

特殊ふっ素高分子潤滑薄膜を適用したリニアベアリングの開発

豊田 泰

Development of Linear Bearing Coated with Special Fluorocarbon Polymer Lubricating Film

H. TOYOTA

We have developed original solid lubricants; special thin fluorocarbon polymer lubricating film. Molecular structure of this film is similar to PTFE and it's formed without use of binder. So this lubricant is stable against heat and chemicals. Ball bearings coated with this lubricant show characteristics of low particle generation, low degassing and long life in spite of sub-micron film thickness. In this paper, we present the particle generation performance of the linear bearing which is coated with this lubricant.

Key Words: linear bearing, solid lubricant, fluorocarbon polymer, particle generation

1. はじめに

当社では、他社に先駆け半導体製造装置用クリーン軸受をはじめとする各種の特殊環境用軸受¹⁾を開発し提供してきた。今日、半導体業界では、300mmウエハサイズの時代を迎え、生産効率向上の要求がますます増大している。そのため、製造工程における搬送方法も従来のベルト搬送から高速、高荷重に対応できるロボット搬送へと大きく変化しつつある。この変化に対応するため、当社ではクリーン軸受の開発において蓄積した表面改質技術を応用し、クリーン用直動要素の開発を進めている。その一つとして、当社が開発した特殊ふっ素高分子潤滑薄膜(登録商標：クリーンプロ)をリニアベアリングに適用することにより、発塵、アウトガ斯特性にすぐれたリニアベアリング(クリーンプロ・リニアベアリング)の開発を進めた。今回、その内容について発塵特性を中心に紹介する。

(SUS440C)と窒化けい素(Si_3N_4)の2種類の玉を用いた。また、構成要素部品すべてに被膜厚さ $0.5\ \mu\text{m}$ 以下の特殊ふっ素高分子潤滑薄膜を形成した。

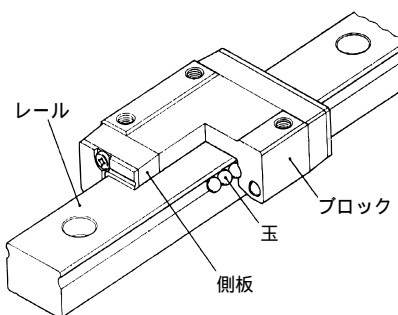


図1 試験リニアベアリングの概略
Linear bearing

2. 試験軸受

図1、表1にそれぞれ試験軸受の概略図とおもな仕様を示す。試験軸受には、レール幅9mmのリニアベアリングを用いた。試験軸受のレールおよびブロック本体の材質は、マルテンサイト系ステンレス鋼(SUS440C)、側板部分の材質は、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)の焼結品である。玉材質の違いによる発塵特性の違いを確認するため、マルテンサイト系ステンレス鋼

表1 試験軸受の仕様
Specifications of tested bearings

軸受記号&仕様	レール &ブロック	玉	側板
A 総ステンレス	SUS440C	SUS440C	SUS304
B 総ステンレス +クリーンプロ	SUS440C +クリーンプロ	SUS440C +クリーンプロ	SUS304 +クリーンプロ
C 組合せセラミック +クリーンプロ	SUS440C +クリーンプロ	Si_3N_4 +クリーンプロ	SUS304 +クリーンプロ

クリーンプロ：特殊ふっ素高分子潤滑薄膜(膜厚 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下)
組合せセラミック：玉に窒化けい素を用いた軸受

3. 試験方法

図2、表2にそれぞれ試験装置の概略図と試験条件を示す。試験は、ベースプレートの上下に各1個の試験軸受を、レールの反ブロック側を基準面に合わせて設置し(2個の試験軸受が平行を得るためベースプレートには基準面が設けてある)、両試験軸受のブロックに専用治具を用いて荷重用バネによりラジアル荷重を負荷し、モータによりブロックに取り付けたベルトを介して、レールを固定しブロックを往復しゅう動させて行った。動作条件は、平均移動速度250mm/sec、加速度500mm/sec²、ストローク250mmである。また、試験軸受部は透明アクリル樹脂のケース内に設置し、さらに装置全体をクリーン度クラス10のクリーンベンチ内に設置した。

