

機械試験所における転がり軸受の研究の思い出

青木三策
元 機械試験所

要 旨

戦後、欧米に大きく遅れていた我が国の工作機械、自動車等の機械産業を振興する必要性を痛感した通商産業省は、重工業局（現・製造産業局）が主催部局となって生産技術審議会を立ち上げ、品質比較審査部会では機械産業における重要な構成要素である転がり軸受を取り上げて、機械試験所が試験研究を担当することになった。同局産業機械課の応援を得て機械試験所では 1950 年から 1960 年代の初めまでに、国内主要メーカー並びに代表的海外メーカーの各種転がり軸受について、回転試験、精度測定等を行って、品質を比較審査し、その過程で開発した新測定法は JIS に採用され、ISO の WG にも提案された。また、官・産・学が参加する転がり軸受に関する研究会が発足し、懇談会へと発展し、1956 年に日本潤滑学会（現・日本トライボロジー学会）の設立となった。転がり軸受の研究はさらに発展して、騒音対策、寿命向上、各種測定法や測定器の開発へと進み、またメーカーにおける高品質・高性能軸受の開発も進んだ。それらの成果が活かされて、日本製転がり軸受が海外に雄飛するようになり、今日我が国の転がり軸受産業が技術レベル、生産量ともに世界トップレベルに達し、世界をリードする業界の繁栄に繋がっている。

1. はじめに

工業技術院機械技術研究所の歴史を辿ると、日中戦争の始まった 1937 年に遡る。機械に関する国立研究機関の必要性は既に大正末期から提唱されていたが、この年の 8 月ようやく機械工業に関する試験、分析、鑑定および伝習を掌ることを目的として、商工省に機械試験所が設置されたのである。1943 年には工作機械科、治工具科、計測機器科、材料科、機素科、自動車部の体制で、名古屋支所も開設された。太平洋戦争が激しくなると商工省は軍需省と名を変え、機械試験所における軸受関連の業務も兵器増産用の工作機械の性能審査を行ったり、加工法の開発まで含めた主軸用転がり軸受やジャイロ用玉軸受の性能向上のための試験を行っていたそうである。

戦後は再び商工省に戻ったが、1949 年には通商産業省に衣替えした。その前年の 1948 年には商工省傘下の各分野の試験研究機関を統括する工業技術庁（のち工業技術院）が発足した。工業技術庁設置法施行令によると、機械試験所は機械工業に関する試験、研究、分析、鑑定、技術調査、技術指導、その他これに附帯する業務を行うことになっており、戦前に比べると研究や技術調査などが加わり、研究所的な性格がはっきり謳われている。機械試験所の組織体制・業務内容も、戦後の復興から高度成長を遂げるに到った日本の機

械工業の発展、社会のニーズの変化や周辺科学技術の進歩に伴って変遷し、1971年に機械技術研究所と改称、1980年につくば研究学園都市に移転した。

私が機械試験所に人所したのは1948年、戦災の焼け跡に再建の槌音が響き始めた頃である。入所と同時に取り組んだ転がり軸受の試験研究の面白さとやり甲斐にすっぽりはまり込み、ライフワークの一環として自分で軸受製造の仕事にも従事したいという熱望に駆られて退職し、軸受メーカーに再就職したのが1962年である。私の機械試験所在職中の大まかな記録は日本ベアリング工業会の会報¹⁾に掲載し、その後の機械技術研究所における転がり軸受の研究については岡本純三氏²⁾と藤原孝誌氏³⁾がそれぞれ1971年と1985年に軸受メーカーの技報に執筆している。

本稿では、私が機械試験所に在職した1948年から1962年までの頃の転がり軸受を取り巻く環境や研究体制についての思い出と、当時の技術レベル、研究内容のいくつかについて述べる。

