

# 研究は万華鏡のごとく

## Kaleidoscope of Researches



田中正人\*  
Prof. Masato TANAKA

You cannot predict what you will see into a kaleidoscope of researches, before you start working. Making researches is like reaching for the summits of unexplored mountains. You could be lucky enough to find new gold mines or hold breath at most beautiful scenery no one has ever seen. On the other hand you may be often turned back by a deep gorge or a high waterfall ahead. In spite of that, you find that you have known more of the mountains. With the information, you may be able to be at the summits next time. You need be always optimistic, positive and tenacious in making researches.

*Key Words: tribology, rotordynamics, research*

### 1. 万華鏡

新しい世紀の始まりに立つと、講師の辞令をもらった丁度30年前の春が遙か遠くのようにもであり、すぐ近くのことのようにも感ぜられるこの頃です。この間に携わったトライボロジーやロータダイナミクスの研究のいろいろな場面を振り返ってみると、まさに千変万化する万華鏡の華麗な世界を覗いた時のように心を奪われるものがあります。

研究は地図のない未踏の山の頂上を目指すのに似て、登るに値する山なのかどうかを判断するところから始まり、登ると決めてからもいくつもの分かれ道でどのルートを取るかの決断を迫られます。ほとんど苦労することなく頂上に到達する幸運な場合もありますが、長い目でみるとそれが本当に幸運なのかどうかはわかりません。一方、何度も道に迷ったり、中途まで登った道を逆戻りする決断をしなくてはならないことも多く、その挫折の経験から教訓を汲み取って新たな展開の組み立てを模索するのが研究ならではの楽しさです。研究を遂行するには、正しい努力をすれば必ず道はひらけるはずという楽観的な態度、また転んでもただでは起きないという積極的な態度が必要です。本稿では私自身が経験したこのような場面のいくつかを思い出しながら、研究の面白さ、苦しさを紹介したいと思います。

### 2. Coup de Foudre

フランス語を語源とするこの言葉の和訳の一つに「電撃の恋」というのがあります。これはあらゆる恋の中で身を灼き尽くさんばかりの最も情熱的な恋であり、日本古来の「一目惚れ」という優雅な言葉よりもはるかに激しい情念が感ぜられます。その昔、学生時代のパーティ会場で入り口から入ってくる特定の人が目に入った途端、その人だけしか目に映らなくなったという経験をされた方もおられると思います。それに似て、自分を捉えて離さない何かを感じさせる研究テーマとの運命的な出会いというものも確かにあるものです。

「金属面の摩擦に関する研究」という私の卒業論文の研究テーマはまさにそのようなものでした。高校の物理の演習問題で取り組んで以来、勉学の課題としての「摩擦」を意識することはありませんでした。それを研究しようとするテーマに何かしら新鮮な感覚、心惹かれるものを強く感じたのです。思えば、これがトライボロジーとの出会い、そして同時によき指導者との出会いでもありました。このテーマの指導教官は当時気鋭の助教授であった堀幸夫先生(現金沢工業大学副学長、東京大学名誉教授、元日本トライボロジー学会会長)で、廊下を歩いていた先生を引き止めてこのテーマの内容について丁寧に説明していただき、ますますこの研究をやってみたくなりました。研究室には当時博士課程2年生の木村好次氏(現

