

## ■ 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化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 an 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.

## ■ Profile

若狭 裕

Yutaka Wakasa

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

|         |                                        |
|---------|----------------------------------------|
| 昭和40年3月 | 東京大学工学部電子工学科卒業                         |
| 昭和40年4月 | 株式会社横河電機製作所入社<br>DDCシステム開発に従事          |
| 昭和50年6月 | 分散型計装制御システムCENTUM開発<br>以降同システムの継続開発に従事 |
| 平成7年7月  | 取締役 T&M事業本部長                           |
| 平成8年7月  | 取締役 技術開発本部副本部長                         |
| 平成9年7月  | 取締役 総合企画室副室長                           |
| 平成12年6月 | 横河電子機器株式会社 代表取締役社長                     |
| 平成16年6月 | 同上退任                                   |
| 平成16年7月 | JEMIMA（日本電気計測器工業会）<br>テクニカル・アドバイザー     |
| 平成19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.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 |

# 1 はじめに

プロセス制御の基本は、フィードバック制御である。ワットの蒸気機関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。制御理論が整備され、PID制御から、現代制御理論へと発展してゆくが、その変遷について第2章で解説する。現在でもPID制御が基本であるので、その原理についても解説する。第3章ではプロセス計装の歴史を空気式計装システムからアナログ電子式計装システムへの変遷をたどり、代表的な空気式計装システムと電子式計装システムの機能体系と要素技術について解説する。アナログ調節計では電流信号が4～20mAに統一される経緯を示した。アナログ電子式計装システムは、その後マイクロプロセッサを搭載した1ループコントローラへ進化してゆく。第4章では、フィールド機器について解説する。プラントの状態を示すプロセス変数は温度、圧力、流量など多岐にわたっており、さまざまなセンサが使われているが、最も代表的な流量計測の中から、差圧伝送器をとりあげ空気式と電子式の代表機種について、その構成と動作原理を紹介する。コントロールバルブはプロセス制御上重要なフィールド機器であり、その構造と流体による内部の摩耗のメカニズムを紹介し、インテリジェント化による予知保全の可能性について触れた。

1960年代に入り、計算機によって直接プロセスを制御するDDC（Direct Digital Control）が導入され、デジタル計装の時代が始まった。当初は集中型DDCで

あったが、その後マイクロプロセッサや通信技術の進歩を取り入れ、DCS（Distributed Control System：分散型計装制御システム）へと進化してゆく。第5章ではDCSへ進化する経緯とDCSの構成について解説する。

プロセス制御システムにとって最も重要な課題はその高信頼化である。空気式、アナログ電子式、DCSへと変遷してきたが、それぞれの世代で高信頼化が追求されてきた。電子部品の評価、ディレーティングなど信頼性工学に基づく高信頼化設計がなされてきたが、DCSでは部品故障の影響を受けないフォールトトレラントシステムが追求されている。第6章ではDCSにおける高信頼化設計技術と予知保全が紹介される。耐ノイズ技術と防爆技術についても触れている。

第7章では、プロセス制御の分野で進められてきた国際標準化について解説する。フィールド機器とのインターフェイスは4～20mAで統一されているが、1996年にフィールドバス（H1）規格が制定され、フィールド機器の情報をデジタル通信でDCSに取り込むことが出来るようになった。また品質管理などの業務系PC からDCSを介してプロセスの状態を監視する要求が増えているが、そのためのWindows系ソフトウェア間のインターフェイスとしてOPC（OLE for Process Control）が標準化されている。

第8章では、DCSがアプリケーションにどのようなインパクトをもたらしたかについて、石油・石油化学、鉄鋼、紙パルプ、エネルギー関連の事例を紹介している。



## 2 制御理論の変遷

表2.1に制御理論の歴史を示す。1778年にWattによって蒸気機関が発明され、その制御には遠心调速機 (Centrifugal Governor) が取り付けられた (図2.1)。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。構造的に比例制御のみであったため、負荷変動に対してオフセット偏差が残り、制御の安定性も不十分であった。1868年Maxwellは種々の方式のGovernorに対して、論文“On Governors”に於いて、その安定性の解析を行い制御系の安定性判別の方法を与えた。この論文は制御理論の起源といわれる。PID制御の着想は、1922年にMinorskyが発表した論文“Directional Stability and Automatically steered Bodies”に船舶の方向制御の安定性の解析に於いて示されている。ラプラス変換など制御特性を解析する数学的手段のない時代に、P (比例) 動作に、オフセットを除去する機能をもつI (積分) 動作を付加し、さらに制御量の変化の度合いから先行して抑制する機能をもつD (微分) 動作を付加したPID 制御が提案されたことは特筆すべきことである。1936年には米国テイラー (Taylor) 社のカレンダー (Callender) らによって空気式PID 調節器の原型が作り出された。しかし、PID パラメータ値をどのように決定し、調整すればよ

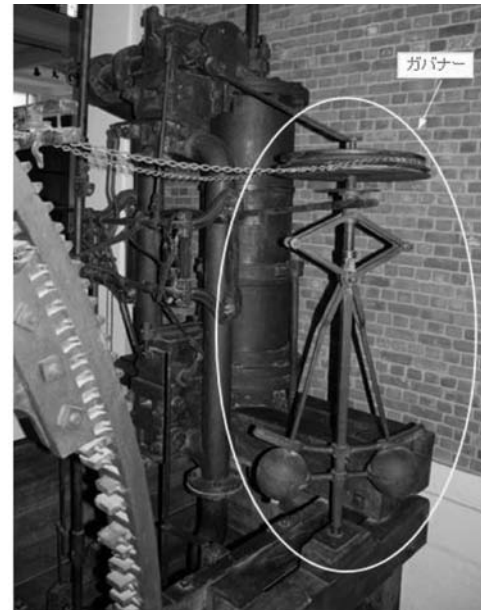


図2.1 ワット蒸気機関のガバナー

いかが不明であったため、ほとんど使用されることはなかった。その後テイラー社のジエグラー (Ziegler) とニコルス (Nichols) は、PID パラメータの最適調整法の開発に取り組み、1942年、むだ時間と時定数のある制御対象に対するPID パラメータの実用的な調整

表2.1 制御理論の変遷 <sup>(1)</sup>

| 年代         | 項目                  | 概要                                                                          |
|------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1778       | フィードバック制御の起源        | ワット(Watt)蒸気機関の调速機(比例制御)                                                     |
| 1868       | 制御理論の起源             | マクスウェル(Maxwell) "On Governors"                                              |
| 1922       | PID制御の着想            | マイノースキー(Minorsky) "Directional Stability and Automatically Steered Bodies," |
| 1936       | PID調節器の原型           | カレンダー(Callender)ら                                                           |
| 1942       | PID調整則の誕生           | ジエグラー(Ziegler) & ニコルス(Nichols)<br>(PID調節器の本格的普及始まる)                         |
| 1946       | 計算機誕生               | ENIAC                                                                       |
| 1959       | 計算機集中型DDC           | テキサコ                                                                        |
| 1960       | 現代制御理論              | カルマン(R.E.Kalman) 周波数を忘れ、制御理論を科学にした。                                         |
| 1963       | 2自由度制御系の概念          | ホロビッツ(I.M.Horowitz)                                                         |
| 1964       | DDCの要件              | CASHEN, J. F. "Direct digital control-questions that must be answered."     |
| 1965       | ファジー理論              | ザディ(L.A.Zadeh)                                                              |
| 1960年代後半から | モデル予測制御             |                                                                             |
| 1973       | I-PD制御              | 北森俊行                                                                        |
| 1975       | DCS誕生<br>制御のデジタル化元年 | CENTUM(横河電機)、TOSDIC200(東芝)、TDC(Honeywell)、Σシリーズ(日立)、MICREX-P(富士電機)          |
| 1977       | 知識工学                | ファイゲンバウム(Feigenbaum)                                                        |
| 1980       | H <sup>∞</sup> 制御   |                                                                             |
| 1986       | ニューラル・ネットワーク        |                                                                             |
| 1989       | EIC統合制御システム         | (E:電機制御、I:計装、C:計算機)                                                         |
| 1990       | ポスト現代制御理論           |                                                                             |
| 1995       | ライトサイジング・システム       | パソコン化、オープン化、デファクト化                                                          |
| 2007       | 制御技術の現状             | 依然としてPID制御が90%以上を占めている。<br>PID制御の見直し、高度化が盛ん。                                |

則が提唱された。ジグラー・ニコルスの限界感度および過渡応答法として知られている。これらの調整則は実験的に求められたもので、理論的根拠は明確ではなかったが、PID パラメータの実用的調整法としてわかりやすく有効であったため、PID制御の普及に大きく貢献することになった。<sup>(2)</sup>

その後制御の安定判別として、ボード線図、ニコルス線図など周波数領域での安定判別法が考案され、制御理論としてまとめられて行った。1960年カルマンによって状態ベクトルに注目した最適制御理論の考えが発表され、いわゆる「現代制御理論」が出現した。以降、従来のPID制御やフィードバック理論は「古典制御理論」と呼ばれるようになった。その後1963年、ホロビッツ (I.M.Horowitz) (1963年) によって2自由度制御系のコンセプトが、1965年にはザディ (L.A.Zadeh) によってファジー理論が発表された。1980年代には制御系設計の一つの枠組みを与える $H^\infty$ 制御理論が研究された。このように、制御理論は1960年に現代制御理論が出現して以来、古典制御理論を超えるとされる様々な理論が提案されてきたが、現実のプロセス制御では、いまだに制御ループの90%はPID制御で行われている。PID制御は実績が長く、実用的で優れており、I-PD制御、2自由度PID、非線形PID、むだ時間補償制御、非干渉PIDなど、制御性能のよい様々な方式が継続的に改良開発されている。

## 2.1 フィードバック制御

フィードバック制御の起源といわれるワット (James Watt) の蒸気機関に適用されたガバナ (Centrifugal governor) による自動回転数制御の動作原理を図2.2に示す。負荷が増加して蒸気機関 (制御対象) の回転数 (制御量) が低下すると、遠心力が小さくなるため遠心振り子が降下し、すべりリングが引き下げられる。すべりリングが引き下げられると、テコの支点を介してレバーの左端が上がり、蒸気供給弁 (操作端) の開度が大きくなり、蒸気供給量が増加して、回転数が上昇する。この制御機構は回転数が設定値からずれると、その偏差に比例して修正動作をするフィードバック制御系を構成している。この制御は比例 (P) 動作のみのため、比例ゲインを限界まで大きくしても、原理的にオフセット (定常偏差：制御を行っても定常的に残る偏差) をゼロにできないという限界があった。しかし、蒸気を回転動力に変換して利用する重要な役割を果たし、産業革命のきっかけとなったもので、制御技術の起源といわれている。ワットの遠心

调速機の制御系としてのブロック図を図2.3に示す。

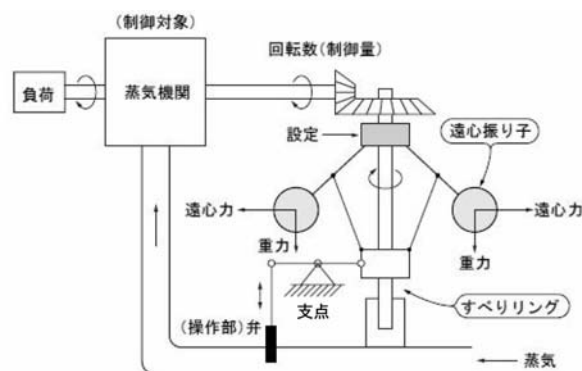


図2.2 ワット蒸気機関のガバナの動作原理図<sup>(3)</sup>

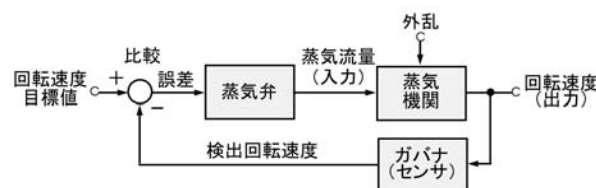


図2.3 ワット蒸気機関のガバナのブロック図

## 2.2 PID制御

プロセス制御とは、プラントを目的の状態に保つように、温度、圧力、流量などのプロセス変数を所定の値に制御することである。図2.4にプロセス制御におけるフィードバック制御のブロック図を示す。調節計はプロセス変数 (PV) と設定値 (SV) を比較し、その偏差に対して所定の演算をして操作出力 (MV) を決めている。操作出力がプロセスに出力され、PVがSVに近づくように変化するフィードバック制御系が構成される。プロセス制御の中で、最も代表的なPID制御について簡単に触れておこう。式2.1にPID制御の演算式を示す。同式でPは比例帯、eは偏差、 $T_i$ は積分時間、 $T_d$ は微分時間を表す。

$$MV = K_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad \text{--- [式2.1]}$$



### (1) P (Proportional : 比例動作) --現在

現在生じている偏差に比例した操作出力を出す動作。図2.5の液位制御プロセスで考えてみよう。流入量 $Q_i$ と流出量 $Q_o$ が等しく制御されている時、液位は一定に保たれている。流出量 $Q_o$ を増やすと（負荷変動：外乱）、液位が下がって偏差が生じ、調節計は偏差に比例したMVを増やし、増えた流出量と等しい流入量

を増やし液位は一定に保たれるが、一度下がった液位のままで安定し、比例動作だけでは、プロセスに外乱が入り込んできた場合にプロセス変数を設定値に保つことができず、最終的には設定値からずれた所でプロセス変数が安定してしまう。この差をオフセット（定常偏差）と言う。比例動作だけでは、負荷変動などの外乱によって生ずるオフセットを解消することは原理的にできない。

## (2) I (Integral : 積分動作) ---過去

過去から現在までの偏差の積分に比例した出力を出す動作である。積分動作は偏差が存在する限りそれをなくす方向に働き続けるので、最終的にはオフセットは解消される。オフセットをなくすという意味で、積分動作はリセット (Reset) 動作とも呼ばれる。負荷変動に対しても偏差のない制御が可能になるので、実用的には比例動作に積分動作を加えたPI動作がよく使われる。

## (3) D (Derivative : 微分動作) ---未来

偏差の生じる割合（速さ）に比例して操作量を与える動作である。偏差が大きくなるのを未然に抑えるもので、P、PI動作と組み合わせて使用される。加熱炉のような無駄時間があったり、時定数の長いプロセスではP動作やPI動作だけでは良好な制御が得られない事が多い。これは、P動作は現在の偏差に対応しているだけであり、I動作は過去から現在までの偏差の積分に対応しているだけである事に起因する。D動作は偏差の増減の動向を見ながら未来へあらかじめ対処するように作用する。微分動作はレート (Rate) 動作とも呼ばれる。

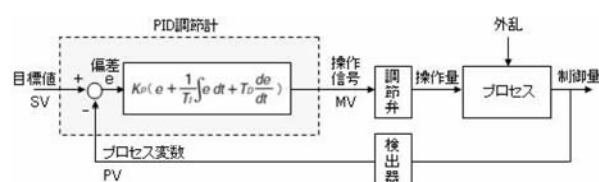


図2.4 フィードバック制御のブロック図

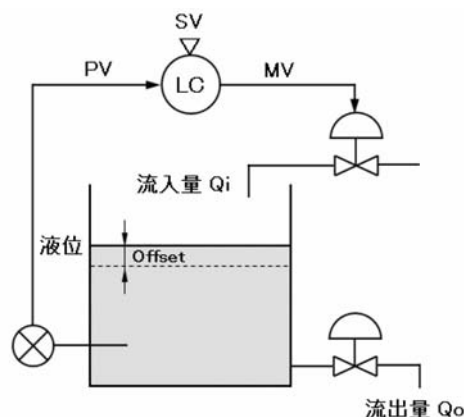


図2.5 液位制御プロセス

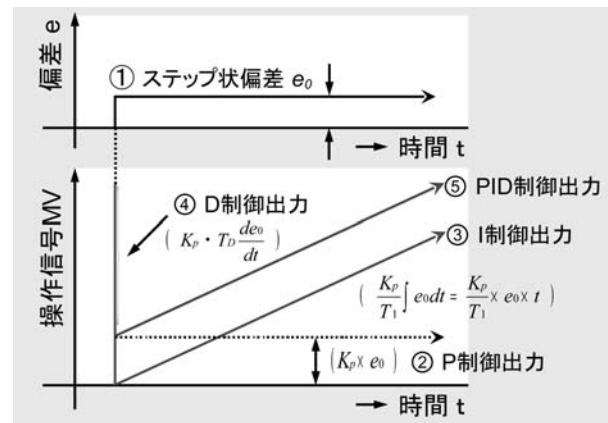


図2.6 PID調節計の制御出力 (4)

## [2.2.1] PID調節計の動作

PID調節計によるフィードバック制御のブロック図を図2.4に示す。PID 調節計は、目標値SVとプロセス変数の測定値PVとの差（偏差：e）に対して [式2.1] に示す演算を行い、その結果の操作出力MVを調節弁に出力する。操作出力によって変化したプロセスの状態は検出器によって計測されて調節計のPV値としてフィードバックされる。この制御系において、目標値変更や負荷変動などによってステップ状の偏差 $e_0$ が与えられた時のPID調節計の操作出力の動きを図2.6に示す。同図に於いて、①は加えられたステップ状の偏差の変化、②はP制御出力、③はI制御出力、④はD制御出力である。D制御出力は偏差の微分なので、ステップ状の変化に対してはインパルス状の出力になる。⑤は②③④の合計で、PID制御出力としてプロセスに出力される。

## [2.2.2] PID制御のプロセス応答特性

図2.4に示すPID制御系において、目標値を変化させて偏差eを与えたときのプロセスの制御応答特性を図2.7に示す。制御なし（ $K_p=0$ ）の場合は、⑥のように偏差がそのまま現れる。P制御の応答特性⑦のようになる。比例ゲイン $K_p$ を大きくしていくと偏差は小さくなるが、 $K_p$ を大きくし過ぎると制御応答が振動的となるので、 $K_p$ の大きさには限界があり、P制御のみではオフセットが残ってしまう。そこでI制御を付加してPI制御にすると、I制御機能によって偏差がある限り偏差をゼロにする方向に操作信号を変化し続けるため、定常状態では偏差はゼロとなってオフセットをなくすことができる。PI制御の応答特性は⑧のようになる。さらに偏差の変化速度を用いて予測制御する機能をもつD制御を付加したPID制御では、偏差発生から定常状態に至るまでの過渡応答特性を、PI制御の応答特性⑧に比べて、⑨のように改善することができる。



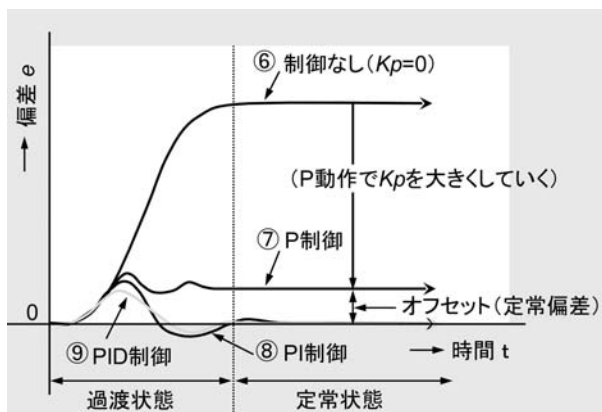


図2.7 PID調節計の制御出力 <sup>(5)</sup>

## 参考文献

- (1) (2) (3) (4) (5) 広井和男/宮田 朗 共著 シミュレーションで学ぶ自動制御技術入門 CQ出版社に一部追記。

# 3 | アナログ計装システム

## 3.1 計装とは

JIS Z8116-1994 自動制御用語一般によると、計装とは「対象とするシステムの運転や管理を具現するために、対象システムの計測、制御、管理方法などの方法を検討して、制御および監視のための装置を装備すること」と定義されている。自動制御を研究していた東京大学の深井善三郎教授が“計装”の用語を提案しその後定着したと言われている。“Instrumentation”を「工業計器 (instrument) を装備してプラントの監視や制御を行う事」ととらえ、「計器」と「装備」から命名されたものと思われる。

## 3.2 プロセス計装システムの歴史

図3.1は、プラントを運転するマンマシンインタフェースの観点からみたプロセス計装システムの歴史を表している。1930年代は機械式計器が主体で、プロセスの制御は現場の手動操作が主体であった。1940年代には、大型の空気式計器が実用化され、空気圧信号の伝送により計器室での監視・操作が可能になった。1950年代には空気式計器の小型化・システム化が進み、プラントの運転は中央計器室に集約され、ボード（パネル）オペレーションによる運転が中心になった。1960年代に入ると空気式に代わり電子式アナログ計装システムが主流になり、グラフィックパネルなども組み合わせ、さらに管理用計算機からの情報も提供され中央計器室の集約化が進んだ。1960年代半ばからデジタル計算機により直接パルプが駆動されるDDC (Direct Digital Control) が実用化されたが、計算機が高価であったため多数のループを1台のCPUで制御する集中型であった。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、分散型DDC (DCS: Distributed Control System) が出現し、その後のデジタル計装時代の幕開けとなった。DCSではCRTによるオペレータコンソールが中心になり、CRTオペレーションと呼ばれた。以下、それぞれのシステムの概要と、歴史的な背景について概観する。

## 3.3 空気式計装システム

図3.1で示したように、1940年代から大型空気式計器が使われ始めたが、その代表的機種としてフォック

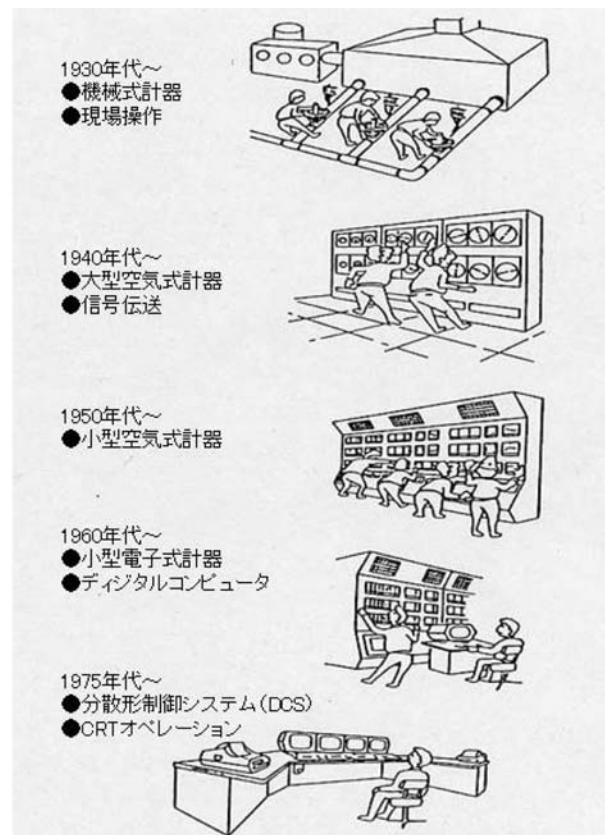


図3.1 マンマシンに見るプロセス計装システムの歴史<sup>(1)</sup>

スボロ社のM40型記録調節計を図3.2に示す。現場型大型計器として多数使われた代表的機種である。現場からのプロセス信号を直接記録し、変位平衡式調節機構によるPID制御機能を有している。回転する円形記録紙には標準で1日分のデータが記録される。空気式計装システムでは、信号に空気圧 (0.2~1.0 kg/cm<sup>2</sup>) が使われ、プロセス変数の検出、伝送、制御演算は、ベローズ、コントロールリレー、リンク機構など表3.2で示されるような機構部品の組合せで構成された。1950年代に入ると、空気式計器の小型化、システム化が進んだ。1951年ハネウェル社から小型空気式計器Tel-O-Set (テル・オ・セット) が、1952年にはフォックスボロ社からコンソールド小型空気式計器PCI (Pneumatic Consotrol Instrumentation) が相次いで発売され、図3.3に示すような空気式計器による中央計器室が可能になった。PCIシステムは表3.1に示すような計装機器として必要なラインアップをそろえ、その機能体系はその後の電子式アナログ制御システムにおける機能体系の原型となり、さらにはDCSにおける制御機能の体系に引き継がれている。

フォックスボロ社は、1951年に差圧伝送器3A d/p



セルを発表し、1955年に13A d/pセルに改良した。13A d/pセルは、シンプルな構造で、力平衡式というフィードバック機構による極めて安定な差圧伝送器であったため、世界的に高い評価を受けた。

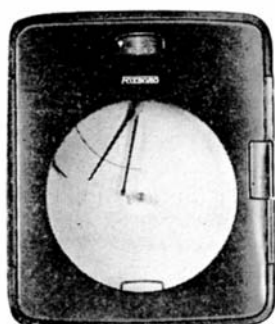


図3.2 大型空気式記録調節計 M40<sup>(2)</sup>

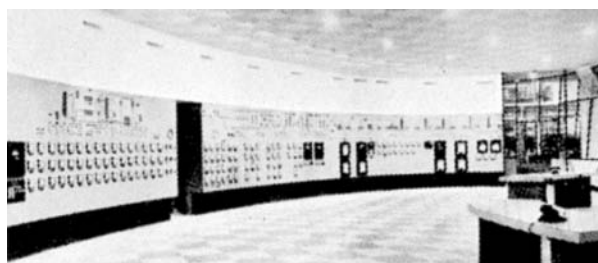


図3.3 小型空気式計装システムによる中央計器室<sup>(3)</sup>

表3.1 PCIシステムの機器構成

| 力平衡式伝送器   | コントロール受信計<br>パネル計器 |
|-----------|--------------------|
| 11 (圧力)   | 50 (リボン式指示計)       |
| 12 (温度)   | 52 (指示調節計)         |
| 13 (差圧)   | 54 (記録計)           |
| 14 (積算計)  |                    |
| 15 (低差圧)  | ラック計器              |
| 16 (回転速度) | 56 (加減演算器)         |
| 17 (液位)   | 57 (比率設定器)         |
| 18 (流量)   | 58 (調節器)           |
| 19 (雑)    | 59 (流量調節器)         |
|           | 556 (乗除演算器)        |
|           | 557 (開平演算器)        |

### [3.3.1] 空気式工業計器の特長

空気式工業計器には次のような特長がある。

- (1) 構造が簡単で信頼性が高い。
- (2) 調節計からの操作出力（空気圧）で、空気式のダイヤフラム調節弁を直接駆動できる。
- (3) プロセス制御用調節計に要求される長い積分/微分時定数（50min）が容易に得られる。
- (4) 引火の危険性が無く本質的に安全である。
- (5) 信号伝送に時間遅れがあり、長距離の伝送には不向きである。

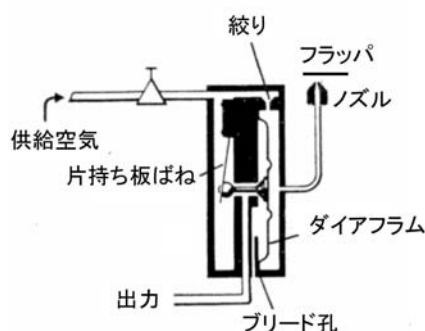


図3.4 コントロールリレーの構造<sup>(5)</sup>

表3.2 空気式計器の構成要素<sup>(4)</sup>

| 変換要素      | 変換信号    |
|-----------|---------|
| ベローズ      | 圧力 → 力  |
| ダイヤフラム    | 圧力 → 力  |
| スプリング     | 変位 ⇄ 力  |
| レバー       | 力 ⇄ 力   |
| リンク機構     | 変位 → 変位 |
| フラップ・ノズル  | 変位 → 圧力 |
| コントロールリレー | 圧力 → 圧力 |

### [3.3.2] 空気式工業計器の構造

空気式工業計器は、表3.2に示すような構造の簡単な機構部品の組合せで構成されている。例えばフラッパー・ノズルは、フラッパーとノズルの間の間隔がせばまるとノズルの背圧は高くなり、広がると低くなることを利用して微小な（ミクロンオーダー）変位を空気圧に変換する。ノズル背圧により得られる空気量は非常に微量であるため、これを大きな容量をもつ伝送管や調節弁に直接接続すると応答が極めておそくなってしまう。図3.4に示すコントロールリレーはノズルの背圧の変化を受けて、これを0.2～1.0kg/cm<sup>2</sup>の空気圧力に変換し、多量の空気を出力できる空気のパワー増幅器の機能をはたす。

図3.5に 力平衡式PID調節計の原理図を示す。支点をはさんでレバー上に四つのベローズが配置され、それらからの力でレバーが平衡するように構成されている。ベローズは圧力を力に変換する機能をもつ。設定、測定ベローズには信号空気圧 $P_s$ 、 $P_m$ が与えられ、レバーに対して逆方向の力の比較を行う。設定と測定信号間に偏差 $\varepsilon$  ( $P_s - P_m$ )があると、レバーにトルクが生じ、フラップ・ノズルの間隔が変化してノズル背圧の変化となり、コントロールリレーにより出力信号圧 $P_o$ が変化する。この出力信号の変化は比例ベローズに与えられ、偏差によって生じたトルクを打ち消す方向にトルクを発生し、レバーの平衡を保つように動作する（比例動作）。出力信号は微分絞り・微分タンク機構を

通って微分ペローズに導かれるが、絞り・タンク機構は圧力に対して1次遅れ要素として作用するので、微分ペローズからの力は出力 $P_o$ に対して1次遅れを伴ってレバーに伝えられ平衡を保つように動作する（微分動作）。微分ペローズに対向する位置に積分ペローズが配置されて、積分絞り・積分タンク機構を通して積分ペローズに導かれ、積分動作を実現している。比例ゲインは支点の位置によって、微分、積分の時定数はそれぞれの絞り機構によって変更される。このように簡単な機構で、PID制御をはじめ表3.1に示すプロセス制御に必要な各種の機能が、高い信頼性をもって実現されたことは驚嘆に値する。

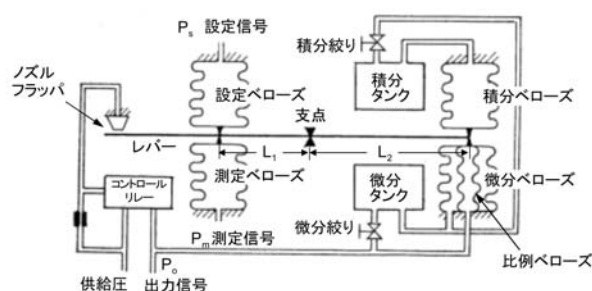


図3.5 力平衡式PID調節計の原理図<sup>(6)</sup>

### [3.3.3] 工業計器：技術提携から自主技術へ

日本の工業計器はアメリカからの技術導入から始まった。1953年に(株)山武は米ハネウエル社と合併し、1956年に社名を「山武ハネウエル計器(株)」に変更した。(株)横河電機製作所は1955年に米フォックスボロ社(Foxboro)と、(株)北辰電機製作所は1958年に米フィッシュヤ・アンド・ポーター社(Fischer & Porter)と、(株)島津製作所は1959年に米テイラー社(Taylor)と、それぞれ技術提携した。その後、各社とも提携先の工業計器製品の国産化を始め、さらに自社製品の開発・生産へと発展していった。

## 3.4 電子式計装システム

### [3.4.1] アナログ調節計：4～20mAへの統一

電子管に代わってトランジスタが工業計器に使われるようになり、1958年、ハネウエル社は空気式テルオセット(Tel-O-Set)を電子化したETOSを、フォックスボロ社はPCIを電子化しECI(Electronic Consortrol Instrumentation)を発売したが、システムのインターフェイス信号は、ETOSが4～20mA、ECIが10～50mAであった。国産では横河のECSが5～25mA、北辰のε-lineが2～10mAと、内外各社がそれぞれ異なる電流値を採用していた。1961年には山武

がETOSを、横河がECIを国産化し、電流信号レベルは4～20mA、10～50mAの競争となったが、1973年、ISA(Instrument Society of America)によって4～20mAに規格が統一された。アナログ電子式調節計の電流信号に関する規格統一までの経緯を表3.3に示す。

表3.3 アナログ電子式調節計：規格統一までの経緯

|      |                            |
|------|----------------------------|
| 1958 | Honeywell: ETOS(4～20mA)    |
| 1958 | Foxboro: ECI(10～50mA)      |
| 1959 | 横河: ECS(5～25mA)            |
| 1961 | 横河: ECI(10～50mA)国産化        |
| 1961 | 山武: ETOS(4～20mA)国産化        |
| 1962 | 北辰: ε-line(2～10mA)         |
| 1963 | 山武: VSI 縦型偏差指示計(4～20mA)    |
| 1964 | 横河: 62V 縦型偏差指示調節計(10～50mA) |
| 1965 | 横河: EBS(10～50mA)           |
| 1971 | 横河: Iシリーズ(4～20mA)          |
| 1973 | ISA: 4～20mAに統一             |

### [3.4.2] 電子式アナログ計装システム

電子式アナログ計装システムは、表3.1に例示した空気式計装システムの機能体系を基本的に引き継ぎ、それらを電子回路で実現したものである。伝送器などのフィールド機器も電子式となり、伝送信号は4～20mAに統一された。温度は熱電対や測温抵抗体で計測するが多いが、これらに対しては温度変換器が用意され、温度信号はリニアライズや基準接点補償を行って4～20mAまたは1～5V信号に変換された。システムは、指示計、記録計、調節計、警報設定器など、オペレータが操作するパネル計器と、各種の演算器などパネル裏面に配置されるラック計器とから構成された。表3.4に電子式アナログ計装システムの機器構成例を示す(横河：Iシリーズ)。これは空気式計装以来培われてきたいわば計装機能の体系ともいうべきもので、この機器構成はその後のDCS(横河：CENTUM)にもそのまま引き継がれ、その機能はソフトウェアで実現されていった。

図3.6に電子式アナログ計装システムによる、温度制御の例を示す。プラントの温度計測には熱電対が多く用いられる。熱電対はmVレベルの電圧を発生するが、温度に対して非線形であるため、温度変換器ITEによってリニアライズと基準接点補償を行い、入力温度レンジの0～100%が1～5V電圧信号に変換される。ITEはラック計器であり計装盤の裏面に取り付けられている。ITEの出力は調節計ICEに温度測定値(PV)として与えられ、ICEは設定値(SV)に対してPID制御演算を行い、結果を4～20mAの制御出力(MV)として調節弁(ポジションナ)に出力し、熱源の流量が制

表3.4 電子式アナログ計装システムの機器構成例

| パネル計器         | ラック計器/その他        |
|---------------|------------------|
| ICE 指示調節計     | ITE mV温度変換器      |
| ICD 偏差指示調節計   | IDB デイストリビュータ    |
| ICE 比例調節計     | IKY 警報設定器        |
| IML 手動操作器     | ISQ 開閉演算器        |
| IRO 比例設定器     | ICM 加減演算器        |
| IAS オートセレクト   | ICM 乗除演算器        |
| IKH 警報設定器     | ISN 積算演算器        |
| IKH On-Off調節計 | ILS HIGH/LOWリミッタ |
|               | ILS HIGH/LOWセレクト |
|               | IBS ブースタ         |
|               | IBS リバースアンプ      |
|               | IST アイソレータ       |
|               | IDN 電源箱          |

御される。ICEのPID制御演算は、図3.7に示すような電子回路で実現されている。ITEの出力は記録計IRVに与えられ、プロセスの制御状態が連続記録される。ICEやIRVはパネル計器であり計装盤の前面にとりつけられ、オペレータによる監視・操作に使用される。差圧伝送器などに対しては、デイストリビュータIDBから電力が供給され、プロセス変数の値に対応した4～20mAの電流が流出し、この電流値が伝送器からの測定値となる。表3.4は、電子式アナログ計装システムとして、プロセス制御に必要な機器構成として用意されたものであり、これらを組み合わせて様々なプロセスの計装が行われた。

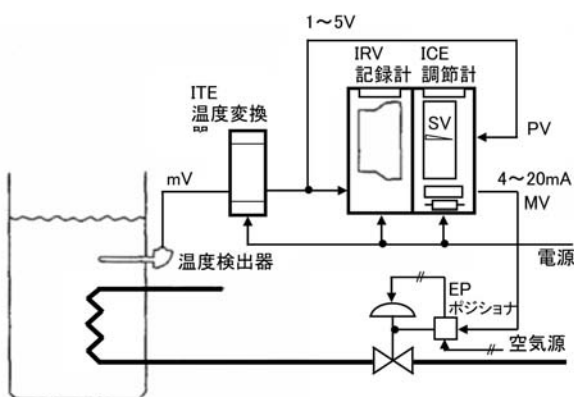
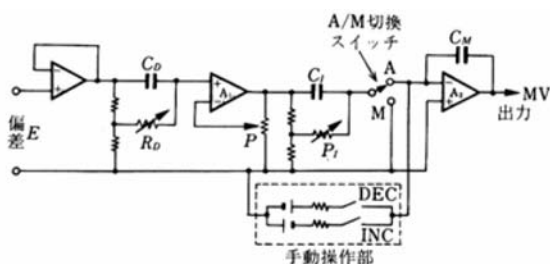


図3.6 電子式アナログ計装システムによる温度制御 (7)



$$M = \frac{100}{P} \left( e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad \dots \text{PID制御演算式}$$

図3.7 アナログ調節計のPID制御回路例

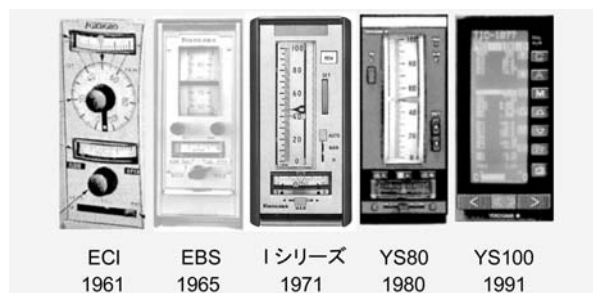


図3.8 電子式調節計：フェイスプレートの変遷

電子式アナログ計装システムは、表3.3に示すように、1958年にHoneywell (ETOS)、Foxboro (ECI) から世界に先駆けて出されたが、その後内外各社から新システムが開発され、半導体など電子部品の進歩を取り入れながら世代交代が進んでいった。また様々なプロセスの自動化が進み、計装盤は電子式調節計を中心に高密度化が進み、さらにセミグラフィックやフルグラフィックパネルによるパネルオペレーションへと進化していった。また多数の制御ループを扱う大規模計装パネルでは、オペレータの負担を軽減し安全なプラント運転を確保するために、調節計や指示計を横一列に配置し、グリーンベルトを基準に設定値からの偏差が一目でわかるようにした偏差指示計が用いられるようになった。1963年、山武が発表したVSI (Vertical Scale Indicator) 縦型偏差指示計がその先鞭をつけ、1964年に横河の62V、1965年のEBSへと続き、パネルオペレーションの高度化を牽引した。図3.8に、電子式調節計のフェイスプレートの変遷を示す。

