

平成 29 年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「宇宙産業向けシームレス球形容器の技術開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 国立大学法人埼玉大学

目次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	4
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論	
1 宇宙産業向けシームレス球形容器を製造可能な真空チャック方式の開発研究	6
【1-1】真空チャック治具の設計・開発	
2 アルミニウム合金薄肉円筒から球形容器ボス部を加工する為の肉厚制御技術の開発研究	8
【2-1】シミュレーションノウハウの蓄積	
【2-2】リアルタイム肉厚測定システムの開発	
【2-3】球形形状・ボス部の肉厚を実現する試作開発	
3 宇宙産業向けシームレス球形容器の強度信頼性の確立	10
【3-1】荷重に対する強度を測定する技術の開発	
【3-2】強度要件を満足するスピニング加工肌に仕上げる技術開発	
最終章 全体総括	11

(研究目的及び目標)

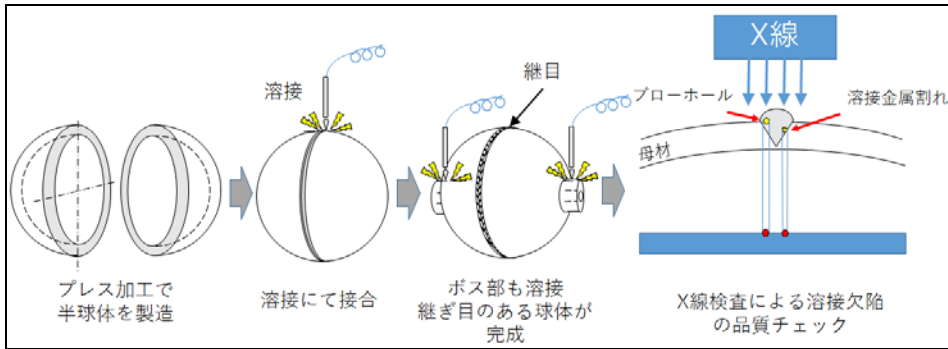
○今回研究開発する製造技術

低コスト化を実現するために、これまでのスピニング加工技術をより高度化させた、真空チャック方式によるスピニング加工技術を、さらに高度化させる。肉厚制御による軽量化やボス部の増肉を可能とし、さらに信頼性を得られるよう強度の検査技術も開発し、宇宙向けのシームレスな球形容器の製造技術を確立させる。

これまでのスピニング加工技術では、元材となるパイプ材は、その外径の2~3%程度の肉厚を持つ必要があったが、本研究開発では、推薬タンクの軽量化を実現するために、外径の0.7%の肉厚のパイプ材を使って、薄肉加工が行えるようスピニング加工を行う。そのため、肉厚を制御できるよう加工前のシミュレーションを可能とするほか、真空チャック治具で加工中の荷重や反力を測定しつつ加工ができるようにし、さらに、肉厚自体を測定しながら加工ができるように、リアルタイム肉厚測定システムを開発し、治具と成形機とシミュレーション技術、測定技術等を融合した技術開発を行う。

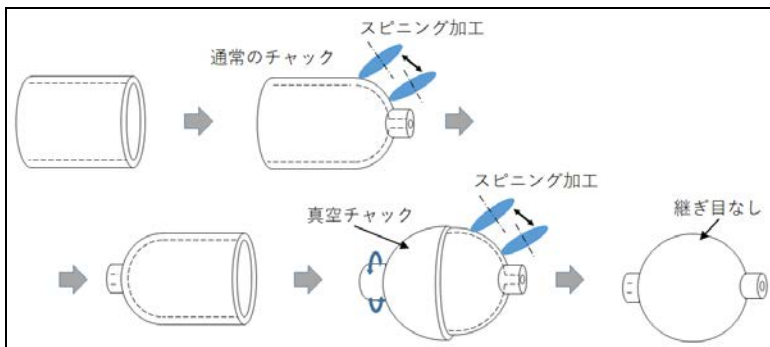
<p>【従来の溶接による製造技術の課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> 溶接や検査に製造日数がかかりコスト高。 部材（鍛造チタン合金）の調達期間も約10か月と長い。 <p>【従来のスピニング加工技術の課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> 球形状のワークを固定（チャック）させることができない。 球形容器の加工ができないほか、肉厚をコントロールする術がなく、材料となるパイプ材の肉厚はその外径の2~3%程度と厚いものしか加工できない。 	<p>【従来技術の課題解決方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> 一体加工技術である真空チャック方式によりスピニング加工技術での球形容器製造を可能とし製造期間を短縮させ低コスト化を図る。 調達期間を要しないアルミ合金で従来製品と同等以上の軽さ、強度を実現させる。 従来製品と同等以上の軽さ、強度を実現するため、シミュレーションやリアルタイム肉厚測定などの肉厚制御技術のほか、信頼性確保のための強度測定技術も開発、薄肉軽量で高信頼性のあるシームレス球形容器を製造可能とする。
--	---

