

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

真空用固体潤滑軸受の揺動運転時における寿命試験 試験報告書(その1)

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

真空用固体潤滑軸受の揺動運転時における寿命試験
試験報告書(その1)

Technical Memorandum of Oscillatory-motion Lifetime
Test of Solid-lubricated Ball Bearings, Part 1

田中 康夫、小原 新吾、佐々木 彰、今川 吉郎

Yasuo TANAKA , Shingo OBARA , Akira SASAKI , Kichiro IMAGAWA

総合技術研究本部 マテリアル・機構技術グループ

Machanical and Materials Engineering 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

2023年10月10日

2023年10月10日

2023年10月10日

2023年10月10日

2023年10月10日

2023年10月10日

和 文 抄 録	<p>本書は、真空用固体潤滑#7900 軸受について、揺動試験時の寿命試験結果を纏めたものである。</p> <p>本試験では、軸受が寿命に達するまで試験を継続する計画であったが、筑波宇宙センターに発生した（計画外の）停電により中断を余儀なくされた。</p> <p>本試験では、以下の結果が得られた。</p> <p>(1) #7900 軸受の揺動試験において、700000 サイクル以上の寿命を有することが確認された。ただし、試験は停電で中断されたため、寿命を確認することはできなかった。</p> <p>(2) 本試験では、50000 サイクルから 100000 サイクルの間にトルク波形の特性値 μ_{s_min}、μ_{s_max}、μ_p が全て急激に増大しており、摩擦条件が変化したことが考えられる。</p> <p>今後、製造メーカーに軸受の分解及び転走面の真円度測定を依頼し、併せてNASDAでも転走面の元素分析等を行うことにより、原因解明を行う予定である。</p> <p>(3) 今後、停電等で試験が中断した場合でも容易に再開可能となるよう、試験装置の改良を行う予定である。</p>
和文キーワード	ADEOS-Ⅱ、太陽電池パドル、TCM、軸受、揺動試験

目 次

1. 適用範囲.....	1
2. 関連文書等.....	1
3. 試験目的.....	1
4. 試験結果.....	6
4.1 試験装置.....	1
4.2 供試体.....	
4.3 試験条件.....	1
4.4 計測項目.....	2
4.5 寿命判定条件.....	2
5. 試験結果.....	2
5.1 試験環境等.....	2
5.2 摩擦トルクの変化.....	3
5.3 考察.....	4
5.4 試験中断について.....	5
6. まとめ.....	5

1. 適用範囲

NTN 製真空用#7900 固体潤滑軸受について、真空中揺動運転時の寿命試験を実施した。
本書では速報として、トルク値の変化について結果を纏めた。今後、供試軸受について転送面の光学観察、真円度測定及び元素分析等を行う予定である。

2. 関連文書等

- (1) ADEOS-II TCM 用軸受及び固体潤滑剤の評価試験 試験結果報告
- (2) ADEOS-II TCM 用軸受のトルクピーク低減化試験 試験報告書
- (3) 真空用固体潤滑軸受のトルクピーク低減化試験 試験報告書(その1)
- (4) 信頼性向上技術調査事例 ひまわり 3 号観測カメラの走査駆動系に異常

3. 試験目的

固体潤滑軸受では、一定角度の往復運転(揺動運転)を行う場合、一定方向に運転した場合とは異なる挙動を示すことが確認されている。特に、揺動範囲の端部において、駆動に要するトルクが急上昇する現象(トルクピーク)が発生し、このトルクピークにより、GMS-3 ではミラースキャン機構の動作不良が発生している。
本試験では、真空用固体潤滑軸受の揺動試験における寿命を確認するため、寿命試験を実施し、試験中のトルクの変化を確認した。

4. 試験結果

4.1 試験装置

本試験は、筑波宇宙センター研究開発棟の真空機器特性評価試験設備(設備B)に軸受揺動試験装置を組み付けて行った。図1に、設備B及び軸受揺動試験装置を示す。

4.2 供試体

供試体として、表1に示す仕様の軸受を使用した。また、図2に供試軸受の外観を示す。
なお、本軸受の内輪及び外輪は ADEOS-II TCM 用軸受と同等であり、固体潤滑膜及び保持器は、技術研究部(機構グループ)における業務「民生用軸受の宇宙適用性に関する検討」に使用し、宇宙適用性が確認された供試体と同等とした。

表 1 供試体

No.	試験項目	供試体	S/N	備考
1	真空揺動試験	真空用#7900 軸受(NTN 製) FN-F-SF00T05DBP4V50	NTN-004	MoS ₂ スパッタリング膜 PTFE 系保持器 (*1)

(*1) 内径 10mm、外径 22mm、厚さ 6mm。
初期接触角 15 deg.、ピッチ円直径(PCD) 16 mm、玉径 3.175 mm、玉数 11 個。

4.3 試験条件

表 2 に、本試験における試験環境条件を示す。また、表 3 に揺動試験条件を示す。
本試験で実施した試験環境条件及び揺動試験条件は、関連文書(1)～(3)で実施した試験条件と同等である。

表 2 試験環境条件

No.	真空環境	温度環境	備考
1	超高真空環境 (1×10 ⁻⁶ Pa 程度)	常温 (温度制御無し)	

表 3 揺動試験条件

No.	設定項目	設定または設定値	備考
1	動作状態	揺動運転	
2	角度範囲 θ_0	25°	(*2) TCM 定常運用角度
3	角速度 ω_0 (設定値)	2.5 °/s	TCM 定常運用時の 5 倍
		5.0 °/s	TCM 定常運用時の 10 倍
		7.5 °/s	TCM 定常運用時の 15 倍
4	停止時間 t_0	1 s	
5	揺動回数	軸受が寿命に到達するまで	
6	荷 重	アキシャル荷重 240 N	(*3)

(*2) 揺動角度 25° では、各玉の内外輪転走面上の軌跡は互いに重ならず、また、保持器から内外輪転走面への移着も発生しない。

(*3) 接触面圧は、玉/内輪:1.62 GPa 相当、玉/外輪:1.53 GPa 相当。

4.4 計測項目

表 4 に、本試験における計測項目を示す。

表 4 計測項目

No.	計測項目	備 考
1	摩擦トルク	図 1-2 に示す板ばねにより測定
2	軸角度	
3	軸角速度	
4	真空チャンバ内圧力	
5	真空チャンバ内温度	チャンバのベースプレート温度を測定

