

JAERI-Tech
2003-022



JP0350107



革新的小型炉用内装型制御棒駆動装置の開発
(受託研究)

2003年3月

頼経 勉・石田 紀久

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 沢城県那珂
郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料セン
ター（〒319-1195 沢城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をお
こなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

革新的小型炉用内装型制御棒駆動装置の開発
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
頼経 勉・石田 紀久

(2003年1月30日受理)

発電用軽水炉の制御棒駆動装置は一般に原子炉容器の外側に設置されているが、内装型制御棒駆動装置は原子炉容器内に設置されるものである。内装型制御棒駆動装置は、制御棒飛び出し事故発生の可能性を排除し安全性向上を図るとともに、格納容器を小型化し経済性向上を図ることができるため、革新的小型炉に採用される重要な要素技術である。これまで、原研は舶用炉用として、高温・高圧水環境下で動作するモーター駆動方式の内装型制御棒駆動装置を開発している。この研究成果をもとに、本研究では、革新的小型炉の内装型制御棒駆動装置用に、過酷な条件の高温蒸気雰囲気で使用できるように、蒸気雰囲気での影響を最も受けやすいと考えられる駆動モーターのコイル及び軸受を開発するものである。

駆動モーターについては、高温高圧蒸気中駆動モーターを作成し、室温大気中において駆動コイルの電磁特性及び冷却特性を確認するための性能試験を実施し、その試験結果及びこれまでの高温水中性能評価試験結果に基づき、高温蒸気雰囲気中の電磁特性及び冷却特性を解析・評価した。また、軸受については、複数の候補材料を用いた材料特性試験用試験片を作成し、高温蒸気中での転がり摩耗試験を実施した。

その結果、高温高圧蒸気中駆動モーターの駆動コイル性能は、高温水中駆動モーターに比較して若干向上しており、容量的にも十分であることを確認した。また、本仕様のモーターが高温蒸気中環境下においても十分性能を発揮できることを確認した。さらに、今回の蒸気中用軸受の試験結果、これまでの水中用軸受の試験結果、及び蒸気中での予備試験結果に基づき、軸受材としての性能を評価するとともに、蒸気中雰囲気で使用可能な軸受材料を選定した。

これらにより、蒸気雰囲気中でも使用可能な内装型制御棒駆動装置を開発できる見通しを得た。

本研究は、特別会計による文部科学省からの受託研究「革新的小型炉要素技術開発」として実施したものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Development of In-vessel Type Control Rod Drive Mechanism for a Innovative Small Reactor
(Contract Research)

Tsutomu YORITSUNE and Toshihisa ISHIDA

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 30, 2003)

Although the control rod drive mechanism of an existing large scale light water reactor is generally installed outside the reactor vessel, an in-vessel type control rod drive mechanism (INV-CRDM) is installed inside the reactor vessel. The INV-CRDM contributes to compactness and simplicity of the reactor system, and it can eliminate the possibility of a rod ejection accident. Therefore, INV-CRDM is an important technology adopted in an innovative small reactor. Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has developed this type of CRDM driven by an electric motor, which can work under high temperature and high pressure water for the advanced marine reactor. On the basis of this research result, a driving motor coil and a bearing were developed to be used under the high temperature steam, severe condition for an innovative small reactor.

About the driving motor, we manufactured the driving motor available for high temperature steam and carried out performance test under room temperature atmosphere to confirm the electric characteristic and coolability of the driving coil. With these test results and the past test results under high temperature water, we analyzed and evaluated the electric performance and coolability of the driving coil under high temperature steam. Concerning bearing, we manufactured the test pieces using some candidate material for material characteristic test and carried out the rolling wear test under high temperature steam to select the material.

Consequently, we confirmed that performance of the driving coil for the advanced type driving motor, is enough to be used under high temperature steam. And, We evaluated the performance of the bearing and selected the material of the bearing, which can be used under high temperature steam.

From these results, we have obtained the prospect that the INV-CRDM can be used for an innovative small reactor under steam atmosphere could be developed.

Keywords: Innovative Small Reactor, In-vessel Type Control Rod Drive Mechanism, Driving Motor, Bearing

This study was conducted under contract research " Development of elemental technology for a innovative small reactor" with Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

目 次

1. はじめに	1
2. 駆動コイル性能試験	2
2. 1 開発目標	2
2. 2 駆動モーター仕様	3
2. 3 試験装置	8
2. 4 組立試験内容及び結果	12
2. 5 性能試験内容及び結果	15
2. 6 高温蒸気中での駆動モーター特性評価	59
3. 軸受材料特性試験	62
3. 1 開発目標	62
3. 2 候補材料の選定	63
3. 3 試験装置	65
3. 4 試験条件	68
3. 5 試験結果	69
3. 6 評価	101
4. まとめ	103
謝辞	104
参考文献	104
付録	105

Contents

1 . Introduction	1
2 . Driving Coil Performance Test	2
2 . 1 Target of Development	2
2 . 2 Specification of Driving Motor	3
2 . 3 Test Apparatus	8
2 . 4 Contents and Results of Manufacturing Test	12
2 . 5 Contents and Results of Performance Test	15
2 . 6 Performance Evaluation for Driving Motor under High Temperature Steam	59
3 . Material Characteristic Test for Bearing	62
3 . 1 Target of Development	62
3 . 2 Selection of Candidate Material	63
3 . 3 Test Apparatus	65
3 . 4 Test Condition	68
3 . 5 Test Results	69
3 . 6 Evaluation	101
4 . Conclusion	103
Acknowledgement	104
References	104
Appendix	105

1. はじめに

原子力エネルギー利用の拡大を図るため、需要地近接立地可能で、熱供給、小規模発電等の多様な利用システムに用いる革新的小型炉において、内装型制御棒駆動装置を採用することにより、制御棒飛び出し事故発生の可能性を排除し安全性向上を図るとともに、格納容器を小型化し経済性向上を図ることができる。これまで、原研は船用炉用として、高温・高圧水環境下で動作するモーター駆動方式の内装型制御棒駆動装置を開発している^{1),2)}。この研究成果とともに、本研究では、革新的小型炉の内装型制御棒駆動装置用に、過酷な条件の高温蒸気雰囲気で使用できるように、駆動モーターのコイル及び軸受を開発するものである。

駆動モーターについては、高温高圧蒸気中駆動モーターを製作し、室温大気中において駆動コイルの電磁特性及び冷却特性を確認するための性能試験を実施、その試験結果及びこれまでの高温水中性能評価試験結果に基づき、高温蒸気雰囲気中での電磁特性及び冷却特性を解析・評価した。また、軸受については、複数の候補材料を用いた材料特性試験用試験片を製作し、高温蒸気中での転がり摩耗試験を実施した。

本報告書は、原研が受託した「革新的小型炉要素技術開発」として革新的小型炉用の内装型制御棒駆動装置開発の成果を取り纏めたものである。

2. 駆動コイル性能試験

これまで日本原子力研究所（以下、原研）に於いて改良船用炉用に開発した高温・高圧水中で作動する内装型制御棒駆動装置の成果をもとに、高温蒸気雰囲気条件で動作可能な革新的小型炉用の駆動モーターのコイルを開発した。蒸気雰囲気中では、駆動モーターで発生した熱が水中と比較し除熱されにくいため、コイルが高温となり、駆動トルクが低下する等のモーター特性が低下することが考えられる。そのため、冷却性を考慮した構造に改良し、室温空気雰囲気中で駆動コイルの発熱試験及びモータートルク試験を実施し、この測定データとこれまでの高温水中試験データから、高温水蒸気中の駆動モーターの電磁特性及び冷却特性を評価した。

2. 1 開発目標

革新的小型炉の設計条件から、駆動モーターの開発目標値を以下のように定めた。

・ 雰囲気	： 高温高圧蒸気中
・ 温度	： 310°C
・ 最大トルク	： 1200N·cm
・ 回転速度	： 0~50rpm
・ 耐用年数	： 40 年

また、平成 8 年に製作した改良船用炉用の高温高圧水中駆動モーターの設計を基に、駆動モーターについては、以下に示すような改良を行った。

(1) モーターステーナー

1) 駆動トルクを大きくするため電流値を上げること及び高温蒸気中設置の場合、コイル部の除熱が難しくなるので発熱を抑えるために以下の改良を行った。

- ・ コイルの無機絶縁ケーブルを太径化し、電気抵抗を小さくし発熱量を小さくする。

[コイル外径 2.4mm、導体径 1.4mm からコイル径 2.8mm、導体径 1.6mm]

- ・ 無機絶縁コイル非水封直接冷却型とする。

[水封型から非水封直接冷却型とし、蒸気が端部から流れる構造とする]

2) 長期運転中でのコイルの絶縁抵抗劣化を防ぐため、コイルは、中性点以外は継目なしで外部へ取り出す二重管方式とし、リード線との接続は、原子炉容器外部で行うように改良する。

[モーター出口接続方式から原子炉内継目なし方式]

(2) モーターローター

3) 永久磁石の酸化を防止するため、不活性ガス封入型ローターとする。

[大気雰囲気から不活性ガス封入とし、密封キャン構造とする]

4) 完全な水封構造とすることで永久磁石の金メッキ処理は行わない。

[コスト低減化]

2. 2 駆動モーター仕様

2. 2. 1 モーター仕様

本年度製作した高温蒸気中駆動モーター（供試体モーター）の主要仕様を以下に示す。

また、改良船用炉用のモーター仕様を[]に示す。

(1) モーター仕様

・型式	: 無機絶縁コイル非密封型 8 極サーボモーター [無機絶縁コイル耐圧型 8 極サーボモーター]
・雰囲気	: 高温高圧蒸気中 [高温高圧水中]
・温度	: 310°C [320°C]
・最大使用電流	: 13A
・通常駆動電流	: 8A
・通常保持電流	: 4A
・最大トルク	: 1200N·cm
・回転数	: 0~50rpm
・耐用目標	: 40 年

(2) ステーター仕様

・型式	: 無機絶縁コイル直接冷却型 [無機絶縁コイルキャッシング型]
・外形寸法	: 外径 200mm×内径 124mm×長さ 460mm [外径 200mm×内径 124mm×長さ 480mm]
・コイル	
ケーブル	インコネル 600 被覆無機絶縁ケーブル
導体及び導体径	Cu / 1.6mm
絶縁材	MgO (マグネシヤ)
被覆外径	2.8mm
ターン数	8 層、140 列、1120 ターン
結線	3 相結線
・鉄心	
構造	薄板積層構造
材質	電磁ステンレス鋼 [純鐵]
スロット数	36
積層板絶縁材	Al ₂ O ₃ (アルミナ)

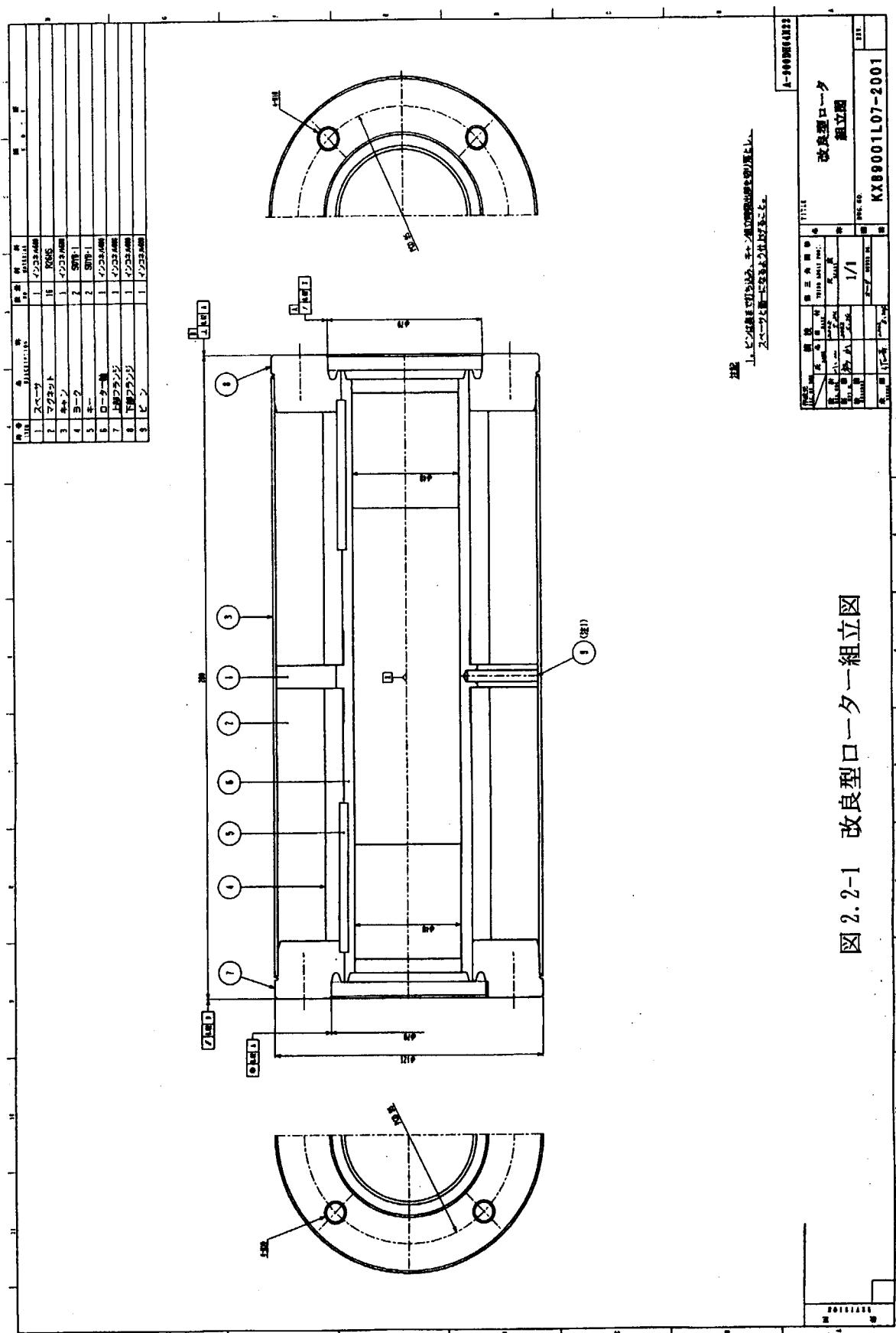
(3) ローター仕様

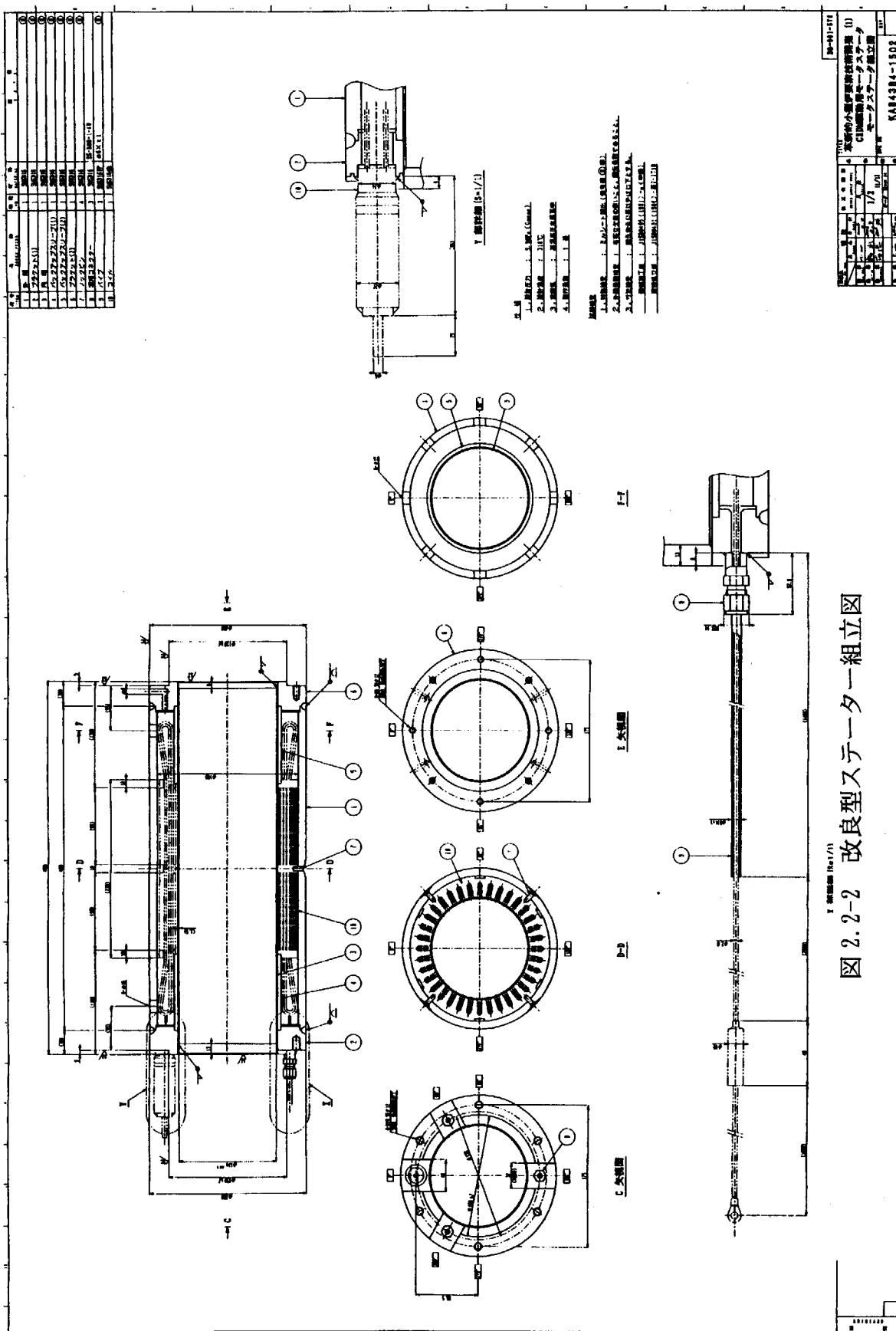
・型式	: 永久磁石水封型 [不活性ガス封入型]
・外形寸法	: 外径 121mm×内径 48mm×長さ 280mm
・マグネット	

材質	2-17 系サマリウムコバルト (SmCo) 磁石
寸法	幅 31mm×長さ 110mm×最大厚さ 21.58mm
残留磁束密度	0.9~1.05 (T)
保磁力	>1194 (KA/m)
最大エネルギー積	183~207 (KJ/m ³)
極数	8
・ ヨーク	
型式	8 角ヨーク両極スペーサ式
材質	電磁軟鉄 (SUY-1)
・ 水封構造	
型式	アルゴンガス封入キャッシング式
材質	インコネル 600
溶接	キャン(無開先レーザ溶接) 軸側 (TIG 溶接)

2. 2. 2 モーター構造

ローター及びステーターの構造を図 2.2-1 及び図 2.2-2 に示す。このローター及びステーターを駆動コイル性能試験用部品（ローター軸、軸受等）と組合せ、図 2.2-3 に示すモーター試験台へ供試体モーターとして組立てた。





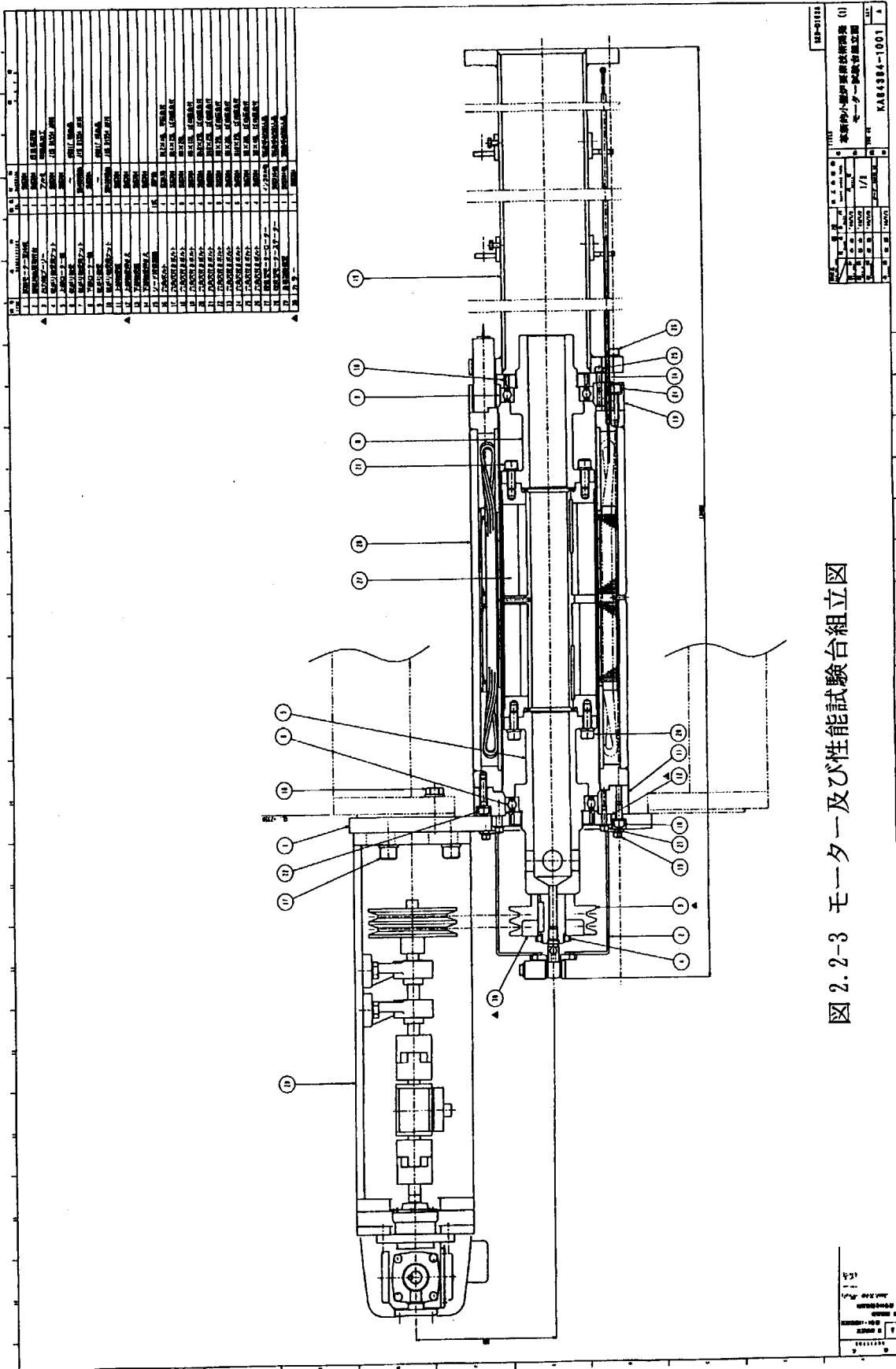


図 2.2-3 モーター及び性能試験台組立図

2. 3 試験装置

2. 3. 1 モーター特性試験装置

試験装置は原研の新型炉実験棟に既設の高温水中機能確認試験装置の制御系と図 2.2-3 に示した新設の駆動コイル性能試験台を使用した。

試験モーターの出力軸はプーリ、V ベルトを介して負荷調整ユニットのパウダーブレーキ及び減速モーターに連結されている。

パウダーブレーキは、供試体モータに負荷トルクを掛けるために設置されており、パウダーブレーキに供給される直流電流値により負荷トルクを変化させることができるものである。また、減速モーターは、後に述べる試験モーターの無負荷誘起電圧を測定するため、供試体モーターを外部より回転させるためのものであり、減速モーターに供給される直流電流値により回転数を変化させることができるものである。

また、この駆動コイル性能試験装置には、供試体モーターの回転数及び負荷トルクを計測するための計測装置として回転計及びトルクメータが組込まれている。

負荷調整ユニットのパウダーブレーキ、減速モーター及び計測装置の回転計、トルク計の状況を写真 2.3-1 に示す。

2. 3. 2 実験計装設備

供試体モーターの特性を測定するため、図 2.3-1 の実験計装設備の構成図に示す実験計装設備を準備した。表 2.3-1 に各実験計装設備の仕様を示す。

なお、今回の試験においては、計測データを全てオムニエースを使用して、デジタルデータとして収録した。

表 2.3-1 実験計装設備

計装設備	機 器 仕 様
電圧計	横河電機（株） デジタルボルトメータ 7541
電流計	横河電機（株） クリップオン電流計 3228
トルクメータ	(株) クボタ アンプ内装型非接触磁歪式トルクセンサ TD-050 [定格容量 : 50N·m、出力 : ±2V/510kgf·cm]
ロードセル	(株) 昭和測器 荷重計 DB-100K [定格容量 : 100kgf、出力 : ±3V/100kgf]
動歪計	(株) 共和電業 動歪測定器 DPM-712B [応答周波数 : DC~5kHz]
回転検出器	(株) 小野測器 電磁式回転検出器 MP-981 [測定範囲 : 1Hz~20kHz]
回転計	(株) 小野測器 デジタル回転計 TM-830 [出力 : 6.67V/200rpm、1.67V/50rpm]
温度計	助川電気工業（株） CA 熱電対
データレコーダ	(株) NEC 三栄 オムニエース RT-3208

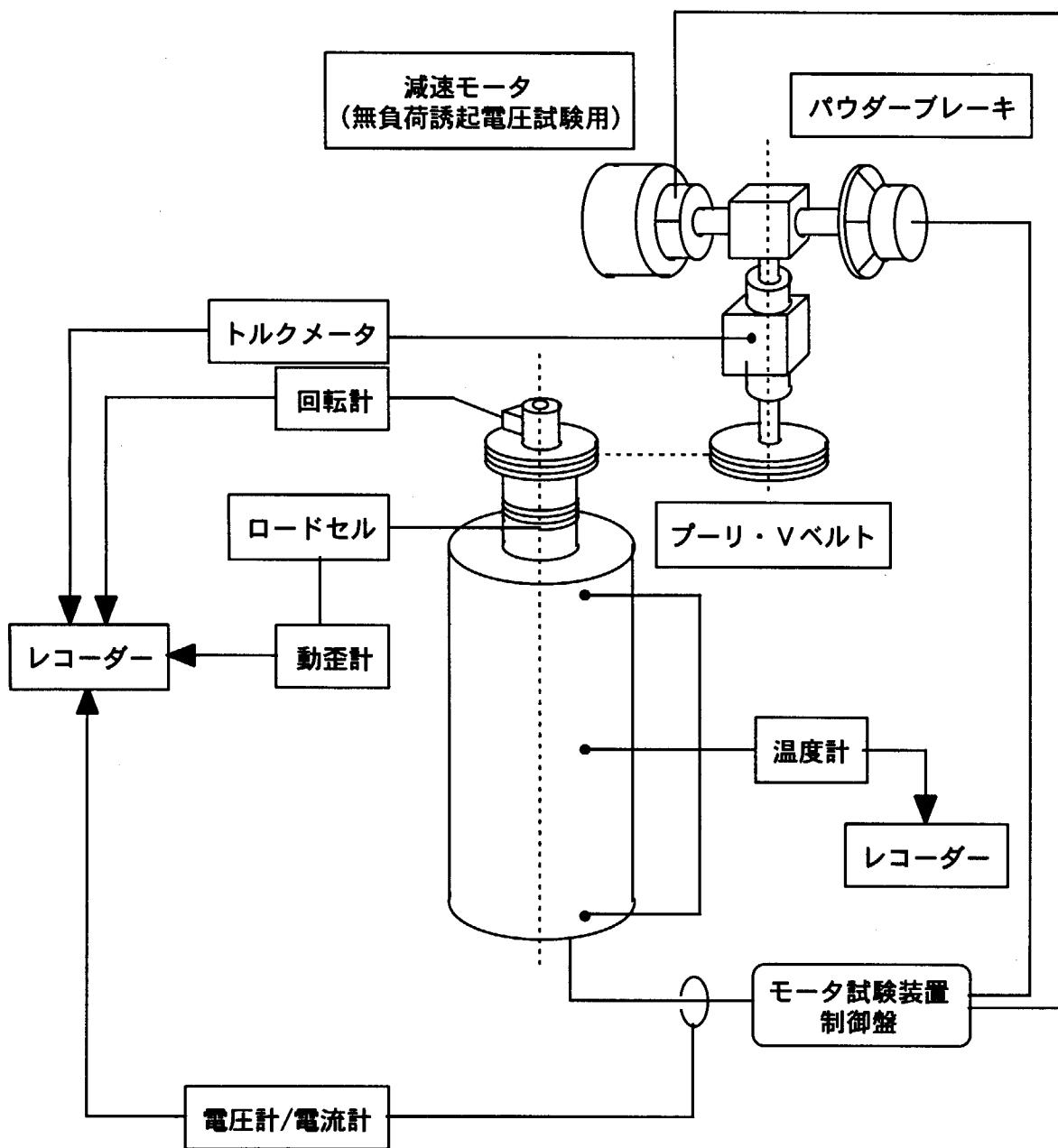


図 2.3-1 実験計装設備構成図

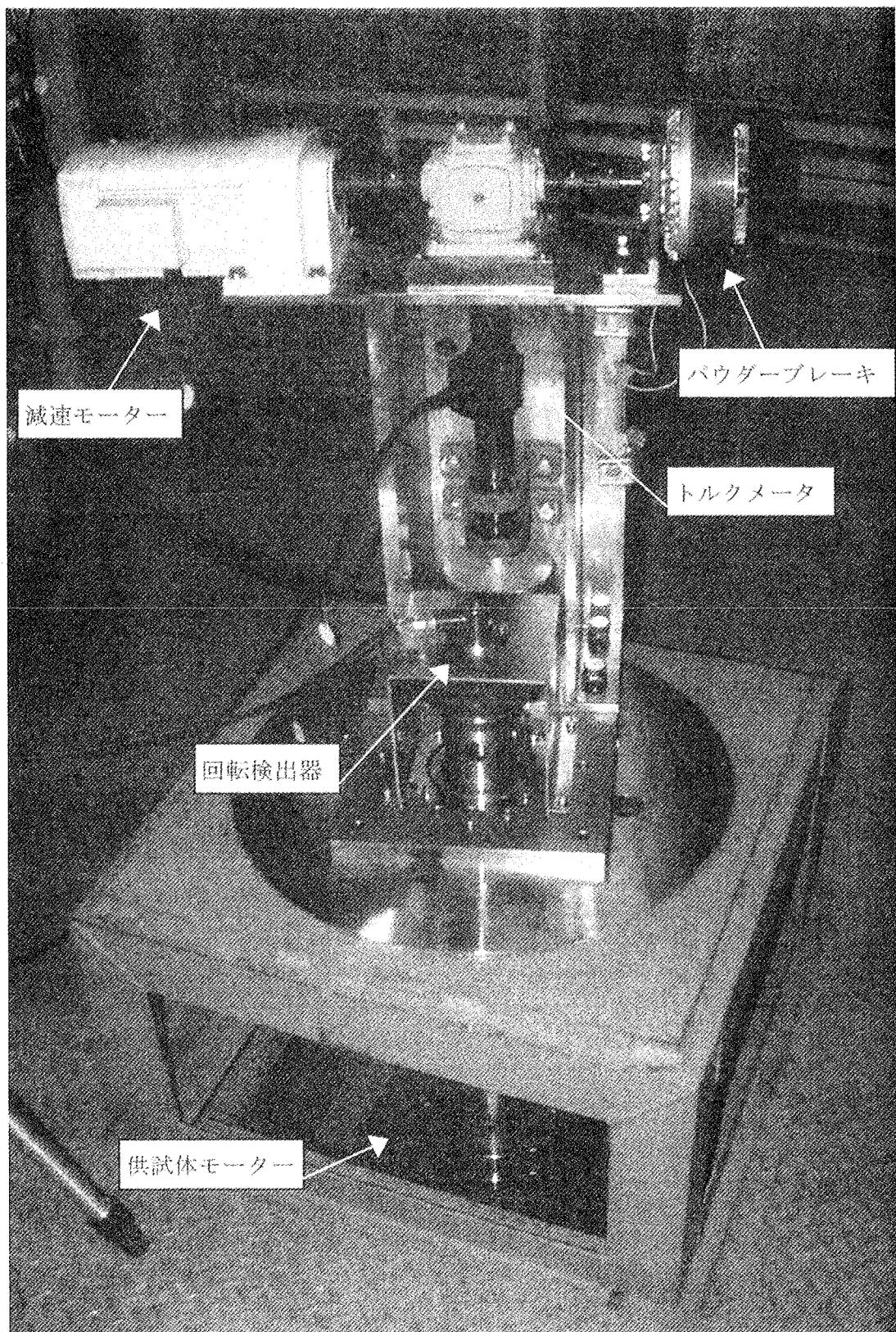


写真 2.3-1 駆動コイル性能試験装置（負荷調整ユニット及び計測装置）

2. 4 組立試験内容及び結果

2. 4. 1 ローターの回転振れ検査

ローター及び軸、軸受の組立品を軸受部で定盤上に固定し、手動にてローター部を回転させ、ダイヤルゲージにてローターの軸方向 3箇所（キャップ部）及び上下フランジ部各 1箇所の計 5箇所について回転振れを測定した。

図 2.4-1 にローター回転振れ検査要領と測定点を示す。また、その状況を写真 2.4-1 に示す。

表 2.4-1 に回転振れ測定結果一覧表を示す。振れ幅の最大値はローターキャップ部の 0.09mm であり、平成 8 年度に改良船用炉用に試作した高温水中モーターの同測定結果 0.12mm と比べても良好な値を示しており、ローター軸が正しく、精度良く組立てられ、供試体モーターとして構造的に支障の無いことが確認された。

2. 4. 2 ローター回転試験

ステーナー内にローターを組込んだ組立完了状態で、手動にてローターを回転させ「スムーズに回転すること」及び「異常音が発生しないこと」を確認した。

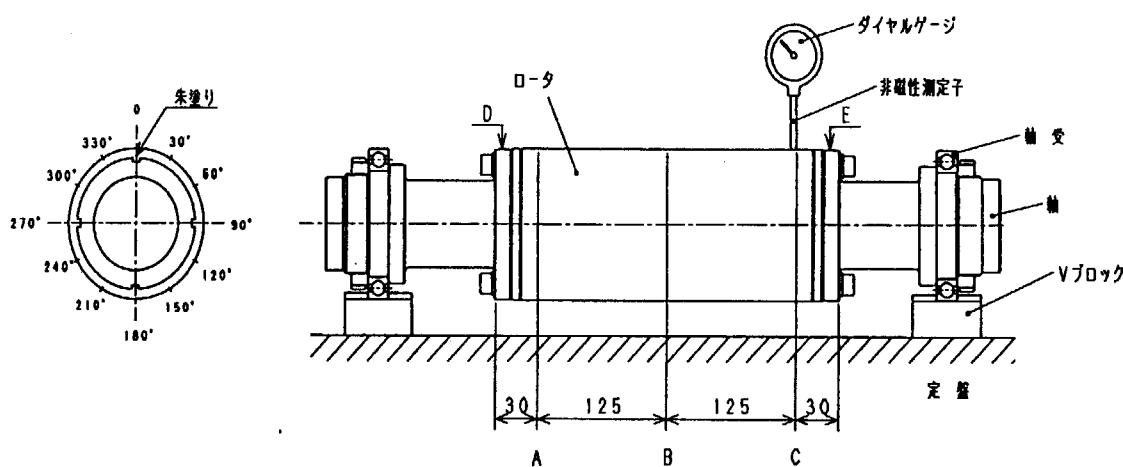


図 2.4-1 ローター回転振れ検査要領及び測定点

表 2.4-1 ローターの回転振れ測定結果一覧表

	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	振れ幅
キャン上部 A	0	+0.02	+0.04	+0.05	+0.07	+0.09	+0.07	+0.07	+0.06	+0.03	+0.02	+0.01	0.09
キャン中央部 B	0	+0.03	+0.03	+0.04	+0.07	+0.06	+0.06	+0.07	+0.04	+0.01	0	0	0.07
キャン下部 C	0	0	0	+0.03	+0.05	+0.05	+0.06	+0.04	+0.01	0	0	-0.03	0.09
上部フランジ D	0	-0.02	-0.02	-0.01	0	+0.01	+0.01	+0.01	0	0	-0.01	-0.02	0.03
下部フランジ E	0	0	0	+0.02	+0.02	+0.03	+0.04	+0.03	+0.02	+0.01	0	-0.01	0.05

(mm)

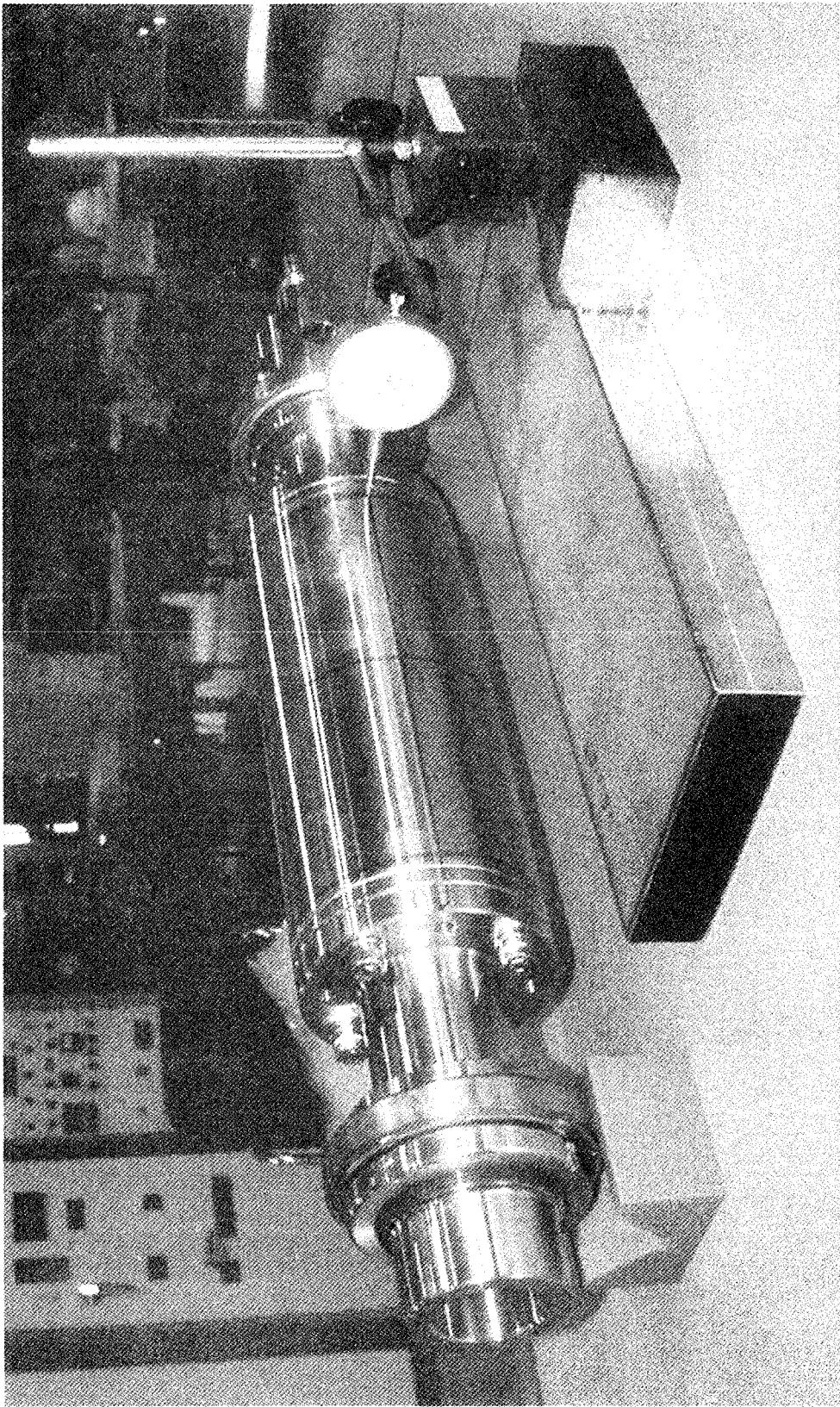


写真 2.4-1 ローターの回転振れ検査

2. 5 性能試験内容及び結果

2. 5. 1 無負荷誘起電圧測定試験

1) 試験内容

平成8年度に改良船用炉用に試作した高温水中駆動モーターとの基本性能を比較するための試験である。

供試体モーターと連結されている減速モーターを回転させることにより、供試体モーターを機械的に回転させた時の供試体モーター各相間に誘起される電圧を測定した。

2) 試験要領

- ・供試体モーターの電源回路結線を外した。
- ・供試体モーターに繋がる上部ロータ軸（出力軸ブーリ）と負荷調整ユニット側の回転軸（ベルトブーリ）間を連結した。
- ・負荷調整ユニットの減速モーターを起動し、供試体モーターを機械的に回転させた時、供試体モーター各相間に誘起する電圧を測定した。

3) 試験パラメータ

- ・供試体モーター回転数 : 50, 100, 200 rpm

4) 試験結果

表 2.5-1 に無負荷誘起電圧測定試験結果一覧表を示す。また、図 2.5-1 (1/8~8/8) に無負荷誘起電圧波形を示す。

5) 考察

試験結果より各相間ともバランスのとれた電圧が誘起され、整った正弦波が得られており、ローターの永久磁石とステーターの巻線に問題が無い。

平成8年度製作した高温水中駆動モータの室温での無負荷誘起電圧測定結果と本試験により得られた無負荷誘起電圧測定結果との比較を図 2.5-2 に示す。

図に示される通り、本試験結果（蒸気中仕様）で得られた無負荷誘起電圧の方が平成8年度試験結果（水中仕様）よりも高い。蒸気中仕様に改良するに際し、ステーターコイル導体径を1.4mmから1.6mmに変更、ステーター鉄心材質を純鉄から電磁ステンレス鋼に変更した影響及びローターの永久磁石の磁気特性が5%程度向上（材質：CR26S→R26HSに変更）している影響により、若干の電磁性能変化を生じ、本供試体モーターの電磁的性能が向上しているものと考えられる。

表 2.5-1 無負荷誘起電圧測定試験結果一覧表
 (試験実施日 : H14. 9. 10 溫度 : 27. 5°C)

試験 No.	試験パラメータ モータ回転数 (rpm)	誘起電圧 (V)		
		U-V 間	U-W 間	V-W 間
1-1-1	50	5.3	5.2	5.4
1-1-2		5.3	5.3	5.4
平均		5.3	5.3	5.4
1-2-1	100	10.5	10.5	10.6
1-2-2		10.6	10.5	10.5
平均		10.6	10.5	10.6
1-3-1	150	15.8	15.7	15.8
1-3-2		15.7	15.7	15.8
平均		15.8	15.7	15.8
1-4-1	200	21.1	21.0	21.2
1-4-2		21.2	21.1	21.2
平均		21.2	21.1	21.2

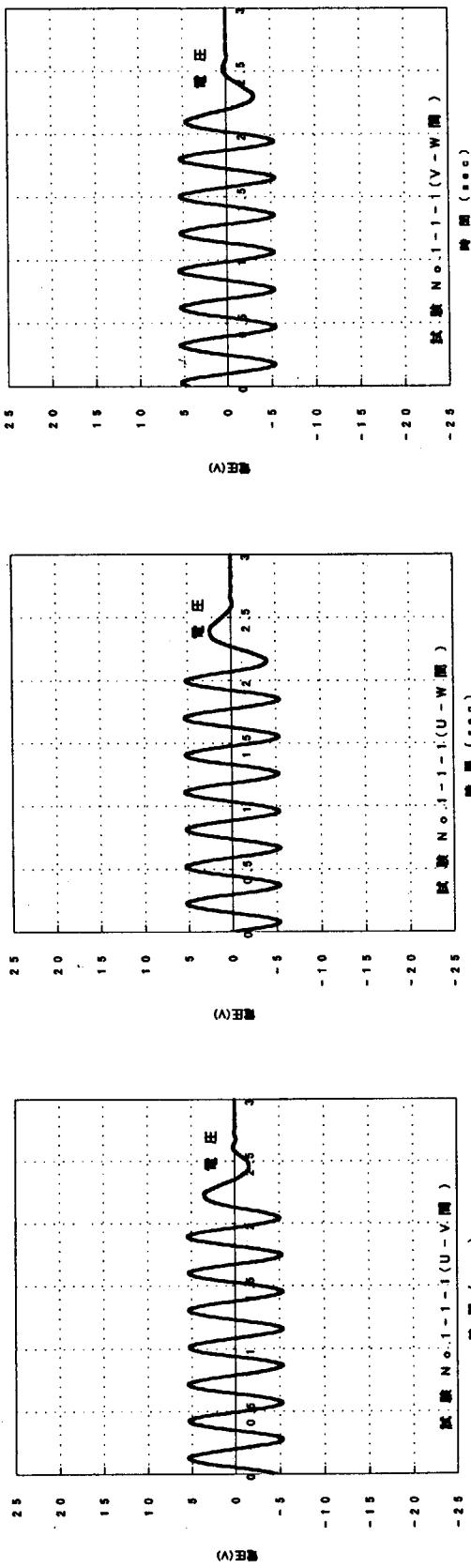


図 2.5-1 (1/8)

無負荷誘起電圧測定試験各相間電圧波形

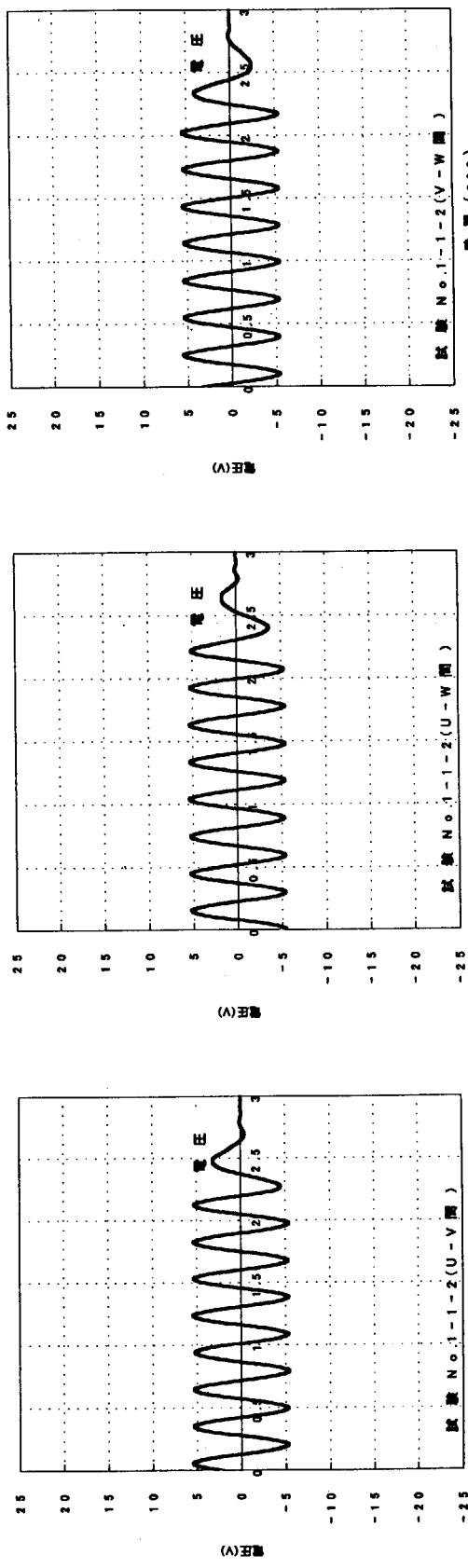


図 2.5-1 (2/8)

