

放電加工機技術の系統化調査

Systematic Survey on Electrical Discharge Machine Technology

岩崎 健史 Takeshi Iwasaki

■要旨

放電加工は、電極と工作物の間に微小な放電を繰り返し発生させ、金属を溶融し除去する加工方法である。その原理は1943年にソ連で発明され、1950年代の半ばまでにソ連、欧州、米国に多数の放電加工機メーカーが誕生した。一方、日本では1948年に研究が始まり、1953年に最初の放電加工機メーカーが誕生した。

放電加工の特長は、一般に難削材と呼ばれる機械加工が困難な硬度や靱性の高い金属の加工を得意とする点である。その特長から、米国では航空宇宙産業向けの特殊部品などの加工に普及し、日本では主に金型部品の加工に普及した。

当初は欧米のメーカーが先行していたが、1980年頃には、日本のメーカーが世界シェアの過半を占めるまでに成長した。日本の急速なシェアアップの理由のひとつは、目覚ましい進歩を遂げていた半導体を始めとする日本のエレクトロニクス技術が放電加工機の開発を支えたためである。加えて、放電加工機産業は、主要な販売市場である金型産業の飛躍的な規模増による旺盛な需要に恵まれたことがあった。

本報告書の前半は、概ね1980年頃までに確立した放電加工機の基盤技術である加工用電源、軸送り機構、数値制御装置の応用技術などの開発史を解説する。また、放電加工機は金型産業の恩恵を受けて発展したが、同時に金型の製作方法を革新する役割を果たしてきた。需要先と供給元が車の両輪として発展した経緯や放電加工機を適用する利点について具体的な事例を基に解説した。

本報告書の後半は1980年頃から2015年頃までの期間を中心に、放電加工機のその後の発展について調査を行った結果を述べた。例として、新しい半導体素子を適用した高速加工電源、リニアモータ駆動の高速軸送り機構、加工ノウハウを智能化した適応制御などがあり、日本の放電加工機メーカーはこれらの世界に先駆けた新技術を次々と生み出し国際的な競争力を高めて行った。

1980年代以降、欧米のメーカーは次々と淘汰され、有力な競合先は高級機ブランドで鳴らしていたスイスの2社となった。1990年頃の日本は、高機能でコンパクトな製品で世界を席巻していたが、当時の流行り言葉で言う“軽薄短小”な製品に必要とされた微細で精密な部品の製造は、世界に冠たる日本の精密金型技術が支えたと言って過言ではない。日本の金型産業の世界一厳しい加工精度や品質への要求に、さらに微細化が加わり、日本の放電加工機メーカー各社は精密加工技術の開発競争に鎬を削り、遂にはスイスの高級機ブランドを超える精密加工技術を手中にした。報告書の後半では、こうした精密加工の要素技術である加工精度や表面粗さの向上、そして加工形状の微細化を追求した開発の歴史などを解説した。

日本における放電加工機の用途シェアは現在、金型がおおよそ7、8割を占めるため、本報告書では放電加工機の用途については金型を中心に調査を行った。しかしながら、今後の放電加工機の発展は、高付加価値な部品加工での用途拡大にあると考えられる。そのため報告書の最後として、将来の用途拡大が期待される高付加価値な部品を加工する目的の特殊な放電加工機についてまとめた。

■ Abstract

Electrical discharge machining is a fabrication process that melts and removes metal from a workpiece by repeatedly applying a small electrical discharge between an electrode and the workpiece. The principle behind this process was invented in 1943 in the Soviet Union, and by the 1950s, dozens of manufacturers of electrical discharge machines were founded throughout the Soviet Union, Europe and the United States. Research into the process began in Japan in 1949, with the first electrical discharge machine manufacturer established in 1953.

One of the advantages of electrical discharge machining is the ability to machine hard or tough metals—called difficult-to-cut materials—that are difficult to handle with mechanical processes. It is because of this that the process became increasingly used in America for machining special components for the aerospace industry—in Japan, electrical discharge machining came to be used for machining die and mold components.

While European and American manufacturers led the market in the early days, Japanese manufacturers grew to claim more than half the global share by the 1980s. One of the factors contributing to Japan's sharp rise in market share is that Japanese electronics technology, including semiconductors which had made remarkable progress, supported the development of electrical discharge machines. In addition, the electrical discharge machine industry was blessed with the strong demand arising from the rapid growth of its main market—the die and mold industry.

