

コルゲート容器成形技術の開発

兵庫県立大学大学院 工学研究科

教授 原田 泰典

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017005)

キーワード：深絞り加工，コルゲート，成形性

1. 研究の目的と背景

電子機器や制御機器などの産業用筐体では、耐食性や耐熱性などの機能性ととも軽量かつ高強度が求められている¹⁾。自動車や航空機などの搬送機器の場合、省エネのための軽量化が進められている²⁾。例えば、燃料電池用筐体では、軽量化のために強度は維持したまま薄肉化が求められている³⁾。また、深絞り加工によって製造される容器では、機能性材料の利用で高付加価値製品を生み出すことが積極的に行われている。強度向上のため、部分的厚肉化⁴⁾やエンボス加工⁵⁾などが行われている。

一方、建築用として用いられている外壁板や梱包として用いられている段ボール紙では、波形状構造であるコルゲートによって薄板自体の剛性を高めている⁶⁾。また、衝突時のエネルギー吸収用車両床材として、機能性パネルの開発が行われている⁷⁾。金属製薄肉容器においても波形状に加工することで容器自体の強度は改善することが知られている⁸⁾。もし深絞り加工によって容器側壁部にコルゲートの形状を施すことが出来れば、強度の改善が期待できるのではないかと考えた。そこで、予備的な基礎実験ではあるが、純チタンや鉄鋼材料などの金属板を用いて、容器側壁部に対して波形状加工を試みた。具体的には、ダイ肩部を波形状にするため、肩部を鋼球で配列したダイを用いた深絞り加工を試みた⁹⁾。試行錯誤の結果、容器側壁部を凹凸形状に成形できることが得られた。純チタンでは 70 mm から 100 mm の範囲で壁割れや底割れは発生せず、波形状容器の成形が可能であることが分かった。また、極低炭素鋼やステンレス鋼においても良好な成形性を示すことが分かった¹⁰⁾。

本研究では、深絞り加工によって機能性のある付加価値の高い容器の成形を行うため、コルゲート構造を有するクラッド容器成形技術の開発を行うことを目的とする。段ボール紙のようにコルゲート構造を有する容器の成形を試み、容器のひずみ分布や硬さ分布について調べ、また圧縮試験による圧縮強度について評価を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

深絞り加工は油圧式プレス加工機を用いて室温で行った。しわ抑えの負荷は約 10 kN である。潤滑剤は市販の二硫化モリブデン系潤滑剤を使用した。図 1 に、深絞り加工装置の概略を示す。パンチは先端コーナ半径 3 mm で、直径 39~40 mm である。パンチとダイは、標準熱処理を

施した工具鋼 SKD11 を用いた。

段ボール紙断面のような空隙を有する構造を再現するため、容器側壁部が波形状を有するコルゲート容器を通常の円筒容器でサンドイッチするように設置、つまり鋼球を配置したローラダイの上下に通常のダイを設置した。図 2 に、成形に使用した複合ダイス(a)およびローラダイ(b)の概略および外観を示す。中央ダイであるローラダイにおいて、容器側壁部に波形状を有するためにダイ肩部に鋼球を隙間なく配置してある。また、鋼球は深絞り加工中に回転可能となっている。表 1 に、クラッド容器における加工条件を示す。