4.5 寿命判定条件

軸受の寿命判定条件は、表 5 の通りとした。

表 5 寿命判定条件

No.	判定項目	判定値	備 考
1	摩擦トルク	軸受2個分の摩擦トルクが、摩擦係数換算で 0.1 以下(摩擦トルク 0.12 Nm 以下)であること	(*4)

(*4) 判定値は、宇宙用固体潤滑軸受の試験で採用されている一般的な値。

摩擦係数 μ の定義は $\mu = T/(W \cdot d/2)$ 、ここで、T:摩擦トルク、W:アキシャル荷重、d:軸受内径。

5. 試験結果

5.1 試験環境等

当初、本試験は軸受の摩擦トルクが表 5 に示す寿命判定条件に到達するまで継続する予定であったが、70 万サイクルを越えた時点で建屋に長時間の夜間停電が発生し、全ての計測装置が停止してしまったため、軸受回転角等の装置状態が不明となり、試験中止を余儀なくされた。

なお、計測装置には無停電電源が接続されていたが、停電発生が深夜で、かつ長時間であったため、電力復旧まで稼働状態を維持することはできなかった。

表 6 に、真空環境及び温度環境の測定値を示す。

表 6 試験環境条件(測定値)

No.	項 目	測定値等	備 考
1	試験期間	平成 13 年 11 月 27 日 ～ 12 月 28 日 平成 14 年 1 月 9 日 ～ 4 月 9 日	(*5)
2	試験サイクル数	702200 サイクル	(*6)
3	真空環境	$3.7 \times 10^{-6} \sim 8.8 \times 10^{-7} \text{Pa}$	(*5)
4	温度環境	23.9 ～ 25.1℃	

(*5) 年末・年始は真空ポンプを停止し、各バルブを閉鎖して低真空環境(数 Pa 程度)を保持。

なお、平成 11 年 12 月 28 日停止時点で 117510 サイクル。

(*6) データ有効分のみ。実際には 707000 サイクル程度まで動作していたが、停電によりデータが破損して処理不能となった。

図 3 に、駆動角速度の設定値と実際の値との関係を示す。

本試験では、当初揺動角速度を 2.5 deg/s に設定して試験を行い、実際の動作角速度もほぼ設定値通りとなっていたが、約 10000 サイクルから徐々に低下し、約 2.2 deg/s となっていた。120000 サイクルから、設定値を 5.0 deg/s に変更して試験の加速を図ったが、実際の動作角速度は約 3.4 deg/s となっていた。

その後、約 200000 サイクルから動作角速度が急上昇し、約 340000 サイクルには約 22 deg/s にまで到達した。このため、設定値を 2.5 deg/s に低下させたところ、暫くは動作角速度は低下したが、その後再度急上昇が始まり、再び約 22 deg/s まで上昇した。

止むを得ず、そのまま試験を継続することとしたが、その後約 590000 サイクルでは動作角速度は約 3～5 deg/s まで低下した。

593550 サイクルから、再び設定値を 5.0 deg/s に変更したが、動作角速度は緩やかに 7～8 deg/s まで上昇した後低下し、約 630000 サイクルでは 3～4 deg/s に落ち着いた。

638740 サイクルから、設定値を 7.5 deg/s に変更したところ、多少の変動はあるものの、動作角速度は 4.5～5 deg/s で安定した。

図 3 に示す駆動角速度の変化については、試験実施条件を一定に保つという観点からは望ましくはないものの、後述するように駆動トルクの駆動角速度依存性が見られないことから、駆動トルクに影響を与えない角速度範囲であると判断し、試験を続行した。

なお、角速度異常の原因は、制御回路の故障と考えられる。

5.2 摩擦トルクの変化

図 4-1～4-15 に、1～70 万サイクルにおける 50000 サイクル毎のトルク波形を示す。

なお、図 4 の各図において、横軸は 1 揺動サイクルの時間に設定している。図 3 に示すように、試験中に駆動角速度が変化しているため、図 4 の各図で単位目盛りは変化している。

図 5 にトルク波形の特性値 $\mu_{s,min}$ 、 $\mu_{s,max}$ 、 μ_p の揺動試験中の変化を、図 6 に各特性値の定義を示す。また、図 7 に、揺動範囲の変化を示す。

さらに、図 8 に関連文書(3)の試験結果(NTN-1 及び 2)との比較を示す。下表 7 に、図 8 中の S/N と試験条件との関連を示す。図 8 より、54000 サイクルまでの範囲では各軸受の試験結果は非常に良く一致し、各試験結果間には再現性があることがわかる。

表 7 試験環境条件

S/N	慣らし運転	真空環境	温度環境	備 考
NTN-1	無 し	$8.7 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-6} \text{Pa}$	23.7～26.7℃	
NTN-2	一方向回転 1500 回転	$6.2 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{Pa}$	24.2～25.2℃	
NTN-4	無 し	$3.7 \times 10^{-6} \sim 8.8 \times 10^{-7} \text{Pa}$	23.9～25.1℃	

図 5 より、各特性値は約 50000 サイクルを過ぎると急速に増加し、約 150000 サイクル以後は勾配が少々緩やかになるものの、一様に増加傾向となっている。特に、約 70000 サイクル以降は $\mu_{s,max}$ と μ_p がほぼ同一となって

おり、摩擦現象に変化が生じたものと考えられる。

この後は、 $\mu_{s,max}$ の増加を追いかけるように μ_p が増加し、 $\mu_{s,min}$ も増加傾向であるため、各サイクルのトルク波形では、54000 サイクル以前のように μ_p が目立つことはなく、振れが少なく一定の傾向となっている。

図 7 より、試験を通じて揺動範囲はほぼ同一位置であることがわかる。なお、図 7 中の 120000 サイクル付近で多少の変化が見られるが、ここは年末・年始の運転停止期間に相当し、約 2 週間の停止期間中に角度検出器にドリフトが生じたものと考えられる。

5.3 考察

本試験の結果、約 50000 サイクル以降トルク波形の特性値 $\mu_{s,min}$ 、 $\mu_{s,max}$ 、 μ_p が全て急激に増大している点が注目される。

