

凍土工学発展の系統化調査

Systematic Survey on Frozen Ground Engineering Technology

赤川 敏 Satoshi Akagawa

■要旨

「凍土工学」とは、地盤が冷却され負の温度になったとき、土粒子の作る間隙に存在する水分が、氷に相変化することにより起きる諸物性変化や現象を工学的に取り扱う学問である。凍土工学では凍った土を「凍土（凍結土）」、凍る時に起きる現象を「凍上（凍結膨張）」と呼んでいる。

凍土はその温度が低いほど強度は高く、土の種類にもよるが -10°C ではコンクリートの $1/3$ 程度、 -40°C 程度の温度でコンクリート並みの強度となる。このため地盤を凍結させると、地盤をコンクリートのように変質させることが出来る。ただし、土が凍る際通過する凍結面(0°C 等温面)付近で凍上と呼ばれる現象が土の種類によっては起きることがある。この現象は土が凍る際、凍結面の前進に伴いその面に沿ってレンズ状の氷脈を熱流方向に飛び飛びに発生させ、概ねその氷脈それぞれの層厚の総和分だけ地盤を持ち上げるというものである。

このような凍土や凍上現象の系統的な研究は20世紀前半から始まり、我が国でも北海道大学低温科学研究所が理学的な研究を、1960年代になると京都大学防災科学研究所と株式会社精研が共同で工学的な研究を盛んに行い、世界に伍した研究業績を残している。

1960年代後半になると、日常生活を支えている都市ガスや電力の主要な一次エネルギー源として、燃焼時の大気汚染物質の排出が少ない液化天然ガス(LNG: Liquefied Natural Gas)の活用が求められた。この政策を受けて京浜・京葉工業地帯に、LNGを貯蔵するための巨大な貯槽(タンク)が、地震時の安全性確保のため地下に建造され始めた。LNGの温度は大気圧下で -162°C と低温であるため、地下に建設されたLNGの貯槽(LNG地下タンク)の周囲地盤は徐々に凍結し、その際起きる凍上により周囲の地盤を押し出し、放置すると周囲の構造物に悪影響を与える恐れがあった。この挙動を予測し制御する必要性から、LNG地下タンクの設計が始まった1960年代後半から、日本においては産官学が連携して土の凍結に伴う工学的な取り扱いに関する研究が盛んに行われるようになった。その結果、国内に70基ほどのLNG地下タンクが建造され、その周囲には20～30万 m^3 ほどの凍土が現在存在し、健全に管理されている。

これと並行して、東京のような地下構造物が輻輳している大都市での地下工事において、人工的に地盤を凍結しコンクリートに近い強度を持つ凍土を活用して地下工事が安全に行われ始めた。その結果、これまでに700件に及ぶ工事事例を通して70万 m^3 にも及ぶ地盤を凍結させ、主に都市土木に貢献してきている。

このような凍土の活用技術の向上は、日本における凍土工学に対する要求品質の高さに依るところが大きい。すなわち直径及び深さ数十メートルのLNG地下タンクや都市土木における地盤凍結工法において、構造物の変位はミリメートル単位で把握され管理する必要性が要請されている。この厳しい要求品質に対応する技術、例えば土の凍上を定量的に任意の応力場及び温度場においても予測し得る方法が、世界で唯一日本では研究・評価・基準化されている。この技術を含め多くのR&D成果を活用し、上記の合計100万 m^3 にも及ぶ人工的に造成された凍土の設計・施工・管理を半世紀近く成功裏に適用されている現状から、日本の凍土工学は世界に類を見ないレベルに達していると考えられる。

事実、日本の企業が東アジアおよび東南アジアでLNG地下タンクを施工し、地盤凍結工法を実施するという実績が増えてきている。

当初凍結工法の黎明期には、信頼性は高いがそのコストの高さから「困ったときの凍結工法」と国内の土木技術者の中で言われていたが、最近は他の地盤改良工法と比べその高い信頼性及び機能性から標準的な地盤改良工法となってきている。

ただし、一帯一路政策に伴う寒冷地における高速道路及び高速鉄道の建設機会が増加している中国、北極域における地下資源開発に注目している韓国等の、国を挙げての猛追がある現状では慢心は禁物であるように思われる。

このような国際的な背景及び状況から、日本における凍土工学の発展のあらましをここに記録させていただいた。

■ Abstract

This is a summary of the development of frozen ground engineering technology in Japan.

