

## TODAY

## エリマキトカゲとコイルばね



香川大学

学長 木村好次

皆さんはエリマキトカゲを覚えておられるでしょうか。ウーパールーパーというのもありました。一世を風靡した、と言っては大きすぎでしょうが、動物園や水族館をにぎわせたスターでしたが、今では覚えている人も少ないでしょう。熱しやすく冷めやすい、わが民族の特徴の一つとしてそういうところがある。

それが良いとか悪いとかは誰にも言えないでしょうけれど、技術の話になると困ったことになる……ことがあるのです。

1994年のことですから、もう10年も前の話ですが、種子島の宇宙センターから技術試験衛星ETS-VIが打ち上げられました。「きく6号」という愛称でご記憶の方がいるかもしれません。重さ3.8t、静止軌道にのせて10年間ほど、実用衛星としての技術基盤の確立を目指した実験の予定が組まれていました。

こういう衛星は、まず地球を一つの焦点とする楕円軌道に打ち上げ、地球から一番離れた遠地点、英語ではアポジと言いますが、そこでアポジエンジンという小さなロケットを吹かして軌道を変更し、高度3万6千kmの静止軌道に投入するという方式をとります。

打ち上げから2日後の早朝、アポジエンジンを吹け、というコマンドが送られました。ところがエンジンがいうことをきかない。燃焼室の圧力が設計値の1/10ほどにしかならないのです。スタッフは焦ったでしょう。手を変え品を変え、いろいろなコマンドを出してもらちがあかず、最後には全然応答がなくなってしまいました。

結局衛星は静止軌道にはのらず、800億円がパーになったのです。

その調査のお手伝いをしたのですが、推定された原因は次のようなものでした。ロケットを打ち上げると、大気圏を突き抜ける時に先頭の部分に空気のうずができ、衛星は激しく揺さぶられる。その振動によって、ヒドラジンという燃料と酸化剤をアポジエンジンに送る二液推進剤という弁に不具合が起きたのです。

この弁は、ロッドで円盤を串刺しにしたような形をしていて、円盤の片側に燃料を加圧注入してその円盤をロッドの軸方向に動かし、両端の流路を開け閉めして燃料と酸化剤の流量を制御しようという仕組みです。その圧力とバランスするように、ロッドの周りにはコイルばねが巻いてあるのですが、打ち上げの時の振動で、ばねがロッドと直角の方向にずれたのです。間の悪いことに、ずれたばねの端っこが円盤とハウジングの間に噛みこまれ、燃料の圧力で押された円盤がロッドを曲げてしまった。

コイルばねというのは、小田原提灯の竹ひごみたいな形のばねで、考えてみれば軸対称にはなっていない。だから振動を受けると、横方向にずれる場合がある。あとで測定してみると、ちょうど打ち上げの時の振動レベルでだけ、ずれるばねがいくつか見つかりました。

こういう原因がわかるまでに、ずいぶん時間がかかりました。ばねのこんな性質を知っている専門家をなかなか探し出せなかったのです。

話が飛びますが、そもそも機械要素全体に、そういうことが言えるような気がします。いまだき売れ筋の技術といえは情報でありナノである。ばねだとかベアリングだとか、おまえらまだそんなカッターイことやってんのか、と言われかねない。

むろん先端的な技術は大事だし、それを伸ばそうというのはわかります。それはわかるけれど、基本的な要素技術をどこかでしっかり守っていないと、先端技術だつてうまくいかない、これはそういう例だと思うのです。

## 「低摩擦損失高效率駆動機器のための材料表面制御技術の開発」中間報告

非鉄材料研究部 武村 厚

## 1 はじめに

本プロジェクトは地球温暖化防止新技術プログラムの開発事業として、平成14年度に経済産業省の直轄事業としてスタートし、平成15年度に新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO技術開発機構）に移管され現在に至っている<sup>1)</sup>。

本年度（平成16年度）は中間目標の達成が問われる時期でもあり、本稿では現在までに得られた主な成果を紹介する。

## 2 成果の概要

本開発では、最近のトライボロジー研究の進展により明らかになりつつある摺動部のナノレベルの境界潤滑膜の構造とマクロなトライボロジー特性との関連性の知見に基づき、駆動機器の高面圧摺動部の状態を制御することで、駆動機器の省エネルギー化を図ることを目標としている<sup>1,2)</sup>。