無負荷誘起電圧測定試験各相間電圧波形

試験	試験 No.	モード	回転数
	1-1-1	1-2	50 rpm

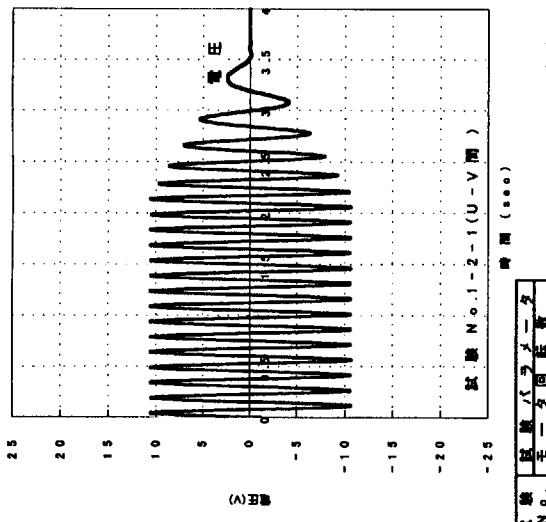


図 2.5-1 (3/8)

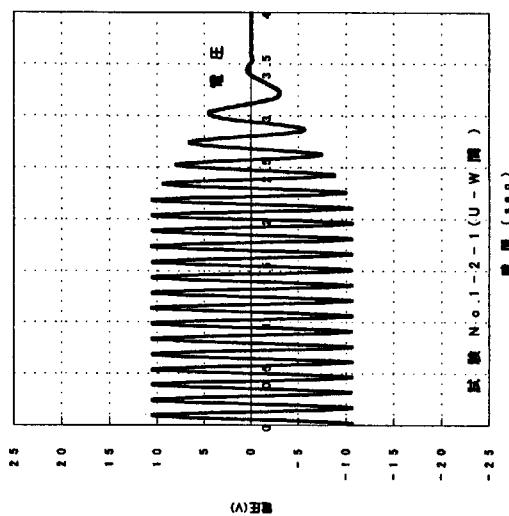


図 2.5-1 (3/8) 無負荷誘起電圧測定試験各相間電圧波形

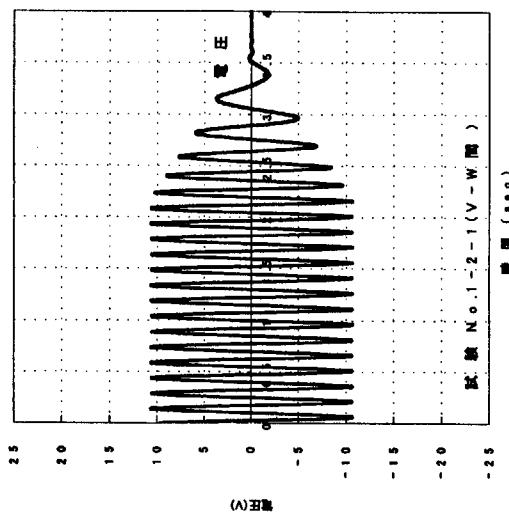


図 2.5-1 (3/8) 無負荷誘起電圧測定試験各相間電圧波形

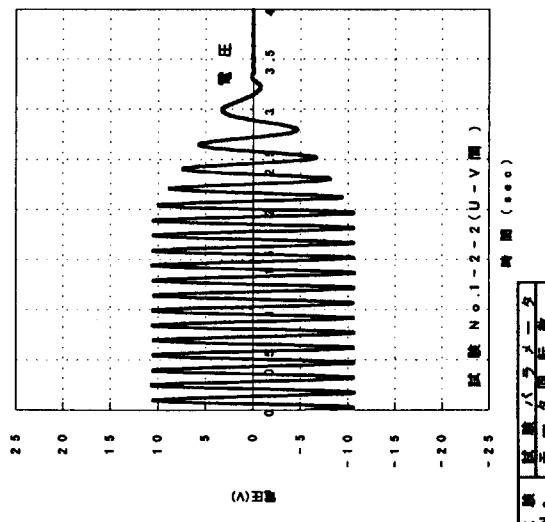


図 2.5-1 (4/8)

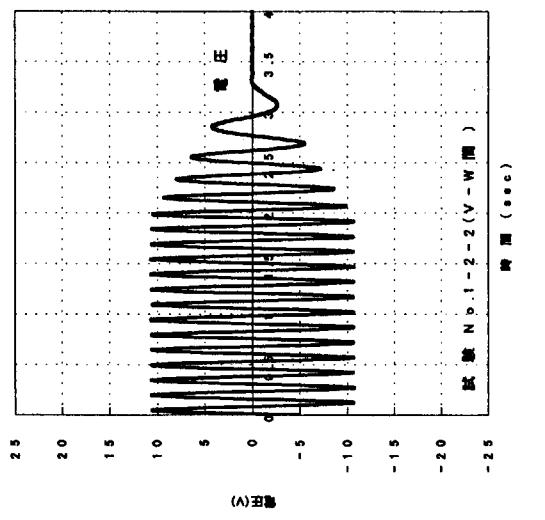


図 2.5-1 (4/8) 無負荷誘起電圧測定試験各相間電圧波形

試験 N _{o.}	回転数	電圧
1-2-1	100 rpm	

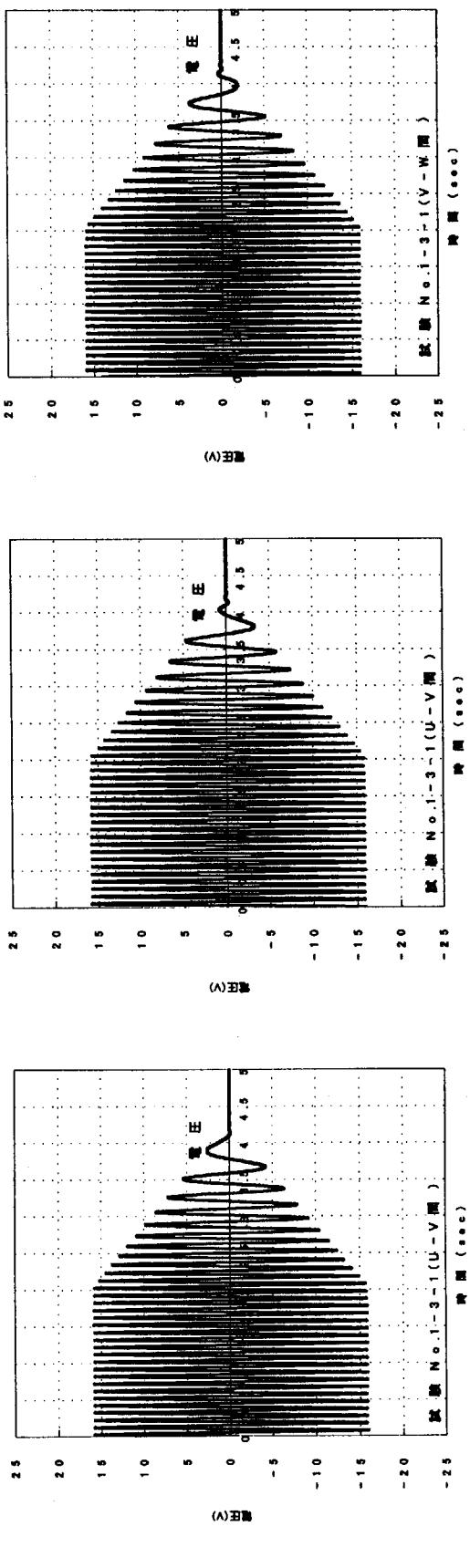


図 2.5-1 (5/8)

無負荷誘起電圧測定試験各相間電圧波形

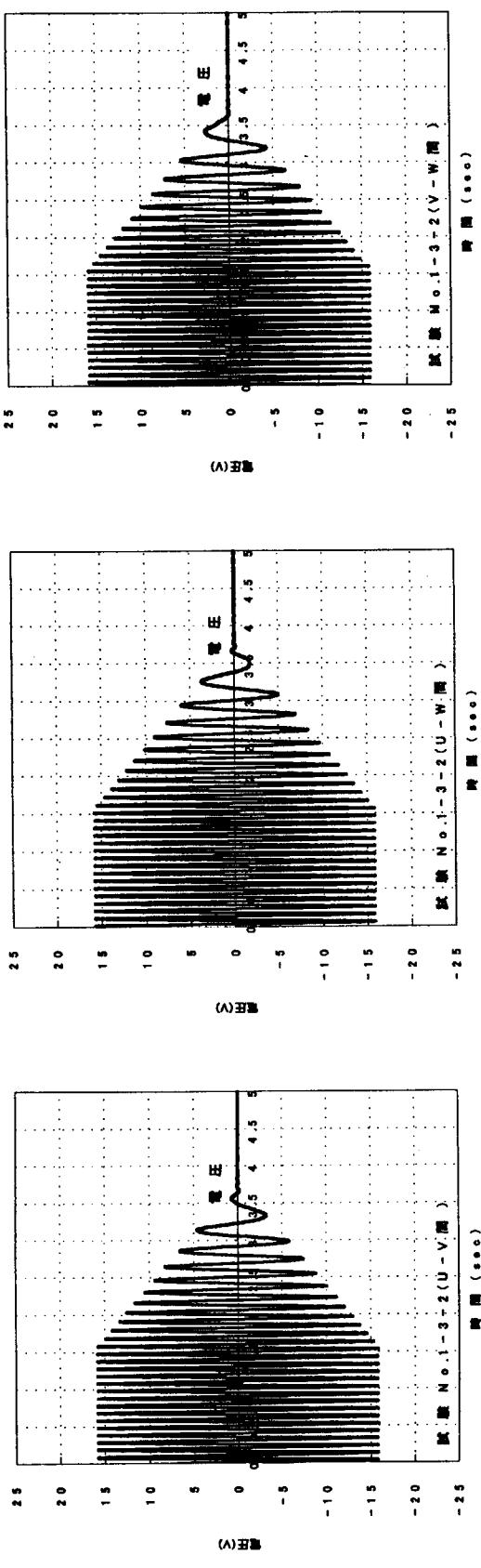


図 2.5-1 (6/8) 無負荷誘起電圧測定試験各相間電圧波形

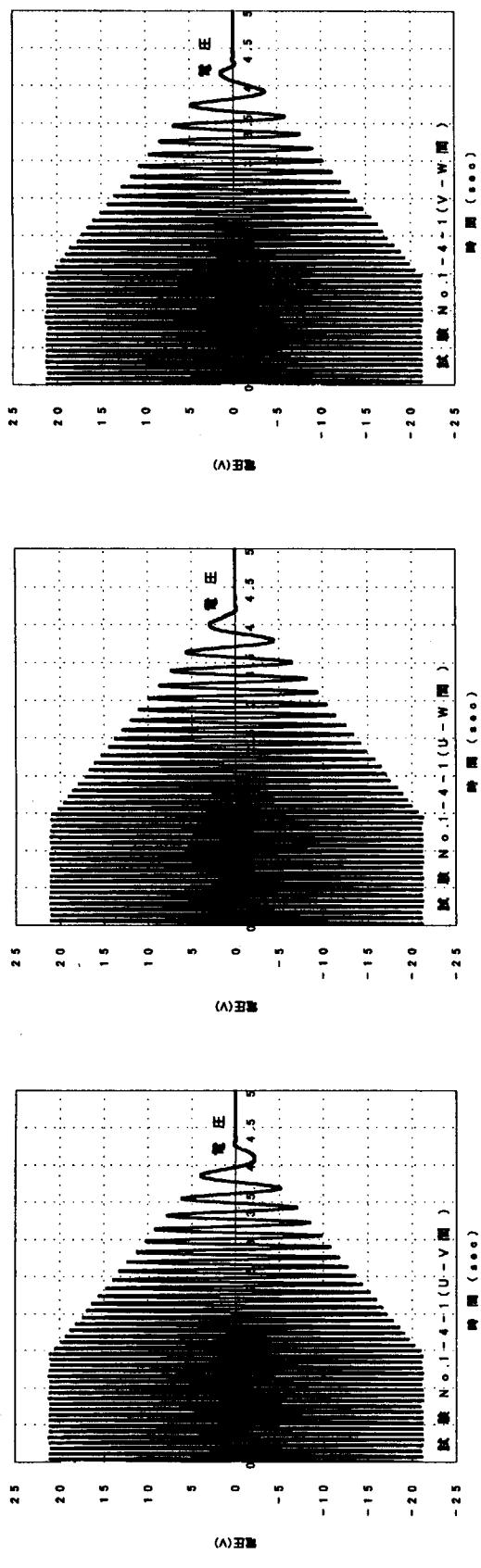


圖 2.5-1 (7/8) 無負荷誘起電壓測定試驗各相間電壓波形

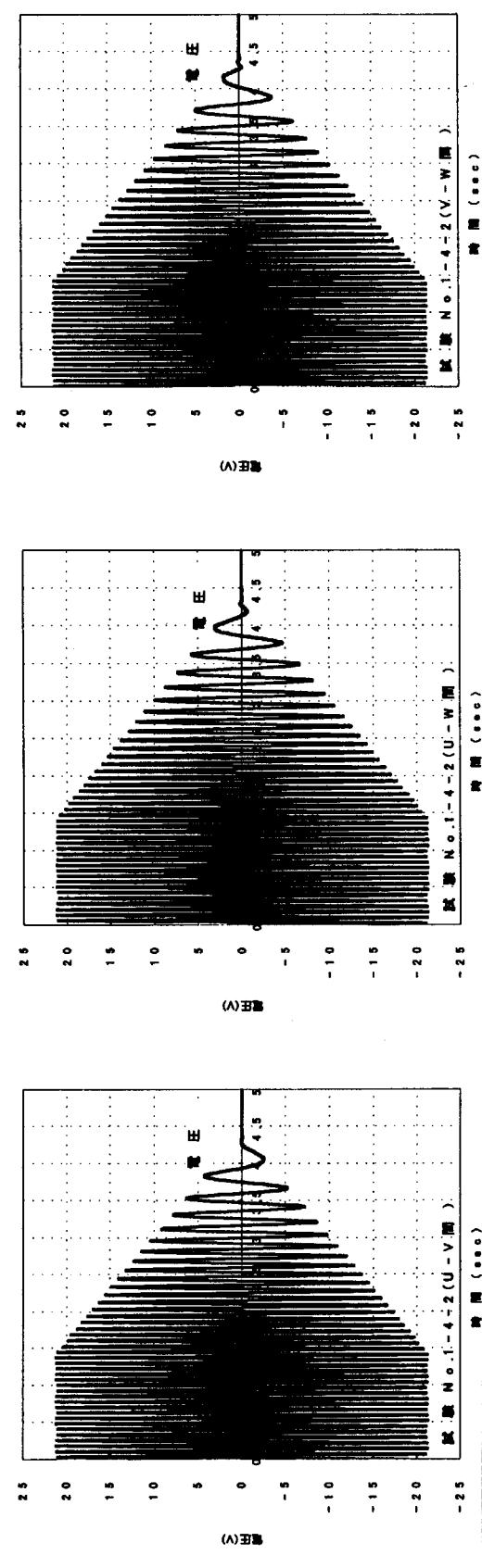


図 2.5-1 (8/8) 無負荷誘起電圧測定試験各相間電圧波形

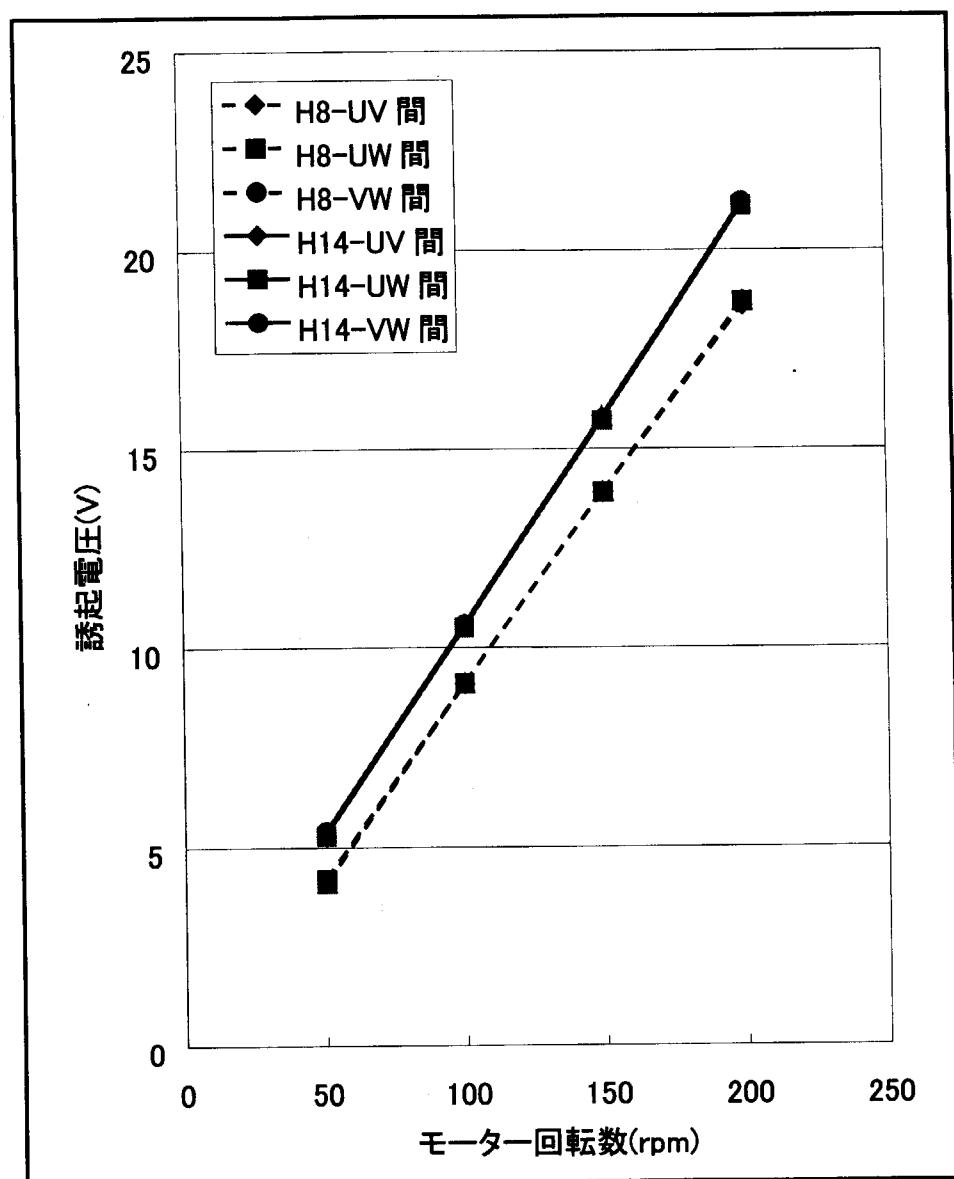


図 2.5-2 平成 8 年試験と平成 14 年(今回)試験の無負荷誘起電圧の比較

2. 5. 2 静的脱調トルク試験

1) 試験内容

試験モーターが停止状態で保持できる最大トルクを計測し、平成8年度に改良船用炉用に試作した高温水中駆動モーターとの基本性能を比較するための試験である。

供試体モーターに直流保持電流を印加しておき、供試体モーターのローター軸にワイヤを巻付け、ワイヤ端を手動にて引張り、試験モーター回転開始時、即ち電磁的に保持できなくなったときのワイヤ張力を計測し、トルクに換算した。なお、以下の試験はいずれも室温雰囲気で行った。

2) 試験要領

- ・供試体モーターに繋がる上部ローター軸（出力軸プーリ）と負荷調整ユニット側の回転軸（Vベルトプーリ）間の連結を外した。
- ・供試体モーターの電源回路をモータ制御盤に接続した。
- ・モーター制御盤側により、供試体モーターに所定の保持電流を印加した。
- ・供試体モーターのローター軸にワイヤを巻きつけ、ワイヤ端を手動にて引張り、回転を始めるときのワイヤ張力を計測した。

3) 試験パラメータ

- ・供試体モーター保持電流 : 0, 3, 5, 7, 9, 11, 13A

4) 試験結果

表2.5-2に静的脱調トルク測定結果一覧表を示す。また、図2.5-3(1/7~7/7)に静的脱調トルク測定データを示す。

5) 考察

試験結果より保持電流にほぼ比例した静的脱調トルクの特性が得られた。

平成8年度製作した高温水中駆動モーターの室温での静的脱調トルク測定結果と本試験により得られた静的脱調トルク測定結果との比較を図2.5-4に示す。

図に示される通り、いずれのモーターも保持電流と静的脱調トルクはほぼ比例した特性を示しているが、本試験結果（蒸気中仕様）で得られた静的脱調トルクの方が平成8年度試験結果（水中仕様）よりも高い結果となった。無負荷誘起電圧測定試験において示された蒸気中仕様の本供試体モーターの基本的電磁特性の高さにより、同一電流で比較した場合の電磁的保持力が大きいことを示しているものと考えられる。

表 2.5-2 静的脱調トルク試験結果一覧表
 (試験実施日 : H14.9.11 溫度 : 28.5°C 軸半径 : 3.5cm)

試験 No.	試験パラメータ	ワイヤー張力 (kg)	脱調トルク (kg-cm) (ワイヤー張力 × 軸半径)
	保持電流 (A)		
2-1-1	0	7.6	26.6
2-1-2		7.2	25.2
平均		7.4	25.9
2-2-1	3.0	21.4	74.9
2-2-2		22.0	77.0
平均		21.7	75.9
2-3-1	5.0	34.4	120.4
2-3-2		32.2	112.7
平均		33.3	116.6
2-4-1	7.0	42.4	148.4
2-4-2		44.8	156.8
平均		43.6	152.6
2-5-1	9.0	55.0	192.5
2-5-2		52.6	184.1
平均		53.8	188.3
2-6-1	11.0	64.0	224.0
2-6-2		68.2	238.7
平均		66.1	231.4
2-7-1	13.0	75.2	263.2
2-7-2		73.2	256.2
平均		74.2	259.7

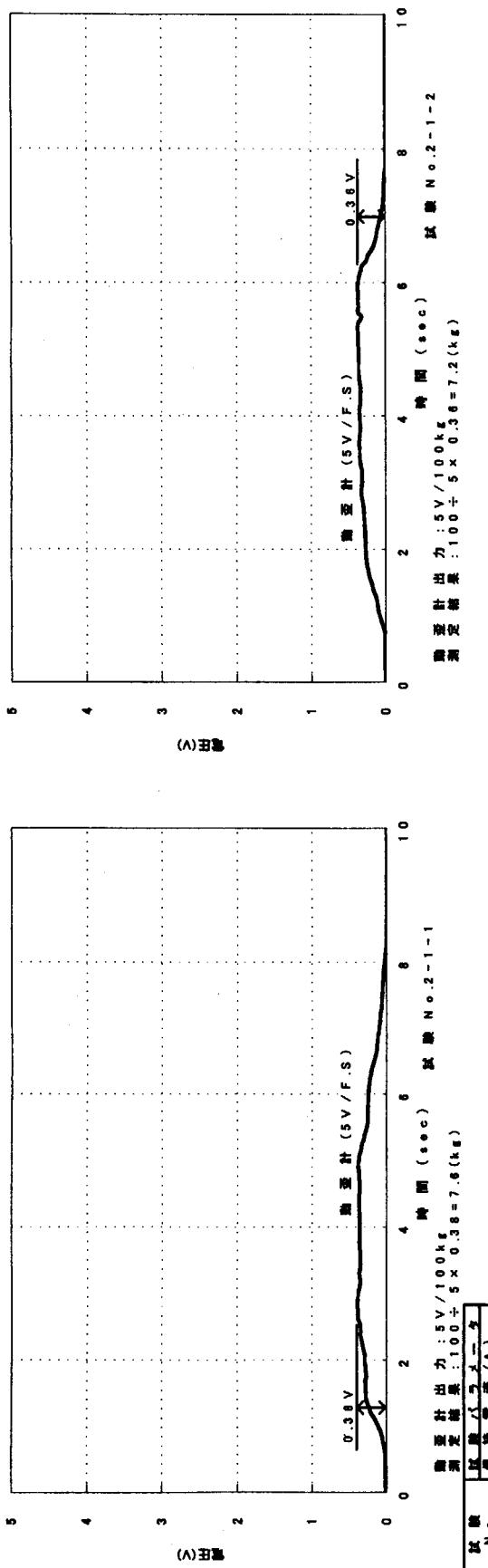


図 2.5-3 (1/7) 静的脱調トルク测定データ

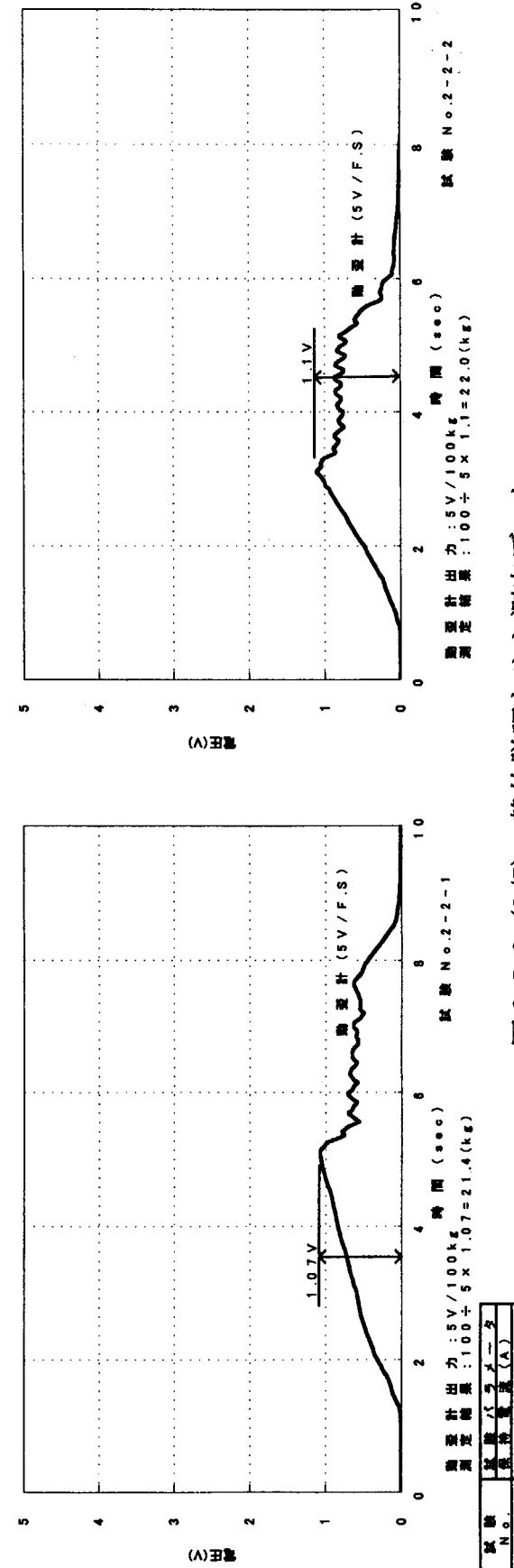


図 2.5-3 (2/7) 静的脱調トルク测定データ

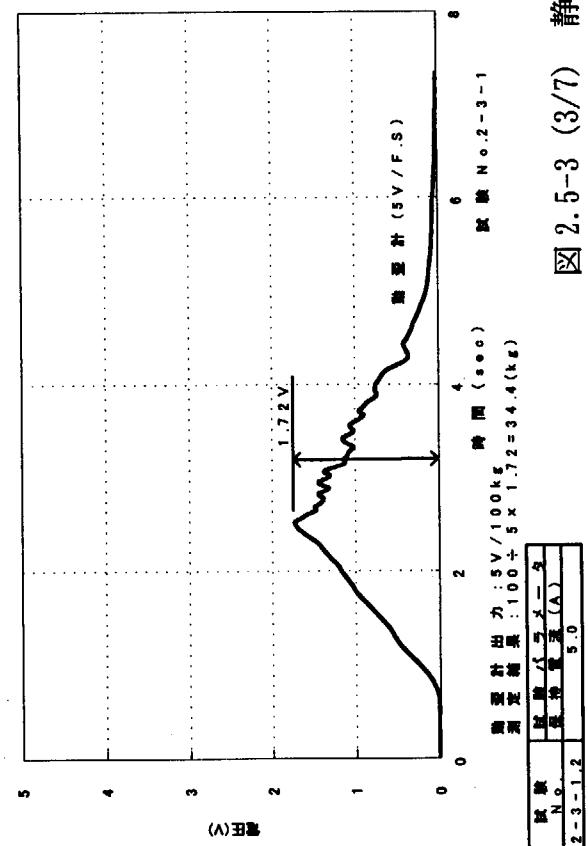


図 2.5-3 (3/7) 静的脱調トルク测定データ

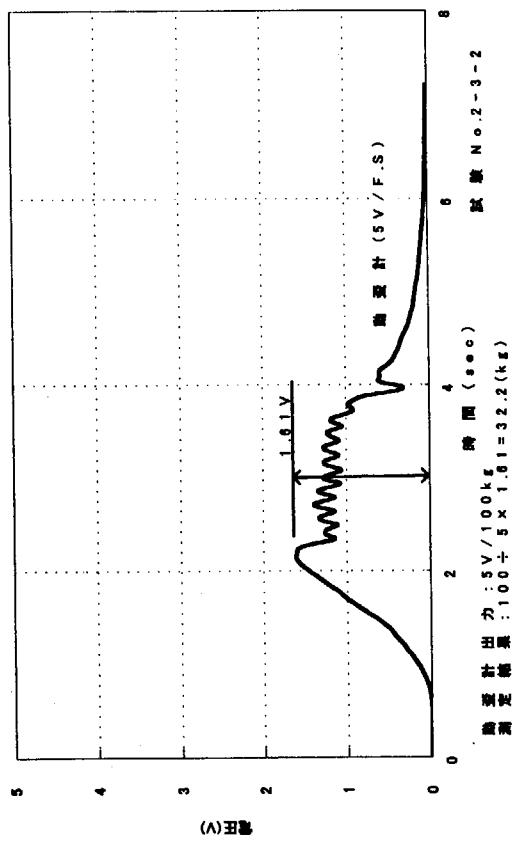


図 2.5-3 (4/7) 静的脱調トルク测定データ

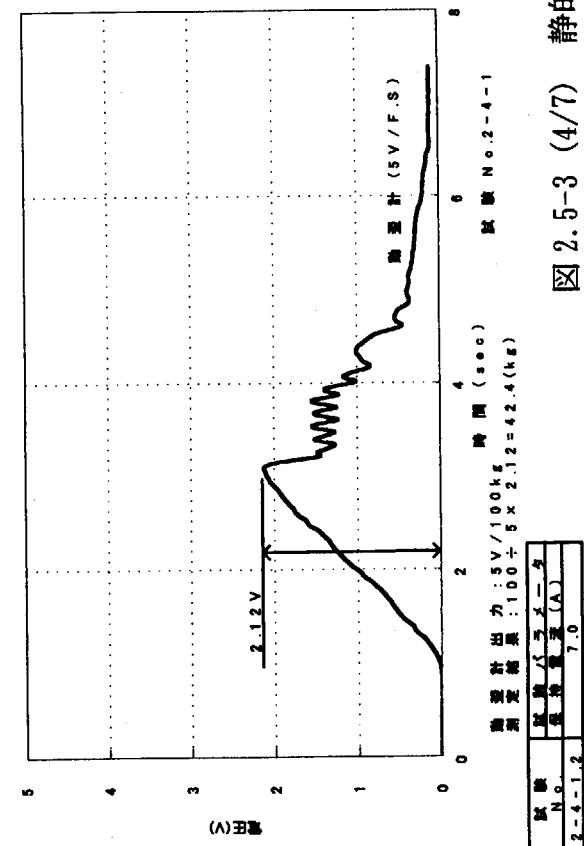


図 2.5-3 (4/7) 静的脱調トルク测定データ

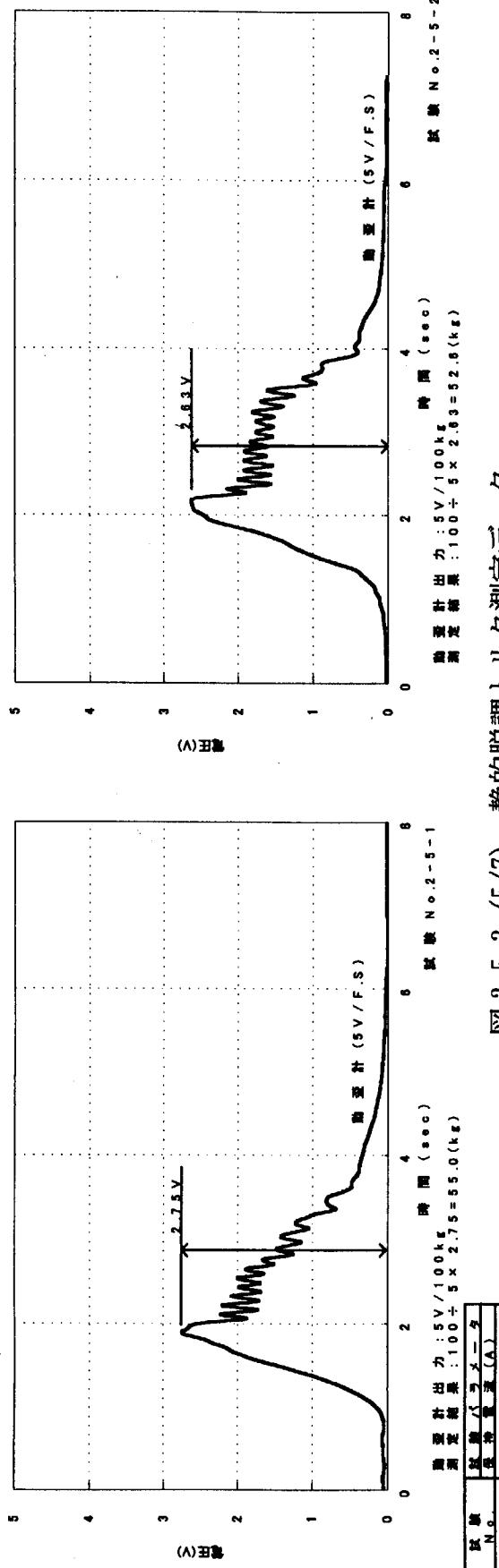


図 2.5-3 (5/7) 静的脱調トルク测定データ

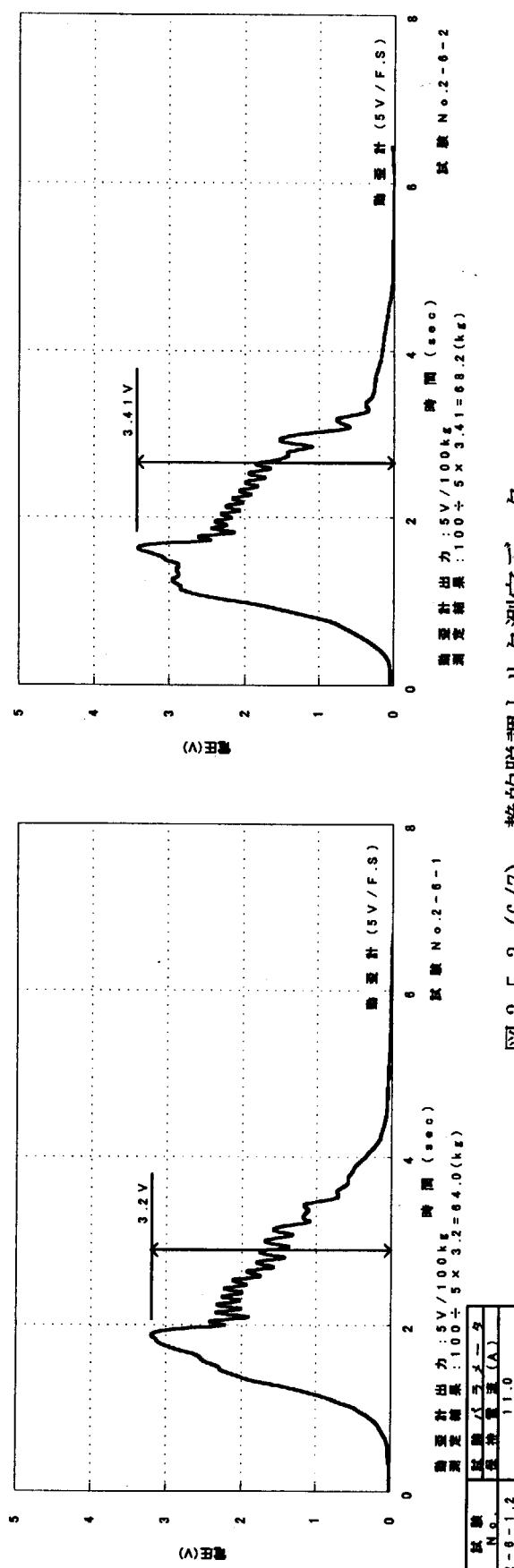


図 2.5-3 (6/7) 静的脱調トルク测定データ

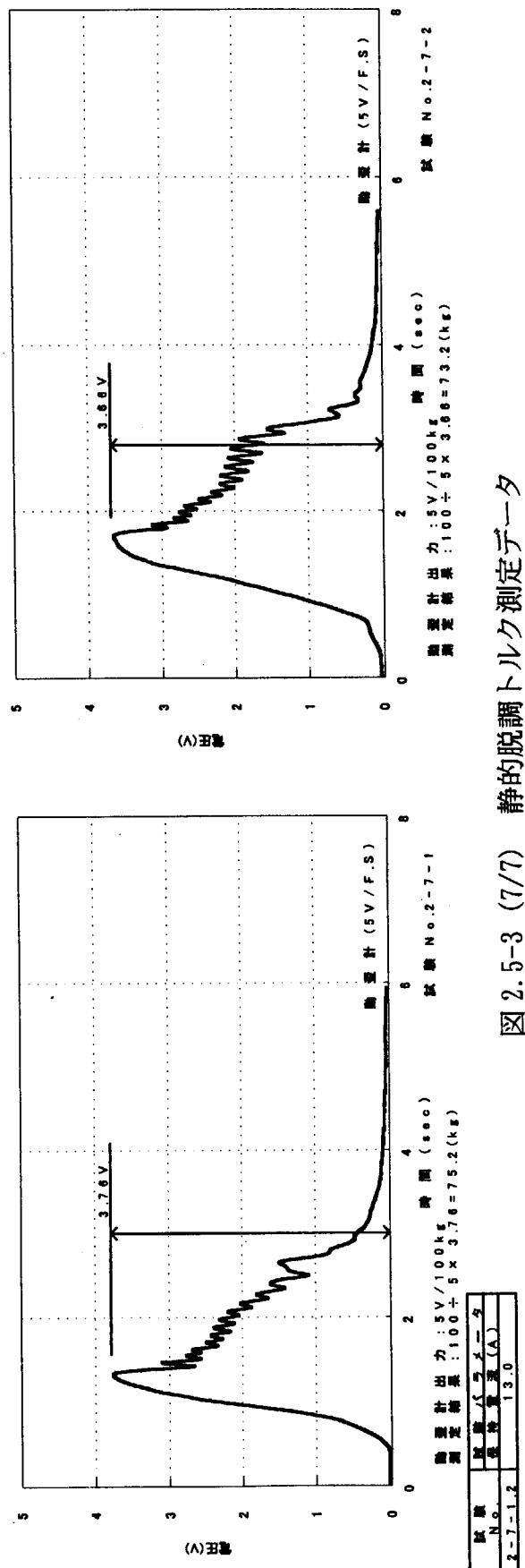


図 2.5-3 (7/7) 静的脱調トルク测定データ

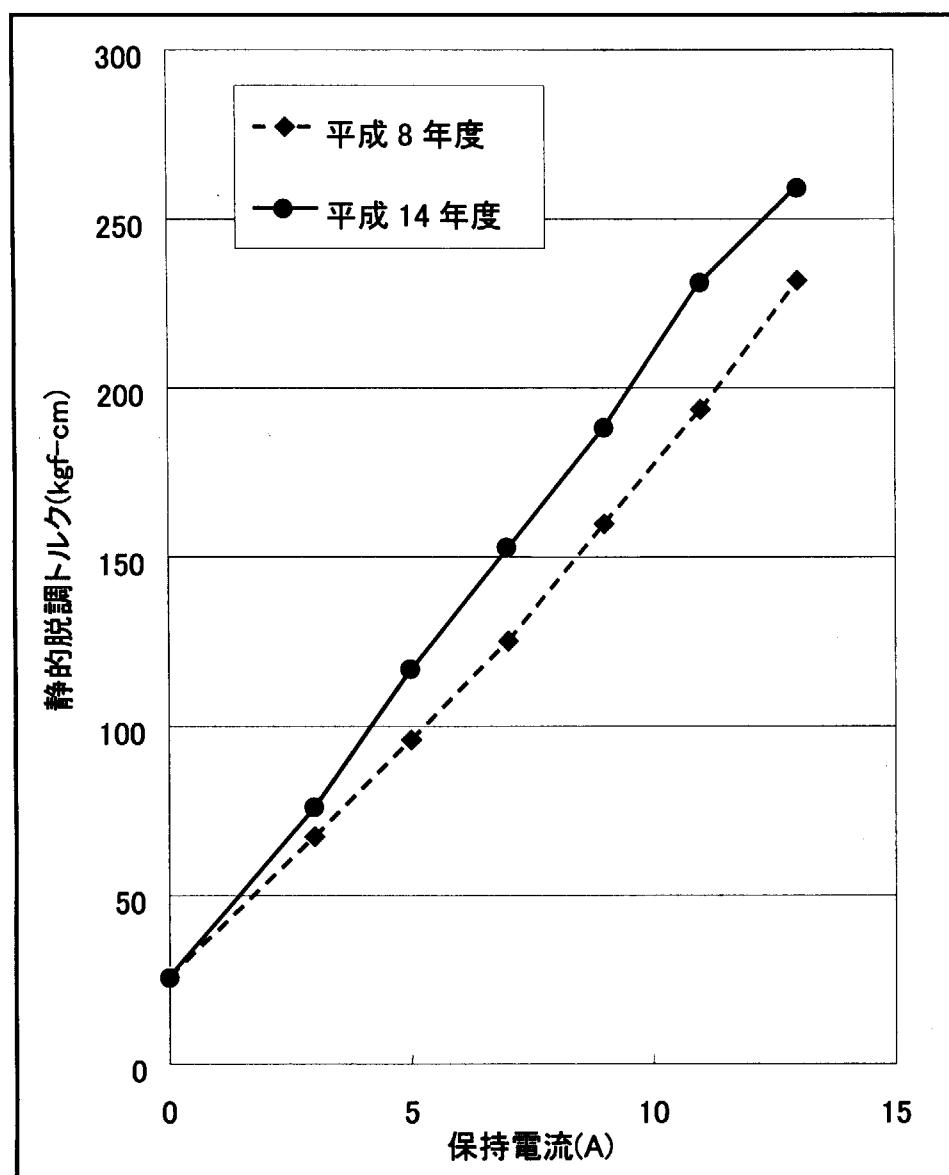


図 2.5-4 平成 8 年試験と平成 14 年(今回)試験の静的脱調トルクの比較

2. 5. 3 動的脱調トルク試験

1) 試験内容

供試体モーターが回転状態で負荷が増加した時の脱調するトルク（電磁的に引張り切れず同期運転ができなくなる限界トルク）を計測し、平成8年度に試作した高温水中駆動モーターとの基本性能を比較するための試験である。

供試体モーターを3)項に示す試験パラメータにて回転させ、各々の状態でパウダーブレーキの電流（抵抗）を徐々に上げ、供試体モーターが脱調するときのトルクを計測した。

2) 試験要領

- ・供試体モーターに繋がる上部ローター軸（出力軸ブーリ）と負荷調整ユニット側の回転軸（Vベルトブーリ）間を連結した。
- ・負荷調整ユニットのパウダーブレーキ電源回路を接続した。
- ・負荷調整ユニットの減速モーター電源回路結線を外した。
- ・供試体モーターの電源回路をモーター制御盤に結線した。
- ・モーター制御盤側により、供試体モーターを所定の回転数とモーター電流で回転させた。
- ・パウダーブレーキ電流を徐々に上げ、供試体モータが停止（脱調）するときのトルクを計測した。

3) 試験パラメータ

- ・供試体モーター回転数 : 50, 100, 200 rpm
- ・供試体モーター電流 : 4, 5, 6, 7A (50rpm)
4, 5, 6, 7, 8A (100rpm)
6, 7, 8, 9A (200rpm)

試験要領書ではモーター電流値を全てのモーター回転数で4~13Aとする予定であったが、回転数200rpmではモーター起動電流が6A必要であったため6Aから計測した。また負荷ユニットのパウダーブレーキ容量が120kgf-cmであるため、脱調トルクが120kgf-cmまでの上記モーター電流で計測した。

4) 試験結果

表2.5-3(1/3~3/3)に動的脱調トルク測定結果一覧表を示す。また、図2.5-5(1/13~13/13)に動的脱調トルク測定データを示す。

5) 考察

試験結果よりモーター電流にほぼ比例した動的脱調トルクの特性が得られた。

パウダーブレーキ容量の関係で負荷トルクが120kgf-cmまでのため、直接比較することが難しいが、平成8年度製作した高温水中駆動モーターの室温での動的脱調トルク測

