向のひずみは小さくなる⁴⁾。金型には ϕ 40 mm の球頭ポンチと r 6 mm、クリアランス 2mm のビード付きダイスを用いた。材料毎の摩擦係数を統一するため、潤滑にナフロンテープ TOMBO 9001 t0.05mm (以下、ナフロンテープ) を用い、しわ押さえ荷重 7ton、ポンチ上昇速度を 20mm/min とし、各ブランクの張出し高さを評価した。液圧バルジでは、ブランク形状を 150L \times 150T mm とし、孔径 ϕ 100 mm、 r 10mm のビード付きダイスを用い、しわ押さえ荷重 40ton で、5min 程度で破断するよう徐々に油圧を増加した。円筒深絞り試験では ϕ 80~108 mm まで 4mm ピッチで円形ブランクを作製し、金型には ϕ 40 mm、 r 8mm の円筒ポンチとクリアランス 1.75 mm、 r 10mm のダイスを用いた。材料毎の摩擦係数を統一するため、潤滑にはナフロンテープを用い、しわ押さえ面圧を 4MPa、ポンチ上昇速度を 20mm/min で限界深絞り比 (以下、LDR : Limiting Drawing Ratio) を測定した。各試験片には試験後にひずみが確認できるように、予め \square 2mm のグリッドマーキングを施した。引張試験片、張出し試験片および液圧バルジ試験片の破断部近傍のひずみを非接触歪解析装置 AutoGrid で測定し、成形限界線図 (FLD : Forming Limit Diagram) を作成した。

表 1 CP-Ti の化学成分
Chemical composition of CP-Ti (mass%)

Material	N	C	O	Fe	Ti
CP-Ti	0.001	0.005	0.5	0.03	Bal.

表 2 LC-Steel, SUS316 の化学成分
Chemical composition of LC-Steel, SUS316 (mass%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
LC-Steel	0.004	0.005	0.079	0.019	0.0039	-	-	-	Bal.
SUS316	0.016	0.59	1.31	0.033	0.0086	10.57	16.91	2.01	Bal.

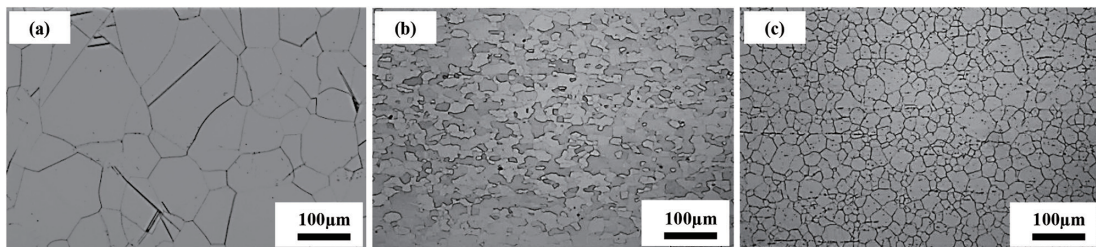


図 1 供試材の光学顕微鏡写真
Optical micrographs of samples (a) CP-Ti, (b) LC-Steel, (c) SUS316

90T mm、90L \times 90T mm、90L \times 70T mm、90L \times 60T mm、90L \times 50T mm、90L \times 40T mm、90L \times 30T mm とした。90L \times 90T mm の正方形ブランクでは等 2 軸ひずみ変形、その他の長方形ブランクでは長軸方向が主ひずみとなり、短軸長が短いほど、短軸方向のひずみは小さくなる⁴⁾。金型には ϕ 40 mm の球頭ポンチと r 6 mm、クリアランス 2mm のビード付きダイスを用いた。材料毎の摩擦係数を統一するため、潤滑にナフロンテープ TOMBO 9001 t0.05mm (以下、ナフロンテープ) を用い、しわ押さえ荷重 7ton、ポンチ上昇速度を 20mm/min とし、各ブランクの張出し高さを評価した。液圧バルジでは、ブランク形状を 150L \times 150T mm とし、孔径 ϕ 100 mm、 r 10mm のビード付きダイスを用い、しわ押さえ荷重 40ton で、5min 程度で破断するよう徐々に油圧を増加した。円筒深絞り試験では ϕ 80~108 mm まで 4mm ピッチで円形ブランクを作製し、金型には ϕ 40 mm、 r 8mm の円筒ポンチとクリアランス 1.75 mm、 r 10mm のダイスを用いた。材料毎の摩擦係数を統一するため、潤滑にはナフロンテープを用い、しわ押さえ面圧を 4MPa、ポンチ上昇速度を 20mm/min で限界深絞り比 (以下、LDR : Limiting Drawing Ratio) を測定した。各試験片には試験後にひずみが確認できるように、予め \square 2mm のグリッドマーキングを施した。引張試験片、張出し試験片および液圧バルジ試験片の破断部近傍のひずみを非接触歪解析装置 AutoGrid で測定し、成形限界線図 (FLD : Forming Limit Diagram) を作成した。