\*東京大学大学院 工学系研究科 産業機械工学専攻 教授 工学博士  
元日本トライボロジー学会副会長  
元日本機械学会理事

香川大学副学長，東京大学名誉教授，元日本トライボロジー学会会長)が焼付き現象の解明の研究をされており，ついでに私も卒論生の面倒も見てくれることになりました。

木村先生の指導で，ボール盤を改造して摩擦試験機の本体を製作したり，摩擦トルクを計測するのに板ばねに歪みゲージを貼り付けたセンサーを製作するなど，それまで実験装置はお金を出して購入したものを組み立てて使うのだとばかり考えていた私には何もかも新鮮な経験でした。堀先生は，あとで改造しやすい手作りの簡単な構造の実験装置が望ましいということをもとに教えて下さったのですが，大学で行なうべき基礎的な研究の実験装置はそのようなもので済むはずで，またそうでなくてはならないという信念を持っておられたようです。さらに，客観的にみても焼付き現象を人工的に発生させるという初期のトライボロジー研究には，そのような実験装置で十分であったと思います。確かに，物理や化学の有名な基本原理，法則の発見につながった過去の多くの実験装置は，文献で見ると極めて簡素なものですが，しかし，ナノレベルのトライボロジー現象を解明しようとする最近の研究では，億円単位の高価，複雑な実験装置が必要になる場合もあり，これも一つの現実に違いありません。

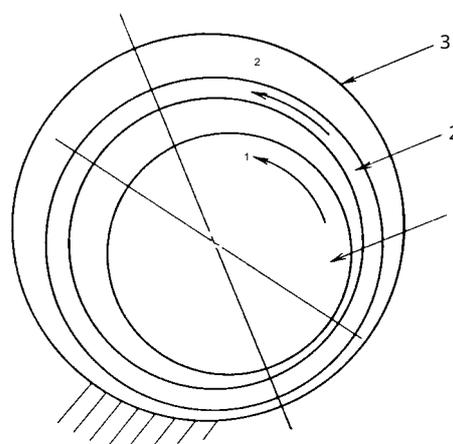
今後，大学の研究室は億円単位で必要となる研究費をどうやって稼ぐか，それとも精々数十万円から数百万円程度で済む研究テーマを探すか，決断を迫られています。前者の場合には，リーダーとなる一人の研究者のもとに多数のポスドク研究者を結集して集団で研究を進めるか，企業も含めた複数の研究グループが分担して研究を進めるか，いずれにせよ今まで研究者個人が独立して研究を行い，成果をすべて個人に帰するという大学の伝統的な文化を変更する方向に移行し，大学の質的，構造的変化につながるものと思います。そうすると，研究費の配分のみならず研究員の人事など，多くの大学の先生が最も不得意とするいろいろなマネジメントが極めて重要なものとなってくでしょう。

さて焼付きの実験に戻ると，円環状の金属のテストピースの端面同士を突き合わせて潤滑剤に浸し，片方を固定してもう一方を回転させる摩擦試験を行いました。ある時間が経過すると，それまで安定していた摩擦係数が次第に乱れ始め，摩擦係数が一挙に増加して摩擦部分から異音が発生するようになります。ここで試験を中断して摩擦面を調べると確かに焼付きが生じていることがわか

り，予定したとおりの現象の発生を自分たちの作成した装置で確認できたことに単純に感動したものです。焼付きは，機械的な摩擦作用によって潤滑膜の剥ぎ取られる速度が，剥ぎ取られた部分の潤滑膜の修復速度を上回るようになると自動的に発生するという安定・不安定問題であることがわかり，これ以降安定判別の問題に強い興味を抱くようになりました。

### 3. 浮動ブッシュ軸受

私が博士課程で研究することになった浮動ブッシュ軸受についてもCoup de Foudreが当てはまります。現在，自動車のエンジンや船用機関のターボチャージャー用のすべり軸受として多用されているこのすべり軸受では，図1に示すように，軸と軸受の間に挿入された薄肉円筒状のブッシュが軸の回転により連れ回るとブッシュ外側のすきまにも流体潤滑膜が形成され，軸は浮動ブッシュ内外の2枚の流体潤滑膜に直列に支えられて回転するようになります。



1. ジャーナル 2. 浮動ブッシュ  
3. 固定ブッシュ

図1 浮動ブッシュ軸受

Floating bush journal bearing

このタイプのすべり軸受は，その昔航空用往復動エンジンの高速化が進行してすべり軸受の摩擦発熱の増加が問題視されるようになった時期に考案されたということです。摩擦発熱はすべり速度の二乗に比例するので，仮に浮動ブッシュが軸の半分の速度で回転すれば，内外の油膜それぞれの発熱は浮動ブッシュがない場合の4分の1ずつ，合わせて2分の1となり，結果として半減する計算です。しかし，実際には浮動ブッシュが思うように回らないことから航空用エンジンへの応用は断念され，ある意味ではうち捨てられたすべり軸

