

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

極低温流体中でインデューサに発生する
キャビテーションの直接可視化
(その1 耐低温樹脂の特性検証試験結果)

渡邊 光男, 永浦 克司, 長谷川 敏,
島垣 満, 吉田 義樹, 杉田 英一郎

2010年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

極低温流体中でインデューサに発生する

キャビテーションの直接可視化*

(その1 耐低温樹脂の特性検証試験結果)

渡邊 光男^{*1}, 永浦 克司^{*2}, 長谷川 敏^{*1}, 島垣 満^{*1},
吉田 義樹^{*1}, 杉田栄一郎^{*3}

Direct Visualization for Cavitating Inducer in Cryogenic Flow^{*} (1st Report : Verification Test of Resin Characteristics in Low-Temperature)

Mitsuo WATANABE^{*1}, Katsuji NAGAURA^{*2}, Satoshi HASEGAWA^{*1},
Mitsuru SHIMAGAKI^{*1}, Yoshiki YOSHIDA^{*1} and Eiichiro SUGITA^{*3}

概 要

本報告は、平成 19 年度の「先端・萌芽研究」の一環として行った、極低温インデューサに発生するキャビテーションの可視化装置の設計・試作に必要なデータ取得のために行った要素試験の結果である。極低温流体のキャビテーションを直接可視化するためには、耐低温性、加工性、透明性に優れた素材の選択が不可欠である。透視管材料には、筆者らが見だし、極低温可視化装置（-196℃、0.97MPa 以下）に実績があったポリカーボネート樹脂を選定し、これまでに経験したことがない高圧極低温領域における強度、特性データを取得した。また、ポリカーボネート樹脂の耐化学性および金属部のシール性の検証を行ったので、その結果を報告する。

Key Words: Visualization, Cryogenic, Cavitation Flow

1. 緒言

極低温流体を推進剤とするロケットエンジン用ターボポンプは、軽量化のため高速回転、低吸込圧力という特徴があり、厳しいキャビテーションが発生する。これを補うために、ポンプ主羽根車の前に 3～4 枚の羽根から成るインデューサを設置する設計手法が採られているが、このインデューサにはキャビテーションによる不安定現象が生じることから、数多くの研究が進められている。

極低温流体中に生じるキャビテーション現象の解明には「直接見る」ことが最も重要な要素の一つと考え、平成 19 年度から JAXA において「先端・萌芽研究」の一環として、極低温インデューサの可視化装置の設計と透視管素材の要素試験を行った。

極低温（液体酸素-183℃～液体水素-253℃）流れの観察には、合成石英ガラス、硬質耐熱ガラス等が一般的に使用されているが、高価であり加工性に問題がある。一方、筆者らが約 30 年前に液体窒素温度（-196℃）においても十分に使用に耐えることを見出した耐熱樹脂

（ポリカーボネート）⁽¹⁾⁽²⁾ は、比較的安価でしかも円筒形加工が容易で有り、透明度も良く可視化装置の材料には最適と考えられた。

したがって、本可視化装置のインデューサ透視部に用いる素材としてポリカーボネート（以後 PC と記述する）に再度着目し、低温強度、耐化学性等の PC の材料特性及びシール性能の取得のため液体窒素による検証試験を行った。

2. これまでの可視化の経緯

これまで産業用の軸流ポンプ、遠心ポンプはもとよりロケット用ターボポンプインデューサのキャビテーション性能確認においては、水を作動流体として流れ場の観察が数多く行われてきた。一方、極低温流体中でのキャビテーションの直接観察は、1967 年に米国 NASA において、図 1 に示すように液体水素中でインデューサの可視化⁽³⁾を行ったことが報告されているが、これまでに世界で成功した例はこの一例だけであった。

日本では、水とロケットの推進剤（液体酸素／液体水素）

* 平成 22 年 1 月 25 日受付 (Received 25 January, 2010)

*1 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系推進技術研究開発センター (Space Transportation Propulsion Research and Development Center, Space Transportation Mission Directorate)

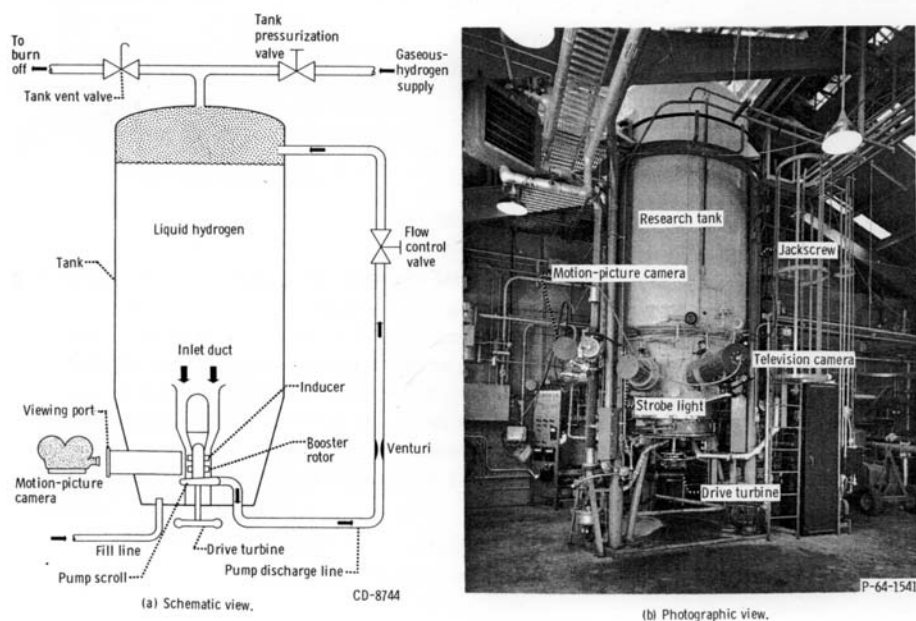
*2 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japan Aerospace Technology)

