

舞台照明器具技術の系統化調査

Systematic Survey on Stage Lighting Luminaire Technologies

浅川 久志 Hisashi Asakawa

■要旨

本報告書は、舞台照明器具の系統化調査として、日本における舞台照明器具の成り立ちを、用途区分および光学系の観点から体系的に整理したものである。舞台照明器具は、一般照明の目的である「明るくする」機能に加え、空間やセット、演者の立体感の表現、さらに時間・季節・気候などの状況変化を照明によって描写するという、舞台芸術特有の要請を担う。加えて、劇場という大空間を照明するため、大容量光源を用い、様々な配光特性を持つ器具へと多様化してきた。本調査では、これらの発展過程を光源技術と光学設計の両面から整理した。

まず、近代の劇場に導入された白熱電球期のスポットライト、フットライト、ボーダーライトの構造と特性について解説し、戦後に普及したハロゲン電球器具がもたらした影響について検討した。また、1980年代以降におけるプロファイルスポットライトおよびフォロースポットライトの光学系の高度化について解説し、演目や劇場によって異なる舞台照明器具への技術的要求が、伝統的な演目・ミュージカル・オペラ・コンサートの照明表現が舞台照明器具やその使用方法にどう影響をしたのかについて考察を行った。とりわけ、光のエッジ形状制御、照射範囲の限定、遠距離投射性能といった演出上の要請が器具設計にどのように反映されたかを示した。

さらに、国内メーカーによる独自技術として、大口径平凸レンズ、非球面レンズなどのハロゲン電球を含む白熱電球を使用した光学系の位置づけを整理し、欧米機器との比較から日本の発展の特徴を明らかにした。これらの技術は、舞台芸術の要求に応じて改良され、国産の舞台照明器具が独自の光学設計を確立する契機となった。

2000年代以降のLED化に関しては、COBモジュールの普及、演色性の改善、熱対策機構の高度化、PWM(pulse-width modulation)制御による調光などの基礎的な技術の構築など、課題と利点を示した。従来のフィラメント光源やアーク光源とは異なる発光特性が光学系の再設計を促し、舞台照明器具の構造そのものの再定義につながった点を示した。また、LED化は光源寿命・エネルギー効率の観点だけでなく、光学的・文化的な転換期として捉える必要があることを考察した。

本稿は、舞台照明器具の発展を、光源技術、光学設計、舞台芸術の実践という複数の視点から総合的に示したものである。

■ Abstract

This report presents a systematic survey of stage lighting luminaires in Japan, organizing their development from the perspectives of application categories and optical systems. In addition to the general-lighting function of providing illumination, stage lighting luminaires are required to meet the unique demands of the performing arts: expressing the three-dimensionality of spaces, stage sets, and performers, and depicting changes in conditions such as time of day, season, and weather through lighting. Furthermore, because they must illuminate the large interior volume of a theatre, they have diversified into luminaires employing high-output light sources and offering a wide range of light-distribution characteristics. This study organizes these developmental processes in terms of light-source technology and optical-design.

First, the report explains the structures and characteristics of spotlights, footlights, and border lights from the incandescent-lamp era that were introduced into modern theatres, and examines the effects brought about by the tungsten-halogen-lamp luminaires that became widespread after the Second World War. It also describes the advancement of optical systems for profile spotlights and follow spotlights from the 1980s onward, and analyzes how the differing technical requirements for stage lighting luminaires across productions and theatre types influenced both the luminaires themselves and their methods of use in lighting for traditional performances, musicals, operas, and concerts. In particular, it illustrates how staging demands, such as controlling the shape of the beam edge, limiting the illuminated area, and achieving long-distance projection performance, were reflected in luminaire design.

Furthermore, the report highlights optical systems that use incandescent lamps, including halogen lamps, and incorporate proprietary technologies developed by domestic manufacturers, such as large-diameter plano-convex lenses and aspherical lenses, and clarifies the characteristics of Japan's unique technological development through comparisons with European and American equipment. These technologies were refined in response to the demands of the performing arts, providing the impetus for domestically produced stage lighting luminaires to establish their own distinctive optical designs.

Regarding the shift to LEDs from the 2000s onward, the report identifies both the challenges and advantages, including the spread of COB modules, improvements in color rendering, advances in thermal-management mechanisms, and the establishment of fundamental technologies such as dimming through PWM (pulse-width modulation) control. It shows how the emission characteristics, different from those of conventional filament and arc light sources, prompted a redesign of optical systems and led to a redefinition of the very structure of stage lighting luminaires. It also argues that LED adoption must be understood not only from the perspectives of light-source longevity and energy efficiency, but also as an optical and cultural turning point.

