

# 「極限環境下におけるマイクロトライボロジーに関する基盤的研究」

(H11年～H12年、第Ⅱ期)

H11年度予算額：1.8 (億円)

研究体制：鈴木峰男 (航空宇宙技術研究所) 他11機関

## 研究の概要・目標

### 1. 何をを目指しているのか

摩擦・摩耗・潤滑のメカニズムを原子・分子レベルの相互作用を基礎に解明し、現実にかかる複雑な現象に対して科学的・技術的指針を確立する。

(第Ⅱ期の目標)

極限環境におけるマイクロトライボロジーの先行標準/知的基盤化、独創型先鋭研究、実用化研究を実現。

### 2. 何を研究しているのか

1) 極限環境(超微小領域)における摩擦・摩耗・潤滑のメカニズムの解明(原子・分子レベル)と、これらと実際のマクロな現象との関係の解明。  
2) 超微小領域における摩擦・摩耗・潤滑のメカニズムの解明(原子・分子レベル)と、これらと実際のマクロな現象との関係の解明。  
3) 超微小領域における摩擦・摩耗・潤滑のメカニズムの解明(原子・分子レベル)と、これらと実際のマクロな現象との関係の解明。

### 3. 何が新しいのか

摩擦・摩耗・潤滑に関するこれまでの経験則から原子分子レベル研究から実用的な技術までを統合した基盤技術を構築する。

トライボロジーとは、

総合潤滑技術と摩擦・摩耗学であり、本研究では原子・分子領域での現象や微小な構造と実際のマクロな現象を結びつける統合的な研究であり、このような領域をマイクロトライボロジーと呼んでいる。

## 諸外国の現状等

### 1. 現状

高性能・長寿命の宇宙機器、真空下の微小動作する機器、高密度情報記録装置、超小型の超清浄な半導体製造装置、超清浄な環境を必要とする先端技術の確立が求められている。

### 2. 我が国の水準

トライボロジーは、自動車、航空機、宇宙機器、コンピュータなど幅広い産業分野で重要な技術として認識され、研究開発が盛んに行われている。一方、本邦の研究分野は基礎研究ばかりで、応用面から、日本の技術開発に必要とする磁気記録分野の交流が少なく、研究レベルは米国と同程度である。