受でありましたが、1960年代になって高速回転機械に応用したところ、通常の真円ジャーナル軸受よりも振動トラブルが少ないという報告が相次いで出されました。このような論文をいくつか読むうちに、油膜の不安定化作用による自励振動(オイルウィップ)の安定性に関しては研究論文が全く発表されていないことが判り、是非この問題を開拓してみたいと強く思うようになりました。回転機械に使用するすべり軸受については、トライボ設計とともに回転軸がオイルウィップとよばれる激しい自励振動を発生しないよう振動設計も同時に行なう必要があります。

まず、浮動ブッシュ軸受の静的性能計算を行って、軸回転速度に対する浮動ブッシュの回転速度比を求めたところ、図2<sup>1)</sup>に示すように、回転速度比は必ずしも2分の1ではなく、内外のすきま比やゾンマーフェルト数の関数として変化するので、発熱量を半減させるのはそれほど簡単ではないことがわかりました。

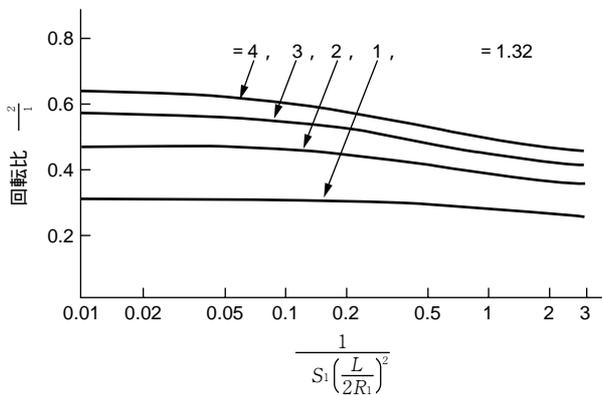


図2 浮動ブッシュの回転速度比<sup>1)</sup>  
Bush-to-journal speed ratio

次に、オイルウィップが発生するかどうかを調べる安定判別の計算に入ろうとしたところで、大きな壁にぶつかって立ち往生する羽目になりました。安定判別を行うには運動方程式から導かれる特性方程式の係数をまず確定させる必要がありますが、ロータの質量だけでなく浮動ブッシュの質量と内外2枚の油膜で構成される軸・軸受系の特性方程式は、4行4列の係数行列式を展開して得られる10次の方程式となり、その係数を求める計算はとてつもなく膨大なものであることが判ったからです。今でこそ代数式を演算して係数を求めるコンピュータプログラムが利用できますが、当時はそんなものはなく、手計算でやるしかありません。当初は弱気になって別のテーマへ転進することも考えましたが、浮動ブッシュ軸受の魅力に心底取りつかれていたもので、大いなる不安を抱え

つつも勇気を奮って係数を求める手計算に挑戦することに思い直しました。今から思えば、この時の無謀とも思える決断を敢えて行ったことと大変な作業をやり遂げたという自信が今日の自分を支える力になっているような気がします。

指導教官である堀幸夫先生は、世界的に有名な「オイルウィップの理論」の論文をまとめるにあたって6次の特性方程式の係数を決定するのに大変な苦勞をされた経験から、10次の特性方程式の係数決定計算などあまりに冒険的過ぎる企てとお考えになったようで、論文がまとまらないのではないかと相当に心配されたようです。

行列式の展開計算は卒論生二人にも手伝ってもらい、三人の計算結果がステップ毎に一致したら先へ進む、一致しなければそのステップの最初から全員で計算をやり直すという方法で少しずつ計算し、漸く二ヶ月後に係数をすべて確定させることができました。当時、アメリカのアポロ計画による月面着陸プロジェクトでは、宇宙船に搭載したコンピュータ3台のうち2台が正しいとしたらその判断を採用するという手法をとっていましたが、この係数決定計算ではそれ以上の厳しさでチェックしたことになります。

