



流体機械の研究の思い出

Remembrance of Researches on Fluid Machinery

石原 智 男*

Tomo-o ISHIHARA

昭和 21 年 10 月から昭和 59 年 3 月までの 37 年 6 カ月にわたる筆者の研究生生活の思い出をまとめたものであり、退官記念講演の内容を書き改めたものである。流体工学の研究に興味をもつようになった経緯、流体トルクコンバータの研究の過程と自動変速機の研究概要、油圧工学の発展へ向けての研究概要、その他流体機械関係の研究概要等について述べ、研究室の研究成果を要約している。

1. はじめに

戦時中、筆者は第二工学部の学生であり、また当時の海軍の技術学生でもあった。終戦の年である昭和 20 年 2 月から終戦の 8 月 15 日まで約半年海軍の空技廠に動員され、前半は追浜で、後半は泰野でジェットエンジンの開発研究の下働きを勤めた。兼重寛九郎先生のご配慮によって、機械科の大先輩である永野 治氏（当時少佐）のもとで学生時代にこのような最先端の技術開発に触れる機会を得たことはまことに幸せであった。追浜の頃、永野氏から文献調査のため本郷に出張するよう指示を受けた。東京大空襲の直後であり、瓦礫の中を新橋から本郷まで歩き、第一工学部の造船学科の図書掛の人を探すまでの苦労と、指示された文献をようやく見ることができたときの喜びは今でも忘れられない。その文献は Ingenieur Archiv の 1932 年版に掲載されていた A. Betz の Göttingen 587 翼型の翼列実験の論文であった。当時はコピーなどの設備は無く、この論文を筆写して追浜まで戻り、翌日その概要報告を行った。この論文を読んだことと、泰野でジェットエンジンの性能試験とデータ整理に関与したことから、流体力学に興味をもつようになり、終戦後の約 1 年間に故宮津 純先生のご指導のもとに流体関連の卒業研究を行うこととなった。宮津先生にお願いして研究テーマを翼列理論にさせていただいたのもこのような経緯による。卒論は「任意翼型よりなる直線翼列の一近似解法」であったが、今でいう特異点法のはじまりであり、筆者の研究の第一歩であった。¹⁾このような事情もあって、学部卒業の翌日から第二工学部の一員として宮津先生のもとで流体工学の研究・教育に従事することとなった。

2. 流体トルクコンバータの研究をはじめまで

昭和 21 年 10 月からの数年間は翼列理論をはじめとして流体工学の基礎についての勉強が主であった。その当時 H.Lorenz の著書 Technische Hydromechanik (1910) を読んで感激した。流体力学の基礎から応用にわたって、巨視的ではあるがドイツ人らしい筋の通った理論展開がなされており、複雑な流れの現象をまず巨視的に把握し、そこで説明がつかない事項について実験的・理論的に詳細に追求しようとする工学研究のセンスが示されていた。現在でも筆者の愛する書の一つである。これに刺激されて、流体機械の中で理論的に解明されていない諸問題の研究に取り組みたくなり、基礎の勉強を兼ねながら水槌ポンプ、軸流ポンプ、渦ポンプなどの流体機械の特性解析に熱中した。当時のこととて研究費の面から実験は困難で、もっぱら紙と鉛筆による研究であった。研究結果を昭和 22 年から 25 年にかけて機械学会で発表したが、これらについて宮津先生から (1) 小論文としては良いが、これ以上継続して研究するテーマではない、(2) 主研究としては将来性のあるテーマを選びなさい、(3) 国内外で研究者がすでに取り組んでいる研究テーマを避けなさい、というご指示を受けた。将来性があり、しかも後追いでない研究テーマを模索しなさいということであった。

そこで、流体関連の研究動向を調べるため、進駐軍の好意によって主としてアメリカの雑誌類の閲覧ができる日比谷の小さな図書館に足繁く通った。近刊の技術雑誌の中に流体継手や流体トルクコンバータを用いた乗用車用の自動変速機の記事を見だし、これが流体の関係する機械の一種であることから強く興味をひかれ、関係文献を探し求めた。文献複写の容易でない時代のこととて、必要事項をノートにメモし、図面はトレーシングペーパー