## 研究進展・成果がもたらす利点

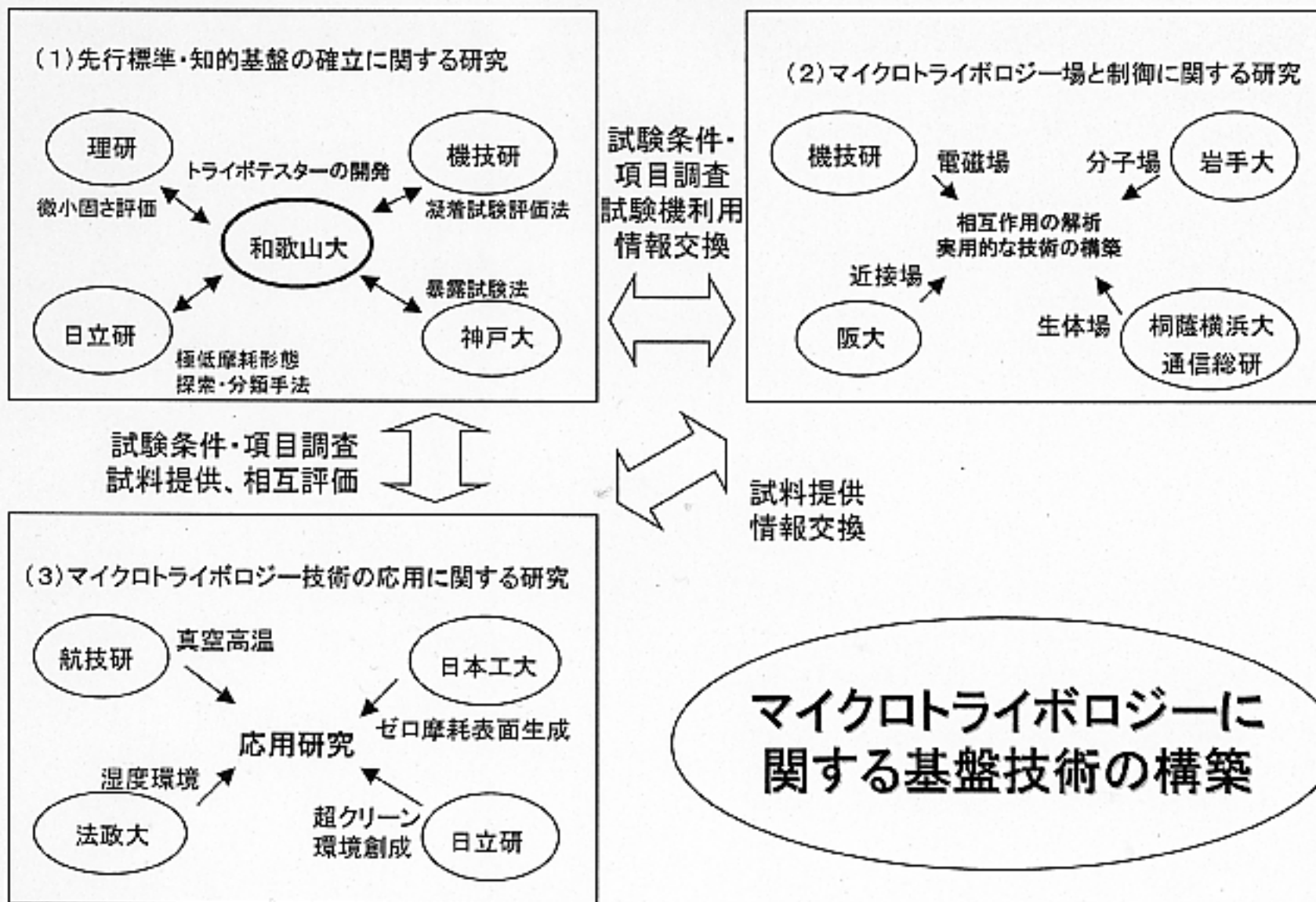
### 1. 世界との水準の関係

特にコンピュータ等の高密度情報記録装置の分野における競争力が厳しく、研究の成果が産業界の競争力に結びつく。超清浄な環境を確保するためには摩擦の問題が重要であり、また、宇宙機器分野における高信頼潤滑技術の確立も急務である。

### 2. 波及効果

極限環境におけるマイクロトライボロジー技術およびマクロな現象が結合され、摩擦・摩耗・潤滑に関する技術が高効率化されることで、機器の高信頼・長寿命化、高効率化によるエネルギーロスの低減、リスクミッション等の効果が期待される。領域はあらゆる可動部分だけでなく、摩擦による粉塵等が問題になる超高空・超清浄環境分野へも貢献することが期待される。