### [3.4.3] 電子式アナログ計装システムの高信頼化

電子式アナログ計装システムが導入された1958年当時は、半導体はゲルマニウムトランジスタの時代であった。その後シリコントランジスタが実用化され、アナログ調節計EBS (1965) はじめ多くの工業計器にも使用されるようになった。Iシリーズ (1971) ではリニアICが全面採用された。mVレベルの信号に対しては低ドリフト特性、PID演算などには高入力インピーダンスの演算回路が要求されるが、当時はプロセス制御に使用できるレベルの汎用品はなく、自社開発された。電子式アナログ計装システムは、このような半導体電子部品の進歩を取り入れながら進化して行ったが、常にその高信頼化が追求された。システムの高信頼化の手法として信頼性工学が取り入れられ、信頼性設計が追求された。電子部品の故障率データや製品の故障率計算の手法は、MIL-HDBK-217A (1965) が参考にされた。IC化により部品点数を少なくし、部品の評価、エージング、ディレーティングなどによって



個々の部品の故障率を下げることに努力が払われた。低消費電力化も進められ、内部発熱による温度上昇も最小限に抑えられるよう、熱設計上の配慮がとられた。図3.9にアナログ調節計の消費電力の変遷を示す。このような経過を経て、1970年代半ばにはアナログ電子式調節計は空気式調節計に匹敵する信頼性をもつことが、フィールドデータから裏付けられた。

信頼性工学にもとづく設計手法や部品の評価技術、ディレーティングなど、システムの高信頼化手法は、空気式から電子式と築いてきた計装システムの機能とともに、後のDCSに引き継がれ、DCS時代が大きく開花する基盤となった。

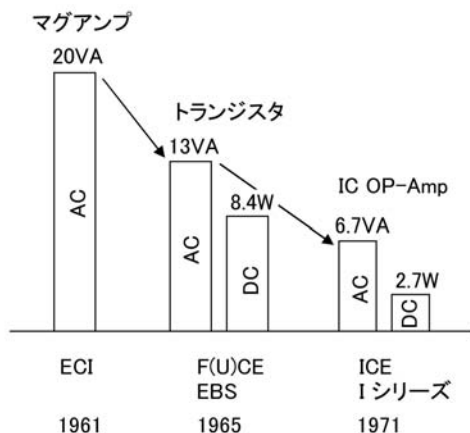


図3.9 アナログ調節計の消費電力の変遷<sup>(8)</sup>

#### [3.4.4] 1ループコントローラ

1971年に世界初のマイクロプロセッサIntel 4004が発表され、1974年に8ビットMPU8080、その後16ビット

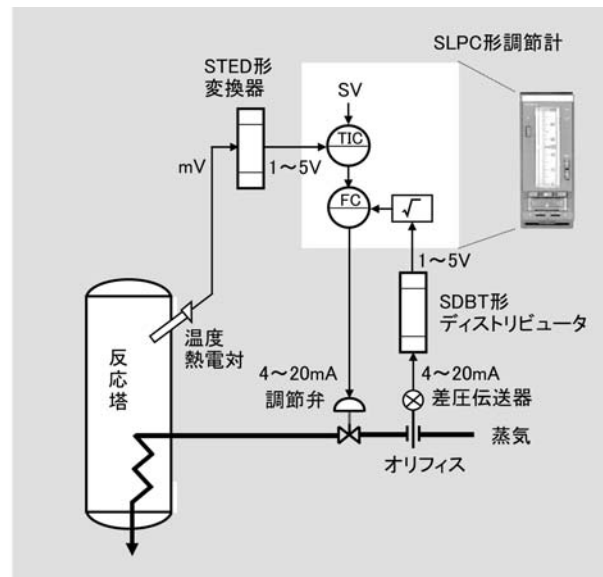


図3.10 SLPCによるカスケード制御<sup>(9)</sup>

ト32ビットと急速に高集積化が行われ、さまざまな電機製品のインテリジェント化が進んでいった。計装システムにおいてもアナログ調節計のシリーズが1979年から1980年にかけてマイクロプロセッサ化され、1ループコントローラと呼ばれるようになった。1979年にはMACTUS200（三菱）、コンパクトコントローラCC-F（富士電機）、TOSDIC211（東芝）、プロセスマイクロコントローラ（島津）、1980年にはユニトリールMシリーズVI87（日立）、HOMAC300（北辰）、YEW SERIES80（横河）が相次いで開発され、マイクロプロセッサによる1ループコントローラの時代が始まった。マイクロプロセッサによるインテリジェント

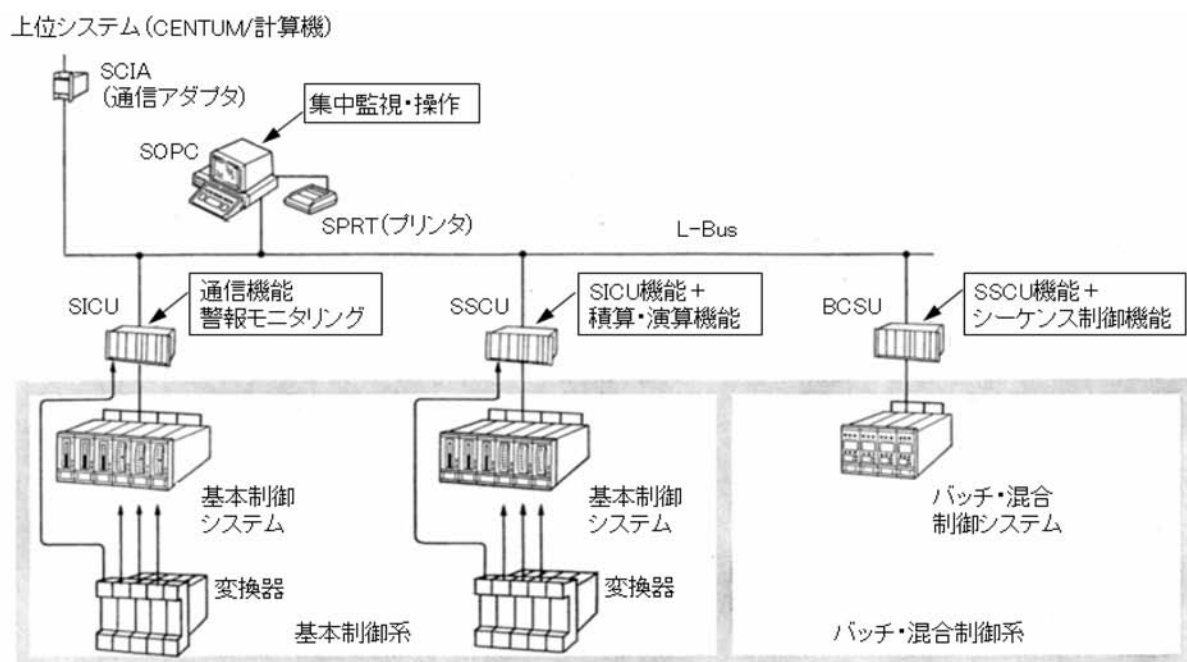


図3.11 YEW SERIES80のシステム構成と通信機能<sup>(10)</sup>

化により、複合的な機能を1台の計器に組み込むことが可能となった。図3.10にSLPC（横河：YS80）によるカスケード制御の例を示す。

1台のSLPCによって、流量信号に対する開平演算と、1次（温度制御系）2次系（燃料流量制御系）によるカスケード制御が行える例が示されている。さらに、バッチ・混合制御などの専用システムを構築する自由度も大きくなった。また、1ループコントローラは通信機能が強化され、DCSや上位計算機との通信を可能にし、従来のアナログ調節計では不足がちであったマンマシンインタフェースの改善がはかられた。図3.11にYEW SERIES80のシステム構成と通信機能を示す。な

お、1ループコントローラは、内部の処理はマイクロプロセッサで行われているが、従来のループバイループのアナログ計装システムの体系の延長であり、DCSとは区別されている。

#### 参考文献

- (1) 日本損害保険協会発行「予防時報」,140, P18
- (2) (3) (4) (5) (6) 横河電機：工業計器ハンドブック 東京電機大学出版会
- (7) 横河電機：ISERIESシステム解説書 TI 1B3A1-02
- (8) 横河電機：Iシリーズの信頼性 TI 1B3A1-04
- (9) (10) 細川宗広ほか：横河技報 Vol.25 N0.2 (1981)

# 4 フィールド機器

## 4.1 プロセス変数

プラントの状態を表すプロセス変数は温度、圧力、流量、液位、成分など多岐にわたっており、それらを計測するさまざまなセンサが使用されている。本章では、実プロセスで多数を占めている流量計測センサについて述べる。

## 4.2 流量計測

図4.1に流量計開発の歴史を示す。この図は英国国立技術研究所の流量計測の大家スペンサー博士によって作成されたものである。水道や都市ガスの流量計測用にせき式や容積式流量計が開発されたと言われるが、その後さまざまな原理の流量計が開発されてきたことが示されている。現在のプロセス産業では各種の物質が扱われ、計測制御の対象となっているが、その状態も気体、液体、粉体などさまざまである。測定流体の種類や状態に適した表4.1に示す様な方式の流量計が使われている。本稿では代表的な差圧式流量計について解説する。

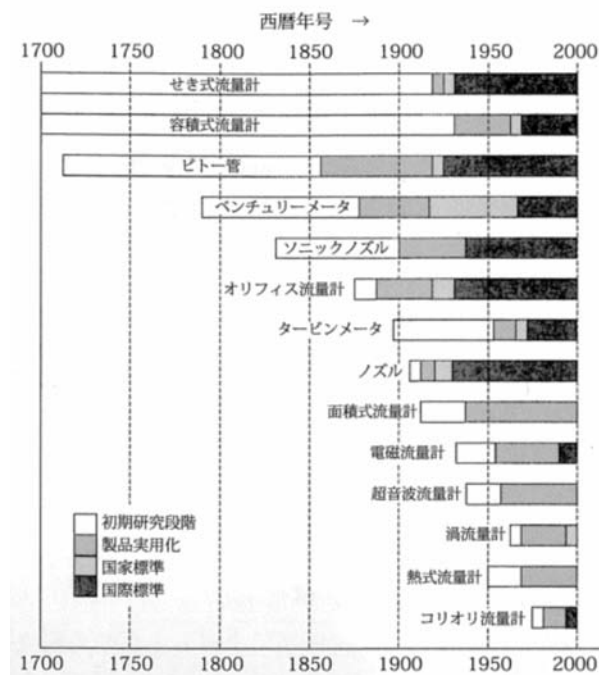


図4.1 流量計開発の歴史<sup>(1)</sup>

表4.1 測定流体と流量計<sup>(2)</sup>

| 流量計<br>測定流体        | 容積<br>流量計                                             | 面積<br>流量計 | 差圧<br>流量計            | タービン<br>流量計 | 渦<br>流量計 | 超音波<br>流量計   | 電磁<br>流量計   | 質量<br>流量計<br>(コリオリ式) | 質量<br>流量計<br>(熱式) | 流速水位式<br>流量計 | せき式<br>流量計 |
|--------------------|-------------------------------------------------------|-----------|----------------------|-------------|----------|--------------|-------------|----------------------|-------------------|--------------|------------|
| 清浄な液体              | ◎                                                     | ◎         | ◎                    | ◎           | ◎        | ◎伝搬<br>×ドップラ | ◎           | ◎                    | ◎                 | ◎            | ◎          |
| 汚れた液体<br>(下水・排水など) | ×                                                     | △         | ○<br>フローノズル          | △           | △        | ○伝搬<br>◎ドップラ | ◎           | ◎                    | ○                 | ◎            | △          |
| 粘着性液体              | ○                                                     | △         | ○                    | △           | △        | ○            | ○           | ◎                    | △                 | ○            | △          |
| 石油・オイル             | ◎                                                     | ◎         | ◎                    | ◎           | ○        | ○            | ×           | ◎                    | ×                 | ×            | ×          |
| 腐食性液体              | ○                                                     | ○         | △                    | △           | ○        | ○            | ◎           | △                    | ○                 | ×            | ×          |
| 研磨性スラリ             | ○                                                     | △         | ○<br>ベンチュリ<br>フローノズル | ×           | ×        | ○            | ◎           | ○                    | ○                 | ○            | ×          |
| 繊維性スラリ             | ×                                                     | △         | ○<br>同上              | ×           | ×        | ×伝搬<br>○ドップラ | ○           | △                    | △                 | ○            | △          |
| 低速流体               | ○                                                     | ○         | ○                    | ○           | ×        | ○            | ◎           | ○                    | ○                 | ×            | ×          |
| 脈動流体               | ○                                                     | ○         | △                    | △           | ×        | ○            | ○           | ○                    | △                 | △            | ×          |
| 水蒸気・ガス             | ◎                                                     | ◎         | ◎                    | ◎           | ◎        | △            | ×           | ○                    | ◎                 | ×            | ×          |
| 高温流体               | ○                                                     | ○         | ◎オリフィス<br>○その他       | ○           | ○        | ×            | ○<br>液体(注1) | ○<br>液体(注2)          | ○                 | ×            | ×          |
| 高圧流体               | ○                                                     | ○         | ○                    | ○           | ○        | △            | ○<br>液体     | △                    | ○                 | ×            | ×          |
| 適合順位               | ◎:最適 (注1)最高180℃<br>○:適 (注2)最高350℃<br>△:条件付使用可<br>×:不可 |           |                      |             |          |              |             |                      |                   |              |            |



#### [4.2.1] オリフィスによる流量計測

差圧式流量計測の歴史は古く、オリフィスなどの絞り機構の上下に生ずる差圧を測定することによって、流体の流量を測定する方法が考案され、1909年にはホジソンによって D、D/2タップオリフィスが開発されている。オリフィスによる差圧計測は工業用流量計測の約8割に用いられている。管路を流れる流体がオリフィスによって絞られると、その上下で圧力差が生ずるが、流体に対するエネルギー保存則から式4.1が導かれる。これはベルヌーイの定理と呼ばれ、非圧縮性の理想流体の定常流（流速の時間変化が0）について成り立つ定理で、1730年頃発見されたと言われている。

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gz + p = \text{一定} \quad \text{--- [式4.1]}$$

ここで、密度  $\rho$ 、圧力  $p$ 、流速  $v$ 、高さ  $z$

差圧式流量計はこの原理を応用したもので、現在でも各プロセスにおいて最も多く使用されている流量計である。図4.2にオリフィス板に上流から流体が流れてきたときの圧力分布図を示す。オリフィスの寸法を図のように取り、上流側断面aにおける流体の密度を  $\rho_1$ 、圧力を  $P_1$ 、下流側断面bにおける圧力を  $P_2$  とすると、オリフィスを流れる流体の質量流量  $Q_m$  は式4.2のように表され、流量が差圧の平方根に比例することがわかる。

ここで

$\beta$  : 絞り口径比  $= d/D$

$C$  : 流出係数

$\varepsilon$  : 膨張補正係数

式4.2はオリフィス板、ヴェンチュリー管、及びフローノズルに普遍的にあてはまる。差圧流量計の種類によって係数  $C$ 、 $\varepsilon$  が変わるだけである。オリフィスに代表される絞り機構を配管中に入れて、その前後の圧力差を測れば、流量は差圧の平方根に比例するとい

う原理が適用されている。

$$Q_m = \varepsilon C \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)} \quad \text{--- [式4.2]}$$

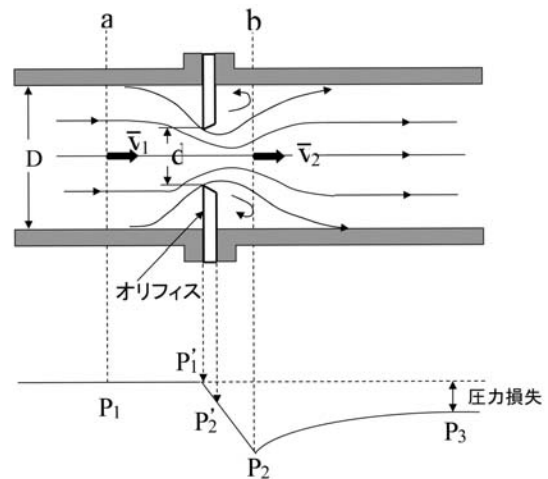


図4.2 オリフィスと圧力分布 (3)



図4.3 オリフィス (4)

表4.2に差圧伝送器の技術の変遷を示す。力平衡式（空気式、電気式）、差動容量式、シリコン拡散抵抗式、シリコンレゾナントセンサー式など様々な方式が実用化されてきた。本章では、初期の空気式力平衡式差圧伝送器と最新のシリコンレゾナントセンサー式差圧伝送器について、その原理と技術的特徴について解説する。

表4.2 差圧伝送器の技術の変遷 (5)

| 年代                   | '60                                                                           | '70            | '80             | '90～                |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 原理                   | <div>力平衡式</div> <div>差動容量式</div> <div>シリコン拡散抵抗式</div> <div>シリコンレゾナントセンサ</div> |                |                 |                     |
| センサ素材                | <div>金属</div> <div>単結晶シリコン</div>                                              |                |                 |                     |
| 加工技術                 | 機械加工精度の向上                                                                     |                | 精密機械加工          | 3次元マイクロマシニング        |
| 電子部品                 | -                                                                             | IC             | マイクロプロセッサ       | LSI                 |
| 信号伝送                 | 空気圧信号<br>0.2～1kg/cm <sup>2</sup>                                              | アナログ<br>4～20mA | 4～20mA<br>+デジタル | Field Bus<br>(デジタル) |
| 精度                   | ±0.5%                                                                         | ±0.5% ±0.2%    | ±0.1%           | ±0.1%               |
| レンジアビリティ<br>(精度保証範囲) | 5～6                                                                           | 5～6            | 7～8             | 13～14               |

#### [4.2.2] 空気式差圧伝送器

空気式差圧伝送器の代表的製品として、フォックスボロ社から1951年に3A型d/pセルが発表され、その後1955年に13A型d/pセルに改良された（図4.4）。受圧部に図4.6のような独創的な二重ダイアフラムカプセルを設け、力平衡式のシンプルな構造により、高精度で安定した性能が実現された。特に力平衡方式により、ヒステリシスや摩擦誤差が少なく、かつ優れた直線性と外部からの振動や衝撃に強いコンパクト構造が実現した。このため世界的に非常に高い評価を受け、多くのプラントに使われ、ロングセラー製品となった。

図4.5にd/pセルの構造を、図4.7に断面構造を示す。二重ダイアフラムカプセルAにかかる差圧が増加すると、ダイアフラムには左から右方向に押す力が生じ、力棒Bの下側に、右向きの力が働く。力棒はダイアフラムシールEを支点として左に傾き、たわみ板Dを通じてフラッパーとノズルHとの間の間隙をせばめ、ノズルの背圧を上昇させる。この背圧はコントロールリレーIによって増幅され出力となる。同時にこの出力はフィードバックベローズGにも導かれ力に変換される。この力はレンジホイールFを支点としてレンジ棒Cによってフラッパーを引き戻す方向の力を与え、ノズルの背圧を下げようとする。このようにして出力圧力に比例した力と入力差圧に比例した力とが常に平衡し、伝送器には差圧に比例した出力空気圧を発生することになる。二重ダイアフラムカプセルには1/100mm程度の変位しか起こらない状態で力平衡している。レンジホイールの位置を変えると平衡する二つの力の比が変化し、0.2～1.0kg/cm<sup>2</sup>の出力を得るのに要する入力差圧すなわち測定スパンが変化することになる。レンジホイールを下におろせばスパンはせばまり上に上げれば広がる。このように13A型d/pセルは、極めてシンプルな構造で部品点数も少なく、安定で高い信頼性が得られた<sup>(8)</sup>。

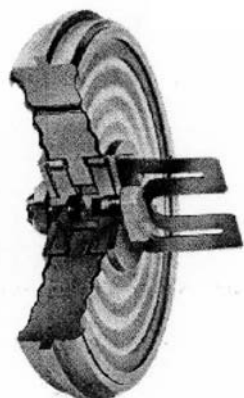


図4.6 二重ダイアフラムカプセル<sup>(8)</sup>



図4.4 空気式差圧伝送器13A型<sup>(6)</sup>

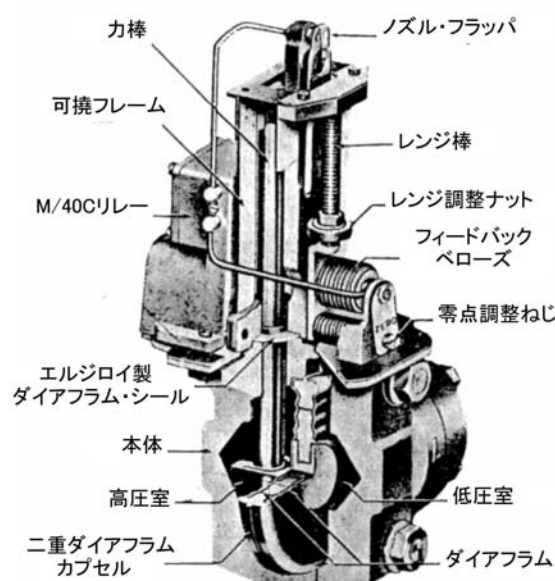


図4.5 差圧伝送器13Aの構造<sup>(7)</sup>

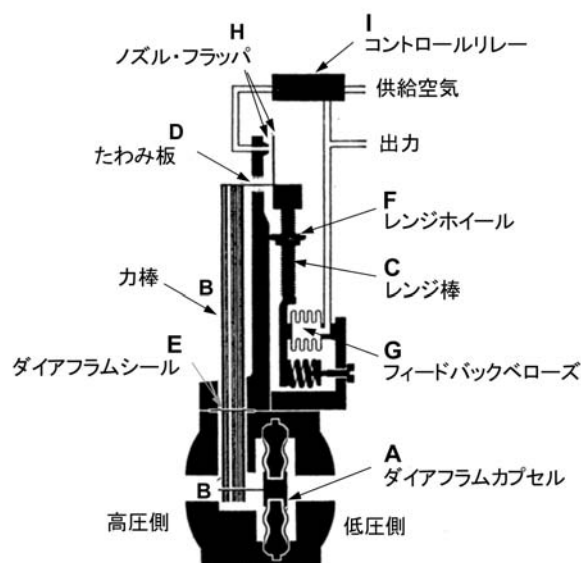


図4.7 d/p cellの断面構造<sup>(9)</sup>

### 【4.2.3】 シリコン振動式差圧伝送器

圧力センサにはピエゾ抵抗式、静電容量式、振動式などの方式がある。振動式圧力センサは、機械加工振動子の固有振動数の変化を利用するので精度が高く、またデジタルセンシング技術への展開が期待され、早くから着目されていたが、弾性体の素材や加工技術によるばらつきなどに課題があった。また振動子が周囲の流体の影響を受けやすく、用途も気体に限定されていた。1980年代に入りマイクロマシニング技術により単結晶シリコン上に3次元加工して高精度なシリコン振動子を作ることが可能になった。横河電機は早くからこの技術の工業計器への応用研究に着手した。1987年には真空マイクロキャビティの製作プロセスの開発に成功し、シリコン振動子を真空のシリコンマイクロキャビティの中に封じ込めて、これにより振動子を周囲の流体から隔絶することが可能になり、プロセス用の圧力センサチップが実現した。3次元モノリシック構造で単結晶シリコン振動子を真空封止した世界初の振動式センサであった。図4.8にシリコン振動子の構造を、図4.9にシリコン振動式圧力センサの構造を示す。振動子の梁の大きさは幅 $30\mu\text{m}$ 、厚さ $5\mu\text{m}$ 、長さ $500\mu\text{m}$ である。図4.10にシリコン振動式圧力センサの回路構成を示す。磁場中でH型振動子の片方に交流電流を流すと電磁力が発生し、振動子は上下に振動する。交流周波数がH型振動子の固有振動数と一致すると共振がおこる。磁場中で運動する導体には起電力が発生するので、もう片方の梁には共振周波数の交流電圧が発生し、これを正帰還させると、振動子は自励発振する。共振周波数は圧力によって変化するので、これにより圧力を測定することができる。シリコン振動子は非常に高いQ値（約50000）をもち、センサとして高い安定性と分解能が得られる。以上述べたシリコン振動子の共振周波数変化（レゾナント方式）を採用した圧力センサは、1992年プロセス用差圧伝送器として製品化された。1995年には、「マイクロマシニング技術を用いたシリコン振動式圧力センサの開発」に対して1995年第41回大河内記念賞が授与され、同時に全国発明表彰特別賞を受賞した。

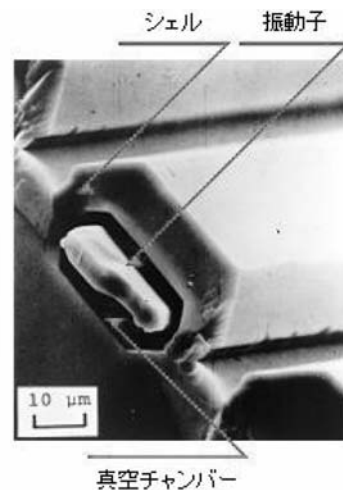


図4.8 シリコン振動子の構造 <sup>(10)</sup>

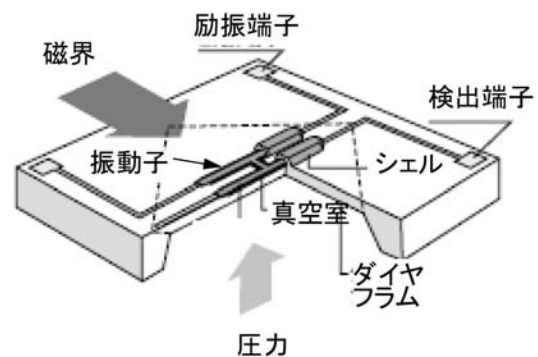


図4.9 シリコン振動式圧力センサの構造 <sup>(11)</sup>

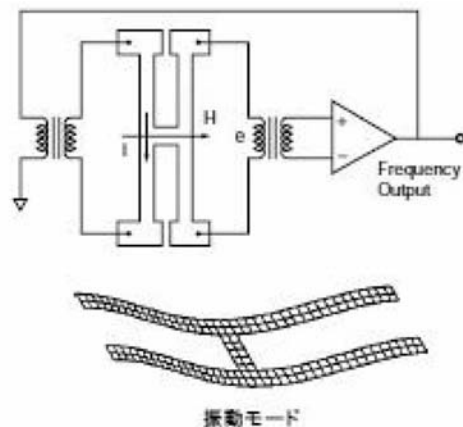


図4.10 シリコン振動式圧力センサの回路構成 <sup>(12)</sup>



図4.11はシリコン振動式センサを搭載した、差圧伝送器DPharpの外観を示す。図4.12に受圧部の構造を、図4.13にセンサアセンブリの構造を示す。ボディ部の中央に高圧側と低圧側を隔離するセンターダイアフラムがあり、プロセス圧はシールダイアフラムとセンターダイアフラムの間に封入されたシリコンオイルを介してセンサアセンブリに伝達される。センサアセンブリにはシリコンセンサチップとそれを支えるスペーサ、永久磁石とホルダーとハーメチック端子からなっている。シリコンセンサチップの両面に高圧/低圧側のプロセス圧が導かれ、差圧が計測される。

差圧伝送器はオリフィスの上流と下流の圧力を差圧として検出するが、流体密度補正等のために上流側の圧力（静圧）も測定し補正演算に使用する。DPharp型差圧伝送器にはMEMS技術によりシリコンダイアフラム上の引っ張り歪と圧縮歪が発生する箇所に2つの振動子が形成されている。それぞれの発振周波数 $f_1$ 、 $f_2$ の差から差圧が、和から静圧が求められる。ひとつのダイアフラムの変形から、差演算と和演算で差圧信号と静圧信号を同時に算出できることは、シリコンレゾナントセンサの大きな特徴である。



図4.11 シリコン振動式差圧伝送器DPharp<sup>(13)</sup>

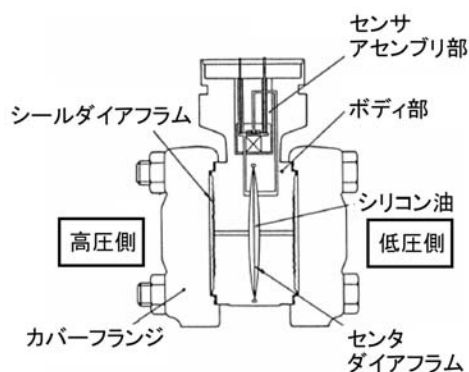


図4.12 受圧部の構造<sup>(14)</sup>

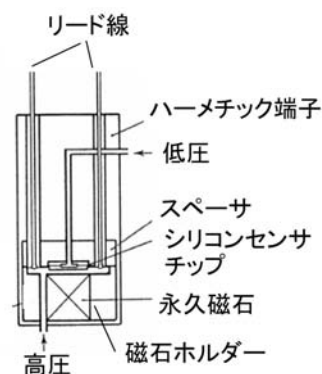


図4.13 センサアセンブリの構造<sup>(15)</sup>

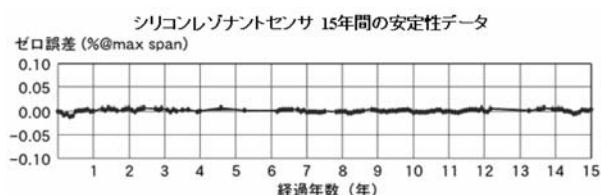


図4.14 シリコンレゾナントセンサの安定性<sup>(16)</sup>

図4.15にセンサの製造プロセスを示す。基板の単結晶シリコンウェハに酸化膜を形成し、振動子部分に不純物濃度の異なる4層を連続的に形成する (a)。次に酸化膜とp+層を選択的に溶解除去し振動子と真空室の骨組み（シェル）を作る。これにより長さ500 $\mu$ m、厚さ5 $\mu$ mの振動子用のSiの梁をシェルの中に形成する (b)。続いてシェルと基板とのギャップをSiで埋め込み、振動子をシェル内に閉じこめる (c)。以上の3工程の後に、電極を取り出し、ダイアフラムを形成する。

このようにセンサを半導体プロセスで作成することによって、安定した品質のセンサを量産することが可能になった。弾性特性の優れた単結晶シリコンの使用

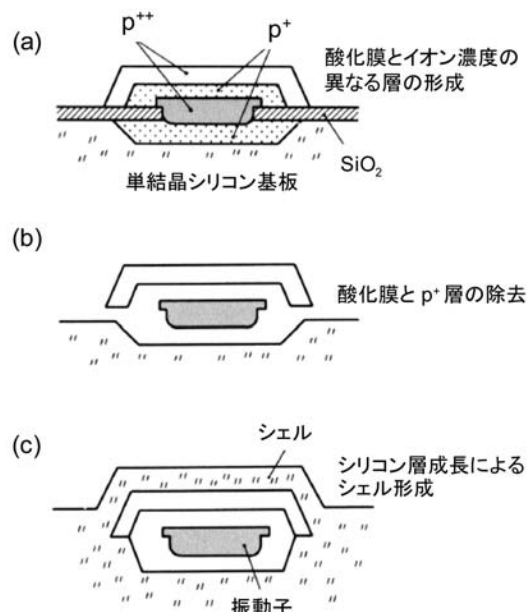


図4.15 センサの製造プロセス<sup>(17)</sup>

により、もともと振動式センサがもつ高感度、高分解能の特徴に加えて、精度、ヒステリシス特性、安定性が大幅に向上した。また従来の機械加工振動子と比べて、形状寸法で約2桁小型化が達成された。特性を代表するQ値や再現性は1桁向上し、入出力特性も直線近似の結果、 $\pm 0.01\%$ を満足している。また長期安定性もシリコン抵抗式センサに比較して1桁以上改善された。図4.14にシリコンレゾナントセンサの15年間の安定性データを示す。極めて高い安定性が得られている。

## 4.3 コントロールバルブ

### [4.3.1] コントロールバルブの歴史



図4.16 国産初のコントロールバルブ<sup>(18)</sup>

プロセス制御におけるバルブの歴史において、最大の技術革新はコントロールバルブの登場であった。単に流れを遮断する機能から、流量を自在に調節（コントロール）する機能、さらにそれを自動的にできるようになり、産業におけるバルブの役割は飛躍的に広がった。1930年代に入り産業のエネルギーが石炭から石油に切り替わり、石油精製の技術が高度化したが、それに伴いコントロールバルブの生産が工業先進国の欧米で始まった。日本では当初輸入に頼っていたが、1936年株式会社山武はトップ・アンド・ボトム・ガイド型複座自動調節弁の開発・生産に成功し、コントロールバルブの国産第一号機が当時の日本石油秋田精油所に納入された（図4.16）。これが日本のコントロールバルブ技術の歴史の原点にあたる。その後産業の発展とともに、コントロールバルブは広く普及していったが、1956年9月に機械工業振興臨時措置法により高温高压コントロールバルブが対象業種に指定され、設備の近代化、技術の高度化が促進され、バルブ工業全体の技術水準が大幅に向上する契機となった。1964年には、山武は従来のトップ・アンド・ボトム・ガイド型調節弁とは構造を大きく異にするケージ型調節弁を

世界で初めて商品化し発表した。ケージ型調節弁は調節弁本体構造の大きな変革であり、その結果、高安定、低騒音、取り扱い容易性等の特徴がもたらされた（図4.18）。その後1970年代にかけて石油精製やコンビナートの建設が進み、アンモニアプラント用の超高压弁、LNGプラント向けの極低温弁（ $-161^{\circ}\text{C}$ ）、大容量、低騒音など、多様な流体仕様に対応した各種の調節弁が開発され、プロセス制御の発展を支えた。

### [4.3.2] コントロールバルブの構成

図4.17に示すように、コントロールバルブは調節弁本体と駆動部から構成される。プロセス制御装置からの操作出力は、空気圧信号に変換されてコントロールバルブのダイヤフラムに送られ、ダイヤフラムに直結しているステムを上下させ、調節弁本体の内弁が上下することにより、流体の流れが制御される。次のようなきびしい条件下にある調節弁は、平常の空気圧20～100kPa（ $0.2\sim 1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ ）では作動遅れが出たりするので、空気圧力を増幅して、正確に作動するよう、バルブポジショナーが使用される。

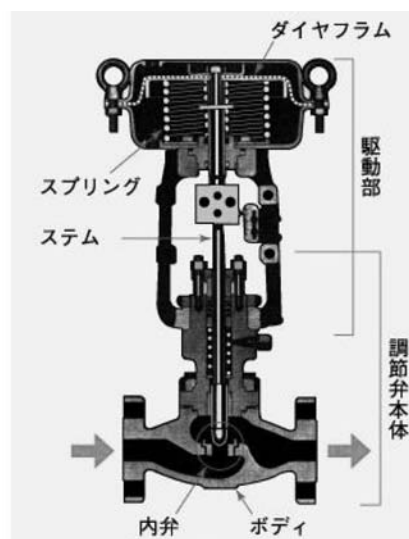


図4.17 コントロールバルブの構造<sup>(19)</sup>

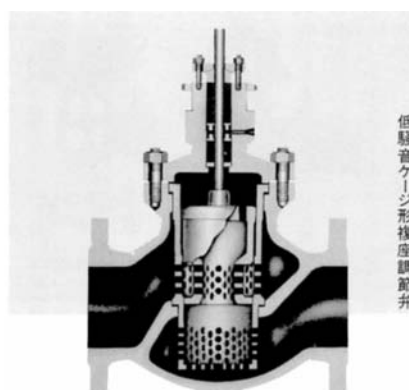


図4.18 ケージ型調節弁の本体構造<sup>(20)</sup>

- ① 大口径のもの
- ② 高圧系統で使用するもの
- ③ 調節弁前後の差圧が大きいもの
- ④ 作動用空気メイン配管からの距離が遠いもの

#### [4.3.3] コントロールバルブ内の流体

コントロールバルブは流量を制御するものであるが、流路が絞られる弁座近傍では、非常に高速の噴流が狭い弁空間内で急激に減速する過程をとる。高速流体のエネルギーの大部分はバルブ壁面との摩擦や流体の内部摩擦として散逸されるが、一部は壁面振動や騒音のエネルギーに変換され、壁面材料を破壊するエネルギー源ともなる。高圧気体を減圧すると、気流はバルブの最縮流部で音速に達しその下流で超音速流となって、衝撃波の発生を含む複雑な減速過程となる。液体の場合には、バルブ下流部で圧力が局部的に低下すると、蒸気や含有気体を含む泡が発生する。これはキャビテーションと呼ばれ、この泡の発生・崩壊に伴って管路壁やバルブの接液部に大きい力が加わり、損傷を生ずる原因になる（壊食：Erosion）。産業用プラントではキャビテーション条件下でもコントロールバルブが運転される場合が多い。弁プラグが壊食されると、バルブの制御性能や締切性能の劣化、さらにはプラグ破損の事態も生じる。図4.19にコントロールバルブ内部の流体挙動と摩耗の関連を示す。このようにコントロールバルブは実稼働を通して流体からさまざまなモードで摩耗され続けるが、経時変化の把握は難しく、機能劣化が顕在化して始めて損傷が問題になることが多かった。このためバルブ自体の耐摩耗性を向上させる設計上の

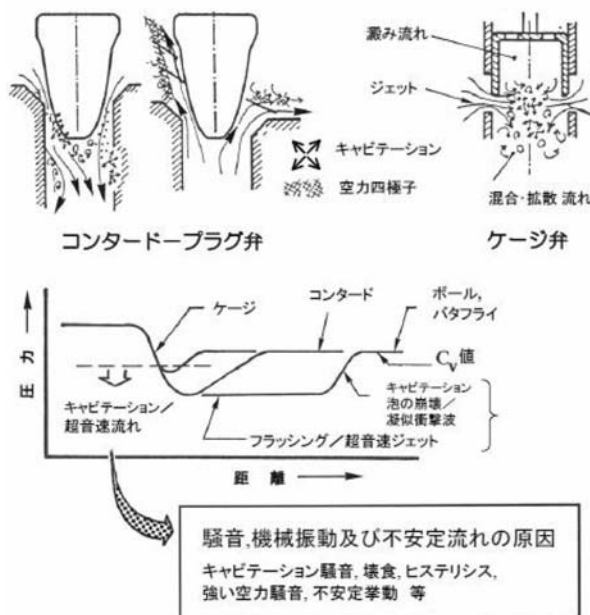


図4.19 コントロールバルブ内の流体 <sup>(21)</sup>

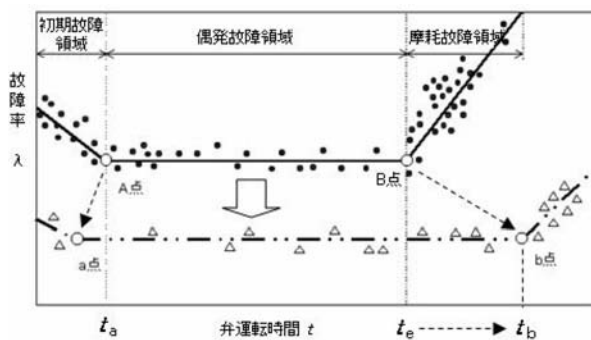
工夫が継続的に行われてきたが、同時に、この摩耗の進行を予測する手法の検討も様々な角度からなされてきた。以下に述べるコントロールバルブのインテリジェント化（マイクロプロセッサ搭載）によって、稼働状態の把握や自己診断機能の搭載が可能になった。