3. 実験結果および考察

3.1 引張試験

表 3 に引張試験結果を示す。LC-Steel, SUS316 と比較して、CP-Ti の異方性は非常に大きく、0.2% 耐力は L<D<T 方向、引張強さは D<L<T 方向の順に高くなった。また、均一伸び (U-EL) と全伸び (T-EL) は引張強さと逆の傾向で T<L<D 方向となった。 r 値は L<D<T 方向の順に高く、T 方向は 7.9 と顕著に高い値であった。材料毎の L、

D, T 方向の平均値を比較すると, 全伸び, 引張強さは CP-Ti ≒ LC-Steel < SUS316, r 値は SUS316 < LC-Steel < CP-Ti となった。また, r 値の異方性については式 (1) の面内異方性 Δr で評価した。

$$\Delta r = \frac{(r_L + r_T)}{2} - r_D \quad (1)$$

ここで, r_L, r_T, r_D はそれぞれ L, T および D 方向の r 値である。Δr は CP-Ti で 0.5, LC-Steel で 0.0, SUS316 で -0.1 となった。

図 2 に公称応力 - 公称ひずみ線図 (以下, S-S 曲線) を示す。CP-Ti では加工硬化にも異方性があり, S-S 曲線を

比較すると CP-Ti の L 方向, LC-Steel および SUS316 は公称ひずみと共に公称応力が増加する傾向であったが, CP-Ti の D 方向では公称応力の変動が小さく, T 方向では耐力測定後, すぐに公称応力が最大となり, 以降, 単調に低下した。図 3 にひずみ毎の n 値の推移を示す。CP-Ti の L および D 方向では n 値が真ひずみと共に増加した。特に D 方向は高ひずみ域になるほど n 値の増分が大きくなっており, 均一伸びが大きい要因と考えられる。なお, CP-Ti の T 方向は均一伸びが小さいため, n 値のひずみ依存性については不明であった。一方, LC-Steel の n 値はひずみ依存

表 3 各材料の引張方向毎の 0.2%耐力 (0.2%PS), 引張強さ (TS), 均一伸び (U-EL), 全伸び (T-EL), r 値, Δr
0.2% proof stress (0.2%PS), tensile stress (TS), uniform elongation (U-EL), total elongation (T-EL), r-value, Δr of materials in three direction

Material	Cutting direction	0.2%PS /MPa	TS /MPa	U-EL %	T-EL %	r-value	Δr
CP-Ti	L (0°)	169	296	31	45	2.0	0.5
	D (45°)	188	284	46	59	4.5	
	T (90°)	202	310	5	31	7.9	
	Ave.	187	297	27	45	4.8	
LC-Steel	L (0°)	138	303	23	43	1.3	0.0
	D (45°)	146	302	23	43	1.5	
	T (90°)	142	303	22	43	1.7	
	Ave.	142	302	23	43	1.5	
SUS316	L (0°)	265	614	45	54	0.8	-0.1
	D (45°)	263	586	48	58	1.0	
	T (90°)	257	596	52	60	1.0	
	Ave.	262	598	48	57	0.9	

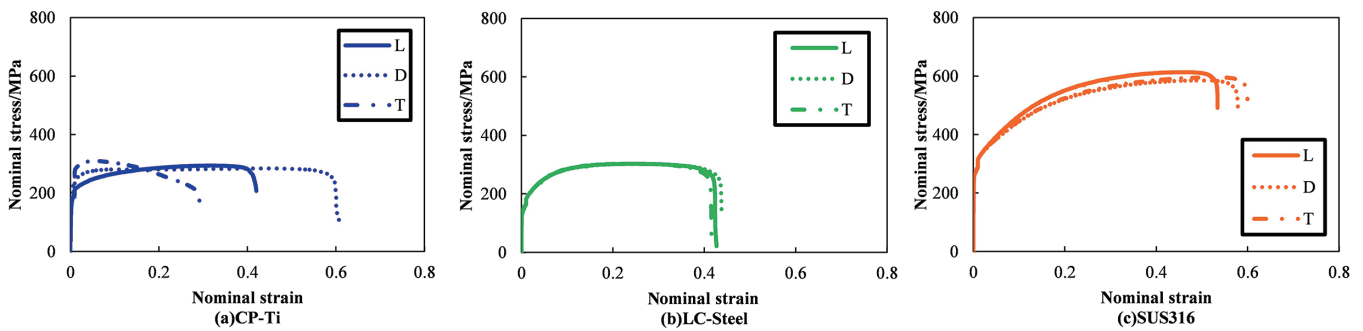


図 2 各材料の引張方向毎の S-S カーブ
S-S curve of each material in different tensile directions