*3 ダイナックス(株) (dynax Incorporated)

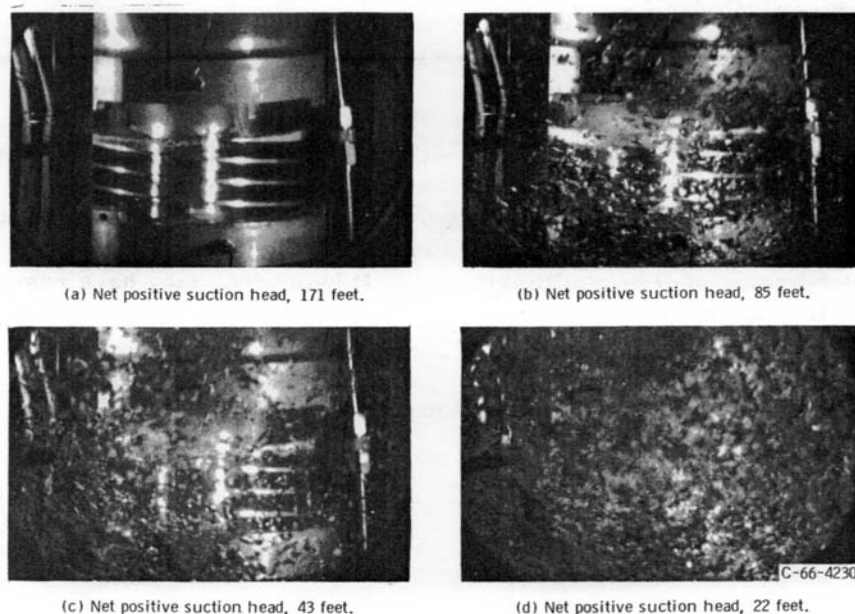
では熱力学的な性質が大幅に異なる為、実際の極低温状態での流れを観察したいという欲求が原点となり、NASA の成功から 8 年後の 1975 年から筆者らによるポンプ可視化の試みが始まった。この試みは幾多の失敗を経て、1982 年に極低温流体のポンプ入口における気液二相流

の可視化⁽¹⁾に成功した(図 2 参照)。この試みのなかで、耐熱性の樹脂として開発し

使用されていた PC(ユービロン:三菱化学(株))を見だし、真逆の耐低温用素材としてこれを用いた。



試験設備外観と装置概略



インデューサに発生する液体水素キャビテーション

図 1 液体水素キャビテーションの可視化試験⁽³⁾

(NASA Lewis Research Center)

