

# 1 透過型電子顕微鏡技術発展の系統化調査

## A Systematic Survey of the Technical Development of Transmission Electron Microscopes

小島 建治  
Kenji Kojima

### ■ 要旨

電子顕微鏡は肉眼で見えない小さなものを拡大して観察が出来る機械である。電子の性質を利用して、物体を観察する方法は 3 通りあり、それぞれの方法により透過型電子顕微鏡、走査型電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡と言われるが、本報告書では、透過型電子顕微鏡について技術発展の系統化を試みた。

19 世紀の後半に光学顕微鏡の性能が限界まで到達し、この結果、疫病の原因となる病原菌が特定されて疾病に対して、充分の対応策が取れるようになった。しかし、20 世紀の初頭のスペイン風邪等の原因となるウイルスの脅威を取り除くためにはウイルスを特定する必要があったが、ウイルスの大きさは光学顕微鏡で見える限界を越えていた。光学顕微鏡の限界をこえて像の観察が可能な顕微鏡として電子の波としての性質を利用する電子顕微鏡の開発が期待された。

最初の電子顕微鏡はドイツのルスカ等によって 1932 年に試作された。そしてその 7 年後の 1939 年にシーメンス社で商用機が完成し、光学顕微鏡では見えない大きさのウイルスの観察に成功した。当時、電子線で生物を観察することは難しく、光学顕微鏡にかわって電子顕微鏡になると予想するのは少数派であった。だが病気の原因であるウイルスの観察の成功により電子顕微鏡の有用性が一気に高まった。

日本の電子顕微鏡の開発は、海外からの機械の導入ではなく、書籍からの知識の導入や見聞による知見から独自に装置を開発するところから始まった。当時は、電力網構築と安定供給が国家的な課題で、このため日本の留学生がドイツに派遣されていた。これらの帰国留学生が電子顕微鏡の開発の中心となり、1937 年に日本の国家的な事業として開発が推進された。日本では戦後、すぐに国産の商用機が 5 社により供給された。日本国内の市場は大きくなかったが、電子顕微鏡に関連する研究者が多く、1950 年代に 250 台を越える装置が稼動し、技術的なレベルがあがるとともに、装置も電子回折が出来るという特徴が評価されて 1955 年には海外への輸出が始まった。また、この当時に装置は生物の組織や形状を観察するために必要な分解能が得られるまで進歩した。しかし日立と日本電子は、原子 1 個が見えるだけの分解能を持つ性能の電子顕微鏡を目指して技術開発を推進した。このような高分解能化により得られる電子顕微鏡像は結晶格子が見えることを必要とした金属や非金属等の材料の解析に有効であった。1970 年代に入り、生物学の中心が DNA の発見から分子生物学に移行し、電子顕微鏡の重要度が減少する一方で、材料の開発やデバイスの開発では電子顕微鏡の必要性が増してきたため、高分解能の装置の開発を推進した日本（日立と日本電子）の電子顕微鏡が世界の市場を押さえることが可能となった。

1970 年代には先進国は高度大衆化社会になり、自動車や電気製品等の開発や量産化が加速されたが、これらの物品の品質向上には材料の品質向上が不可欠であった。このため物質評価技術として物理分析や化学分析が重要性を増した。このような背景から、既に電子顕微鏡の基本的な電子光学系のレンズやステージの技術が蓄積されていたこともあって、今まで透過型電子顕微鏡で利用していた電子線が試料に照射される時に発生する透過電子以外の 2 次電子や特性 X 線を活用して分析機器として利用されるようになった。1980 年代には主力の装置は生物用と材料用に区分されるとともに、他の分析手法にない特徴を利用して、汎用に利用される機種以外に、超高真空電子顕微鏡、電子干渉型（ホログラフィー）電子顕微鏡、超高压電子顕微鏡、極低温電子顕微鏡等が開発されている。

現在でも、日本の電子顕微鏡は世界のトップをはしっている。日立、日本電子の機器製造メーカーと共に、世界のトップの研究のツールとして電子顕微鏡を積極的に活用する大学と世界のトップを行く高機能、高品質の素材を供給する素材メーカー、高機能部品を供給する部品メーカー、半導体等のデバイスメーカー等で生まれるコストパフォーマンスのよい製品を供給する産業の恩恵も大きい。今後は、21 世紀に実用化が期待されるナノテクノロジーやバイオテクノロジーの研究用に開発される電子顕微鏡の技術が次世代の汎用電子顕微鏡の技術となって社会に貢献することが期待される。

## ■ Abstract

The electron microscope is a equipment that enables small things that cannot be seen with the naked eye to be magnified and observed. There are three main types of electron microscopes each named for the method it uses for observing objects using the properties of electrons. These are the transmission electron microscope, scanning electron microscope, and scanning probe microscope. In this report, we focus on the transmission electron microscope and endeavor to present a systematic survey of its technical development.