#### [4.3.4] コントロールバルブのインテリジェント化

4-20mAアナログ統一信号に代わる通信インターフェイスとして、1984年にIECでフィールド機器用デジタル通信の標準化構想が提案された。その後10年余りの検討期間を経て1996年に規格（FOUNDATION Fieldbus H1）として制定された。このような動きの中で、山武は1984年に独自技術により世界に先駆けてデジタル・ポジショナを開発した。その後マイクロプロセッサが搭載され、バルブと組み合わせる際のオートチューニング機能をはじめとして、バルブの最適制御機能、診断機能、リミットスイッチ機能などの機能が実現された。バルブの最適制御機能ではタイトシャット・フルオープン、バルブCV特性設定機能などが実現された。診断機能では、出力圧のモニタ、ストローク回数やバルブの開閉時間の積算、ポジショナの自己診断機能などがあり、どの弁開度でどのくらいの時間作動していたかを記録することが可能になった。図4.20に、コントロールバルブの故障率曲線を示す。バスタブ曲線の初期故障期間、偶発故障期間、摩耗故障期間それぞれの期間において設計、製作、施工、運転、環境などの因子が原因となって故障が発生する。これら因子に対して適切な対応を適切な時期にすることで、故障率を下げたり、機能限界に到達してしまう時期を出来るだけ先に延ばすことができる。バルブの寿命の主要因は4.3.3で述べたように内部の摩耗であるが、摩耗進行のメカニズムが解明され、フィールドでの事例が蓄積されてくると、図4.20の故障率曲線から寿命を推定することが可能になり、予知保全が可能になる。バルブ内部が摩耗してくると図4.22に示す流量特性が変化（例：イコールパーセント特性の実線から破線へ）してくるが、図4.21のようなクローズドループで制御が行われている場合には、バルブ特性の変化を補う方向に調節計の出力（MV）が変化してPVが一定に保たれるので、見かけ上の変化はなく、摩耗の進行はわからない。実際の動作は、図4.22の例では、バルブの動作点がA点からB点に移動して、図4.21のクローズドループの制御が行われている。コントロールバルブがインテリジェント化されることによって、このような内部変化を稼働履歴と関連づけてとらえることができるようになり、効果的な保全情報が提供でき



らなっている。



プラントに設置される調節弁群の故障率曲線(概念図)

AMF保全支援システムを用いて多くの調節弁をより適切な保全管理下におく、弁故障発生率が低下し、その結果、安定期のさらなる延長が可能となる。

図4.20 コントロールバルブの故障率曲線<sup>(22)</sup>

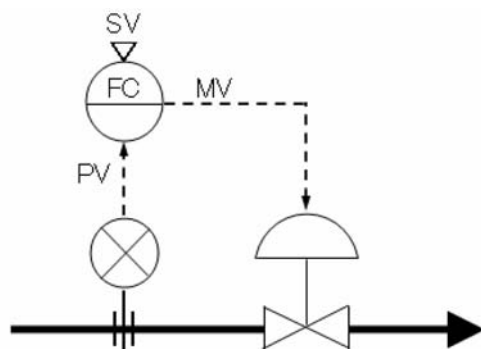


図4.21 制御のクローズドループ

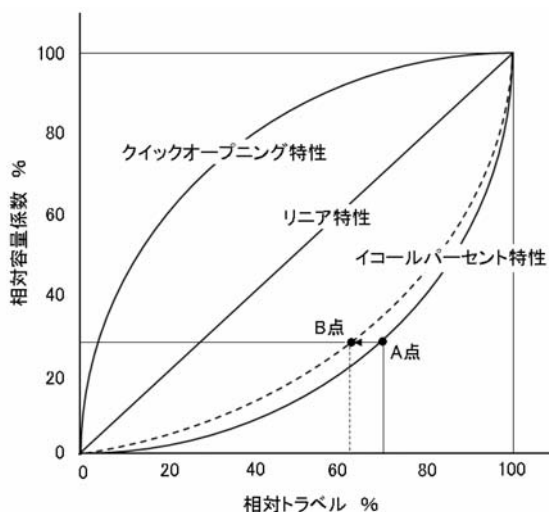


図4.22 コントロールバルブの流量特性

## 参考文献

- (1) 小川胖：流れわざのシルクロード 日本工業出版 p66
- (2) 流量計のナビ：(社)日本計量機器工業連合会 p11
- (3) 流量計のナビ：(社)日本計量機器工業連合会 p74
- (4) OVAL社資料より
- (5) 流量計のナビ：(社)日本計量機器工業連合会 p73
- (6) (7) (9) 北島太平：コンソールドシリーズ (2) 横河技報 通巻17号No.5 p87, 88 (1959)
- (8) 工業計測ハンドブック 空気式計器編 横河電機製作所編 東京電機大学出版局 p50
- (10) (11) 三枝徳治ほか：横河技報 Vol.36 N0.1 p22 (1992)
- (12) 横河テクニカルブックレット：ミクロの竖琴 [DPharp] Project-y No.03
- (13) (14) (15) 三枝徳治ほか：DPharp電子式差圧伝送器 横河技報 Vol.36 N0.1 p23 (1992)
- (16) 石川環ほか：新差圧・圧力伝送器DPharpEJXシリーズ横河技報 Vol.48 No.1 (2004) p13~18
- (17) 三枝徳治ほか：DPharp電子式差圧伝送器 横河技報 Vol.36 N0.1 p23 (1992)
- (18) 山武：コントロールバルブ物語 p11
- (19) (株)エム・システム技研：MS TODAY (2006.7)
- (20) 山武：コントロールバルブ物語 p13
- (21) 奥津ほか：調節弁内部の流体挙動 計測技術 (1990.4) p35
- (22) OKUTSU & KURODA：IP SERVICE No.WO/2003/023540 "Failure Prediction Support Device" (World Intellectual Property Organization)

# 5 デジタル計装システム

## 5.1 計算機技術の変遷

表5.1に、DCSの誕生に至るまでの制御用計算機の歴史を示す。プロセス制御に応用された最初のコンピュータシステムは、Hughes Aircraft社が1954年に開発したDIGITACであると言われている。1956年には、計算機が実プロセスのロギングとSPC（Set Point Control）に使用されるようになった。プロセスを直接制御するDDC（Direct Digital Control）は、1959年に誕生し、1964年にはDDCの具備すべきハード/ソフト上の要件が体系的にまとめられた論文が発表されている。1964年、IBMから、革新的な技術を駆使したSystem/360が発表された。SLT（Solid Logic Technology）などの実装技術、CPU制御のマイクロプログラミング技術、オペレーティングシステムなど、計算機のハードウェア、アーキテクチャに画期的な進歩をもたらした。特にマイクロプログラミング技術はCPUの制御方式として、アーキテクチャに大きな影響を与えた。1965年Digital Equipment社から世界初の大量生産されたミニコンピュータとしてPDP-8が発表された。プロセスを直接制御するDDCシステムには、極めて高い信頼性が要求されるが、半導体IC技術の進歩によりDDCシステムの実用化が可能になり、横河電機は1967年にYODIC500を東燃和歌山のハイドロス

キミング・プラントにテスト用として納入し、1968年にCPUが完全二重化されたYODIC600が採用され、DDCの実用性・有利性が実証された。1971年には、世界初のマイクロプロセッサ、インテル4004が発表され、その後の半導体技術の飛躍的な進歩とともにマイクロプロセッサの時代が到来する。マイクロプロセッサと通信技術とにより、DCS（Distributed Control System：分散型計装制御システム）のアーキテクチャが可能になり、1975年世界初のDCSとしてCENTUMが横河電機から発表された。TOSDIC200（東芝）、TDCS2000（山武、TDC2000：Honeywell）、MICREX-P（富士電機）、Σシリーズ（日立）と各社からDCSが相次いで発表され、1975年はDCS元年と呼ばれている。

## 5.2 DDC：Direct Digital Controlの要件

従来アナログ（連続、実時間）で行われていた制御を、デジタル（量子化離散値、時分割多重）で行うための様々な検討がなされた。DDCを実際に工業プロセスに適用するにあたっての問題点は何か、またそれらの問題はどのように解決されるべきかについて、DDCシステムが実用化されるために解決しなければならない諸問題が、1964年に次の論文に示されている。

表5.1 DCSの誕生に至る制御用計算機の歴史

| 年    | デジタルプロセス制御システム                                                       | 計算機技術                            | 半導体技術                        |
|------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 1945 |                                                                      | 計算機誕生：ENIAC                      |                              |
| 1947 |                                                                      | トランジスタ                           |                              |
| 1951 |                                                                      | UNIVAC                           |                              |
| 1954 | DIGITAC (Hughes Aircraft)                                            |                                  |                              |
| 1956 | プロセスのロギングとSPC (Set Point Control) に導入                                |                                  |                              |
| 1958 | 北辰：プロセス用電子計算機HOC100                                                  |                                  |                              |
| 1959 | DDC誕生                                                                |                                  |                              |
| 1960 | 北辰：プロセス用電子計算機HOC300                                                  |                                  |                              |
| 1963 | 東芝：プロセスコンピュータICD-507N                                                |                                  |                              |
| 1964 | 論文：DDCの具備すべき要件                                                       | IBM：System/360, Microprogramming | SLT (Solid Logic Technology) |
| 1965 |                                                                      | PDP-8                            |                              |
| 1967 | 横河：DDC, YODIC-500                                                    |                                  | DTL                          |
| 1968 | 横河：DDC, YODIC-600 山武：DDC, H20                                        |                                  | TTL (SSI)                    |
| 1970 | 東芝：ミニコンピュータTOSBAC-40A                                                |                                  |                              |
| 1971 | 横河：ミニコンピュータYODIC-100                                                 | 世界初のマイクロプロセッサ 4004               | 4Bit/2,300Tr/108KHz/10μm     |
|      |                                                                      | Unix：PDP-11                      |                              |
| 1972 |                                                                      | 8008                             | 8Bit/3,500Tr/200KHz/10μm     |
| 1973 | 北辰：HOC900コンピュータ・システム                                                 |                                  |                              |
| 1975 | DCS誕生：横河：CENTUM、東芝：TOSDIC200、山武：TDC (Honeywell)、富士：MICREX-P、日立：Σシリーズ | μCOM-16                          | TTL (MSI), MOS (LSI)         |

J.W.Bernard and J. F.Cashen: Direct digital Control-questions that must be answered.

19th Annual ISA Conf. and Exhibit, New York, Oct. 1964

この論文はDDCの実用化の要件について述べたものであるが、その後のDCS時代を築く技術的基盤を与えているとも言えるので以下にその要点について記す。

DDCシステムでは、調節弁駆動、フィードバック制御動作、サンプリング周期、および入出力信号の量子化レベルの4つの技術的側面が相互に関連している。

### [5.2.1] コントロールバルブの操作

DDCシステムに於いては、計算機に於ける計算の簡単さの観点から、あるいは手動/自動の切替の容易さなどの観点から、バルブの位置（開度）そのものを出力する（位置型）よりは、バルブの位置（開度）の変化量を出力する（速度型）ほうが適している。コントロールバルブの駆動方法には、可変速度駆動（Continuous Rate Actuation）と最大速度駆動（FSA：Full Speed Actuation）などがあるが、それぞれの方法に対して行ったシミュレーションの結果、DDCシステムに於いては実際に動かす最大速度でバルブを駆動するFSA方法がもっとも良いことが示された。

### [5.2.2] フィードバック制御動作

アナログ調節計で実現されている位置型PID制御の演算式は[式5.1]に示される。DDCシステムに於いては、これと等価な制御動作としていろいろな形のもの考えることができる。[式5.1]に対応する位置型制御動作は、[式5.2]のようになる。サンプリング系に於ける位置型PID演算式の基本形を与える。

$$P = K \left( e + \frac{1}{t_r} \int e dt + t_d \frac{de}{dt} \right) \quad \text{--- [式5.1]}$$

ただし  $P$ : 位置型出力信号

$K$ : 調節計ゲイン  $(= \frac{100}{P.B.})$

$e$ : 制御偏差  $(= R - M)$

$R$ : 目標値

$M$ : 測定値

$t_r$ : 積分時間

$t_d$ : 微分時間

$$P_n = K \left[ e_n + \sum_{m=n-n}^n \frac{\Delta t}{t_r} \cdot e_m + \frac{t_d}{\Delta t} (e_n - e_{n-1}) \right] \quad \text{--- [式5.2]}$$

ここで

$e_n = R_n - M_n$

$\Delta t$ : サンプリング周期

$n$ : サンプリング数

[式5.2] から、速度型の演算式として [式5.3]が導出される。

$$V_n = \frac{\Delta P_n}{\Delta t} = K \left[ \left( \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t} \right) + \frac{1}{t_r} e_n + \frac{t_d}{\Delta t^2} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right] \quad \text{--- [式5.3]}$$

FSAバルブを使用する場合は、出力位置の変化量  $\Delta P$  の計算を行えばよいので、この合の一般形として [式5.4] が求められる。

$$\Delta P_n = K \left[ (e_n - e_{n-1}) + \frac{\Delta t}{t_r} e_n + \frac{t_d}{\Delta t} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right] \quad \text{--- [式5.4]}$$

ここで、制御モードの調整用パラメータ  $\Delta t/t_r$ 、 $t_d/\Delta t$  は無次元量となり、プロセス時定数の絶対値には関係なく、その比だけで決められることが示されている。アナログ調節計では、さまざまなプロセスに適合するために、制御パラメータは極めて広範囲にわたって変えられることが必要であるが、DDCに於いてはプロセスの動特性に見合ったサンプリング周期を選んでやればよい。[式5.4] は [式5.5] のように変形することができるが、この式には積分動作に相当する項のみに目標値 ( $R$ ) が含まれている。このことは目標値変更の際に、比例項および微分項にキックを与えることがない事を示している。

$$\Delta P_n = K_1 (M_{n-1} - M_n) + K_2 (R - M_n) + K_3 (2M_{n-1} - M_{n-2} - M_n) \quad \text{--- [式5.5]}$$

ただし

$$K_1 = K$$

$$K_2 = K \cdot \frac{\Delta t}{t_r}$$

$$K_3 = K \cdot \frac{t_d}{\Delta t}$$

さらに、[式5.5] は [式5.6] のように変形することができ、各パラメータを全く独立に設定できる演算式となる。

$$\Delta P_n = K [(M_{n-1} - M_n) + K_r (R - M_n) + K_d (2M_{n-1} - M_{n-2} - M_n)] \quad \text{--- [式5.6]}$$

ただし

$$K_r = \frac{\Delta t}{t_r}$$

$$K_d = \frac{t_d}{\Delta t}$$

このように、DDCに於ける制御演算式はいろいろな形に変形でき、それぞれのもつ特性を生かした使い方が選択されて使用される。



### [5.2.3] サンプリング周期

サンプリング周期はプロセスの動特性とその系に適用される制御動作によって決められる。一般的にサンプリング周期がプロセス全体の時定数にほぼ等しい時に、よい制御性が得られる。サンプリング周期が長い方が計算機の負荷は軽減されるが、手動操作や目標値変更時の応答性が悪くなるので、やはり適当な長さに設定する必要がある。流量プロセスシミュレータから、液体流量制御にたいしては1~1.5秒が妥当であるとされた。目標値変更に対する応答や警報監視を正常に行わせるためにはサンプリング周期は10~20秒を超えるべきではない。

### [5.2.4] 入力及び出力の量子化

センサーやトランスデューサーからの入力信号の計測精度と見合った量子化レベルが必要であるが、DDCシステムの制御DDCシステムに於いては、通常1/1000（10ビット）の量子化を行えば十分であるとされており、量子化によって生ずる誤差は問題にならない。一方出力の最適な量子化は、制御系の特性によって決まり、バルブ駆動の方式やプロセスループに於ける雑音などその他の要因で決まる最適な量子化レベルが存在すると思われる。

### [5.2.5] デジタル計算機の形式

1960年頃の計算機の処理能力、信頼性、価格などから、DDCとして望ましい形式が論じられた。Wired program方式（現在では考えられないが）と、Stored program方式との一長一短が論じられ、融通性などからStored program方式がよいと結論つけている。主メモリには10 $\mu$ 秒程度のメモリサイクルの磁気コアが使われていたので、計算機の処理能力の配分は重要な要素であった。100ループを1秒でサンプリングするためには、1ループあたり10msecしか割り当てられない

ので、PIDなどの制御演算の時間内に処理できるよう、ソフトウェアの処理時間を検討しておく必要があった。また当時計算機の価格も高く処理能力や価格とのトレードオフも検討された。

## 5.3 集中型DDCシステム

1960年代の半ば頃、プラント操業に於ける計算機は日報月報作成など、管理的な業務に使用されていたが、プロセスの直接制御はアナログ計装システムによって行われていた。計算機処理によるプラント計装の高度化に期待する傾向は多々あったが、プロセスの直接制御をまかせるまでの信頼性や信頼感は得られていなかった。一方、1965年頃から半導体集積回路の実用化が進み、本格的な制御用計算機の開発が始まった。デジタル計算機がプラントの調節弁を直接駆動し、プロセスを制御することから、DDC（Direct Digital Control）と呼ばれた。また1台のデジタル計算機が、時分割多重で多数の制御ループを集中して処理するので「集中型DDCシステム」と呼ばれた。図5.1に集中型DDCシステムYODIC600（横河電機）の外観を示す。このシステムは、1970年最上流の連続プロセスである石油精製プラントに初めて導入された。300ループもの制御ループを対象とするため、絶対にダウンしないシステムが求められた。第6章で述べるように、信頼性工学に基づく高信頼化技術が設計に盛り込まれ、二重化のためのシステム設計技術と併せて、システムの高信頼化が徹底して追求された。DDC用に専用設計されたCPUは、命令体系はじめ二重化、高信頼化のための各種の機能を備えていた。自己診断機能などによるエラー検出や、二重化制御部による不一致検出があると、出力命令の出力動作が禁止され、誤ったデータが出力されることの無いようにCPUの命令が設計された。2台のCPUは、命令



図5.1 完全二重化構成の集中型DDCシステム

実行のマシンサイクルまで完全に同期して並列動作し、「デュアル・システム」と呼ばれた。このような二重化システムを制御するため、リアルタイムOSも自社開発された。図5.2に2重化構成の信頼度モデルを示す。 $\lambda_S$ はCPU単体の故障率、 $\lambda_B$ は二重化のための共通部の故障率で、当時は $\lambda_S > 10 * \lambda_B$ 程度に、共通部の部品数が少なくなるよう設計した。これによって二重化による信頼性向上は、シングルの時の10倍以上になることが期待された。また、システム設計上、「2重化システムの3C」として次の3つの要件が抽出され、実現された。

- ① Check --- 診断：自己診断、2重化制御部による不一致比較検出など。
- ② Changeover --- 切替：待機側CPUへの切り替え。
- ③ Copy --- 復元時のメモリ内容のCopy。

このように集中型DDCシステムが開発され、二重化による高信頼化設計技術が確立されたことに対して、1973年に大河内記念賞が授与された。この技術は、分散型DCS CENTUMに受け継がれ、CENTUMではマイクロプロセッサなどハードウェアの飛躍的進歩を取り入れながら、新たな高信頼化技術に発展してきている。なお、「3C」などの高信頼化設計技術の基本は、このとき作られたと言ってよい。

DDCのPID演算ソフトウェアは、[式5.1]のアナログPID演算式を、サンプリング時間(n)ごとの階差式表現に直したものが使われている。位置型[式5.7]、速度型[式5.8]の2つの形式があり、サンプリング系でのPID演算アルゴリズムが検証された。

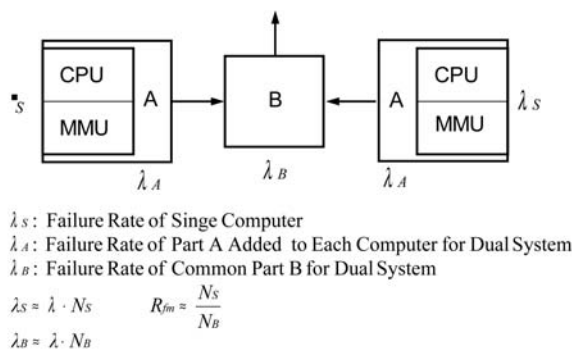


図5.2 二重化構成の信頼度モデル<sup>(1)</sup>

$$M_n = K(e_n + \frac{\tau}{T_I} \sum e_n + \frac{T_D}{\tau} \Delta e_n) \quad \text{--- [式5.7]}$$

$$\Delta M_n = K(\Delta e_n + \frac{\tau}{T_I} e_n + \frac{T_D}{\tau} \Delta^2 e_n) \quad \text{--- [式5.8]}$$

ここに

$$\Delta M_n = M_n - M_{n-1}, \quad \Delta^2 e_n = \Delta e_n - \Delta e_{n-1}$$

## 5.4 デジタル制御ステーションに見るCPUの変遷

図5.3に、デジタル制御ステーションに見るCPUの変遷を示す。①は集中型DDC YODIC-600のCPU（16ビット）で、1968年当時実用化されたSSI（Small Scale Integration）のTTL（Transistor Transistor Logic）IC主体で設計された。A5判よりやや大きめのプリント基板30枚が、図のようなラックに納められ、ワイヤラッピングのバックボードで相互接続された。②は1971年に開発された制御用ミニコンピュータ

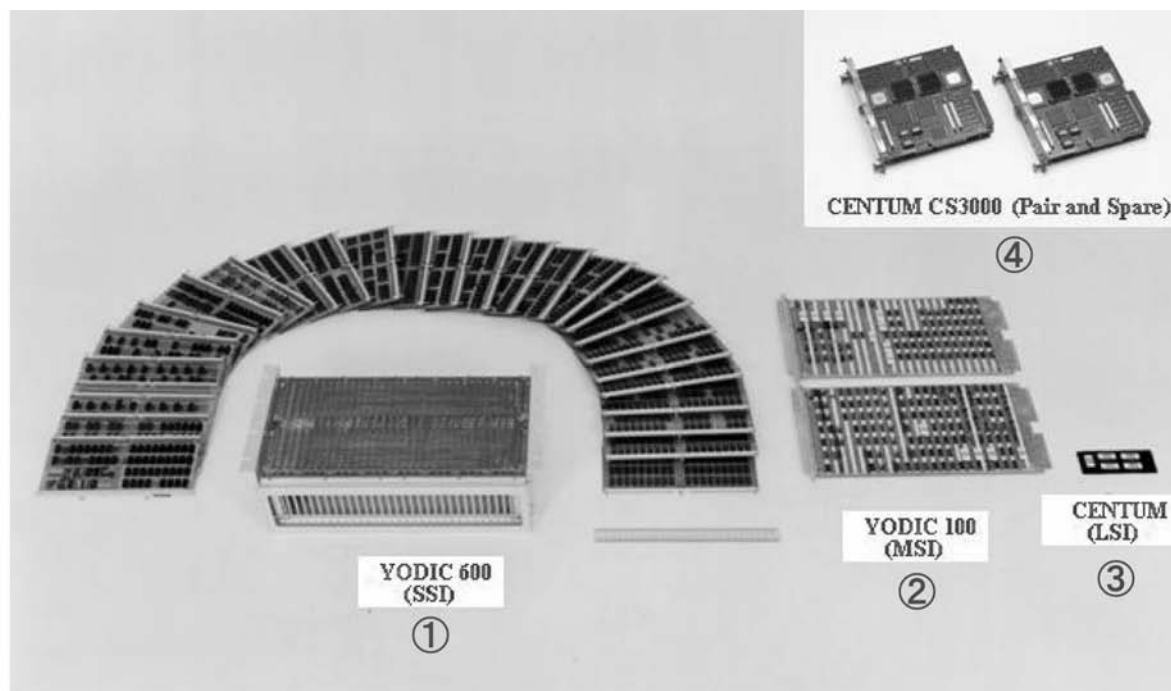


図5.3 デジタル制御ステーションに見るCPUの変遷

YODIC-100のCPU（16ビット）で、MSI（Medium Scale Integration）のTTL IC主体で設計された。マイクロプログラミング技術を採用し、B4判程度の大きさのプリント基板2枚で構成された。③はマイクロプログラミング可能なマイクロプロセッサ（ $\mu$ COM16：16ビット）で、NECと共同開発され、初代CENTUMのFCS（フィールド・コントロール・ステーション）のCPUに使用された。YODIC100の命令体系がそのままエミュレートされ、YODIC100でのソフトウェア資源の継承を可能とした。④は現在のCENTUM CS3000のFCSのCPUカード（64ビットRISC）で写真からPair&Spareの冗長化方式の様子が伺える。Pair&Spare方式については、[6.2.4]で解説する。

このような半導体集積回路の高集積化とともに、プロセス制御システムのCPUの小型化高性能化が、わずか数年の間に飛躍的に進んだ。そして、CPU関連技術（Computer）、通信技術（Communication）、プロセス

制御技術（Control）とが統合活用され、分散型のDCSを生み出す技術的基盤となったのである。

図5.4は世界のマイクロプロセッサの進化の様子を示している。世界初のマイクロプロセッサ、インテル4004（4ビット）が発表されたのは1971年である。その後の半導体集積回路のめざましい高集積化とともに4、8、16、32、64ビットへと発展し、この30年間に約25,000倍の性能向上がなされた。わずか30年間に10の4乗倍もの進化を遂げたものは、マイクロプロセッサ関連技術において他に無い。この報告書の原稿は3GHzのCPU、1GBのメモリ、100GBのディスクを搭載したパソコンを使って書かれたが、著者自身が設計した集中型DDCのCPU（図5.3）が、マイクロプロセッサ出現前の開発だったとはいえ、1MHz、メモリ8KB、ディスクなし、であった事を思うと隔世の感を禁じ得ない。

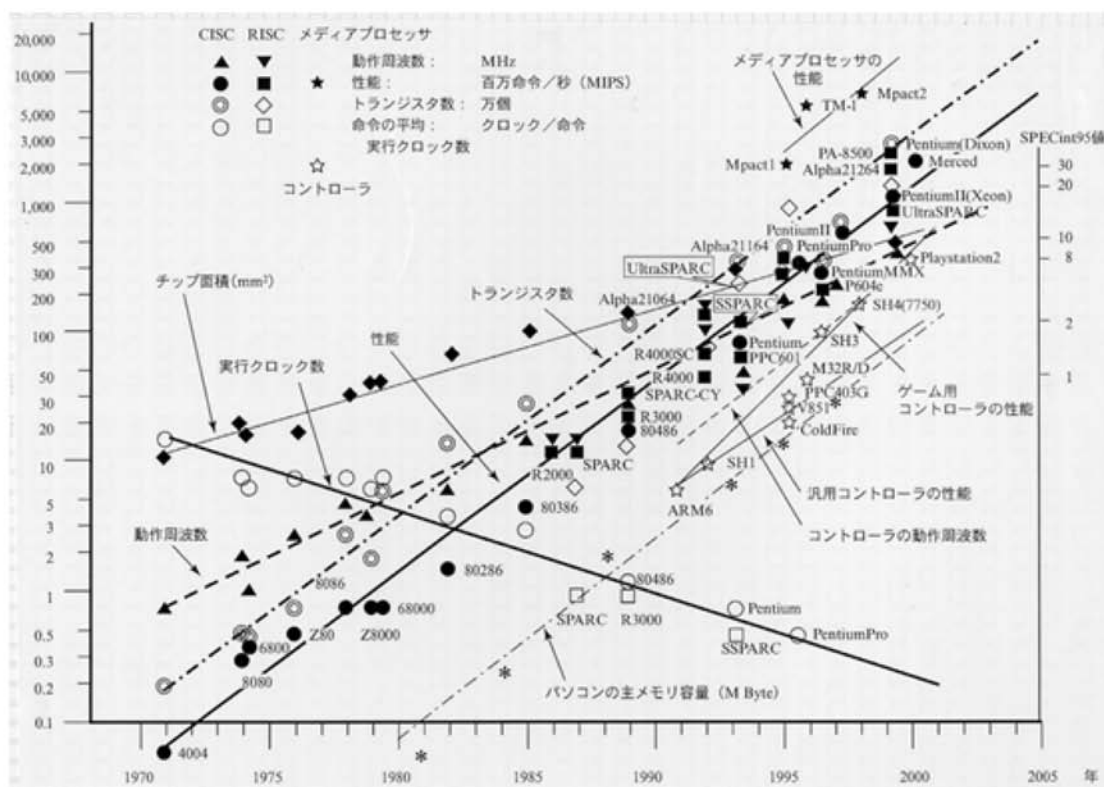


図5.4 マイクロプロセッサ25年の進化<sup>(2)</sup>



## 5.5 DCS：分散型デジタル計装制御システム

### [5.5.1] DCS誕生の経緯

DCS (Distributed Control System：分散型計装制御システム) CENTUMは1975年に世界に先駆けて市場に導入された。CENTUM開発当時の半導体集積回路技術の進歩は、図5.4に示したほど驚異的なものではなかったが、十分にマイクロプロセッサの将来を予見させる胎動が感じられた。またkmオーダーの長距離を一本の同軸ケーブルで結ぶ高速通信技術とも合わせて、分散型システムの生まれる技術的背景がそろってきていた。CENTUM開発時に掲げられた下記の3つの「C」は、DCSの技術的要件を端的に表している。

- ① Control --- アナログ計装時代以来、蓄積されてきたプロセス制御技術。
- ② Computer --- マイクロプロセッサに代表されるコンピュータ技術。
- ③ Communication --- 長距離高速のシリアル通信技術。

またプラントでは各設備が工場内広域に分散し、日常の操業や設備保全もプロセス単位ごとに管理されるので、機能分散、地域分散、危険分散、などの観点から分散型システムの必要性があった。このようにDCSはシーズ、ニーズ両面からの必然性をもって誕生したのである。図5.5はCENTUM誕生の時に書かれたDCSの初めてのシステム構成図である。同図に示されているように、FCS (Field Control Station)、OPS

(Operator Station) などの機能名称がつけられたが、それらは現在にも引き継がれている。

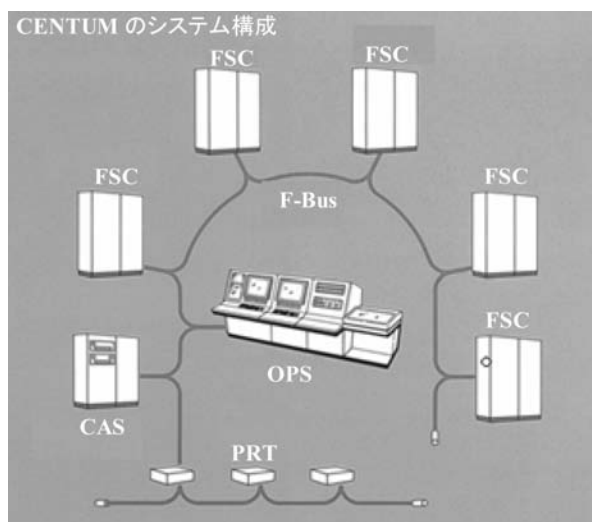


図5.5 DCSのシステム構成

### [5.5.2] DCSのシステム構成

図5.6にDCSの基本構成を示す。最も基本的な機能分散は制御機能 (FCS) と運転・監視機能 (OPS) の分散である。FCSはフィールド機器から温度、圧力、流量などのプロセス変数を読み込み、PIDなどの制御演算を行い、結果をフィールドの調節弁へ送る。リミットスイッチなど接点信号も読み込まれ、シーケンス制御に取り込まれる。シーケンス制御機能からは、電磁弁や表示ランプなどを駆動するオンオフ信号が出力される。このようにFCS内部では従来のアナログ計装パネルのほとんどの機能がソフトウェアで実現され、そ

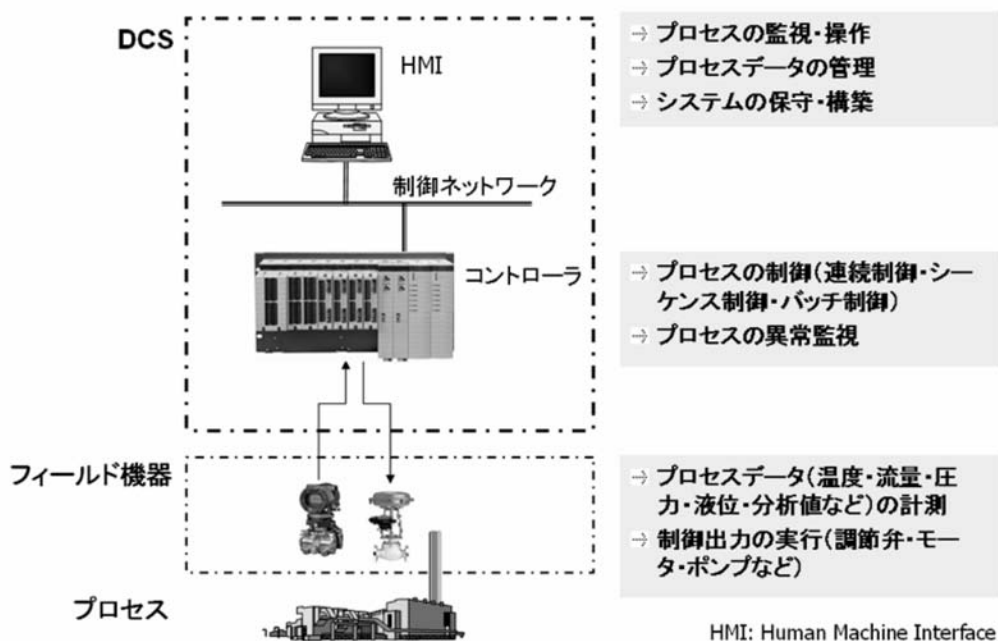


図5.6 DCSの基本構成

の状態は通信を介してOPSに送られる。オペレータはOPSによってプラントの監視操作ができる。

### [5.5.3] FCS : Field Control Station

初代CENTUMのFCSには、制御機能として従来のアナログ計装システムの機器群がそっくりソフトウェアにより組み込まれた。従来アナログ計装時代に築かれてきたプロセス制御の経験を、そのままDCS上で違和感なく構築できるよう配慮がなされた。これらはプロセス計装に於ける実績のある機能オブジェクトであり、それらをつなぎ合わせて計装全体が構築できるようにしたビルダメンテナンス機能とも合わせて、当時からオブジェクト指向のシステム設計がなされた点は特筆に値する。またFCSには、従来リレー回路で構成されていたシーケンス制御機能がソフトウェアで組み込まれた。スイッチ計器、タイマ、カウンタ、コード入出力なども内蔵計器として用意された。また計算機プログラミングの知識なしにシーケンスの記述ができるよう、ディシジョンテーブル形式の「シーケンステーブル」が使われ、シーケンス変更に対する自由度が格段に改善された。DDCの制御アルゴリズム (PID) は、すでに集中型DDC YODIC-600で実証済みの [式 5.7] [式 5.8] が組み込まれた。このようにFCSは従来の計装パネルの機能を包含した柔軟性の高い制御ステーションとなったため、広範なアプリケーションに使用されることが予想された。同時にその信頼性の確保が至上命題とされ、高信頼化が徹底して追求された。DCSにおける高信頼化の技術的な詳細は第6章で記述する。

### [5.5.4] OPS---CRTオペレーション

図5.7に初代CENTUMのオペレータ・ステーションの外観を示す。従来の計装パネルから、キーボードとCRTによるコンソール・オペレーションへの変化は、当時のオペレータにとっては革命的であった。そのためOPSの機能や画面設計にあたっては、オペレータのとまどいや不安感を払拭するために、徹底して従来計器の操作感覚でCRT操作できるよう、配慮がなされた。図5.8に初代CENTUMの計器図画面を示す。CRTのドット分解能の制約の中であったが、図5.9に示す当時のアナログ調節計のフェースプレートの操作性が、忠実にCRT上に実現されている。一方グラフィック画面にプロセスフローを表示して、その画面上で監視や設定操作などができるOPSならではの画面表示も合わせて用意され、DCSの普及とともに、本格的なCRTオペレーションが浸透していった。



図5.7 初代CENTUMのオペレータステーション

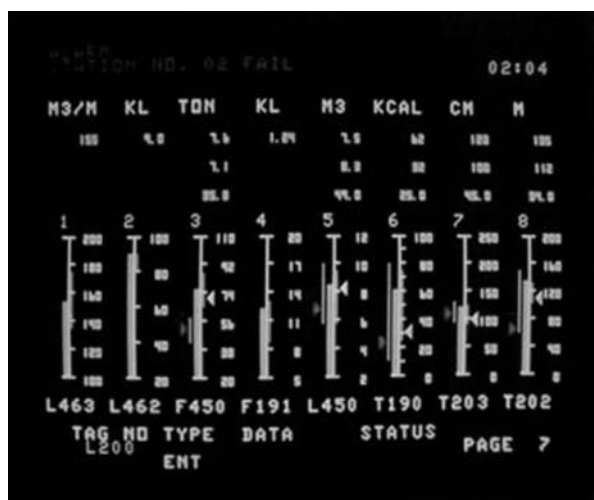


図5.8 初代CENTUMの計器図画面



図5.9 アナログ調節計のフェースプレート

### [5.5.5] ビルダメンテナンス

初代CENTUMで導入された新しい機能にビルダメンテナンス機能がある。これは、計算機を意識せずに、計装の言葉でシステムを構築することを可能にした、当時としては進んだ機能であった。従来計器を計装パネルに配置して配線でつなぎ合わせる感覚で、FCSやOPSのソフトウェア機能が構築できる。ビルダメンテナンス機能は、PID制御機能だけでなく、シーケンス機能、グラフィック画面はじめ、システム構築の全

てに亘って用意された。こうして構築されたシステムの内容は、セルフドキュメント機能によりドキュメント化され、その後の変更管理などエンジニアリング用に供された。このように、ビルダやドキュメント機能はDCSのシステム構築や変更を正確かつ容易にし、エンジニアリングの側面からその浸透を支えてきた役割は極めて大きい。

#### [5.5.6] シーケンス制御機能

シーケンス制御機能は機器インターロックシーケンス、プロセス監視シーケンス、ループ機器レベルの汎用シーケンスなど、プロセス計装の安全性、効率化などを向上させるために重要な機能であるが、アプリケーションによって異なる記述方法が使われている。初代CENTUMには図5.10のようなデシジョンテーブル形式のシーケンステーブルが採用されたが、さまざまなニーズに対応するため、最新のCS3000ではシーケンステーブルに加えて、ロジックチャート、SFC (Sequential Function Chart)、SEBOL (SEquential Batch-oriented Language) などが用意されており、それぞれの記述特性を生かして使用されている。さらにバッチプロセスの分野では、効率的エンジニアリングを目指して、材料の仕込、加熱、反応など、バッチプロセスの工程（処方）の類型化が検討され、それにそったアプリケーションレベルの記述方式の国際標準化 (ISA/SP88.01、IEC61512-1) が進められてきた。すでにCS3000ではISA S88 準拠のバッチパッケージが開発され使用されている。図5.11はCS3000に於ける反応缶バッチプロセスのグラフィック画面の例である。バッチプロセスやシーケンス制御の記述方法の進化、グラフィック画面の表示の進化など、DCSの進化の一例を見ることができる。図5.12に最新の分散型計装制御システムCENTUM CS 3000の外観を示す。