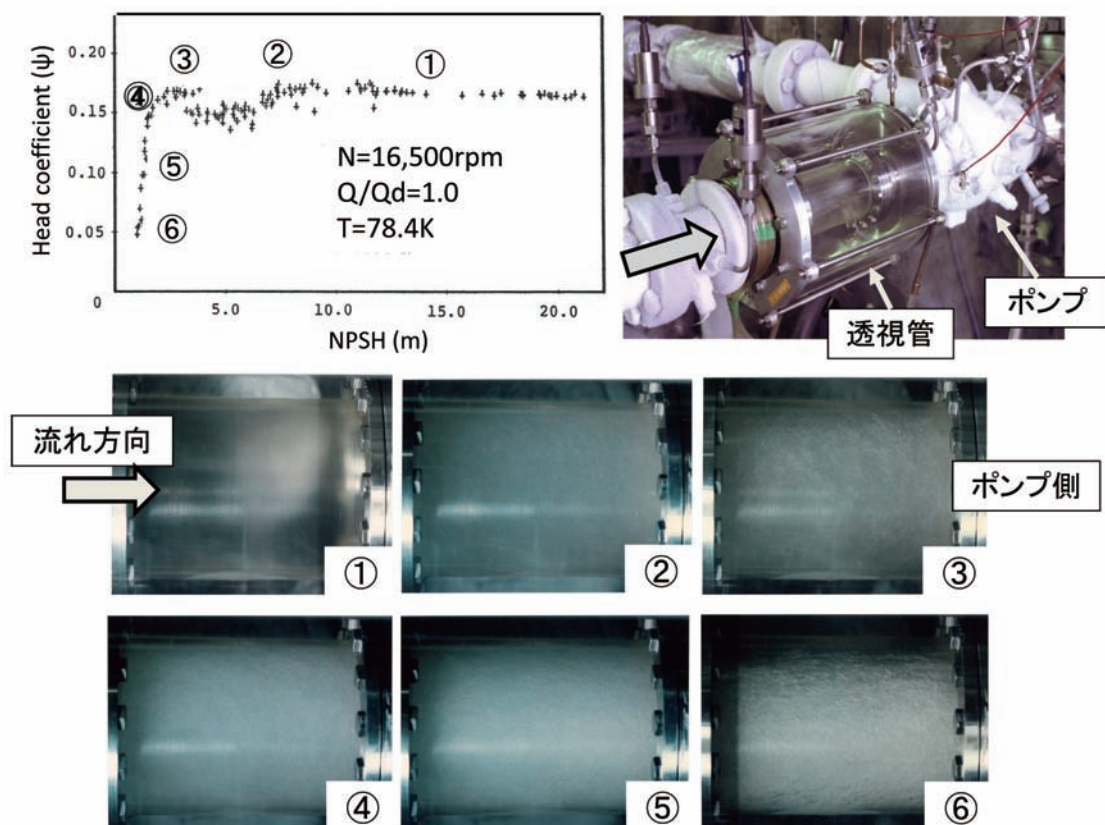


図2 極低温ポンプの気液二相流の可視化⁽¹⁾

3. 試験目的

高速回転するインデューサを観察する目的から、透明度、加工の容易性、加工精度、低温強度を素材選定の条件とした。しかし、現在でも極低温環境下での透明材料の素材特性が公表されたものは皆無である。従って、透視管を試作する上で現状で最も可能性の高い素材⁽⁴⁾として、過去に液体窒素温度において使用経験があり、低温における実証試験により特性を把握し、これを設計に反映できれば使用可能であるとの判断からPCを選択した。

可視化装置の試作に必要なPCの低温特性を明らかにするために以下に示す①～③の実証試験を行った。

①インデューサ形状に合わせてPC透視管を製作し、インデューサ試験機に組付けた形状に近い状況で、低温強度（最終破壊圧力）の検証を行う。

②PCは、清浄度管理された設備及び試験機に組付けるために精密洗浄が要求される。PCはガラス系に比べると耐溶剤性では劣ることから、想定される洗浄用溶剤、シール補助剤等の耐化学性の検証を行う。

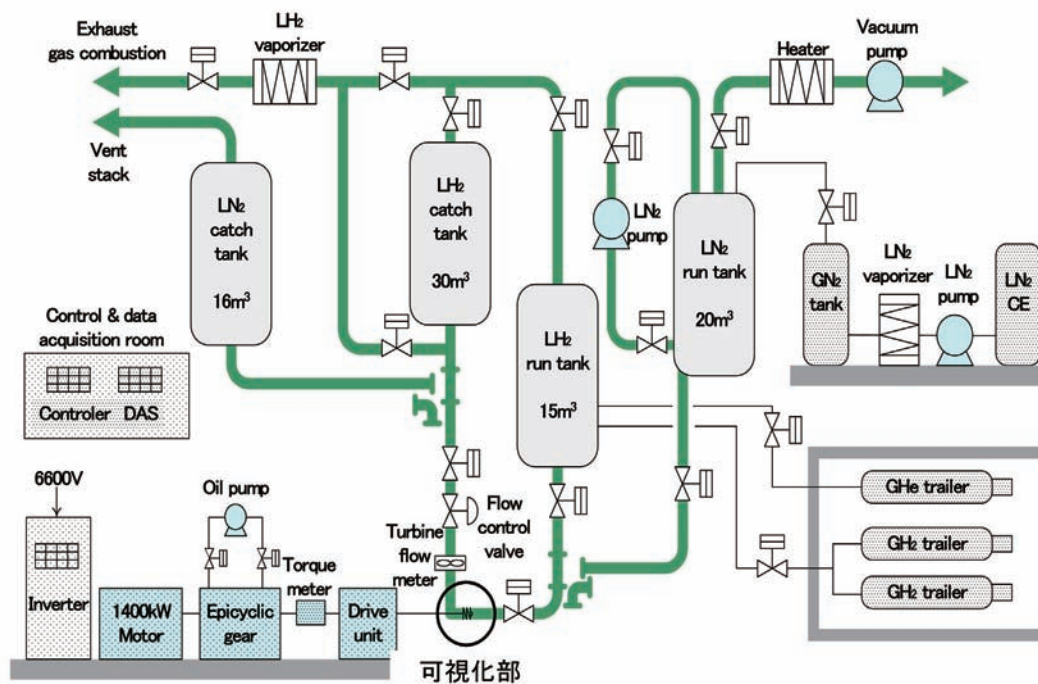
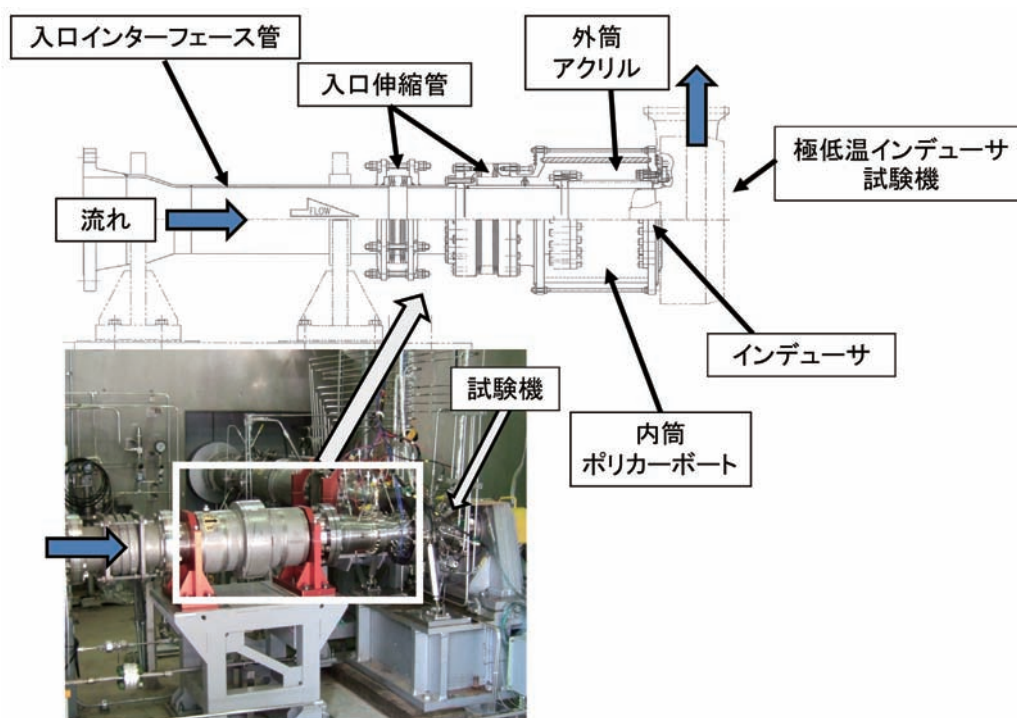
③異種材料(PCと金属)間の熱収縮の差異及び硬さの違いは、シール性能に影響を及ぼすことから、極低温高圧環境下においてシール性の検証を行う。