The performance of optical microscopes reached their limit in the latter half of the 19th century enabling disease-causing bacteria that play a role in epidemics to be identified and sufficient countermeasures to be taken. Then, in the early years of the 20th century, the need arose to identify viruses to eliminate the threat caused by virus strains that give rise to devastating diseases such as the Spanish flu, but the small size of viruses exceeded the limits of optical microscopes. The development of an electron microscope, which could exploit the wave properties of electrons to enable objects that exceed the limits of optical microscope to be observed, was therefore anticipated.

The first electron microscope was built by the Ernst Ruska, a German physicist, in 1932. Seven years later, in 1939, a commercial version was completed by Siemens AG that was used to observe viruses that could not be seen with optical microscopes. Before this success, the observation of living organisms by electron beams was difficult, and only a small minority of people expected electron microscopes to become a substitute for optical microscopes. This successful observation of disease-causing viruses, however, immediately raised the usefulness of electron microscopes.

The development of electron microscopes in Japan started not with the introduction of machines from overseas but rather with the development of original equipment based on knowledge obtained from books and publications or from actual experiences. At that time, the construction of a power network and stable supply of power were national issues, and Japanese students were dispatched to Germany for this reason. On returning, however, these students came to focus their research efforts on the development of electron microscopes, and in 1937, the development of electron microscopes began in Japan as a national project. Soon after the war, domestically produced commercial electron microscopes came to be supplied by five companies. While the commercial market in Japan was not very large at this time, there were many researchers whose work could benefit from electron microscopy. More than 250 units came into operation in the 1950s, and their export to overseas markets began in 1955 as Japanese-manufactured electron microscopes came to be recognized for their high technical level and electron-diffraction capability. Progress was also made at this time in increasing resolution so that electron-microscope equipment could observe the formation and shape of living organisms. Nevertheless, the aim of Hitachi and JEOL was to develop technology that would raise the performance of an electron microscope to a level of resolution at which a single atom could be observed. The images that could be obtained by an electron microscope with such high resolution would prove useful in analyzing metallic and non-metallic materials, which was necessary to observe crystal lattices. On entering the 1970s, the focus of biology came to shift from the discovery of DNA to molecular biology, and the importance of electron microscopes in this field started to decline. At the same time, the need for electron microscopes in the development of new materials and devices increased. As a result, electron microscopes from Japan (Hitachi and JEOL), which had promoted the development of high-resolution equipment, were able to occupy a major portion of the world market.

In the 1970s, developed nations turned into mass consumption societies as the development and mass production of automobiles and electrical appliances accelerated, and it came to be realized that improving the quality of these articles could not be achieved without improving the quality of constituent materials. The importance of physical analysis and chemical analysis as material-evaluation technologies increased as a result. Against this background, and considering that the industry in Japan had already accumulated basic electron-microscope technologies involving the electron optical lens, stage, and other components, it was found that secondary electrons and characteristic X-rays could be used in addition to transmitted electrons that occur when irradiating a sample with an electron beam as traditionally used in transmission electron microscopes. This capability meant that electron microscopes could also be used as analysis equipment. In the 1980s, key equipment came to be divided into those for biological use and those for materials use, and in addition to general-purpose equipment, there also came to be developed equipment with special features not found in other analysis techniques. This equipment included ultra-high-vacuum electron microscopes, electron-interference (holographic) electron microscopes, ultra-high-voltage electron microscopes, and extremely-low-temperature electron microscopes.

Today, as well, electron microscopes manufactured in Japan occupy a leading position in the world. They provide great benefit not only to Hitachi and JEOL as electron-microscope manufacturers but also to universities that actively use their electron microscopes as world-leading research tools. And by enabling materials manufacturers to supply high-function, high-quality world-leading materials, component manufacturers to supply high-function components, and semiconductor device manufacturers to supply products with exceptional cost performance, electron microscopes are benefiting industry in a big way. In the years to come, electron-microscope technology will be developed for research in such advanced fields as nanotechnology and biotechnology that are expected to reach a practical stage in the 21st century. We can expect this technology to become the basis for next-generation, general-purpose electron microscopes and to make a significant contribution to society.

## ■ Contents

|  |    |
|--|----|
| 1. はじめに                                | 3  |
| 2. 現代科学の確立と透過型電子顕微鏡の発明                 | 4  |
| 3. 透過型電子顕微鏡の開発の黎明期                     | 12 |
| 4. 透過型電子顕微鏡の性能向上と機能拡大<br>— 科学機器から分析機器へ | 19 |
| 5. 透過型電子顕微鏡の技術進歩と社会への貢献                | 34 |
| 6. まとめと考察                              | 39 |
| 付属資料                                   | 43 |

# 2 アミノ酸発酵技術の系統化調査

Systematic Survey of the Technical Development of Fermentative Production of Amino acids

中森 茂  
Shigeru Nakamori

## ■ 要旨

アミノ酸はタンパク質の構成成分で、20 種あり、様々な生物学的あるいは化学的な機能が見出され、うま味調味料、医薬品、サプリメント、飼料添加物、化成品、化粧品など、多くの用途で活用されている。これらのアミノ酸は現在、タンパク質の加水分解法、化学合成法、発酵法で生産されているが、中心は発酵法である。この発酵法、つまり微生物を活用してアミノ酸を生産するアミノ酸発酵は、日本で生まれ、進歩をとげ、今や世界のアミノ酸市場の過半を生産する技術となった。本報告では、アミノ酸発酵の技術を系統化し、現在までの歴史を辿り、さらに今後の技術的な展開を展望した。

アミノ酸の中で世界で初めて商品化されたのはグルタミン酸ナトリウムである。明治 41 年 (1908 年)、池田菊苗によって、小麦のタンパク質、グルテンから製造する方法が発明され、鈴木三郎助によってうま味調味料 (「味の素」) として発売された。この事業は多くの苦難を克服して成功したが、原料の確保と、高温の塩酸を使用するため、技術的には改良の必要があった。改良は化学合成と発酵の二つのアプローチから行われた。化学合成法によるグルタミン酸製法が確立され、工場での実生産も行われたが、合成法によるグルタミン酸は消費者には受け入れられなかった。一方、新しいグルタミン酸生産菌 (*Corynebacterium glutamicum*) が協和発酵で見られ、初めて発酵法による生産に成功した。アミノ酸発酵の特徴は、グルコースなど安価な原料から、穏和な条件の反応で天然型のアミノ酸が作れることである。グルタミン酸に続いて、リジン、アスパラギン酸、スレオニンなど、15 余品目のアミノ酸が発酵法で生産されている。アミノ酸発酵の技術は世界的に拡大され、アミノ酸生産量は増加の傾向をたどっている。中でもグルタミン酸ナトリウムは 2005 年には世界で 170 万トンになり、なお年率 3 ~ 4% の増加が見込まれている。

アミノ酸発酵技術は、生産菌の育種、大量培養法、分離精製、およびエンジニアリングの 4 つの要素から構成されているが、この中で、基本をなすのが生産菌株の育種である。微生物の菌体内では、アミノ酸のような代謝物の生産を調節するメカニズム、つまり代謝制御が働いている。したがって、アミノ酸生産菌の育種とは、代謝制御を克服するための、生化学や遺伝学、あるいは新しい遺伝子工学などの科学の応用技術である。

代謝制御の打破・克服は、具体的には以下のような方法で達成された。グルタミン酸発酵は、*C. glutamicum* の特性に対応した培養法を確立することによって確立された。リジンやオルニチン発酵は、代謝制御作用のあるスレオニン、あるいはアルギニンの濃度を抑えるため、*C. glutamicum* からこれらのアミノ酸要求性変異株を誘導することによって開発された。スレオニン、リジン、トリプトファンなど多くの生産株は、アミノ酸のアナログ耐性株から採取する方法が開発された。一方、グルコース以外の安価な原料をアミノ酸に変換する酵素をもつ微生物を用いる、酵素法やバイオリクターによる生産法も開発された。さらに、新しい遺伝子工学の技術の応用によって、発酵法、酵素法ともに、生産株の改良や新しい発酵生産が登場した。