This paper presents the development of stage lighting luminaires from multiple perspectives, including light-source technology, optical design, and the practical application of the performing arts.

■ Profile

浅川 久志 *Hisashi Asakawa*

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

1985年 日本大学生産工学部機械工学科卒業
丸茂電機株式会社入社、開発部において舞台照明器具
の開発に従事
2002年 舞台照明器具の光学設計および管理、教育業務に従事
2017年 開発部主幹
2022年 開発部シニアアドバイザー
2025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

2005年～2019年 東海大学工学部光・画像工学科 非常勤講師
2005年～2007年 日本照明器具工業会「国際規格回答原案調査
作成委員会分科会」委員
2013年～2025年 劇場演出空間技術協会「演出空間用LED照明
器具表示規格研究会」主査
2016年～2025年 日本照明家協会「技術委員会」委員

■ Contents

1. はじめに	004
2. 光源の変遷と舞台照明器具	005
3. 舞台照明器具の種類	010
4. 上演作品の様式(ジャンル)によって異なる舞台 照明器具と使用方法	018
5. フラッドライトの光学系の特徴と変遷	034
6. 単レンズスポットライトの光学系の特徴と変遷	049
7. プロファイルスポットライトの光学系の特徴と 変遷	073
8. そのほかのスポットライトとエフェクトライト	088
9. 舞台照明器具のLED化	100
10. おわりに	104

自動車用無段変速機技術の系統化調査

Systematic Survey on Continuously Variable Transmission for Automobile

安保 佳寿 Keiju Abo

■要旨

より良いクルマを実用化し続けるために、わが国の自動車産業の技術者はクルマを構成する材料、部品やユニットを支える多岐にわたる技術を進化させ続けてきた。その進化の過程においては、技術者が新技術の種を世界中から探し出し、または自ら生み出して、それらを実現するために研究開発を長期間粘り強く継続してきた歴史があった。

1970年代、わが国の自動車産業界では高度経済成長を社会背景として、クルマに搭載した内燃機関から生じる有害な排気ガス問題を抱えていた。また女性ドライバーの増加により、イーゼードライブ化したクルマの実用化開発は急務であった。その当時の日本市場において主流な自動車用変速機は手動変速機(MT: Manual Transmission)であり、米国市場で主流であった自動変速機(AT: Automatic Transmission)は日本市場では主に大型高級車クラスのみを採用されていた。

このような背景から、連続可変変速機能によって内燃機関を理想的な運転状態に制御することで排気性能や燃費性能の改善を可能とし、さらにはシームレスで連続的な優しい変速によるクルマのイーゼードライブ化を実現する理想の自動変速機として、無段変速機(CVT: Continuously Variable Transmission)の実用化は注目されていた。

ここで移動手段の歴史として馬車からクルマへの技術的移行を振り返ってみると、1886年にダイムラー(Daimler)社から発表された内燃機関式自動車に初めて手動変速機が登場した。1886年以前、1884年に既に電気自動車は発表され、さらにその前の1769年に蒸気自動車は発明されたが、それらのクルマに変速機は必要とされていなかった。つまり変速機は、1886年以降のクルマにおける内燃機関にとって決して手放せない重要な動力伝達機構として位置づけられる。

世界初の自動車用無段変速機としては、1897年に米国リーベス・モーター・カンパニー(Reeves Motor Company)からReeves CVT Transmissionが発表された。この無段変速機に使用されたベルトは皮とゴムのバンドに木製のブロックをボルトで締結した構成であり、その材料強度に基づく耐久性不足を技術的要因として、増大する内燃機関からの出力トルクに対応できず、市場から消えて行った。一方で、手動変速機が世界で初めてクルマに採用された1886年のわずか11年後である1897年に米国で無段変速機を搭載したクルマが実用化されたという事実は、クルマづくりにおいて、今から約130年前から既に連続可変変速機構の技術的な価値が認められていたことを意味する。

1958年には乾式ゴムVベルト式無段変速機を搭載したクルマがオランダで実用化され、1970年代までの間にこの無段変速機用乾式Vベルトは約90万本生産された。このことは無段変速機を搭載した量産乗用車時代の幕開けといえる。