4. 試験装置

4.1 可視化装置の設計条件

今回試作する可視化装置は、図3に設備系統図を示す極低温インデューサ試験設備⁽⁵⁾⁽⁶⁾において、キャビテーションの可視化が行えることが必要である。また、図4に示すインデューサ試験機⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾組立状況の白枠の位置に設置することを考慮して、可視化装置全体の概念設計を行った。

インデューサを直接観察する試みから、図5に示すインデューサ試験機の入口ライナケーシングを透視管に置き換えることとし、透視部の形状はポンプ入口部の流れに影響を与えないことが必要である。また、インデューサに発生するキャビテーションは極力実機に近い状況にして、これを直接観察するために円筒形を採用することにした。

図3 極低温インデューサ試験設備系統図⁽⁵⁾⁽⁶⁾

インデューサ試験機組付け状況

図4 可視化装置概念図

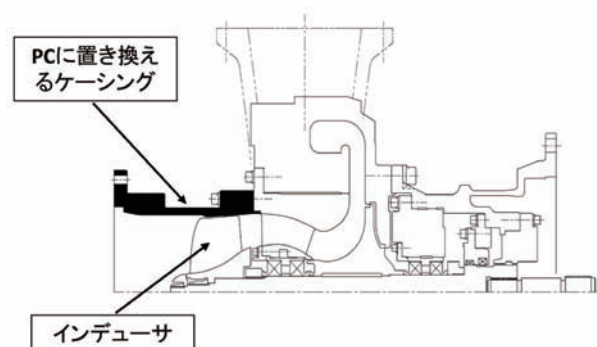


図5 インデューサ試験機概略図 (5) (6) (7)

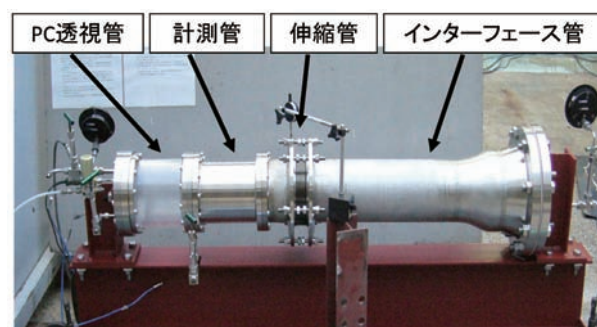


図6 0.97MPa 低圧試験用装置組立

4.2 予備試験条件

PCの極低温破壊を安全に行える設備、環境条件が必要であるため、試験はこの二つの条件がそろっているダイナックス(株)⁽⁸⁾の高圧試験場で行った。

極低温環境下における本試験は、樹脂メーカにおけるPCの開発目的(耐熱用樹脂)から外れ、全く未知の領域である。

そこで最初の試験は、インデューサ試験機の吸込み側の設計条件である、最大圧力0.97MPaの低圧で行った。図4に示した概念設計の可視化装置を模擬したPC+入口インターフェース管(入口管、入口伸縮管、計測管)を製作し、図6に示すように、実際に組み付ける極低温インデューサ試験設備と同じ組み合わせとした。この装置の組み合わせは、PCの確認を行うだけでなく、実際に可視化装置を設計する上での妥当性を確認する目的も含まれている。

一方、低温強度の確認を行う高圧の試験では、インデューサ吐出圧力である約3.5MPaより高い4MPaを特性検証試験の目標圧力に定めた。入口側の部品は低圧設計のため、高圧試験はPC単体で行うこととし(図7参照)、最終破壊まで行えるように装置は10MPaの耐圧設計とした。

試験に供したPCは、インデューサ試験機の入口ライナケーシングを外し、直接試験機に組み込む構造のために、その接続部には最短設計が可能であり、過去に製作した可視化装置⁽¹⁾にも採用した経験がある、PC外側に直接ネジ加工を施す方式を選択した。

5. 検証試験

5.1 ポリカーボネートの低温強度の検証

図8は、PC+入口インターフェース管を組み付けた低温試験の様子である。初めに、試験圧力である0.97MPaで組立の確認と、安全性の確認のためにGHe常温気密を行った。気密性に問題がないことを確認した後、低温気密を行うために液体窒素温度(LN₂: -196℃)まで、通常のインデューサ試験の予冷時と同じ手