発塵特性の評価は、ベースプレートと同じ高さで、ストロークのほぼ中央に位置する場所にパーティクルカウンタのセンサヘッドを設置し、1リットル/分の吸引量で吸引しながら、往復しゅう動中に試験軸受から発生する発塵を3水準の粒子径(0.1~0.3μm, 0.3~0.5μm, 0.5μm以上)で測定することにより行った。なお、本試験でのラジアル荷重80Nは、試験軸受の基本動定格荷重の約5%に相当する値である。

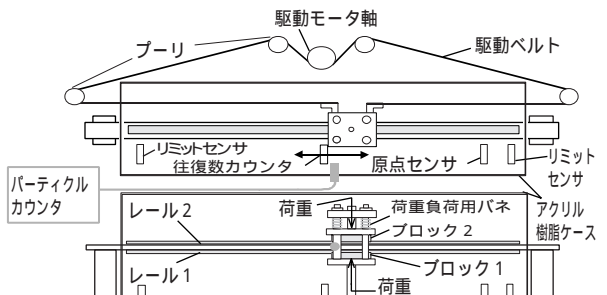


図2 試験装置の概略
Schematic diagram of tester

表2 試験条件
Test conditions

項目	内容
雰囲気	クリーンルーム内(クラス10), 室温
平均移動速度, mm/sec	250
加速度, mm/sec ²	500
ストローク, mm	250
荷重, N	40, 80, 160(ラジアル方向)

4. 試験結果²⁾と考察

4.1 総ステンレスリニアベアリングの発塵特性

図3にラジアル荷重80Nで試験を行った場合の

発塵量の経時変化を示す。発塵傾向としては、なじみ期間である試験初期に比較的多くの発塵が認められるが、その後減少し、吸引量0.1cf当たり10個程度の量で安定して推移すること、また、総移動距離が40kmになる手前の時点で、急激に発塵量が増大することが確認された。発塵粒子径ごとの発塵傾向としては、試験開始から寿命に至るまでのすべての時点において、粒子径0.3μm以下の比較的小さい粒子の発塵が多く認められ、粒子径0.5μm以上の比較的大きい粒子の発塵はほとんど無いことが確認された。また、急激な発塵量の増大時点以降では、それまでほとんど発生していなかった粒子径0.5μm以上の大きい粒子の発塵が、粒子径0.3μm以下の小さい粒子とほぼ同量発生していることから、この急激な発塵量の増大は、潤滑被膜の消失による母材同士の直接接触、および、摩耗の発生によるものと考えられた。

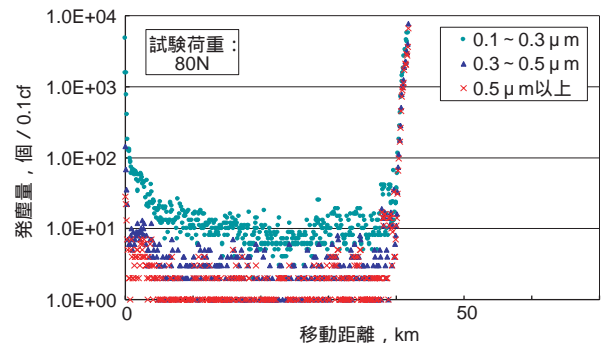


図3 発塵量の経時変化(総ステンレス)
Particle generation (all stainless steel)

図4にラジアル荷重40N, 80Nおよび160Nと荷重を変えて試験を行った場合の発塵量の経時変化を示す。なお、ここでの発塵量は、粒子径0.1μm以上の総量で示してある。荷重を変化させた場合の発塵傾向としては、荷重の違いにより安定期での発塵量に違いはほとんど認められないこと、また、荷重が増加することにより転がり軸受の場合³⁾⁴⁾と同様に寿命が減少することが確認された。

