

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

極低温ターボポンプ試験機（CTP-X-A）による 動的特性に着目したポンプシステム試験結果

Results of Pump System Test with Focus on Dynamic Characteristics
Using the Cryogenic Turbopump Testing Apparatus (CTP-X-A)

川崎 聡, 須和 直人, 林 奈央, 菊池 竜, 矢田 和之, 島垣 満

Satoshi KAWASAKI, Naohito SUWA, Nao HAYASHI, Ryu KIKUCHI,
Kazuyuki YADA and Mitsuru SHIMAGAKI

2019年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. 緒言	1
2. 試験設備と供試試験機	1
2.1. 試験設備	1
2.2. 供試試験機	2
2.3. 供試試験機の変更点	2
3. CTP-X-A 試験結果	3
3.1. 回転数上昇試験	3
3.2. 低流量比の減圧試験	5
4. 結言	6
謝辞	6
参考文献	6

極低温ターボポンプ試験機 (CTP-X-A) による 動的特性に着目したポンプシステム試験結果

川崎 聡^{*1}, 須和 直人^{*2}, 林 奈央^{*3}, 菊池 竜^{*1}, 矢田 和之^{*1}, 島垣 満^{*1}

Results of Pump System Test with Focus on Dynamic Characteristics Using the Cryogenic Turbopump Testing Apparatus (CTP-X-A)

Satoshi KAWASAKI^{*1}, Naohito SUWA^{*2}, Nao HAYASHI^{*3}, Ryu KIKUCHI^{*1},
Kazuyuki YADA^{*1} and Mitsuru SHIMAGAKI^{*1}

1. 緒言

ターボポンプはインデューサ、インペラ、タービン、軸受、軸封シールなどの複数要素から構成されるシステム機械であり、信頼性向上のためには個々の要素研究だけでなくシステムからの視点による研究が必要である。例えば、軸振動問題に対しては各要素が関連したロータシステムとしてのダイナミクスを理解した上で、解決策を検討する必要がある。また、実機運用を見据えた場合、極低温環境や高速回転環境における挙動を把握しておくことも必要である。しかし、液体ロケットの推進剤（液体水素や液体酸素など）を用いたターボポンプのシステム試験は、コストや安全性に関する負荷が非常に大きい。

一方、著者らはターボポンプの概念設計段階からダイナミックな特性を考慮してロータシステムの最適化を図る設計手法（ダイナミック設計⁽¹⁾）の研究を進めており、研究で得られた技術の有効性を確認するためのターボポンプシステム試験の実施が望まれていた。

このような背景から、実機に近い環境条件におけるターボポンプのシステム試験実施を目的に、JAXA角田宇宙センターの極低温インデューサ試験設備を改修し、極低温ターボポンプ試験設備 (CATTS: Cryogenic Advanced Turbopump Test Facility) として運用を開始した。2014年にターボポンプ試験機による初回試験シリーズ

を実施し⁽²⁾、その試験機の一部を変更・改良して2017年3月にポンプシステムの動的特性に着目した第2回試験シリーズを実施した。本稿では、第2回試験シリーズの結果をポンプシステムの動的特性の観点から整理して報告する。

2. 試験設備と供試試験機

2.1. 試験設備

Fig. 1に極低温ターボポンプ試験設備の系統図を示す。本設備は、ランタンクに充填した液体窒素を供試試験機を經由してキャッチタンクに流すtank to tank方式を採用している。試験機は1.4MW交流モータと増速機によって駆動され、実機ターボポンプと同レベルの高速回転