定結果と本試験により得られた動的脱調トルク測定結果との比較を図 2.5-6 に示す。

図に示される通り、モーター電流と動的脱調トルクは何れのモーターもほぼ比例し、モーター電流が一定であれば、回転数が大きいほど出力トルクが小さくなる特性を示している。これは回転数が大きいほど定格軸出力を得るためのモーター電流が大きくなるというモーター電流と回転数の特性によるものである。

また、本試験結果（蒸気中仕様）で得られた動的脱調トルクの方が平成 8 年度試験結果（水中仕様）よりも高い結果となり、静的脱調トルク測定結果と同様、本供試体モーターの基本的電磁特性の違いを示したものと考えられる。

なお、負荷トルク容量の制限から測定できなかった最高使用電流 13A 付近での動的脱調トルクを計測データから外挿すると約 200kgf-cm を超えるトルクが得られることが分かる。（この最大トルクは開発目標の最大トルク：120kgf-cm の約 2 倍に達し、磁石及びコイルの高温経時劣化を 40% と見込んでも十分な性能であることが確認できた。）

表 2.5-3 (1/3) 動的脱調トルク試験結果一覧表 (50rpm)
(試験実施日：H 14. 9. 11 温度：29. 0°C)

試験 No.	試験パラメータ		トルク (kg-cm)
	回転数 (rpm)	モータ電流 (A)	
3-11-1	50	4.0	48.45
3-11-2			48.45
平均			48.45
3-14-1	50	5.0	68.85
3-14-2			68.85
平均			68.85
3-12-1	50	6.0	86.70
3-12-2			89.25
平均			87.98
3-15-1	50	7.0	104.55
3-15-2			107.10
平均			105.83

試験 No. 3-13 (50rpm/8.0A) は、トルク容量を超えるためデータ無し

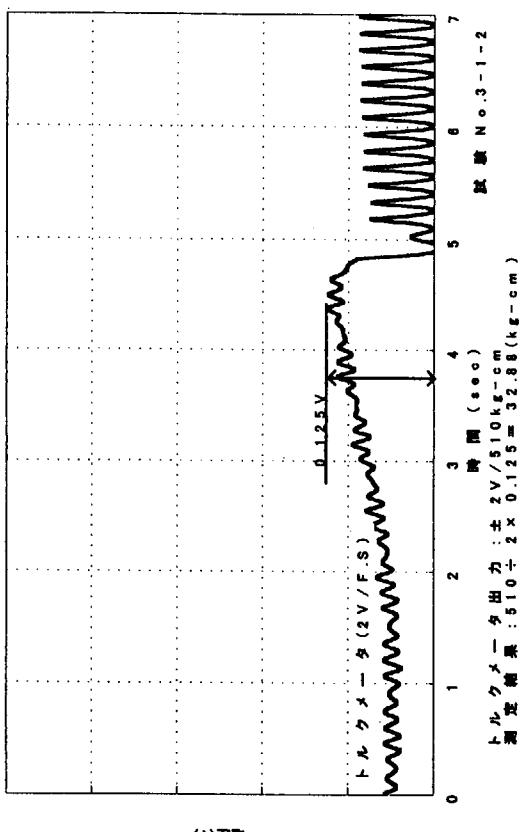
表 2.5-3 (2/3) 動的脱調トルク試験結果一覧表 (100rpm)
 (試験実施日 : H14. 9. 11 温度 : 29. 0°C)

試験 No.	試験パラメータ		トルク (kg-cm)
	回転数 (rpm)	モータ電流 (A)	
3-1-1	100	4.0	32.64
3-1-2			32.88
平均			32.76
3-4-1	100	5.0	53.55
3-4-2			53.55
平均			53.55
3-2-1	100	6.0	69.36
3-2-2			70.13
平均			69.75
3-5-1	100	7.0	91.80
3-5-2			91.80
平均			91.80
3-3-1	100	8.0	107.10
3-3-2			109.65
平均			108.38

表 2.5-3 (3/3) 動的脱調トルク試験結果一覧表 (200rpm)
 (試験実施日 : H14. 9. 11 温度 : 29. 0°C)

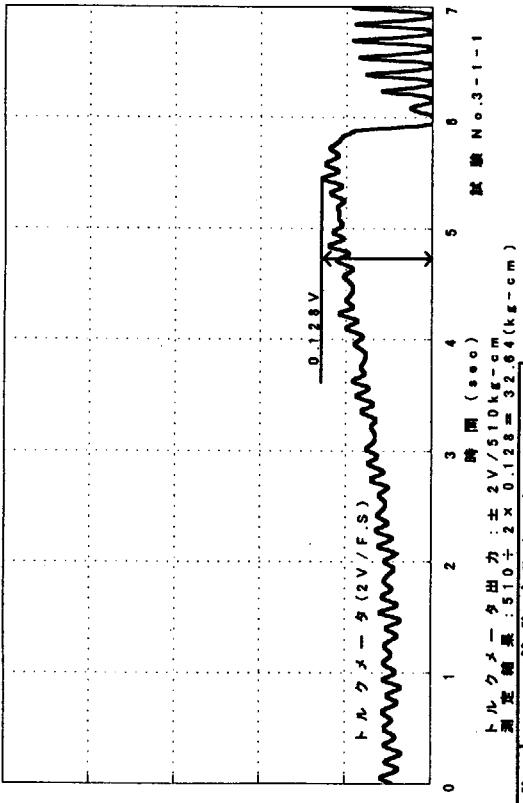
試験 No.	試験パラメータ		トルク (kg-cm)
	回転数 (rpm)	モータ電流 (A)	
3-7-1	200	6.0	53.55
3-7-2			53.55
平均			53.55
3-10-1	200	7.0	73.95
3-10-2			73.95
平均			73.95
3-9-1	200	8.0	94.35
3-9-2			96.90
平均			95.63
3-8-1	200	9.0	112.20
3-8-2			109.65
平均			110.93

試験 No. 3-6 (200rpm/4.0A) 起動せずデータ無し

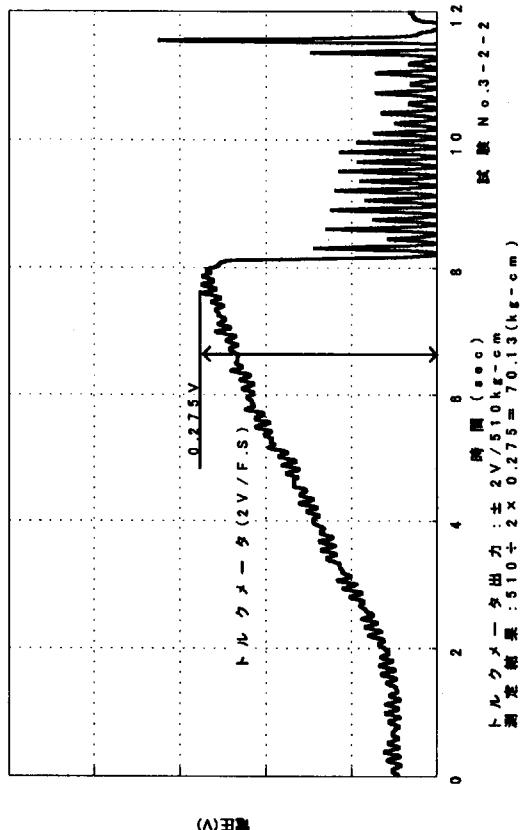


(A) 図

図 2.5-5 (1/13)

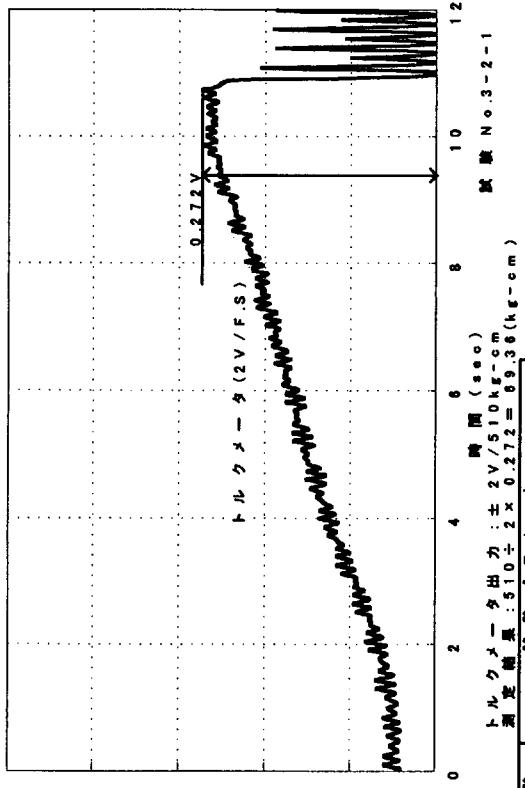


(A) 図

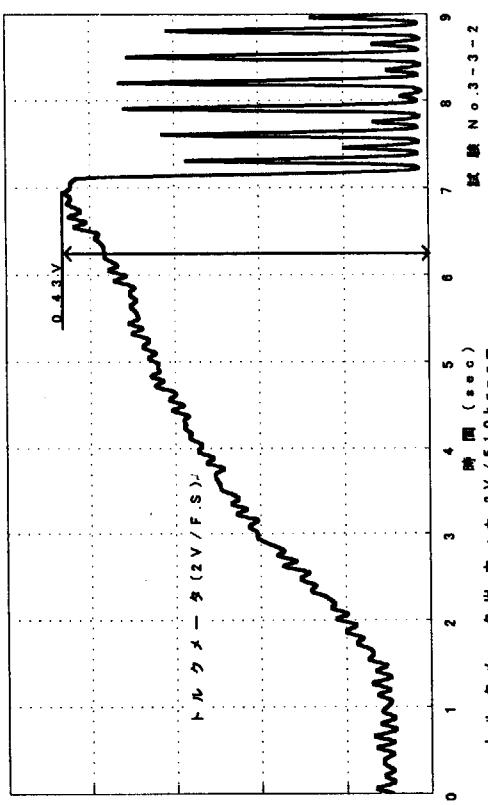


(A) 図

図 2.5-5 (2/13) 動的脱調トルク測定データ



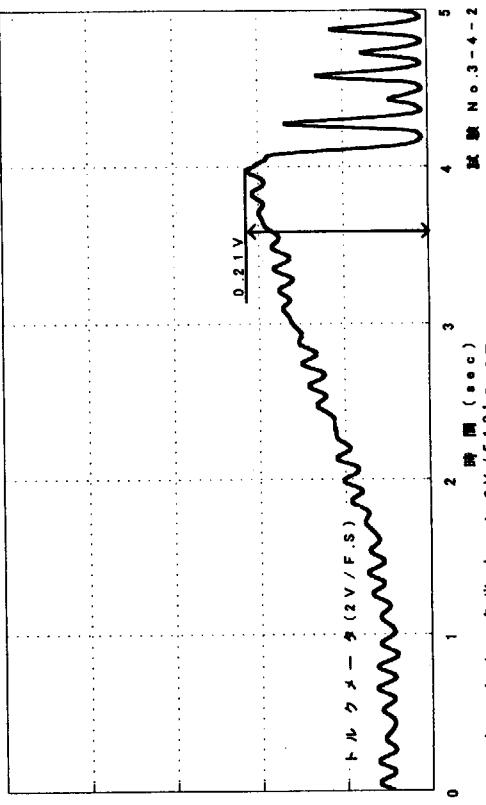
(A) 図



(A) 図

トルクメータ出力 : $2V / 510 \text{ k}\text{g}\cdot\text{cm}$
測定結果 : $510 \div 2 \times 0.43 = 109.65 (\text{k}\text{g}\cdot\text{cm})$

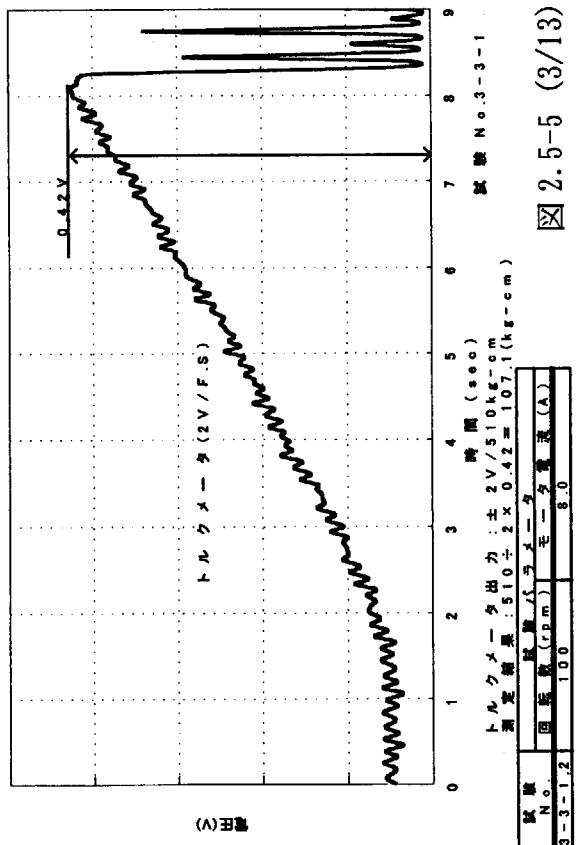
図 2.5-5 (3/13)



(A) 図

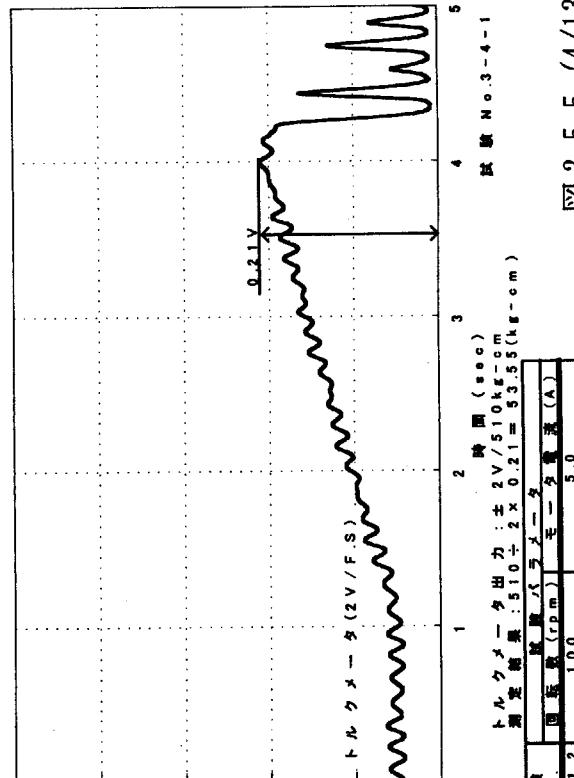
トルクメータ出力 : $2V / 510 \text{ k}\text{g}\cdot\text{cm}$
測定結果 : $510 \div 2 \times 0.21 = 153.55 (\text{k}\text{g}\cdot\text{cm})$

図 2.5-5 (4/13) 動的脱調トルク測定データ



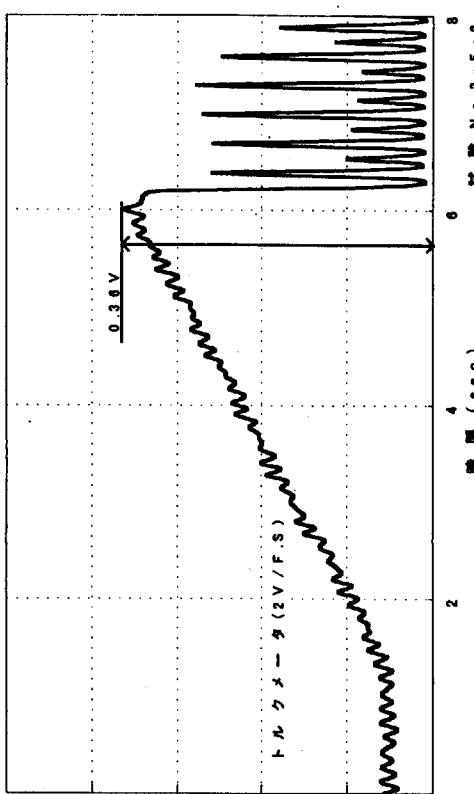
(A) 図

試験 N. 3-3-1.2
回転数 (rpm) モード選択 (A)
測定結果 : $510 \div 2 \times 0.42 = 107.1 (\text{k}\text{g}\cdot\text{cm})$

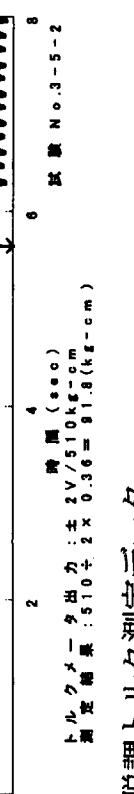


(A) 図

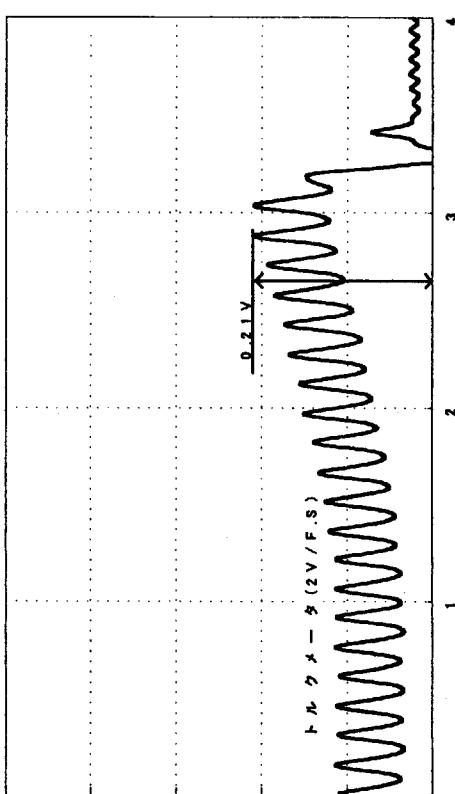
トルクメータ出力 : $2V / 510 \text{ k}\text{g}\cdot\text{cm}$
測定結果 : $510 \div 2 \times 0.21 = 153.55 (\text{k}\text{g}\cdot\text{cm})$



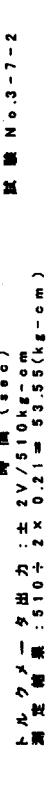
(A) 図



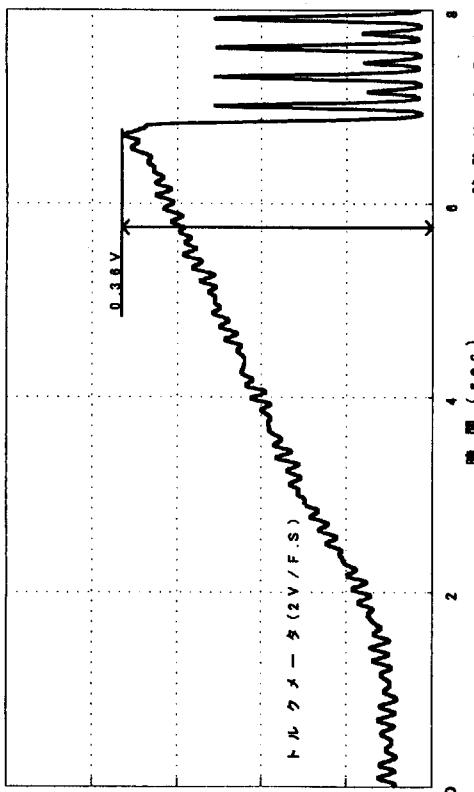
動的脱調トルク測定データ



(A) 図



動的脱調トルク測定データ



(A) 図

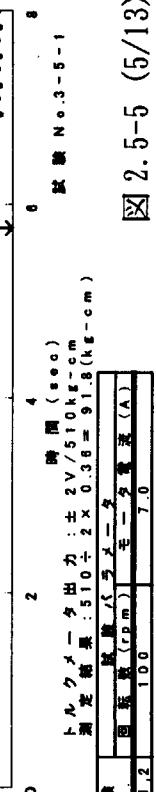
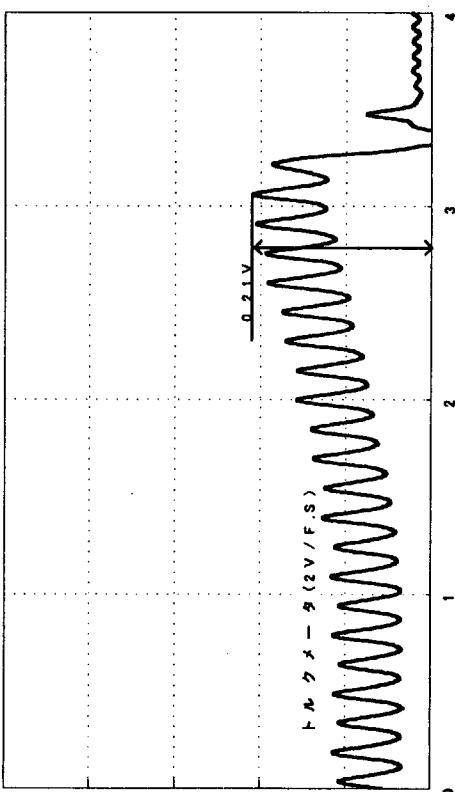


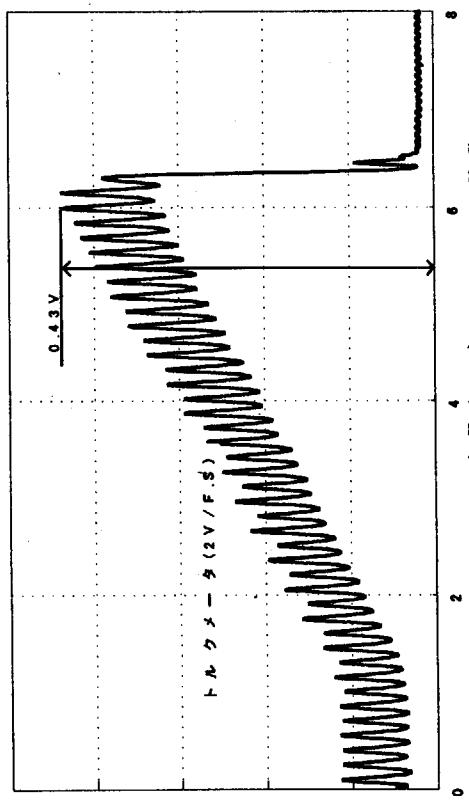
図 2.5-5 (5/13)



(A) 図



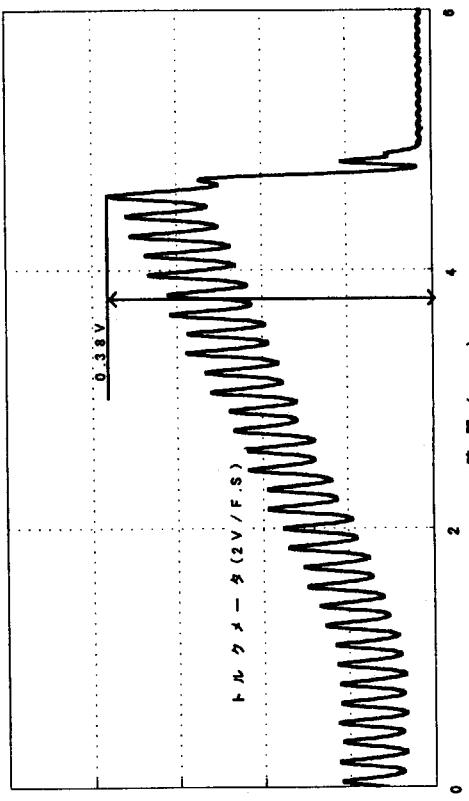
図 2.5-5 (6/13)



(A) 図

トルクメータ 外出力 : $\pm 2V / 510 \text{ kg-cm}$
測定範囲 : $510 \div 2 \times 0.43 = 112.2 (\text{kg-cm})$

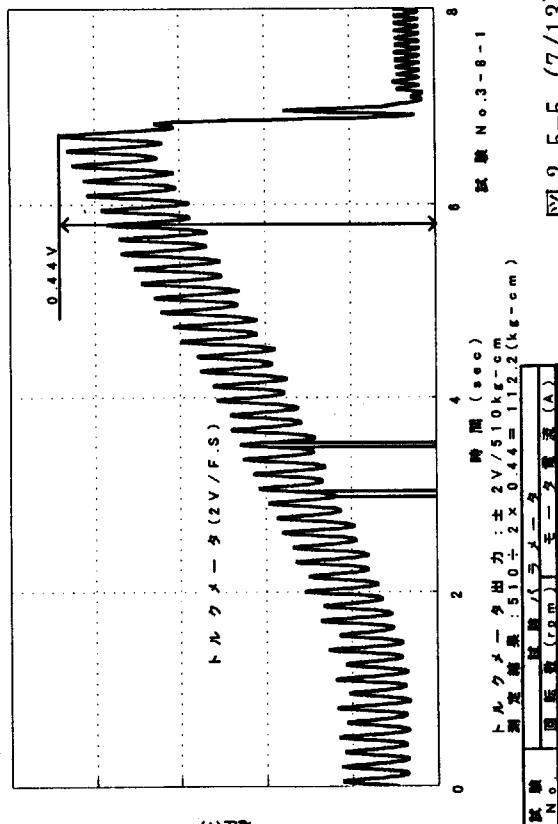
動的脱調トルク測定データ



(A) 図

トルクメータ 外出力 : $\pm 2V / 510 \text{ kg-cm}$
測定範囲 : $510 \div 2 \times 0.38 = 109.55 (\text{kg-cm})$

動的脱調トルク測定データ

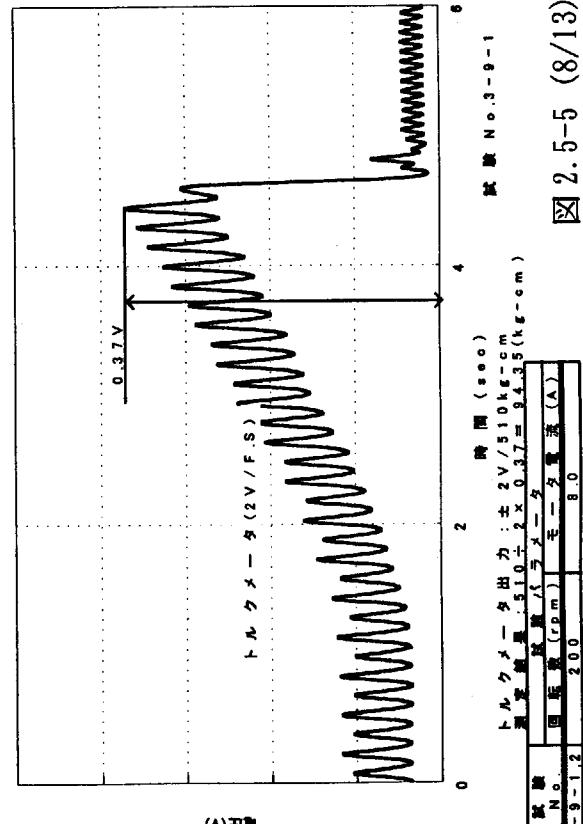


(A) 図

トルクメータ 外出力 : $\pm 2V / 510 \text{ kg-cm}$
測定範囲 : $510 \div 2 \times 0.44 = 112.2 (\text{kg-cm})$

試験	回転数 (rpm)	モード
3-8-1.2	200	(A)

図 2.5-5 (7/13)



(A) 図

トルクメータ 外出力 : $\pm 2V / 510 \text{ kg-cm}$
測定範囲 : $510 \div 2 \times 0.37 = 94.35 (\text{kg-cm})$

試験	回転数 (rpm)	モード
3-9-1.2	200	(A)

図 2.5-5 (8/13)

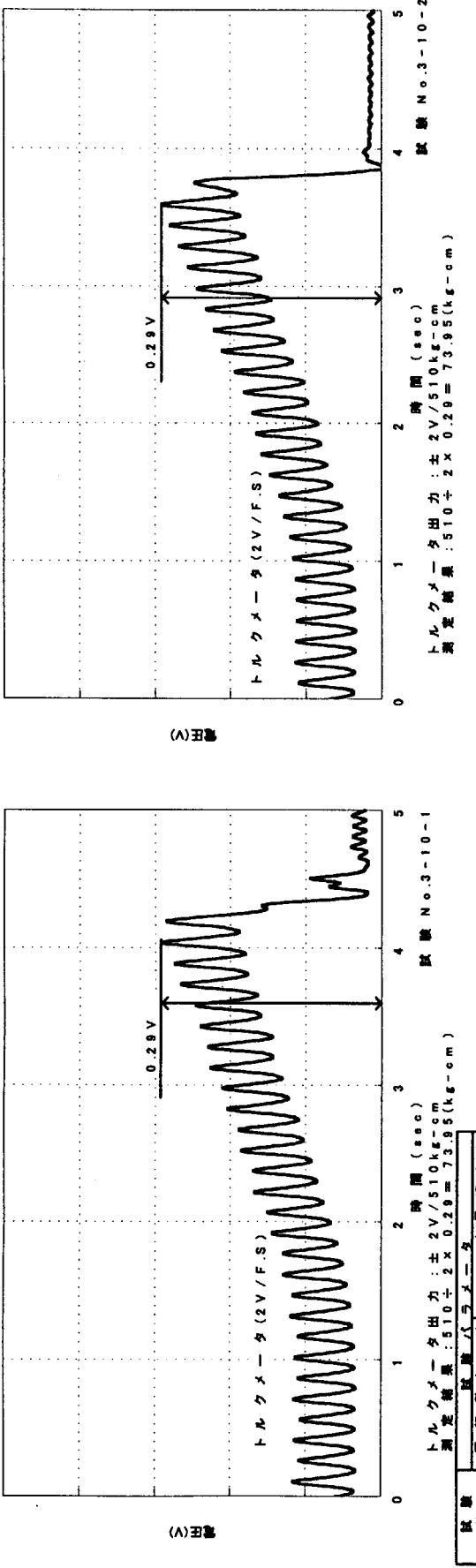


図 2.5-5 (9/13)

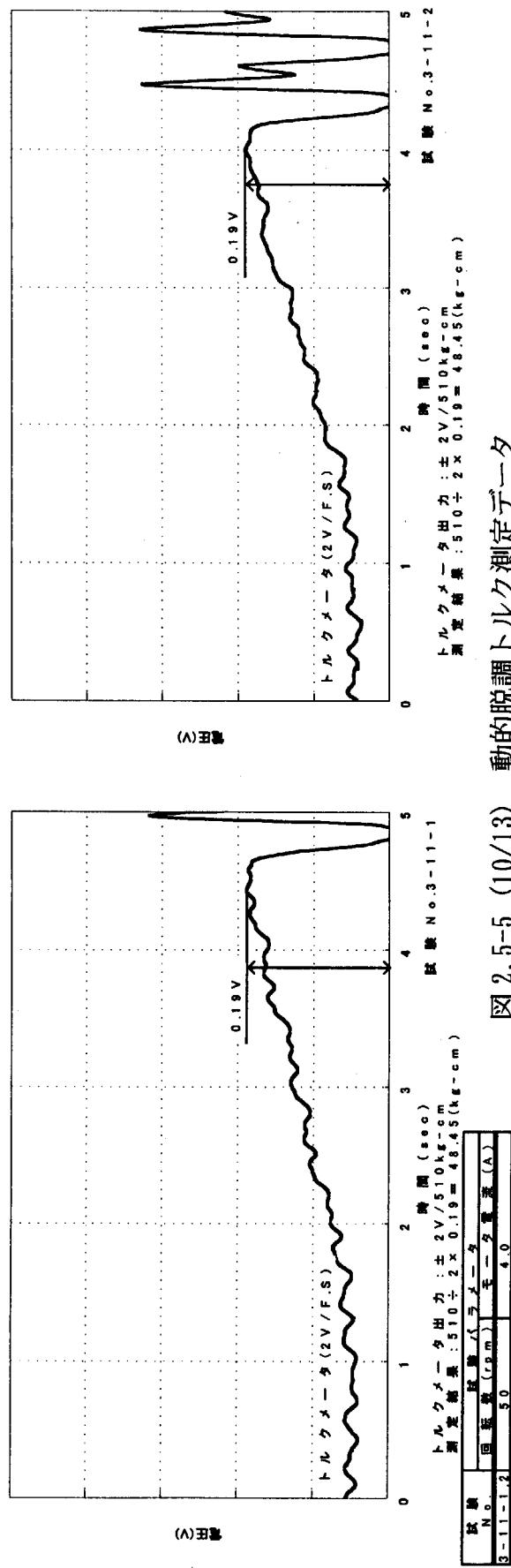
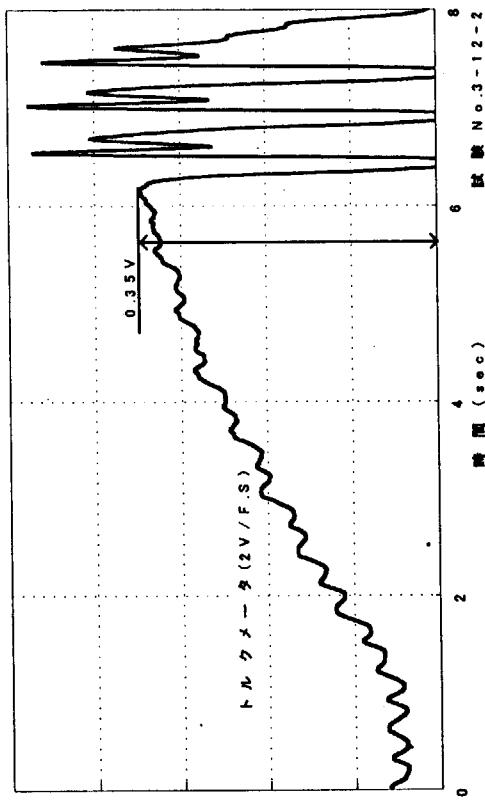


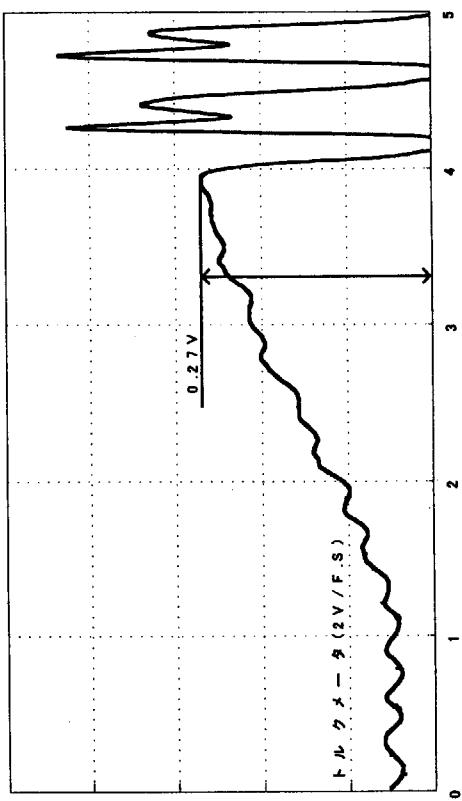
図 2.5-5 (10/13)



(A) 図

試験 N o . 3 - 1 2 - 2
トルクメータ出力 : $\pm 2V / 510 \text{ kg-cm}$
測定範囲 : $510 \div 2 \times 0.35 = 86.7 (\text{kg-cm})$

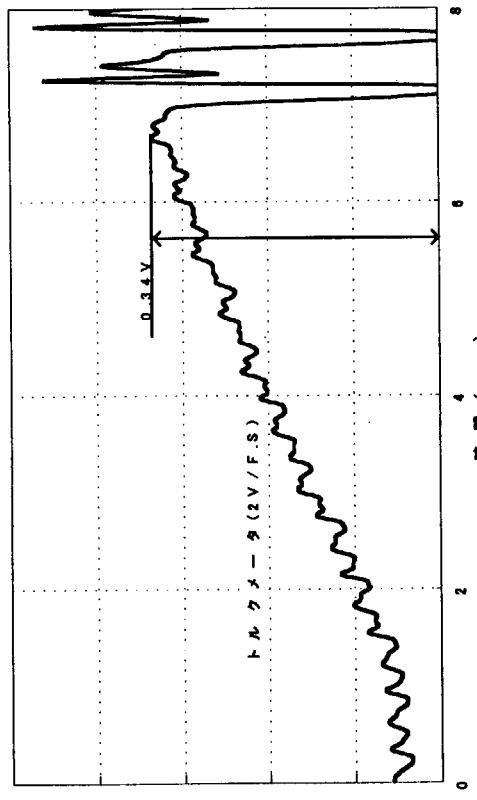
動的脱調トルク測定データ



(A) 図

試験 N o . 3 - 1 2 - 2
トルクメータ出力 : $\pm 2V / 510 \text{ kg-cm}$
測定範囲 : $510 \div 2 \times 0.27 = 88.9 (\text{kg-cm})$

動的脱調トルク測定データ

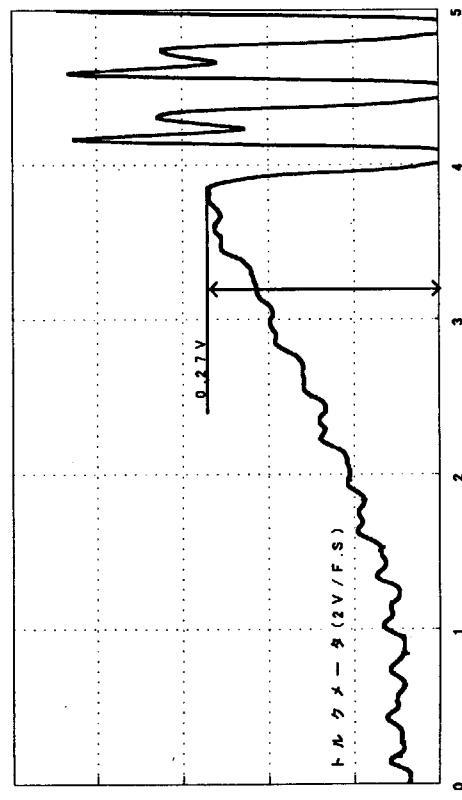


(A) 図

試験 N o . 3 - 1 2 - 1
トルクメータ出力 : $\pm 2V / 510 \text{ kg-cm}$
測定範囲 : $510 \div 2 \times 0.34 = 86.7 (\text{kg-cm})$

試験 N o .	回転数 (rpm)	モード電流 (A)
3-12-1.2	50	6.0

図 2.5-5 (11/13)



(A) 図

試験 N o . 3 - 1 4 - 1
トルクメータ出力 : $\pm 2V / 510 \text{ kg-cm}$
測定範囲 : $510 \div 2 \times 0.27 = 88.9 (\text{kg-cm})$

試験 N o .	回転数 (rpm)	モード電流 (A)
3-14-1.2	50	5.0

図 2.5-5 (12/13) 動的脱調トルク測定データ

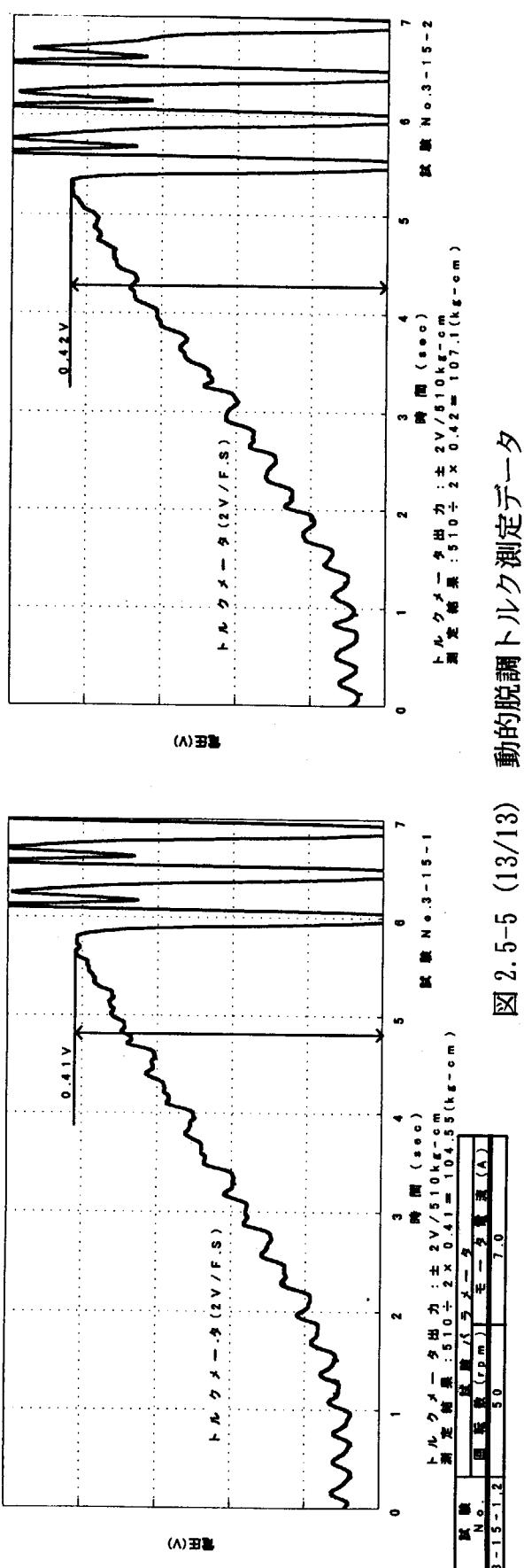


図 2.5-5 (13/13) 動的脱調トルク測定データ

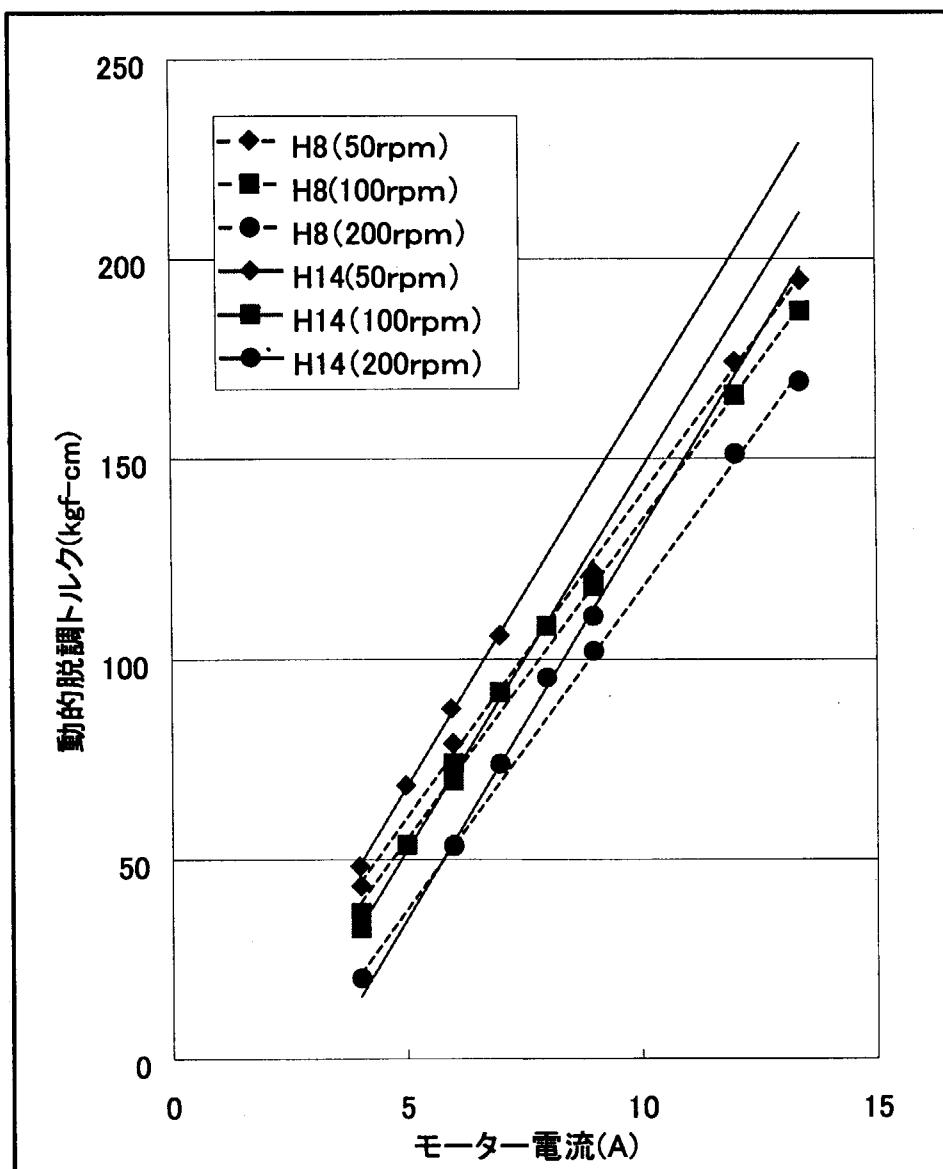


図 2.5-6 平成 8 年試験と平成 14 年(今回)試験の動的脱調トルクの比較

2. 5. 4 起動停止特性試験

1) 試験内容

定格負荷状態及び過負荷状態で最大使用電流（13A）にて任意の回転数で起動、停止ができるることを確認する試験である。

パウダーブレーキに負荷トルクに相当する制御電流を印加した状態で供試体モーターの起動、停止を行った。

2) 試験要領

- ・供試体モーターに繋がる上部ローター軸（出力軸ブーリ）と負荷調整ユニット側の回転軸（Vベルトブーリ）間を連結した。
- ・負荷調整ユニットのパウダーブレーキ電源回路を接続した。
- ・負荷調整ユニットの減速モーター電源回路結線を外した。
- ・供試体モーターの電源回路をモーター制御盤に結線した。
- ・パウダーブレーキに所定の負荷トルクに相当する電流を印加した。
- ・モーター制御盤側により、供試体モーターを最大使用電流（13A）に設定し、所定の回転数で回転、停止動作を繰り返した。

3) 試験パラメータ

- ・負荷トルク : 30, 45 kgf·cm
- ・供試体モーター回転数 : 50, 100, 200 rpm

4) 試験結果

表 2.5-4 に起動停止特性結果一覧表を示す。また、図 2.5-7 (1/7~7/7) に起動停止特性測定データを示す。

5) 考察

試験結果よりモーター制御盤からの回転、停止指令に従い、供試体モーターが確実に起動、停止することが確認できた。

表 2.5-4 起動停止特性試験結果一覧表
 (試験実施日 : H 14. 9. 11 温度 : 27. 5 °C)