1960年代から無段変速機によるクルマの動力性能は高く評価され、フォーミュラカーやラリー車に搭載された。しかし乾式ゴムVベルトの伝達トルク容量の制約という技術的な要因により、乾式ゴムVベルト式無段変速機の適用範囲が内燃機関排気量約0.8Lまでであったことから、これを搭載したクルマの生産はその後を終了となった。無段変速機にとって伝達トルク容量不足は避けられない二度目の大きな技術的課題として残ったのであった。

1970年代に入り、オランダのファン・ドールネ・トランスミッシー(Van Doorne's Transmissie b.v.)によって金属Vベルトの基礎研究、実用化開発及び生産準備が進み、1987年に世界初の金属Vベルト式無段変速機であるECVTを搭載したクルマの量産が富士重工株式会社(現株式会社SUBARU)から開始された。このECVTをベンチマークとして、各自動車メーカーと各変速機メーカーによる無段変速機の開発は黎明期から加速期へと進んでいった。

1997年からの加速期に入ると、米国発祥の遊星歯車式自動変速機との置き換えを前提とする無段変速機が登場した。入力トルク容量は内燃機関の排気量2.0Lまで増大し、発進要素として無段変速機では初めてトルクコンバーターが採用された。クルマの電子制御化が進むなかで、無段変速機のフル電子制御化が定着していく時期でもあった。

こうして、内燃機関の電動スロットル弁制御と無段変速機の電子変速制御との相乗効果によりタイヤの駆動力

制御や制動力制御をきめ細かく実現するユニット、Hyper CVT(日産自動車株式会社開発)は誕生した。回転エネルギーを発生する内燃機関とそのエネルギーを路面との間で伝えるタイヤの間に配置される無段変速機は、この時期からクルマにおける運動エネルギーを制御する司令塔として評価されるようになった。クルマの電動化に対応する無段変速機の開発は進み、いよいよ無段変速機は本格的に自動変速機と置き換わる道を開拓していった。

2000年代に入ると欧州発祥のデュアルクラッチ式変速機(DCT: Dual Clutch Transmission)が登場した。無段変速機にとっては後発ユニットであったが、手動変速機ベースの平行軸歯車列によって構成する変速機のため、変速段数や変速比幅の拡大には有利なユニットとして無段変速機と競合する自動変速機となった。また金属Vベルトとプーリー間で動力を伝達する金属間摩擦伝動を基盤とする無段変速機は、歯車の噛み合い伝動で動力を伝達する遊星歯車式自動変速機やデュアルクラッチ式変速機と比較して、伝達効率上、不利な部分を持っていた。こうして無段変速機は米国発祥の遊星歯車式自動変速機や欧州発祥のデュアルクラッチ式変速機との商品力競争を繰り広げていった。

2007年からの発展期では、金属Vベルト式無段変速機において、歯車機構を活用して動力伝達系を構成する副変速式が次々と登場した。この歯車機構活用法は変速比幅の拡大にのみでなく伝達効率の向上やトルク容量の増大にも貢献した。一方で歯車機構を活用しないスタンダード式無段変速機では、トルク容量増大のために金属Vベルトに代わってVチェーンの実用化が拡大した。

2009年、わが国の無段変速機においてVチェーンが実用化されて以降、無段変速機のトルク容量は内燃機関排気量3.8 Lクラスの380 Nmまで増大され、無段変速機の年間生産台数は約1,000万台となり、自動変速機としての市民権を得たのである。

2017年からの成熟期では、無段変速機の伝達トルク及び変速比幅は遊星歯車式自動変速機やデュアルクラッチ式変速機と同等の競争力を持ち、2021年にはクルマの燃費計測走行モードでの平均伝達効率は90%を達成した。

このように、1987年から現在に至るまでの約40年間にわたる継続した実用化に向けた開発により、わが国の自動車産業界が育てた新たな自動変速機として、今日無段変速機は世界中の市場に普及している。

なお本調査ではVベルト式無段変速機及びVチェーン式無段変速機を調査範囲とし、1社のみに採用されたトロイダル式無段変速機は調査対象外とした。

現在、世界の自動車産業界は100年に一度の大変革期であり、クルマの電動化は急ピッチで進み、内燃機関の重要なパートナーとしての無段変速機は大きな節目を迎えている。精密機械部品と高度な制御技術で構成され、車両との複雑な協調制御開発で培ったこの無段変速機の多岐にわたる技術は、今後も電動モーター、発電機、減速機、増速機、インバーターやバッテリー熱マネージメントの技術開発に活かされることであろう。

■ Abstract

In their pursuit of continuously realizing better automobiles, engineers in Japan's automotive industry have relentlessly advanced the diverse technologies underpinning vehicle materials, components, and units. This evolution has been characterized by a persistent history of engineers seeking out seeds of innovation from across the globe, or cultivating their own, and nurturing them through long-term, steadfast research and development to bring these technologies to maturity.

