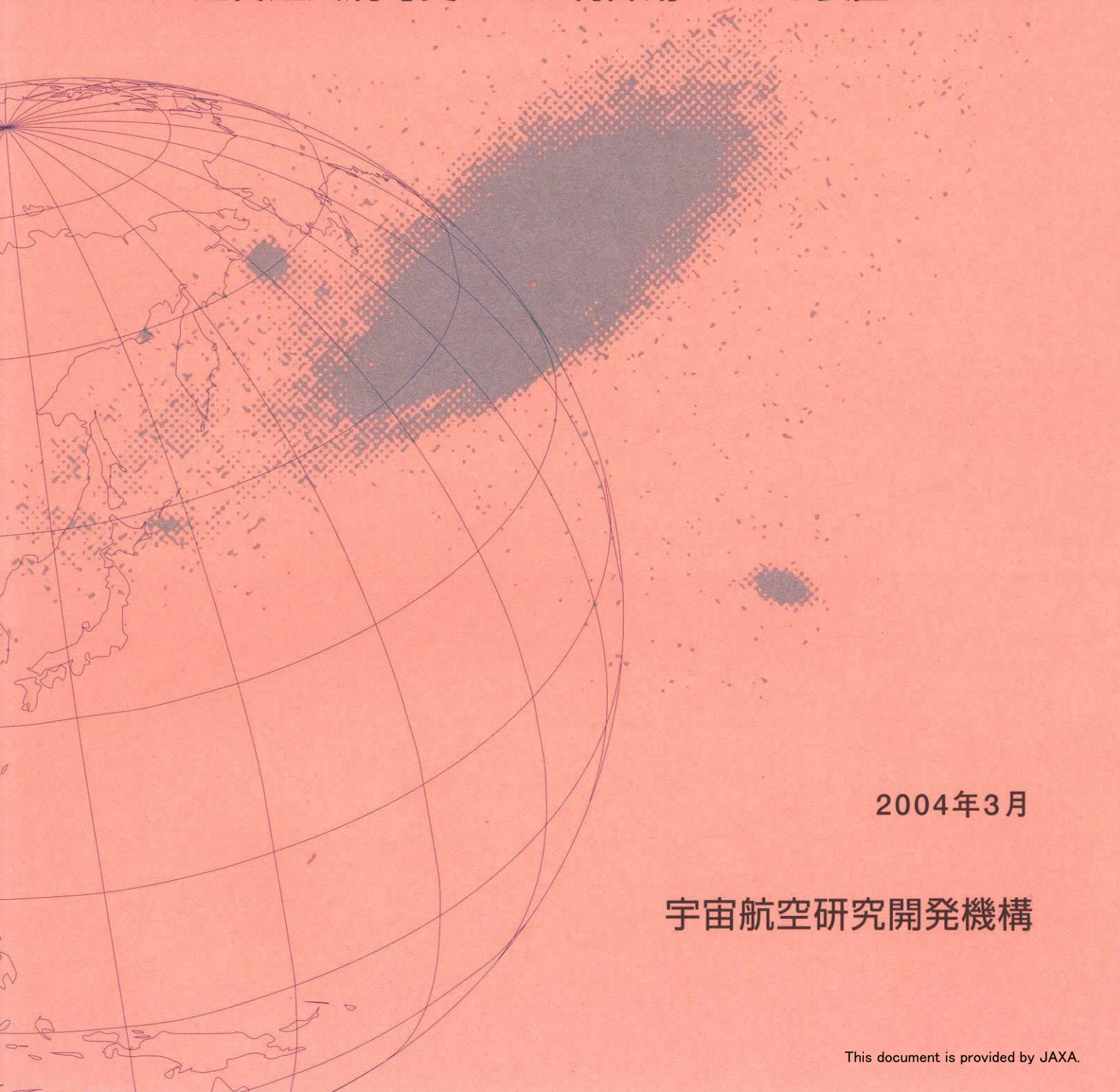


宇宙航空研究開発機構研究開発資料

低温環境におけるジャッキ装置耐久試験 0.2m超音速風洞可変ノズル制御用ジャッキ装置について



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

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

低温環境におけるジャッキ装置耐久試験
0.2m超音速風洞可変ノズル制御用ジャッキ装置について

Endurance Test of the NAL 0.2mSWT
Flexible Plate Nozzle Control Jack System at Cryogenic Temperature

国益 徹也、澤田 秀夫、河野 敬

Tetsuya KUNIMASU , Hideo SAWADA , Takashi KOHNO

総合技術研究本部 空気力学研究グループ
Aerodynamics Research Group
Institute of Space Technology and Aeronautics

2004年3月
March 2004

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

低温環境におけるジャッキ装置耐久試験 0.2m超音速風洞可変ノズル制御用ジャッキ装置について*

国益徹也*¹、澤田秀夫*¹、河野敬*¹

Endurance Test of the NAL 0.2mSWT Flexible Plate Nozzle Control Jack System at Cryogenic Temperature*

Tetsuya KUNIMASU*¹, Hideo SAWADA*¹
And Takashi KOHNO*¹

Abstract

This experiment is to investigate the effect of the solid lubricant applied on the principal jack driving division of bearing, ball screw or gear, and researched for the adequate durability of the selected MoS₂ as a lubricant. As a result, it has been found that there were some worn down of the lubricant depending on the position. However with the condition that lubricant remaining is barely left, there was no anomaly such as abrasion or damage confirmed on the base material and consecutively, the usefulness of the lubricant has been verified. But the result of the experiment indicates that for the experiment this time, with the cryogenic temperature solution being applied for the test piece, it is difficult to evaluate the extent of the lubricant remaining life. Furthermore, the result has been lead practically by the continuous running and for the endurance test this time and the experiment conditions, which might occur for the actual wind tunnel operation, such as repetition of normal temperature and cryogenic temperature in continual operation etc, are not included in this experiment. Thus it can be expected to have a faster lifetime than the experiment this time. Accordingly, it appears that more experiments are required such as the one with a different lubricant condition which eventually leads to destruction, or the one that several test pieces with the same solution as this experiment including non-lubricant condition are prepared and operate until reaching to destruction with regular checks of the transitions.

Keywords: cryogenic, supersonic wind tunnel

概 要

航空宇宙技術研究所0.2m超音速風洞は、超音速で高レイノルズ数を得るために低温環境下でも運転が出来るような技術を採用している。現段階では本風洞に装備されている可変ノズルジャッキ装置の潤滑剤が低温仕様ではないため、実用化のための予備試験として同等のジャッキ装置を設計し、低温環境でも有効と思われる潤滑剤MoS₂を使用して実際に低温環境下での耐久試験を行った。軸受、ボールネジ、歯車などの主な駆動部分の固体潤滑剤の十分な耐久性の有無を調べたが、潤滑剤の残像量がほとんどなくなっている状態においても母材には摩耗・損傷は見られず、潤滑剤の有効性は認められた。

1. はじめに

0.2m超音速風洞は1995年に設計、製作された我が国初の軸流圧縮機を用いた本格的連続式風洞であり、図1-1のような風路を持つ。マッハ数は図1-2に示すように、上下に可変ノズル機構を設け、M1.5~2.5までの任意のマッ

ハ数で運転ができ、運転中にマッハ数を変えることが可能である。最大風洞総圧はマッハ数に依存するが、現在0.055~0.15Mpaの範囲に設定している。

風洞総温は330K付近に設定できるように熱交換器を圧縮機下流に設置している。軸流圧縮機は定格出力

* 平成16年2月16日 受付 (received 16 February, 2004)

*¹ 総合技術研究本部 空気力学研究グループ

(Aerodynamics Research Group, Institute of Space Technology and Aeronautics)