■従来の製造方法



これまでの推薬タンクの製造工程は部材調達に10か月を要するほか製造コストも高くなっている

■今回研究開発する新たな製造方法



アルミ合金で十分な軽さと強度をもった高信頼性の球形容器が低コストで製造可能

○研究開発の課題及び目標

川下企業が求める軽さや強度にも耐えられるようにするため、厚さ 3mm のパイプ材を使用し、真空チャック方式でスピニング加工を行いΦ418mm の球形容器とするが、左側の小さいボス部の内径はΦ14mm で肉厚は 6mm と元材の 2 倍の肉厚にし、他方の右側の大きいボス部の内径はΦ100mm、肉厚は 5mm と元材の 1.67 倍の肉厚にする必要がある。この大きさ、仕様のシームレス球形容器が製造可能となれば、今回開発する技術を用いて、外径Φ600mm までの球形容器の製造が可能と考える。

サブテーマ①：「宇宙産業向けシームレス球形容器を製造可能な真空チャック方式の開発研究」

【1-1】真空チャック治具の設計・開発

試作容器外径 418mm、肉厚 3mm、重さ 4kg、(肉厚/外径) 比 0.7% のスピニング加工を可能とする真空チャックを開発する。

サブテーマ②：「アルミニウム合金薄肉円筒から球形容器ボス部を加工する為の肉厚制御技術の開発研究」

【2-1】シミュレーションノウハウの蓄積

座屈を生じるスピニング加工条件の予測値と実験値の誤差が 5% 以内となるシミュレーションモデルを構築する。

【2-2】リアルタイム肉厚測定システムの開発

スピニング加工中の肉厚測定精度が肉厚の 5% 以内となるレーザー超音波送受信法を用いた測定システムを確立する。

【2-3】球形形状・ボス部の肉厚を実現する試作開発

(肉厚/外径) 比 0.7% の薄肉パイプを使用し、7 種類の加工データをリアルタイムに取得して、外径真円度が±1%以内、ボス部外径が材料肉厚の 1.67 倍～2 倍の肉厚を確保する製造条件を得る。

サブテーマ③：「宇宙産業向けシームレス球形容器の強度信頼性の確立」

【3-1】荷重に対する強度を測定する技術の開発

開発対象とする宇宙産業向け部品形状から、スピニング加工肌を含む部材の単調および繰り返し荷重に対する強度を測定可能な、試験片形状、負荷治具、荷重変位測定法を確立する。

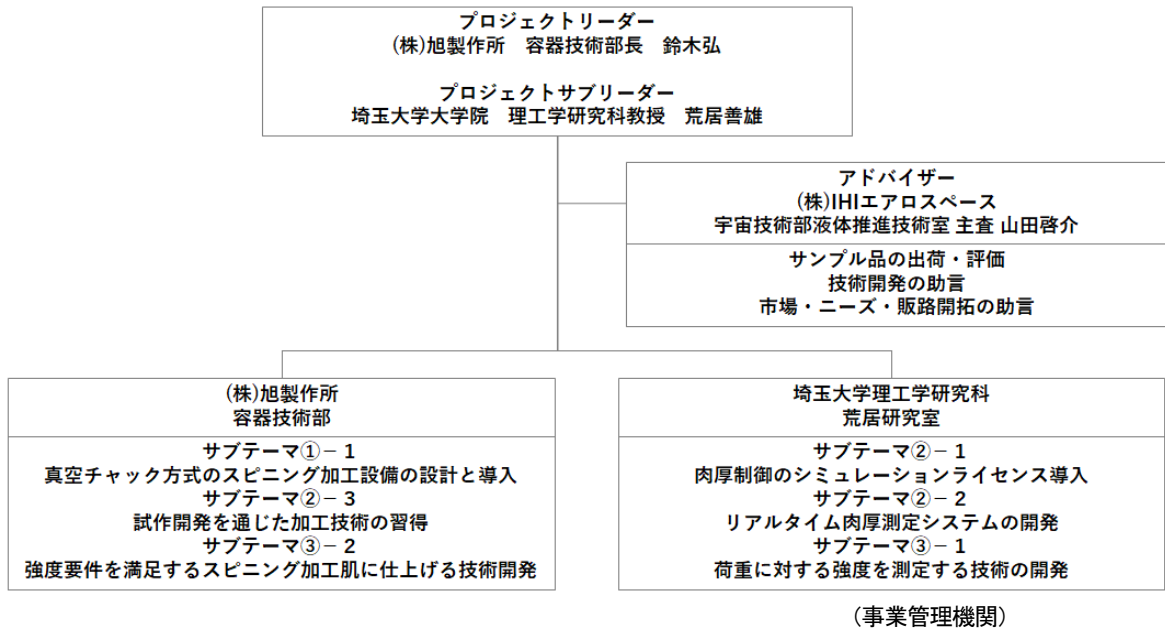
また、同一の研削加工表面を持つ丸棒試験片と比較して、球形容器から切り出した試験片形状の静的強度および繰り返し強度が誤差 3% 以内で測定可能な技術を確立する。

【3-2】強度要件を満足するスピニング加工肌に仕上げる技術開発（旭製作所容器技術部）

開発対象とする宇宙産業向け部品に要求されている強度要件を満足するスピニング加工肌を得る。

また、研削仕上げ表面を有する同一材料の強度と比較して、100%以上の強度を有するスピニング加工肌を得る。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）



(研究者氏名)

