

気体軸受研究独り言

Soliloquy on Gas Bearing Research



森 淳暢*

Prof. Atsunobu MORI

The author concentrated on the gas bearing research works supervised by Prof. Haruo Mori, when he was in Kyoto University as a graduate student and subsequently as an assistant professor. Looking back upon precious experiences of bygone days, this article is written about the details of his studies on gas bearings as his soliloquy but to talk to young researchers and/or engineers to stimulate their interests in research works.

Key Words: memories, gas bearing research, externally pressurized gas bearing, pneumatic hammer, whirl instability

1. はじめに

あっという間に還暦を迎え、1年が経とうとしている。顕著な業績の持ち主ならば自伝をとということになるが、振り返ってみても自慢できるものはほとんどない。一人前に年は食ったが、長年何をしていたのかお恥ずかしい次第である。ちょっと自慢できることといえば、京大時代に恩師森美郎先生(京大名誉教授)の研究室、通称“森研”で、我が国としては非常に早い時期に気体軸受研究の一端を担うことができたことであろう。

さて、空気のような粘性がないと思われていた流体で摩擦を劇的に減らすことができるという発見は1854年(G. A. Hirn)に遡るということである。しかし、粘性という性質が僅かでもあればどんな流体でも潤滑剤になりうるということが理論的に明らかになったのは、かの有名なO. Reynoldsが流体潤滑理論を発表した1886年のことである。翌年には早速A. Kingsburyにより動圧空気ジャーナル軸受の空気膜圧力分布が測定され、その数年後には空気軸受紡機スピンドルの特許が出願されるなど、空気軸受の実用可能性の検討がすぐさま始まっている。この動きを加速するかのように、1913年にはW. J. Harrisonが圧縮性流体に対する潤滑方程式、いわゆるHarrison方程式を提案し、理論的機能解析を可能にした。しかしながら、翌年から始まった第1次世界大戦のためか、しばらくの間さしたる成果の公表は見当たらない。第2次世界大戦からは核の時代を迎えて、ウラン精製プロセスのキーテクノロジーという位置付けの下、米国を

中心に開発研究が活発に展開されるようになるが、事が事だけに、そのときの成果の公表もほとんど見当たらない。空気以外のガスを使用することから、この頃から気体軸受(Gas Bearing)という表現が一般化したといわれている。

気体軸受の研究が、理論的興味や軍事目的から抜け出て、民生用機器への応用に向け活発化したのは第2次世界大戦終結後約10年が経過した1950年代の後半である。ここで特筆すべきは、1957年、米海軍のONR(Office of Naval Research)がスポンサーとなって、Franklin研究所、G. E.社、Columbia大学が加わって発足した『目的を特定しない気体軸受研究開発プロジェクト』であろう。Columbia大学のD. D. Fuller教授を主査とし、各国のアクティブな研究者が参加して、ONR Gas Bearing Coordination Meeting(年2回開催)が立ち上がった。翌年の1958年には、Washington D. C.で1st International Symposium on Gas Lubricated Bearingsが開催され、公式の場で初めて各国の情報交換がなされている。これを機に気体軸受研究は黄金期に入ったとみられ、応用分野の一層の広がりを目指して、静特性のみならず動特性・安定性の研究が活発化することになる。このあたりの詳細についてはC. H. T. Pan¹⁾によるASMEのトライボロジー研究委員会75周年記念講演を参照願いたい。

1963年には英国Southampton大学が海外に開かれたGas Bearing Symposiumの開催(隔年を予定)を開始、途中BHRAが引継いで9回を数えている。これらのプログラムは1980年代には終了している

*関西大学工学部 機械システム工学科 教授 工学博士

が、英国に2年遅れの1965年に我が国で森美郎京大教授を主査として発足した『気体軸受研究会』は、精機学会、機械学会、トライボロジー学会と母体を変えながら会合を毎年4～5回のペースで開き、後半は主査を矢部寛京大教授に交代して2000年まで続けられてきた。メンバーは若返りながら、現在、これを発展的に継承した『“超”を目指す軸受技術研究会』を立ち上げて、なお気体軸受技術の進展に寄与している。