「極限環境下におけるマイクロライボロジーに関する基盤的研究」の研究体制



極限環境下におけるマイクロトライボロジーに関する基盤的研究

研究項目	担当機関	研究担当者	所要経費(千円)		
			H11	H12	計
1. 先行標準・知的基盤の確立に関する研究					
(1)極限環境対応マイクロトライボテスターの開発に関する研究	和歌山大学工学部	土谷 茂樹	-	13,918	13,918
(イ)極限環境対応マイクロトライボテスターの開発に関する研究	和歌山大学工学部	土谷 茂樹	19,647	-	19,647
(ロ)微小硬さ評価技術に関する研究	理化学研究所	河野 彰夫	9,588	-	9,588
(2)低軌道宇宙環境の曝露試験法に関する研究	神戸大学工学部	大前 伸夫	9,330	9,239	18,569
(3)マイクロ荷重下の凝着試験評価法に関する研究	産業技術総合研究所	安藤 泰久	12,836	9,932	22,768
(4)計算機実験による極低摩擦形態探索・分類手法開発に関する研究	(株)日立製作所機械研究所	佐々木 直哉	8,859	9,009	17,868
2. マイクロトライボロジー場と制御に関する研究					
(1)電磁場のマイクロトライボロジー相互作用と制に関する研究	産業技術総合研究所	榎本 祐嗣	14,672	8,503	23,175
(2)近接場のマイクロトライボロジー相互作用と制に関する研究	大阪大学工学部	菅原 康弘	10,940	8,889	19,829
(3)分子場のマイクロトライボロジー相互作用と制に関する研究	岩手大学工学部	森 誠之	15,036	12,396	27,432
(4)生体場のマイクロトライボロジー相互作用と制に関する研究					
(イ)極微小バイオモータのトライボロジー挙動に関する研究	桐蔭横浜大学工学部	工藤 成史	6,929	5,126	12,055
(ロ)モータンパク質のすべり運動摩擦に関する研究	通信総合研究所関西先端研究センター	大岩 和弘	9,398	6,535	15,933
3. マイクロトライボロジー技術の応用に関する研究					
(1)宇宙環境・真空高温下の長寿命潤滑被膜創成	科学技術庁航空宇宙技術研究所	鈴木 峰男	15,140	9,373	24,513
(2)宇宙環境・湿度環境下の長寿命表面創成に関する研究	法政大学工学部	西村 允	8,509	6,669	15,178
(3)ゼロ摩擦・超ダストフリー表面創成に関する研究	日本工業大学工学部	川田 洋輝	15,018	10,342	25,360
(4)超クリーン環境創成に関する研究	(株)日立製作所機械研究所	三宅 正二郎	24,841	12,637	37,478
4. 研究推進	文部科学省研究振興局		369	368	737
			181,112	122,936	304,048

## 研究目標の概要・成果の概要<課題全体>

課題名：極限環境下におけるマイクロトライボロジーに関する基盤的研究

(研究代表者：航空宇宙技術研究所，鈴木峰男)

### 【研究目標の概要】

高性能・長寿命の宇宙用機器、極高真空下で作動する機器、マイクロマシンなどの超小形機器、高密度の情報記憶機器、超クリーンな半導体製造機器などはこれからの科学技術の重要な応用分野である。このような極限環境下で動作させる機器においては、トライボロジー（総合潤滑技術，摩擦学）にかかわる諸問題が顕著に現れてくる。それらの問題は従来の機器において蓄積されたともすれば経験的なエンジニアリングデータの延長では対応できない課題を多く含み、確固たる科学的根拠に基づいて技術的に解決しなければならない。

摩擦・摩耗・潤滑の現象は表面の動的過程として捉えることができ、その究極は原子・分子レベルの相互作用である。原子・分子レベルの相互作用を基礎に摩擦・摩耗・潤滑のメカニズムを解明していくマイクロトライボロジーの研究は、現実におこる複雑な現象に対して技術的指針を与えるには未だきわめて不十分な状況である。

このため第Ⅰ期においては、極限環境下の機器に顕著に現れる多くの現象が、表面科学に立脚するマイクロトライボロジーを必要としていることに着目し、マイクロトライボロジーの基礎研究を加速推進するとともに、これからの社会に大きなインパクトを与える極限環境下で動作する機器の開発に対する技術指針を確立することを目的として研究を進めた。第Ⅱ期では、第Ⅰ期の研究成果および評価を踏まえ、独創型研究をさらに深化させるとともに、実用的なマイクロトライボロジー技術の構築を図ることを目標に、(1)第Ⅰ期で目途がついた試験手法の先行標準化・データベース（知的基盤）化を目指す研究、(2)第Ⅰ期の探索的研究で見いだされた新しい知見をさらに深化させる独創型研究、(3)第Ⅰ期で応用の芽が出てきた課題に対してさらに実用化を目指した研究を行った。