氏名	所属・役職	実施項目
鈴木 弘 (PL)	(株)旭製作所 容器技術部/ FRP 容器製造部・部長	テーマ全体
荒居 善雄 (SL)	埼玉大学理工学研究科 教授	【2-1】 【2-2】 【3-1】
飯島 孝文	(株)旭製作所 容器技術部・課長	【1-1】 【2-3】 【3-2】
柴田 哲	(株)旭製作所 容器技術部・主任	
新井 義明	(株)旭製作所 容器技術部・主任	
神口 眞	(株)旭製作所 容器技術部	
黒澤 彬元	(株)旭製作所 容器技術部	
光山 仁	(株)旭製作所 容器技術部	
大淵 智之	(株)旭製作所 FRP 容器製造部・課長	
佐々木 教行	(株)旭製作所 FRP 容器製造部・主任	

(アドバイザー)

氏名	所属・役職	具体的な協力内容
山田 啓介 氏	(株)IHIエアロスペース 宇宙技術部液体推進技術室 主査	試作品の仕様提示および試作品の評価、市場ニーズの助言等

1-3 成果概要

サブテーマ① 宇宙産業向けシームレス球形容器を製造可能な真空チャック方式の開発研究

独自に考案した真空チャック機構や肉厚制御技術を盛り込んだ特殊なスピニングマシンの設計、開発を行った。導入したスピニングマシンにより、外注加工にて取得したパイプ形状の材料を用いて球形容器の試作が可能になった。

加えて、スピニングマシンを改造し、外注加工にて取得するパイプ材料と同様の形状を A6061 板材料から作成することができ、肉厚 3.0mm、肉厚/外径比 0.7%、材料購入費用 90%削減、購入材料納期 88%短縮を達成することができた。

サブテーマ② アルミニウム合金薄肉円筒から球形容器ボス部を加工する為の肉厚制御技術の開発研究

基礎的なモデルによる解析実施を通じてノウハウの蓄積を行うとともに、軸対称モデル、三次元モデル、完全焼きなまし材、熱処理材、室温、高温におけるスピニング加工シミュレーションを行い、実験結果の再現性を確認した。残された課題として、スピニング加工中における肉厚の変化条件、座屈条件を明らかにし、実験結果の再現性を誤差 10%（事業終了時点）から 5%以内にする必要がある。

レーザー超音波信号測定システムにより、サンプル材料の超音波信号を非接触で測定する基礎実験等を行い、リアルタイムに肉厚測定を行うための複合システムを構築した。

レーザー超音波厚さ測定システムにより、非接触板厚測定試験を行い、接触式測定結果と良い一致を確認するとともに、レーザー超音波厚さ測定法の精度に及ぼす表面粗さの影響を明らかにした。残された課題として、回転する材料の速度、加工中の材料の温度、スピニング加工肌がレーザー超音波厚さ測定精度に及ぼす影響を明らかにするとともに、スピニング加工条件を変えた加工中の肉厚の変化を加工中に測定し、肉厚の変化と材料の座屈現象の支配因子を明らかにすることにより、誤差 10%（事業終了時点）から 5%以内にする事が求められる。

CAMソフトを導入し加工前にローラー軌跡のシミュレーション・確認を実施し、実際のスピニング加工を通して良好条件を確定した。残された課題として、薄板から円筒材料を作る際に、①加熱温度の調整による変形抵抗を低くする。②中間なましを行って材料を軟化する。③NCプログラムの修正を行い円筒度を改善する。の3つの方法でさらに円筒度を改善する必要がある。

サブテーマ③ 宇宙産業向けシームレス球形容器の強度信頼性の確立

ボス部形状を考慮した球形容器のモデルを構築し、破裂シミュレーションを実施した。今後、さらにシミュレーションの精度を高めるため、レーザー超音波表面性状測定システムを導入し、試作容器の破裂試験を実施し、容器の肉厚、形状の不均在破裂圧力に及ぼす影響を明らかにすることにより、破裂起点と破壊の進展経路を再現できるシミュレーションモデルを構築し、安定して強度要件を満足するスピニング加工容器を作成する技術（同一の研削加工表面を持つ丸棒試験片と比較して、球形容器から切り出した試験片形状の静的強度および繰り返し強度が誤差 3%以内で測定可能な技術）を開発する必要がある。

宇宙産業向け部品に要求されている強度要件を満足していることを確認するため、球形容器を試作した。試作した球形容器を破裂試験などに供し概ね目標を満足していることを確認した。

本研究開発をふまえ、終了年度翌年の 4 月以降の納期にて、国内航空宇宙関連メーカーより、外径 540mm 継目なし球形容器の製造・販売を要望されている。本研究開発は、補助期間終了直後から本格的な事業化段階に入る。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社旭製作所 開発技術担当 鈴木 弘