試験 No.	試験パラメータ		起動停止状況
	回転数(rpm)	負荷トルク(kg-cm)	
4-1-1	100	30	良
4-1-2			良
4-2-1	200	30	良
4-2-2			良
4-3-1	100	45	良
4-3-2			良
4-4-1	200	45	良
4-4-2			良
4-5-1	50	30	良
4-5-2			良
4-6-1	50	45	良
4-6-2			良

試験 No.	回転 数 (rpm)	負荷トルク (kg-cm)
4-1-1	100	30

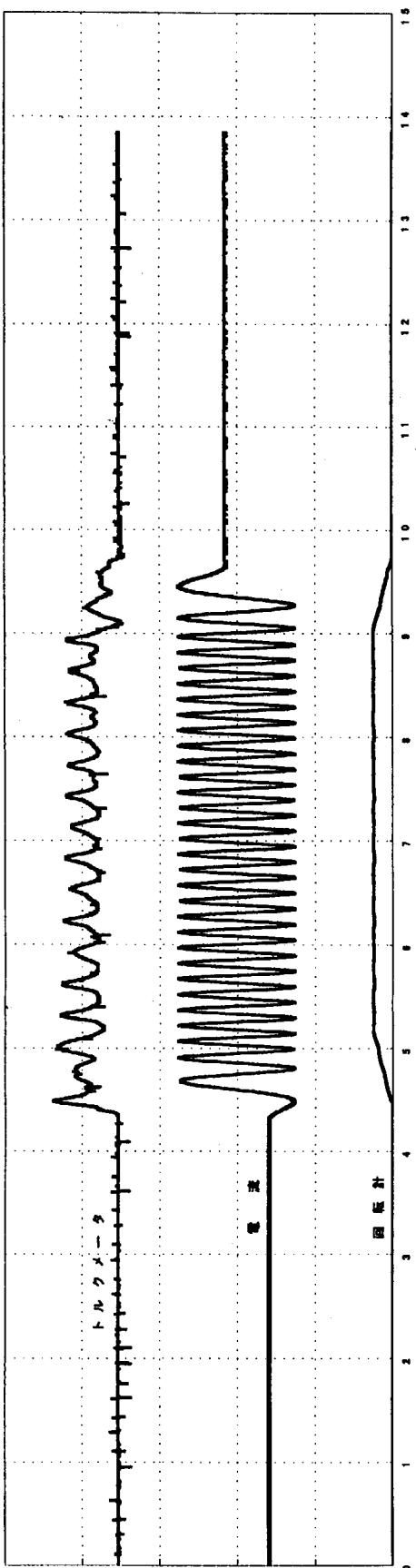


図 2.5-7 (1/12) 起動停止特性測定データ

試験 No.	回転 数 (rpm)	負荷トルク (kg-cm)
4-1-2	100	30

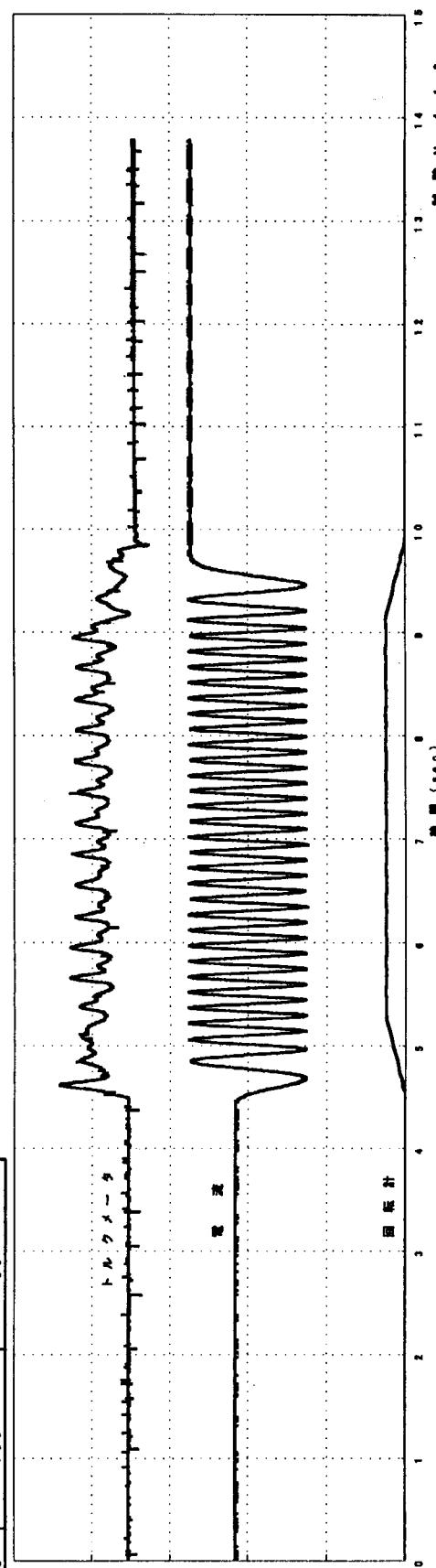


図 2.5-7 (2/12) 起動停止特性測定データ

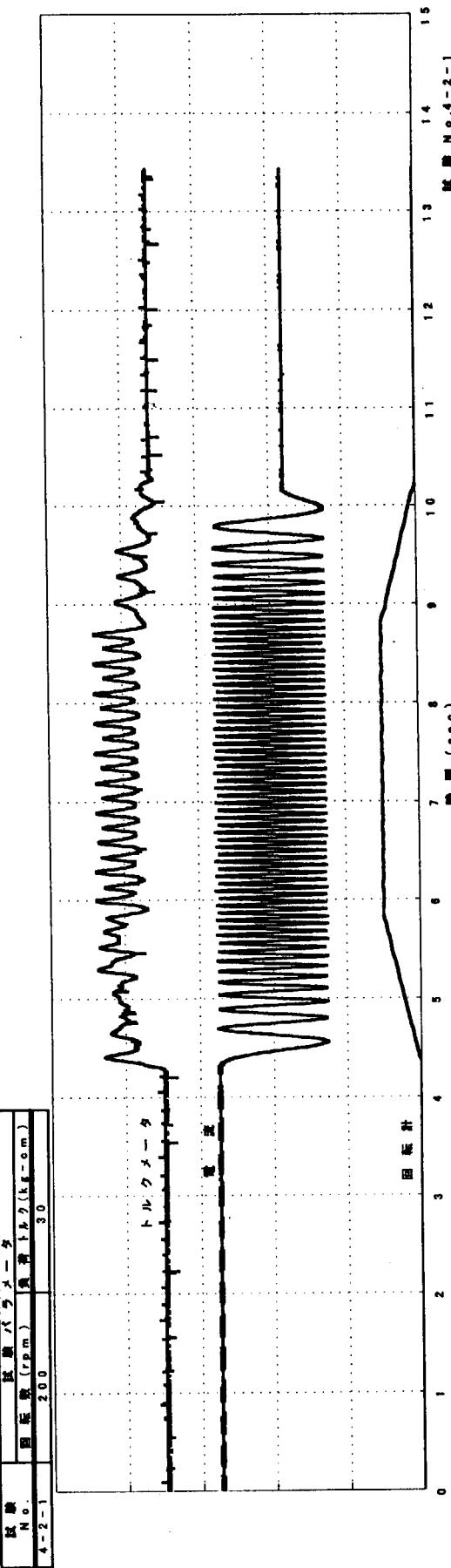


図 2.5-7 (3/12) 起動停止特性測定データ

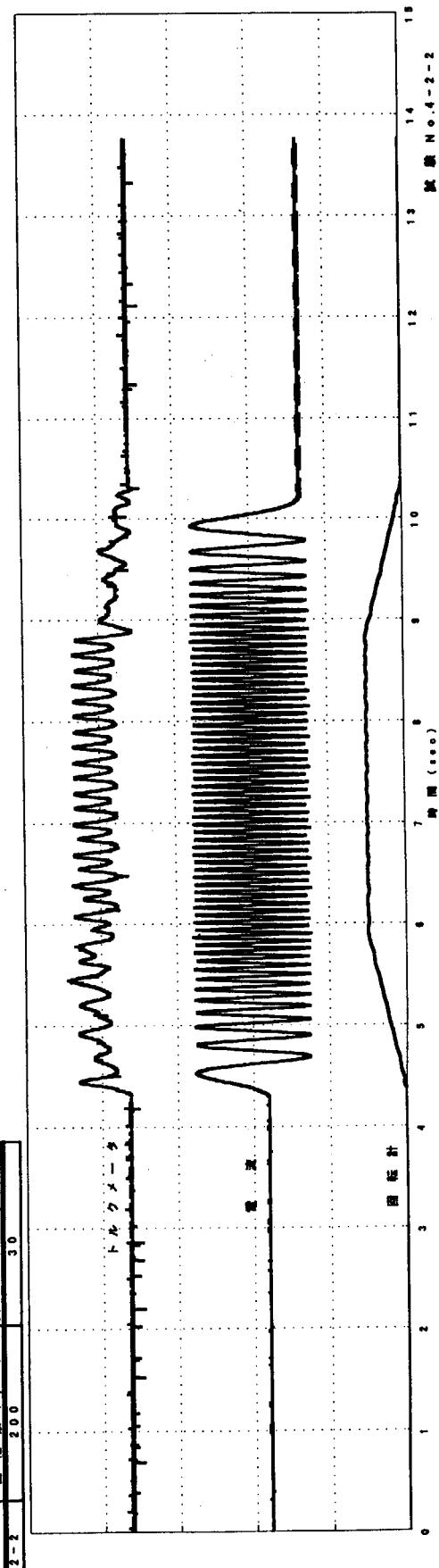


図 2.5-7 (4/12) 起動停止特性測定データ

試験 No.	回転数 (rpm)	負荷トルク (kg-cm)
4-3-1	100	45

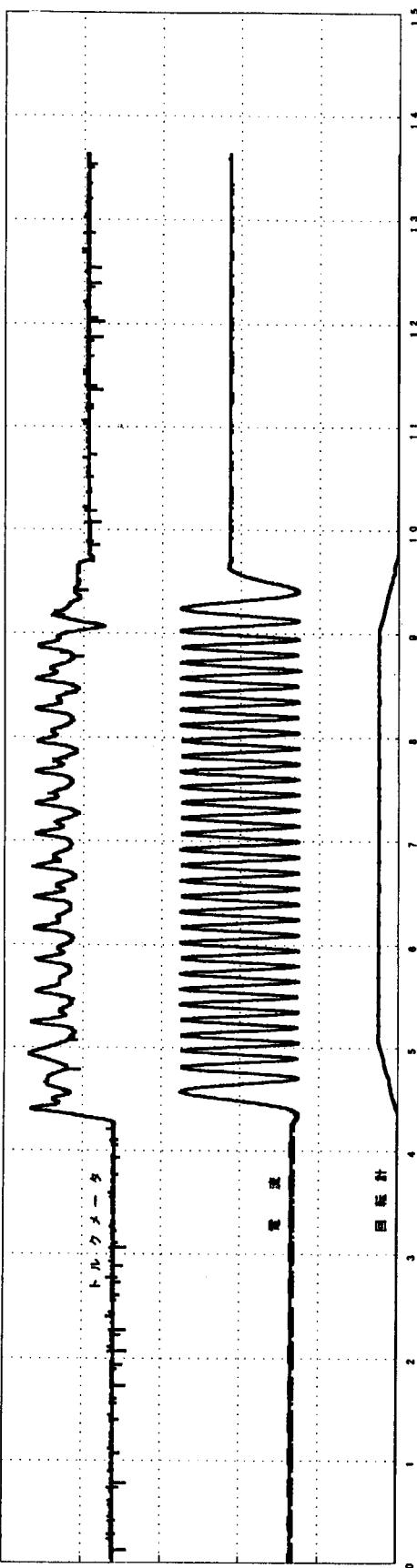


図 2.5-7 (5/12) 起動停止特性測定データ

試験 No.	回転数 (rpm)	負荷トルク (kg-cm)
4-3-2	100	45

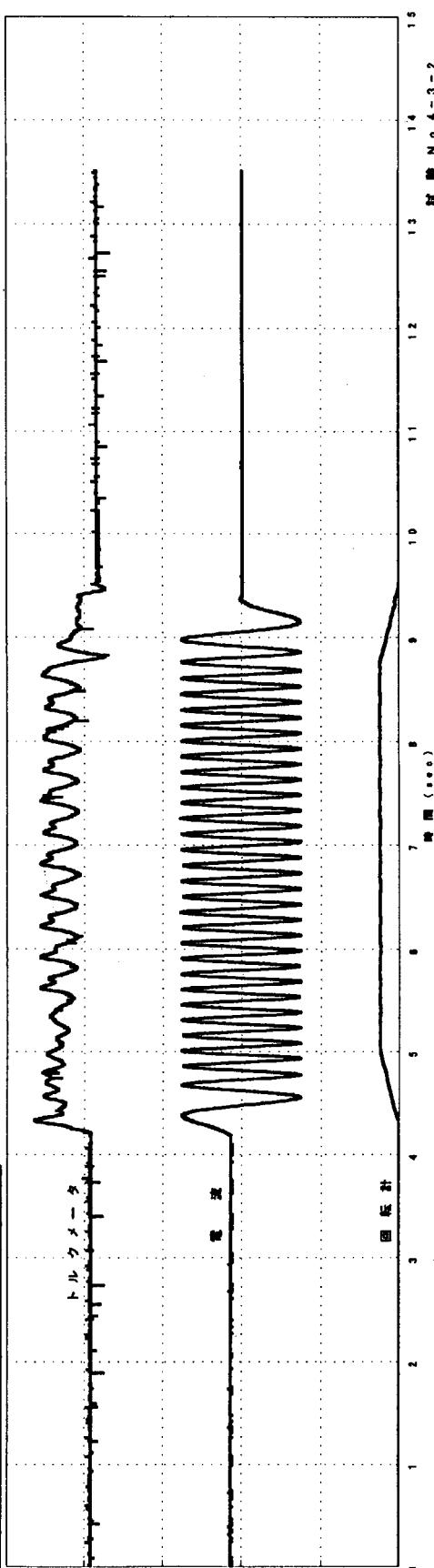


図 2.5-7 (6/12) 起動停止特性測定データ

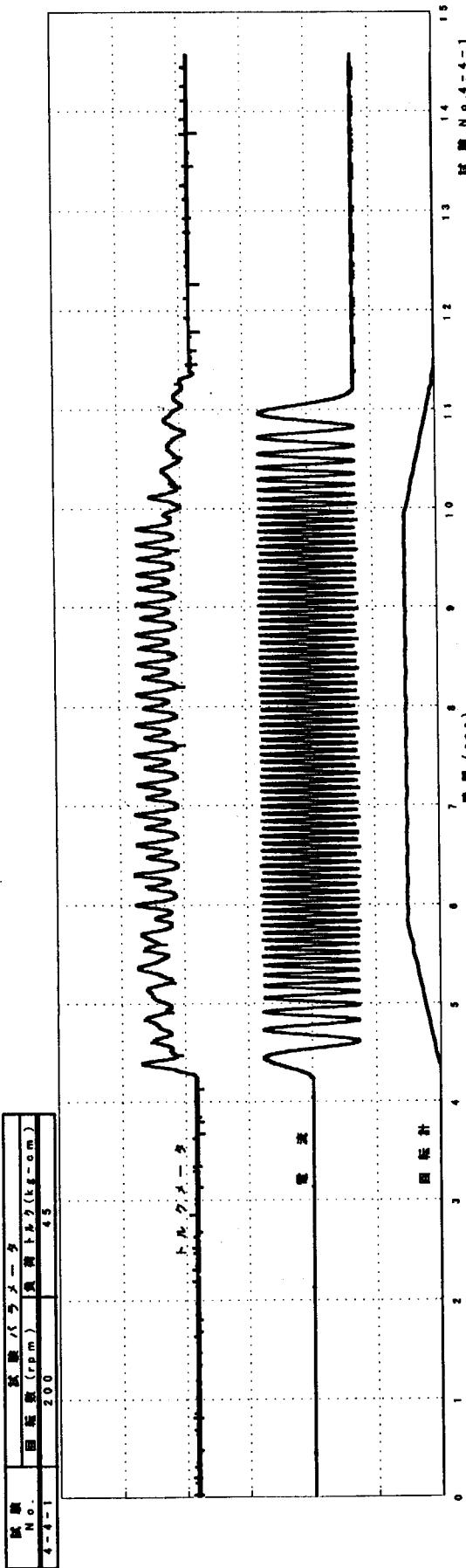


図 2.5-7 (7/12) 起動停止特性測定データ

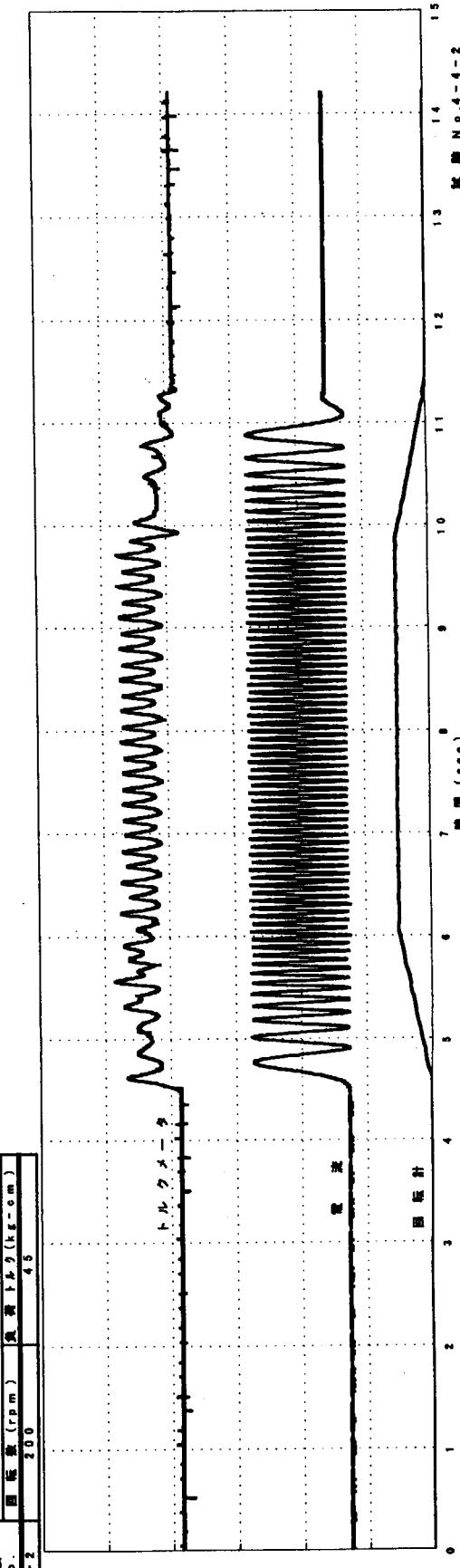


図 2.5-7 (8/12) 起動停止特性測定データ

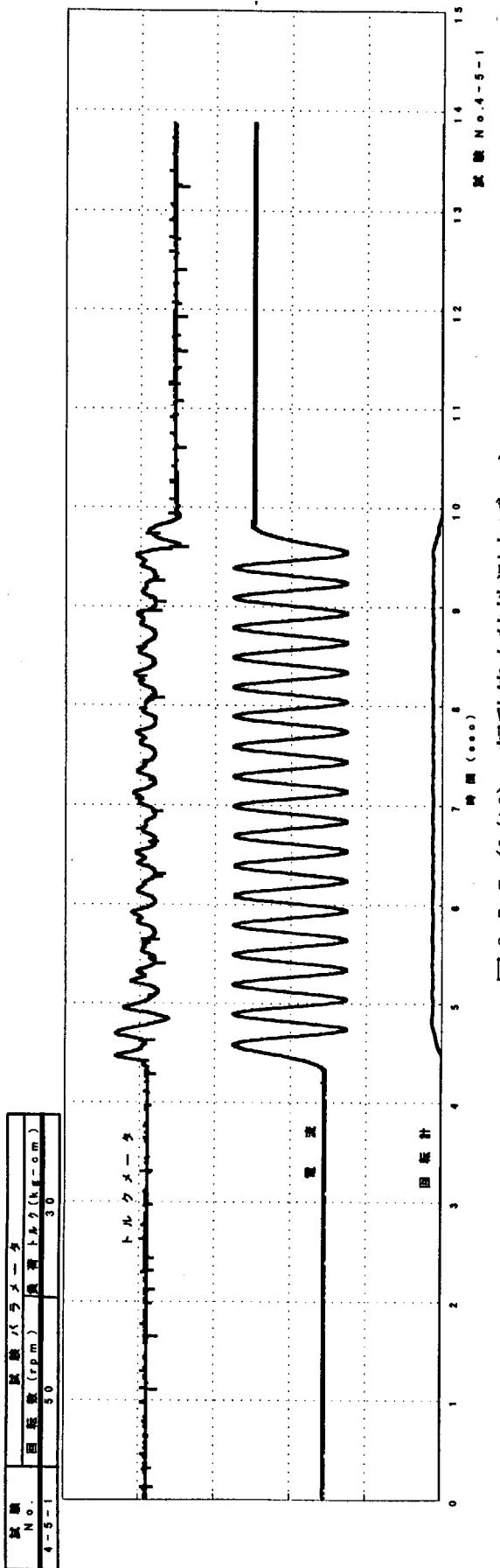


図 2.5-7 (9/12) 起動停止特性測定データ

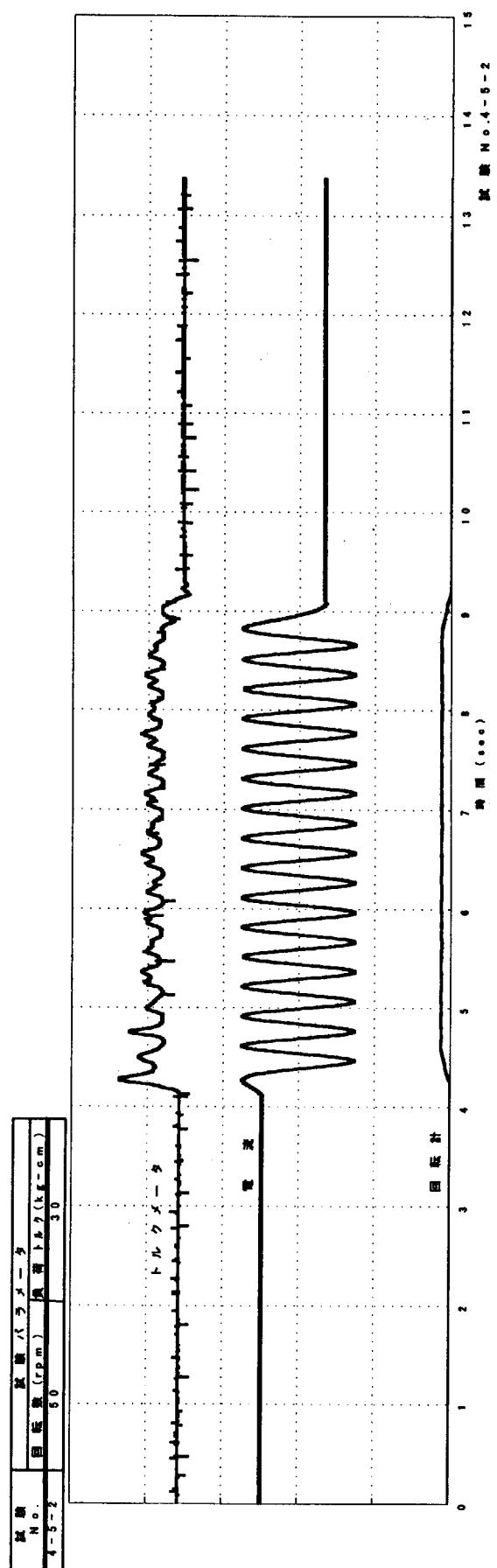


図 2.5-7 (10/12) 起動停止特性測定データ

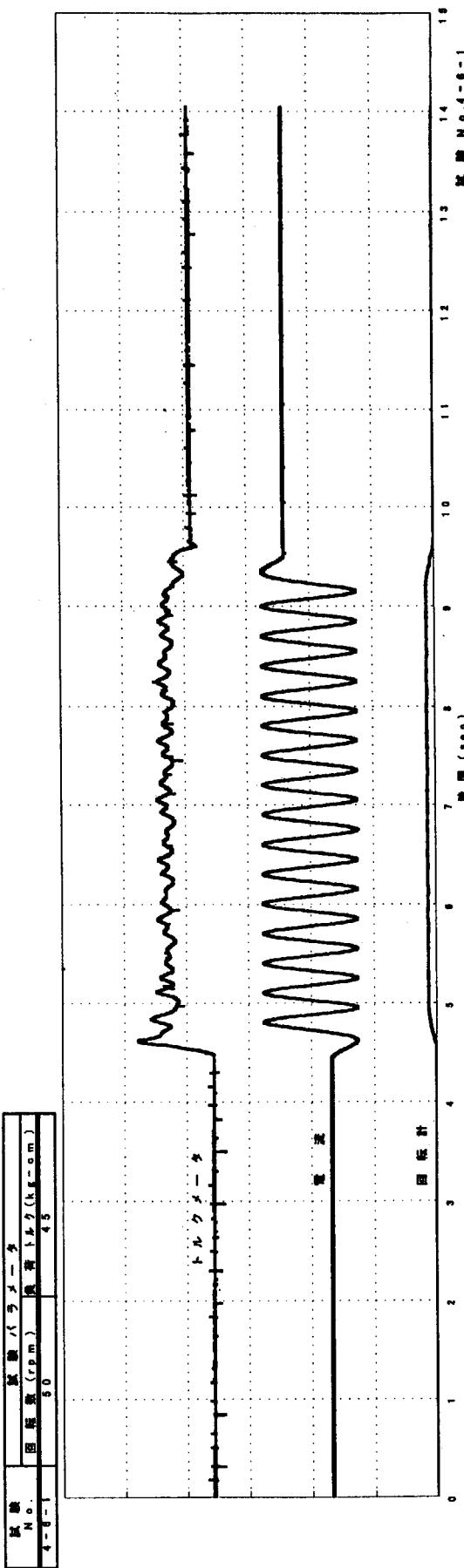


図 2.5-7 (11/12) 起動停止特性測定データ

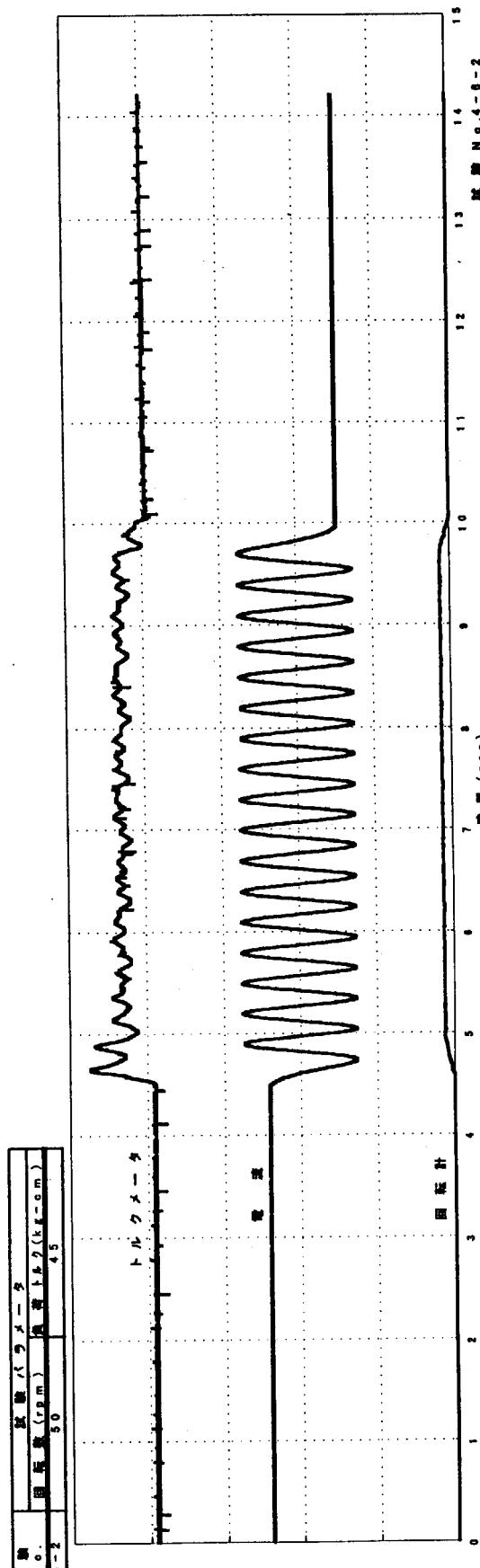


図 2.5-7 (12/12) 起動停止特性測定データ

2. 5. 5 回転速度制御試験

1) 試験内容

定格負荷（30kgf-cm）状態において、モーター制御盤からの回転速度指令への追従性を確認するための試験である。

パウダーブレーキ（負荷）に 30kgf-cm の負荷トルクに相当する電流を印加した状態で供試体モーターを回転させ、制御盤の回転数指令を切り替えて供試体モーターの回転速度追従性を計測した。

2) 試験要領

- ・供試体モーターに繋がる上部ローター軸（出力軸ブーリ）と負荷調整ユニット側の回転軸（Vベルトブーリ）間を連結した。
- ・負荷調整ユニットのパウダーブレーキ電源回路を接続した。
- ・負荷調整ユニットの減速モーター電源回路結線を外した。
- ・供試体モータの電源回路をモーター制御盤に結線した。
- ・パウダーブレーキに定格負荷トルク（30kgf-cm）に相当する電流を印加した。
- ・モーター制御盤側により、供試体モーターを回転させ、回転数指令を切替え、追従性を計測した。

3) 試験パラメータ

- ・供試体モーター回転数 : 0→50→100→150→200→150→100→50→0 rpm
0→200→0 rpm

4) 試験結果

表 2.5-5 に回転速度制御性試験結果一覧表を示す。また図 2.5-8 に回転制御性測定データを示す。

5) 考察

試験結果よりモーター制御盤からの回転指令（回転数制御）に正確に追従し、供試体モーターが動作することが確認できた。

表 2.5-5 回転速度制御性試験結果一覧表
 (試験実施日 : H14. 9. 11 溫度 : 27. 0°C)

	試験パラメータ		回転制御性状況
	電流(A)	回転数パターン(rpm)	
5-1-1	8	0→50→100→150→200→150 →100→50→0	良
5-1-2			良
5-2-1	13	0→50→100→150→200→150 →100→50→0	良
5-2-2			良
5-3-1	8	0→200→0	良
5-3-2			良
5-4-1	13	0→200→0	良
5-4-2			良

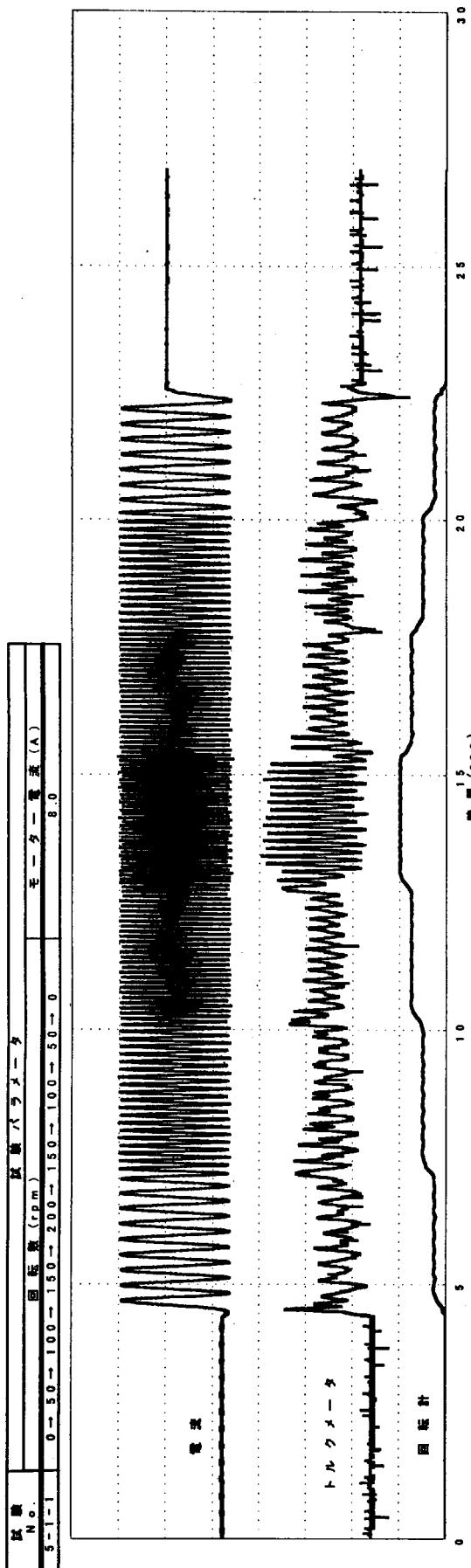


図 2.5-8 (1/8) 回転制御測定データ

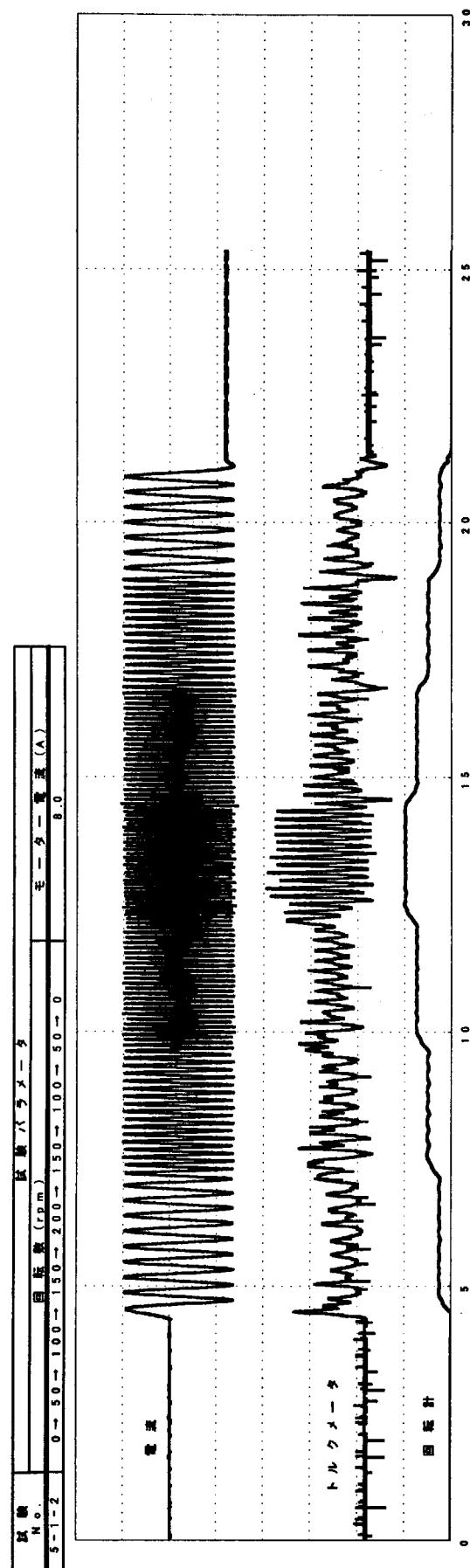


図 2.5-8 (2/8) 回転制御測定データ

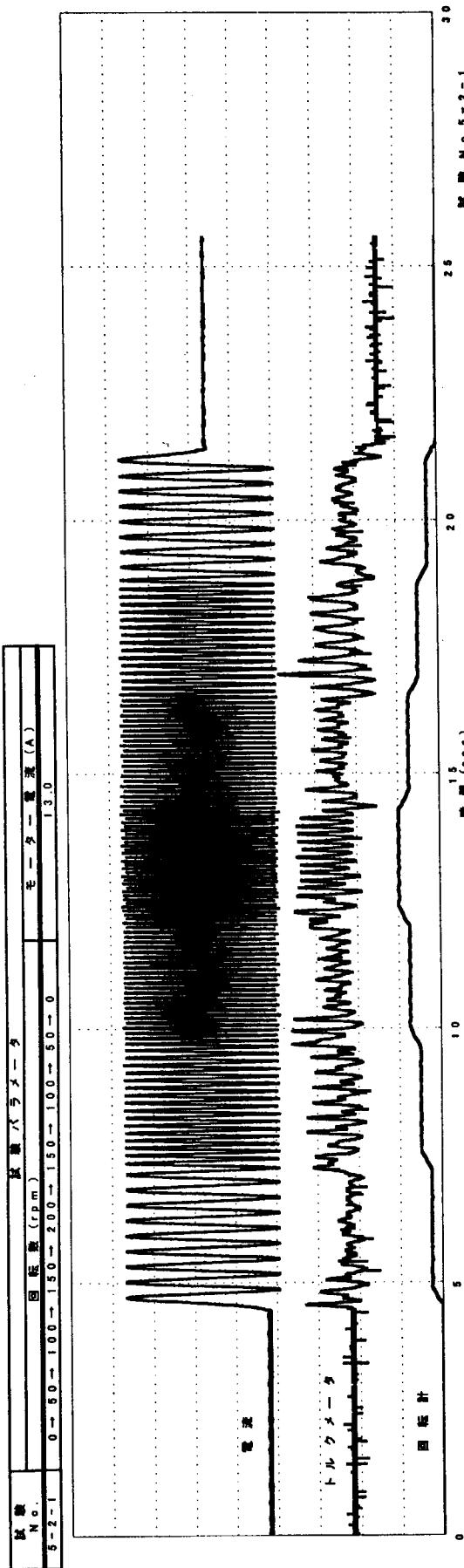


図 2.5-8 (3/8) 回転制御測定データ

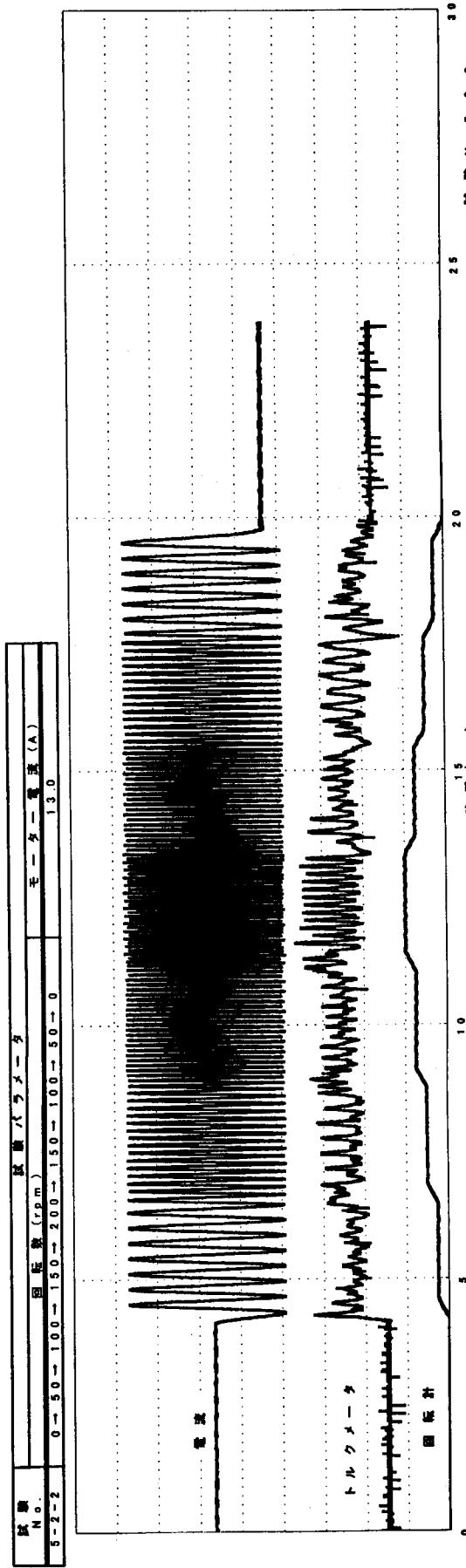


図 2.5-8 (4/8) 回転制御測定データ

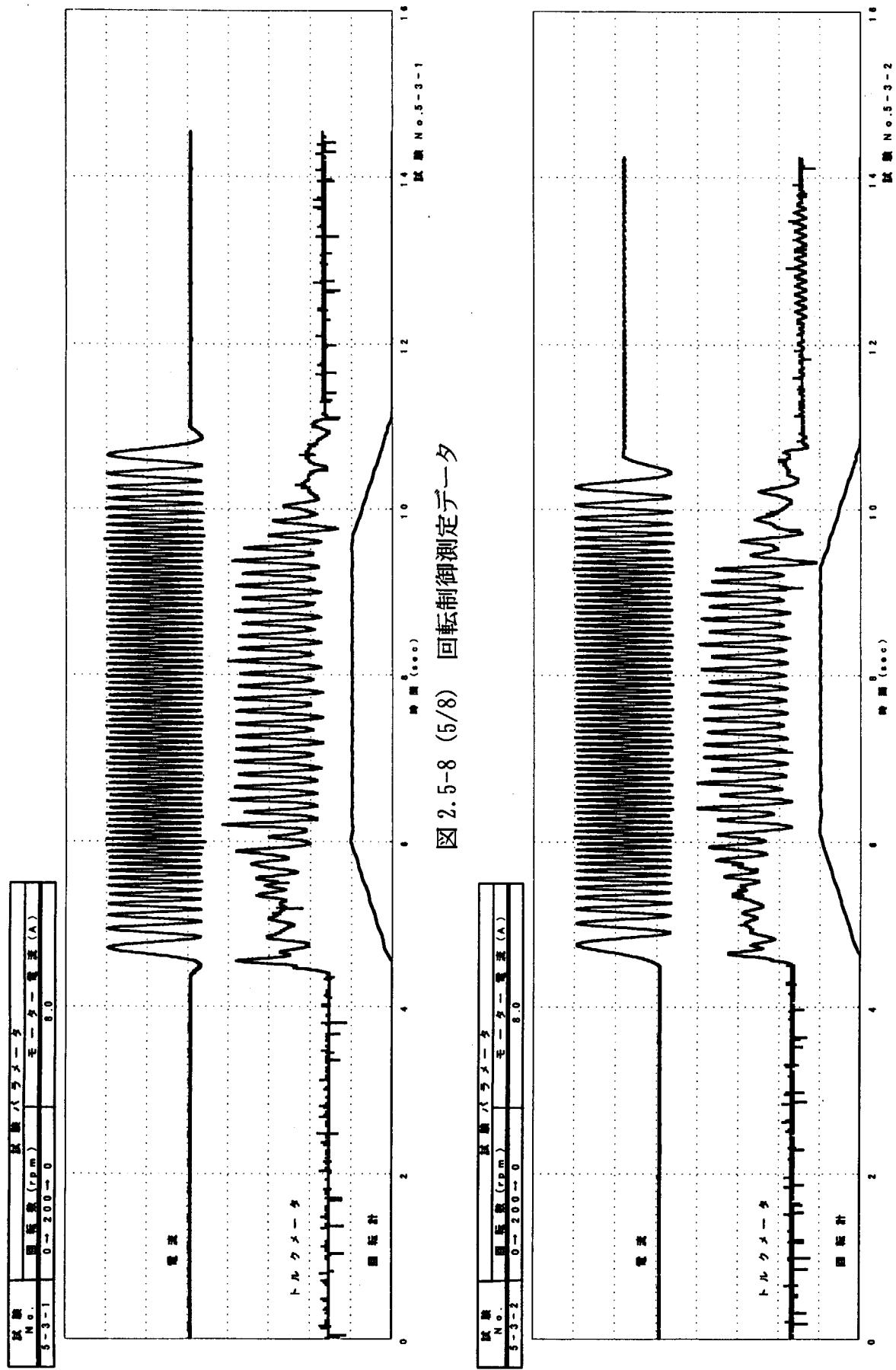


図 2.5-8 (5/8) 回転制御測定データ

図 2.5-8 (6/8) 回転制御測定データ

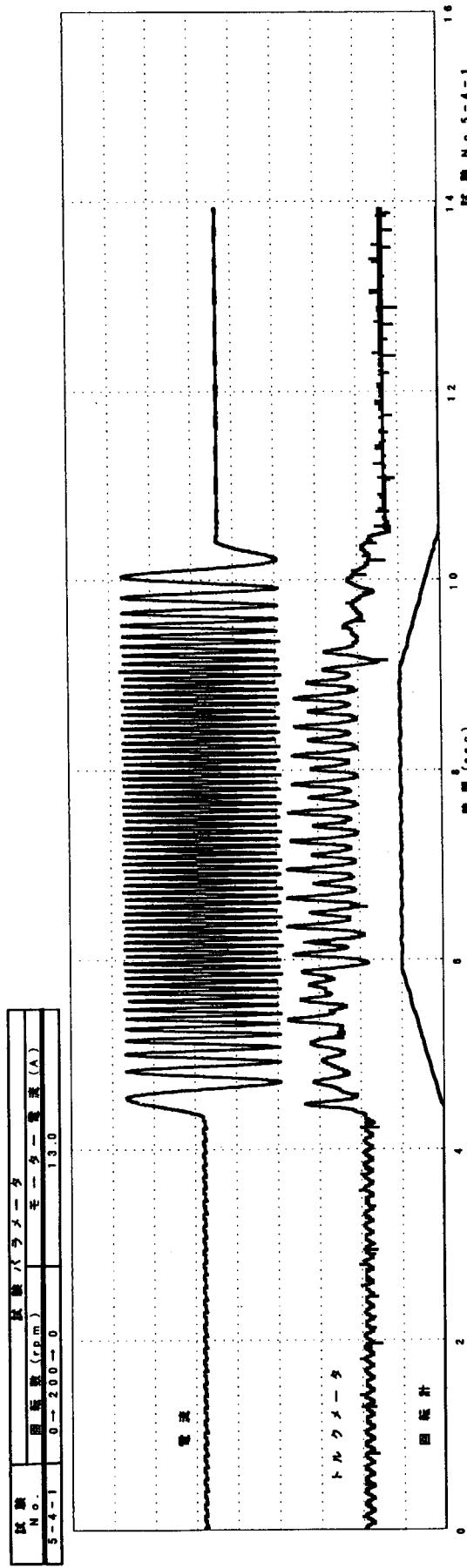


図 2.5-8 (7/8) 回転制御測定データ

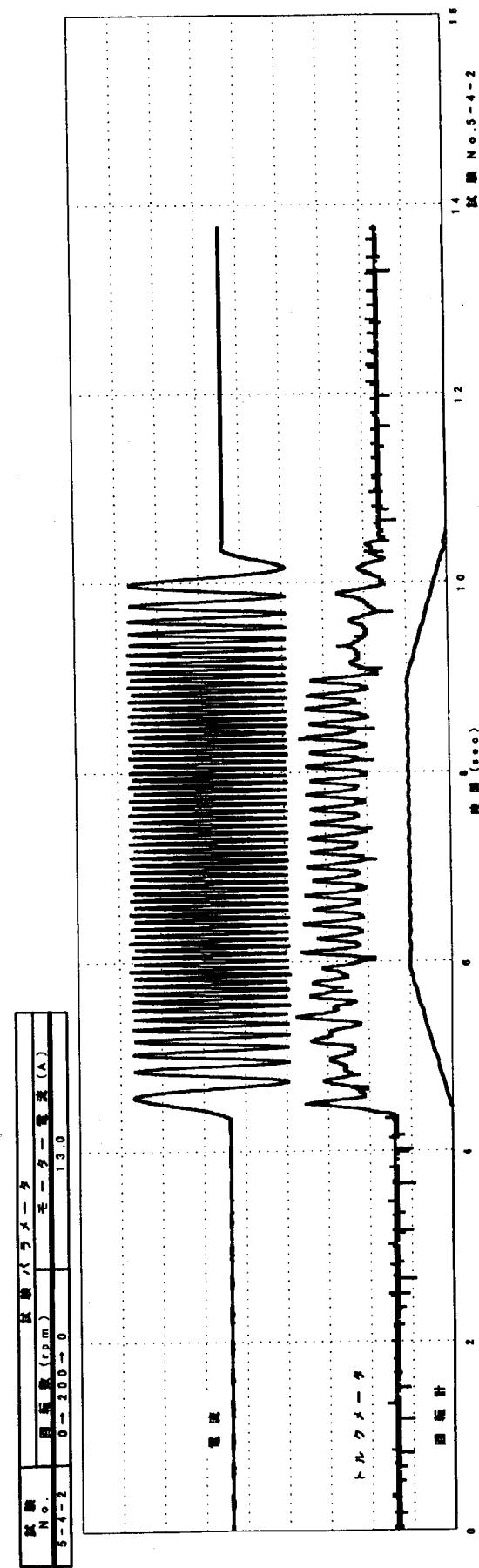


図 2.5-8 (8/8) 回転制御測定データ

2. 5. 6 温度上昇試験

1) 試験内容

室温大気中における定格連続運転でのモーター表面温度の上昇特性を把握する。

供試体モーターを最大使用電流(13A)で最高回転数(200rpm)で連続運転(12分間)し、供試体モーターステーター表面及びステーターコイル表面温度を計測した。なお、負荷系はパウダーブレーキの温度上昇による不具合を避けるため、無負荷状態とした。