The first half of this report covers the history of development of the core technologies dedicated for electrical discharge machines by the 1980s, such as the power supplies used for machining, axial feed mechanism, and applied technology like numerical control devices. While development of electrical discharge machines benefited from the die and mold industry, the process also served to transform the methods used for making die and molds. The report outlines how both suppliers and customers worked hand in hand to further development, and also includes specific examples of the advantages of using electrical discharge machines.

The second half of the report describes the results of research on the subsequent development of electrical discharge machines, focusing on the period from around 1980 to around 2015, with examples including high-speed machining power supply that use new semiconductor elements, high-speed axis feed mechanisms driven by linear motors, and adaptive control that utilizes intellectual machining know-how. Japanese electrical discharge machine manufacturers led the world in developing new state-of-the-art technologies like these, which in turn boosted their competitive edge on the world stage.

European and American manufacturers found themselves left behind from the 1980s and on, with only two premium machining tool brands based in Switzerland considered potential competitors. Japan took over the world in the 1990s with countless high-performance and compact products. It goes without saying that Japan became the global power in precision die and mold technology that underpinned the manufacture of tiny precision components essential for a broad range of products that were small and light—just like the catchphrase of the time. The Japanese die and mold industry demanded the world's highest standard of machining accuracy and quality, but now miniaturization had become essential—this sparked fierce competition amongst Japanese electrical discharge machine manufacturers to further develop high-accuracy machining technologies, which eventually went on to exceed that of premium Swiss manufacturers. The second half of the report explores the history of development of elemental technology required for such high-accuracy machining, like enhancing machining accuracy and surface finish, and miniaturization of machined shapes.

With die and mold currently accounting for around 70 to 80% of electrical discharge machining in Japan, this report mainly examined how electrical discharge machines are used for fabricating die and mold. Electrical discharge machines are expected to be developed to cover a wider range of applications for machining high-value added components in the future, so the last section of this report covers special electrical discharge machines designed for machining high-value added components that are expected to grow in demand moving forward.

■ Profile

岩崎 健史 *Takeshi Iwasaki*

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

1980年 北海道大学工学部精密工学科卒業
1980年 三菱電機(株)入社 放電加工機の以下の業務に従事
加工技術開発、顧客技術支援、自動化装置開発、他
1990年 Mitsubishi Electric Automation, Inc, (米) Eng. Mgr.
1996年 放電システム部加工技術課長、工作部 GR、他
2007年 FA 事業本部産業メカトロニクス事業部
主席技師長、主管技師長
2017年 三菱電機(株) 専門嘱託、現在に至る
2022年 国立科学博物館 主任調査員、現在に至る
2014年～2022年 (一社)型技術協会 理事(編集委員長、他)

■ Contents

1. はじめに	4
2. 放電加工機の概要	5
3. 誕生から基盤技術の確立まで	11
4. 金型と歩んだ放電加工機	37
5. ワイヤ放電加工機発展の系統化調査	49
6. 形彫放電加工機発展の系統化調査	75
7. 特殊な放電加工機	97
8. おわりに	102

薄膜トランジスタ用透明酸化物半導体材料の系統化調査 ～IGZO系酸化物半導体材料の創製経緯と技術波及～

Systematic Survey of Innovation in Transparent Oxide Semiconductor "IGZO" for Next-Generation Thin-Film Transistors

鈴木 真之 Masayuki Suzuki

■要旨

大画面で薄型の液晶ディスプレイや有機エレクトロルミネッセンス・ディスプレイを駆動する薄膜トランジスタ (TFT) に用いられている半導体は、近年、アモルファスシリコン (a-Si:H) から、「IGZO」と呼ばれる酸化物半導体材料に置き換わりつつある。シリコンが隆盛を誇ってきた半導体文化に大きな革命が起こったということにほかならない。この一大変革をもたらしたのが、細野秀雄を中心とする ERATO プロジェクトグループによって発表された 2003 年の *Science* 誌と 2004 年の *Nature* 誌の連続する 2 つの論文である。前者の *Science* 誌の発表がホモガス相という層状構造を有する酸化物結晶： $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_m$ (m = 整数) をトランジスタの活性層に用いたのに対して、後者の *Nature* 誌の発表は、アモルファス (非晶質) の a-IGZO [= InGaZnO_4] 系酸化物半導体を用いた研究成果である。特に a-IGZO TFT の発見・発明は低温作製が容易であること、従来のシリコン・プロセスとの整合性が高く、アモルファスシリコンに比べて電子の移動度が 10 倍程高く、しかもリーク電流がはるかに少ないことなどから、全世界のエレクトロニクスメーカーから注目を浴び、そして半導体分野における「ゲームチェンジ」を巻き起こした。このイノベーションの源泉と言える *Nature* 誌の論文は、マテリアル・サイエンスと半導体トランジスタ双方の分野で歴史に残る名編となった。