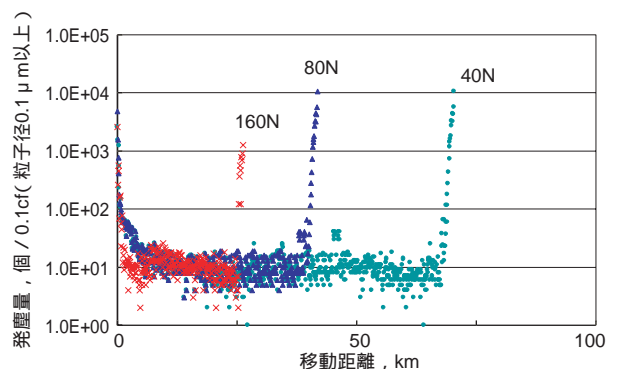


図4 荷重を変化させた場合の発塵量の経時変化(総ステンレス)
Particle generation at various loads (all stainless steel)

4.2 表面観察および形状測定

図5にラジアル荷重80Nでの試験後軸受についての表面観察，および形状測定結果，表3にその結果についてのまとめを示す．なお，表面観察については，レール軌道部，玉表面，ブロック軌道部について行い，形状測定については，ラジアル荷重に対して，レール側では軌道部の下部，ブロック側では軌道部の上部がおもに負荷を受けるため，その箇所について測定を行った．なお，玉については全体の測定を行った．

ブロック軌道部については，試験初期に確認された粗さが，試験後では消失し，試験後の転走部は非常にフラットになっていることが確認された．これについては，表面観察の結果から，試験後の転走部では潤滑被膜がほぼ完全に消失し，母材が露出したためであることが確認された．レール軌道部については，試験初期に確認された粗さが，試験後でも同様に存在することが確認された．これについては，表面観察の結果から，ブロック軌道部では潤滑被膜の消失により母材が露出して

いたのに対し，レール軌道部では，試験後でも潤滑被膜が残存していたためであることが確認された．また，玉については，表面観察および形状測定の結果，試験初期に比べ試験後では，明らかに面粗れが発生していることが確認された．

同条件で試験を行った5個の試験後軸受について，表面観察および形状測定を行った結果のまとめから，レール軌道部は，ほぼすべて正常であること，ブロック軌道部はほぼすべて母材の露出が認められること，また，玉についてはほとんどで面粗れ，または，母材の露出が認められることが確認された．これらの結果から，寿命に至るまでのプロセスとして，最初に，玉，または，ブロック軌道部の何れかで潤滑膜切れが発生し，次に，玉とブロック軌道部との接触部で摩耗が進行(この間，ブロック軌道部より玉の方が早く摩耗が進行する)することにより発塵が増大し，最終的に寿命に至るというプロセスが推察された．

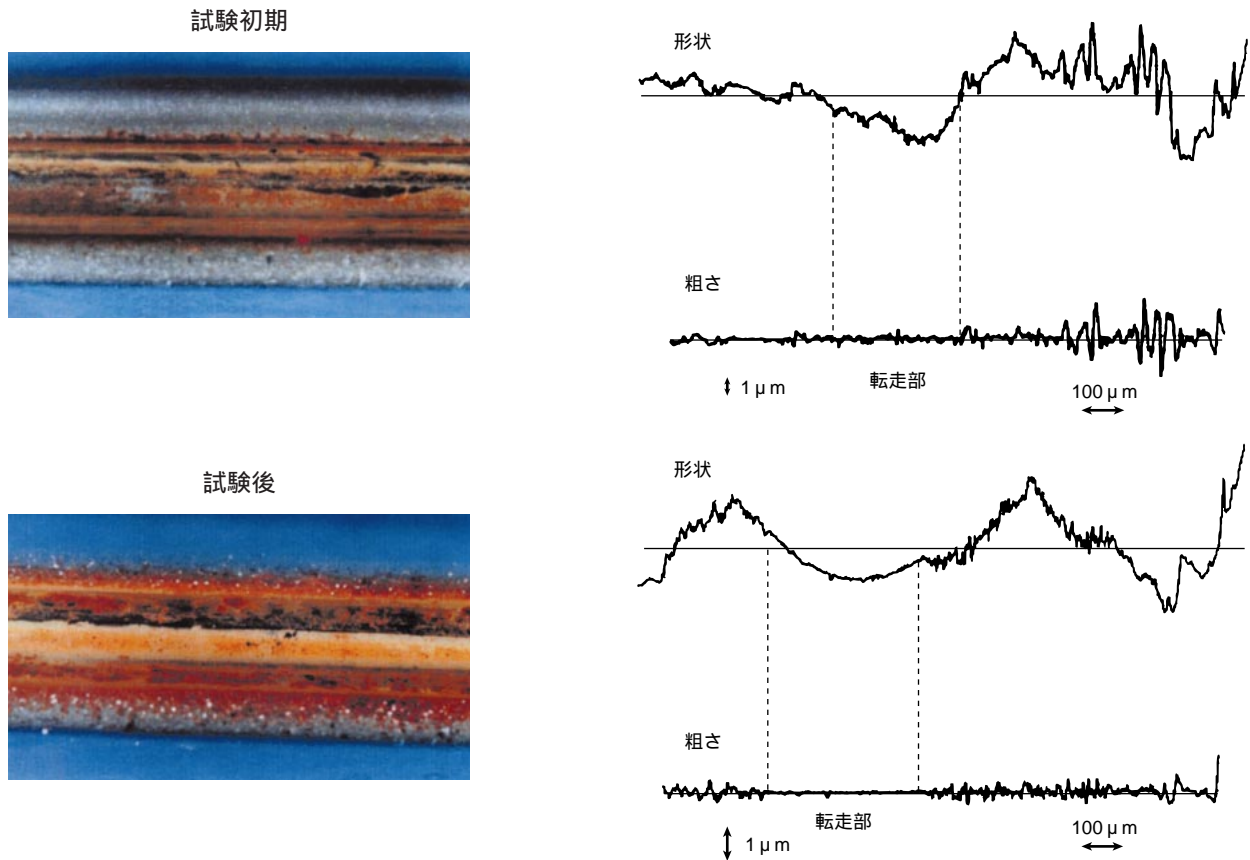


図5 - 1 表面観察・形状測定結果(ブロック軌道部の代表例)
Investigation of block race way surfaces

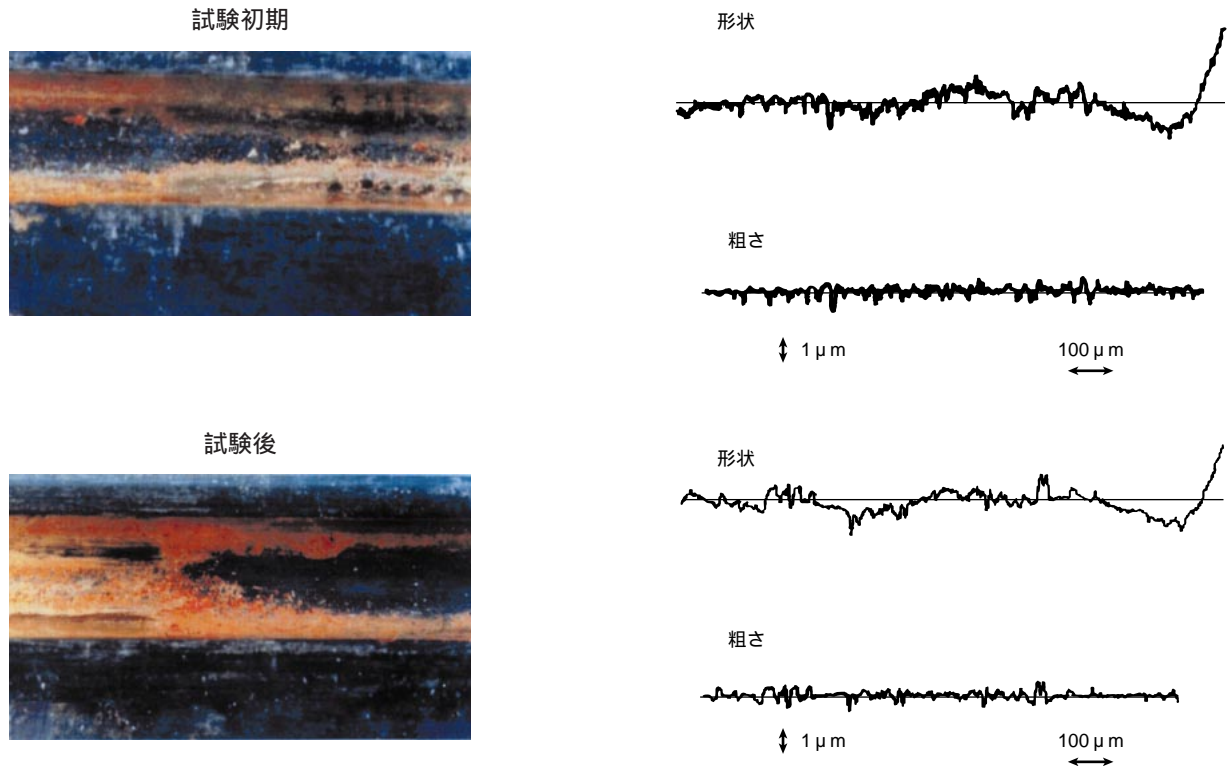


図5 - 2 表面観察・形状測定結果(レール軌道部の代表例)
Investigation of rail race way surfaces

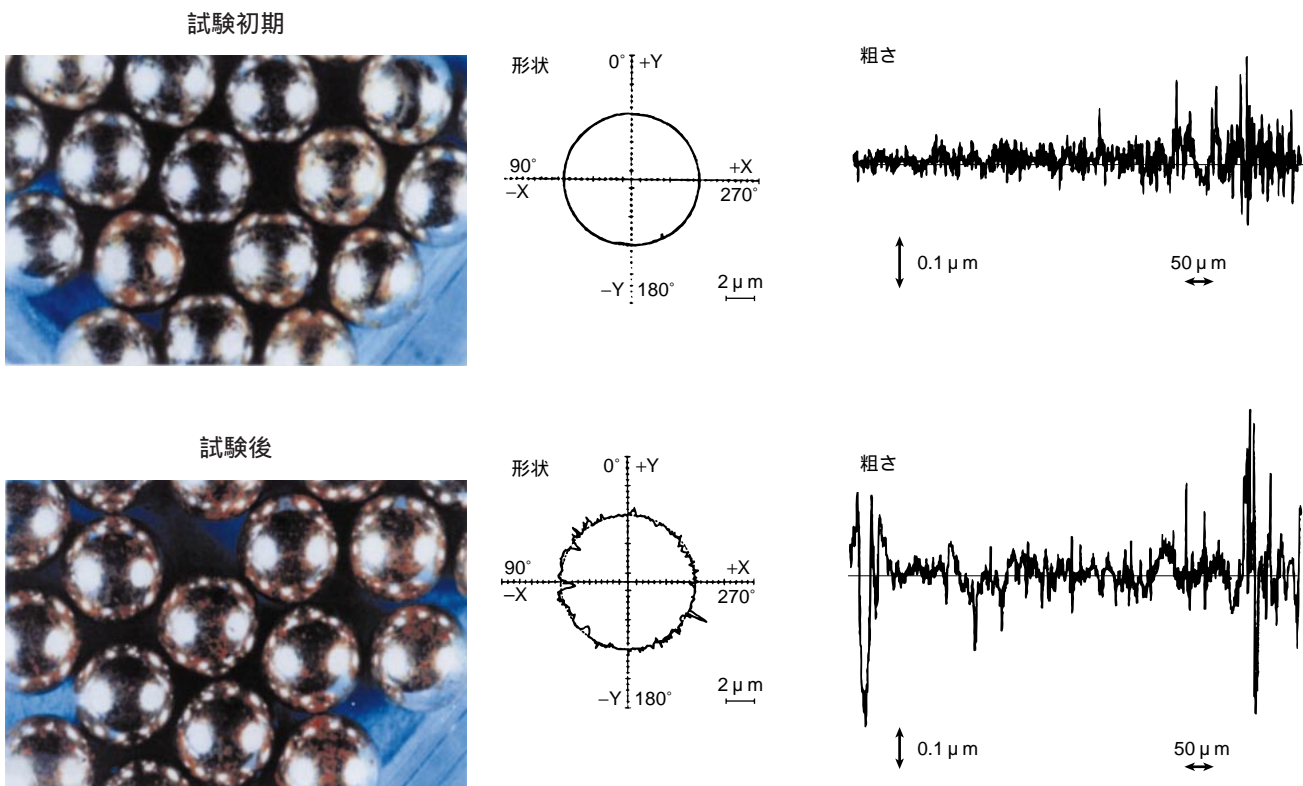


図5 - 3 表面観察・形状測定結果(玉表面の代表例)
Investigation of ball surfaces

表3 表面観察および形状測定結果
Investigation of surfaces

軸受部位	試験軸受No.				
	No.1	No.2	代表例 No.3	No.4	No.5
レール軌道					
ブロック軌道					
玉		×	×		×

○ : 正常(潤滑膜残存)
○ : 母材露出(潤滑膜消失)
× : 面粗れ(摩耗による面粗れ発生)

4.3 玉に窒化けい素(Si₃N₄)を用いたリニアベアリングの発塵特性

図6にラジアル荷重80Nで試験を行った場合の発塵量の経時変化を示す。なお、ここでの発塵量は、粒子径0.1μm以上の総量で示してある。発塵傾向としては、組合せセラミックの場合も総ステンレスの場合と同様の傾向を示すことが確認された。ただし、組合せセラミックの場合には、安定期における発塵量は、総ステンレス(吸引量0.1cf当たり10個程度)の場合に比べて少なく、発塵寿命も約3倍程度の長寿命を示すことが確認された。

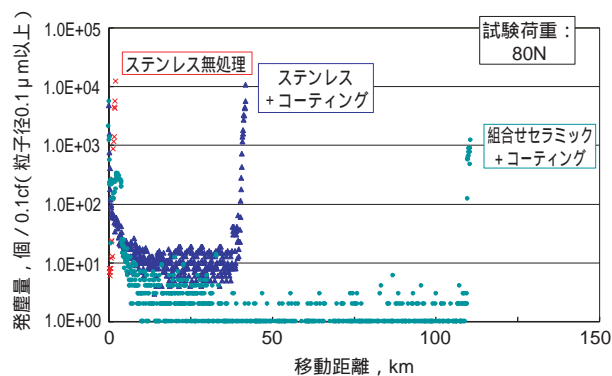


図6 発塵量の経時変化(組合せセラミック)
Particle generation (hybrid ceramic)

図7に発塵粒子径ごとの経時変化、図8にラジアル荷重を40N, 80Nおよび160Nと変えて試験を行った場合の発塵量の経時変化を示す。発塵粒子径ごとの発塵傾向、および、荷重を変化させた場合の発塵傾向ともに、組合せセラミックの場合も総ステンレスの場合と基本的に同様の傾向を示すことが確認された。なお、組合せセラミックの場合の特徴として認められた、安定期における発塵量が少ないこと、および、長寿命を示すことの2

点については、転がり軸受で試験を行った場合の結果と同じであることから、転がり軸受の場合と同様に、転がり接触面においてシリコンふっ化物が生成され、それが潤滑に寄与するという潤滑メカニズム⁵⁾⁶⁾が働いていたものと推察された。

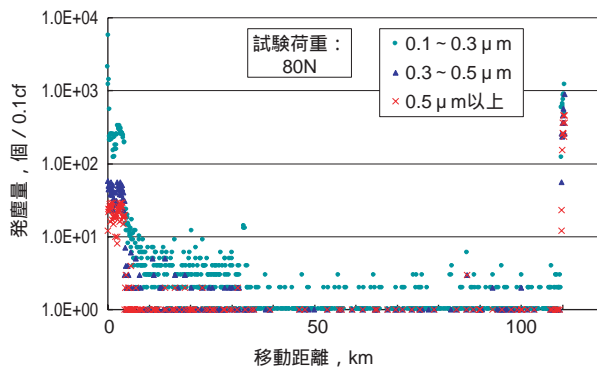


図7 発塵粒子径ごとの経時変化(組合せセラミック)
Particle generation of various diameters (hybrid ceramic)

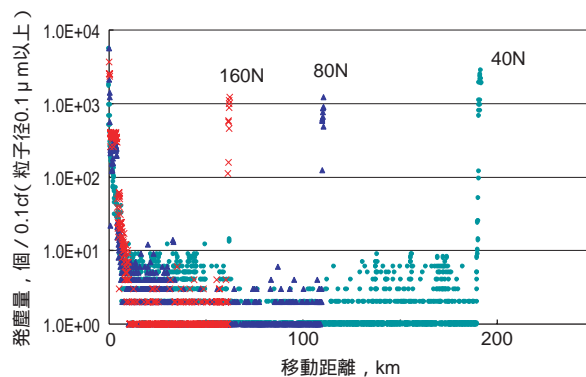


図8 荷重を変化させた場合の発塵量の経時変化(組合せセラミック)
Particle generation at various loads (hybrid ceramic)

4.4 発塵寿命の推定

図9に特殊ふっ素高分子潤滑薄膜を適用したリニアベアリングについて、ラジアル荷重40N, 80Nおよび160Nで試験を行った結果を、縦軸を発塵寿命、横軸をP/Ce(Pは動等価荷重, Ceは基本動定格荷重を示す)としてまとめた結果を示す。なお、各プロットは試験データ5個の平均値を示す。この結果から、特殊ふっ素高分子潤滑薄膜をリニアベアリングに適用した場合の発塵寿命(平均値)を推定する式として以下に示す式が考えられた。

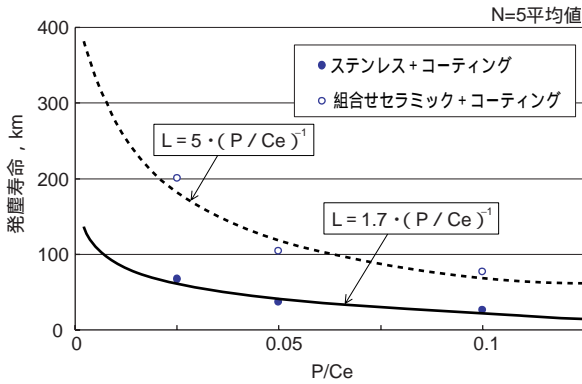


図9 P/Ceに対する発塵寿命
Particle life with P/Ce

$$L = a \cdot (P/Ce)^{-1}$$

L : 発塵寿命(平均値), km

(大気, 室温, 移動速度 0.5m/sec以下,
P/Ce 15%以下)

a : 材料係数

総ステンレス 1.7

組合せセラミック 5

P : 動等価荷重, N

Ce : 基本動定格荷重, N

5. おわりに

以上, 特殊ふっ素高分子潤滑薄膜は, リニアベアリングに適用した場合にも, 転がり軸受と同様にすぐれた潤滑効果を示すこと, また, その場合の発塵特性についても転がり軸受の場合とほぼ同様であることがわかった. 特殊ふっ素高分子潤滑薄膜は, 従来のPTFE膜などの焼成膜とは異なり, 膜自身が潤滑剤(バインダ)を使用していない)であり, PTFE樹脂と同程度の硬さをもつふっ素系高分子材料で, 熱的, 化学的に非常に安定で, クリーン性および耐環境性に優れ, サブミクロンの薄膜であるにもかかわらず長寿命を示すという優れた特徴をもっている. よって, この潤滑薄膜を適用したリニア要素は, 次世代の半導体製造装置用直動案内要素として期待できるものと考えられる.

半導体関連技術の進歩はめまぐるしく, 今後, ますます高度な要求が増大するものと予想されるが, そのニーズに応えることができるようさらに研究, 開発を進めてゆきたい.

参考文献

- 1) 光洋精工(株): 特殊環境用軸受シリーズCAT. No. 208(1998).
- 2) 豊田 泰, 気田健久他: トライボロジー会議予稿集(高松 1999 - 10)433.
- 3) 豊田 泰: トライボロジー会議予稿集(東京 1999 - 5)275.
- 4) 豊田 泰: Koyo Engineering Journal, no. 15(1999)19.
- 5) 豊田 泰, 林田一徳他: Synopses, International Tribology Conference(横浜 1995).
- 6) 豊田 泰: Koyo Engineering Journal, no. 15(1996)3.

筆者



豊田 泰*

H. TOYOTA

* 総合技術研究所
基礎技術研究所 軸受技術開発部