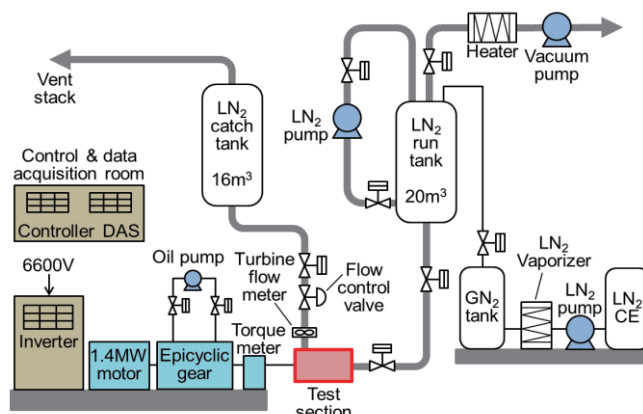


Fig. 1 Schematic diagram of the test stand: CATTS

doi: 10.20637/JAXA-RM-18-012/0001

* 平成 30 年 12 月 12 日受付 (Received December 12, 2018)

^{*1} 研究開発部門 第四研究ユニット (Research Unit IV, Research and Development Directorate)

^{*2} 研究開発部門 第四研究ユニット (Research Unit IV, Research and Development Directorate) (現 三菱重工業㈱)

^{*3} 研究開発部門 第四研究ユニット (Research Unit IV, Research and Development Directorate) (現 NTN ㈱)

を実現できる。モータ駆動のためタービンは設置できないが、それ以外は実機とほぼ同じ構造の試験機を、正確に回転数制御して運転することが可能である。

2.2. 供試試験機

極低温ターボポンプ試験設備における初回試験シリーズで使用した供試試験機（以下、CTP-X-0と呼ぶ。）の仕様をTable 1に示す。CTP-X-0は、推力30ton級（LE-5Bエンジンの約2倍）のエキスパンダーブリードサイクルエンジンをリファレンスエンジンとして設定し、その液体酸素ターボポンプを対象に設計された。

1次危険速度は定格回転数より上に十分離調するように設計され、初回試験シリーズにおいて定格回転数以下に危険速度がないことと軸振動が十分小さいことを確認している。

インデューサ部のケーシングには旋回キャビテーション抑制のための段差付きライナーを取り付けている。初回試験シリーズでは、定格流量の減圧試験においてキャビテーション不安定現象（旋回キャビテーションやキャビテーションサージなど）は確認されなかったが、

低流量比の減圧試験においては、Fig. 2に示すような強いキャビテーションサージが発生した⁽²⁾。

軸方向推力はバランスピストン機構を用いて自律調整させている。バランスピストンのNo.1オリフィスには、オーバーラップが可能な形態（Fig. 3(b)）が採用され、推力バランスが保てない状態においてもオリフィス部が接触しない構造となっている。本試験機はタービンが無い実機と比べてポンプ入口側への軸方向推力が若干増加するが、軸受冷却流路からのドレンラインによってインペラ背面側の圧力を低減させて調整している。

なお、設備や試験機の詳細については、参考文献(2)を参照されたい

2.3. 供試試験機の変更点

第2回試験シリーズでは、ポンプシステムの動的特性に着目した試験を実施するため、CTP-X-0にいくつかの変更を加えた。Fig. 3 に変更後の試験機（以下、CTP-X-Aと呼ぶ。）の模式図を示す。主な変更点は以下の通りである。

(1) 1次危険速度の変更（定格回転数以下）

試験機のロータダイナミック特性をより詳細に明らかにすることを目的に、意図的に1次危険速度を低下させ、危険速度通過時のデータ取得を試みた。インペラ背面の軸受支持部に設置した減衰機構（Fig. 3(a)）の剛性を下げ、1次危険速度を低下させた。なお、1次の振動モードはインデューサがふれまわるモードである。安達らの構築した軸振動解析コード⁽³⁾⁽⁴⁾を用いて危険速度を推定した結果、CTP-X-0からCTP-X-Aへの変更により1次危険速度は29,000rpmから14,000rpmに低下し、設計上は定格回転数20,000rpm以下にすることができた。なお、2次危険速度はCTP-X-0およびCTP-X-Aとも60,000rpm以上であり、定格回転数までの運転においては試験機の振動特性に影響しないと推測される。