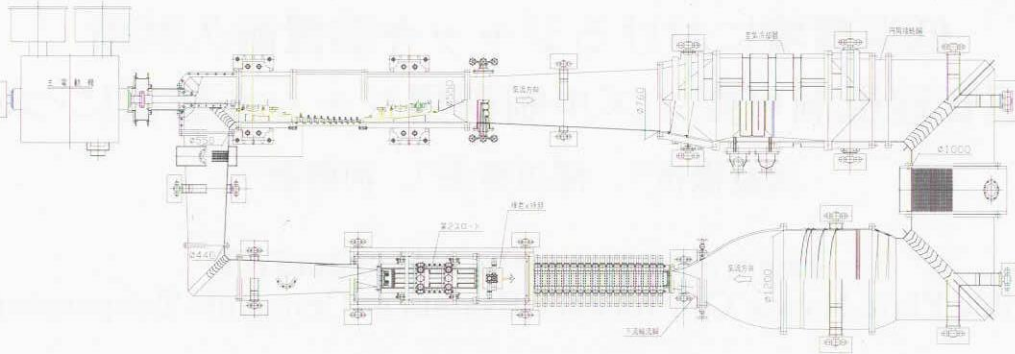


図1-1 0.2m超音速風洞（平面図）

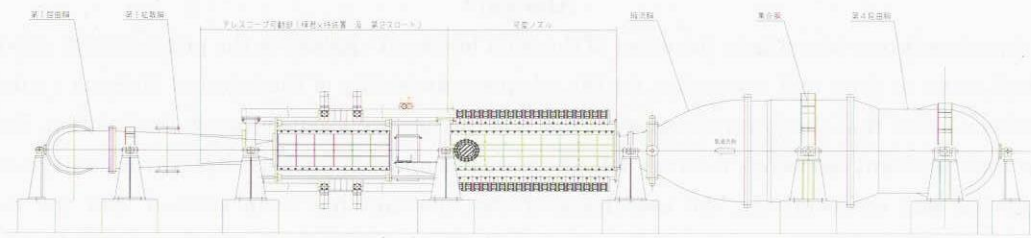


図1-2 0.2m超音速風洞（側面図）

550kWの可変周波数誘導電動機により駆動され、750kW出力までは運転時間を15分以内に制限することで可能となっている。

本風洞は将来の高レイノルズ数超音速風洞の設計に要する技術資料を得るために様々な特徴を予め持たせるように設計製作されていて、その一つに低温風洞技術がある。気体は温度が低下すると、粘性係数が下がる。一方、一定の圧力下では気体は温度が下がると密度は上がる。このため、気流温度を下げると同じ速度の流れでは、高いレイノルズ数になる。このような風洞内の作動流体の温度を低温にして高いレイノルズ数の流れ場を測定部に作り出せるようにする低温風洞技術を実現するために、作動流体として窒素ガスを使用し、また風路内への熱侵入を防ぐために風洞全体を断熱箱の中に覆っている。将来マッハ数2.5で173K、マッハ数1.5で103Kの低温環境下で稼働できる超音速風洞とするのが目標である。しかし、現在本風洞に装備されている可変ノズルジャッキ装置は低温環境下で駆動できるような機構を有しているが、潤滑剤の問題は解決されておらず、現段階では低温環境では駆動できない。また、そのような低温仕様のジャッキ装置は未だ技術的に実現していない。そこで今回、低温環境下でも使用することが出来るジャッキ装置の設計・実験を川崎重工業株式会社と協議しながら行った。

本実験では低温環境でもジャッキ装置が駆動出来ると思われる潤滑剤MoS₂の効果を重点的に調査し、また0.2m超音速風洞に使用しているジャッキ装置と同様の供試体を使って実際に低温環境で作動実験を行った。そして実験後に供試体各部分の損傷度並びに低温環境下での使用可否判定を調べた。本資料では、実験で得られたデータについて、解析結果並びに評価を報告するものである。

2. 実験装置

実験装置は図2に示すような低温運転時の環境を模擬する低温槽と、供試体の駆動や低温槽の内部状態の自動制御を行う制御盤により構成されている。低温槽は図3のようにポリウレタンフォーム断熱材で密閉されており、LN₂タンクから液体窒素を供給することによって、内部を低温状態に維持する。低温槽内に貯留される液体窒素は、液面制御計の液面センサーによって任意に設定され、最低液面を検知することで液体窒素用電磁弁を開く。最高液面は液面制御計内部の遅延回路の時間で調整する。供給された液体窒素は、被冷却体と熱交換する。そして酸化した窒素ガス内部の圧力が過大にならないように、排出口から適宜排出される。また表1に低温槽の仕様を示す。

表1 低温実験槽仕様

使用冷媒	液体窒素(LN ₂)
本体外寸法	W1500×D650×H1087(mm)
内槽寸法	W780×D250×H550(mm)
内槽耐荷重	100kg
重量	本体：130kg 蓋：27kg
使用温度	-196℃
本体材質	外槽：SUS304 内槽：SUS304 架台：SS41 断熱材：硬質発泡ウレタンフォーム パッキン：シリコンゴム
接続口径	液体窒素供給口：PF3/8”オス×1 温度センサー入口： JIS10K50Aフランジ×1 排気口： JIS10K100Aフランジ×1 ドレン口：1/2Bバルブ止め

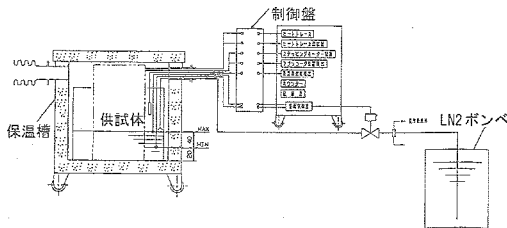


図2 実験低温槽及び自動制御盤

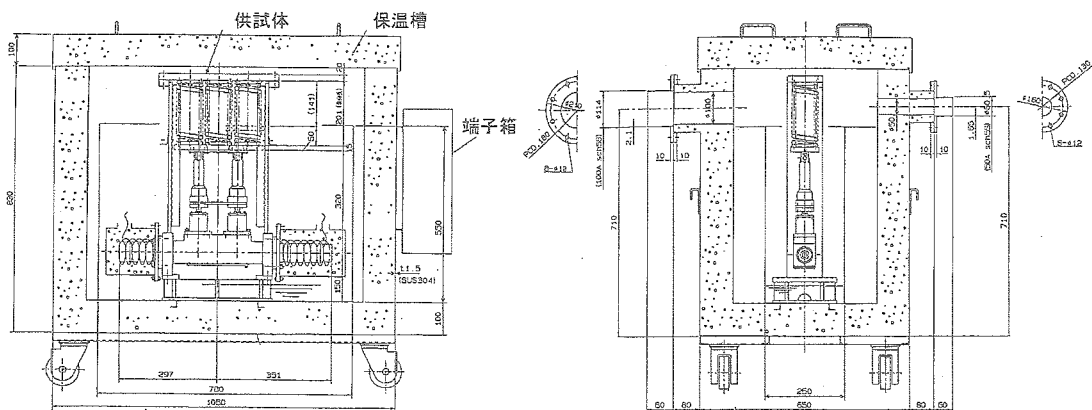


図3 実験低温槽

供試体であるジャッキ装置は図4のような枠組に固定され、低温槽の内部に設置されている。ジャッキ装置の上端にはコイルバネが取り付けられており、他端は供試体の取り付けられている枠組によって拘束されている。ジャッキが伸縮すると実際の風洞運転時に可変ノズルが変形する事によりジャッキ装置に作用する同様の荷重が装置に加わるようになっていく。また、モーター及びア

ブソコーダーはポリウレタンフォーム断熱材により保温され、ヒーターにより常時常温付近に維持されるようになっている。自動制御装置は低温槽に内装したジャッキ装置に伸縮の命令を送り自動運転が行えるものである。またジャッキ装置の運転プログラムは実際の運用を模擬するように予め決定した。

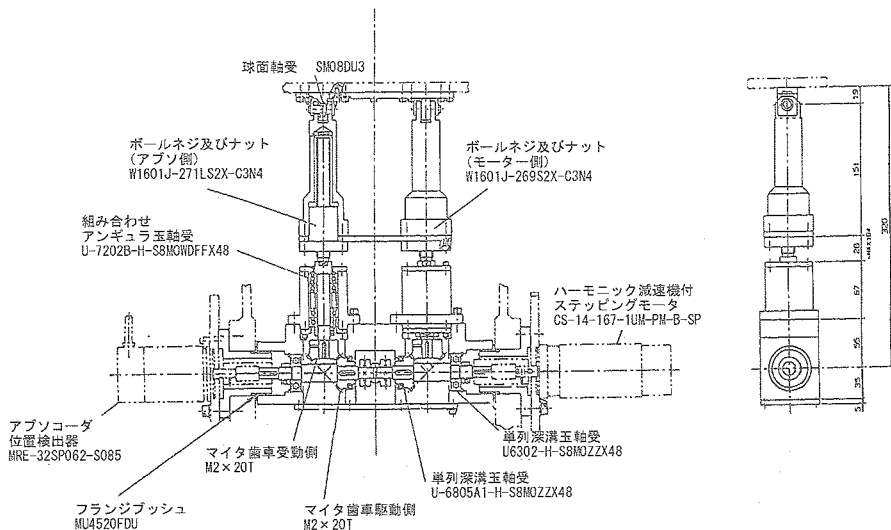


図4 可変ノズルジャッキ装置全体

3. 動作実験ケース

実験ケースはジャッキ装置先端部に取り付けたコイルバネの伸縮量にて加える負荷を変化させ、その負荷に応じて表2に示す3ケースの実験をおこなった。また実験中は、ヒートトレース部の温度も別途計測し、ヒーターを制御することで低温槽内部の温度を所定範囲に維持するように設定した。実験中のジャッキ装置運転パターンは、