2) 試験要領

- ・供試体モーターに繋がる上部ローター軸(出力軸ブーリ)と負荷調整ユニット側の回転軸(Vベルトブーリ)間の連結を外した。
- ・供試体モータの電源回路をモーター制御盤に結線した。
- ・モーター制御盤側により、供試体モーターを所定の駆動電流、回転数で連続運転し、供試体モーターステーター表面温度を計測した。
- ・ステーター表面温度計測点は外筒中央部周方向4箇所(0° 、 90° 、 180° 、 270°)、コイル表面温度は上下の外筒貫通孔($\Phi 20\text{mm}$)で周方向2箇所(45° 、 225°)の計8点とした。
- ・試験時間は連続12分とした。

(フルストローク駆動時間 $1400/6/200\text{rpm} \times 10\text{倍} = 12\text{min}$)

3) 試験パラメータ

- ・供試体モーター電流 : 8、13A

4) 試験結果

表2.5-6に温度上昇試験結果一覧表を示す。また、図2.5-9に温度上昇測定データを示す。

また、写真2.5-1にはステーター表面温度計測中の熱電対の取付状況を示す。

5) 考察

12分間連続運転による温度上昇は、最高使用電流13Aの場合、ステーター表面で約10°C程度、コイル表面で約25°C程度であり、使用上問題ないと考えられる。また、通常の駆動電流8Aでの運転では、さらに温度上昇は低く、ステーター表面で約6°C程度、コイル表面で約13°C程度である。

コイル表面温度はモーター停止後急速に低下し、7~8分後にはステーター温度とほぼ同等の温度となる。ステーター外筒に開けた貫通孔により、コイル内部に熱がこもることなく放熱されるためと考えられる。

表 2.5-6 溫度上昇試験結果一覧表
(試験実施日: H14. 9. 11)

試験 No.	モーター 電流 (A)	室温 (℃)	測定 点	ステーター表面温度 (℃)		測定 点	コイル温度 (℃)	
				開始時	終了時		開始時	終了時
6-1-1	13.0	25.8	25.8	①	25.9	35.5	9.6	⑤
				②	25.6	36.4	10.8	⑥
				③	26.1	37.1	11.0	⑦
				④	25.5	35.9	10.4	⑧
				平均	-	10.5	平均	-
6-1-2	13.0	24.5	24.5	①	30.2	39.0	8.8	⑤
				②	29.4	39.3	9.9	⑥
				③	30.3	40.2	9.9	⑦
				④	29.6	39.0	9.4	⑧
				平均	-	9.5	平均	-
6-2-1	8.0	24.0	24.0	①	30.1	35.6	5.5	⑤
				②	29.1	34.9	5.8	⑥
				③	29.8	36.1	6.3	⑦
				④	29.2	35.5	6.3	⑧
				平均	-	6.0	平均	-
6-2-2	8.0	23.5	23.5	①	29.7	35.3	5.6	⑤
				②	28.7	34.8	6.1	⑥
				③	29.4	35.9	6.5	⑦
				④	29.4	35.6	6.2	⑧
				平均	-	6.1	平均	-

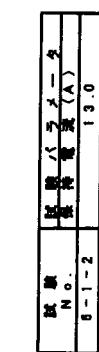
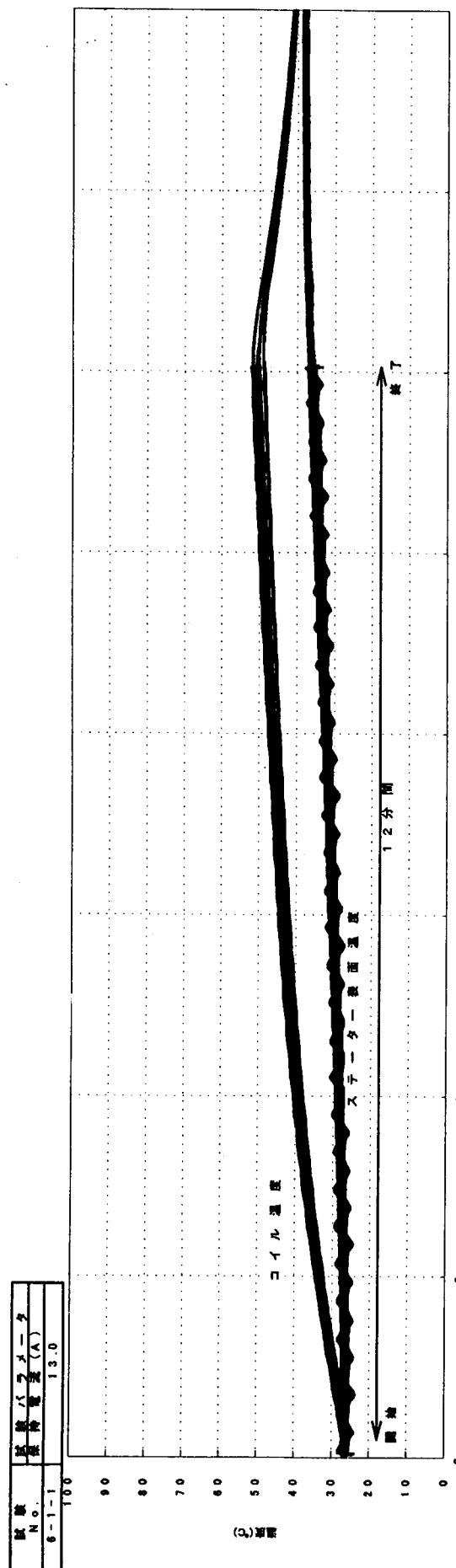


図 2.5-9 (1/4) 温度上昇測定データ

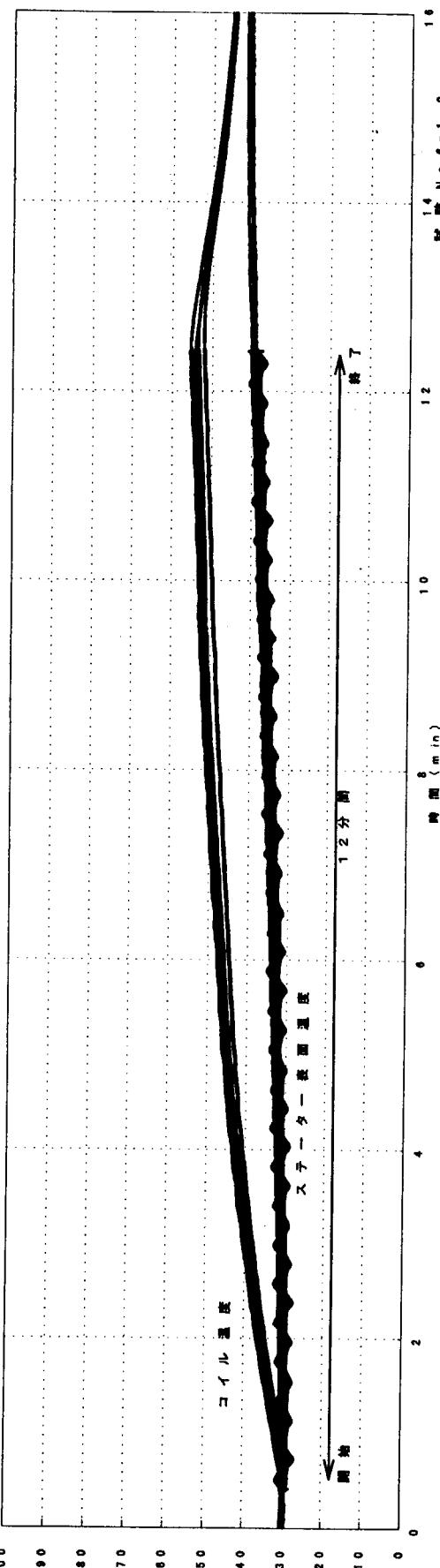
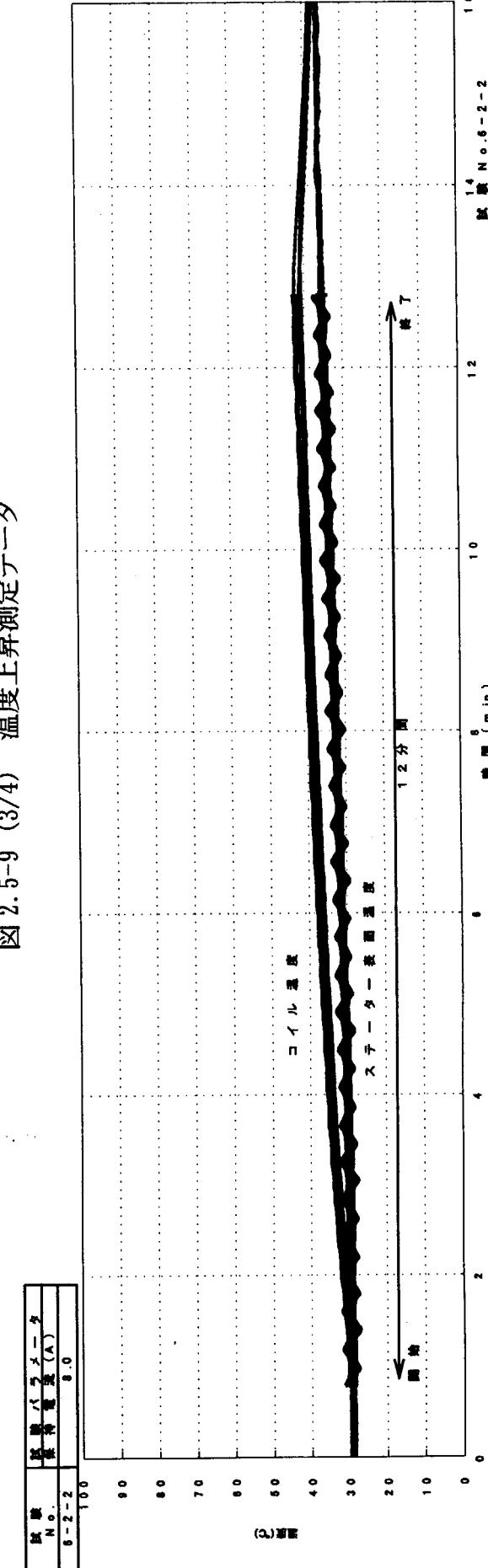
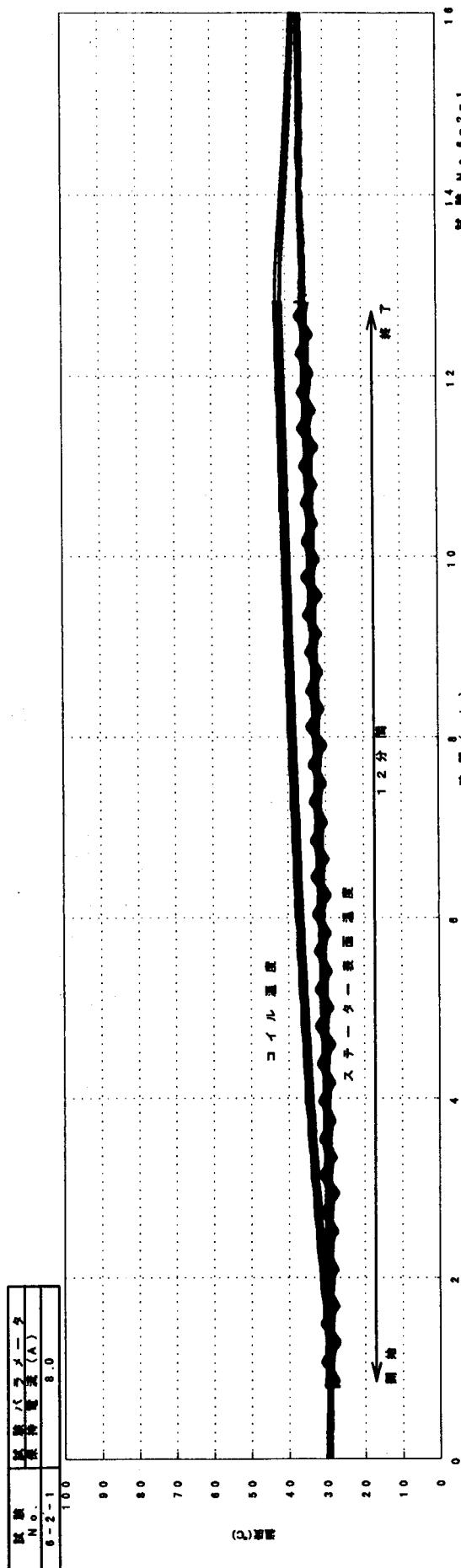


図 2.5-9 (2/4) 温度上昇測定データ



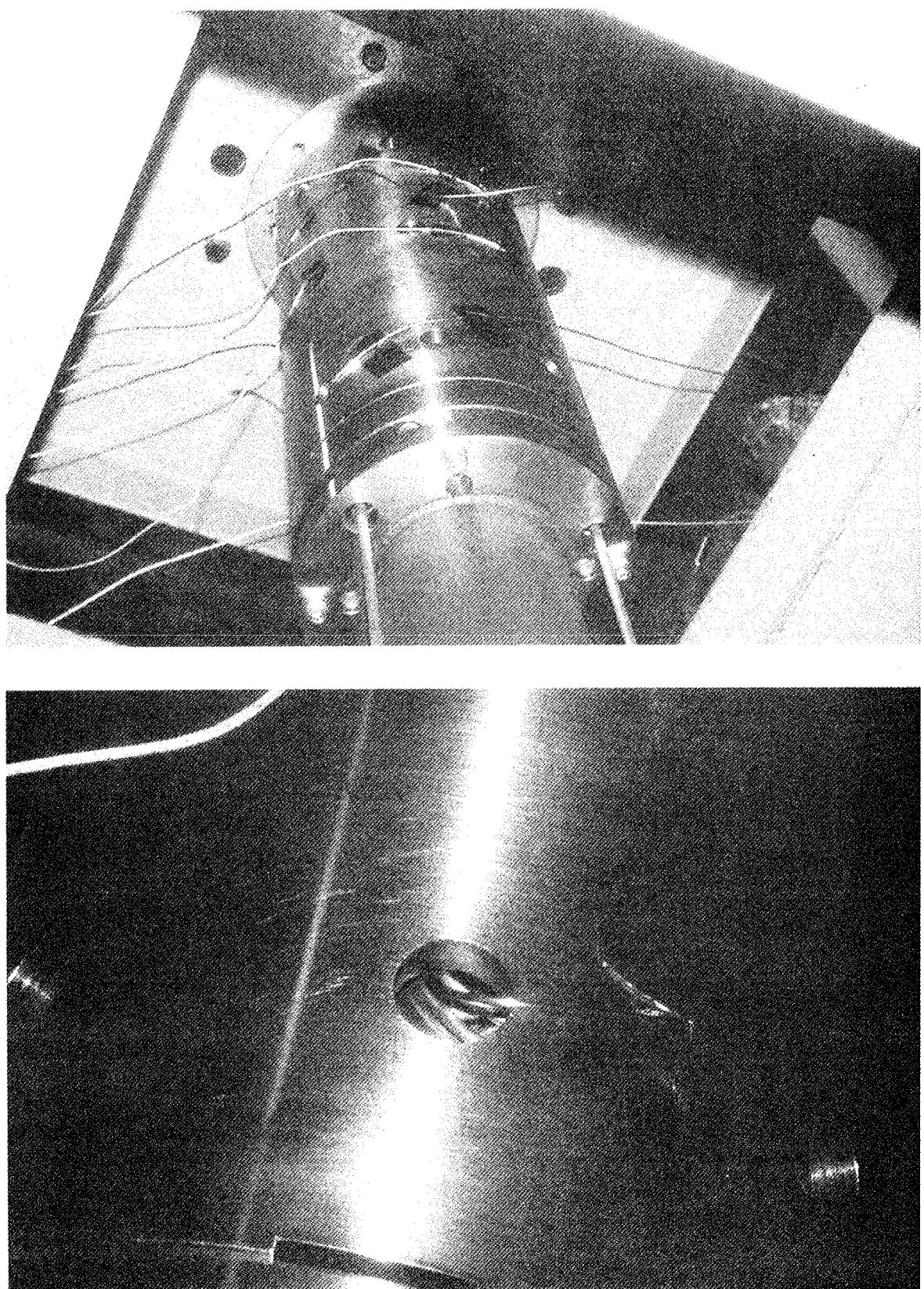


写真 2.5-1 溫度上昇試験（熱電対取付状況）

2. 6 高温蒸気中の駆動モーター特性評価

今回製作した革新的小型炉用電気駆動モーターは、高温高圧蒸気中が使用環境であり、平成8年度製作の船用炉用電気駆動モーターの高温高圧水中環境と異なる。そこで高温蒸気中におけるモーターの特性評価を行ない、革新的小型炉用電気駆動モータとしての成立性を検討した。

2. 6. 1 設計仕様

今回製作した革新的小型炉用モーターと船用炉用モーターの設計仕様からその相違点をまとめて表 2.6-1 に示す。

2. 6. 2 特性評価

革新的小型炉用モーターの設計仕様において、そのモーター特性に影響を与える以下の項目について評価した。

1) 無機絶縁ケーブルの冷却特性

船用炉用水中仕様 (320°C) における無機絶縁ケーブルの健全性検討において、無機絶縁ケーブル内の温度差及び無機絶縁ケーブルの表面温度による熱応力評価を実施し、何れも安全であることを確認している。革新的小型炉用蒸気中仕様 (310°C) における無機絶縁ケーブルは、以下の理由から船用炉用よりもさらに除熱性が良好であり、熱応力の点では安全であると考えられる。

- ・ケーブル導体径を 1.4mm から 1.6mm に太径化し、発熱量を抑える改良設計となっていること。
- ・耐圧密封キャン構造の空隙中で使用される船用炉用ステーターのケーブルに対し、310°C 蒸気流により直接冷却（除熱）される改良設計となっていること。

さらに、無機絶縁ケーブルの高温蒸気中での温度上昇に対する評価（添付資料 1）を実施し、無機絶縁ケーブルの表面温度を算出した。本計算では、蒸気雰囲気中で駆動コイルに最大電流 13A を通電した場合でも無機絶縁ケーブルの表面温度は 360°C 程度であり、使用にあたって特に問題の無いことを確認した。

2) 無機絶縁ケーブルの耐食性

船用炉用ステーターは完全水封耐圧型でコイルはキャンニングされたため、炉心冷却水（軽水）に直接浸漬することなく、耐食性の問題はない。

革新的小型炉用ステーターは非密封型でコイル直接冷却型としたため、コイルケーブルは炉内高温蒸気に晒される。これまで電気駆動モーター用無機絶縁ケーブルとして、原子炉内蒸気中での使用実績はなく、今後、その耐食性を実証することが課題として挙げられる。

電気モーターのステーターコイルとしてインコネルシースの無機絶縁ケーブルの原子炉内での使用例はないが、同様の製作過程、構造のヒータでは、各種環境下での使用例と実績がある。

インコネルシースの健全性が維持されることにより、ケーブルの絶縁性も維持され、その

電気的性能が維持される。

次のステップとしては、実炉内での実証データの取得、蓄積を得ることが必要と考えられる。

3)ステーター、ローターの構造強度

船用炉用水中仕様におけるステーター及びローターは完全水封耐圧型とし、インコネル625材のキャンニング構造である。これに対し、革新的小型炉用ステーターは、ステーター外筒に導圧孔となる冷却孔を設けた非密封型コイル直接冷却型である。

船用炉用モーターのステーターはインコネル材を使用しても、キャン単体でその設計圧力(12MPa)に耐える構造強度を確保できず、内部構成部材のバックアップスリーブ及びコアによりサポートする構造とした。また、キャンとバックアップスリーブ、キャンとコアとの隙間にかかる圧力の影響も無視できず、構造設計上工夫が必要であった。

革新的小型炉用ステーターは非密封型としたため、耐圧上の強度は全く不要となり、ステーター構成材にステンレス鋼(SUS316)を使用するため、コスト上もメリットを生んだ。ステーター外筒、内筒は耐圧強度上は不要な部材であるが、内側ローターとの機械的取合いや内筒部の磁束密度損失の影響、ステーターコイル保護等を考慮し、船用炉用ステーター寸法により製作した。

一方、ローターの耐圧構造については、船用炉用ローター構造と基本的には変更しておらず、また、使用圧力が12MPaから9.9MPa、温度が320°Cから310°Cへと下がっているため、安全は確保できると判断される。

4)電磁特性

高温における電磁特性変化については、320°C仕様の船用炉用モーター設計で検討され、高温水中試験において確認されている。その結果、高温水中での電磁特性は室温に比べて5%程度低下することが確認されている。今回は、使用環境が蒸気中雰囲気であるが、製作した革新的小型炉用モーターの耐用年数が40年と長期であり、永久磁石の高温経時劣化等、電磁特性に影響を及ぼす要因は存在するが、モーター出力(出力軸トルク)にも大きな余裕があり、その電磁特性は使用期間中維持できるものと判断される。

表 2.6-1 船用炉用モーターと革新的小型炉用モーターの設計仕様比較

設計項目	船用炉用モーター(H8)	革新的小型炉用モーター(H14)
モーター形式	無機絶縁コイル耐圧型 8極サーボモーター	無機絶縁コイル非密封型 8極サーボモーター
使用雰囲気	高温高压水中	高温高压蒸気中
温度	320°C	310°C
圧力	12MPa	310°C飽和圧力(約9.9MPa)
熱過渡	30~320°C (50°C/hr)	30~3110°C (50°C/hr)
【ステーター】		
型式	無機絶縁ケーブルキャンニング型	無機絶縁ケーブル直接冷却型
ケーブル導体	1.4mm/Cu	1.6mm/Cu
絶縁材	MgO	MgO
シース材	インコネル600	インコネル600
鉄心	純鉄 (薄板積層 Al ₂ O ₃ 絶縁構造)	電磁ステンレス (薄板積層 Al ₂ O ₃ 絶縁構造)
【ローター】		
型式	永久磁石キャンニング型	不活性ガス封入型
マグネット	2-17系 SmCo (CR26S)	2-17系 SmCo (R26HS)
ヨーク材	電磁軟鉄	電磁軟鉄

3. 軸受材料特性試験

駆動モーターと同様、これまで改良型船用炉用に開発された高温・高圧水中で作動する内装型制御棒駆動装置の軸受について、革新的小型炉用に高温蒸気雰囲気中で使用できる材料を選定するため、軸受材料特性試験を実施した。

材料選定試験片は4組製作し、これまで使用した転がり摩耗試験装置を用い、高温水中及び高温蒸気中において転がり摩耗試験を実施の上、摩耗量等の測定を行い、材料選定を行った。試験条件は、310°Cの水中及び飽和蒸気中である。

3. 1 開発目標

革新的小型炉の設計条件から、軸受の開発目標値を以下のように定める。

- ・軸受の回転数=60万回転:

負荷追従運転(0.085*往復／日)、起動停止(年1回)、耐用年数(40年)

* :添付資料-2に算出根拠を示す。

①ストローク(往復)

負荷追従を0.085往復／1日と仮定すると40年寿命として、

$$0.085 \times 365 \times 40 = 1241 \text{ 往復}$$

起動停止(フルストローク)を1往復／1年と仮定すると40年寿命として、

$$1 \times 40 = 40 \text{ 往復}$$

合計で1281往復となる。(改良型船用炉は20年で2400往復である。)

②軸受の回転数

ボールねじのリードを6mmとすると1往復で、

$$1400 / 6 \times 2 = 467 \text{ 回転}$$

1281往復で、

$$467 \times 1281 = 598227 \text{ 回転}$$

従って、目標とする軸受の回転数は60万回転とする。(改良型船用炉は120万回転数)

- ・運転条件(熱供給炉、発電炉の一次系運転条件から定めた。ここでは条件の厳しい発電炉用とする。)

雰囲気=温度310°Cの飽和蒸気(圧力約10Mpaの飽和蒸気圧)

- ・荷重=1.8kN: 設計上の自重、ばね荷重から
- ・回転数=50rpm: 設計条件から
- ・ストローク=1400mm: 設計条件から
- ・耐用年数=40年: 設計条件から

3. 2 候補材料の選定

(1) 基本的な考え方

高温蒸気中での転がり摩耗に関するデータは非常に少なく、転がり摩耗特性を明らかにすることが工学的に重要である。

これまで改良船用炉用に開発した軸受の水中試験の結果から、軸受球のサーメット材、レースのステライト材が硬度維持、耐摩耗の観点から優れており、蒸気雰囲気中でも適用できる可能性が高いのでそのまま採用することとした。また、保持器にはグラファイト材 (ISO-63、カーボンの純度約100%、層状構造を有し柔らかい性質) を用いることにより、固体潤滑機能を満足することがこれまでの開発で明らかになっているので、蒸気雰囲気中ではさらに厳しい潤滑条件になると予想されるが、これに適応する材料として、このグラファイト材を基本材として候補材料を選定する。

上記の軸受開発目標の運転条件の下で試験するにあたり、蒸気中でのデータが少ないことから、蒸気中での固体潤滑特性把握のため、原研では本事業を実施する前に予備試験を試みた。それらの概略結果を添付資料-3「蒸気中転がり摩耗試験結果（温度効果）」と添付資料-4「250°C（蒸気中、水中）における予備試験結果」に示す。

(2) 蒸気中での転がり摩耗特性

苛酷な条件下に於ける本軸受の潤滑は、グラファイト材を媒質とする固体潤滑が支配的である。固体潤滑は、安定した薄膜が潤滑面上に形成された場合に良好に作用し、摩耗を少なくできる。良好な固体潤滑を得るために、媒質に要求される因子には以下のものが考えられる。

- ① 柔軟性
- ② 摺動性
- ③ 耐酸化性
- ④ 耐摩耗強度
- ⑤ 強度

グラファイト材の固体潤滑性能は、一般的に環境に大きく依存することが知られており、水分のある環境では良好な潤滑を示すが、水分のない状態あるいは高温では潤滑性能は期待できないと言われている（極端な場合、真空中では使用できない）。これは、水分の存在が固体潤滑性能の①、②の因子をプラス側に働かせる為と言える。

これを基に、添付資料-4「250°C（蒸気、水中）における予備試験結果」について、摩耗挙動を以下のように推察した。

100時間までは、両者に有意な差が見られなかつたが、それ以後に長時間経過すると、蒸気中では摩耗量が増大している。これは蒸気中の場合、以下の事象を経て摩耗量を増大させたと考えられる。

- ・ 軸受球と平板、及び軸受球と保持器、保持器と回転輪のそれぞれが摩耗し、このうち、軸受球、平板、回転輪の摩耗粉は、転動部に残留し、硬いため固体潤滑を阻害し、研磨剤の働きをし、摩耗を増大させた。

- ・ 軸受球と保持器の摺動性（潤滑性）が悪く、軸受球の表面粗さが大きくなり、その結果、軸受球が転動面を研削し摩耗が増大した。

すなわち、これらが相乗効果的に作用し、固体潤滑性能の劣化をもたらした結果、蒸気中での摩耗量増大（200時間）の結果をもたらしたと考えられる。一方、水中の場合は、水分の補給が切れることがなかったので良好な固体潤滑が維持でき、摩耗度合が時間に対して一定となっていたと考えられる。

(3) 高温蒸気中用（310°C）の保持器の候補材料

高温蒸気中で良好な固体潤滑を維持するためには、前記の媒質に要求される因子を考慮する必要がある。このうち、柔軟性と摺動性が高温蒸気中での固体潤滑に非常に大きく影響すると考え、これらの因子の影響を試験で調べるため、候補材として以下を用いることとした。

- ・ 試験片A、B：これまでの ISO グラファイト材で、蒸気中と水中での摩耗量の比較をするための基準試験片（ショア硬度 80）：東洋炭素製 ISO-63
- ・ 試験片C：柔軟性の影響を調べるため、硬度を大きく下げたグラファイト材（ショア硬度 55）：東洋炭素製 IG-43
- ・ 試験片D：球と保持器間の潤滑性（摺動性）の影響を調べるため、高温大気中無潤滑摺動材として使用されているグラファイトをニッケル合金で焼結した自己潤滑性複合材
：富士ダイス製 NF メタルメロン系 BGN5050

(4) 判定基準

改良船用炉開発時に試験片A、Bと同じ ISO-63 グラファイト材の保持器を用い、レースにはステライト、球にはサーメットの材質組合せで実機形状のペアリングによる 320°C 水中試験を実施し、120万回転まで使用できることを確認している。この 120 万回転をこの試験装置における試験時間に換算すると 280 時間となる。従って、試験片Aの 280 時間における摩耗量まで使用可能と判断できる。JAERI-Tech2001-40 の試験結果を添付資料-5 に示す。

3. 3 試験装置

これまで改良船用炉用の軸受の開発に使用してきた転がり摩耗試験装置を使用し、高温水中及び高温蒸気中転がり摩耗試験を実施する。試験装置の構造図を図 3.3-1 に、試験装置の設備仕様を表 3.3-1 に示す。

試験片はスラスト型で、上部の軌道溝を持つ回転輪と下部の平板試験片の間に保持器で等間隔に配置された試験球 6 個を挟む構造になっている。試験片形状を図 3.3-2 に示す。

尚、保持器形状は添付資料 - 3 の試験において、保持器が傾斜し回転輪と接触して摩耗が生じたため、添付資料 - 4 に示す予備試験と同様に、保持器のポケットを両面から交互に開け、上下各 3 個の球で保持器を挟み込む形とした。

表 3.3-1 転がり摩耗試験装置の設備仕様

項目	仕様
型式	小型圧力容器
最高使用温度	320°C
最高使用圧力	13MPa
回転数	50~300 rpm
最大試験荷重	590N

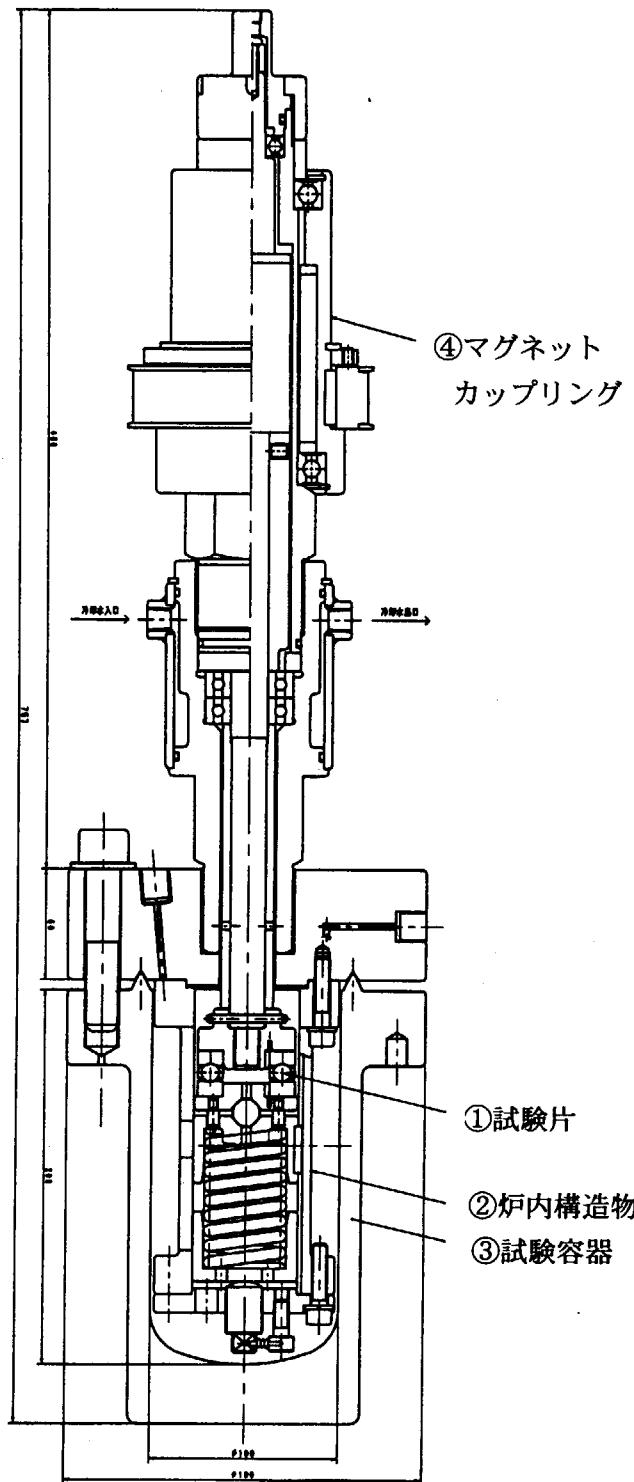


図 3.3-1 転がり摩耗試験装置

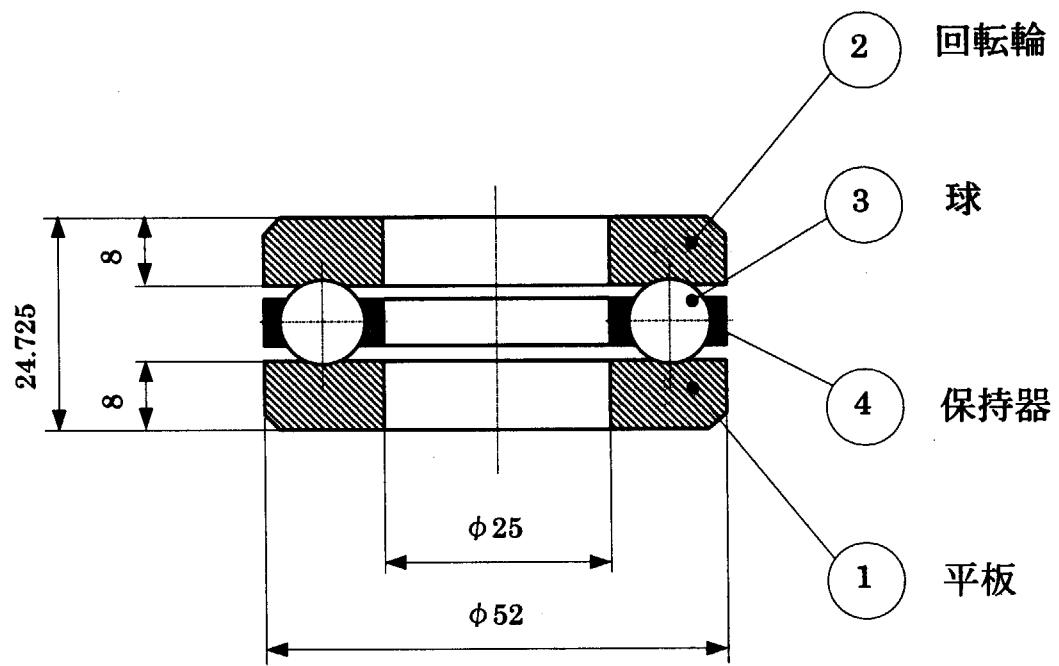


図 3.3-2 試験片

3. 4 試験条件

(1) 試験片材質

試験片の内、平板試験片、回転輪及び試験球は全ての試験片で同一であり、下記材質とした。

平板試験片 : SUS316 にステライト N0.1 盛金

回転輪 : 同 上

試験球 : サーメット

保持器の材質は、下記の 3 種類とした。保持器のポケット穴は交互に両面からあけた改良型を使用した。

試験片 A 及び B : グラファイト ISO-63 (ショアD硬さ 80)

試験片 C : グラファイト IG-43 (ショアD硬さ 55)

試験片 D : NF メタルメロン系 BGN5050 (ブリネル硬さ 12)

(2) 温 度 : 310°C

(3) 環 境 : 水中又は飽和水蒸気中

(4) 圧 力 :

蒸気中試験：飽和蒸気圧（約 10Mpa）

水中試験：加圧水（最大 12Mpa）

(5) 回転数 : 185rpm (実機 50rpm 相当周速)

(6) 荷 重 : 290N (実機の軸荷重 1.8kN + 横荷重 1.0kN 相当面圧)

(7) 試験時間 : 累積 200 時間 (100 時間 + 50 時間 + 50 時間) 又は 150 時間

実機 60 万回転を軸受球の通過回数を等価にする様に試験条件に換算すると、139 時間となる。従って、摩耗試験時間は 150 時間を目標とし、基準試験片（試験片 A、B）については 200 時間まで、試験片 C 及び試験片 D については 150 時間まで試験を実施するものとした。但し、試験片 C については、150 時間までの試験で試験片 B との差が生じなかつたため 200 時間まで継続して試験を実施した。

(8) 試験後検査

試験後検査は試験終了時の他に、試験開始後 100 時間及び 150 時間の時点で実施した。

検査項目は以下の通りである。

- ・ 外観検査 (150 時間の時点では顕微鏡による観察を行う。)
- ・ 寸法検査 (試験球の外形を測定し、外形の減少量を算出する。)
- ・ 重量検査 (試験片の摩耗量を算出する。)
- ・ 平板試験片の溝深さ
- ・ 平板試験片の溝の粗さ
- ・ 試験球の表面粗さ

3. 5 試験結果

3. 5. 1 試験片A（保持器：グラファイト／東洋炭素 ISO-63）310℃水中試験

(1)外観検査

100時間、150時間、200時間経過後の試験片の外観を写真3.5.1-1～3.5.1-3に示す。

(2)寸法検査

試験球外径寸法をマイクロメータで5点測定し、試験前外径からの減少量の最大値と最小値を表3.5.1-1に示す。

表3.5.1-1 試験球外径減少量

試験時間 (Hr)	試験球外径 (3/8": $\phi 9.525\text{mm}$) 減少量 [μm]		
100	0～-4	0～-4	0～-4
	-1～-3	-1～-3	-1～-3
150	-1～-4	-1～-5	-1～-5
	-1～-6	-1～-6	-1～-6
200	-1～-7	-1～-7	-1～-7
	-4～-7	-4～-7	-4～-7

(3)重量検査

100時間、150時間、200時間経過後の試験片の重量検査結果を表3.5.1-2に示す。

摩耗度合は、下式により算出した。

$$\text{摩耗度合} = (\text{試験前重量} - \text{試験後重量}) / \text{試験時間}$$

表3.5.1-2 重量検査結果

部位	試験前重量 [g]	100時間試験後		150時間試験後		200時間試験後	
		重量 [g] 摩耗度合 [mg/h]					
回転輪	102.93	102.84 0.90		102.72 1.40		102.60 1.65	
平板	105.72	105.58 1.40		105.46 1.73		105.32 2.00	
球 (6個合計)	16.48	16.47 0.10		16.46 0.13		16.45 0.15	
保持器	8.27	8.17 1.00		8.11 1.07		7.94 1.65	

(4) 表面粗さ検査

平板、球の表面粗さ検査結果を表 3.5.1-3 に示す。

表 3.5.1-3 表面粗さ (μm)

	試験前	100 時間	150 時間	200 時間
平板粗さ	0.0523	0.0261	0.1646	0.2037
球粗さ	0.0150	0.1482	0.2383	0.2469

(5) 真円度検査

試験時間 150 時間経過後の試験球真円度検査結果を表 3.5.1-4 に示す。球①②③は 3 個抜取検査したものである。

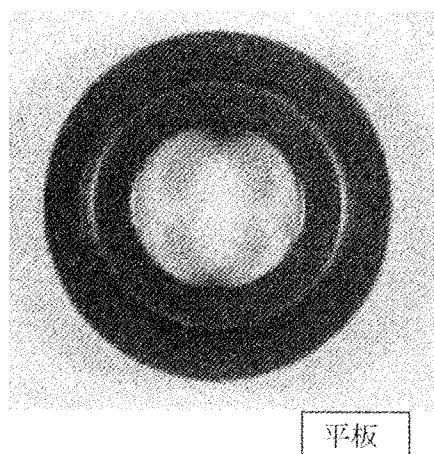
表 3.5.1-4 真円度検査結果

	球①	球②	球③
真円度 [μm]	4.51	3.23	3.06

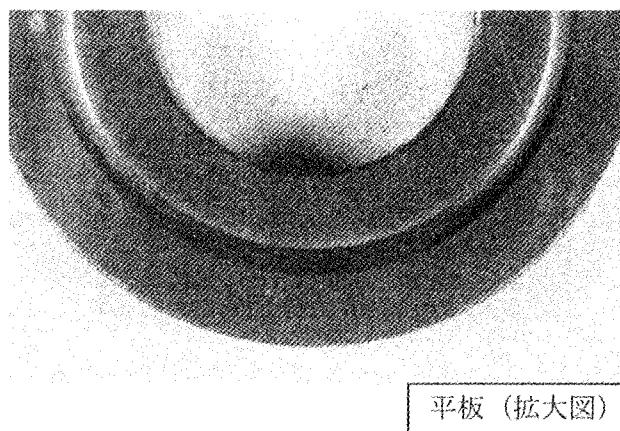
(注) 試験前、球の真円度は $0.17 \sim 0.23 \mu\text{m}$

(6) 顕微鏡による観察

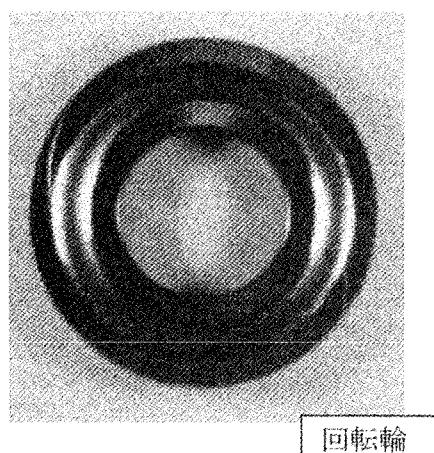
試験時間 150 時間経過後の平板試験片摩耗痕部の顕微鏡観察結果を写真 3.5.1-4～3.5.1-5 に示す。



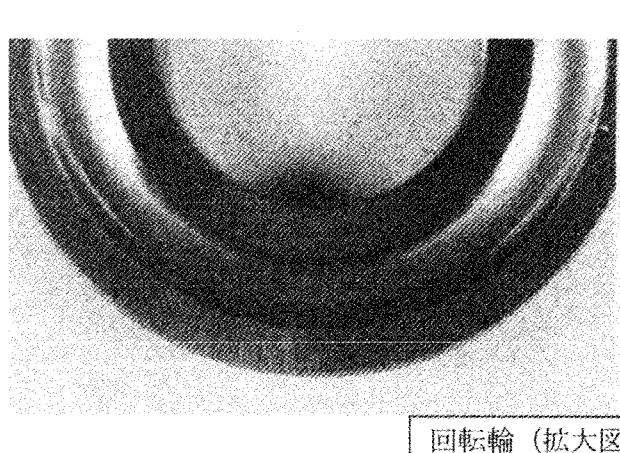
平板



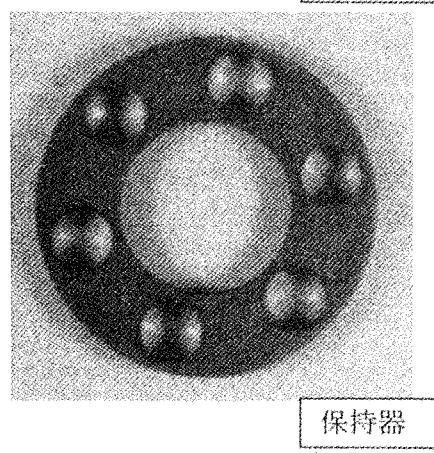
平板（拡大図）



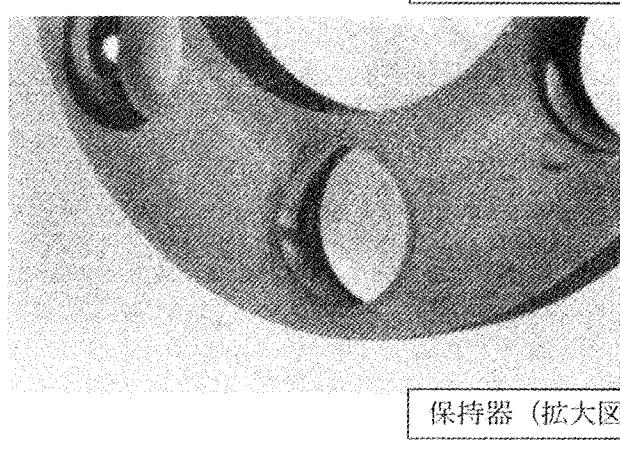
回転輪



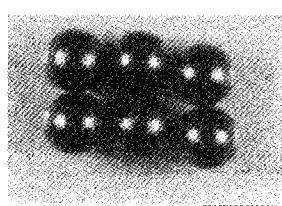
回転輪（拡大図）



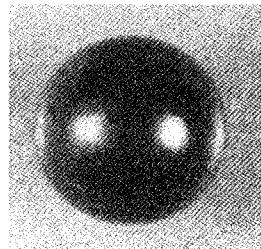
保持器



保持器（拡大図）



球



球（拡大図）

写真 3.5.1-1 試験片 A 外観写真 (100 時間)