本系統化調査では、良く知られた ITO 材料や多元系透明導電性酸化物の研究開発の歴史の変遷を端緒として、このイノベーションを起こした東京工業大学教授の細野秀雄が 1990 年代半ばから挑戦し続けてきた新しい酸化物半導体群の創製、および若手研究者の幾つかの実験結果から論理的に導き出された「作業仮説」の構築について、その技術フローも含めて筆者なりの視点で考察する。さらに酸化物薄膜のエピタキシャル単結晶化技術の蓄積と並行して、物質としては対極に位置する「アモルファス」でも「結晶」と遜色ない電子機能を賦与できることを「作業仮説」の具体的実証として大きな発見・発明に至った詳細な経緯を、企業との共同研究やプロジェクトメンバー個々の研究アクティビティーの観点も含めて、筆者の独自の推測・推理や想像も織り交ぜながら、細野による「IGZO 系酸化物半導体材料」の創製の源流を紐解いていく。

微量の他元素混入でも嫌われるシリコン半導体隆盛の時代の中において、In、Ga、Zn といった金属元素が 3 種も混在している複合酸化物を、新しい半導体産業のメイン・ステージに載せることが如何に大変な労苦を伴うものであったのか、マテリアル・サイエンスの視点だけでなく、特許出願や権利化への努力にも視点を注いで調査した。加えてこの材料創製のエポックが、世界中の研究者をどうエンカレッジしたのか、そして現在、高精細フラットパネル・ディスプレイ分野だけでなく、エレクトロニクス用メモリー応用や X 線ディテクター用、さらにはバイオセンサーなど、多岐に亘る応用分野にまで技術波及しているの、それらについてもその概要を簡潔に紹介する。

このアモルファス IGZO 系酸化物半導体は、その材料科学と薄膜トランジスタというデバイス技術の 2 つの新基軸をベースに、新しい大きな技術プラットフォームを構築したと言える。2015 年 3 月に、日本学士院より「無機電子機能物質の創製と応用に関する研究」の功績に対して、細野秀雄へ恩賜賞・日本学士院賞が授与され、2016 年には日本国際賞 (Japan Prize) を受賞した。

※なお、材料研究に精通されている方々にはすでにご存じのことと思われるが、次世代 TFT 用の IGZO 系透明酸化物半導体材料の開発者である細野秀雄は、本系統化調査で取り上げた材料系以外にも、典型的絶縁体と見做されていたセメント鉱物 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (略称：C12A7) を半導体化、金属化、そして超伝導化させた極めてインパクトの高い卓越した研究成果を挙げている。この研究は電子がアニオンとして働く「エレクトライド (電子化物)」という新領域の開拓に繋がった。また、半導体の一つである新規層状オキシカルコゲナイド系物質の創製、さらには、従来の金属系超伝導で定着していた BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) 理論の延長では考えにくい、革新的な鉄系超伝導物質 [$\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ 組成の層状オキシニクタイト物質 ($T_c=26\text{K}$)] も発見し、第二の超伝導フィーバーを起こした。時に『材料探索における新大陸を発見した』と形容されるほどの卓越した多くの研究成果は、従来の固体物性物理学において新しい章への扉を拓かせ、新しい材料科学の学理を創成したものであり、現在もなお材料科学の分野では世界屈指の研究者であることをここに付記させて頂く。

■ Abstract

Thin-film transistors (TFTs) have greatly contributed to the increase in the area of liquid crystal displays and organic electroluminescence displays. In recent years, amorphous silicon (a-Si:H) is being replaced by an oxide semiconductor known as "IGZO" (In-Ga-Zn-O) in TFTs. This is nothing less than a major revolution in the semiconductor field, where silicon has prospered. This revolution was brought about by two consecutive papers in *Science* (2003) and *Nature* (2004) published by the ERATO project group led by Prof. Hideo Hosono. The paper in *Science* discussed a homologous series of oxide crystals $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_m$ ($m = \text{integer}$) with a layered structure that serve as the active layer of the transistor. The paper in *Nature* discussed an amorphous oxide semiconductor (a-IGZO, InGaZnO_4). a-IGZO TFTs in particular are easy to fabricate at low temperatures, are highly compatible with conventional silicon processes, have ten times higher electron mobility than amorphous silicon, and have much lower leakage currents. These are the reasons why IGZO has attracted attention from electronics manufacturers around the world. As a result, this discovery and invention has sparked a "game change" in the semiconductor field. The paper in *Nature*, which is the source of this innovation, has become a landmark in both the fields of materials science and semiconductor transistors.