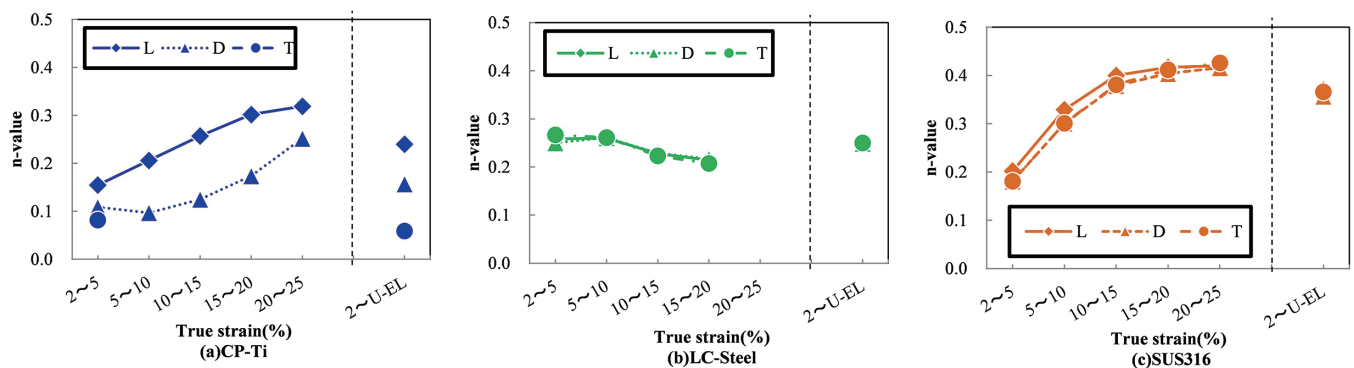


図 3 各材料の引張方向毎の n 値に及ぼすひずみの影響
Effect of strain on n-value of each material in different tension directions

性が小さく、SUS316 の n 値は CP-Ti の L, D 方向と同様にひずみと共に増加した。上記のように n 値は引張方向やひずみによって変動するため、一概に材料毎の比較はできないが、2%から均一伸びの範囲の平均的な n 値を比較すると、CP-Ti の T 方向 < CP-Ti の D 方向 < CP-Ti の L 方向 \approx LC-Steel < SUS316 の順に高かった。

3.2 球頭張出し試験および FLD の作成

種々の矩形ブランクを用いて球頭張出し試験を行い、張出し高さを測定した。図 4 にブランク形状毎の張出し高さの比較を示す。CP-Ti の張出し高さは引張試験の全伸びの異方性とは逆傾向となり、L (図中右側) < T (図中左側) 方向となった。材料毎に張出し高さを比較すると、L30×T90 から L60×T90 にかけて LC-Steel < SUS316 < CP-Ti となり、L70×T90 から L90×T60 にかけて LC-Steel \approx CP-Ti < SUS316 となり、L90×T50 から L90×T30 にかけて LC-Steel \approx CP-Ti \approx SUS316 となった。いずれのブランク形状においても CP-Ti の張出し高さは LC-Steel と同等以上となり、ブランク形状次第では SUS316 をも上回った。

一般に、張出し高さには n 値と破断部の最大主ひずみ (以下、成形限界ひずみ) が寄与することが知られている⁹⁾。そこで張出し試験片の成形限界ひずみを測定し、張出し高さとの関係を調査した。図 5 にブランク形状毎の張出し高

さと公称ひずみに換算した成形限界ひずみ (以下、成形限界ひずみ (公称)) を示す。張出し高さには n 値も寄与するため完全な一致はしなかったが、どの材料も張出し高さと同様に成形限界ひずみ (公称) の推移は類似の挙動となった。CP-Ti の T 方向では、 n 値は小さかったが、成形限界ひずみ (公称) が大きいため、その寄与によって、張出し高さが高くなったと考えられる。なお、SUS316 の短軸 L30×T90, L90×T30 のブランクで成形限界ひずみ (公称) が小さな値となっているが、図 6 のようにしわ押さえの拘束が影響し、ブランクの端に亀裂が生じ、伝播して破断したためと考えられる。