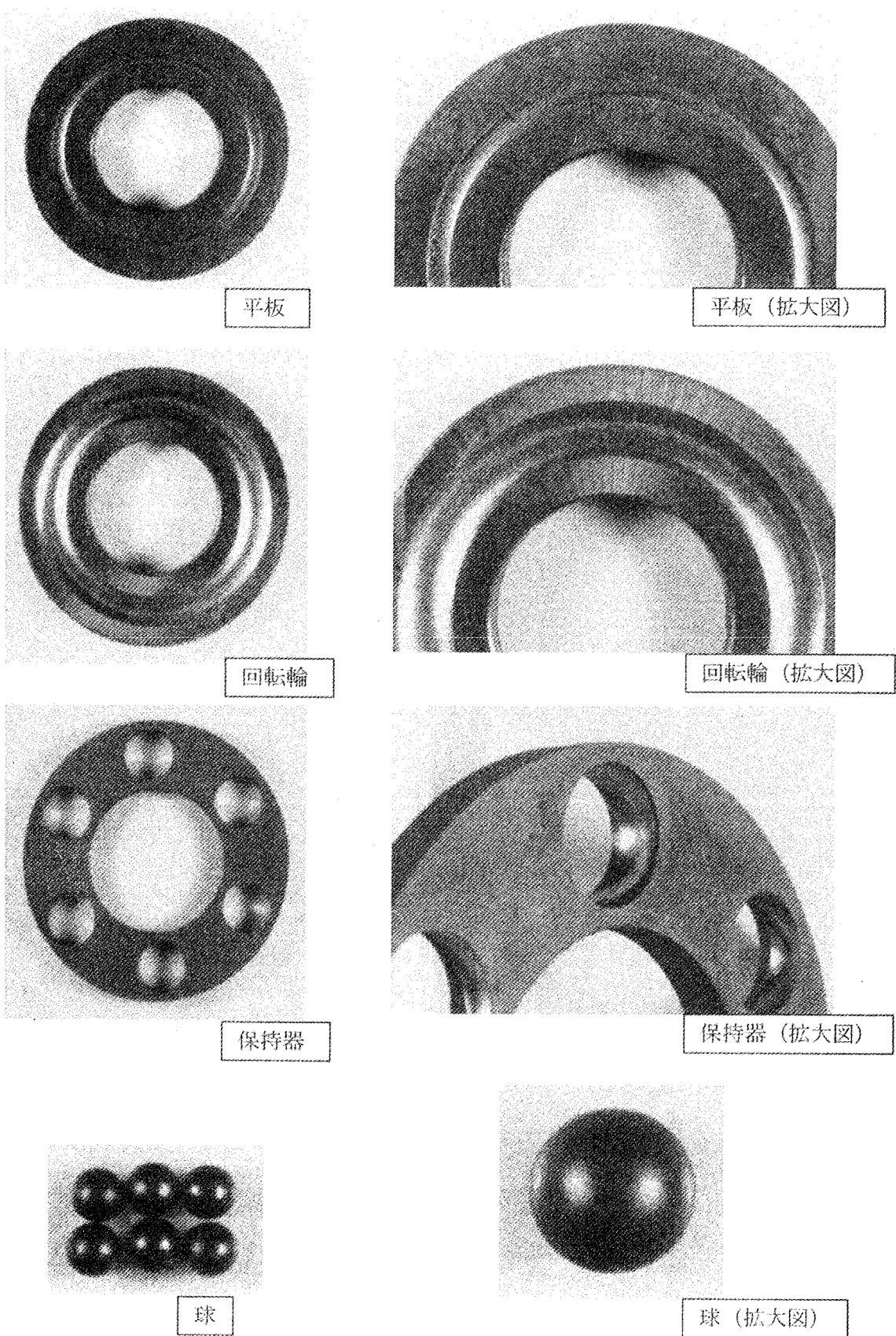
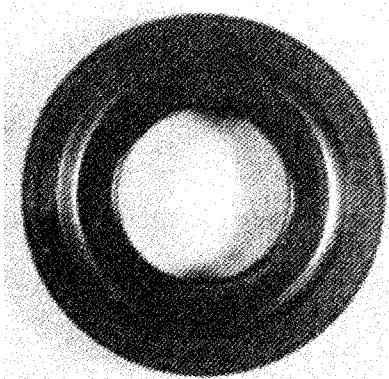
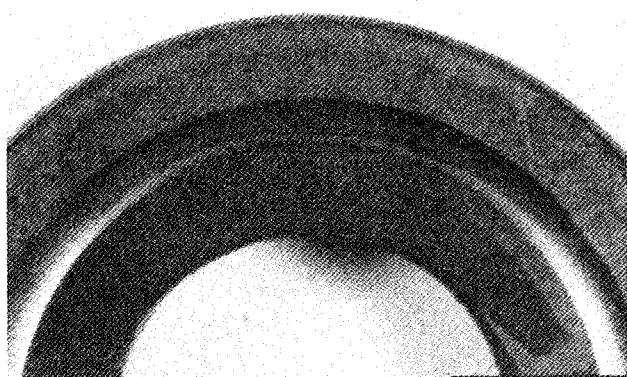


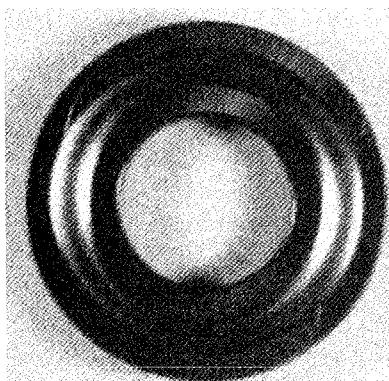
写真 3.5.1-2 試験片 A 外観写真 (150 時間)



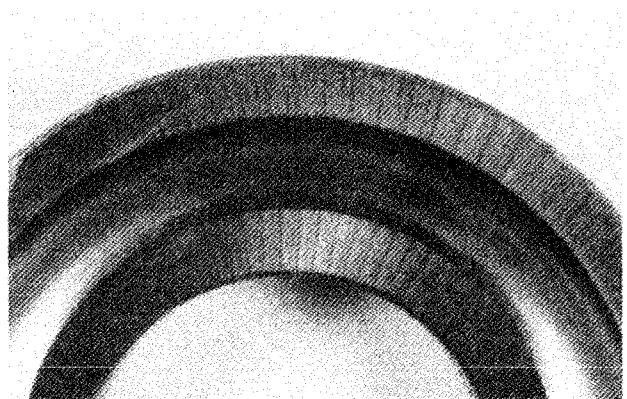
平板



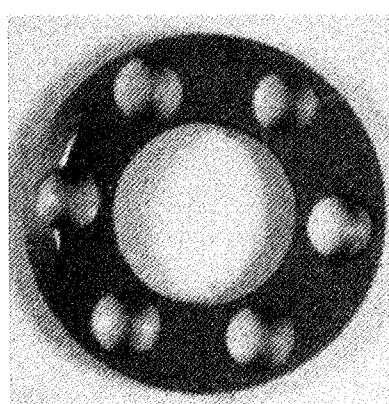
平板（拡大図）



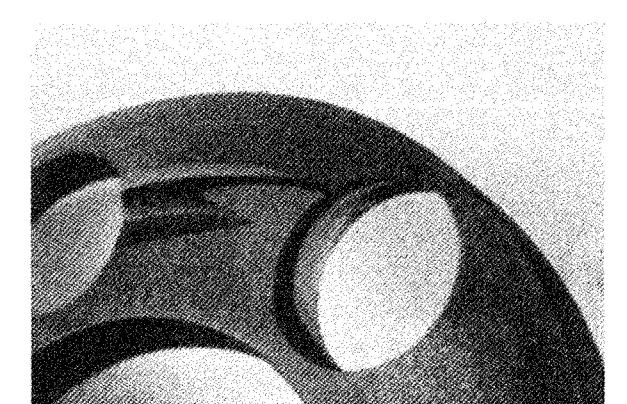
回転輪



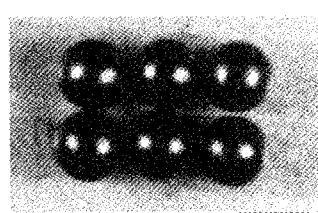
回転輪（拡大図）



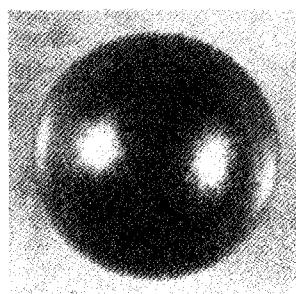
保持器



保持器（拡大図）



球



球（拡大図）

写真 3.5.1-3 試験片 A 外観写真 (200 時間)

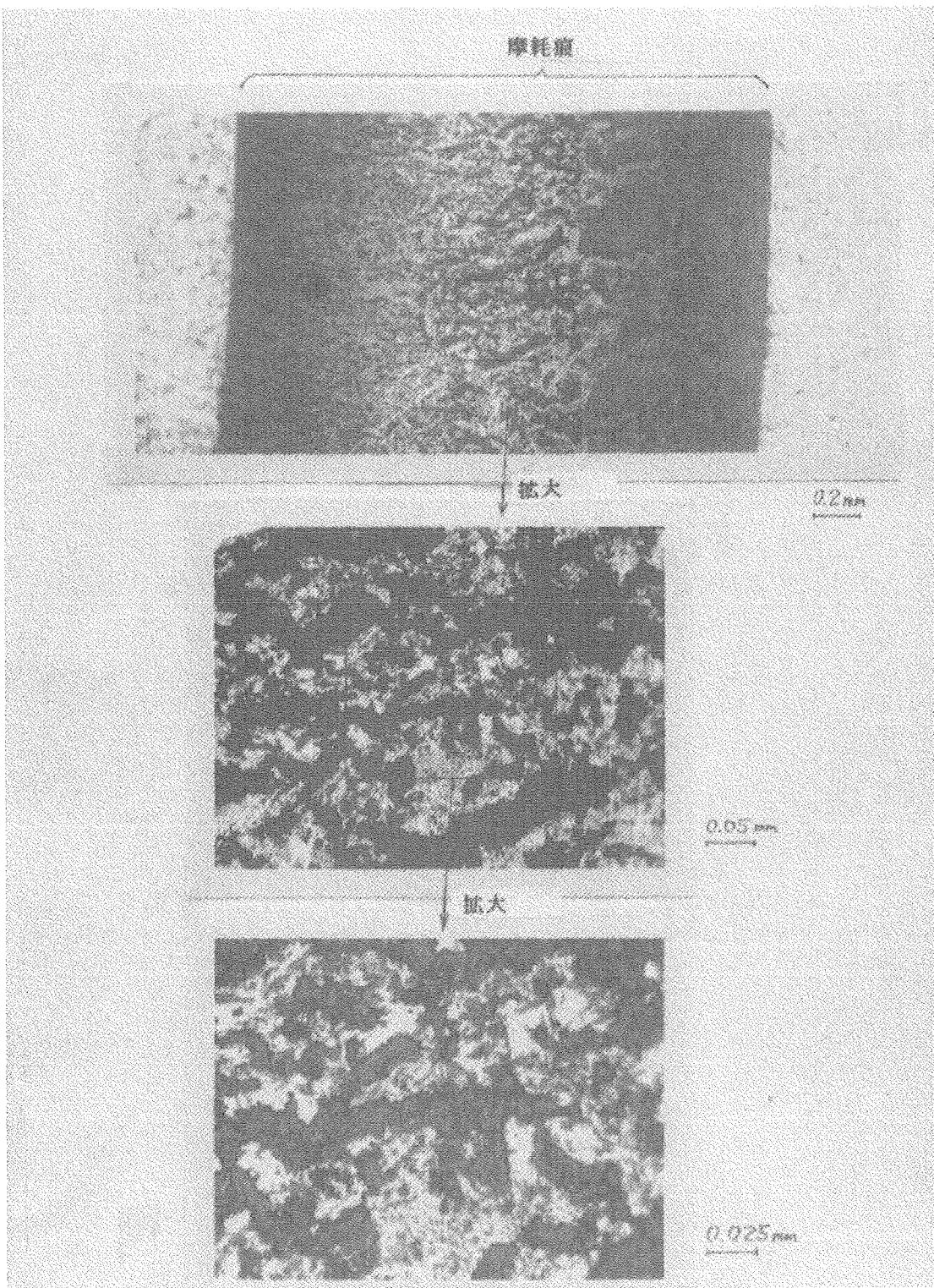


写真 3.5.1-4 顕微鏡による観察（平板摩耗痕：移着グラファイト拭き取り前）

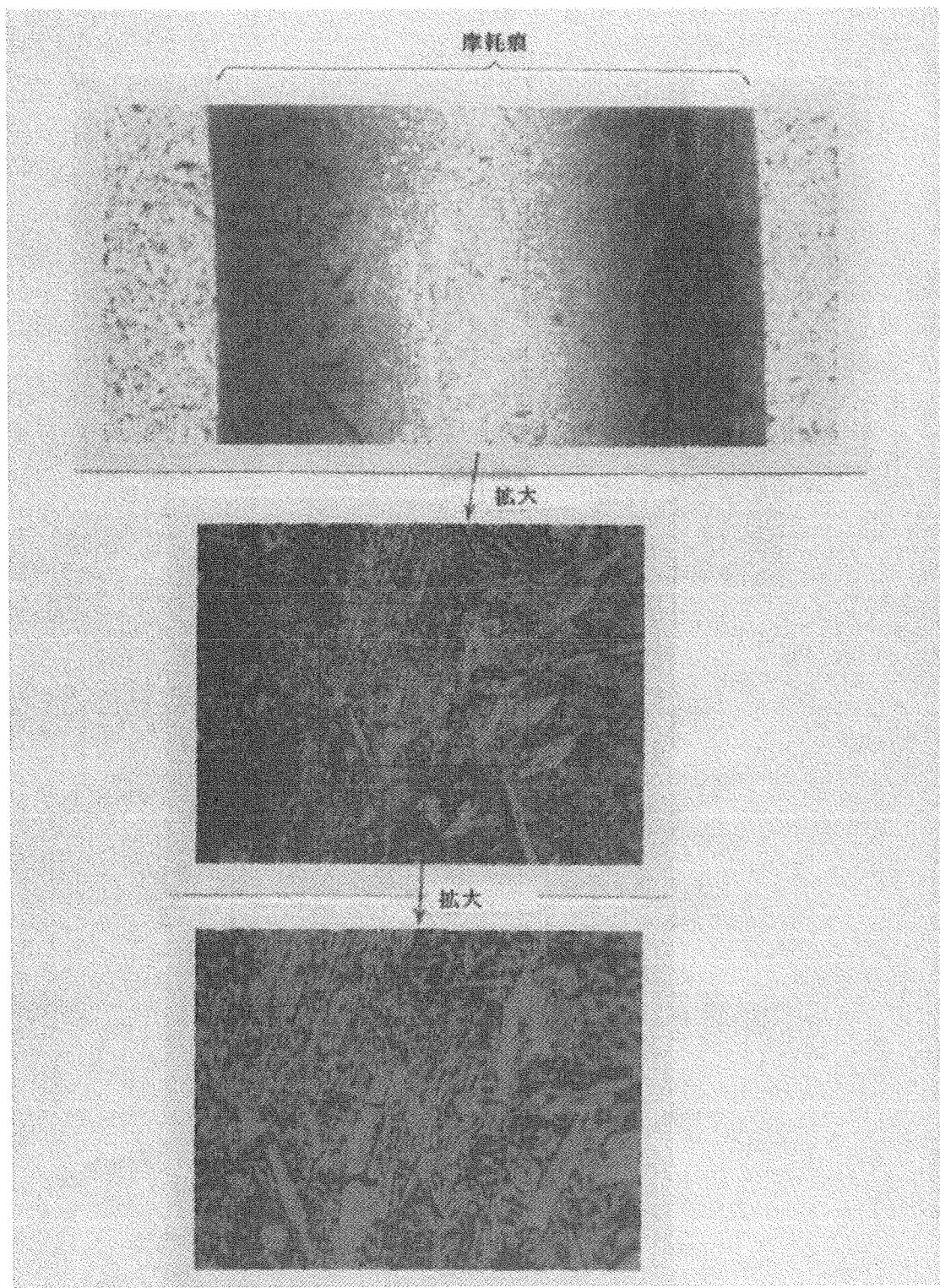


写真 3.5.1-5 顕微鏡による観察（平板摩耗痕：移着グラファイト拭き取り後）

3. 5. 2 試験片B（保持器：グラファイト／東洋炭素 ISO-63）310℃蒸気中試験

(1) 外観検査

100時間、150時間、200時間経過後の試験片の外観を写真3.5.2-1～3.5.2-3に示す。

(2) 寸法検査

試験球外径寸法をマイクロメータで5点測定し、試験前外径からの減少量の最大値と最小値を表2.5.2-1に示す。

表3.5.2-1 試験球外径減少量

試験時間 (Hr)	試験球外径(3/8": $\phi 9.525\text{mm}$) 減少量【 μm 】		
100	0	0	0
	0	0	0
150	0	0	0
	0	0	0
200	-1~-8	-1~-8	-1~-8
	-1~-8	-1~-8	-1~-8

(3) 重量検査

100時間、150時間、200時間経過後の試験片の重量検査結果を表3.5.2-2に示す。

摩耗度合は、下式により算出した。

$$\text{摩耗度合} = (\text{試験前重量} - \text{試験後重量}) / \text{試験時間}$$

表3.5.2-2 重量検査結果

部位	試験前重量 [g]	100時間試験後	150時間試験後	200時間試験後
		重量[g] 摩耗度合[mg/h]	重量[g] 摩耗度合[mg/h]	重量[g] 摩耗度合[mg/h]
回転輪	102.66	102.65 0.10	102.64 0.13	102.58 0.40
平板	105.87	105.86 0.10	105.84 0.20	105.62 1.25
球(6個合計)	16.48	16.48 0.00	16.48 0.00	16.46 0.10
保持器	8.32	8.31 0.10	8.29 0.20	8.21 0.55

(4) 表面粗さ検査

平板、球の表面粗さ検査結果を表 3.5.2-3 に示す。

表 3.5.2-3 表面粗さ (μm)

	試験前	100 時間	150 時間	200 時間
平板粗さ	0.0597	0.0848	0.0927	0.1336
球粗さ	0.0150	0.0348	0.0658	0.2684

(5) 真円度検査

試験時間 150 時間経過後の試験球真円度検査結果を表 3.5.2-4 に示す。球①②③は 3 個抜取検査したものである。

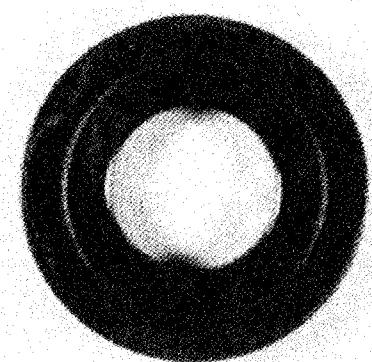
表 3.5.2-4 真円度試験結果

	球①	球②	球③
真円度 [μm]	0.71	0.73	0.93

(注) 試験前球の真円度は $0.17 \sim 0.23 \mu\text{m}$

(6) 顕微鏡による観察

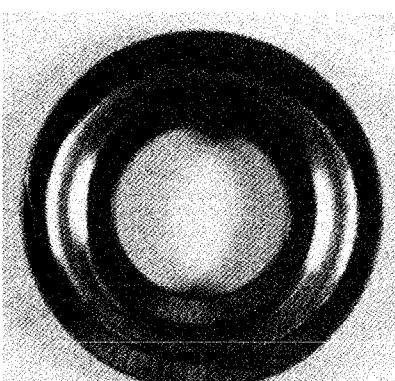
試験時間 150 時間経過後の平板試験片摩耗痕部の顕微鏡観察結果を写真 3.5.2-4～3.5.2-5 に示す。



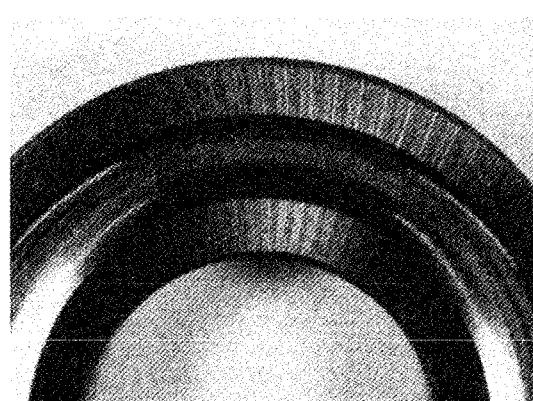
平板



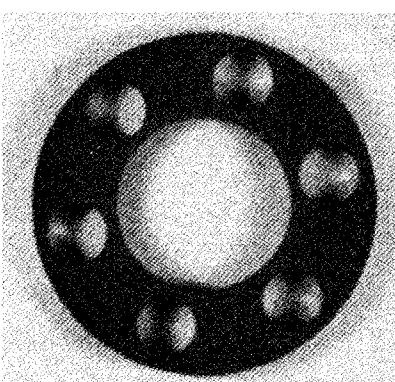
平板（拡大図）



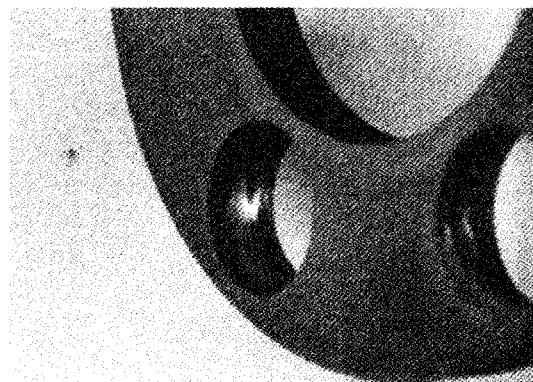
回転輪



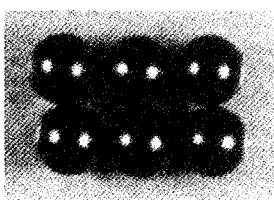
回転輪（拡大図）



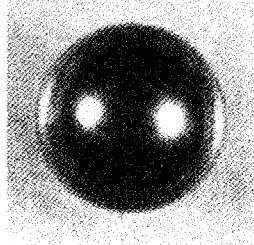
保持器



保持器（拡大図）

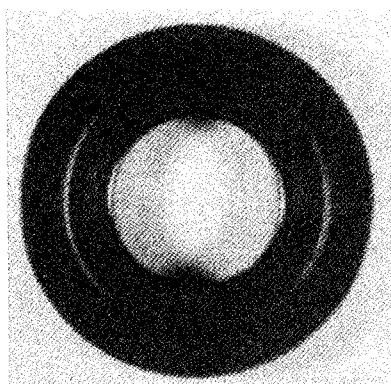


球

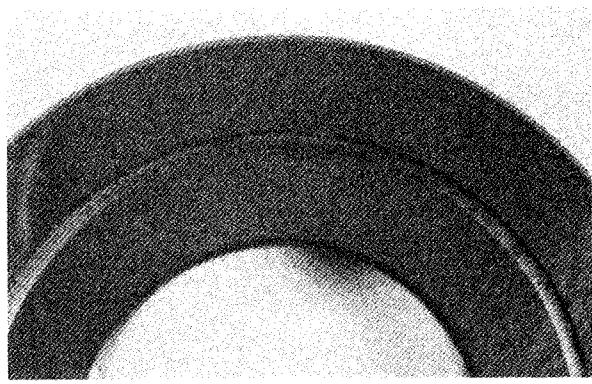


球（拡大図）

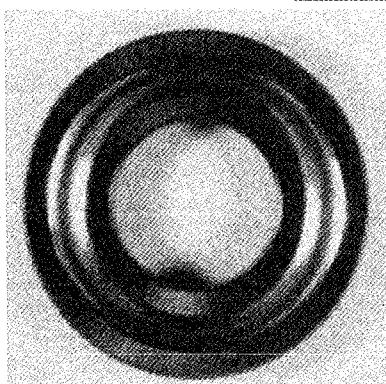
写真 3.5.2-1 試験片B外観写真（100時間）



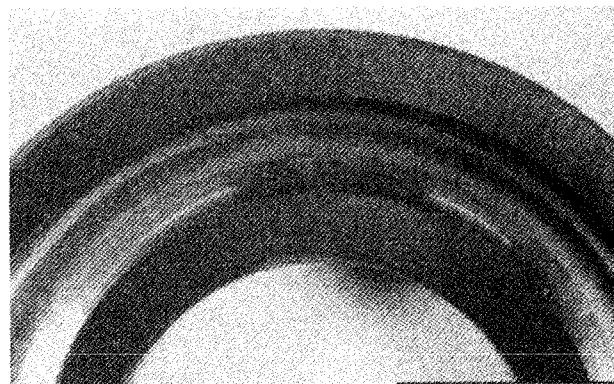
平板



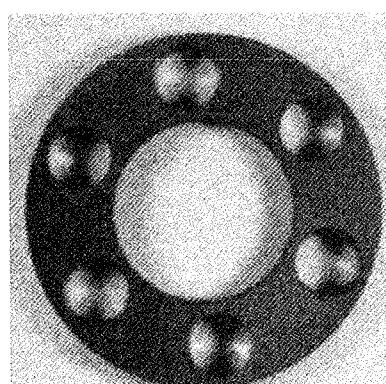
平板（拡大図）



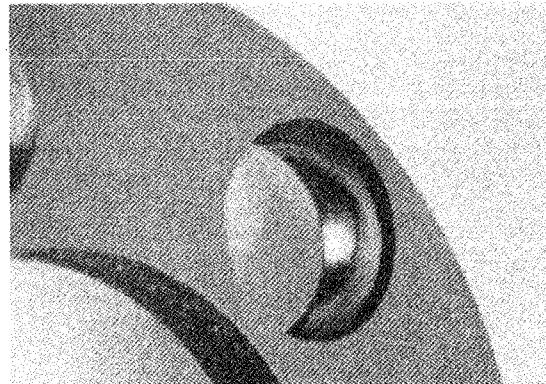
回転輪



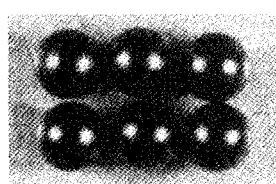
回転輪（拡大図）



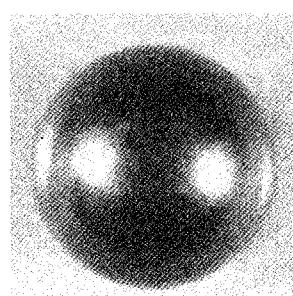
保持器



保持器（拡大図）



球



球（拡大図）

写真 3.5.2-2 試験片 B 外観写真 (150 時間)

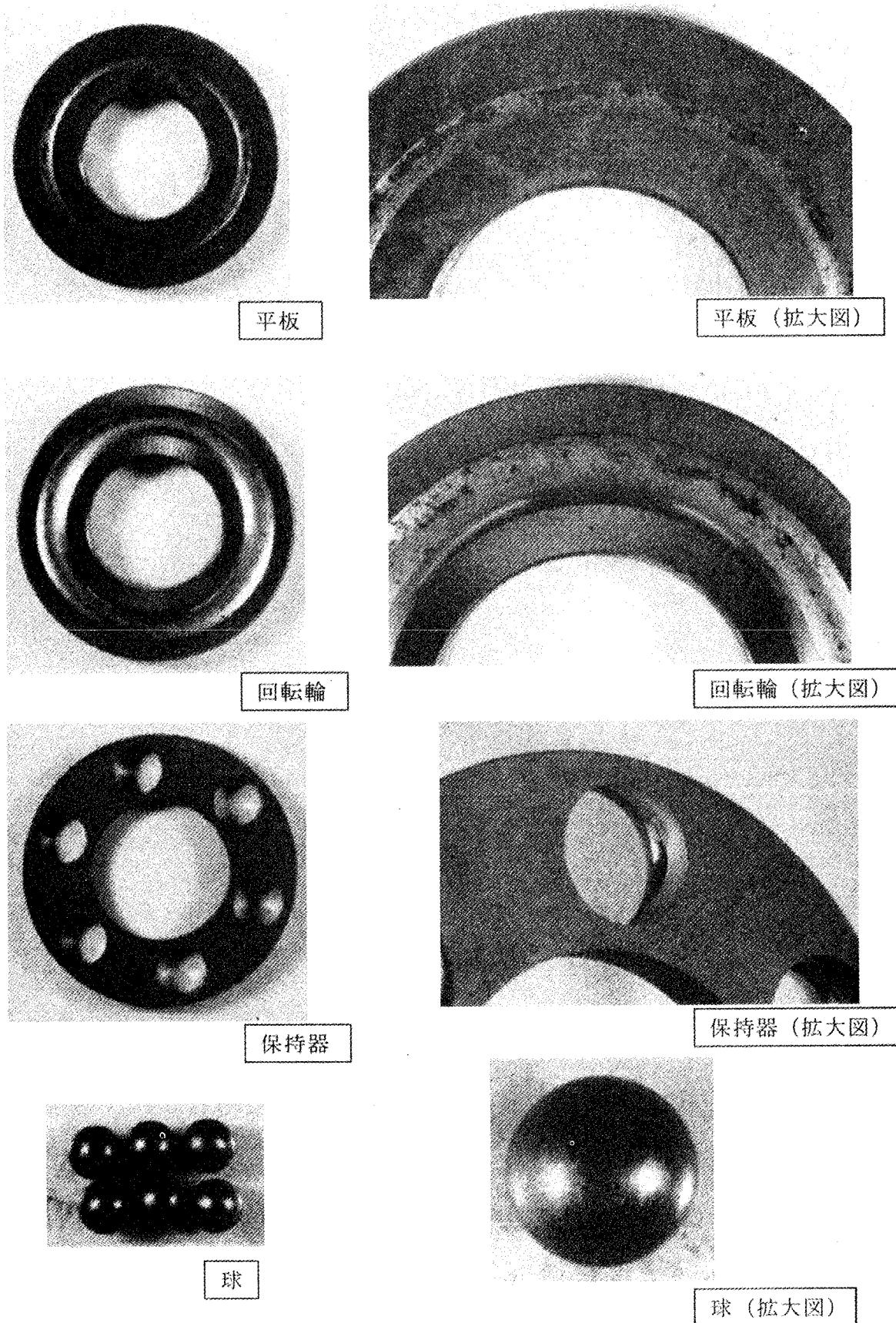


写真 3.5.2-3 試験片B 外観写真 (200 時間)

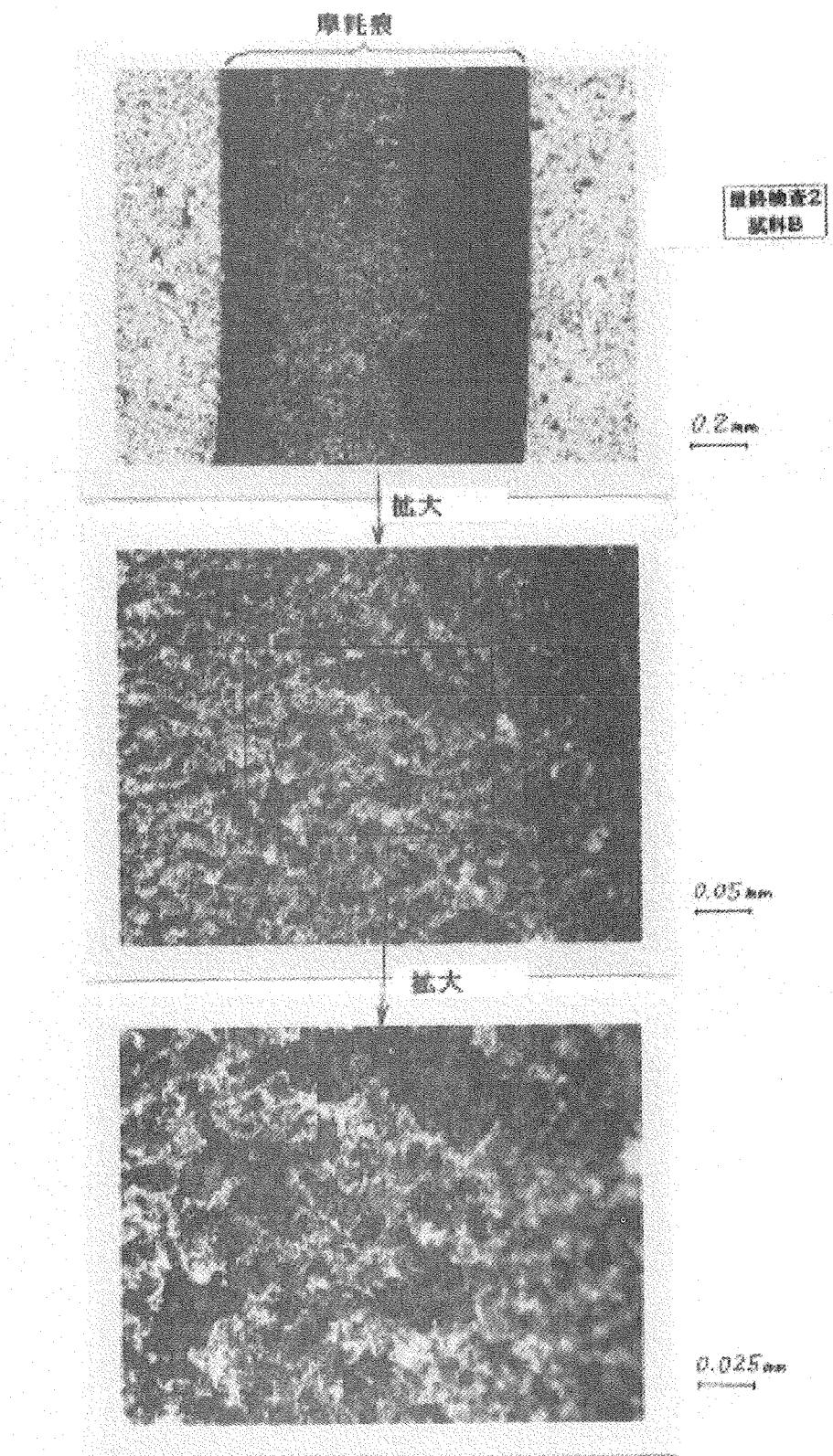


写真 3.5.2-4 頭微鏡による観察（平板摩耗痕：移着グラファイト拭き取り前）

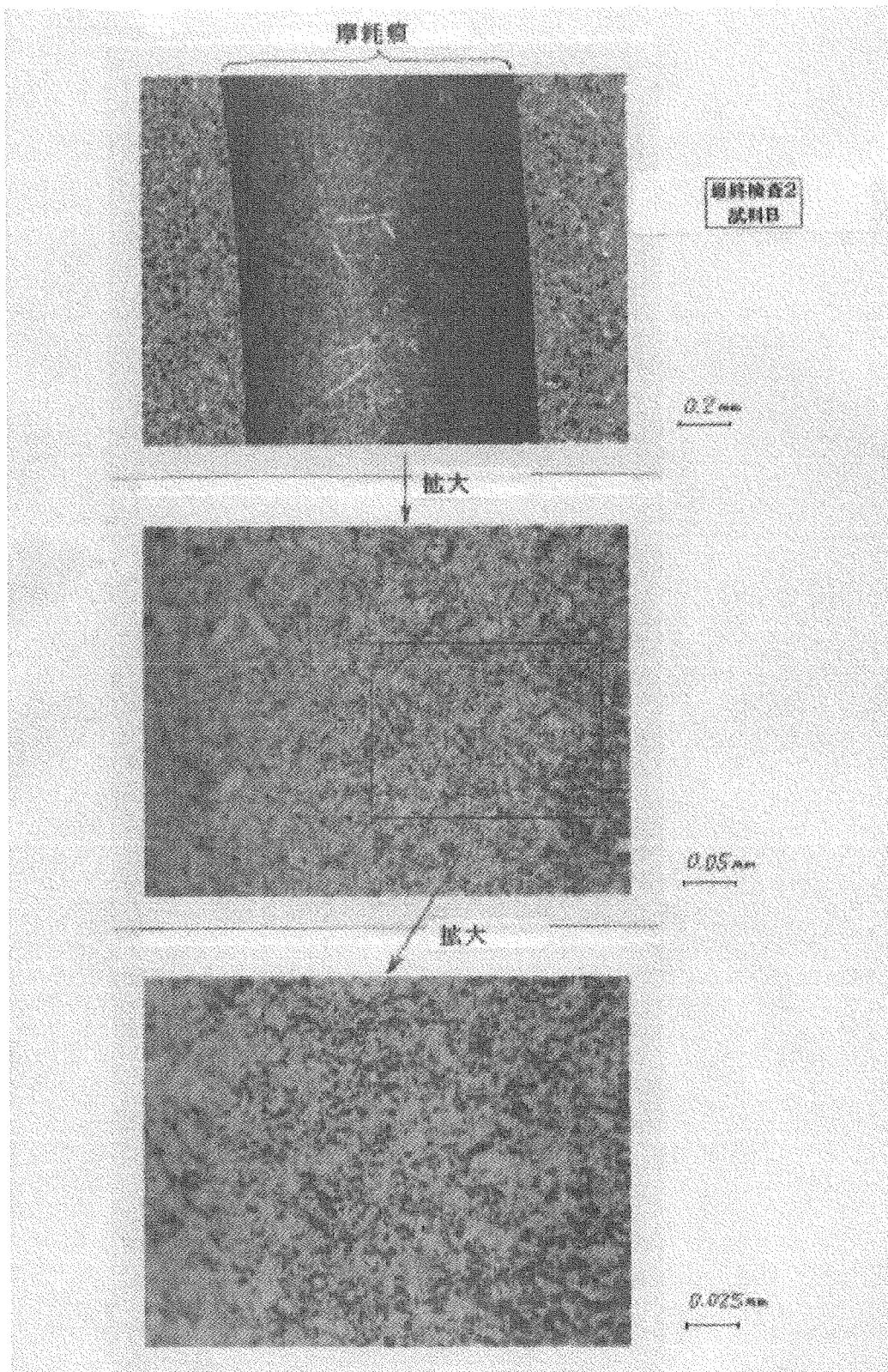


写真 3.5.2-5 顕微鏡による観察（平板摩耗痕：移着グラファイト拭き取り後）

3. 5. 3 試験片C（保持器：グラファイト／東洋炭素 IG-43）310℃蒸気中試験

(1) 外観検査

100 時間、150 時間、200 時間経過後の試験片の外観を写真 3.5.3-1～3.5.3-3 に示す。

(2) 寸法検査

試験球外径寸法をマイクロメータで5点測定し、試験前外径からの減少量の最大値と最小値を表 3.5.3-1 に示す。

表 3.5.3-1 試験球外径減少量

試験時間 (Hr)	試験球外径 (3/8" : $\phi 9.525\text{mm}$) 減少量 [μm]		
100	0	0	0
	0	0	0
150	0	0	0
	0	0	0
200	0	0	0
	0	0	0

(3) 重量検査

100 時間、150 時間、200 時間経過後の試験片の重量検査結果を表 3.5.3-2 に示す。

摩耗度合は、下式により算出した。

$$\text{摩耗度合} = (\text{試験前重量} - \text{試験後重量}) / \text{試験時間}$$

表 3.5.3-2 重量検査結果

部位	試験前重量 [g]	100 時間試験後		150 時間試験後		200 時間試験後	
		重量 [g] 摩耗度合 [mg/h]					
回転輪	103.23	103.22 0.10		103.21 0.13		103.17 0.30	
平板	105.87	105.85 0.20		105.84 0.20		105.73 0.70	
球 (6 個合計)	16.48	16.48 0.00		16.48 0.00		16.48 0.00	
保持器	8.56	8.55 0.10		8.54 0.13		8.52 0.20	

(4) 表面粗さ検査

平板、球の表面粗さ検査結果を表 3.5.3-3 に示す。

表 3.5.3-3 表面粗さ(μm)

	試験前	100 時間	150 時間	200 時間
平板粗さ	0.0136	0.0736	0.0621	0.1087
球粗さ	0.0150	0.0243	0.0355	0.1447

(5) 真円度検査

試験時間 150 時間経過後の試験球真円度検査結果を表 3.5.3-4 に示す。球①②③は 3 個抜取検査したものである。

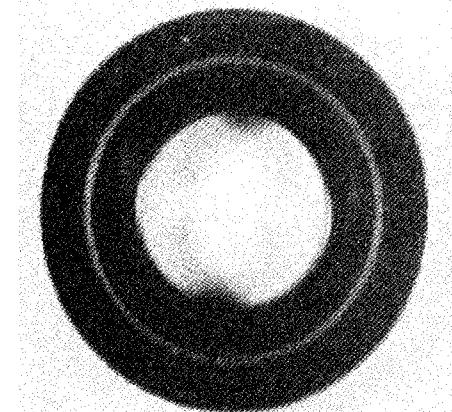
表 3.5.3-4 真円度検査結果

	球①	球②	球③
真円度 [μm]	0.48	0.68	0.63

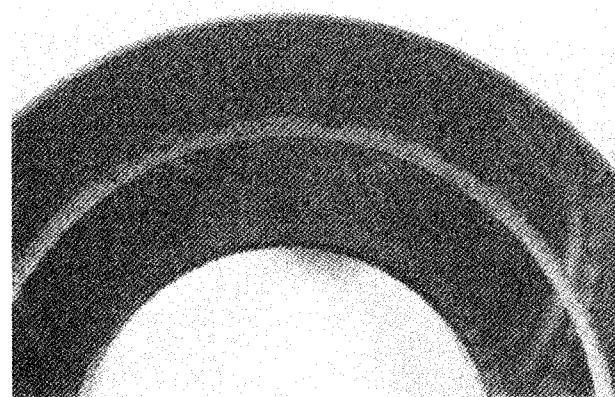
(注) 試験前球の真円度は $0.17 \sim 0.23 \mu\text{m}$

(6) 顕微鏡による観察

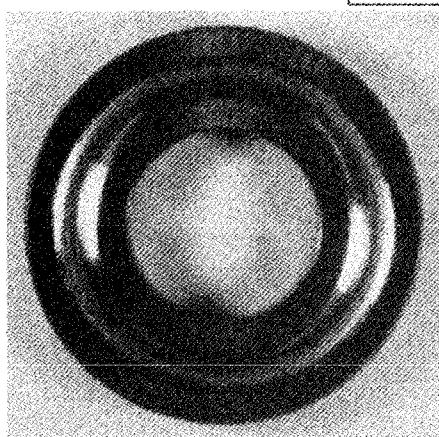
試験時間 150 時間経過後の平板試験片摩耗痕部の顕微鏡観察結果を写真 3.5.3-4～3.5.3-5 に示す。



平板



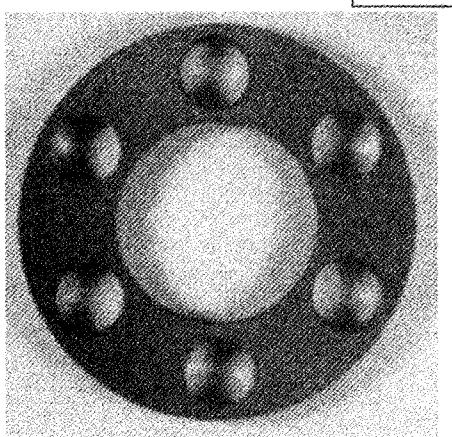
平板（拡大図）



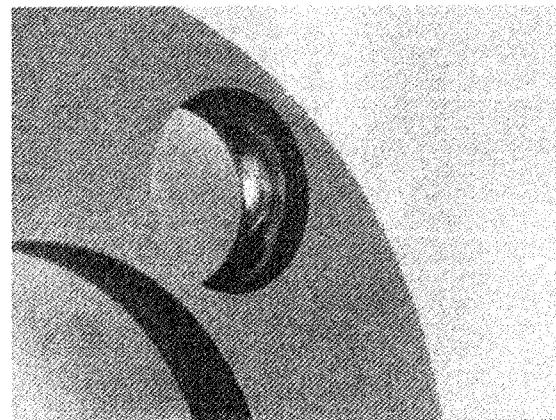
回転輪



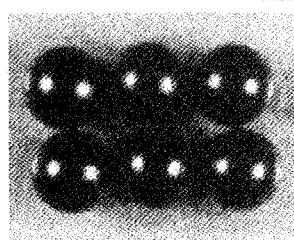
回転輪（拡大図）



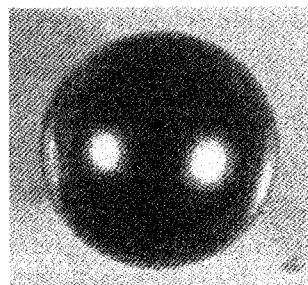
保持器



保持器（拡大図）

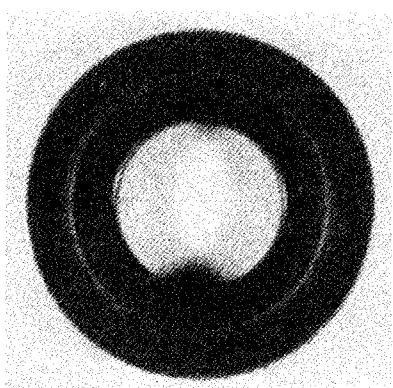


球



球（拡大図）

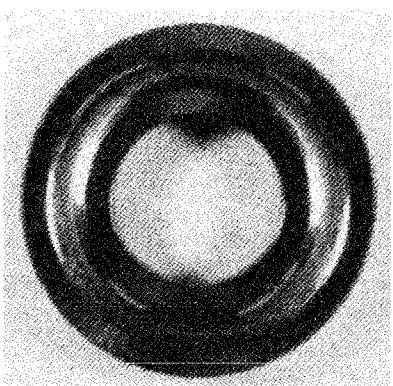
写真 3.5.3-1 試験片 C 外観写真 (100 時間)