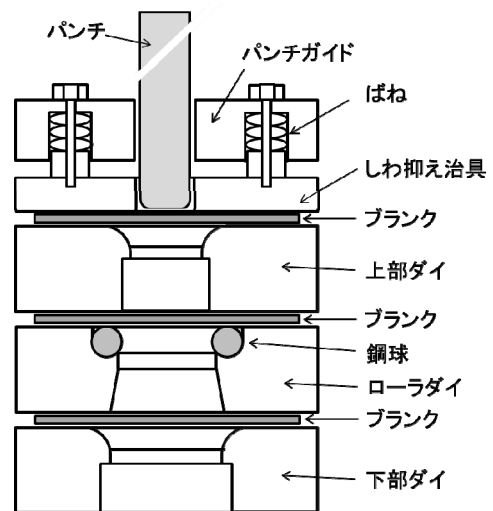


図 1 複合ダイスの概略



(a) 複合ダイス (b) ローラダイ

図 2 成形用複合ダイスの外観

表1 深絞り加工条件

しわ抑え力		10 kN
パンチ	材質	SKD11, 60HRC
	直径	39 - 40 mm
	コーナ半径	3 mm
上部ダイ	材質	SKD11, 60HRC
	穴径	40 - 40.8 mm
	コーナ半径	3 mm
ローラダイ	材質	SKD11, 60HRC
	穴径 (内接)	41 mm
鋼球	材質	SUJ2, 800HV
	直径	10 mm
下部ダイ	材質	SKD11, 60HRC
	穴径	46.4 - 46.6 mm
	コーナ半径	3 mm
潤滑剤		二硫化モリブデン系

2・2 実験材料

試験材料はおもに市販の純チタン JIS1 種 TP270 と JIS2 種 TP340 で、板厚は TP270 では 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm で、TP340 では 0.5 mm である。一部、鉄鋼材料であるステンレス鋼 SUS304 と極低炭素鋼 SPCC を用いた。円板状試験片であるブランクは、直径 80 mm と 85 mm の 2 種類で、ブランクングによって作製した。

2・3 純チタンの工具への焼付き防止

受け入れた純チタン板をそのまま深絞り加工を行うと、金型工具との激しい焼付きが発生しやすい¹¹⁾。そのため、ブランクや工具へのテフロン剤の塗布すること¹²⁾、大気中加熱や電気化学などによる酸化皮膜処理を行うこと^{13, 14)}、などが焼付き防止に有効であることが知られている。本研究では、純チタンブランクに対してテフロン剤の塗布を行った。

2・4 容器の評価

容器における板厚の測定は、ミットヨ製マイクロメータ APB-3D を用いた。薄板の圧延方向を 0° とし、圧延方向に対して 45° 方向と 90° 方向も含めた 3 方向において測定を行った。測定箇所は容器底部の中心を起点とし、各方向の開口部に向かって、コーナ部手前までは 2 mm 間隔で、またコーナ部から側壁部の中央部までは 1 mm 間隔で測定を行い、それ以降は 2 mm 間隔で測定を行った。

容器における硬さの測定は、ミットヨ製 HM-124 を用いた。容器における測定は、円周方向と半径方向の 2 方向で行い、板厚中央付近を 5 点測定し、その平均値を求めた。

容器の強度は圧縮試験によって評価を行った。圧縮試験は精密万能試験機インストロン社製 5982 型を用い、クロスヘッド速度 5 mm/min で行った。得られた荷重-変位曲線から最大圧縮力を求めた。容器は底部から高さ 25 mm とし、開口部をワイヤーカットで切断した。

3. 研究成果

3・1 コルゲートクラッド容器の外観

複合ダイスを用いてコルゲートクラッド容器の成形を行った。図 3 に、成形後の純チタンコルゲートクラッド容器の外観を示す。ブランクはすべて純チタンである。また、構成する容器の初期ブランクの厚さは、内側 0.3 mm, 中央 0.4 mm, 外側 0.4 mm である。コルゲートクラッド容器において底割れや壁割れなどの破壊は発生せず、成形が可能であることが分かった。通常の円筒容器である内側および外側の容器では、開口部で異方性による耳の発生が確認された。また、外側容器では、開口部の一部で材料が座屈している部分を確認された。しわ抑え力が低下したため、円周方向の圧縮応力に対して材料が変形しやすくなったと考えられる。

成形性に及ぼすブランクの材質の影響を調べるため、純チタンから鉄鋼材料であるステンレス鋼 SUS304 や極低炭素鋼 SPCC に変化させて成形を行った。コルゲートクラッド容器における破壊は見られず、良好な成形性を示した。図 4 に、鉄系ブランクから成形を行った SPCC(a) および SUS304(b) の容器の外観を示す。構成する容器の初期ブランクの厚さは、内側 0.3 mm, 中央 0.4 mm, 外側 0.4 mm である。