(2) 軸受支持部の減衰機構

インペラ背面の軸受支持部には、中村らが考案した新しい構造の粒子ダンパ⁽⁵⁾⁽⁶⁾を設置した。Fig. 4にその基本構造を示す。

LE-7Aエンジンの液体水素ターボポンプでは、軸振動対策として軸受支持部にワイヤーメッシュダンパ⁽⁷⁾を採用している。ワイヤーメッシュダンパは、ワイヤー間の摩擦とワイヤーの変形を利用した減衰機構であり、極低温環境下で作動する機器には非常に有用である。しかし、ワイヤーの圧縮により

Table 1 Specifications of the testing apparatus: CTP-X-0

Turbopump	CTP-X-0	LE-5B LOX Turbopump
Revolution	20,000rpm	18,000rpm
Pump head (Pressure rise)	1410m (16.0MPa:LOX) (11.4MPa:LN ₂)	470m (5.2MPa:LOX)
Flow rate	0.044m ³ /s	0.024m ³ /s

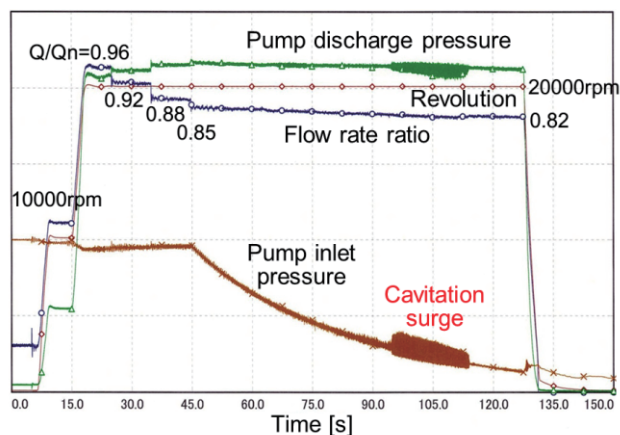


Fig. 2 Cavitation surge in the CTP-X-0 test ⁽²⁾

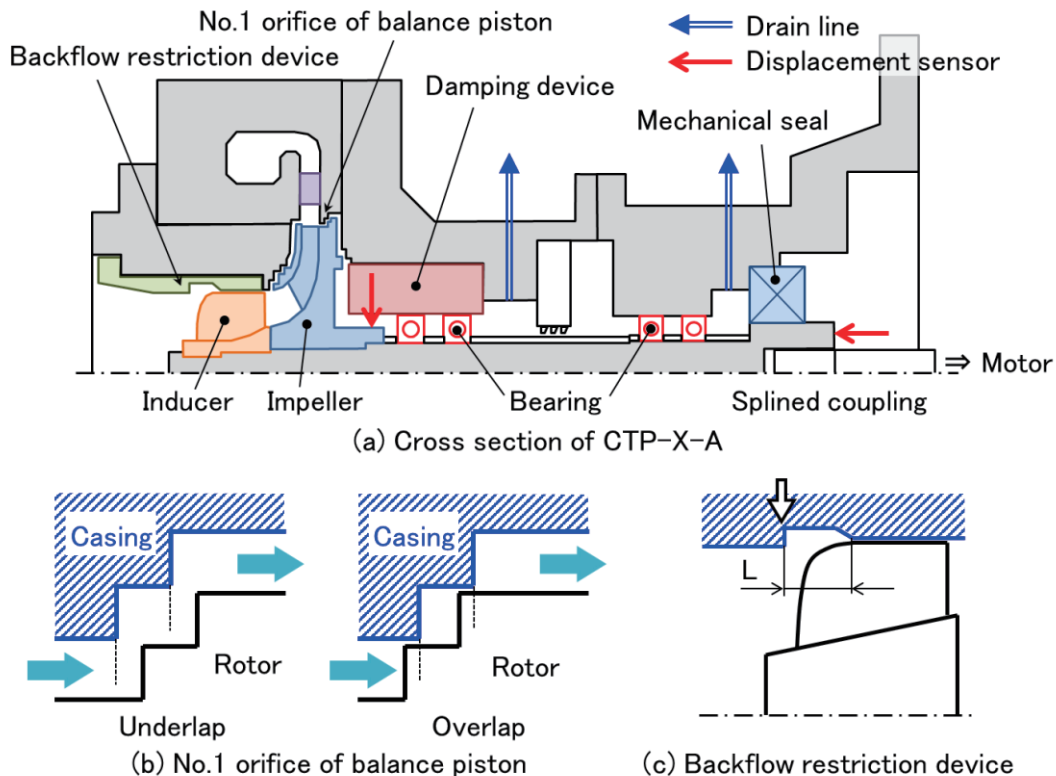


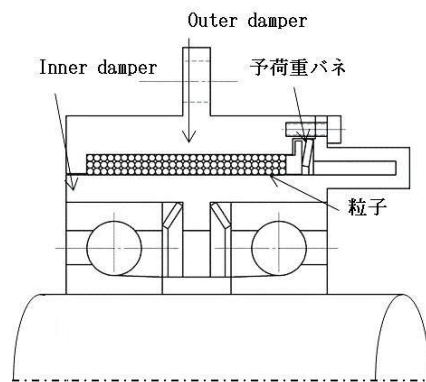
Fig. 3 Cross section of the testing apparatus: CTP-X-A

個体ごとの品質ばらつきが生じやすく、再現性も得られにくい点が課題である。一方、粒子ダンパは粒子間の摩擦を利用した減衰機構であり、極低温環境下での使用が可能、かつ品質ばらつきが少ないダンパとして期待されている。第2回試験シリーズでは、実機に近い環境条件において、この粒子ダンパの実現性確認を試みた。

(3) キャビテーションサージ抑制対策