引張試験、球頭張出し試験片の破断部付近の成形限界ひずみを測定し、FLD を作成した。図 7 に各材料の FLD

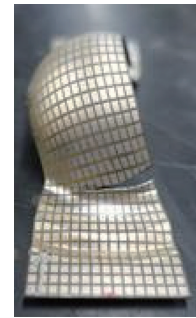


図 6 SUS316 の破断の様子 (L30×T90 mm)
Broken part of SUS316 (L30×T90 mm)

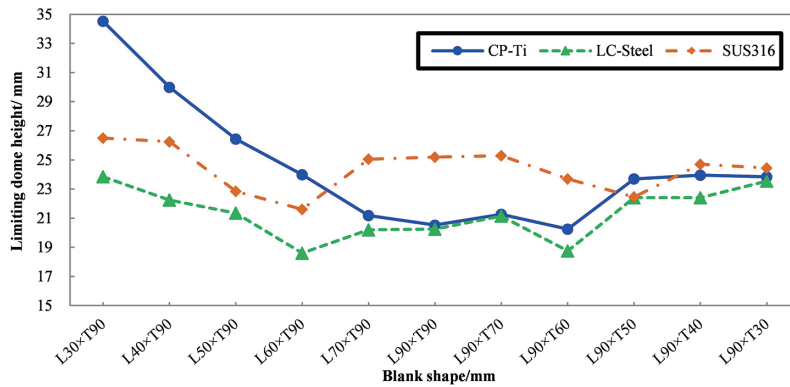


図 4 各材料の張出し高さに及ぼすブランク形状の影響
Effect of blank shape on limiting dome height of each material

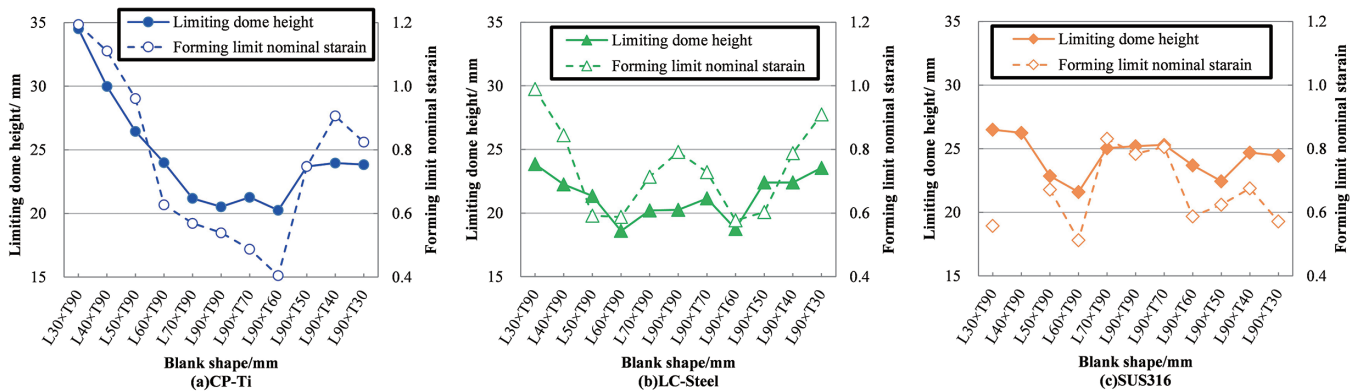


図 5 各材料の張出し高さと成形限界ひずみ (公称) に及ぼすブランク形状の影響
Effects of blank shape on limiting dome height and forming limit nominal strain of each material