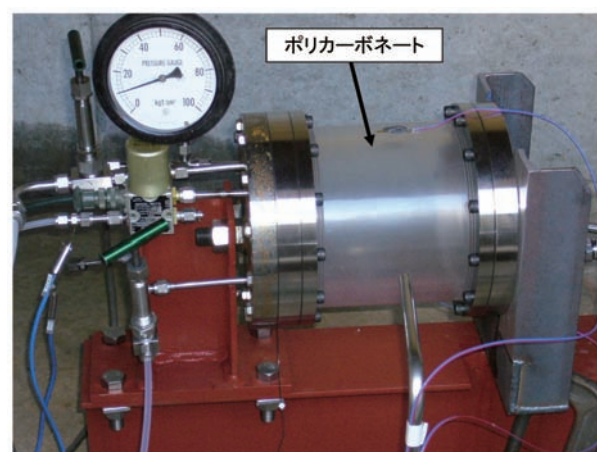


図7 高圧試験用組立

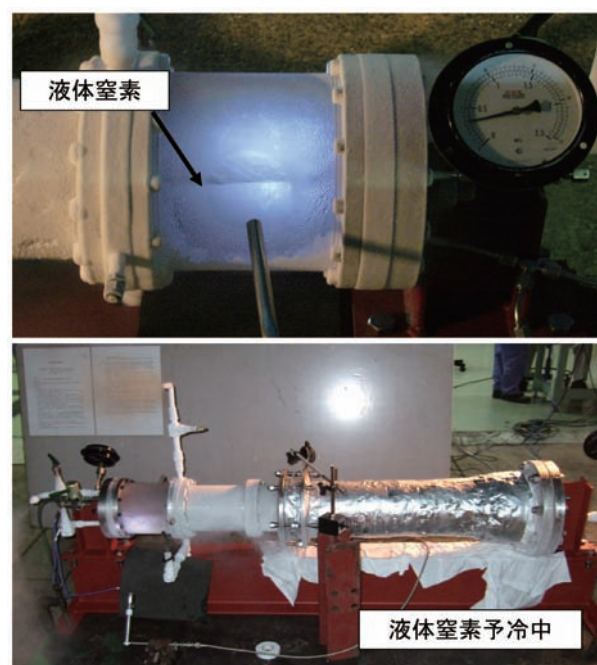


図8 低圧・極低温実証試験

順で、低温ガス予冷から液予冷と段階的に約4時間をかけて冷却した。予冷終了後、液が満たされた状態でGHeで加圧し、0.97MPaまで上昇したところで漏れのないこ

とを確認した。漏洩の可否は、目視とヘリウム・リーク・ディテクタを用い、測定値 $\chi \times 10^{-7} \sim \chi \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (大気中の GHe 濃度) のレベルでリークゼロとの判断をした。

一方、可視化装置は横置きに設置されるため、予冷中は PC の底部から冷え始めるので、PC 下部には引っ張り、上部には圧縮の両方の応力が働き、最も厳しい状況となる。そこで、予冷中の PC と金属配管の歪み、変形等に対応するために伸縮管 (ダイナミックベロー) を設けた。その結果、応力は緩和され PC に特に問題は生じず、また接続シール部からの漏洩も見られなかった。この検証試験のために用いた、PC+入口インターフェース管の組み合わせを、実際の可視化試験装置の設計に採用することにした。

図 9 は低温・高圧の試験であり、低温・低圧試験の場合と同様に約 4 時間かけて PC の予冷を行っている。第一段階として、低温においてインデューサ吐出圧力 $3.5\text{MPa} + \alpha$ である 4MPa の気密・耐圧確認を行い、次に最終破壊圧力を確認する試験を行った。

この際 PC のトップ位置と 180 度対称位置に歪みゲージを貼り付け、予冷から破壊までのデータを取得した。十分予冷をして、液が満たされた状態で液充填弁、排気弁を締めきり徐々に GHe により PC 内部の圧力を上げた。上昇スピードは遠隔排気弁の開・閉により調整した。 1.5MPa 附近まで圧力を上げたところで、シール部からの漏洩がモニター画面で確認されたが、PC 樹脂の極低温における限界圧力データを取得する第一目的から、そのまま圧力を上げ続けた。

図 10 に PC に貼り付けた歪みゲージのデータを示す。歪みは圧力の上昇に連れて緩い傾斜で増加し、その傾向には破壊するまで特別な変化は見られず、金属破断とは異なる様相であった。従って、歪みのモニタでは、PC の限界を検知することは困難であることが判明した。加圧を続け、歪みデータに特別な変化は見られないままに目標圧力 4MPa をクリアしたため、更に圧力を上げ続けたところ、 5MPa を超えた付近で突然大音響と共に PC は破裂し試験は終了となった。破裂直前の最終圧力は 5.4MPa であった。図 11 に破裂後の状態と、飛散した PC の破片を示す。

表 1 に示すように、常温における PC の設計圧力は、胴の内径 $\phi 150\text{mm}$ 、ネジ部の最小厚み 17.8mm 、PC の引張り破断強さ 60MPa とすると、安全率ゼロの 100% では 12.4MPa 、金属圧力容器と同様に安全率を 4 倍とすると 3.1MPa となる。

一方、今回 -196°C における破壊圧力は 5.4MPa であることから、極低温環境下では引っ張り応力 100% の常温と比較すると、約 44% の強度に低下することが確認された。

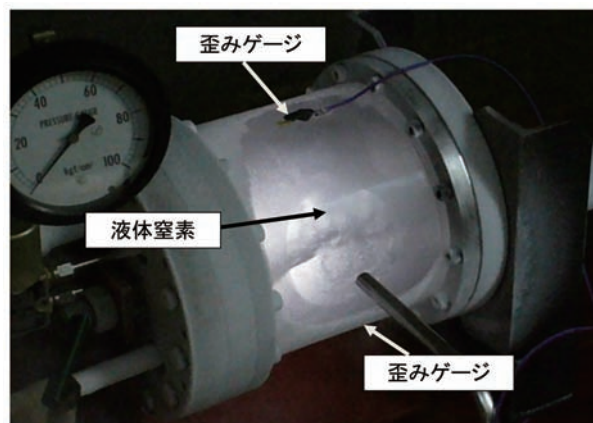


図 9 高圧・極低温実証試験

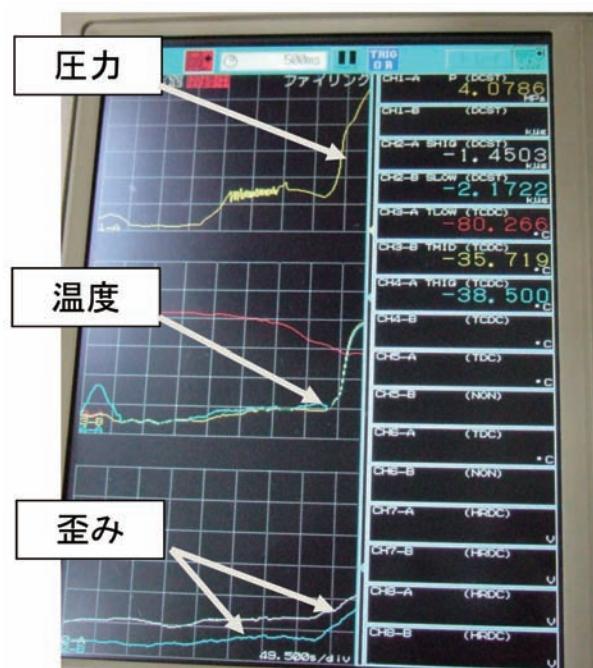


図 10 極低温試験圧力、温度、歪みデータ

しかし、低温強度の最終目的である 7MPa には至らなかったが、現設計の PC において本試験の目標である 4MPa はクリアすることができた。

破裂した PC の破片を調べた結果、破壊はネジ部より始まり、胴筒部に広がったとの結論が得られた。更に常温においてネジ部に掛かる負荷を増大させると、荷重の増加と共に一部のネジ山が変形し、PC の弾性限界を超えたときに次々と隣の山が崩れて破壊に至ることが分かった。

これまでの金属ネジに対する認識では、全てのネジ山で均等に荷重を受けているとの考えに立つものであった。弾性限界が高い金属であれば、次々とネジ山が変形を起こし密着することでほぼ均等に荷重を受けることになり、加工精度のバラツキを吸収する。しかし、



〔破壊試験後の状況〕

〔PC破片を集めたもの〕

図 11 5.4MPa で爆発破壊した状況

表 1 PC の常温強度

＊ PCの引張り破断強さ:605kg/cm² とすると

	引張り応力100%	引張り応力50%	引張り応力25%
設計圧力	12.4 MPa (低温破壊5.4MPa)	6.2	3.1
設計温度	40 °C (-196°C)	40	40
設計温度における材料の許容引張り応力	60 N/mm ²	30	15
胴の内径	150.0 mm	150.0	150.0
最小厚み	＊ ＊ 17.8 mm	17.8	17.8

＊ 芝軽粗材株式会社(材料物性表 その2) (4)

＊ ＊ ネジ部の最小厚み

強度の劣る樹脂では、全てのネジ山が密着する前に一部のネジ山が破壊限界を超えてしまうために、隣のネジ山に負荷がかかって破壊に至ったものと推察された。

PC の設計圧力を上げる手段として、次の二つの方策が考えられる。一つは、肉厚を増すことである。しかし、厚みを増すことで低温における歪み、変形が大きくなるのは明らかである。また、金属とは異なる点も多く、極低温の環境では、単純に厚みを増すことが耐圧強度を増すことになるか否かの結論を導き出すためには、多くの実証データの蓄積が必要である。更に、厚みを増すと屈折率が大きくなりインデューサを透視したときの歪みが大きくなる欠点も現れる。

もう一方の対策方法は、破壊のきっかけとなるネジ

部の補強策である。PC にネジ山を加工することで、応力が集中し著しく強度が低下したものと推定されたので、低温収縮の問題、設計・製作上の問題、透過性等の優劣について再度比較検討を行った。以上の結果、ネジ部の設計見直しを行い、ネジ山の形状、加工方法、加工精度の見直しを行うことにし、最終目標である7MPaを目指すことにした。

5.2 PC の耐化学性の検証

PC の透明度を良くする方法としては、精密加工後の研磨と表面仕上げ用溶剤を塗布する方法があり、この両者について検証を行った。表面仕上剤を塗布した PC は、研磨した PC と比較すると遙かに透明度が高く、流速計のレーザー入射にも十分使用可能と考えられた

が、メーカーからの情報開示は無く、製作過程は不明であった。このため、耐溶剤性と低温縮みによる表面剥離の有無を調べた。

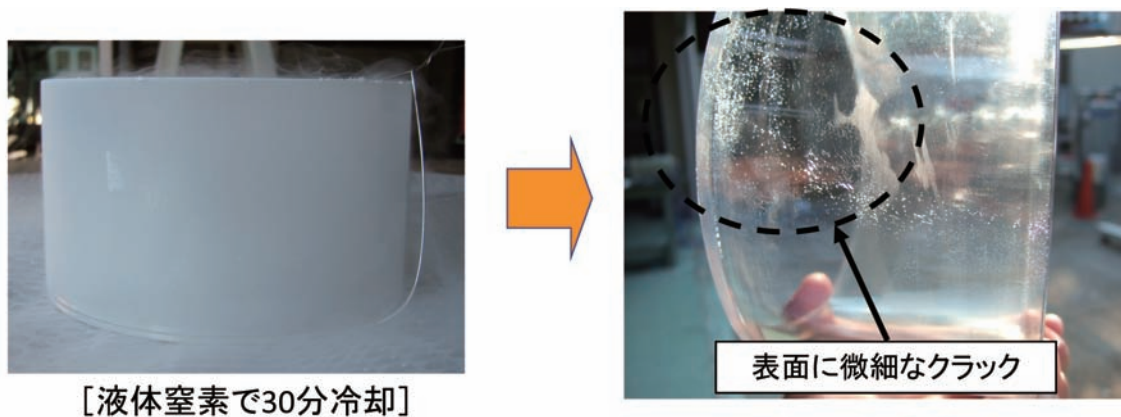
図 12 に示すように、表面仕上げ用溶剤を塗布した PC を 30 分液体窒素に入れ、常温に戻したところ微細なクラックが全体に発生していた。この溶剤を塗布する表面処理方法では、極低温環境では母材の PC と溶剤の皮膜との間に熱収縮の差があり、低温剥離を起こすため使用できないことが判明した。研磨仕上げの PC についても、同じく低温検証を行ったが、透明度では若干劣るものの、極低温の影響は全く観られなかった。

また、可視化装置はインデューサ試験機に組み込むことから、試験設備及び試験機と同様の清浄度が要求される。一般的な合成樹脂は、溶剤が付着すると劣化を起こすため、精密洗浄に使用するフロン 225cb、イソプロピルアルコール (IPA)、更に組立時に使用するシ

ール補助剤の Krytox (DUPONT:USA) に対する化学的影響の検証を行った。図 13 に示すように、これら 3 種類の溶剤について、常温の PC に溶剤を塗布し、液体窒素で 30 分冷却した後、自然昇温で常温に戻す手順で行った。これらを塗布した表面はひび割れ、溶解等の劣化は全く見られず良好であり、PC に対し使用可能であることが確認できた。

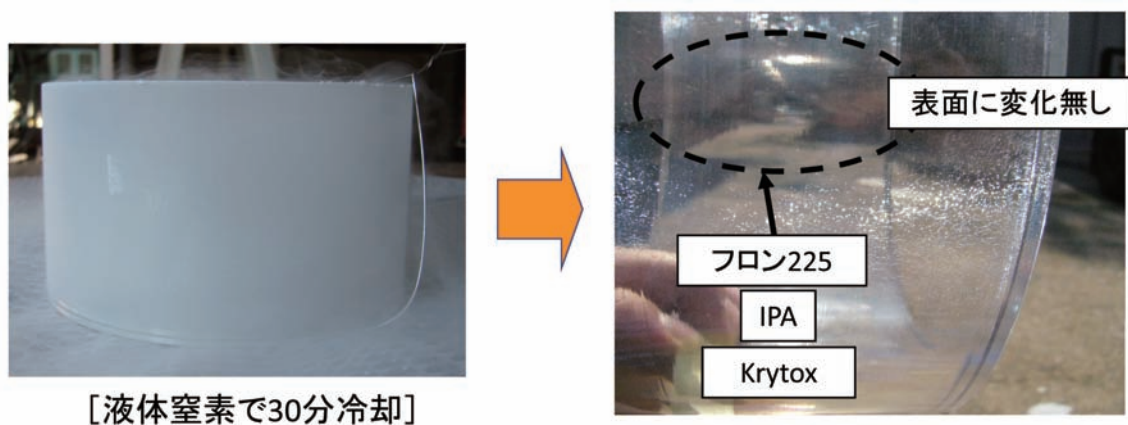
5.3 PC と金属勘合部のシール性の検証

本試験では、これまで 1MPa の低圧ではあるが液体窒素温度までの使用実績があり、広く極低温分野に於いて使用されているインジウムシールを選択した。これは強度の落ちる PC と SUS304 の勘合部のシールとして、筆者らも過去に試作した透視管のシールにインジウムを使用していたため、シール部の工夫をすれば高圧でも使用可能との判断であった。



冷却(液体窒素)→常温に戻し確認

図 12 PC 表面仕上げの検証



溶剤塗布(常温)→冷却(液体窒素)→常温に戻し確認

図 13 耐科学的性の検証

図 14 にインジウムシールと固定フランジを示す。常温 GHe の気密では、漏れは全く見られないものの、極低温の気密では PC 内部圧力（GHe 加圧）が 1.5MPa 附近に達すると、PC と金属フランジ接合部から漏れが確認された。インジウムシールを新たに装着してもほぼ同じ圧力から漏洩が始まることが判明した。

インジウムシールは線径 $\phi 1.0$, $\phi 1.5$, $\phi 2.0$, の 3 種類を試したが何れも同じ結果であった。またこの漏れは、金属フランジのボルトピッチ間の低温歪み（うねり）が原因とも考えられ、フランジの厚みを増し（15mm \rightarrow 16mm）、更に固定ボルトの数を 12 本（M8） \rightarrow 24 本（M10）へ 2 倍にしてピッチを狭くし、ボルト間にうねりが生じないように変更した。しかし、改修後も以前と同じ 1.5MPa 附近で漏洩が確認された。

低温分野でこれまでのインジウムシールの使用実績は、全て 0.97MPa 以下であり 4MPa の圧力レベルを封じることはインジウムシールにとっては未知の領域で

あった。

本試験により、インジウム自体にはスプリングバックの反力は皆無であり、PC の許容締め付けトルクは 7.84N \cdot m と低く、更に PC の歪みの大きさを考えると、1.5MPa 附近が液体窒素温度におけるインジウムシールの限界であることが確認できた。