In the 1970s, propelled by rapid economic growth, Japan's automotive industry grappled with the problem of harmful exhaust emissions from automotive internal combustion engines. Concurrently, the rise in female drivers made the development of easier-to-drive vehicles an urgent necessity. In the Japanese market of that era, manual transmissions (MT) were the mainstream choice for automotive gearboxes. Automatic transmissions (AT), while dominant in the US market, were found in Japan primarily on large luxury-class vehicles.

Against this backdrop, the practical implementation of the Continuously Variable Transmission (CVT) gained significant attention as the ideal automatic transmission. By maintaining the internal combustion engine in an optimal operating state via its continuously variable gear ratios, the CVT promised improvements in both emissions and fuel economy. Furthermore, it offered the prospect of easier driving through seamless, uninterrupted gear shifts.

Reflecting on the technological transition from horse-drawn carriages to automobiles, the first manual transmission appeared in 1886 on an internal combustion engine vehicle introduced by Daimler. Prior to that, electric vehicles had been unveiled in 1884, and steam-powered vehicles invented as early as 1769. Crucially, neither of these earlier forms required a transmission. This history underscores that, from 1886 onward, the transmission established itself as an essential and indispensable power transmission mechanism specifically for the internal combustion engine automobile.

The world's first automotive continuously variable transmission was the Reeves CVT, announced in 1897 by the US-based Reeves Motor Company. This CVT employed a belt constructed from a leather-and-rubber band, with wooden blocks fastened by bolts. Owing to inadequate durability, a limitation inherent in its material strength, this design could not withstand the increasing output torque of internal combustion engines and eventually vanished from the market. Yet, the very fact that a CVT-equipped vehicle was commercialized in the United States in 1897, a mere 11 years after the manual transmission's automotive debut in 1886, demonstrates that the technical merit of continuously variable shifting was already acknowledged in vehicle manufacturing approximately 130 years ago.

In 1958, a vehicle fitted with a dry rubber V-belt CVT was commercialized in the Netherlands. By the 1970s, approximately 900,000 of these CVT-specific dry V-belts had been manufactured. This milestone marks the dawn of the mass-production era for passenger cars equipped with continuously variable transmissions.

From the 1960s onward, the dynamic performance afforded by continuously variable transmissions was highly valued, leading to their adoption in formula and rally cars. However, constrained by the inherent torque capacity limits of the dry rubber V-belt, this type of CVT was only applicable to internal combustion engines with displacements up to approximately 0.8 liters. Consequently, vehicle production featuring these units eventually ceased. For CVT technology, the issue of insufficient torque capacity thus persisted as the second major, and seemingly unavoidable, technical hurdle.

In the 1970s, Van Doorne's Transmissie b.v. of the Netherlands made significant strides in the fundamental research, practical development, and production preparation for a metal V-belt. This groundwork culminated in 1987 when Fuji Heavy Industries, Ltd. (now Subaru Corporation) commenced mass production of vehicles equipped with the ECVT; the world's first practical automotive metal V-belt CVT. Serving as a critical benchmark, the ECVT propelled CVT development by automakers and transmission suppliers from a nascent, experimental phase into a period of intense and rapid advancement.

Upon entering an accelerated phase of development starting in 1997, a new type of continuously variable transmission emerged, conceived from the outset as a replacement for the US-originated planetary-gear automatic transmission. These CVTs featured an increased torque capacity suitable for engines up to

2.0 liters in displacement and, in a first for the technology, incorporated a torque converter as the launch element. This era also coincided with the full integration of electronic control for CVTs, mirroring the broader trend toward vehicle-wide electronic management systems.

