

# 多孔質サイアロン軸受の潤滑特性の改善

高知工科大学 知能機械システム工学科

トライボロジー 研究室

学籍番号 1020113

栄枝 将史

指導教員 竹内 彰敏

Thursday, February 28, 2002

# 目次

# page

## 第1章 緒言

- 1－1 研究背景 3～5
- 1－1 研究目的 5

## 第2章 実験装置概要ならびに実験方法

- 2－1 実験装置概要 6
- 2－2 回転速度の求め方 7
- 2－3 荷重Wの算出 7
- 2－4 摩擦係数の測定方法 7～9
- 2－5 試験片について
  - 2－5－1 試験片材質 9
  - 2－5－2 多孔質体について 9～10
  - 2－5－3 実験試験片 10～11
- 2－6 実験条件 11

## 第3章 実験結果および考察

- 3－1 実験結果
  - 3－1－1 多孔質セラミックスの特性と有効性 12～16
  - 3－1－2 本研究の実験結果 16～18

## 第4章 結言

- 4－1 実験結果のまとめ 19
- 4－2 参考文献 19～20

## 第5章 付録

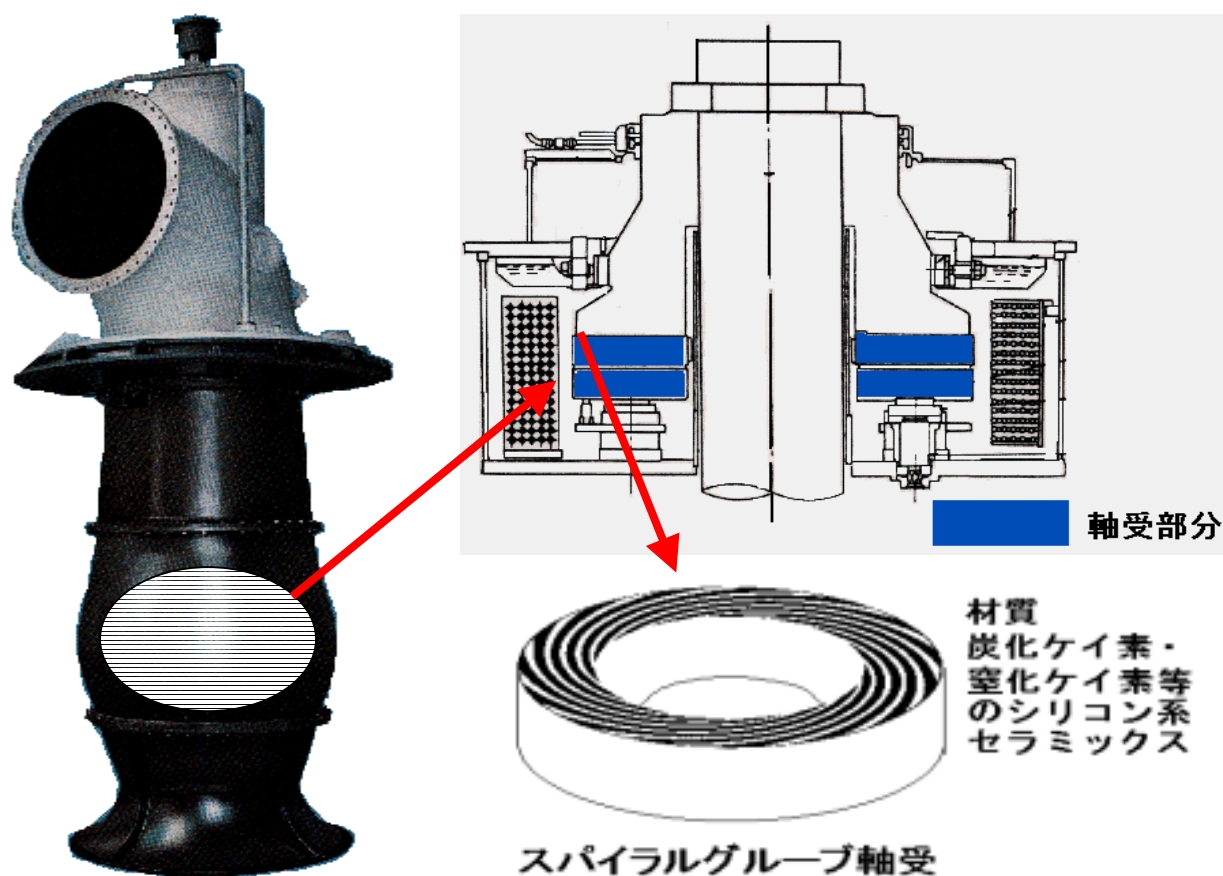
- 5－1 本実験で摩擦係数を表示させたプログラム 21～33
- 5－2 全測定データ 34～55

# 第1章 緒言

## 1-1 研究背景

例えば，上下水供給，雨水排水，海水取水，河川水取水等に用いられている立型軸流ポンプ等の流体機械では，その構成要素である軸受を自分の扱っている流体，すなわちプロセス流体で潤滑し，構造の簡略化を実現している。

しかし，水潤滑では水の粘度が低いため，油潤滑のような効率的な負荷の発生が期待できず，起動停止の過渡期には軸受面に十分な流体膜が形成されなくなり，混合潤滑あるいは境界潤滑となる可能性が高く，また，定常状態でも流体膜の剛性が低いため局所的な固体接触が生じると考えなければならない．そのような問題を防ぐために軸受荷重を支えるスラスト軸受には耐熱・耐食・耐摩耗性に優れ，水中摩擦によるトライボケミカル反応によって良好な潤滑が期待できるシリコン系セラミックスが使われる事が多い。そして、しゅう動面への効果的な動圧発生構造の付与により水潤滑下での良好な軸受特性を実現している。



<一般水中ポンプの軸受部と軸受構造>

### <トライボケミカル反応の軸受特性効果>

軸受のしゅう動部では摩擦によって固体の表面は局所的な接触、粉砕、などの機械的刺激を受ける。その結果表面では、格子欠落による触媒作用、温度上昇、結合開裂によるダングリングボンドの形成等が起きて化学的活性の高い新生面ができる。それらは雰囲気中の分子や潤滑剤と容易に反応を引き起こすため、摩擦面では非常に複雑な化学現象が誘起される。摩擦により活性化された表面で起きる反応はトライボケミカル反応とよばれ、摩擦材料の最表面の性状を変化させ摩擦特性に大きな影響を与える。以下に水潤滑下の窒化ケイ素セラミックスの例について、どのような化学的因子があるかについて述べる。

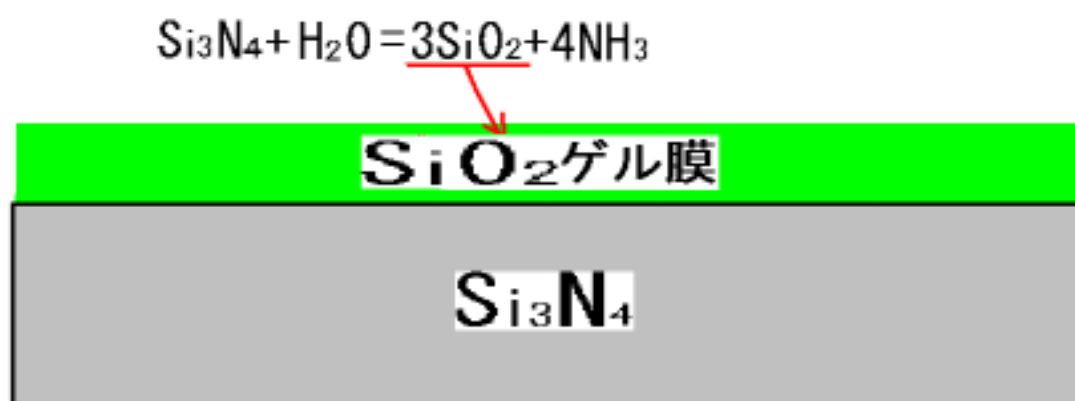


図1－1窒化ケイ素セラミックスのトライボケミカル反応

摩擦面では窒化ケイ素の成分  $\text{Si}_3\text{N}_4$  が潤滑剤の水  $\text{H}_2\text{O}$  と化学反応を起こし  $\text{SiO}_2$  と  $\text{NH}_3$  という物質ができる。この  $\text{SiO}_2$  は母材と比べ柔らかいため、真実接触部において固体接触を防ぐとともに、その塑性変形により応力集中を緩和して破壊的な摩耗を減らす働きをする。さらに水と反応することで、より柔らかい水酸化物もしくは水和物になり、軸受表面にゲル状の膜となって形成される。これが潤滑剤として作用して摩擦を下げる働きをされると考えられる。

### <動圧発生構造の軸受特性効果>

荷重が支えられた状態で固体壁面間に流体潤滑膜を形成するためには、荷重に釣り合うだけの圧力を潤滑膜中に発生させるとともに、摺動面外へ流出する量に見合う分の流体が摺動面へ供給される必要がある。

圧力発生原因の主たるものは、相対する摺動面が流体の運動方向に対して負の傾きをもち、摺動面間の隙間が運動方向に狭くなるよう形成された軸受構造により、粘性力でくさび状の隙間に引き込まれた流体分子同士の押し合いが発生する“くさび膜効果”である。

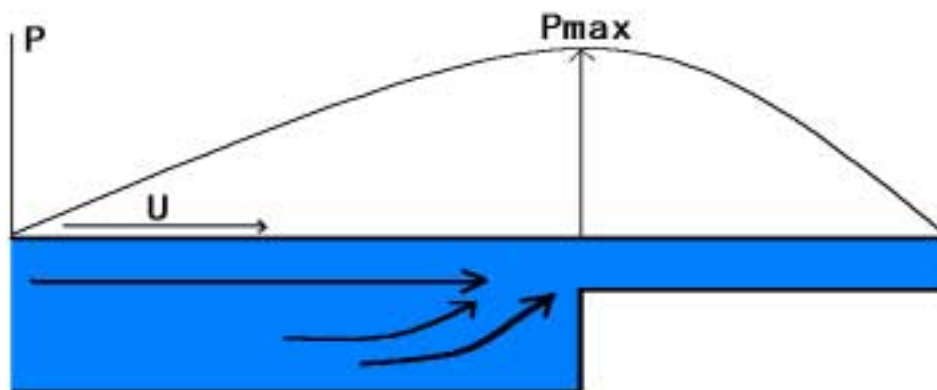


図1-2 くさび膜効果

特に、低粘度で負荷の発生が期待できない水潤滑下の軸受面への流体潤滑膜の形成には、摩擦面への効果的な動圧発生構造の付与が不可欠であり、このような“くさび膜効果”により水潤滑下での潤滑特性の改善を図っている。

このように上述したトライボケミカル反応と軸受表面への動圧発生構造の付与との相乗効果によって水潤滑下での良好な軸受特性を実現している。

## 軸受への動圧発生構造＋トライボケミカル反応



## 水潤滑化での潤滑特性の改善

### 1-2 研究目的

しかし、セラミックス材料への動圧発生構造の付与は、加工にかかるコストが高く、また、形成される流体膜が極めて薄い水潤滑下では、軸受面のうねりや粗さが軸受特性に大きく影響するため、これらの値を極力小さく抑える必要もあり、加工費はさらに高くなってくるという問題点がある。

そこで本研究では、より簡便で安価な方法で軸受に動圧発生構造を持たせるため、従来のように除去加工によりしゅう動面に軸受構造を持たせるかわりに軸受材料を連通型の気孔を持つ多孔質セラミックスとし、シアノアクリレートを浸透・固化して多孔質体の一部を埋没させることにより棚部を設け、軸受構造を付与する方法を試み、ここでは、そのように形成された簡易的多孔質軸受の基本的特性を調べ、その有効性についての検討を行った。

## 第2章 実験装置ならびに試験片

### 2-1 実験装置概要

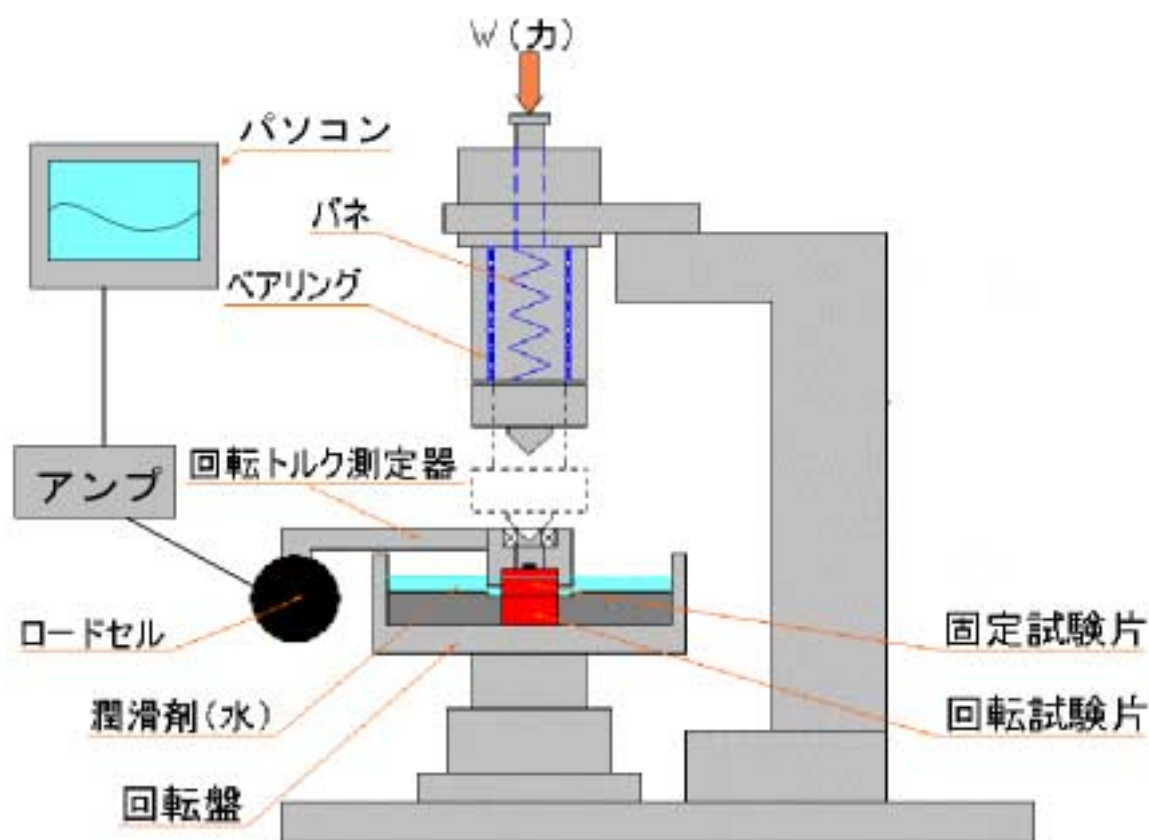


図2-1 摩擦係数測定装置

図2-1は、2面間の摩擦力の大きさを表す摩擦係数を測定する実験装置である。この装置は回転盤の回転速度と26N～114Nまで荷重の組み合わせにより、2面の接触状態を変化させる事ができる。

摩擦係数は、回転試験片の回転の影響を受ける固定試験片のトルクをロードセルで計測し、アンプを介してパソコンに出力する。

荷重は、荷重器上部のネジを回して円柱内のばねを縮め、そのバネの弾性力により固定試験片の上部に荷重を加える。また、固定試験片の上面にベアリングを設置し、そのベアリングのみに荷重器の先端が触れることによって、固体試験片のトルクへ影響のないようにした。また潤滑剤は水ポンプへの適用を想定して水道水を使用する。

次に本実験装置での測定の方法を説明する。

## 2-2 すべり速度の求め方

回転速度は

すべり速度  $= (\text{回転数: } r \text{ pm}) \times \pi \times (\text{回転盤直径: } m) / 60$   
で求めた。

## 2-3 荷重 W の算出

図2・1内に図示した荷重器内に使用したバネのバネ係数は  $11\text{N/mm}$  であり、荷重器の円錐突起形状の自重が  $355\text{g}$  ( $=4.283\text{N}$ ) であることから、ねじを  $X\text{mm}$  まわすことで接触面に与えられる荷重  $W$  (N) は

$$W \text{ (N)} = 11(\text{N/mm}) \times X(\text{mm}) + 4.283(\text{N}) = 11X(\text{N}) + 4.283 \text{ (N)}$$

と求められる。なお、今回の実験では小数点以下の表記を省略して荷重の表示している。

## 2-4 摩擦係数の測定方法

潤滑形態は大きく分けて4つの体系に分類される。2面の間に潤滑剤が無い状態を乾燥摩擦、潤滑剤が二面間に侵入し、十分な厚さの油膜ができて二面が十分にはなされた状態のものを流体潤滑、2面間に分子程度の厚さの油膜が存在する状態を境界潤滑、その2つが混合した状態のものを混合潤滑という。

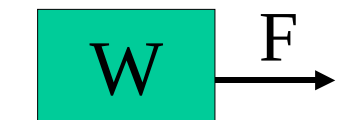
摩擦係数は流体潤滑から混合潤滑へ向かう過程で減少し、混合潤滑から境界潤滑へ向かう過程で急激に増加するため、摩擦の大小を論じるのに良く使われる。

摩擦係数  $\mu$  は次の式で定義されている。

$$\mu = F / W$$

$W$ : 接触面に垂直な荷重

$F$ : 摩擦力



今回は、 $F$  を摩擦面から離れた場所でロードセルにより測定する。そのため摩擦力  $F$  は

$$F = \beta L = \beta \lambda v$$

$\beta$ : 試験片中心から摩擦する箇所（後述）と試験片中心から

ロードセルまでの距離の比率

V：ロードセルで測定する数値がパソコンに入力された値

として求める。

$\beta$ を求めるにあたり、摩擦する箇所は試験片中心より 7.13mm離れた地点とする。

摩擦箇所は基本的に接触面全面である。その摩擦する箇所の平均として一点を挙げると半径の中心と考えられるが、今回使用する試験片では、試験片中央部に直径 6mm の穴が空けられていることから接触面の中心が中心より 7.13mm地点となるため全体を統一して上述値とした。

また、 $\lambda$ は次のようにして定めた。まずアンプを表 2. 3 の設定にする。次に 250 g から 1250 g まで 250 g おきにロードセルに垂直荷重を与え、パソコン上に表示される電圧値を記録していく。次にロードセルに与えた荷重 (N) を表示された電圧 (V) で除し、その値の平均値を  $\lambda$  とした。

表 2-2 アンプの設定

| DC AMPLIFIER SA-56/57 |            |       |
|-----------------------|------------|-------|
| (摩擦係数表示のために使用したアンプ)   |            |       |
| CAL                   | 較正電圧極性スイッチ | OFF   |
| DC                    | DC-ACセレクター | DC    |
| FINE GAIN             | 利得微調整      | 右回しきり |
| GAIN                  | 利得設定       | 5000  |
| CAL(mV)               | 較正電圧セレクト   | 100mV |
| FILTER(Hz)            | ローパスフィルター  | 1Hz   |

摩擦係数を求める時に使用した A/D コンバータの設定を表 2-3 に示す。

表 2-3 A/D コンバータ仕様

| A/Dコンバータの設定値 |                |
|--------------|----------------|
| アナログ入力       |                |
| 入力方式         | シングルエンド入力      |
| 入力レンジ        | バイポーラ -10V~10V |
| アナログ出力       |                |
| 出力レンジ        | バイポーラ -10V~10V |



## 2-5 試験片について

### 2-5-1 試験片材質

今回の実験で使用する試験片材質は、全てサイアロン（ $\text{Si}_4\text{Al}_2\text{O}_2\text{N}_6$ ）製セラミックスである。

サイアロンはケイ素・アルミニウム・酸素・窒素で構成されていて、高温での強度・耐熱衝撃・耐磨耗性に優れ、また高剛性、軽量、低熱膨張等の特徴を有し特性としては窒化ケイ素に類似しており、水酸化物や水和物の形成による良好な潤滑特性が期待できる素材である。以下に窒化ケイ素とあわせて機械的性質を示す。

物性表

|                                          | サイアロン   | 窒化ケイ素   |
|------------------------------------------|---------|---------|
| 硬度 (HV)                                  | 1 7 0 0 | 1 4 5 0 |
| 曲げ強さ (Mpa)                               | 8 3 3   | 8 0 4   |
| 破壊靱性 ( $\text{Mpa}/\text{m}^{3/2}$ )     | 5. 3    | 6       |
| ヤング率 (Gpa)                               | 3 2 4   | 2 8 4   |
| 熱膨張率 ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) | 3. 0    | 3. 4    |

### 2-5-2 多孔質体について

多孔質体はセラミックス粉末を焼結させる際の助結剤が熱により蒸発しその部分が気孔になってできた材質である。

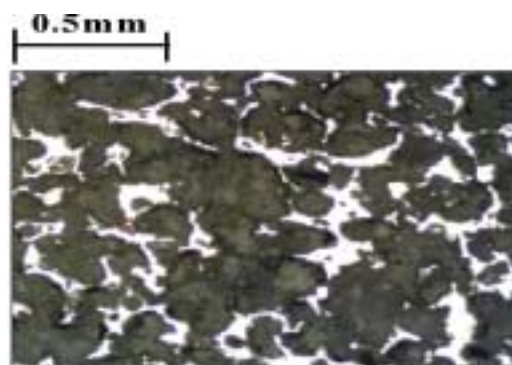


図2-1 多孔質試験片表面拡大写真

特性として軸受内に潤滑油が浸透する効果があり、軸受の回転に伴い軸受内に含浸されていた潤滑油が摺動面に吸出され、軸受が直接接触する事が避けられる。同時にこの潤滑油膜に回転により流体力学的に荷重を支えようとする圧力が発生するが、この圧力により一部の潤滑油が軸受内の気孔に押し戻され、軸受内の吸出により潤滑油が不足した部分へ連通気孔内をつうじて供給される。

### 2-5-3 実験試験片

この実験で使用する試験片について次に示す。

#### <回転試験片>

回転試験片は直径20mm 厚さ5mm で気孔率0%の緻密な試験片を使用する。



図2-2 緻密試験片

#### <固定試験片>

固定試験片には図2-2の緻密試験片と次に示す試験を使用する。なお、次に示す試験には6mmの穴をあけた。

##### 1) 多孔質未処理試験片

気孔率30%の多孔質体でなにも処理を施していないもの。

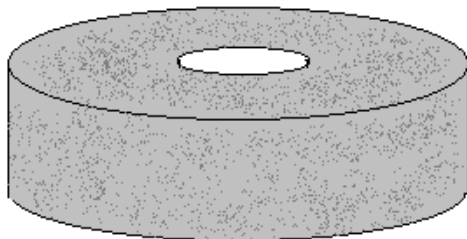


図2-3 多孔質試験片

##### 2) 多孔質全面処理試験片

上記の多孔質試験片にシアノアクリレートを全面に浸透・固化させた試験片。シアノアクリレートは一般家庭で使われている瞬間接着剤の成分で水分に触れると、瞬時に分子が結合し高分子化して固まる性質がある。

### 3) 扇状4個・8個試験片

図2-3のように多孔質試験片の一部にシアノアクリレートを扇状に浸透・固化させた試験片。

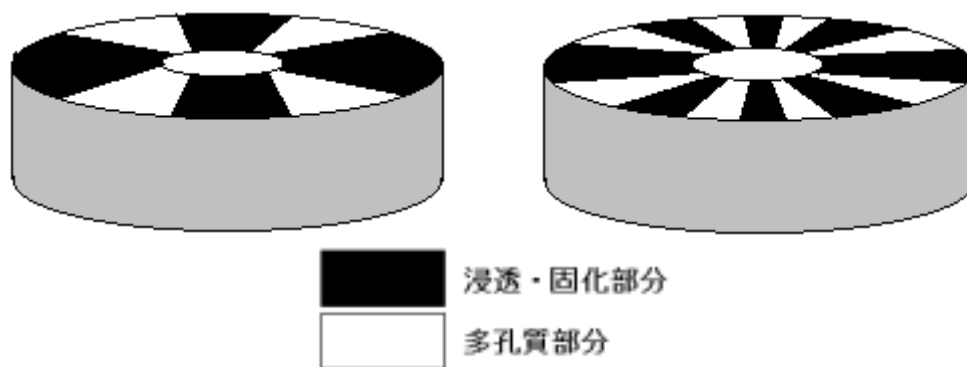


図2-3 扇状試験片

図2-3のように多孔質試験片の一部にシアノアクリレートを浸透・固化させることで図2-4のようにランド部ができ流体力学的に等価な多孔質溝深さ $h$ との段差部で“くさび膜効果”を生じさせる軸受構造をもたすことができる。

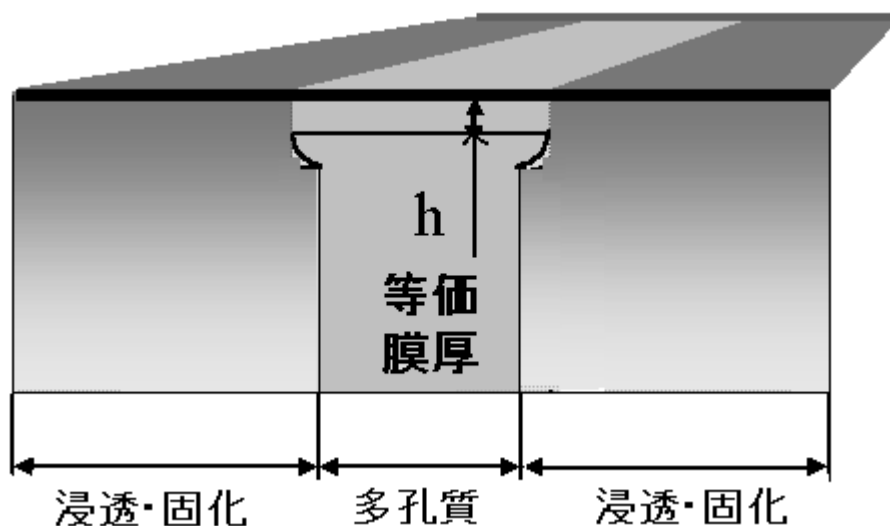


図2-4 シアノアクリレート浸透・固化によるくさび膜効果

以上に記載した試験片を使用する。

## 2-6 実験条件

以下に今回の実験条件を示す。

なお計測時間は5分、水温は22℃である。

### <すべり速度0. 2 m/sの時>

- ・回転試験片 緻密試験片
- ・固定試験片 多孔質未処理試験片・多孔質全面処理試験片・扇状4個試験片・8個試験片

### <すべり速度0. 1 m/sの時>

- ・回転試験片 緻密試験片
- ・固定試験片 緻密試験片・多孔質未処理試験片・多孔質全面処理試験片・扇状4個試験片・8個試験片

### <すべり速度0. 05 m/sの時>

- ・回転試験片 緻密試験片
- ・固定試験片 多孔質未処理試験片・多孔質全面処理試験片・扇状4個試験片・8個試験片

なお全すべり速度とも荷重を26N～114Nまで22Nステップで加えていき114N～26Nまで22Nステップで荷重を下げていく。これを2回繰り返し合計4回行う。

以上の実験条件で摩擦係数の測定を行った。

## 第3章 実験結果および考察

### 3-1 実験結果

#### 3-1-1 多孔質セラミックスの特性と有効性

まず、多孔質セラミックスの特性と有効性を検討するために九州大学で行った実験をもとに検討を行う。実験に使用した試験片は水中での摩擦によるトライボケミカル反応により良好な潤滑が期待できるシリコン系セラミックスの一つのSiCを使い、気孔率が殆ど0%の稠密体、約10%、20%の多孔質体の3種類であり、いずれも、直径30mm、厚さ5mmの円盤で、下部回転試験片として用いた。

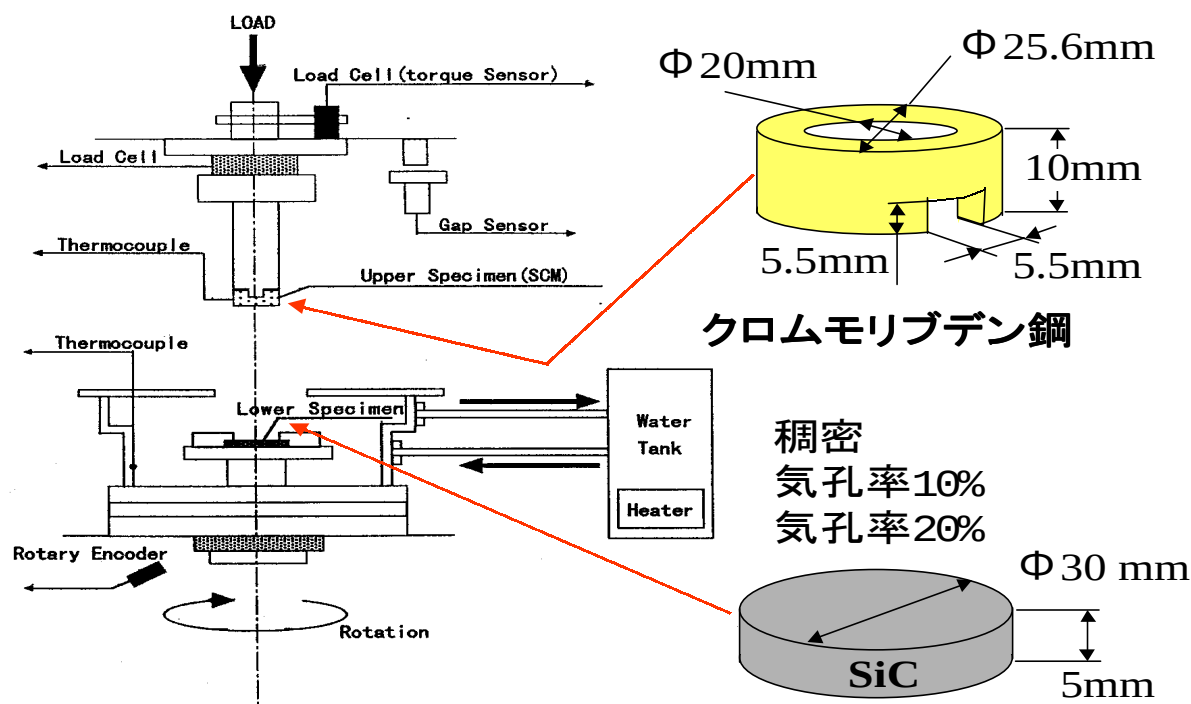


図3-1 円筒端面摩擦実験装置概略

一方、上部固定試験片は、図7-1の実験装置略図中に示した形状をもつクロムモリブデン鋼製であり、図中試験片下側の凹み部分を支持軸側の凸部に勘合させて用いているので、回転試験片との接触は図の上側の円筒端面で生じる。

潤滑剤としては蒸留水を使用し、下部回転試験片を覆うように設置された水槽内に、外部タンクからフィルタを通して供給される。なお、水温はヒータにより調整されている。

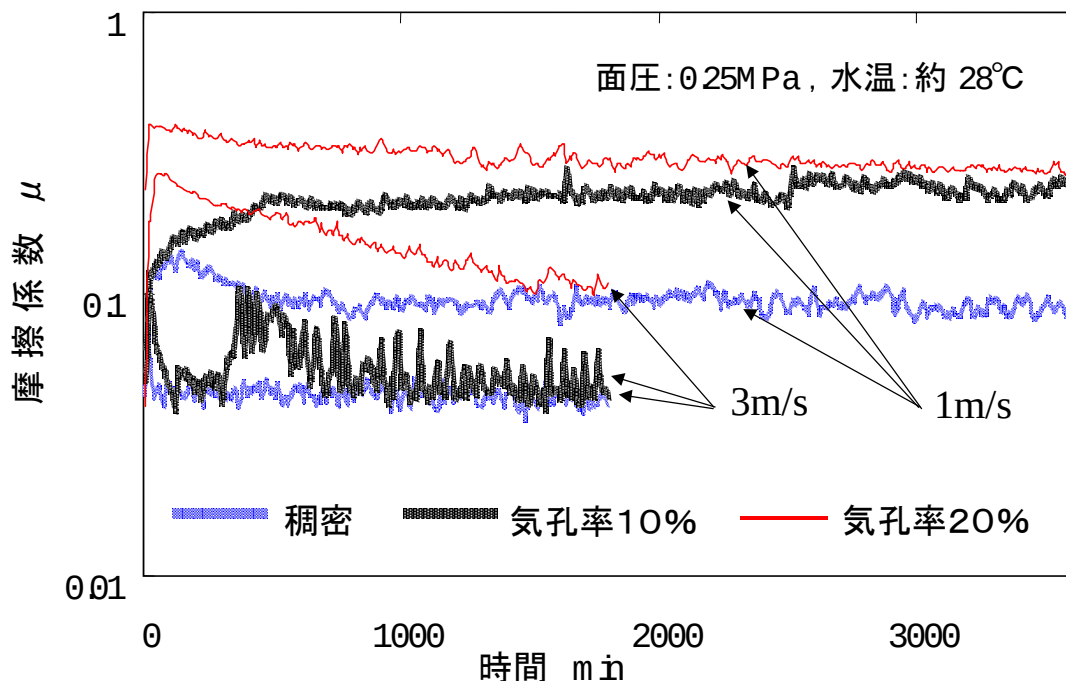


図 3-2 軸受面摩擦に及ぼす気孔率の影響

滑り速度 1m/s ならびに 3m/s の下で、面圧が 0.25Mpa になるよう荷重を負荷した場合の摩擦変化を図 7-2 に示してある。運転時間は 1m/s の場合が 60 時間(3600min)、3m/s の場合が 30 時間(1800min)である。

実験開始直後の 2 時間の摩擦に関しては、気孔率 20% を除いて稠密も 10% も殆ど違いが認められなかったが、時間の経過とともに気孔率の違いによる顕著な差が現れるようになり、60 時間経過後の摩擦は気孔率が高い粗な摩擦面ほど高くなる傾向にある。

この結果の主な原因としてすべり速度が高く、稠密面同士の組み合わせにおける 2 面間の潤滑は、まだ、流体潤滑が支配的な領域にあったことによると考えられる。

この場合、気孔内への流体の流入を伴う多孔質面では、流体膜の形成が困難であるため、荷重の大部分は固体接触部で支持されることとなり、摩擦も高い値を示すようになる。

次に、すべり速度 0.1m/s の下で順次荷重を増加させて混合潤滑の広範囲での摩擦特性を調べ、多孔質面・動圧発生構造付与面の有効性について検討した。

実験装置は図 2-1 とほぼ同じで、回転する水槽に装着された回転試験片(稠密)と摩擦トルク測定用のホルダに保持された固定試験片(稠密、気孔率 30% の多孔質, Sin 波状)間の摩擦を測定している。両試験片の直径は 20mm、厚さは 10mm であり、接触は両試験円柱の端面で生じる。直径 7.5mm での滑り速度は 0.1m/s、荷重  $W$  は 26, 48, 70, 92, 114N の 4 種類(面圧: 0.08~0.369MPa)で

あり、各荷重段階での測定時間は 5min とした。また、潤滑剤には水道水を用いた。

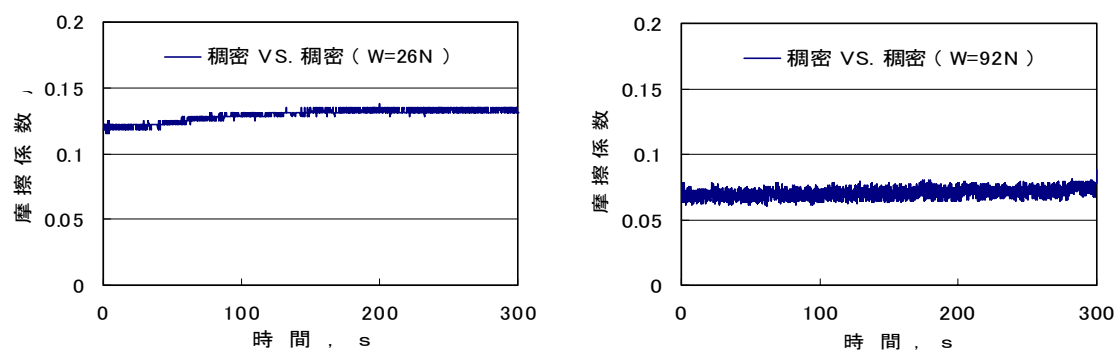


図 3－2 稠密試験片同士組み合わせ時の摩擦変化

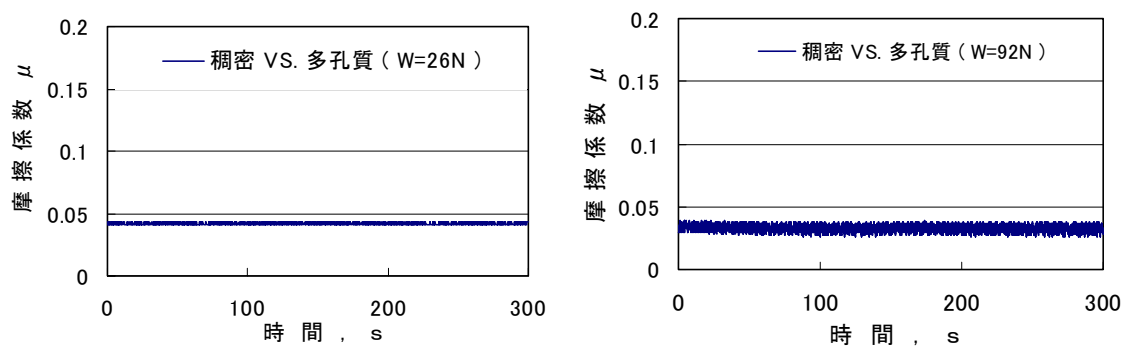


図 3－3 稠密回転試験片と多孔質固定試験片組み合わせ時の摩擦変化

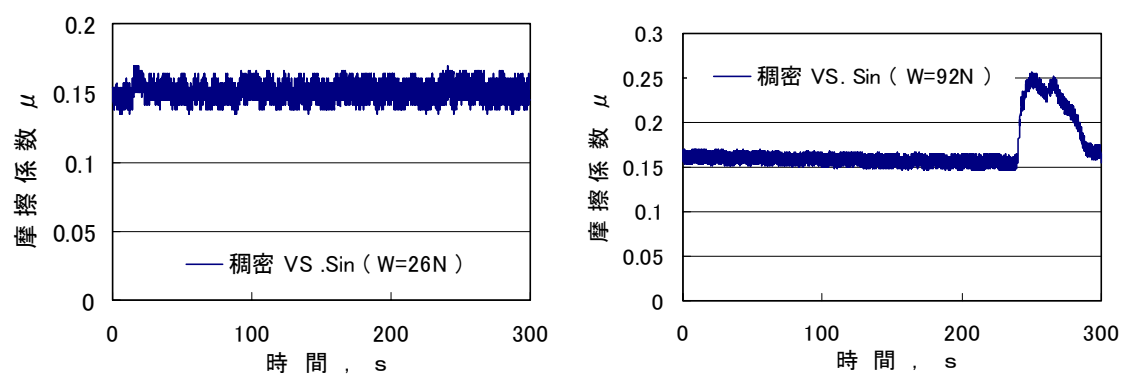


図 3－4 稠密回転試験片と Sin 波状稠密固定試験片組み合わせ時の摩擦変化

Sin 波状稠密固定試験片は、油潤滑下で良好な潤滑特性を示すことが明らかになっている、円周方向3波長、半径方向半波長の正弦波状動圧発生構造を持つ摩擦面である。他の試験片と異なり、図3-5中に示すような、内径10mm、外形20mm、平均直径15mmの摩擦面であり、図のような高分子マスクを円柱端面に貼り付けて、ブラスト加工により正弦波状凹凸面を創成したものである。

さて、図3-2から図3-4には、各摩擦面での摩擦の実測例を示してある。稠密面同士の組み合わせの場合の摩擦係数に比べて、多孔質面での摩擦は低く安定しており、その有効性が認められる結果となっている。本実験前に行ったなじみ運転前後の摩擦面の光学顕微鏡写真を図3-6に示したが、実験に用いたなじみ運転後の摩擦面では、白い固体部分の面積が大きくなっていることから、潤滑状態を左右する摩擦面表面の気孔率は初期の30%よりかなり低くなっているものと考えられる。

このような気孔率の減少に加え、表面の気孔部がそれぞれ小さな軸受の役割を果たして流体潤滑効果を生じさせたか、あるいは、トライボケミカル反応による良好な潤滑膜の形成が促進されたことにより、低く安定した摩擦が維持されたと考えられる。

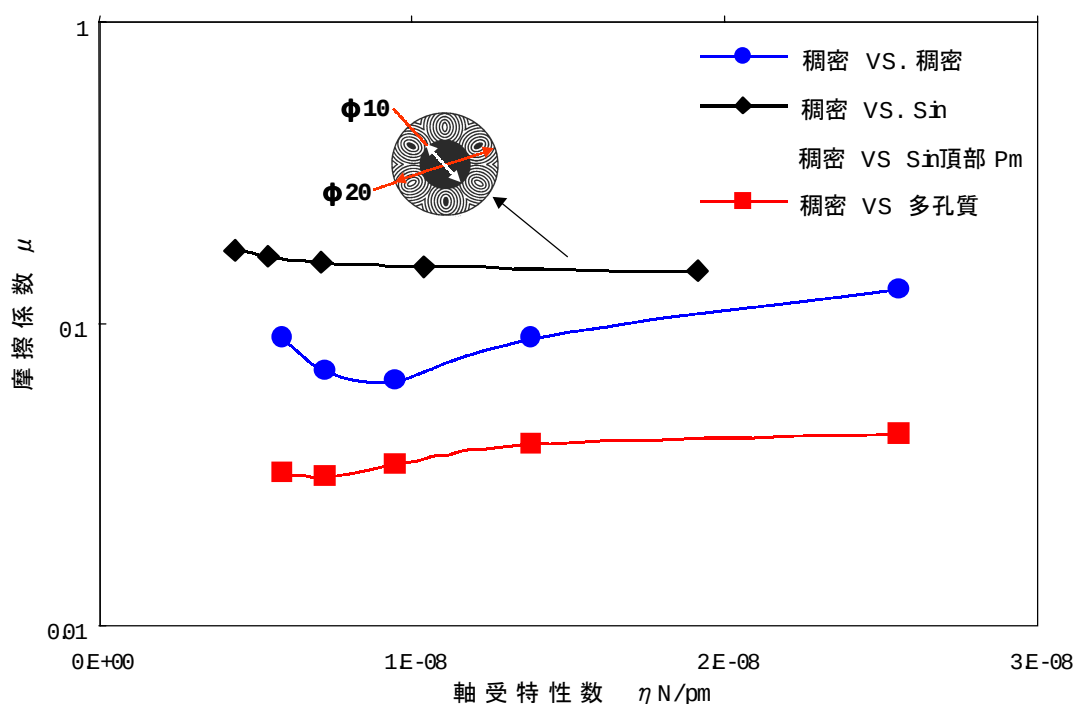


図3-5 各種摩擦面での軸受特性曲線

得られた摩擦係数の平均値を、他の荷重の結果も含め示すと図3-5のようになる。横軸の軸受特性数は粘度 $\eta$ と毎秒回転数 $N$ との積を軸受の平均面圧 $P_m$ で除した無次元数であり、この値が小さくなるほど高荷重・低回転の過酷



な運転状態に移行すると考えてよく、上述した多孔質面の有効性は軸受特性数の広い範囲に渡って認められる。

これに対し、摩擦面上に Sin 波状の凹凸を形成した軸受面での摩擦は高い値を維持するようになり、潤滑上好ましくない状態に陥る。固体接触をする 3 箇所の摩耗面積で計算し直した軸受特性数は、図 7-9 中の（稠密 VS. Sin 頂部 Pm）で示すように、極めて小さな値となる。

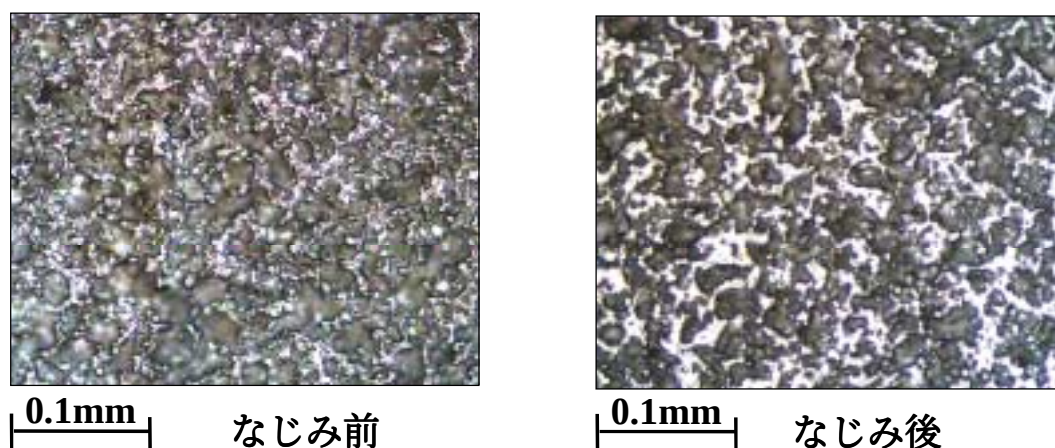


図 3-6 実験前後の多孔質摩擦面の光学顕微鏡写真

### 3-1-2 本研究の実験結果及び考察

上述したように、通常の油潤滑下において流体膜発生に貢献している摩擦面表面への軸受構造の付与は、水のように低粘度で流体膜の発生が期待できない潤滑剤の下では、突部への負荷の集中を生じさせ、固体摩擦を大きくするため、多孔質摩擦面の場合よりかえって過酷な潤滑状態に陥り易くさせる。

以上の多孔質の特性と突部への負荷の集中による摩擦の影響を考慮して作られたのが本研究で使用する試験片である。

以下に本研究での実験結果を示す。

図 3-7 は回転速度 0.1 m/s 荷重 26 N での摩擦係数の測定例である。平面同士の接触で動圧発生が期待できない緻密試験片同士の場合の摩擦係数は高くしかも大きく変動している。

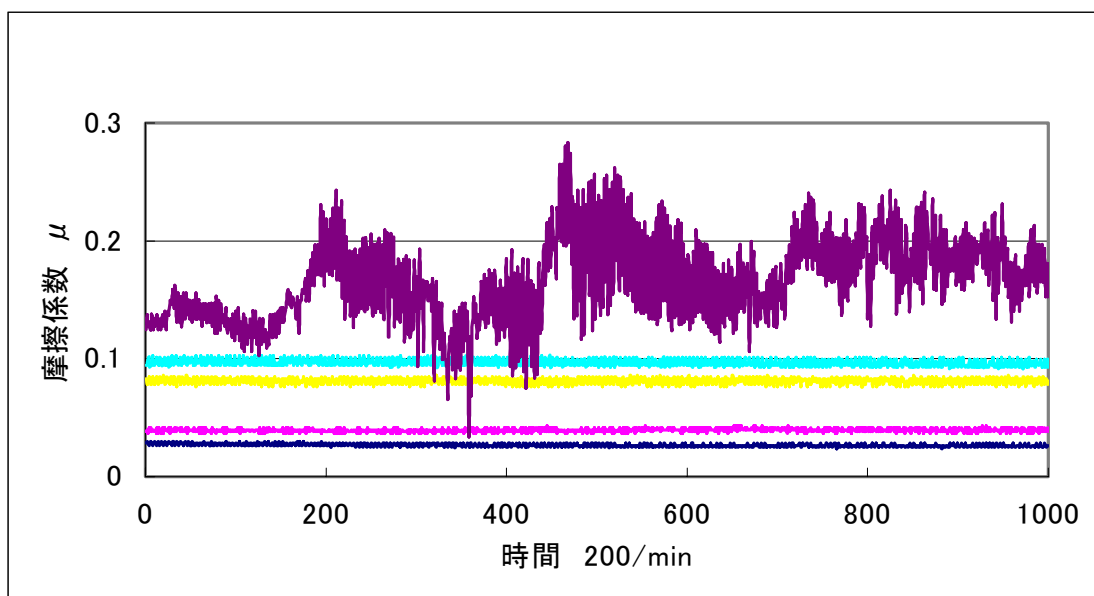


図 3－7 試験片別摩擦係数

しかし、表面に顔を出す粒子先端でのミクロな潤滑効果のある多孔質固定試験片での摩擦は低く安定している。これは多孔質体表面の微少な気孔がランド部の変わりとなってミクロな軸受効果に繋がったと考えられる。また、多孔質にシアノアクリレート进行浸透・固化させた試験片での摩擦係数はさらに低く、特に表面に扇状のランド部を設けた試験片での摩擦は、多孔質のままの場合の半分以上以下に下がっている。これは多孔質体に“くさび膜効果”を生じさせる動压発生構造をもたせることにより潤滑特性が向上したためと考えられる。また、同じ動压発生構造を持たせた多孔質体でもランド部が4箇所あるものより8箇所ある形状の方が摩擦が低く現れている。

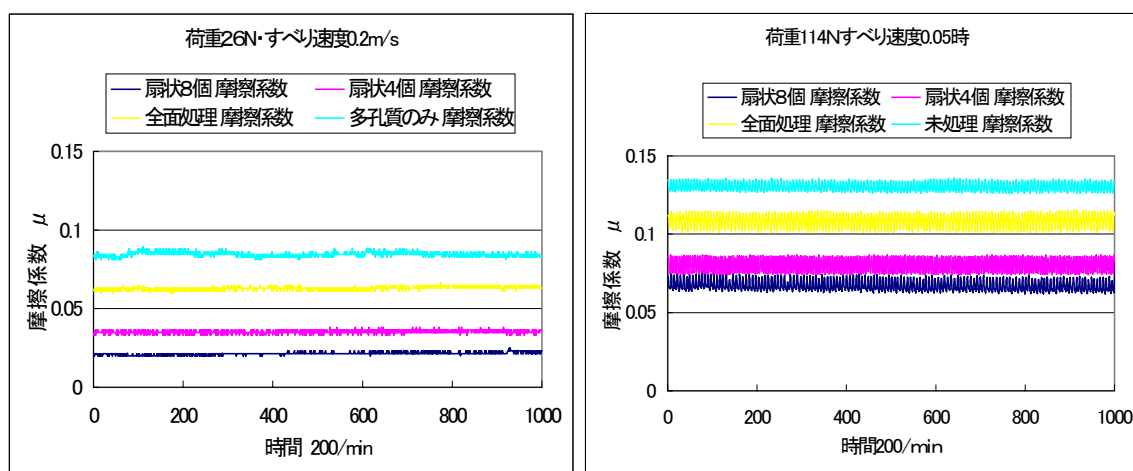
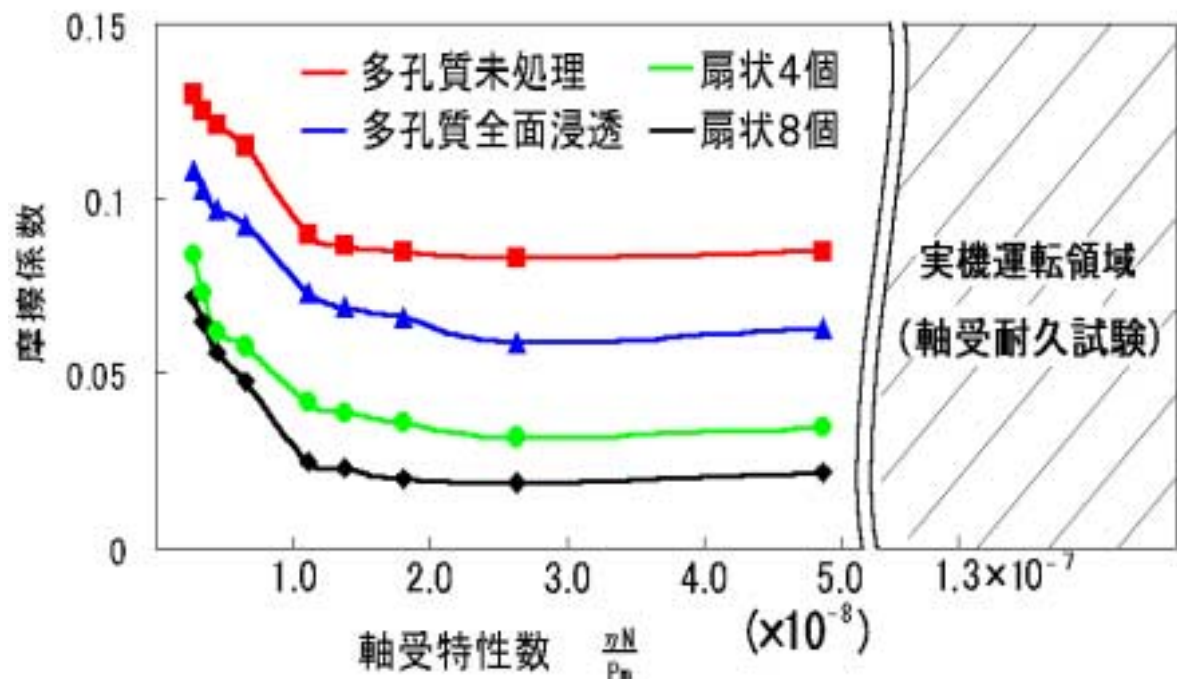


図 3－8 高回転・低荷重時の摩擦係数 図 3－9 低回転・高荷重時の摩擦係数

図3-8・3-9は荷重26N・すべり速度0.2m/s時の摩擦係数と荷重114N・すべり速度0.05m/s時の摩擦係数を表したものである。

全体的に図3-8の摩擦は図3-9に比べ摩擦係数は低く、摩擦変動も安定していることから、図3-8は流体潤滑状態、図3-9境界潤滑状態の非常に過酷な運転状況にあると推測される。また、このような境界潤滑状態になると多孔質未処理試験片と扇形試験片摩擦係数の差が若干縮まっている。

図3-2は荷重26N～114N・すべり速度0.05条件での軸受特性数と摩擦係数との関係を表したものである。



各種固定試験の中で、扇状8個の試験片での摩擦は軸受特性数の広い範囲にわたって低く安定しており、良好な特性を示している。

図中右側の実機運転領域は荏原製作所製の水中ポンプ資料に記載されていた軸受耐久試験の領域を示しているがその場合の軸受特性数は、今回の実験の約10倍である。

実機軸受の軸受耐久試験での摩擦係数が約0.18であるのに対し、約10倍程の過酷な条件下で行った「扇状8個」の摩擦特性は約0.02と低い値を示している。また最大荷重・最小回転時の多孔質未処理試験片の摩擦係数は0.135と過酷な運転状況時でも低い値を示している。

## 第4章 結言

### 実験結果のまとめ

以上の結果から、分かったことをまとめる。

- (1) 摩擦面表面に動圧発生用の凹凸を設けて流体潤滑効果を期待するより、むしろ平面同士の接触としてその一方に多孔質体を用い、多孔質体表面の微小軸受効果とトライボケミカル反応膜効果により、良好な潤滑膜の形成を促進さす方が、低く安定した摩擦が得られ易い。
- (2) しかし、稠密面同士の組み合わせにおいてマクロな流体潤滑効果が期待できる潤滑条件下では、気孔内への流れにより負荷容量が低下して固体接触が頻繁になる多孔質体のほうが摩擦は高くなる。
- (3) 以上の事を考えて、多孔質体の一部にシアノアクリレートを浸透・固化させてランド部を設け、“くさび膜効果”を生じさせる動圧発生構造をもたすことにより、水潤滑下で有効なシリコン系セラミックスの潤滑特性を、更に向上させられる可能性が明らかになった。
- (4) またこの軸受はトライボケミカル反応と動圧発生構造による潤滑特性の向上だけでなく、材質を多孔質セラミックスにし、表面を除去加工しない事でトライボケミカル反応によって発生する水酸化物や水和物の膜が容易に形成されやすく、更に多孔質体表面のミクロな潤滑効果が期待できるという特徴があるのではないかと考えられ、この特徴により水潤滑下での潤滑特性が向上したと考えられる。

最後に使用した実験装置の一覧を下に記述する。

| 実験装置一覧                             |
|------------------------------------|
| A/D コンバータ (AD12-16 (PCI) E、CONTEC) |
| アンプ (SA-56/57 DC AMPLIFIER、TEAC)   |

### 参考文献

- “トライボロジスト” 第46巻 第9号 (2001) 708-713  
摩擦・摩耗特性に影響を与えるしゅう動面での化学現象 日比 裕子
- “潤滑” 第33巻 第8号 (1988) 685-690  
セラミックスの摩擦・摩耗に及ぼす水の影響について 佐々木 信也

(社) 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集

SiC 表面の浅窪みが水潤滑下の摩擦係数に及ぼす影響 王 暁 雷 等

“トライボロジスト” 第35巻 第8号 (1990) 575-581

セラミックス製スパイラルグリーブスラスト軸受の水潤滑下における起動特性

木村 芳一等

“トライボロジスト” 第34巻 第8号 (1989) 743-749

低粘度液潤滑下におけるセラミックス製スパイラルグリーブスラスト軸受の  
特性一起動・停止における耐久性一

木村 芳一等

トライボロジー概論

養賢堂

木村 好次 岡部 平八郎 共著

## 5 付録

### 5-1 摩擦係数を求める際に使用したプログラム

フォントが赤の箇所は既存のプログラムを改良した箇所である。

Option Explicit

Dim DataTable(2000) As Single

Dim Databox(2000) As Single

Dim heikin(2000) As Single

Dim wheight(2000) As Single

Dim a As Single

Dim b As Single

Dim c As Single

Dim i As Integer

Dim j As Integer

Dim m As Integer

Dim n As Integer

Dim p As Integer

Dim o As Integer

Dim vv As Integer

Dim Q As Integer

Dim X As Integer

Dim W As Single

Dim KAJUU As Single

Dim masa As Single

Dim masaturyoku As Single

Dim REV As Integer

Dim Ret As Integer

Dim ave1 As Single

Dim ave2 As Single

Dim ave3 As Single

Dim GrpXPos As Long 'X 軸の現在位置を保存

Dim Buffer(3) As Single 'データ保存用

Dim buf As Single

Dim LastVoltRange As Integer '16 進表示を戻すときのレンジを保存

'タイマイイベント

' A/D 変換をします

Private Sub AcxAio1\_Timer()

```
lblData.Caption = ""           '表示を消去します。
masatu.Caption = ""           '表示を消去します。
kaunto.Caption = ""           '表示を消去します。
avedata.Caption = ""          '表示を消去します。
command2.Caption = ""         '表示を消去します
Ret = AcxAio1.AcquireData(Buffer) 'データ取得
```

```
    If REV = 1 Then
        Ret = 1                'Ret=1 で停止
    End If
```

```
    If Ret = 0 Then
        If i <= AcxXY1.XMaximumRange Then
```

```
            KAJUU = 11 * W + 4           'W[荷重]=11[N/mm]*X[mm]
            masa = Buffer(0) * 1.574062186/2 'Load の値
            masaturyoku = masa * 11.22
            buf = masaturyoku / KAJUU     'Buffer(0)の値を摩擦係数に変
```

換

```
            AcxXY1.DisplayDataY GrpXPos, buf, 1           'グラフ表示 1
```

```
            '                If vv = 1 Then                'vv=1 で記録開始
            '                If Q <= AcxXY1.XMaximumRange Then
            '                Q = Q + 1
            '                DataTable(Q) = Buffer(0)
```

```
            '
            '
            masatu.Caption = masatu.Caption & "摩擦力" & Q & " = " &
Format(DataTable(Q), "0.0000") & Chr(13)
            End If
```

```

        End If
        m = m + 1
        If m >= AcxXY1.XMaximumRange Then REV = 1
    End If
    GrpXPos = GrpXPos + 1          'グラフ位置更新
    If Optcnt(0).Value = True Then 'XPOS レンジ長さ設定
        AcxXY1.XMaximumRange = 50
    Else
        If Optcnt(1).Value = True Then
            AcxXY1.XMaximumRange = 100
        Else
            If Optcnt(2).Value = True Then
                AcxXY1.XMaximumRange = 250
            Else
                If Optcnt(3).Value = True Then
                    AcxXY1.XMaximumRange = 1000
                End If
            End If
        End If
    End If
End If
If Combo1.ListIndex = 0 Then 'YPOS レンジ長さ設定
    AcxXY1.YMaximumRange = 20
    AcxXY1.YMinimumRange = 0
Else
    If Combo1.ListIndex = 1 Then
        AcxXY1.YMaximumRange = 10
        AcxXY1.YMinimumRange = 0
    Else
        If Combo1.ListIndex = 2 Then
            AcxXY1.YMaximumRange = 0.5
            AcxXY1.YMinimumRange = -0.1
        Else
            If Combo1.ListIndex = 3 Then
                AcxXY1.YMaximumRange = 0.3
                AcxXY1.YMinimumRange = -0.1
            End If
        End If
    End If
End If

```



```

Else
    If Combo1.ListIndex = 4 Then
        AcxXY1.YMaximumRange = 0.2
        AcxXY1.YMinimumRange = -0.1
    Else
        If Combo1.ListIndex = 5 Then
            AcxXY1.YMaximumRange = 0.1
            AcxXY1.YMinimumRange = -0.1
        End If
    End If
End If
End If
End If
End If
If REV = 0 Then
    If GrpXPos >= AcxXY1.XMaximumRange Then 'グラフの端まで来
た
        GrpXPos = 0
        AcxXY1.ClearData
    End If
End If
'ラベル表示

If Q <= AcxXY1.XMaximumRange - 1 Then
    Q = Q + 1
    heikin(Q) = masatoryoku
    Databox(Q) = masa
    DataTable(Q) = buf
    wheight(Q) = KAJUU

    kaunto.Caption = kaunto.Caption & "摩擦力" & Q & " = " &
Format(heikin(Q), "0.000") & Chr(13)
    masatu.Caption = masatu.Caption & "Load 力" & Q & " = " &
Format(Databox(Q), "0.000") & Chr(13)
    avedata.Caption = avedata.Caption & "摩擦係数" & Q & " = " &
Format(DataTable(Q), "0.000") & Chr(13)

```

```

        command2.Caption = command2.Caption & "荷重" & " = " &
Format(wheight(Q), "0.000") & "N" & Chr(13)
    Else
        Q = 0
    End If
    For i = 0 To AcxAio1.ChannelNumber - 1    '"No.* = 0.00000000"形式で表示
(Chr(13)は改行)
        If AcxAio1.InputRange >= 2 Then '電圧表示
            lblData.Caption = lblData.Caption & "Buffer." & i & " = " &
Format(Buffer(0), "0.00000000") & Chr(13)
        Else    'バイナリ表示
            If chkHex.Value = 1 Then    '16 進表示
                lblData.Caption = lblData.Caption & "No." & i & " = " &
Hex(Buffer(0)) & "h" & Chr(13)
            Else
                '10 進表示
                lblData.Caption = lblData.Caption & "No." & i & " = " &
Format(Buffer(0), "0") & Chr(13)
            End If
        End If
    Next i
End If

```

End Sub

Private Sub Com\_Click(Index As Integer)

```

    REV = 1
    lblData.Caption = lblData.Caption & "Buffer." & i & Buffer(0)
    masatu.Caption = masatu.Caption & "摩擦係数" & Q & " = " &
Format(DataTable(Q), "0.0000") & Chr(13)
    kaunto.Caption = kaunto.Caption & "摩擦力" & Q & " = " & Format(heikin(Q),
"0.0000") & Chr(13)

```

End Sub

Private Sub Comm\_Click(Index As Integer)

```

REV = 0
    lblData.Caption = ""           '表示を消去します。
    masatu.Caption = ""           '表示を消去します。
    kaunto.Caption = ""           '表示を消去します。
End Sub

```

'記録開始

```

Private Sub Command1_Click()
    m = 0
    a = 0
    b = 0
    c = 0
    p = 0
    Q = 0
    n = 0
    vv = 1
    GrpXPos = 0
    REV = 0
    AcxXY1.ClearData
    lblData.Caption = ""
    masatu.Caption = ""
    Call Teisi
End Sub

```

```

Private Sub Teisi()
    m = m + 1
    If m >= AcxXY1.XMaximumRange Then
        REV = 1
    End If
End Sub

```

```

Private Sub Dir1_Change()
    File1.Path = Dir1.Path
End Sub
Private Sub Drive1_Change()
    Dir1.Path = Drive1.Drive
End Sub

```

```

Private Sub File1_Click()
    Text1 = File1.FileName
End Sub

```

```

'-----

```

```

'フォームロード時の処理

```

```

Private Sub Form_Load()

```

```

    'フォームの位置を中央に

```

```

    Left = (Screen.Width - Width) ¥ 2

```

```

    Top = (Screen.Height - Height) ¥ 2

```

```

    AcxXY1.XMaximumRange = 100

```

```

    '設定ファイルの読み込み

```

```

    Ret = AcxAio1.LoadProperty("ACXAIO.INI")

```

```

    '自動検出

```

```

    If Ret <> 0 Then          '設定ファイルがなければ検出/登録を試みる

```

```

        Ret = AcxAio1.AutoDetect("AIO00")

```

```

        If (Ret = 0) Then

```

```

            AcxAio1.DeviceName = "AIO00"    'デバイス名 AIO00 のボードを選択

```

```

        End If

```

```

    End If

```

```

    '初期化

```

```

    fncOpen

```

```

End Sub

```

```

'-----

```

```

'フォームアンロード時の処理

```

```

Private Sub Form_QueryUnload(Cancel As Integer, UnloadMode As Integer)

```

```

    cmdEnd_Click

```

```

End Sub

```

```

'-----

```

```

'初期化処理

```

```

Sub fncOpen()

