

Ti-6Al-4V によるハイブリッドロケット酸化剤タンクの開発

五十嵐裕貴^{*1}, 高野敦^{*1}, 喜多村竜太^{*1}, 正井卓馬^{*1}, 植村寧夫^{*1},
政木清孝^{*2}, 中山昇^{*3},
堤健児^{*4}, 下川養雄^{*4}, 長谷川真人^{*4}, 蓮沼将太^{*5}

^{*1} 神奈川大学

^{*2} 沖縄工業高等専門学校

^{*3} 信州大学

^{*4} ツツミ産業株式会社

^{*5} 青山学院大学

Development of hybrid rocket oxidizer tank with Ti-6Al-4V

Hiroki Igarashi^{*1}, Atsushi Takano^{*1}, Ryuta Kitamura^{*1}, Takuma Masai^{*1}, Shizuo Uemura^{*1}, Kiyotaka Masaki^{*2},
Noboru Nakayama^{*3}, Kenji Tsutsumi^{*4}, Yoshio Shimokawa^{*4}, Makoto Hasegawa^{*4}, Shota Hasunuma^{*5}

^{*1} Kanagawa University

^{*2} National Institute of Technology, Okinawa College

^{*3} Shinshu University

^{*4} TSUTSUMI INDUSTRIES INC.

^{*5} Aoyama Gakuin University

ABSTRACT

Oxidizer (nitrous oxide) tank for hybrid rocket was developed. The main material of the oxidizer tank had developed previously had been aluminum alloy, but improvement of weight to strength ratio had been limited. Hence Ti-6Al-4V, which has better specific strength, was focused. However, there is no comprehensive guideline that can be used for tank design in the open literature. Therefore, in this research, the mechanical performance of Ti-6Al-4V and its welded part was investigated, and engineering-model-tank was developed and tested.

Keywords: Hybrid rocket engine, oxidizer tank, Ti-6Al-4V, N2O

概要

本研究室ではハイブリッドロケット用の酸化剤(亜酸化窒素)用のタンクの開発を行っている。以前に開発した酸化剤タンクの主材料はアルミニウム合金であったが、強度向上に限界があった。そこで今回はより比強度に優れるTi-6Al-4Vに着目した。しかし、公知の文献ではタンク設計に用いることができるような網羅的な指針は見当たらない。そこで本研究ではTi-6Al-4Vのおよびその溶接部の機械的性能などの調査研究及び実機タンクの開発・試験を行った。

1. 緒言

ハイブリッドロケットの亜酸化窒素用タンクの開発に取り組んだ。従来著者らが開発した酸化剤タンクの主材料はアルミニウム合金であったが、耐食性、強度が優れているチタン合金Ti-6Al-4Vに着目した^[1]。しかし、Ti-6Al-4V溶接部の疲労き裂進展や腐食の特性に関する論文^[2]や文献^[3-5]がいくつか存在するが、設計に用いることができる網羅的な指針は見当たらない。そこで本研究ではTi-6Al-4Vのおよびその溶接部の機械的性能などの調査研究及び実機タンクの開発・試験を行った。

2.実機タンクの開発

2.1 はじめに

実機タンク開発に至る前に溶接部の引張試験、疲労特性改善のためのショットピーニング処理及びその残留応力特性などを実施した。静的な引張強度については要求を満足する溶接条件を見出したが、実機タンクの開発においては、耐圧試験に至るまでトラブルが多発し、主に実機のサイズおよび1.2mmと薄肉であることに起因する溶接時熱変形などに伴う溶接部の強度・気密確保が優先的な課題となった。具体的に溶接方法の選択・条件出し・溶接時の熱変形対策が挙げられ、その中で特に気密溶接のプロセス確立については詳細な検討が必要であった。現在においても溶接の方法は充分には確立出来ていない。しかし、タンク直胴部と半球ボス間にNCファイバーレーザ溶接、直胴部と半球間にTiG溶接で製造したタンクは耐圧試験の目的を達成したものがあつたため今回、報告する。当初、実機の各部位における溶接は材料に対する熱影響が少なく歪を小さく抑えられるNCファイバーレーザ溶接を採用した。また、NCファイバーレーザ溶接とTiG溶接の比較を表1に示す。