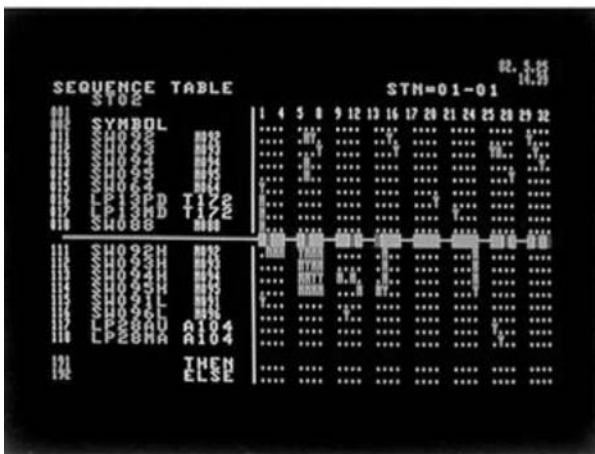


図5.10 初代CENTUMのビルダ・メンテナンス画面  
(シーケンス・テーブル)

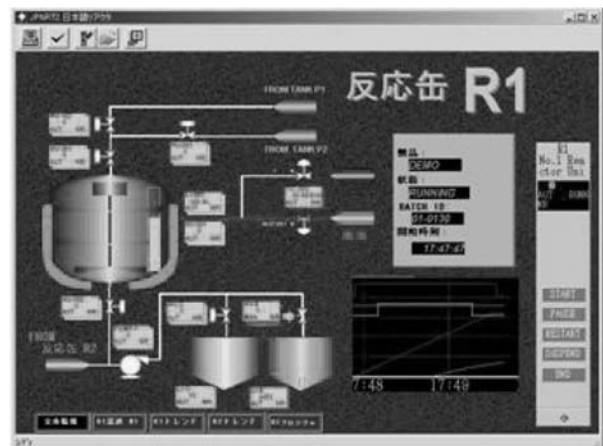


図5.11 バッチ・プロセス制御用グラフィック画面

#### [5.5.7] DCSの進化

図5.13および表5.2に分散型計装制御システム CENTUMの進化の歴史を示す。1975年に初代CENTUMが、世界初の分散型計装制御システムとして市場に登場して以来、1983年CENTUM-V、1988年CENTUM-XL、1993年CENTUM-CS、1998年CENTUM CS-3000、2001年CENTUM CS-3000R3と5世代にわたって進化を続けてきた。この間、制御用のシステムバスは、初代のF-Bus (250kbps) から、HF-Bus (1Mbps)、Vnet (10Mbps) へと高速化されたが、制御バスゆえの絶対的な高信頼化要求から、二重化とトークンバス方式が継承されている。トークンバス方式は通信権がトークン (開発当初はバトンと呼ばれた) によって管理され、どれかが故障しても残されたステーションの通信は正常に確保され、いわゆる「Deterministic」な通信方式として、1979年にIEC/TC65/SC65A/WG6に「PROWAY」として提案された。

DCSの進化の歴史は、「新技術の導入とシステムの継承性の両立」の歴史でもあった。コンピュータ技術の面では、図5.4に示したような、マイクロプロセッサの飛躍的性能向上を頂点として、関連する要素技術の進歩がもたらされた。図5.13に示すCENTUMの進化は、これらの最新技術をタイムリーに取り入れて、システムの高機能化を実現することによって成されたが、同時にユーザに蓄積されたアプリケーションの資産をいかに継承するかが常に求められた。

制御ステーション (FCS) は、CPUやメモリーなどの半導体デバイスの進歩を取り入れ、処理速度の向上とともにアプリケーション容量の拡大や制御機能の高度化がなされた。初代FCSから待機冗長 (Duplex) 方式の二重化構成がとられてきたが、1993年のCENTUM-CSからは、Pair&Spare方式が導入され、信頼性の飛躍的向上 (セブンナイン) につながった。



Pair&Spare方式については[6.2.4] フォールトトレラントシステムの項で解説する。制御ステーションでは制御のリアルタイム性と二重化/高信頼化などの観点から、歴代自社製OSと制御ソフトウェアが継承されている。

オペレータ・ステーションは、画面の精細度や表示速度などハードウェア性能向上の上に、CRTオペレーションの操作性向上のために様々なソフトウェア機能増強がはかられ進化してきた。このために自社設計のリアルタイムOSが使われてきた。当初ビルダメンテナンスなどエンジニアリング機能はオペレータ・ステーションに組み込まれていたが、エンジニアリングの生産性向上の必要性から、CENTUM-XL (1988年)ではエンジニアリング・ステーション (ENGS) に分離され、ENGSには汎用OSのUNIXが採用された。

一方プロセス産業においては、工場トータルの生産性や品質の向上のために、生産制御システム (MES: Manufacturing Execution System) や経営レベルの統合業務システム (ERP: Enterprise Resource Planning) の構築が進められた。DCSはプロセスの制御が主業務であるが、このようなユーザ企業におけるトータルシステム化の要求から、DCS自体の機能拡張とともに関連する他のシステムとの連携のし易さが求められるようになった。そのためにシステムのオープン化への要求が高まってきている。

PCの普及とともに汎用OSとしてWindowsが広まり、プロセス制御の周辺にもPCが多用されるようになった。また通信ではEthernetが標準になり、汎用OSとともに標準化とオープン化を加速し、PCとインターネットの普及がそれに拍車をかけた。

このようなニーズ/シーズの変化に対応して、CENTUM-CSではオペレータ用のHIS (Human Interface Station) にも自社製のリアルタイムOSに代わって、汎用のUNIXが採用された (1993年)。CENTUM CS3000ではHISにWindows-NT が採用され (1998年)、その後Windowsの進化に追従できるようになった。上位システムとの通信はEthernetを介してオープン化されている。さらにEthernetをベースにした1GbpsのVnet/IPが開発され、通信のリアルタイム性の向上がはかられた。アプリケーションソフトウェア間のインターフェイスとしてOPC (OLE for Process Control) が標準的に使われるようになっておりオープン化に対応している。オープン化については、第7章 標準化とオープン化 で解説する。本章の要点を付図2「プロセス制御システムの技術系統図」にまとめた。

一方プロセス産業はライフサイクルが長く、システ

ムの長期間にわたる安定供給と保守が求められる。この間にユーザにはプラント固有の制御・運転ノウハウが蓄積される。これらの資産の継承はユーザにとって極めて重要であり、このためにCENTUMは、その世代が進化するたびに、「マイグレーション」という手段を併せて提供してきた。プラント本体を維持しつつ、計装システムの更新を可能にするため、下記の様にユーザの事情にあわせた段階的なマイグレーションが用意されている。

- ①マンマシンレベルを最新のHMIに更新。
- ②既設のI/Oカードを利用しながら最新の制御機能に進化させ、制御パフォーマンスの改善、アプリケーション容量の増加をはかる。
- ③既設のフィールド配線を利用しながら、最新I/Oに進化させる。

このようにマイグレーションは、ハードウェア、ソフトウェア、運転ノウハウなどのユーザの資産を、最小限の投資で最大限に継承し再利用することを可能にし、最新技術の活用と現有資産の継承の「両立」を可能とするものである。

このように、分散型計装制御システム CENTUMは1975年に市場に登場して以来、30年の長きに亘って進化を遂げてきた。開発時に打ち出された分散型計装制御システムの基本的なアーキテクチャと一貫した高信頼化設計思想のもとに、タイムリーに適切な最新技術を取り入れてきたことが、このような永続的な進化を可能にしたと言える。



図5.12 CENTUM CS3000の外観

#### 参考文献

- (1) RESEARCH AND DEVELOPMENT IN JAPAN AWARDED THE OKOCHI MEMORIAL PRIZE 1973, Okochi Memorial Foundation, p55
- (2) 嶋正利：マイクロプロセッサの25年 電子情報通信学会誌 Vol.82, No.10, pp.997-1017

# 分散型計装制御システム CENTUM の進化

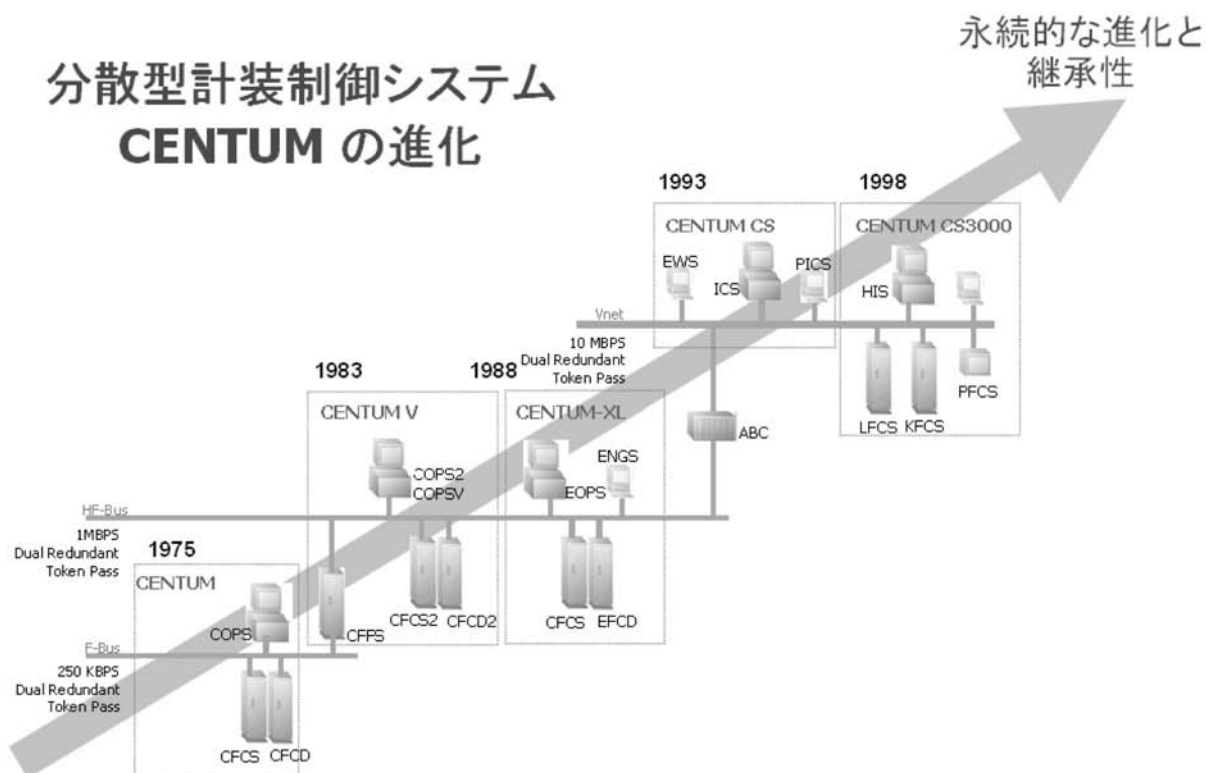


図5.13 分散型計装制御システム CENTUMの進化と継承性

表5.2 CENTUMの基本技術の進化

|             |                | 1975            | 1983            | 1988            | 1993              | 1998              | 2001                      |
|-------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| システム        | 名称             | CENTUM          | CENTUM-V        | CENTUM-XL       | CENTUM-CS         | CENTUM-CS3000     | CENTUM-CS3000R3           |
|             | 制御バス           | F-Bus           | HF-Bus          | HF-Bus          | Vnet              | Vnet              | Vnet                      |
|             | Bit Rate       | 256KBPS         | 1MBPS           | 1MBPS           | 10MBPS            | 10MBPS            | 10MBPS                    |
|             | Physical Layer | 差動位相変調          | 差動位相変調          | 差動位相変調          | Ethernet(10Base5) | Ethernet(10Base5) | Ethernet(10Base5)         |
|             | Datalink Layer | Token Passing   | Token Passing   | Token Passing   | Token Passing     | Token Passing     | Prioritized Time Slotting |
|             | 冗長化            | Dual Redundant  | Dual Redundant  | Dual Redundant  | Dual Redundant    | Dual Redundant    | Dual Redundant            |
| 制御          | 名称             | CFCS            | CFCS2/CFCD2     | EFCS/EFCD       | CS FCS            | LFCS / SFCS       | KFCS / FFCS               |
|             | OS             | 横河 リアルタイム組込み OS | 横河 リアルタイム組込み OS | 横河 リアルタイム組込み OS | 横河 リアルタイム組込み OS   | 横河 リアルタイム組込み OS   | 横河 リアルタイム組込み OS           |
|             | 冗長化            | Duplex          | Duplex          | Duplex          | Pair&Spare        | Pair&Spare        | Pair&Spare                |
| 操作          | 名称             | COPS            | COPS2/COPSV     | EOPS            | ICS               | HIS               | HIS                       |
|             | 形態             | コンソール形          | コンソール形          | コンソール形          | コンソール形 / デスクトップ形  | コンソール形 / デスクトップ形  | コンソール形 / デスクトップ形          |
|             | OS             | 横河 リアルタイム組込み OS | 横河 リアルタイム組込み OS | 横河 リアルタイム組込み OS | UNIX / PC UNIX    | Windows NT        | Windows 2000、Windows XP   |
| Engineering | 名称             |                 |                 | ENG             | EWS               | PC                | PC                        |
|             | OS             |                 |                 | UNIX            | UNIX              | Windows NT        | Windows 2000、Windows XP   |

## 6 高信頼化

プラントを直接制御するプロセス制御システムには、極めて高い信頼性が要求される。その実現は信頼性工学に裏打ちされた高信頼化設計技術に依るところが大きいが、高品質の製造技術や品質管理技術なども含めた総合力で達成されてきた。以下DCSに於ける高信頼化の歴史をたどってみよう。

### 6.1 信頼性工学

#### [6.1.1] 故障率のバスタブ曲線

部品の故障率は図6.1に示すような「バスタブ曲線」を示すことが知られている。部品の集合であるシステムの故障率も同様である。時間経過とともに、次の3つの期間に区分される。

- ①初期故障期間：比較的早い時期に故障が発生する領域で、時間の経過とともに故障率が減少する。選別工程で取り除けなかった潜在故障が、使用開始後の温度や電圧などのストレスで短時間に顕在化するものである。製造上で造り込まれる欠陥や材料不良に起因するものが多い。出荷前にスクリーニングや加速試験などで早く ( $t_i$ ) これを取り除くことが大切である。
- ②偶発故障期間：初期故障が取り除かれると、偶発的に一定の確率  $\lambda_r$  で故障が発生する期間に入る。この値 ( $\lambda_r$ ) の小さい部品または製品を選択する。
- ③摩耗故障期間：部品または製品が摩耗や疲労などにより故障し、故障率が時間とともに増加し寿命にいたる期間。  $t_w$  が大きくなるようするとともに、この期間に入った事を知り事前に交換を促すような情報を出すなど、設計上の配慮が必要である。

#### [6.1.2] 故障率計算

故障率の単位はfit (Failure In Time) =  $10^{-6}/h$  で表される。単位時間あたりの故障数で、1 fitとは、10の9乗時間に1回の故障率である。故障率の逆数はMTBF (Mean Time Between Failure：平均故障間隔) を表す。故障率10,000fitの製品のMTBFは10万時間であり、約10年に一回故障する確率をもつ。システムの故障率を計算する基準としてMIL-STD-217が知られている。これは米国防省が軍用電子機器を調達する際の故障率計算に基準として制定したものである。個々の部品の故障率データとともに、装置やシステムの故障率計算の基準が示されている。式6.1はParts Count Model と

呼ばれる計算法で、カテゴリ  $i$  ごとに、部品固有の故障率  $\lambda_G$  と品質ファクタ  $\pi_Q$  と使用数量  $N_i$  を乗じてカテゴリの総和をとってシステム全体の故障率  $\lambda_{EQUIP}$  とする簡便な方法である。部品の故障率は温度などの使用ストレスで変わるので、それらを加味した Component stress analysis modelもあるが、ストレスファクタの種類が多く計算が非常に複雑である。式6.2はMIL-STD-217の二つのモデルを参考に、実用的なストレスファクタを加味して計算できるように工夫された計算式の例である。ここで  $\lambda_B = \lambda_G \cdot \pi_Q$ 、 $\pi_T$  は周囲温度ストレスファクタ、 $\pi_S$  は電氣的ストレスファクタ、 $\pi_E$  は環境ストレスファクタである。

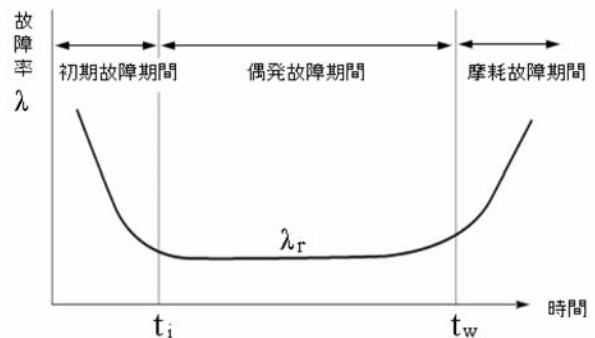


図6.1 故障率のバスタブ曲線

$$\lambda_{EQUIP} = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_G \cdot \pi_Q)_i \quad \text{--- [式6.1]}$$

$$\lambda_{EQUIP} = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_B \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_E)_i \quad \text{--- [式6.2]}$$

MIL-HDBK-217に規定されている故障率は使用条件の厳しい軍用電子機器を対象に定められているので、そのまま故障率計算に用いると、民生用のアプリケーションでは現実にはそぐわない値となってしまう。電子工業振興協会 (JEIDA) は、1984年に国内114社に対して、電子部品のカテゴリごとに故障率をどの程度に見積もっているかについてアンケート調査を行った。図6.2は46社からの回答で、当時の電子部品の故障率の実態を表している。例えばMSI/TTL (74LS161) では、平均47fitと見積もられている。RAPSでは、自社の実績にこのような調査結果を加味して個々の故障率を定めている。表6.1はRAPS<sup>(注)</sup>とMILの故障率の比較を示している。

(注) RAPS: Reliability Prediction System —— 横河電機の信頼度計算システム

該当する  $\pi_Q$  が円で囲われている。これらの調査結



果は、横河の信頼性設計の考え方とともに、IFAC  
Workshop on Reliability of instrumentation systems  
for safeguarding and control (1986) に報告された。

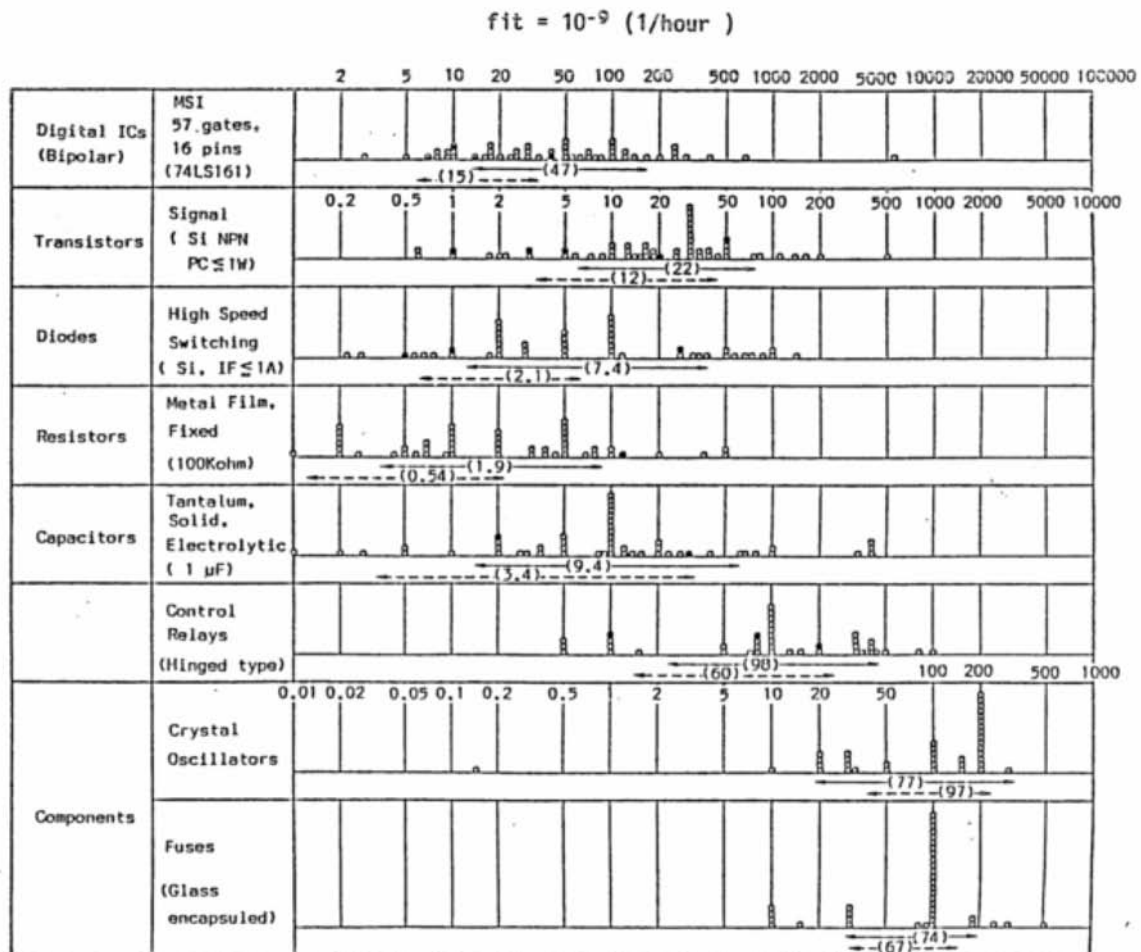


図6.2 電子部品の故障率 アンケート調査結果<sup>(1)</sup>

表6.1 電子部品の故障率 MIL-HDBK-217DとRAPSの比較<sup>(2)</sup>

| Component      |                    |                | [ $\times 10^{-6}/\text{H}$ ]           |                   | $\pi Q$ value / grade (dY : equivalent of RAPS) |       |     |     |     |       |       |         |       |  | $\lambda$ (Japan)<br>[ $\times 10^{-6}/\text{H}$ ] |
|----------------|--------------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|---------|-------|--|----------------------------------------------------|
| Name           |                    | Type           | MIL-HDBK-217D                           | RAPS<br>Data base |                                                 |       |     |     |     |       |       |         |       |  |                                                    |
| ICs            | 74LS type TTL      | LS193          | $0.021 \times \pi Q$                    | 0.02              | S                                               | B     | B-0 | B-1 | B-2 | C     | C-1   | D       | D-1   |  | 0.015                                              |
|                |                    |                |                                         |                   | 0.5                                             | 1     | 2   | 3   | 6.5 | 8     | 13    | 17.5    | 35    |  |                                                    |
| Discrete       | Signal transistor  | T018           | $0.028 \times \pi Q$                    | 0.02              | JANTXV                                          | JANTX | JAN |     |     | LOWER |       | PLASTIC |       |  | 0.012                                              |
|                |                    |                |                                         |                   | 0.12                                            | 0.24  | 1.2 |     |     | 6     |       | 12      |       |  |                                                    |
| Semiconductors | Signal diodes      | 200mA 35V      | $0.0006$<br>to $\times \pi Q$<br>0.0025 | 0.002             | "                                               | "     | "   | "   | "   | "     | "     | "       | "     |  | 0.0021                                             |
|                |                    |                |                                         |                   | 0.15                                            | 0.3   | 1.5 |     |     | 7.5   |       | 15      |       |  |                                                    |
| Resistors      | Metal film         | 1/4W, 100ppm/F | $0.00216 \times \pi Q$                  | 0.001             | S                                               | R     | P   |     |     | M     | 10509 | 22684   | LOWER |  | 0.00054                                            |
|                |                    |                |                                         |                   | 0.03                                            | 0.1   | 0.3 |     |     | 1     | 5     | 5       | 15    |  |                                                    |
| Capacitors     | Tantalum           | 25 $\mu$ F 10V | $0.0437 \times \pi Q$                   | 0.01              | S                                               | R     | P   |     |     | M     |       | L       | LOWER |  | 0.0034                                             |
|                |                    |                |                                         |                   | 0.03                                            | 0.1   | 0.3 |     |     | 1     |       | 1.5     | 10    |  |                                                    |
| Magnetic Parts | Relays             |                | $0.126$<br>to $\times \pi Q$<br>1.515   | 0.05              | R                                               |       | P   |     |     | M     |       | L       |       |  | 0.060                                              |
|                |                    |                |                                         |                   | 0.1                                             |       | 0.5 |     |     | 1     |       | 1.5     |       |  |                                                    |
| Miscellaneous  | Oscillator crystal | HC18-U         | 0.2                                     | 0.05              |                                                 |       |     |     |     | None  |       |         |       |  | 0.057                                              |
|                | Fuse               |                | 0.1                                     | 0.1               |                                                 |       |     |     |     | None  |       |         |       |  | 0.067                                              |

## 6.2 高信頼化設計

### [6.2.1] 高信頼化設計—部品

システムは部品の集合であるから、その信頼性は個々の部品の信頼性で決まる。しかし、同じ部品でもメーカーによって故障率が違うし、使われ方で早く故障する場合もあれば長持ちする場合もある。図6.3はシステムの高信頼化を支える要因について示したものである。設計、製造、運用の場面で信頼性に関係する要因が示されている。設計段階では、「信頼性の高い（素性のよい）部品を見極め、これを適度な余裕を持って正しく使う」ことが基本である。そのためには部品の素性を見極める評価技術をもつ事が大切で、科学的な根拠を持って部品の特性を見抜く必要がある。電子部品のディレーティング基準は、「適度な余裕をもって」使う手法の一つである。これは式6.2のストレスファクタに關係する。正確には部品ごとの活性化エネルギーで決まるが「10℃温度が上昇すれば寿命は半分になる」というアレニウスの法則がある<sup>(注1)</sup>。温度ディレーティングが有効な物理的根拠がここにあ

る。評価はあくまで測定データがものを言うが、ちょっと手で触ってみて「熱い!」とか、音を聞いて「何か変だな」と感ずる技術者としての感性をみがく事も重要なことである。部品の身になって、さぞかし熱いだろう、こんなにストレスをかけられてはさぞかし痛いだろうと思いやる気持ちが、高信頼化設計の質を高めてくれる。

実稼働時のシステムの高信頼化は、設計によって素質として作り込まれ、それが正しく製造され、かつユーザーに納入後はその適切な運用が行われたとき、初めて達成される。なかでも設計に依存する要素が最も大きい。設計段階では、様々な評価手法を用いて、素性のよい部品を選定し、それらをディレーティングして（余裕をもって）使用する。熱設計など実装上の配慮をする。すなわち、電子部品の諸特性、環境条件など様々な変動要因に対する設計余裕を持たせ、基本の故障率を下げる配慮を行う。その上で冗長化などのシステムアーキテクチャ上の手法や、運転点・保守のなどシステムの運用時に生じる人間工学的要因に対する配慮をする。その他ハードウェア、ソフトウェア両面にわたる体系的な設計手法が駆使される。図6.3に、

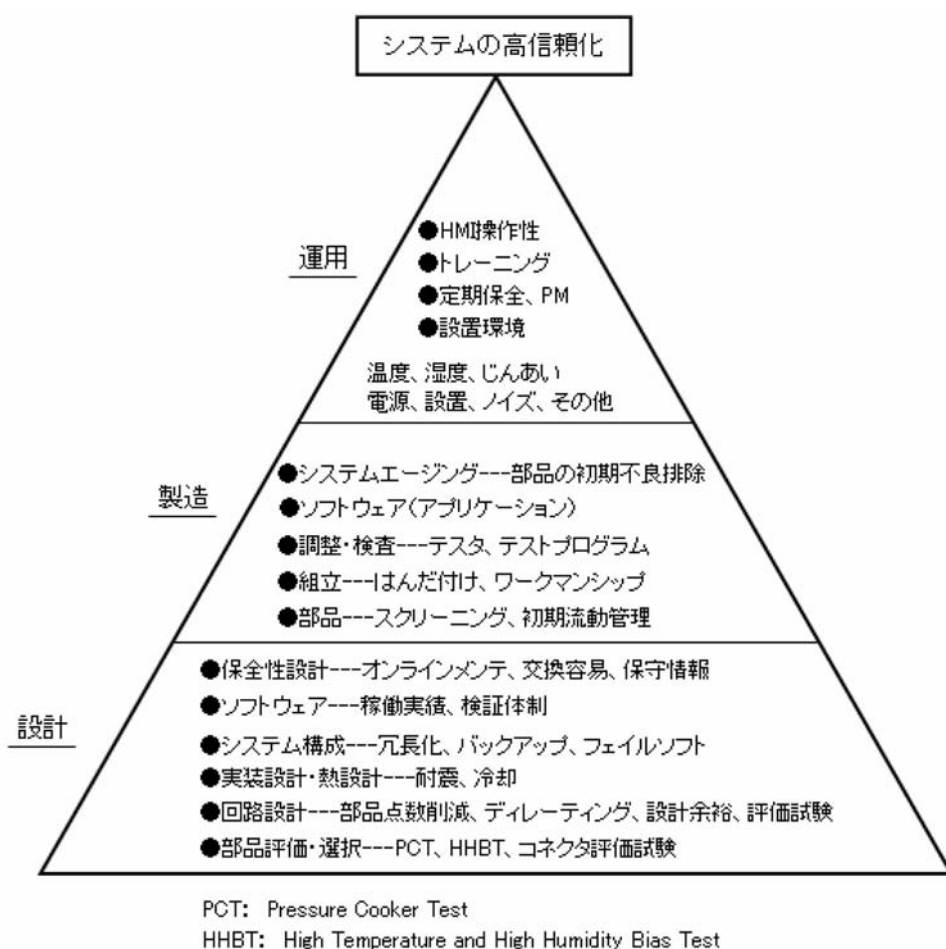


図6.3 システムの高信頼化を支える要因<sup>(3)</sup>

設計、製造、運用の場面でシステムの信頼性に係る要因を示す。

(注1)

ある温度での化学反応の速度を予測する式。部品の経年劣化の主要因が温度である場合、部品の寿命はアレニウスの式で近似できる。加速試験や部品の寿命の推定に利用され、温度ディレーティングの根拠にもなっている。使用環境の温度が10°C上がると寿命は1/2になるという「10°C 2倍則」として寿命を算出するのにも使われる。

$$L=A \cdot \exp (E_a/k \cdot T)$$

L：寿命

A：定数

E<sub>a</sub>：活性化エネルギー

k：ボルツマン定数 (8.6159×10<sup>-5</sup> [eV/K])

T：絶対温度 [K]

## [6.2.2] 高信頼化設計---システム

いくら個々の信頼性を高めても故障率をゼロには出来ない、それでもシステムとして機能を続行できるよう、冗長化などによりシステムの信頼性を高めるように設計される。

表6.2にCENTUMの高信頼化設計技術を示す。

### ① 故障しにくい設計 ---フォールト・アボイダンス

何と言ってもこれが基本である。[6.2.1] で解説し

たとおり、「信頼性の高い（素性のよい）部品を見極め、これを適度な余裕を持って正しく使う」ことであり、そのための手法の例が表6.2の設計技術の欄に示されている。

### ② 故障しても影響の少ない設計---フェールセーフ/フェールソフト

フェールセーフ：故障してもあらかじめ定められた安全サイドの安定状態をとる設計。

たとえば故障時に電流出力がゼロになり調節弁が閉となってプロセスが安全サイドに維持されるような場合。一般には故障時にはエネルギーを出さない方向に、回路構成やソフトウェア設計に配慮がなされる。

フェールソフト：故障しても与えられたミッションの一部を遂行できる設計で、マニュアルバックアップなどが該当する。

### ③ 故障しても動作が続行出来る設計---フォールト・トレランス

二重化を始め、各種の冗長化システムがこれに該当する。冗長化には必ず「共通部」が存在するので、その部分を如何に少なくするかがポイントである。CENTUMでは、制御バス、FCSのCPU部、I/Oとのインタフェース、I/Oカードなど、それぞれの部分が二重化設計されており、極めて高い信頼性を実現している。

表6.2 CENTUMの高信頼化設計技術<sup>(4)</sup>

| 高信頼化設計技術の分類     |                                                   | CENTUMにおける設計技術                                                                                                                                                                                                        | 評価尺度と概念用語                         |                            |
|-----------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 故障しにくい設計        | フォールトアボイダンス<br>故障や誤動作の発生頻度を小さくする設計                | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 部品評価、選択 (PCT、HHTなど)</li> <li>● ディレーティング</li> <li>● パラメータ変動を考慮した設計</li> <li>● 実装設計、熱設計</li> <li>● 部品点数削減および低消費電力化</li> <li>● 耐環境設計</li> <li>● 耐ノイズ設計 (CEマーキング適合設計)</li> </ul> | 信頼性<br>MTBF                       |                            |
| 故障しても影響の小さい設計   | フェールセーフ<br>故障しても、あらかじめ定められた安定状態をとるシステム            | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 故障の局所化と実時間検出</li> <li>● 各種の保護回路</li> <li>● 外部へのフェイル通知</li> <li>● CPU故障時の出力モジュールの出力保持</li> <li>● フォールバック</li> </ul>                                                           | 稼働率<br>(アベイラビリティ)<br>MTBF<br>MTTR | ディペンダビリティ<br>Dependability |
|                 | フェールソフト<br>故障しても、与えられたシステムのミッションの一部を遂行する状態をとるシステム | <ul style="list-style-type: none"> <li>● バックアップ</li> <li>● 手動バックアップ</li> <li>● 自動バックアップ</li> </ul>                                                                                                                    |                                   |                            |
| 故障しても動作が続行できる設計 | フォールトトレランス<br>故障が発生しても、常に正常動作が続行できるシステム           | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 冗長性</li> <li>● システムの各レベルでの二重化構成</li> <li>● 二重化共通部の極小化</li> <li>● 高い故障率検出率と高速な切替制御</li> </ul>                                                                                 |                                   |                            |
| 故障しても早く回復できる設計  | メンテナビリティ<br>故障しても早く回復できるシステム                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 自己診断</li> <li>● 自動回復/自動再構成</li> <li>● 保全情報のメッセージ出力/保持</li> <li>● 稼働状態表示画面</li> <li>● カードのオンラインメンテナンス</li> <li>● 予防保全情報</li> </ul>                                            | 保全性<br>MTTR                       |                            |



#### ④ 故障しても早く回復できる設計

故障部分が特定でき、簡単に交換ができるようにする事により、システムの稼働率を高めることができる。また、摩耗性のある部品やユニットに対しては、使用時間やオンオフ回数などの履歴をとって稼働状態を表示し、故障する前に予防保全情報を出して交換を促すことも有効である。

#### [6.2.3] 二重化システムの信頼度モデル

図6.4に二重化システムの信頼度モデルを示す。 $\lambda$ は故障率、 $A$ は稼働率である。直列システムの場合は、どちらか一方が故障すると、システム全体の故障になるので、システムの故障率  $\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2$  となり、稼働率は  $A_s = A_1 \cdot A_2$  となる。二重化システムの場合には、両方が同時に故障した時がシステム全体の故障となり、システム全体の故障率は  $\lambda_s = 2\lambda^2 \cdot \text{MTTR}$ 、稼働率は  $A_s = 1 - (1-A)^2$  で与えられる。

修理しながら運転する二重化システムの状態遷移を図6.5に示す。CENTUMのような待機冗長系の二重化はこれに該当する。正常（状態0）から片側故障（状態1）に遷移する確率は  $2\lambda$ 。また片側故障（状態1）から正常に復帰する確率は  $\mu$  で表される。両方故障（状態2）からは復帰できないので、遷移方向は一方方向となる。状態0と状態1は、どちらでもシステムは機能する。状態2に陥るとシステムは機能しないため、「故障」と判定される。 $\mu \gg \lambda$ 、 $\text{MTTR} = 1/\mu$  と仮定すると  $\text{MTBF} = \mu / 2\lambda^2 = 1 / (2\lambda^2 \cdot \text{MTTR})$ 、システムの故障率  $\lambda_s = 2\lambda^2 / \mu = 2\lambda^2 \cdot \text{MTTR}$  で与えられる。

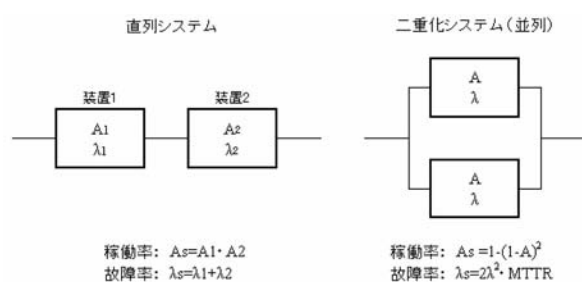


図6.4 二重化システムの信頼度モデル

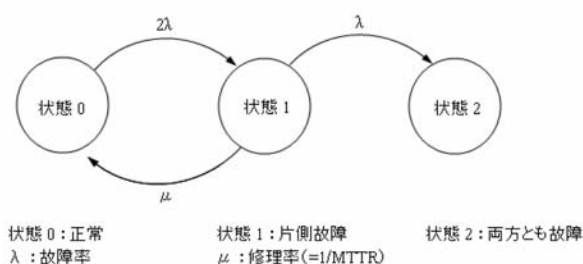


図6.5 修理しながら運転する二重化システムの信頼度モデル

#### [6.2.4] フォールトトレラントシステム

計算機（CPU）の二重化にはDual方式とDuplex方式がある。Dual方式では、2台のCPUはマシンサイクルレベルまで完全に同期して動作し、同一のソフトウェアが同時に実行される。2台の不一致はマシンレベルで即座に検出されるが、CPUにはそのための専用の設計が必要である。[5.2.1] で述べた集中型DDCシステムYODIC600はDual方式の二重化がなされた。Duplex方式は主系のオンライン処理を継続するために、従系を待機させておくシステムで待機冗長系と呼ばれる。一般には従系（予備系）でも優先度の低い処理などを行い、主系に障害が発生した場合には、オンライン処理を従系に切り替えて継続する。最新のCENTUM CS3000 FCSのCPU部はPair&Spareと呼ばれる構成をとり、Dual（Pair）とDuplex（Spare）両方の二重化がなされている。図6.6に制御ステーションCPU部の冗長化構成を示す。同図の①に示すMPU1とMPU2はDual構成で動作し、各CPUカード内では、MPU1、MPU2が常時比較され一過性の異常も瞬時に検出してMPUを停止させ、待機系への即時切替を可能にしている。③で示す2台のCPU CardはDuplex構成で動作しているが、CENTUMのPair&Spare方式では、待機側も主系と同じプロセス制御のソフトウェアが実行されていて、切替時の制御の連続性が保証されている。このほかにも②④⑤に示されているような各部の二重化がなされ、故障検出能力の向上が図られCPU部全体の信頼性を万全なものにしている。図6.7に、制御ステーションのI/O部の冗長化構成を示す。⑥から⑨に示すように、I/Oカードの二重化だけでなく、I/Oモジュールのバックプレーン、I/Oバスなどのインターフェイスも二重化され、I/OバスではEnd to endチェック方式の通信により、データインテグリティが保証されている。以上、図6.6および図6.7に示された①から⑩のフォールトトレラント技術によってCENTUM制御ステーションの画期的な高信頼化がもたらされた。