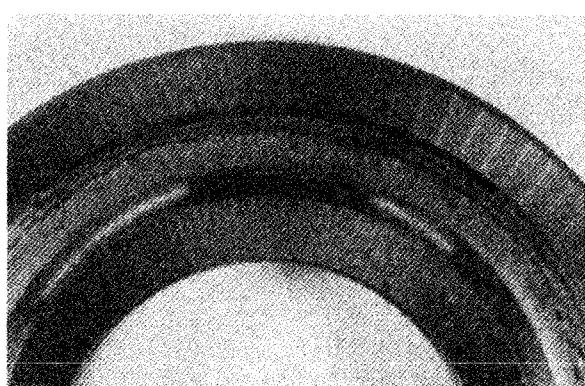
平板



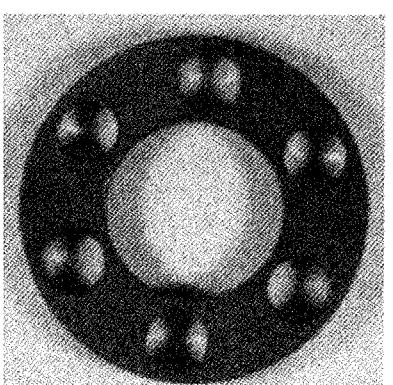
平板（拡大図）



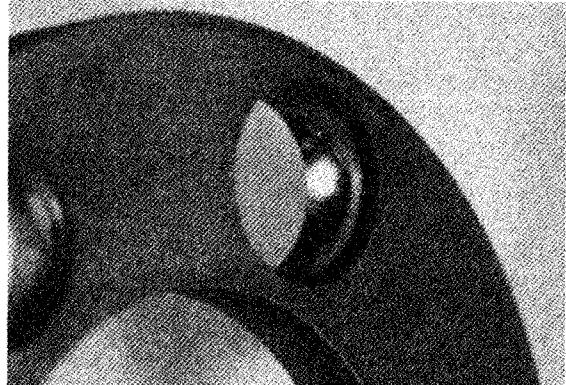
回転輪



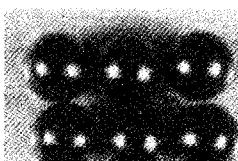
回転輪（拡大図）



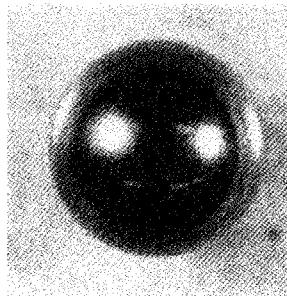
保持器



保持器（拡大図）

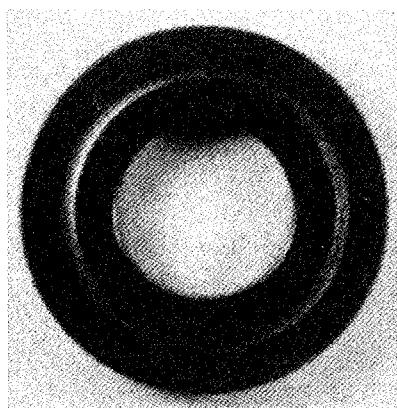


球



球（拡大図）

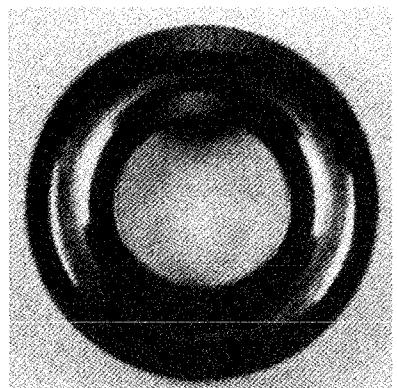
写真 3.5.3-2 試験片 C 外観写真（150 時間）



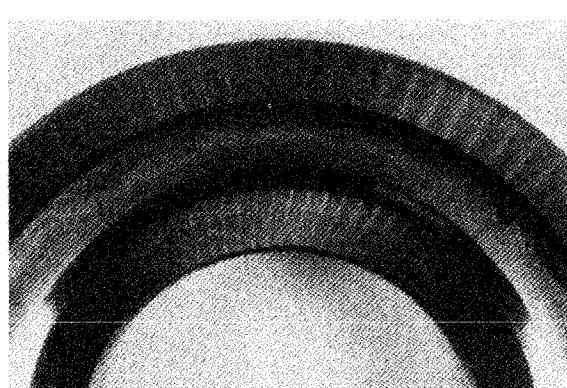
平板



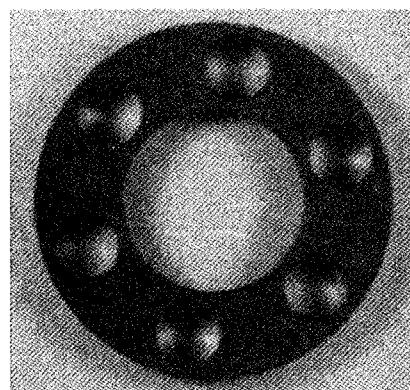
平板（拡大図）



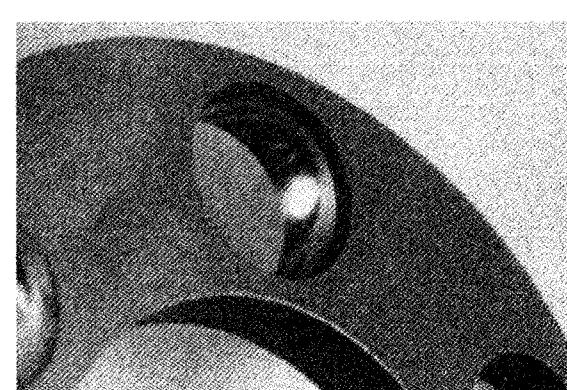
回転輪



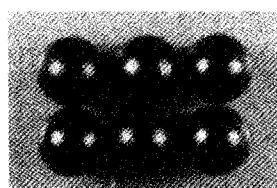
回転輪（拡大図）



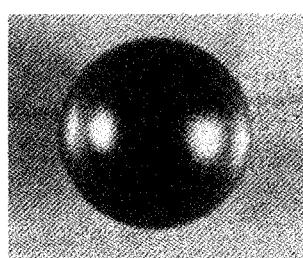
保持器



保持器（拡大図）



球



球（拡大図）

写真 3.5.3-3 試験片 C 外観写真 (200 時間)

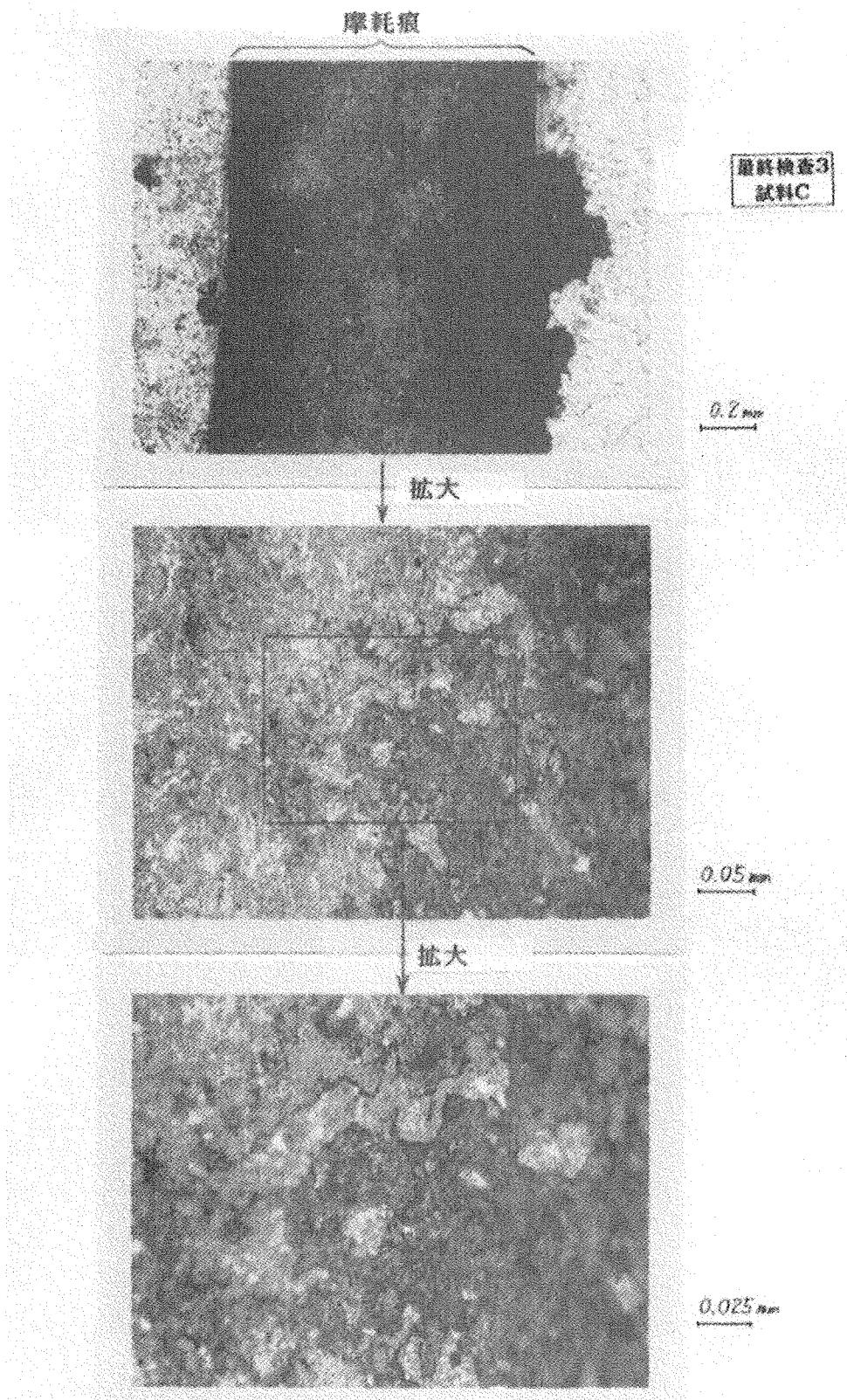


写真 3.5.3-4 顕微鏡による観察（平板摩耗痕：移着グラファイト拭き取り前）

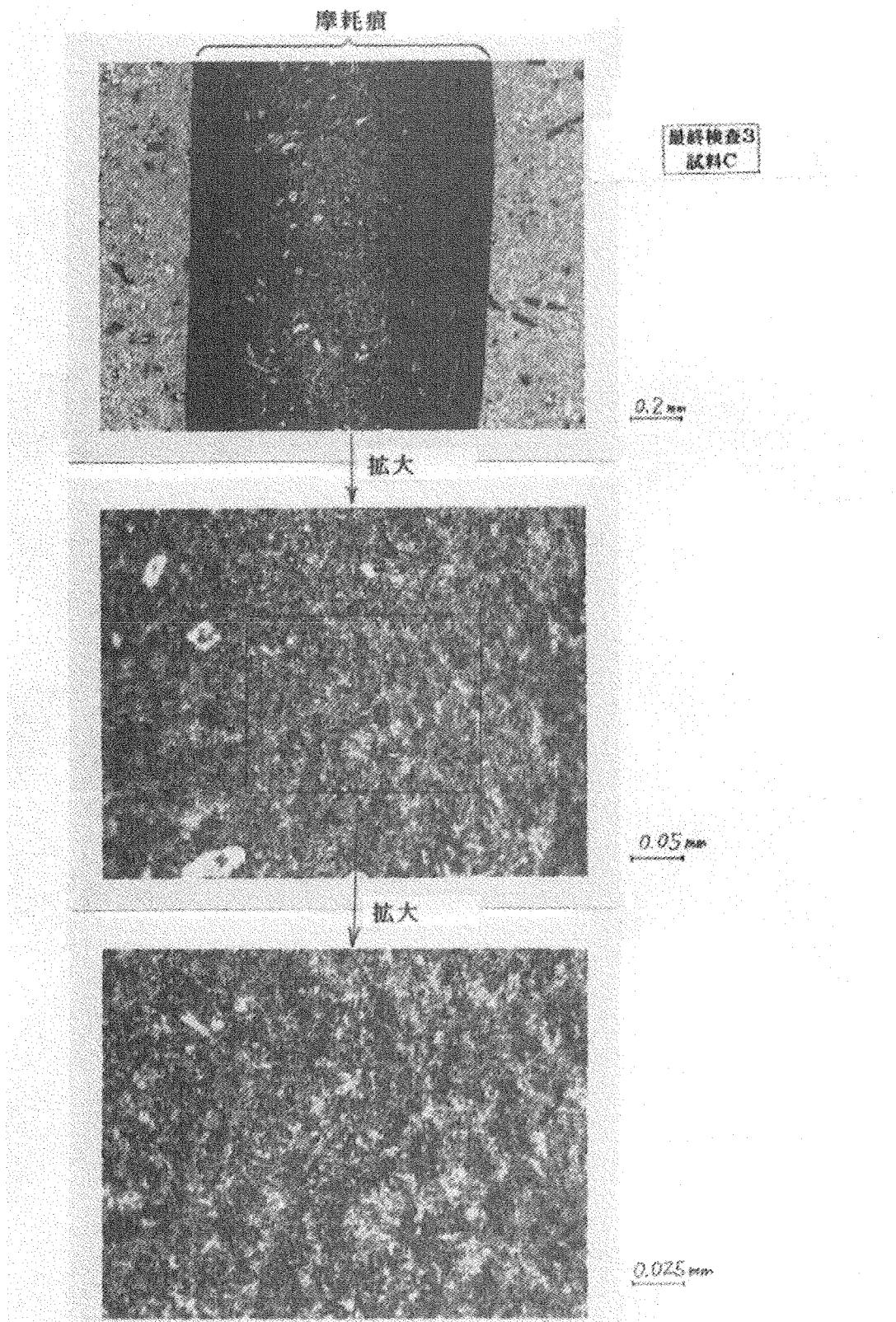


写真 3.5.3-5 顕微鏡による観察（平板摩耗痕：移着グラファイト拭き取り後）

3. 5. 4 試験片D（保持器：N F メタル／富士ダイス BGN0505）310°C水中試験

(1) 外観検査

100時間、150時間経過後の試験片の外観を写真3.5.4-1～3.5.4-2に示す。

(2) 寸法検査

試験球外径寸法をマイクロメータで5点測定し、試験前外径からの減少量の最大値と最小値を表3.5.4-1に示す。

表3.5.4-1 試験球外径減少量

試験時間(Hr)	試験球外径(3/8": φ9.525mm) 減少量【μm】		
100	-6~-24	-8~-24	-12~-24
	-12~-24	-15~-22	-18~-22
150	-28~-30	-28~-30	-24~-33
	-22~-33	-22~-33	-22~-33

(3) 重量検査

100時間、150時間経過後の試験片の重量検査結果を表3.5.4-2に示す。

摩耗度合は、下式により算出した。但し、保持器については100時間で破損したため、100～150時間の試験では新品を使用した。この為、150時間試験後の摩耗度合は、100～150時間の摩耗度合とした。

$$\text{摩耗度合} = (\text{試験前重量} - \text{試験後重量}) / \text{試験時間}$$

表3.5.4-2 重量検査結果

部位	試験前重量 [g]	100時間試験後	150時間試験後
		重量 [g] 摩耗度合 [mg/h]	重量 [g] 摩耗度合 [mg/h]
回転輪	103.04	102.97	102.93
		0.70	0.73
平板	105.53	105.24	105.13
		2.90	2.67
球(6個合計)	16.48	16.39	16.34
		0.90	0.93
保持器	No.1/21.25	19.30	20.12
	No.2/21.29	19.50	23.40

(注) 保持器のみ100時間にて破損のため、100～150時間試験は別途新品を使用
(保持器No.1: 0～100時間の摩耗度合/保持器No.2: 100～150時間の摩耗度合)

(4) 表面粗さ検査

平板、球の表面粗さ検査結果を表 3.5.4-3 に示す。

表 3.5.4-3 表面粗さ (μm)

	試験前	100 時間	150 時間
平板粗さ	0.0620	0.0261	0.1646
球粗さ	0.0150	0.1482	0.2383

(5) 真円度検査

試験時間 150 時間経過後の試験球真円度検査結果を表 3.5.4-4 に示す。球①②③は 3 個抜取検査したものである。

表 3.5.4-4 真円度検査結果

	球①	球②	球③
真円度 [μm]	2.49	3.84	7.70

(注) 試験前球の真円度は $0.17 \sim 0.23 \mu\text{m}$

(6) 顕微鏡による観察

試験時間 150 時間経過後の平板試験片摩耗痕部の顕微鏡観察結果を写真 3.5.4-3～3.5.4-4 に示す。

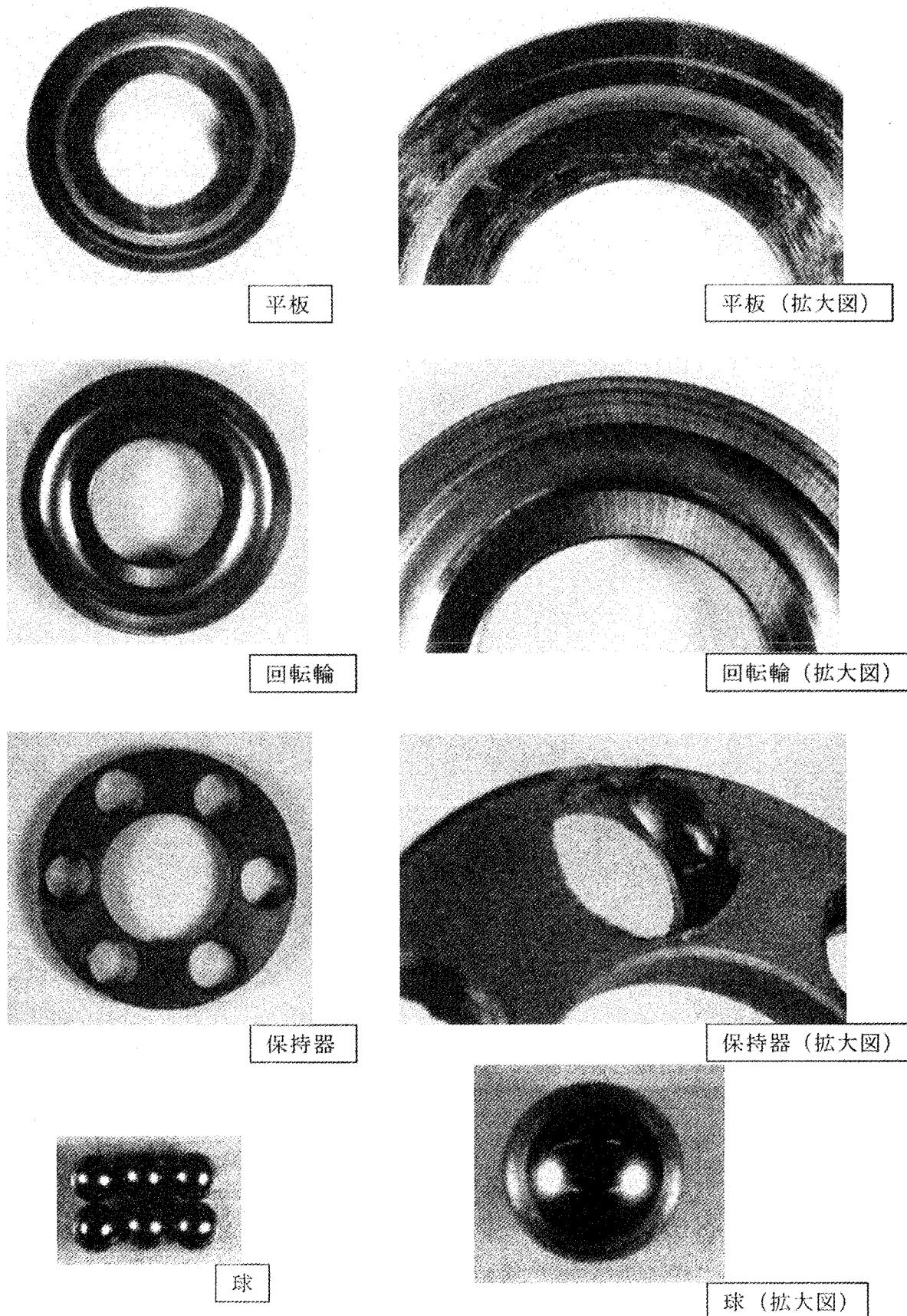
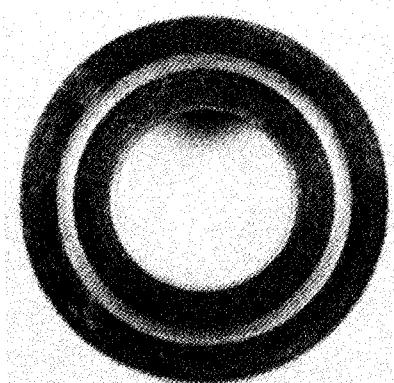
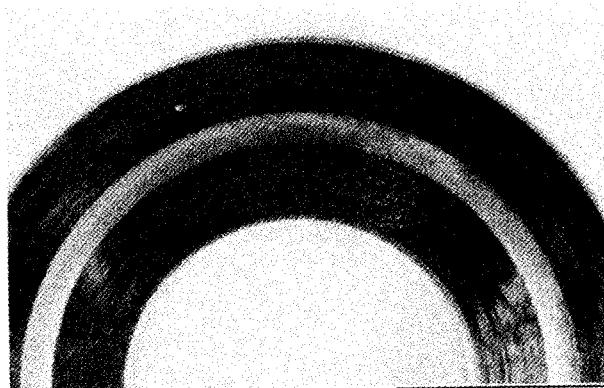


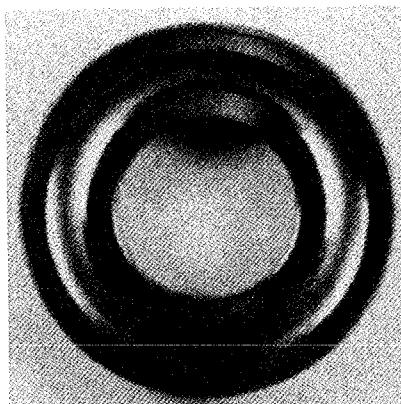
写真 3.5.4-1 試験片D外観写真（100時間）



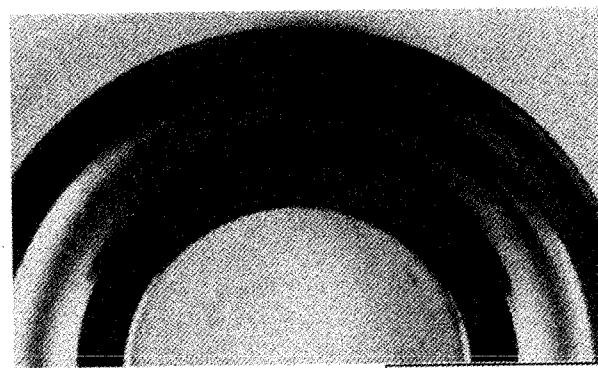
平板



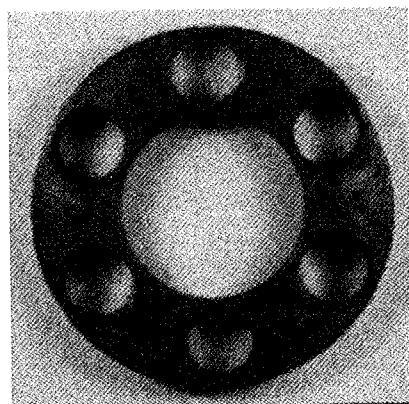
平板 (拡大図)



回転輪



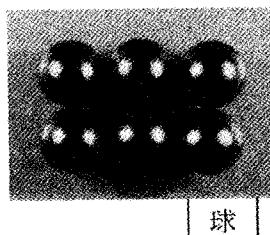
回転輪 (拡大図)



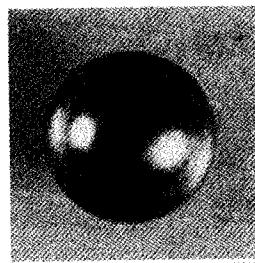
保持器



保持器 (拡大図)



球



球 (拡大図)

写真 3.5.4-2 試験片D外観写真 (150 時間)

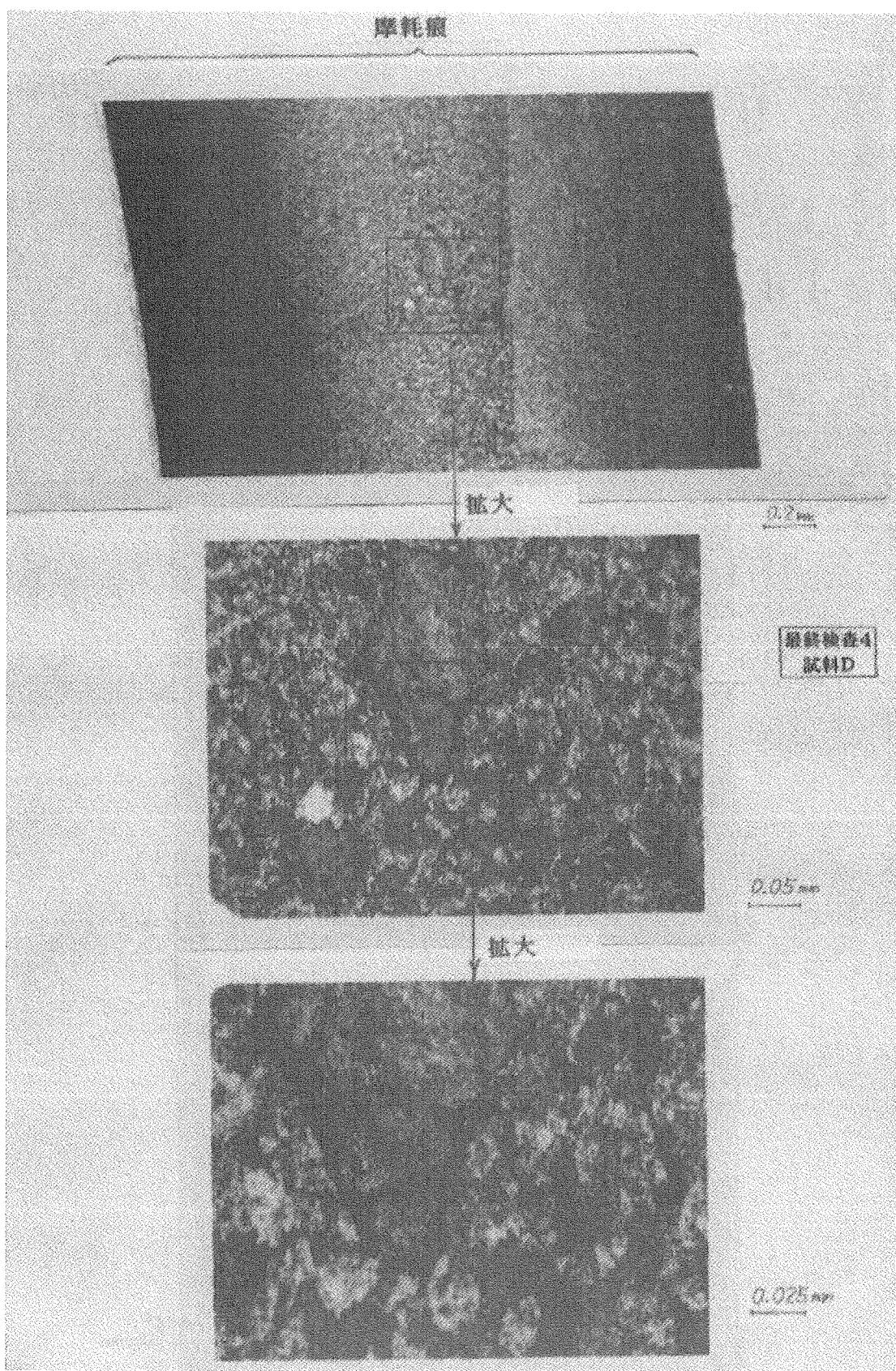


写真 3.5.4-3 顕微鏡による観察（平板摩耗痕：移着グラファイト拭き取り前）

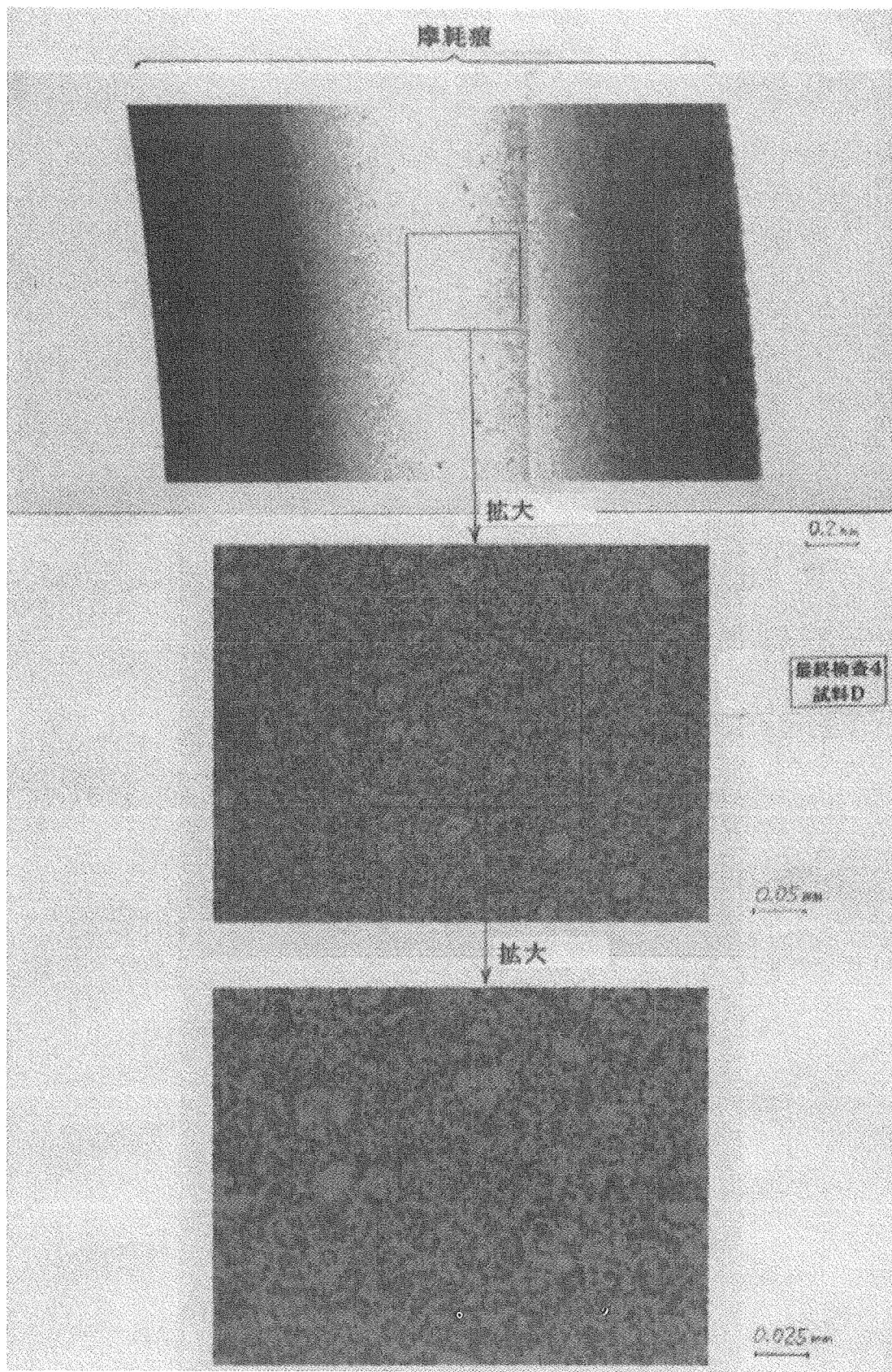


写真 3.5.4-4 顕微鏡による観察（平板摩耗痕：移着グラファイト拭き取り後）

3. 5. 5 試験結果の比較

4試験片による転がり摩耗試験結果について比較したものを表3.5.5-1に示す。高温水中試験と高温蒸気中試験の比較を図3.5.5-1に、保持器材料の硬度の比較を図3.5.5-2に、保持器材料の摺動性の比較を図3.5.5-3に示す。

(1) 使用環境の相違

310°C高温水中と310°C高温蒸気中環境下での試験結果

- ・水中試験の摩耗度合が蒸気中試験の摩耗度合を上回る。
- ・水中試験の摩耗度合は初期が大きく、100時間経過後は試験時間の経過にはほぼ直線的に増加していく。
- ・蒸気中試験の摩耗度合は150時間経過までは小さいが、200時間に近づくある時点から急に増加の傾向を示す。
- ・水中、蒸気中試験とも、試験時間に関わりなく、平板摩耗度合が保持器摩耗度合を上回る。

(2) 保持器グラファイト材の硬度の相違

グラファイト材の硬度差による試験結果

- ・150時間までの摩耗度合にはほとんど差は認められない。
- ・200時間経過後の摩耗度合では若干試験片B(ショア硬度80)が試験片C(ショア硬度55)を上回る。
- ・すなわち、軟らかい保持器の方が平板、球、回転輪及び保持器の摩耗度合が少ない。

(3) 保持器材料の摺動性による相違

- ・試験片D(自己潤滑性複合材)の摩耗度合は、グラファイト材(試験片B、C)と比較して、圧倒的に大きい。
- ・試験片Dでは、平板などの摩耗度合と比較して保持器の摩耗度合が圧倒的に大きい。
また、試験後の保持器には、破損(一部欠損)が観察された。

表 3.5.5-1 転がり摩耗試験結果

			回転輪	平板	球	保持器
試験片A	試験後検査1 (100h)	摩耗深さ μm	—	約110	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.90	1.40	0.10	1.00
		状態 (表面粗さ Ra)	若干摩耗	若干摩耗 (0.0261)	若干摩耗 (0.1482)	若干摩耗
試験片A	試験後検査2 (150h)	摩耗深さ μm	—	約160	—	—
		摩耗度合 mg/h	1.40	1.73	0.13	1.07
		状態 (表面粗さ Ra)	摩耗	摩耗 (0.1646)	摩耗 (0.2383)	摩耗
試験片A	試験後検査3 (200h)	摩耗深さ μm	—	約210	—	—
		摩耗度合 mg/h	1.65	2.00	0.15	1.65
		状態 (表面粗さ Ra)	摩耗	摩耗 (0.2037)	摩耗 (0.2469)	摩耗大 片当たり
試験片B	試験後検査1 (100h)	摩耗深さ μm	—	約24	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.10	0.10	0.00	0.10
		状態 (表面粗さ Ra)	良好	良好 (0.0848)	良好 (0.0348)	良好
試験片B	試験後検査2 (150h)	摩耗深さ μm	—	約38	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.13	0.20	0.00	0.20
		状態 (表面粗さ Ra)	良好	良好 (0.0927)	良好 (0.0658)	良好
試験片B	試験後検査3 (200h)	摩耗深さ μm	—	約150	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.40	1.25	0.10	0.55
		状態 (表面粗さ Ra)	若干摩耗	摩耗 (0.1336)	摩耗 (0.2684)	摩耗
試験片C	試験後検査1 (100h)	摩耗深さ μm	—	約30	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.10	0.20	0.00	0.10
		状態 (表面粗さ Ra)	良好	良好 (0.0736)	良好 (0.0243)	良好
試験片C	試験後検査2 (150h)	摩耗深さ μm	—	約45	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.13	0.20	0.00	0.13
		状態 (表面粗さ Ra)	良好	良好 (0.0621)	良好 (0.0355)	良好
試験片C	試験後検査3 (200h)	摩耗深さ μm	—	約100	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.30	0.70	0.00	0.20
		状態 (表面粗さ Ra)	良好	良好 (0.1087)	良好 (0.1447)	良好
試験片D	試験後検査1 (100h)	摩耗深さ μm	—	約110	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.70	2.90	0.90	19.50
		状態 (表面粗さ Ra)	若干摩耗	摩耗 (0.0817)	摩耗 (0.0603)	摩耗大 一部欠け
試験片D	試験後検査2 (150h)	摩耗深さ μm	—	約130	—	—
		摩耗度合 mg/h	0.73	2.67	0.93	23.40
		状態 (表面粗さ Ra)	若干摩耗	摩耗 (0.0602)	摩耗 (0.0606)	摩耗大 一部欠け

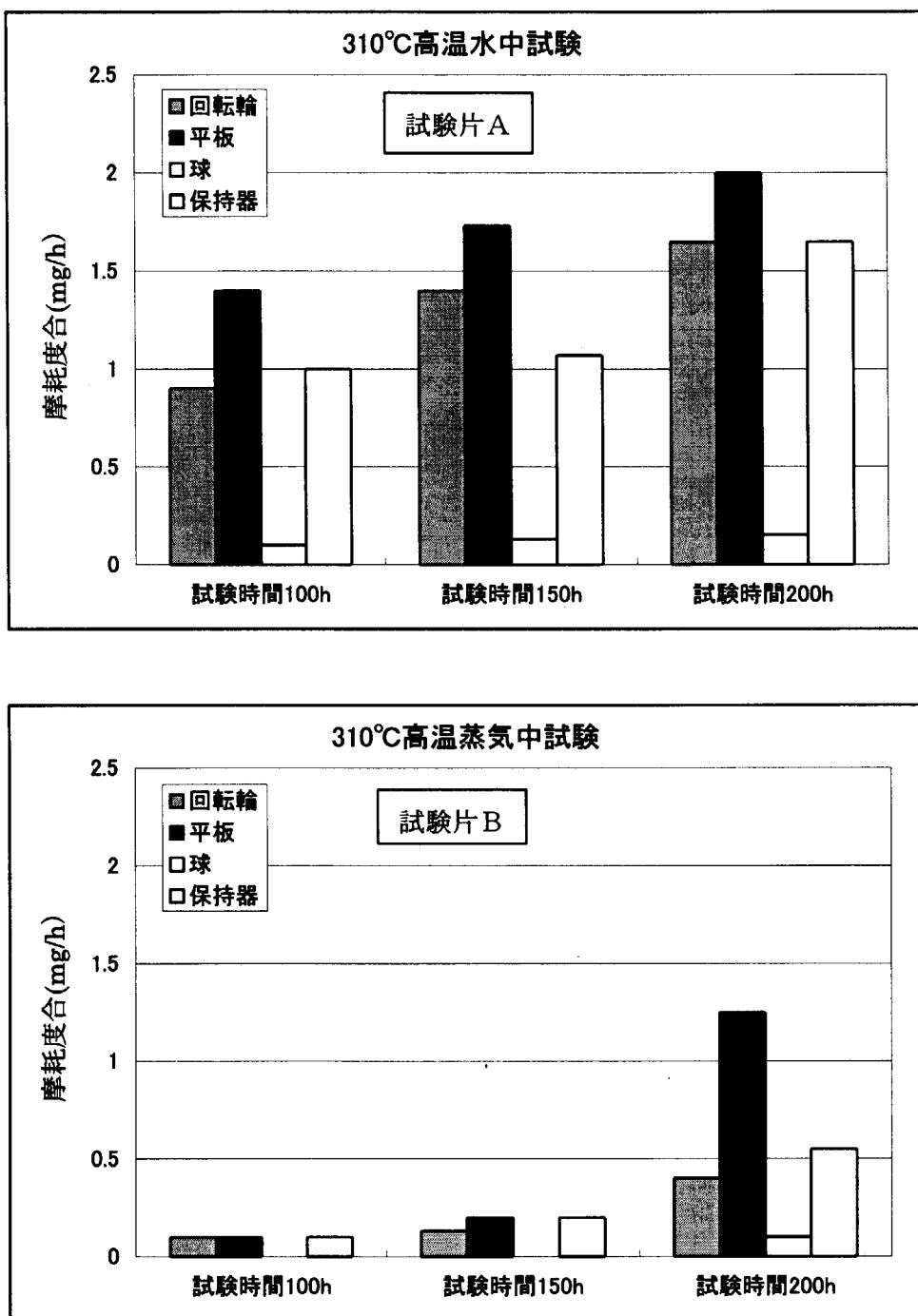


図 3.5.5-1 使用環境（高温水中/高温蒸気中）による摩耗度合の相違

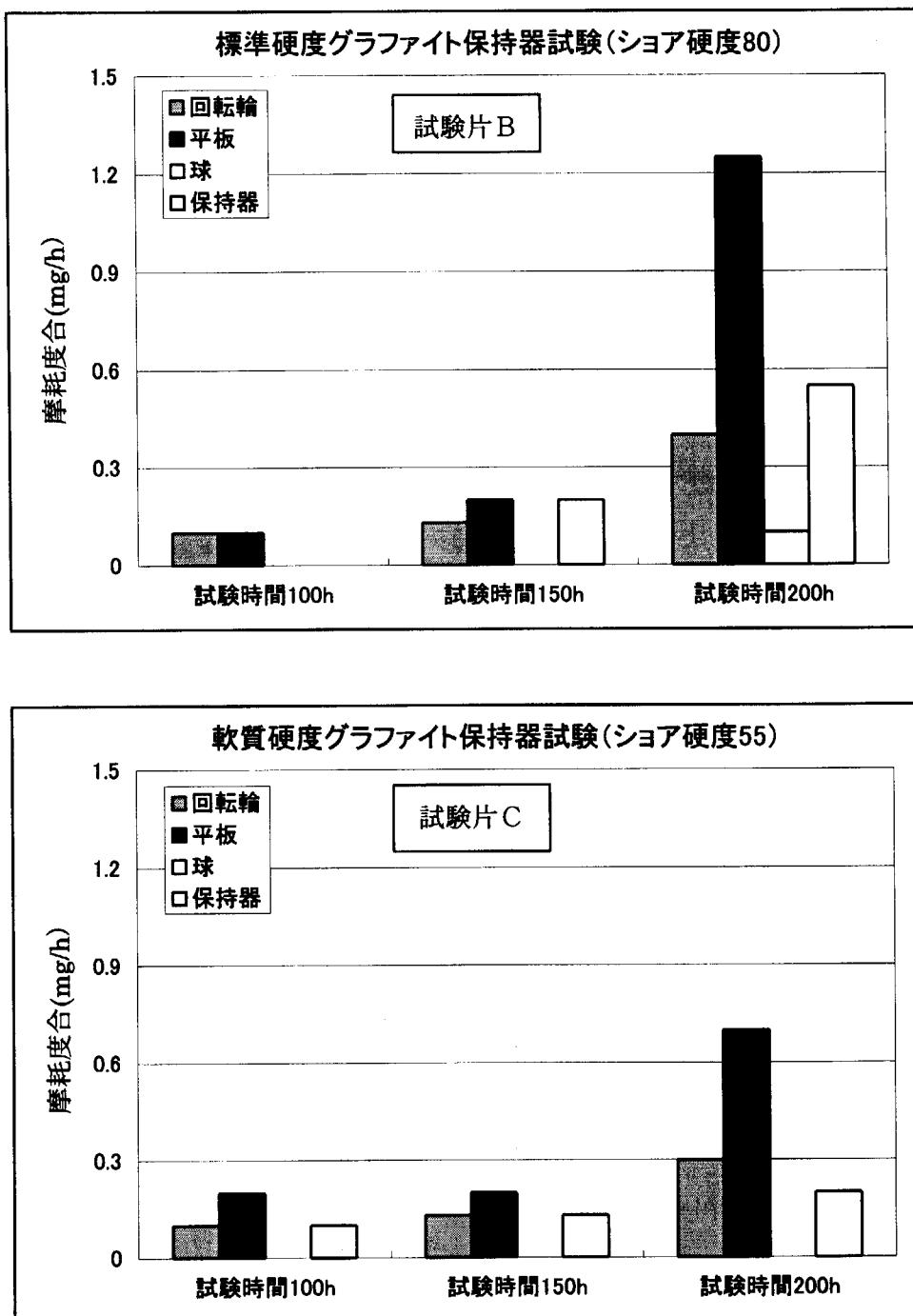


図 3.5.5-2 保持器材料の硬度差による摩耗度合の相違

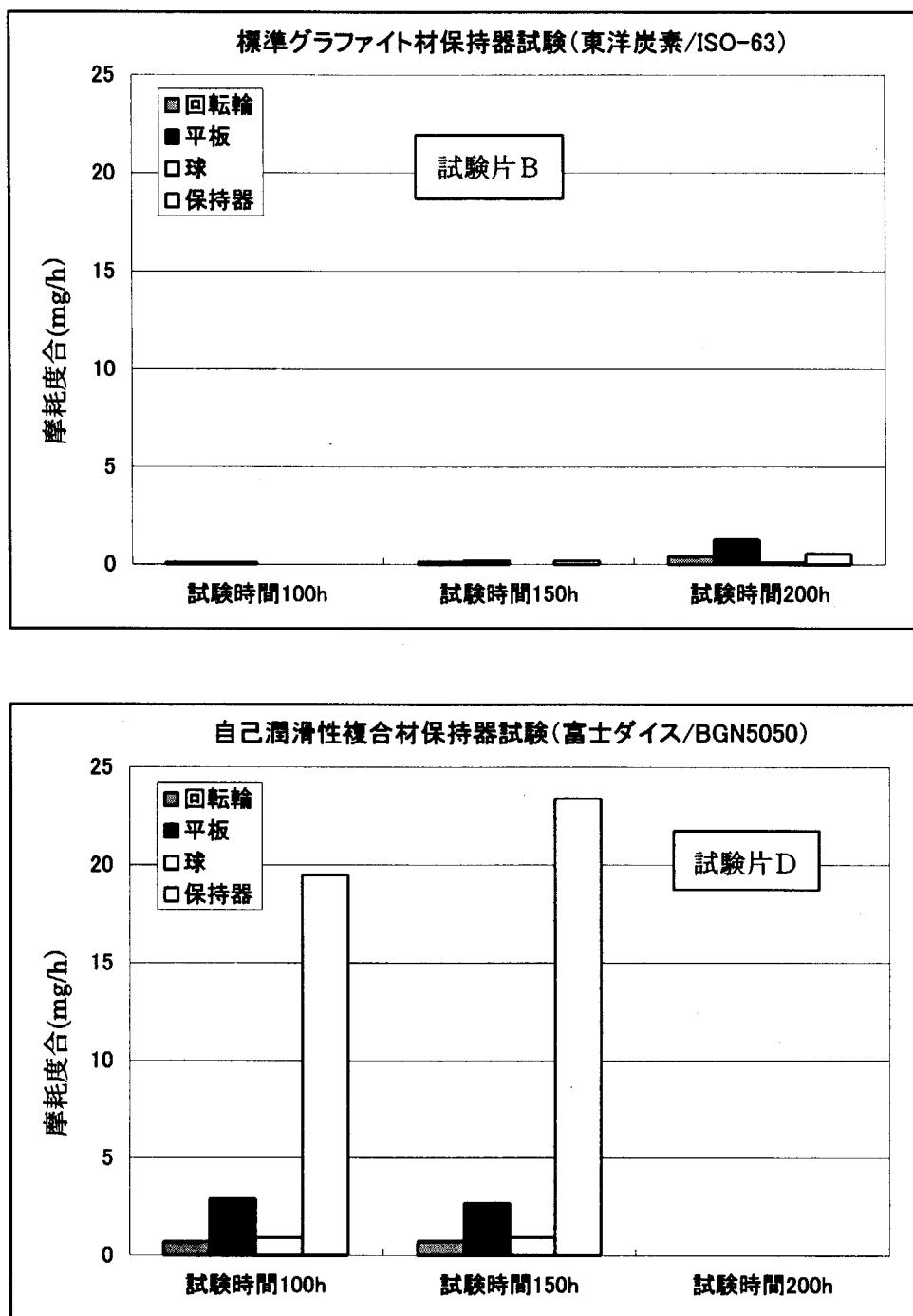


図 3.5.5-3 保持器材料の摺動性の差による摩耗度合の相違

3. 6 評価

(1) 水中と蒸気中の摩耗特性比較

試験片A水中試験と試験片B及び試験片C蒸気中試験の摩耗量の比較を図3.6-1に示す。150時間までは蒸気中試験の摩耗量が非常に少ないが、200時間で急増する。水中試験の摩耗度合は時間に対し略一定である。水中試験では回転輪、球及び保持器の回転に伴う水の流れによりグラファイト摩耗粉が軌道面から流出するが、蒸気中ではその力が弱くグラファイト摩耗粉が軌道面に転着し易いと考えられ、その結果、初期における摩耗が少ないものと推定される。しかし、後期において、摩耗が進展してくると硬いサーメットやステライトの摩耗粉が軌道上に堆積し、これが研磨剤となり、且つ、球の表面が荒れることの相乗効果により急速に摩耗が進行するものと推定される。