表1 NCファイバーレーザ溶接とTiG溶接の比較⁶⁾

	NCファイバーレーザ溶接	TiG溶接
材料に対する熱影響	少ない	大きい
歪	小	大
溶け込み幅	狭い	広い
溶け込み深さ	深い	浅い
作業者技量による影響	小	大

2.2 各タンクの溶接条件

Tiタンク開発・製造においてこれまでの各タンクの溶接条件(表2)を以下に示す。

表2 各タンクの溶接条件

タンクA	直胴部：NCファイバーレーザ溶接
タンクB	半球と直胴部間：NCファイバーレーザ溶接
タンクC	半球とボス間：NCファイバーレーザ溶接
タンクD	直胴部：NCファイバーレーザ溶接 半球と直胴部間：アルゴンTiG溶接
タンクE	半球とボス間：NCファイバーレーザ溶接 手直し：アルゴンTiG溶接
タンクF	直胴部：NCファイバーレーザ溶接 半球と直胴部間：NCファイバーレーザ溶接
タンクG	半球とボス間：NCファイバーレーザ溶接
タンクH	直胴部：アルゴンTiG溶接 半球と直胴部間：アルゴンTiG溶接
タンクI	半球とボス間：NCファイバーレーザ溶接

タンク A~C は材料に対する熱影響が少ないため歪を小さく抑えられる NC ファイバーレーザ溶接としたが、耐圧試験にて受入試験の耐圧試験圧力¹⁾7.5MPa に達する前に破壊した。対策として、半球と直胴部間にアルゴン TiG 溶接を採用したタンク D 及び E を製造した。直胴部及び半球部とボス部間を NC ファイバーレーザ溶接、直胴部と半球部間を TiG 溶接したタンクを以下図 1 に示す。

タンク D は耐圧試験に成功したが、タンク E は耐圧試験で破壊した。対策を行い、タンク E G はタンク直胴部と半球部間の溶接方法を NC ファイバーレーザ溶接とすることとした。しかし、NC ファイバーレーザ溶接の作業者の入れ替わりや操作方法未確立により建屋を移転したために生じた作業者の入れ替わりや操作方法の未確立によって溶接に失敗した。これにより、タンク直胴部と半球部間、直胴部の溶接方法もアルゴン TiG 手溶接に変更をすることとした。