This systematic survey starts with historical changes in the research and development of well-known indium tin oxide (ITO) materials and multi-component transparent conductive oxides. From the author's point of view, this survey discusses the creation of new oxide semiconductors by Hideo Hosono, a professor at Tokyo Institute of Technology, who has always been up for a challenge and initiated innovation in this area since the mid-1990s. This survey also discusses the formulation of a "working hypothesis" logically derived from the results of several experiments by young researchers, as well as the workflow of the technology. In parallel with technology accumulation to epitaxially-grown single-crystal oxide thin films, this survey describes the detailed history of major discoveries and inventions that resulted from concrete validation of the "Hosono's working hypothesis" that even "amorphous" materials, which differ vastly from "crystals," can be endowed with electrical properties comparable to those of crystals. This survey deciphers how Hosono created "IGZO oxide semiconductors" as well as joint research with companies and research by individual project members while interweaving the author's speculations, theories, and imaginings.

During the era when silicon semiconductors flourished, even contamination with trace amounts of other elements were prohibited, so putting composite oxides containing three metals such as In, Ga, and Zn on the center stage of a new semiconductor industry was an arduous feat. This survey examines that difficulty from the perspective of materials science as well as efforts to apply for patents and acquire rights to the materials. In addition, this epoch of materials creation has encouraged researchers around the world. Currently, the technology is spreading in the field of high-definition flat panel displays as well as in a wide range of fields such as memory applications for electronics, X-ray detectors, and even biosensors. This survey will provide a brief overview of those fields of application.

a-IGZO semiconductors have created a large new technological platform based on two new cornerstones, materials science and device (TFT) technology. In March 2015, the Japan Academy awarded Hideo Hosono the Imperial Prize and the Japan Academy Prize for his achievements in "Study on creation and application of inorganic electro-active materials." In addition, he was also awarded the Japan Prize in 2016.

※ As those who are familiar with materials research probably already know, Hideo Hosono is the pioneer of transparent oxide semiconductors (IGZO) for next-generation TFTs. In addition to creating these oxide semiconductors, the results of his outstanding research have had a profound impact on materials other than those covered here. The mineral $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C12A7) is used in cement and was considered to be a typical insulator, but Hosono converted this material into a semiconductor, metal, and superconductor. This research led to the development of a new field called "electrides," in which electrons act as anions. In addition, Hosono has created a new layered oxychalcogenide material that is a semiconductor. He also discovered an innovative iron-based layered oxypnictide superconductor ($\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$, $T_c=26$ K) that is unlikely to be an extension of the established BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) theory in conventional metal-based superconductivity, causing a second "Woodstock of physics" in the superconducting materials field. Many of the results of his outstanding research are sometimes described as "discovering a new continent in materials exploration," and they have opened a new chapter in solid state physics and created a new theory of materials science. I would like to add that Prof. Hideo Hosono remains one of the world's leading researchers in the field of materials science.

■ Profile

鈴木 真之 Masayuki Suzuki

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

1981年	東京大学大学院工学系研究科修士課程修了 ソニー株式会社入社 中央研究所材料研究室
1993年	ソニー株式会社 主任研究員
1993年	米国イリノイ大学フレデリック・サイツ材料研究所 留学
1995年	日本電子工業振興協会 酸化物エレクトロニクス専門委員
1997年	横浜国立大学大学院物質工学専攻 非常勤講師
1998年	博士(工学)(横浜国立大学)
1999年	ソニー株式会社フロンティアサイエンス研究所 新材料研究室 室長
2002年	ソニー株式会社マテリアル研究所 ナノテクノロジー研究グループ グループ長
2004年	ソニー株式会社退職
2004年	富士写真フイルム株式会社先進コア技術研究所
2007年	富士フイルム株式会社 主席研究員
2008年	富士フイルム株式会社先端コア技術研究所 研究室長
2015年	科学技術振興機構(JST)戦略研究推進部 主任調査員
2016年	富士フイルム株式会社退職
2022年	科学技術振興機構退職
2022年	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

■ Contents

1. はじめに	112
2. 透明導電性酸化物材料の発展	114
3. 新しい酸化物半導体創製へ向けた Hosono's Working Hypothesis とその学理構築	140
4. 半導体トランジスタの歴史変遷	170
5. IGZO 系酸化物半導体薄膜トランジスタの 創製の意義	182
6. 知的財産活動への取り組み	193
7. その後の IGZO 関連材料・デバイスの研究開発 動向と技術発展・波及	204
8. まとめ	229
9. 謝辞	230

