

ISSN 0452-2982
UDC 621.454.2.043

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-519

液酸ターボポンプの起動試験

渡辺光男・長谷川 敏
菊池正孝・斉藤 隆

1983年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

液酸ターボポンプの起動試験*

渡辺 光 男** 長谷川 敏**

菊池 正 孝** 斉 藤 隆***

1. ま え が き

昭和52年度より、大型人工衛星打上げ用ロケットの第2段を対象としたターボポンプ式液酸・液水ロケットエンジンの開発研究が進められてきた。同エンジン用ターボポンプシステムに関しては、昭和52年度より航空宇宙技術研究所と宇宙開発事業団の共同研究として開発研究が進められ、昭和55年度にその原型が完成¹⁾した。その後、軽量化や耐久性^{2),3)}など実機ターボポンプに向けて多くの努力がなされている。

実機エンジンにおける大きな課題の1つに再着火の問題があり、現在様々な点にわたり検討が進められている。実機における第1回燃焼後の再着火時には、燃焼器からの熱侵入および太陽熱によりターボポンプはかなり昇温されていると考えられる。再着火時の液体酸素残量は少ない場合には約数パーセントと予測されるため、ターボポンプの予冷量はロケット性能に極めて大きな影響を持つものと考えられる。

予冷量をどこまで下げることができるかどうかを調べる第1ステップとして、起動時のターボポンプ軸受温度を上昇させた状態からの急速起動試験を行った。本報告はこの結果について示したものである。

2. 試験装置と試験方法

2.1 試験装置

本液酸ターボポンプの試験は航空宇宙技術研究所角田支所のターボポンプ試験装置にて行った。試験装置の系統を図2.1に示した。

試験にはポンプ流体として液体酸素を用い、ター

ビン駆動系には内容積300m³、常用最大圧力200kg/cm²の水素ガスカードル3基からの水素ガスを用いた。タービン操作盤を図2.2に、ポンプ操作盤を図2.3に示す。なおポンプ冷却過程のみを詳しく調べるために、ターボポンプを静止させた状態での予冷試験を行った。この試験系統図を図2.4に示す。この試験では5000ℓランタンクをガス窒素で加圧し、ポンプ予冷流量を一定に保った。またターボポンプはエンジンの艤装と用じ縦置きとした。

2.2 供試ターボポンプ

供試体は始動過渡試験では宇宙開発事業団の製作した実機型10トン級液酸ターボポンプ(T/P-120)を用いた。また縦置予冷試験では航技研の製作した第2次試作液酸ターボポンプ(T/P-80)を用いた。T/P-120はT/P-80のケーシング部を軽量化したものであり、回転系は全く同じである。第2次試作液酸ターボポンプ(T/P-80)の外観と構造の概略を図2.5に示した。またターボポンプの主要設計諸元を表2.1に示した。

表2.1 液酸ターボポンプ主要設計諸元

要 目	LOX T/P
回 転 数 (rpm)	16,500
ポンプ N P S H (m)	7.5
ポンプ吐出圧力 (ata)	52.5
ポンプ流量 (kg/s)	19.4
ポンプ効率 (%)	65.8
タービンガス量 (kg/s)	0.390
タービン入口圧力 (ata)	4.87
タービン出口圧力 (ata)	2.61
タービン入口温度 (K)	693
タービン効率 (%)	39.2

* 昭和58年7月18日受付

** 角田支所

*** 宇宙開発事業団

インデューサ付1段遠心ポンプと1段2列速度複式衝動タービンが主要部である。タービンの2列の動翼、ディスクならびに軸は一体構造であり、2個の自己潤滑玉軸受（保持器はアーマロン製）によって支持されている。2個の軸受は液体酸素により冷却され、主羽根車出口後面ケーシングにはめ込まれ

たフィルタを通過した液体酸素がタービン側軸受（以後軸受Bと記述する）ならびにポンプ側軸受（以後軸受Aと記述する）を冷却して主羽根車のバランスホールを通して主羽根車入口に戻る。ポンプ側液体酸素はペロー式メカニカルシールにより軸封される。タービン側ガス（本試験においては水素ガ