特に、揺動端のトルクピーク μ_p よりも軸受が回転中のトルク値 $\mu_{s,min}$ や $\mu_{s,max}$ の増加が著しく、 $\mu_{s,min}$ については、50000 サイクルまではほぼ 0.003 で安定していたが、100000 サイクルでは 0.01 に、200000 サイクルでは 0.02 に達している。また、 $\mu_{s,max}$ については、約 50000～100000 サイクルの範囲で 0.0075 から 0.015 に増大し、その後も増加を続けている。

ここで、試験条件及び環境条件の影響について考察する。

本試験において、真空環境及び温度環境はこれまでの試験とほぼ同等であり、試験を通じてほぼ一定に保たれている。

図 3 及び図 5 より、 $\mu_{s,min}$ 及び $\mu_{s,max}$ の増大は駆動角速度を変化させる以前から始まっており、また、駆動角速度を変化させた時点で各特性値に明確な不連続はみられない。なお、その後も駆動角速度とトルク波形特性値との間には明確な関係はみられない。

図 4 より、各サイクルのトルク波形は CCW 側、CW 側でほぼ対称であり、かつ軸受回転中のトルク値はほぼ一定であり、軸受取付時に大きなミスアライメントは発生していないと考えられる。

図 8 より、本試験の結果は 54000 サイクルまでは以前の試験結果と非常に良く一致しており、初期段階では本試験に特異性は無いと考えられる。

図 7 より、試験中に揺動位置に大きな変化はみられない。

以上より、トルク波形特性値の増大について、試験条件及び環境条件の影響は無いと考えられる。

トルク波形特性値の増大原因としては、主として以下の 3 点が考えられる。しかし、現段階ではあくまで推定であり、その特定のためには、今後軸受製造メーカーに依頼して軸受内外輪及び玉の表面観察及び真円度測定、並びに EPMA 等による元素分析等を行う必要がある。

(1) 潤滑膜の摩耗

転送面及び玉の MoS_2 スパッタリング膜が摩耗し、潤滑性能が低下したため、トルク波形特性値が上昇した。

(2) 摩耗粉の堆積による転走位置の変化

玉表面または内外輪転走面に摩耗粉が堆積し、玉の揺動位置が内外輪転走面に対して傾斜した。図 9 に、揺動位置傾斜の概念図を示す。玉の揺動位置が傾斜すると、玉と内外輪との接触角が変化するため、駆動トルクが増大することとなる。

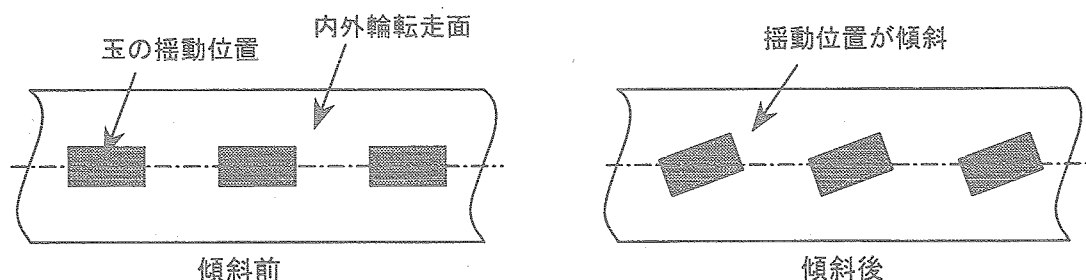


図 9 玉の揺動位置の傾斜

(3) 保持器と玉の接触

玉表面または内外輪転走面に摩耗粉が堆積し、玉と保持器が強く接触するようになった。玉と保持器の接触はすべり摩擦となるため、玉と内外輪との転がりすべり摩擦に比べ駆動トルクが増大することとなる。

5.4 試験中断について

前述の通り、当初本試験は寿命に到達するまで継続する予定であったが、70 万サイクルを越えた時点で建屋に長時間の夜間停電が発生し、試験中止を余儀なくされた。

これは、試験中の計測データが消滅し、揺動角度等の装置状態が不明になったことが主な原因である。しかし、仮に無停電電源の動作時間内に停電が復旧したとしても、試験続行は困難だった可能性が高い。

現在、軸受揺動試験装置には CCW 一方向回転及び CCW-CW 揺動の 2 つの試験モードがあるが、CW 回転モードが無く、揺動途中で停電になった場合、軸受を揺動原点まで戻すことができない。

通電中に真空度異常等で一時停止した場合は、設定条件を保持して試験継続が可能であるが、停電時には揺動角度が初期化されてしまうため、停止位置が原点となる。CW 回転モードがあれば、軸受を原点(または原点近傍)まで戻し、角度を初期化して試験継続が可能であるが、現状では、試験を継続するならば停止位置(揺動範囲の途中)を原点とするしかない。

軸受揺動試験装置に CW 運転モードが無いのは(特に停電時に)大きな問題であり、現在追加を行うべく検討中である。

6. まとめ

本試験では、真空用#7900 軸受の 25° 揺動運転時の寿命試験を行い、以下の結果が得られた。

(1) #7900 軸受の揺動試験において、700000 サイクル以上の寿命を有することが確認された。

ただし、試験は停電で中断されたため、寿命を確認することはできなかった。

(2) 本試験では、50000 サイクルから 100000 サイクルの間にトルク波形の特性値 $\mu_{s,min}$ 、 $\mu_{s,max}$ 、 μ_p が全て急激に増大しており、摩擦条件が変化したことが考えられる。