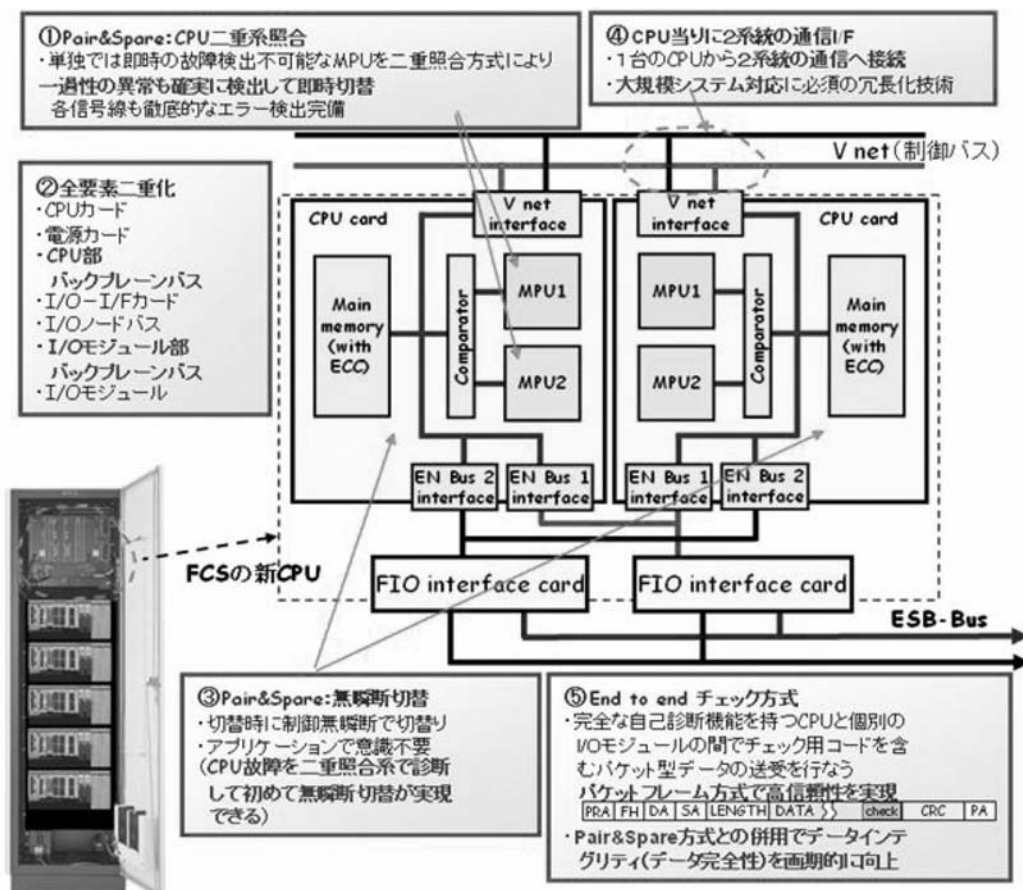


図6.6 CENTUM制御ステーション：CPU部の冗長化構成<sup>(5)</sup>

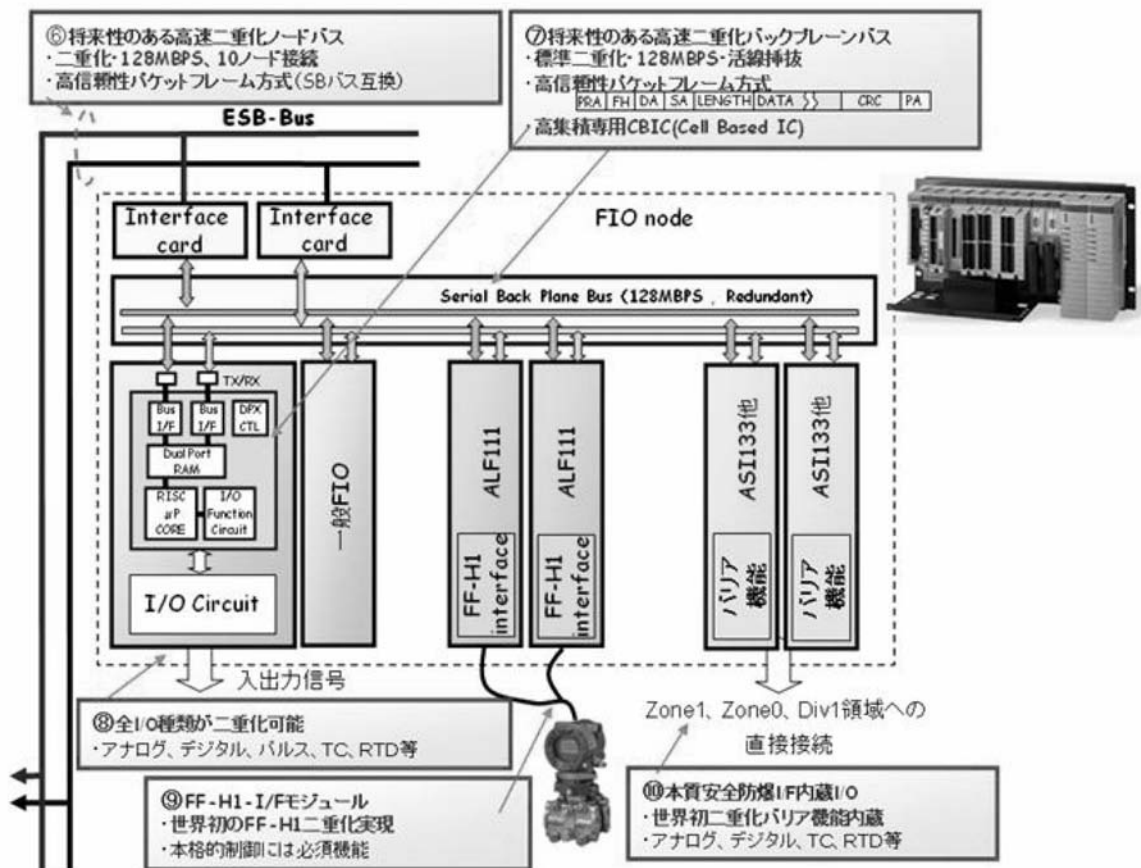


図6.7 CENTUM制御ステーション：I/O部の冗長化構成<sup>(6)</sup>

## 6.3 オンライン診断と予知保全

[6.1.1] で述べたように、有寿命部品の故障率は、バスタブ曲線に示される摩耗故障期間に入り、やがて寿命を迎える。摩耗故障期間に入る時期やその後の加速度合いが予測できれば、故障に至るまえに交換などの予防措置を取ることが出来る。摩耗劣化の進行度合いは、機器の運転履歴や稼働環境条件などに依存するので、これらをオンラインで連続監視することによって、機器の劣化度合いを診断し、適切な時期に保全を行うことでプラントの利用率を向上させる事ができる。このように機器の稼働状態をベースとした寿命管理手法は予知保全（Predictive Maintenance）と呼ばれ、[6.2] で述べた高信頼化設計とあわせて、システムトータルの稼働率向上に大きく寄与している。

図6.9にDCSにおけるオンライン診断サービスシステムの構成を示す。DCSの構成機器はそれぞれ各種の自己診断機能を有し、稼働状態が監視されている。温度、湿度、雰囲気など環境情報は、システムと同じ場所に設置されているODU（Online Diagnosis Unit）によって監視される。図6.8にODUの外観を示す。これらの稼働状態および環境情報はAMC（Advanced Management Console）に集められ、保全情報として集約される。AMCは公衆回線を介して、横河電機本社にあるグローバルレスポンスセンターに接続することができる。表6.3に稼働状態監視機能を示す。監視する時間の長さに応じて、3つのレベルに区分されており、それぞれのレベルに於いて、システムの稼働状態、劣化状態が監視され、保全上の総合評価がなされる。システムの稼働状態は、自己診断による情報で、

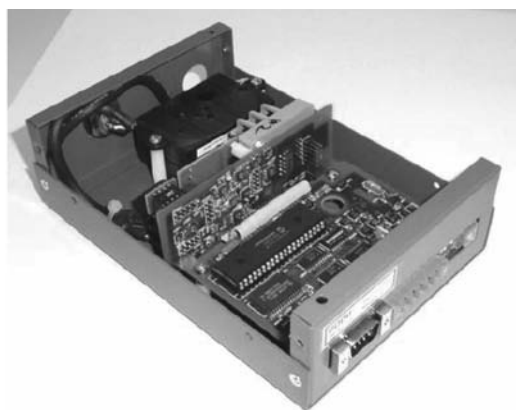


図6.8 ODUの外観<sup>(7)</sup>

表6.3 稼働状態監視<sup>(8)</sup>

| 監視レベル                | 稼働状態監視                                       | 状態劣化監視                             | 総合評価                                |
|----------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| レベル1<br>瞬時値または短時間で評価 | 内部エラー発生有無<br>ファン回転、電圧、バス負荷などの急変              | 温度、湿度、塵埃量の急変                       | 収集データの妥当性                           |
| レベル2<br>1日～1ヶ月の傾向評価  | ファン回転、電圧、バス負荷など変動<br>各データの変化量と規則性から短期的な評価を行う | 温度、湿度、塵埃量の1日単位の変動                  | 稼働状態監視データと状態劣化データの関連性有無             |
| レベル3<br>1ヶ月～1年の傾向評価  | ファン回転、電圧、バス負荷など変動<br>各データの変化量と規則性から中期的な予測を行う | 温度、湿度、塵埃量の季節変動<br>腐食度、絶縁抵抗、接触抵抗の変化 | 定期レポート発行<br>稼働状態監視データと状態劣化データの関連性有無 |

内部エラー発生有無、ファン回転数、電圧、バス負荷の急変などが監視されている。状態劣化監視は、ODUに内蔵されたセンサーにより、DCSが設置されている環境の温度、湿度、塵埃条件に加えて腐食度、絶縁抵抗、接触抵抗の変化なども計測されている。レベル1では瞬時値または短時間の収集データで妥当性が評価される。レベル2では1日～1ヶ月の傾向から、各データの変化量と規則性から短期的な評価を行い、稼働状態監視データと状態劣化データの関連性有無が評価される。

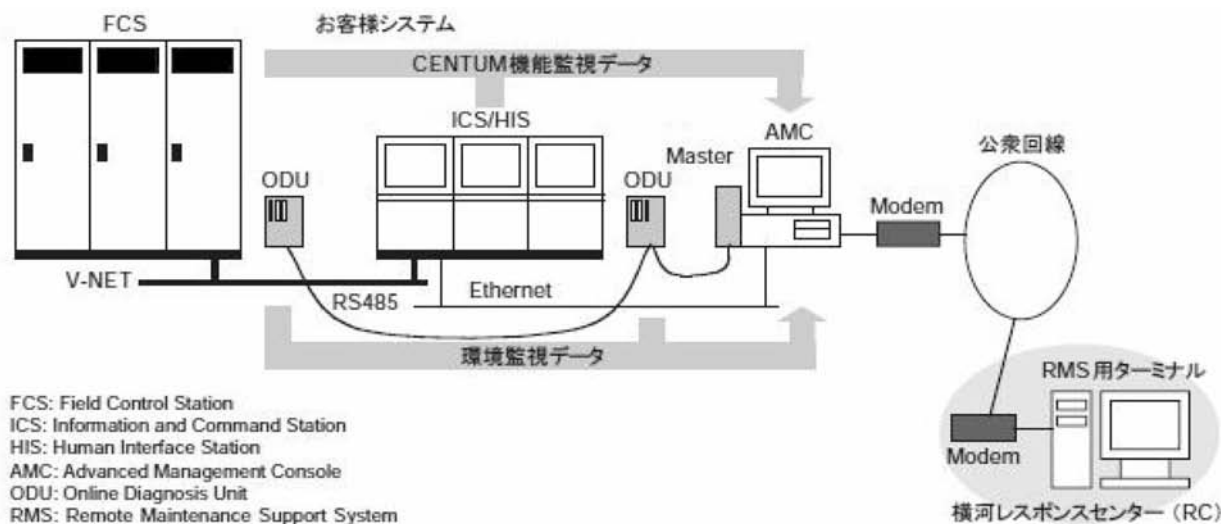


図6.9 オンライン診断サービスシステム<sup>(9)</sup>



レベル3は1ヶ月～1ヶ年の傾向評価で各データの変化量と規則性から中期的な予測を行う。レベル2と同様に稼動状態監視データと状態劣化データの関連性有無が評価され、定期レポートが発行される。図6.10は横河電機本社に設置されたGRC（グローバルレスポンスセンター）の写真である。GRCには、保守契約された世界中のシステムが接続され、その稼働状況が24時間365日監視されており、必要に応じて予知保全情報が提供される。定期修理や障害発生時には、このシステムを介して専任エンジニアによる迅速適切な支援が得られ、システムのライフサイクルにわたるトータルの稼働率向上につながっている。

## 6.4 稼働率実績

図6.11にCENTUMシステムの世界市場に於ける稼働率実績を示す。2007年12月現在で、17,000を越えるシステムが、世界の様々なアプリケーションで稼働している。また上述したフォールトトレラント技術により、CENTUM CS/CENTUM CS3000のFCS（フィールドコントロールステーション）の稼働率は99.99999%（セブennain）という他に類を見ない高い実績値を更新している。1975年開発時点では、当時

の電子部品の故障率と冗長化方式などから、稼働率を99.99%と予測したが、その後 [6.2.4] で述べたCPUのPair&Spare構成をはじめとするフォールトトレラントアーキテクチャの徹底追求がなされた結果、飛躍的な改善が達成された。



図6.10 グローバルレスポンスセンター



図6.11 CENTUMシステムの稼働率実績

## 6.5 耐ノイズ技術

1970年代に入りプロセス制御にデジタル制御システムが普及するにつれて、従来のアナログ制御システムではあまり問題にならなかったシステムの耐ノイズ性が問題となるようになった。デジタルシステムを構成する論理素子の高速・低消費電力化とともに、特に高周波ノイズに対する感度が相対的に高くなったためである。また一過性の誤動作（Transient Error）であっても、記憶内容が喪失されるとソフトウェア的に回復不可能な永久故障（Permanent Failure）を誘発してシステムダウンに至るような、デジタルシステム固有の危険性も懸念されたため、ハード/ソフト/システム、それぞれの観点から徹底したノイズ対策がとられた。表6.4にプロセスフィールドにおけるノイズ発生源とその特徴を示す。大型の電動機などが多数稼働するプロセスフィールドに於いては様々なノイズ源が存在するがこれらの外部ノイズは、入出力ケーブル、電源ライン、接地線などを介して電磁誘導、静電誘導、抵抗性結合などによってシステムに結合される。特にモータ起動時の突入電流や、リレー電磁弁など誘導性負荷の開放時のスパイク状電圧など、フィールド機器の起動停止時に発生する高周波成分を含むトランジェントノイズに対する対策が重要であった。図6.12にノイズ発生源と結合メカニズムを示す。システム内部の論理回路自身も素子のスイッチング電流がノイズ源になり、クロストークや共通インピーダンスノイズを発生させるので、プリント基板や相互接続配線などの実装の対策がなされている。

図6.13にDCSシステムの絶縁と接地の形態を示す。

表6.4 プロセスフィールドにおけるノイズ源<sup>(10)</sup>

| 周波数           | 主なノイズ発生源                                                                                                                    | 特徴                                                                                                                                 |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 直流および超低周波     | 熱起電力<br>電気化学的起電力<br>直流機器<br>鉄道                                                                                              | ・ ノーマルモードに重畳する信号との分離が難しい。                                                                                                          |
| 商用周波とその高調波    | 配電系<br>モータ、トランスなど交流機器<br>電源装置<br>電源線<br>計器<br>電気炉<br>工場内アース電流                                                               | ・ ノイズに周期性がある（周期性を利用した対策）。<br>・ 最も一般的なノイズで比較的良好に対策されている。                                                                            |
| 高周波<br>無線周波   | 高周波加熱炉<br>ラジオ・テレビ放送<br>トランシーバ<br>スイッチング電源                                                                                   | ・ 電磁波として伝播。<br>・ 回路の非直線性により検波されて直流低周波成分のノイズとなる。                                                                                    |
| インパルス性<br>広帯域 | 誘導性負荷の開放電圧<br>リレー、電磁弁、<br>アナンシェータ、遮断器<br>容量性負荷の突入電流<br>ランプ、モータ<br>コンデンサ入力形の電源<br>サイリスタ制御装置<br>溶接機<br>雷<br>静電気放電<br>給電系統のサージ | ・ ノイズの大きさ、周波数、発生頻度ともにランダムで再現性が得にくい。<br>・ 非常に高い周波数成分をもち、分布容量、配線の相互インダクタンスなどにより結合。<br>・ アナログ回路、デジタル回路ともに影響を受けるが、高速のデジタル回路への影響のほうが深刻。 |

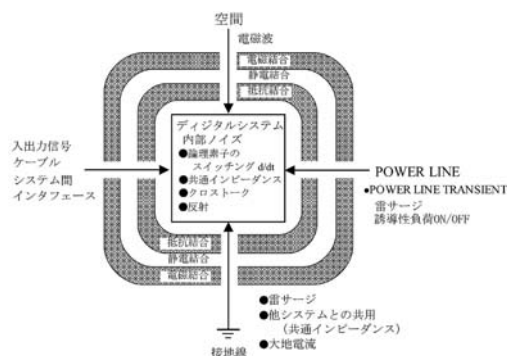


図6.12 ノイズ発生源と結合メカニズム<sup>(11)</sup>

プロセス入出力信号は、センサーやアクチュエーターが広域のフィールドに分散設置されるので、それぞれの大地電位差や大地電流などの影響を避けるため、これらの入出力信号は全てシステムからは絶縁されている。AC電源は勿論、通信ラインを含め、システムとの接続は全て絶縁されている。筐体もチャンネルベース建屋から絶縁されて設置され、回路系アースは大地に第一種接地されている。このように、プロセス制御システムを、プラントで安定に稼働させるためには、設置環境への配慮が極めて重要であり、1975年に（社）日本電子工業振興協会で、JEIDA29「工業用計算機設置環境基準」がまとめられた。DCS開発での経験が多く反映されている。その後さらに、計算機技術および計算機の設置される環境、システム形態などの変化に対応してJEIDA-63-2000「産業用情報処理・制御機器設置環境基準」として増補改訂された。

1975年に開発された当初のCENTUMの主記憶装置には磁気コアメモリーが使われていた。半導体メモリーがDCSに使用されるようになったのは、1970年代後半になってからで、SRAM（Static RAM）が最初に採用された。導入にあたっては、実績のあるコアメモリーに代替可能か、特に信頼性の観点からさまざまな評価が行われた。停電時の不揮発性はバッテリーで確保した。一方、SRAMやDRAMなど半導体メモリーの開発が進む中、1978年Intelから、パッケージの蓋を融着する鉛ハンダやパッケージを構成するセラミックに含まれる微量の放射性同位元素から発生するアルファ線によってDRAMのビットが反転するという論文が発表された。このビット反転は、メモリー素子がハード的に破壊されたわけではなく、リライトすることによって正常な動作に戻すことができるため、非破壊的なエラーでありソフトエラーと呼ばれている。その後この現象は宇宙線中性子や放射線によっても引き起こされ、SRAMや低電力の論理回路に於いてもソフトエラーとして影響を受けることが報告されている。主記憶装置はDCSの中核を占め、その高信頼化は極めて重



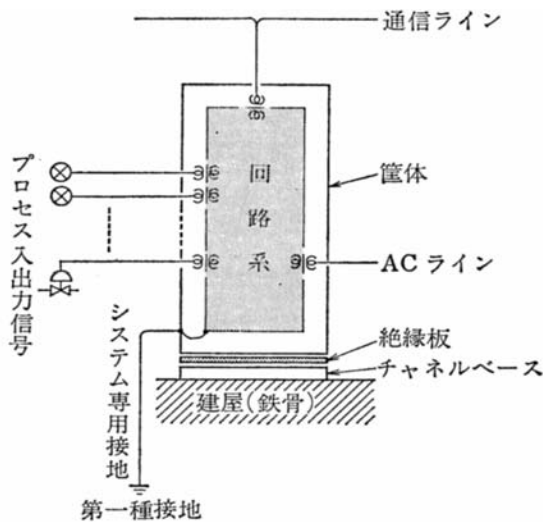


図6.13 システムの絶縁と接地<sup>(12)</sup>

要であるため、このような半導体メモリのハード故障およびソフトエラーに対して冗長ビットを付加して、誤り訂正符号（ECC：Error Correction Code）としてSECCED（Single Error Correction Double Error Detection）機能が組み込まれた。1ビットの故障は自動訂正し、2ビット故障は検出できる。図6.14に冗長化Codingの原理図を示す。符号Ⅰは3ビット（x、y、z）で8つの状態を表現しているが、冗長性のないCodingなので、1ビット誤りはそのままエラーとなる。符号Ⅱは3ビットで4つの状態を表現し、1ビット誤りを検出できる。符号Ⅲは3ビットで2つの状態を表現し、1ビット誤りは訂正、2ビット誤りはエラーとして検出できる。符号Ⅲでは、座標（0、0、0）が「0」に、（1、1、1）が「1」に対応している。符号化された隣り合う状態までの距離はハミング距離と呼ばれ、符号Ⅰ、Ⅱ、Ⅲのハミング距離は、それぞれ1、2、3である。

プラントのフィールドに広域に設置された制御ステーションから、中央計器室のオペレータステーションへの通信ラインは、kmオーダーの長距離伝送の場合

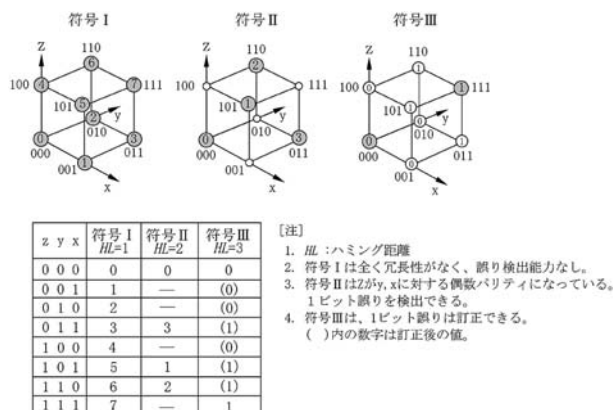


図6.14 冗長化Coding<sup>(13)</sup>

も多く、様々なノイズ源に晒される。通信ラインに混入するノイズによって引き起こされるエラーには、雑音の混入が確率的（ランダム）な「独立誤り」や、ネットワーク機器の故障によって雑音が集中して発生するような「バースト誤り」が想定される。DCSの中核をなす通信ラインに於いては、これが閉塞するとオペレータステーションからプラントの状態が見えなくなるので、通信ラインの故障や誤動作は絶対に許されない。そのために徹底した高信頼化がはかられ、通信ラインの二重化や、通信方式による高信頼が実現されている。図6.15に通信ラインの伝送誤り制御用のチェックコードとして使用され、「バースト誤り」についても効力のあるCRC（Cyclic Redundancy Check）符号を示す。CRC生成多項式は16ビットISO準拠である。

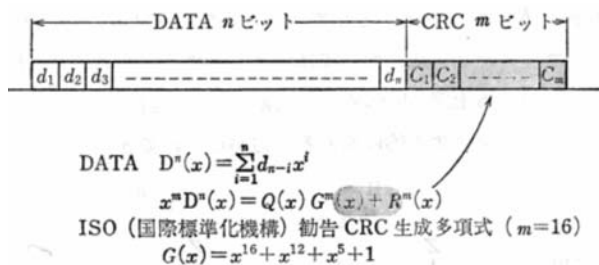


図6.15 CRC: Cyclic Redundancy Check

## 6.6 防爆技術

石油・化学プラントなどでは、プラントのフィールドで使用される機器類は、爆発性雰囲気など危険な作業環境で使用する場合には、安全確保のため防爆対策機器の使用が法的に義務付けられている。プロセス制御システムに於いても、フィールドに設置されるセンサーやアクチュエータは勿論、計器室に設置される制御システムとの電気的接続の上でもシステムの防爆対策が講じられている。

防爆の歴史は、産業革命の最中の19世紀初頭、イギリスの炭坑で明かりとして用いていたロウソクの火が、石炭に吸蔵されていたメタンガスに引火して爆発災害が多発し、多くの人命が失われたことが起源となっている。当時、王立科学研究所のデービー教授は、イギリス政府から炭鉱内で使用しても着火源とならない灯火開発の依頼を受け1815年ランプの火を金網の細隙で遮蔽した「デービー灯」を発明した。細隙による火炎の冷却効果に基づく消炎の原理は、耐圧防爆構造の細隙による火炎逸走防止の原点となった。また1912年と1913年にイギリスで発生した2件の炭鉱爆発事故では、信号レベルが検証され、低電圧回路でも炭鉱ガスに着火させ得るものであることが示された。その結果、



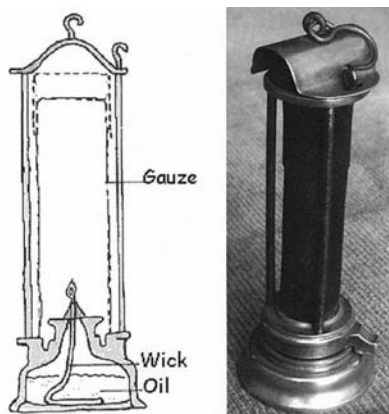


図6.16 デービー灯<sup>(14)</sup>

蓄積エネルギーが着火不能な水準に制限された新しい回路が考案され、「本質安全」と名付けられた。これが今日の本質安全防爆の起源となった。

爆発要因として「危険場所」が次のように定義されている。

0種場所（Zone 0）：爆発性雰囲気連続的又は長時間持続して存在する可能性がある区域。

1種場所（Zone 1）：爆発性雰囲気がプラント等の正常運転時に生成する可能性がある区域。

2種場所（Zone 2）：爆発性雰囲気がプラント等の正常運転時に生成される危険性がなく、また仮に発生したとしても短時間のみ存在するような区域。

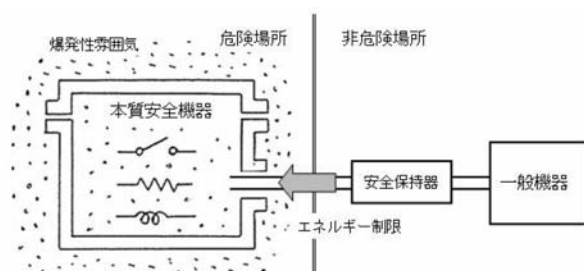


図6.17 本質安全防爆のシステム構成

「着火源」としては、電子・電気設備に於ける電気火花（アーク・スパーク・静電気）や金属工具や機器類の衝撃火花があげられる。基本的な防爆対策としては、爆発性雰囲気の生成と電気設備が着火源となるのを実質的にゼロとなるような小さな値以下に保持する（本質安全）か、機器の内部で爆発が発生しても外部に爆発が及ばない構造（耐圧防爆）などが備わった機器とすることが必要となる。以下に防爆構造の種類を示す。

### (1) 耐圧防爆構造

容器が、その内部に侵入した爆発性雰囲気の内部爆発に対して、損傷を受けることなく耐え、かつ、容器を構成するすべての接合部又は構造上の開口部を通して外部の対象とするガス又は蒸気の爆発性雰囲気へと引火を生じることのない電気機器の防爆構造。

### (2) 内圧防爆構造

容器内の保護ガスの圧力を外部の雰囲気の圧力を超えるある値に保持すること、又は容器内のガス又は蒸気の濃度を爆発下限界より十分に低いレベルに希釈することによって、防爆性能を確保する電気機器の防爆構造。

### (3) 油入防爆構造

電気機器及び電気機器の部分が油の上又は容器の外部に存在する爆発性雰囲気に点火することがないような方法で、これらを油に浸す電気機器の防爆構造。

### (4) 安全増防爆構造

正常な使用中にはアーク又は火花を発生することのない電気機器に適用する防爆構造であって、過度な温度の可能性並びに異常なアーク及び火花の発生の可能性に対して安全性を増加する手段が講じられた電気機器の防爆構造。

### (5) 本質安全防爆構造

正常状態及び仮定した故障状態において、電気回路に発生するアーク又は火花及び熱が、ガス又は蒸気に点火するおそれがないようにした電気機器の防爆構造。電気エネルギーが制限され、沿面距離/絶縁空間距離を確保して放電を防止し、電気部品等の表面温度も制限される。安全保持器（バリア）との組み合わせが必要である。図6.17に本質安全防爆のシステム構成を、図6.18に安全保持器の回路構成を示す。安全保持器は、本質安全防爆システムを構成するために必要なエネルギー制限機能（バリア）で、爆発危険場所に設置される本質安全防爆構造の機器と組み合わせて接続され、対象とする爆発性ガスに点火し得ないように、ツェナーダイオードにより電圧が、Fuseおよび抵抗により電流が制限される。

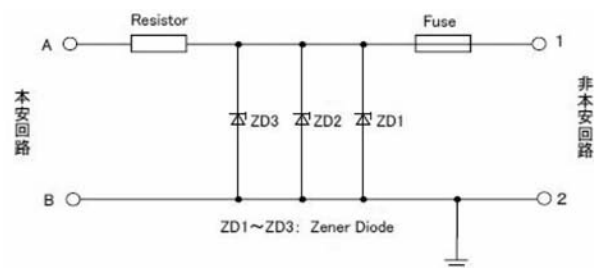


図6.18 安全保持器（バリア）の回路構成

## 参考文献

- (1) (2) Y.Wakasa : Design Considerations for a Fault-Tolerant Distributed Control System, IFAC Workshop on Reliability of instrumentation systems for safeguarding and control (1986)
- (3) (4) 若狭裕ほか：総合形相制御システムCENTUM New Modelの高信頼化設計技術 横河技報 Vol.27, No.4, p.175～184 (1983)
- (5) (6) CENTUMの高信頼化への取り組み IAブックレット (2003)
- (7) (9) 野田孝司ほか：CENTUM CS/CS3000/CS1000 オンラインメンテナンス診断サービス 横河技報 Vol.47, No.1, p.31～34 (2003)
- (8) 横河電機：IP013 (R0) オンライン診断サービス 紹介資料PART2
- (10) (11) (12) (13) 山崎弘郎ほか：電子回路のノイズ技術 オーム社p164, 219, 229, 247, 248 (1981)
- (14) (社) 産業安全技術協会TISニュースNo.223 p5

# 7 標準化とオープン化

## 7.1 標準化の意義

工業に於ける標準化の重要性は言をまたない。部品や製品に於ける互換性が確保されることにより、市場競争が促進され、新技術の開発・普及が促進される。プロセス制御の分野でも、さまざまな切り口から標準化が進められてきた。特にプラントの状態を計測するセンサーには、温度計、圧力計、流量計など、多岐にわたる測定対象に対して、さまざまな測定原理に基づく多数のメーカーの製品が、それぞれの特徴を生かして使われている。これらを制御システムとして一元的に扱うために、フィールド機器とプロセス制御システムとのインターフェイスが標準化されている。DCSはリアルタイムの制御とその信頼性の重要性から、メーカーごとのクローズドシステムになっているが、工場全体を見ると、DCSによるオンラインのプラント運転の上に、プロセス解析、収率解析、品質管理など業務を行うシステムが構築されている。これらのオフライン業務の多くはWindows系のPCで行われ、表計算ソフトEXCELでデータ処理することが多い。これらのPC系システムとの接続性を向上させるために、DCSのオープン化が必要となり、そのためのソフトウェアインターフェイスの標準化も進んでいる。

## 7.2 基準化信号：フィールド機器インターフェイス

プラントの状態を表すプロセス変数は温度、圧力、流量など多岐にわたり、それぞれの測定範囲（レンジ）もまちまちであるため、図7.1に示すように0-100%に基準化（Normalize）されて扱われている。すなわち、空気圧信号では、0-100%が20～100kPa（0.2～1.0 kg/cm<sup>2</sup>）に、電流信号では4-20mAに、電圧信号では1-5Vに対応して扱われる。3.4.1の項でも解説したとおり統一信号の規格化は1960年代初頭から始められたが、それ以前は、電流信号のインターフェイスには、DC1～5mA、DC2～10mA、DC4～20mA、DC10～50mAなどが使われていた。また、熱電対、测温抵抗体など、センサ自体に生じる信号がmV単位の微小な直流電圧信号が多いため、DC0～10mVを統一信号として採用したメーカーもあった。電圧信号の問題点は、電流信号に比べてノイズに弱いことであり伝送距離の長いフィールドでの信号伝送には、電流信号の方が優れている。この伝送信号に関してはIEC

（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）のTC65/SC65A（Industrial Process Measurement and Control：工業プロセス計測制御専門委員会のシステムコンシダレーション分科会）のWG4で審議され、IEC381として制定（後にIEC60381-1と改称）された。IEC60381-2ではDC4～20mAの電流信号とともにDC1～5Vの電圧信号も規格化された。DC4～20mAなど最小出力信号が0でない「ライブゼロ」となっている理由は、停電や信号線の断線による無信号状態（事故）と、信号値ゼロの状態を区別するためである。ライブゼロのもう一つの利点として、最低信号（DC4～20mAの場合には4mA）以下の信号を使って発信器自体の駆動用電力を電流信号から送ることができ、その電力によって2線式発信器の回路を作動させることがあげられる。比較的長距離の信号伝送を行うプロセス制御では、配線が減ることは大きなメリットである。また空気式制御システムでは0.2～1.0cm<sup>2</sup>の統一信号が使われていたので、最小、最大の比が5倍のライブゼロ信号は電気、空気の混在するシステムで、互いの信号のやり取りが容易となる。IEC60381-2ではDC4～20mAの電流信号とともにDC1～5Vの電圧信号も規格化された。図7.2に2線式伝送信号の回路構成を示す。

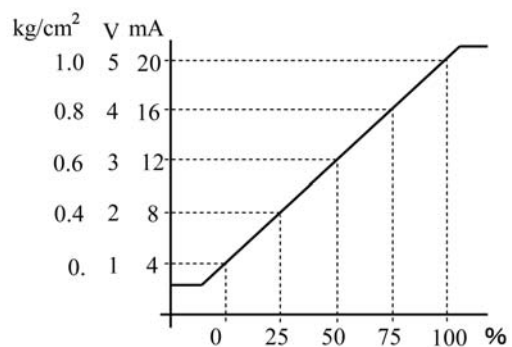


図7.1 フィールド機器との統一信号



図7.2 2線式発信器の回路例



## 7.3 フィールドバス

フィールドバスは、4-20mAアナログ統一信号に代わる通信インターフェイスとして、1984年にIECでフィールド機器用デジタル通信の標準化構想が提案されてから、10年余りの検討期間を経て1996年に実装仕様 (FOUNDATION Fieldbus H1) として制定された。図7.3に示すように、従来の4-20mAでは、各フィールド機器と1対1のケーブルでつながれて、信号伝送は一方方向であったが、フィールドバスでは一本のバスケーブルでマルチドロップ接続され通信は双方向である。温度、圧力、流量などの測定値の伝送だけでなく、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

った。このことは、フィールド機器とのインターフェイスがデジタル通信になったという直接的な変化に止まらず、計装システム全体に大きな影響をもたらした。遠隔地や危険場所にあるフィールド機器に対してはフィールドバス経由でのオンライン保全が可能になった。個々のフィールド機器が持つ保全情報を集めてデータベース化することにより、統合的な機器管理を可能とするPAM (Plant Asset Management: プラント設備管理) パッケージが提供され、フィールドネットワークを利用した予知保全技術も開発されている。フィールドバス計装によって保全業務の効率化がなされ、プラントの建設コストや運転コストなど、TCO (Total Cost of Ownership) の削減が可能となった。表7.1にフィールドバスの主な仕様を示す。

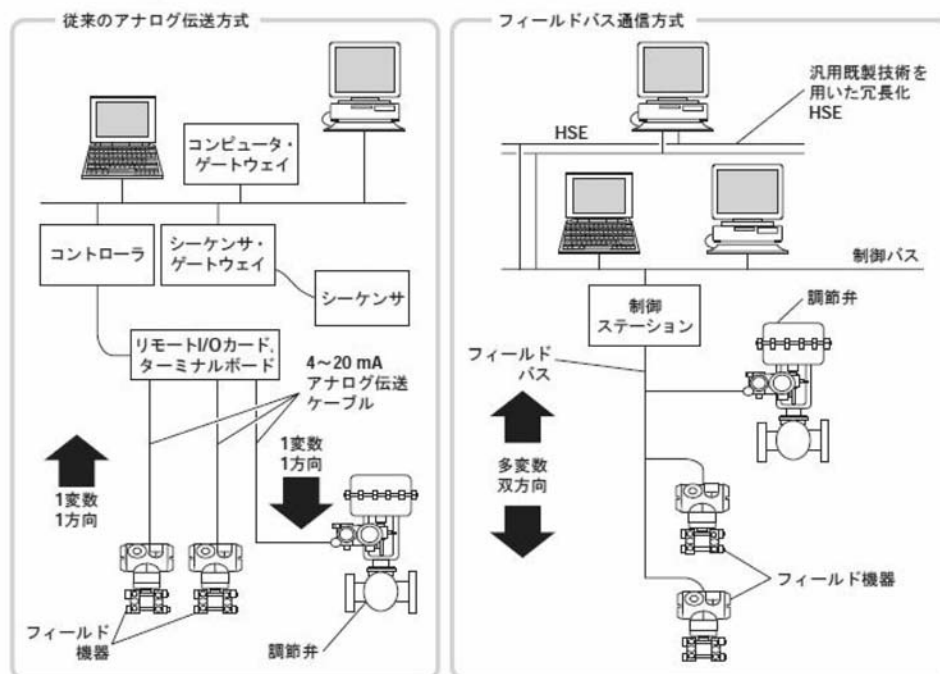


図7.3 アナログ伝送とフィールドバスの比較 <sup>(1)</sup>

表7.1 フィールドバスの仕様 <sup>(2)</sup>

| 項目         | 低速フィールドバス<br>FF-H1                     | 高速フィールドバス<br>FF-H2 (*2)                                         | 高速フィールドバス<br>FF-HSE (高速イーサネット)     |
|------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 位置付け       | フィールド機器統合                              | サブシステム統合                                                        | サブシステム統合<br>データサーバ統合               |
| 伝送速度       | 31.25 kbps                             | 1.0 Mbps (1 Mbpsモード<br>もしくは高速電流モード時)<br>2.5 Mbps (2.5 Mbpsモード時) | 100 Mbps                           |
| 接続機器台数     | 最大32台/セグメント                            | 最大32台/セグメント<br>(リピータを使用すると、<br>接続台数を増やすことが可能。)                  | 接続台数は、FF-HSEによって<br>統合されるサブシステムに依存 |
| 使用ケーブル     | ・ 対より線 (シールド付き)<br>・ 光ファイバー            | ・ 対より線 (シールド付き)                                                 | ・ 対より線 (シールド付き)<br>・ 光ファイバー        |
| 接続機器への電源供給 | 可                                      | 可                                                               | 不可                                 |
| 本安対応       | 可                                      | 可                                                               | 不可                                 |
| 二重化対応      | 不可 (シングル) (*1)                         | 可                                                               | 可                                  |
| 接続機器の例     | 伝送器、コントロールバルブ、<br>フィールドバスマルチプレクサ<br>など | 多成分分析計、PLC、<br>リモートI/Oなど                                        | 多成分分析計、PLC、<br>リモートI/Oなど           |