我が国の気体軸受研究は終戦直後東大に始まるが、中心は間もなく京大に移り、『佐々木研究室』、『森研究室』、『矢部研究室』と引き継がれながら、2000年まで長年にわたってアクティブに展開されたことは万人の認めるところであろう。1963年、ひょんな事から“森研”メンバーとなった筆者も気体軸受研究の一端を担い、いまだに足をきれいに洗うことができずにいる。筆者自身の足跡を辿ってみても恥をかくのが関の山、読む方にとっては迷惑千万ということになりかねないが、若い方に何がしかの参考になればとの淡い期待を抱きながら勇気をふるうことにした。

2. 京大“森研”における気体軸受研究の特徴

森美郎先生がよく「私がずっと対象にしてきたのは静圧方式で、Columbia大学のFuller教授の影響が強い」と言われているように、1940年代後半から始まった京大の気体軸受研究は静圧方式が対象になっている。順不同で研究を大別すると、表1のようになる。

京大“森研”の研究の最大の特徴は、複素ポテンシャル理論の展開に代表されるように、「理論的な厳密さとスマートさ」にあったといっても過言ではなからう。長年にわたって森美郎先生の片腕としてこれを支えてこられたのが矢部寛先生(京大名誉教授・現大阪電通大教授)である。このような雰囲気は逆に災いしてか(というよりも多くのメンバーの力量が両先生に及ばなかったという方が適切かもしれない)、この程度では論文として発表できないというメンバー個々の思い過ごしから、当時としては相当に価値の高い研究成果が、後にも筆者が関わった一例を示すように、数多く、『卒論』や『修論』の段階で留め置かれている。論文の数がとやかく言われる今現在にあっては何とも割り切れない気持ちもするが、“森研”にはそのような雰囲気が漂っていた。

表1 京大“森研”で行われた気体軸受研究の概要
Gas bearing research works in old "Mori Laboratory"

<p>【「絞り」と軸受すきま内給気孔まわりの気体流動モデル】</p> <p>自成絞り：給気孔 臨界状態で流入 断熱的な超音速広がり流れ 圧力降下 衝撃波 圧力回復 粘性の支配的な亜音速広がり流れ 周囲へ流出 粘性領域での慣性力効果 チョーク条件の検討</p> <p>他形式の絞り：毛細管、スロット、表面絞り</p> <p>【複素ポテンシャル理論による多数孔給気軸受の特性解析】</p> <p>種々の軸受面形状(スラスト軸受、ジャーナル軸受)に対する圧力分布、流量の厳密解</p> <p>【多孔質軸受の諸特性解析】</p> <p>均質モデル：境界値問題としての解析</p> <p>等価すきまモデル：軸受面に垂直な流れと沿う流れに分け、沿う流れを等価なすきま内の流れで置換</p> <p>表面目詰まりへの拡張 動特性の改善、安定化へ</p> <p>【動特性・安定性解析】</p> <p>集中定数化近似：ポケット付き軸受、多孔質軸受に適用(定性的特徴の把握に便利)</p> <p>気体流れの慣性力を考慮した修正レイノルズ方程式： 減衰特性の解析 ホワールの解析</p> <p>【安定化】</p> <p>ニューマチックハンマの安定化：流体RC回路による位相シフト</p> <p>ホワールの安定化：2重気体膜による弾性支持 流体RC回路による位相シフト 慣性力による『くさび膜効果』の抑制</p>

3. 気体軸受研究にのめり込んだ経緯

1963年春、“森研”の先輩から誘いを受けて、卒業研究を“森研”で行うことになった。後でわかったことであるが、教授のそばで「おい、森」と呼んでみたかったという、ただそれだけの理由で誘われたらしい。気体軸受という言葉すら知らず、M1の先輩の多孔質軸受に関する研究の手伝いをしていたが、その先輩の雑誌会での紹介論文に「おかしい」と口を挟んだのがそもそもの始まりである。ドイツ語で書かれたE. Loch²⁾のポケット付き軸受に発生するニューマチックハンマの安定化に関する論文であった。図1に示すように、空気室を連通管で軸受ポケットに接続するというもので、安定化のメカニズムを右上の図のようにダイナミックダンパとして捉えていた。たまたま機械力学の講義に関連して連成振動系の振動の特徴を勉強していた筆者には、瞬間、「本当にそうかな？」と思えたのである。主振動系の質量(軸