3種類の駆動機器システム、自動車用ベルトCVT、水圧機器、タービン軸受の省エネルギー化の実現方法を検証するため、摺動部の接触状態、境界潤滑膜の構造と性質に着目し検討した結果、各機器に特有の境界潤滑膜あるいは変質層等が摺動部に形成されていることが確認され、それらの膜構造への表面状態、潤滑剤、環境条件の影響を把握し、最適化への指針を提示した。これらに基づき、各機器システムの目標トライボロジー特性実現のための指針を見だし、各機器システムの摺動部の基礎的なモデル案を構築できる見通しである。

次に各機器システムの研究開発においては、摺動部材質、環境、接触状態等の各条件をスクリーニングし、表面状態、潤滑剤、環境の候補を絞り込んだ。トライボロジー特性改善効果の検証のため、各駆動機器の要素及びシステムを高精度で模擬する試験装置を開発した。これら

により、境界潤滑膜構造の制御による駆動機器の省エネルギー化実現の可能性を確認した。

各テーマごとの成果について以下に述べる。

3 研究開発項目  
潤滑膜の構造・特性及び生成機構の解明のための評価・解析技術に関する研究

トライボロジー特性と境界潤滑膜の関係を把握するうえで不可欠な境界潤滑膜の諸性質を評価する方法を確立し、環境（潤滑媒体等）材料（表面材質、形態等）、摩擦条件と摩擦摩耗特性との関係を解析した。

(a) 摺動部の状態の評価解析方法の開発  
・境界潤滑膜の構造

TOF-SIMS分析による摺動面の厚さ数nmの層の成分の同定と構造解析、高分解能TEMによる断面構造観察、ナノインデント及びTEMによる膜厚測定及びエリブソメーターによる広域の膜厚の測定技術等を確立した。

## ・境界潤滑膜の変形特性

ナノインデントによる変形抵抗の測定技術を確立した。

## ・境界潤滑膜の形成過程

多成分系の境界潤滑膜における競争反応と膜構造生成過程の解析技術を確立した。

## ・摺動部接触状態

トライボロジー挙動と相関性の高い表面形状パラメータによる接触状態の評価技術及び摺動面接触機構の解析法として、表面付近の塑性変形領域計測によるマイルドからシビア摩耗への遷移臨界圧力の判定技術を確立した。

## (b) 境界潤滑膜構造の影響因子と機器のトライボロジー特性との関連の調査

## ・自動車用ベルトCVT

鋼、Ni-P膜等の皮膜とZnDTP、Caスルホネート、コハク酸イミド等の潤滑油

添加剤との組み合わせにおいて境界潤滑膜の構造及び特性を摺動面圧、添加剤成分により制御可能なことを検証。摩擦摩耗と境界潤滑膜特性との関連性についても確認した。またエレメント、プリー間の非定常弾性流体潤滑を考慮した混合潤滑解析（スリップ率、摩擦係数、接触部形態等）を実施し、接触部の表面形状の指針を提示した。さらに境界潤滑膜の生成過程のデータを加えてモデルを構築できる見込みである。

## ・水圧機器

CrSiN皮膜摺動面の非晶質酸化物からなる境界潤滑膜の存在及びその膜厚を確認した。DLC皮膜及び相手材の摺動部をラマン、XPS分析やSEM観察し、皮膜表面には薄い変質層、あるいは相手摩擦面にはDLC膜とは構造の異なる移着物の存在を確認した。接触状態の解析にGreenwood-Trippの粗さの接触モデルを適用し、水膜厚さと粗さの接触圧力を推定した。

## ・発電用タービン軸受

摺動部のTOF-SIMS分析により、PEEK系複合材の摺動面は、移着により生成したPTFEの薄膜で覆われ、相手材S35CはPEEKとPTFEとのトライボロジー反応によって生成したと推定される生成物等により覆われていることを把握した。耐高面圧性を耐焼付性とみなして、軽摩耗モードから重摩耗モードへの遷移臨界圧力の挙動として把握した。

PEEK系複合材料とホワイトメタルの表面層の変形挙動について、スクラッチ試験を実施、PEEK系複合材料はホワイトメタルに比べ、表面層における弾性限界が高く塑性変形し難いことを確認した。