2. 当時の機械試験所の概要

東京杉並区の西武新宿線井荻駅界隈は、当時駅前に数軒の店がある程度で、駅から畠の中の道を歩いて2分ぐらいの所に機械試験所があった。

機械工学全般を網羅していたが、1950年代になると名古屋工業技術試験所（のち名古屋工業技術研究所）の設置に伴って名古屋支所を移管し、中央度量衡検定所（のち計量研究所）の研究部門拡大に当たって精密測定部門の所員が出向し、また科学技術庁の設立に伴ってジェットエンジン部門と流体力学の一部が航空技術研究所（現・宇宙航空研究開発機構）に、金属材料部門が金属材料技術研究所（現・物質材料研究機構）に移管された。これらの部門が別れた後の1960年頃の組織を思い起こすと、第1部が光学、電気、自動制御、物性のような応用物理的な部門、第2部が工作機械、歯車、軸受など、第3部が流体力学、熱伝導、熱力学、燃焼工学など、第4部が構造力学、材料力学および自動車の性能に関する部門、第5部が切削加工、砥粒加工、塑性加工、溶接、メッキなどの生産技術部門、他に試作課、企画課、庶務課などがあった。

専門分野の異なる研究者とも親交を結ぶことができ、戦後に新しく導入された学問分野や基礎的で難解な分野の専門書の輪講をしたり、研究途上での問題点を討論し合ったり、酒を飲んだり、麻雀をしたり、素晴らしい青春時代を懐しく思い浮かべる。当時の機械試験所で行なわれていたトライボロジー関連の研究としては、久田太郎氏（のちに科学技術庁事務次官）の転がり摩擦の研究、内海竜夫氏（のちに神奈川大学）の無給油軸受の研究、高木理逸氏の世界に先駆けて電子顕微鏡を使った摩擦の研究、長洲秀夫氏（のちに航空技術研究所所長）の摩擦の確率論的研究、伊藤文蔵氏の三元摩擦の研究などが世間から着目されていた。松原清氏（のちに東海大学）のプラスチックの摩擦の研究や津谷裕子氏の固体潤滑剤の研究もその頃から始まった。

3. 転がり軸受を取り巻く当時の環境

私が入所した当初は敗戦により日本全体が疲弊していた時代であったが、転がり軸受業界もご多分に漏れず、空襲を受けた工場もあり、製造設備が賠償指定を受けて一時期使用できなくなったり、軍需に頼っていた用途が皆無になったり、散散な状態であった。私が初めて工場見学に行った時には、炭坑で使うトロッコ用の軸受の製造や米軍の車両の補修が主な仕事のようにであった。

日本の復興のためには機械産業の基幹となる転がり軸受業界の活性化が必須であるとの考えから、官・産・学の協力で新しい用途を民需に求めるための需要の掘り起こし作戦が展開された。通産省関連の業務については後述するが、鉄道省（のち運輸省、現・国土交通省）としては日本国有鉄道（現・JR）の客車用軸受を滑り軸受から転がり軸受に置き換えようと、鉄道技術研究所（現・鉄道総合技術研究所）が中心になり、東京大学理工学研究所（のち航空研究所、現・先端科学技術研究センター）の曾田範宗教授の指導のもと、軸受メーカー、シールメーカー、潤滑剤メーカーなどが参加した研究会が発足した。私達も上司の内海竜夫研究課長に引き連れられて仲間に入り、最終的には新幹線用転がり軸受の開発にまで繋がった。

また、この研究会を核として、車両用軸受以外にも枠を拡げ、広範囲の軸受ユーザーも加わり、毎月の例会として潤滑懇談会に発展したように思う。潤滑剤の関係では東京大学理工学研究所の永井雄三郎、玉井康勝、東京工業大学の桜井俊男といった先生方もおられ、各分野に跨がる学際領域の課題を議論するのに最適の場であった。私のような駆出しの研究者が、学会発表には不十分な実験データやあいまいな考え方を持ち込んで気楽に先輩諸氏から意見を聞くことができ、実に貴重な懇談会であった。特に三菱石油研究所の豊口満所長から潤滑剤に関する個人授業を受け、実験用のサンプルまで頂いて理解を深めることができ、今でも深く感謝している。この潤滑懇談会が発展して1956年に日本潤滑学会（現・日本トライボロジー学会）の設立となり、今日の活発な学会活動に至っている。