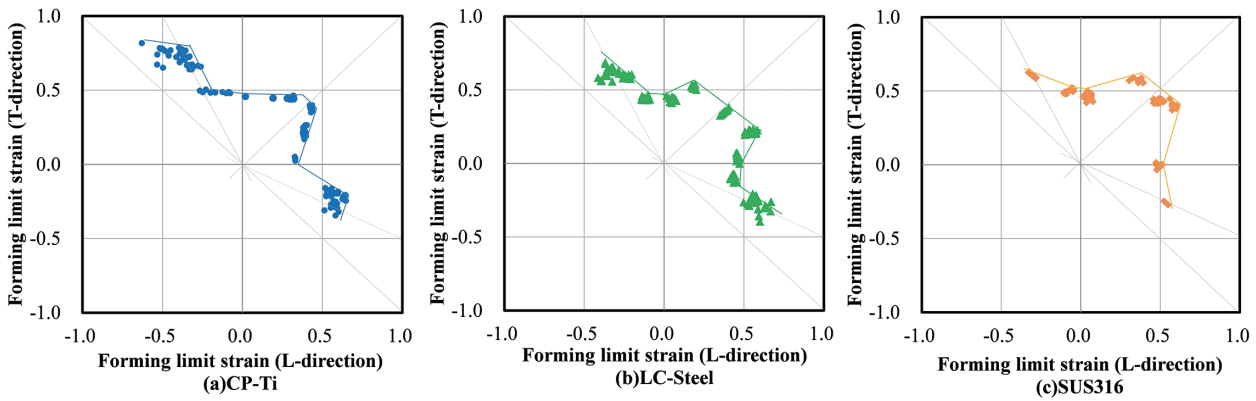


図7 材料毎のFLD
Forming limit diagram of each material

を示す。球頭張出し試験のブランク形状毎のひずみモードは、L90×T90mmでは等2軸ひずみ、短軸60mmの矩形では平面ひずみとなった。なお、LC-Steelは等2軸ひずみ変形を狙ったL90×T90mmブランクで等2軸と平面ひずみの間のひずみモードで破断が生じたため、等2軸の成形限界ひずみには液圧バルジ試験の破断部の値を用いた。CP-Tiの成形限界ひずみは主ひずみ方向毎に異なり、L<T方向となり、等2軸からL方向の平面ひずみにかけて特に低かった。プレス成形などで該ひずみモードの局所変形を加える際には思わぬ破断に留意する必要がある。材料毎に成形限界ひずみを比較すると、引張-引張変形となる第1象限の等2軸からT方向が主ひずみとなる領域にかけてはCP-Ti≒LC-Steel<SUS316となり、L方向が主ひずみとなる領域ではCP-Ti<LC-Steel<SUS316となった。T方向が主ひずみの引張-圧縮変形である第2象限ではSUS316<LC-Steel<CP-Tiとなり、L方向が主ひずみの引張-圧縮変形である第4象限ではSUS316<LC-Steel≒CP-Tiとなった。

3.3 円筒深絞り試験

図8に円筒深絞り試験片を示す。深絞り可能なブランクの最大直径はCP-Tiではφ104mm(LDR2.6)、LC-Steelではφ92mm(LDR2.3)、SUS316ではφ88mm(LDR2.2)となった。図9に円筒深絞りの模式図を示す⁴⁾。深絞り性は、ポンチ肩部(a点:引張-引張変形)の破断荷重Paが高く、フランジ(b点:引張-圧縮変形)を流入させるのに必要な荷重Pbが小さいほど良好となり⁴⁾、一般にr値が高いほど、LDRが向上することが知られている⁵⁾。本試験においても材料の平均r値が高い順にLDRが大きかった。円筒深絞り中に肩部に生じる最大応力 σ_{pa} (以下、肩部最大応力)を式(2)で定義した。

$$\sigma_{pa} = \frac{Pa_{max}}{D \cdot t} \quad (2)$$

ここで、 Pa_{max} は深絞り中の最大荷重、Dはポンチ直径、tは初期の板厚である。図10に肩部最大応力に及ぼすブランク径の影響を示す。なお、図中の×は肩部の破断を示しており、×の肩部最大応力が肩部の破断応力となる。CP-Ti