鉄鋼の信頼性向上技術の系統化調査

The History of Technology to Enhance the Reliability of Steel

長井 寿 Kotobu Nagai

■要旨

人類はまず自然から原材料を採取した。19世紀以降は地下資源から作った人工材料が主となる。21世紀では再生可能、循環型資源への期待が高まっている。「与えられた条件の下で、与えられた期間、故障せずに、要求どおりに遂行できる能力」である信頼性の向上もますます重要になる。そのためには破損、損耗を最小限化しなくてはならない。構造材料としての鉄鋼には低価格と高強度利用が期待される。高強度利用は構造物の軽量化および省材料化を同時実現する。ところが、高強度利用には脆性、疲労、腐食、高温クリープなどへの耐性の低下がつきまとう。これらの耐性を高めることが信頼性向上に直結する。鉄鋼の「ハイテン化」は、各用途分野で「使える高強度」の限界を改善した積み上げの歴史である。

技術開発は失敗や事故などのマイナス面の歴史でもあり、100%の安全・安心はあり得ない。そのため、設計者は材料が使用される条件や環境を理解し、それらの条件に合う材料を選択する必要がある。素材の製造者や提供者はその限界を正しく理解し、関連する情報の公開と普及に努めなければならない。そうすると設計者と材料提供者のコミュニケーションと協力が容易になり強化される。ひいては「使える高強度」のさらなる上昇につながる。その効率的な展開のために、どのような指標が連携および信頼性向上に適しているのか歴史的に検討されてきた。現時点で指標は100%完成とは言い切れないが、その方向性は明白である。

西欧に始まった産業革命以降、鉄鋼は安価さと便利さからいろんな用途に大量に利用された。しかし鉄鋼は「完全無欠」ではなく破損、損耗の事例が相次ぐ。それでも鉄鋼が幸運だったのはその弱点を克服できたことである。徐々に改良が積み重なった。信頼性向上のためには物理・化学は勿論のこと、機械工学の発展が鍵になっている。さらに新しい科学理論や観察手段なども動員された。弾性論から材料力学が発展した。そこに脆性的でない鉄鋼が出現し塑性変形に関心が向くようになった。しかしさらに一歩進んで耐破損性にまで関心がなかなか及んでいない。耐破損性への接近は、まず脆性破壊に始まる。「遷移曲線」と呼ばれる耐破損性の整理（経験論）がいち早く定着し、「耐き裂性」についての基本的考え方（理論）も提案された。疲労では「ヴェーラー線図」と呼ばれる耐破損性の評価手法が見出された。これらは信頼性向上技術の観点からは特筆すべき前進だった。時代が進み、科学者や技術者が専門家集団として現れ、大学の充実、基礎研究所の設置、統一規格に向けた国際会議の始まりなども必然的に起こった。

西欧に遅れをとった日本では、鉄鋼技術において民間産業が主導的な役割を果たしてきたといっても過言ではない。一方、公的研究機関も重要な役割を果たしてきた。大学や研究機関は基礎研究において重要なだけでなく、鉄鋼の信頼性向上技術の進歩のために複数の専門分野の連携にも大きく寄与した。また、学会や公的研究機関は、一企業ではできない大規模な実験や長期試験、産官学連携の研究の実施主体となった。このように学会や公的研究機関の寄与は大きかった。

戦前の日本では、順次試験設備等の整備が進み、経験が蓄積し始めた。しかし、基礎現象の把握という点では、試験設備の改善、工夫がしやすかった脆性分野では日本独自の知見もあったが、疲労のように試験法の統一が遅れた分野では得られた知見は経験的理解でしかなかった。戦後になると欧米の知見が総合的に理解されるようになり、1950年ごろまでには少なくとも知識の上では欧米とほぼ同じ地平に到達していたと思える。それに続く半世紀で大きな発展を遂げ、欧米に比肩してグローバルリーダーのプレゼンスを占めるに至っていると自負できる。本稿では、脆性破壊、高サイクル疲労、大気腐食、高温クリープについて詳述する。

鉄鋼の信頼性向上技術には、材料力学と材料学の連携が不可欠である。技術の成長期では製造者が関わる三角形が大きな役割を果たすが、技術の成熟期では需要家もしくは使用者が関わる三角形も重視しなくてはならない。この二つの三角形が有機的に繋がることで、より安全・安心で豊かな社会が持続的に運営されていこう。これらの三角形を切り結び役目を果たす、学協会、公的研究機関による具体的な貢献が今後ますます重要になると思われる。自然環境の多様性や耐破損性・耐損耗性を許容条件への反映を考慮した国際標準への期待が高まる。同時に、数値シミュレーション、データ科学の活用も重要である。