1950年代に転がり軸受を研究していた機関は、軸受メーカーの研究部門のほかに次の大学、研究所が挙げられる。東京大学の曾田範宗教授は戦時中の航空機に関する軸受、潤滑の基礎から実用までの幅広い研究実績に引き続き、境界潤滑、高速軸受、変動荷重による寿命試験の研究などに取り組んでいた。研究室には宮川行雄氏（のちに法政大学）、甲藤好郎氏（のちに東京大学工学部）もいた。東京大学工学部の青木保雄教授は玉軸受の摩擦やすきま測定法の研究のほか、規格制定にも熱心だった。戦前から日本で使われていた接触弾性接近量の計算式の誤りを修正したことも有名である。京都大学では戦時中に軸受研究所を設置し、戦後も引き続き佐々木外喜雄教授を中心に各種転がり軸受の摩擦の実験を始め、幅広く軸受の研究を行っていた。トライボロジストとして世界的に高名の九州大学の平野富士夫教授も当時は新進気鋭の研究者で、運転中の玉軸受内を通過する潤滑油の温度上昇から軸受の発熱量を推定する研究を行い、続けて玉の挙動の実験と解析を行った。鉄道技術研究所では赤岡純氏（のちに玉川大学）や岩田の夫氏らが鉄道車両用軸受やシール

の研究を、理化学研究所では中野幸久（のちに名古屋工業研究所）、井沢實（のちに明治大学）の両氏がユニークな玉軸受の精度測定の研究を行っていた。機械試験所名古屋支所（のちに名古屋工業試験所、名古屋工業技術研究所）では山田國男氏（のちに宇都宮大学）らが高速玉軸受や針状ころ軸受など幅広く研究を進めていた。これらの軸受研究の大先輩に親しく教を乞う機会に恵まれたことに幸せを感じているが、潤滑懇談会当時の主要メンバーで忘れられないのは早稲田大学の鈴木徳蔵教授である。上述の諸先生より年齢的に一つ格上だったので、研究面での直接の指導は受けていないが、大正時代からの機械の事情に通じていて話題が豊富だったし、酒はかく飲むべしと範を垂れられた先生であった。

4. 機械試験所における転がり軸受の試験研究

4.1 通産行政上必要な試験研究

4.1.1 品質比較審査

通産省が軸受メーカーとユーザーに呼びかけ、官民一体の協力作戦で、国産の転がり軸受を使用するにはそれぞれの産業分野で何が問題で、どう対策をとればよいかを調査・研究することになった。正確に言うと通産省重工業局（現・製造産業局）が主催部局となり、生産技術審議会品質比較審査部会で転がり軸受を取り上げたということになる。試験軸受は当時の国内主要メーカーが提供するが、代表的な外国製軸受も購入し、試験研究は機械試験所が担当した。

1950年から開始し、1960年代の初めまでに汎用電動機用玉軸受、自動車用円すいころ軸受、木工機械用自動調心ころ軸受、電動直流発電機用小径玉軸受、紡績機械用自動調心ころ軸受、計器用ミニチュア玉軸受などを取り上げ、1953年からは玉軸受と円すいころ軸受の寿命試験も開始した。

部品や完成品の精度測定は、測定法も測定器もすべて新しい研究開発の対象となり、性能についても用途に適応した試験法を考案した。1950年に機械試験所の所長に就任された佐々木栄一氏の「問題点や不良原因を見つけただけでは駄目。対策を立てて良い製品にしなければ成果と認めない」という強烈な指導は、技術者としての生き方の厳しさと同時に、後になって考えれば技術開発の喜びも教えて頂いたと今でも感謝している。

品質比較審査を情熱的に推進されたのは重工業局産業機械課の坂部正明氏であるし、機械試験所サイドの最高の功績者は言うまでもなく上司の内海竜夫研究課長であった。後に機械部長となり、退官後は神奈川大学教授に就任されたが、日本潤滑学会の設立、JISの改訂、学術振興会の転がり軸受寿命試験法委員会の発足など、トライボロジーの発展に対する貢献は枚挙にいとまがない。また、日本の軸受工場ですべて初めて超仕上げを量産として採用する緒を開いた調心式超仕上げ機の発明や、円すいころ軸受の円すいつばの発明など、数々の天才的な業績を残された金子鍊造氏（のちに東洋マイクロ社長）も私達の研究室の誇るべき先輩である。

4.1.2 JISの改訂と工場審査

品質比較審査の過程で開発した新しい測定法の幾つかが JIS に採用され、ISO の WG にも提案された。すきま測定法、アキシアル振れ測定法、音響試験法などである。

JIS マークの認定のための工場審査は工技院と地方通産局の仕事であったが、1950 年代の初め頃は新しい検査法を考案しながら審査を進めることが必要だったので私達も協力した。製造工程の安定性の確認も重要課題なので、工場の内部まで立ち入り、メーカーの技術者と現場で真剣に討議できたことは貴重な体験であった。