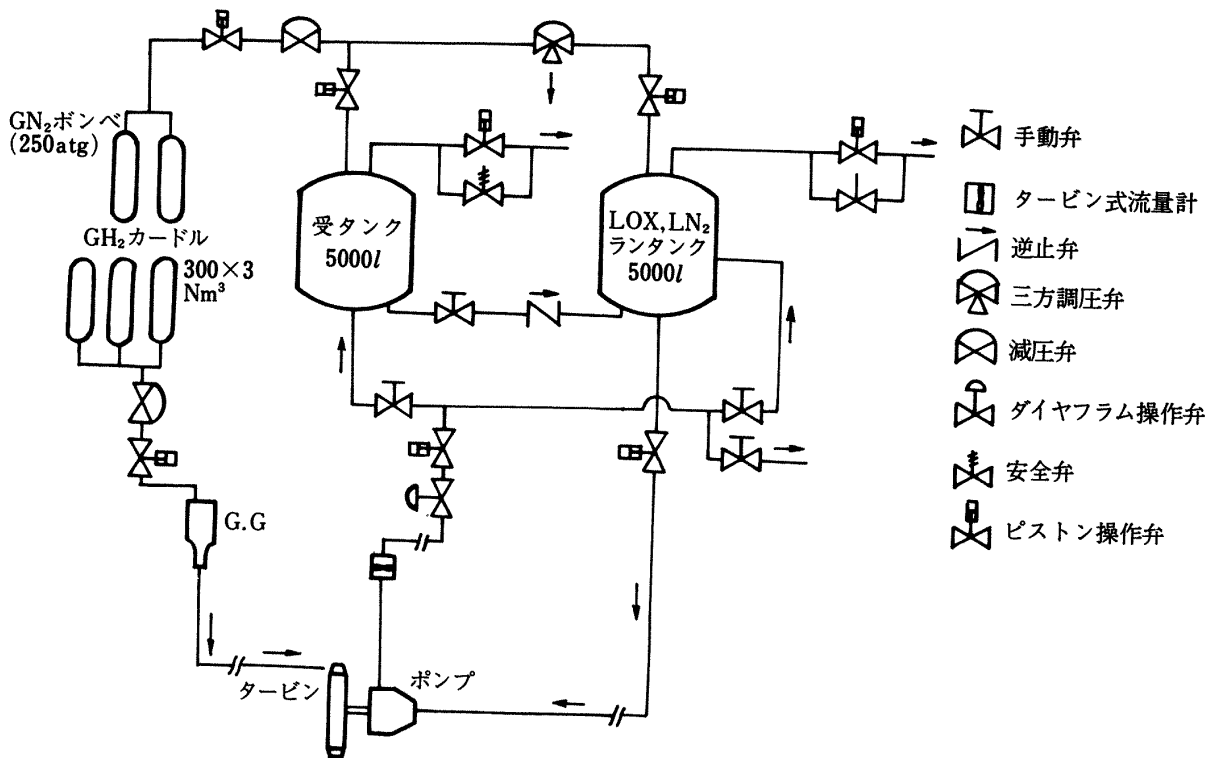


図 2.1 ターボポンプ試験系統図

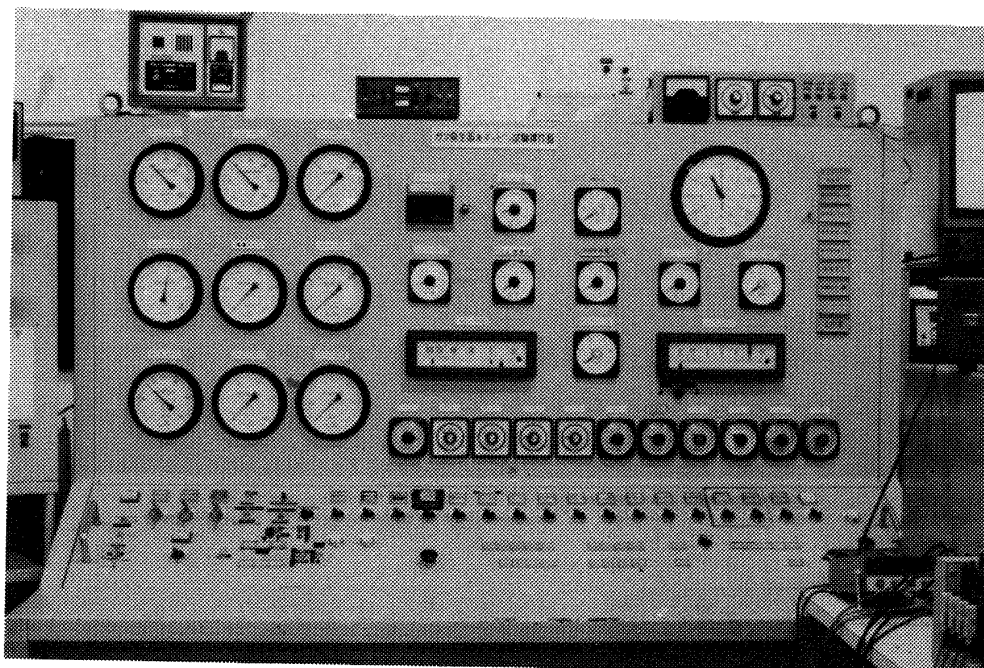


図 2.2 タービン操作盤

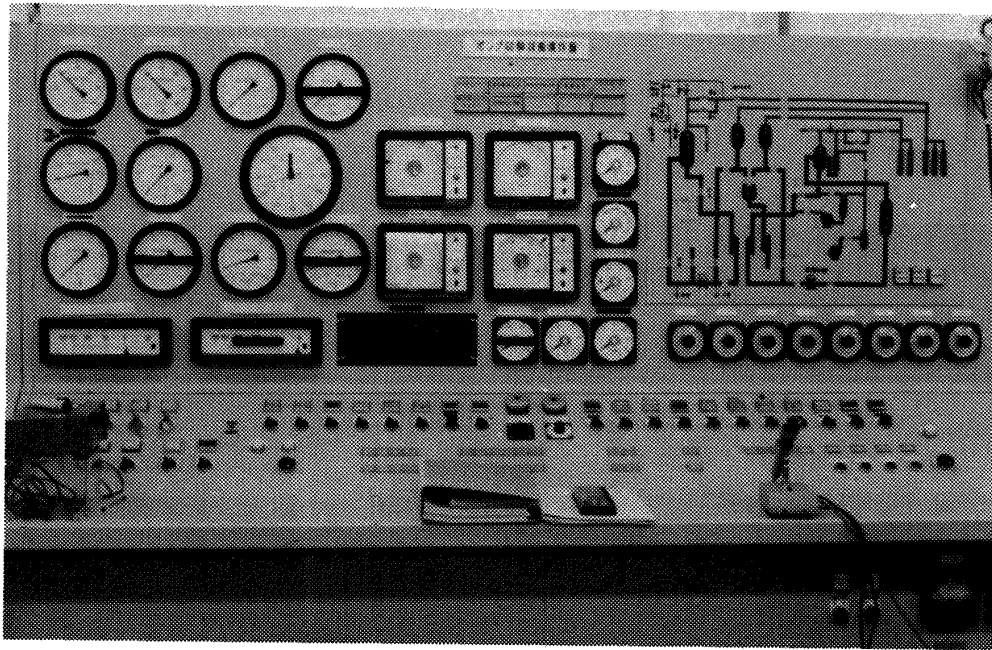


図 2.3 ポンプ操作盤

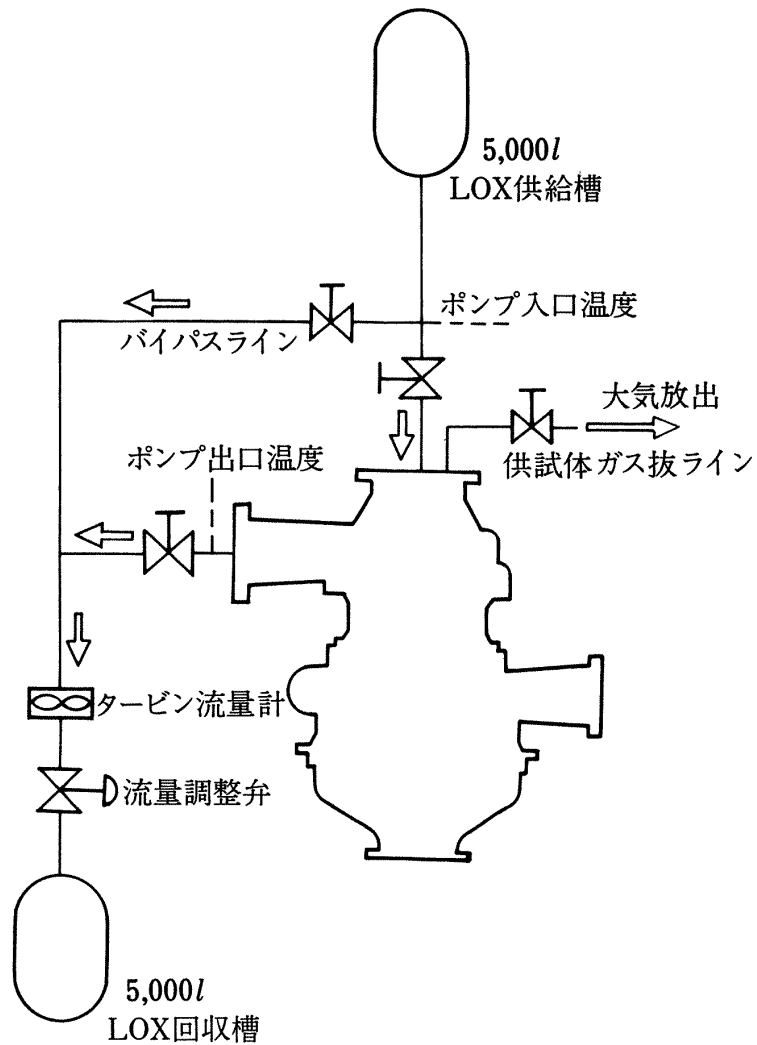


図 2.4 縦置予冷試験系統図

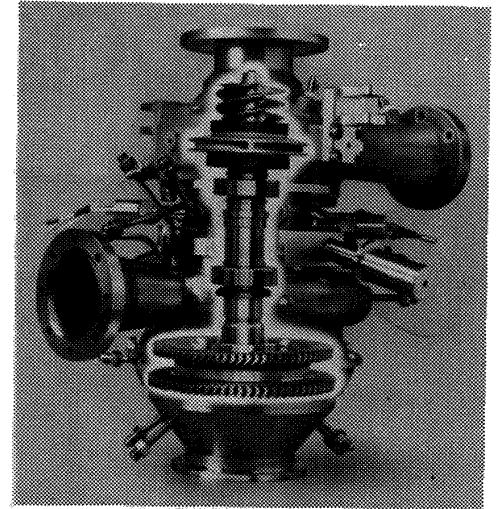
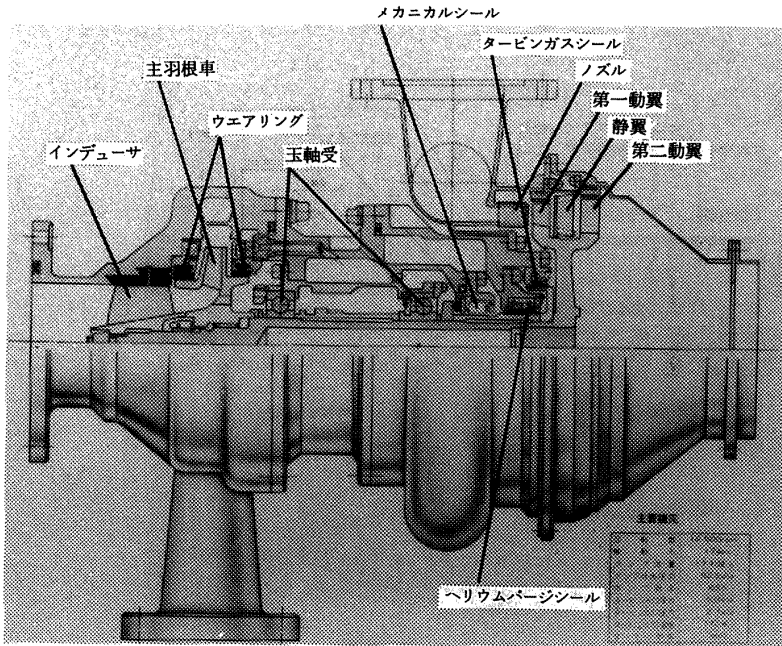


図 2.5 液酸ターボポンプ

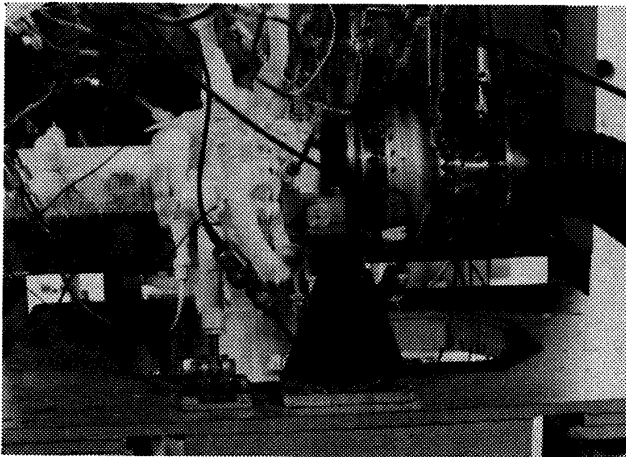


図 2.6 ターボポンプ始動過渡試験

スのみ) に対して動圧型セグメントシール(タービンガスシール)を用いている。メカニカルシールを漏れる低温ガス酸素とタービンガスシールを漏れる水素ガスを完全に分離するため、一对の動圧型セグメントシールを用い、シールリングの中央からヘリウムガスをパージしている。急速起動試験の外観を図 2.6 に示した。

2.3 計測装置

軸受を昇温しての始動過渡特性を調べるのに最も正確さを要求されるのは軸受温度およびポンプ入口、出口液温などの温度測定である。この測定には常温および低温用に銅、コンスタンタン非接触型熱電対

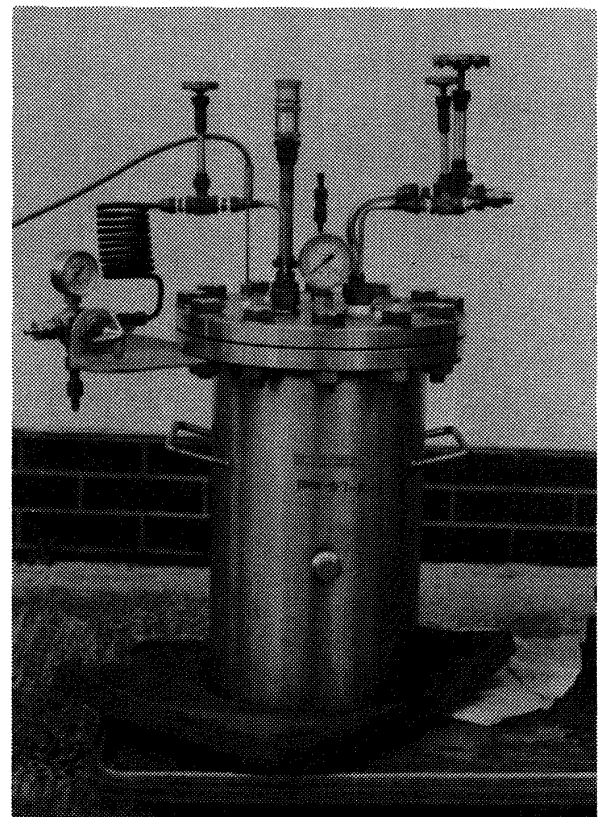


図 2.7 極低温温度校正装置外観

を用い、筆者らが製作した極低温用温度校正装置で校正した。この温度校正装置の外観を図 2.7 に、その概要を図 2.8 に示した。温度計を校正するに際してはまず容器内の液体窒素を一定温度の飽和状態に設定する。これは液体内にガス窒素を吹き込むこと

によって行う。この飽和状態の液体窒素に対する温度計の電気出力を測定する。飽和状態の液体窒素温度は文献4の値を用いた。

定常データは主にデジタル収録し、軸振動などの動的データは14チャンネルFMレコーダによりアナログ収録した。温度のデータはデジタル収録と同時

に監視用としてマルチペンレコーダに収録した。図2.9に計測装置を示す。

2.4 始動過渡試験(その1)

起動までにポンプ入口および出口温度がほぼ液温になるまでじゅうぶんに冷却した後第1回試験を行

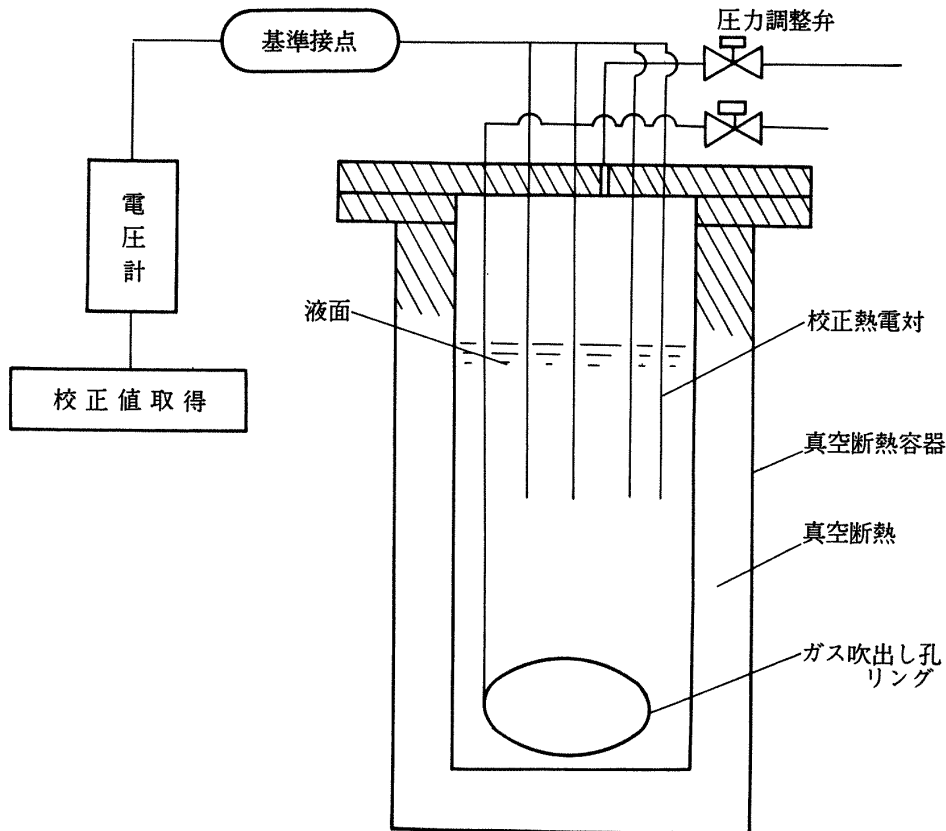


図 2.8 極低温温度校正装置概要

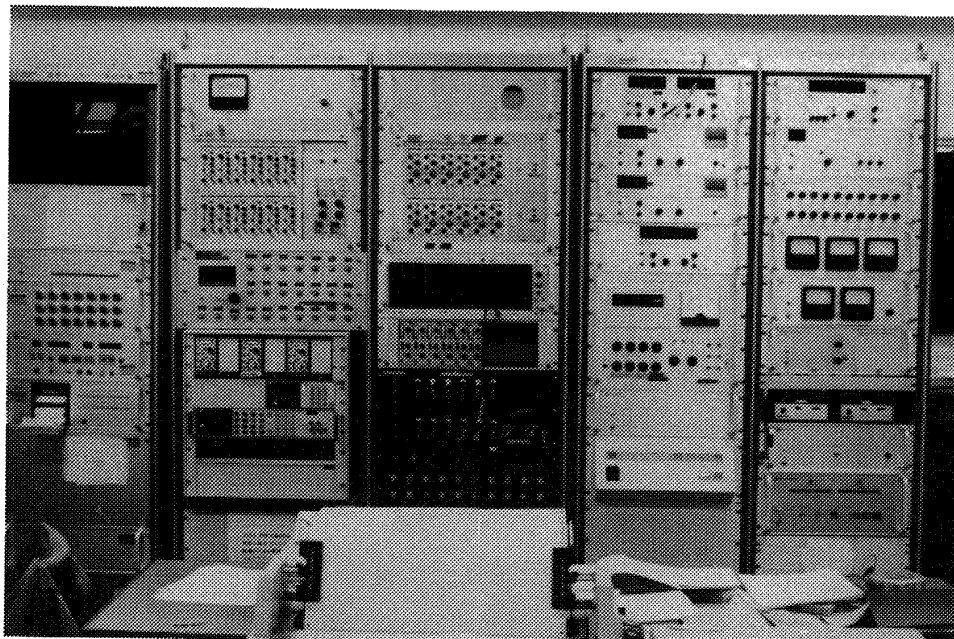


図 2.9 データ処理装置

った。この第1回試験（試験番号S-1，以後試験番号で記述する）では，軸受Bとメカニカルシールとの間からポンプの外部へ排出する軸受予冷ラインを使用して軸受の予冷を行った。

S-2では軸受予冷ラインを使用せず，ポンプ入口および出口配管の予冷のみで試験に移行した。

2.5 始動過渡試験（その2）

S-2の試験においてランタンク圧力および流量制御弁を起動条件に設定すると，予冷流量増大のた

めに試験の条件設定から起動までの短時間に軸受温度も低下してしまった。このためS-3～S-7の試験では，この起動直前の急激な温度降下を防ぐために推力バランス室（主羽根車と軸受Aの間）に常温のガス窒素を吹き込み，軸受予冷ラインから排出させてポンプおよび設備配管の予冷と平行して軸受の昇温を行い，任意の温度条件に達した後にターボポンプを起動した。昇温用ガス窒素パーズ系統を図2.10に示す。なお起動直前にガス窒素入口弁を閉，出口の排出弁を開の状態に軸受室内を酸素雰囲気