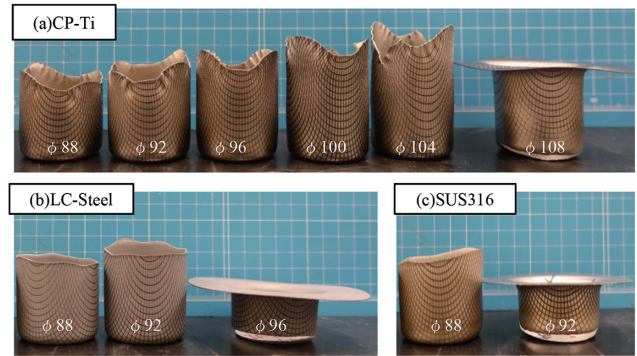


図8 各材料の深絞り試験片
Deep drawing test piece of each material

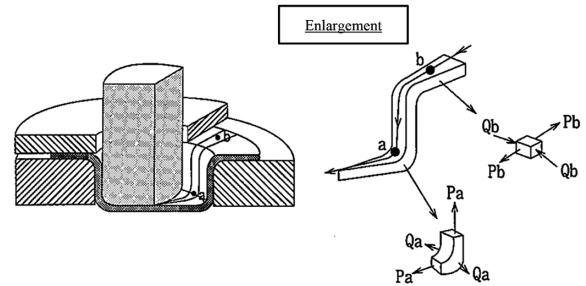


図9 深絞り試験の模式図⁴⁾
Schematic of deep drawing test⁴⁾

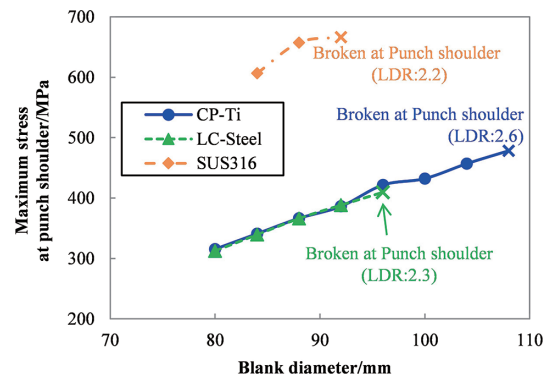


図10 材料毎の肩部最大応力に及ぼすブランク径の影響
Effect of blank shape on maximum stress at punch shoulder of each material

とLC-Steelの肩部最大応力の推移は同等であったが、肩部の破断応力はLC-Steelが410MPa程度であるのに対し、

CP-Ti が 480MPa 程度と大きく上回った。CP-Ti と LC-Steel の L, D, T 方向の引張強さから材料強度が同程度と考えれば、CP-Ti の高い深絞り性には肩部の破断応力の増加が大きく寄与したと考えられる。

深絞り成形において耳は r 値の異方性と密接な関係があり、CP-Ti では大きな耳が形成された。耳の形成方向は面内異方性 Δr で整理できることが知られている²⁾。例えば $r_L \neq r_T \neq r_D$ で Δr が正の場合、L および T 方向の r 値が D 方向より高くなる。その結果、フランジの L および T 方向での引張 - 圧縮変形が促進され、耳が形成される。 Δr が負の場合は同様の考えで D 方向付近に耳が形成される。表 3 に示すように CP-Ti の Δr は 0.5 で正の値であったが、図 11 に示すように CP-Ti の耳は D 方向付近に形成された。チタンは r 値が $L < D < T$ で、それぞれの差が大きいため、上記の Δr の考え方とは異なる機構で変形が生じたと推定される。図 12 に深絞り途中で肩部が破断した CP-Ti の $\phi 108\text{mm}$ のフランジの形状を示す。フランジの様子はブランクに予め施しておいた、 $\square 2\text{mm}$ のグリッドマーキングである。グリッドの湾曲から、L 方向に対し、T 方向の引張 - 圧縮変形が小さいことがわかる。CP-Ti の 0.2% 耐力は $L < D < T$ 方向の順に大きいため、T 方向の変形が抑制され、T 方向の変形を補うために、L, D 方向には大きな変形が生じると考えられる。この時 r 値が $L < D$ 方向であるため、D 方向の変形が相対的に大きくなり、フランジ形状が D 方向を角とした四角形の様相になったと考えられる。その結果、対角線が長い D 方向に耳が形成されたと推定される。

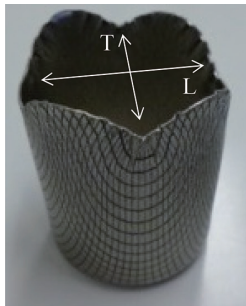


図 11 CP-Ti の深絞り試験片 ($\phi 96\text{mm}$)
Deep drawing test piece of CP-Ti ($\phi 96\text{mm}$)

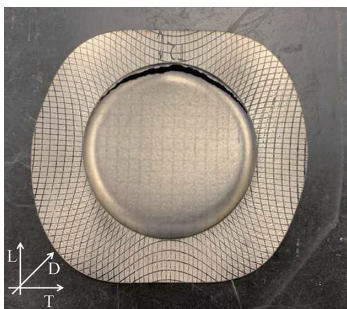


図 12 CP-Ti のフランジ形状 ($\phi 108\text{mm}$; パンチ肩部で破断した試験片)
Flange shape of CP-Ti ($\phi 108\text{mm}$; broken at punch shoulder)

4. 成形シミュレーション

4.1 チタン材のプレスシミュレーション

民生品のチタン材は特に IT (Information Technology) 等の筐体のプレス成形に用いられるようになってきている。上記のように、チタンの材料の特性として、鋼と異なり大きな塑性異方性に加え加工硬化の異方性があり、加工は難しいとされている。