4.1.3 試作工作機械の審査

1950 年代の機械試験所の大きな仕事の一つに、通産省の補助金で試作した国産工作機械の性能審査があった。私達も軸受専用工作機械数台について審査を担当した。精密加工学の世界的権威の大越諄東京大学教授（私が入所時の所長、のちに東洋大学工学部長）を恩師と仰ぐ私は常日頃、軸受の研究は加工を考えた「できばえ」を対象にすべきであると思っていたが、工作機械メーカーに 1 件で 1 週間も通いつけて静的精度試験のみならず、大量の切削または研削実験を行うことができたことは、研究室の中では得られない貴重な経験であった。これらの審査でもいくつかの問題点を見出し、改善を提言して成果を上げることができた。

4.1.4 機械試験所としての特別研究

1966 年 11 月に工業技術院の大形プロジェクト制度が始まる前は、所内の各研究室が協力して国が当面する課題に挑戦しようという特別研究があった。私が在職中に軸受研究室が参加した特別研究はガスタービンの研究、工作機械のオートメーションの研究、機械部品の耐久性向上の研究であった。

占領軍によって禁止されていた航空機の研究が再開されたのは 1952 年頃だったと思うが、ガスタービンの特別研究のからみで高速軸受の研究を行い、保持器に歪ゲージと熱電対を取り付けて保持器に加わる力と温度上昇を測定した。1956 年に開始した工作機械のオートメーションの研究では機械試験所の総力をあげて NC（数値制御）ジグ中ぐり盤の開発を行ったが、軸受研究室としては主軸用軸受と転がり案内の研究を担当した。機械部品の耐久性向上としては転がり疲れの研究を本格的に取り上げ、私の 6 年後に入所した岡本純三氏（のちに機械部長、千葉大学）がライフワークとして優れた成果を上げている。なお、NC ジグ中ぐり盤は 1959 年 3 月に試作が完了し、同年 5 月に東京晴海で開催された東京国際見本市に出品され、昭和天皇皇后両陛下の臨席も仰ぎ、国内外の注目を集めた。

4. 2 工学に貢献するための研究

4. 1 の業務で国産転がり軸受の品質や性能を向上させて産業界に貢献すれば、通産省に勤務する公務員としての責は果たせたとも思ったが、名称は試験所でも実質は研究所であると確信していたので、研究者として工学にも貢献したいと思っていた。私の考える工学とは、新しい製品や方法の開発や改良（エンジニアリング）に役立つ技法や知識を体系化したものである。したがって、誰でも利用できるように普遍性と応用性があり、研究者自身が十分な吟味を行った上で学会で発表と討議をし、学会誌や所報に研究論文として公

表する必要がある。

そのため、春と秋の学会（最初は日本機械学会、途中から日本潤滑学会）にはかならず研究発表を行い、論文にしようと心に決めていた。私自身が中心になって行ったこの範疇の研究としては、転がり軸受の摩擦変動の研究、音響寿命の研究、回転精度測定法の研究、すきま測定法の研究、取付け誤差の影響の研究、運転中のすきまの研究、接触塑性変形の研究、フレッチングの研究などであった。

4. 3 転がり軸受に関する個人ノウハウの構築

通産行政の立場からの試験・研究・開発を行っている過程で困った問題や興味深い事柄に数多く遭遇した。それらを解決、解明して目的を達成し、そこから抽出した課題のいくつかについて研究論文として公表した。しかし、論文にするには厳密性や普遍性の面からかなりの時間と労力を要するので、折角の課題を全て論文にする余裕はなかった。そこで、給料分の仕事は十分にしているからと勝手に考え、論文にはならないまでも私個人の知的財産として転がり軸受工学が構築できるように、手待ちの時間を利用して実験や考察を行った。その結果、新たな疑問や課題に展開することもあって、気楽で興味津々の時間を楽しむことができた。この時間をひねり出すために理論解析、計算（歯車式計算機は高価で重いので、家では対数計算）、読書などは家に持ち帰り、職場では実験、討論、情報交換などを主体とすることとした。それでも仕事以外の人生を楽しむゆとりが十分に持てたのは、やはり若さのせいだったのだろうか。

5. いくつかの研究事例

5. 1 玉軸受の騒音対策

今でこそ滑り軸受を使っている電動機は特殊な用途に限られているが、1950年以前はすべて滑り軸受で、時々油を差しながら使っていた。そのうえ、起動時の動力損失も大きかった。したがって、転がり軸受の採用は電動機の立場からも有効であるし、転がり軸受の立場から見れば莫大な民需の用途が開けることになる。そこで、通産省としては第1回の品質比較審査として電動機用玉軸受を取り上げたのである。

滑り軸受の場合、軸は油膜を介して回転するので非常に静粛である。それに対して、当時の玉軸受を電動機に組み付けて回転すると、かなり耳障りな騒音が発生した。当然、軌道の精度が影響していると考えたが、当時は軌道のうねり（waviness）という概念が正しく理解されておらず、真円度（10角ぐらいまでの多角）と表面粗さしか知らなかった。そこで、騒音の大きい軸受と小さい軸受の真円度と表面粗さを測定してみたが大同小異で、はっきりした相関は認められなかった。ラジアル振れやアキシアル振れなどの回転精度とも無関係であった。何故だろうと考え込んでしまったが、思わぬことから原因が見つかった。

軸受の騒音を測定する前に、それまで軸受に付いていた潤滑剤や防錆油をきれいに洗い落とし、軽油を差して潤滑条件を一定にして測定することにした。軸受を洗浄するには、軸受の内輪（内径17mm）を左手の人差し指にはめ、ボウルに入れた洗浄液に軸受を浸して

右手で外輪を勢いよく回転させる。外輪の回転が速い時は感じないが、液から出して回転が遅くなり、止まる寸前になると指にコリコリッという感じが伝わってくる。この感じ方が明らかに音の大小と関連がありそうに思えた。指に感じるのは摩擦トルクの変動なので、ピアノ線の振れを使って摩擦変動を測定してみた。内輪の中心にピアノ線を取り付けて軸受が水平になるように吊し、外輪に円形のおもりをのせて軸受にアキシアル荷重をかけ、外輪をゆっくり回転させた時のピアノ線の振れを、ピアノ線に貼り付けた小さな鏡に当てた光の反射で測定し、時間による変動、つまり摩擦トルクの変動を記録した。その結果、記録紙上の変動の振幅が騒音の大小とほぼ比例関係にあることがわかった。この変動の周期から玉数を考慮して計算してみると、軸受によって異なるが、ピッチが 1mm 前後の凹凸があるらしいことが推察された。

現在広く使われている円グラフで表示する半径式の真円度測定機はその頃にはなかったので、粗さ測定機の触針の先に小さい鋼球を取り付け、軌道輪をテストバーにはめてゆっくり回転し、一円周上の凹凸を触針の動きで光学的に測定した。予想通り、ピッチが 0.2 ないし 2 mm の凹凸の存在が認められ、その高さは $0.3\mu\text{m}$ から $1.0\mu\text{m}$ で、騒音の大小とよい相関があつた。今で言うところのうねりであり、研削盤の振動によって発生し、当時行われていた木の丸棒に巻き付けたサンドペーパーによる軌道面の仕上げ工程では除去することができない凹凸であった。

その頃、機械試験所名古屋支所の金子鍊造・山田國男・渡辺義彦の 3 氏が玉軸受の軌道面の研削後の仕上げ法として超仕上げ加工を施す研究を行っていた。超仕上げは戦前に米国で開発され、棒状砥石の端面をワークに押し付け、ワークの運動方向に対してある交差角で砥石を揺動させながら加工する方法で、能率的に表面粗さを小さくできるので脚光を浴びていた。日本でも以前に玉軸受の軌道面に超仕上げを試みたことはあつたが、軌道面の溝横振れに砥石が追従しなかったり、砥石の選択が不適切であったりで成功していなかった。金子氏らの方法は砥石を保持して揺動させる軸の中間に 2 個の十字継手を入れ、砥石が溝横振れにならって押し付けられるようにした調心式であることと、比較的結合度の低い砥石を使って数回転で軌道面の円周の包絡線になじませ、凹凸の高い部分から削るようにしたことの特長があつた。上述のうねりの大きい軌道輪をこの方法で再加工してみると、短時間で軌道面の凹凸の高い箇所が削られて、円周方向に直角な縞がうねりのピッチで見られるようになる。時間の経過とともに縞の円周方向の幅が広がり、やがて全面が削られたことが観察される。このときの凹凸を測定すると、高さは $0.1\mu\text{m}$ 以下になっており、再び軸受として組んで騒音を測定すると非常に小さくなっていた。