今後、製造メーカーに軸受の分解及び転走面の真円度測定を依頼し、併せて NASDA でも転走面の元素分析等を行うことにより、原因解明を行う予定である。

(3) 今後、停電等で試験が中断した場合でも容易に再開可能となるよう、試験装置の改良を行う予定である。

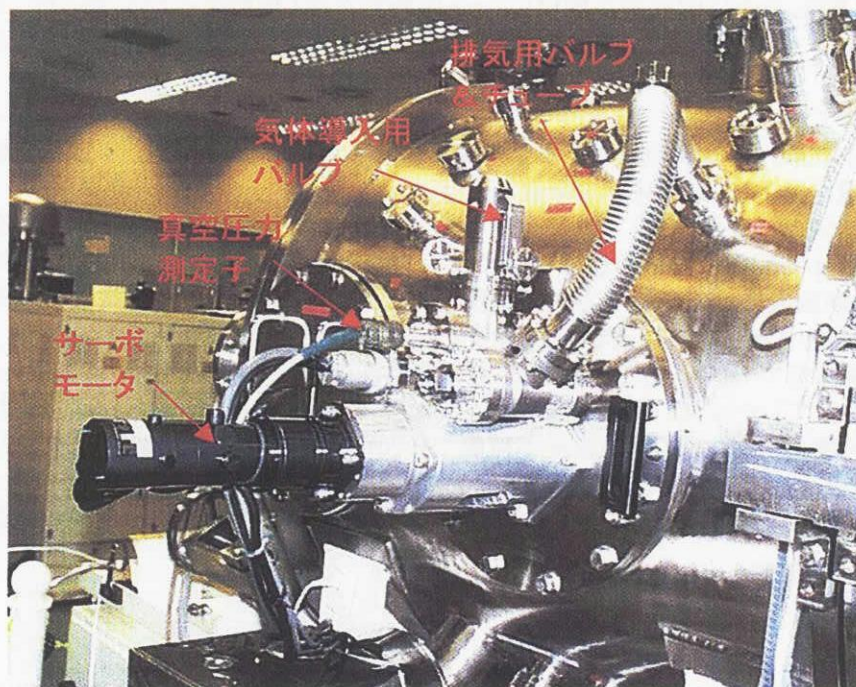


図 1-1 試験機外観(大気側)



図 1-2 試験機外観(真空側)

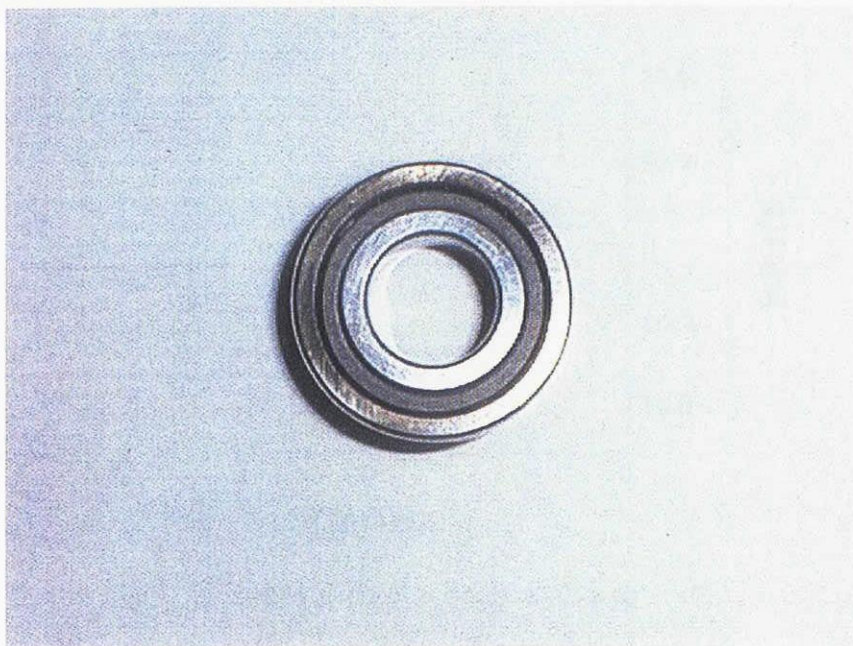


図2 供試体(真空用#7900 軸受)