Frozen ground engineering is the field of engineering that studies the changes and phenomena that occur in soil as the ground freezes in sub-zero temperatures. These changes and phenomena occur as the moisture held between the soil particles changes its phase to ice. In frozen ground engineering, soil that has frozen is referred to as “frozen ground,” and the phenomenon that occurs as it freezes is referred to as “frost heaving.”

Frozen ground becomes stronger as its temperature decreases and can be as strong as concrete at around -40°C , depending on the type of soil. At -10°C , it is around one third the strength of concrete. This means that by freezing the target ground, it can be made to transform like concrete. However, depending on the type of soil, a phenomenon referred to as “frost heaving” can occur around the freezing front (0°C isothermal plain) which passes through the ground, freezing it. When this phenomenon occurs, lens shaped pieces of ice, or “ice lenses,” segregate along the freezing front and, since the freezing front advances with time, ice lenses appear rhythmically following the direction of the front, uplifting the ground to the same height as the total thickness of the ice lenses.

The systematic study of frozen ground and the frost heaving phenomenon began in the early 20th century. In Japan, the Institute of Low Temperature Science of Hokkaido University actively researched this field scientifically, and in the 1960s the Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University started undertaking a wealth of engineering research in collaboration with Seiken Co., Ltd. These institutes have yielded some world-class research results.

In the late 1960s, there was a move to utilize liquified natural gas (LNG), due to its low emission of air pollutants during combustion, as a primary energy source for producing the city gas and electricity that support our daily lives. This prompted the construction of huge LNG storage tanks in the Keihin and Keiyō industrial zones facing Tokyo Bay. These tanks were built in-ground to prevent possible earthquake damage. Since LNG has a temperature of -162°C at atmospheric pressure, the ground surrounding the LNG in-ground storage tanks would gradually freeze, making them susceptible to frost heave and exposing the surrounding structures to damage unless appropriate measures were taken. Once work on the design of LNG in-ground storage tanks began in the late 1960s, the need for prediction and control of frost heave was recognized, and research in frozen ground engineering was carried out cooperatively by Japanese industry, government and academia. This resulted in the construction of around 70 LNG in-ground storage tanks, with around 200,000-300,000m³ of frozen soil being managed successfully around them.

At the same time, artificial ground-freezing technology for actively freezing ground to the consistency of concrete began to be used as a standard auxiliary construction method in underground construction work in major cities such as Tokyo, where there were numerous underground structures in proximity. This has resulted in as much as 700,000m³ of frozen ground used in over 700 construction projects, making it a significant contributor to urban civil works.

The increase in frozen ground engineering applications has been thanks to rapid technological advances made in frozen ground engineering, due largely to Japan's exacting quality requirements in this field. For example, the ground freezing methods used in urban civil works, and LNG in-ground storage tanks, which are dozens of meters in depth and diameter, must be executed and managed to the millimeter. This requires a thoroughgoing understanding and managing of structural displacement. Japan is the only country in the world to have researched, evaluated and standardized the technology to meet these strict quality requirements. This technology includes the method to predict frost heaving quantitatively at any stress and temperature field. Thanks to this research and development, Japan has reached a globally unparalleled level in frozen ground engineering, as proven by its planning for, and construction and management of, a huge amount of artificially frozen ground, i.e. around one million cubic meters.

In fact, Japanese firms have been constructing LNG in-ground tanks and applying ground freezing methods increasingly in East and Southeast Asia in the last few decades.

In the early years of frozen ground construction, Japanese civil engineers referred to it as a “last resort construction method” because, although highly reliable, it was very costly. However, more recently, it has become the standard soil improvement method, as it offers greater reliability and functionality than other methods.

In any case, with China increasing construction of high-speed train tracks and highways into cold northern areas as part of its Belt and Road Initiative and Korea turning its attention to developing underground resources in the Arctic region, both countries' governments are boosting their R&D activities in this area, meaning complacency born of pride in achievements to date cannot be an option for us.