シールからの漏洩は、シールそのものに反力がないために低温歪みに追従できないことが原因と考えられ、新たに図 15 に示すボルテックスシール、メタルジャケット（波形）シール、デルタシールを選定し、低温による実証試験を行った。しかしながら、検証を行った両シールは共に金属間のシールを目的としており、そのために反力が強く PC の締め付けトルクでは十分な潰し代が得られず、低温では 1.2MPa \sim 1.5MPa 付近で漏洩してインジウムシールとほぼ同じような結果であった。

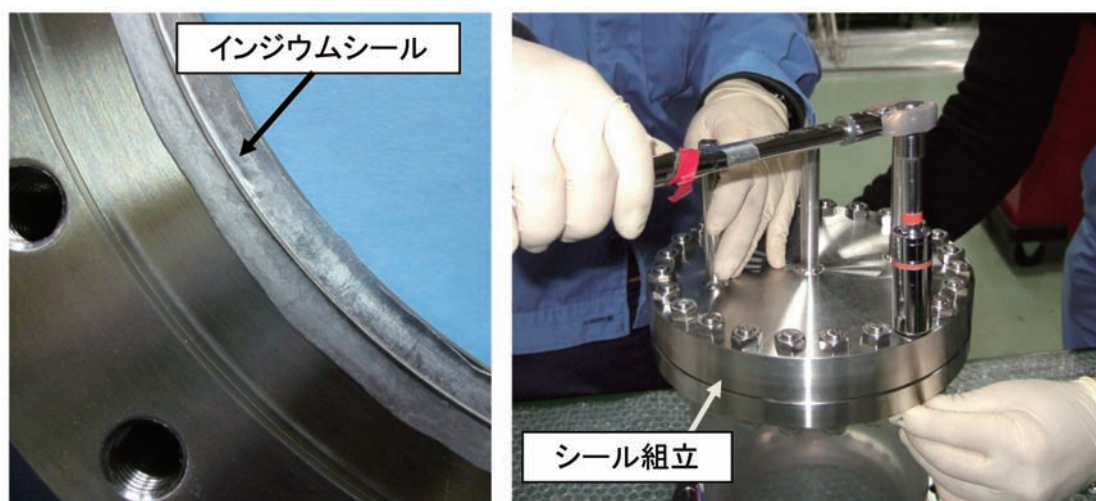


図 14 インジウムシールと組立



図 15 検証試験に用いたシール

6. 今後の予定

インジウムシールでは高圧に耐えられず、また PC では反力が強すぎてもシール性能は低下することが判明した。国内外の①～④の条件を満たすシールの選定を行い、今後極低温下での検証試験を再度行う予定である。

- ①PC に損傷を与えない材質であること。
- ②締め付けトルクは PC の許容値を超えないこと。
- ③シール圧力は 7MPa 以上であること。
- ④反力があり -196℃ の低温に使用できること。

一方、PC も現設計のネジ部では予定の強度が得られていないため、ネジ部の設計の見直し、ネジ部の加工精度（表面粗さ等）の見直しを含め再検討を行う。

今回確認ができなかった PC の低温脆性については、-100℃が限界と云われている。しかし、メーカーには根拠となる極低温のデータは皆無であり、しかも単純に温度のみが問題となるのか、低温における応力の繰り返しが影響するのかは全く不明である。従って、熱サイクル試験を行い劣化の状況を把握することも今後の課題と考えている。

7. 参考文献

- (1) 山田仁, 渡邊光男, 長谷川敏, 上條謙二郎, “極低温ポンプの二相吸込性能試験” 航空宇宙技術研究所報告, NAL-TR-870, (1985.8)
- (2) 渡邊光男, 長谷川敏, 島垣満, 永浦克司, 中村憲明, 橋本知之, 吉田義樹, “極低温ロケットポンプの入口流れの可視化について” 日本機械学会 2006 年次大会講演会論文集, (2006.9)
- (3) Ball, C.L., Meng, P.R., Reed, L., “Cavitation Performance

of 84 deg Helical Pump Inducer Operated in 37 deg and 42 deg Liquid Hydrogen” NASA, TMX-1360, (1967)

- (4) 芝軽粗材株式会社ホームページ, 材質物性表(その 2), <http://www.shibakei.co.jp/zaishitsu/zaishitsu2.htm>
- (5) 吉田義樹, 渡邊光男, 長谷川敏, 橋本知之, 島垣満, 山田仁, 志村隆, “JAXA 極低温インデューサ試験施設” ターボ機械, 第 33 巻 8 号, (2005.8)
- (6) 吉田義樹, 渡邊光男, 長谷川敏, 橋本知之, 島垣満, 山田仁, 志村隆, “JAXA 極低温インデューサ試験施設” 宇宙航空研究開発機構報告, JAXA-RR-05-042, (2006.3)
- (7) 永浦克司, 渡邊光男, 長谷川敏, 笹尾好史, 吉田義樹, 呉宏義, “同期旋回キャビテーション初生時の軸振動の挙動” 日本機械学会 2007 年次大会講演論文集, No.1610, (2007.9)
- (8) ダイナックス株式会社ホームページ, <http://www.dynax-jpn.com>

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-09-008

発行 平成 22 年 2 月 26 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (有)ノースアイランド

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 050-3362-6224 FAX : 029-868-2956

© 2010 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工作することを禁じます。



宇宙航空研究開発機構
JAXA

宇宙航空研究開発機構
JAXA