の質量)に対するダンパの質量(小さな連通管内の気柱の質量)比があまりにも小さすぎるので、両者の固有振動数をピンポイントで一致させない限り逆効果になる。これは不可能な要求で、もし実際に安定化が実現できているのであれば、メカニズムは別のところにあるはずである。ニューマチックハンマも知らず、その安定化で苦労した経験も全くなかった筆者であるがゆえに抱いた疑問かもしれないが、とにかく、メカニズムを自分流に確かめてみたくなったのである。大学院進学後も多孔質軸受を手伝ってくれるものと思っていた先輩には悪いと思いつつも、多孔質軸受は筆者の頭から離れていった。卒論は適当にごまかして、しばらくそれに専念することにした。こんな自由が許されていたのも“森研”の雰囲気であった。

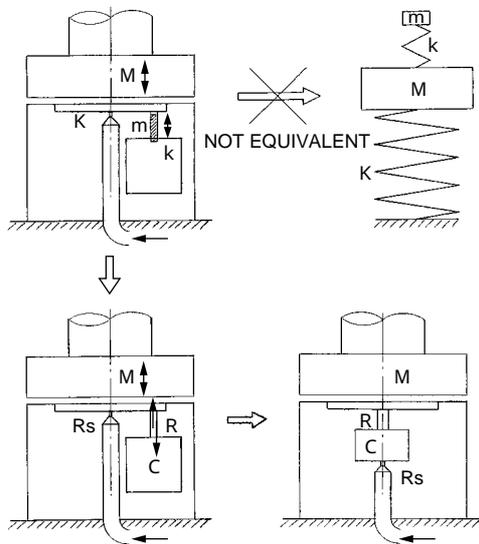


図1 ニューマチックハンマ安定器
Stabilizer for pneumatic hammer

これまた偶然であるが、筆者がM1になった1964年春、L. Licht³⁾の集中定数化近似によるポケット付き軸受の安定性解析の論文に出くわした。検討の対象になる軸受系の固有振動数は高々数kHzである。流れのコントロールという概念が導入できることに気付いた。空気室に出入りする気体の質量流量を考慮して全体の質量流量連続の条件を考える。図1左下のように空気室はコンデンサの役割を、連通管は抵抗の役割を考えると考える。解析を進めてみた結果、安定化だけならば、連通管内の気柱の固有振動数はどうでもよいということがわかってきた。早速、実験してみることにした。軸受の内部に大きな空気室を設けるわけにはいかなかったので、一升瓶をぶら下げて空気室にし、水を入れて容積をいろいろ変えてみた。ある容積以上あれば、振動は確かにおさまる。

Lochの提案する連通管と空気室の安定化メカニズムは、ダイナミックダンパや共鳴箱的なものではなく、流体RC回路によるポケット圧力の位相シフトと捉えるべきであることが明らかになってきた。結果を機論⁴⁾に投稿。流体RC回路として機能するのであれば右下図のように給気ラインに挿入することも可能と考え、その構造の提案を翌年の機論⁵⁾に。両者をまとめて修士論文とし、同時にASME⁶⁾に投稿した。この過程で研究なるものに興味を抱き始めたことになる。“森研”に動特性の研究がなかったことで、矢部大先輩のようにはいかなかったが、もっと続けてみてもよいかと考えようになり、博士課程に進学を決意したが、1965年の秋口である。

4. 幻の大論文

Lochの提案は、自励振動を抑えるという機能は有するものの、外乱に対する過渡特性や周波数特性を著しく低下させる。流体RC回路として解析すれば、このことも説明できる。この時点では、専らニューマチックハンマを防ぐことに目が向いていた。上記ASMEの論文に対するT. Chiangの討論の中で、もともと安定なものにこの要素を接続すると、条件によっては不安定になることが判明していたが、わざわざそんな設計を試みる人はいないだろうと、それ以上の検討はしていない。博士課程に進学した1966年、スリランカからの留学生S. M. Sahibの卒論の面倒を見ることになり、何をテーマに採り上げさせようかと思案していたときのことであるが、ふと、その討論を思い出した。