Thus, the synergistic combination of electronic throttle control for the internal combustion engine and electronic shift control for the CVT enabled the precise, nuanced management of tire driving and braking force. This gave rise to the Hyper CVT, developed by Nissan Motor Co., Ltd. Situated between the rotational energy of the engine and the driving force at the tires, the CVT began to be regarded from this period onward as the central command unit for managing the vehicle's kinetic energy. With the advancement of CVTs designed for automotive electrification, the technology was poised to chart a definitive course toward supplanting conventional automatic transmissions altogether.

The 2000s saw the emergence of the dual-clutch transmission (DCT), a technology with European origins. Although a later entrant than the CVT, the DCT's construction, based on the parallel-shaft gear train of a manual transmission, gave it inherent advantages for increasing the number of discrete gear ratios and widening the overall ratio spread, positioning it as a direct competitor. Furthermore, CVTs, which rely on metal-to-metal frictional contact between a belt and pulleys for power transfer, suffered from a comparative disadvantage in drivetrain efficiency against both planetary-gear automatics and DCTs, which utilize the positive engagement of meshing gears. Thus, CVTs found themselves engaged in a three-way battle for market supremacy against the established US-born planetary automatic and the newer European DCT.

From 2007 onward, a period of further development saw the successive introduction of compound CVT designs. These systems incorporated a supplementary gearset into the metal V-belt drivetrain. This integration of gearing contributed not only to a wider overall ratio spread but also to enhanced transmission efficiency and greater torque capacity. In parallel, for conventional (non-geared) CVT designs, the practical adoption of V-chains expanded as a replacement for metal V-belts, primarily to achieve higher torque capacity.

Following the successful implementation of the V-chain in Japanese CVTs in 2009, torque capacity expanded to 380 Nm, making it suitable for engines in the 3.8-liter class. Annual production volume subsequently reached approximately 10 million units, solidifying the CVT's status as a fully established and legitimate automatic transmission technology.

Entering a phase of maturity from 2017 onward, CVTs attained parity with planetary-gear automatics and dual-clutch transmissions in both torque-handling capacity and overall ratio spread. A landmark was reached in 2021 when the average drivetrain efficiency of CVTs, measured under standardized fuel economy test cycles, achieved 90%.

In this way, through roughly forty years of sustained development for practical application, spanning from 1987 to the present, the continuously variable transmission, cultivated by Japan's automotive industry as a novel automatic transmission technology, has achieved global market proliferation.

This systematic survey is limited to V-belt and V-chain type continuously variable transmissions. The toroidal CVT, adopted by only a single manufacturer, falls outside its scope.

The global automotive industry is now navigating a once-in-a-century transformation. With vehicle electrification advancing at a rapid pace, the CVT, long an indispensable partner to the internal combustion engine, has reached a critical inflection point. The diverse technologies inherent in CVTs, which integrate precision mechanical components with sophisticated control systems and were honed through complex vehicle integration, will undoubtedly find new applications. They are poised to contribute to the ongoing development of key electrification components such as electric motors, generators, reduction gears, power electronics (inverters), and battery thermal management systems.

■ Profile

安保 佳寿 *Keiju Abo*

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 早稲田大学理工学部機械工学科卒業
日産自動車株式会社中央研究所にて、CVTの研究に従事
1989年 米国Nissan R&D, Inc. にて、駆動系・シャシ系の技術
調査、技術企画、産学連携に従事
1995年 日産自動車株式会社テクニカルセンターにて、CVT実
用化開発に従事
2002年 ジャトコ株式会社にて、CVT実用化開発、商品企画に
従事
2015年 シェフラー ジャパン株式会社R&Dセンターにて、変速
機部門担当
2021年 安保技術士事務所開設
株式会社アイキテック技術顧問
2025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	116
2. 自動車用の変速機	118
3. わが国の無段変速機	135
4. 無段変速機の発達を支えた部品技術	161
5. 無段変速機の発達を支えた制御技術	195
6. 海外の無段変速機	215
7. 無段変速機の将来展望	219
8. おわりに	223

電力用遮断器および開閉装置の系統化調査

Comprehensive Survey on the History of High Voltage Circuit Breakers and Switchgear

伊藤 弘基 Hiroki Ito

■要旨

電力分野においては、これまで発電機(2005年、2006年)、変圧器(2004年)、系統技術(2020年)などの系統化調査が実施されてきた。今回の調査対象は、発電された電気を工場や家庭に安定的に供給する電力系統において、電力供給の信頼性を支える基盤機器である開閉機器である。