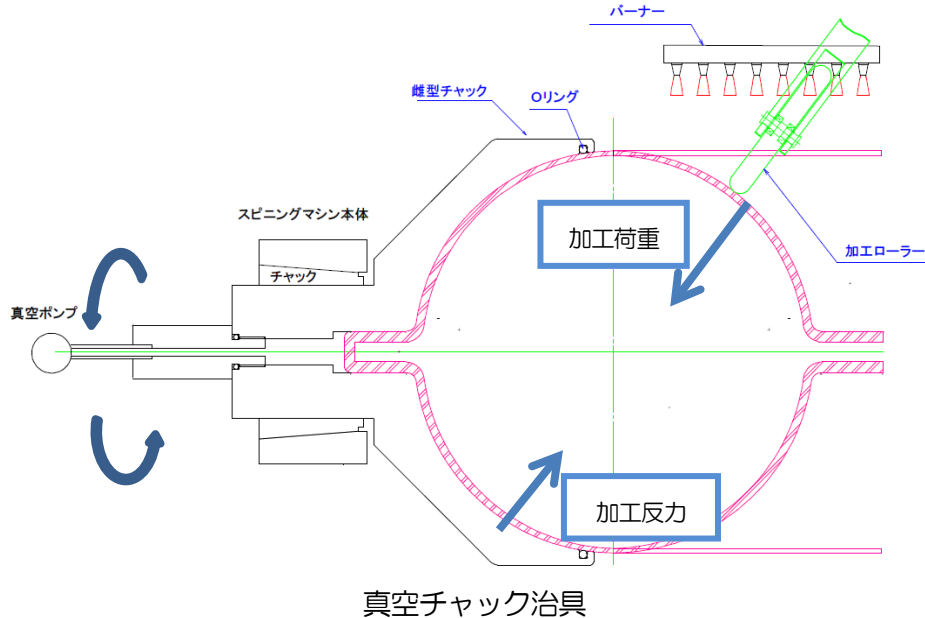
電話：048-758-1413 FAX：048-758-8077 E-mail：suzukih@asahi-ss.ac.jp

第2章 本論

1 宇宙産業向けシームレス球形容器を製造可能な真空チャック方式の開発研究

【1-1】真空チャック治具の設計・開発

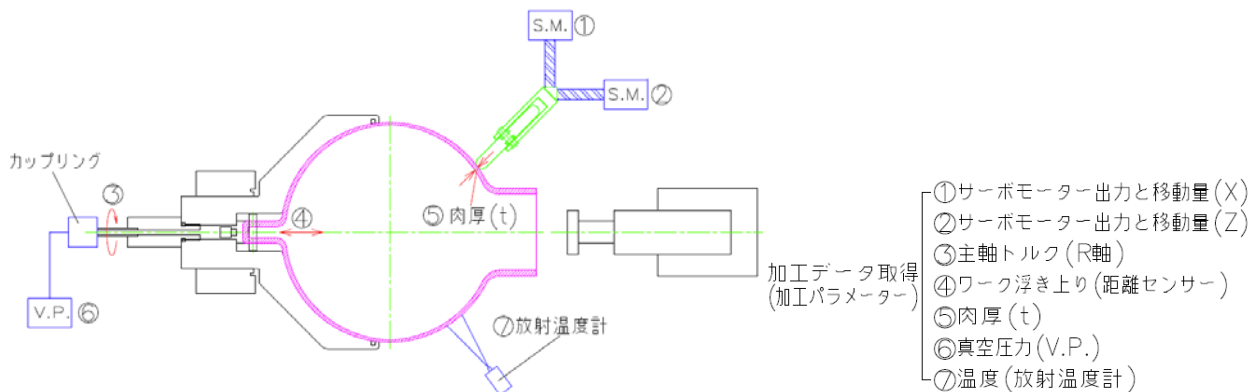
真空チャックによるスピニング加工は、下図のような、高速回転しながら真空を保つ特殊な真空チャック治具を取り付け可能なNC制御のスピニング加工機を導入した。



真空チャック治具

この真空チャック治具がφ418mmの球形容器を加工できるよう、ローラーの加工荷重とその加工反力などを取得可能とし、真空チャックの吸引力や球形容器の重量、チャック部の表面積、回転スピードなど、様々なパラメーターを考慮し設計開発した。具体的には、真空チャックと加工荷重については、吸引力を概略計算し、スピニング加工でローラーをチャック側からボス部方向に移行したときにワークにかかる前方向荷重は、ローラーの斬り込み量（半径方向変形量）とローラー直径によりローラーが受けているワークの変形部面積に材料変形抵抗を掛け合わせる事で概算値を計算した。リアルに取得したデータ項目は、以下のとおり。

- ① NC サーボモーターからX方向の移動量、速度、負荷を取得する。
- ② NC サーボモーターからZ方向の移動量、速度、負荷を取得する。
- ③ 主軸サーボモーターからトルクを取得する。
- ④ 真空チャックとワークの距離を測定する。
- ⑤ ローラー部付近のワーク肉厚を測定する。
- ⑥ 真空チャックの真空度を測定する。
- ⑦ ワークの加工部付近の温度を測定する。



加工データ取得
(加工パラメーター)

- ①サーボモーター出力と移動量(X)
- ②サーボモーター出力と移動量(Z)
- ③主軸トルク(R軸)
- ④ワーク浮き上り(距離センサー)
- ⑤肉厚(t)
- ⑥真空圧力(V.P.)
- ⑦温度(放射温度計)

導入したスピニング加工機は、薄肉加工のためにローラーを複数用意し、1回転当たりの変形量を少なくして座屈に対する適応性を高めている。その結果、外注加工にて取得したパイプ形状の材料を用いて球形容器を試作することが可能になった。