当時、多孔質軸受は多孔質ブッシュ内部の気体の粘性摩擦に起因して減衰特性がよいものと信じられていた。しかし、「それは違うのでは？」という疑問が湧いてきたのである。そこで、多孔質軸受の安定性をソリッドな軸受面の通常のオリフィス絞り軸受と比較検討させることにした。一方、解析は、前出の等価すきまモデルの等価すきまに代えて等価気孔容積を定義し、これを空気室に見立てて集中定数化近似を適用することにした。図2左図を右図のようにモデル化したわけである。多孔質軸受は、通常的设计では、ニューマチックハンマを起こしやすいという、筆者にとっては予想通りの結果がえられた。解析は先の論文の延長線上にあり、結果は予想通り。実験も大した工夫のあるものではない。この指摘の重要性を認識できなかった筆者は、“森研”の名で学会発表はちょっと恥ずかしいという思いから、論文にはしなかった。が、実は、これが「多孔質軸受の常

識を覆す」大変な指摘であったということが後になって判明したのである。

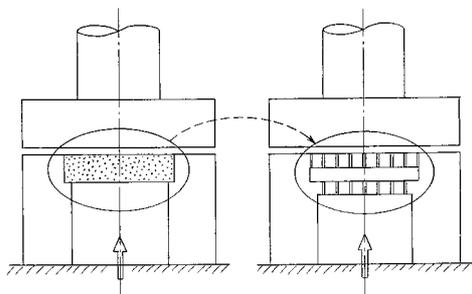


図2 多孔質静圧気体スラスト軸受解析モデル
Analytical model for externally pressurized porous thrust bearing

時期は定かではなく、1970年前後であったと思うが、当時、矢部寛先生と親交のあったカナダのH. J. Sneck教授から、多孔質軸受の研究結果を調査しているので京大から発表したものがあれば送ってほしいという依頼が来た。たまたまSahibの卒論が英語で書かれていたので、矢部先生がそれを送られた。その直後から大変なことが起きたのである。世界のあちこちで引用が始まり、『卒論』はいつしか『博士論文』に格上げされるという全く予想もしない事態に発展した。かくして『幻の大論文』が出来上がったわけである。最近のことであるが、「ひょっとしたら、森研の中でこの論文の引用が一番多かったのでは……」と、ある研究会の二次会で矢部先生と談笑したのを憶えている。

5. 研究者として恥ずべきこと

博士課程進学後は静圧気体ジャーナル軸受に生じる不安定な振れまわり現象(whirl)の解析と安定化方法の研究に大半の時間を費やした。発生機構は、油膜軸受のoil whirlと全く同じで、圧縮性、非圧縮性を問わず、レイノルズ方程式の性質上、軸の回転速度と振れまわり速度の2倍との間の大小関係が動圧効果による軸受反力の振れまわり方向成分の向きを変えることにある。振れまわり速度は、半径方向成分に基づく軸受剛性と軸質量から決まるところの最低次の固有振動数でなければならない。このように考えていた筆者には現象の解析そのものは興味深いものではなかったの、自然、興味は安定化方法の提案に向いていた。

当時考えていたのは、先とは別の形態の流体RC回路による安定化(負剛性を生じる圧力の位相を遅らせて減衰力を得る)と2重の静圧気体膜による弾性支持であるが、恥を忍んで取り上げたいのは後者に関連した第5回Gas Bearing

Symposium, Southampton(1971)への投稿論文⁷⁾である。軸受構造は図3に示すように浮動ブッシュ軸受と同じで、ブッシュの回転を許す場合の解析において、内側気体膜に対するレイノルズ方程式を立てるとき、符号を取り違えていた事実に、数ヵ月後、Proceedingsを受け取ったとき気が付いた。第6回はパス。別の論文ではあるが第7回に投稿したので、その折にでも、訂正したものを出せばよかったのであるが、ずるずると時間が経ち、そのうち機会を失ってしまった。気がついた人は笑って済ませてくれるだろう、と、無責任にも忘れることにしていたが、それから十数年後、その論文を引用したブッシュ回転効果の実験的検討結果が関西大学教授下間頼一先生のグループから報告された。理論的には筆者の報告をベースに検討されていたようで、やはり訂正しておくべきであったとの自責の念に駆られた。ここで黙っているのは恥の上塗り、良い機会を与えていただいたと思ひ、間違いを訂正するとともに、ブッシュの正逆回転効果の詳細な解析結果を、海外の人の目にも触れるように、Bulletin of the JSMEに英文で発表することにした⁸⁾。肩の荷が下りたような気がした。このとき、筆者自身、後に関西大学に移り、下間先生と仕事をさせていただくようになるなど知る由もなかった。

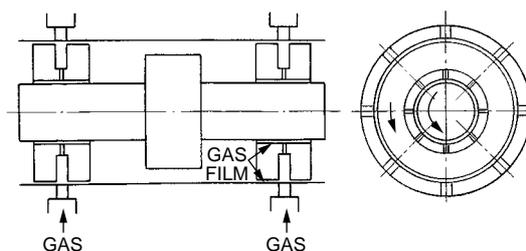


図3 静圧気体浮動ブッシュジャーナル軸受
Externally pressurized floating-bush journal bearing

6. 苦労したがゆえちょっぴり残念に思っていること

1967年11月に小野京右氏(当時東工大院生)⁹⁾が、1968年3月に多々良篤輔氏(当時川崎重工技師)¹⁰⁾が続けて静圧気体ジャーナル軸受の振れまわり不安定現象の解析結果を機械学会論文集に発表された。先にも述べたように、レイノルズ方程式を使用する限り、方程式の性質上、安定限界軸速度は気体膜剛性と軸質量で決まる最低次の固有振動数の丁度2倍になるはずであると信じ、これを基に安定化法を論じていた筆者にとって、結果は驚きであった。実験結果を実によく表すというもので、動揺は隠せなかった。解析はレイノルズ方程式の

圧縮性関連の非定常項を省略するというもので、納得できる理由は示されていない。慌てて、振れまわり不安定現象そのものの実験と解析にしばらく専念することにした。実験の結果、軸受すきまが非常に小さい間はレイノルズ方程式の厳密解に従うが、少し大きくなると、両氏が示す解のように厳密解から大きく外れてくる。何故こんなことが起きるのか。考えても考えても、筆者の頭の中は堂々巡りを繰り返すだけである。

一方、同じ時期、J. W. Lund¹¹⁾は軸を偏心させながらレイノルズ方程式を厳密に解いた安定限界の解析結果を発表している。無偏心近傍では、軸受すきまの大きさを問わず、安定限界軸速度は固有振動数の2倍になるが、偏心により2倍を越す。今までの実験は全て横軸で、重力によりなにかの偏心がある。その影響か。立軸にしてみたが結果は変わらない。偏心率を0~1の間で連続的に変化させてみた¹²⁾が、高偏心率下でしか偏心の影響は現れない。すきまが大きくなるにつれ2倍から外れるという実験結果は偏心の影響ではない。しからば原因は何か。このあたりの経緯を『潤滑』の総説として書き、何かが間違っているとはっきり言うことにした¹³⁾。その後、小野氏¹⁴⁾も同じ『潤滑』の中でこの問題を取り上げ、「気体軸受になお秘められているこの謎」という表現で、未だ解明されない1つの大きな課題としておられる。