開閉機器の代表である遮断器は、電力系統の回路に接続され、電流を遮断して回路を絶縁状態にする、あるいは通電して導通状態に戻すという、回路状態を導体から絶縁体へ、絶縁体から導体へと切り替えるスイッチ機能を担う。この機能を実現するために、水、油、空気、真空、SF₆(六フッ化硫黄)など、さまざまな媒体が採用され、電力系統の高電圧・大容量化の要求に応えてきた。技術の進歩に伴い、遮断器の外観や構造も大きく変化してきた。

以下に、本報で詳説する遮断技術に関する主な技術進歩をまとめる。

- 1900年
英国で水遮断器が開発され、ドイツでは10～60 kV-1500 MVA級の製品が製造された。
- 1900～1910年
並切型油入遮断器が普及し、交流電力供給網の拡大に大きく寄与。
- 1930～1960年
油遮断器の技術は進化を続け、定格345 kV-63 kAまで高性能化。これらの技術成果は後の空気遮断器やガス遮断器の性能向上にも活かされた。
- 1950～1960年
空気遮断器は36～735 kVの多重切形でシリーズ化され、性能面で油遮断器を凌駕した。
- 1950年代後半
米国でガス遮断器が実用化され、二重圧力式から単一圧力式へと進化し、小型化と高信頼性を実現。
- 1960年以降
ガス絶縁開閉装置(GIS)が登場し、電力会社とメーカーの協力により、日本が世界の開発をリードする製品となった。GISは変電所のコンパクト化と信頼性向上に大きく貢献。

ガス遮断器全盛の時代を歩んできた著者にとって、油遮断器や空気遮断器開発史、それらの技術革新の節目を体系的に調査する機会を得られたことは極めて意義深いものであった。油遮断器の高性能化の過程において、消弧室の発明やダブルフロー方式など、現在のガス遮断器にも受け継がれている重要な技術がすでに考案されていた事実、改めて深い感銘を受けた。先達の功績を学ぶことの重要性を、強く再認識した次第である。

本調査では、遮断器の技術的変遷を概観するとともに、日本が欧米から消弧室構造、ガス吹付方式、多重切構成などの技術を学びつつ、次第に自主技術確立し、ガス遮断器およびガス絶縁開閉装置(GIS)の開発によって世界をリードする高信頼性を実現してきた過程について報告する。

■ Abstract

The National Museum of Nature and Science has previously conducted comprehensive surveys on power generators (2005, 2006), power transformers (2004), and power system technologies (2020) within the domain of electric power systems. The present study extends this series by focusing on circuit breakers and switching devices, which are indispensable for ensuring the stable transmission and distribution of electricity from generation sources to industrial facilities and households.

Circuit breakers are critical components in power systems, alternating the circuit between conductive and insulating states to interrupt or restore current flow. To fulfil these roles, various interrupting media, including water, oil, air, vacuum, and sulphur hexafluoride (SF₆), have been employed to accommodate the increasing demands for higher operating voltages and greater interrupting capacities. Continuous technological advancements have driven profound transformations in both the external configuration and internal architecture of circuit breakers, reflecting continuous innovation in response to evolving system requirements.

The evolution of circuit breaker technology has been marked by several significant milestones:

- 1900
Water circuit breakers were first introduced in the United Kingdom, with products rated at 10-60 kV and 1500 MVA subsequently manufactured in Germany.
- 1900-1910
Oil circuit breakers gained widespread adoption, playing a pivotal role in the expansion of alternating current (AC) power supply networks.
- 1930-1960
Oil circuit breaker technology advanced considerably, achieving ratings up to 345 kV-63 kA. These advancements also influenced the performance improvements of later air and gas circuit breakers.
- 1950-1960
Air circuit breakers were standardized in multi-break configurations for voltages ranging from 36 to 735 kV, surpassing oil circuit breakers in both performance and reliability.
- Late 1950s
Gas circuit breakers were put into practical use in the United States, evolving from the double-pressure type to the single-pressure type, thereby achieving greater compactness and enhanced operational reliability.
- After 1960s
Gas insulated switchgear (GIS) emerged as a transformative technology. Japan assumed a leading role in global development through close collaboration between utilities and manufacturers, significantly contributing to the compactness and reliability of high-voltage substations.

For the author, who experienced the era dominated by gas circuit breakers, the opportunity to explore the historical development of oil and air circuit breakers and the associated milestones of technological innovation was of great significance. A particularly noteworthy observation was the rediscovery that, during efforts to enhance the performance of classical oil circuit breakers, fundamental concepts such as the arc-extinguishing chamber and the double-flow method had already been conceived. These principles remain integral to the design of modern gas circuit breakers, underscoring the enduring relevance of early innovations and the importance of learning from the achievements of our predecessors.