そこで、日本製鉄(株)はこれらの特性を考慮し、かつ板厚方向の応力を考慮可能な 3 次元のソリッド要素を用いた解析技術を開発している。チタンの成形シミュレーション技術の向上には、より高精度にチタン材の変形を模擬できる材料構成則を開発・適用することが必要である。

4.2 チタン材のシミュレーション方法

チタン材は大きな r 値を有する塑性異方性を示す上、図 13 のように、引張方向毎に、応力 - 歪曲線が異なる加工硬化の異方性も有し、鋼とは異なる変形挙動を示す。また、ショックライン低減を目的とする解析には板厚方向の応力を考慮することが必要である⁶⁾。

本シミュレーションモデルは板厚方向の応力を考慮できるように 3 次元ソリッド要素を用いた弾塑性有限要素法を用い、式 (3) の Hill の直交異方性の 2 次降伏関数で近似した解析を行った。

$$a_1(\sigma_y - \sigma_z)^2 + a_2(\sigma_z - \sigma_x)^2 + a_3(\sigma_x - \sigma_y)^2 + a_4\tau_{yz}^2 + a_5\tau_{xz}^2 + a_6\tau_{xy}^2 = \bar{\sigma}^2 \quad (3)$$

また、加工硬化の異方性は要素の流入方向にて考慮する方法で近似した。

4.3 解析結果

今回は図 13 の純チタン材を使用し、 $\square 70\text{mm}$ のパンチによる角筒の深絞り試験を行い、実験との比較を行った。ブランクサイズは $\square 140\text{mm}$ 、板厚は 0.5mm、しわ押さえ荷重は 9.8kN とした。潤滑材を用い、摩擦係数 $\mu = 0.05$ 条件を与えた。角筒深絞り成形について適用した計算と実験の成形状態との比較を図 14 に示す。解析は実験で発生す

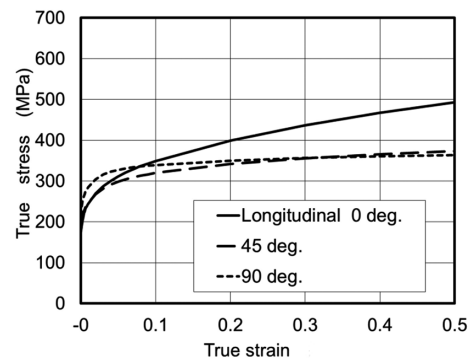


図 13 純チタン材の異方硬化
Anisotropic work-hardening of pure titanium

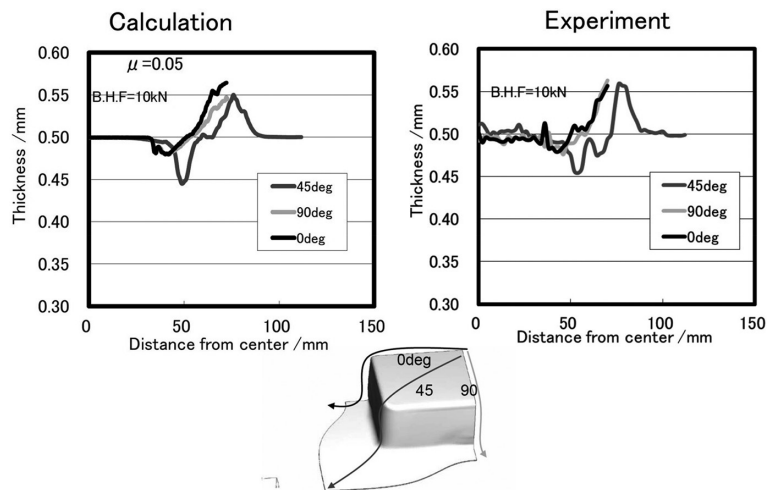


図 15 角筒絞りにおける板厚分布 (H=30mm)
Thickness distribution of square deep drawing (H=30mm)

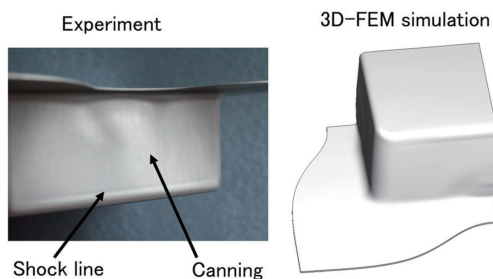


図 14 角筒深絞りの成形形状
Forming shape of square deep drawing

るキャンニングやショックラインなどの形状不整の発生をシミュレートできているのがわかる。このシミュレーションにより、しごきを伴う最適な金型クリアランス等の事前検討を行うことが可能になった。