このようにして求めた特性方程式の係数を用いて、Routhの判別法アルゴリズムにより安定・不安定を決定するコンピュータプログラムを作成しましたが、当初はコーディングに間違いがあって理解に苦しむ安定線図が得られ、しばらくはバグ取りに汗を流す毎日でした。

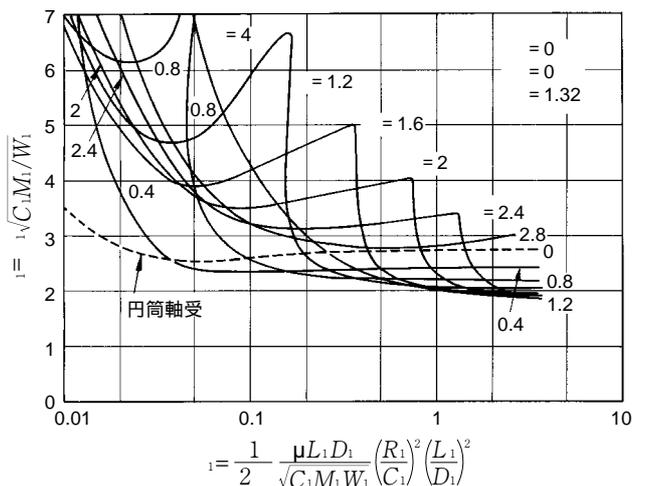


図3 浮動ブッシュ軸受の安定線図<sup>2)</sup>  
Stability chart of floating bush journal bearing

図3<sup>2)</sup>は最終的に得られた安定線図の一例です。縦軸は軸回転速度、横軸は軸受定数、図中の各安定限界線の下側がオイルウィップの発生しない安

定領域，上側がオイルウィップが発生，持続する不安定領域となります．浮動ブッシュ軸受は通常の真円ジャーナル軸受( 図中の破線 )に比較して高い安定性が得られる( 特に軸受定数が小さく内外のすきま比が大きい場合 )こと，また内外のすきま比の影響など浮動ブッシュ軸受の安定性の詳細が明らかになったと言えます．また本理論モデルで予測した安定限界は，実験結果と良い一致を示しました．この研究をまとめた論文をASME Transactionに掲載したため，その後国際会議などで出会った同業の外国の研究者にはこの論文が名刺代わりになりました．

この研究にはいくつもの後日談があるのですが，その一つに，もし私が壁の高さに怯んで躊躇したままであったとしたら，別の研究者に先を越されていたかもしれない，ということがあります．高齡のため先頃亡くなったデンマーク工科大学のヨルゲン・ルンド教授はすべり軸受と回転機械の振動の研究で世界的に有名な方でしたが，四半世紀前のある国際会議で初めてお会いしたときに，自分が指導する博士課程の学生に浮動ブッシュ軸受の安定性の研究をするように勧めたけれども，しばらくして私の論文が掲載されたのを発見したのでその学生に別のテーマを与えることになった，と話してくれました．このことから，研究を行うに際しては高いリスクに決して怯んではならず，時機を失せず果敢に挑戦すれば大きなリターンを得ることができる，低いリスクを取ればリターンも小さい，という教訓を得たように思います．

後日談その二．浮動ブッシュ軸受のこの理論モデルは私が行なった実験結果とは良く一致したものの，実機のターボチャージャーに近いデータを用いて計算すると，常用の定格回転速度は極めて高いので必ず自励振動が発生して運転不可能になるという予測になりますが，実機では振動トラブルもなく安定に運転されている事実と矛盾します．

それ以来，実機で観察される現象と整合する新しい理論モデルを考案したいとずっと考え続けてきました．実機のターボチャージャーの条件で私の行なった実験と違うところは，軸受荷重がはるかに小さく，軸回転速度がずっと大きいことです．これより，従来のモデルでは先広がりの軸受すきま部分で全面的に油膜破断が生じるとするギュンベルの境界条件が適用されるとしていたのを，内側油膜に限って油膜の圧力発生が全円周にわたるとするゾンマーフェルト条件を適用することに変更してみました．さらに，軸が高速回転している

ことから，油膜に作用する遠心力の効果で軸の表面近傍，軸受端近傍の圧力が低下して全円周で一樣にキャビテーションが発生するとする軸方向油膜破断の概念( 図4<sup>3)</sup>を導入しました．

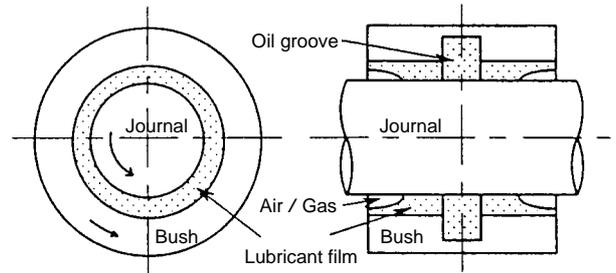


図4 軸方向油膜破断<sup>3)</sup>  
Axial oil film rupture

このようにして修正した理論モデルにより求めた浮動ブッシュ軸受の安定線図の一例を図5<sup>4)</sup>に示します．たとえば軸受定数が9の場合，無次元軸回転速度が10(たとえば10万rpm)に達するまでは浮動ブッシュ軸受は不安定ですが，それを越えてさらに高速になると安定になり，この図では少なくとも25(たとえば25万rpm)までは安定であるという結果が得られます．これは，回転し始めは不安定で自励振動も観測されるが高速回転になると自励振動が消えて安定になるという実機の現象とよく符合し，三億円宝くじに当たったかのような良い気分でした．

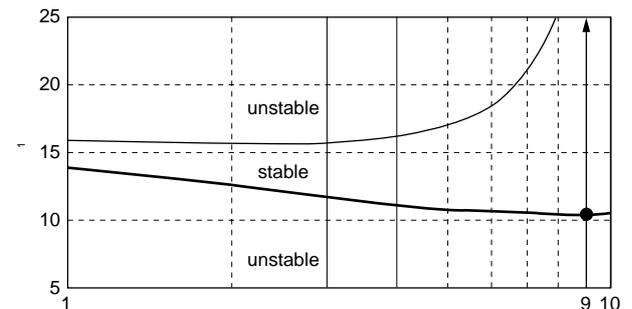


図5 浮動ブッシュ軸受の安定線図<sup>4)</sup>  
Stability chart of floating bush journal bearing

しかし，この修正理論モデルの妥当性は，遠心力の作用で軸方向油膜破断が実際に発生するかどうかにかかっており，それを確認するために透明なガラス軸受内で軸を5万rpmの高速まで回転させて油膜の挙動を観察した結果，図4に示したような軸方向油膜破断が生じることを実証することができました<sup>5)</sup>．Coup de foudreがついに実を結んだその時は，嬉しさよりも永年の緊張からの解放感を楽しんだというところでしょうか．

ここで述べたような理論モデルのアイデアを、昔ある学術講演会で発表したところ、境界条件をいろいろ組み合わせて計算しただけでは単なる演習問題ではないかと高名な先生方からお叱りを頂戴しました。それにもめげずにモデルを少しずつリファインし続け、当初の研究開始から30年かかって、浮動ブッシュ軸受の全体像を漸くはつきりさせることができたように思います。研究にも粘り勝ちということがあつたようです。

#### 4. 熱流体潤滑理論と高速すべり軸受の設計

油膜内の3次元的な温度分布、粘度分布を考慮して構成するすべり軸受の熱流体潤滑理論の研究は、私の研究室では1970年代に着手しました。すでに基本的な方程式は1960年代に提示されておりましたが、実際にすべり軸受の設計に応用しようとすると、関与する方程式の各項の吟味、様々な境界条件の確認が必要であるにもかかわらず、それに関する情報はほとんどないことに気づいたからです。