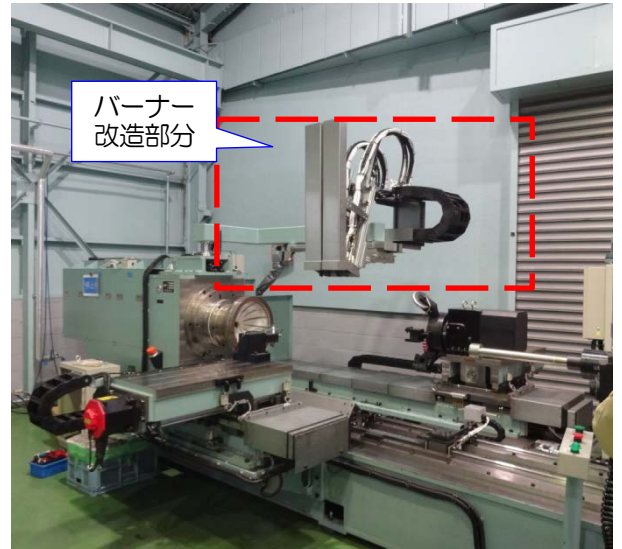
また、試作と併せて真空チャックのための真空圧力及び加工荷重を追跡するためにNCサーボモーターを設置すると共に、真空チャック把握力を距離センサーの測定距離法により測定した。

しかし、材料に使用するパイプ寸法は、メーカーが保有する外径の金型に制約され任意外径のパイプが入手できないこと、また、必要肉厚が3mmのところ14mmの厚さになり、これを薄肉にするために、材料の79%が切り屑として捨てなければならない等の問題があり、納期的にも価格的にも、材料の歩留まり的にも、更なる改善策が必要である事が分かった。

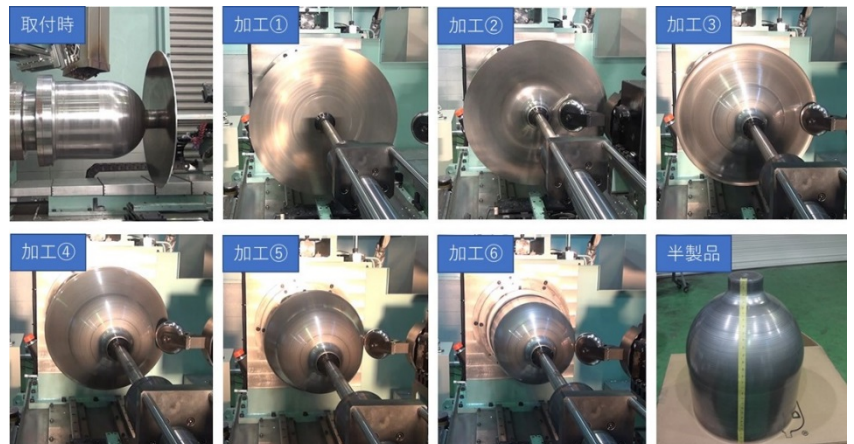
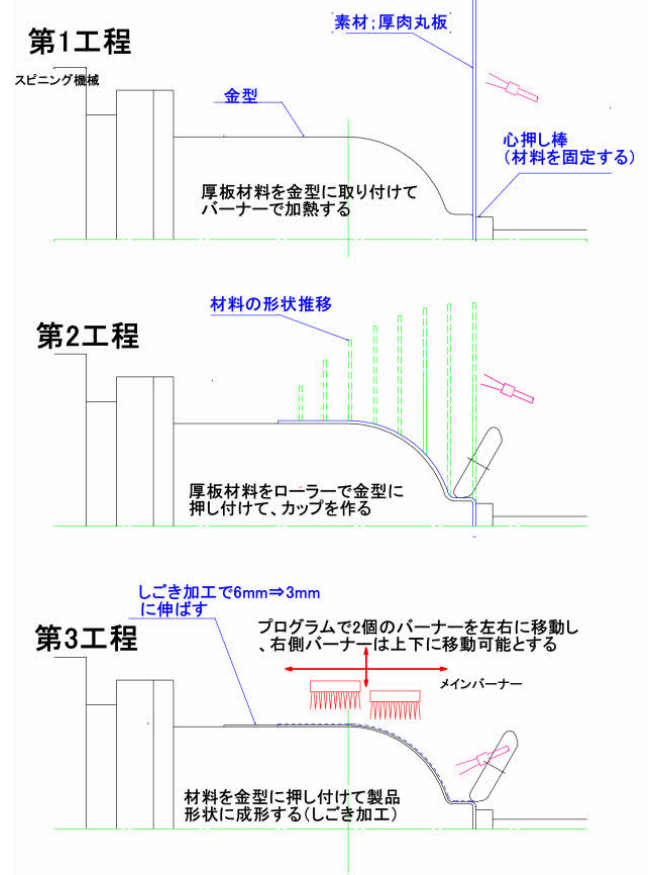
解決策を検討し、板材料から絞り加工としごき加工を合わせて円筒状のカップを作る方法が最も適していると考えた。スピニングマシンの固定バーナーを軸方向と上下方向の制御ができるよう可動型に変更し、専用金型を作ることにより、A6061 板材料から薄肉パイプを作ることができるように改造を加えた（右図参照）。

改造したスピニングマシンと薄肉パイプ加工用の金型について、真空チャックの把握力を確認するために、加工中の金型とワークの距離を測定したところ、加工が進むとワークの心振れが発生し加工不能となった。本課題に対しては真空ポンプによる把握力が不足する時の担保として、あらかじめ準備していた心押しシグを使うことにより、実際に板材料から薄肉パイプが加工できることを確認した。