#### (1)先行標準・知的基盤の確立に関する研究

マイクロトライボロジーの分野は、比較的新しいため標準的な評価法・分析法が確立されていない。アトミックスケールに至るマイクロトライボロジーの研究は欧米に伍して我国も高水準な位置を誇っているが、世界に先駆けて先行できるもの、及びスタンダードとなる手法を与えるもの、データベースとして供給できると考えられる4課題について研究を進めた。具体的には、マイクロトライボテストの標準化、スペースステーションでのマイクロトライボロジーの基礎知識、凝着現象の解明、計算機シミュレーションによるマイクロトライボロジーシステムの評価・予測、データベース化を目標とした。

#### (2)マイクロトライボロジー場と制御に関する研究

第Ⅰ期の探索的研究で見出された新しい知見をさらに深化させる独創的研究を行った。トライボロジー場として物理場、化学場および生物場に大別し、それぞれのトライボロジー場におけるマイクロ条件での相互作用を計測し、その原理を解明するとともに、その成

果をマイクロトライボロジー特性を制御するために活用することを目標とした5課題について研究を進めた。具体的には、帯電による素電荷との相互作用を原子スケールで計測すること、外部電場による摩擦の制御、分子状境界膜の構造制御、筋肉のモーター蛋白質分子の相互作用と直線運動の制御、バイオモーターによる回転運動の制御を目標に、極限下におけるマイクロトライボロジー計測法の開発、特異現象の観察および相互作用の制御に関して基礎的な研究を進めた。

### (3) マイクロトライボロジー技術の応用に関する研究

宇宙、超クリーン、高温や高湿度などトライボロジーにとって極限的な環境において超低摩擦、ゼロ摩擦、超ダストフリー、長寿命などを実現するため、第1期で応用の芽の出してきた4課題について、さらに実用化を目指したマイクロトライボロジー技術の研究を進めた。具体的には、宇宙機器への応用を想定した真空高温に耐えられる長寿命潤滑被膜創成、真空及び高湿度に耐えられる長寿命表面創成、超LSI製造装置やナノスケール加工等への応用を想定したゼロ摩擦・超ダストフリー表面創成、超クリーン環境創成の研究を進めた。

### 【研究成果の概要】

「先行標準・知的基盤の確立に関する研究」では、試験・評価手法について先行標準化が期待できる課題、及び知的基盤化が期待できる課題について研究を行った。ナノメートルスケールの解析手法を実現できる環境雰囲気制御機能を有する高速摺動マイクロトライボテスターの開発、マイクロトライボテスターと表面分析を複合した世界で唯一のスペースステーション環境シミュレーターの開発及びこれを利用した大気曝露の影響と軌道上の現象との基本的相違の明確化、表面の修飾状態を変化させた実験や新しい測定デバイスの開発による凝着現象を高精度に評価する手法の確立、原子スケールの解析と連続体モデルの結合によるより解析手法の開発及びこれを利用した異種原子添加材料での摩擦現象を考慮した高精度Wear-Mapモデルの構築など、極限環境下のマイクロトライボロジーにおける新知見・新手法、データベース化に貢献した。

「マイクロトライボロジー場と制御に関する研究」では、物理場、化学場および生物場におけるマイクロ条件での相互作用の計測法の開発、特異現象の観察および相互作用の制御について研究を進めた。物理場では、分解能が原子スケールで素電荷のレベルまで観察できる計測装置の実現、新規開発の電子顕微鏡埋め込み型トライボテスターを用いた原子分解能での電場効果現象の把握や交番電流により摩擦を制御する手法を開発した。化学場では、分子状薄膜の高次構造制御やトライボケミカル反応制御によるマイクロトライボロジー特性の向上を実現し、特性制御を材料面から支援するための新規材料を提案した。生物場では、バクテリアのべん毛モーターの回転運動を制御して内部摩擦の測定を実現させ、またモーター蛋白質の相互作用を検出するに十分な性能の装置を開発し、分子摩擦である相互作用を捉えることに成功した。いずれの場でも、マイクロトライボロジー特性が着目した因子に敏感であり、推定したマイクロトライボロジー機構に基づき、極限環境下におけるトライボロジー特性の制御に成功している。これらの計測法、観察結果ならびに摩擦制御法は世界で最も進んでおり、今後マイクロトライボロジーの研究を進める上で有効に利用されると期待される。