■ Abstract

Humans first collected raw materials from nature. Since the 19th century, though, humans have mainly used materials made from resources underground. In the 21st century, there are growing expectations for the use of renewable and recyclable resources. Improving reliability, which is the ability to perform as requested under given conditions for a given period of time without failing, will also become increasingly important. To that end, damage and wear must be minimized. As a structural material, steel should be very strong and inexpensive. The use of a high-strength material in a structure simultaneously reduces its weight and conserves the materials used. However, increased strength reduces resistance against brittleness, fatigue, corrosion, and high-temperature creep. Improving resistance to these phenomena is directly linked to improving reliability. The development of high-strength steel is a history of increased limits of usable high-strength steel in each field of application.

Technological development is also a history of negative outcomes such as failures and accidents. In any case, achieving perfect safety and reliability is not possible. Therefore, designers must understand the conditions and environments in which a material will be used, and select materials to meet those conditions. Manufacturers and providers of materials must have a correct understanding of the limitations of those materials and disclose and share relevant information. This will facilitate and enhance communication and cooperation between designers and material providers. In turn, this will lead to a further increase in "usable high-strength" materials. Therefore, the indices that are suited to increased cooperation and improved reliability have been historically examined. The indices are not 100 % perfect at this point, but the direction is clear.

Since the Industrial Revolution began in Western Europe, steel has been used in large quantities for various purposes due to its low cost and convenience. However, steel is not "perfect," and there are numerous examples of its fracturing and wear and tear. Nonetheless, steel has luckily overcome its weaknesses. Gradual improvements have been made. In addition to advances in physics and chemistry, advances in mechanical engineering have been the key to improving the reliability of steel. Moreover, new scientific theories and observational techniques have also been put to use. The mechanics of materials developed from the theory of elasticity. Non-brittle steel emerged, and interest turned to plastic deformation. However, interest had not yet reached fracture resistance, which is a step further on from plastic deformation. The approach to fracture resistance begins with brittleness. Identification of fracture resistance via a method known as the "transition curve" (an empirical theory) was quickly established, and the basic concept (theory) of "crack resistance" was also proposed. A technique for evaluating fatigue known as the "Wöhler curve" (S-N curve) was identified. These were remarkable advances from the standpoint of technology to improve reliability. Over time, scientists and engineers emerged as a group of experts. The expansion of universities, the establishment of basic research institutes, and the beginning of international conferences to unify standards inevitably occurred.

Private industry has undoubtedly played a leading role in steel technology in Japan, which has lagged behind Western Europe. That said, public research institutes have also played an important role. Universities and research institutes are not only important to basic research, but they have also greatly contributed to collaboration among specialized fields in order to advance technology to improve the reliability of steel. Moreover, academic societies and public research institutes have become the main entities conducting large-scale experiments, long-term tests, and collaborative research involving industry, government, and academia that cannot be done by a single company. This is how academic societies and public research institutes have made a significant contribution.

In pre-war Japan, testing facilities gradually improved and experience was being gained. In terms of grasping basic phenomena, Japan had unique knowledge in the field of brittleness, where test facilities and approaches were easy to improve and devise. In fields such as fatigue, however, standardization of testing methods was delayed and the knowledge obtained was only an empirical understanding. After the war, Western knowledge was comprehensively understood, and by around 1950, Japan seemed to have reached the same level of knowledge as in the West. In the half-century that followed, Japan has made major advances, and Japan can proudly say that it now holds a position as a global leader on par with Europe and the United States. This paper describes brittleness, high-cycle fatigue, atmospheric corrosion, and high-temperature creep.

Collaboration between material mechanics and materials science is essential to technology to improve the reliability of steel. When a technology is developing, manufacturers play a major role. When a technology is mature, consumers or users must also be emphasized. A safer, more secure, and more prosperous society can be operated sustainably by organically linking these two groups. Academic societies and public research institutes play a role in connecting those groups, and specific contributions by those societies and research institutes will become increasingly important in the future. There are mounting expectations for international standards that take into consideration the diversity of the natural environment and the inclusion of fracture and wear in allowable conditions for materials. At the same time, use of numerical simulation and data science will also be important.