* 東京大学名誉教授

一に書き写す作業であった。その結果として、欧米先進国ではもっぱら数多くの実験と経験によってトルクコンバータが設計されていることと、また、これらの具体的な資料はほとんど発表されていないことを知り、この技術をわが国で開発することは容易でないことを知った。前記の流体機械の特性解析の経験から、この形状の複雑なトルクコンバータの特性を理論的に解明し、実験的資料無しに高性能のトルクコンバータを設計してみたい衝動に駆られた。これは昭和23年のことで、アメリカにおいて初めてトルクコンバータ付の自動変速機がDynaflow変速機としてGMから発表された年であり、当時の日米間の大きな技術格差がうかがわれる。

昭和24年、第二工学部が生産技術研究所に転換され、その目的の一つとして社会が要望する工業技術向上のための基礎研究を推進することとなり、筆者は流体機械学部門の一員としてそれに合致する研究を重視することとした。トルクコンバータの研究はその一つであった。昭和24年、受託研究制度のはしりとして、いすゞ自動車からの研究協力の申出があったことは筆者を勇気づけてくれた。最適設計の基礎となる特性の理論解析法を考え出し、²⁾それをもとに設計資料を作製するためBarlowの数表を用いてはタイガー計算器を回し続けたことを想い出す。当時の食糧事情からして、数値計算とはまことに体力の要る仕事であった。

3. 流体トルクコンバータの研究に関連して

昭和25年にトルクコンバータの特性の理論解析結果を自動車技術会で発表し、同会から当時の浅原賞をいただいた感激は大きかった。宮津先生のお勧めにより、この研究を主テーマとして試作実験にまで進むこととした。理論解析をもとに、4要素1段形トルクコンバータ継手の基本設計を行い、いすゞ自動車では珍しいシルミン鋳物の羽根車が製作された。木型から鋳物までの段階で何回か鋳物工場に出向き、また完成した試作機の性能試験のため頻繁にいすゞ自動車に出かけた。当時、性能試験ができるほどの設備は当所に無かった。試作機の性能が、ストールトルク比3.5、最高効率85%と目標値をほぼ満たすものであったときの喜びは大きかった。この国産第一号の自動車用トルクコンバータ継手はいすゞ自動車のリアエンジンバスに試用され、機械系の大学関係者が記念のドライブに招かれ、自動変速機のフィーリングを楽しんだことを想い出す。昭和25年には、これと併行して逆転用トルクコンバータの試作研究を石川島重工業と共同で行い、逆転用トルクコンバータの性能限界を示す資料を求めた。

これらの研究結果をまとめた論文の発表³⁾後、昭和27年から昭和30年代にかけて筆者の研究室に多くの会社からの研究員が入所し、研究室におけるトルクコンバー

タやこれを用いた自動変速機の研究に協力した。これらの諸氏はその後わが国の自動変速機の実用化にたいへん貢献された。一例として、昭和31年に富士重工業によって実用化されたスクータ用の超小型トルクコンバータ継手が挙げられる。このスクータは市販され、その一台を用いて西千葉キャンパスで実用試験が行われた。⁴⁾また、当時の小型乗用車に自動変速機を適用しようとする研究が当所を中心に行われ、まとめ役としての平尾 収先生が積極的にその推進をはかられた。小型トルクコンバータ継手の試作をいすゞ自動車が、試験車の試作をトヨタ自動車が担当し、両社とともに共同研究が始められた。昭和29年に試作車が完成し、種々の問題点が明らかにされた。1,000~1,500 ccの小型乗用車にトルクコンバータを搭載したのは世界的にみて珍しいことであった。この研究の当所の研究メンバーは宮津先生、高橋安人先生、平尾先生、亙理 厚先生と筆者であり、⁵⁾筆者にとって文部省の科学研究費の補助を受けた最初の研究であった。その後、日産自動車においても同様の研究がなされ、小型車ダットサンにトルクコンバータを付けて乗り回したことがあった。昭和34年にはトヨタ自動車によって2速の半自動変速機付の小型乗用車が発表された。これがわが国実用AT(Automatic Transmission)車の最初である。実用に関連して、作動油中に混入する空気の影響におよびず影響等についての実験研究が行われた。⁶⁾