結果、外注加工にて取得するパイプ材料と同様の形状を板材料から製作することができ、肉厚 3.0mm、肉厚/外径比 0.7%、材料購入費用 90%削減、購入材料納期 88%短縮を達成することができた。

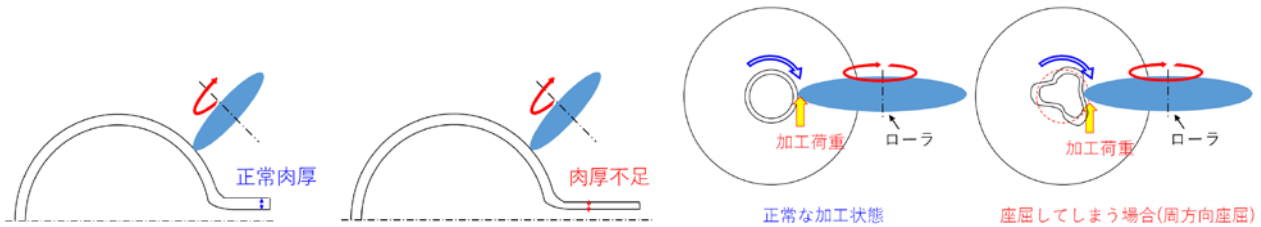


改造後スピニングマシン全体像



2 アルミニウム合金薄肉円筒から球形容器ボス部を加工する為の肉厚制御技術の開発研究

球形容器の仕様として、部位毎に肉厚が異なり、全体を球形形状に加工しながら、ボス部の肉厚不足や座屈などの問題が起きないようにする必要がある。真空チャックで固定された条件下で、所定の肉厚を各部位で制御する技術を開発することが求められる。

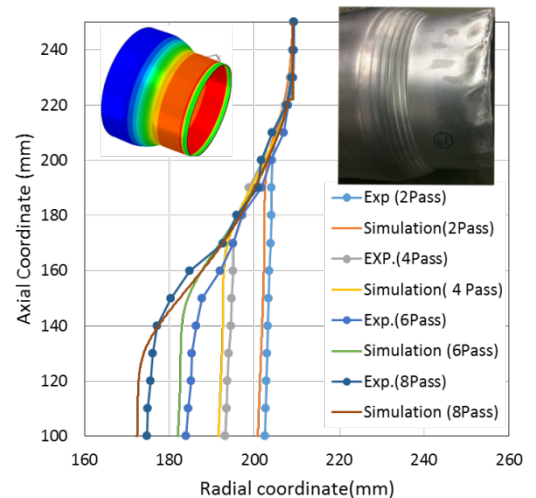


【2-1】シミュレーションノウハウの蓄積

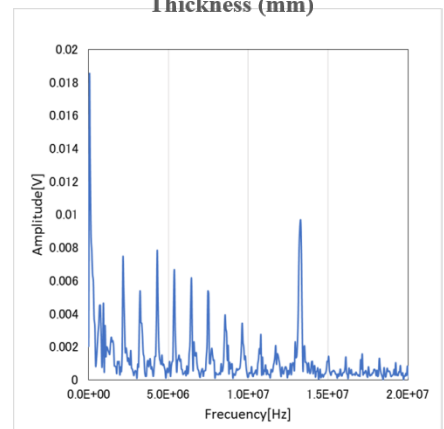
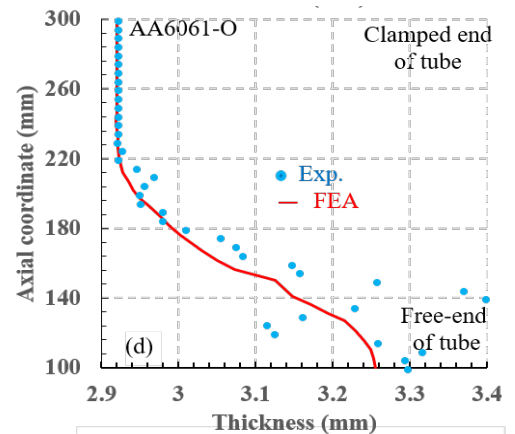
加工前に、材質や外径、肉厚などから最適な加工条件を見出すために、シミュレーションソフト及び解析用ワークステーションを導入し、真空チャック方式のスピニング加工の最適な加工条件を試算できる技術ノウハウを蓄積させ、スピニング加工の最適な加工条件を探索するシミュレーション手法の開発を実施した。

スピニング加工を模したシミュレーションを行うことを目標として、基礎的なモデルによる解析実施を通じてノウハウの蓄積を行うとともに、軸対称モデル、三次元モデル、完全焼きなまし材、熱処理材、室温、高温におけるスピニング加工シミュレーションを行い、実験結果の再現性を確認した。(予測値と実験値の誤差 10%)

残された課題として、スピニング加工中における肉厚の変化条件、座屈条件を明らかにし、実験結果の再現性を誤差5%以内にする必要がある。



加工形状の計算結果と試作結果



レーザー超音波厚さ測定結果 (板厚3.00mm)

【2-2】リアルタイム肉厚測定システムの開発

加工中に肉厚を仕様どおりとしながら加工できるよう、レーザー超音波送受信法により肉厚をリアルタイムに測定可能なシステム開発を行った。

レーザー超音波信号測定システムにより、サンプル材料の超音波信号を非接触で測定する基礎実験等を行い、リアルタイムに肉厚測定を行うための複合システムを構築した。

レーザー超音波厚さ測定システムにより、非接触板厚測定試験を行い、接触式測定結果と良い一致を確認した。レーザー超音波厚さ測定法の精度に及ぼす表面粗さの影響を明らかにした。(予測値と実験値の誤差 10%)

残された課題として、回転する材料の速度、加工中の材料の温度、

スピニング加工肌がレーザー超音波厚さ測定精度に及ぼす影響を明らかにするとともに、スピニング加工条件を変えた加工中の肉厚の変化を加工中に測定し、肉厚の変化と材料の座屈現象の支配因子を明らかにし、誤差 5%以内にする事が求められる。

【2-3】球形形状・ボス部の肉厚を実現する試作開発

上記のシミュレーションとリアルタイム測定の2つの技術を使用し、実際の試作開発を行いながら、真空チャック方式のスピニング加工技術のノウハウを習得した。

元材は外径 418mm、薄さ 3mm を使用するが、ボス部は外径 ϕ 26mm、内径 ϕ 14mm にまで細くなるほか、さらに、真空チャック方式によって行うため、その吸引力は、通常の油圧シリンダーを使ってパイプ円筒部をチャックするような大きな力を出せない。そのため、【1-1】の加工荷重に関するデータを取得しながら、真空チャックが持っている吸引力の範囲で、①座屈しないで、②要求されるボス部肉厚を確保し、③球形形状も実現できる、最適条件を見つけていく。また、熱間加工の場合、材料の温度により変形抵抗が決まるため薄肉円筒の加工には温度管理が重要な因子となる。最適な加熱処理方法についても検討を行った。

1) 試作パイプの準備

押し出し加工により厚肉パイプを作り、内外面を切削加工して薄肉パイプを準備。

2) 材料特性の把握

A6061 材料の温度と機械的性質のデータを取得し、NC プログラムにおける加工変形量の設定データに反映させる。

3) CAM ソフトの導入

スピニング成形 NC 加工プログラム作成用として CAM ソフトを導入。コンピュータ上で材料形状と製品形状を確認しながら、効率的に且つ正確に NC プログラムを作る。

4) スピニング加工条件の確定

2) の高温材料特性を参考に加工温度を設定し、NC プログラムの各パスにおける前送り量、後送り量、加工軌跡など設定して試作を繰り返し、最適条件を確定する。

また、NC プログラムと真空チャック把握力の関係を各種データ(真空圧力、サーボモーター出力、距離センサーデータなど)から検証する。

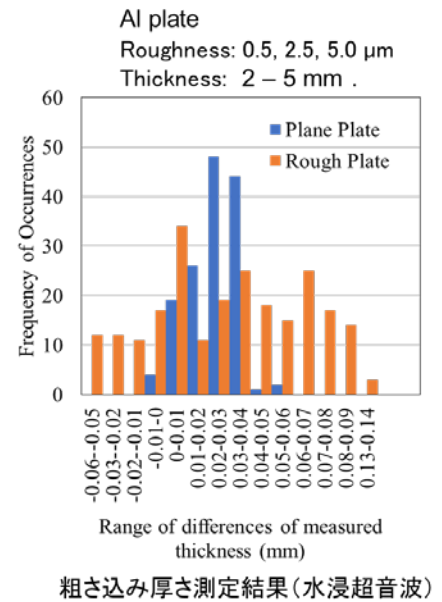
5) 板材料から薄肉パイプを作る

スピニングマシン改造後は、A6061 材料を用いて薄肉パイプを作る製造条件を確定し、試作用薄肉パイプを試作する。

加工範囲を設定温度分布になるように加熱する熱間スピニング加工方法の検討を行い、加熱方法や温度管理方法の改良案を作成した。CAMソフトや実際のスピニング加工を通して概ね良好条件を確定し、改造したスピニングマシンを使用して板材料から薄肉パイプを試作した。

試作した球形容器は、外径真円度 $\pm 2\%$ 以下(目標 $\pm 1\%$ 以内)、ボス部外径 2.5 倍(目標 1.67 倍~2 倍)まで精度を高めた。