■ Profile

長井 寿 *Kotobu Nagai*

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

1974年	東京大学工学部金属工学科	卒業
1977年	東京大学工学系大学院金属材料学科修士課程	修了
1977年	東京大学工学部助手	
1981年	工学博士（東京大学）	
1981年	金属材料技術研究所	
2001年	物質・材料研究機構に統合	
2002年	同 超鉄鋼研究センター長	
2012年	同 構造材料研究拠点長	
2017年	同 退職	
2018年	同 名誉研究員	

■ Contents

1. はじめに	238
2. 構造・材料の破損、損耗	239
3. 安価で加工しやすい鉄鋼	244
4. より高強度の壁は信頼性向上	251
5. 信頼性向上のための科学と技術の プラットフォーム	259
6. 脆性破壊	268
7. 高サイクル疲労	276
8. 高温クリープ	287
9. 大気腐食	298
10. まとめ	305

国内公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査

Historical Investigation of Antenna Technology in Domestic Public Radio Communication

堀 俊和 Toshikazu Hori

■要旨

情報通信は、社会生活を営む上で重要なインフラストラクチャーである。特に、目には見えない電波を用いた無線通信が1895年のマルコーニの発明から約130年しか経っていないにもかかわらず、現代人は携帯端末を片手に高度なパーソナル無線通信を堪能している。

日本における国内公衆無線通信は、1908年の銚子無線局による長波(LF)および中波(MF)を用いた船舶無線電報サービス、および1940年の石崎(青森)―当別(北海道)間を結ぶ超短波無線多重電話回線として始まった。その後1950年代に入って、船舶通信は超短波(VHF)の時代を迎え、無線多重電話回線は本格的なマイクロ波通信の時代を迎えた。このマイクロ波通信が、国内電気通信ネットワークを構成する無線回線構築の軸となり、基幹系無線通信ネットワーク全盛の時代へと繋がった。さらに1980年代に入って、電気通信ネットワークは情報通信ネットワークへと姿を変え、基幹系無線通信ネットワークは携帯端末を用いた電話・メッセージから動画像にいたる情報伝送のためのアクセス系無線通信ネットワークへと進化してきた。

これらの無線通信においては、空間を飛ぶ電波が情報を伝送する役目を担っており、空間と送受信回路との間の電波の出入口の役目を担っているデバイスがアンテナである。アンテナは、無線通信にとって不可欠なデバイスであり、無線通信の発達とともに目覚ましい発展を遂げてきている。

日本国内における公衆無線通信とそれらの通信に用いられたアンテナとの関わりについて、「国内公衆無線通信におけるアンテナ技術の系統化調査」と題して系統化調査を行った。この系統化調査においては、国内公衆無線通信として研究開発され実用化された固定無線通信、国内衛星通信および公衆移動通信に主眼を置いている。

固定無線通信については、市外電話および放送テレビの長距離中継回線、市外電話の短距離中継回線、加入者無線の固定アクセス回線を取り扱っている。国内衛星通信については、国内通信衛星とこれらの衛星を用いた国内衛星通信回線を対象としている。初期の公衆移動通信については、船舶電話、無線呼出、自動車電話(第1世代移動通信)、航空機電話を取り上げている。また本調査では、デジタル携帯端末を用いた第2世代移動通信以降をパーソナル通信として取り扱い、第2世代から第5世代移動通信における携帯電話、PHS(Personal Handy-Phone System)、高速データ伝送についても対象としている。

これらの国内公衆無線通信には、各種の通信用アンテナが用いられた。固定無線通信および国内衛星通信には、主として開口面アンテナが用いられた。一方、公衆移動通信には、線状アンテナから始まり、平面アンテナを素子とするアレーアンテナが用いられてきている。

本系統化調査報告は、上述の方針で行った調査の結果をまとめたものである。ここでは、国内公衆無線通信で用いる周波数に着目して、公衆無線通信に適用可能な周波数とアンテナとの関係を明らかにしている。さらに、公衆無線通信の実用化において研究開発されたアンテナの高性能化技術と公衆無線通信の変遷との関わりについてまとめている。公衆無線通信用アンテナの設計に際して、各々の無線通信システムに適したアンテナ形式が存在し、アンテナ固有の特性を活かした最適設計が図られてきた。その結果、各々の無線通信システムの高度化に応じて、高性能化および高機能化のための卓越したアンテナ技術が確立されてきた。すなわち、通信用アンテナ技術の発展は、無線通信システムとともに高度化が図られてきた結果とも言える。なお、本系統化調査で対象とした国内公衆無線通信用アンテナは、各サービスの終了とともに撤去され、殆どのアンテナは現存していない。本報告で対象とした無線通信システムおよび通信用アンテナの研究実用化における設計技術は今後の新たな研究開発にも継承されることが期待される。

■ Abstract

Information and communications are an essential part of infrastructure used for living our social lives. In particular, although wireless communication using invisible radio waves were invented by Guglielmo Marconi in 1895 only around 130 years, people in modern society grasp a mobile phone in one hand while making full use of advanced personal telecommunications.