■ Profile

赤川 敏 Satoshi Akagawa

国立科学博物館産業技術史料情報センター主任調査員

1973 年 千葉大学理学部生物学科地学専修 卒業
同年 清水建設株式会社 入社 (研究所土質研究部配属)
1976 年 北海道大学低温科学研究所 留学 (受託研究員)
1977 年～1995 年 清水建設株式会社 (研究所土質研究部)
1986 年～1988 年 U.S. Army Corps and Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory (客員研究員)
1992 年 博士 (環境科学) 北海道大学
1995 年～1997 年 清水建設株式会社 総合企画室 (R&D 成果の業績貢献)
1997 年～2000 年 清水建設株式会社 電磁環境市場開発室 (技術営業)
2000 年～2003 年 北海道大学大学院工学科 社会基盤工学専攻 客員教授
2003 年～2009 年 北海道大学大学院工学科 北方圏環境政策工学専攻 特任教授
2009 年～ 低温圏工学研究所 代表
2020 年～2021 年 国立科学博物館 産業技術史料情報センター 主任調査員

■ Contents

はじめに	4
土が凍るとは	6
科学としての凍土・凍上研究	10
工学としての凍土・凍上研究	29
凍土工学の適用史	39
凍土工学の代表的適用例	77
おわりに	97
謝辞	98
付属資料	99

電動アシスト自転車の技術系統化調査

Technical Systematization Survey of Electric Power Assisted Bicycles

明田 久稔 Hisatoshi Akita

■要旨

日本における電動の自転車又は二輪車の発想は、1940年代の電動の自転車又は二輪車の特許出願から始まっていた。モータの配置と駆動力伝達方法に関しては、考えられるほとんどの形式が、1980年代までに特許登録されている。その中で唯一商品化された世界初の電動自転車が、1980年に発売された「Electric Cycle DG-EC2」だった。また、1990年代前半には、2機種の電動スクータが限定販売された。これらの電動の自転車又は二輪車は、いずれも法律上、第一種原動機付自転車（以下、原付一種と呼ぶ）であるが、当時の原動機（エンジン）付自転車と比べた場合の電池の性能及びモータ等の特性などから、市場で広く普及するまでには至らなかった。

1970年代前半の自転車市場は、少年用スポーツサイクル及びミニサイクルが大流行して、全盛期を迎えた。1980年代には、軽快車・シティ車が主流となり、中高生及び主婦層を中心に広く普及していった。一方、原付一種は、1970年代後半にファミリーバイク、小型スクータが誕生し、それまで二輪車とは縁遠かった女性層も含めて、販売台数が急増した。しかし、1980年前後の熾烈なシェア争いの時代を経て、1986年のヘルメット着用義務化の頃から、徐々に販売台数が減少していった。

電動アシスト自転車は、自転車として認可され、1993年に世界で初めて商品化された日本発の電動の自転車であるが、その開発は最初から順調に進められていた訳ではない。1970年代後半から1980年代後半にかけて、幾つかの「ペダル付きの原動機（エンジン）付自転車」の開発が行われたが、いずれも途中で中断となった。1989年にペダル回転に合わせたエンジン回転数制御をモータ駆動制御の自転車に変えたことを機に、やっと当初考えていたものに近い1台の試作車ができた。その後、自転車としての認可を目指して、ロビー活動も含めた「ペダル踏みに比例したモータ駆動補助機能付きの自転車」の技術開発が行われた。1991年11月に始まった商品開発では、電池の搭載方法、車体強度、電池のサイクル寿命などに苦戦を強いられたが、1993年11月に最初の電動アシスト自転車「初代PAS」が、神奈川、静岡、兵庫の3県で限定販売、1994年4月に全国販売された。

本報告書では、1993年から現在までの電動アシスト自転車市場の期間を、導入期 - 過渡期 - 成長期 - 成熟期（？）に分けて、その市場・製品・技術の変遷を記述していく。この中では過渡期が、色々な意味で、最も重要である。過渡期の前半は、電動アシスト自転車業界が唯一経験した「不況下における販売・生産の減少傾向の時期」であった。過渡期には、電池、モータ及びトルクセンサなど、アシスト機能に係る主要部品が大きく変わる技術的進化が起り、その基本的構造は現在も変わっていない。この時期からアルミフレームが広く普及するようにもなった。海外市場を目指して、中国・欧州などに展開し始めたのもこの時期だった。

成長期以降、リチウムイオン電池・アルミフレームの軽量化及び電池の高容量化に支えられ、様々な車種が増え、従来の高齢者中心から20歳～40歳の女性層中心のユーザ層に変化した。また、前輪駆動モータによる回生充電機能付きの電動アシスト自転車が誕生して、ユーザの選択肢が増えた。電動アシスト自転車業界は、アシスト比率の道路交通法改正や幼児二人同乗自転車の条例改正の効果もあって、リーマンショックの時でも、ほぼ右肩上がりの成長を続けてきた。