本装置が0.2m超音速風洞の実働にあたって10年間に「6往復(変更12回) / 日×100日 / 年×10年=6000回」の駆動をおこなうものとして実際の運転を模擬するように繰り返し動作を設定した。使用したボールネジ軸は各実験ケースにより動作位置が異なり、移動範囲は図5のようになっている。実験に使用した運転諸元は表3に、実験経過は図6に示す。

表2 実験ケース

実験ケース	環境	繰返し数(往復)	ジャッキ負荷(N)	ジャッキストローク(mm)
	常温	71回	0~2000	1~12.5
I	低温	2000回	0~2000	1~12.5
II	低温	2000回	2000~4200	12.5~25.2
III	低温	2000回	5000~7000	29.7~14.2

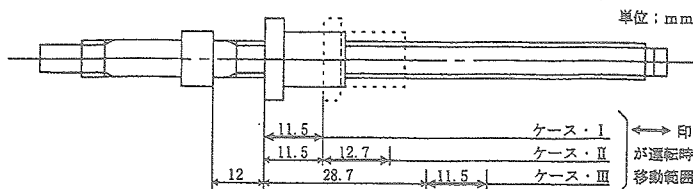


図5 各試験ケースにおけるボールネジ軸の動作位置

表3 運転緒元

低温槽内保持温度	120℃～-140℃
ジャッキ移動速度	0.48mm/s
ジャッキ駆動モーター回転数	1200rpm(9999パルス/s)
駆動軸及び歯車回転数	7.18rpm
歯車伝達トルク(計算値)	ケースⅠ：0～0.8N・m ケースⅡ：0.8～1.67N・m ケースⅢ：1.99～3.29N・m
ジャッキ推力(バネの伸縮量からの推定量)	ケースⅠ：0～2000N ケースⅡ：2000～4200N ケースⅢ：5000～7000N
モーター及びアプソユーターヒーター温度	19.5℃～22.5℃に保持
使用液体窒素	ボンベ内容量：175L 充填圧力：1373kPa 供給設定圧：245kPa

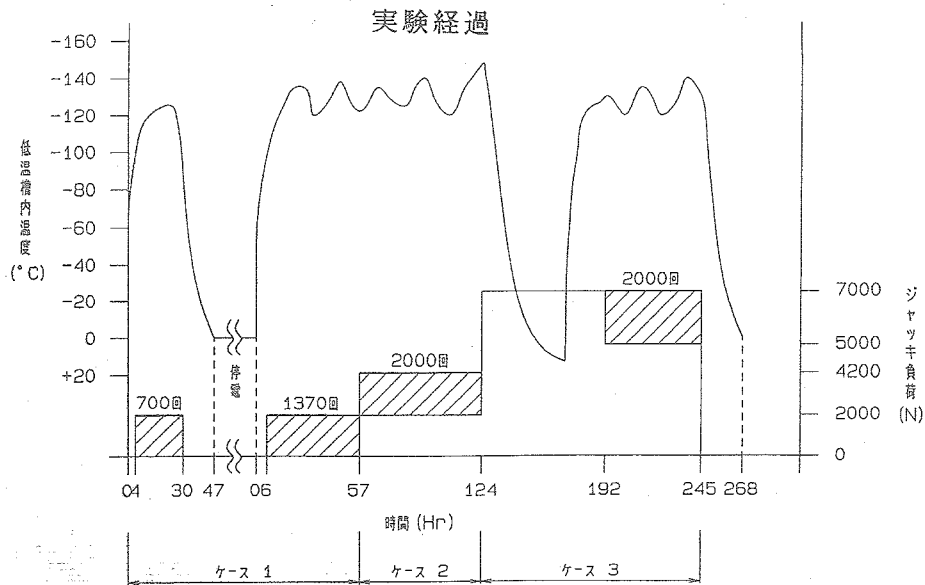


図6 実験経過

4. 実験結果

4.1. 組み合わせアンギュラ玉軸受及び深溝玉軸受

超音速可変ノズル板を鉛直方向に変位させる機構では、図4に示すように、モーターからの回転トルクを、水平方向のシャフトとマイタ歯車を介して、鉛直に支持されているボールねじに伝達し、ボールねじの回転運動を鉛直方向の直線運動に変換する。回転するシャフトとマイタ歯車を支持するために合計12個の軸受を使用している。このうち、ボールねじに回転トルクを伝える鉛直方向のシャフト2本を支持するため、合計4つの軸受から成る組み合わせ軸受2組がある。また、水平方向のシャフトを支える2種類の軸受2組がある。水平方向のシャフトを支持する軸受U-6805A1-HS8MOZZX48とU6302-H-S8MOZZX48はシャフトの軸方向の力を受けることはなく、回転するシャフトを支えることを目的としている。一方ボールねじを鉛直に支持する軸受U-7202B-H-S8MOWDFFX48はボールねじの回転と同時にボールねじが受ける軸方向の力も支持するように設計されている。

図4に示すように、モーターの回転を超音速可変ノズル板の鉛直方向の運動に直す機構は、基本的に左右対称に作られており、右側のモーター部分に、左側ではノズル板の位置を評価するアブソコーダーが取り付けられている点のみが唯一の左右非対称構成部分である。水平方向のシャフトは一組の単列深溝玉軸受

U-6302-H-S8MOZZX48（モーター側）とU-6302-H-S8MOZZX48（アブソ側）で支えられ、モーターの回転トルクをなめらかに伝達することを目的としている。このシャフトにマイタ歯車一組を図4に示すように取り付け、鉛直方向の一組のシャフトを回転させるようにしている。このマイタ歯車にもう一組の単列深溝玉軸受U-6805A1-H-S8MOZZX48が使われている。諸元は表5に示す。

表5 アンギュラ玉軸受及び深溝玉軸受

軸受名称	数量
U-6805A1-H-S8MOZZX48	2個・2組
U-6302-H-S8MOZZX48	2個・2組
u-7202B-H-S8MOWDFFX48	4個・2組

各軸受は低温環境下に曝されるので、低温でも潤滑の効果が持続するMoS₂の焼き付け処理を行った。このため、軸受の隙間は30μm分増加させた後、MoS₂を焼き付けた。試験条件は、低温槽内に供試体部品を組み込んだジャッキ装置を設置し、低温窒素ガスで低温にしてから、バネの伸縮量にて、表2の3ケースの負荷を与えた。低温槽内の温度は、ほぼ摂氏-120度から-140度であった。試験後に、外形寸法、内径寸法、ラジアルすきまとアキシアルすきまを測定した。その結果は表6-1~6-3に示す。

表6-1 U-6805A1-H-S8MOZZX48寸法測定結果

U-6805A1-H-S8MOZZX48		単位：μm	
項目	外径寸法	内径寸法	ラジアル隙間
規格値	-11~0	-10~0	5~20
アブソコーダー側	-3	-2	26
モーター側	-3	-3	30

表6-2 U-6302-H-S8MOZZX48寸法測定結果

U-6302-H-S8MOZZX48		単位：μm	
項目	外径寸法	内径寸法	ラジアル隙間
規格値	-11~0	-8~0	3~18
アブソコーダー側	-3	-2	29
モーター側	-3	-3	30

表6-3 U-7202B-H-S8MOWDFFX48寸法測定結果

U-7202B-H-S8MOWDFFX48			単位: μm
項目	外径寸法	内径寸法	ラジアル隙間
規格値	-11~0	-8~0	10~0
アプソコーダー側A-1	-5	-4	+4
アプソコーダー側B-1	-6	0	
アプソコーダー側C-1	-5	-1	
アプソコーダー側D-1	-6	-3	
モーター側A-2	-7	-3	+9
モーター側B-2	-6	-2	
モーター側C-2	-5	-2	
モーター側D-2	-5	-1	