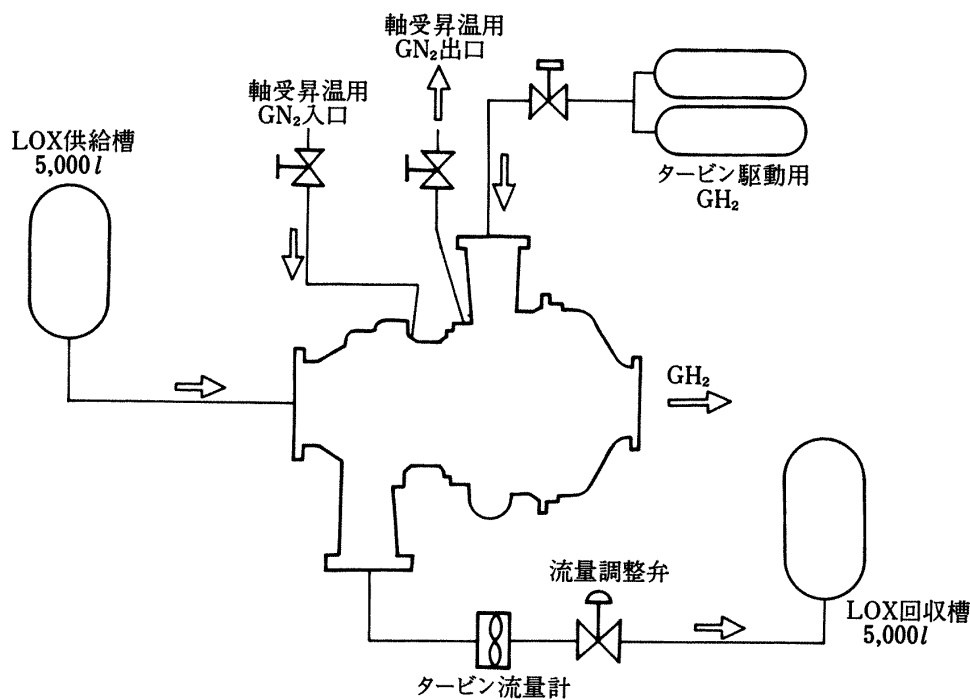


図 2.10 軸受昇温用ライン系統図

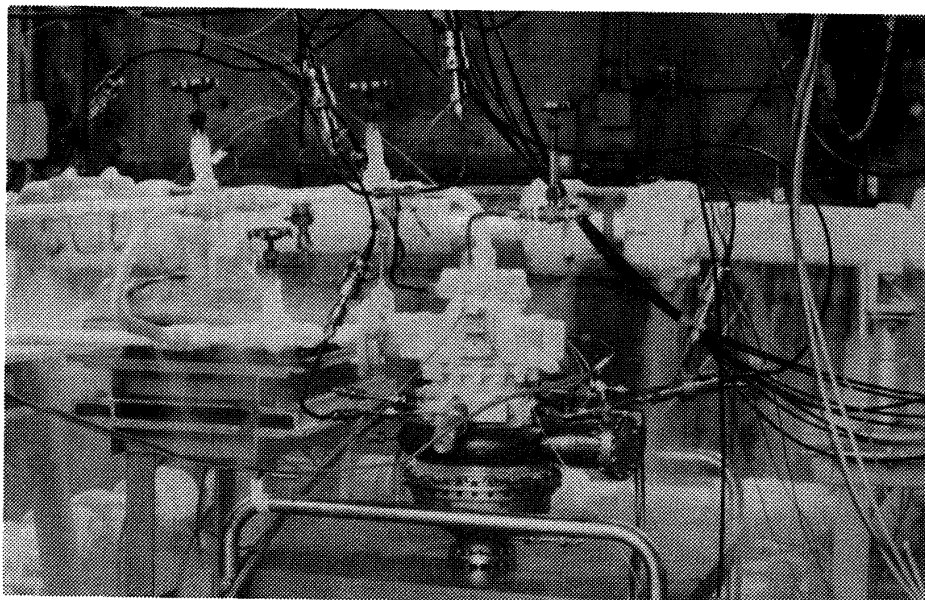


図 2.11 縦置予冷試験

戻した後に起動させた。

2.6 縦置予冷試験

縦置予冷試験は図 2.4 のようにポンプ入口直前から出口直後へ設備配管予冷のための予冷バイパスラインを設け、ポンプ本体の予冷時間が設備配管予冷などに影響されないよう配慮した。まず試験番号 V-1 では、あらかじめバイパスラインを通して入口管および出口管をじゅうぶんに予冷した後にターボポンプを常温から予冷を実液にて行った。V-2 は V-1 の試験の後にターボポンプを昇温し、任意の軸受温度に達した時点から再予冷を開始した。V-3 は V-2 と同じ手順で再予冷の試験を行った。試験外観を図 2.11 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 始動過渡試験(その1)

ターボポンプ急速起動時におけるデータを図 3.1, 図 3.2 に示す。表 3.1 は起動直前の軸受温度と回転時の軸振動の回転同期成分の最大値ならびに定常運転時の軸振動の関係を示したものである。

S-1 は軸受予冷ラインを使用して軸受 A, B を

じゅうぶんに冷却した場合である。S-2 でもポンプ入口, 出口温度を実液温度付近までじゅうぶんに予冷すると, 軸受 A 温度は起動条件をじゅうぶんに満足するまでに降下する。軸受 B については予冷速度が若干遅くなるが, 試験条件セット(ランタンクを加圧し, 流量制御弁の開度の設定)とはほぼ同時に温度は急速に降下する。

本試験の軸振動データを図 3.3, 図 3.4 に示す。データは軸変位計と軸間の距離および軸振動の両振

表 3.1 起動直前の軸受温度と軸変位

試験番号	起動直前の軸受温度		最大軸変位	定常軸変位
	軸受 A(℃)	軸受 B(℃)	* (μm)	(μm)
S-1	-181	-180	23	20
S-2	-170	-170	22	20
S-3	-172	-168	47	23
S-4	-120	-144	42	22
S-5	-150	-168	20	16
S-6	-98	-84	24	20
S-7	-57	-57	42	24

* 回転同期成分の最大値

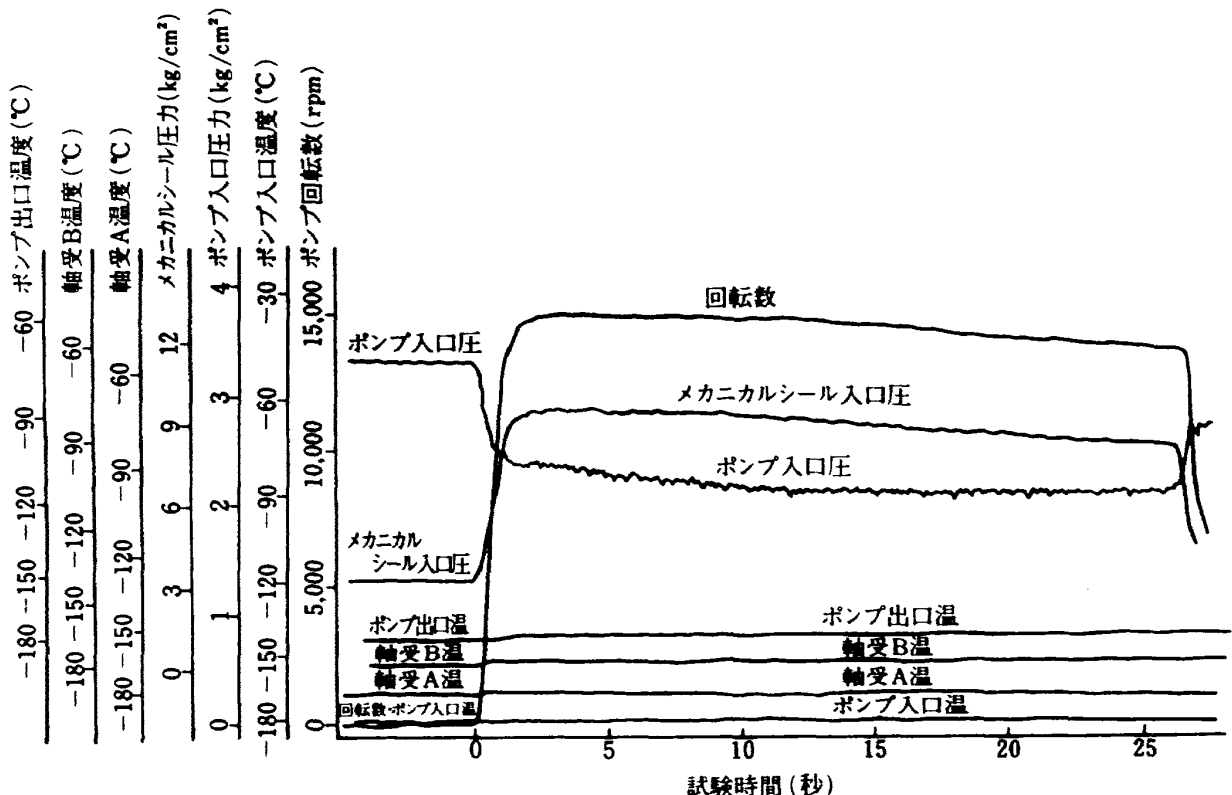


図 3.1 急速起動試験 (S-1)

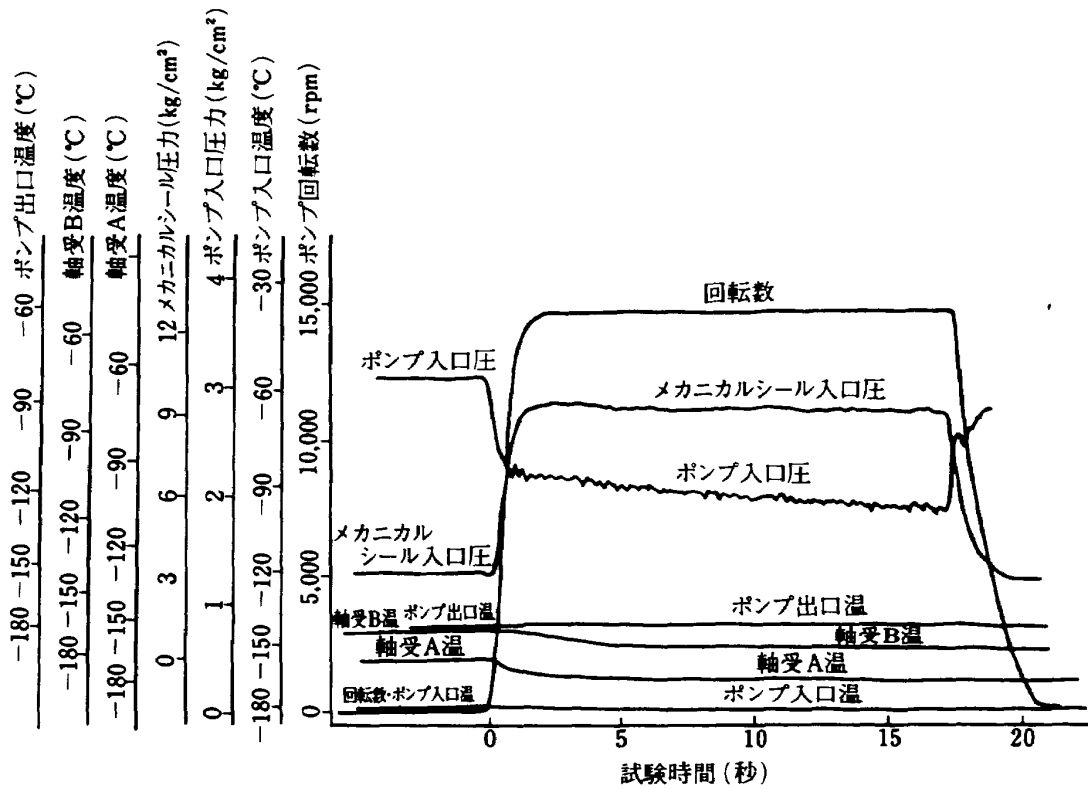


図 3.2 急速起動試験 (S-2)