「マイクロトライボロジー技術の応用に関する研究」では、宇宙や超高密度記録・ナノ加工等のフロンティア分野で超低摩擦、ゼロ摩擦、超ダストフリー、長寿命などを実現させるマイクロトライボロジー技術の研究を行った。宇宙環境・真空高温下で長寿命を達成するためには移着膜潤滑が有望であること、複合ターゲットスパッタリング法やイオン注入による表面改質で二硫化モリブデン膜の寿命や耐湿性が改善されることなど、新しい知見を得た。また、超格子薄膜、ナノ周期構造被膜等の新しい薄膜が摩擦低減・摩擦耐久性の向上、ナノスケールの極微細発塵低減に有効であることなどを明らかにし、超LSI装置やナノ加工実現への基盤技術を確立した。また、プラズマエッチング時のプラズマ解析とコンタミネーション発生源の解析から、コンタミネーションを低減するためのプロセス条件を見いだした。実用を目指した応用研究にただちに着手できるレベルに達しており、基盤研究としては十分な成果を挙げたと言える。

研究成果公表等の状況<課題全体>

課題名：極限環境下におけるマイクロトライボロジーに関する基盤的研究

(研究代表者：鈴木峰男)

【研究成果発表等】

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	18 件 ( 3) 件	25 件 ( 2) 件	134 件	177 件 ( 5) 件
国外	55 件 ( 9) 件	4 件	51 件 ( 8) 件	110 件 (17) 件
合計	73 件 (12) 件	29 件 ( 2) 件	185 件 ( 8) 件	287 件 (22) 件

(注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと)

【特許出願等】 6 件 (国内 5 件、国外 1 件)

【受賞等】 4 件 (国内 4 件、国外 0 件)

- ・ ナノプローブテクノロジー賞 (平成11年5月)  
大阪大学 菅原康弘
- ・ 日本トライボロジー学会論文賞 (平成12年5月)  
岩手大学 猪狩 隆, 七尾英孝, 森 誠之
- ・ 日本金属学会 金属組織写真奨励賞 (平成13年3月)  
産業総合技術研究所 藤澤 悟
- ・ 日本トライボロジー学会論文賞 (平成13年5月)  
岩手大学 星 靖, 下斗米 直, 佐藤未生, 森 誠之

【主要雑誌への研究成果発表】

Journal	Impact Factor	サブテーマ 1	サブテーマ 2	サブテーマ 3	合計
Nature	28.833		1		1
Physical Review Letter	6.017		1		1
Biophysics Journal	4.524		1		1
Physical Review B	2.842		2		2
Langmuir	2.813		1		1
Surface and Interface Anaysis	1.561		1		1
Journal of Material Research	1.539		1		1
Nanotechnology	1.505		1		1
Journal of Crystal Growth	1.307		1		1
Japan Journal of Applied Physics	1.275	2(1)	6		8(1)
Review of Scientific Instruments	1.177		1		1
Applied Surface Science	1.045		11		11
Thin Solid Film	1.019		1		1
Wear	0.602	1	4	1	6
Tribology Letters	0.456	2	2		4
ASME Journal of Tribology	0.450	1(1)		1	2(1)
STLE Lubrication Engineering	0.242			1	1
JSME International Journal	0.236- 0.112	2			2
日本機械学会誌		2(1)		2(1)	4(2)
トライボロジスト			6	2(1)	8(1)
精密工学会誌				1	1
真空				1	1
主要雑誌小計		10(3)	41	9(3)	60(6)
発表論文合計		17(7)	45(2)	11(3)	73(12)