表に示すように、ラジアル隙間とアキシャル隙間以外は、規格内で、特に異常は認められなかったが、ラジアル隙間とアキシャルすきまは規格値を4~10 μm 超えていた。これは、軸受6805と6302では、固体潤滑剤が摩滅してラジアル隙間が増加したものと考えられる。また、軸受7202では、同様に固体潤滑剤が摩滅してラジアル隙間が増加し、それに伴いアキシャル隙間が増加したものと判断される。溝形状測定の代表的な結果を図7-1~7-3に示す。これらの図からは、溝形状は固体潤滑剤の摩滅による形状の崩れが確認できたが、母材の異常摩耗は認められなかった。また、目視によっても、軸受内部の部品には、潤滑に関与する部分の皮膜は摩滅しており、また、幅広い走行跡が認められた。潤滑剤の残量を評価するために、非走行部分と走行部分の潤滑剤を比較する方

法でEPMA分析（波長分散X線マイクロアナライザ：焼付けした潤滑剤の二硫化モリブデン MoS_2 の主成分であるモリブデンとサルファの成分残量を計測する）を行い、潤滑剤の主成分であるMoとSのピークの変化を調べた。代表的な結果を図8-1~8-2に示す。他の部分のEPMA分析結果もほぼ同じであり、各軸受、MoとSのピークは走行部分でも若干認められるが、大幅に減じているのが判明した。

このように、各軸受ともに固体潤滑剤は殆ど摩滅していたことが判る。母材の異常摩耗は認められず、一方、固体潤滑剤は殆ど摩滅していたことから、本供試体に使った MoS_2 は微量とはいえ、個体潤滑剤としての役割は果たしていたものと考えられる。

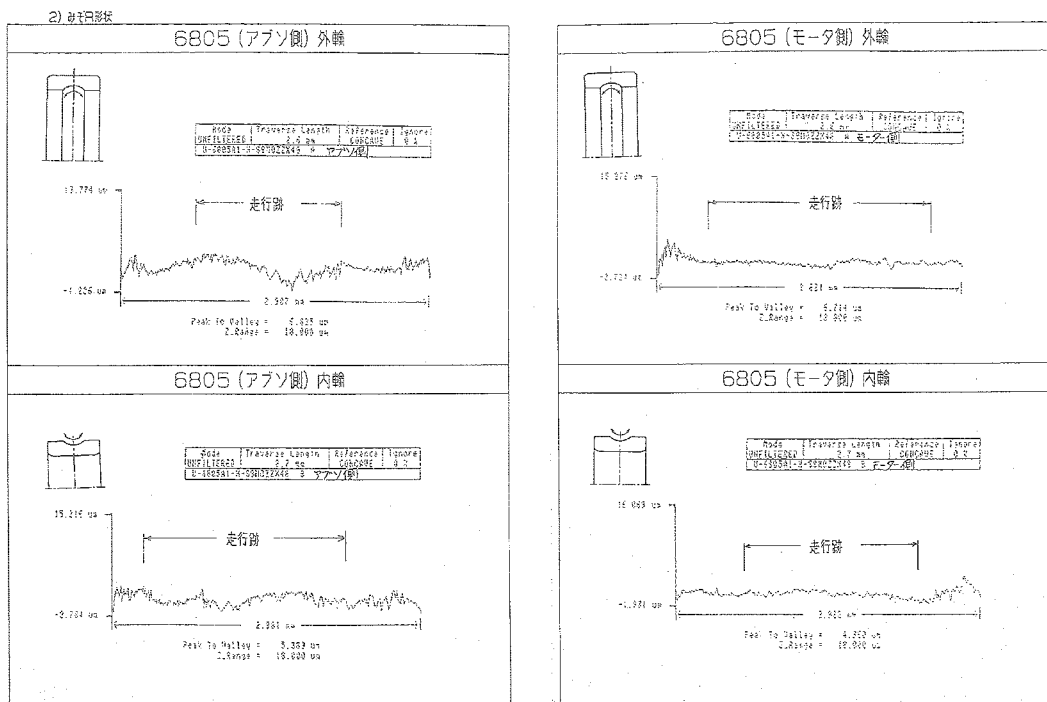


図7-1 U-6805A1-H-S8MOZZX48の外輪と内輪の溝形状

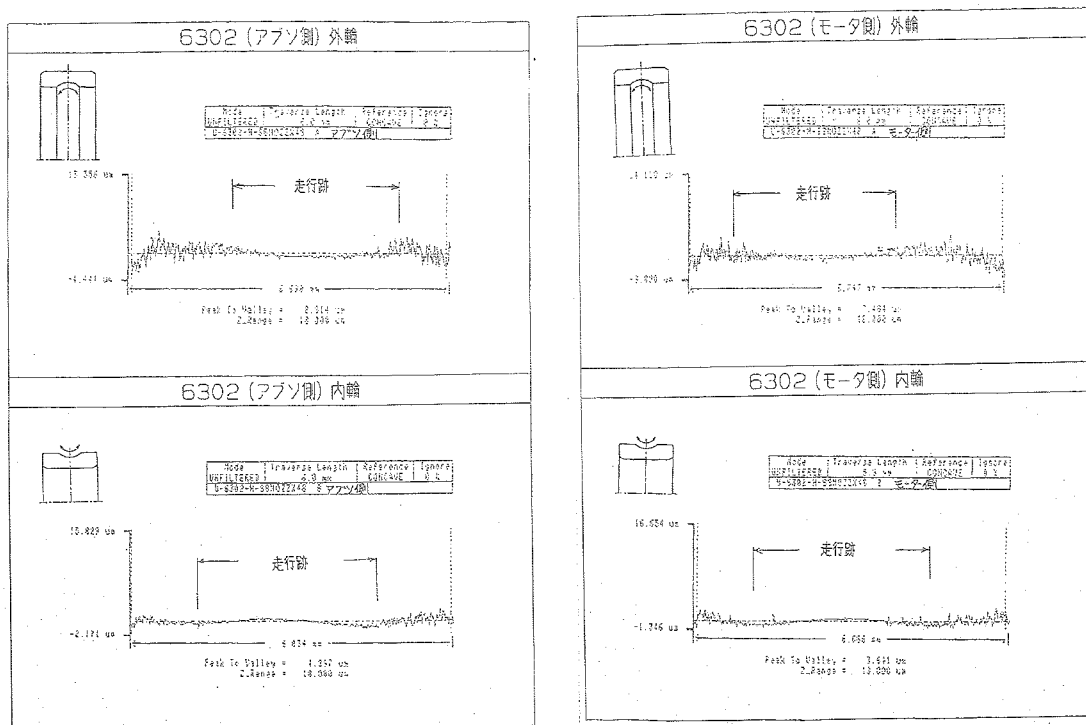


図7-2 U-6302-H-S8MOZZX48の外輪と内輪の溝形状

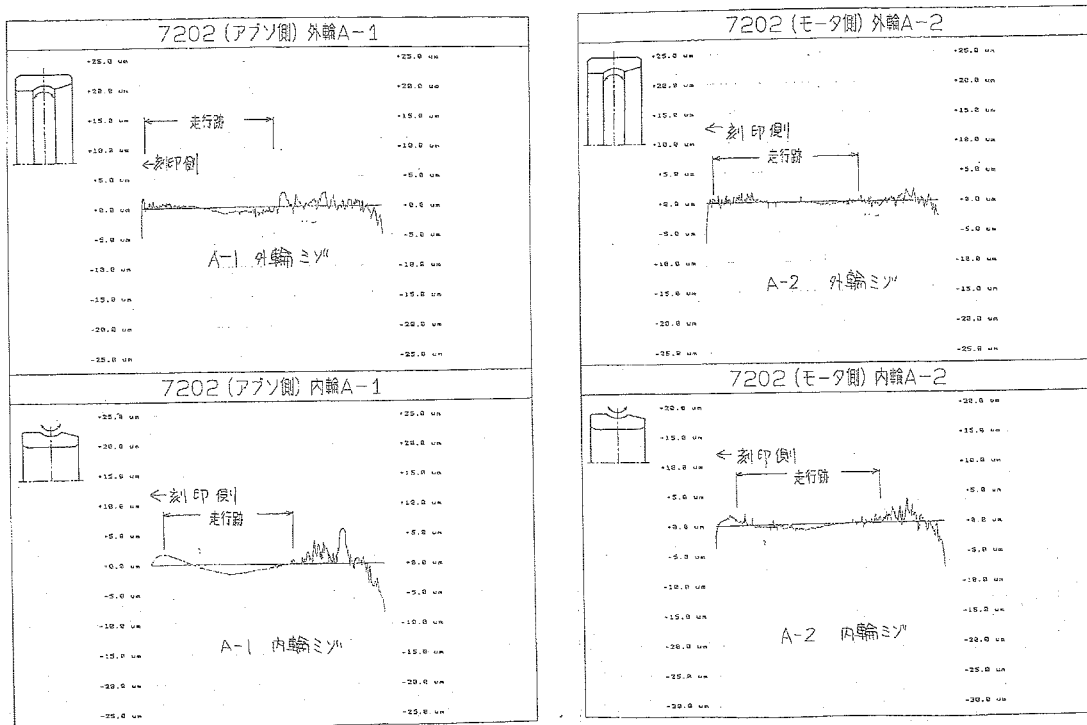


図7-3 U-7202B-H-S8MOWDFFX48の外輪と内輪の溝形状

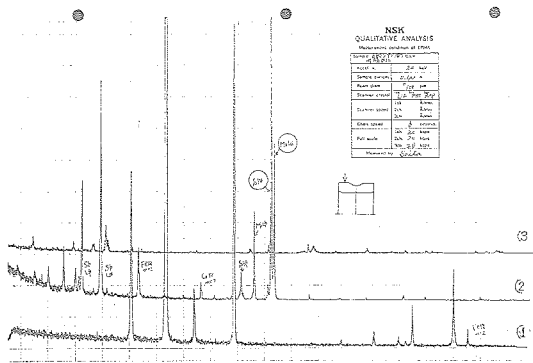


図8-1 ボール非転送面

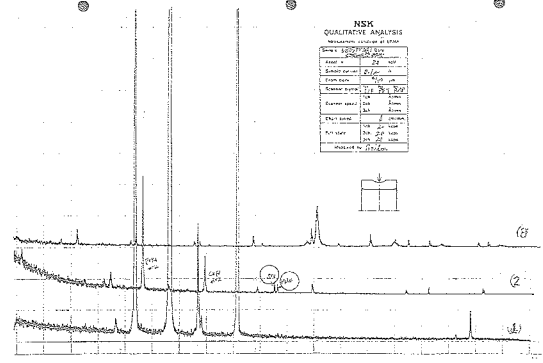


図8-2 ボール転送面

4.2. ボールネジ及びナット

ボールネジ及びナットは図4に示すように、超音速可変ノズル板を鉛直方向に変位させるために、シャフトの回転運動から直線運動へ変換する機構として用いられている。ボールネジ及びナットは日本精工社製 W1601J-269S2X-C3N4（モーター側）、および、W1601J-271LS2X-C3N4（アブソコーダー側）である。

ボールネジ及びナットは低温環境下に曝されるので、低温でも潤滑の効果が持続するMoS₂の焼き付け処理を行った。このため、軸受の隙間は30 μm分増加させた後、MoS₂を焼き付けた。低温耐久試験後のボールネジ及びナットの外観検査では、表面に若干の錆が認められた。これは、試験途中に低温槽内の目視と写真撮影の目的で蓋を開けたため、若干の空気中の水分が試験槽内に進入したこと、低温槽を常温にあげるときに液体窒素の供給をやめて長時間放置するため、大気が若干進入し、周りよりも低温の金属部分に水蒸気が凝結したためと考えられる。ボールねじでは、図9に示すBの領域で、ボールの走行時にボールと接触する面に強い走行跡が観察された。また、ナット側でも同じ様に、ボールと接触する面に強い走行跡が観察された。一方、ボールを導くチューブ2列では、ボールがスムーズに通過し、循環機能は正常であった。

溝形状測定の代表的な結果を図10-1~10-3に示す。ボールネジ部の荷重面に当たる左右のフランクの摩耗が明

瞭に読みとれる。一方、ナット溝の摩耗はボールネジ部と比べると、その摩耗は顕著ではない。ボールは未使用品に比べて表面の光沢が強くなっており、また、表面に渦巻き状のかき傷が認められた。また、作動性では、触感にて「ゴロゴロ感とザラザラ感」が認められた。ボールネジとナットの寸法検査、隙間検査結果を表7-1~7-3に示す。各試験ケースでのボールネジの使用部分と隙間計測位置等を図11に示す。表に示すように、軸方向の隙間は、使用前と比べると11 μmほど増加していることが判った。これは、MoS₂の焼き付け処理のために隙間を増加させた分だけ、潤滑剤の摩滅の後に生じた隙間と考えられる。一方、軸の振れ精度ではいずれも許容値内に入っており、低温環境におかれたことによる悪影響はみられなかった。転送面の試験後の状況は、未使用部分の溝と比較することで、摩耗状況を判定した。その結果、総ての試験ケースで、荷重面では被膜の面粗度が非荷重面に比べて、つぶれていることが判明した。固体潤滑剤の試験後の残存状況はEPMA分析により評価した。代表的な例を図12に示す。ボール転送面には、図で示すように、Mo、Sのピークはわずかにしか認められず、皮膜は残存していないものと推定される。以上、外観状況と、転送面及びボール表面のEPMA分析結果から、固体潤滑剤の被膜は殆ど摩滅しており、ボールネジ及びナットの寿命は殆ど無いものと考えられる。

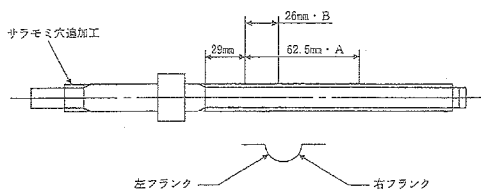


図9 ボールネジ形状と走行位置

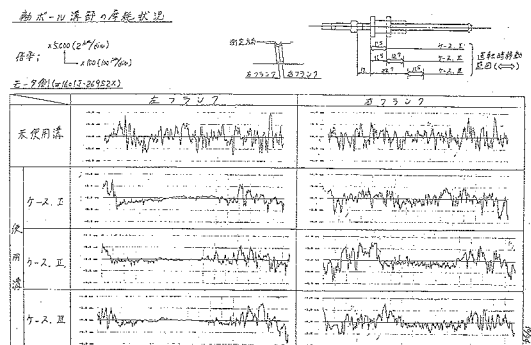


図10-1 軸ボール溝部の摩耗状況

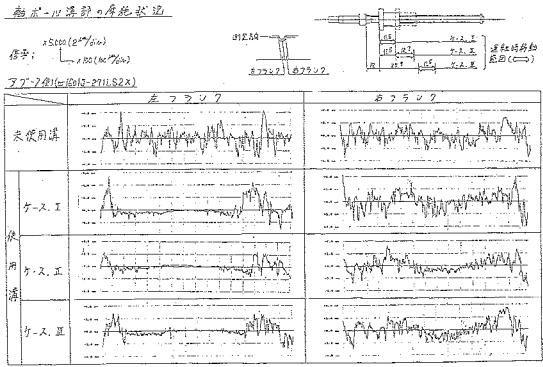


図10-2 軸ボール溝部の磨耗状況

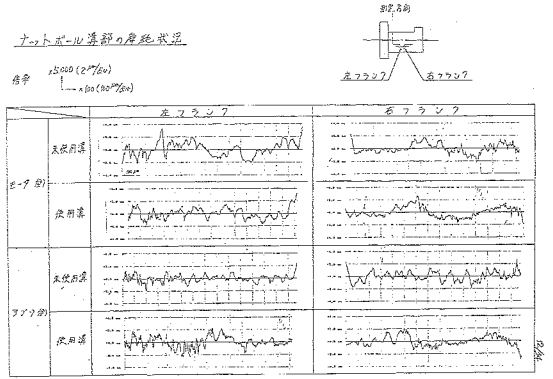


図10-3 ナットボール溝部の磨耗状況

表7-1 ボールネジ軸方向隙間

単位：μm

区分	型番	出荷時の隙間量	荷重条件による隙間量		
			ケースI	ケースII	ケースIII
			測定個所：a	測定個所：b	測定個所c
モーター側	W1601J-269S2X-C3N4	11	22	21	19
アブソ側	W1601J-271LS2X-C3N4	12	28	28	24

表7-2 曲がり及び胴付け端面部の直角度

単位：μm

区分	型番	曲がり	胴付け端面部の直角度
		規格値=MAX 25	規格値=MAX 4
		測定個所：①	測定個所：②
モーター側	W1601J-269S2X-C3N4	MAX 10	MAX 2
アブソ側	W1601J-271LS2X-C3N4	MAX 15	MAX 2

表7-3 ストレート外径部の振れ及び同軸度

単位：μm

区分	型番	ボール溝部支持による振れ	B外径部支持による同軸度
		規定値=MAX 14	規定値=MAX 9
		測定個所：B	測定個所：A
モーター側	W1601J-269S2X-C3N4	5	4
アブソ側	W1601J-271LS2X-C3N4	8	5