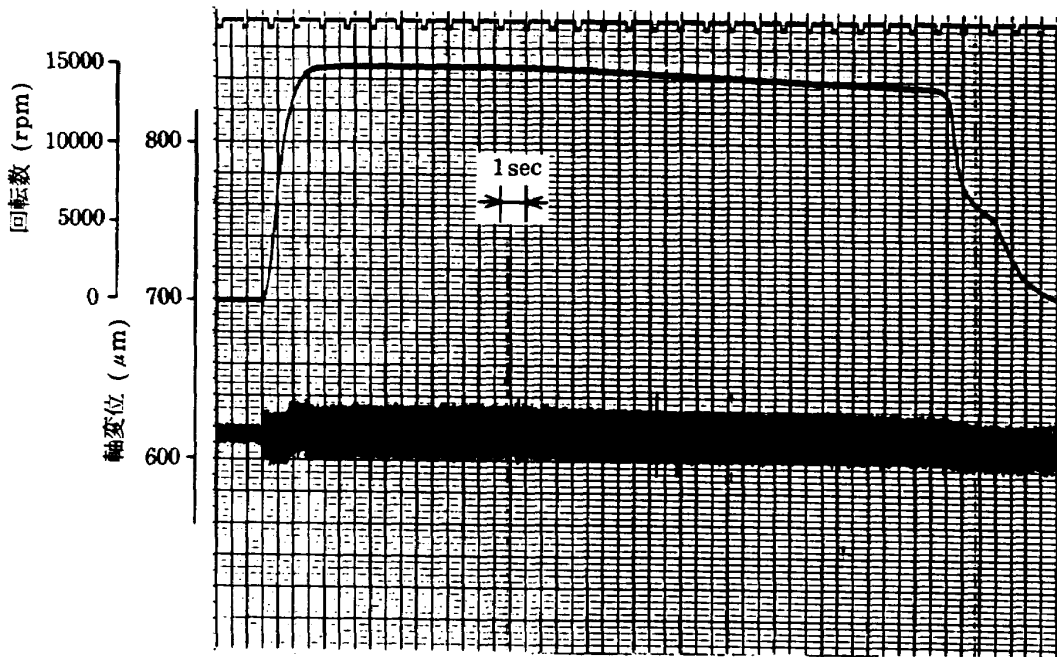


図 3.3 軸振動 (S-1)

幅を示している。軸受予冷ラインを使用し、ポンプケーシングおよび軸受をじゅうぶんに実液温度まで冷却したS-1では回転の立上り速度（ $N = 0 \rightarrow 15000\text{rpm}$ の立上り約2秒）に関係せず軸振動は小さい。起動時に予冷が不足しているS-2については、軸が変位計から離れる現象が認められた。この現象は起動後の急激な温度変化による軸系およびケ

ーシングなどのひずみによるものと考えられる。

3.2 始動過渡試験（その2）

図 3.5, 図 3.6, 図 3.7はポンプ予冷と平行して軸受A, Bにガス窒素を吹き込み強制昇温した場合のデータである。

起動時軸受温度が最も高いS-7においても、他

の試験同様にポンプ起動後約 0.5 秒で軸受 A, B 温度とも急速に降下する。この起動とはほぼ同時の軸受温度の降下は軸受の焼付きを防ぎ、酸素雰囲気中の急速な酸化、あるいは着火などの危険性を極めて小さくする結果となっている。

図 3.5, 図 3.6, 図 3.7 に見られるように軸受 A が軸受 B より若干遅い温度降下を示すのは、起動後

予冷液が主羽根車を出た後、軸受 B から軸受 A に流れ、バランスホールを通り主羽根車の入口へ戻る構造の影響と考えられる。軸受 B については起動と同時に温度が急速に低下したあといくつかの山なりの温度上昇と低下を示している。これは急速起動による軸受 B の発熱量が瞬間的に冷却量を上回ることを示唆している。軸受 A の様相が異なるのは軸受の位

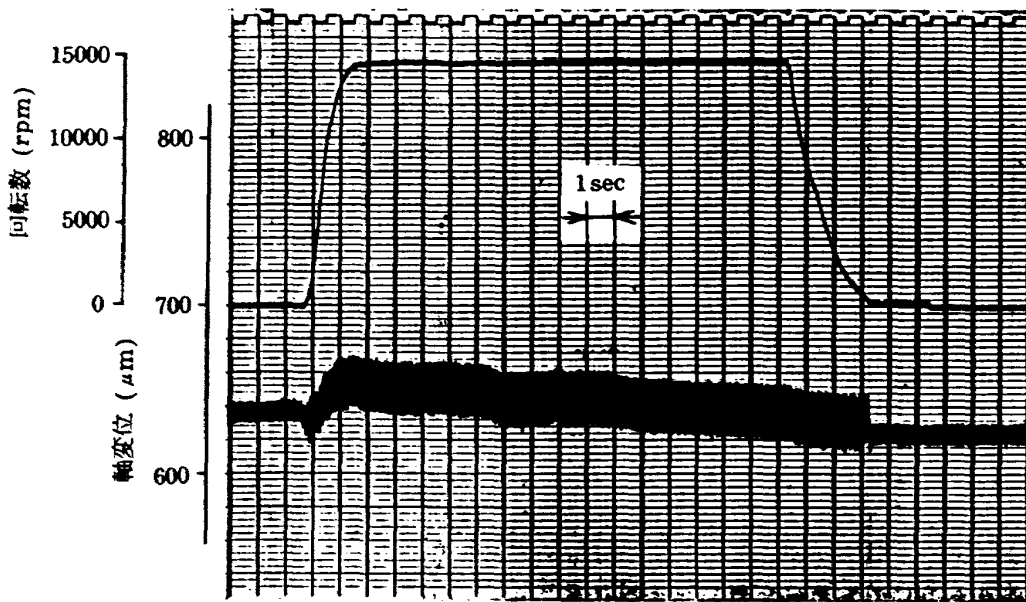


図 3.4 軸振動 (S-2)

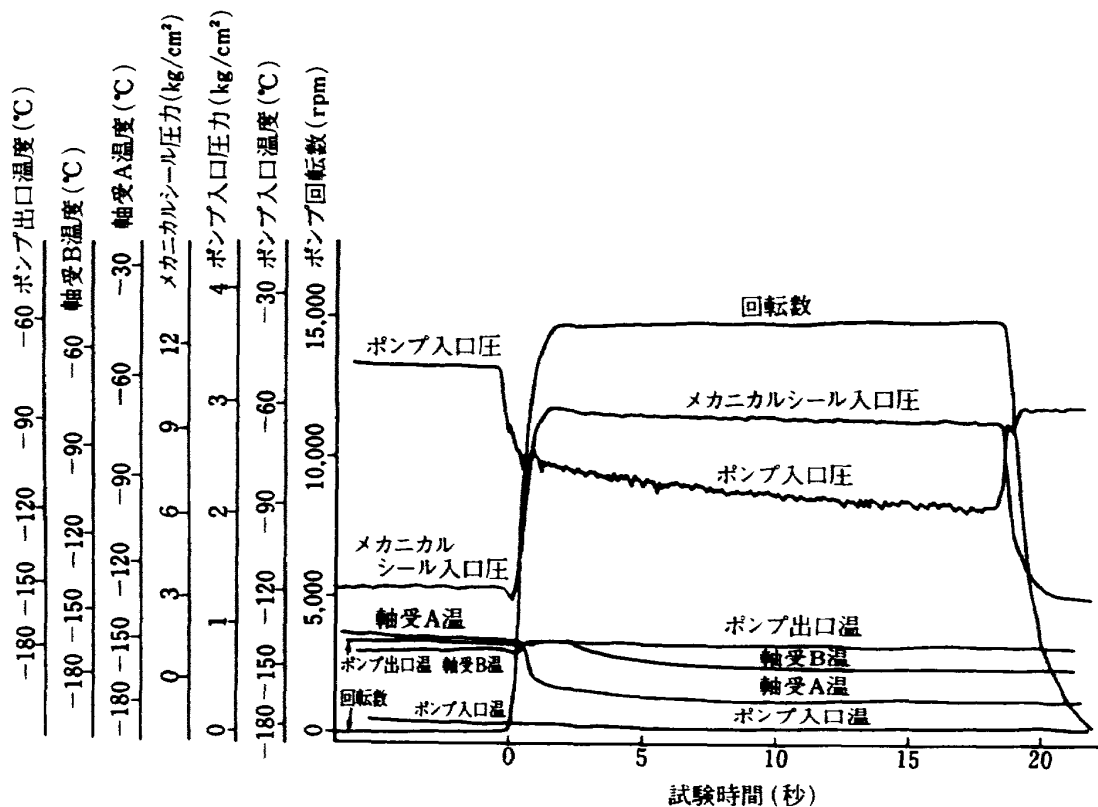


図 3.5 急速起動試験 (S-5)

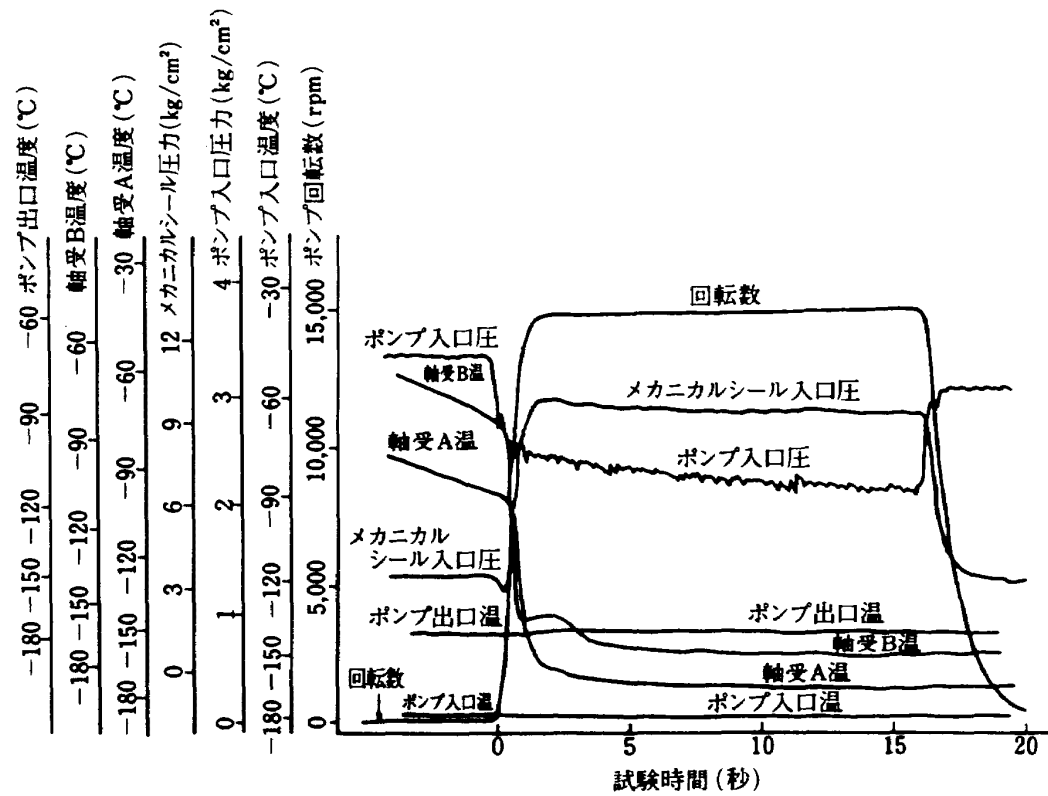


図 3.6 急速起動試験 (S-6)

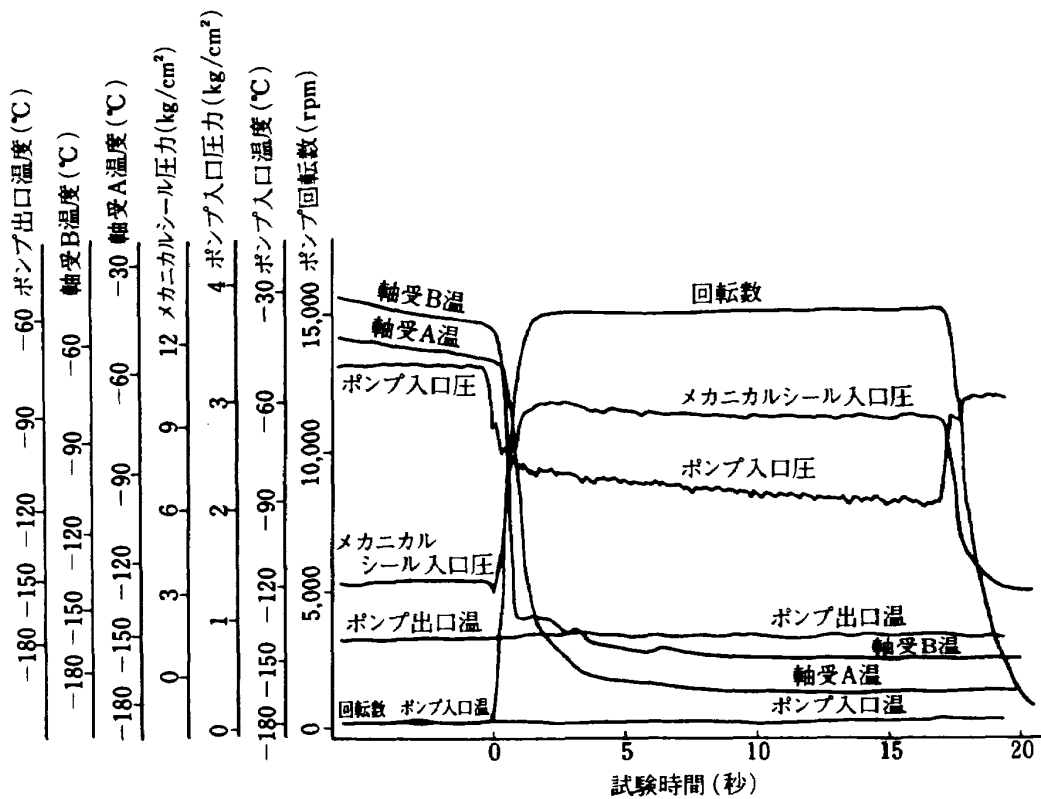


図 3.7 急速起動試験 (S-7)