これまでに、キャビテーション不安定現象の抑制技術としてケーシングトリートメントなどの対策が提案されており⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾、水流し試験で抑制効果が確認されている。CTP-X-A では、中野らが提案したシンプルで加工が容易な逆流返し付きケーシング形状⁽⁸⁾をインデューサライナに適用し、実機に近い環境条件における有効性の確認を試みた。

Fig. 3(c)に逆流返し付きケーシング形状の模式図を示す。中野らは、インデューサ入口に生じる逆流領域の中間の位置、もしくはそれより手前に逆流返しを設置し、キャビテーションサージ抑制効果を確認した。CTP-X-A においては、類似インデューサの可視化試験結果からキャビテーションサージ発生流量での逆流領域を推測し、その中間位置に逆流返しを設置した。

Fig. 4 A new structure of particle damper⁽⁵⁾⁽⁶⁾

3. CTP-X-A 試験結果

3.1. 回転数上昇試験

CTP-X-Aの動的特性を把握するため、初めに定格流量で回転数を上昇させる試験を実施した。ポンプ入口圧は十分高く設定し、試験機特性に影響を与えるようなキャビテーションが発生しない試験条件とした。Fig. 5に回転数上昇試験時の時系列データを示す。以下に、回転数上昇試験時に見られたCTP-X-Aの動的特性について整理して示す。

(1) No.1オリフィスのオーバーラップ

Fig. 5に示すように、回転数の上昇に伴ってインペラ出口圧 PIM やバランスピストンNo.1オリフィス下流圧 $POID$ が上昇し、軸方向推力バランスに応じてロータの軸方向位置 DA がポンプ入口側に移動している。CTP-X-0試験では定格20,000rpmまで運転できたが、CTP-X-A試験では14000rpmを超えてから急速にロータがポンプ入口方向に移動し、許容移動量を超えたために自動停止した。第2回試験シリーズでは、試験機の都合上、軸方向推力調整用ドレンラインの抵抗を初回試験シリーズの状態から変化させた。そのためポンプ入口方向への軸方向推力が増加し、高速回転時の推力バランスが保持できなくなったためと考えられる。