図 3.7 測定箇所概略図

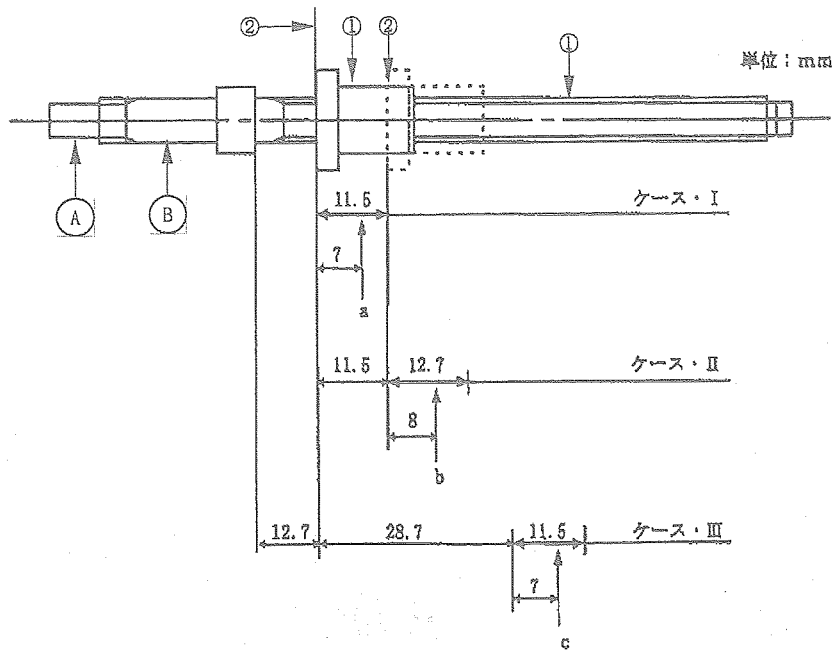


図 11 ボールネジ測定箇所概略図

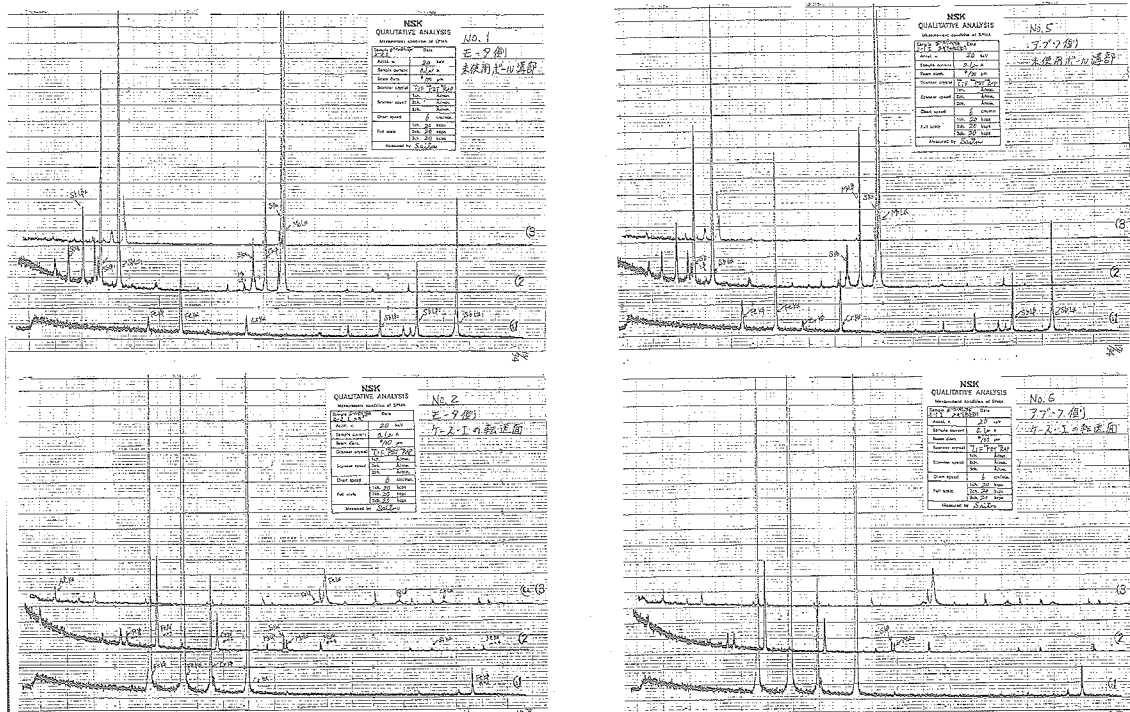


図 12 ボール転送面及びボール表面におけるEPMA分析結果

4.3. マイタ歯車

マイタ歯車は図4に示すようにモーターの回転トルクを、シャフトを介して、さらに超音速可変ノズル板を鉛直方向に変位させるためのボールネジに伝達する機構として用いられている。マイタ歯車は協育歯車工業製マイタギアM2×20Tである。マイタギアは低温環境下に曝されるので、表面処理に歯面高周波焼き入れ後、低温でも潤滑効果が持続するMoS₂の焼付処理を行った。

実験後の外観観察の結果、歯の表面が多少荒れた状態になっていたが、これは剥がれた個体潤滑剤が歯に押さ

れて再付着したものの、再度剥がれたものと思われる。またEPMA線分析結果の一部を図13に示す。歯車の非作用面の分析結果は振幅大きい線図を呈しているが、この現象はマイタ歯車の表面粗さに依存している。Mo、Sにおける水平方向に対する増減は認められなかった。また作用面における当たり部と非当たり部で比較をしても個体潤滑剤である元素の落差は認められなかった。その結果マイタ歯車の歯面には皮膜が残っているものと推測され、個体潤滑剤が低温環境下でも機能しているものと考えられる。

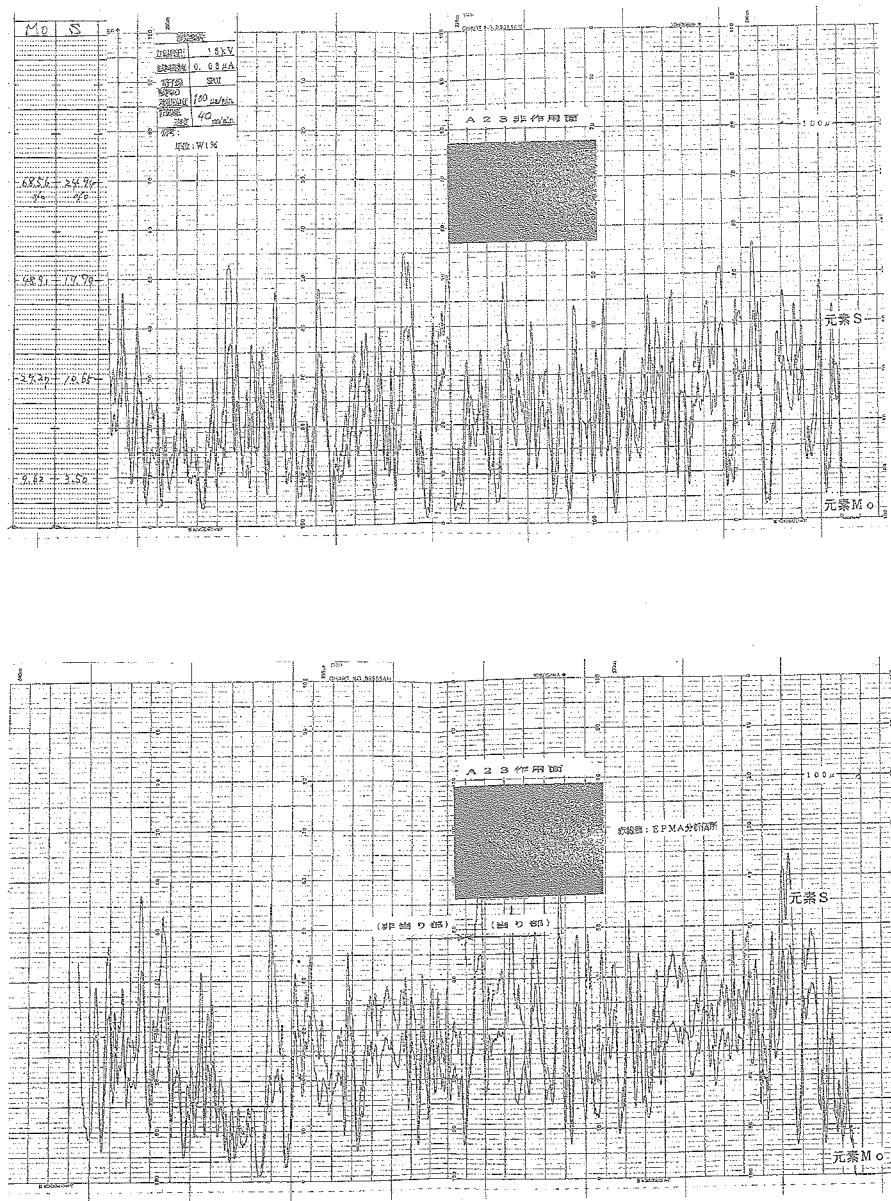


図13 マイタ歯車歯面EPMA分析結果

4.4. フランジブッシュ

フランジブッシュは図4に示すように、本供試体が低温環境下に曝され熱収縮した分に遊びを持たせる部品である。フランジブッシュは大同メタル工業製の標準市販品MU4520FDUであり、0.2m小型超音速風洞に使用しているものと同じものである。潤滑剤としてPTFE+Pbを用いて実験に使用した。

実験後の外観観察の結果、アブソコーダー側の内径の皮膜はほぼ正常な状態で残っていたが、一部剥離した箇所が認められた。これはフランジブッシュをギアケースに圧入にて挿入しているため、検査を行うため分解時に剥離させてしまったものである。また外径は青みがかった色を呈していて、円周方向に筋がついていた。フランジブッシュの膜厚測定の結果は図14に示すように、膜厚はアブソコーダー側、モーター側のいずれも $300\mu\text{m}$ あることが認められた。その結果フランジブッシュは取り外し時の潤滑剤の剥離や傷は認められたものの、受圧部には十分な潤滑皮膜が残存し、機能していたものと考えられる。

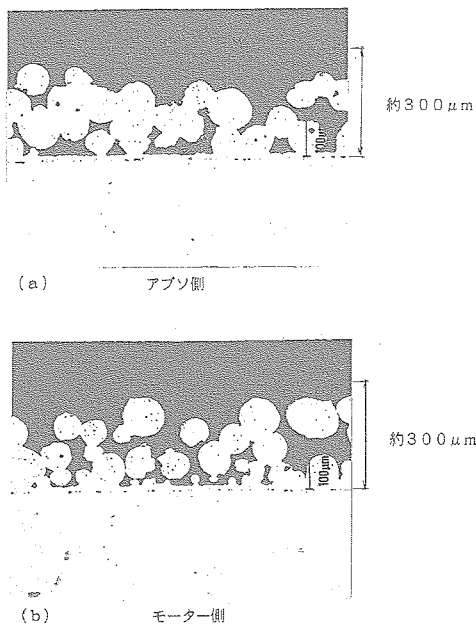


図14 フランジブッシュ膜厚測定結果

4.5. 球面軸受

球面軸受は図4に示すように、ジャッキ装置と可変ノズル板の間の摩擦力を軽減するために取り付けられている。可変ノズル板をスムーズに押し上げるための部品である。球面軸受は大同メタル工業製の標準市販品SM08DU3であり、0.2m小型超音速風洞に使用しているものと同じものである。潤滑剤としてPTFE+Pbを用いて実験に使用した。

実験後の外観観察の結果、球面体（内輪）の表面には傷は観察されなかった。軸受外輪は幅方向の両端部において潤滑皮膜が摩滅しているのが認められたが、中央付近には十分に皮膜が残っていた。その結果球面軸受は潤滑機能の働きをするだけの皮膜は十分に残っていて、低温環境下においても使用可能だと考えられる。

4.6. ハーモニック減速機付ステッピングモーター

ハーモニック減速機付ステッピングモーターは図4に示すように可変ノズル板制御用ジャッキ装置を駆動させる動力源であり、一つのジャッキ装置につきアブソコーダーと対になって取り付けられている。本部品は低温環境から保護するため、既に -40°C まで低温対策が施されているハーモニック・ドライブ・システムズ製ハーモニック・ドライブCS-14-167-1UM-PM-B-SPに、ヒーターと保温ケースによってモーターの周囲温度を 20°C 前後に保温するように設計した。

実験後の外観観察の結果、供試体について支障となるような傷、打痕等の不具合は認められなかった。また表8に示す機械特性についても検査した結果、ロストモーションが増大していることが判明したが、これはハーモニック・ドライブの減速機歯面に若干の摩耗が起り、そのために負荷領域で剛性が低下したものと考えられる。しかしそれ以外には異常は認められなかった。外径寸法に関しても表9に示すとおり特に異常は認められなかった。図15に示すようにハーモニック歯形摩耗度では、フレクスラインには歯底部に僅かな摩耗が見られたが、形状には異常は認められず、駆動には影響ないと考えられる。サーキュスラインについては摩耗度、形状共に異常は認められなかった。部品硬度についてもフレクスライン、サーキュスライン、ウェーブジェネレーターについて検査したが、いずれも規定値の範囲内で収まっていて、特に問題はないと考えられる。モーターの電気特性の検査では巻線抵抗、コイルインダクタンス、把持トルク、位置精度、最大起動トルク、ブレーキ特性を実験後に測定したが、いずれも規定値の範囲内で収まっていて、特に問題はないと考えられる。以上の各検査の結果、ハーモニック・ドライブの減速機歯面に若干の摩耗による剛性低下が認められた以外には異常は無く、今回の実験のごとくヒーターを使用して温度管理をおこなえば、低温環境下においても問題なく使用できるものと考えられる。しかし、本モーターはそれ自体が発熱体であり、ヒーターで保温を行った状態で常温で使用した場合、逆に加熱という問題が発生し、常温・低温の両条件で使用が可能な保温方法、または温度制御の方法を考えるのが今後の課題だと思われる。

表8 モーター電気特性検査結果

検査項目	規定値	測定値	備考
巻線抵抗	2.4Ω ±10% at 25°C	2.461~2.472	
コイルインダクタンス	4.3mH ±20% at 1kHz 1Vr.m.s.	4.427	
把持トルク	0.46N·m MIN. at I=3.0A	0.524	
位置精度	0.18° spread MAX.	0.0558	
最大起動トルク	1980pps MIN.	2843	
静摩擦トルク	1.471N·m MAX.	2.991	
アーマチュア吸引時間	20msec MAX.	14.0	at 25°C DC=24V
アーマチュア釈放時間	30msec MAX.	2.0	at 25°C DC=24V

表9 外径寸法

項目		基準値	測定値
出力軸	外径	φ 12 h6(0~-0.011)	φ 11.997
	キー溝幅	4 N9	キーゲージ合格
	キー溝深さ	9.5(0~-0.1)	9.46
	軸端長さ	28 ±0.2	27.8
出力フランジ	インロー径	φ 54 h7(0~-0.030)	φ 53.998
	取付穴	4・φ 5.5キリ通し 等配 φ 70 ±0.3	φ 5.5キリ通し 等配 φ 69.9
長さ	全長	98 ±0.3	98.1
	取付面からの長さ	70 ±0.3	70.2

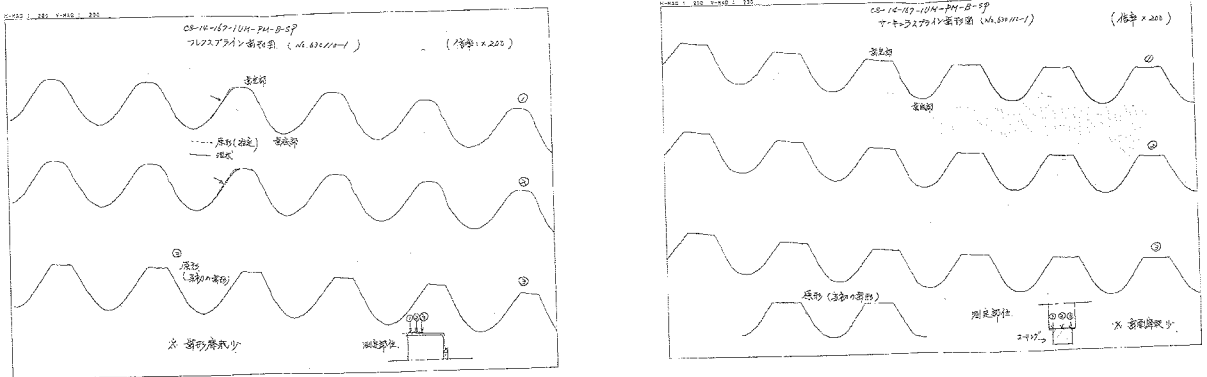


図15 歯形測定結果

表10 部品硬度測定結果

部品名	基準値	測定値
フレクスプライン	HRC28~32	HRC31.0
サーキユスプライン	HB299~285	HB271
ウェーブジェネレータ	HRC57~63	外輪 HRC60.0 内輪 62.3