This survey provides a comprehensive overview of the technological evolution of circuit breakers and examines how Japan, while initially adopting Europe and the United States in areas such as arc-extinguishing chamber design, gas-blast techniques, and multi-break configurations, progressively established its own technological foundations. Through these advancements, Japan ultimately achieved world-leading reliability with the development of gas circuit breakers and gas insulated switchgear.

■ Profile

伊藤 弘基 *Hiroki Ito*

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

1984年3月 東京工業大学理工学研究科修士課程修了
1984年4月 三菱電機株式会社入社、遮断器等の技術開発に従事
1989年9月～1991年2月 米国イリノイ大学総合科学研究所研究員
1995年1月 東京工業大学工学博士
2005年5月～2012年3月 三菱電機株式会社 系統変電システム
製作所 技術開発部部长、高電圧・大電力試験所所長
2012年4月 三菱電機株式会社 電力・産業システム事業部 技師長
2018年4月 三菱電機株式会社 技術顧問

2004年8月～2012年8月 CIGRE国際大電力システム会議SCA3
送配電機器研究会国内委員長
2012年8月～2018年8月 CIGRE国際大電力システム会議SCA3
送配電機器研究会本部委員長
2022年7月～ CIGRE送配電機器に関する第四回信頼性調査 主査
2025年4月 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. 電気を送る	232
2. 電気を切る	242
3. 電気を守る	275
4. 直流を切る	298
5. おわりに	312
6. 謝辞	321

早期地震警報システムの系統化調査

Historical Survey on Earthquake Early Warning System

中村 豊 Yutaka Nakamura

佐藤 勉 Tsutomu Sato

齋田 淳 Jun Saita

■要旨

大きな地震が発生するとすぐにテレビやスマートフォン等で通知される緊急地震速報は、早期地震警報システムの一つである。2007年に一般提供が開始された緊急地震速報であるが、そのアイデアは1868年のサンフランシスコの医師の構想まで遡る。この構想は、地震波と電気通信の伝播速度差を利用して、震源近くで地震を検知し遠く離れた都市（サンフランシスコ）にいち早く伝えるというものであったが、当時の技術では実現できなかった。

それから約100年後、日本においても「10秒前大地震警報システム」という構想が発表される。相模湾内に地震計を設置することで、東京地方に大きな揺れが襲う前に警報を行うというものであった。しかし、これも実用には至らなかった。

この構想に関心を強く持った国鉄は、地震時の不測の事態に対応するためのシステムとして、1970年代から早期地震警報システムに関する研究・開発を始めた。まずは、震源近くに地震計を設置し、地震を検知・警報を行うシステムを東北新幹線へ整備した。その後、より迅速かつ的確な地震警報を求め、地震の初期微動（P波）から地震諸元を推定して、地震の大きさと震央距離の関係から想定される地震被害に基づく地震警報を発令する早期地震検知警報システム「ユレダス」を開発する。1992年に東海道新幹線「のぞみ」の開業と共に運用が開始されたユレダスは、P波初動で地震警報を発令する世界で初めて実用化された早期地震警報システムである。

ユレダスの実用化以降は、1995年の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）や2004年の新潟県中越地震などを経験して開発された新たな早期地震警報システムも生まれている。また2007年には、これまで列車の運行制御などに限定的に利用されていた早期地震警報システムが緊急地震速報として一般の人々にも提供され、地震防災への関心の向上にも資することとなった。

海外に目を向けると、早期地震警報システムは1990年代にメキシコや米国で実用化され、その後、複数の国や地域においても来るべき地震に備えて開発が進んでいる。さらに巨大IT企業によるサービスが瞬く間に世界中に展開され、早期地震警報システムが広まっていった。

本系統化調査では、早期地震警報システムがどのようにして生まれ、そして発展してきたのか、その歴史を辿る。特に、世界で初めて実用化された早期地震警報システム「ユレダス」の誕生までの経緯やその背景にある思想、そしてその後の展開を中心に詳述するとともに、地震計や地震観測、地震そのものに関する研究の歴史などについても概括する。

■ Abstract

Earthquake Early Warning System, which is delivered via television, smartphones, and other media immediately after the occurrence of a large earthquake, constitute one form of a system to issue earthquake early warning. Although public dissemination of Earthquake Early Warning Issued by the Japan Meteorological Agency (JMA) began in 2007, the underlying concept dates back as far as an idea proposed in 1868 by a medical doctor in San Francisco. This concept sought to exploit the difference between the propagation speed of seismic waves and that of electrical communication by detecting earthquakes near the epicenter and rapidly transmitting warnings to the distant city of San Francisco. However, the technology available at the time was insufficient to realize this concept.