ロータの軸方向移動距離から検討すると、急速な軸方向移動時にはNo.1オリフィスはオーバーラ

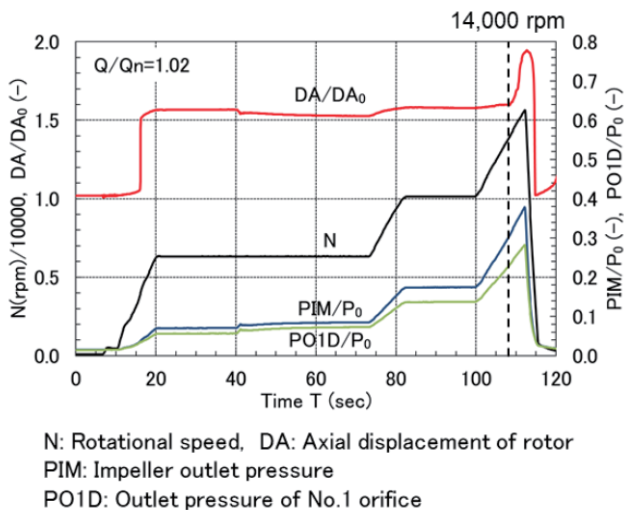


Fig. 5 Time series in rotational speed increase test

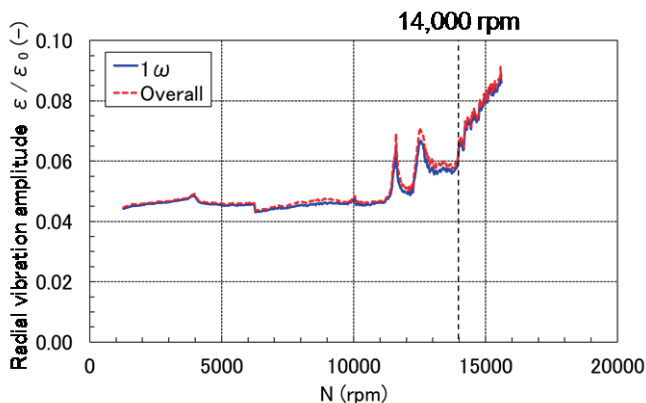


Fig. 6 Radial vibration in rotational speed increase test

ップ状態であったと推測される。Fig. 3(b)に示すように、アンダーラップ状態では、軸方向移動に対してオリフィス通過流路面積が大幅に変化し、オリフィス下流圧力を大きく変化させることが可能である。一方、オーバーラップ状態では、オリフィス通過流路面積は一定でオーバーラップ長さ変化による摩擦損失の変化のみであるため、推力調整能力はアンダーラップ状態と比べて低下する。このためオーバーラップ状態に入った直後にロータが急速にポンプ入口方向へ移動したと考えられる。

実機ではバランスピストンのオリフィス部の接触回避のため、オーバーラップが可能な形態を選択する場合があるが、軸方向推力バランスが崩れてオーバーラップした場合、ロータがポンプ入口方向へ急速移動する危険性があることが分かった。この点については、ターボポンプの設計や運用においては十分注意する必要がある。

(2) 軸振動

Fig. 6に回転数上昇試験時の回転数に対する半径方向の軸振動振幅(回転同期成分とオーバーオール)の変化を示す。半径方向の軸振動はインペラ背面部の変位センサにて計測している(Fig. 3(a)参照)。12,000～13,000rpmに危険速度と見られる振動ピークが2つ見られる。また、14,000rpm付近から回転数上昇とともに振動振幅が急激に増加し、その振幅は危険速度通過時より大きい値を示している。