4.7. アブソコーダー位置検出器

アブソコーダー位置検出器は図4に示すように可変ノズル板を変位させるハーモニック減速機付ステッピングモーターの位置を検出し、可変ノズル板を任意の形状に制御する装置として一つのジャッキ装置につきステッピングモーターと対になって取り付けられている。本部品は低温環境から保護するため、既に-30℃まで低温対策が施されているNSD製MRE-32SP062-S085に、ヒーターと保温ケースによって保温するように設計した。

実験後の外観検査の結果は図16に示すように、センサ内部の部品の変形破損、接合部の低下(ネジのゆるみ等)、腐食・発錆、基盤の破損などの目視検査をしたが特に異常は認められなかった。オイルシールはリップ部に若干の初期摩耗が見られたが問題になる程度のもではなく、硬度計を使用し素材であるニトリルゴムの硬度を新品と比較測定したが、結果に差異は見られなかった。尚、測定方法はJIS A6301 A型に準ずる。シャフト側のインナーレース側面に結露のためと思われる錆が生じていたが、内部に異常は認められなかった。電気特性の検査は表11に示す検査結果のとおり、直流電流、インピーダンス、インダクタンス、絶縁抵抗を実験後に測定したが、いずれも規定値の範囲内で収まっていて、異常は無いものと考えられる。リニアリティの検査については、精度は64ポイント/回転として計測を行い、主センサの原点基準で、主センサの原点と幅センサの原点のずれを変換器のdigitで表示し零調をした。そしてマルチメーターでセンサの入力電圧(SIN)を測定し、次に32ポイント/回転として出力電圧を測定して、出力電圧の最大値、最小値から入出力比を1式より算出した。

$$\text{入出力比max(min)} = \frac{\text{出力電圧max(min)}}{\text{入力電圧}} \times 100(\%) \quad \dots(1)$$

その結果を図17に示す。実験前と実験後の測定結果には大きな差は認められず、問題はないと考えられる。これらの検査結果より、シャフト側インナーレース側面に結露により生じたと思われる錆が認められたが、他のセンサ内部部品には結露した形跡は無く、シャフト端部のみ低温になったものと推測できる。その他の部分には異常は認められず、今回のようにヒーターを使用して温度管理すれば問題なく使用できると思われる。

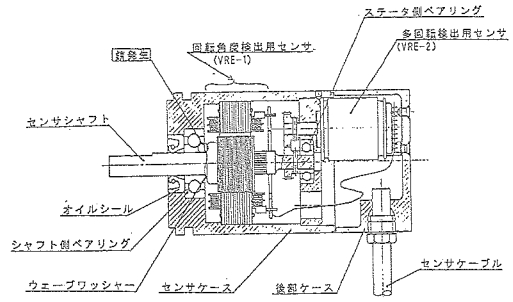


Fig. 2 センサ構造図

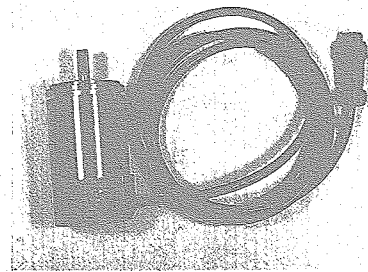


Photo. 1 センサ外観

図16 アブソコーダー外観

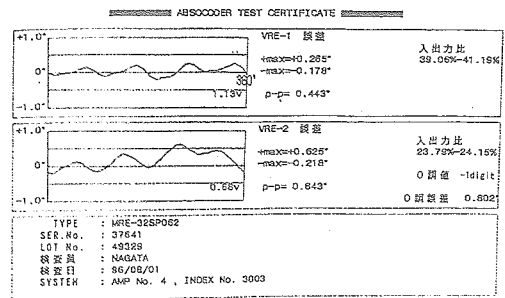


Fig. 1-1 源相誘リニアリティ

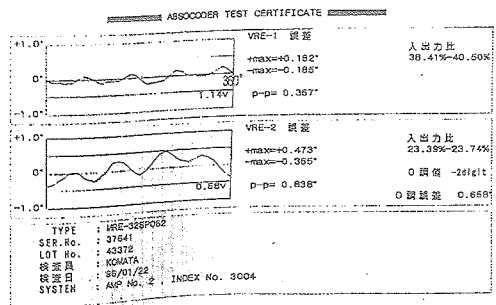


図17 リニアリティ検査結果

表11 アブソコーダー検査結果

検査項目		検査結果	規格値
直流抵抗(Ω)		SIN: 115.6 COS: 115.4 OUT1: 7.6 OUT2: 123.6	SIN: 104~127 COS: 104~127 OUT1: 6.7~8.4 OUT2: 111~138
インピーダンス(Ω)		SIN: 174.4~190.6 COS: 173.5~190.7 OUT1: 584~595 OUT2: 481~486	SIN: 154~211 COS: 154~211 OUT1: 513~656 OUT2: 437~546
インダクタンス(mH)		SIN: 1.8~2.1 COS: 1.8~2.1 OUT1: 9.1~9.3 OUT2: 7.2~7.3	SIN: 1.5~2.3 COS: 1.5~2.3 OUT1: 8.0~10.1 OUT2: 6.5~8.1
絶縁抵抗(M Ω)		センサケース各回路間: ∞ 各回路間: ∞	100M Ω 以上
軸トルク		CW,CCW: 各0.019N·m	0.049N·m以下
リニアリティ	精度	誤差巾 返却時(出荷時) VRE-1:0.443° (0.367°) VRE-2:0.843° (0.838°)	VRE-1:1.0°以下 VRE-2:2.0°以下
	零調	返却時(出荷時) 0調値:-1digit(-2digit) 0調誤差:0.802° (0.658°)	2.5°以下
	入出力比	VRE-1: 返却時 39.6%~41.19% 出荷時 38.41%~40.51% VRE-2: 返却時 23.79%~24.15% 出荷時 23.39%~23.74%	VRE-1:35.7%~46.4% VRE-2:21.4%~32.1%
高速回転試験		高速回転時の桁上がり不良及び異常音は認められなかった。	
ハンマリング		各回路ともに直流抵抗の変動は認められず、従ってセンサ内部回路の接続部分において断線の可能性は認められない	
センサ内部調査	オイルシール	リップ部は若干の初期摩耗が見られたが、新品との硬度比較をしたが変化は認められなかった	
	ベアリング	グリスに若干の変色があったものの劣化は認められなかった	
	ギヤ	異常摩耗、グリスの変色・劣化は認められなかった	
ケーブル	外皮	若干軟化していたが異常は認められなかった	
	内部	断線・変色等の異常は認められなかった	
コネクタ		半田付け部、ブッシュの変色・硬度変化の異常は認められなかった	

5. まとめ

今回の実験の最大の目的である低温環境下における軸受、ボールネジ、歯車等の主となるジャッキ駆動部分に施した固体潤滑剤の効果について、選定した MoS_2 の潤滑剤としての十分な耐久性の有無を調査したが、場所によっては潤滑剤が摩滅している箇所が認められた。しかし、潤滑剤の残存量がほとんどなくなっている状態においても母材には摩耗、損傷等の異常は見られなく、結果的に潤滑剤の有用性は確認できたが、果たして今回の実験で供試体に施した低温対策では、実際にはどの程度の残存寿命があるかを評価するには見極めが困難であるという実験結果となった。また、今回行った耐久試験は、ほぼ連続運転に近い状態での結果であり、断続的に使用する場合及び常温、低温を繰り返して使用する場合等の、実際に風洞を運転する際に生じるような試験条件は今回は行っておらず、条件によっては今回の実験よりも早く寿命がくる場合も考えられる。従って、潤滑条件を変えた破壊までの実験、例えば無潤滑のものを含め、今回と同様の対策を施した供試体を数個準備し、途中経過を適時確認しながら破壊するまでの運転を行う等の実験が必要と思われる。

6. 参考文献

- 1)川崎重工業株式会社：航空宇宙技術研究所納小型超音速風洞・低温実験装置 完成図書、1996年3月
- 2)川崎重工業株式会社：航空宇宙技術研究所納小型超音速風洞・低温実験装置 低温実験供試体調査報告書、1996年11月

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-029

発行日 2004年3月25日
編集・発行 独立行政法人宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1
TEL 0422-40-3000 (代表)
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