一方、中国・欧州市場では、それぞれの道路事情、自転車文化及び従来技術と融合して、独自の電動自転車が誕生し、中国では2000年代前半、欧州では2000年代後半以降、急速にその数を伸ばし、日本市場を大きく上回る市場に成長している。

近年日本市場では、幼児二人同乗自転車及びシティ車の多様化並びに社会情勢の変化などによって、幼児二人同乗、通学用、シニア向けの電動アシスト自転車がその数を伸ばしつつある。一方で、数の増加と共に、製品事故発生に伴う事故分析・リコールなどに関して、国内主要企業が苦戦している現状もある。

■ Abstract

The idea of electric bicycles or motorcycles in Japan began with patent applications for electric bicycles or motorcycles in the 1940s. By 1980s, most conceivable forms of motor placement and driving force transmission methods had been patented. The only design to become a commercial product was the "Electric Cycle DG-EC2", launched in 1980 as the world's first electric bicycle. In the early 1990s, two models of electric scooters were sold for a limited utility. Both of these electric bicycles or two-wheeled vehicles are legally class 1 motorized bicycles. But due to the battery performance and motor characteristics when compared with the motorized bicycles at that time, they did not reach widespread use in the market.

The bicycle market in the early 1970s reached its heyday with the epidemic of boys' sports cycles and mini-cycles. In the 1980s, light roadsters and city bicycles became the mainstream, and became widespread mainly among middle and high school students and housewives. On the other hand, in the late 1970s, family bikes and small scooters were born, and the number of these mopeds sold increased sharply, including women who were far from motorcycles until then. However, after a fierce battle for market share around 1980, the number of sales gradually decreased from the time when helmets became mandatory in 1986.

The electric power assisted bicycle is the first electric bicycle from Japan that was approved as a bicycle and commercialized in 1993 for the first time in the world, but its development has not been proceeding smoothly from the beginning. From the late 1970s to the late 1980s, several "motorized bicycles with pedals" were developed, but all were interrupted. In 1989, when the engine speed control according to the pedal rotation was changed to a motor-driven bicycle, a prototype that was close to the original concept was finally created. After that, with the aim of being approved as a bicycle, technological development of "a bicycle with a motor drive assisting function proportional to the pedaling force" was carried out. This included some lobbying as well. Product development began in November 1991 and was a constant hard struggle with battery mounting method, frame strength, battery cycle life, etc., In November 1993, the first electric power assisted bicycle "first PAS" was released in limited sale in 3 prefectures of Kanagawa, Shizuoka and Hyogo, and sold nationwide in April 1994.

This report discusses the trends in the electric power assisted bicycle market, products and technology from 1993 to the present day. The timeframe is divided into four stages: the introductory stage, the transition stage, the growth stage and the mature stage. Of these, the transition stage is the most important in many ways. The first half of the transition stage was the only "time of declining sales and production in the recession" that the electric power assisted bicycle industry experienced.

During the transition stage, technological evolutions have occurred in which the main parts related to the assisting function, such as batteries, motors, and torque sensors, have changed significantly, and their basic structure has not changed. From this stage, aluminum frames became widespread. Expansion to overseas markets in China and Europe also began during this stage.

Since the growth stage, various types of electric power assisted bicycle have increased, supported by the weight reduction of lithium-ion batteries and aluminum frames and the increase in battery capacity, and the main user demographic has shifted from elderly people to women in their 20s, 30s and 40s. In addition, the birth of electric power assisted bicycles with a regenerative charging function using a front-wheel drive motor has increased the choices of users. The electric power assisted bicycle industry has continued to grow almost steadily even during the 2008 financial crisis, partly due to the effects of the revision of the Road Traffic Act for the assist ratio and the revision of the regulations for bicycles with two child seats.

On the other hand, in the Chinese and European markets, unique electric bicycles were born by fusing with their respective road conditions, bicycle culture and conventional technology, and the number has increased rapidly since the early 2000s in China and the latter half of the 2000s in Europe, has grown into a market that greatly exceeds the Japanese market.

In recent years, in the Japanese market, the number of electric power assisted bicycles for two child seats, for commuting to school, and for seniors is increasing due to the diversification of bicycles with two child seats and city bicycles and changes in social conditions. However, as the number increases, major domestic companies are struggling with accident analysis and recalls of their products.