14,000rpmから振幅増加が生じていることから、バランスピストンNo.1オリフィスのオーバーラップ状態に関連した振動現象と推測される。No.1オリフィスがオーバーラップした状態は、半径が大きく非常に狭い環状隙間と同じ状態である。その隙間流れには、大きなロータダイナミック流体力が生じていると考えられる。また、No.1オリフィス部にはインペラ出口から強い旋回速度を持った流体が流入する。流体の旋回速度は隙間流れの流体力に強く影響し、特に流入する旋回速度がロータの周速度を超えるとロータ系に不安定な効果を与えることが知られている⁽¹²⁾。No.1オリフィス部では流入する旋回速度がロータの周速度を超えることはないが、旋回速度による影響についても注意する必要がある。

以上から、バランスピストンオリフィスのオーバーラップ状態では、大きなロータダイナミック流体力の作用による軸振動増加が予想されるため、軸方向への急速移動の問題とともに注意が必要である。

なお、回転数上昇試験において計測された1次

危険速度通過時やNo.1オリフィスのオーバーラップ状態での軸振動振幅は、本試験機の運転上は問題ないレベルであった。

(3) 1次危険速度

前述のように12,000～13,000rpmに危険速度と見られる振動のピークが2つ見られた。解析から推定した2次危険速度は60,000rpm以上であることから、2つ目の振動のピークが2次危険速度である可能性は極めて低い。このような現象は軸支持特性に異方性がある場合に見られるが、詳細については今後の解析で明らかにしたい。

2.3節(1)に示したように軸振動解析より求めたCTP-X-Aの1次危険速度は14,000rpmであった。試験結果は解析結果とおおよそ一致しており、安達らの構築した軸振動解析コード⁽³⁾⁽⁴⁾による推定は妥当であったと考えられる。

(4) 粒子ダンパ

1次危険速度通過時やNo.1オリフィスのオーバーラップ状態での軸振動振幅は運転上問題ないレベルに抑えられており、粒子ダンパによる減

衰がある程度効いていると推測される。また、第2回試験シリーズ後の分解点検において、粒子ダンパに大きな損傷や変形などは見られなかった。

振動特性(剛性や減衰)の解析や定量的な評価、耐久性の確認などが必要ではあるが、ある程度の減衰効果が見込めるダンパとして粒子ダンパの実機への適用実現性は十分あると考えられる。今後、実機適用に向けて要素試験や解析による設計データの収集を進める予定である。

3.2. 低流量比の減圧試験

3.1節で示した通り、第2回試験シリーズでは14,000rpm以上で軸方向推力がバランスしないため、13,000rpmにおいて低流量比の減圧試験を実施した。Fig. 7に、CTP-X-0とCTP-X-Aの減圧試験におけるポンプ入口変動圧のウォーターフォール図を示す。また、Fig. 8に計測値を時間平均化して処理した吸込性能曲線を示す。CTP-X-A試験時の流量比はCTP-X-0と比べて7pt程度低い条件であった。また、CTP-X-A試験では無次元キャビテーション数 $\sigma/\sigma_0=0.12$ までのデータ取得であったが、CTP-X-0試験においてキャビテーションサージが