本試験片に関する判定基準(3.2章(4)項)は、試験片Aの280時間での摩耗量を下回っていることであるが、試験片Aは200時間までしか試験を行っていないので、保守的評価として、200時間での試験片Aの摩耗量を判定基準とする。即ち、摩耗量は球：30mg、平板：400mg以下であれば合格である。これから、試験片B及び試験片Cの摩耗量はいずれもこの基準値を下回っており合格である。

(2) 試験片C(保持器硬度の影響)

軟質グラファイトを使用した試験片Cは、硬質グラファイトの試験片Bと同様に200時間で摩耗が急増してくるが、試験片Bより摩耗量が少ない。試験片Cは200時間における球の摩耗量は0であり、平板等の摩耗量も試験片Bより少なく、耐摩耗性は試験片Bより良好である。これから、保持器に軟らかいグラファイトを用いた方が全ての摩耗が少なくなることが示された。

(3) 試験片D(摺動性の影響)

自己潤滑性複合材保持器を使用した試験片Dは、保持器と球の摩耗が非常に多い。これは球の材質であるサーメットと保持器の材質のニッケル合金との潤滑特性が高温蒸気中では良くなかったものと考えられる。いずれにしても、310°C蒸気中で使用するには適さない組み合わせである。

(4) 高温蒸気中で使用可能な軸受材料の選定

以上の結果から、試験片B及び試験片Cが高温蒸気中で使用可能な材料である。

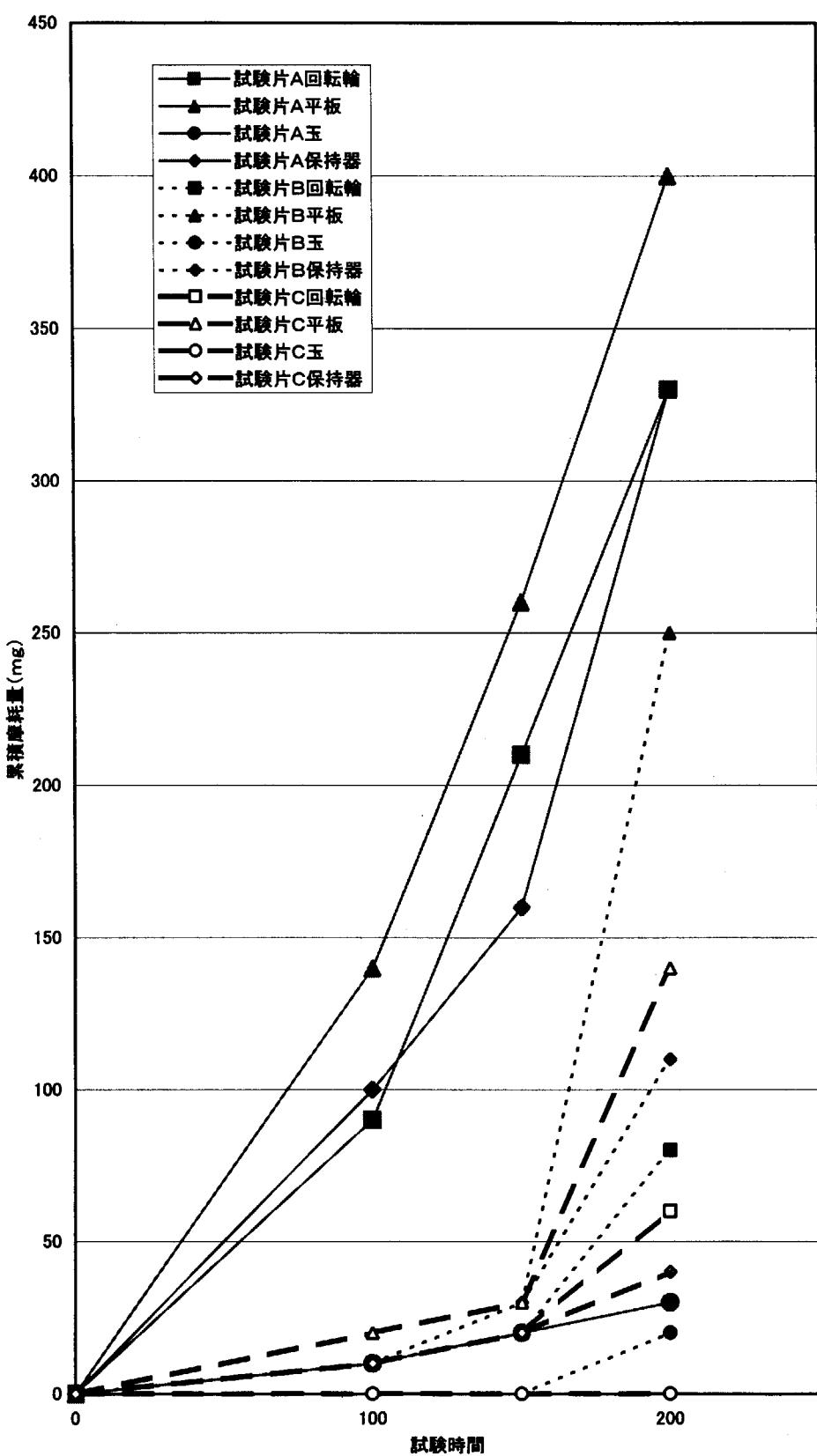


図3.6-1 累積摩耗量の水中と蒸気中の比較

4. まとめ

船用炉用高温高圧水中駆動モーターの開発技術をベースに革新的小型炉用内装型制御棒駆動装置用の高温高圧蒸気中駆動モーターを製作し、室温大気中において駆動コイルの諸特性を計測し、駆動コイルの基礎データ収集を実施した。

この結果、高温蒸気中駆動モーターの駆動コイル性能は、高温水中駆動モーターに比較して若干向上しており、要求を満足することが確認された。これは、基本的なモーター電磁性能に関する設計変更はしなかったものの、モーター性能の維持を目標に実施したステータの改良（ケーブル導体径の太径化、鉄心材質の電磁ステンレスへの変更及び非密封構造化等）及びローターの改良（マグネット材の性能向上、不活性ガス封入キャンニング構造の採用等）が良い結果を示したものと考えられる。

また、室温大気中の試験結果を基にした高温高圧蒸気中における駆動コイル性能評価においても、本仕様のモーターがその使用環境下で十分性能を発揮できることを確認した。

さらに、船用炉用に開発された高温・高圧水中で作動する内装型制御棒駆動装置の研究成果をもとに、高温蒸気中で使用する軸受について、材料を選定するため軸受材料特性試験を実施した。310°Cの高温水中及び蒸気中において転がり摩耗試験を実施し、高温蒸気中で使用可能な材料として下記を選定した。

軸受レース材	: SUS316 にステライト NO.1 盛金
軸受球	: サーメット
保持器	: グラファイト IG-43 (ショアD硬さ 55)

上記材料の組合せによる軸受は、内装型制御棒駆動装置の設計条件である 50 万回転に十分耐えられる対摩耗特性を有していることを確認した。なお、船用炉用に開発したグラファイト ISO-63 (ショアD硬さ 80) の組合せも十分な耐摩耗性を有している。

謝　　辞

本報告書は、文部科学省から原研へ受託研究として実施された「革新的小型炉要素技術開発」の研究成果を取り纏めたものである。本研究を進めるにあたり、三菱重工業株式会社の河越稔之氏、松井昭彦氏、今吉祥氏、光洋精工株式会社の林田一徳氏、北村和久氏、ニュークリアデベロップメント株式会社の小山好一氏に貴重な助言を頂きました。また、三菱重工業株式会社の久我正二氏、原子力エンジニアリング株式会社の柿崎禎之氏に多大な協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Ishida, *et al.*, "Development of In-vessel Type Control Rod Drive Mechanism for Marine Reactor", Nuclear Science and Technology, Vol.38, No.7, pp557-570 (2001).
- 2) T. Yoritsune, *et al.*, "In-vessel Type Control Rod Drive Mechanism Using Magnetic Force Latching for a Very Small Reactor", Nuclear Science and Technology, Vol.39, No.8, pp913-922 (2002).
- 3) 布川 浩他 : "MRX 原子炉容器内装型制御棒駆動装置の高温水中軸受の開発", JAERI-Tech 2001-40 (2001)

付録

添付資料-1

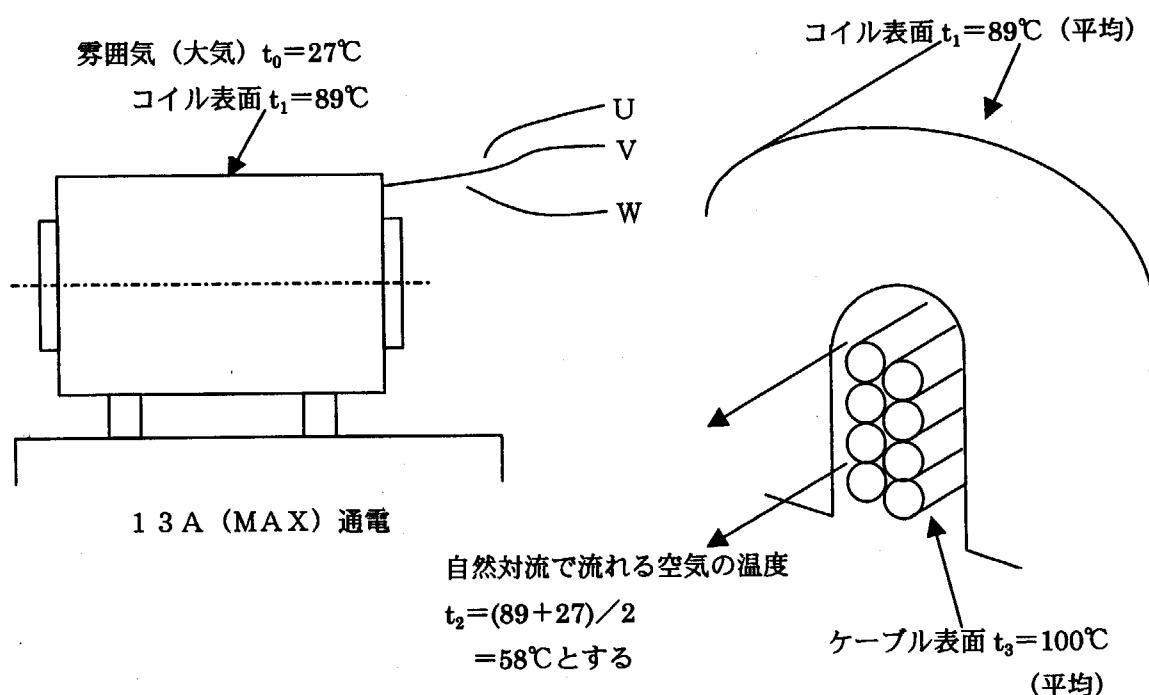
無機絶縁ケーブルの高温時評価

1. 概要

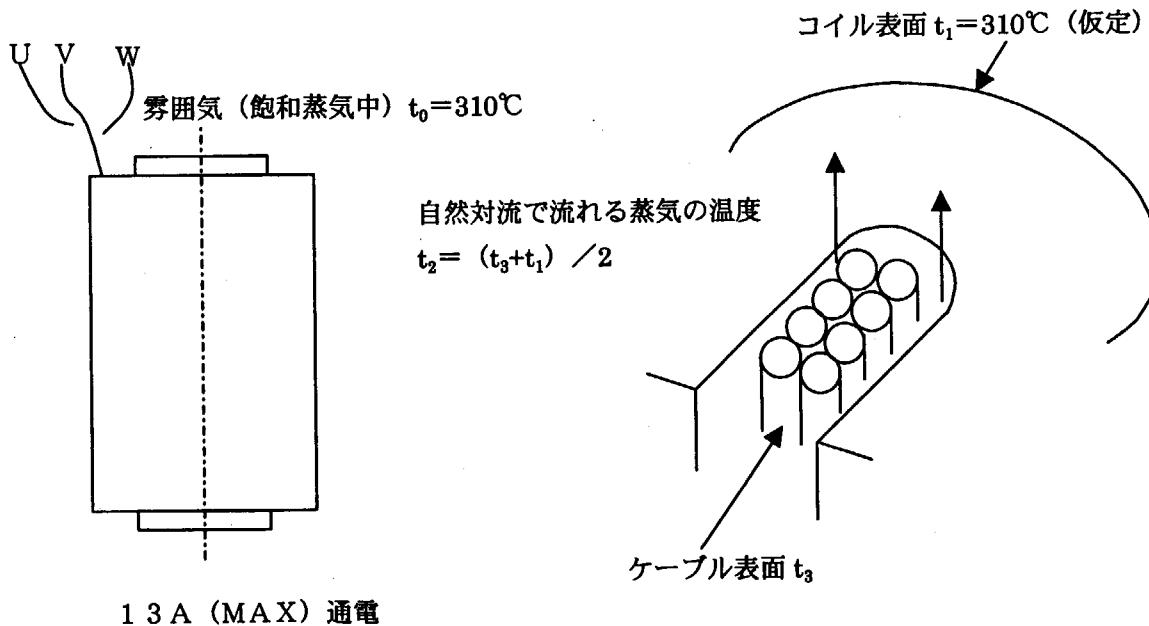
本資料は、蒸気中用駆動モーターステーターのコイル部に使用している無機絶縁ケーブルの高温蒸気中での表面温度の算出を行ったものである。

2. 評価モデル

(1) コイル単体通電発熱確認試験時の評価



使用条件下での評価



3. 評価計算

(1) コイル単体通電発熱確認試験時

コイル単体にて通電発熱確認試験を実施した時のデータの妥当性を確認する。

評価の方法は、2. (1) の評価モデルにて次の順にて検討・評価を行う。

- 1) 無機絶縁ケーブル表面から雰囲気への熱伝達率を求める。
- 2) その熱伝達率から、無機絶縁ケーブル発熱量を求める。
- 3) 試験結果から得られたケーブル表面温度から、その温度でのケーブル内導線(銅)の抵抗値を求め、MAX 1 3 A通電した時の発熱量を求める。
- 4) 2) と 3) の発熱量の比較

1) 無機絶縁ケーブル表面の熱伝達率

①グラスホフ数の算出

$$Gr = g \beta (t_3 - t_2) l^3 / \nu_2^2$$

Gr : グラスホフ数

g : 重力加速度 = 9.8m/s²

β : 空気の体積膨張率 = 1/t₂ = 1/(58+273) = 1/K

l : 代表長さ (コイルスロット内ケーブル長さ) = 0.2m

ν_2 : 動粘性係数 = 18.87mm²/s (t₂時の空気)

t_2 : スロット内を対流する空気温度 = (58+273) K

t_3 : 無機絶縁ケーブル表面温度 = (100+273) K

$$= 2.794 \times 10^7$$

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Ra : レーレー数

Pr : プラントル数 = 0.718 (t₂時の空気)

$$= 2.006 \times 10^7$$

②ヌセルト数の算出

水平円柱の自然対流熱伝達より

$$Nu = 1.031 \cdot \{Pr / (2.4 + 4.9\sqrt{Pr} + 5Pr)\}^{1/4} \cdot Ra^{1/4}$$

$$= 35.6$$

③熱伝達率の算出

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / 1 \quad W / (m^2 \cdot K)$$

α : 热伝達率 $W / (m^2 \cdot K)$

λ : 热伝達率 $= 28.295 \times 10^{-3} \quad W / (m \cdot K)$

$$= 5.03 \quad W / (m^2 \cdot K)$$

2) 無機絶縁ケーブルの発熱量

スロット中での無機絶縁ケーブルは、ケーブル外表面からの放熱及びコイルへの熱放射により、ケーブルの発熱量を算出する。

$$Q' = \alpha \cdot A_1 \cdot (t_3 - t_2) + \sigma \cdot A_1 / \{1 / \varepsilon_1 + (1 / \varepsilon_2 - 1) \cdot A_1 / A_2\} \cdot (t_3 - t_2)^4$$

Q' : 1スロット内ケーブルの発熱量 W

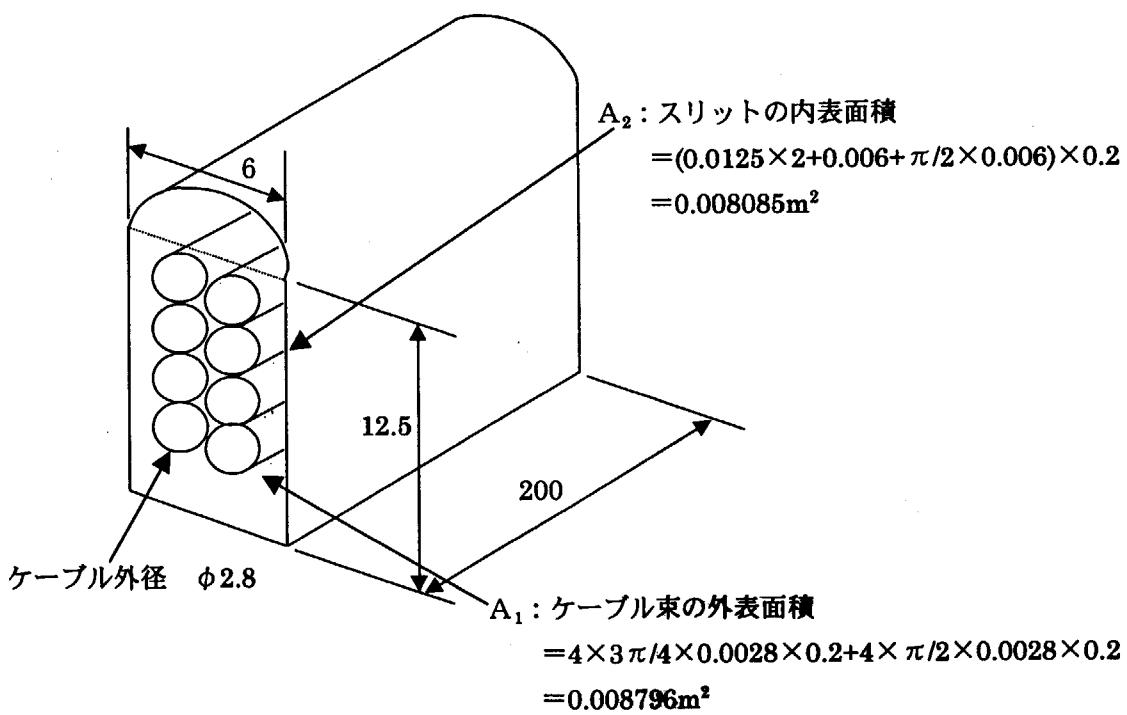
σ : ステファン・ボルツマン定数 $= 5.6687 \times 10^{-8}$

A_1 : ケーブル外表面積 (8本束) $= 0.008796 m^2$

A_2 : スロット内表面積 $= 0.008085 m^2$

ε_1 : ケーブルの放射率 $= 0.2$ (NCF600)

ε_2 : コイルの放射率 $= 0.2$ (電磁ステンレス)



$$Q' = 1.86 \quad W$$

ケーブル1本当たりの発熱量Qは

$$Q = Q' / 8 = 0.23 \quad W$$

3) スロット内のケーブル 1 本当たりの発熱量（設計値）

①ケーブルの抵抗値算出

$$R = \rho \cdot l / A$$

R : 抵抗 Ω ρ : 銅の比抵抗 $= 2.04 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ (t_3 時)l : スロット中のケーブル長さ $= 20 \text{ cm}$ A : 銅芯の断面積 $= d^2 \cdot \pi / 4 = 0.020 \text{ cm}^2$ d : 銅芯の径 $= 0.16 \text{ cm}$

$$= 0.002 \Omega$$

②ケーブルの発熱量

$$Q'' = R \cdot I^2$$

Q'' : ケーブル 1 本当たりの発熱量 W

I : 電流値 $= 13 \text{ A}$ (MAX)

$$= 0.34 \text{ W}$$

4) 実験値と設計値との比較

実験値から算出したケーブル 1 本当たりの発熱量と設計値とでは、0.1W設計値の方が大きい結果となった。

実験値から算出したケーブル 1 本当たりの発熱量は、コイルのスロットに接触していない条件で算出しているが、実際にはケーブルがコイルに接触しており、コイルへの直接の熱伝導分を考慮すれば妥当な結果だと考えられる。

(2) 使用条件下での評価

(1) のコイル単体通電発熱確認試験時の評価で使用した計算式等から、実際の使用条件での無機絶縁ケーブル表面温度（推定）を算出する。

算出方法は、2. (2) の評価モデルにて次の順にて検討・評価を行う。

- 1) 無機絶縁ケーブル表面から雰囲気への熱伝達率を求める。
- 2) その熱伝達率から、無機絶縁ケーブル発熱量を求める。
- 3) 1) の計算に使用したケーブル表面温度から、その温度でのケーブル内導線(銅)の抵抗値を求め、MAX 13 A通電した時の発熱量を求める。
- 4) 2) と3) の結果が近似するまで1) ~ 3) を繰り返し計算し、ケーブル表面温度を求める。

上記の内容で計算した結果を、以下に示す。

1) 無機絶縁ケーブル表面の熱伝達率

①グラスホフ数の算出

$$Gr = g \beta (t_3 - t_2) L^3 / \nu_2^2$$

Gr : グラスホフ数

g : 重力加速度 = 9.8m/s²

β : 空気の体積膨張率 = 1/t₂ = 1/(335+273) = 1/K

L : 代表長さ (コイルスロット内ケーブル長さ) = 0.2m

ν_2 : 動粘性係数 = 51.04mm²/s (t₂時の空気)

t₂ : スロット内を対流する空気温度 = (335+273) K

t₃ : 無機絶縁ケーブル表面温度 = (360+273) K

$$= 1.237 \times 10^6$$

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Ra : レーレー数

Pa : プラントル数 = 1.41 (t₂時の空気)

$$= 1.745 \times 10^6$$

②ヌセルト数の算出

鉛直円柱の自然対流熱伝達（平均熱伝達率）より

$$(Nu)_c / (Nu)_p = 1 + 0.428 [\{ 1 / r_0 \} / (Nu)_p]^{5/6}$$

$$(Nu)_c = [1 + 0.428 [\{ 1 / r_0 \} / (Nu)_p]^{5/6}] \times (Nu)_p$$

$(Nu)_c$: 鉛直円柱のヌセルト数

$(Nu)_p$: 鉛直平板のヌセルト数

l : 代表長さ（コイルスロット内ケーブル長さ）=0.2m

r_0 : ケーブルの半径=0.0014m

$$(Nu)_p = \{ Pr / (2.4 + 4.9\sqrt{Pr} + 5Pr) \}^{1/4} \cdot (\nu_t / \nu_s)^{0.21} \cdot Ra^{1/4}$$

ν_t : 動粘性係数=51.04mm²/s (t₂時の蒸気)

ν_s : 動粘性係数=58.14mm²/s (t₃時の蒸気)

$$(Nu)_p = 19.5$$

$$(Nu)_c = 63.4$$

③熱伝達率の算出

$$\alpha = (Nu)_c \cdot \lambda / l \quad W / (m^2 \cdot K)$$

α : 热伝達率 $W / (m^2 \cdot K)$

λ : 热伝達率= $71.57 \times 10^{-3} \quad W / (m \cdot K)$ (t₂時の蒸気)

$$= 22.7 \quad W / (m^2 \cdot K)$$

2) 無機絶縁ケーブルの発熱量

スロット中の無機絶縁ケーブルは、ケーブル外表面からの放熱及びコイルへの熱放射により、ケーブルの発熱量を算出する。

$$Q' = \alpha \cdot A_1 \cdot (t_3 - t_2) + \sigma \cdot A_1 / \{1/\epsilon_1 + (1/\epsilon_2 - 1) \cdot A_1 / A_2\} \cdot (t_3 - t_2)^4$$

Q'	: 1スロット内ケーブルの発熱量 W
σ	: ステファン・ボルツマン定数 = 5.6687×10^{-8} W / (m ² K ⁴)
A_1	: ケーブル外表面積(8本束) = 0.008796m ²
A_2	: スロット内表面積 = 0.008085m ²
ϵ_1	: ケーブルの放射率 = 0.2 (NCF600)
ϵ_2	: コイルの放射率 = 0.2 (電磁ステンレス)

$$Q' = 4.99 \text{ W}$$

ケーブル1本当たりの発熱量Qは

$$Q = Q' / 8 = 0.623 \text{ W}$$

3) スロット内のケーブル1本当たりの発熱量(設計値)

①ケーブルの抵抗値算出

$$R = \rho \cdot l / A$$

R	: 抵抗 Ω
ρ	: 銅の比抵抗 = 2.04×10^{-6} Ω · cm (t ₃ 時)
l	: スロット中のケーブル長さ = 20 cm
A	: 銅芯の断面積 = $d^2 \cdot \pi / 4 = 0.020 \text{ cm}^2$
d	: 銅芯の径 = 0.16 cm

$$= 0.0037 \Omega$$

②ケーブルの発熱量

$$Q'' = R \cdot I^2$$

Q''	: ケーブル1本当たりの発熱量 W
I	: 電流値 = 13A (MAX)

$$= 0.625 \text{ W}$$

4) 高温時における無機絶縁ケーブルの評価

上記の計算結果より、310°C、9.9 MPa の蒸気中における無機絶縁ケーブル表面温度は 360°C 程度と考えられる。

無機絶縁ケーブルは、シース表面温度 400°C 以下そのため、使用にあたっては特に問題無いものと考えられる。

(3) 計算に使用した式及び物性値

計算式及び各物性値は、日本機械学会編 電熱工学資料 改訂第4版によるものである。

※一部物性値については、改訂第3版から使用した。

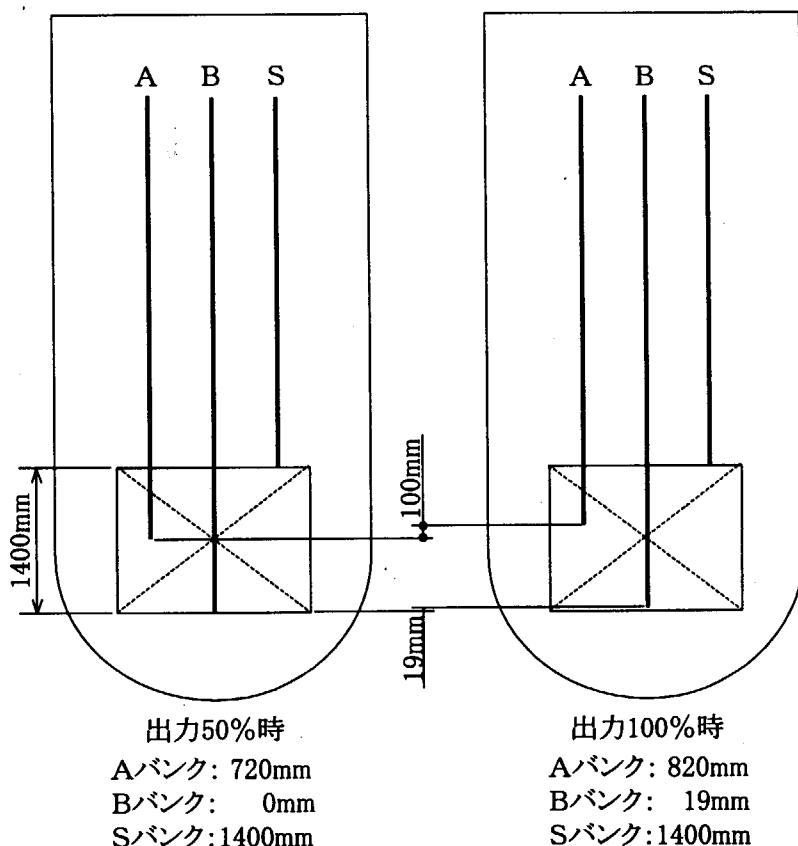
改良船用炉負荷追従運転時制御棒位置

1. 目的

革新的小型炉の負荷追従運転時における制御棒移動量を推定するため、改良船用炉のシミュレータを用いて、50%出力運転時と100%出力運転時の制御棒位置を算出した。

2. 制御棒位置

50%出力運転時と100%出力運転時における制御棒相対位置（制御棒移動距離）を添付図1-1に示す。添付図に示すように、50%から100%の負荷追従運転時における最大制御棒移動距離はAバンクの100mmであるが、これにBバンクの移動量を加算し119mmを制御棒移動量と仮定する。これは炉心高さの8.5%である。従って、革新的小型炉における50%負荷追従運転時の制御棒移動距離を炉心高さの8.5%と仮定する。



添付図 2-1 負荷追従運転時制御棒位置

蒸気中転がり摩耗試験結果（温度効果）

1. 目的

蒸気中転がり摩耗試験における温度の影響を確認するため、過去に実施した試験結果をまとめた。

2. 試験条件

(1) 試験片材質

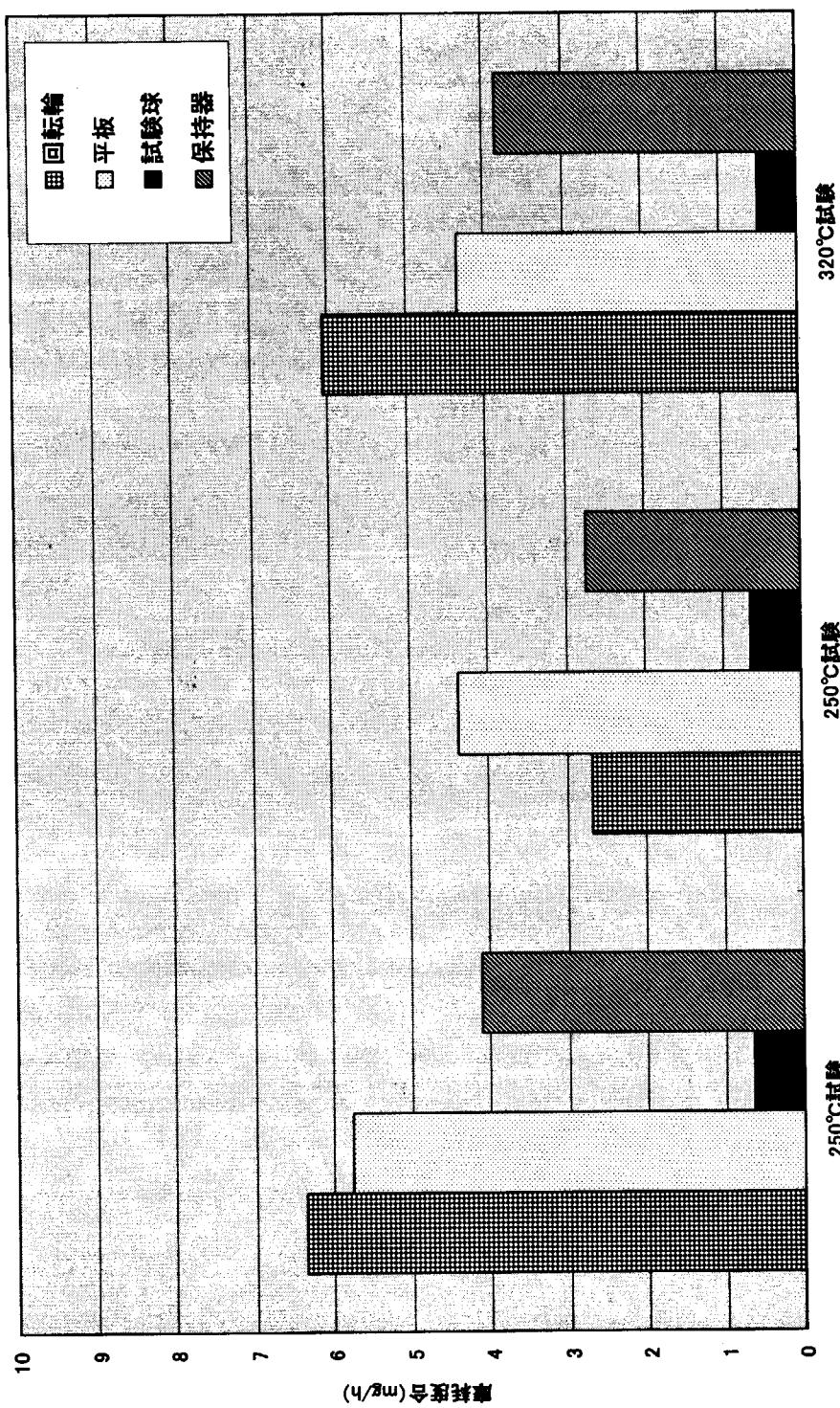
平板試験片	:	SUS316 にステライト N0.1 盛金
回転輪	:	同 上
試験球	:	サーメット
保持器	:	グラファイト ISO-63 (ショアD硬さ 80)

(保持器のポケットは片面からのみのアクセスであり、球の上に保持器が乗る形状)

- (2) 温 度 : 320°C 及び 250°C (250°C は 2 ケース)
- (3) 環 境 : 飽和水蒸気中
- (4) 圧 力 : 飽和蒸気圧
- (5) 回転数 : 185 rpm (実機 50rpm 相当周速)
- (6) 荷 重 : 490N
- (7) 試験時間 : 219 時間
- (8) 試験ケース数 : 320°C 試験 1 ケース、250°C 試験 2 ケース

3. 試験結果

試験結果を添付図 3-1 に示す。添付図に示す様に、320°C 試験は 2 回実施した 250°C 試験のばらつきの範囲であり、試験温度の差による影響は小さいと判断できる。尚、この 250°C 試験と 320°C 試験において、保持器は球の上に乗っているだけの構造のため、保持器は回転輪に接触して摩耗が生じていた。



250°C (蒸気中、水中) における予備試験結果

1. 概要

水中と蒸気中における転がり摩耗特性を把握するため、250°Cの水中及び蒸気中で転がり摩耗特性予備試験を実施した。

2. 試験条件

(1) 試験片材質

平型試験片	: SUS316 にステライト N0.1 盛金
回転輪	: 同 上
試験球	: サーメット
保持器	: グラファイト ISO-63 (ショアD硬さ 80)

(添付資料-3に示す試験に於いて、保持器が回転輪に接触して摩耗が発生したため、この試験では保持器のポケットを両面から交互に開けた改良型とし、上下の試験球により保持器を挟む形状に変更した。)

(2) 温 度 : 250°C

(3) 環 境 : 飽和水蒸気中及び水中

(4) 圧 力

蒸気中試験：飽和蒸気圧 (約 10Mpa)

水中試験 : 加圧水 (最大 12Mpa)

(5) 回転数 : 185 rpm (実機 50rpm 相当周速)

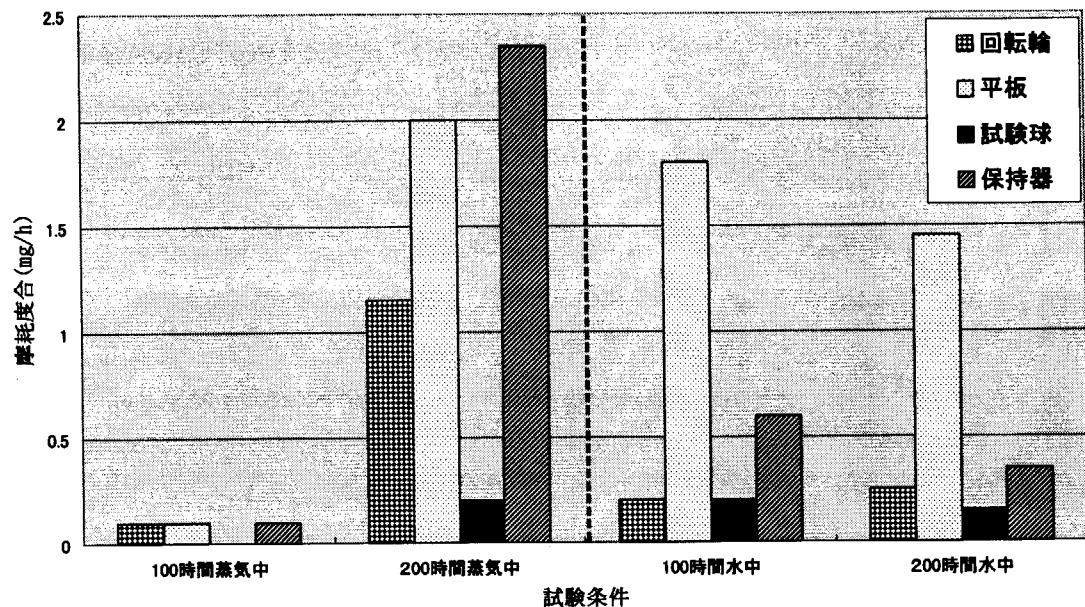
(6) 荷 重 : 490N

(7) 試験時間 : 累積 200 時間 (100 時間 + 100 時間)

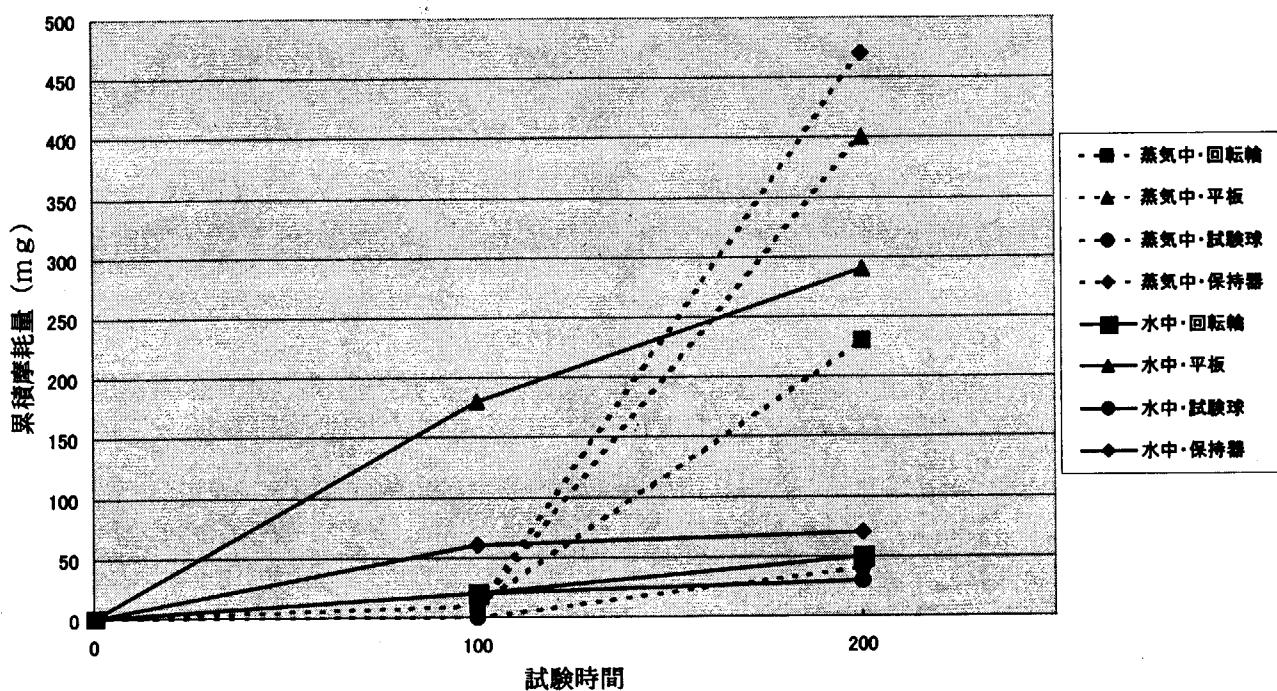
100 時間試験実施後に摩耗量測定を行い、更に 100 時間の試験を実施した。

3. 試験結果

250°C蒸気中及び水中での予備試験結果を添付図 4-1 及び添付図 4-2 に示す。これらの結果から、100 時間では水中の摩耗が多いが、200 時間では蒸気中の方が摩耗が多いことが分かる。つまり、蒸気中ではグラファイトによる安定した固体潤滑状態が得られ難く、摩耗が進行しはじめると一気に加速されるものと推察する。

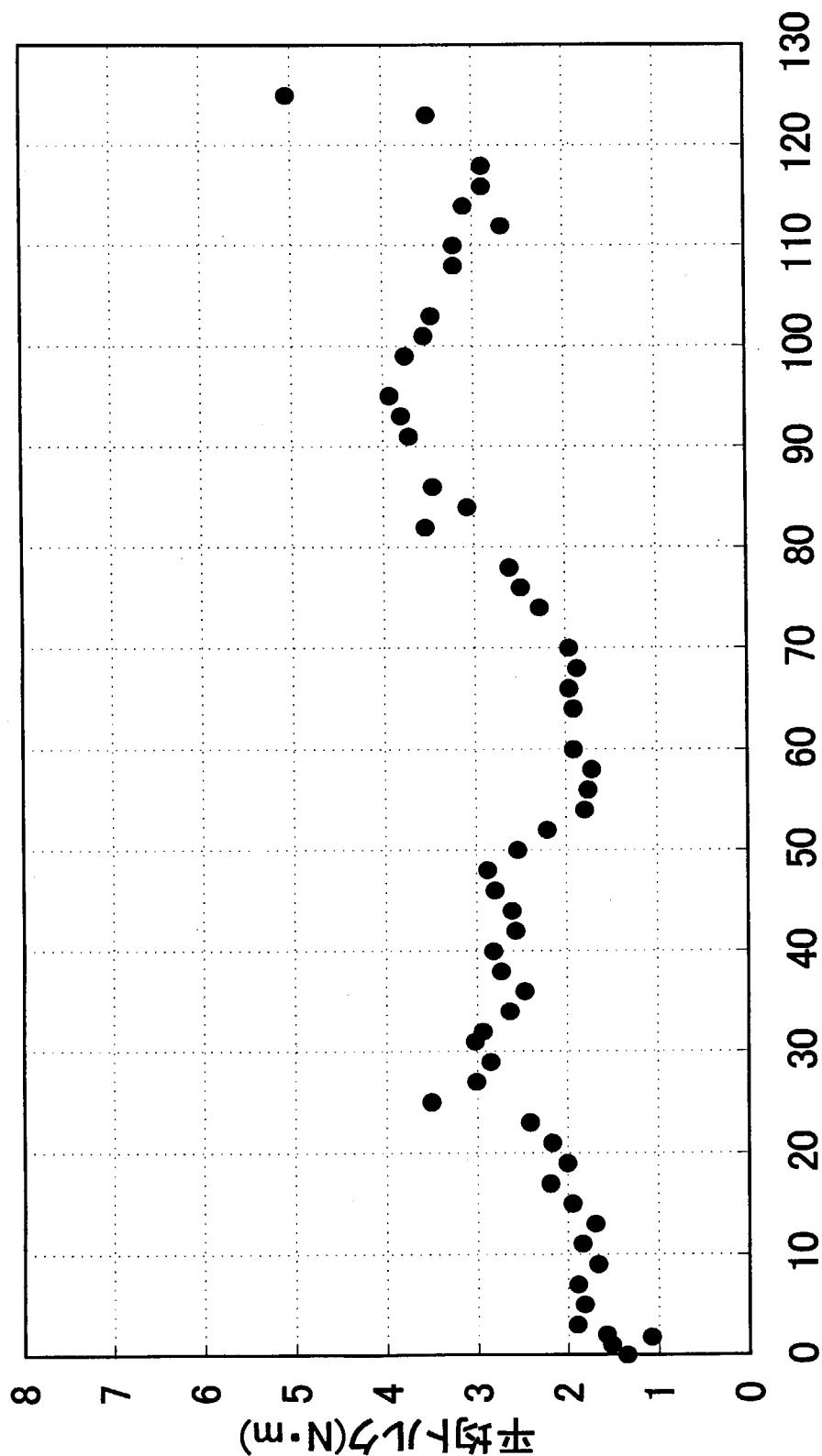


添付図4-1 蒸気中及び水中試験結果



添付図4-2 累積摩耗量の水中と蒸気中の比較

添付資料 - 5

布川浩他：JAERI-Tech2001-040³⁾から抜粋

添付図5-1 軸受耐久試験結果

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038	
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁶	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

革新的小型炉用内装型制御棒駆動装置の開発(受託研究)

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。