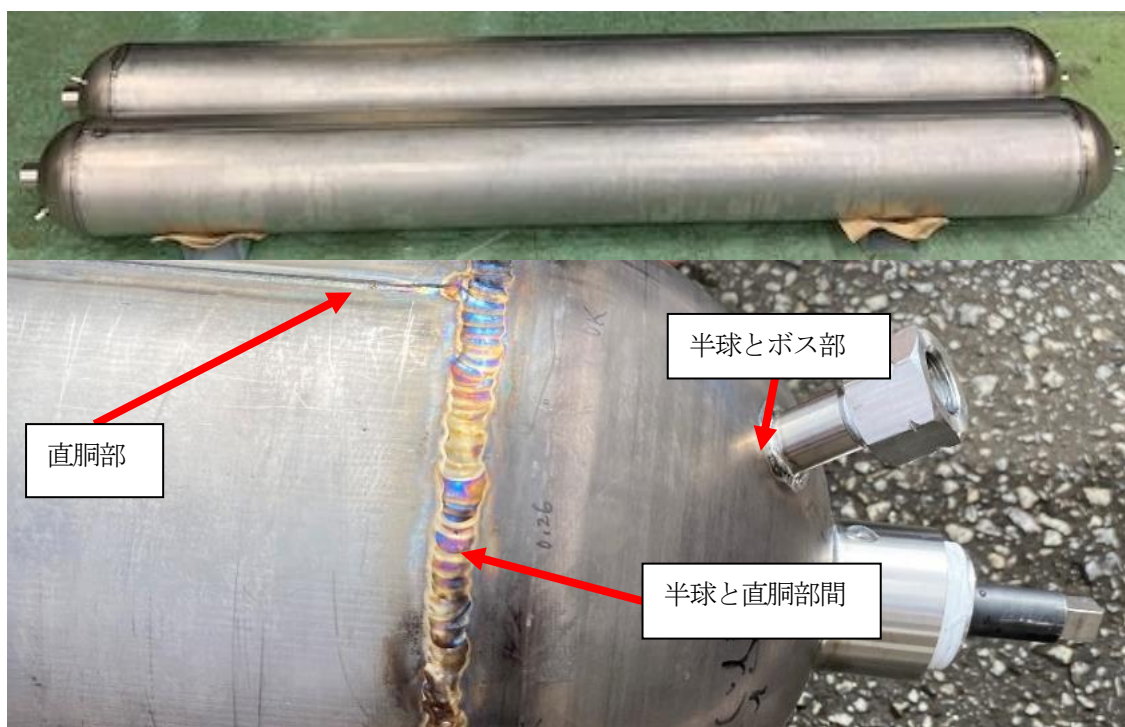


図 1 タンク D(上:全体図, 下:蓋部拡大図)

2.3 耐圧試験

2.3.1 実験目的

開発したタンクの耐圧・気密性を確認及び設計の妥当性を確認するため耐圧試験を行った。耐圧試験の主な目的を以下に示す。また、実験設備の様子を図 2, 3 に示す。

- (1) 気密性が保てること
→耐水の確認、タンクからの漏れがないかの確認
- (2) 打ち上げ試験を想定した予想最大使用圧力の 1.5 倍の圧力(7.5[MPa])を 2021 年度打ち上げ実績のある酸化剤タンク耐圧試験の保持時間 30 分間タンクが耐えること
- (3) 妥当なデータの測定・取得