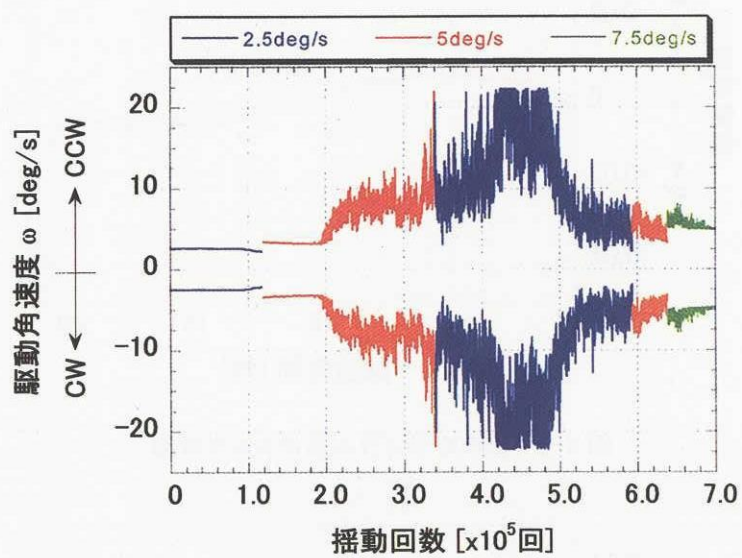


図3 駆動角速度の変化

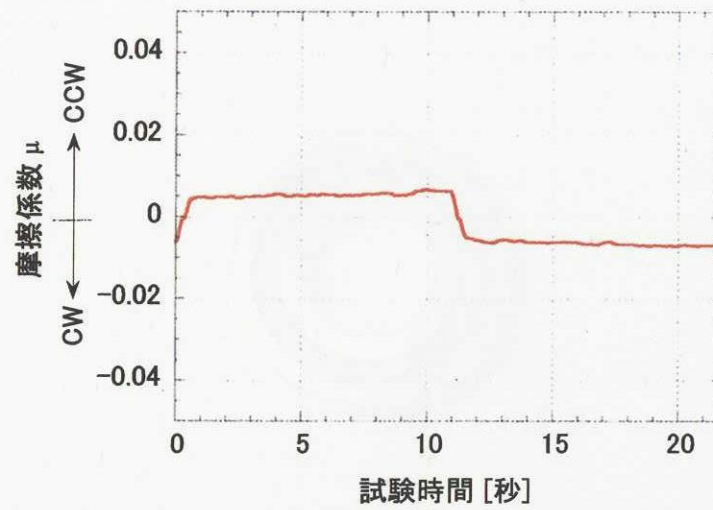


図 4-1 1 サイクル目のトルク波形

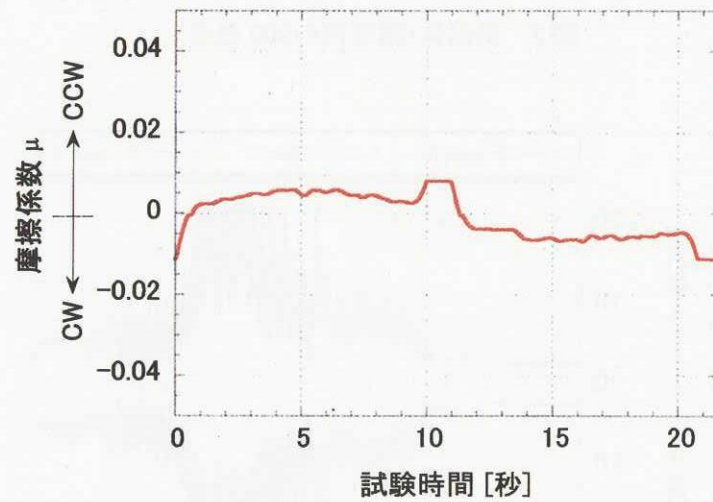


図 4-2 50000 サイクル目のトルク波形

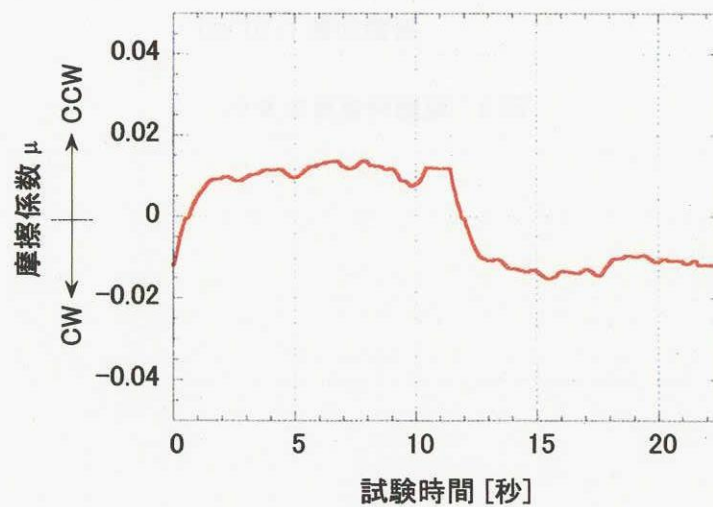


図 4-3 100000 サイクル目のトルク波形

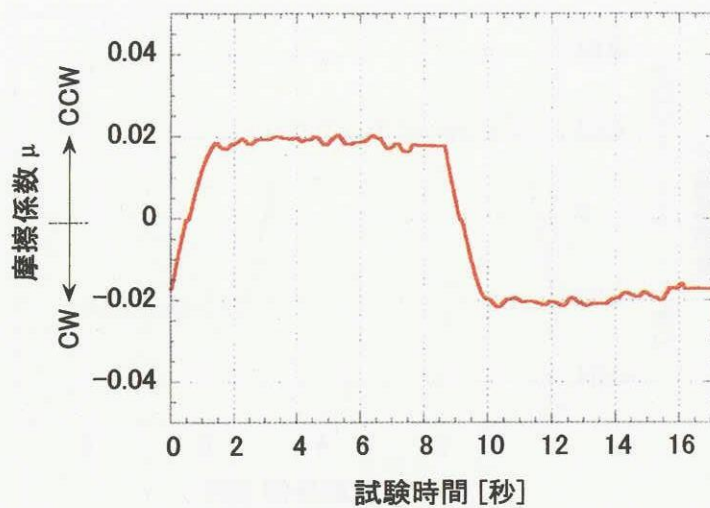


図 4-4 150000 サイクル目のトルク波形

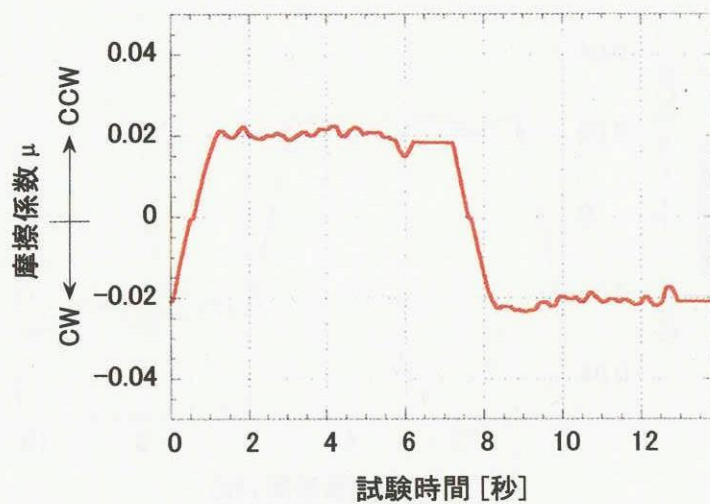


図 4-5 200000 サイクル目のトルク波形