図3 チタンコルゲートクラッド容器の外観



(a) SPCC (b) SUS304

図4 鉄系コルゲートクラッド容器の外観

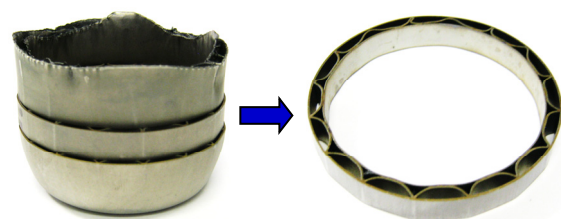


図5 純チタンクラッド容器の側壁部内部の構造

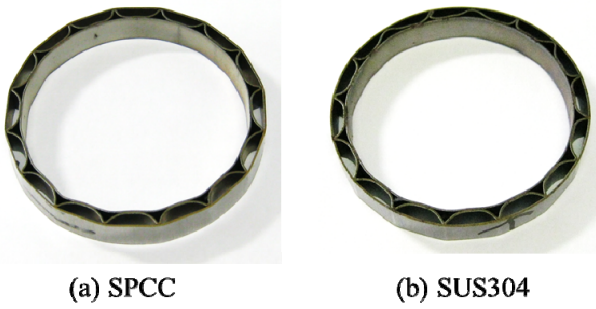


図6 鉄系クラッド容器の側壁部内部の構造

クラッド容器において、側壁部内部の成形状態は不明である。そこで、容器側壁部の内部構造を調べるため、容器中央部において幅6mmを切断して容器断面の観察を行った。図5に、側壁部中央断面の外観を示す。構成する容器の初期ブランクの厚さは、内側0.3mm、中央0.4mm、外側0.4mmである。断面は規則的な波形状を呈しており空隙が見られ、コルゲート構造を呈していることが分かった。

同様に、鉄系コルゲートクラッド容器の内部構造について調べた。図6に容器中央付近の切断断面の外観を示す。規則的な波形状が見られた。

3・2 板厚ひずみ分布

純チタンコルゲートクラッド容器の板厚ひずみ分布を調べるため、容器の中心から開口部に向かってひずみの測定を行った。図7に、構成する各容器における板厚ひずみ分布を示す。初期ブランクの板厚は、内側0.3mm、中央0.4mm、外側0.4mmである。内側容器から外側容器に向かうにつれて、側壁部におけるひずみの増加量が低減していることが分かる。このことから、内側容器では加工が厳しくなっていることが分かる。また、コルゲート形状を示す中央容器において、底部コーナ部付近でひずみの急激なピークが見られた（図中、矢印）。

コルゲートクラッド容器の構成する容器において、板厚ひずみに及ぼすブランクの初期板厚の影響について調べた。図8に、構成する各容器における板厚ひずみ分布を示す。ブランクの初期板厚は、すべて0.5mmである。ブランクの初期板厚を増加した場合、ひずみ分布にあまり変化は見られなかった。すなわち、外側容器のひずみの増加量は内側容器のそれに比べて低減した。

3・3 中央容器における板厚ひずみのピーク

コルゲート形状を示す中央容器において、底部コーナ部付近でひずみの急激な増加が見られた。通常の深絞り加工において、容器底部コーナにおいて板厚の減少することが知られているが¹⁵⁾、急激な板厚の上昇はコルゲート容器の特徴と考えられる。このピークを示す容器の領域は、鋼球が中央のブランクと最初に接触する位置に相当する。図9に、中央容器における鋼球の初期の接触領域を示す。鋼球と接触した領域の材料は深絞り成形中に变形しているため、鋼球との接触領域の材料は塑性流動が生じやすくなると考えられる。