原因の特定を巡って模索が続く。すきまが大きいときには圧力流れの流速・流量が大きい。自成絞り以外に、スロット給気、表面絞り、多孔質軸受等々、いろいろな軸受を用いて供給質量流量が安定限界軸速度に及ぼす影響を調べてみた。どの形式においても、大流量ほど固有振動数の2倍を大きく超える。一方、多数孔給気スラストつば軸受の動特性を検討する中で、減衰係数が、流量の多いものほど、レイノルズ方程式に基づく理論予測値を上回る傾向にあることがわかっていった。ふと、想像したのが速い圧力流れの慣性力。レイノルズ方程式はこれを無視している。発達した流れの仮定はそのまま慣性力の効果を1次近似で取り込んだ『修正レイノルズ方程式』を立て、まず、スラストつば軸受に適用してみた¹⁵⁾。流量と共に減衰係数が上がるという実験結果が見事に説明できる。しめしめと思い、これを使ってジャーナル軸受の振れまわり安定性の解析を試みることにした。ここで出くわしたのが境界条件の問題である。給気孔を出るまでは流速は非常に遅いので、円周方向流れの境界層は発達しているはずである。しかし、こう考えると結果は変わらないことになっ

てしまう。困り果てていたとき、例の『気体軸受研究会』で、泉英樹氏(当時日立製作所)から「給気孔近傍でのずり流れの未発達が原因と考えている」というお話があった。早速、スロット給気軸受を模擬した実験装置で円周方向流れの発達過程を調べた。結果は泉氏の指摘が正しいと出た。発達した流れを前提した方程式で発達過程を捕らえるという矛盾めいたことを可能にしたい。動圧効果の評価に必要なのは円周方向流量であり、流速分布そのものではない。考えたのが、ずり流れに圧力流れを重ね合わせて円周方向流れの流量を給気部で無理やりゼロにしてみようというものである。このときの流れの様子を模式的に描いたのが図4であり、左下が厳密に解析した円周方向ずり流れの軸受端へ向かっての発達過程、右下が提案する方法で解析した同様のものである。すきま方向に積分した流量は両者でほとんど差がなく、円周方向流量の軸方向への発達過程を『修正レイノルズ方程式』で捉えることができたのである。これを適用して振れまわりの解析を試みた。結果は上々で、これをBulletin of the JSMEに投稿した^{16), 17)}。筆者自身の内にあった疑問が一気に解消したような気分になり、これを境に、興味を中心に気体軸受から次第に遠ざかっていった。

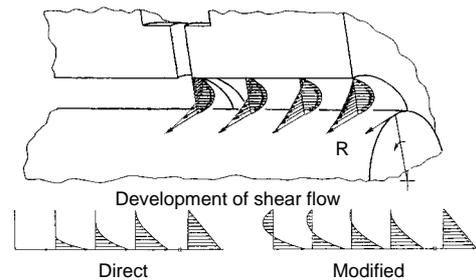


図4 多孔孔給気あるいはスロット給気静圧気体ジャーナル軸受内気体膜流れ - ずり流れの発達

Gas film flow in externally pressurized gas journal bearing with multiple holes feed or slot feed - development of shear flow -

ところで、筆者は、静圧気体軸受の諸特性を論じる際、上記『修正レイノルズ方程式』は非常に便利な方程式と思っている。給気孔まわりの臨界前の圧力窪みや臨界条件の予測も可能にする。適当なポリトロップ指数の導入で、擬似衝撃波を伴う圧力回復過程をも捉えることができる。少し軸受すきまが広くなった場合のこのような静的特性から、剛性、減衰係数、振れまわり不安定現象まで適用可能である。境界条件の与え方で、図5のような接線方向逆噴射による安定化^{18), 19)}のみならず、接線方向正噴射による不安定振れまわり現象

の助長(歯科用エアスケーラーの発振原理として応用されている)の解析にも使うことができる。にもかかわらず、あまり使ってくれる人が出ず、苦労しただけに、正直なところちょっぴり残念に思っている。ところが、ごく最近、機械学会年次大会で東京理科大の吉本成香先生²⁰⁾に使っていたことを知った。レイノルズ方程式では実験とかけ離れていた減衰係数がうまく予測できるという結果を聞き、内心、捨てたものでもないな、と、一人で喜んだ次第である。