当時のすべり軸受の設計は、古典的な等粘度流体潤滑理論に基づいて行うので十分であるとされておりました。これは、当時製作されたすべり軸受が十分な性能余裕をもつ優れたものであったため、理論予測にかなりの誤差を生じても問題なかったと言えます。しかし、すべり軸受に対する性能要求が次第に厳しくなるにつれて、軸受表面温度が次第に上昇し、焼付きの裕度が危険なまでに低下することが予想されるようになりました。こうなると、軸受表面最高温度や最小油膜厚さを精度良く予測できる熱流体潤滑理論の整備、また、高速運転時にも軸受表面温度の上昇を抑制できる実際の仕掛けが必要になると予測できます。

この二つを同時に実現するという明確な目標を指向して、スポット給油式の高速ティルティングパッドジャーナル軸受の熱流体潤滑の研究を開始しました。スポット給油式というのは、小型スラスト軸受では当時すでに商品化されていたノズル給油方式をティルティングパッドジャーナル軸受に応用したもので、パッドチャンバーの両端に設置されたシールを取り払ってチャンバーを大気開放とし、各パッド間に設置したノズルから潤滑油を軸表面に向けて噴射する方式です(図6<sup>6)</sup>)。こうすることにより、熱くなった潤滑油がチャンバー内に長時間滞留せず自由に流出するので、軸受面の温度上昇を相当程度抑制できるものと期待しました。

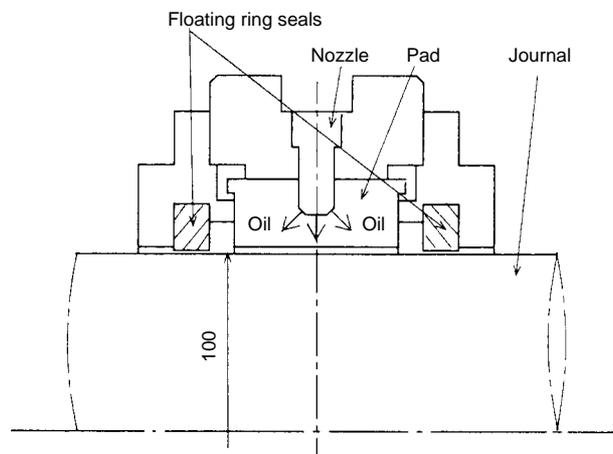


図6 スポット給油式ティルティングパッドジャーナル軸受<sup>6)</sup>

Tilting pad journal bearing with spot feeding

ところが熱流体潤滑理論を用いてスポット給油式のすべり軸受性能を計算してみると、パッド最高温度が従来のシールド式とほとんど変化しないという予測結果が得られ、これにはえらく落胆したものです。しかし、気を取り直して実験してみると、パッド最高温度はシールド式に比べて10以上低減することができ、スポット給油は高速すべり軸受の温度低減に極めて有効であることが実証されました。頭だけで考え過ぎてしまったために、スポット式は役に立たないという間違っただ結論に囚われてしまうところでした。

当初の計算においてジャーナル表面温度を境界条件として与える際に、どちらの給油方式でも同一の値を設定してしまったのが間違いの元で、ジャーナル表面温度を実測するとスポット給油式の場合は高速になるほどシールド式との差が開き、20以上も低くなる場合がありました(表1<sup>6)</sup>)。

表1 ジャーナル表面温度の実測値<sup>6)</sup>  
(軸受平均面圧1.13MPa)

Measured journal surface temperature  
(specific bearing load 1.13MPa)