この頃から、わが国の自動車工業以外の諸社もトルクコンバータの開発に積極的となり、鉄道用内燃機関車、同動車、建設機械などへの適用がはかられた。これらの中には、国産技術によるものと外国からの導入技術によるものがあつた。昭和20年代後半から昭和30年代前半にかけては、わが国のトルクコンバータの啓蒙時代ともいえる。当時はトルクコンバータが何であるかを知らない技術者が多く、応用面の開発のため、数多くのPRの機会がもたれた。機械学会、建設機械化協会等々での講習会や講義会に呼ばれてトルクコンバータの解説を何回もさせられた。昭和29年、東大同期の水沢譲治氏(現いすゞ自動車副社長)と共著した「流体変速機」(オーム社)は当時唯一の技術解説書であった。昭和30年代には、国産技術による船用可逆流体減速装置(川崎重工業)や1,000 PS級の内燃機関車用自動変速機(国鉄・日立製作所・川崎重工業)の実用化が進んだ。これらのトルクコンバータの設計には筆者の理論解析法や研究室で行われた実験の資料が有効に使用された。昭和30年頃、鈴木弘先生に協力してストレートライン伸線機にトルクコンバータを適用する研究を行った。この研究は当時の伸線機の近代化に役立ち、数多くの実用機が製造された。⁷⁾

昭和36年頃から、トルクコンバータと違って構造は簡単であるが理論解析の困難な流体継手の実験研究に着手し、数多くの形状のものについて性能実験を繰返した。

これには古屋七郎氏（現生研助手）の連続実験への辛抱強い努力があった。⁸⁾この結果は、大型の変速用流体継手の実用設計の資料として活用された。

昭和 38 年頃、トルクコンバータを用いた乗用車用自動変速機の変速段切替時の衝撃対策が問題となった。摩擦部材の耐久性を向上させるとともに軸系のショックを緩和するためには、変速段切替時の適正な油圧制御が必要となり、筆者は自動変速機の数学モデル作りをはじめた。昭和 39 年にたまたま足を骨折し、1 カ月余の治療を余儀無くされ、おかげでゆっくり落着いて勉強をすることができ、図式解法などを含めて変速段切替時の諸特性を定性的に説明する資料をまとめた。⁹⁾その後、これは車全体を含めた数学モデルに拡張され、電子計算機の活用によって諸特性が定量的に説明されるようになった。¹⁰⁾この数学モデルは、現在の変速段切替時のショック対策と適正な制御システムの設計に役立てられている。

その後、かつて検討を加えたままになっていた流体継手やトルクコンバータの非定常特性の理論体系作りを、GM から研究員として入所した江守一郎氏（現成蹊大教授）の研究テーマとし、実験を含めてこの問題の追求を行った。その研究結果は流体継手とトルクコンバータの過渡特性や振動特性を理論的によく説明するもので、軸系のねじり振動に対するターボ式流体伝動装置の減衰特性に関する有益な資料を提供した。¹¹⁾

石油危機以来、自動車の燃費改善の要求に応えるため、乗用車用の自動変速機の補助歯車は多速化に向かうとともに、トルクコンバータの高効率化・小型化や直結機構の採用がはかられた。その意味で昭和 50 年代は AT 車の近代化の時代ともいえる。トルクコンバータの高効率化のためには、内部流れの解明が必要とされた。昭和 30 年代後半に水を用いた流体継手の内部流れを油膜法で調べた経験から、トルクコンバータに油膜法を適用することが検討された。鉱物油を作動流体とする機械に油膜法を適用することは不可能であったが、これの解決にトヨタ自動車の諸氏の考案によるエポキシ樹脂を用いた液膜法が有効であった。同社による液膜法を適用してのトルクコンバータ内部流れの解明はトルクコンバータの小型化と高効率化に寄与し、研究に協力した筆者にとって興味あるものであった。¹²⁾ともあれ、現在のわが国の AT 車の技術が世界の最高水準にあり、また国内における AT 車の普及が急速に増加していることに対して、この研究を継続してきた者としての誇りを感じる。

4. 油 圧 工 学 の 研 究

昭和 20 年代から、建設機械、鍛圧機械、工作機械、船用機械等の近代化のために、欧米における油圧技術の発展は目覚ましいものがあつた。当時のわが国の油圧技術と油圧工業はきわめて貧弱であつたことから、工業界の要