■ Profile

明田 久稔 *Hisatoshi Akita*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

1978 年 大阪府立大学大学院工学研究科経営工学専攻修士課程
終了
1978 年 ヤマハ発動機株式会社 入社
モータサイクル事業本部でスクータ、業務用二輪車の
車体設計業務に従事
1991 年 ヤマハ発動機株式会社
事業開発本部 22 プロジェクト室(現: SPV 事業部)で
電動アシスト自転車の車体・機装部品設計に従事
1995 年 ヤマハ発動機株式会社 PAS 事業部 (現: SPV 事業部)
プロジェクトリーダー
2009 年 ヤマハ発動機株式会社 PAS 事業部 (現: SPV 事業部)
グループリーダー
2016 年 ヤマハ発動機株式会社 研究本部システム安全研究部
退職

■ Contents

1. はじめに	106
2. 電動アシスト自転車の概要	107
3. 電動アシスト自転車以前の自転車、原動機付自転車	113
4. 電動アシスト自転車 初代 PAS の誕生	131
5. 電動アシスト自転車の普及と発展の変遷	143
6. 電動アシスト自転車主要技術の進化	171
7. 電動アシスト自転車の海外展開	200
8. 電動アシスト自転車の法令・規格と安全性	206
9. おわりに	217

電話機技術の系統化調査

Systemized Survey on Telephone Set Technology

大賀 寿郎 Juro Ohga

■要旨

わが国の電話機は 1877 年（米国でグラハム・ベルが電話機を発明した翌年）以来の歴史を刻んでいるが、その技術はメーカーではなく逓信省に代表される政府機関の主導で発展されたのが諸外国とは異なる特徴だった。1950 年代からは公共企業体の日本電信電話公社が協力メーカーとともに独自の技術開発をすすめて世界有数の高性能の電話機を実用化してきた。1985 年に電話端末が自由化された後は多くのメーカーが独自の商品を実用化し、1990 年代以後の携帯電話機の時代を導いていく。

本報告ではこうしたわが国の電話機の研究実用化の流れのうち、黎明期から 1990 年頃までに着目する。特に、電電公社が研究実用化を主導してわが国独自の電話機技術が大きく開花した、終戦直後から電話端末開放までの時期に重点を置くこととしたい。

電話機には標準電話機のほか公衆電話機、構内交換（PBX）用電話機、携帯電話機など多くの種類があるが、ここでは古典的なアナログ電話回線に接続して用いる標準電話機とその変種に注目する。技術内容は主として筆者の専門であるオーディオ技術に注目するが、それ以外のダイヤル、電気回路などの重要技術にも言及する。

外国の製品のコピーから脱却した我が国独自の電話機技術の研究実用化は、第二次世界大戦による大混乱からの復興を目指して立ち上がった 1945 年以降に逓信省の電話機エンジニアにより開始された。最初の命題は物理特性と人の心理特性とを定量的に把握し、カットアンドトライを排して納得できる物理量を根拠とするような設計を行うことだった。1949 年に量産が開始されて復興のシンボルとなった 4 号電話機は、伝送周波数帯域と音声の明瞭度との関係の把握、正確な音響測定手法の確立など周辺技術の蓄積を推進しながら実用化され、定量的な設計を徹底した電話機として当時の最先端といえる。

その後、わが国が本格的な高度成長期に入った 1964 年から量産された 600 形電話機では、実用化にあたって聴覚心理グループが電話機の目標とすべき音響特性を示し、電話機設計サイドはこれを参照して電話機設計を行った。こうした基本検討を踏まえて設計された電話機は世界に例が少ない。

600 形電話機及びその変種の 600P 電話機「プッシュホン」の実用化以降、高度成長下の社会で電話機の需要は伸び続けた。しかし、その流れが 1973 年末の石油ショックで突然断ち切られて諸物価が急激に上昇し、社会が大混乱に陥った。電電公社はこれに対処して協力メーカーと緊急プロジェクトを立ち上げ、大幅なコストダウンを果たしながら通話性能を向上した 601 形電話機を実用化した。

その頃から電話機への半導体 IC の導入が現実のものとなり、電話機の構成を 100 年ぶりに全面変革する研究実用化が開始された。オーディオトランスデューサも炭素粉マイクロホンや高感度電磁イヤホンに代えて小型トランスデューサが検討され、パイロット商品に導入された。1980 年代に入ると電電公社の電話端末独占が見直され、電話機の技術やデザインが通信機から脱皮して家電商品に近づいていく。1984 年に電電公社が発表した 801P 電話機「ハウディ」は新世代の標準電話機というべきもので、電子回路が全面的に IC 化され、また電気通信研究所で 20 年来検討されてきたセラミック圧電トランスデューサを活用し、その後約 10 年にわたり世の電話機技術の源流となった。