Approximately 100 years later, a similar concept known as 'A Plan for Strong Earthquake Alarm System 10 Seconds before it Attacks the City of Tokyo' was proposed in Japan. This plan aimed to issue warnings before strong ground motion reached the Tokyo metropolitan area by installing seismometers in Sagami Bay. However, this plan, too, never progressed to a practical stage.

Strongly intrigued by this concept, Japanese National Railways (JNR) initiated research and development on an Earthquake Early Warning System in the 1970s to manage unforeseen events during earthquakes. First, mirroring the earlier concept, a system was deployed on the Tohoku Shinkansen that used seismometers installed near potential epicenters to detect tremors and issue warnings. Subsequently, to enable faster and more precise alerts, JNR developed the UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System). This advanced system estimates seismic parameters from the primary wave (P-wave) and issues warnings based on expected damage, calculated from the relationship between an earthquake's magnitude and its distance from the epicenter. Launched in 1992 alongside the debut of the Nozomi service on the Tokaido Shinkansen, UrEDAS was the world's first operational Earthquake Early Warning System to issue alarms triggered by the initial detection of P-waves.

The successful implementation of UrEDAS was followed by the development of new Earthquake Early Warning Systems, informed by the experiences of major disasters such as the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake (Great Hanshin-Awaji Earthquake) and the 2004 Mid Niigata prefecture Earthquake. Then, in 2007, an Earthquake Early Warning System, which had been utilized mainly for railway operation control, was launched for public use as the Earthquake Early Warning Issued by JMA. This shift played a significant role in raising public awareness and engagement with earthquake disaster prevention.

Looking abroad, Earthquake Early Warning Systems were first implemented practically in Mexico and the United States during the 1990s. Development has since progressed in numerous other countries and regions in anticipation of major seismic events. Furthermore, a service rolled out by global technology giant has expanded worldwide, rapidly accelerating the global adoption of these Early Warning Systems.

This historical survey traces how Earthquake Early Warning Systems emerged and evolved over time. In particular, it focuses on the circumstances leading to the birth of UrEDAS, the world's first practically implemented Earthquake Early Warning System, the underlying concepts and philosophies that shaped its development, and its subsequent evolution. This survey also provides an overview of the history of research related to seismometers, seismic observation, and earthquakes proper.

■ Profile

中村 豊 Yutaka Nakamura

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

1977年 東京大学大学院工学系研究科土木工学専門博士課程 修了
工学博士
東京大学生産技術研究所 入所
1978年 東京大学生産技術研究所 退所
日本国有鉄道公社鉄道技術研究所(後に財団法人鉄道
総合技術研究所) 入所
早期地震警報システムなど地震防災に関する研究開発
に従事
地震防災研究室長, ユレダス開発推進部長を歴任
1997年 財団法人鉄道総合技術研究所(現 公益財団法人鉄道総合
技術研究所) 退所
株式会社システムアンドデータリサーチ 代表取締役就任
2006年 東京工業大学(現 東京科学大学)
大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 連携教授
就任
2012年 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム
専攻 連携教授 退任
2025年 株式会社システムアンドデータリサーチ 取締役会長就任
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
急逝(2025年7月)

佐藤 勉 Tsutomu Sato

1999年 東北工業大学大学院工学研究科土木工学専攻博士
課程前期 修了
修士(工学)
2025年現在 株式会社システムアンドデータリサーチ 代表取締役

齋田 淳 Jun Saita

1991年 早稲田大学理工学部土木工学科 卒業
2025年現在 株式会社システムアンドデータリサーチ 常務取締役

■ Contents

1. はじめに	332
2. 地震観測・強震観測の歴史	334
3. 地震学から地震防災への発展と 早期地震警報システムへの道のり	367
4. 早期地震警報システムの開発とその進化	383
5. 現在稼働中の主な早期地震警報システム	404
6. おわりに	437
謝辞	439