\*1: 横河のFF-H1用のALF111形フィールドバス通信モジュールは、二重化が可能。  
\*2: 現在は使用されていない。

### 【7.3.1】フィールドバス規格制定の経緯

図7.4にフィールドバス標準化の経緯を示す。フィールドバスの標準化はISA SP50委員会で検討が進められていたが、プロセス産業にとって重大な影響を与えるものであるため、さまざまな意見が出され、その標準化には紆余曲折があった。IECに於いても1984年、フィールド機器用デジタル通信の標準化構想が提案され、1985年にはIEC/TC65/SC65Cで、「フィールドバス」の名称で新標準化作業項目に承認されている。1990年にはISA SP50委員会とIEC/TC65/SC65C/WG6が協力して、標準化検討が始まった。フィールドバスの製品化を目的として、1992年8月に、横河、フィッシャー・コントロール（Fisher Control）、ローズマウント（Rosemount）、シーメンス（SIEMENS）の4社によってISP（Interoperable Systems Project）が結成され、1993年2月、ISPはISP協会へと発展した。一方このようなISPの動きとは別に、1993年3月に、ハネウェル（Honeywell）、A-B（Allen-Bradley）、シェジェレック（CEGELEC）、テレメカニーク（Telemechanique）他数社によってWorldFIP

（Factory Instrumentation Protocol）が発足し、2陣営間で「フィールドバス戦争」と呼ばれる覇権争いが始まった。その後、ユーザから「フィールドバスは国際的に統一された標準に基づくべきである」との意見が高まり、ISP協会とWorldFIP北米（WorldFIPの北米組織）が1994年9月に合併して、フィールドバス協会が設立された。日本からは横河、山武、富士電機が理事会社となった。

以後、フィールドバス協会が、国際的に統一された実装仕様の開発を行うことになり、IEC、ISA、フィールドバス協会によるフィールドバス標準化の体制が確立した。1996年8月フィールドバス協会によってFOUNDATION Fieldbus H1（Low Speed Voltage Mode）仕様が制定され、IEC61158として国際標準が順次発行された。仕様を表7.1に示す。

このような規格制定の過程で、日本は1989年12月の会議で物理層仕様の検証計画を提案し翌年2月に結果を報告、1993年横河がIEC/TC65会議で差圧伝送器を使った試作品のデモンストレーションを行うなど、物理層の規格制定に大きく貢献した。

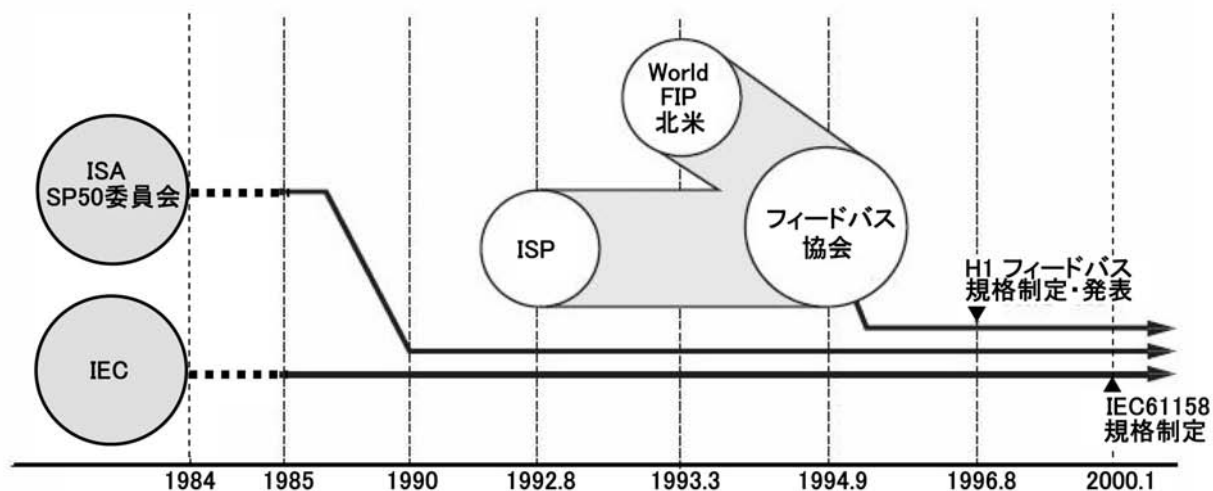


図7.4 フィールドバス標準化の経緯 (3)

### [7.3.2] フィールドバスがもたらすもの

フィールドバスにより、プロセス量や機器の内部状態など複数データの同時伝送が可能になった。またフィールド機器にマイクロプロセッサが搭載されインテリジェント化されたことにより、1台で複数の物理量計測（マルチセンシング）が可能になり、自己診断による機器内部状態の伝送も可能となった。マルチセンシングでは、例えば、差圧伝送器では差圧だけでなく1次側静圧も同時に測定し伝送が可能であり、流量計では流量に加えて流体の温度などの計測も可能である。流量の補正演算に供せられ計測の精度向上につなげることができる。フィールド機器の自己診断は、保全情報として有効に利用される。近年、プラントの安全操業と保全コストの低減をめざし、PAM（Plant Asset Management：プラント設備管理）への要望が高くなっているが、そのためには、フィールド機器を含めたプラント全体の実稼働状態をリアルタイムに監視することが必要である。フィールドバス機器のインテリジェント化により、圧力差圧伝送器の導圧管詰まり検知、電磁流量計の電極部付着検知などが可能になっているが、このような経時変化の監視は有効である。特にコントロールバルブはプロセスに直接作用し、大きなエネルギーをもった流体を制御しているので、そのタイムリな保全が極めて重要である。[4.3.4]でも述べたように、バルブポジションナのインテリジェント

化により、バルブのストローク回数や開閉時間の積算、弁内部の摩耗進行状態などの監視が可能になり、この情報はフィールドバスを介して制御システムに収集される。またこれらの情報を蓄積し、信頼性工学に基づいた判断をすることによりバルブの部品交換時期を予測し、予防保全から予知保全へと保全のレベルを高めることが期待されている。

事故防止の観点から、安全に関するユーザ側の関心は高く、プラント全体の保全情報管理の充実が求められ、フィールド機器はじめプラント関連機器の稼働状態を統合的に監視・管理できるシステムが開発されてきた。フィールドバスやDCSと連携したシステムの例を図7.5に示す。PRM（Plant Resource Manager）はDCS経由でフィールドバス上の機器の稼働状態を収集し保全情報を提供する機能を持つ。PRMサーバは、[7.4]で述べる標準インターフェイスOPCを介してMES/ERPドメインのシステムと接続され、工場内の広域に設置された各機器の保全情報を、上位のシステムへも提供することを可能にしている。これらはフィールドバスを始め、ネットワークの標準化によって加速される。

ISA/SP100で工業用無線（Industrial Wireless）の標準化検討が始まっているが、上述した広域のメンテナンスの観点からも、その応用面には注目すべき内容が多く含まれている。

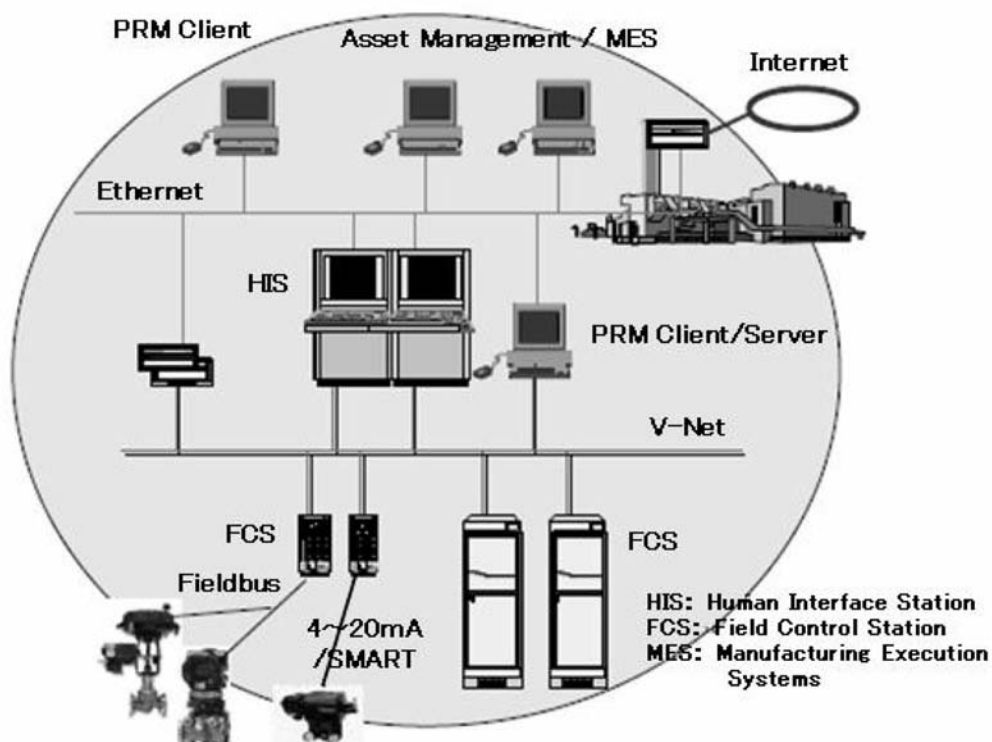


図7.5 PRM の位置付け (4)



## 7.4 OPC---OLE for Process Control

プロセス産業に於いては、生産現場のプラント制御システム（DCS）と生産管理システム（MES：Manufacturing Execution System）や経営情報システム（ERP：Enterprise Resource Planning）との統合をはかることにより工場全体の生産効率の改善が進められている。工場内には、様々なベンダーの機器やシステムが稼働しており、これらを統合するためには、マルチベンダー製品間の情報交換が必須となる。また対象となる機器も、DCSだけでなくSCADAやPLCなどが含まれる。プロセス制御システムはライフサイクルが長く、同一工場内に、自社製品でも歴代の機種が稼働しているケースも少なくないし、将来には新機種にリプレースされる事もある。生産システムの統合のためには、このような事情に対応できるよう、フレキシブルな通信手段が必要である。Windows系PCは今や業務の標準ツールとなり、職場のネットワークに接続され、日々の業務に使用されている。オンラインのプラント運転はDCSで行うが、プロセス解析、収率解析、品質管理など、DCSを介してプラントの状況を把握しながら行われるオフライン業務も多い。これらの業務の多くはWindows系のPCで行われ、表計算ソフトEXCELでデータ処理することが多い。DCSのオープン化とはWindows系PCへのオープン化といっても過言ではない。

プロセス産業に於いては、フィールドの計器から制御室のDatabaseに至るまで、様々なデータソースが存在する。これらデータはその仕様やアクセス手段が各システムで異なるため、統一的なアクセス手順が必要であった。このためにOPC Foundationが1996年に設立された。OPCとは、OLE for Process Controlの意味で、マイクロソフトのCOM（Component Object Model）/ DCOM（Distributed Component Object Model）を利用した計測・制御システムにおける情報交換の標準インタフェースである。クライアント/サーバ構造で動作し、マルチベンダー製品間の情報交換を容易にする。OPC協議会（OPC Foundation）が組織され、世界の多くの計測・制御関連企業が参加し、普及と標準化が進められている。現在OPC Foundationへは356社、OPC-J（日本）へは48社が加盟している。主要IA関連企業だけでなく、中小企業を含め種々の会社が加盟しており、プロセス制御・監視システム間のデータインタフェースとしては、完全にデファクトスタンダードの地位を確立している。ま

たInteroperability Workshopが開催され、OPC対応製品の適合性確認が行われている。CENTUMではOPCのクライアント/サーバのいずれにもなれるよう、専用のソフトウェアが用意されている。

表7.2にOPCの仕様を示す。システム間に発生する通信データやイベントの形態に合わせた仕様が定められている。例えばプロセスデータの授受はOPC-DA（Data Access）、アラームやイベントの通知はOPC-A&E（Alarm and Event）、ヒストリカルデータの通信はOPC-HDA（Historical Data Access）によって行われる。

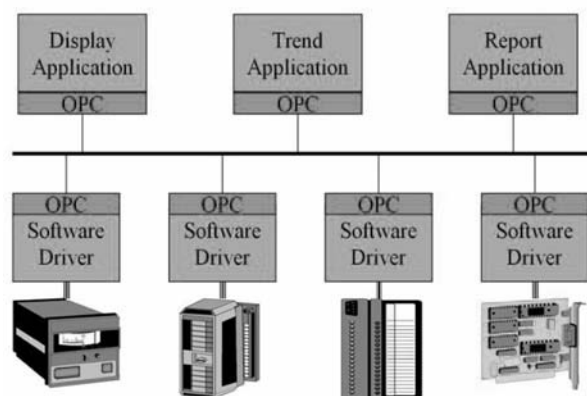


図7.6 OPCによる異機種間接続

表7.2 OPCの仕様<sup>(5)</sup>

| OPC仕様        | 内容                                                                          |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| OPC-DA       | プロセスデータの基本アクセス                                                              |
| OPC-A&E      | アラームとイベントの通知                                                                |
| OPC-HDA      | ヒストリカルデータのアクセス                                                              |
| OPC-DX       | フィールドネットワーク間のデータアクセス                                                        |
| OPC-XML      | SOAP (Simple Object Access Protocol) を利用したデータ交換                             |
| OPC-Batch    | バッチコントロール(SPC)データのアクセス                                                      |
| OPC-Security | セキュリティの仕様                                                                   |
| OPC-UA       | UA: Unified Architecture<br>既存仕様(DA,A&E,HDA)の統合に加えて、本格的なオブジェクトベースのデータ交換が可能。 |

図7.7にOPCサーバーExaopc<sup>(注1)</sup>の構成を示す。OPCクライアントは、OPCサーバーに接続されたマルチベンダー機器に対して、OPC-DA、OPC-A&E、OPC-HADによって統一的にアクセスすることが出来る。ベンダーによる違いは、特定機種（システム）に対応して用意されたカセットによってソフトウェア的に吸収されている。これによりOPCクライアントはI/Oインターフェイスカセットを通してマルチベンダーのDCSやPLCとの通信が可能となる。新機種に対しては、カセット部のみを開発すればよい。図7.8にOPCクライアント/OPCサーバーによるプラントの統合システム構成を示す。リアルタイムの制御性と極めて高い信頼性が要求される制御システム（DCS）と、

MES/ERPとが、OSはじめそれぞれのシステムの事情とは独立に、相互接続が可能になった。このようにOPCは、マイクロソフトのソフトウェア技術の上にプロセス制御の世界のオープン化と統合化を進めてきたと言える。

(注1) Exaopcは横河電機のソフトウェアパッケージの商標。

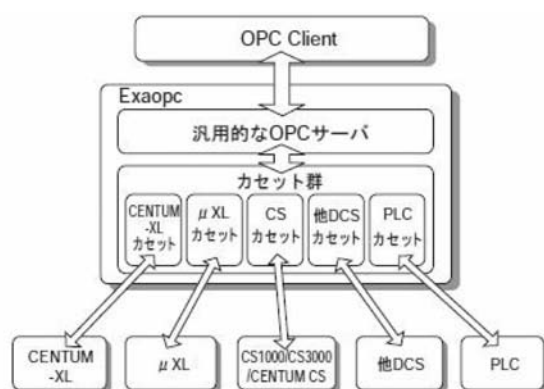


図7.7 OPCサーバーの構成 (6)

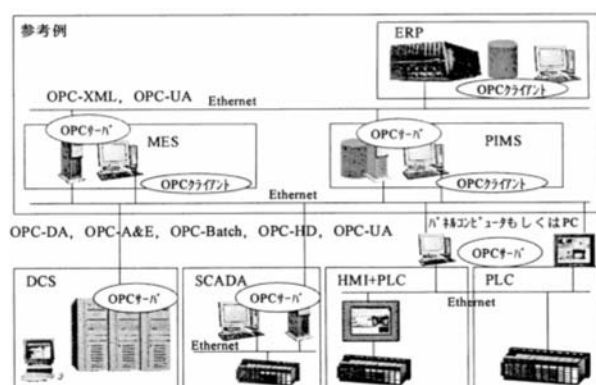


図7.8 OPCによるシステムの統合 (7)

## 7.5 バッチプロセス

化学産業におけるバッチプロセスでは、反応釜などの同一設備を使って多品種の製品が生産され、各工程の設備がネットワーク型につながっているものが多い。またバッチプロセスは処方の変更が頻繁に行われ、新しい処方に基づくプラントの改造も行われている。従来バッチプロセスの設計は一品ものが多く、製品が変わるたびに制御システムのハードウェアやソフトウェアの改造が発生するという問題もあった。これらの変更柔軟に対応できるよう、制御、運転、管理などバッチプロセスの体系化と標準化が進められてきた。

1988年 ISAにSP88 (Standard Practices88) が創立され、標準化のための仕様の検討が始められた。1995年にISA S88.01 Batch control Part1: Models and terminologyが制定され、これを受けた形で1997年にIEC

61512-1 Batch control Part1が規格化された。2002年IEC 61512-2が制定され、さらに-3、-4、-5へと標準化が進められている。翻訳規格としてJIS C1807が制定されている。この規格は下記の5つのパートで構成される。

Part1：モデル及び用語

Part2：データ構造および言語ガイドライン

Part3：原処方およびサイト処方、モデルおよび表現

Part4：バッチ記録

Part5：装置インタフェース手順要素

1994年アメリカで非営利活動団体WBF (World Batch Forum) が発足し、標準化の推進活動が進められている。日本では1995年に発足した学術振興会PSE143委員会・ワークショップ17 (WS17) とその後継のWS20を経て2000年からJBF (Japan Batch Forum) が常設され、日本における標準化を推進している。

ISA/S88.01 では、バッチプロセスは次の3つのモデルに階層化されて定義されている (8)。

- [1] プロセスモデル (Process Model)：化学反応や物理反応などプロセス面からみた階層化である。製品になるまでの物質の化学的、物理的变化というプロセスのみ抽象化して記述し、設備などの具体的概念を含んでいない。
- [2] 物理モデル (Physical Model)：ハードウェアの面から見た階層化である。プラント全体は設備 (Process Cell) と呼ばれ、“設備”は装置 (Unit) から構成され、“装置”は機器 (Equipment Module) に分解される。“機器”はバルブ、ポンプ等の計装機器 (Control Module) や配管などの集まりのことで、仕込み、攪拌、温調といったひとつの機能を司る。
- [3] 手順制御モデル (Procedural Control Model)：ソフトウェアの面から見た階層化である。仕込み、冷却、攪拌、送液、添加、など製造の単位手順を規定する。バッチプロセスの制御には、装置を制御する側面と生産する製品 (バッチ) を制御する側面がある。一つの装置を使って、複数の銘柄の製品が生産される。S88では処方 (Recipe) という概念によって、銘柄毎の設定値ばかりでなく、その製造手順も含んだ「処方手順」が定義されている。処方の変更に対するシステムの変更が容易になり、変更に伴うエンジニアリングとソフトウェアコストが大幅に軽減される。

図7.9にISA/S88.01に準拠して作成されたDCSのバッチ制御パッケージにおけるプロシジャの構成例を示す。この例ではユニットプロシジャは「仕込み」、「加

熱」、「反応」からなり、「反応」は初期化、触媒投下、静置の単位シーケンスからなっている。各単位シーケンスを実行する各フェーズはDCS内のシーケンス制御機能（SEBOL、ロジックチャート、シーケンステーブルなど）によって実行されることが示されている。図7.10にユニット管理の操作監視画面の例を示す。

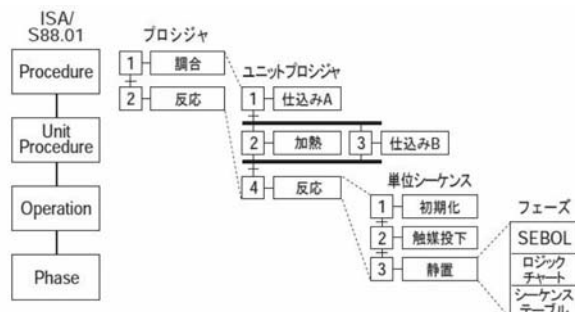


図7.9 プロシジャの構成<sup>(9)</sup>

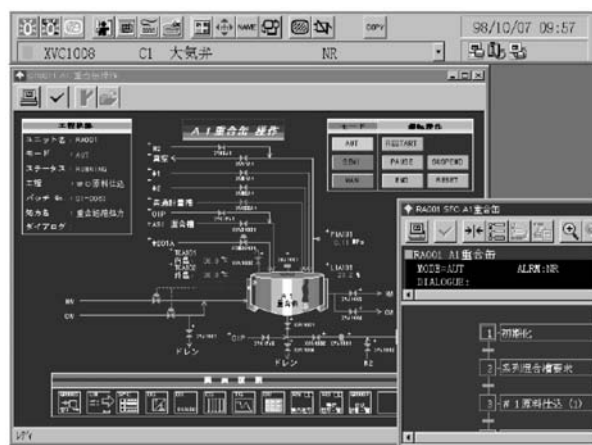


図7.10 ユニット管理の操作監視ウィンドウ例<sup>(10)</sup>

## 7.6 プロセス制御に関連する国際標準化組織

工業プロセス計装制御分野の国際標準化活動はIEC/TC65（Industrial Process Measurement and Control：工業プロセス計測制御）で行われている。図7.11にTC65の組織図を示す。TC65の担当範囲は多岐にわたり、IECの他のTC/SCや、ISO、ISA等他組織とも密接に連携を取りながら標準化が進められている。SC65A：システム側面（Aspect）、SC65B：計測制御機器（Device）、SC65C：産業用ネットワーク（Industrial Networks）、SC65E：システムエンジニアリングおよび管理の4つの分科委員会（SC）で構成されている。JEMIMA（（社）日本電気計測器工業会）は日本工業標準調査会（JISC）から委託を受け、国内審議団体としてIEC/TC65国内委員会事務局を務めている。

## 7.7 トータルシステム

### [7.7.1] プロセス制御の形態

プロセス産業は石油精製や鉄鋼のような原材料の加工から始まり、自動車や家電のような最終製品の製造へとつながっている。図7.12では、製品と制御対象の特性からプロセスを連続プロセス、ハイブリッドプロセス、ディスクリートプロセスに分類している。石油・化学、紙、鉄鋼などの連続プロセスでは、制御対

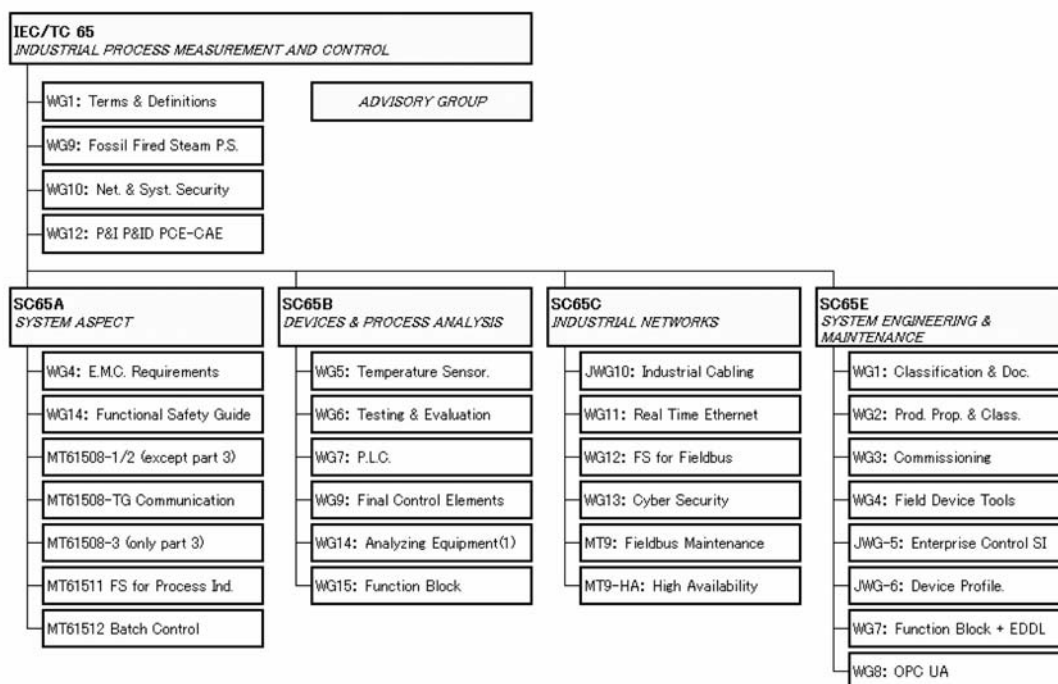


図7.11 プロセス制御関連技術の国際標準化：IEC/TC65の組織



象は主として気体または液体でありPID制御が中心である。自動車などのディスクリートプロセスでは、製品は固体でありシーケンス制御が中心である。中間に位置するハイブリッドプロセスとして化学、薬品、食品などがあげられるが、液体または粉体を対象にPID制御とシーケンス制御が組み合わされたバッチプロセスで生産が行われている。連続プロセスや多くのハイブリッドプロセスは、主としてDCSによって制御され、ディスクリートプロセスはPLCが主体である。

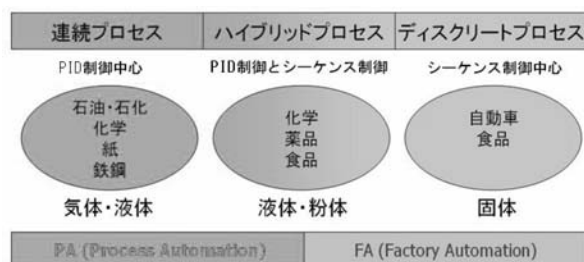


図7.12 プロセス制御の形態

### [7.7.2] 生産システムに関する標準化

市場の要求の変化に迅速に対応し、サプライチェーンも含めてトータルの生産効率を上げる為に、工場/プラントから全社レベルへのシステムの統合化が積極的に進められている。図7.13にISA95の定義による生産システムの階層構成を示す。プロセス制御システムはLevel 0/1/2に位置づけられ、各工程に設置されプロセスを制御する。処理の単位は秒オーダーである。DCSはこのレベルに属している。最上位のERP (Enterprise Resource Planning: 経営資源計画) は、Level 4に位置づけられ、オフィスに設置され顧客を対象として月/週/日単位の処理が行われる。ERPとDCSなどの制御システムをつなぐ生産管理システムは、MES (Manufacturing Execution System: 製造実行システム) と呼ばれ、Level 3に位置づけられている。工場に設置され、製品を対象に、時間/分単位の処理が中心である。MESはERPからの業務計画を、指示として制御システムに伝えその結果として生産現場の情報をリアルタイムに把握する、生産工場に於ける「神経系」システムとしての役割を担い、ものづくり経営の「見える化」の推進とともに、その重要性が増している。MESという用語は、1992年MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association) Internationalで定義された。

生産システムの統合 (ECI: Enterprise Control Integration) の標準化は、1995年ISAの中に発足した、SP95委員会によって行われてきた。検討のスコープは、S88 (バッチ) との連携のもとに広げられ、対象

プロセスも連続/バッチ/ディスクリートへ、業務機能は制御装置や設備機器領域だけでなく、生産管理/品質管理/在庫管理まで視野に入れられている。SP95委員会の検討結果はANSI/ISAのS95規格となり、IEC/TC65/SC65A/JWG15 (Enterprises Control System Integration: ビジネス・製造システムの統合) で国際規格 (IEC62264) として審議されてきた。なおSC65A/JWG15は改組され現在は図7.11のSC65E/JWG-5となっている。IEC62264は下記の構成となっている。

Part1 (ISO/IEC62264-1):モデル及び用語

Part2 (ISO/IEC62264-2):オブジェクトモデルの属性

Part3~:審議中

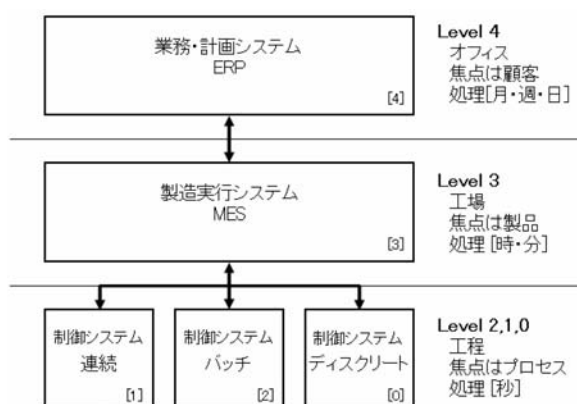


図7.13 生産システムの階層構成

### [7.7.3] 標準化とトータルシステム化

図7.14は、生産システム全体におけるプロセス制御システムの機能の相互関係の構成を示したものである。コントロールドメインでは、フィールドのセンサーなどからの信号はフィールド通信によって制御機能に入りPID演算などの制御演算結果がアクチュエータへ出力される。高度制御、最適化は、操業上の制約と安全な運転範囲内で、スループットを最大にして運転収益、運転効率を増大させる。個々のプロセスユニット装置を安定な状態にして安全性を向上させる。モデリング機能には、プラントを構成する装置のモデル化と制御機能のモデル化があり、プロセスシミュレーションに利用される。ダイナミックシミュレーションは、プラント運転を中心にしたプラント操作、制御の設計/解析、運転訓練の分野で利用される。スタティックシミュレーションは、プラントを設計する段階でプラントの全体バランスと各装置の仕様確定に使われている。コントロールドメインは、生産管理、生産計画などを司るMESを介してビジネスドメイン (ERP) へ接続される。

図7.15は横軸に図7.12で述べたプロセスの形態を、

縦軸に生産システムの階層をとって、ネットワークの位置づけを表したものである。DCSはそれ自体の機能拡張とともに、MES/ERPなど関連する他のシステムとのシームレスな連携を可能にしており、工場トータルの生産性の向上に大きく寄与している。これは、フィールドバス、LANなどネットワークの標準化、OPCなどソフトウェア間インターフェイスの標準化、S88（バッチプロセス）のようなアプリケーションレベルの標準化、さらにはS95（MES）のような生産システムの概念の標準化など、さまざまなレベルでの標準化により可能となった事であり、産業における標準化の重要性を改めて痛感する次第である。

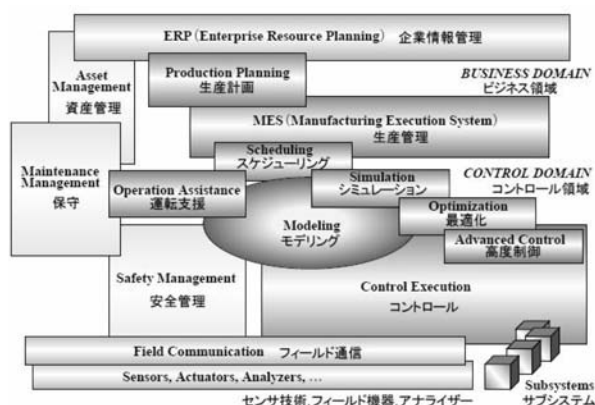


図7.14 プロセス制御生産システムの機能構成<sup>(11)</sup>

## 参考文献

- (1) 横河電機 Technical Information：FOUNDATIONフィールドバス参考書 TI 38K02A01-01 (2003) p1-3,
- (2) (3) 横河電機Technical Information：フィールドバス概説書TI 38K03A01-01 に加筆。
- (4) 森宏ほか「統合危機管理パッケージ"PRM"」横河技報 Vol.45 No.3 (2001) p153
- (5) 日本OPC協議会：OPC Foundation日本語概説書
- (6) 寺島伸彦ほか：Exaopc OPCインタフェースパッケージ 横河技報 Vol.43, No.3, p.107～110 (1999)
- (7) 日本OPC協議会：OPC実線ガイド 工業技術社p13
- (8) ジャパン バッチ フォーラム (JBF)：S88入門
- (9) (10) 島田千秋ほか：CENTUM CS 3000のバッチ制御パッケージ"CS Batch 3000" 横河技報 Vol.43, No.1, p.21～24 (1999)
- (11) 森岡義嗣：横河フィールドバス製品開発のコンセプト 横河技報 Vol.42, No.2, p.47～49 (1998)

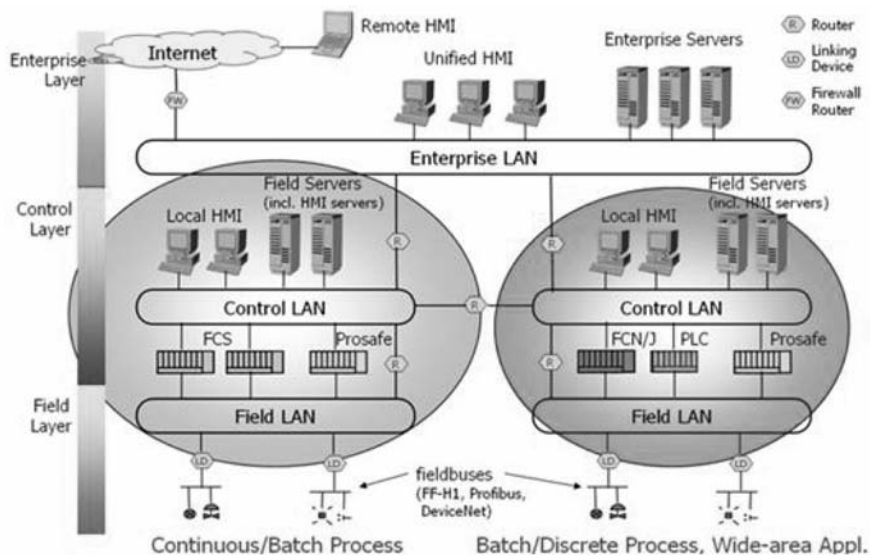


図7.15 生産システムの階層とネットワーク

# 8 | アプリケーションへのインパクト

前章までにDCSを中心に、プロセス制御技術の変遷について述べてきた。本章では、代表的なプロセスについてDCSがアプリケーションにどのようなインパクトをもたらしたかについて要点を解説する。

## 8.1 石油・石油化学

### [8.1.1] 石油化学工業の変遷とプロセス制御システム

石油精製工場では、原油はその成分の沸点の違いを利用して、蒸留塔で石油ガス、ナフサ、ガソリン、灯油、軽油、重油などに分解される。ナフサはエチレン、プロピレン、ブタジエン、ベンゼン、トルエン、キシレンに分解される。これらは石油化学基礎製品と呼ばれ、プラスチック、合成繊維、合成ゴム、塗料、洗剤などの誘導品に加工され、関連産業に供給される。原油精製から始まって、基礎製品、誘導品へいたる各種の化学プラントは相互に接続され、石油化学コンビナートを形成する。

図8.1に、石油化学工業とプロセス制御システムの変遷を示す。1955年に当時の通産省から「石油化学工業育成対策」が出され、日本に石油化学コンビナートが誕生した。1958年の岩国に続いて1959年川崎、四日

市、1964年に千葉、水島、徳山1969年に大分、1970年泉北と続々と建設された。石油精製は産業の最上流の連続プロセスとして早くから自動化が進んだ。DDC (Direct Digital Control：直接計算機制御) の導入では、横河は1967年にYODIC500を東燃和歌山のハイドロスキミング・プラントに納入し、1968年に完全二重化システムYODIC600が同社川崎工場に採用された。山武からはH20コンピュータシステムが出光興産徳山工場のエチレンプラントにDDCシステムとして納入された<sup>(1)</sup>。その後石油・石油化学を中心にDDCの採用が進められた。集中型DDCシステムでは、完全二重化を中心とした高信頼化が追求され、DDCの制御アルゴリズムが検証された。1975年にDCSが登場し、計器室の統合を目指し様々なプラントでパネルレス (CRT) オペレーションが検討されたが、1982年東燃和歌山BTXプラントにおいて、本格的なパネルレスオペレーションが稼動したのを契機に、急速に石油・化学等でDCSによるパネルレス (CRT) オペレーションが浸透して行った。

また制御の面でもDCSの果たした役割は大きい。連続プロセスにおける制御性の改善は、製品品質や操業効率の改善につながり、そのまま利益に直結した。

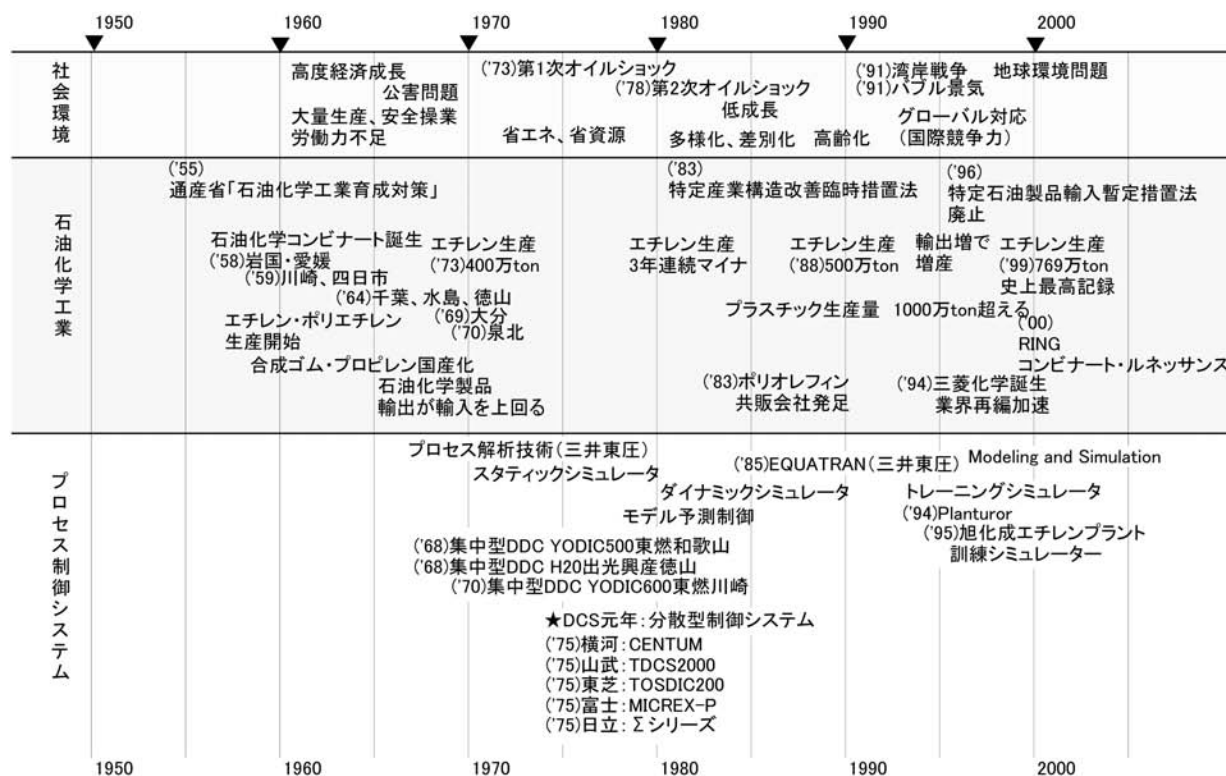


図8.1 石油化学工業とプロセス制御システムの変遷



FLTP (Flow、Level、Temperature、Pressure) と呼ばれる基本的なプロセス変数の制御から、製品品質やプロセスの様々な性状を計測し制御する、高度な制御が追求され導入されていった。アドバンスド・プロセス制御はSPC (上位計算機) -DCSというシステム構成のなかでは、従来はSPCの領域であったが、DCSの制御機能やCRTオペレーション機能の拡充によってDCSでの高度制御の構築が可能になった。一方、いかに高度な制御を組み込んだとしても、プロセス設計ですべてを厳密に既定することはできない。またプロセス特性の変動や制御のOptimum Pointの変化などあって、実際は設計どおりの自動化にはならない。従ってオペレータが介在したフレキシブルな運転が必要であり、その面でもDCSシステムのもつ柔軟性が効果を発揮した。1996年には特定石油製品輸入暫定措置法が廃止され、非精製会社による石油製品輸入が自由化された。石油関連産業に従前にも増してコストダウン圧力が高まり、制御性やプラントの操業効率の一層の改善が求められた。これらの改善要求に対して、信頼性の優れたDCS上で高機能かつ安全な高度制御を効率的に開発/保守/運転することが推進された。また、2000年5月にはRING (石油コンビナート高度統合運営技術研究組合) が設立され、コンビナートの国際競争力強化を目指して「コンビナート・ルネッサンス事業」が開始され、コンビナート域内の生産性向上および環境負荷の低減に対応すべく異業種異企業間をまたがった高効率生産技術の開発が進められた。