1985 年の電話端末開放以後は多くのメーカーが独自の電話機商品を競い合い、電話機は家電商品となった。音響部品に適用される国内、国際規格は汎用オーディオ製品に近いものとなり、スイッチなどの部品も電卓などに近いものになっていく。本報告ではそうした動きにも言及する。

■ Abstract

The history of telephones in Japan dates back to 1877 (the year after its invention by Alexander Graham Bell in the United States). Unlike other countries, the technology in Japan was primarily developed by government agencies such as the Ministry of Communications and Transportation rather than by manufacturers. From the 1950s, the Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation (NTT) worked with collaborating manufacturers to achieve world-class, high-performance telephones. When the telephone equipment market was liberalized in 1985, many manufacturers brought out their own products, ushering in the mobile telephone era in the 1990s.

This report discusses the research and development of telephone sets in Japan from 1880s to 1990s, with particular focus on the period from the end of the Second World War through to the liberalization of the telephone equipment market. It was during this time that research and development led by NTT produced significant results in Japanese telephone technology.

There are various kinds of telephones besides the ordinary telephone, such as public pay phones, private branch exchange (PBX) phones and mobile phones. The focus of this report is the classic ordinary telephone that connects to an analogue telephone line, and variants of this. The technical content will primarily focus on the author's specialist area of audio technology, as well as references to other major technologies, such as dials and circuits.

Research and development on independent Japanese telephone set technology began in 1945 by telephone engineers working for the Ministry of Communications and Transportation. The country was rebuilding itself after the chaos of the Second World War and there was a move to avoid simply copying overseas technology. The first challenge was to quantify the necessary physical and psychological characteristics and come up with a design based on rational physical quantities without depending on trial and error. The "Type 4" telephone set was mass produced in 1949 and became a symbol of Japan's reconstruction. Developers had done their best to understand and incorporate the relationship between transmission frequency characteristics and speech clarity, establish accurate acoustic measuring methods and encourage the gathering of peripheral technologies. This thoroughly quantitatively designed telephone was state of the art for its time.

The "Type-600" telephone set was mass produced from 1964, as Japan entered a period of high economic growth. A group of auditory psychologists had identified preferable acoustic properties for a telephone set, and these had been referred to by the telephone designers. Very few telephones in the world have ever been designed based on such fundamental research.

Following the development of the Type-600 telephone set and the related Model 600P push-button telephone, demand for telephone sets continued to grow as the economy soared. However, the 1973 oil crisis put a sudden stop to this, as prices skyrocketed and the world went into chaos. In response, NTT launched an emergency project with collaborating manufacturers, resulting in the Type-601, a telephone set offering improved performance at significantly reduced cost.

After that, semiconductor ICs began to be incorporated into telephones. This completely changed the century-old telephone configuration and led to new telephone research and development. Audio transducers were introduced in pilot products, with small sized transducers being considered in place of carbon granule microphones and highly sensitive electromagnetic earphones. In the 1980s, NTT reconsidered its monopoly on telephone receivers. Telephone technology and design became less like telecommunication equipment and more like consumer appliances. The NTT 801P "Howdy" telephone series launched in 1984 became the standard for a new generation of telephone sets. With electric circuits all fully integrated into ICs and featuring three ceramic piezoelectric transducers that had been investigated by Electrical Communication Laboratory for two decades, this became mainstream telephone technology worldwide within the next ten years.

When the telephone terminal market in Japan was liberalized in 1985, telephone sets became a consumer electronic product, with competition arising between the many manufacturers and their telephone products. The national and international standards for contributing technologies for these products also became closer to those for general audio products. This report also mentions these trends.

■ Profile

大賀 寿郎 Juro Ohga

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任研究員

1964 年	電気通信大学 電気通信学部 通信機械工学科 卒業 日本電信電話公社 入社、電気通信研究所 配属 (電話機研究室)
1985 年	工学博士 (名古屋大学、電気音響変換材料の研究)
1985 年	日本電信電話公社 退職 富士通株式会社 入社 (宅内機器事業部)
1986 年	株式会社富士通研究所 転属 (通信宇宙研究部)
2000 年	富士通株式会社 退職 芝浦工業大学 教授 就任 (工学部通信工学科、大学院)
2008 年	芝浦工業大学 退職
現 在	芝浦工業大学 名誉教授
1967 年	日本音響学会 第7回佐藤論文賞受賞
1980 年	日本電信電話公社総裁表彰 (601 形電話機の実用化)
1994 年	電子情報通信学会 第50回論文賞受賞
1996 年	日本規格協会 IEC 活動推進会議運営委員長賞受賞
2000 年	IEEE (米国電気電子学会) Third Millennium Medal 受賞
2001 年	電子情報通信学会 フェロー称号授与
2006 年	IEEE (米国電気電子学会) Fellow 称号授与
2007 年	日本音響学会 功績賞受賞
2007 年	経済産業省 国際標準化貢献者表彰 (局長賞) 受賞
2019 年	日本音響学会 名誉代議員

■ Contents

1. はじめに	230
2. アナログ電話機と電話システム	234
3. 戦災からの復興と4号電話機	242
4. 電電公社の成立と電話技術の展開	249
5. 高度成長の時代と600形電話機	256
6. 種々の要素技術の研究と多彩な電話機の実用化	267
7. 石油ショックの嵐と601形電話機	277
8. 多彩なデザインへの要求と電子化技術の導入	290
9. ICと固体トランスデューサによる 高度な電子化電話機	300
10. 電電公社の民営化による大変革	310
11. 商品としての電話機とその技術	317
12. あとがき	321

民間航空機用ジェットエンジン技術の系統化

Systematic Survey of Jet Engine Technology for Commercial Aircraft

勝又 一郎 Ichiro Katsumata

■要旨

ライト兄弟による初の動力飛行の成功は、1903年12月17日になされたが、それは人類の古代からの夢を実現した瞬間であった。その夢は、僅か100年余りの期間に、世界中の多くの人々が自由に安心して旅行できるまでに成長した。ある発明を契機にして、これほど長い間人類が夢に見ていた技術が、短期間に完成したのはジェットエンジンに負うところが大きい。

なぜ、それが実現したのか。そこには技術の系統化に関する二つの大きな特徴がある。第1は、発明当初から、国際間の情報交換が盛んに行われたことだった。それには、平和時の国際共同開発があげられるが、戦争時等における相手方の軍用機の利点と欠点を必死に追及した努力も含まれる。

第2の特徴は、人から人への技術の伝承が、常に行われていたことであった。ジェットエンジンの作動原理の基本は単純で、このことは発明以来変わらない。問題は、性能の向上と安全性と信頼性の確保にある。このことは、必然的に暗黙知の伝承が必要となる。つまり、優れた設計と製造の技術があっても、膨大な経験が的確に伝えられなければ民間航空機用のエンジンの型式承認を取得することはできない。本稿は、この二点に注目をしながら纏めた。

1903年を契機にして、世界中の多くの発明家が独自の飛行機を設計して、その性能を競った。当初のそれは、いかに早く目的地に到着できるかで、競争相手は自動車だった。それが達成されると、次は長距離の安全飛行で、それは1927年の大西洋横断飛行の成功で達成された。しかし、当時の航空機産業は採算性が悪く、郵便輸送や遊覧飛行が中心であった。

その状況が一変したのは第2次世界大戦で、当事国の航空機生産能力は一気に向上した。各国の製造機数は現代をはるかに上回る数で、その間には、性能の向上と大型化が飛躍的に行われた。しかし、エンジンはレシプロで、ジェットエンジンは一部を除いてまだ実用レベルには達していなかった。

ジェットエンジン技術が急激に伸びたのは、戦後も続いた大国間の緊張によるもので、軍需予算の多くが、この分野の研究と開発に費やされた。そして、その完成された技術が民間航空機用に転用された。このために、新規の開発には多くの特殊性がある。そのことを、特に章を設けて説明した。

エンジンの大型化と信頼性の向上が、大洋横断に十分なまでに成長すると、国際間移動の需要の急上昇と共に多くのエアラインが乱立した。その中で、国家の威信を背負ったフラッグ・キャリアと呼ばれるエアラインの力が強力になり、エンジン開発は、その要求によって大型化に重点が置かれた。またこの頃には、安全性の確保のために、多くの国際間協定が結ばれ、更に排気ガスと騒音という環境問題の解決のための許容限度に関するルールが、頻繁に見直されることになった。その結果、ジェットエンジン技術の高度化が絶え間なく続けられて今日に至っている。本報告では、この期間を10年ごとに分けて、第1世代から第7世代への進化の特徴を述べた。また、設計、製造の各技術分野の系統化については、専門技術分野ごとに纏めた。さらに、同じガスタービン仲間である産業用との技術面における伝承についても述べた。

最後に、戦後の7年間の空白を超えて抱き続けられてきた、日の丸エンジンへの期待と、その実現に必要な事柄についての考察と、残された課題として脱炭素時代への動向を示した。

■ Abstract

The first successful powered flight by the Wright brothers was made on December 17, 1903, the moment when humanity's ancient dreams came true. The dream has grown to the point where many people around the world can travel freely and with peace of mind in just over 100 years. One significant technology that has made this dream come true in such a short space of time is the jet engine.