残された課題として、薄板から円筒材料を作る際、以下の方法でさらに円筒度を改善する必要がある。



- ①加熱温度の調整による変形抵抗を低くする。
- ②中間なましを行って材料を軟化する。
- ③NC プログラムの修正を行い円筒度を改善する。

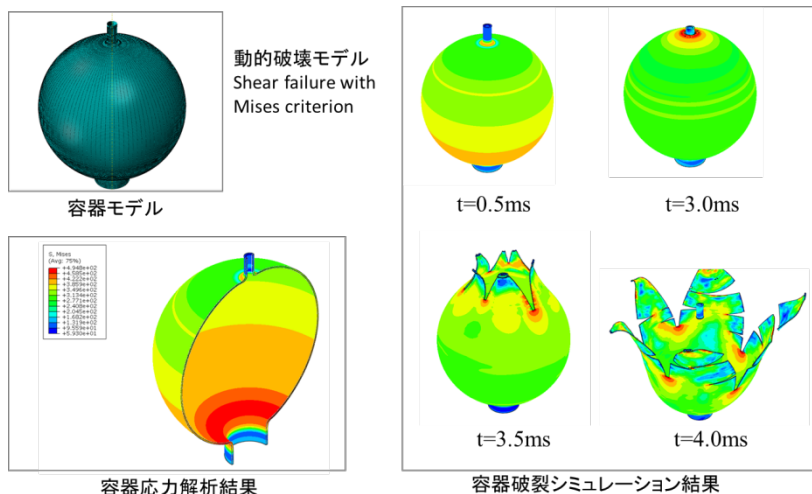
3 宇宙産業向けシームレス球形容器の強度信頼性の確立

【3-1】荷重に対する強度を測定する技術の開発

スピニング加工した球形容器から切り出し可能な試験片形状、試験片掴み治具、試験片に生じる応力・ひずみの実験解析法およびシミュレーション方法を確立することを目指した。

ボス部形状を考慮した球形容器のモデルを構築し、破裂シミュレーションを実施した。

今後、さらにシミュレーションの精度を高めるため、レーザー超音波表面性状測定システムを導入し、試作容器の破裂試験を実施し、容器の肉厚、形状の不均在が破裂圧力に及ぼす影響を明らかにすることにより、破裂起点と破壊の進展経路を再現できるシミュレーションモデルを構築し、安定して強度要件を満足するスピニング加工容器を作成する技術（同一の研削加工表面を持つ丸棒試験片と比較して、球形容器から切り出した試験片形状の静的強度および繰り返し強度が誤差3%以内で測定可能な技術）を開発する必要がある。



【3-2】強度要件を満足するスピニング加工肌仕上げ技術開発

開発対象とする宇宙産業向け部品に要求されている強度要件を満足するスピニング加工肌仕上げ技術開発。様々なスピニング加工条件で製作した球形容器から切り出した試験片を用い、単調荷重試験および繰り返し荷重試験を実施し、引張強さ、破断伸び、低サイクル疲労強度を測定し、加工条件と強度の関係を定量的に明らかにすることにより、要求されている強度要件を満足するスピニング加工条件を確立することを目指した。

スピニング加工で、計画通りの形状、寸法の製品を作り、更に熱処理及び両端ボスネジ加工を行って容器を完成させて強度試験を行った。

- 1) 引張試験 製品から引張試験片を切り出して、引張強さと伸びを測定。
- 2) 常温圧力サイクル試験 大気圧力～使用圧力間の圧力を交互に加えて疲労特性を確認。
- 3) 破裂試験 容器が破裂するまで容器内部に水圧を付加して容器の強度を確認。

宇宙産業向け部品に要求されている強度要件を満足していることを確認するため、球形容器を試作した。試作した球形容器 2 個のうち加圧履歴の無いものを破裂試験に供し、もう一方を常温圧力サイクル試験実施後の破裂試験に供した。また球形容器と一緒に熱処理した薄肉パイプ材料から試験片を採取し引張試験を実施した。

最終章 全体総括

○研究開発成果

継目なし球形容器を製作するために考案した球形チャックが有効に機能する事が分かった。また、当該チャックを用いて製作した薄肉球形容器は形状と肉厚分布は想定内の結果となり、圧力サイクル試験、破裂試験等の強度試験を満足する事が出来た。

今回開発した製造技術を利用して、従来溶接構造で製作していた「H3」ロケットに搭載する外径540mm球形容器を継目なしで開発すべく協議を重ねて来たが、当社が提案したA6061-T6製継目なし球形容器の開発・製造が決まった。

○研究開発後の課題・事業化展開

外径418mmの技術開発では、計画通りの形状と機械的強度を確保する事が出来たが、商品としての外観形状および完成度の面では改善の余地がある。

開発を受注した外径540mm継目なし球形容器は高圧用途のため、肉厚も開発品の3倍程度と厚くなっているため、開発品のスピニング加工プログラムをベースに新たな製造技術を得るために試行錯誤しなければならない。また、高圧ガス容器としての機械的強度の他に、商品としての完成度を高めて信頼性の高い高圧ガス容器を開発し、当該開発品をJAXA始め業界にPRして行く。

○事業化展開

本研究開発をふまえて外径540mm継目なし球形容器は、ロケットに搭載するJAXA設計規格に合わせるために、従来の民生用高圧ガス容器とは精度と信頼性に格段の違いがある。

今回の開発を通じてロケット搭載用製品に要求される精度追求もさることながら、品質管理及び品質保証体制を構築して今後の事業化展開に結びつけていきたい。

なお、日本経済新聞 2017年10月7日付け朝刊によれば、次期主力ロケット「H3」の年間打ち上げ回数を現行「H2A」の6~7回から、10回以上に引き上げる計画をしているとの事であるので開発・製造に全力を注いで行く所存である。

○知的財産権

継目なし球形容器の製造方法について国内外を調べたところ、アイデア程度のものはあったが実現可能な方法は見つからなかった。

新規に考案した継目なし球形容器とその製造方法を平成28年1月27日付け特願2016-13583として特許出願中であり、取得後は国内では独占的に製造・販売する事が可能である。

本研究開発により従来コストのほぼ1/2で製造できる継目なし球形容器が注目され、日本の宇宙産業の拡大に少しでも貢献できれば幸いである。

以上