```

```

    p = 0

```

```

o = 0
m = 0
n = 0
vv = 0
Q = 0
REV = 0
AcxXY1.XMaximumRange = 100 'グラフ 1 の X 軸の幅(点数)
W = 0
Combo1.ListIndex = 4
Optcnt(1) = True
Dim StrCaption As String
AcxAio1.TimEnabled = False
Ret = AcxAio1.Open
If Ret = 0 Then
    fncDispProperty 'プロパティの設定を表示
    StrCaption = "簡易アナログ入力: " & AcxAio1.BoardName
    frmAcqData.Caption = StrCaption
    AcxAio1.TimEnabled = True
    GrpXPos = 0
    AcxXY1.ClearData
Else
    MsgBox "初期化できませんでした。[プロパティ]ボタンを押してボードを登録し
    た後" & Chr(13) & _
        "[初期化]ボタンを押してください"
End If
End Sub

'-----
'終了処理
Private Sub cmdEnd_Click()
    '現在の状態を保存

    Ret = MsgBox("現在の状態を保存しますか?", vbYesNo)
    If Ret = vbYes Then
        AcxAio1.SaveProperty ("ACXAIO.INI")
    End If

```

```

        AcxAio1.Close
    End
End Sub

'-----
'プロパティページの表示
Private Sub cmdShowProperty_Click()
    Dim tmpBoardName As String
    tmpBoardName = AcxAio1.BoardName
    AcxAio1.ShowProperty
    'プロパティページでボードが変更された？
    If tmpBoardName <> AcxAio1.BoardName Then
        DoEvents
        MsgBox "ボードが" & tmpBoardName & "から" & AcxAio1.BoardName & "に変更されました。" & Chr(13) & _
            "初期化しなおします。"
        fncOpen          '初期化時の処理
    Else
        fncDispProperty '設定表示を更新
    End If
End Sub

'-----
'プロパティの設定状態を表示
Sub fncDispProperty()
    Dim MaxRange As Single
    Dim MinRange As Single
    Dim ChkFlag As Integer
    DoEvents
    lblDisp.Caption = "ボード名：" & AcxAio1.BoardName & Chr(13) & _
        "I/O アドレス：" & Hex(AcxAio1.IoAddress) & " h" & Chr(13) & _
        "割込み：" & AcxAio1.IrqLevel & Chr(13) & _
        " レンジ：" & AcxAio1.GetSupportedRange(0,
AcxAio1.InputRange, ChkFlag)
    AcxAio1.GetInputRange MinRange, MaxRange 'グラフの Y 軸用にレンジ取得
    AcxXY1.YMaximumRange = MaxRange

```

```

AcxXY1.YMinimumRange = MinRange
txtTimInterval.Text = AcxAio1.TimInterval    'タイマ周期更新
If AcxAio1.ChannelNumber > 32 Then            'このサンプルは 32ch までです
    MsgBox "同時に表示できるチャンネル数は 32 です。", vbExclamation
    AcxAio1.ChannelString = "0-31"
End If
'ReDim Buffer(AcxAio1.ChannelNumber)          'チャンネル分の配列を定義
AcxXY1.ArrayNumber = AcxAio1.ChannelNumber    'グラフのライン数 = チャンネル
数
lblChannelString.Caption = AcxAio1.ChannelString
End Sub

```

```

Private Sub mnuOpen_Click()
    '開く
    Dim FileName As String
    'REV = 1
    ' AcxXY1.ClearData
    ' AcxXY2.ClearData
    i = 0
    If Right(Dir1.Path, 1) = "¥" Then
        FileName = Dir1.Path & Text1
    Else
        FileName = Dir1.Path & "¥" & Text1
    End If

    Open FileName For Input As #1

        For i = 1 To 100
            Input #1, DataTable(i)
        Next i

        ' For i = 1 To 20
        '     Input #1, Databox(i)
        ' Next i

    Close #1

    GrpXPos = 0

```

```

                For i = 1 To 100
                    AcxXY1.DisplayDataY      GrpXPos,      DataTable(i),
AcxAio1.ChannelNumber ' グラフ表示 1
                    GrpXPos = GrpXPos + 1 'グラフ位置更新 1
                Next i

'
                For i = 1 To 20
                    AcxXY2.DisplayDataY  GrpXPos,  Databox(i),
AcxAio1.ChannelNumber 'グラフ表示 2
                    GrpXPos = GrpXPos + 5 'グラフ位置更新 2
                Next i

End Sub

```

```

Private Sub mnuSaveAs_Click()

```

```

'保存

```

```

    Dim FileName As String
    Ret = MsgBox("[ " & Text1 & " ] で保存しますか?", vbYesNo)

    If Right(Dir1.Path, 1) = "¥" Then
        FileName = Dir1.Path & Text1
    Else
        FileName = Dir1.Path & "¥" & Text1
    End If

    Open FileName For Output As #1
        Write #1, "荷重"
        Write #1, KAJUU & "N" & Chr(13)
        Write #1, "摩擦係数"

        For i = 1 To 2000

```



```

        Write #1, DataTable(i)
    Next i

    Close #1

End Sub

Private Sub txtKajuu_Change()
    W = Val(txtKajuu.Text)
End Sub

'アナログ出力更新
' E シリーズボードなどで自己ループでテストするのに使用します
' フォームの下の方に隠れています
Private Sub txtSingleAO_Click()
    AcxAio1.SingleAO 0, Val(txtDADData.Text), 1
End Sub

'タイマ周期の変更
Private Sub txtTimeInterval_Change()
    AcxAio1.TimInterval = Val(txtTimeInterval.Text)
End Sub

'グラフクリア
Private Sub cmdClearData_Click()
    GrpXPos = 0
    AcxXY1.ClearData
End Sub

'16 進表示
Private Sub chkHex_Click()
    If chkHex.Value = 1 Then '16 進表示
        LastVoltRange = AcxAio1.InputRange
        AcxAio1.InputRange = 0 'オフセットバイナリにします
    Else '10 進表示
        AcxAio1.InputRange = LastVoltRange '16 進表示にする前のレンジに戻します
    End If
End Sub

```

```
End If  
cmdClearData_Click  
fncDispProperty  
End Sub
```

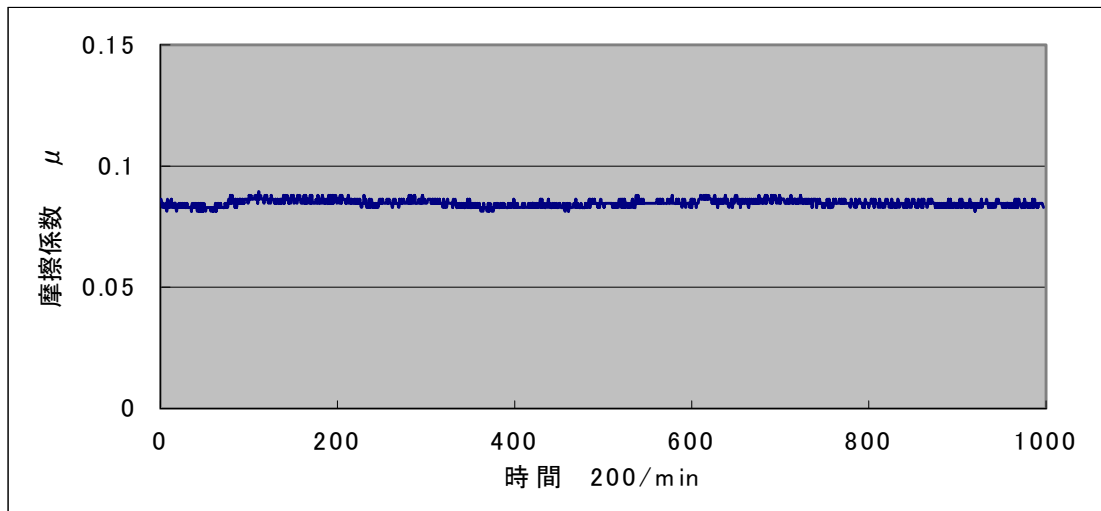
```
Private Sub VScroll1_Change()
```

```
End Sub
```

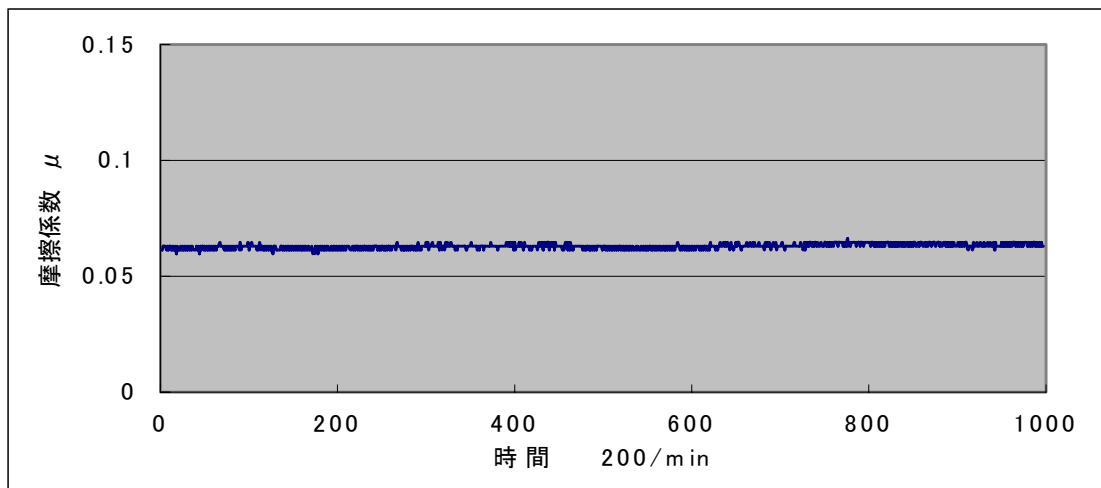
## 5-2 全測定データ

以下に今回測定した摩擦係数の結果を速度別・荷重別に表す。  
なお、グラフのY軸は摩擦係数 $\mu$ 、X軸は時間200/分を表している。

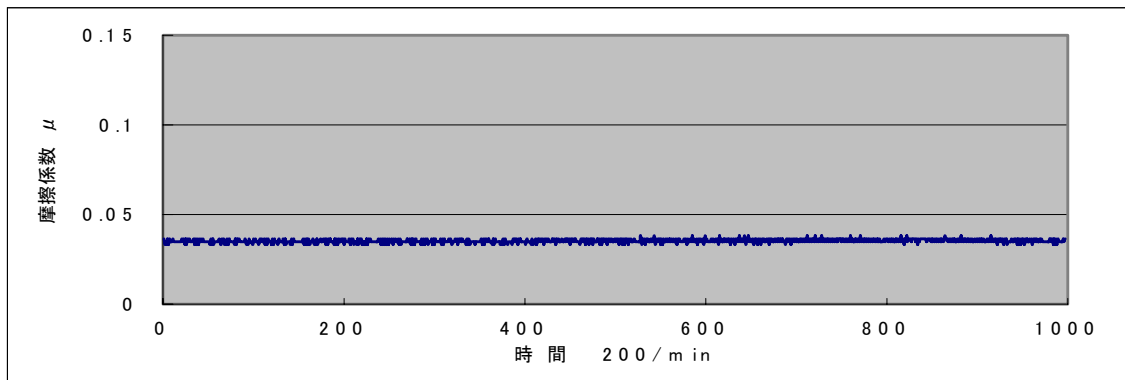
すべり速度0.2m/s・荷重26N時



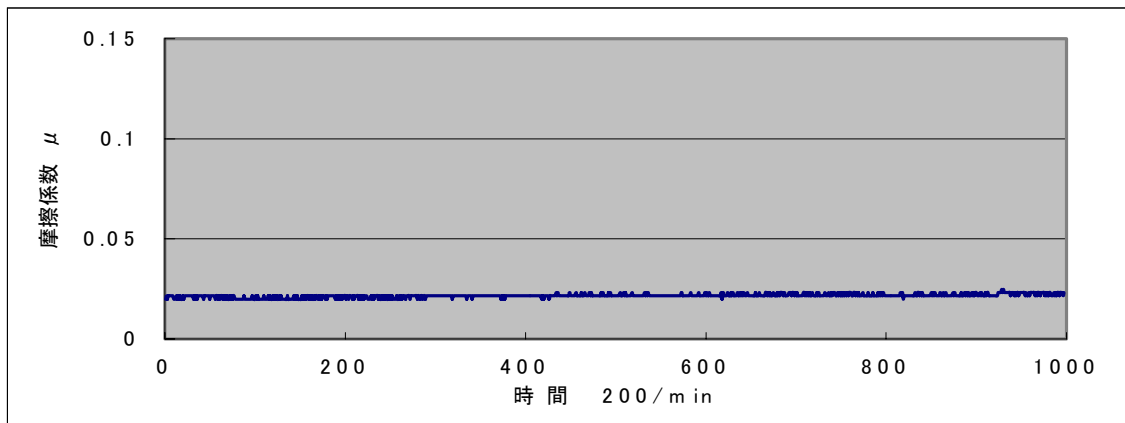
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

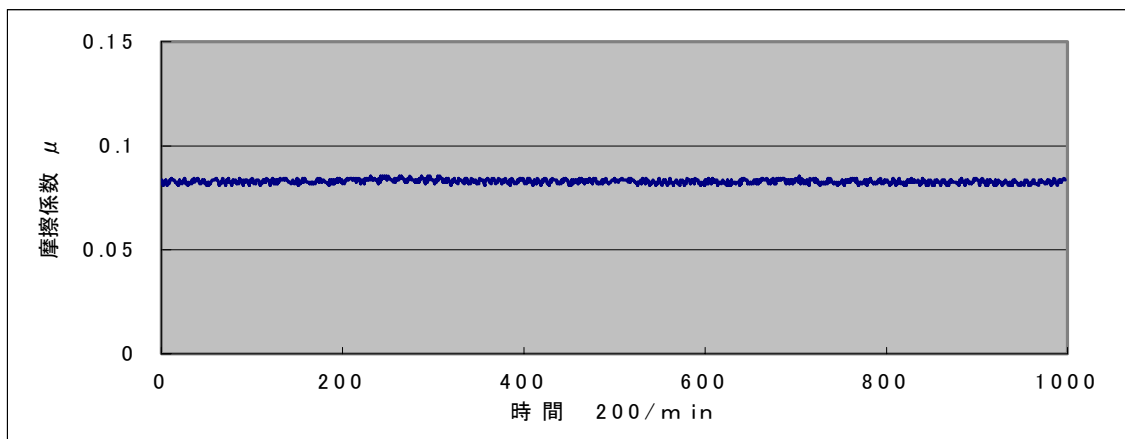


扇状4個試験片

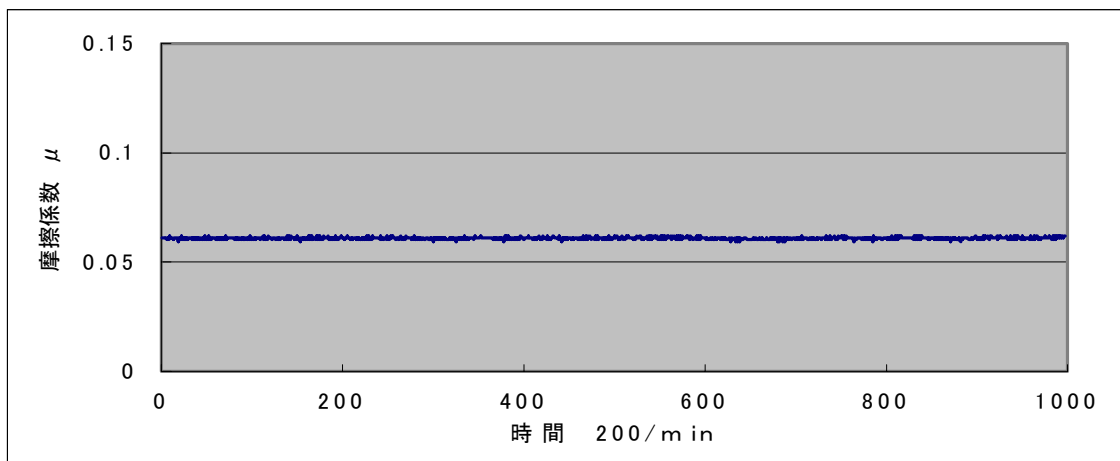


扇状8個試験片

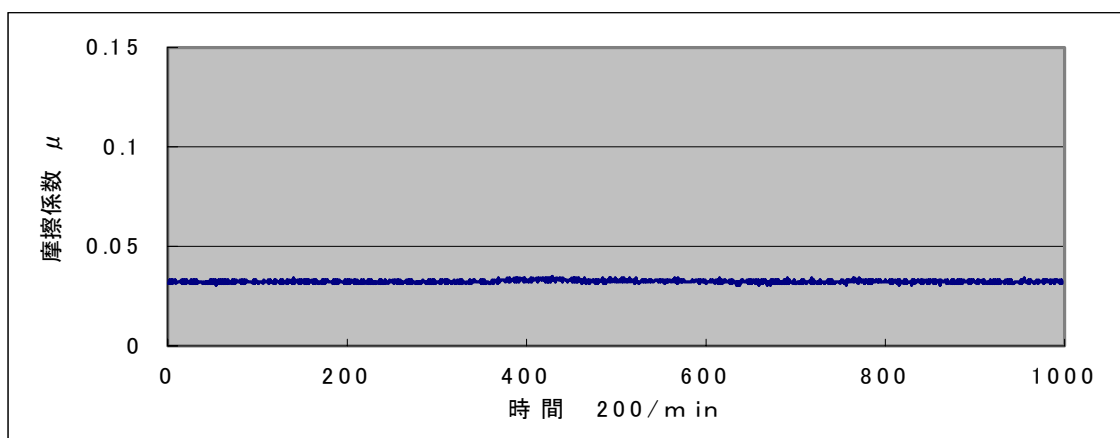
すべり速度0.2 m/s・荷重48 N時



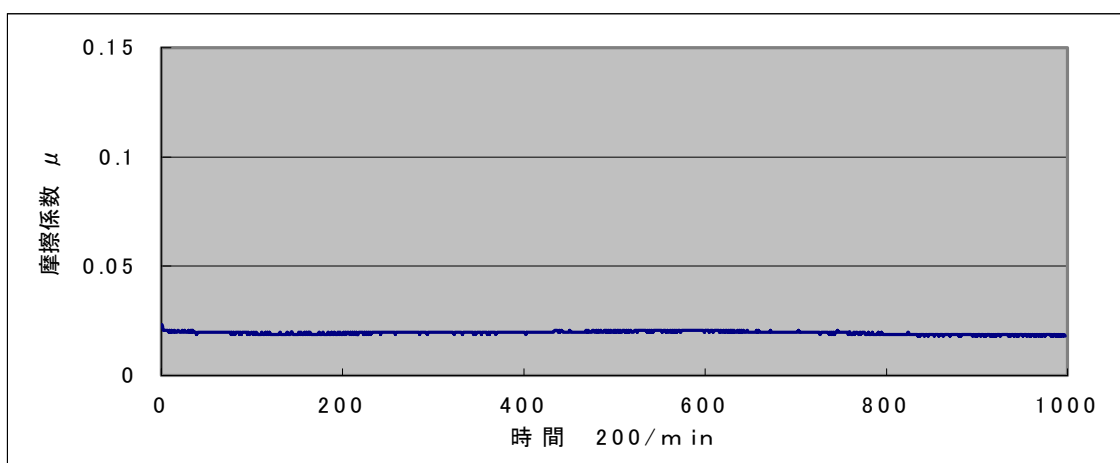
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

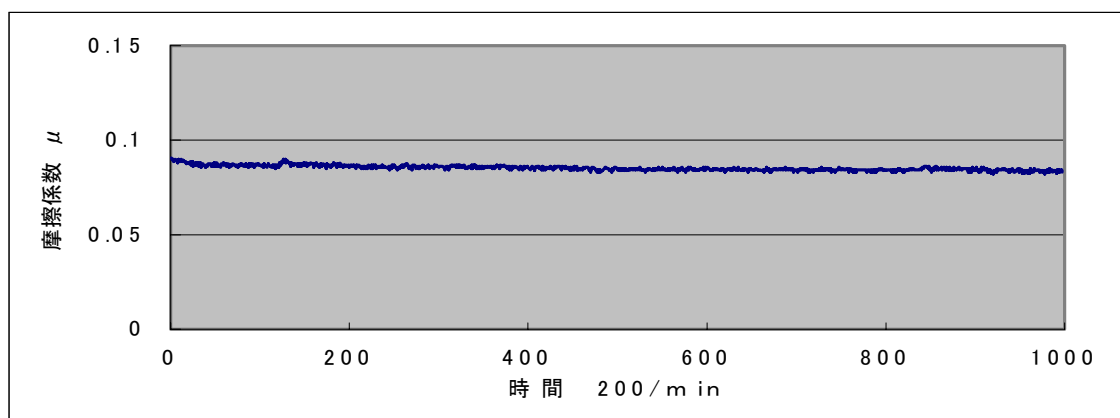


扇状4個試験片

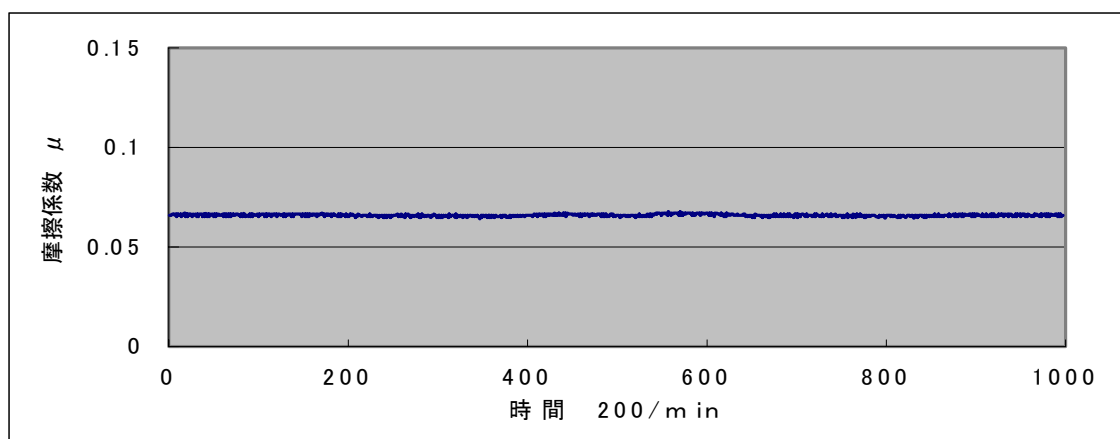


扇状8個試験片

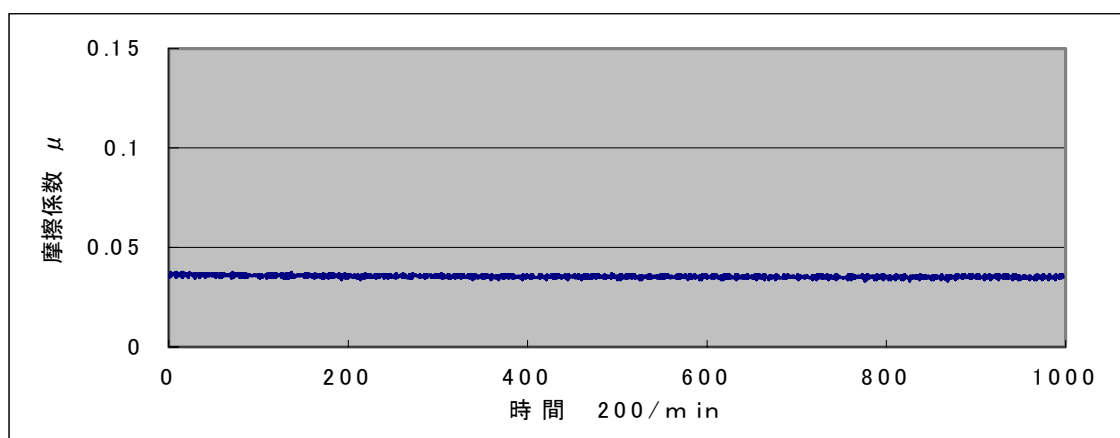
すべり速度0.2 m/s・荷重70 N時



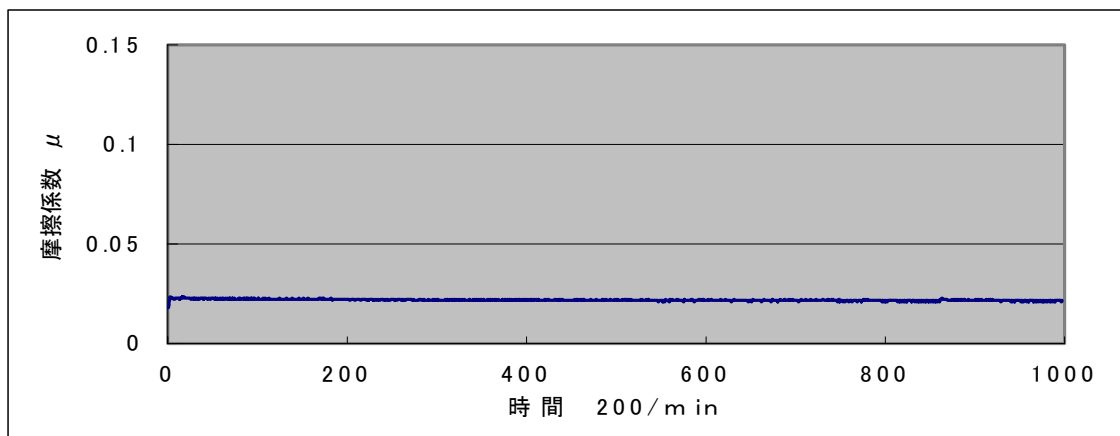
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

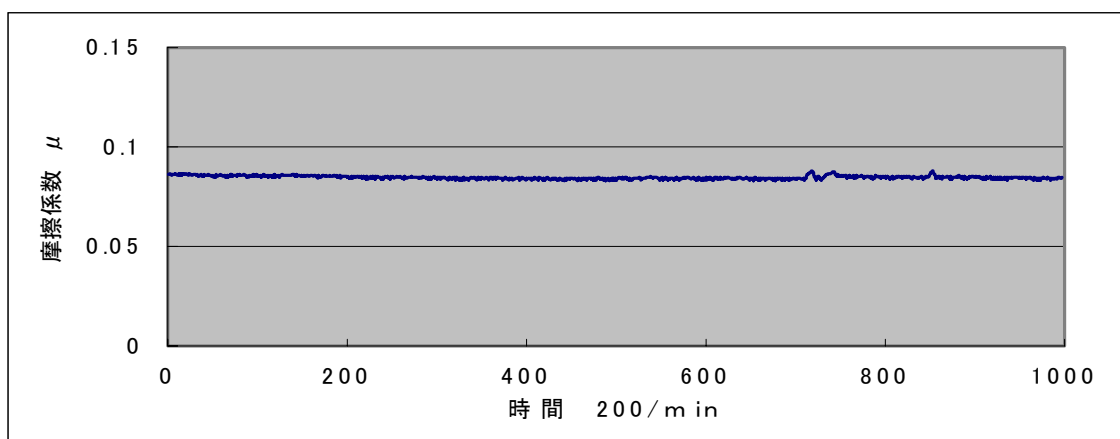


扇状4個試験片

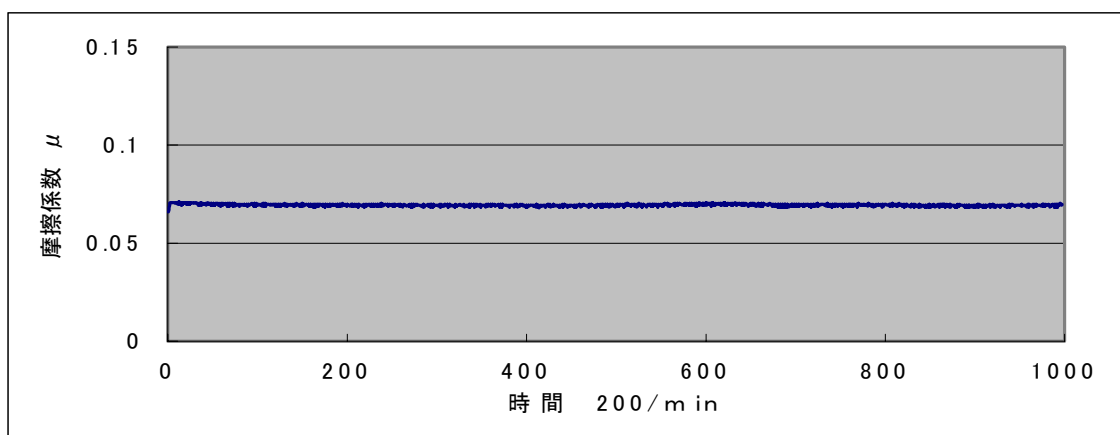


扇状8個試験片

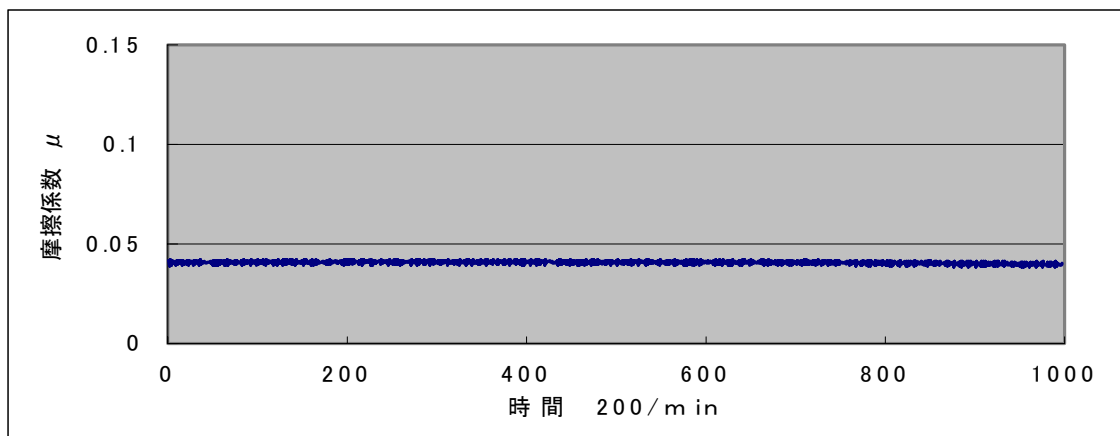
すべり速度0.2 m/s・荷重9.2 N時



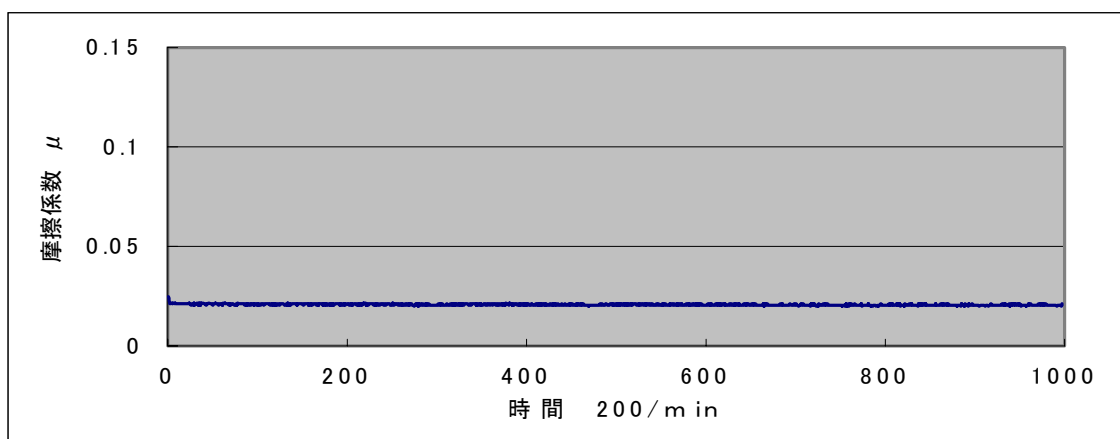
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

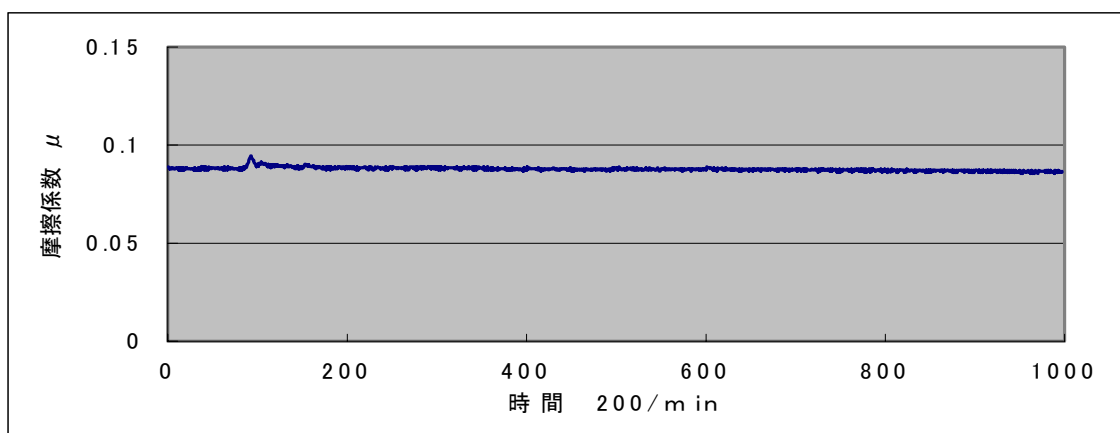


扇状4個試験片



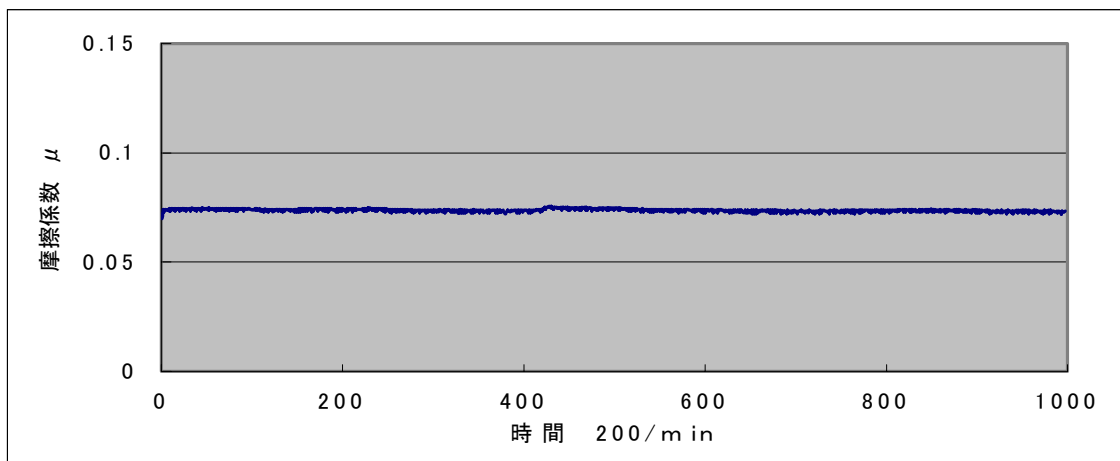
扇状8個試験片

すべり速度0.2m/s・荷重114N時

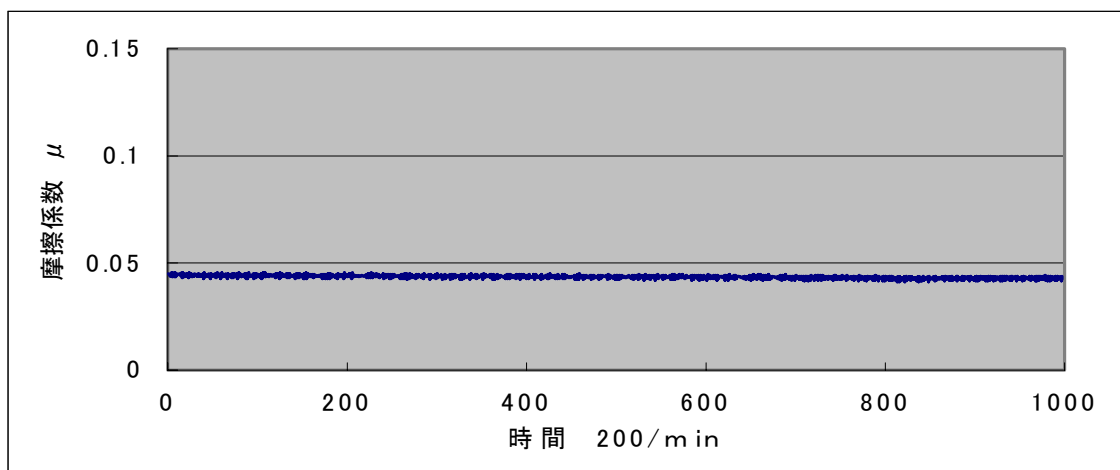


多孔質未処理試験片

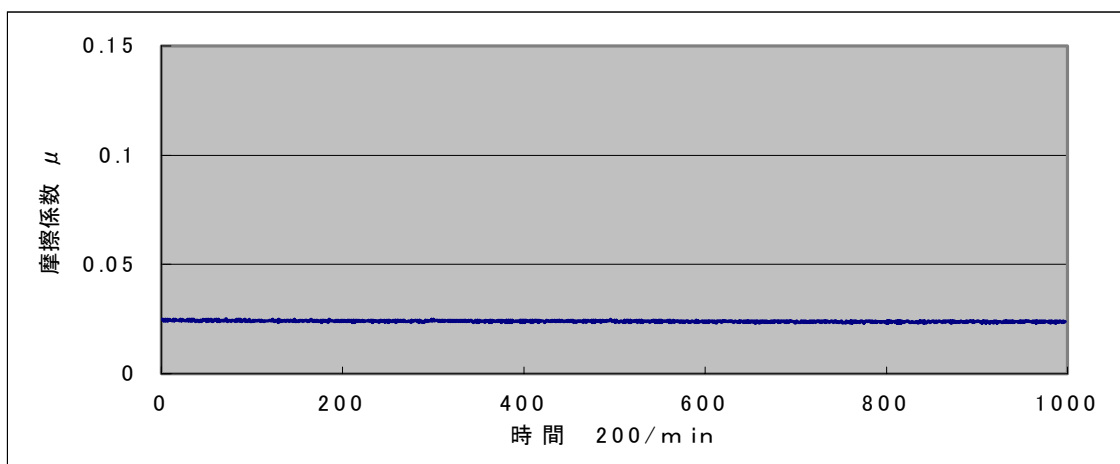




多孔質全面処理

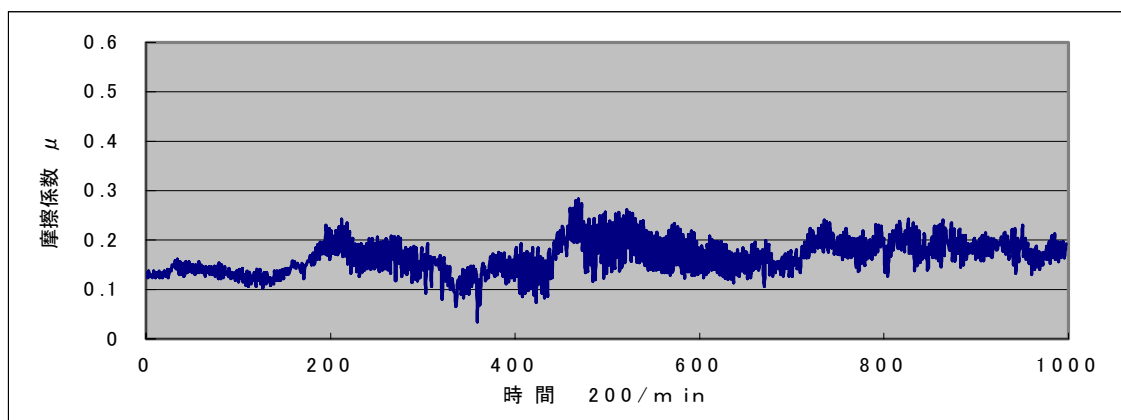


扇状4個試験片

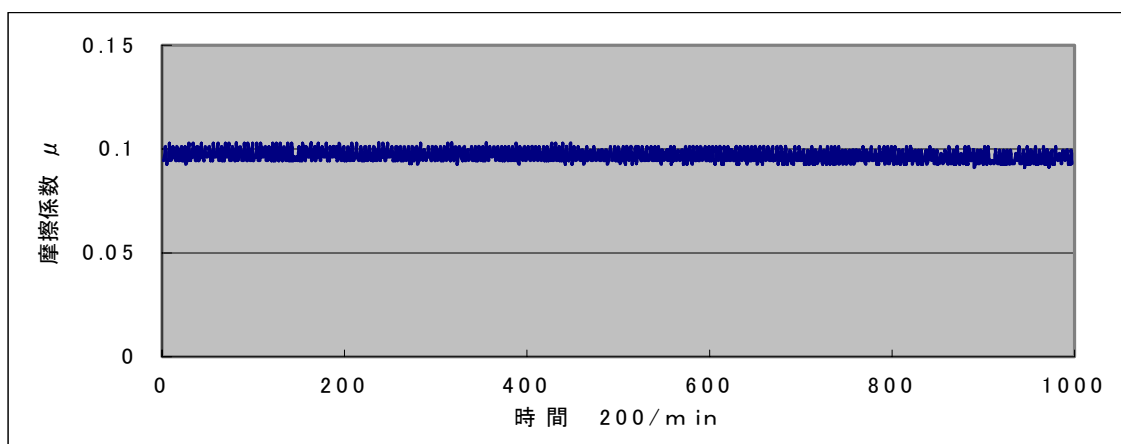


扇状8個試験片

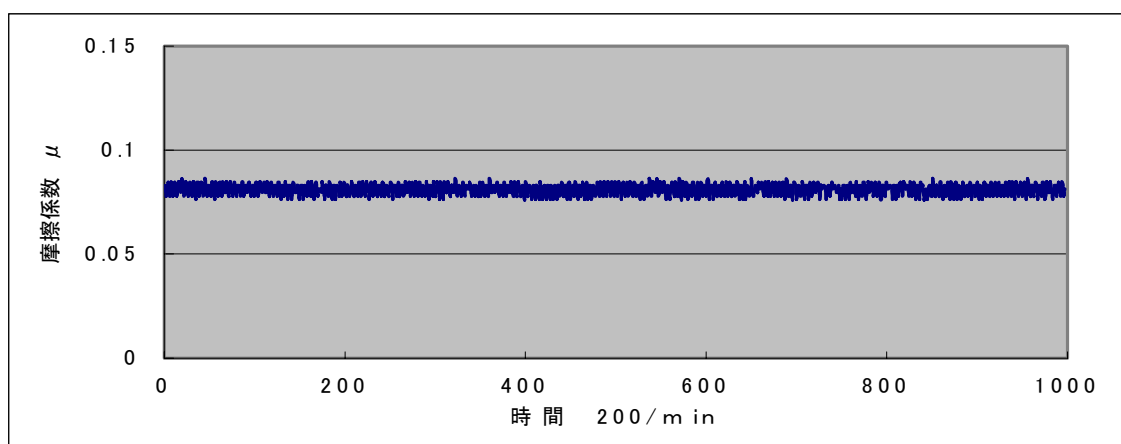
すべり速度0.1 m/s・荷重26 N時



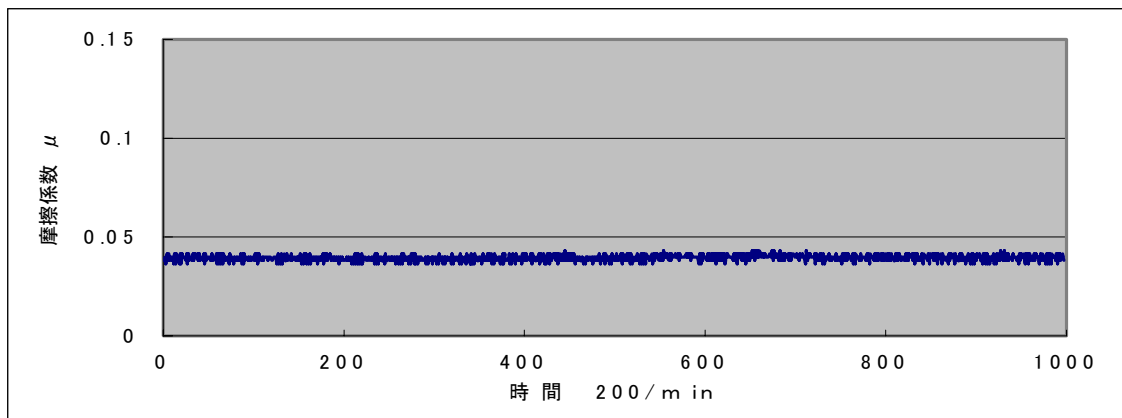
緻密試験片



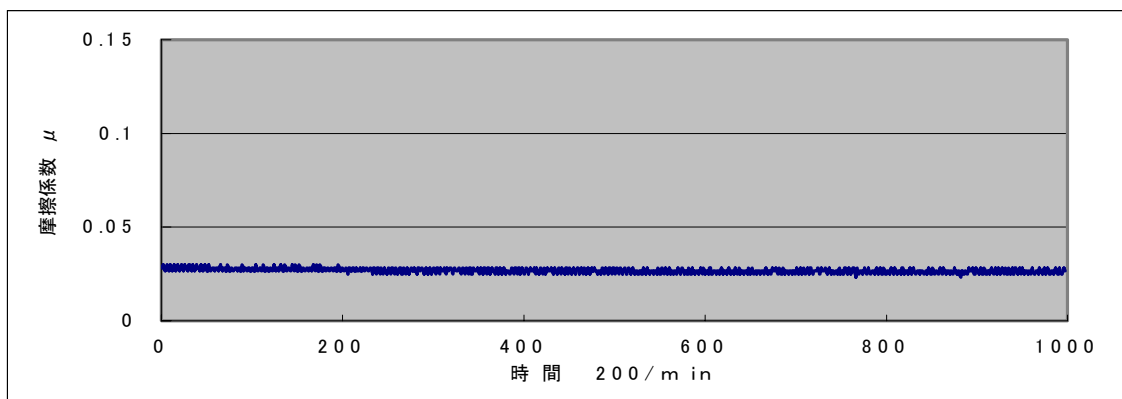
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