請を受けて昭和 31 年から組織的な研究体制づくりがはじまり、その第一段階として、東工大の故板谷松樹教授と東大生研の筆者の研究室とで油圧ポンプの性能試験に着手した。筆者が油圧の研究をはじめようになつたのはこのときからである。特に、トルクコンバータの研究を行っていた関係から、油圧ポンプと油圧モータを組み合わせた油圧伝動装置に興味をもち、まず油圧ポンプおよび油圧モータの高性能化のための基礎研究と動力分割型（差動型）油圧伝動装置の性能予測の研究を行った。¹³⁾

自動車用油圧伝動装置の将来を検討するため、昭和 37 年から 39 年にかけて自動車技術会内に油圧駆動研究委員会を設け、筆者がまとめ役となつて産・官・学の実験者・技術者 48 名とともに、(1)油圧ポンプ・モータ単体の構造および性能に関する調査、(2)純油圧駆動装置ならびに同駆動車の性能計算、(3)動力分割型駆動装置ならびに同駆動車の性能計算、(4)変速制御の実験研究を行った。調査結果から、当時の技術での油圧駆動車の実現は否定的であるという結論がえられた。¹⁴⁾この調査に関連して、油圧伝動装置の将来のためにアキシャル・プランジャ（ピストン）ポンプと同モータの特性解析と、これらポンプ、モータの技術的問題点の解明をはかることが要望された。研究室の第一号大学院学生であつた山口 惇氏（現横浜国大教授）がこの特性解析を担当した。同氏は理論と実験とによって作動油の圧縮性が特性に大きく影響することを示すと同時に、これが油圧伝動装置の振動特性に及ぼす影響も明らかにした。¹⁵⁾

アキシャル・ピストンポンプの技術的問題点として、シリンダブロックと弁板との間の流体潤滑があり、これがポンプの高速・高圧化の一つの研究課題であつた。昭和 43 年からこの問題の理論的ならびに実験的研究に着手し、シリンダブロックと弁板の両潤滑面が必ずしも平行でなく、一種の幾可学的くさび効果が存在して、これが両面に大きな引き離し力を生じることを明らかにした。この研究は大学院学生上原一男、赤坂利幸の両氏（現小松製作所）が中心となつて行ったものである。¹⁶⁾

一般の油圧システムにおいて、各種制御弁の安定化をはかることが望まれた。大学院学生前田照行氏（現成蹊大教授）は高圧下で生じるボベット弁の自励振動を理論と実験によって解明し、弁の横振動の存在を明らかにした。¹⁷⁾

トルクコンバータを用いる自動変速機の制御システムの中には、各種の制御弁が含まれているが、特に圧力調整弁の安定性が問題とされた。大学院学生小島雅一氏（現神奈川大教授）、田中裕久氏（現横浜国大助教授）はこの動特性について理論的ならびに実験的研究を行い、小流量ならびに大流量圧力調整弁の安定性を明らかにした。¹⁸⁾さらに、田中氏は直動形電気油圧制御弁の開発を行い、その実用化に成功した。¹⁹⁾

油圧システムの作動の安定化のためには、作動油のキャビテーション防止対策が必要とされる。研究室では昭和48年より、レーザ光さらには超音波を使用するキャビテーション検出法を用いて作動油のキャビテーション現象を継続的に研究しており、²⁰⁾最近ではHWBF(High Water Base Fluid)のキャビテーション現象の究明を行ってきた。²¹⁾

これらの研究とは別に、昭和45年、筆者が準備委員長となって日本油空圧協会を設立し、昭和57年にはこれが日本油空圧学会として正式に社団法人化された。当研究室出身の諸氏が、この学会において責任ある立場で活躍しておられることを嬉しく思う。

5. その他の研究

昭和20年代、水力発電の有効利用のため、実物水車の性能を詳しく調べることが行われた。特に実物水車の大量測定には精度上大きな問題があり、主として機械学会をベースに電力会社、水車メーカー等と共同研究を行った。研究室では、円筒形ピトー管、大量測定用せき、水柱マノメータの挙動などに関する研究を行うとともに、現場実験の精度のチェックを行った。多くの水力発電所に出かけ、水圧鉄管沿いに急坂を登ったことを想い出す。水量測定については、当時の機械学会の水量測定規格制定委員会の最年少メンバーとして、故 沖 巖教授をはじめとする大先輩の先生方のもとで大変良い勉強をすることができた。昭和26年から筆者の研究室に助手として勤務してくれた井田富夫氏(現神奈川大教授)とともに全市せきの流量係数公式を作製した。²²⁾これはその後JIS規格に採用された。