置が主羽根車に近く、ケーシングおよび軸がじゅうぶんに冷却されていることが要因と推察される。

表 3.1 において、起動直前の軸受温度と軸振動は単純な相関関係にはないが、予冷がじゅうぶんでない条件での起動は軸振動に悪影響を与える傾向は明確である。

図 3.8、図 3.9、図 3.10、図 3.11、図 3.12 に軸振動データを示す。S-3 の試験では起動直前の軸受 A、B 温度は約 -170°C で起動時最大軸振動が約 47 ミクロンと大きい一方、S-6 の試験では軸受 A、B 温度は約 -90°C で軸振動が約 24 ミクロンと小さく逆の結果を示している。この -90°C まで昇温

した S-6 の軸振動の値は、軸受予冷ラインを使用しじゅうぶんに冷却した S-1 の試験とほぼ同一の結果となっている。このように本試験に関するかぎり、起動直前の軸受温度と起動時の軸振動の関係を明確にすることはできなかった。

起動直後に軸振動が大きい S-3、S-4、S-7 の試験においても、起動後約 6~7 秒で軸振動は安定する。この時間は軸受 A、B 温度が起動後に安定するまでの時間とほぼ一致する。これは急激な温度変化による軸系およびポンプケーシングのひずみが大きな要因と推察される。

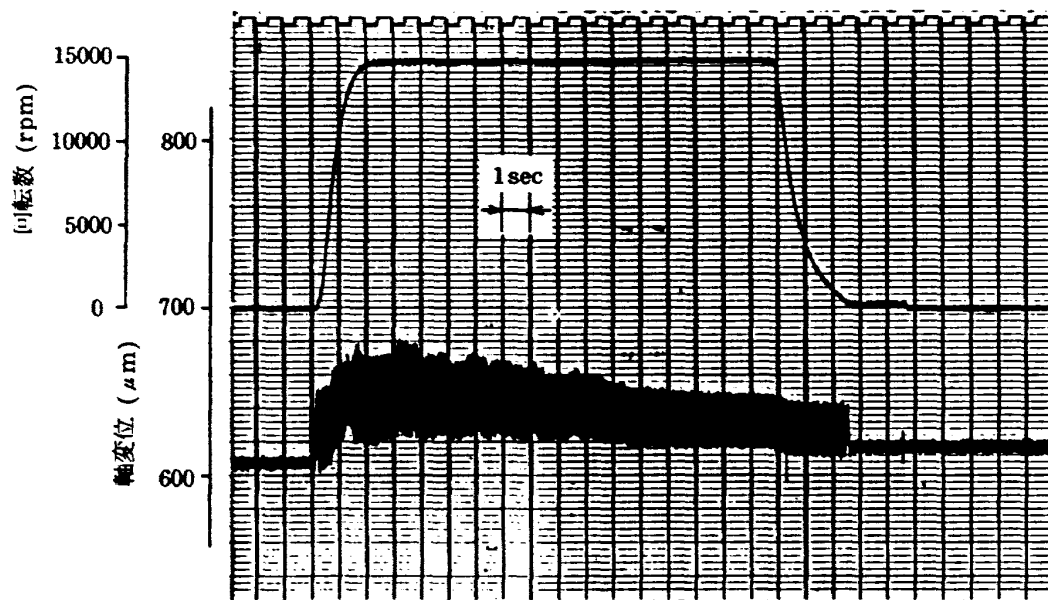


図 3.8 軸振動 (S-3)

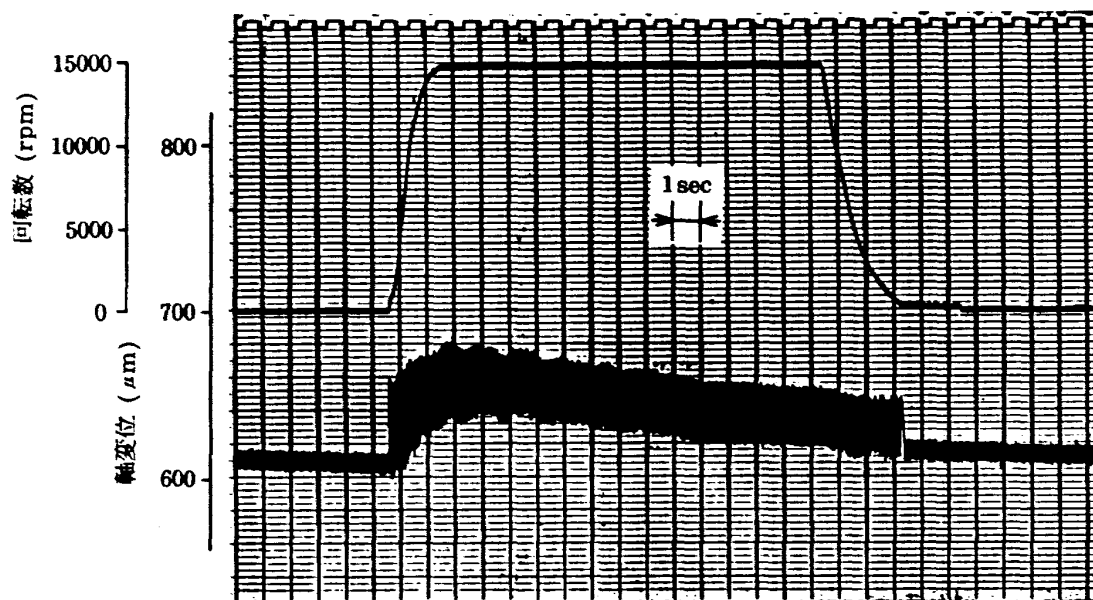


図 3.9 軸振動 (S-4)

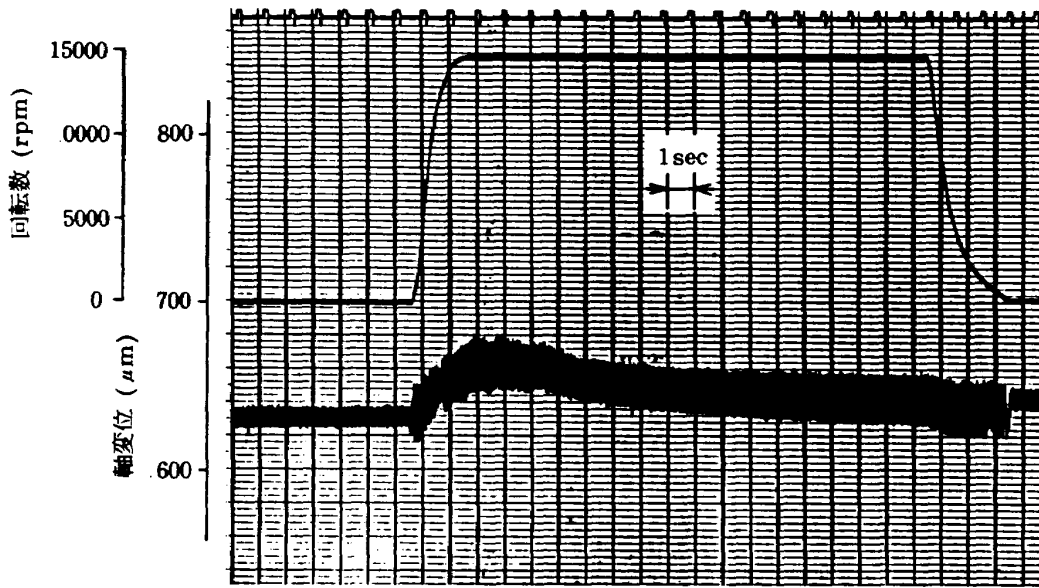


図 3.10 軸振動 (S - 5)

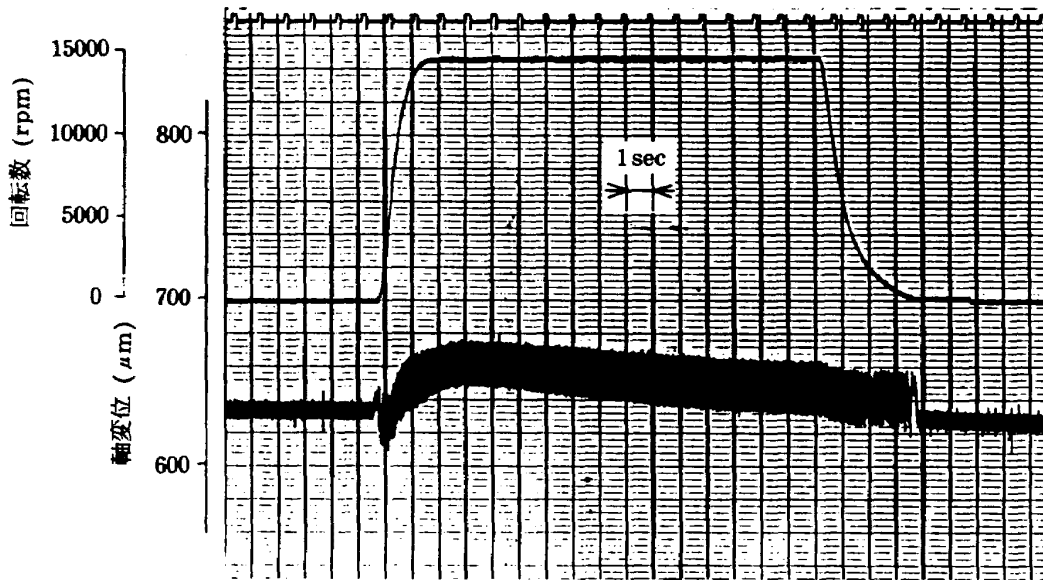


図 3.11 軸振動 (S - 6)

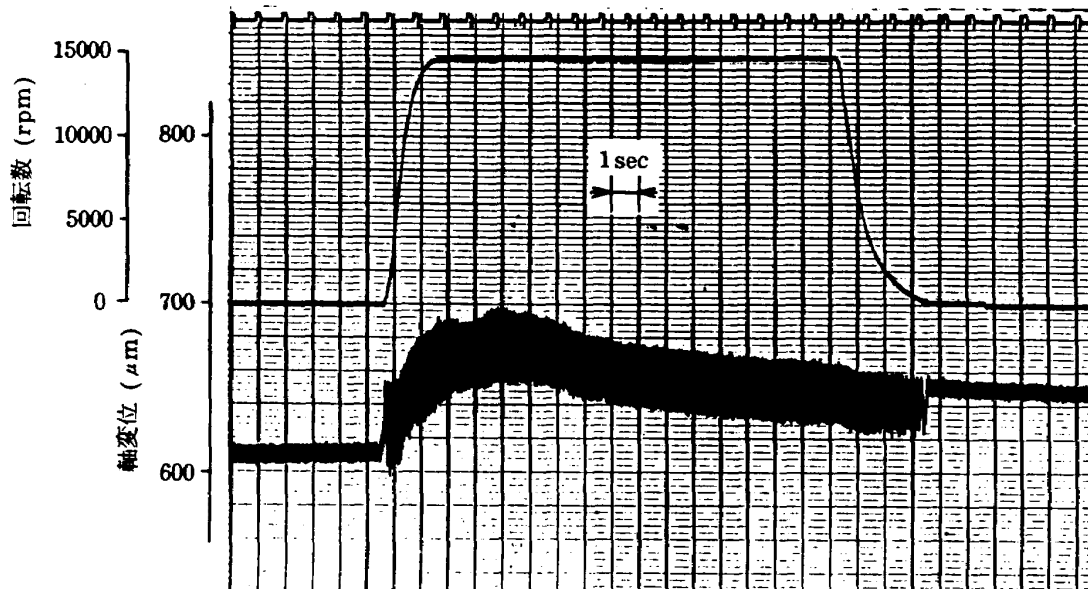


図 3.12 軸振動 (S - 7)

3.3 縦置予冷試験

縦置予冷試験の予冷状況を図 3.13, 図 3.14, 図 3.15 に示した。縦置予冷試験では始動過渡試験の横置予冷と比較すると、軸受 B の温度降下が極めて速い。この現象の違いは、横置では主羽根車に軸受 A が極めて近いためにポンプ入口側からの熱伝導の影響を受けやすい軸受 A の温度降下が速くなる。縦置では軸受 B の位置がポンプ下部になるために予冷液が溜まりやすく、ガスはポンプ上部の配管（実機ではタンク）へ逃げる構造上の影響が大きくなると考えられる。

実機での再着火時の予冷を想定すると、第 1 回燃焼後の再着火時には極めて微小の重力のみの状態と考えられ、さらに太陽熱などにより予冷開始時には配管およびポンプ内の酸素はケーシングとともに昇

温状態にあると推定される。このため一度予冷試験をしてじゅうぶんに供試体を冷却した後に昇温し、軸受 A, B 温度が約 -30°C になった時点から再予冷を開始した図 3.14 ならびに同じ手順で軸受 A, B 温度が約 -80°C の時点から再予冷を開始した図 3.15 の試験が実機ターボポンプの再着火時の予冷に近い状況にあるものと思われる。

図 3.13 および図 3.15 に見られるように予冷流量が少ない場合には、軸受 A, B 温度がほぼ液温近くまで降下し安定してもポンプ入口圧力に脈動が残る。圧力の脈動には設備配管の影響が大きい。予冷流量が限定される実機型ターボポンプでは軸受温度およびポンプ入口・出口温度だけでなく、ポンプ入口圧力の脈動の有無が予冷完了の判断基準として必要である。

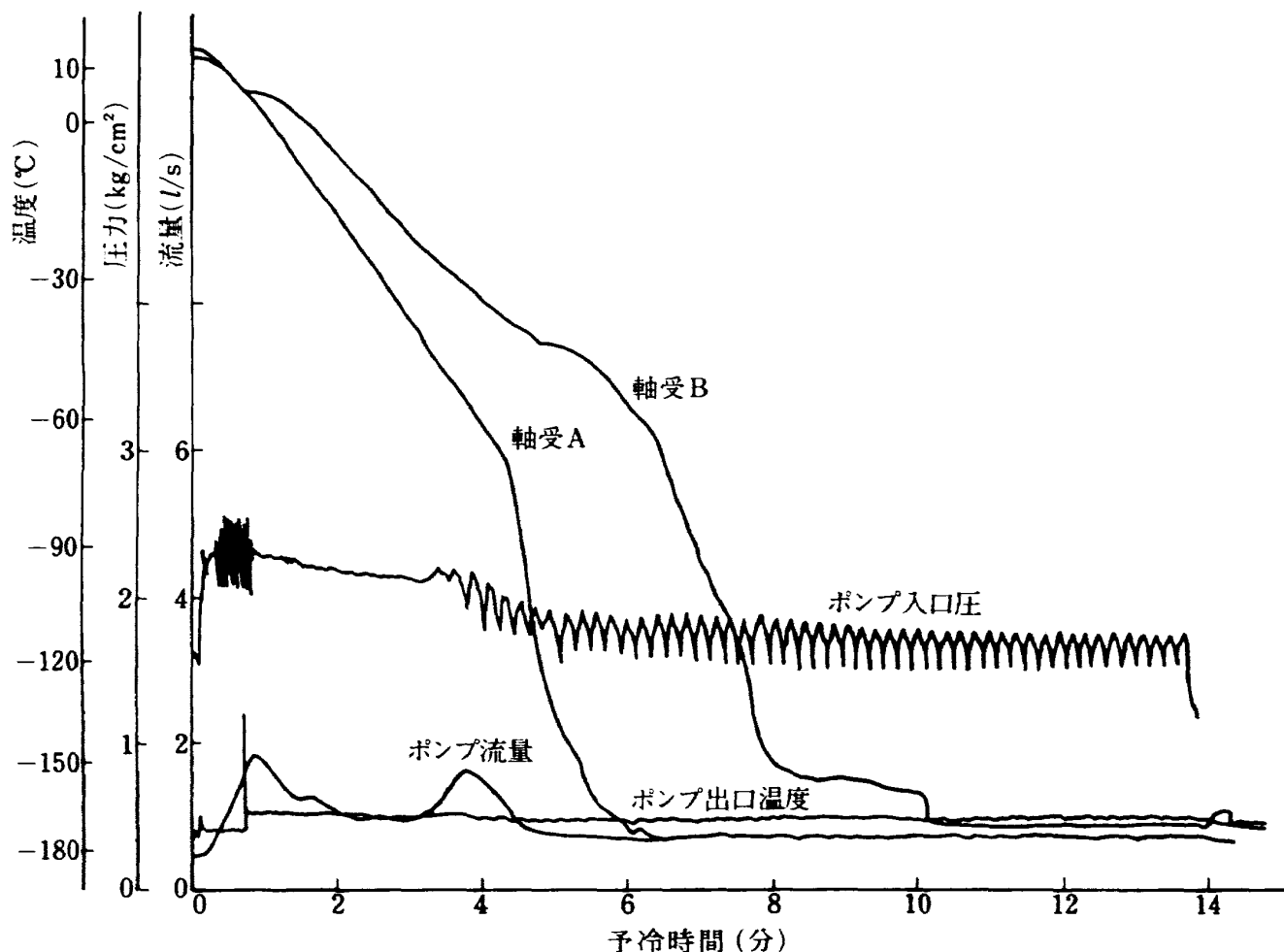


図 3.13 縦置予冷試験 (V-1)

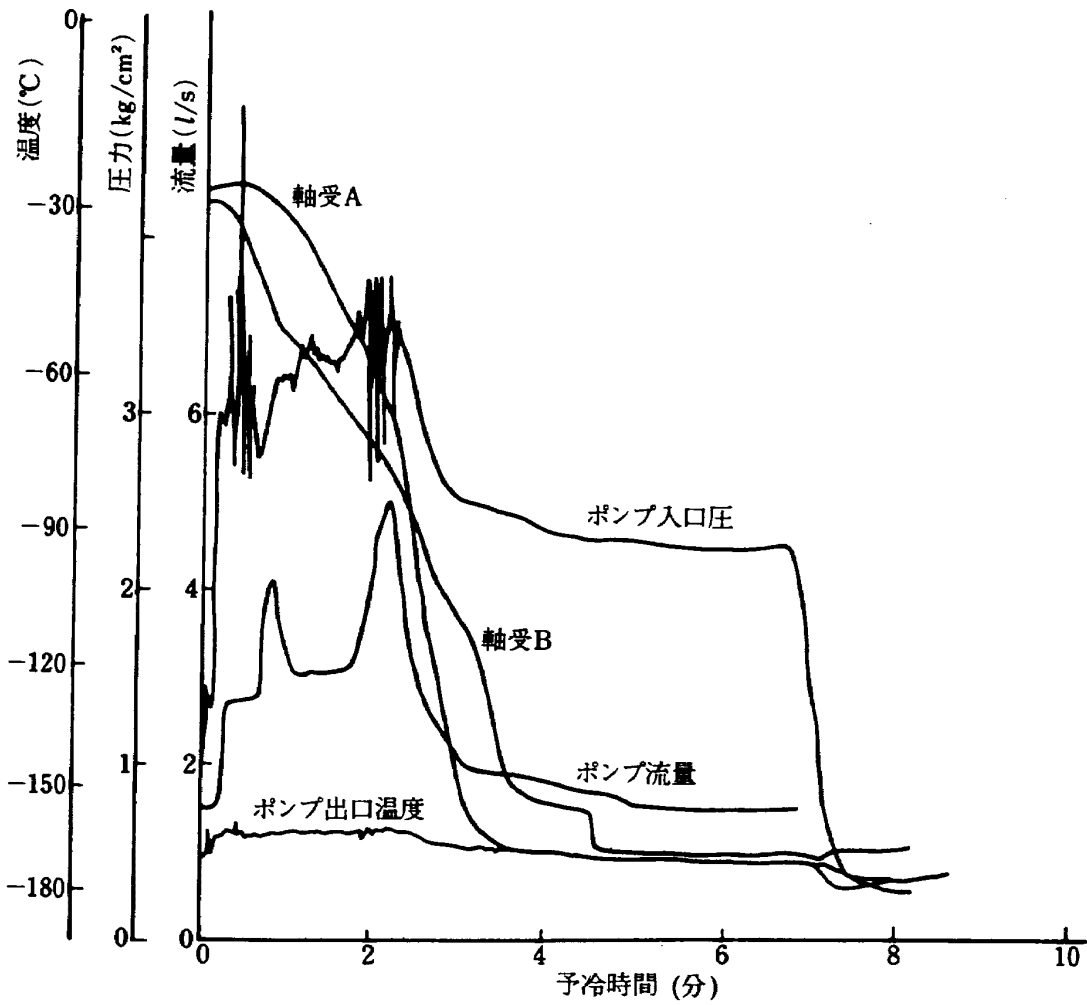


図 3.14 縦置予冷試験 (V-2)

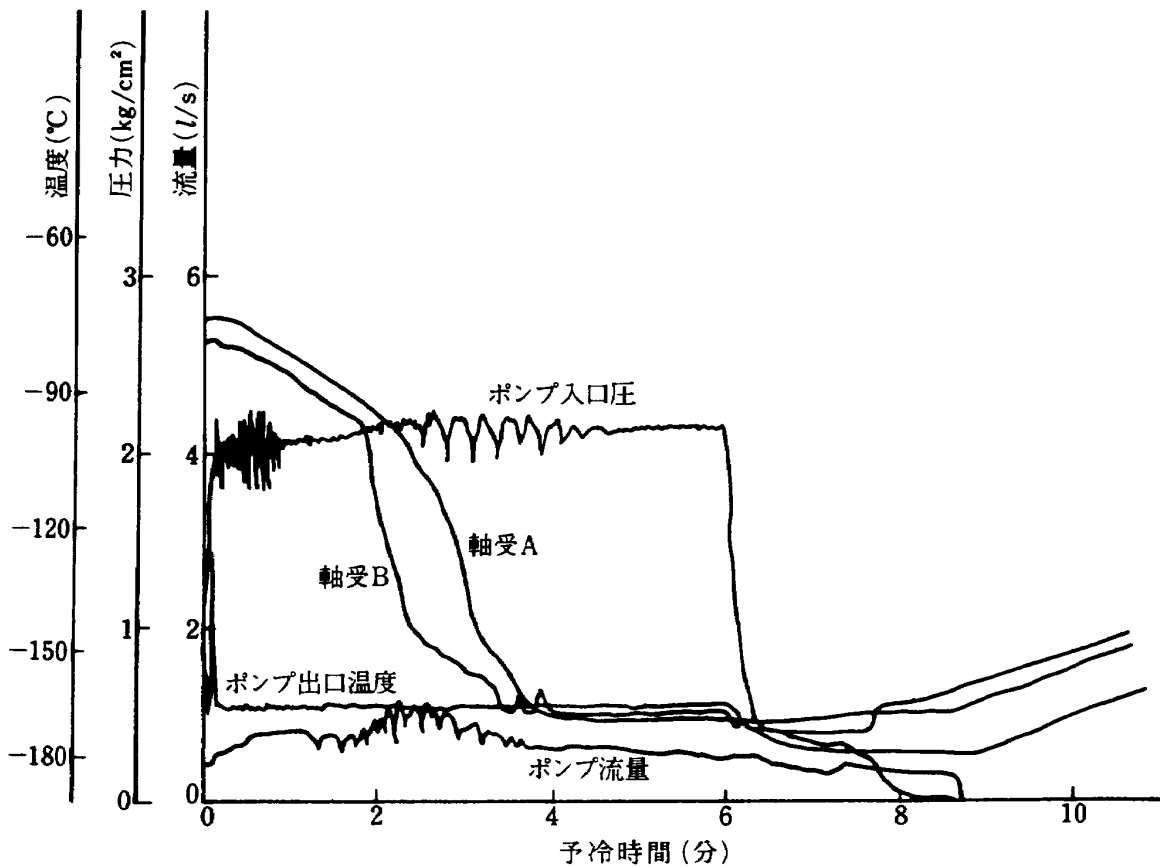


図 3.15 縦置予冷試験 (V-3)

4. 試験後のターボポンプ要素

ターボポンプ始動過渡試験後の各要素の状況を示す。図 4.1 はインデューサと主羽根車であるが、使用前と全く変りはない。図 4.2 にインデューサライナを示す。インデューサチップとわずかな接触痕が認められた。図 4.3, 図 4.4, 図 4.5 に自己潤滑玉

軸受 A を示す。軸受内輪および鋼球の転送面にハチ巻状の変色があり、また軸受保持器（アーマロン材）にも軽い接触痕が認められた。図 4.6, 図 4.7, 図 4.8 は自己潤滑玉軸受 B を示す。軸受 A より軽微なハチ巻状の変色が軸受内輪および鋼球の転送面に観察された。軸受保持器にも軽い接触痕が認められた。図 4.9, 図 4.10 にヘリウムパージシールのシー