There are two main distinguishing characteristics in the systematization of this technology that explain how this was achieved so successfully. The first is the prolific exchange of information across borders since the technology was first invented. In peacetime, the international community worked together on technology development. In wartime, countries were desperate to analyse the strengths and weaknesses of enemy aircraft.

The second is that people were constantly sharing the technology with each other. The basic working principle of the jet engine is simple and has not changed since its invention. The issue is improving its performance and ensuring its safety and reliability. This inevitably requires the sharing of tacit knowledge. In other words, even with superior design and manufacturing technology, it is not possible to get type approval for a commercial aircraft engine without accurately communicating a vast amount of experience. This report focuses on these two points.

From 1903, many inventors around the world started designing their own aircraft and competing over performance. To begin with, the competition was to see how quickly one could reach a target destination while competitors travelled by motorcar. Once that was achieved, the next step was safe long-distance flight. This was achieved in 1927 with a successful crossing of the Atlantic. However, the aviation industry at that time was unprofitable and was centered on postal transportation and scenic flights.

The situation changed completely in World War II, and the aircraft production capacity of the countries concerned improved at once. The number of manufacturing machines in each country far exceeds that of modern times, and in the meantime, performance improvements and upsizing have been made dramatically. However, the engine was a reciprocating engine, and the jet engine, with some exceptions, had not yet reached a practical level.

Ongoing tensions between the great powers after the war prompted dramatic growth in jet engine technology. A large portion of military budgets were invested into research and development in this field, although the resulting technology was put to use in civilian aircraft. This meant that the new developments had a number of peculiarities. This report devotes a chapter to this topic.

Jet engines increased in size and reliability to the point where they could be used to cross oceans. The demand for international travel grew, and airline companies flooded the market. The dominant airlines became the so-called flag carriers, representing their respective nations. The primary focus of engine development was increasing size to meet their demands. Around this time, many international agreements were signed to ensure security, while rules on the maximum permissible limits of noise and emissions were constantly being revised to resolve environmental issues. As a result, enhancements in jet engine technology have continued to the present day. This report discusses the advances in jet engine technology decade by decade from the first generation to the seventh generation of the technology. In addition, the systematization of each technical area of design and manufacturing is summarized for each specialized technical field.

This report also notes the technology transfer with the similar field of industrial gas turbines.

This report concludes with a discussion on the expectations for the “Hinomaru” (Japanese flag) engine that was put on hold for seven years after the war and what is necessary to realize it. One remaining issue is the trends that will emerge in the era of decarbonisation.

■ Profile

勝又 一郎 *Ichiro Katsumata*

国立科学博物館産業技術史料情報センター主任調査員

1970 年 3 月 東京大学大学院工学系修士課程修了
1970 年 4 月 石川島播磨重工業に入社
1972 年 4 月 FJR710 デザインセンター設計システム班長兼務
1980 年 4 月 RJ500 日本側 Chief Designer 兼務
1982 年 4 月 V2500 日本側 Chief Designer 兼務
1989 年 4 月 GE90 日本側 Chief Engineer 兼務
2000 年 7 月 IHI エアロスペース代表取締役
2009 年 6 月 博士（工学）東京大学より
2010 年 4 月 その場考学研究所設立
2012 年 9 月 日本経済大学大学院 特任教授（2017 退任）

■ Contents

1. はじめに	344
2. ジェットエンジンの原理と初期の歴史	346
3. ジェットエンジンの成立	352
4. 日本での実用化と7年間の空白	358
5. 民間航空機用エンジンの種類と構成要素	367
6. 民間航空機用エンジンの進化の歴史	373
7. 民間航空機用エンジンの特殊性	392
8. 民間航空機用エンジンに適用される技術	399
9. 設計・開発分野における技術の系統化	405
10. 系統化調査のまとめと考察	423
11. 結言と謝辞	431