4 研究開発項目  
CVT動力伝達システムの最適効率化に関する研究

実機におけるCVTベルトの摺動環境について、3次元動的応力シミュレーション

ンにより、エレメント摩擦面平均面圧、エレメント/プーリ間の相対摺動速度を求めた。実機と模擬試験のエレメントの摺動面摩擦を比較し、試験の荷重条件、摺動速度及びびならし条件を決定した。摩擦特性は±5%以内でシミュレートでき、摩擦量も実機を再現できた。モデル構築に必要な境界潤滑膜の厚さ、変形抵抗、表面皮膜硬さと摩擦係数のデータを実機及び模擬試験で実測し蓄積した。

プーリの表面粗さの制御、及び今回開発したCa系添加剤等を配合した潤滑油の適用により、摩擦係数向上効果が認められ、両者の併用で中間目標の摩擦係数0.12(現状0.11に対し約10%向上)が得られた。さらにプーリ表面へのコーティング膜の効果も加えることで、さらに高い摩擦係数が得られると期待される。

5

研究開発項目  
高効率高耐久性水圧機器  
システムに関する研究

水圧機器の弁・ポンプ摺動部構造については、バルブ/プレート間及びピストン/シリンダ間の摺動部構造の模擬試験装置を製作した。シリンダ・バルブ摺動部構造については、接触状態を模擬可能な摺動試験装置を製作したほか、実機相当の運転状況下で耐久性を評価する単要素模擬試験装置を製作した。さらに潤滑解析と実験により実機が再現できることを確認した。DLC及びCrSiN系皮膜の小型サンプル試験において、比摩擦量の中間目標を超える $10^{-7}\text{mm}^3/\text{Nm}$ を達成する成膜条件を把握した。さらにDLC系皮膜は、シリンダー及びバルブの単要素模擬試験において、中間目標を超える

$10^{-7}\text{mm}^3/\text{Nm}$ の比摩擦量が得られた。

6

研究開発項目  
耐高面圧複合軸受システム  
に関する研究

発電用タービン軸受と大きさ、材質が実機と同等(軸受径 330mm)の低回転ターニング運転の模擬試験機、及びタービン回転上昇時の昇速モードと回転低下時の降速モードの模擬試験機を設計・製作し、摺動条件を決定した。

PEEKを母材とし、固体潤滑剤としてPTFEを、強化繊維として炭素繊維を加えたPEEK系複合材料は、表面層が塑性変形し難いことと境界潤滑膜の形成による許容面圧の向上効果が明らかになった。PEEK系複合材料は、中間目標を上回る $29\text{kgf}/\text{cm}^2$ ( $2.9\text{MPa}$ )の負荷に対し、ターニング摩擦試験及び昇速降速試験に