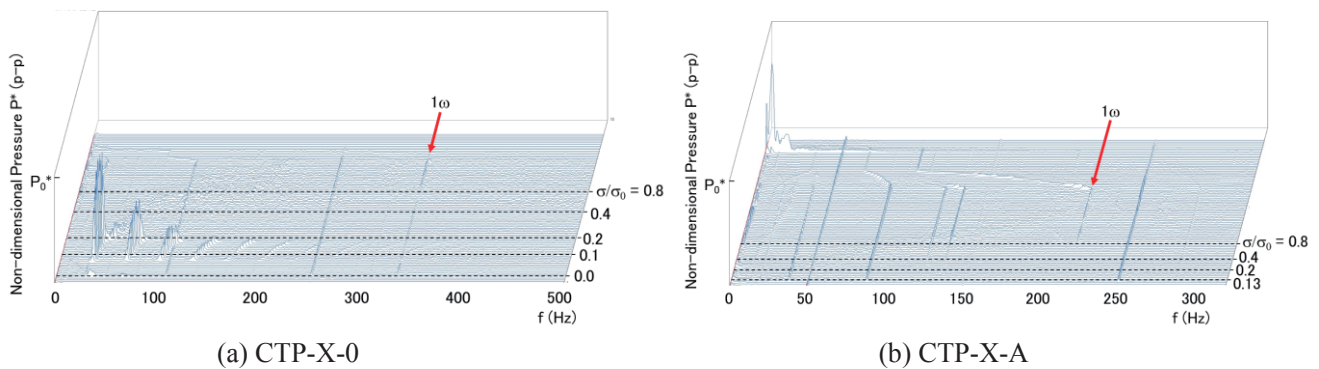


Fig. 7 Waterfall plots of pressure fluctuation at pump inlet under low flow rate condition

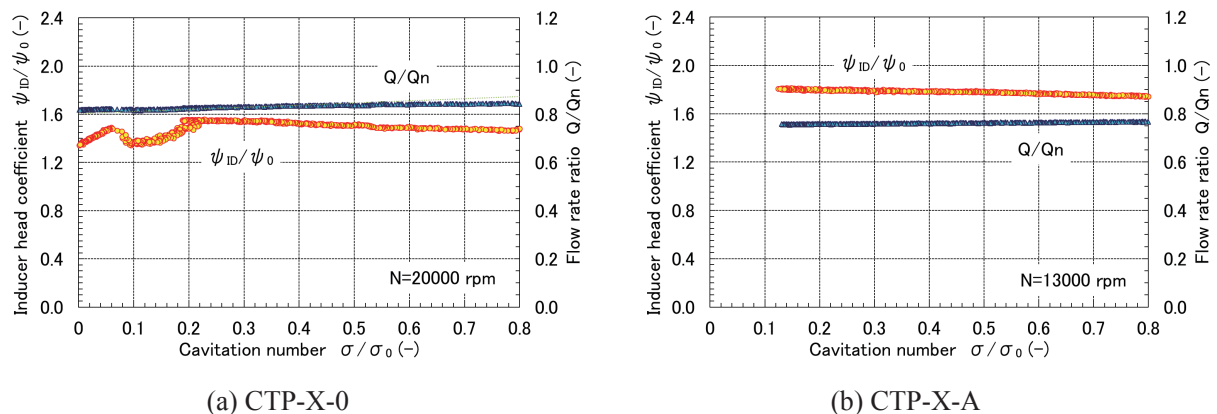


Fig. 8 Suction performance under low flow rate condition

発生したキャビテーション数範囲には達した。

Fig. 7から分かるように、CTP-X-0の試験では30～40Hzに強いキャビテーションサージの発生が確認できるが、CTP-X-Aの試験ではキャビテーションサージと考えられる圧力変動は観察されず、非常に安定した運転状態を示した。CTP-X-Aの試験はCTP-X-0の試験と比べて回転数は低いものの流量比は若干低流量比側であり、キャビテーションサージは発生しやすい流量条件であったと考えられる。従って、中野らの提案した逆流返し付きケーシング形状は実機に近い環境条件においてキャビテーションサージの抑制効果を有していると考えられる。

ロケットエンジンの高機能化のためにスロットリング(推力調整)機能の付加が求められ、ターボポンプに対しては低流量比運転能力の向上が望まれている。逆流返し付きケーシング形状は低流量比においても安定した吸込特性を示し、加工も比較的容易であることから、非常に有用な技術として期待できる。