$m_p$	bearing type	rpm		
		4 000	6 000	8 000
0.2	LOP, spot	56.0	63.2	70.7
0.2	LOP, sealed	58.5	65.5	86.8
0.2	LBP, spot	54.8	67.3	67.8
0.6	LOP, spot	55.8	59.2	64.6
0.6	LOP, sealed	58.9	72.0	81.6
0.6	LBP, spot	57.1	59.1	58.4
0.6	LBP, sealed	59.8	68.8	80.0

このジャーナル表面温度の低さがパッド表面温度の低減をもたらす主因であり、熱流体潤滑理論にあっては静止側の軸受表面温度だけではなく、運動側のジャーナル表面温度も同様に重要であると気づかねばなりません。にもかかわらず、回転側の温度計測が簡単ではないため、静止側の温度のみしか測っていない実験データが発表されることが多く、折角の実験の価値が半減してしまうのはまことに残念です。

当初産業界からは、そんな難しい理論を振り回さないでもすべり軸受は十分設計できますよ、という否定的なコメントが聞こえてきましたが、最近では熱流体潤滑モデルが実用すべり軸受の設計に採用されつつあり、やはり大学ではずっと後になってから実際の役に立つことを先行して研究しなければならぬと確信しました。そのため研究者には将来のニーズを見通す確かな見識が要求され、一旦確信を持って取りかかったら否定的な意見にも揺るがない強靱な神経と果敢な実行力が求められます。

パワーとタフネスは研究上の幾多の修羅場をくぐり抜けるだけでなく、達成感を味わう喜びも経験することで醸成されるものと信じます。

## 5. 戦略思考

恩師の堀幸夫先生は、第一級の研究とは前人未踏の新しい地平を切り拓いたものか、諸説入り乱れて混沌とした状況に対して快刀乱麻を断つ如く明快な道筋を提示したものか、どちらかだと喝破されました。一方、兄弟子の木村好次先生には、工学、技術の研究を行うに際してはその研究が100%うまくいった時にどれだけの成果が期待できるのかについて明確なイメージを持つべきである、「重箱の隅もみんなでつつけば怖くない」と揶揄されるような研究はするなと教えられました。

いずれも、リスクの小ささに惹かれてリターンの小さいことが見えているスケールの小さな研究はするなという戒めと理解します。私もその教えを受けて研究室の学生たちに、自分の研究をローカル座標だけでなく常にグローバル座標で位置づけるようにと話しています。xとyの関係がわかりましたといっても、広い視野で見ればそれがいかなる意味を持つのかをよく吟味し、狭い視野での評価だけで済ませてはならないのです。

21世紀のトライボロジー研究は、機器の超小型化と高速化、環境負荷低減とメンテナンスフリーの実現に一層寄与することが期待されるはずで

す。戦略的な思考に基づいて高い達成目標を掲げることこそが、研究に取り組む多くのトライボロジストの能力を最大限に高めて引き出す要諦ではないでしょうか。

## 6. おわりに

光洋精工技報の会社創立80周年記念号に寄稿させていただく光栄ある機会を与えていただきながら、本稿でその責を十分果たし得たか心許ないものがあります。技術者、研究者は革新的なものを産み出すことを常に求められる存在であり、本稿を読んで下さった方々が前向きな姿勢で積極果敢に踏み出していただければ、これに過ぎる喜びはありません。

## 参考文献

- 1) 田中正人：潤滑，vol. 17, no. 12 (1972) 857.
- 2) M. TANAKA and Y. HORI：Trans. ASME, Series F., J. Lub. Tech., vol. 94, no. 3 (1972) 248.
- 3) 畠中清史，田中正人，鈴木健司：日本機械学会論文集(C編)，vol. 65, no. 636 (1999) 3395.
- 4) 畠中清史，田中正人，鈴木健司：日本機械学会論文集(C編)，vol. 65, no. 640 (1999) 4840.
- 5) 田中正人，中野久司，鈴木健司：トライボロジー会議予稿集，(東京2000-5) 277.
- 6) M. TANAKA：Trans. ASME, J. Tribology, vol. 113, no. 3 (1991) 615.