大量培養法は、抗生物質生産株の培養法をベースにして、アミノ酸生産のために改良された。発酵液からのアミノ酸類の単離・精製技術は、製品の品質を決定すると共に、この段階での収率がコストに大きく影響する重要な行程である。大量培養、大量精製に関わるエンジニアリングはコンピュータ制御によるシステム開発が確立されている。

このようにして、日本で開発された技術によるアミノ酸製造工場は世界中に拡大した。原料はデンプンや粗糖、あるいは糖蜜である。このため、原料依存度が高い、あるいは消費地が海外にあるアミノ酸であるグルタミン酸、リジン、スレオニン、などは大部分が海外の工場で生産されている。

アミノ酸製造は、清酒や醤油などの醸造工場と同じように、天然型の工程で行われている。さらに、環境調和型のシステム作りが行われている。また、穀物などの原料に不足するアミノ酸を家畜の飼料に添加することは排泄物からのアンモニアの排出を削減し、環境の改善に有用である。

アミノ酸の安全性について、1970 年代に消費者運動の中で議論されたが、科学的に問題がないことが証明されている。しかしながら、この運動の“後遺症”とも言うべき安全性を問題にする現象は今も根強く残っている。

商品としてのアミノ酸については、アミノ酸に替わるものがないため、将来にわたって発展が続くと考えられる。



今後は原料価格の上昇が最大の問題点で、安価な原料を確保している海外メーカーとの価格と技術の競争に勝つことが、本家日本技術陣の最大の課題である。このためには、遺伝情報と遺伝子技術を活用した生産を改良する菌株育種、新しい原料の開発とそれを利用できる菌株育種、環境を重視したプロセスの開発の重要度がさらに高まる。これらの技術開発が期待される。

## ■ Abstract

Twenty kinds of amino acids are the building blocks of proteins. Many useful characteristics have been found in amino acids, and they are used as "umami" seasoning, medicines, feed-additives, chemicals, cosmetics, and so on.

Amino acids are now manufactured by three methods : extraction from acid-hydrolysates of various proteins, chemical synthesis, and fermentation. Among these, fermentation is dominant. Amino acid fermentations, in which microbes are used to produce amino acids, was conceived in Japan and has been developed with Japanese techniques. More than 70% of the world's supplies of amino acids are now manufactured by fermentation processes.

This report provides a systematic survey of amino acids fermentation techniques, tracing the history of the development and overviewing future prospects.

Monosodium glutamic acid (MSG) , which was the first amino acid to be commercialized as a seasoning in 1908 under the brand name of "Ajinomoto" by S. Suzuki, the progenitor of Ajinomoto Co., on the basis of an invention by K. Ikeda, a professor at Tokyo Imperial University. This production process, extraction from wheat and soybean proteins, continued successfully for about 50 years. However, the process had drawbacks : the high cost of raw materials and the problems of using hot hydrochloric acid in the manufacturing facilities. New approaches were searched for from the direction of both chemical synthesis and fermentation. However, the concept of producing glutamic acid by chemical synthesis was not accepted by consumers. The first successful fermentative production of glutamic acid was achieved by Kyowa Hakko in 1957, by finding a novel glutamate-producing bacterium, *Corynebacterium glutamicum*, and establishing culturing methods.

Producers of the other 15 amino acids beside glutamic acid were successfully bred by deriving auxotrophic mutants and analog-resistant mutants, and production was expanded to the industrial scale.

Techniques in fermentation are made up of four parts : breeding of producing strains, large-scale culturing, isolation and purification of amino acids from culture liquids, and plant engineering. Among these, the breeding of strains is the most important and fundamental technique. Wild type bacteria have intracellular metabolic regulation mechanisms for preventing over-production of essential metabolites such as amino acids, so the breeding of strains involves deregulating these mechanisms through the application of scientific information from biochemistry, genetics, and genetic engineering techniques.

Deregulated production achievements include the following. Glutamic acid fermentation was accomplished by culturing *C. glutamicum* under optimum conditions corresponding to its characteristics. Producers of the other 15 amino acid were derived as auxotrophic mutants and amino acid-analog resistant mutants, as mentioned above, from *C. glutamicum*, *E. coli*, *S. marcescens*, and so on. Another approach for amino acid production is the enzymatic conversion to amino acids of cheaply available materials, such as intermediates of the chemical synthesis of amino acids. Bioreactors, which contain immobilized enzymes and/or enzyme-containing bacterial cells as catalysts, have been used for long-term production with stable and repeated uses.

Breeding methods have been improved drastically by recombinant DNA techniques, which appeared in the 1970' and provided tools for the isolation, amplification, and modification of DNA. As a result, enzymes of amino acid synthesis could be changed for better production of amino acids. A genetically improved high producer of threonine was constructed by amplifying threonine-producing enzymes, and industrialized.

Large-scale cultures for amino acid production were established by modelling the techniques developed for the production of antibiotics. The productivity of amino acids was improved by supplying a high concentration of oxygen to the culture medium, by using fed-batch cultures, and so on.

The isolation and purification of amino acids accumulated in culture liquids are important steps that determine the quality and final cost of amino acids. Plant engineering for large-scale cultures and purification processes are controlled by computer-control systems.

Starch, crude sugar, and molasses are the raw materials for amino acid fermentation. In these processes, a major portion of the cost of amino acids is the price of raw materials. Thus, amino acid plants have been constructed mainly in areas, where raw materials are produced, all over the world except in Africa and Oceania. As a result, the amounts of amino acids produced in domestic plants have been reduced rapidly. The amount of amino acids

produced is increasing steadily. Among them, the world supply of MSG was estimated to reach 1.7 million tons in 2005.

Fermentation processes are harmonious with the environment, like the brewing processes of "sake" and soy sauce. In the MSG plants of Ajinomoto Co. of Indonesia and Brazil, waste waters, which contains bacterial cells, ions of ammonia, potassium, and phosphate, and some minerals, are recycled on farms that produce sugar cane, coffee, and so on, as a good fertilizer.

The supplementation of amino acids, which are deficient in cereals for domestic animals, improves the amino acid balance of feeds, enabling a reduction in the release of ammonia in excrement, and reducing pollution of the atmosphere, rivers, and lakes.

In around 1970, the safety problem of amino acids arose in consumer's movements. However, the FDA concluded that all the amino acids were safe compounds, judging from many scientific demonstrations, and fair and open discussions.

Demand for amino acid will continue to increase in the future, because alternatives to them cannot be found.

A big problem, nowadays and in the future, is the rise of raw material prices, especially in competition with materials for bioethanol. Therefore, the most important subject for Japan, as a progenitor, is making use of advanced techniques to overcome foreign competitors, who have secured cheaper raw materials. For this purpose, the construction of novel producer strains having the highest yields are expected to improve metabolic flows to amino acids through the application of genetic informations and genetic techniques. It should also lead to the construction of new strains that can produce amino acids effectively from raw materials, such as biomasses, methanol, and CO<sub>2</sub>, which are not in competition with bioethanol and materials for foods.

Novel techniques for the production of peptides have been reported recently. As peptides are prepared from amino acids, the science and technology of peptides will be ranked as an extended field of amino acid fermentation. In the near future, new and big developments for peptides may be expected for physiologically active substances such as hormones.

## ■ Contents

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1. はじめに                | 55 |
| 2. アミノ酸について            | 56 |
| 3. アミノ酸醗酵誕生の背景にあったもの   | 61 |
| 4. アミノ酸醗酵の誕生           |    |
| ーアミノ酸生産菌のスクリーニングと菌株育種ー | 64 |
| 5. 培養技術の進展と培養装置        | 76 |
| 6. アミノ酸の分離・精製技術の開発     | 78 |
| 7. アミノ酸の規格             | 80 |
| 8. アミノ酸醗酵の主原料          | 81 |
| 9. アミノ酸醗酵技術の海外展開       | 82 |
| 10. アミノ酸と環境問題          | 84 |
| 11. アミノ酸の安全性について       | 85 |
| 12. アミノ酸技術の系統化         | 87 |
| 13. 今後の展開              | 89 |
| 14. 謝辞                 | 91 |

# 3 プロセス制御システムの技術系統化調査

## A Technical Survey of Process Control Systems

若狭 裕  
Yutaka Wakasa

### ■ 要旨

プロセス制御とは、JIS-B0155 によると「プロセスの操業状態に影響する諸変量を、所定の目標に合致するように意図的に行う操作」と定義されている。基本的な制御はフィードバック制御であるが、制御したい変数の値（制御量）を測定し、その測定値と設定値との差（偏差）を計算し、その偏差に基づいて操作する変数の値（操作量）が決定される。1778年にWattによって蒸気機関が発明され、その回転数が遠心调速機（ガバナ）によって制御されたが、これが工業的な意味でのフィードバック制御の原点と言われている。その後1922年にMinorskyにより発表されたPID制御の原理をもとに、1936年に空気式PID調節器が作り出され、フィールド機器とともに空気式プロセス制御システムの体系が構築された。プラントの計装システムを中央計器室に集中させるようになったが、空気圧信号0.2～1kg/cm<sup>2</sup>は伝送距離が300m程度であったため、システム化への制約が大きかった。プラントの大型化とともに、伝送距離に制約の大きい空気圧信号に代わって4～20mA統一信号のアナログ電子式計装システムへ移行した。その後マイクロプロセッサや通信技術の進歩により、1975年に分散型制御システム（DCS: Distributed Control System）が開発された。Control、Computer、Communicationの3つのC技術を核に、機能分散、地域分散、危険分散などを特徴とするDCSのアーキテクチャが生まれた。DCSはこのアーキテクチャの上に、半導体はじめ要素技術の進歩を取り入れながら、システム機能の上位互換性を保ちつつ進化を続けている。DCSは計測、制御、マンマシンインターフェースなど機能がソフトウェアで実現されているが、新たに導入されたビルダ機能によりユーザは計算機プログラムではなく計装の言葉でシステム構築することが可能となった。プロセス変数は、温度、圧力、流量はじめ非常に多岐にわたるが、それらを計測制御するため、様々なセンサーやアクチュエータが開発されてきた。制御技術もPIDから現代制御理論にいたる様々なソフトウェアが組み込まれている。プラントを直接制御するDCSには、極めて高い信頼性が要求されるが、信頼性工学に裏打ちされた高信頼化設計技術と、高品質の製造技術や品質管理技術など総合力で実現されてきた。また、ノイズの多いプロセス環境でも安定に動作するための耐ノイズ設計がなされている。センサーなどフィールド機器用デジタル通信として、フィールドバスが1984年にIECでの標準化構想が提案され、1996年に規格として制定された。このことは、伝送がデジタル通信になっただけでなく、フィールド機器の内部状態や保全情報の授受が可能になり、フィールドネットワークを利用した予知保全技術の展開など、計装システム全体に大きな影響をもたらした。このようにプロセス制御は、非常に広範囲な技術に支えられている。

プロセス制御技術は産業のマザーツールとして、石油精製、化学、鉄鋼、紙パ、電力など、あらゆるプロセス産業の発展を、製品の品質や生産性の向上、省エネルギー、安全操業などの面から支えてきた。日本の産業を支えていると言っても過言ではない。1973年、1978年の二度の石油ショックでは、原料・エネルギー価格が高騰したが、プロセス産業は省エネ、省資源を徹底し自動化を推進し生産性向上を図ることでこの危機を乗り切った。省資源・省エネルギー面では、徹底した熱回収が行われるが、モデル予測制御などの多変数制御や最適化制御の実用化によりそれが可能となった。半導体技術を利用した高精度センサーも開発されて精度の高い制御が可能となり、プロセス性能を限界まで発揮させる運転が可能となった。日本のプロセス産業は国際競争力をもつ産業として発展したが、これらを可能ならしめたのは、統合化、大型化、複合化であり、これらのプラント群の運転を支えたのが世界のトップレベルにある日本のプロセス制御技術である。高度成長時代の終了とともに、製造業は需要の変動、多角化に合わせた生産 - 変種変量生産 - に移行せざるを得なくなったが、このようなフレキシブルな生産に対してもDCS（Distributed Control System）は大きな役割を果たしている。工場全体の生産計画や管理業務の効率的を図ることにより企業活動全体の効率向上を達成するERP（Enterprise Resource Planning）システムに於いては、連携するMES（Manufacturing Execution System）が重要であるが、DCSは運転制御システムの中核としてMESの一翼を担っている。今後世界の経済成長とともに、効率向上に加えて環境問題、省エネ、省資源のニーズが高まり、その問題解決のためにプロセス制御の果たすべき役割がますます大きくなると思われる。

本調査では、制御理論、制御システム、要素技術、高信頼化技術などの観点から、プロセス制御システムにおける技術の系統化を行う。

## ■ Abstract

According to JIS-B0155, process control is defined as operations that are performed with the intention of making variables that affect a process's operational state match their prescribed targets. A basic form of control is feedback control, where the value of the variable to be controlled (called the control value) is measured, the difference between this measured value and the setting value (called the deviation) is calculated, and the value of the variable used to operate the process (the control input) is determined based on this deviation.

In 1778, James Watt invented a steam engine in which the speed of rotation was controlled by a centrifugal governor. This governor could be described as the first instance of feedback control in an industrial sense. In 1922, Minorsky described the principles of PID control, and in 1936 the pneumatic PID controller was created based on these principles, resulting in the construction of field instruments and pneumatic process control systems.

Plant instrumentation systems tended to be concentrated in a central equipment room, but this placed a large constraint on system configurations because pneumatic signals of 0.2–1 kg/cm<sup>2</sup> could not be transmitted for distances longer than about 300 m. As plants became larger, these pneumatic signals with highly limited propagation distances were replaced with analog electronic instrumentation systems having a uniform signal current of 4–20 mA. Then with the arrival of microprocessors and communication technology, the distributed control system (DCS) was invented in 1975.

In this way, the DCS architecture was developed, featuring functional distribution, spatial distribution, risk distribution and the like centered around the three 'C's of control, computers and communications. Based on this architecture, DCS systems have continued to evolve while incorporating developments in key technologies such as semiconductors and maintaining upward compatibility with existing system functions.

In a DCS, functions such as control functions and the man-machine interface are implemented in software, but with newly introduced builder functions it has become possible for users to configure systems using instrumentation terminology instead of computer programs. Process variables can represent many different physical parameters such as temperature, pressure, and flow rate, but a wide variety of sensors and actuators have been developed to measure and control these variables. Control technology is also implemented in software in many different forms ranging from PIDs to modern control logic. A DCS that controls a plant directly is required to be very reliable indeed, and this has been implemented by employing the reliability enhancement design techniques that lie behind reliability engineering, in conjunction with high quality construction materials, high quality management techniques and the like.

Noise-resistant designs are employed to perform stably even in noisy process environments. In 1984, Fieldbus was proposed by the IEC as a means of digital communication for the sensors and other field instruments, and was formally standardized in 1996. As a result, not only has digital communication been introduced, but it has also become possible for field instruments to exchange information about their internal states and maintenance information, and with the development of predictive maintenance technology using field networks, this has had a large effect on instrumentation systems as a whole. In this way, process control supports a very wide range of technologies.

Process control technology is one of industry's most important tools, and has supported the development of all sort of processing industries such as oil refineries, chemical plants, steelworks, paper mills and power stations from a diverse range of aspects including the improvement of product quality and productivity, reduction of energy usage and introduction of safe working practices. It would be no overstatement to say that Japanese industry depends on process control technology.

In the two oil crises of 1973 and 1978, the price of raw materials and energy jumped sharply, but processing industries were able to survive by minimizing their use of energy and raw materials and promoting automation in order to improve their productivity. The reduction of resources and energy was achieved by performing thorough heat recovery, which was made possible by the practical application of optimized control and multivariate control techniques such as model predictive control. The development of high-precision sensors using semiconductor technology allowed for high-precision control, and made it possible to push processing performance to the limits. Japan's processing industries have developed with the ability to compete in the global market, and this was made possible through a process of integration, scaling-up and combination to the point where Japan's plants were operated using some of the best process control technology in the world.

As the era of rapid growth came to a close, manufacturing industries had no choice but to shift towards more flexible smaller-lot production schedules to cope with increasingly fluctuating and diverse demands. The distributed control system (DCS) played an important role in this transition. In enterprise resource planning



(ERP) systems where the whole activity of a factory is streamlined by improving the efficiency of the business's production planning and administration activities, it is important to cooperate with the manufacturing execution system (MES). Part of the role of the MES at the core of the operating control system is played by the DCS. With further global economic growth in the future, it will be necessary to consider environmental issues as well as operational efficiency, resulting in a increased demand for energy savings and reduced usage of resources. To address these issues, the role played by process control is likely to become increasingly important.

This survey systematically reviews the technology of process control systems in such terms as their control logic, control systems, constituent technologies and reliability enhancement techniques.

## ■ Contents

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 1. はじめに             | 95  |
| 2. 制御理論の変遷          | 96  |
| 3. アナログ計装システム       | 100 |
| 4. フィールド機器          | 106 |
| 5. デジタル計装システム       | 114 |
| 6. 高信頼化             | 124 |
| 7. 標準化とオープン化        | 136 |
| 8. アプリケーションへのインパクト  | 145 |
| 9. プロセス制御システム技術の系統化 | 157 |
| 10. まとめ             | 159 |