この調心式の超仕上げ装置は 1952 年頃から軸受製造工程に採用され、日本製玉軸受の音響品質は飛躍的に向上した。しかし、やがて軸受のコストダウンと更なる品質向上が望まれるようになり、ワークである軌道輪の回転速度を高めることが必要になった。高速になると砥石軸が躍ってしまうので、現在では軌道輪の前工程や超仕上げ機の精度を上げ、砥石をがっちり把握して揺動させる有心式超仕上げ機に切り換えられ、それに対応して砥石

の結合度や粒度も変更されている。調心式超仕上げ装置の商品寿命は十数年であったが、あの頃の軸受の前工程の精度や生産体制などを考えると、その時点では最適の方法であったし、玉軸受が電動機に採用され、やがて日本製軸受が海外に雄飛するようになった基礎作りに貢献したものと確信している。

5. 2 転がり軸受の摩擦変動

転がり軸受の長所の一つが比較的簡単な潤滑で摩擦抵抗を小さくできることなので、古くから各種形式の転がり軸受の摩擦の測定結果が公表されていた。しかし、いずれも測定系の固有振動数が低く、比較的高速で測定し、しかもダンパを使っているため、前述のようなうねりによる摩擦変動は感知されず、摩擦の平均値だけが測定されていた。摩擦の変動値には、軌道輪のうねりのほかに保持器の不具合やころのよたり（スキュー）なども現われるので、摩擦変動の測定は転がり軸受の総合的な「できばえ」の検査法として便利である。そこで磁歪管の捩れを利用して、比較的大型の玉軸受やころ軸受の摩擦変動も測定できる装置を試作し、各種軸受の試験に活用した。1950年代の後半、計器用ミニアチュア玉軸受の品質比較審査にあたり、ピアノ線に小さいひずみゲージを感度を高める方法で貼り付け、生産現場でも使用できるような摩擦測定機を製作した。これは岡本純三氏のアイデアと器用さによる産物であり、軸受工場や研究部門で広く採用されている。

5. 3 転がり軸受の寿命試験

転がり軸受の寿命が転走面の疲れ現象であることは20世紀前半から認識され、現在と同じ概念の定格寿命も提唱されていた。通産省の品質比較審査として軸受の寿命が取り上げられたのは1953年である。同年製造の国産5社の深溝玉軸受#6304を合計50個、ラジアル荷重500kgf、毎分回転数1200rpmで寿命試験を行った。10台の試験機を製作して予備運転を開始したところ、同じ運転条件にもかかわらず試験機ごとの温度上昇の値にばらつきがあり、改めて試験機の精度不良による取付け誤差を修正したり、玉軸受の内部すきまとはめあいを管理して、温度上昇を限界内におさえて試験を再開した。

結果は平均寿命が420時間で、当時のカタログから計算した平均寿命の1/2以下という短寿命であった。寿命時間のばらつきが大きいのは転がり疲れの本質的な特性なので止むを得ないとしても、平均寿命の1/3の時間にも破損個数のピークが存在し、異常に短命の軸受も多かった。試験した軸受の寿命時間は回転精度や表面精度との相関が認められず、試験結果の解析は金属材料の研究室の三橋鉄雄氏や上野學氏（のちに新日本製鐵、長岡技術科学大学）にゆだねられ、材料内部の介在物や熱処理によるマトリックスなどに短寿命対策の目が向けられた。

日本の転がり軸受の寿命特性が飛躍的に向上したのは、欧州で開発された真空脱ガス処理を軸受メーカーと材料メーカーが協力して研究し、1960年代中頃に真空脱ガス軸受鋼を全面的に採用したことに負うところが大きい。さらに引き続き、軸受鋼製造法の技術や管理の改善が進められ、非金属介在物や酸素量の極めて少ない清浄鋼が開発され、最近の国産転がり軸受の長寿命化は目を見張るばかりである。