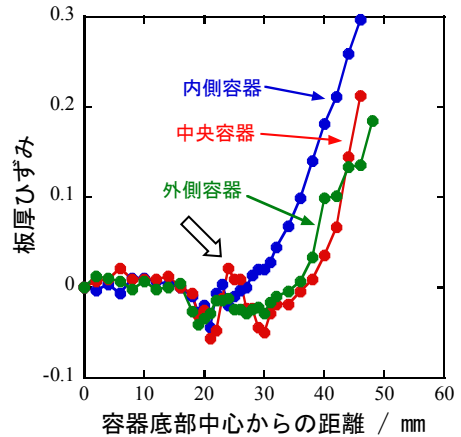


図7 クラッド容器のひずみ分布
初期板厚：内側0.3mm、中央0.4mm、外側0.4mm

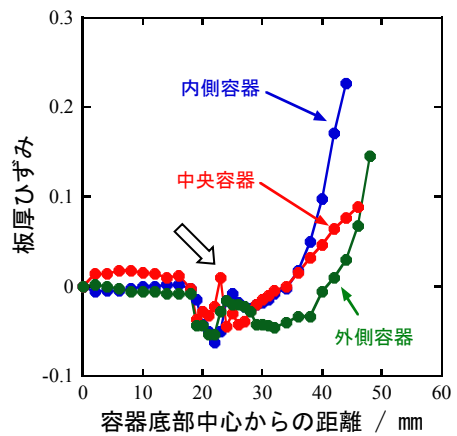


図8 クラッド容器のひずみ分布
初期板厚：内側0.5mm、中央0.5mm、外側0.5mm

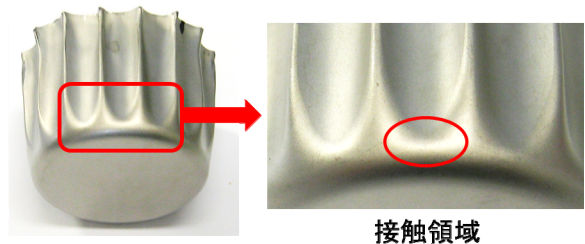
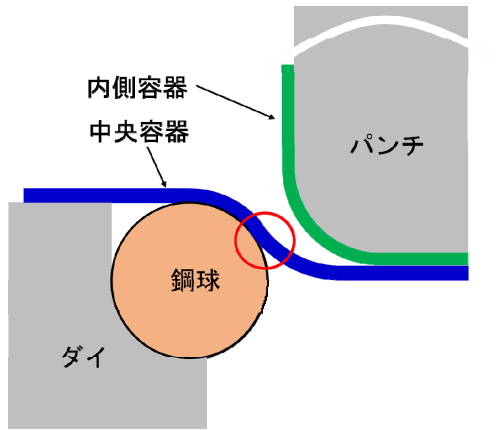
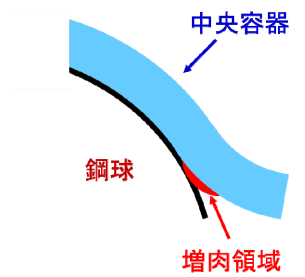


図9 中央容器の鋼球接触領域

図10に、板厚ひずみのピークを生じるメカニズムの概略を示す。図(a)に示すように、中央容器に成形されるブランクは、深絞り成形中の領域において鋼球によって変形を受ける。変形を生じている材料において、接触した鋼球近傍の材料表面は拘束がないため、塑性流動が生じやすい。図(b)に示すように、材料表面への塑性流動によって増肉することになる。このため、板厚ひずみが急激に増加してピークが生じたと考えられる。



(a) 中央容器への鋼球の接触



(b) 塑性流動による増肉領域

図10 板厚ひずみピークのメカニズム

3・4 硬さ分布

深絞り加工によって成形された純チタン容器において、塑性変形に伴う加工硬化が生じているため、容器の硬さについて調べた。図11に、構成する各容器における容器底部中央から開口部までの硬さ分布を示す。ブランクの初期板厚はすべて0.5mmである。また、ブランクの初期硬さは平均140HVであった。各容器において、硬さ分布の違いはあまり見られなかった。容器底部から開口部に至って、硬さの増加が見られ、開口部の硬さは初期硬さの約1.4倍であった。中央容器では底部コーナ付近において、硬さの減少が見られた。この領域は板厚ひずみの急激な増加が見られた領域と一致していることから、加工硬化が十分に進まなかった領域と考えられる。

3・5 深絞り加工の荷重-変位曲線

コルゲートクラッド容器の深絞り加工における荷重推移の特徴について調べた。図12に、純チタン3層のコルゲートクラッド容器の荷重-変位曲線を示す。ブランクの初期板厚はすべて0.5mmである。加工に伴い荷重は増加し、2つのピークが見られた。これらのピークにおいて同程度の最大荷重を示し、約32kNであった。最初のピークは中央容器を、また次のピークは外側容器を成形している際に生じたと考えられる。そこで、外側の容器を除いた内側と中央の容器のみにおける試験を行った。