図2 実験設備全体

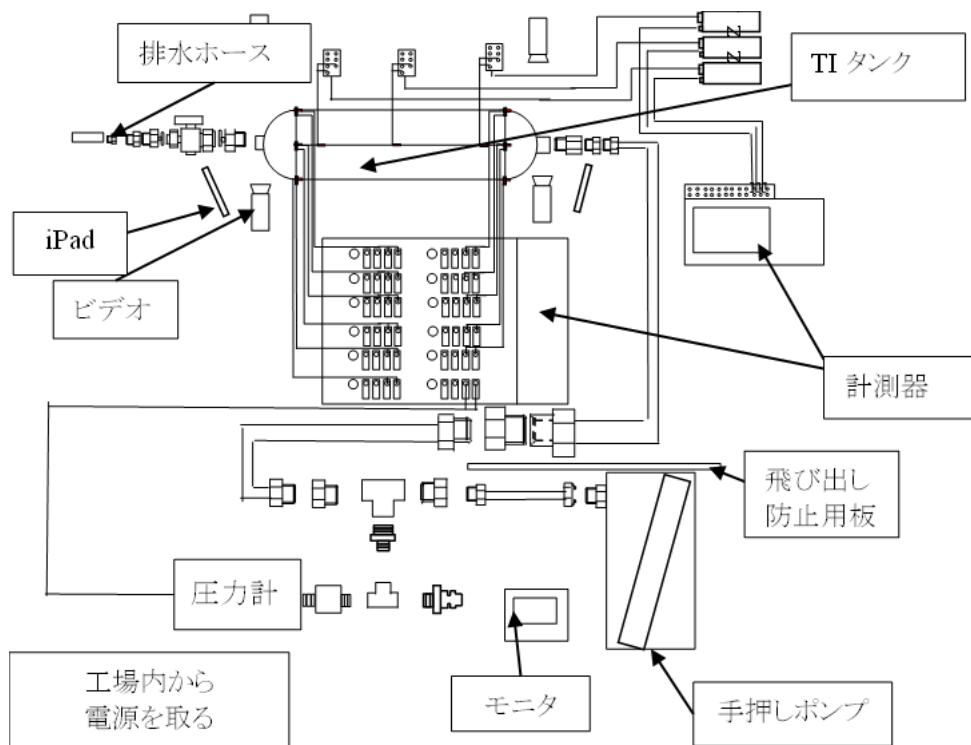


図3 実験設備全体模式図

2.3.2 耐圧試験結果 1

耐圧試験結果を表3に示す。始めにタンク4本(タンクA~D)の製造を行った。しかし、タンクBは製造途中で作業者のミスによって破損した。また、耐圧試験によってタンクCが破損した。そこで、タンクDからは半球と直胴部間の手直しのためにTiG手溶接を行い、また、破損しなかったタンクBの直胴部とタンクCの半球でタンクEを製造することとした。また、タンクDとタンクEは同時期に溶接を行った。耳がねありタンク(図4)は燃焼試験の吊下げ治具や打ち上げロケットの組立の際に使用する。タンクDの耳金有無の理由は溶接条件と強度の関係を確認するために2回に分かれて試験を行っている。タンクEの耳金有無の理由は溶接条件と強度の関係を確認するために2回に分かれて試験を行っている。以下に耐圧試験結果の詳細を示す。

表3 耐圧試験結果1

タンクA	6/15 約3MPaで直胴部中央の溶接部付近から破壊.
タンクB	6/18 溶接作業時に作業ミスで溶接部を破損. タンクEに直胴部を再利用
タンクC	7/5 約4MPaで直胴部と半球部の溶接部付近から破壊. タンクEに半球を再利用
タンクD	7/13 耳金無し8MPaを20分保持成功. 11/5 耳金あり7.5MPa30分保持成功. 12/12 充填試験成功
タンクE	7/20 8MPaでボス部溶接部から霧状のリークが発生TiG溶接で手直しし, 再試験. 7MPa付近から異音が始まり, 8MPaで破壊.