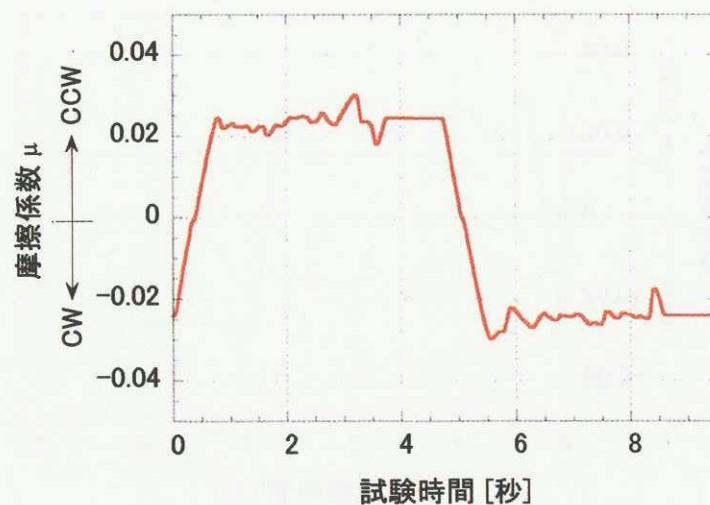


図 4-6 250000 サイクル目のトルク波形

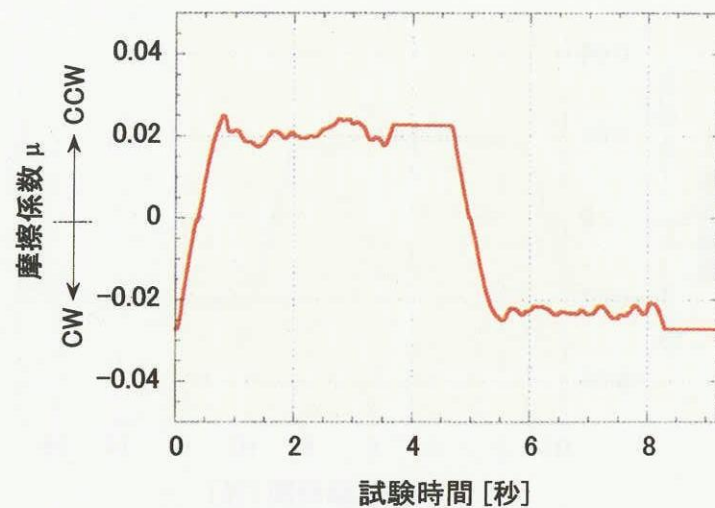


図 4-7 300000 サイクル目のトルク波形

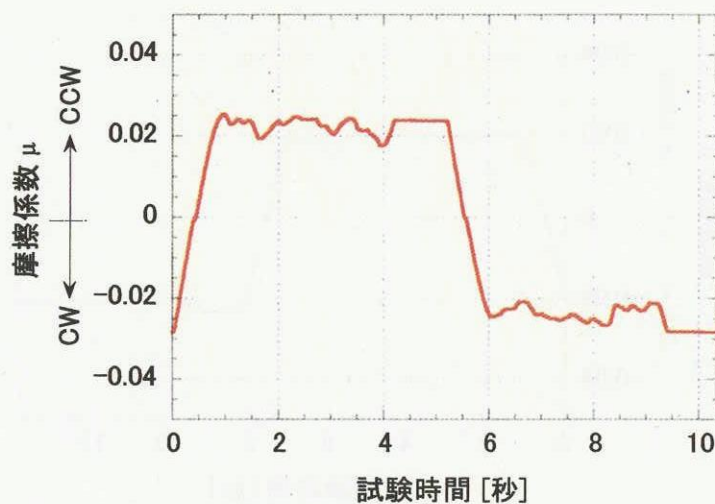


図 4-8 350000 サイクル目のトルク波形

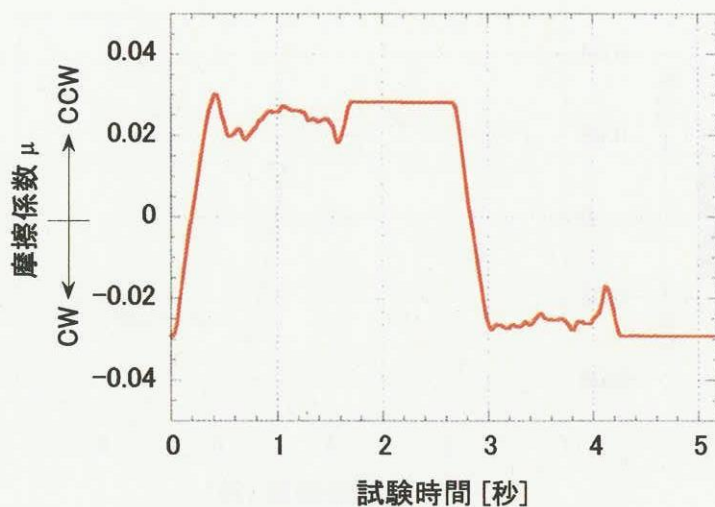


図 4-9 400000 サイクル目のトルク波形

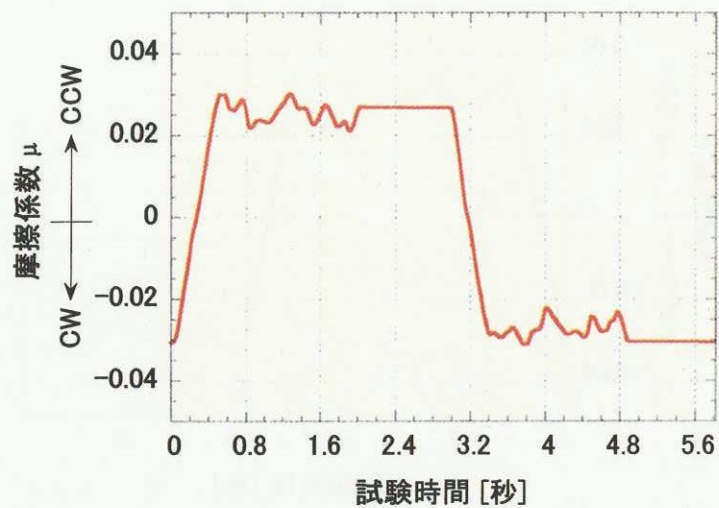


図 4-10 450000 サイクル目のトルク波形

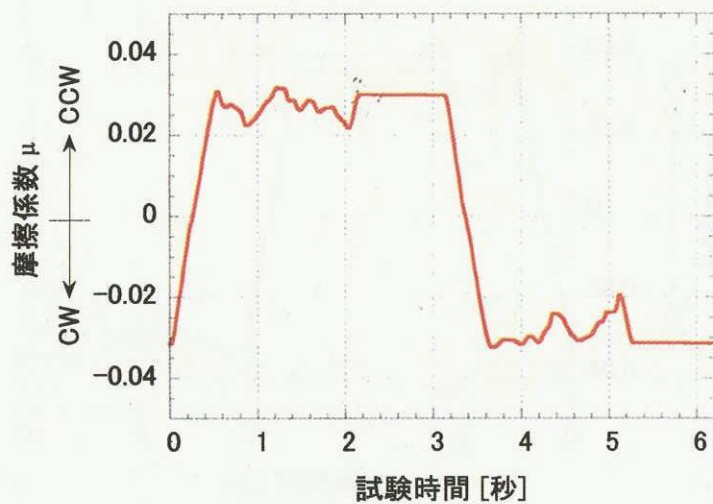


図 4-11 500000 サイクル目のトルク波形