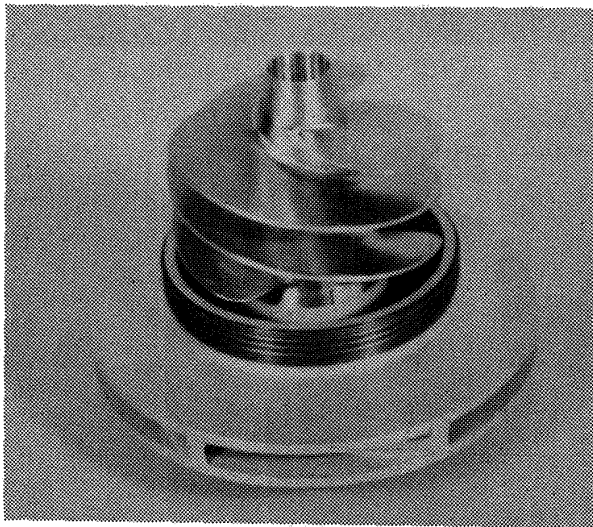


図 4.1 主羽根車とインデューサ

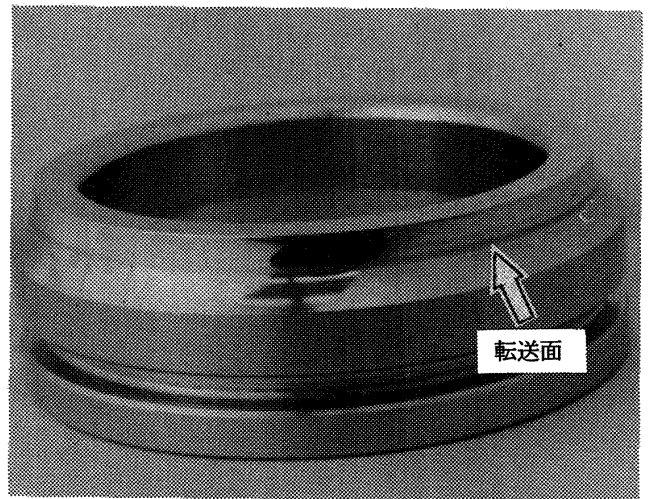


図 4.4 軸受 (A) 内輪

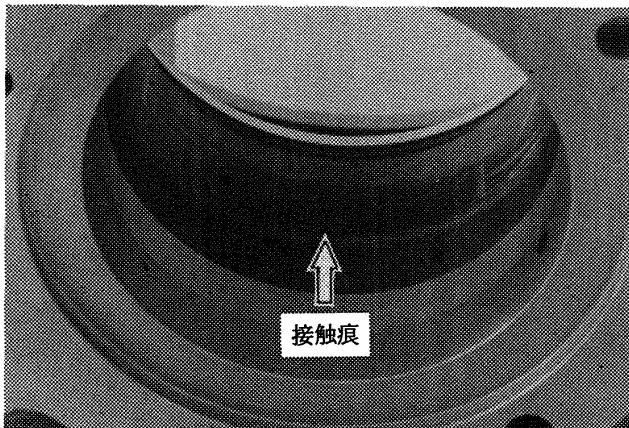


図 4.2 インデューサライナ

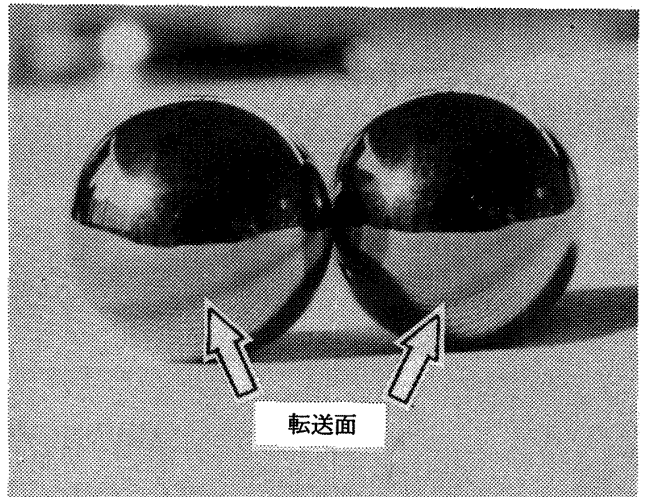


図 4.5 軸受 (A) 鋼球

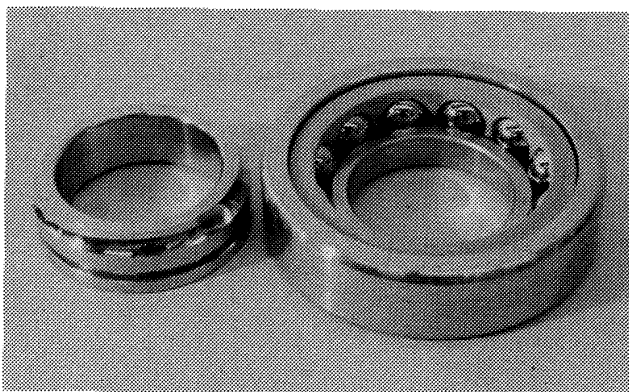


図 4.3 自己潤滑玉軸受 (A)



図 4.6 自己潤滑玉軸受 (B)

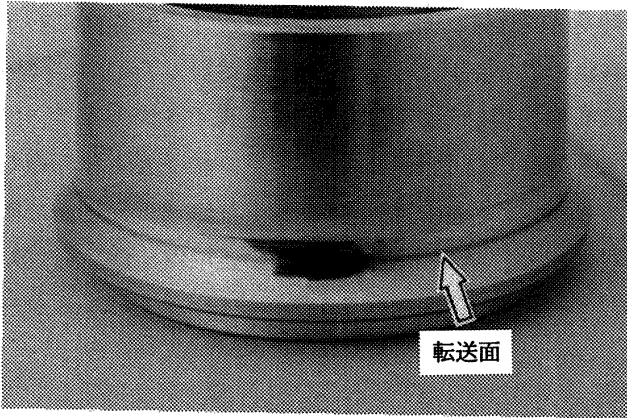


図 4.7 軸受 (B) 内輪

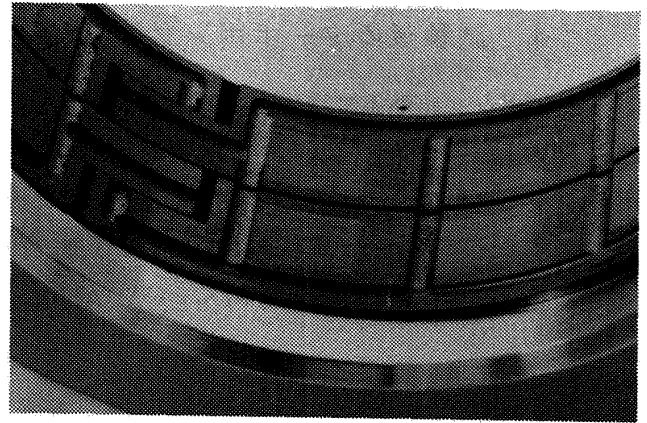


図 4.9 ヘリウムパーージシールシールリング (カーボン)

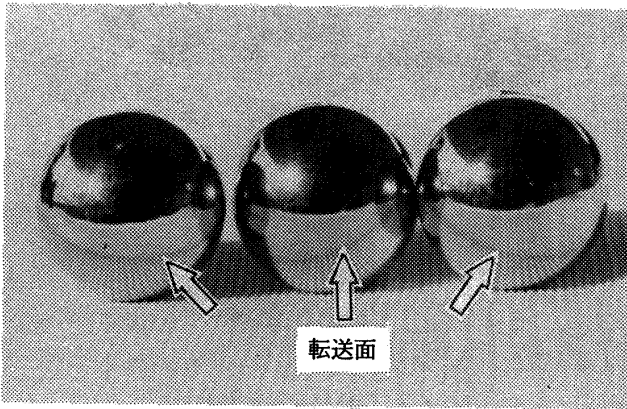


図 4.8 軸受 (B) 鋼球

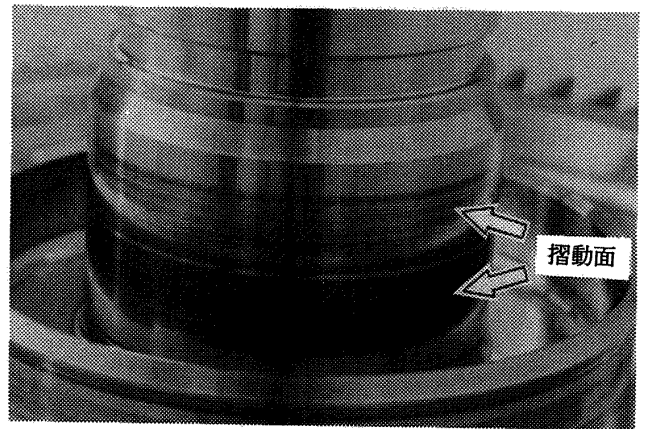
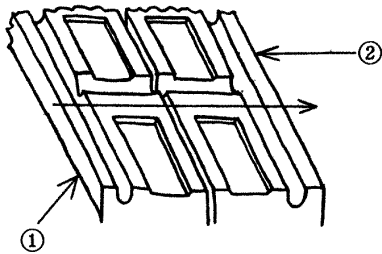
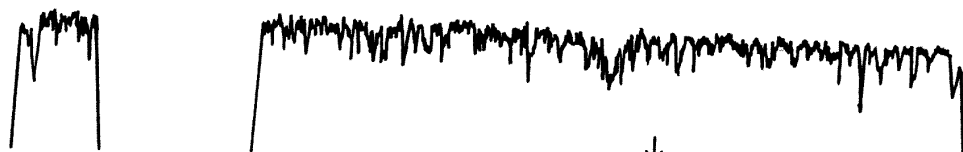


図 4.10 ヘリウムパーージシールシールランナー (Crメッキ)



①ポンプ側



②タービン側

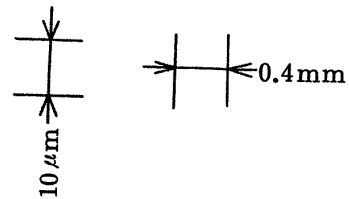


図 4.11 ヘリウムパーージシールシールリング形状あらさ

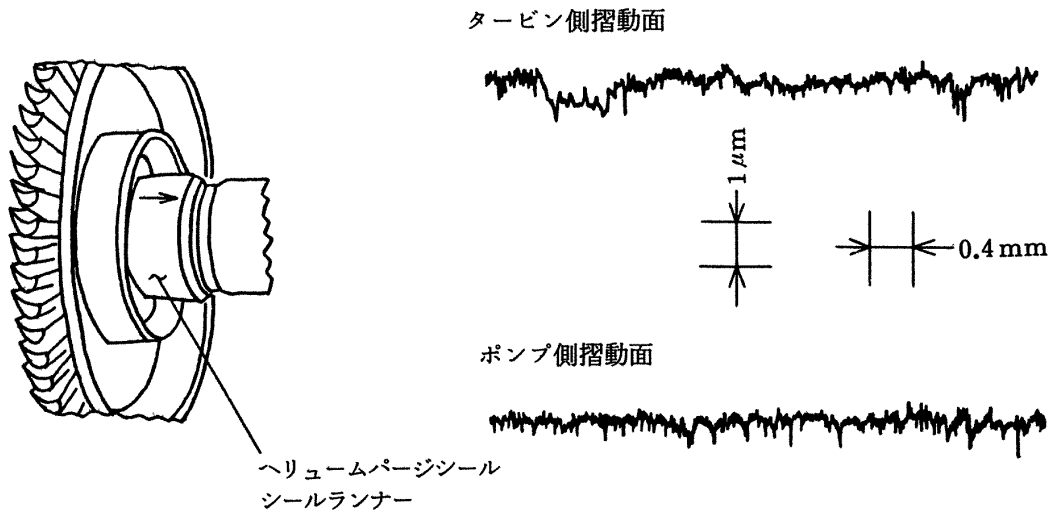


図 4.12 ヘリウムパージシールシールランナー形状あらさ

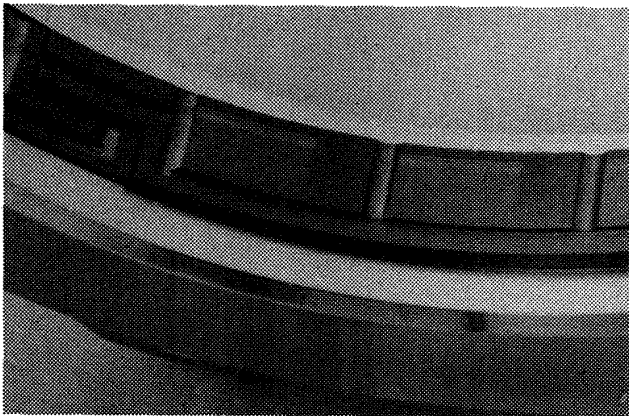


図 4.13 タービンガスシールシールリング (カーボン)

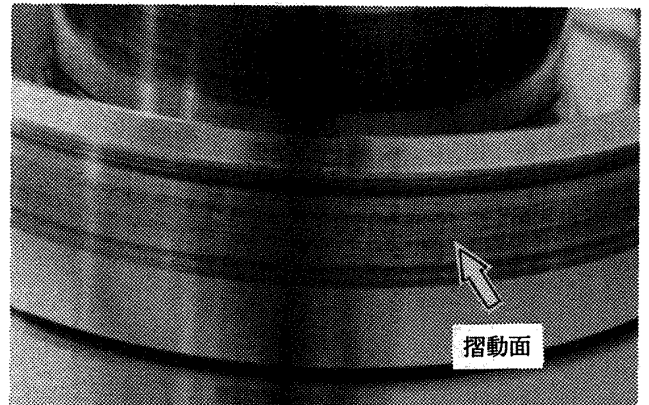


図 4.14 タービンガスシールシールランナー (Crメッキ)