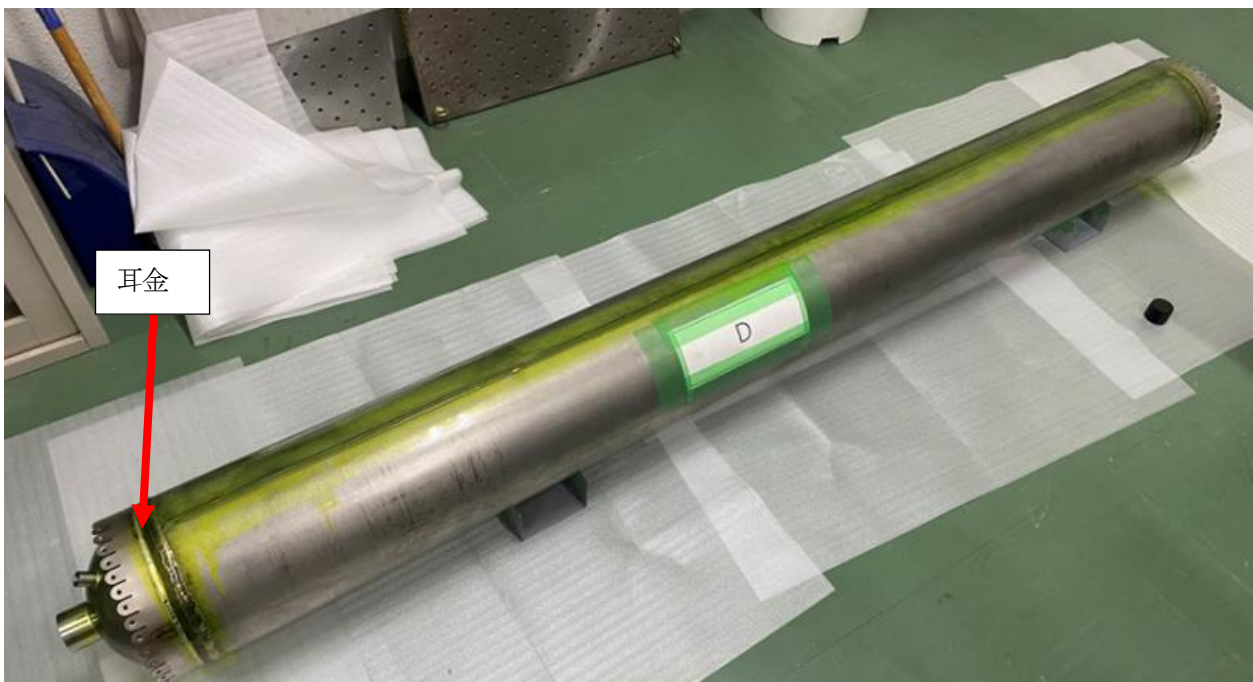


図4 耳金ありタンク

2.3.2.1 タンクE 耐圧試験結果

7月20日にタンクEの試験を行った。7MPa付近から異音が聞こえ始め、8MPaで破壊した。動画をコマ送り写真で吐き出し確認したところ、試験時にタンク上部のボス部側直胴部と半球部との接合部からやや離れたところを起点として破壊しており、そこから水が噴き出した(図5)。このことから、き裂は直胴部と半球部接合部からやや離れたところで発生し、タンク下部へ進展していったと考えられる。



図5 耐圧試験(タンクE)
(左上:破壊前, 右上:破壊直後, 下:破壊後)

2.3.2.2 タンクD 耐圧試験結果

11月15日にタンクDの試験を行った。7月13日に実験目的を達成したタンクへ耳金を溶接した状態で、 $7.5(\pm 0.1)$ [MPa]をかけた状態を30分放置した。圧力-ひずみ線図を図6に示す。結果として $7.5(\pm 0.1)$ [MPa]を30分保持することが出来、x軸方向(機軸方向)の最大ひずみは $2776[\mu\epsilon]$ 、解析は $1880[\mu\epsilon]$ となり、解析結果の1.5倍となった。また、y軸方向(周方向)の最大ひずみは $5717[\mu\epsilon]$ 、解析は $4375[\mu\epsilon]$ となり、解析結果の1.3倍となった。一方、除荷後の残留ひずみは $\pm 73[\mu\epsilon]$ 以内で十分小さい結果となった。

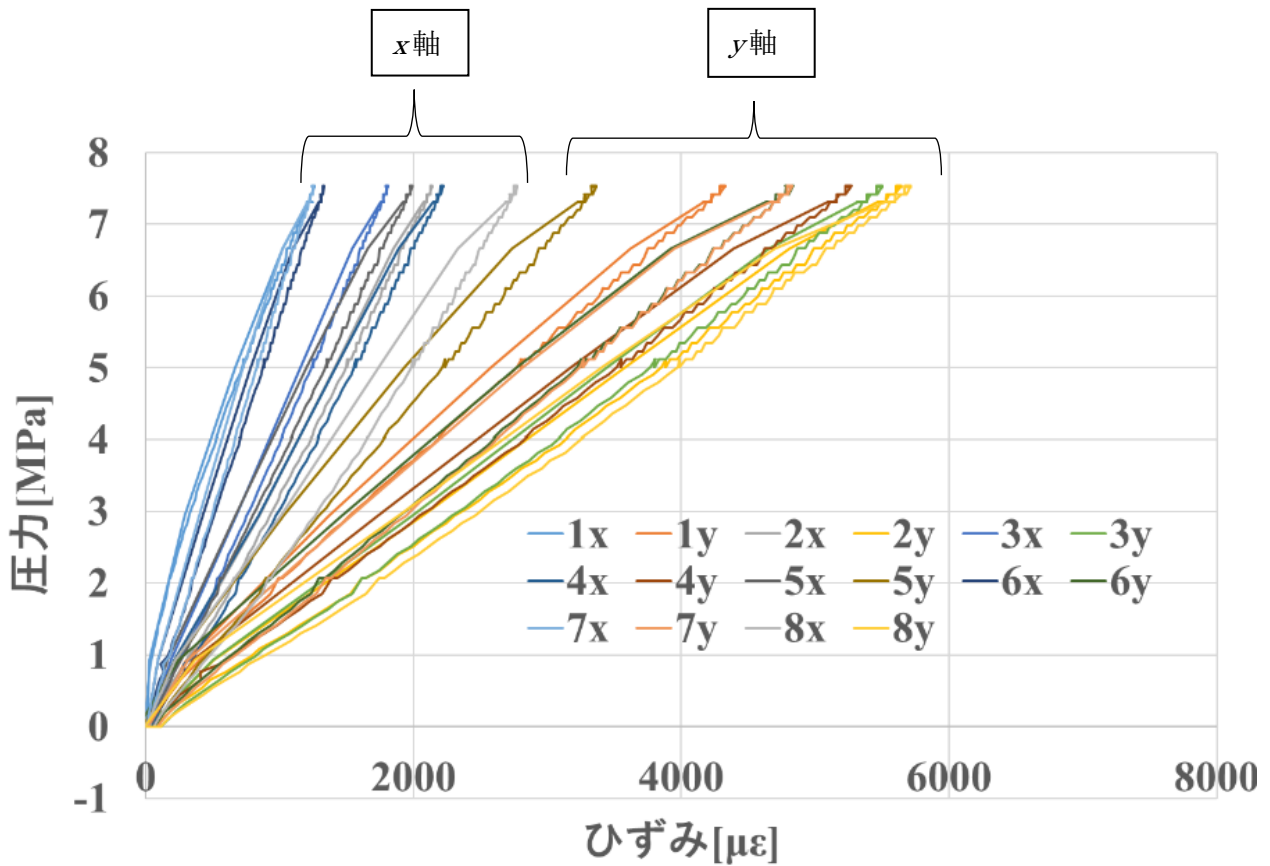


図6 11月15日 圧力-ひずみ線図

2.3.3 耐圧試験結果2

耐圧試験結果2を表4に示す。耐圧試験結果1と比べタンク製造において溶接条件を変更した。

タンクBが破損したため新規に2本製造しようとしたが、NCファイバーレーザー溶接機メーカーの都合により建屋を移転したために生じた作業者の入れ替わりや操作方法の未確立によってヒューム除去を本来アルゴンガスで行うところエアで除去を行われてしまい、溶接部の酸化が疑われた。エア1MPaによる簡易漏れテストを確認したところ半球部と直胴部の接合部からやや離れたところで漏れが発覚した。これによりNCファイバーレーザー溶接が安定せず次回よりアルゴンTiG手溶接に変更をすることとした。

表4 耐圧試験結果2

タンクF	10/13 エア1MPaによる簡易漏れテストを確認したところ半球部
タンクG	と直胴部の接合部からやや離れたところで漏れが発覚

2.3.4 耐圧試験結果3

耐圧試験結果3を表5に示す。耐圧試験結果1,2と比べタンク製造において溶接条件を変更した。TiG手溶接に変更後、タンクHの耐圧試験を実施したが、約5MPaでタンクの半球部と直胴部間の接合部から離れたところで破壊が生じた。

表5 耐圧試験結果3

タンクH	11/3 約5MPaでタンクの半球と直胴部の接合部から離れたところで破壊.
タンクI	タンクHと同日に耐圧試験を行う予定だったが, タンクHが破壊したため現在保留

耐圧試験後にタンクE, Hを観察したところタンクの直胴部で漏れが発生していることが分かった. 目視で破面を観察した結果, 半球部と直胴部の接合部からやや離れたところを起点として壊れているように見える(図7).



図7 タンクH 破壊後拡大図

これまで曲げ応力が乱れる半球と直胴の接合部が破壊の起点になると考えていたが⁹⁾, 破損はいずれも直胴部の軸方向溶接部で生じていた. また, フープ応力は軸応力の2倍ほど応力が大きくなることから破壊のモードがフープ方向で起きていると考察している. 一方, NCファイバーレーザ溶接で製造されたタンクDは水による耐圧試験で試験目的を達成している. しかし, NCファイバーレーザ溶接が安定しない且つ, タンクEの破損があるためアルゴンTiG手溶接に変更した.

3. タンク製作方法の確立に向けた検証

耐圧試験の結果から溶接品質が安定しないため溶接方法の変更を行った. そこで溶接方法の変更に伴う条件出しとして引張試験を実施した. さらに, タンクHと同溶接条件であるタンクIを保留している. 今後, タンクIをどのように手直しするかを検討するため, また今後の品質向上するためアルゴンTiG手溶接の実力確認のための試験を現在進行中である. 条件は以下の3通りである.

1. タンクH,Iの条件(表2参照)
2. シールド良好の際の銀色のビード外観が出せる条件⁹⁾
3. 完全なアルゴンシールド雰囲気とした空間の中での溶接

上記の結果, タンクH,Iの条件は十分な強度を得られたことを確認できた. 一方, 条件3が強度不十分であったため, さらなる溶接方法の見直しが必要であることが明らかになった.

4. 加圧サイクル試験

耐圧試験に合格したタンク D は加圧サイクル試験を行い最低でも 240cycle を行う。試験は 212cycle でタンクからリークが発生し、試験目的が未達成となった。試験後リーク箇所を確認したところ、1-1/2UNF ボス部と半球の溶接部でリークが発生したため、この部分の NC ファイバーレーザ溶接の強度が不足していると考えられる。ボス以外のところは現時点においてリークの確認は見当たらないため、ボスの溶接を見直すことで 240 サイクルは達成できると考えられる。以下、図 8, 9, 10 に試験結果を示す。

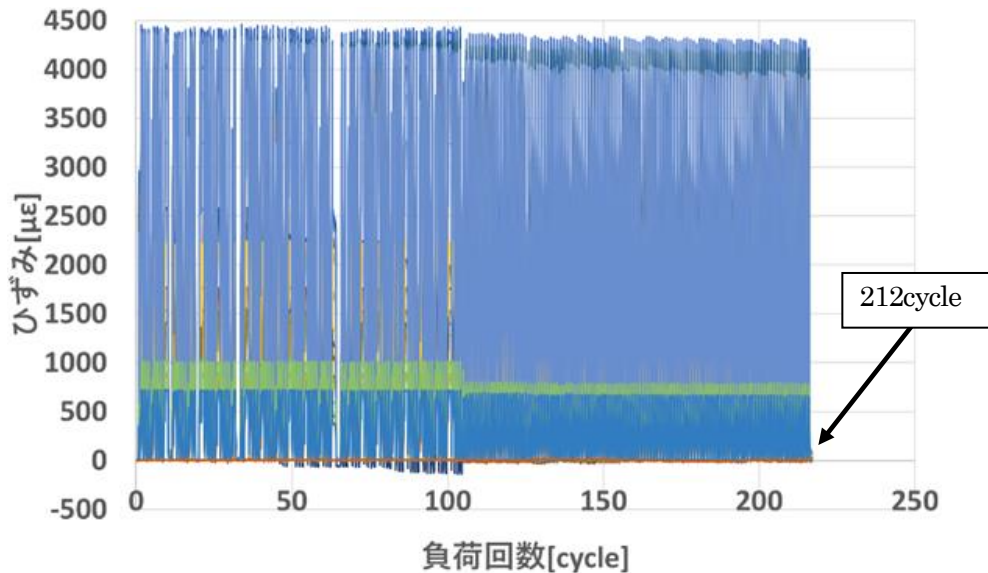


図 8 圧力-負荷回数線図(合計 212cycle)

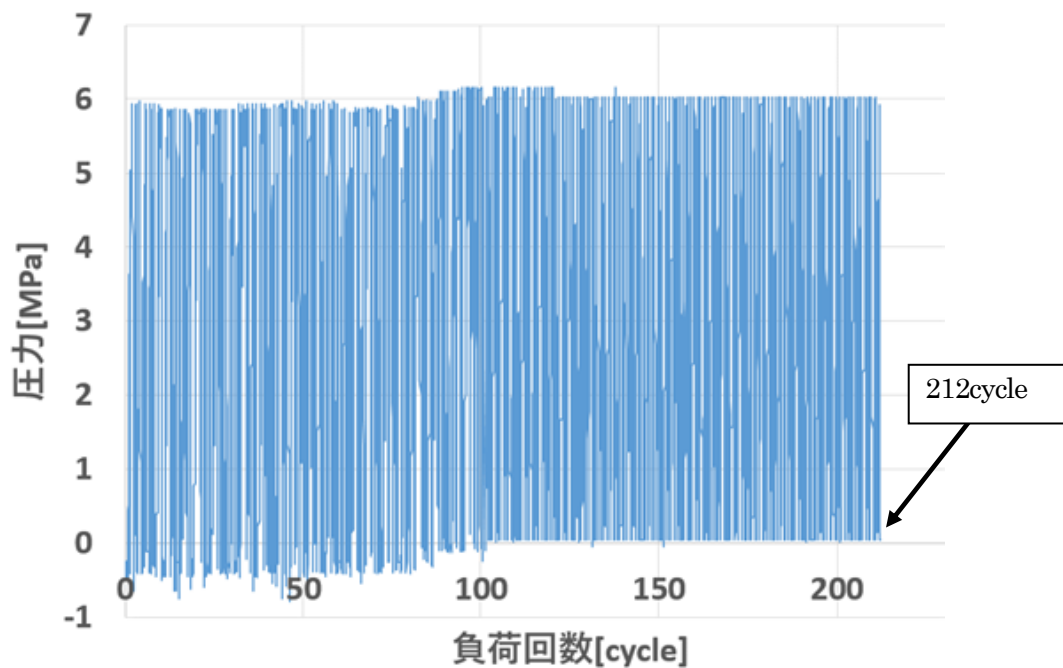


図 9 ひずみ-負荷回数線図(合計 212cycle)



図 10 212 サイクル目水漏れ(上:全体図, 下:拡大図)

5. まとめ

耐圧試験で破壊したタンク E, H を観察したところ、半球部と直胴部の結合部ではなく直胴部で破壊し、直胴部の溶接がポイントであることが分かった。Ti タンクの開発において溶接方法の確立が課題として残ったが、これは今後も溶接技術向上と引張試験による強度評価を行なうことで対策可能であると考えられる。

一方、タンク D は耐圧試験と充填試験に合格したが、その後の加圧サイクル試験において 212 サイクル目でタンクからリークが発生したが Ti タンクの耐圧試験、充填試験、加圧サイクル試験装置及び方法は確立できた。今後溶接作業方法が改善され、品質が安定すれば直ちに耐圧試験、加圧サイクル試験を実施できるため、打ち上げ試験に供することができると思われる。

参考文献

- [1] 兼頼晴香, 濱崎綾子, 亜酸化窒素の自己発熱分解反応と CFRP タンクの開発, 2020 年度卒業論文付録, p.4
- [2] 政木清孝, Ti-6Al-4V 合金の高サイクル疲労特性に及ぼすジルコニアショットピーニングの影響, 2016, pp.1-7
- [3] 図解入門現場で役立つ溶接の知識と技術, 野原英孝, 2020, pp.162-175

- [4] チタンの加工技術, (社)日本チタン協会, 2006, pp.15-18, 101-230
- [5] 新版改訂溶接・接合技術入門, 一般社団法人溶接学会一般社団法人日本溶接協会, 2020, pp.70-99
- [6] FLW-ENSIS - ファイバーレーザー溶接システム - AMADA - アマダ, アマダ株式会社, 最終閲覧日 2022-1-18,
https://www.sheetmetal.amada.co.jp/special/weld/FLW_ENSIS_official/FLW_ENSIS_official.html
- [7] 宇宙航空研究開発機構, 宇宙用高圧ガス機器技術基準 平成 21 年 3 月 9 日 C 改訂, 2009, pp.8,20,95-96
- [8] 小林繁夫, 航空機構造力学 増補新版, 2014, pp.244
- [9] 相談例 16.チタン配管のティグ溶接, WE-COM マガジン第 16 号館, 一般社団法人 日本溶接協会 溶接情報センター, 2015.4 発行