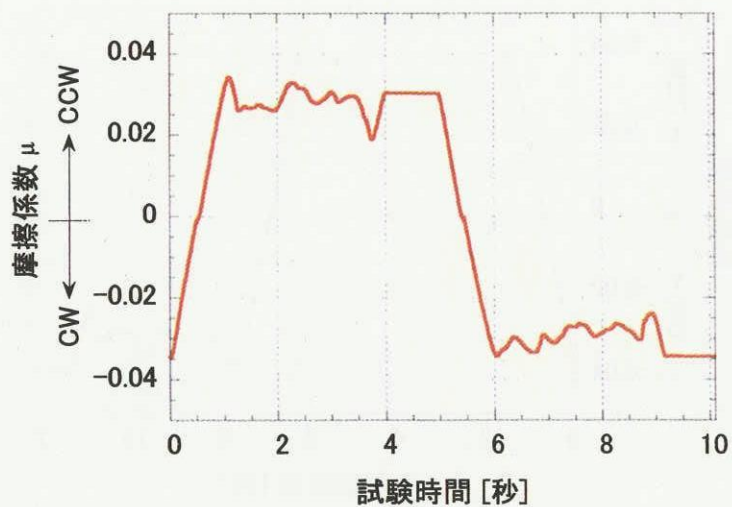


図 4-12 550000 サイクル目のトルク波形

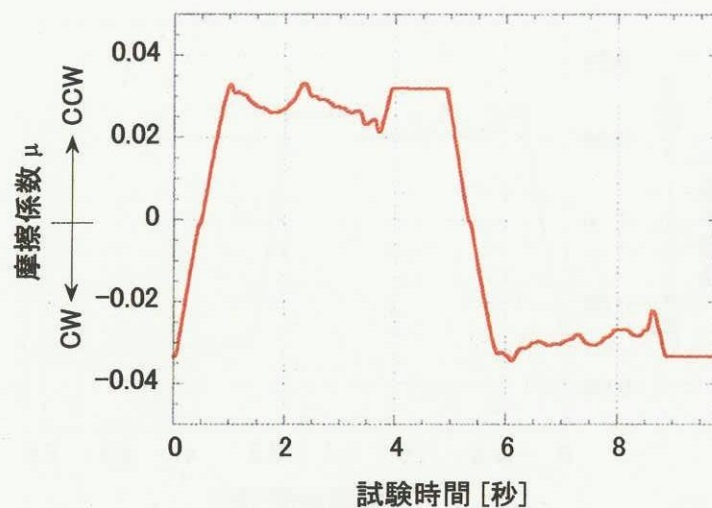


図 4-13 600000 サイクル目のトルク波形

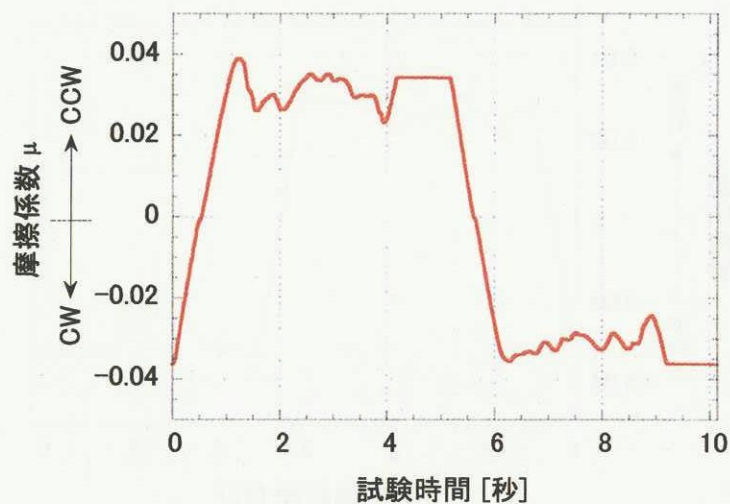


図 4-14 650000 サイクル目のトルク波形

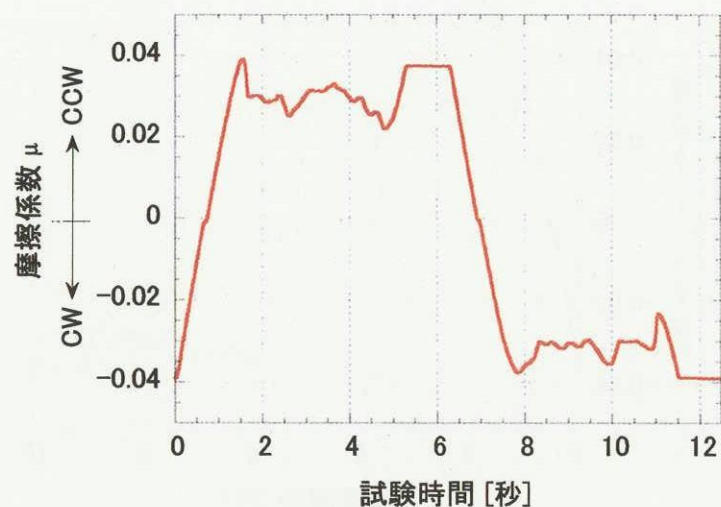


図 4-15 702200 サイクル目のトルク波形

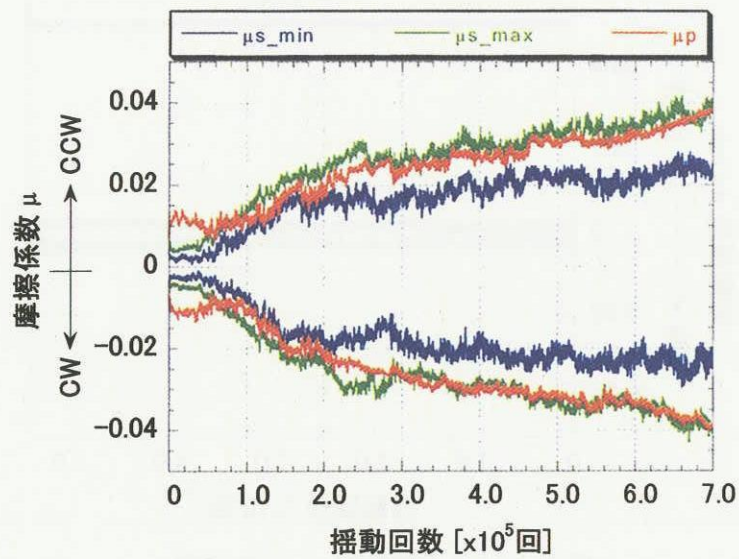


図5 トルク特性値 μ_{s_min} 、 μ_{s_max} 、 μ_p の変化

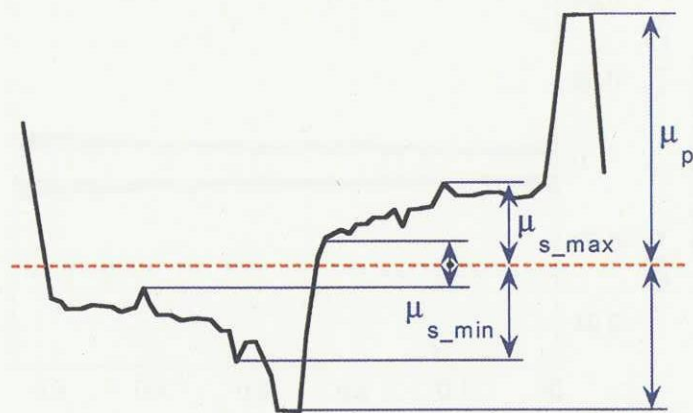