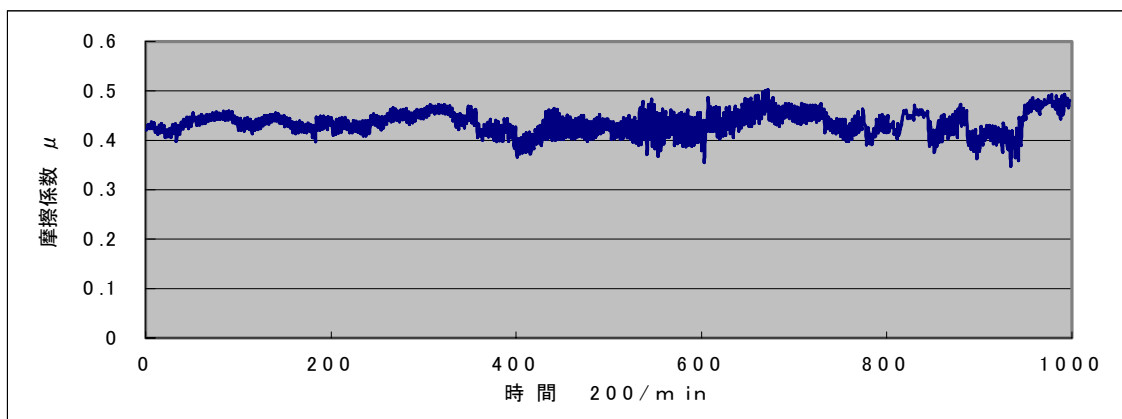


扇状4個試験片

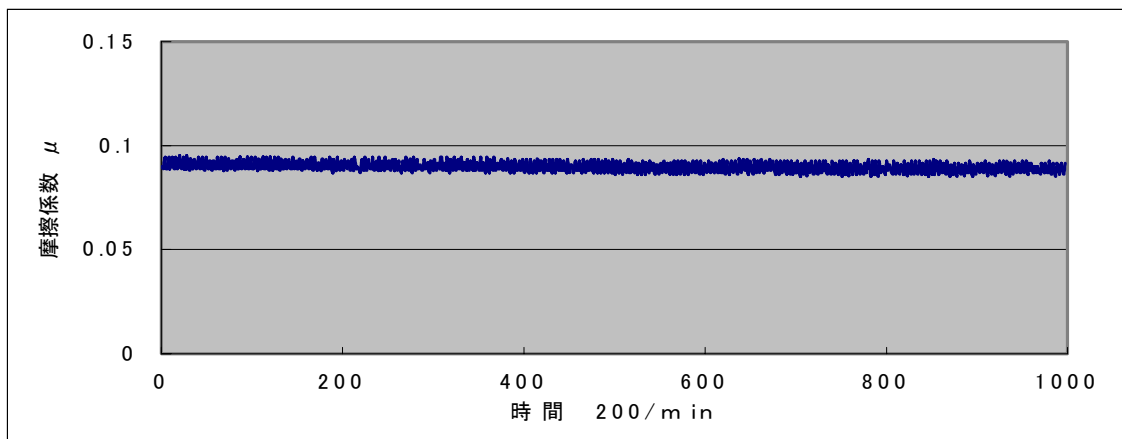


扇状8個試験片

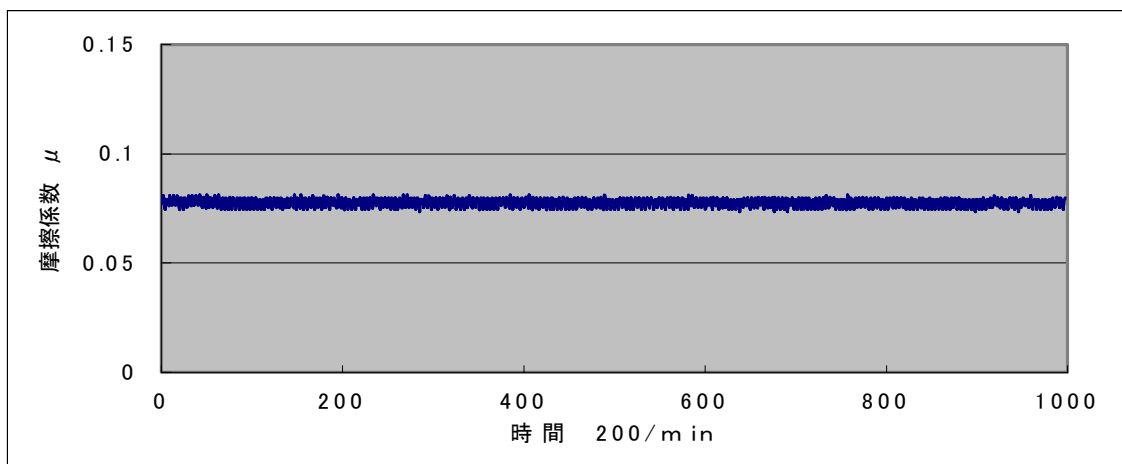
すべり速度0.1m/s・荷重48N時



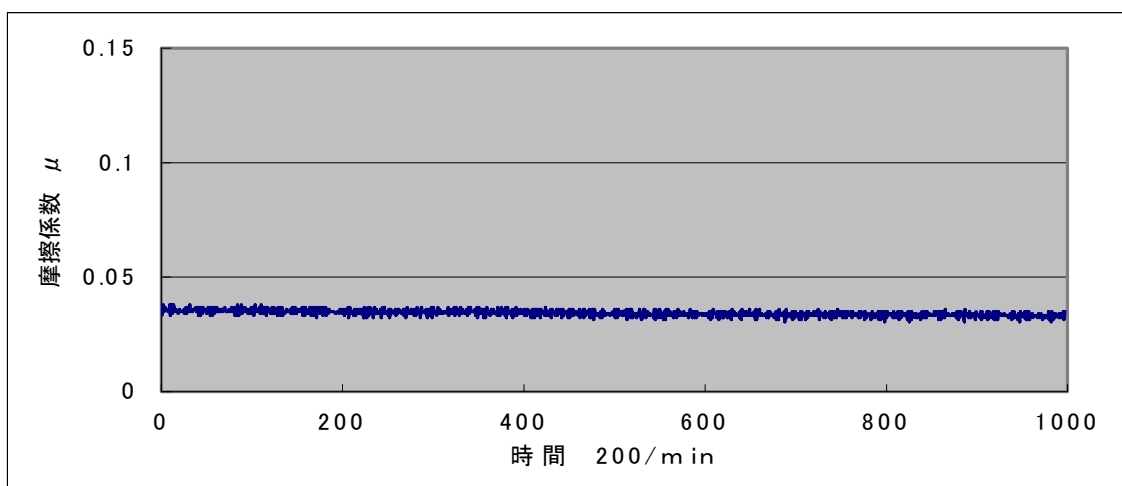
緻密試験片



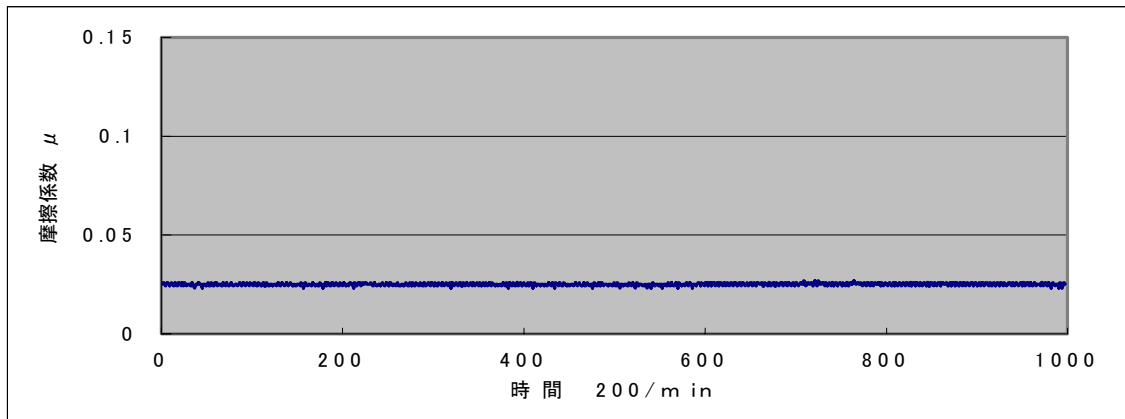
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

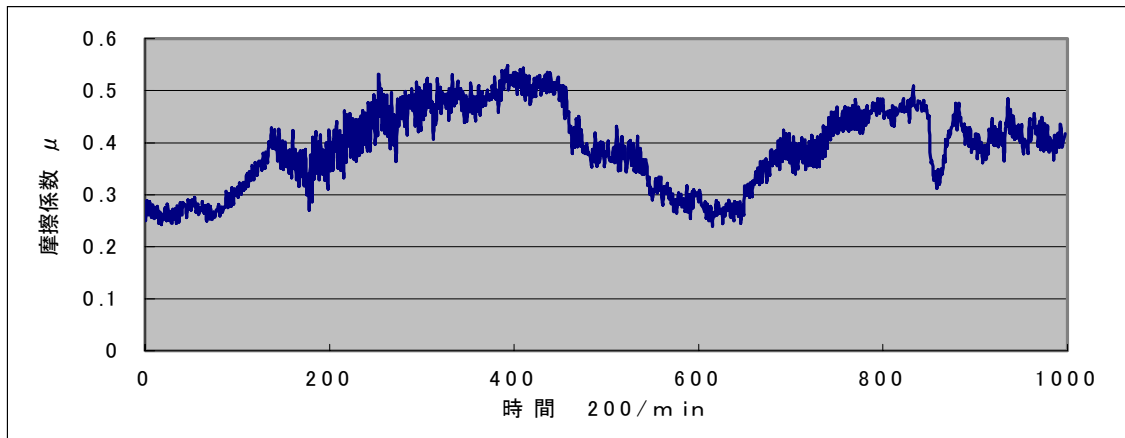


扇状4個試験片

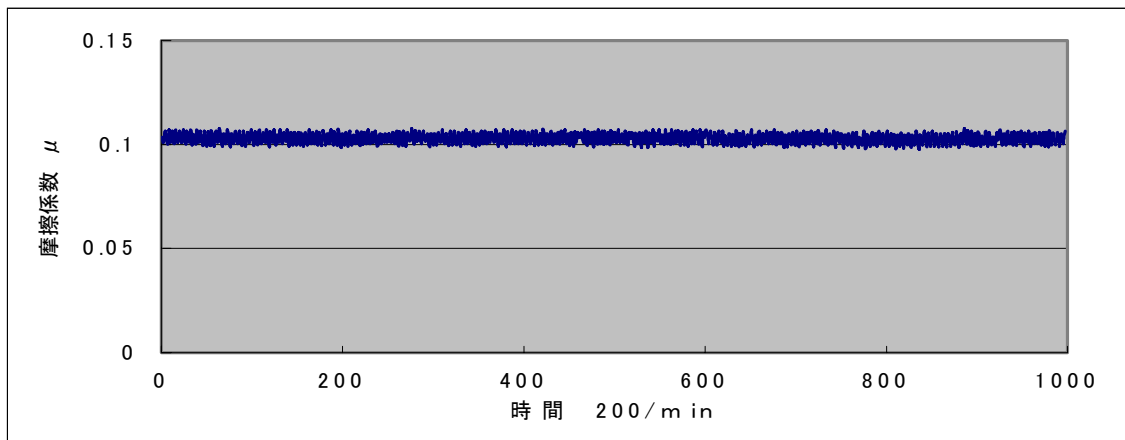


扇状8個試験片

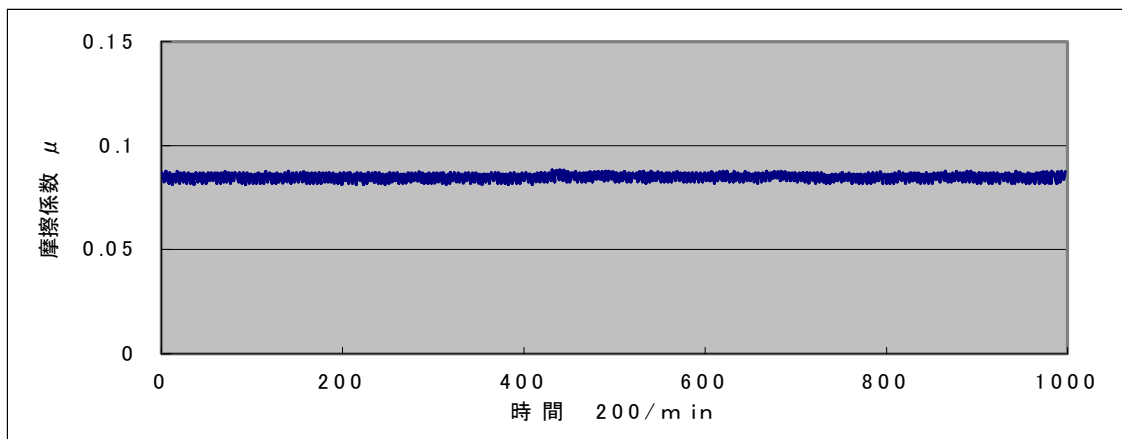
すべり速度0.1 m/s・荷重70 N時



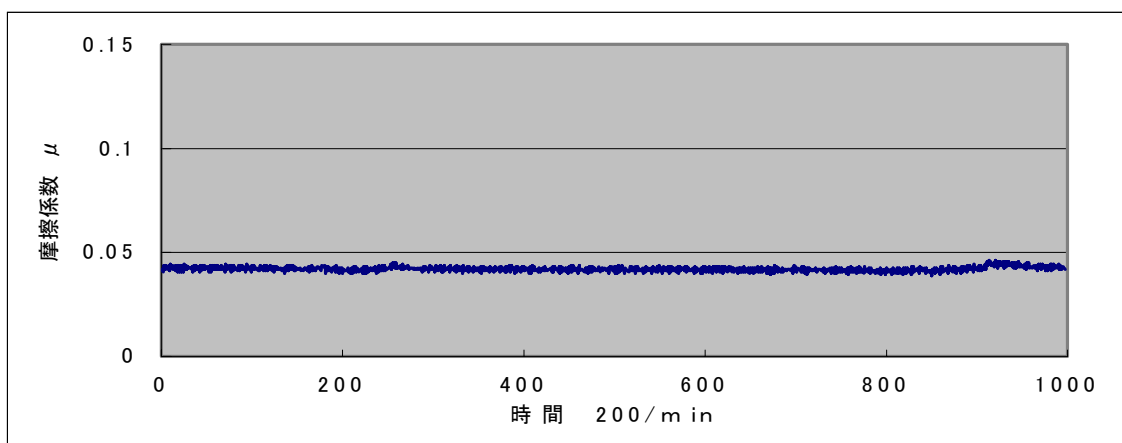
緻密試験片



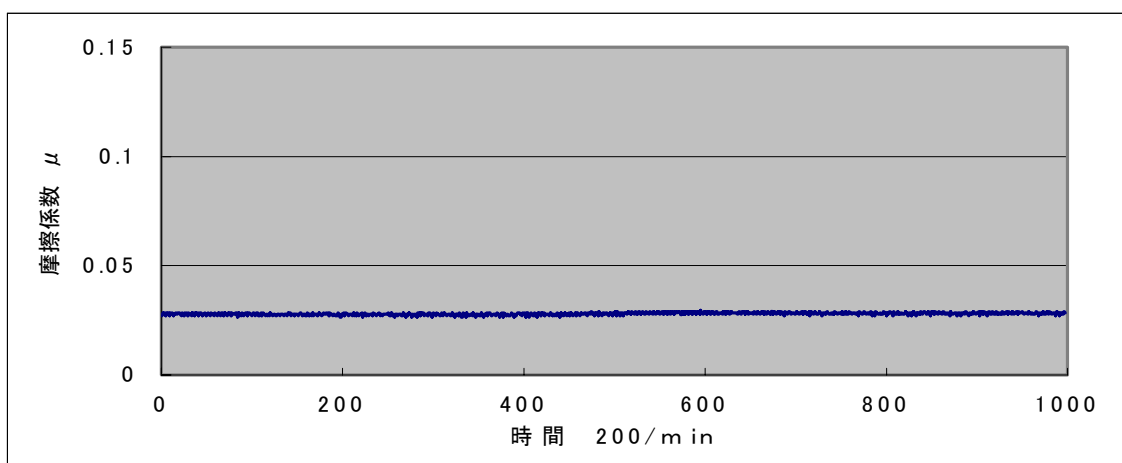
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

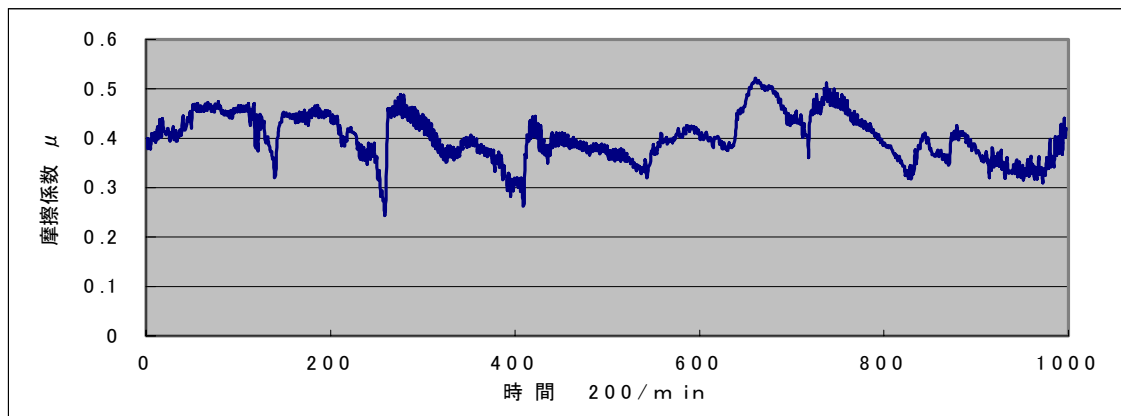


扇状4個試験片

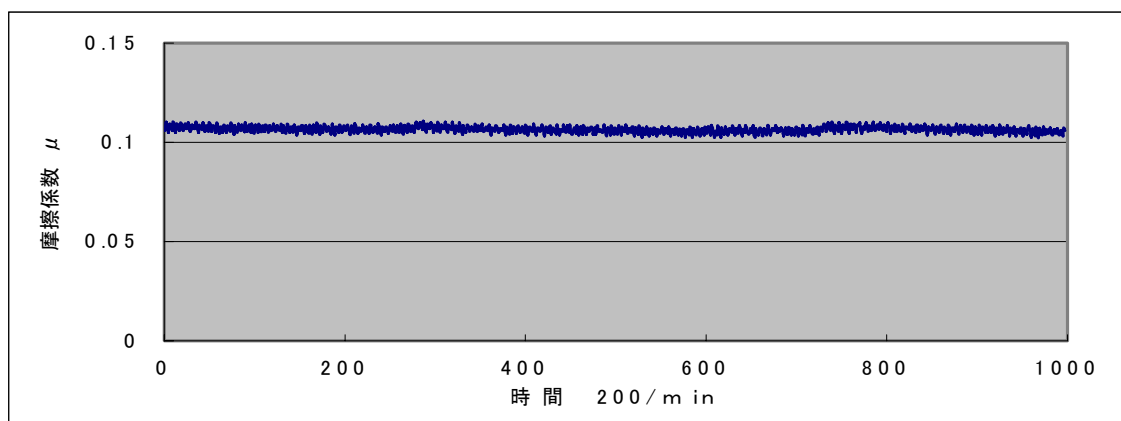


扇状8個試験片

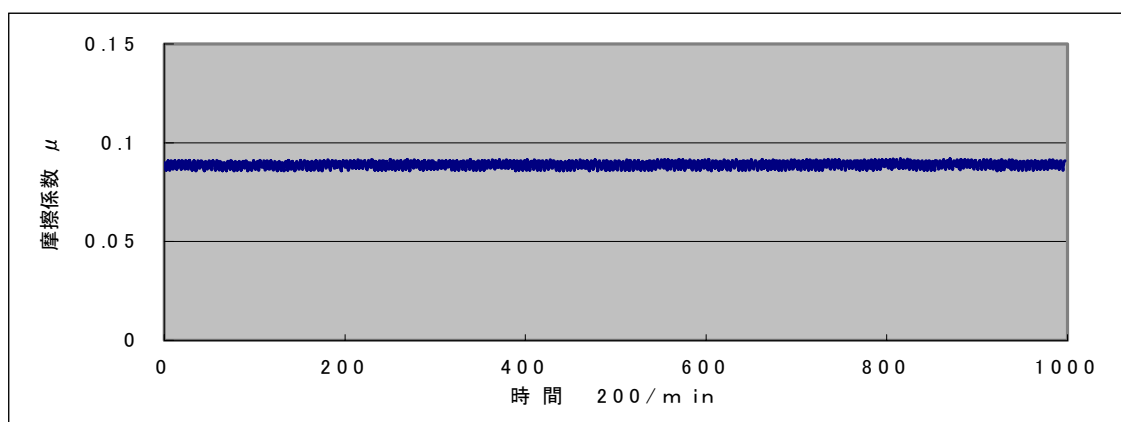
すべり速度0.1 m/s・荷重9.2 N時



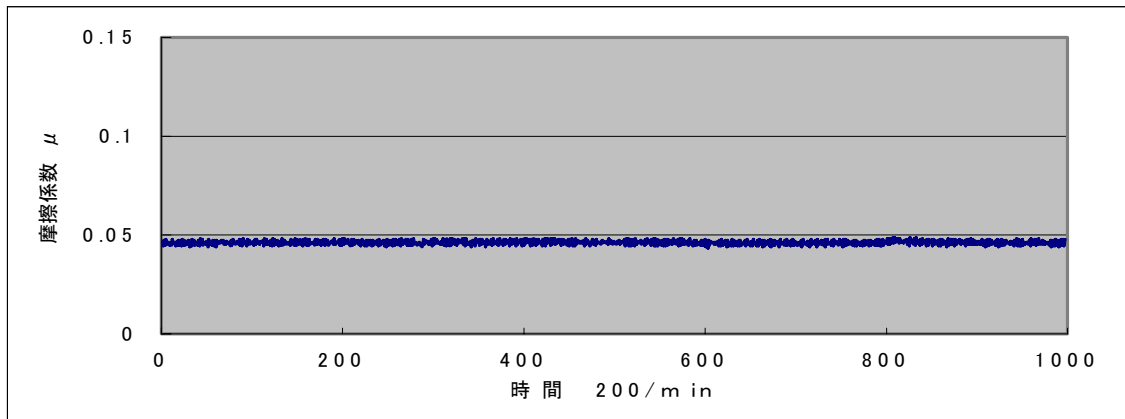
緻密試験片



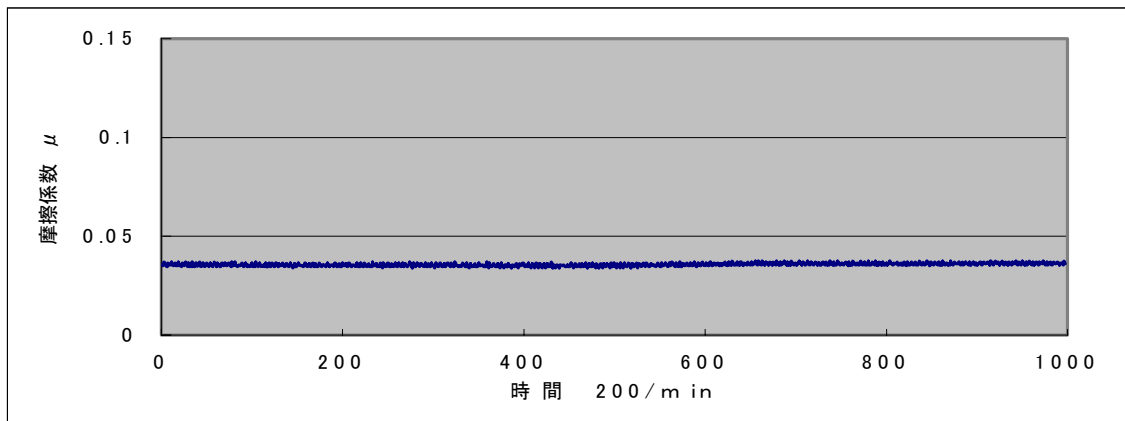
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

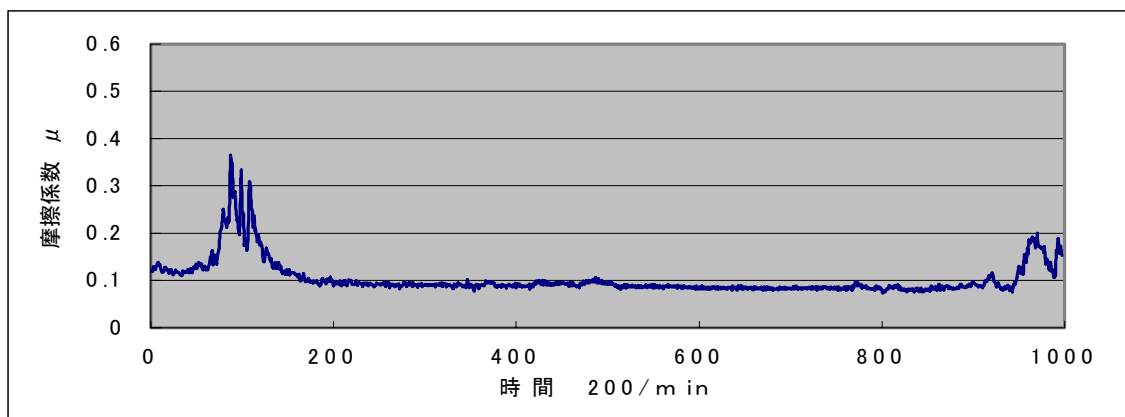


扇状4個試験片



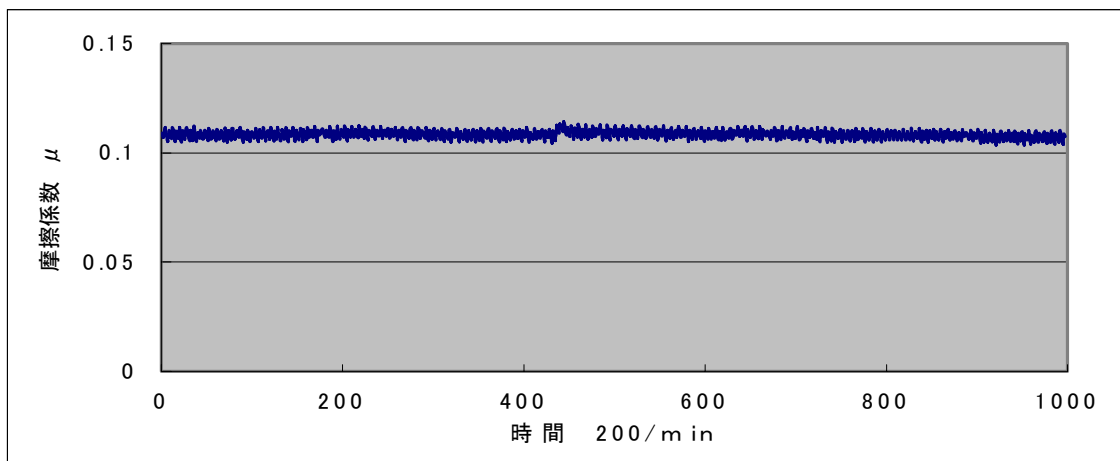
扇状8個試験片

すべり速度0.1m/s・荷重114N時

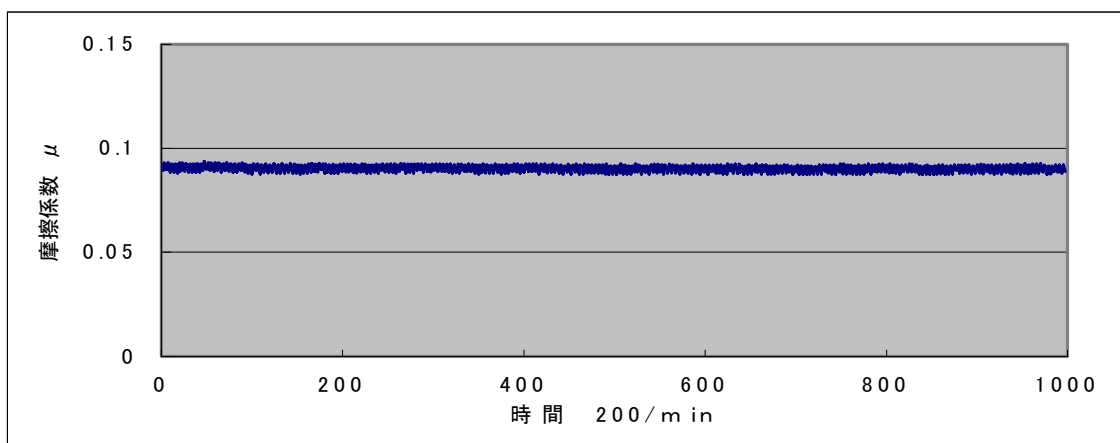


緻密試験片

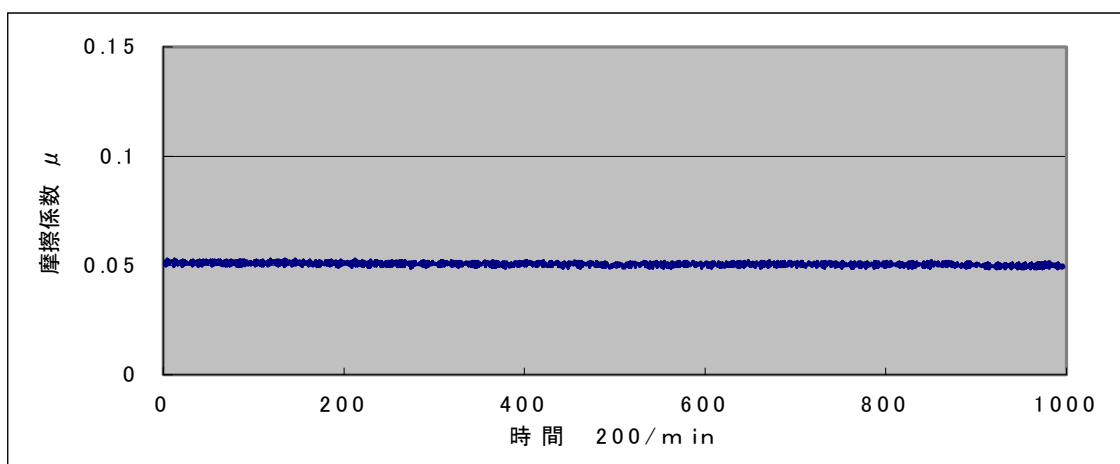




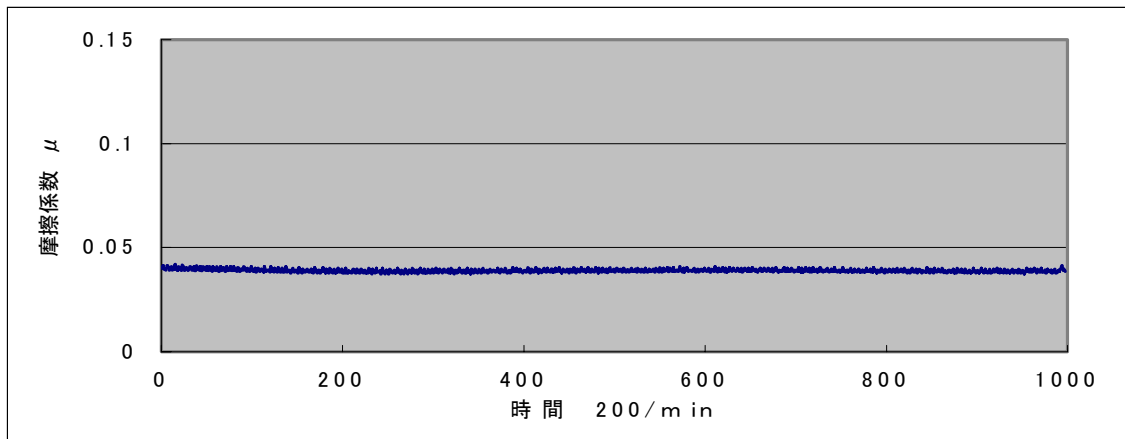
多孔質未处理試験片



多孔質全面处理

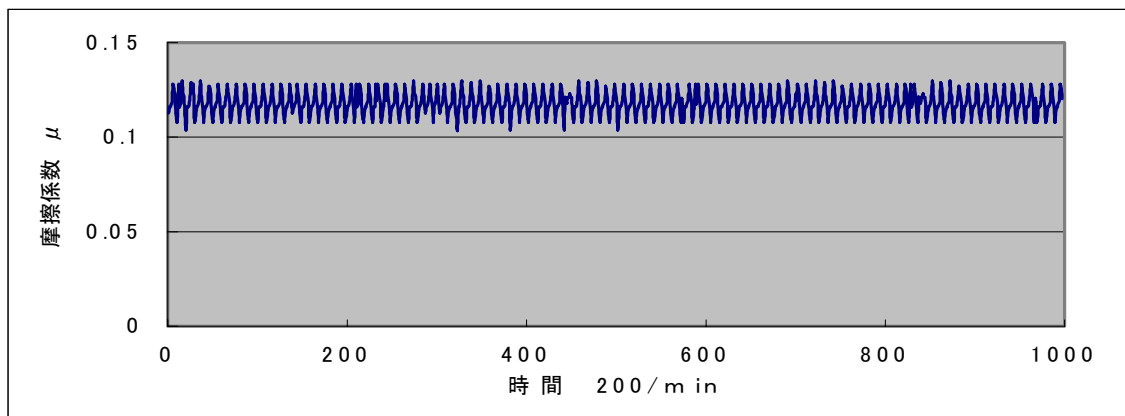


扇状4個試験片

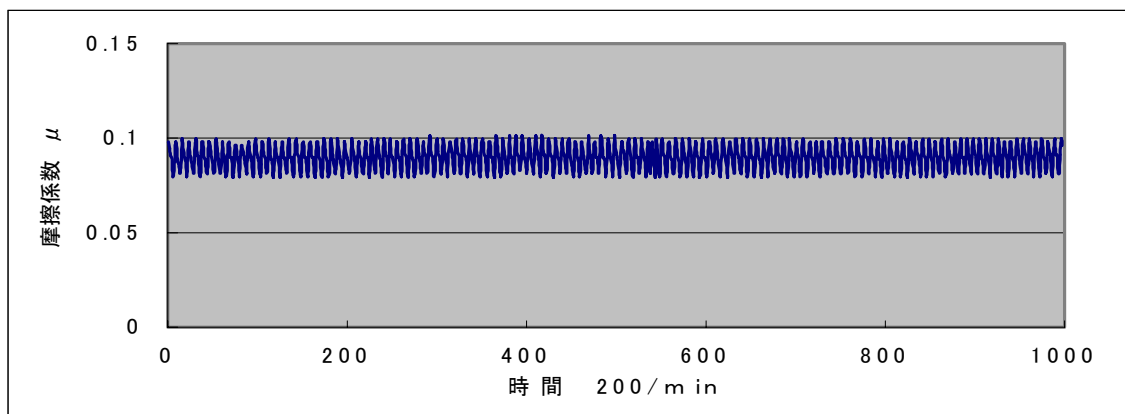


扇状 8 個試験片

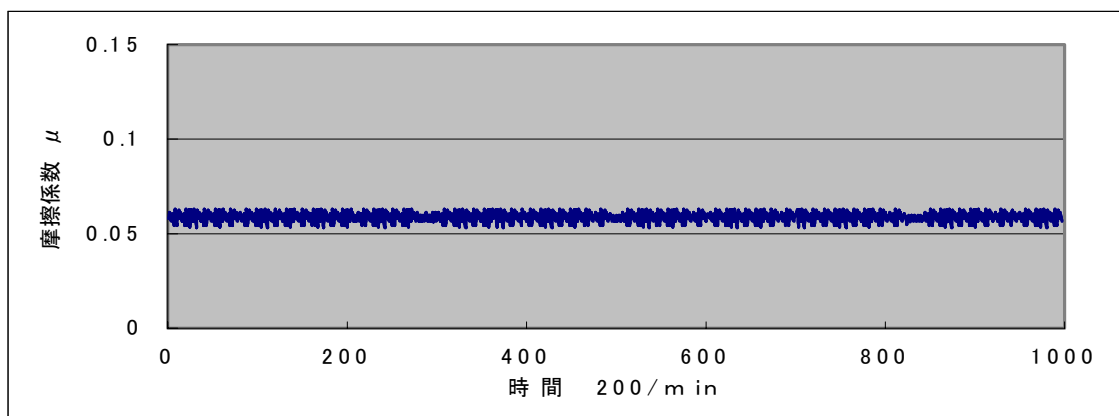
すべり速度 0.05 m/s ・ 荷重 26 N 時



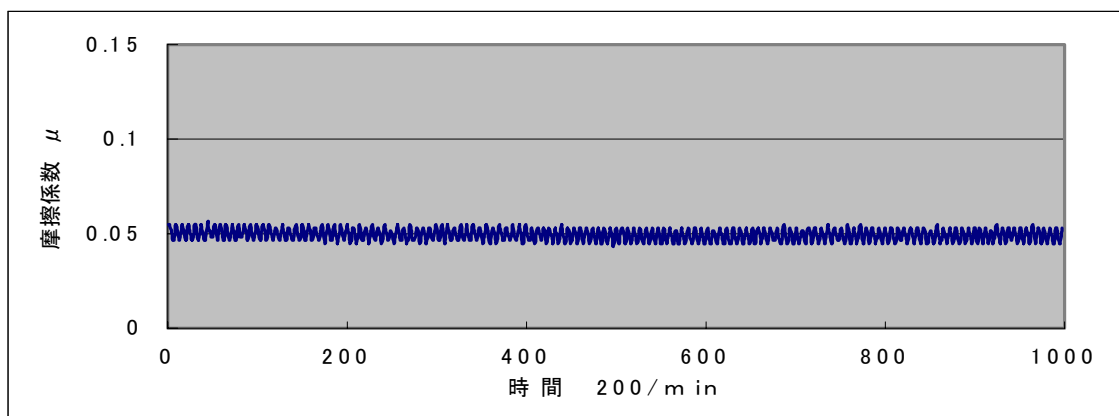
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

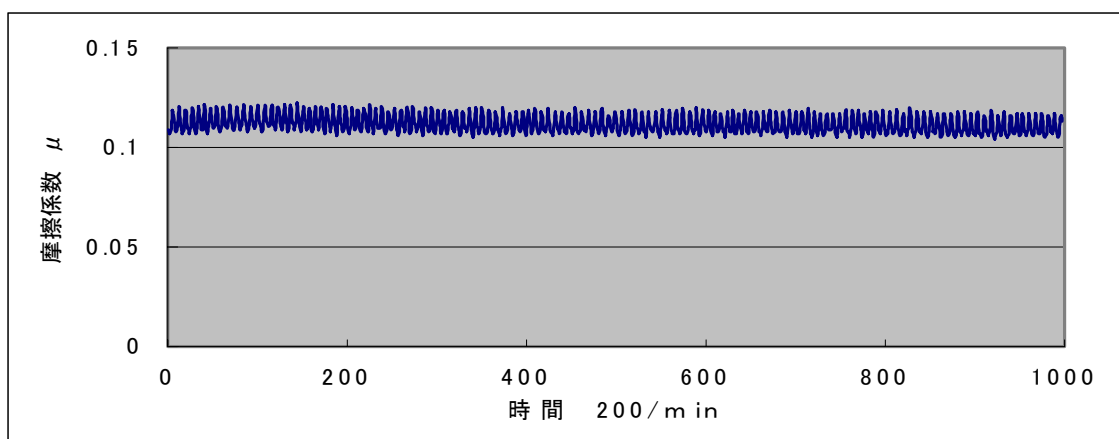


扇状4個試験片

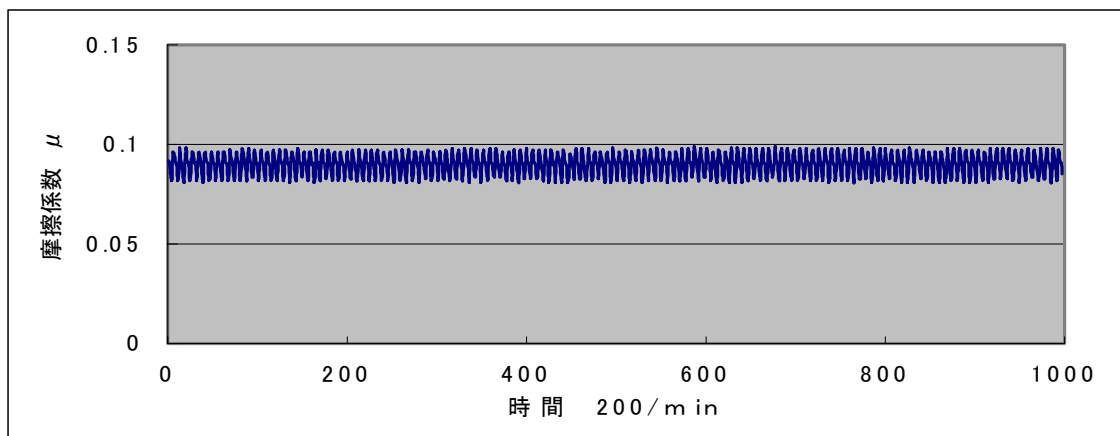


扇状8個試験片

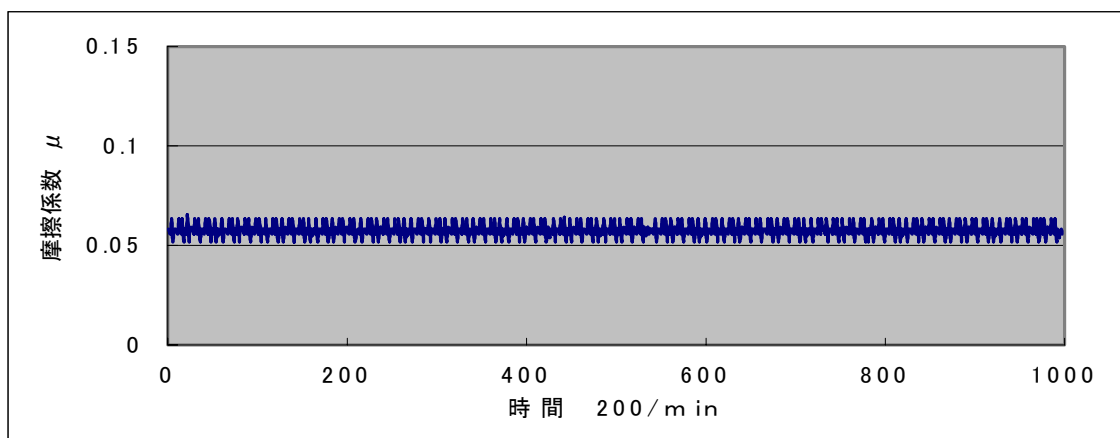
すべり速度0.05m/s・荷重48N時



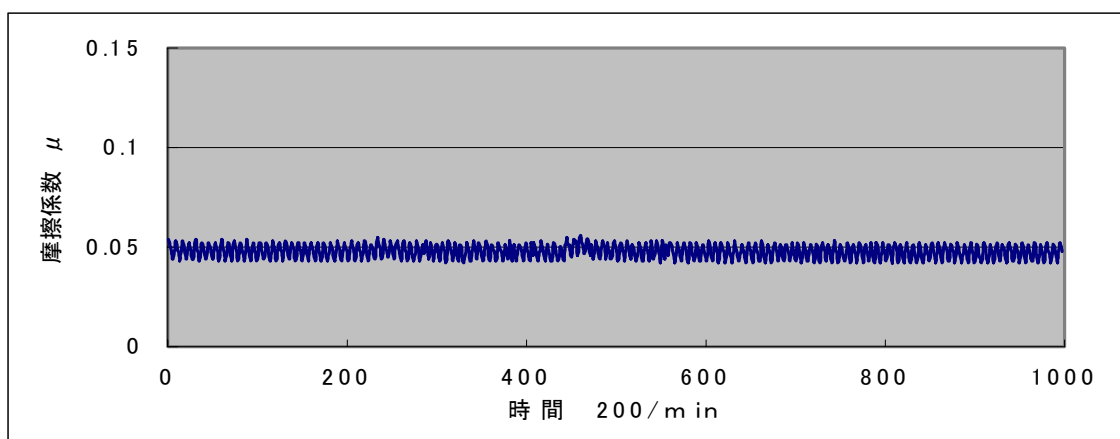
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

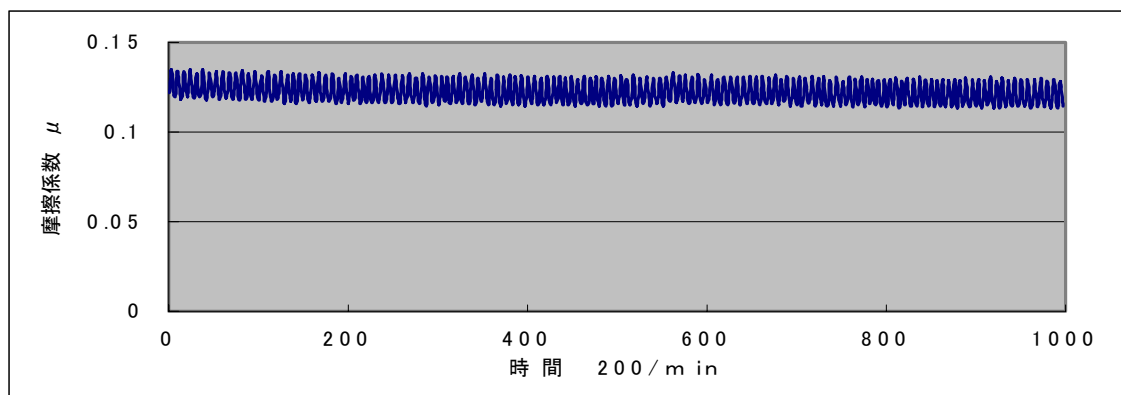


扇状4個試験片

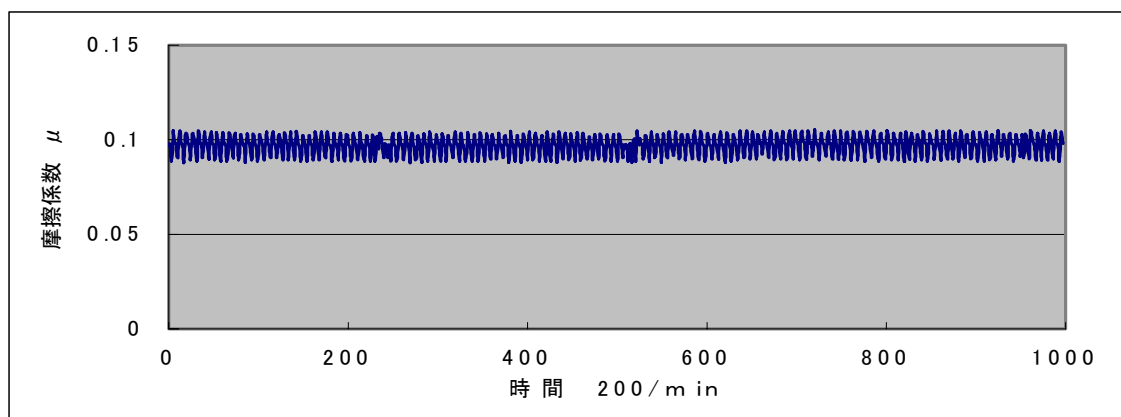


扇状8個試験片

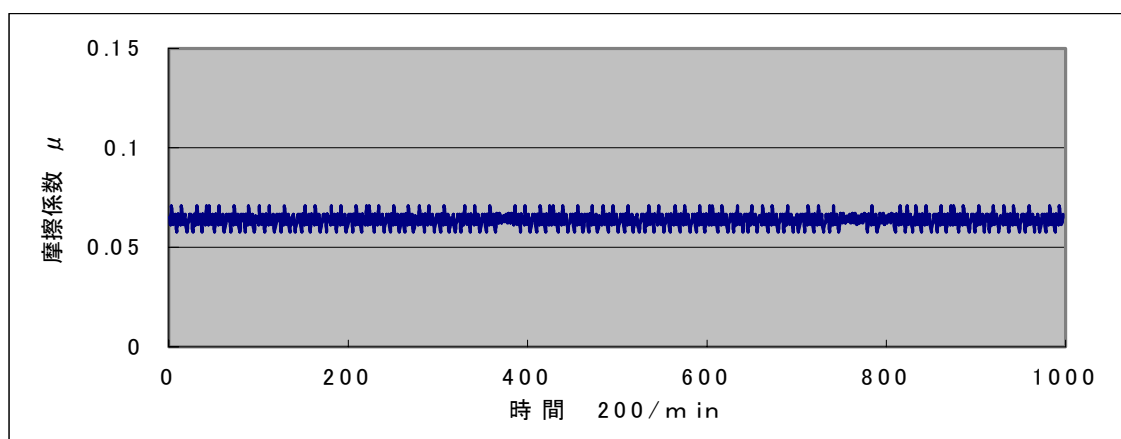
すべり速度0.05m/s・荷重70N時



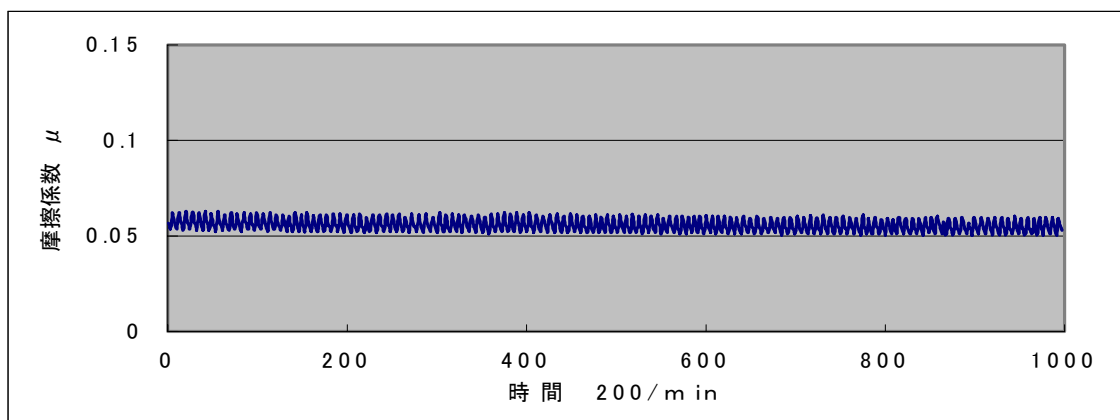
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

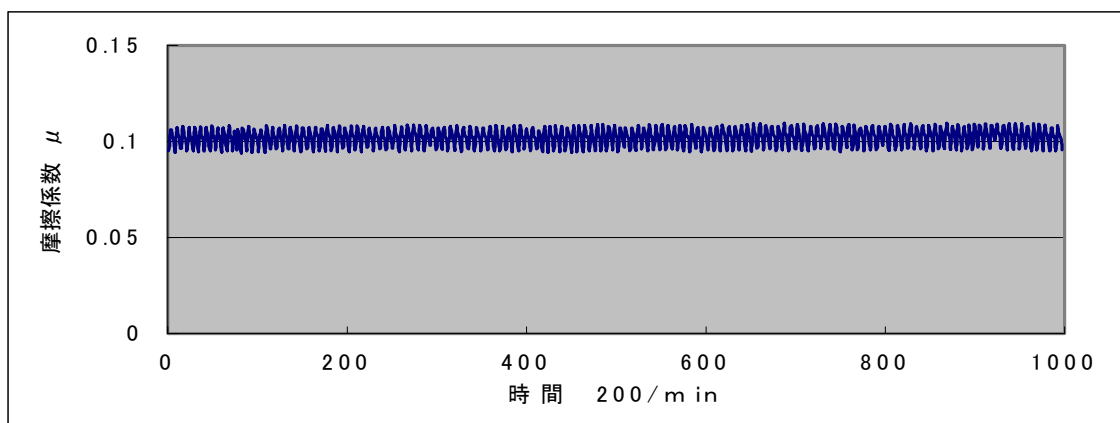


扇状4個試験片

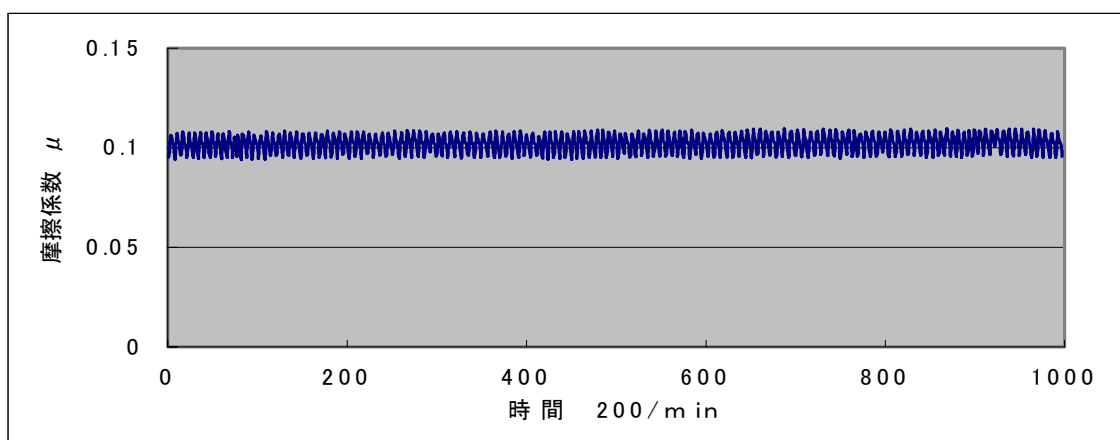


扇状 8 個試験片

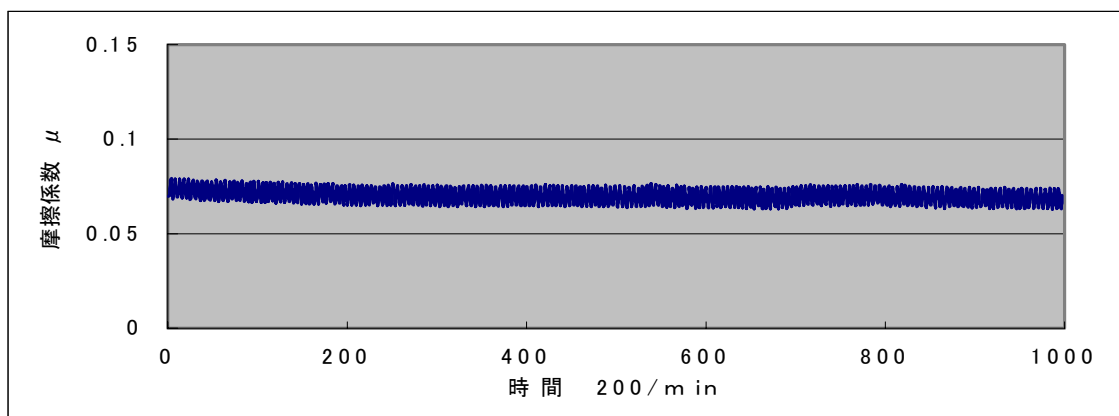
すべり速度 0.05 m/s ・ 荷重 9.2 N 時



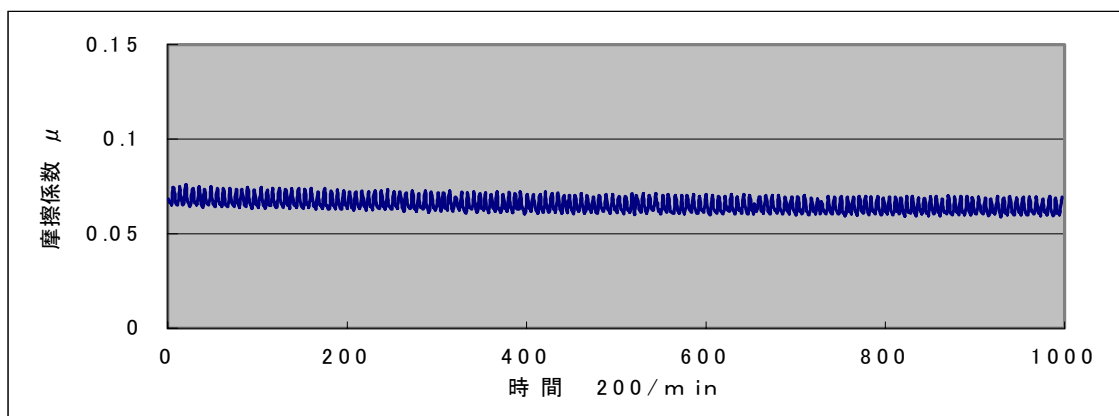
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理

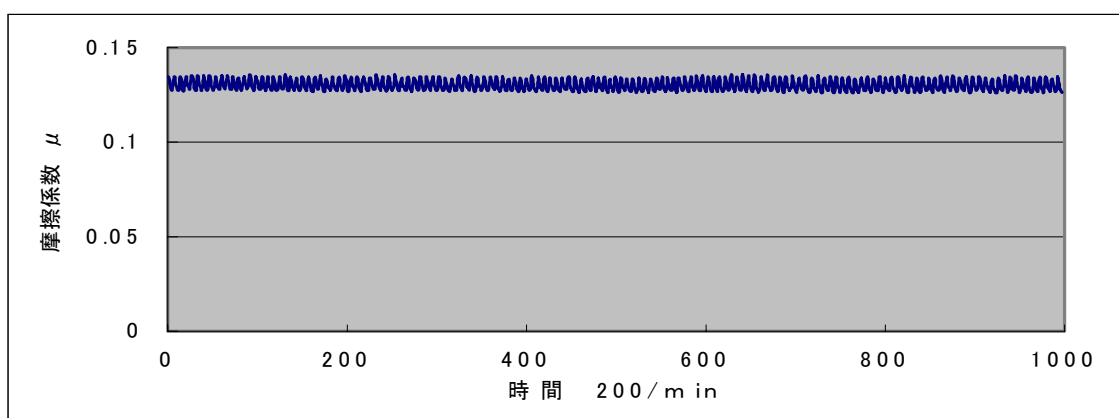


扇状4個試験片

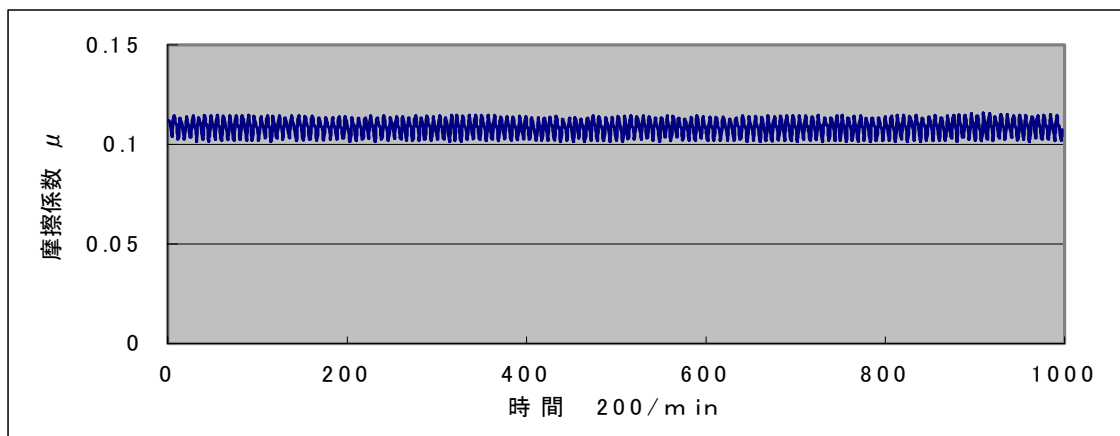


扇状8個試験片

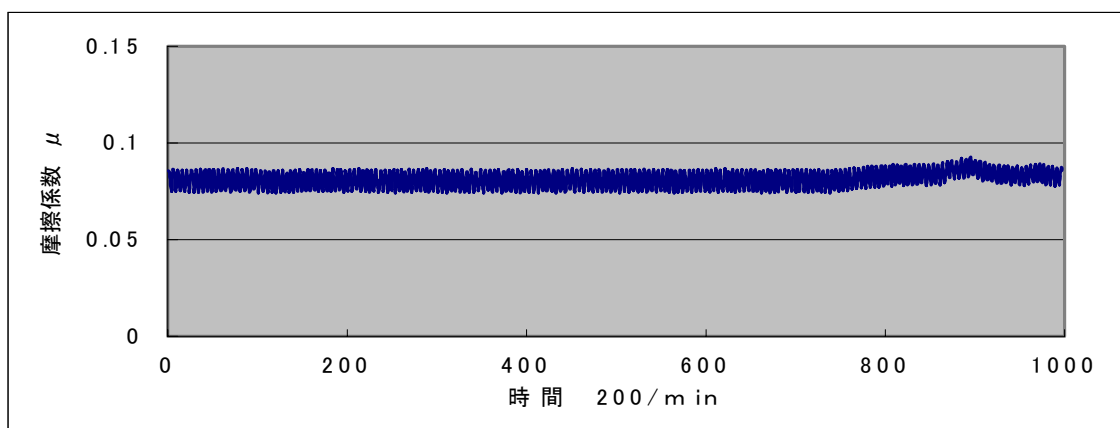
すべり速度0.05m/s・荷重114N時



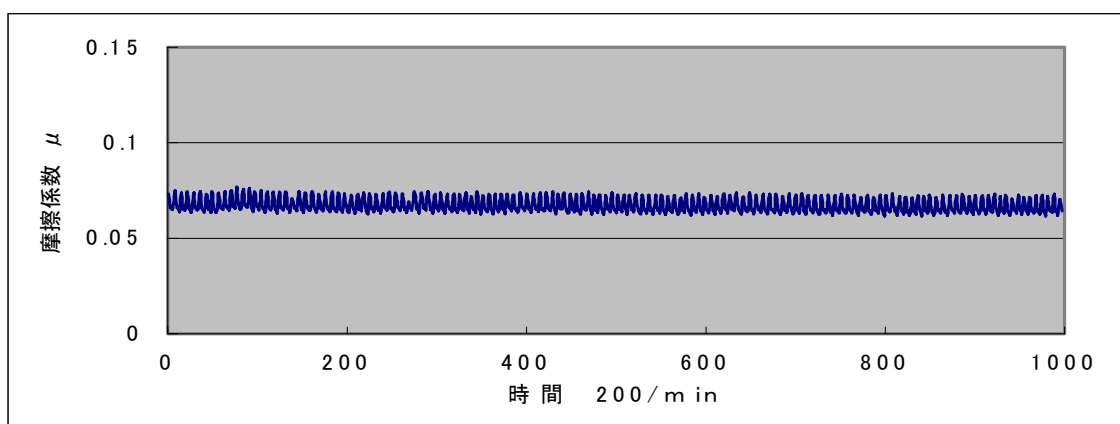
多孔質未処理試験片



多孔質全面処理



扇状4個試験片



扇状8個試験片