軸受鋼に対して長寿命化の対策がとられる一方で、上述のように試験機の機差や試験条件にも疑いの目が向けられ、1959年に日本学術振興会に転がり軸受寿命第126委員会が設置され、官・学・産の協力により標準試験法の確立や、学振式寿命試験機の製作など多くの成果を上げた。ここでも内海竜夫氏や岡本純三氏などが中心になり、機械試験所軸受研究室が主導的な役割を果たした。

5. 4 簡易型軸受運転試験機による実験

ラジアル荷重をかけて軸受の運転試験を行うには、ふつう、軸を支える2個の軸受と負荷用の軸受とで1本の軸に少なくとも3個の軸受を取り付けて、それぞれをハウジングに収納しなければならず、毎回の取付けも厄介だし、運転中の軸受の観察も困難であった。そこで、1個の軸受を電動機から出ている軸に取り付け、U字形の鋼製の枠とボルトを使って外輪を両側から半径方向に圧縮し、枠の変形量を測って荷重を推測した。内輪は1回転中に2回のラジアル荷重を受けるので実用条件とは異なるが、軸受が裸になっているし、取付け取外しも簡単なので、保持器をビス止めしておけば玉軸受の軌道面の变化を簡単に観察できる。また、内輪と外輪の間の通電によって油膜の形成状況を観測するのも便利である。

負荷を受けて回転する軸受の時間を追っての音響の変化の測定と軌道面の荒れの状況の観察を行った。当時の軸受は数時間の回転で軌道面に介在物が剥げ落ちたような直径が0.01mmから0.2mmぐらいまでの小さな凹みが生じたり、同じ程度の大きさの異物をかみ込んだ圧痕（穴の底に加工条痕が残っているので区別できる）が生じるものがあった。音響の変化が小さくても疲れ寿命の短い軸受があったが、音響変化の大きい軸受は軌道面の荒れの程度が大きく、いずれも短寿命であった。当時は原因がわからなかったが、今にして思えば異物の影響で油膜が破断され、接触面の接線力が大きくなったのではなかろうか。また、摩耗により重量が明らかに減少しているのに直径はあまり変化していない鋼球もあった。表面の圧縮残留応力層が摩耗で除かれたためらしい。

潤滑油の粘度と回転速度を変えて通電により油膜の発生状況をブラウン管で観察したところ、粘度と回転速度の積がある値以上では油膜が完全に形成されたが、それ以下では時々破断し、もっと小さいある値以下では油膜はほとんど形成されなかった。ところが、荷重を変えてみても上記の値はあまり変わらず、何故だろうと不思議に思っていたが、後になって弾性流体潤滑理論（EHL）を知り、なるほどと思った。

5. 5 円すいころ軸受の円すいつばの開発

名古屋支所で軌道輪の超仕上げ装置を発明した金子・渡辺の両氏は程なく東京に戻り、私達の軸受研究室で円すいころ軸受の性能向上のための試験・研究を担当することになった。円すいころ軸受はころが円すいなので荷重を受けるところが大端側に押され、内輪に設けられた案内つばに押し付けられて滑り接触しながら案内される。ころの端面と内輪のつば面は共通の円すい頂点を中心とする等しい半径の球面であり、両者が面接触するように設計されている。しかし、設計通りに加工されずに両者の半径に少しでも違いがあると、

つば面の内側の点当たりになるか外側の線当たりになってしまう。内側当たりでは案内性が悪くなり、外側当たりではころがつばのエッジと接触するので油膜ができず、発熱や焼付きの原因になる。そこで、金子・渡辺の両氏と杉崎治三郎氏（のちに光洋精工）は内輪のつばを球面でなく円すい状にし、ころの大端面（球面）はつば面の中間で接触し、圧力分布が楕円状のヘルツの線接触を行うように設計することを提唱した。運転の初期は面圧がやや高いが、エッジ当たりではないので最初から油膜が発生し、短時間でなじみが進行して面圧も低くなる。つばの円すい角を変え、線接触の位置をつばの外側に近くなるように設計すれば、摩擦トルクはやや大きくなるが案内性が向上する。内側当たりになればその逆になり、用途に応じて適当な円すい角を選ぶことができる。円すいころ軸受の異常発熱やころのよたりに防ぐ優れた対策であり、軸受メーカーで広く採用されている。