図6 トルク特性値 μ_{s_min} 、 μ_{s_max} 、 μ_p の定義

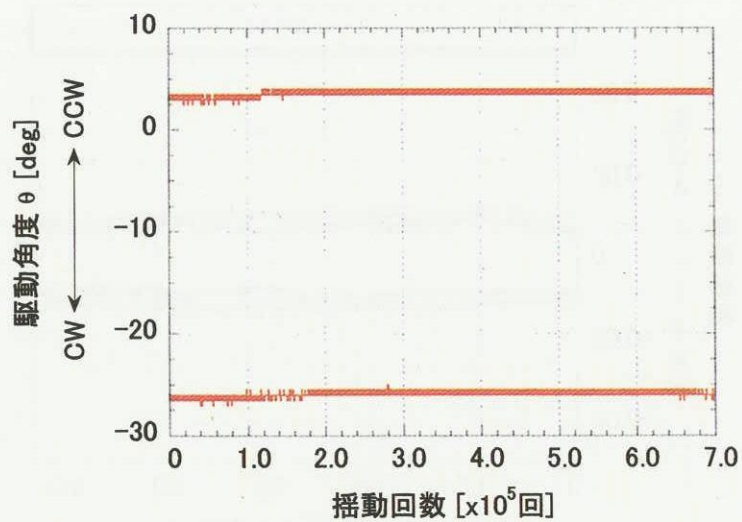


図7 揺動端位置の変化

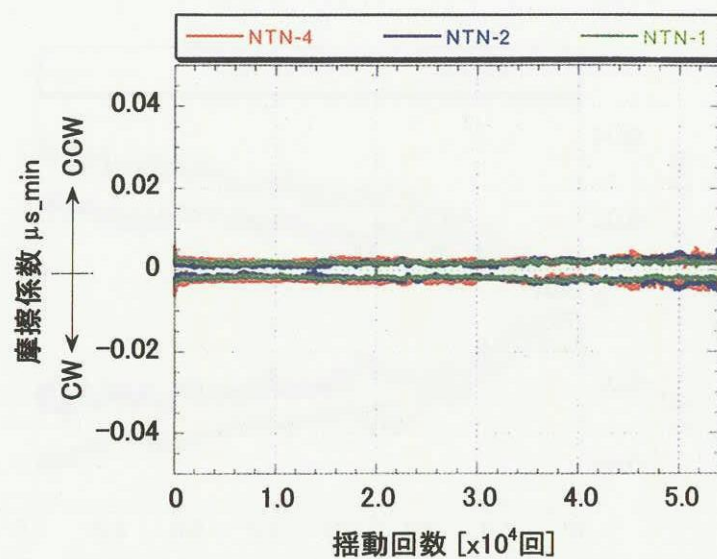


図 8-1 トルク特性値 μ_{s_min} の比較

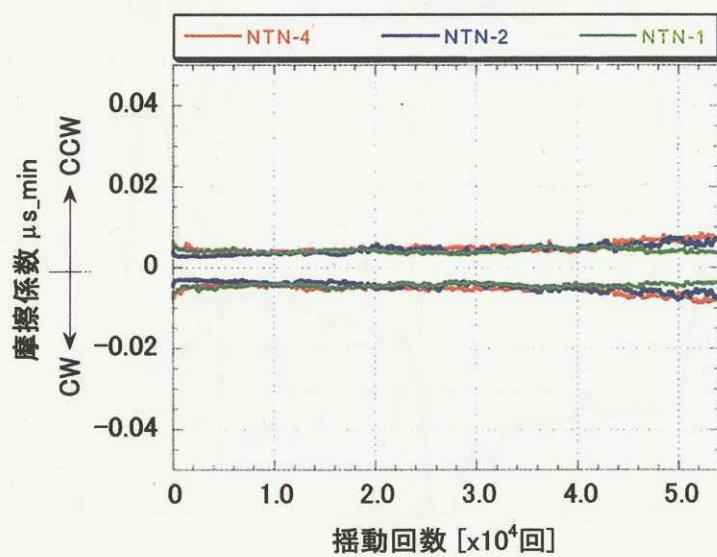


図 8-2 トルク特性値 μ_{s_max} の比較

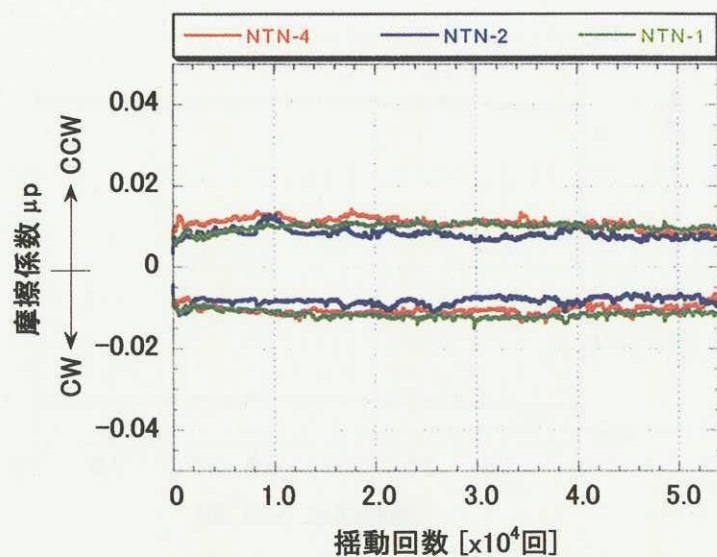


図 8-3 トルク特性値 μ_p の比較

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-017

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