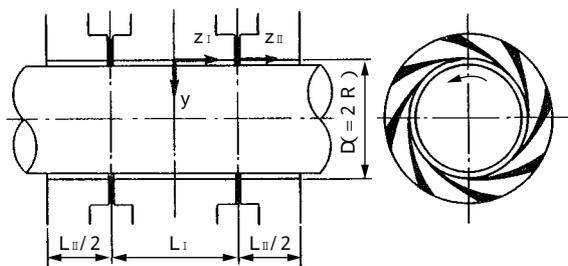


図5 接線給気静圧気体ジャーナル軸受
Externally pressurized gas journal bearing
with tangential feed

7. おわりに

思い切って、京大“森研”時代の筆者の気体軸受研究を振り返ってみた。『幻の大論文』以外に多くの研究成果が未発表のままになっている。今にして思えば、反省すべき点の一つであろう。この記事を読んでいただいた若い研究者・技術者諸君の中にも、こんなものを発表するのは恥ずかしいと発表を躊躇している方があるかもしれない。しかし、自主規制はよくないと思う。積極的に公表し、他人の評価を仰いでいただきたい。先の例のように、どんな重要な指摘が隠されているかもしれないので。

前後するが、最初に研究生活に足を踏み入れたきっかけを紹介した。有名雑誌に掲載された論文に、若気の至りで、ケチを付けたことに始まっている。当然ということで受け入れられている概念の中に間違っているものがあるかもしれない。さしたる仕事もできていない筆者が豪そうなことを言うようで気が引けるが、これからという方には、そんな気持ちで事に当たっていただきたい。

受け取りようによっては自慢話に聞こえるような『たわごと』を長々と書いて、恥をかいたような気がするが、若い方に何かを感じていただくことができたとすれば、望外の幸せである。

最後に、還暦記念に若い頃を思い出す、このような機会を与えて下さった光洋精工株式会社に感謝を申し上げ、筆を置かせていただきたい。

参考文献

- 1) Coda H. T. Pan, ACHIEVEMENTS IN TRIBOLOGY on the 75th anniversary of the ASME Research Committee on Tribology, ASME, 1990, p. 31.
- 2) E. Loch, Konstruktion, vol. 15, no. 8, 1963, S. 333.
- 3) L. Licht, D. D. Fuller and B. Sternlicht, Trans. ASME, vol. 80, 1958, p. 411.
- 4) 森・森, 日本機械学会論文集, 32巻, 244号, 1966, p. 1877.
- 5) 森・森・金子・吉田, 日本機械学会論文集, 32巻, 244号, 1966, p. 1883.
- 6) H. Mori and A. Mori, Trans. ASME, J. Lub. Tech., vol. 89, 1967, p. 283.
- 7) H. Mori and A. Mori, Proc. of the 5th Gas Bearing Symposium, Southampton, 1971, P. No. 4.
- 8) A. Mori and H. Mori, Bulletin of the JSME, vol. 28, no. 239, 1985, p. 1000.
- 9) 小野・田村, 日本機械学会論文集, 33巻, 255号, 1967, p. 1883.
- 10) 多々良, 日本機械学会論文集, 34巻, 259号, 1968, p. 560.
- 11) J. W. Lund, Trans. ASME, J. Lub. Tech., vol. 89, 1967, p. 154.
- 12) A. Mori and H. Mori, Proc. of the 7th Gas Bearing Symposium, BHRA, 1976, P. A6.
- 13) 森, 潤滑, 20巻, 7号, 1975, p. 481.
- 14) 小野, 潤滑, 21巻, 10号, 1976, p. 643.
- 15) A. Mori, N. Iwamoto and H. Mori, Bulletin of the JSME, vol. 22, no. 173, 1979, p. 1678.
- 16) A. Mori, K. Aoyama and H. Mori, Bulletin of the JSME, vol. 23, no. 178, 1980, p. 582.
- 17) A. Mori, K. Aoyama and H. Mori, Bulletin of the JSME, vol. 23, no. 180, 1980, p. 953.
- 18) A. Tondl, Proc. of the 3rd Gas Bearing Symposium, Southampton, 1967, P. No. 4.
- 19) A. Mori, C. Chen and H. Mori, JSME International Journal, Ser. III, vol. 32, no. 2, p. 308.
- 20) 吉本・富川・壇原, 日本機械学会2002年度年次大会講演論文集, vol. V, 2002, p. 153.