一方において、水車の性能向上のため、昭和28年から井田氏とともに模型軸流水車を用いて各種の実験研究を行うとともに、電力会社や水車メーカーと共同で模型試験の問題点を調査した。産・学の良い協同によって、模型試験の在り方、特に表面粗さの影響を明らかにした。井田氏はこのような研究を足場にして、斜流ポンプの特性に関する研究を行い、広範な系統的実験をもとに実用上有益な設計指針を示した。²³⁾

水力発電所に関しては、その老朽化が問題となり、生研の多くの先生方とともに東京電力の水車老朽化対策委員会に協力し、老朽対策の基本方針を検討した。諸先生方と多くの水力発電所見学をもちえたことは懐しい思い出となっている。

このほか、パワーフルイディクス、混相流、物体に作用する流体力等々の研究を行った。パワーフルイディクスについては、研究成果を1971年にハノーバで開かれた油空圧招待講演会で発表した。²⁴⁾この招待講演会は先進各国から各1名の講師によるもので、これを機に油圧工学の海外の学者達との親交が続いている。この研究は大

学院学生鬼頭幸三氏(現日本自動車研究所)の研究テーマであり、論文の独語への翻訳に二人で苦労したことを想い出す。

1977年イエテボリーで開かれた第1回無段変速機会議に招かれた。ここでは、将来の自動変速機の動向についての自由討論が行われた。これを受けて、機械式無段変速機の研究に着手し、トロイダル形についての理論解析と性能実験とを継続してきた。²⁵⁾これの実用化にはいまだ多くの解決すべき問題が残されているが、一つの夢のある研究である。

6. お わ り に

以上、筆者の研究室において37年余にわたって行われた研究の概要を述べた。それぞれの研究によって、井田富夫氏が昭和38年度に、山口 惇氏が昭和39年度に、前田照行氏が昭和44年度に、上原一男、赤坂利幸両氏が昭和49年度に、日本機械学会賞を受賞した。これは研究室にとって名誉なことであった。

長年にわたる研究・教育生活を振り返り、(1)前半を野性と人間性に富んだ西千葉キャンパスで、後半を国際性と未来性に富んだ六本木キャンパスで、それぞれの特徴を生かした生活を送ることができたこと、(2)生研の伝統作りに参加し、しかもその伝統である良き研究環境に恵まれたこと、(3)工業の近代化の過程の中で、研究室の研究に対する産業界からの大きな支援がえられたこと、(4)諸学会で、先輩、同輩に恵まれ、工学・技術上の将来のニーズを知ることができたことなど、幸福な人生であった。終わりに、生研の皆様が力をあわせ、工学・技術の急速な進歩を先取りし、柔軟な姿勢で意欲的に先駆的研究をされ、世界の生研として発展されることを希望する。37年余にわたり、筆者の研究室を盛り上げてくれた研究室の教職員、研究員、大学院学生の努力とこれを支援してくださった多くの方々に心から感謝申し上げますとともに、それぞれの立場で良き研究環境を作られた生研の教官、事務官、技官の方々に心からお礼申し上げます。

(1984年5月26日受理)

参 考 文 献

- 1) 石原：任意翼型よりなる無限翼列の一近似解法，機械学会論文集，14巻，47号(昭23)，44
- 2) 石原：流体変速機の特性について，自動車技術会論文集，2号(昭26)，27
- 3) 石原：流体変速機の特性，機械学会誌，54巻，395号(昭26)，504；同：流体変速機の研究(第1～3報)，機械学会論文集，21巻，101号(昭30)61；同：A Study of Hydraulic Torque Converters，生産技術研究所報告，5巻，7号(昭30)
- 4) 石原：流体トルクコンバータ，科学，27巻，12号(昭32)，609
- 5) 宮津ほか：トルクコンバータ付自動車の研究，自動車技