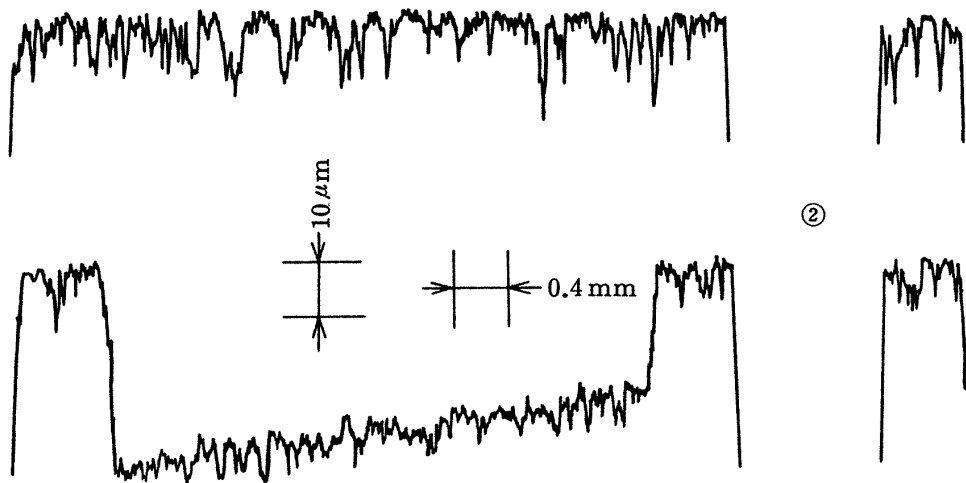
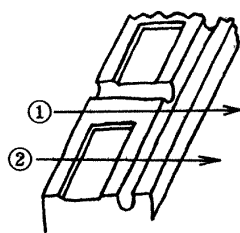


図 4.15 タービンガスシールシールリング形状あらさ

リングとシールランナーを示す。特別異常な接触痕や損傷は生じていない。試験後の表面のあらさを図4.11, 図4.12に示す。表面の形状は表面あらさ計(1/100マイクロンまで計測可能)により測定し

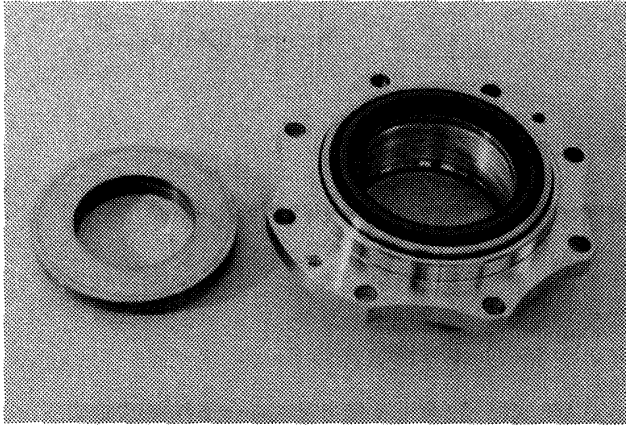


図4.16 メカニカルシール

た。タービン側の面あれが若干大きいのが認められる。図4.13, 図4.14にタービンガスシールのシールリングとシールランナーを示す。異常な摩耗は生じていない。図4.15に表面のあらさを示す。表面のあらさの形態はヘリウムパージシールのタービン側とほとんど同一の様相を呈している。図4.16にメカニカルシールのメイティングリングとベローシールの外観を, 図4.17にシールノーズ(カーボン)を, 図4.18にメイティングリングの表面のあらさを示す。異常な摩耗は見られないが, シールの内周側が強く接触している様子が良く観察される。図4.19, 図4.20にタービン動翼とハニカムシールを示す。動翼とハニカムシールとの間に軽い接触痕が観察されたが, 特別異常な接触は認められなかった。

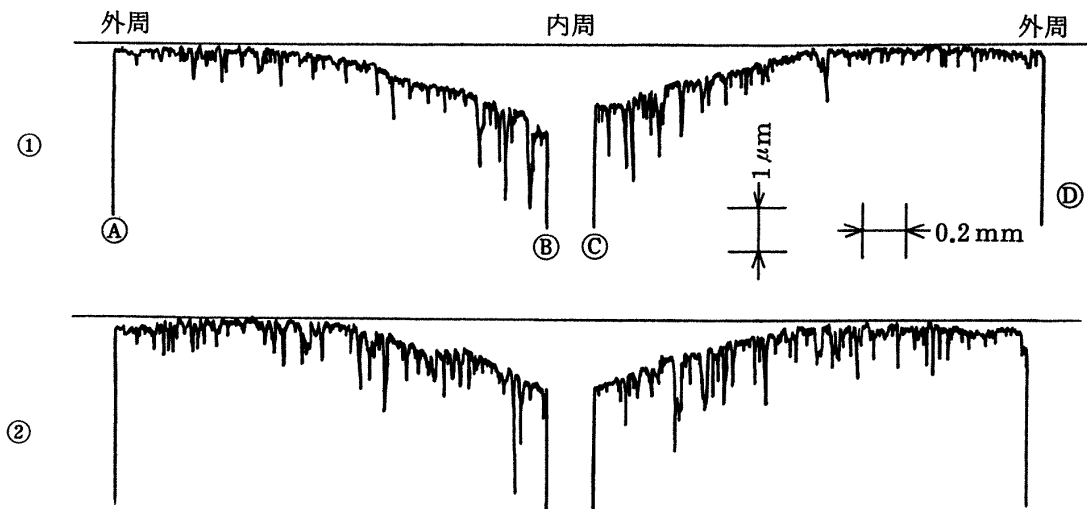
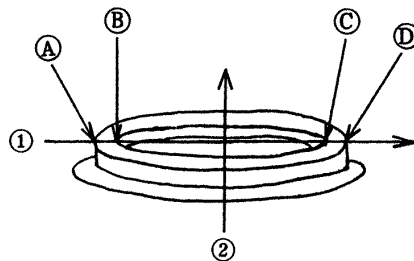


図4.17 メカニカルシールシールノーズ形状あらさ

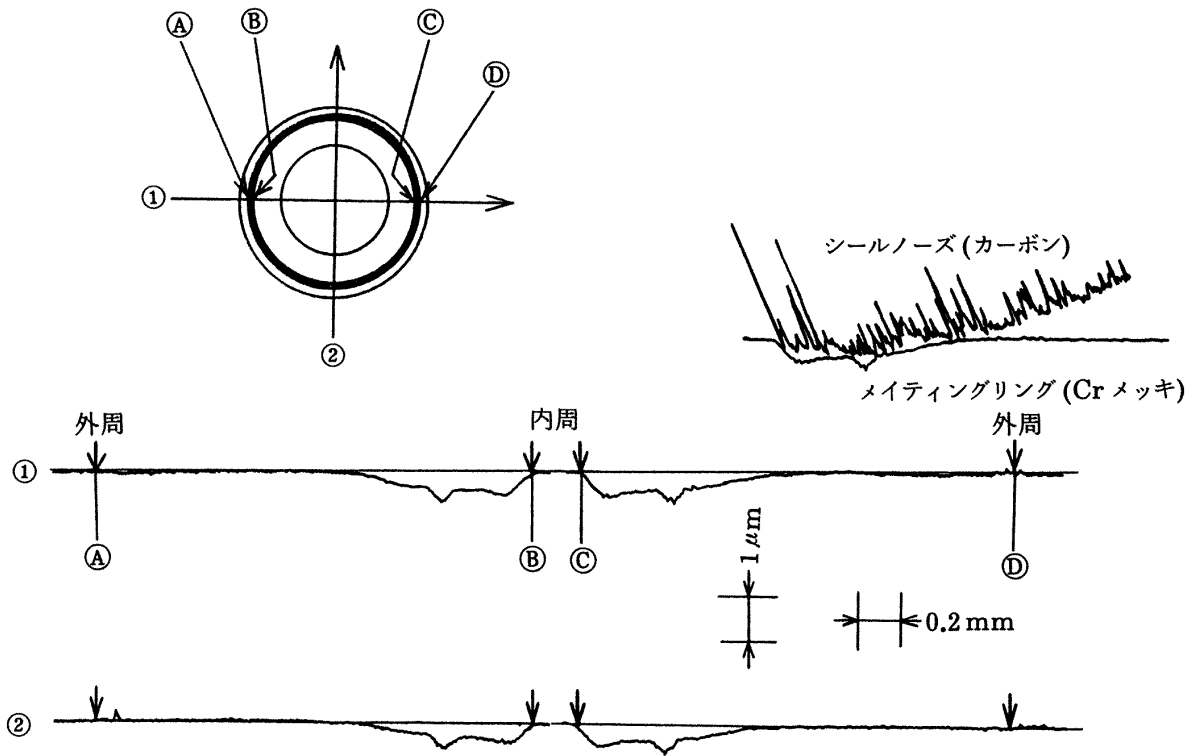


図 4.18 メイティングリング (Crメッキ) 摺動面の形状あらし

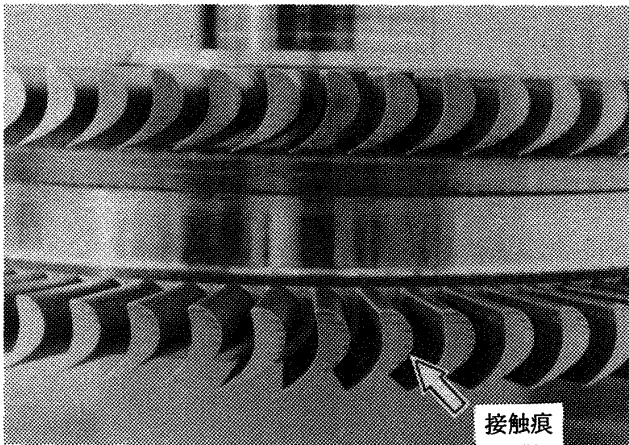


図 4.19 タービン動翼チップ接触部

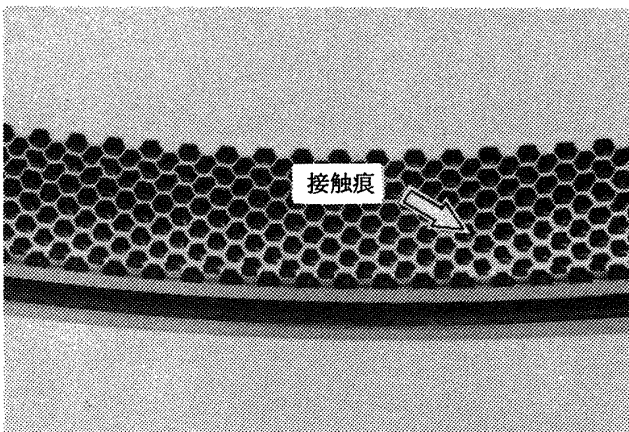


図 4.20 タービンハニカムシール

5. む す び

一連の始動過渡試験および縦置予冷試験を通じ次の結論が得られた。

- (1) ターボポンプ吸込側をじゅうぶんに予冷すれば軸受まわりはガス雰囲気の状態でも起動することが可能である。
- (2) ターボポンプ吸込側がじゅうぶんに予冷されていても、軸受予冷がじゅうぶんでない場合は軸振動が増加する傾向が認められる。
- (3) 予冷流量が少ない場合は、軸受温度だけでなくターボポンプ入口圧力の脈動の有無が予冷完了の判断基準として必要である。
- (4) ガス雰囲気での急速起動のくり返しは、メカニカルシールの劣化を促進する。

以上のように本試験結果をまとめたが、再着火時においては、予冷時間と予冷流量の制限から起動条件は本試験以上に厳しくなることが予想されるので今後さらに詳しい検討が必要である。

本試験の遂行にあたり支援していただいた石川島播磨重工業(株)の担当者の方々に深甚の謝意を表し

ます。

最後に本試験を行うにあたり、ロケット流体機器研究室の上條謙二郎室長ならびに志村隆主任研究官の御指導をいただいたことを付言する。

参 考 文 献

- 1) 上條ほか6名；液酸・液水ロケットエンジン用液酸ターボポンプ試作研究，TR-588，1979
- 2) 大塚ほか22名；液酸・液水ロケットエンジンターボポンプシステムの開発研究，NAL-NASDA共同研究成果報告書，1980
- 3) 上條ほか10名；液酸・液水ロケットエンジンターボポンプシステムの研究，TR-696，1982
- 4) Angus, S., ほか4名，International thermodynamics Tables of the Fluid State Nitrogen, (1978), Pergamon Press.

航空宇宙技術研究所資料 519号

昭和58年9月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区信濃町12三河ビル