5. 6 その他の試験・研究

際限がないので、上記以外のテーマについての思い出は要点だけを列記する。

軸受の取付け誤差の許容限界を知る目的で、任意の内部すきまのラジアル玉軸受にラジアルとアキシアルの両方向の荷重が加わっている状態で、軌道輪の傾きまたはモーメント荷重が与えられた時の軸受内部の荷重分布を理論的に解析し、摩擦トルクの測定で実験的に確認した。

転がり軸受の静負荷容量は転動体の直径の1万分の1の永久変形が生じる荷重で規定されているが、精密な用途ではこの荷重は大き過ぎると思われたので、圧痕を $0.1\mu\text{m}$ 以下に抑えるための荷重を玉径と硬さを変えて実験で求めた。結果はヘルツの平均圧力がビッカース硬さの1/3になる荷重であることがわかった。

転がり接触で生じるフレッチング（微小振動を受ける転がり軸受の異常摩耗）の実験的研究を行った。純粹の転がり接触ではフレッチングが生じないこと、玉軸受の差動滑りやころ軸受のころの傾きなどによる接触面内の微小滑りがフレッチングの原因であること、適当な粘度の潤滑油によって損傷の程度をかなり小さくできるが、揺動の振幅が小さくて軌道と転動体の弾性接触が離れることのない部分で微小滑りが生じている時は、潤滑油が接触部に入れずフレッチングが避けられないこと、潤滑油中の添加剤の種類によっては腐食により逆効果が生じることなどがわかった。

このほか、各種測定法や測定機の開発、はめあいに関する体験や実験、ころのよたり（スキュー）の研究などたくさん残されているが、紙面の都合で割愛する。

6. 機械試験所退職後の技術活動

1962年に機械試験所を退職して軸受メーカー日本精工株式会社に入社し、所期の目的の通り、企業在職中の前半は軸受製造に関する技術開発や研究に従事した。当時の生産技術の主要テーマは生産ラインのオートメーション、前工程加工法の合理化、超精密軸受の加工法や測定方式の確立などであった。生産ラインのオートメーションといっても、加工、組立および検査工程に自動機を採用すればよいという単純な問題ではない。需要予測や販

売計画から始まって、工場内の製造工程やレイアウトはもちろん、製品の設計まで含めたシステム全体にわたっての物と情報のライン化が前提であり、ネック工程の改善によるライン全体のバランスと安定化、次の課題を探し出して対策を立て、ライン全体の効率の向上を図りながら自動化を進める必要がある。前工程の課題としては、素材の形状の選択、複数台の単能旋盤の連結と多軸自動旋盤の経済性と品質の比較、冷間または温間鍛造や転造などの塑性加工の開発と導入などであった。

企業での後半は、転がり軸受の基礎的研究と性能向上の研究のほかに、ボールねじ、マシニングセンタ用や電算機記憶装置用のスピンドル、自動車用ステアリング関連部品などの新製品開発を行った。

1983年に東海大学工学部に移り、企業の生産現場の課題や製品技術に関する産学共同研究も含めた研究を行った。1997年に大学を定年退職したが、一貫して転がり軸受を中心に置いた幅広い研究開発を楽しめたことと、すばらしい先輩・同輩・後輩に恵まれたことに深く感謝している。

参考文献

- 1) 青木三策：機械試験所におけるころがり軸受の研究状況、軸受月報、日本ベアリング工業会、5（1961）1
- 2) 岡本純三：機械技術研究所におけるころがり軸受の研究について、不二越技報、27、3（1971）1
- 3) 藤原孝誌：機械技術研究所におけるころがり軸受の研究について、KOYO Engineering Journal、128（1985）1

青木 三策 (AOKI SANSAKU)

略歴

1948年に東京大学第一工学部精密工学科を卒業。同年工業技術院機械試験所に入所し、転がり軸受の性能向上に関する試験研究に従事。退職時は第2部第3課長。1962年に日本精工株式会社に転職し、転がり軸受の生産技術（超精密化、ライン化、自動化など）の研究開発、精密部品・自動車部品の新製品開発に従事。生産技術部長、軸受技術部長、機械部品技術部長、取締役技術本部長などを歴任。1983年に東海大学に転職し、工学部・大学院でトライボロジー・生産技術の教育に従事。1998年から5年間は地域研究開発促進コーディネータとして群馬県技術顧問を務めた。工学博士。精密工学会名誉会員。

受理日：2016年9月23日