4. 結言

ポンプシステムの動的特性に着目し、極低温ターボポンプ試験機(CTP-X-A)を用いた液体窒素による高速回転試験を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 試験機の軸支持剛性を下げ、1次危険速度の通過運転および通過時の振動特性計測ができた。今後のターボポンプのロータダイナミクスに関する有用な試験・計測が可能となった。
- (2) 試験結果より、実機に近い環境条件においても粒子ダンパは減衰効果を有すると推測される。今後、振動特性の定量的評価や耐久性確認などが必要ではあるが、実機への適用実現性は十分あると考えられる。
- (3) バランスピストンNo.1オリフィスのオーバーラップ状態におけるデータを取得し、オーバーラップ時に軸振動が大幅に増加することを確認した。今後、解析等によってオリフィスオーバーラップ状態でのロータダイナミック流体力を推定し、評価を進める予定である。
- (4) 中野らの提案した逆流返し付きケーシング形状をインデューサライナに適用し、実機に近い環境条件におけるキャビテーションサージ抑制効果を確認した。

謝辞

試験機の設計や製作に協力いただいた株式会社IHI、NTN株式会社、イーグル工業株式会社、および設備の制御に協力いただいた株式会社神戸製鋼所の関係各位に感謝の意を表す。また、設備運転や試験計測に尽力いただいたJAXA長谷川 敏氏、(一財)航空宇宙技術振興財団の永浦 克司氏、田村 努氏、前原 卓哉氏に深く感謝する。

参考文献

- (1) 内海政春, 島垣満, 川崎聡, ターボポンプのダイナミック設計(その2), ターボ機械, Vol. 41, No. 10(2013), pp. 578-585.
- (2) 川崎聡ほか, JAXA極低温先進ターボポンプ試験設備, ターボ機械, Vol. 43, No. 12(2015), pp. 707-713.
- (3) 安達和彦, 内海政春, 井上剛志, ターボポンプの形態設計のための線形振動モデリング, ターボ機械, Vol. 40, No. 7(2012), pp. 433-440.
- (4) 安達和彦ほか, 軸振動解析に基づくターボポンプの形態設計手法の開発, 第72回ターボ機械協会(大分)講演会 講演集, 大分(2014).
- (5) 中村智也, 平木博道, 内海政春, 粒子間摩擦を利用したダンパの研究, 第72回ターボ機械協会(大分)講演会 講演集, 大分(2014).
- (6) 中村智也, 内海政春, ターボポンプ用粒子ダンパの開発, 第59回宇宙科学技術連合講演会 講演集, 鹿児島(2015), 1B03.
- (7) 岡安彰, 太田豊彦, 尾池守, 藤田敏彦, LE-7用液水ターボポンプ軸系振動問題と対策, ターボ機械, Vol. 26, No. 8(1998), pp. 456-462.
- (8) 中野政隆, 川崎聡, 都丸裕司, インデューサの逆流返し付きケーシングによるキャビテーションサージ抑制, ターボ機械, Vol. 34, No. 1(2006), pp. 35-40.
- (9) Shimiya, N. *et al.*, Suppression of Cavitation Instabilities in an Inducer by J Groove, Trans. ASME, J. Fluids Eng., Vol. 130, No. 1 (2008), 021302-1.
- (10) Kang, D. *et al.*, Suppression of Cavitation Instabilities in an Inducer by Circumferential Groove and Explanation of High Frequency Components, Int. J. Fluid Machinery and System, Vol. 3, No. 2(2010), pp. 137-149.
- (11) Tsubouchi, K. *et al.*, Suppression of Cavitation Instabilities in an Inducer by Circumferential Groove with Swirl Breaker, Proc. 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, Tokyo, Japan(2015), AICFM13-120.

- (12) 岩壺卓三, 盛本成, 松本俊郎, ポンプ用平行環状シールの静および動特性の実験的研究(第2報, 同心ふれまわり時の動特性), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 55, No. 510(1989), pp. 317-322.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-18-012
JAXA Research and Development Memorandum

極低温ターボポンプ試験機(CTP-X-A)による動的特性に着目した
ポンプシステム試験結果

Results of Pump System Test with Focus on Dynamic Characteristics Using the Cryogenic
Turbopump Testing Apparatus (CTP-X-A)

発	行	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1 URL: http://www.jaxa.jp/				
発	行	日	平成31年2月8日			
電	子	出	版	制	作	松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