Domestic public radio communications in Japan began with the maritime telegram service from the Choshi coast station in 1908 using low frequencies (LF) and medium frequencies (MF), followed by the very-high frequency multiplex radio telephone link in 1940 linking Ishizaki (in Aomori Prefecture) and Tobetsu (in Hokkaido). In the 1950s, maritime communications entered the era of very-high frequencies (VHF), and multiplex radio telephone links also entered the era of full-scale microwave relay links. These microwave relay links became the backbone radio links that made up the domestic telecommunications network in Japan, and led to the golden era of backbone radio relay network. At the start of the 1980s the telecommunications network began to take the form of an information and communications network, where backbone radio communications networks began to evolve into access radio communications networks for information transmission of phone calls, messages and movies using mobile phones.

The role of radio waves in these types of radio communications is to transmit information through space, and antennas are the devices that serve as the interface for sending or receiving radio waves between space and transmission or reception circuits. Antennas are an essential component for radio communications, and their development has advanced at a tremendous pace in line with the progress of radio communications.

We conducted a systematic survey titled the "Historical Investigation of Antenna Technology in Domestic Public Radio Communication" to examine the relationship between public radio communications in Japan and the antennas used for those communications. This survey focuses on fixed radio communications, domestic satellite communications and public mobile communications that have been researched, developed and put into practical use as domestic public radio communications.

Fixed radio communications covers long-distance relay links used for long-distance calls and broadcast television, short-distance relay links used for long-distance calls, and fixed access lines for subscriber radio. Domestic satellite communications covers domestic communication satellites and domestic satellite communication links using these satellites. The early type of public mobile communications covers maritime telephones, radio pagers, car phones (1G mobile communications technology), and in-flight telephones. The digital mobile communications using 2G and newer mobile communications technology are covered as personal communications, which includes Personal Digital Cellular (PDC), Personal Handy-Phone System (PHS), and high-speed data transmission systems.

Various types of communications antennas have been used for these domestic public radio communications. Fixed radio communications and domestic satellite communications mainly used aperture antennas, while public mobile communications first used linear antennas before array antennas comprising component planar antennas began to be used.

This systematic survey report outlines the results of the survey conducted based on the description above. A closer look at the frequencies used for domestic public radio communications reveals the relationship between the frequencies and antennas suitable for public radio communications. The report also outlines the relationship between high-performance antenna technologies developed for the practical application of public radio communications and the trends in public radio communications. Different antenna types exist to suit various radio communications systems, and the design of antennas for public radio communications involved efforts to identify the most suitable design for maximizing the characteristics specific to each type of antenna. This led to the development of remarkable antenna technology offering higher performance and better functionality to cater to the advances in each type of radio communications system. In a way, development of communications antenna technology has evolved in line with the advances made to radio communications systems. Note that antennas used for domestic public radio communications covered by this systematic survey were progressively dismantled after the termination of each type of service, and almost no such antennas exist today. It is hoped that the design technology used for the research and

practical application of radio communication systems and antennas for these systems will be applied to new research and development going forward.

■ Profile

堀 俊和 *Toshikazu Hori*

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

1976年 金沢大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻 修了
1976年 日本電信電話公社 入社（横須賀電気通信研究所）
以来、主として衛星通信、移動通信など各種無線通信
方式用アンテナおよび電波伝搬の研究実用化に従事
1993年 金沢大学 博士（工学）学位取得
2001年 日本電信電話（株） 退職
2001年 福井大学 教授（工学部情報・メディア工学科）
以来、ワイヤレスブロードバンドのためのアンテナ・
伝搬、メタ・サーフェス等の研究開発に従事
2009年 福井大学 総合情報基盤センター長 併任
2016年 福井大学 定年退職
現在 福井大学 客員教授

2000年 IEEE（米国電気電子学会）APS Japan Chapter 委員長
2007年 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究専門委員長
2008年 電子情報通信学会 フェロー称号授与
2009年 IEEE APS Nagoya Chapter 委員長
2011年 電子情報通信学会 北陸支部長
2015年 IEEE Fellow称号授与
現在 IEEE Life Fellow
電子情報通信学会 終身フェロー
電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究専門委員会 顧問

■ Contents

1. まえがき	323
2. 国内公衆無線通信とアンテナ技術	325
3. 固定無線通信回線を支えたアンテナ	332
4. 国内衛星通信回線を支えたアンテナ	347
5. 初期の公衆移動通信のための無線基地局アンテナ	370
6. パーソナル通信のための無線基地局アンテナ	388
7. あとがき	401