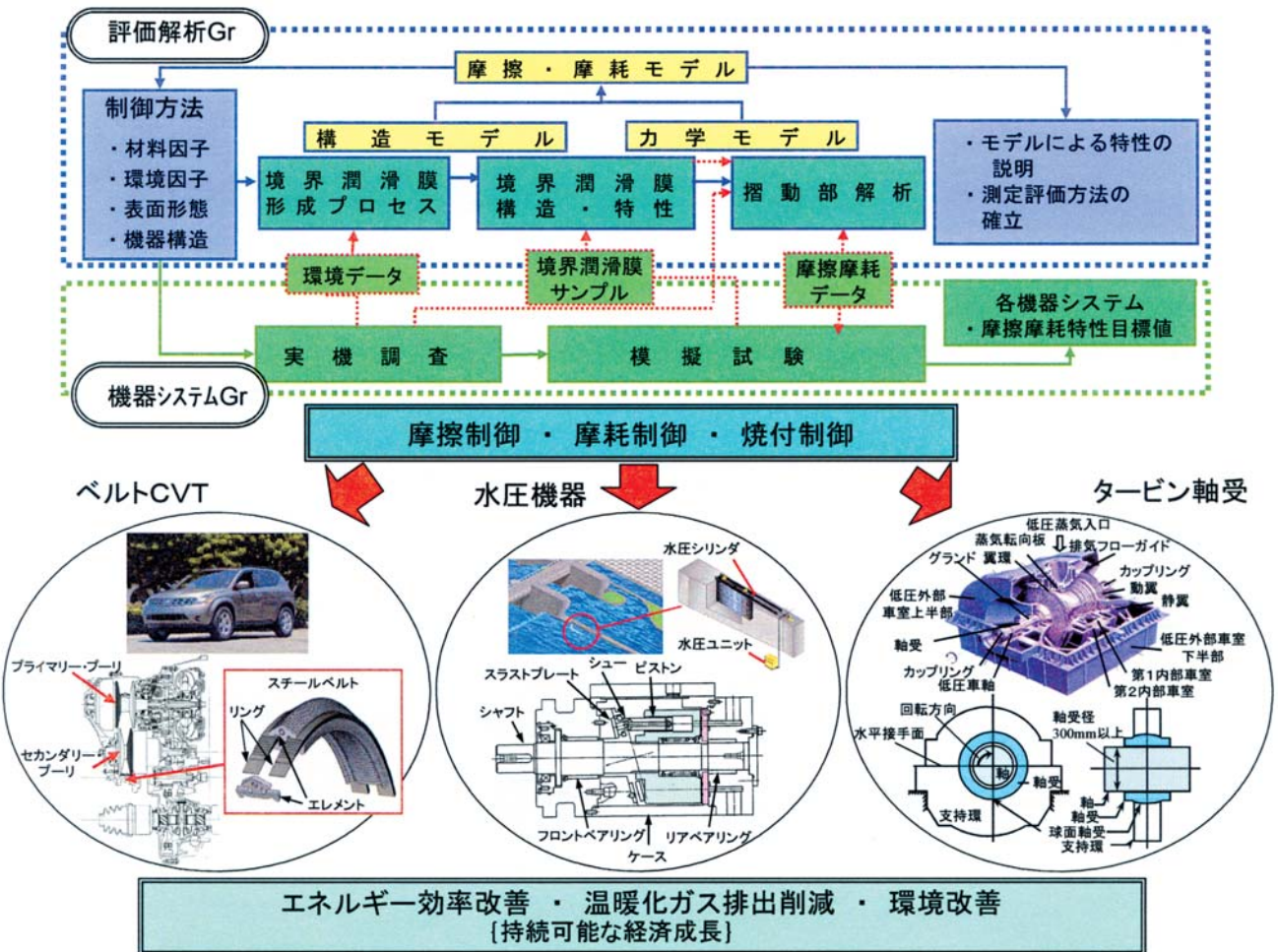


図 プロジェクトのスキーム：トライボロジー基盤技術開発と駆動機器への応用技術開発

において良好な耐焼付性を示した。

## 7

### 今後の進め方

本プロジェクトはほぼ所期の成果を上げ、中間目標を達成できる見通しであるが、汎用性のある摩擦モデル及びデータにより他の駆動機器への適用による省エネルギー、温暖化ガス削減の波及効果も期待されており、今後は特に以下の点を

考慮しつつ、平成18年度の最終目標達成に向けて推進する。

・評価解析研究の促進

「境界摩擦モデル」の構築をプロジェクト全体として推進し、それに基づく摩擦面の設計指針を具体化する。

・個別テ - マ間の有機的な連携

評価解析研究に関して大学と企業との連携を密にし、基本コンセプトが各機器

システムの研究開発に反映できる関係を強化する。

・成果の関連分野への波及

各機器システムの実用化の前倒しを図るほか、応用範囲を広げるため他分野との連携の可能性についても検討する。

(参考資料)

1. 武村 厚, JRCM NEWS 19( 2003 )
2. H. Spikes, Tribol Int 34( 2001 ) 789

お知らせ

#### 「環境調和型超微細粒鋼創製基盤 技術の開発( PROTEUS )」 第2回シンポジウム

JRCMは、新エネルギー・産業技術総合開発機構( NEDO技術開発機構 )との共催で「環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術の開発( PROTEUS )」第2回シンポジウムを開催します。

日 時：1月27日( 木 ) 9 : 00 ~ 17 : 10

場 所：東京電機大学 7号館丹羽ホール

参加費：無料

問い合わせ先：JRCM鉄鋼材料研究部  
城田

詳しくは、JRCMホームページ( <http://www.jrcm.or.jp/> ) をご覧ください。

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第219号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM 総務企画部までお寄せください。  
本誌は地球環境保全を考慮し再生紙を使用しています。  
本書の内容を無断で複写複製転載することを禁じます。

発行 2005年1月1日  
発行人 小島 彰  
発行所 財団法人 金属系材料研究開発センター  
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階  
TEL (03) 3592-1282(代) / FAX (03) 3592-1285  
ホームページURL <http://www.jrcm.or.jp/>  
E-mail [jrcm@oak.ocn.ne.jp](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)