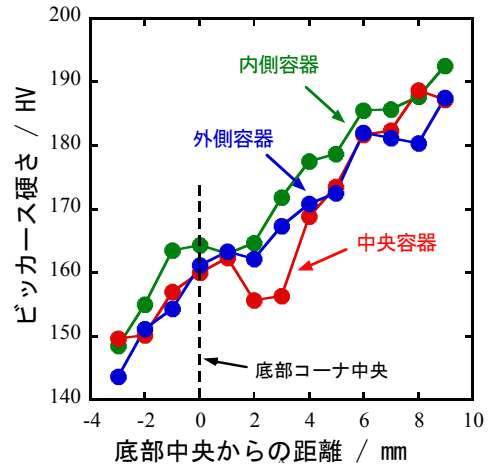


図11 クラッド容器の硬さ分布

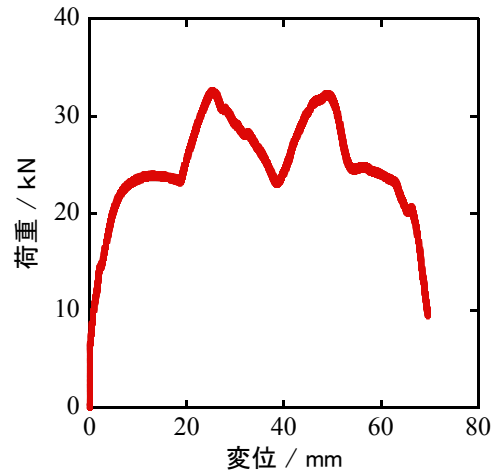


図12 3層クラッド容器の荷重-変位曲線

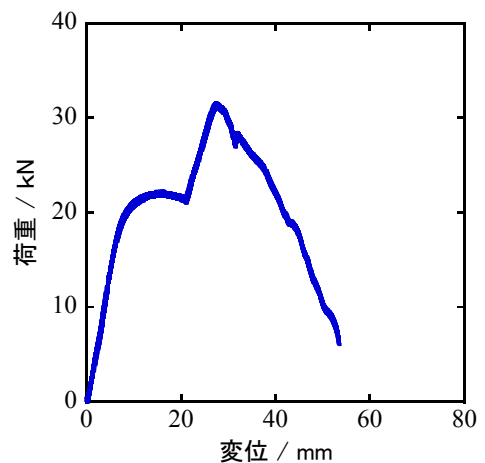


図13 荷重-変位曲線

図13に、内側と中央の2層クラッド容器の成形で得られた荷重-変位曲線を示す。最初に現れたピークは中央容器の成形であることがわかった。

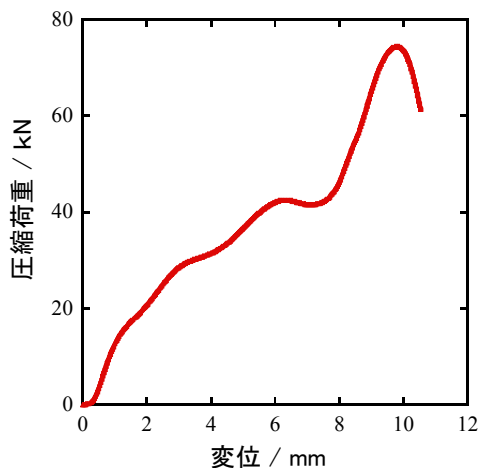


図 1 4 圧縮荷重－変位曲線

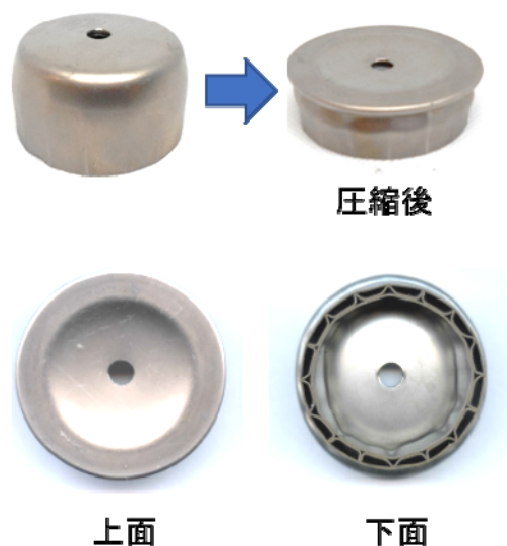


図 1 5 圧縮試験後の容器外観

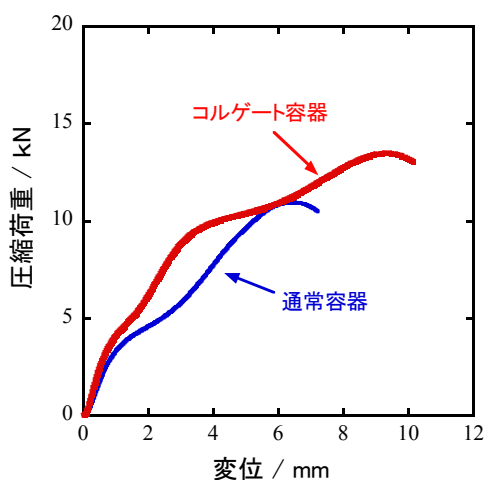


図 1 6 通常容器とコルゲート容器における圧縮荷重－変位曲線

3・6 圧縮による強度評価

チタンコルゲートクラッド容器の強度を評価するため、圧縮試験を行った。ブランクの初期板厚はすべて 0.5 mm である。図 1 4 に、圧縮荷重－変位曲線を示す。容器底部の変形が進んだ後、圧縮荷重が急激に増加した。最大荷重を示したとき、容器側壁部に座屈が生じた。最大荷重は約 76 kN であった。

図 1 5 に、圧縮試験後の容器の外観を示す。ここで、容器底部中央の孔は容器開口部の端面を切断する際に固定用器具に設置するためのものである。容器側壁部において座屈が見られ、座屈直前に最大荷重を示した。また、座屈後の底部付近においてはコルゲート構造が見られ、破壊は生じていないことが分かった。

コルゲートクラッド容器の強度について、単板から深絞り加工した通常容器とコルゲート容器に対して圧縮試験を行い、最大圧縮強度について比較検討を行った。図 1 6 に、単板から深絞り加工した通常容器とコルゲート容器における荷重－変位曲線を示す。通常容器およびコルゲート容器の最大圧縮荷重は、11 kN および 13.5 kN であった。コルゲートクラッド容器の最大圧縮強度は約 76 kN であり、単板から成形された通常容器およびコルゲート容器に比べて約 6.9 倍および約 5.6 倍であることが分かる。容器側壁部の座屈が生じるまでコルゲート構造の状態を維持していることから、コルゲートクラッド容器の圧縮強度は高いことが分かった。