- 術, 10 巻, 2 号(昭 31), 46
- 6) 石原ほか: 流体トルクコンバータの特殊運転性能について, 機械学会論文集, 22 巻, 13 号(昭 31), 23
 - 7) 鈴木, 石原: ストレートライン新形式伸線機, 生産研究, 9 巻, 5 号(昭 32), 242
 - 8) 石原, 古屋, 森: 流体継手の性能, 機械学会論文集, 33 巻, 254 号(昭 42), 1640; 同: Characteristics of Fluid Coupling, Bull. of JSME, Vol. 11, No. 45(1968), 496
 - 9) 石原: 自動変速機の変速段切替時におけるトルク変動について, 生産研究, 20 巻, 1 号(昭 43), 6; T. Ishihara et al: Transient Characteristics of Automatic Transmission During Gear Ratio Change, Bull. JSAE, No. 1 (1969), 219
 - 10) Y. Shindo et al: A Fundamental Consideration on Shift Mechanism of Automatic Transmission, Trans. SAE, Vol. 88(1979)
 - 11) 石原, 江守ほか: ターボ式流体伝動装置の非定常特性(第 1~2 報), 機械学会論文集, 32 巻, 235 および 241 号(昭 41), 495 および 1380; T. Ishihara, I. Emori & H. Saito: Non-Steady Characteristics of Hydrodynamic Transmission, 生産技術研究所報告, 18 巻, 1 号(昭 42)
 - 12) A. Numasawa et al: An Experimental Analysis of Fluid Flow in a Torque Converter, SAE, Paper No. 830571(1983)
 - 13) 石原: 油圧伝動装置について, 生産研究, 10 巻, 8 号(昭 33), 183
 - 14) 油圧駆動研究委員会: 油圧駆動車について, 自動車技術会講演前刷(昭和 41 年春季講演会)
 - 15) 山口: アクシアルプランジャポンプ, 同モータの特性に関する研究(第 1~3 報), 機械学会論文集, 31 巻, 227 号(昭 40), 1115 および 229 号(昭 40), 1336
 - 16) 上原ほか: アクシアルピストンポンプのしゅう動面における軸受スラスト(第 1~3 報), 機械学会論文集, 40 巻, 332 号(昭 49), 1202
 - 17) 前田: ポペット弁の動特性に関する研究(第 1~2 報), 機械学会論文集, 35 巻, 274 号(昭 44), 1285
 - 18) 田中, 石原, 小島: 圧力制御弁の動特性に関する研究, 機械学会論文集, 40 巻, 340 号(昭 49), 3410; 同: Dynamic Characteristics of Oil-Hydraulic Pressure Control Valves, Bull. JSME, Vol. 18, No. 122(1975), 858
 - 19) 田中, 石原: 直動形電気油圧制御弁に関する研究(第 1~2 報), 機械学会論文集, 43 巻, 373 号(昭 52), 3347 および 375 号(昭 52), 4195
 - 20) 石原ほか: 油圧作動油の非定常流れにおけるキャビテーションの一実験, 機械学会論文集, 44 巻, 388 号(昭 53), 4215; 同: An Experimental Study on Cavitation in Unsteady Oil Flow, Bull. JSME, Vol. 22, No. 170(1979), 1099
 - 21) 石原, 柴山: 高含水作動液のキャビテーション特性, 生産研究, 33 巻, 8 号(昭 56), 8
 - 22) T. Ishihara, T. Ida: Supplemented Formulas for Rectangular Weirs without End-Contraction, Proc. 1st Japan National Congress for App. Mech.(1951), 381
 - 23) 井田: 斜流ポンプの特性に関する研究, 機械学会誌, 67 巻, 541 号(昭 39), 181
 - 24) T. Ishihara, K. Kito: Fluidik für hydraulische Wegeventile, Fachtagung Ölhydraulik u. Pneumatik 1971 Tagungsberichtsband, 91
 - 25) 石原, 町田ほか: トロイダル形無段変速機に関する一考察, 生産研究, 33 巻, 8 号(昭 56), 12 および 9 号(昭 56), 9; H. Tanaka, T. Ishihara: Electro-Hydraulic Digital Control of Cone-Roller Toroidal Drive Automatic Power Transmission, ASME, paper No. S-624(1983)