### [8.1.2] 高度制御の応用

石油精製/石油化学プラントは、産業の最上流に位置する連続プロセスであり、安定な操業と省エネ対策をはじめとするプラントの操業効率の向上が重要視されてきた。また化学プラントは化学反応をともなう多入力多出力の制御系であり、効率を重視した最適点での運転と、制御の安定性の両立のためには、基本のPID制御だけでは困難であり、高度な制御が必要である。そのためパルプ、配管などのプラントを構成する個別の機器や、ボイラや蒸留塔などユニットプロセスのシミュレーションモデルが開発されており、計算機によるプロセス解析が検討されている。

図8.2にプロセス制御の高度化システムの構成を示す。DCSは、プロセスに物理的に設置されたセンサによって流量、液位、温度、圧力などのプロセス変数を読み込みそれらを制御する。これらのプロセス変数はFLTP (Flow、Level、Temperature、Pressure) と総称される。一方、不純物濃度や分子量など、製品の

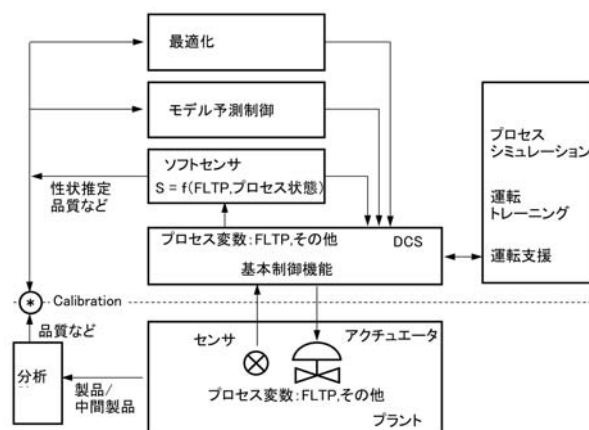


図8.2 プロセス制御の高度化

品質に関係する性状値は直接計測が困難で、分析計などによってオフラインで計測されている。このため品質など製品の性状値をオンラインでリアルタイムに計測制御することは困難であった。これらの性状値はFLTPの値やプロセスの状態の関数であり、これらをソフトウェア演算によって推定する「ソフトセンサ」とよばれる機能が実現されている。ソフトセンサの推定値はハードウェアの分析計によって定期的に校正される。さらにソフトセンサの値を目標値に近づけるよう、対応するFLTPの値を制御することによって、製品品質などを直接制御することが可能になる。プロセスの非線形性や不安定性のために通常のPID制御では満足な制御性能が得難いプロセスに対しては、モデル予測制御 (MPC: Model Predictive Control) が有効である。プロセスをモデル化し、そのモデルを使ってプラントの応答を予測し、それを好ましい形にするように操作出力を決める制御方式で、1970年代後半から1980年代初頭にかけて開発された。モデルの精度が制御性に直接影響するので、各種のモデリング手法が開発されている。

プロセスの負荷変動や起動停止などの変化に対し、操業の安全性や設備の寿命に関係するプロセス変数は、その変動幅や勾配を一定の幅に管理する必要がある、関連するプロセス変数のバランスをとる制御が難しく、その運転にはオペレータによる多くの手動操作と、高い運転技術が必要とされた。高度制御の応用により、従来手動で行っていた操作がなくなりオペレータの負担が大幅に軽減された。また目標値ぎりぎり運転することが可能になり、操業効率向上し、消費電力やスチーム使用量の削減などコスト削減につながっている。さらに、プロセスの運転データを定期的に収集し、内蔵する物質収支、熱収支計算に基づくプロセスモデルを用いて、収益が最大になる最適運転条件を計算し、モデル予測制御やDCSのPIDコントローラに設定値を

与えるオンラインの最適化制御も可能になった。

### [8.1.3] プラントシミュレータの応用

近年、DCSの信頼性が高くプロセス制御も安定して運転され、非定常状態の運転を経験する機会が極端に減少した。定期修理も3～4年に一回となり、プラントのスタートアップ・シャットダウンなどを通してプロセス制御を体験する機会も減少している。また石油・化学工業黎明期の建設・試運転を経験し、プラントを熟知したベテランオペレータも世代交代の時期を迎えている。プロセスの現場に密着した経験や技能を伝承することが重要課題になっており、そのために、プラントシミュレータが活用されている。プラントのライフサイクルにあわせて、下記のようなプラントシミュレータが使用されている。

- [1] プロセス解析・検討
- [2] 教育シミュレータ
- [3] 運転訓練シミュレータ
- [4] 制御支援シミュレータ
- [5] 最適化シミュレータ

これらのシミュレータによって、プロセス工学の原理・原則を学ぶことができる。シミュレータ上で各機

器を操作することによって、その動作原理・性能を理解し、制御操作とプロセスの動きを理解して制御動作の基本を学習し、プロセスオペレーションに必要な知識を習得することができる。特にプラント起動/停止など非定常時の運転手順の訓練に有効である。さらに、オンラインの制御システムと連携した運転支援システムや、高度制御などプラント運転の最適化への応用も行われている。

シミュレーションではモデリングの精度が決め手になる。図8.1に示すように、永年の実績に基づく三井東圧のプロセス解析技術と横河電機のプロセス制御技術とによって1994年Plantutor<sup>(注1)</sup>が開発された。Plantutorでは、ポンプ、バルブ、配管系機器、タンク、熱交換器、蒸留塔など、実際のプラントを構成する機器ごとに、化学工学に基づいてモデル化され、標準のユニットモデルとして用意されている。温度計、流量計などの一般測定器、PID調節計などのDCS制御機器の計装ユニットを使って仮想プラントをコンピュータ上に構築し、実プラントと違和感のないリアルタイム性と高い精度でのシミュレーションが可能となっている。図8.3に蒸留塔のプロセスシミュレータ画面例を示す。

(注1) Plantutorは株オメガシミュレーションの商標。

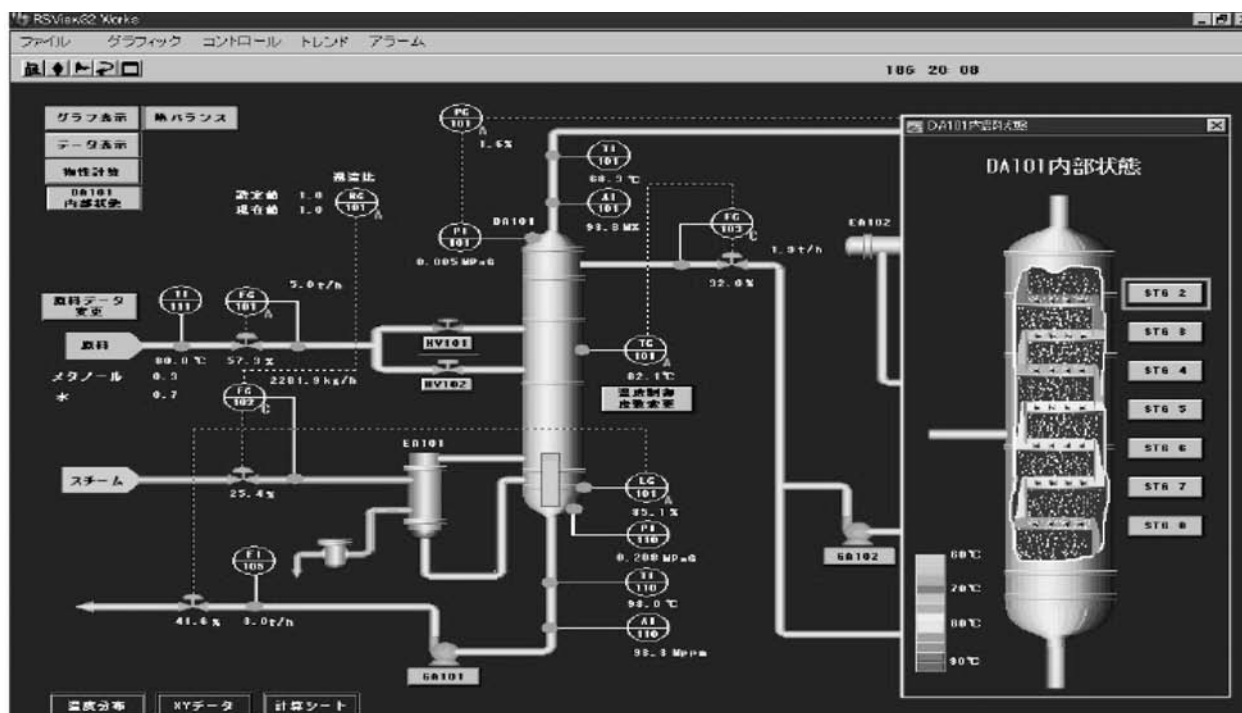


図8.3 蒸留塔のプロセスシミュレータ画面<sup>(2)</sup>

## 8.2 鉄鋼

### [8.2.1] 日本の粗鋼生産量の推移

図8.4に示すように、日本の粗鋼生産量は高度成長期に急速に増加し1972年初めて1億トン/年を超え、1973年にはピーク（1.2億トン）に達した。その後2度にわたる石油ショックを経て高度成長の時代は終わり、20年余りは、1億～1.1億トン/年で横ばいの状態で推移するが、鉄鋼業界は量から質への転換が迫られた。1970年代から韓国や台湾などが鉄鋼業に進出し、グローバルな価格競争も激しくなった。この間種々の合理化対策が実施され、歩留まり、エネルギー原単位、労働生産性、などあらゆる観点からプロセスの改革が進められた。プロセスの改革にはDCSをはじめ計測制御技術が大きく寄与している。DCSが登場した1975年は、鉄鋼業界で量から質への転換が開始された時期にほぼ一致しており、プロセス改革のベースとなる省エネ、省力化、品質改善、制御性改善による製品の高機能化などに、DCSが果たした役割は極めて大きい。また製鉄所トータルの生産管理用計算機とDCSとのシステム統合が容易になり、大幅な生産性の向上が達成された。2003年以降は増加に転じ、2006年には約1.18億トンとなっているが、日本の鉄鋼メーカーはより高付加価値な鉄鋼製品（自動車鋼板など）に経営資源を集中している<sup>(3)</sup>。

DCSが日本の鉄鋼産業に初めて導入されたのは1976



図8.4 日本の粗鋼生産量の推移

年で、新日本製鐵(株)君津製鐵所混鉄車脱硫設備に導入された。高炉へは1977年に川崎製鐵(株)千葉製鐵所の6高炉に納入され、引き続き新日鐵君津2高炉、神鋼加古川3高炉に納入された。その後相次いで各社の高炉に導入され、現在日本で稼働中の28基の高炉のうち26基がDCSで計装され、1基がDCSへの更新中である。

### [8.2.2] 鉄鋼の製造プロセス

鉄鉱石やコークスなどの原料から、高炉によって銑鉄が作られ、転炉、連続铸造、加熱炉、圧延などの設備によって様々な製品に加工される。計測制御の対象は、個体、粉体、液体、気体と多岐にわたり、特に製品の鉄自体が、非常に重量の重い高温の液体の状態から、プロセス間を移動しながら固体に加工されて行く。この間プロセスとしては連続系、バッチ系および搬送

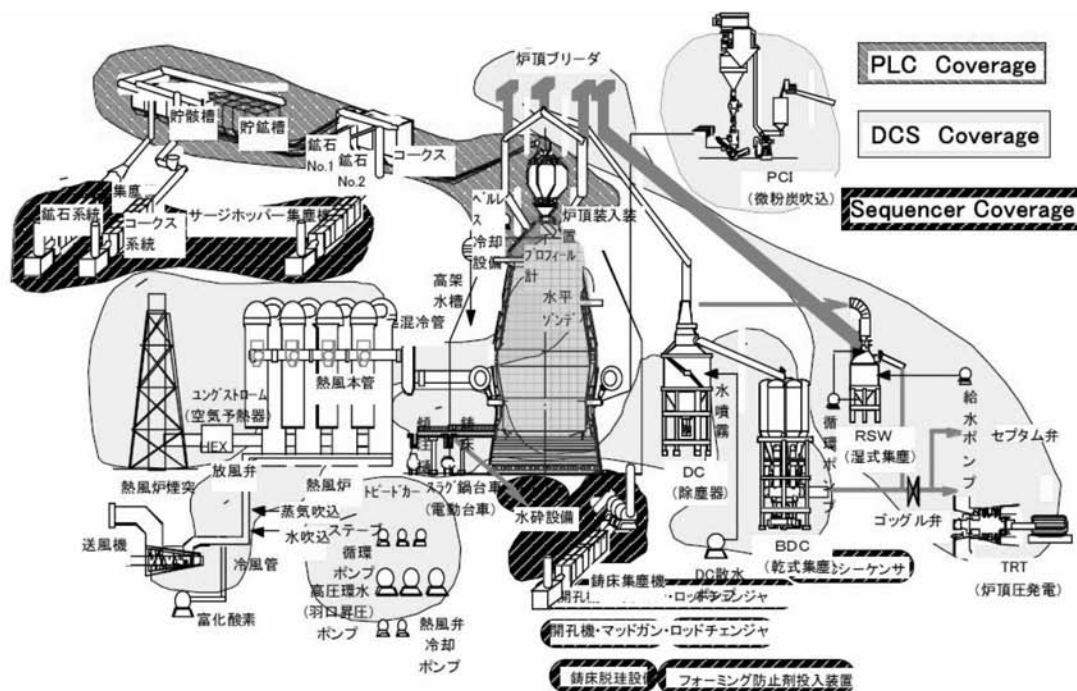


図8.5 高炉の計測制御<sup>(4)</sup>



系が混在しており、複雑なプロセス制御が行われている。温度、圧力、流量といった連続的なプロセス変数の制御のほかに、多数のモーターの制御が行われるのが鉄鋼の製造プロセスの特徴である。

図8.5に高炉および高炉まわりの設備構成を示す。設備の特性上、温度、圧力、流量など、連続的なプロセス変数は、要求される制御周期も比較的遅く、DCSによって制御されている。また高速の制御周期が必要なモーター類はPLC（Programmable Logic Controller）によって制御されている。このように制御対象の特性に合わせて、DCSとPLCがそれぞれの分担範囲を制御し、操作監視はひとつのシステムにまとめられ高炉の操業が行われている。図8.6に高炉の計測制御システムの例を示す。PLCがDCSの制御バスに接続され、DCSのオペレータコンソール上から操作が可能になっている。以下にカバーする高炉のプロセス変数の点数の例を示す。計測制御対象としての高炉の規模の大きさが伺える。

[1] プロセス変数

- ・ 温度：1160点
- ・ 流量：360点
- ・ 圧力：140点
- ・ 成分その他：350点

[2] 制御ループ数：120ループ

[3] デジタル信号

DI=4150点 DO=1700点

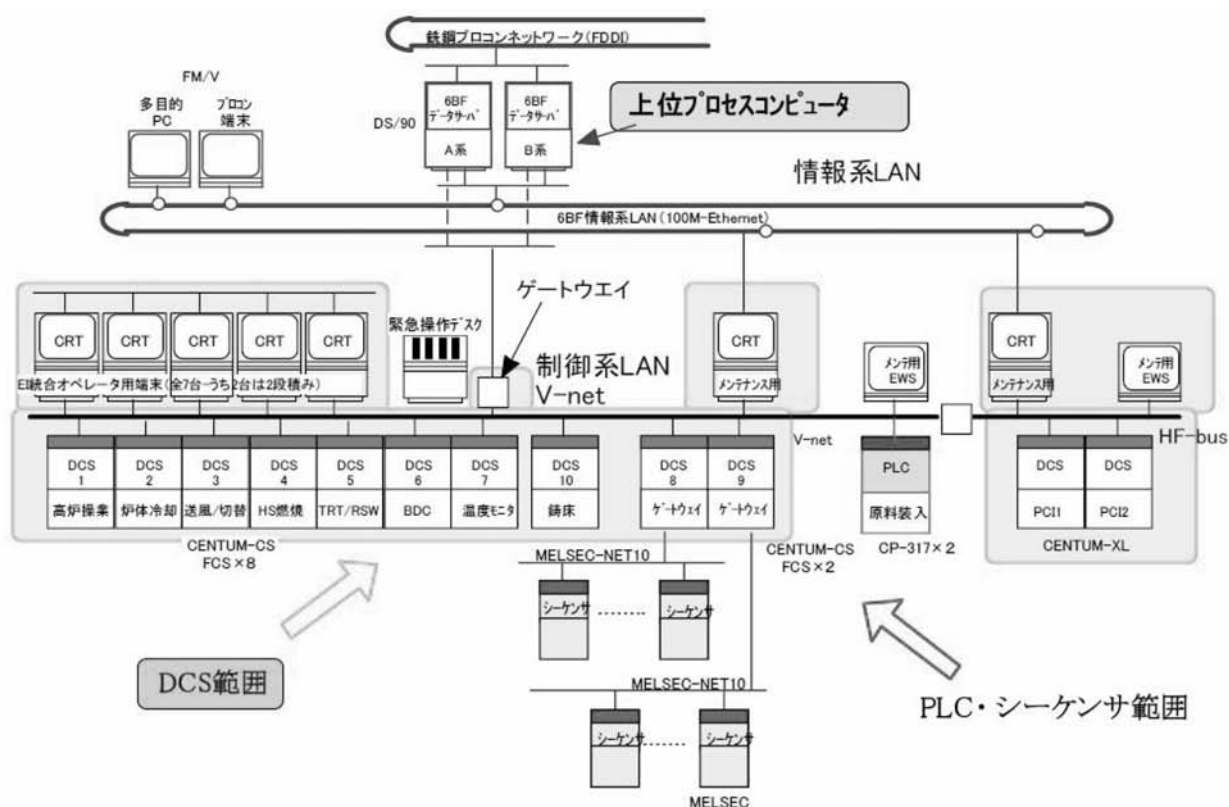


図8.6 高炉の計測制御システム構成例 <sup>(5)</sup>

### [8.2.3] EIC統合

図8.7に鉄鋼プロセスに於けるシステムの階層構成を示す。すでに述べたように、連続的なプロセス制御はDCSによって制御され、調節弁が対象である（I：計装）。高速なモータ類はPLCによって制御される（E：電気）。プラント全体の操業監視や生産管理は計算機によって行われる（C：計算機）。鉄鋼プロセスでは、システムはこのような階層構成をとっており、それらの連携をとるためEIC統合が進められている。E、I、Cの主な機能を以下に記す。

E（電気）…PLCによるシーケンス制御が主体である。

制御対象は基本的にモータの制御で、工場に於ける物流に関連するFA制御（位置、速度、力の制御）で、高速の制御周期（数ms～数百ms）が要求される。

I（計装）…DCSによるPID制御が主体である。制御対象は温度、圧力、流量などの連続プロセス変数を主体に、調節弁を介して行われる。制御周期は1秒周期が基本である。

C（計算機）…ホストコンピュータからPCに移行する傾向にある。モデル制御の他、操業実績の管理、生産計画情報の展開など、生産管理コンピュータとEIの仲介役をはたす。

製鉄プラント（高炉、転炉、連続鑄造、焼鈍…）のどのプロセスに於いてもEI統合が行われているが、EI

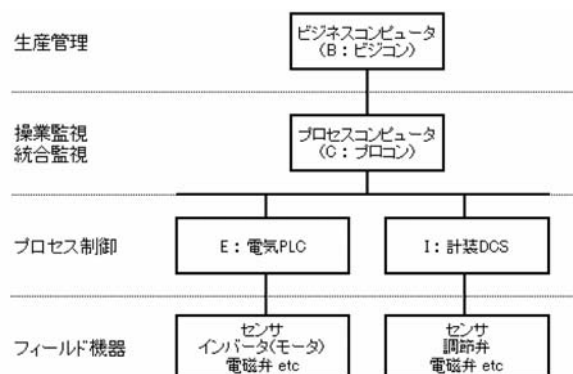


図8.7 鉄鋼プロセスに於けるシステムの階層構成

(C) のCまでを統合している例は、まだ少なく高炉と連続鑄造、焼結の一部で行なわれている。E、I、Cそれぞれに得意なベンダーがシステムを提供し、それらが統合され、いわゆるマルチベンダーの統合システムが構成される。DCSとして横河電機は、1993年の新日鐵君津1、2焼結プロセスで、E=安川電機、I=CENTUM CS（横河DCS）、C=日立に対してCENTUM CSのICS（オペコン）上でEIC統合を実現した。EI（C）統合の目的は、HMI（Human Machine Interface）を統合し、操作性を向上させると同時に、HMI、Operatorを削減することにある。システムのオープン化を通じて異機種間接続性を向上させ、自由なプラットフォーム選択とトータルコストダウンを目指す。また、電気、計装の設計・保守エンジニアの融合をはかる。上記のニーズに対して、計装システムがDCS化されたことが大きく貢献している。システム間のリアルタイムの情報交換が容易になり、DCSのHMI上にEI統

### E(電気)とI(計装)別々のMMI →省人化に支障、オペミス誘発

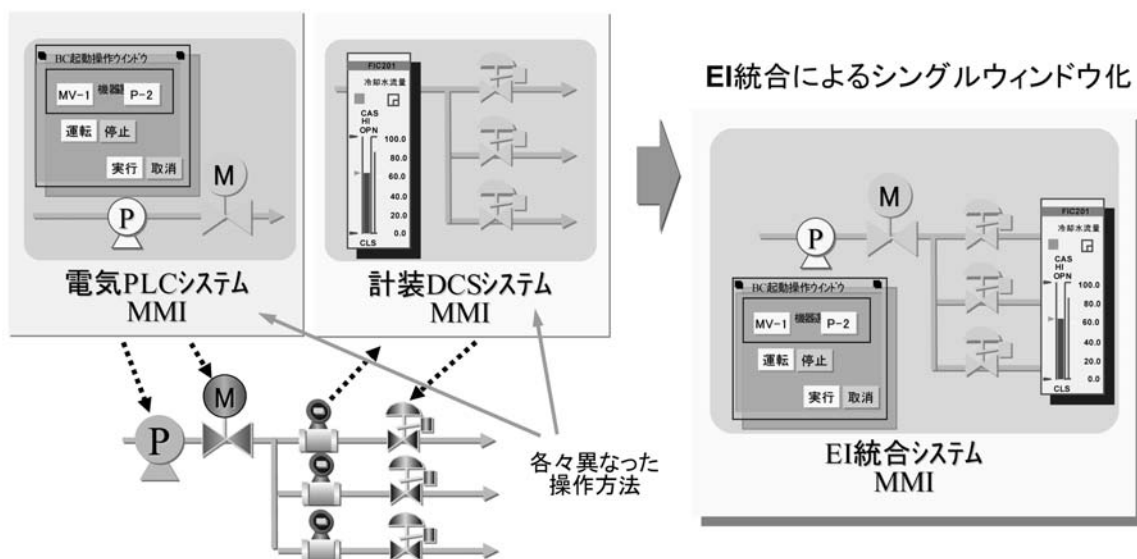


図8.8 EI統合による運転画面のシングルウィンドウ化<sup>(6)</sup>

合の運転画面を構築できるようになった。

図8.8にEI統合による運転画面のシングルウィンドウ化の例を示す。従来システムの事情から、モータはE（電気）、調節弁はI（計装）それぞれのシステムのHMIから行っていた別々の操作画面を、DCSのHMI上に統合し、ひとつの画面からE、I両方の操作が可能になったことにより、アラームの一元化、操作性の向上、オペミスの軽減、オペレータの削減、計器室の統合などが可能になった。

高炉は「休風」と呼ばれる設備の補修が定期的に行われる。その際、設備を安全に停止させ、補修後安全に再起動させることが必要であるが、そのためにDCS-PLC連動による休風時の停止、起動シーケンスの自動化が図られている。図8.6に示すように、PLC群がDCSと同一バスに接続されDCS-PLC間でのインターロックがソフトウェアによりフレキシブルに設定できるので、設備稼働の安全性向上に役立てられている。

世界のGDPの伸びに対応して、鉄の生産量が増加している。日本では高炉の新設はないものの、改修などにより高炉あたりの出鉄量の増強がはかられている。また日本の製鉄業は、自動車用鋼板はじめ世界一の製品品質と操業効率の高さを誇っている。これは高炉はじめ製鉄プラント全体の高い効率と安定な操業の上に実現されていることであるが、そのためにDCS計装が果たしている役割は大きい。

## 8.3 紙パルプ

紙は文明のバロメータと言われる。新聞、書籍などをはじめ多くの用途に大量に使用され、2006年における日本の紙の生産量は世界第3位であった。また高速オフセット印刷など、印刷面からの品質要求に応え、大量に安定供給されてきた。製紙プラントは、パルプ

工程、抄紙工程、塗工工程、仕上げ工程、薬品回収工程、など多数の工程と設備群から構成されている。原料である紙パルプも天然木材から古紙の利用が進んでいる。最新の抄紙プロセスでは、幅10m、抄速1800m/分の抄紙機が使用され、坪量（g/m<sup>2</sup>）、厚さ、密度、水分、白色度、不透明度、光沢など、紙としてのさまざまな品質がオンラインで計測制御されている。本章では、計測制御技術の視点から、抄紙機を支えているBM計とプロファイル制御について報告する。

### [8.3.1] 抄紙プロセスの概要

抄紙プロセスは、製紙プロセスの最終工程であり、この工程での制御結果は製品の品質に重大な影響を及ぼす。抄紙機は脱水工程、圧搾工程、乾燥工程からなり、図8.9に示すように、インレットパート、ワイヤー・パート、プレス・パート、プレ・ドライヤー・パート、サイズ・プレス・パート、アフター・ドライヤー・パート、キャレンダー・パート、リール・パートの順に構成される。パルプ工程でつくられたパルプのスラリ（パルプ濃度0.6%ほどのスラリ）は、ヘッド・ボックスのスライスリップから均一にワイヤー・パート上に噴出される。またヘッド・ボックスには、34～65mm間隔で希釈水を注入する濃調バルブが設置されており、その濃調バルブの開度を調節することでヘッド・ボックス出口の原料濃度を幅方向に調節し坪量プロファイルを制御する（図8.10）。ワイヤー・パートでは、エンドレスに回転するワイヤーとよばれる部分で、水分が脱水、濾過されてパルプ・マットが作られる。パルプ・マットはプレス・パートで加圧され、水分が除去され、湿紙の状態乾燥工程のドライヤー・パートに送られる。ドライヤー・パートは、40～50本のドライヤー・シリンダから構成され、一本一本のドライヤーの中に、150～300kPaの高圧蒸気を通し

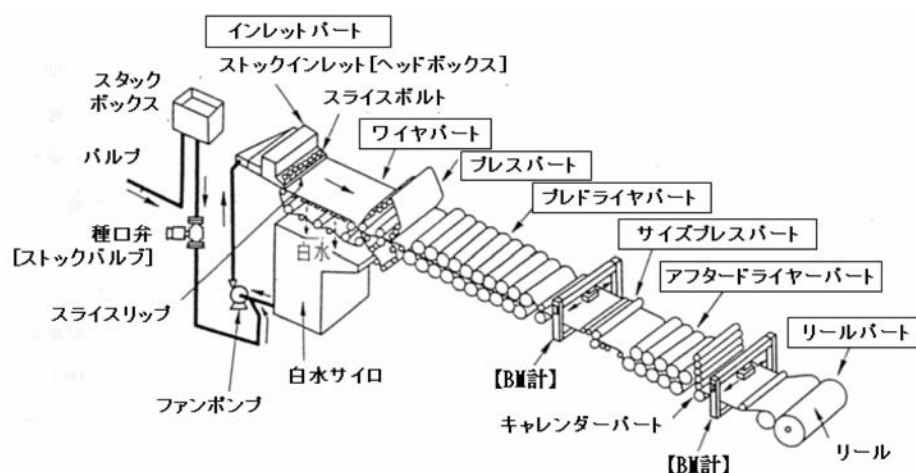


図8.9 抄紙機の構成 (7)



てシリンダを加熱し、シリンダ表面からの熱伝達で紙を加温し、乾燥させる。飽和蒸気圧温度は蒸気圧によって決まるので、この蒸気圧を調節することで紙の水分率が制御される。サイズ・パートでは、印刷特性をさらに向上させるため、一度乾燥した紙の表面にサイズ剤（澱粉溶液）などが塗布される。そのため、紙が湿るのでアフター・ドライヤー・パートで再び3～8%の水分率まで乾燥させ最後にリール・パートで紙としてロール状に巻き取られる。カレンダーパートは多段の回転ロールによる加圧と摩擦により紙の表面平滑性と厚さを調整する。ドライヤー・パートを出た2カ所にBM計<sup>(注1)</sup>と呼ばれるセンサが設置されており、センサ・ヘッドが紙幅方向にスキャンし、紙の坪量、水分率、紙厚、色合い、灰分含有率などを測定し、これらの値は同時にBM計システムで制御される。

(注1) BM計は横河電機の商標

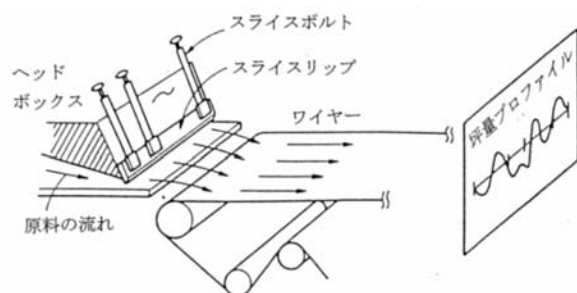


図8.10 坪量プロフィール (8)

### [8.3.2] BM計

BM計は、製紙プロセスの中で特に重要な計測機器である。紙の基本品質である坪量（Basis Weight：g/m<sup>2</sup>）、水分率（Moisture Content：%）等が測定されることからBM計と呼ばれる。図8.11に、BM計フレームとセンサ・ヘッドの外観を示す。抄紙機を横断する形に渡された長いフレームで、センサ・ヘッドを紙幅方向に連続的に往復スキャンさせて測定を行う。フレームはモノコック構造で、センサ・ヘッドの約10mの移動距離に対して、幅方向、上下方向の位置精度が確保されている。センサの構造上ヘッド部が上と下に分離されているが、測定精度に影響しないよう、上下ヘッドのずれや長い支持フレームによるたわみが生じない剛性の高い頑丈な構造となっている。また温度補償や、30分位毎にヘッドを待避して自動校正などをして、ソフトウェアによる測定誤差補償の工夫がなされている。センサ・ヘッド（800mm×700mm×800mm程度）には、坪量センサ、水分センサ、キャリパーセンサ、カラーセンサ、灰分センサ、塗工量センサ、繊維配向センサーなど、8種類までのセンサ・ユニットが格納できる。図8.12に坪量センサの構成を示す。坪

量センサは線源から放射されたβ線が紙を透過する時に、その減衰量が坪量により図8.13のように変化することを利用して非接触で計測する。線源にはKr（クリプトン）、Pm（プロメシウム）などが使用される。

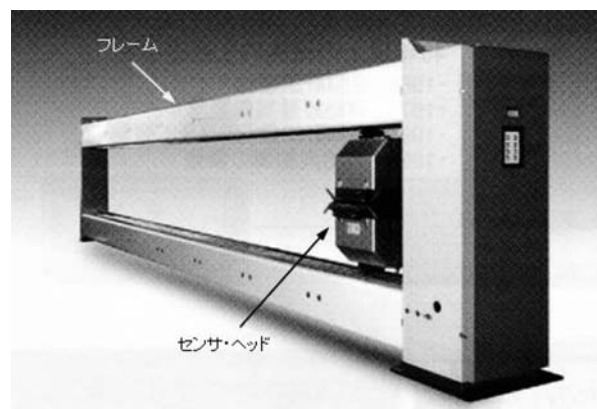


図8.11 BM計のフレームとセンサー・ヘッド (9)

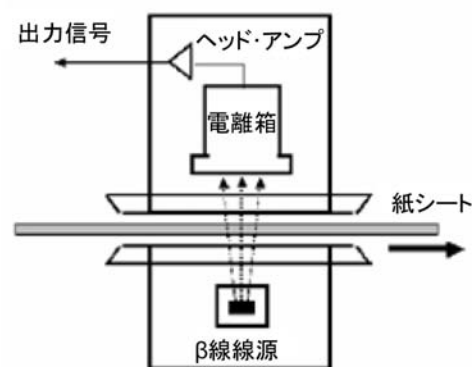


図8.12 坪量センサの構成 (10)

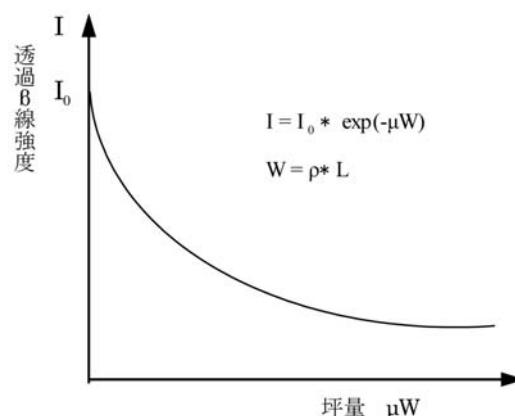


図8.13 坪量と透過β線強度 (11)

- I : 透過後のβ線強度（電離電流）
- I<sub>0</sub> : 透過前のβ線強度（電離電流）
- μ : 紙の吸収係数（m<sup>2</sup>/g）
- ρ : 紙の密度（g/m<sup>3</sup>）
- L : 紙の厚さ（m）
- W : 坪量/紙の厚さ（g/m<sup>2</sup>）

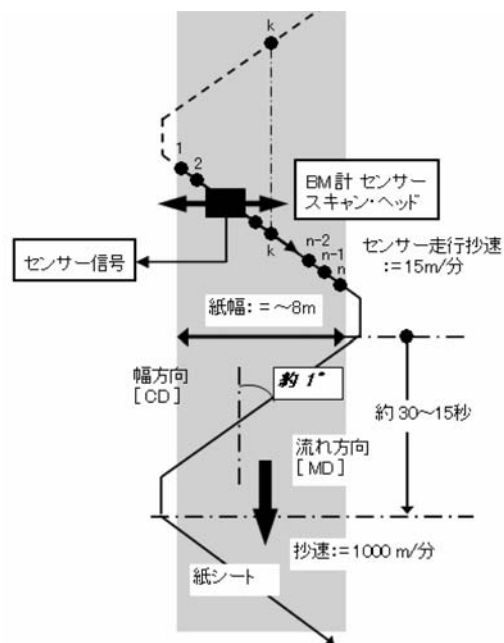


図8.14 BM計センサの測定軌跡<sup>(12)</sup>

### [8.3.3] プロファイル制御

坪量、水分、厚さなど、紙の品質を幅方向に均一になるよう制御することをプロファイル制御と呼ぶ。図8.14にBM計センサの測定軌跡を示す。センサ・ヘッドは片道20～30秒で往復スキャンを行い、紙幅方向に360～1200点の測定を行っている。この測定値が均一な目標値になるよう、図8.10に示すように、ヘッド・ボックスに設置されたスライス・ボルトの位置を上下させて、ワイヤに吐出されるパルプ原料の量を調整することにより、坪量のプロファイル制御が行われる。スライスボルトは75～100mm間隔で50～100本配置されている。図8.15は、 $n$ 番目のスライスボルトを動かしたとき、その周辺の2～3本のスライスボルトに対応する部分にまで坪量変化に干渉が及ぶことを示している。また坪量の制御点（スライスボルト）から坪量プロファイルの測定を行っているBM計までの距離は約100mの距離があり、1000m/分の抄速の場合では、マシン方向に約6秒のタイムラグがあることになる。このように抄紙機は多入力多出力の相互干渉をもつ複雑なシステムであり、これに対して幅方向の均一性を制御するプロファイル制御には、極めて高度の制御アルゴリズムが組み込まれている。

また従来、抄紙機を熟知した熟練オペレータによる手動調整も行われていたが、このBMシステムには、その操作手順をアルゴリズム化したエキスパート・ファジー制御も組み込まれている。このように、抄紙機の制御はBM計による計測とBMシステム（DCS）による高度の制御アルゴリズムによって実現され、紙パルプ産業を支えていると言っても過言ではない。

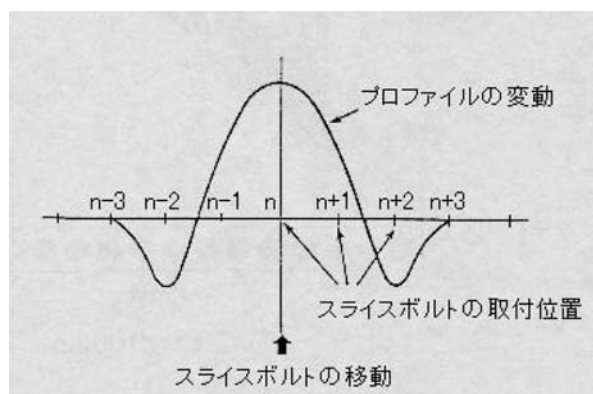


図8.15 スライスボルト制御とプロファイルの干渉<sup>(13)</sup>

## 8.4 エネルギー関連

### [8.4.1] 日本のエネルギー源と利用形態

日本のエネルギー源は、化石エネルギーでは石油と石炭が減少し、天然ガスが増加した。地球環境問題への対応もあり、天然ガスの国内供給は増加傾向にあり、1990年度と比較すると2005年度は+61.5%と増加している。石油依存度は1990年度の57.1%に対して49.0%と8.1%低下している。エネルギー自給率は原子力を国産とみた場合は17.6%、輸入とみた場合は6.3%となっている。

日本におけるエネルギーの供給過程と利用形態を見ると、原油、石炭、天然ガスなどの各種エネルギー源はタンカーなどの船舶で輸入される。原油はそのほとんどが石油精製の過程を経て、ガソリン、軽油などの輸送用燃料、灯油や重油などの石油製品、石油化学原料用のナフサなどとして消費されている。天然ガスはLNG（液化天然ガス）で輸入され、電力への転換のみならず熱量を調整したうえで都市ガスへの転換も大きな割合を占める。石炭は、電力への転換及び製鉄に必要なコークス用原料炭に使用されている。電力、都市ガスなどいわゆるライフラインは安定供給が極めて重要である。