板厚の分布の比較を図 15 に示すが、ほぼ良い一致をしていることがわかる。高次の降伏曲面や有限要素法の変形様式に適した要素やメッシュ分割の適用など、より一層の解析精度の向上が望まれる。

4.4 今後の展望

日本製鉄では以上の内容を踏まえてチタン材特有の材料の引張方向により応力 - 歪関係が異なる (異方硬化) を考慮した構成則を開発している。入力した各方位の応力 - 歪, r 値から計算後の応力 - 歪, r 値を算出し、概ね良好に異方硬化、塑性異方性を再現できることを確認している。今後は成形・加工のシミュレーション技術を実用化し、ユーザーへのソリューション提案等の展開も図りたい。

5. 結 言

・チタンは圧延方向 (以下, L 方向), 圧延幅方向 (以下, T 方向) および 45° 方向 (以下, D 方向) で異方性が大きく, 0.2%耐力では $L < D < T$ 方向, 引張強さでは $D < L < T$ 方向となった。また, r 値は $L < D < T$ であり, T 方向は 7.9

と顕著に大きな値となった。

- ・CP-Ti の均一伸びは $T < L < D$ 方向であったが, 平均的な n 値は $T < D < L$ 方向となり一致しなかった。CP-Ti の n 値はひずみと共に増加し, D 方向は高ひずみ域になるほど n 値の増分が大きくなるためと考えられる。
- ・L, D, T の平均値を材料毎に比較すると, 全伸びと引張強度は $CP-Ti \approx LC-Steel < SUS316$ となり, r 値は $SUS316 < LC-Steel < CP-Ti$ となった。
- ・種々の矩形ブランクを用いた球頭張出し試験の張出し高さでは, どのブランクにおいても $LC-Steel \leq CP-Ti$ となり, ブランク形状次第では CP-Ti が SUS316 をも上回った。CP-Ti の T 方向では n 値は小さいが, 成形限界ひずみが高いため, 張出し高さは良好であった。
- ・成形限界ひずみは第 1 象限 (引張 - 引張) では $CP-Ti \approx LC-Steel < SUS316$ となり, 第 2 象限 (T 方向引張 - L 方向圧縮) では $SUS316 < LC-Steel < CP-Ti$ となり, 第 4 象限 (L 方向引張 - T 方向圧縮) では $SUS316 < LC-Steel \approx CP-Ti$ となった。
- ・CP-Ti は等 2 軸変形から L 方向の平面ひずみにかけての成形限界ひずみが低く, 該ひずみモードの局所変形で思わぬ破断を生じる可能性がある。
- ・円筒深絞り試験では LDR が SUS316 で 2.2, LC-Steel で 2.3, CP-Ti で 2.6 となり, CP-Ti が最良となった。ただし, CP-Ti では Δr から予測される方向と異なり, D 方向に大きな耳が形成された。
- ・T 方向は最も r 値が高いが, 耐力が高く変形が生じ難いため谷となり, 2 番目に r 値が大きい D 方向にひずみが集中し耳が形成されたと推定される。
- ・Hill の直交異方性の 2 次の降伏関数でチタンの角筒絞り成形シミュレーションを行い, 実験結果と比較した。輪郭形状の比較から, 材料流入については若干の差異が認められたが, 板厚の分布は良く一致した。
- ・現在チタン材特有の材料の引張方向により応力 - 歪関係

が異なる（異方硬化）を考慮した構成則を開発しており、今後、成形・加工のシミュレーション技術を実用化し、ユーザーへのソリューション提案等の展開も図りたい。

参考文献

- 1) 山出善章 ほか：軽金属. 67 (4), 126 (2017)
- 2) 伊敷万太郎 ほか：日本機械学会論文集 (A 編). 75 (752), 95 (2009)
- 3) 大上哲郎 ほか：日本機械学会論文集 (A 編). 79 (801), 79 (2013)
- 4) 白田松男：新日鉄技報. (375), 22 (2001)
- 5) 吉田亨：ふえらむ. 23, 20 (2018)
- 6) 伊丹美昭：CAMP-ISIJ. 20 (6), 1403 (2007)



三好遼太郎 Ryotaro MIYOSHI
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
チタン・ステンレス研究室 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



伊丹美昭 Yoshiaki ITAMI
日鉄テクノロジー(株)
富津事業所 材料ソリューション部
専門主幹 博士(工学)