4. おわりに

本研究では、ダイの肩部に鋼球を隙間なく配置したローラダイを用いて、通常のダイとローラダイを組み合わせた複合ダイスによるコルゲートクラッド容器の成形を試みた。得られた知見は次の通りである。

(1) チタンコルゲートクラッド容器において、成形後の容器に底割れや壁割れなどの破壊は発生せず、成形が可能であることが分かった。また、通常の円筒容器である内側および外側の容器では、開口部で異方性による耳の発生が確認された。

(2) 鉄鋼材料を用いたコルゲートクラッド容器において、成形後の容器に破壊は発生せず、成形が可能であることが分かった。

(3) 純チタンおよび鉄鋼材料を用いたコルゲートクラッド容器において、容器側壁部の内部構造の観察から側壁部中央断面は規則的な波形状を呈して空隙が見られ、コルゲート構造を呈していることが分かった。

(4) チタンコルゲートクラッド容器において、内側容器から外側容器に向かうにつれて、側壁部におけるひずみの増加量が低減していることが分かった。また、コルゲート形状を示す中央容器において、底部コーナ部付近でひずみの急激なピークが見られた。

(5) チタンコルゲートクラッド容器における板厚ひずみでは、容器底部コーナにおいて最も減少しており、減少率

は約 7 %であることがわかった。

(6) チタンコルゲートクラッド容器において、コルゲート形状を示す中央容器における底部コーナ部付近でひずみの急激なピークを生じることが分かった。

(7) 構成する各容器の初期板厚 0.5 mm であるチタンコルゲートクラッド容器において、各容器における硬さ分布の違いはあまり見られなかった。容器底部から開口部に至って、硬さの増加が見られ、開口部の硬さは初期硬さの約 1.4 倍であることがわかった。

(8) 構成する各容器の初期板厚 0.5 mm であるチタンコルゲートクラッド容器において、深絞り加工時の最大荷重は約 32 kN であることがわかった。

(9) 構成する各容器の初期板厚 0.5 mm であるチタンコルゲートクラッド容器の最大圧縮荷重は約 76 kN であることがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人天田財団の平成 29 年度一般研究開発助成を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 白土清：素形材，46-10 (2005)，6-12.
- 2) 山根健：MATERIAL STAGE，15-9 (2015) 67-71.
- 3) 大田晋志，朝倉淳，戸出晋吾：パナソニック技報，64-2 (2018)，131-136.
- 4) 林伸和・小林政教：塑性加工春季講演会講演論文集，Vol. 2001 (2001)，37-38.
- 5) 西山貞雄，韓晶：軽金属，56-9 (2006)，489-495.
- 6) 三上英一，茨木孝昌，小林孝男，小高功：日本包装学会誌，13-4 (2004)，243-252.
- 7) 戸倉直，萩原一郎：日本機械学会論文集 A 編，76-765 (2010)，564-572.
- 8) 高田進：包装技術，27-12 (1989)，1506-1516.
- 9) 原田泰典：日本機械学会機械材料・材料加工技術講演会論文集，Vol. 23 (2015)，No. 407.
- 10) 原田泰典，西久保祐貴，藤上剛広，田中一平：日本機械学会機械材料・材料加工技術講演会論文集，Vol. 26 (2018)，No. 408.
- 11) 佐藤丈士，後藤学，前田康晴：日本機械学会論文集 C 編，66-643 (2000)，1002-1007.
- 12) 阿高松男，上野泰司：材料とプロセス，Vol. 17 (2004)，269.
- 13) 原田泰典，大野宏人，西久保祐貴：日本機械学会年次大会講演論文集 (CD-ROM)，Vol. 2018 (2018)，G0400303.
- 14) 村尾卓児：軽金属，55-11 (2005)，566-568.
- 15) Chung, S. Y., Swift, H. W.: Proc. Inst. Mech. Eng., 165 (1951), 199-206.