### [8.4.2] 電力業界に於けるプロセス制御システム

電力業界はライフラインとしての安定供給が至上命令であり、プロセス制御システムも実績が重視され、従来から電力専用システムが採用されてきた。また電力プラントは、ドラム型ボイラよりも効率の良い超臨界圧ボイラに移行してきており、1970年代より60万KW以上は超臨界貫流ボイラとなっている。そのためプラントの応答性も速く起動手順も複雑になっていた。この解決方法として、プラントの自動化が要求され、計算機（ユニット計算機）+アナログ制御装置の

組み合わせで実現した。電力プラントのアナログ制御系は、アナログ制御の極致であり、アプリケーションは小さな制御機能ブロックを組み合わせによって制御系を構成する方式で実現されてきた。ユニット計算機の中に、プラントの自動化ロジックを組み込み、この自動化ロジックに基づいて計算機よりアナログ制御装置及びリレーロジックに対して、自動起動の指令を与えることにより自動起動を可能とした。自動化は、起動、停止等のシーケンシャルな自動化である。一定の条件に達した後は、アナログ制御装置で運転を行った。このユニット計算機は、プラント監視装置、帳票装置を兼務しており、管理機能も含めて実現していた。又、シーケンスロジックとしては、AND/ORロジックによるIBD（インターロック・ブロック・ダイアグラム）という記述方法が要求された。以上の様に、電力業界向けのDCSに対しては、アナログの機能ブロック構成、シーケンスロジックとしてのAND/ORロジックの要求、CRTオペレーション装置は要求されないという特殊事情があり、一般業種の顧客向けのCRTとは、要求仕様が違っていた。その為、東芝（TOSMAP）、日立（HIACS）、三菱電機（MELSEP）、三菱重工（DIASYS）、ベーレー（N-90、I-90）、山武（YEW-PREXA）、島津（MS-90、MS-2000）など、各社共に電力専用システムを提供した。このようにボイラなど発電機本体まわりは、プラントの特性や運用上の要求から専用システムによって制御されてきているが、排煙脱硫装置やLNG（Liquefied Natural Gas：液化天然ガス）基地など、周辺のユーティリティ関係には、1980年半ばころから汎用のDCSが採用されるようになった。

#### [8.4.3] ガス業界に於けるプロセス制御システム

ガス業界のメインプラントは、ガス製造装置（6Cガス、13AガスのSNG＜代替天然ガス＞）であったが、1980年代からは、環境問題への対応もあって輸入したLNGを気化してガスを製造するLNG気化基地にガス製造設備の主流が移ってきた。LNGプラントへのデジタル制御システムの導入は早く、1971年に集中型DDC（Direct Digital Control：Dual構成）であるYODIC600（横河）が大ガス泉北第一に導入され、引き続き東ガス袖ヶ浦、北九州LNGで採用された。DDCが採用された理由は、ガス供給の安定性を確保するため、負荷の変化に対して、自動的に機器の発停を行う機能と機器異常時に自動的に代替機を立ち上げる機能を実現するためであった。ガス業界では、自動化システムとしてDDCを積極的に採用する下地が出

来上がっていたため、1975年の分散型DCS誕生以降、DCSのもつコストパフォーマンス、拡張性、信頼性などが評価されて積極的に採用されていった。

図8.16にLNG基地のプロセスフローを示す。LNG基地の機能は、LNG船から受け入れたLNGをLNGタンクに貯蔵する機能、LNGタンクからLNGポンプで昇圧後、LNG気化器でガス化し都市ガス、火力発電所にガスを供給するガス送出の機能、大気との熱交換によって必然的にLNGタンク内に発生するBOG（Boil Off Gas：LNGが気化され沸点の低いメタン主体のガス）によってLNGタンクが破壊されないようにタンク内圧をBOG圧縮機によって制御する機能と大きく3つに分けられる。

プラントは化学反応を伴う訳ではないため、運用は非常にシンプルである。日本におけるLNG基地は、唯一のガス供給源であるため、ガスの需要変化への対応はもちろんのこと、LNG設備の機器異常、制御装置の異常が発生しても、ガス送出の喪失を一瞬たりとも起こさないことが最大のミッションとなっている。このミッションを実現するために、基地建設の初期より自動化によるNO-MANオペレーションのコンセプトが採用された。日本のLNG基地の設備構成では、負荷追従を担う気化器、ポンプ、BOG圧縮機の機器類は、保守及び運転中の故障発生を想定して通常負荷にて必要とされる機器台数+2台を最低限設置する考え方を取っている。当然、制御装置にも制御装置自身の故障がガス送出の喪失に繋がらないように高い信頼性が要求される。

万一制御装置異常が発生しても基地の運転が継続出来る様に影響度を少なくするように個々の制御装置への設備・機器を分散させる。更にバックアップ装置の設置が可能となるシステムコンセプトが必要とされる。制御アプリケーションとしては、ガス送出負荷需要の変化に追従して自動的にポンプ、気化器等必要な機器の起動停止を行う台数制御機能とそれら機器が故障した場合に代替機を自動起動してガス送出量減少を最小限で抑える機器異常時対応機能を含む自動化機能が要求される。LNG基地の設備・機器の点検、及び付随する制御装置の点検に対して、LNG基地は、24時間・365日連続してガス送出するミッションがあるため、基地全体を止める方式の定期点検は行えない。基地運用を行いながら、設備を一つ一つ点検する方式となる。

設備・機器の点検に合わせて制御装置の点検も出来る様に制御装置への設備・機器の分散を考慮し、分散出来ない基地マスタと呼ばれる自動化を司る制御装置



は、個別に点検・増改造が出来るようにI/Oも含めて分散するという完全2重化構成を取る。制御装置に対しては、上記定期点検対応以外に制御装置故障時に代替設備・機器起動を可能とし、更に運転しながら増改造が行える等、基地の運転が止められない事を十分考

慮して構成する必要がある。以上の様に各種ケースを考慮して、システムを構成するが、最後の砦としてバックアップ制御装置を設置する等重量級の冗長化システムが納入されている。図8.17にLNGプラントの最新の中央計器室の例を示す。

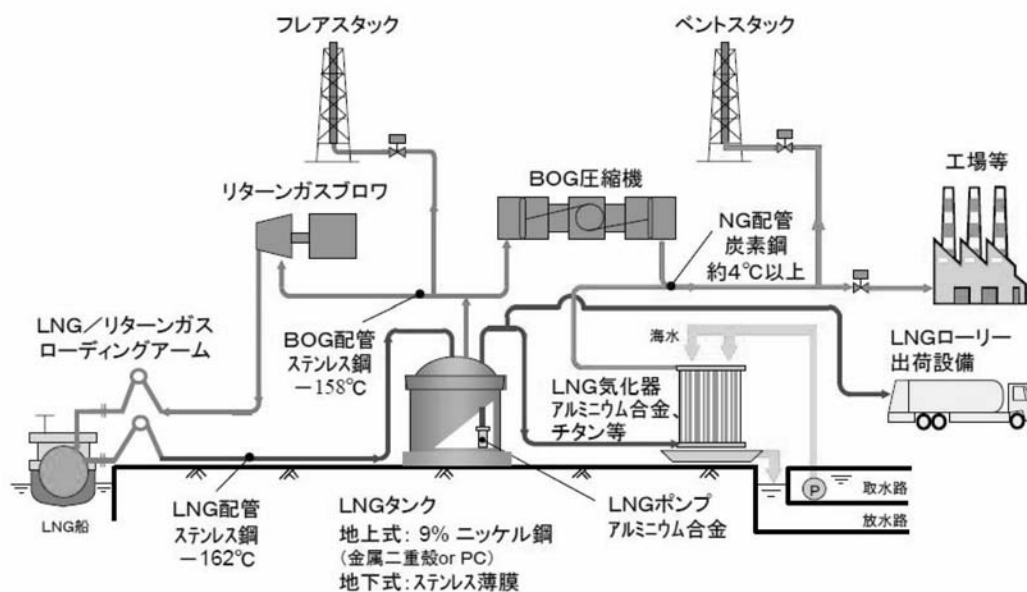


図8.16 LNGプロセスフロー (14)



図8.17 LNGプラント中央制御室 (15)

LNGはLNG船によって運ばれる。LNG船は動くプラントであり、1983年10月に竣工した日本初のLNG船、播州丸（125000m<sup>3</sup>）に当時の最新技術を駆使した船級規格取得システムとして横河電機のDCS CENTUMが搭載された。当時、DCSは監視システムとして用いられていた。LNG船における監視制御装置の呼称はIAS（Integrated Automation System）と呼ばれ、制御は主に従来型操作盤（Cargo Console/Machinery Console）の操作機器で行なわれていた。その後、DCSの安全性、信頼性の実績が培われ、DCSがIASの機能を担い、LNG船のCargo-Machinery Systemでの監視、制御をつかさどることとなった。さらに近年システムの統合高度化が進み航海情報、各機器情報を取り込み、DCSが真にIASと称される統合化監視制御装置として装備されるに至っている。

LNG船の主な計装は荷役監視制御、バラストコントロール、機関監視制御である。LNG船の制御、監視の重要な点は、極低温LNGの自己揮発で発生するNBO（Natural Boil Off Gas）を活用し航海動力のエネルギー源としこのボイルオフガス（BOG）の処理を適性に実行することである。荷役と機関機能の有機的結合で総合的な効率運用が可能な理想的なLNG船が求められてきた。そのひとつである蒸気タービン船ではボイラでBOGを燃焼させる。最近では電気推進船方式がLNG船にも応用され、発電用のFO/BOG二元燃料ディーゼルでBOGを燃焼させ処理する。他の方式としてNBO再液化装置を搭載し重油専焼ディーゼル駆動式LNG船も出現しつつある。また、海洋汚染の防止の観点から、荷積み/荷降ろし港の海水を寄港地に持ち込めないため、バラスト用海水を入れ替えながら航行する（Auto-Ballast Water Exchange）制御が必要とされている。LNG船の計装は、DCSによって今後更に安全運行、自動化が推進されていくであろう。

図8.18に最新の国内最大級メンブレンタンク方式LNG



図8.18 LNG船<sup>(16)</sup>

船TRINITY ARROW（154、900m<sup>3</sup>）、図8.19に同船の制御システム（横河：CENTUM CS3000）の外観を示す。



図8.19 LNG船の制御システム<sup>(17)</sup>

#### 参考文献

- (1) 山武百年史：産業オートメーション史
- (2) 三浦真太郎ほか Omegaland開発のコンセプトと機能概要 横河技報 Vol.45 No.1 (2001) p66
- (3) 岩村忠昭：「製鉄業における計装エンジニア」計測と制御 35-11 (1996)
- (4) (5) JFE牧勇之輔：1998年計装技術会議資料（日本能率協会主催）
- (6) 横河電機：技術資料 EIC統合システムR0
- (7) 神長英俊ほか：紙パルプ産業における制御 p82 コロナ社
- (8) (13) 佐々木尚史：「抄紙機における坪量プロフィール制御の研究」京都大学博士論文 (2000)
- (9) 峰尾知宏：横河電機の紙パルプ・シートビジネス 横河技報 Vol.50 No.1 p8 (2006)
- (10) (11) (12) 森芳立：「製紙業の計測制御技術」SICE計測制御エンジニア講座 (2004)
- (14) 高圧ガス保安協会：LNG受入基地について（平成17年5月31日）
- (15) 東京ガスの提供による。
- (16) 国内最大級メンブレンタンク方式LNG船 TRINITY ARROW（川崎汽船株式会社/三井物産（株）/今治造船（株）の提供による。）
- (17) 搭載IAS：CENTUM（横河）CS3000（川崎汽船株式会社/三井物産（株）/今治造船（株）の提供による。）

# 9 | プロセス制御システム技術の系統化

プロセス制御システム関連技術の系統化調査のまとめとして、付図1にプロセス制御システムの変遷を、付図2に技術系統図を示す。技術の系統化としては、要素技術、高信頼化、ネットワーク、標準化、ソフトウェアとしてOperating Systemの各切り口から、それぞれがプロセス制御システムにどのような影響を与えてきたかについてまとめたものである。DCSについては横河のCENTUMにおける経緯である。

1950年代は、空気式計装システムの時代であったが、伝送器、演算器、記録計、調節計など、計装に必要な機器のラインアップが用意された。要素技術としては、ノズルフラップ、コントロールリレー、ベローズ、ダイヤフラム、力平衡型フィードバック機構、変位平衡型フィードバック機構など、シンプルで洗練されたメカニズムで構成され、高い信頼性が達成された。また信号が空気であり、爆発の危険のない本質的に安全なシステムであった。信号は0.2~1.0kg/cm<sup>2</sup>で統一されていた。空気圧信号は本質的に安全であった反面、伝送遅れがあり伝送距離がとれない欠点があったため、1950年代後半からアナログ電子式計装システムに取って代わられた。当初電子管式の計器もあったが、マグアンプやトランジスタによって回路が構成された。しかし、フィールド機器とのインタフェースである電流信号はHoneywell (4~20mA)、Foxboro (10~50mA)と各社まちまちであり、国内では横河 (5~25mA)、北辰 (2~10mA) もあったが、世界的に4~20mA 対10~50mAの戦争がしばらく続くことになった。その後1973年にISA規格として4~20mAに統一された。電子回路はトランジスタからIC化OPアンプに進化した。

1965年に集中型DDC (Direct Digital Control) が登場し、デジタル計装の時代が始まった。当時の論理素子はSSI (Small Scale Integration) のTTLで、NAND GateやFlip Flop程度の集積度であった。プロセスを直接制御するため、高度の信頼性が要求されるため、完全二重化 (Dual) 構成のCPUが開発された。Dual方式は2台のCPUがクロックレベルまで完全に同期して動作し、同一のプログラムを実行した。2台のCPUの不一致は直ちに検出され、診断され正常側に切り替わった。このためCPUは自社で専用設計した。リアルタイムOSも自社設計であった。Check (比較診断)、Changeover (切り換え)、Copy (記憶内容のCopy) など、二重化のシステム要件 (3C) が追求され、信頼性工学に基づく高信頼化が徹底的に追求された。

1975年はDCS (Distributed Control System: 分散型計装制御システム) 元年と言われる。横河 (CENTUM)、東芝 (TOSDIC200)、山武 (TDCS2000)、富士 (MICREX-P)、日立 (Σシリーズ) から相次いで発表された。以下CENTUMについて技術の変遷について述べる。1975年に発表された初代のCENTUMは、アナログ計装時代に構築されたプロセス制御 (Control) の技術と、マイクロプロセッサに象徴される計算機 (Computer) の技術と、広域を高速で結ぶ通信 (Communication) の技術、の「3C」技術のうえに、機能分散、地域分散、危険分散を実現するDCSの基本アーキテクチャを確立した。システムは制御ステーションとオペレータステーションが制御バス (F-bus) で接続される構成となった。プラントの情報は制御ステーションからF-Bus経由でオペレータステーションのCRTコンソール上に表示され、操作された。「CRTオペレーション」と呼ばれ、DCSによるプラント運転の象徴となった。F-Busは256kbps、通信制御権はDeterministicな通信を保証するTokenPass方式で管理され、二重化構成となった。制御ステーションのCPUはYODIC600と同一命令セットをもち、ソフトウェアの継承性を維持した。MOSLSIの汎用マイクロプロセッサも入手可能であったが、処理能力が不足していたためMSI (Medium Scale Integration) TTLによる自社設計となった。制御部はマイクロプログラム方式で設計された。CPUの二重化は待機冗長 (Duplex) 方式が導入された。CPUもOSも自社設計であった。以降、初代CENTUMで確立されたDCSのアーキテクチャの上に、各部に要素技術の進歩を取り入れながら進化を続けていった。

1983年にリリースされたCENTUM-VではCRTオペレーション機能が増強され、制御バス (HF-Bus) は1Mbpsにスピードアップされた。TokenPass方式で二重化構成は継承された。制御ステーションの二重化はDuplex方式が踏襲されている。

1988年にはCENTUM-XLでは32ビットのCISC (Complex Instruction Set Computer) 型汎用マイクロプロセッサが使用された。エンジニアリング機能が強化され、エンジニアリングステーションとしてオペレータステーションから分離された。エンジニアリングステーションのOSにはUNIXが導入された。ビルダメンテナンスにはグラフィックスなどGUI環境が導入された。制御ステーションとオペレータステーション



は自社OSであった。

1993年にリリースされたCENTUM-CSでは、大幅な機能増強がなされた。制御バス（V-net）が10Mbpsにスピードアップされた。TokenPass方式で二重化構成は踏襲されている。32ビットRISC（Reduced Instruction Set Computer）型汎用マイクロプロセッサが使用され、制御ステーションCPUの二重化にはPair & Spare方式が採用された。一枚のCPUカードには2個のMPUがDual構成で動作し、クロックレベルで動作が比較され不一致があると瞬時に検出される。このCPUカード2枚をDullex構成で動作させる待機冗長系が構成される。Dual方式とDuplex方式の長所が生かされ、信頼性が大幅に向上した。Pair&Spare方式はCENTUM CSシリーズの高信頼化方式としてその後代々踏襲され、セブンナイン（99.99999%）のフィールド稼働率達成のコア技術となった。オペレータステーションのOSにもUNIXが採用され、エンジニアリング機能はWindowsに移行し、オープン化が図られた。

1996年フィールドバスH1規格が制定され、フィールド機器とのインタフェイスもデジタル通信の時代となった。1998年のCENTUM CS3000からは、オペレータステーションにもWindowsが採用され、オープン化が加速された。フィールドバスへの対応も行われた。2001年のCENTUM CS3000 R3からは、1Gbps EthernetをベースとしたVnet-IPが導入され、MES/ERPなど上位のシステムとの接続を容易にした。このように、DCSは分散型システムの基本アーキテクチャの上に、プロセス制御のための絶対的な信頼性と、トータルシステム化のためのオープン性を両立させつつ、新しいテクノロジーとともに進化してきたことがこの系統図に現れている。これは今後も継続されてゆくものと思われる。

付図3にアナログ計装システムの経緯を、付図4にDCSの経緯を、それぞれ各社の製品（システム）のリリース年の順に示した。

# 10 | まとめ

---

「プロセス制御システムの系統化調査」を終えるに当たり、極めて広範囲の内容を含むこのテーマに対して、調査対象の絞り込みが不十分であったため、踏み込みが浅くなってしまった事を反省している。アナログ計装時代から、集中型DDC、DCSの誕生から現在にいたるまでのプロセス計装システムの歴史を振り返ってみたが、どの世代にも共通していることは高信頼性の追求である。電子部品の進歩の上に、冗長化など高信頼化システム設計手法を駆使することによって、DCSの信頼性は揺るぎないものとなった。PID制御やシーケンス制御などの基本的なプロセス制御機能がソフトウェアで組み込まれているが、DCSは今や「ハードウェア」とさえ言われるようになっている。機能が定着し、高信頼が当たり前になった証である。制御対象も、プラントの温度、圧力、流量などの物理量から、製品の品質や性状などを計測し制御するニーズが高ま

っているが、DCSという信頼性の高い「ハードウェア」を使って、その上にソフトセンサやモデル予測制御などの高度制御を構築することによってこれが可能になりつつある。また地球温暖化のような地球規模の環境問題への対応が急がれる一方で、中国始め海外では経済成長のためプラント建設が盛んに行われている。省エネルギー省資源対策が必須であるが、そのためにもプロセス制御の役割がますます大きくなっていくものと思われる。日本国内では2007年問題が顕在化している。プロセス制御の世界でも、ベテランオペレータや設計技術者が世代交代の時期を迎え、経験や技能の伝承の必要性が叫ばれており、産業界や学会でもその対応が検討され始めた。その意味でも専門分野の技術を系統化して残すことの重要性を改めて痛感した次第である。

## ■ 謝辞

今回のテーマを計測器工業会から推薦をいただいた石川専務理事はじめ、プロセス制御システムの各社の製品情報や、図面や写真はじめ専門の情報をご提供頂いた下記の方々に、厚くお礼申し上げる次第である。

後藤博氏（山武）、岡庭文彦氏（東芝）、斉藤達氏（日立ハイテクソリューション）、菅沼利昭氏（富士電機）の各氏からは、各社のプロセス制御システムの年表に関する情報をご提供いただき、付図3、4にまとめることができた。

奥津良之氏（山武）には、コントロールバルブに関する技術情報をご提供頂いた。

常磐晋吾氏（ARC）には、石油業界へのDDC、DCSの導入時の情報をご提供いただいた。

岩村忠昭氏（元JFEスチール）、牧勇之輔氏（JFEスチール）の各氏には、鉄鋼製造プロセス（特に高炉）に関する情報と図面をご提供いただいた。

森芳立氏（王子製紙）には、抄紙プロセスに関する情報と図面をご提供いただいた。

また、横河電機からは、下記の各氏より関連分野の情報や図面などをご提供いただいた。

白井俊明氏：技術全般

後藤茂氏：差圧伝送器

池田恭一氏（元横河）、渡辺哲也氏：シリコンレゾナントセンサ

細川宗広氏：アナログ制御システム

高津春雄氏：制御理論、高度制御

小西信彰氏：CENTUM全般

坂本英幸氏：バッチ制御、SP88

赤井創氏、安井均氏：CENTUM高信頼化

水島幹夫氏：保全機能、Global Response Center

森岡義嗣氏、秋山忠次氏：フィールドバス

出町公一氏：CENTUM通信、IEC標準化

増喜浩一氏：防爆

佐々木尚史氏：BMシステム、プロファイル制御

四元和隆氏、山本隆氏：石油・石油化学

渡辺伸司氏：鉄鋼

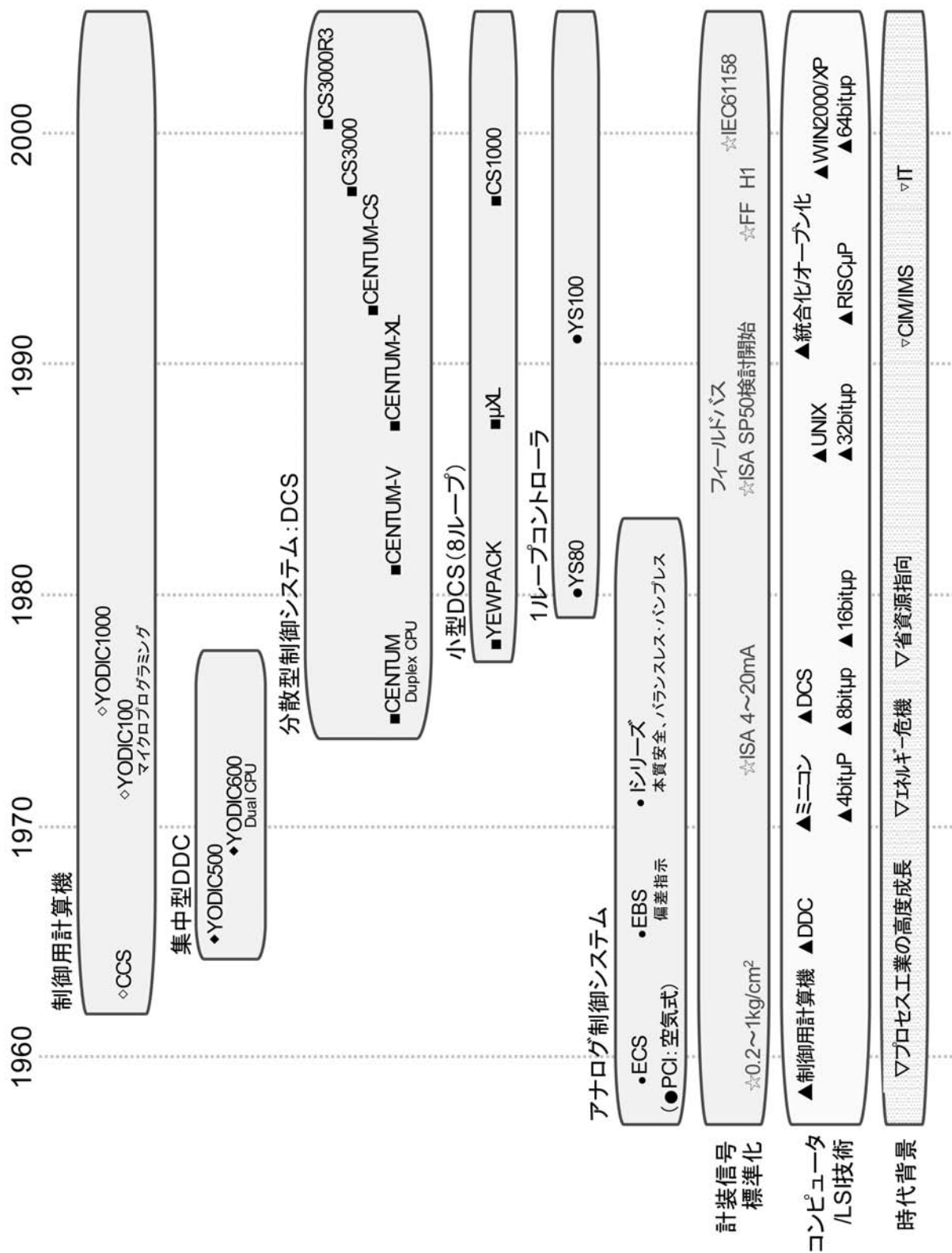
三石甲子夫氏：紙パルプ

田中誠吾氏、炭本淳氏：エネルギー関連

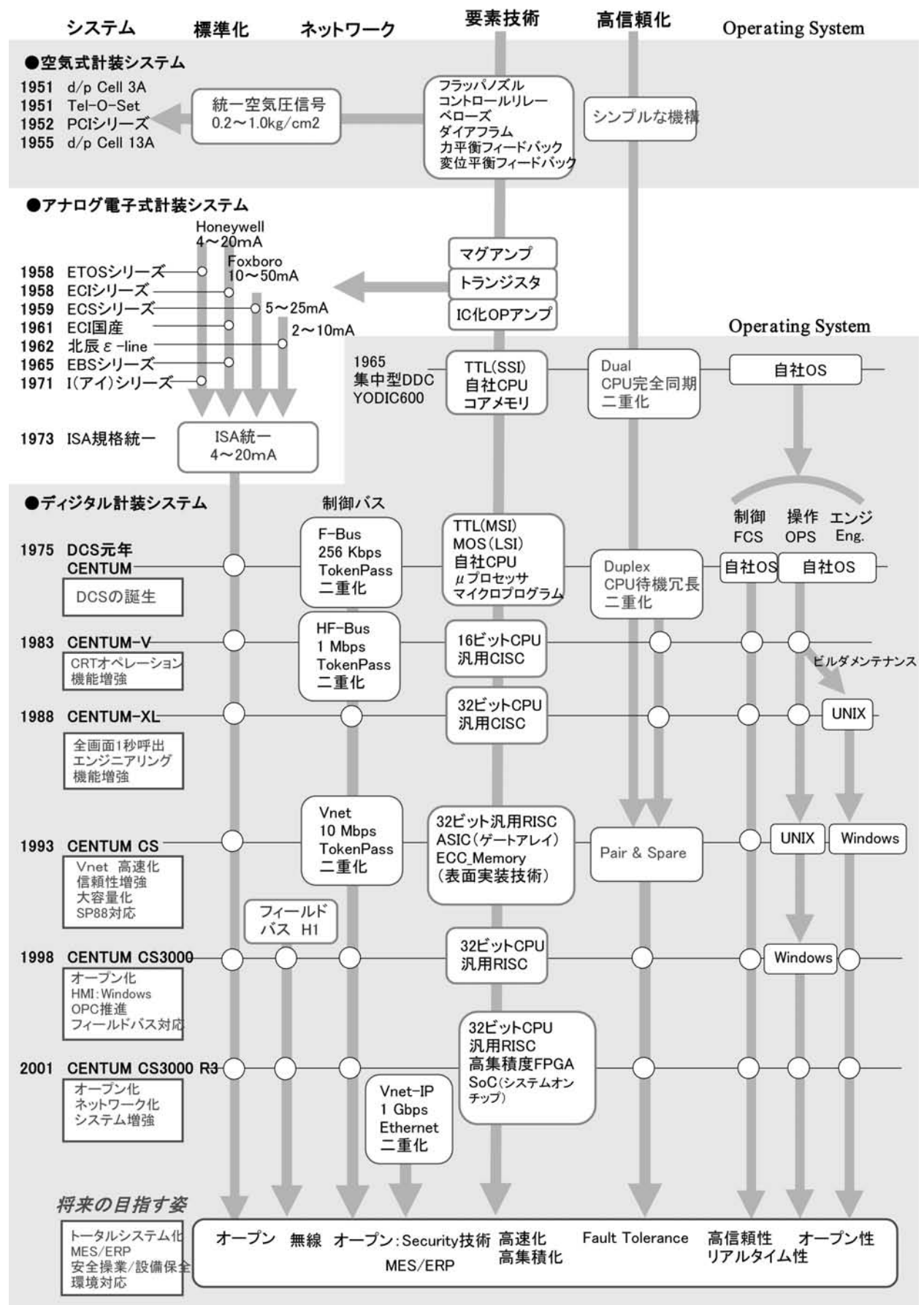
三浦真太郎氏：プロセスシミュレータ

槇島京子氏：所在調査

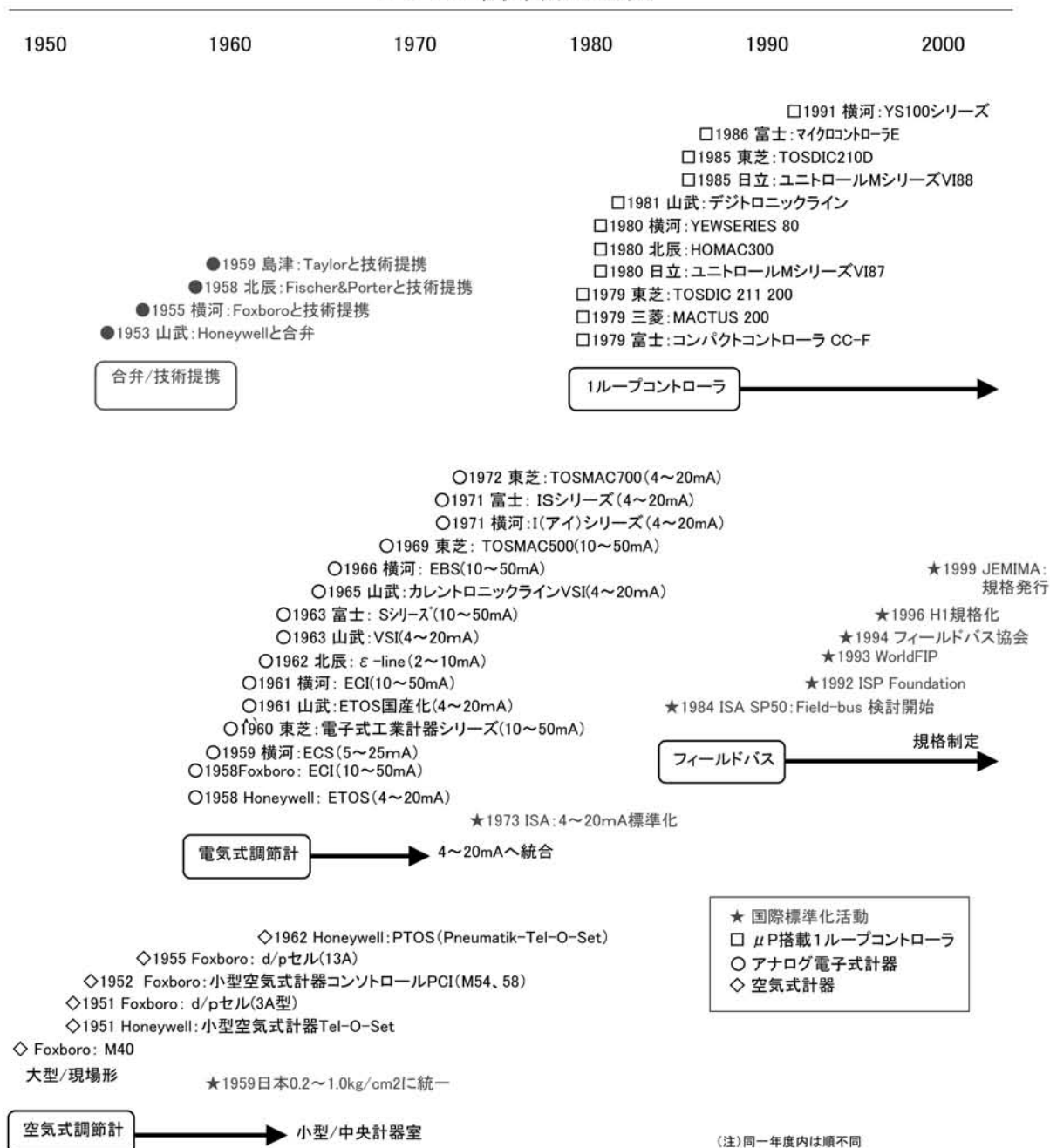




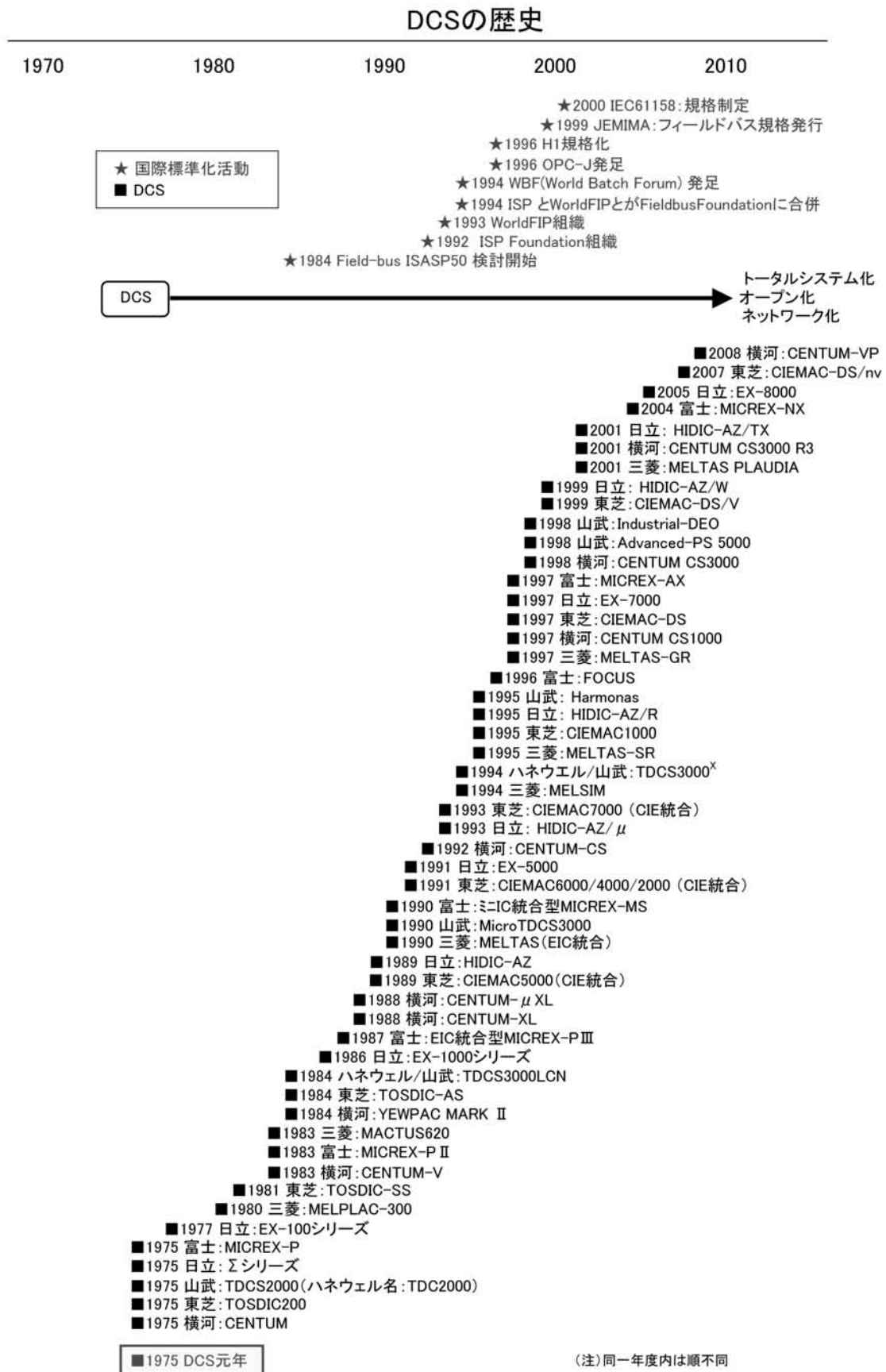
付図2 プロセス制御システムの技術系統図



## アナログ調節計の歴史







| 番号 | 名称                | 資料形態 | 所在地  | 制作者  | 製作年   | コメント                                                                 |
|----|-------------------|------|------|------|-------|----------------------------------------------------------------------|
| 1  | AOK型空気作動調節器       | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1955年 | 空気圧作動のPID調節計。記録機能にはERシリーズ記録計が併用された。                                  |
| 2  | EOK型調節器           | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1956年 | 電気式PID調節計。記録機能にはERシリーズ記録計が併用された。                                     |
| 3  | EK-33型温度調節計       | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1958年 | 電気式ON-OFF調節計。EK-33型は測温抵抗体を使用するタイプで、低温度での温度調節用に使用された。                 |
| 4  | ER6-10型電子式自動平衡記録計 | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1962年 | 電子式自動平衡記録計(ERシリーズ)。電気式サーボ方式による自動平衡式記録計が確立された。                        |
| 5  | EREA型小型記録調節計      | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1962年 | 全電子式制御装置(ECSシリーズ)の中核をなす記録調節計。電子回路による自動平衡測定と空気式調節動作が組み合わされた。          |
| 6  | UCE-65T形偏差指示調節計   | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1966年 | 電子式制御装置EBSシリーズの中核をなす偏差指示調節計。DC24V駆動。                                 |
| 7  | FCE-45S形偏差指示調節計   | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1969年 | 電子式制御装置EBSシリーズの中核をなす偏差指示調節計。AC100V駆動。                                |
| 8  | 4743形調節計          | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1969年 | 空気式制御装置PCI/100Lineシリーズの中核をなす調節計。空気式プリント板、透明目盛板、プラグイン接続などの実装方式が採用された。 |
| 9  | UNI△電子式差圧伝送器      | 実機   | 横河電機 | 横河電機 | 1978年 | UNI△(ユニデルタ)シリーズ：小型軽量高精度の静電容量式差圧伝送器。省資源、省エネルギーを可能とした。                 |

本報告書は平成19年度科学研究費補助金特定領域研究『日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化—』  
計画研究「産業技術史資料に基づいた日本の技術革新に関する研究」(17074009)の研究成果である。

## 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第11集

---

平成20(2008)年3月19日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館  
産業技術史資料情報センター  
(担当:コーディネイト・エディット 永田 宇征、エディット 大倉敏彦・久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館  
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20  
TEL: 03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク