

# 「ユビキタスを操る」技術

## Technologies for Managing Ubiquitous Computing

野口 哲<sup>\*1</sup>  
NOGUCHI Akira

岡部 宣夫<sup>\*1</sup>  
OKABE Nobuo

山口 賢治<sup>\*2</sup>  
YAMAGUCHI Kenji

山本 周二<sup>\*1</sup>  
YAMAMOTO Shuji

大野 毅<sup>\*1</sup>  
OHNO Takeshi

大谷 哲也<sup>\*3</sup>  
OHTANI Tetsuya

当社は、工場を始めとするものづくりの現場を支援するフィールド・コンピューティングに取り組んできた。フィールドにもユビキタスコンピューティングの時代が到来しようとしている。本稿では「ネットワーク基盤の確立」、「成長するシステム」、そして「プラントモデルのリアルタイム活用」の3つの視点で、フィールド・ユビキタスに向けた技術開発について説明する。

We have long been developing field computing technologies for industrial systems. The new paradigm of ubiquitous computing is also making inroads into the domain of field computing. In this paper, we describe our vision for ubiquitous field computing from three aspects: 1) establishment of a network infrastructure based on open standards, 2) computing architecture for more flexible system expandability and common computing platforms for field facilities, and 3) operation support technologies using online plant models.

### フィールド・ユビキタス実現に向けて

#### 1. はじめに

近年、新たなIT化の流れのなかで、社会基盤としてのネットワーク整備が進み、そのなかで新たなパラダイムとしてユビキタスが登場してきた。ユビキタスとは遍在を意味する言葉である。言い換えれば、「何処からでも」、「何時の間にか」、「臨場感溢れる」、「使う立場で」、そして「変化に適応して」情報を活用できることである。

ここで、ものづくりの現場である計測・制御のフィールドに目を向けると、フィールドにはセンサやコントローラ、アクチュエータなど、多くの情報やコンピューティング資源が遍在している。我々は、フィールドに存在するこれらの情報・機能が自在に利用可能となり、必要な時に、より多くの人や目的に活用される環境の実現が、来るべきフィールド・コンピューティングの姿であると考えている。

本稿では、この「フィールド・ユビキタス・コンピューティング環境」を実現する新たなコンピューティング・アーキテクチャへの取り組みについて説明する。

#### 2. 21世紀のフィールドの姿

情報・社会システムにおけるIP(Internet Protocol)の普及とともに、フィールドでも徐々にIPを主体としたネットワークの導入が進みつつある。このIPネットワークの浸透は、上位情報系システムやインターネット基盤を活用した遠隔地との接続など、システム階層や物理的距離に制限されない情報交換を可能とした。また、Webサーバやメールなどの機能を搭載した自律的なコントローラの登場により、人と装置とのダイレクトなコミュニケーションが可能となり、利用者が必要な情報を、ネットワーク上の様々な装置から直接取り出して活用することも可能となった。これらのネットワークの持つダイレクトなアクセス性は、使う側の視点でのフィールド情報の選択と活用を可能とし、その可能性を広げた。

一方、ものづくりの現場を支える生産システムへの要求も、時代とともに変化している。工場の操業だけでなく、安全・安心、省エネルギー、トレーサビリティの確立、環境への配慮など、さらに広範囲に亘る課題にもシステムとしての対応が必要とされ始めている(図1)。

従って、これらの課題をシステムで解決する時、フィールド・コンピューティングの領域は、装置が持つ特定の機能の実現に限定されるものではなく、ネットワーク環境を介し、同じアーキテクチャの下で様々な目

\*1 技術開発本部 ユビキタス研究所

\*2 技術開発本部 技術情報センター

\*3 技術開発本部 計測制御研究所

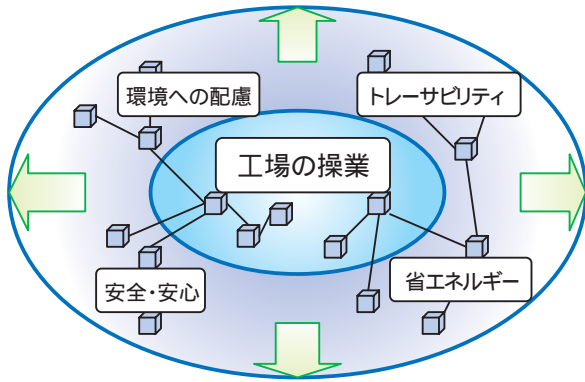


図1 広がるフィールドの領域

的に使えるシステムとして、その対象領域を拡大していく必要がある。

フィールドネットワークのIP化の加速により、フィールドの末端までが一つのネットワークで結ばれ、それぞれの機器や装置がネットワーク上で自律的な情報発信を行うようになれば、フィールドの様々な情報を自在にネットワークから収集し、把握・解決することが期待できる。また、問題解決に必要な構成要素を、一時的なセンサの設置も含めて自由に組み合わせ活用できる柔軟性も、今後実現が期待される重要な特性である。

専用システムでの解決から、ネットワーク上での相互接続性と柔軟性を重視した実現を指向し、多くの利用者の課題に応じて成長・更新できるフィールド・コンピューティング環境が、当社の考える21世紀のフィールド・ユビキタスの姿である。

### 3. フィールド・ユビキタス実現の課題

フィールド・ユビキタスの実現は、オープンな標準に基づいたネットワーク環境が、フィールドの隅々に行き渡ることが前提となる。そのネットワーク基盤をフィールドに確立することと、この基盤の上で変化への柔軟な対応が可能なアーキテクチャを作り上げることが我々の取り組む課題である。

#### ・フィールドネットワーク基盤の確立

フィールドでのネットワーク基盤として、オープン技術に基づいたネットワーク環境をフィールドに実現することが、システムのインターオペラビリティを確保する上で重要である。このオープン技術として、IPと無線技術に着目している。

これらの技術を、屋外、場合によっては防爆エリアなど、オフィス環境と異なる環境下に置かれた限定されたコンピューティング資源しか持たない装置に組み込み、フィールドでの信頼性と運用性を確保することが我々の課題である。

また、従来では配線が困難であった高所や危険な箇所からの情報の収集や、配線コストの関係で難しかった装置、設備の診断や解析のための一時的なセンサの配置などを実現する無線通信が期待される。その観点から、電池や機器の余剰電力による駆動により、電源も含めた無配線化が図れる省電力型の無線通信規格であるIEEE802.15.4に着目し、フィールドでの活用を目指している。

#### ・様々な目的への柔軟な対応

フィールド全体が一つのネットワークで結ばれると、従来のシステムに重畳して、新しい課題解決のためのシステムを作り出す条件が整う。しかし、フィールドのネットワーク化だけでは不十分であり、フィールドに分散された機器が、自律的に機能を拡張し成長する仕組みが必要である。この仕組みが、機器の種類に拠らず共通のプラットフォームとして実現することが鍵となる。

様々な課題を解決するアプリケーションプログラムが、分散する機器上に自由に追加・更新でき、互いに連携動作し、問題解決のシステムを動的に追加構築できることが目指すコンピューティング環境の姿である。また、これらの問題解決のシステムを鳥瞰的に運用管理する仕組みも、併せて必要である。

#### ・プラントモデルのリアルタイム活用

ユビキタス環境の最終的な姿を考えた時、現場の生の情報をそれぞれの利用者の視点に再構成し、提供することが重要である。我々は、シミュレーション技術をリアルタイムに活用し、既存のセンサ情報から計測不可能な情報を推定する技術、さらに、見えなかったものが見えるだけでなく、現在から未来の状態を予測する技術を開発している。

また、シミュレーション技術により、プラントの本質的な情報を推定し、それに基づいた透過性のある操業の仕組みを試作した。透過性のある操業では、工場やプラント全体を、機器や装置の物理構成に依存しない仮想環境としてモデル化し、操業指示に対して、機器や装置の物理構成に応じた具体的な処理を、個々の工場やプラント側で自律的に行う。プラント固有の制御はローカルに隠蔽されるため、操業ノウハウは、複数のプラントで再利用できるものとなることが期待できる。

### 4. おわりに

オープン技術に基づいたネットワーク技術のフィールドへの導入と、その結果生じる新たなパラダイムの変化をフィールド環境で実現することが、我々の注力している活動である。以降の章で、より詳細な取り組みを紹介する。

## IP 技術の展望とフィールドへの取り組み

### 1. はじめに

IP (Internet Protocol) と Ethernet は、LAN (Local Area Network) を起点に WAN (Wide Area Network) やハードウェア間通信をも担い始め、グローバルでシームレスなネットワーク環境が可能になりつつある。PA (Process Automation) や FA (Factory Automation) のように、社会基盤を支える制御システム (以下「フィールド・システム」と呼ぶ) でも、これらが主要なネットワーク技術の一つとなることが予想される。本稿では、IP と Ethernet の動向、フィールド・システムにとっての重要性と課題、取り組んでいる研究テーマについて述べる。

### 2. IP と Ethernet

#### 2.1 普及

Ethernet が他の技術 (FDDI, ATM など) との競争に勝てたのは、上位互換性の維持、コスト・パフォーマンスを重視した技術の選択、単純さによる成長可能性の確保、による。一方、IP が他の技術 (NetWare, OSI など) との競争に勝てたのは、オープンな仕様策定の場とプロセス、多くのベンダーの参画、単純さによる成長可能性の確保、による。競合技術との競争に勝った結果、IP と Ethernet は巨大な市場を確保し、LAN の主要技術となった。

#### 2.2 動向

Ethernet は、10 Gbps の仕様から WAN の領域にも進出した。仕様上の最大距離は 40 km だが、実際には 100 km まで延ばせ、競合技術 (SONET/SDH: Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy など) よりコスト・パフォーマンスが良く、普及することが予想されている。

さらに、ハードウェア同士を結ぶための内部バスなどの領域で IP と Ethernet の応用が進んでいる (例えば、RDMA: Remote Direct Memory Access, InfiniBand, iSCSI など)。組込み用途で問題視される IP のオーバーヘッド (コードサイズと処理速度) は、TOE (TCP/IP Offload Engine) と呼ばれるハードウェア化技術で解決が試みられている。将来、TOE 技術が一般化すれば、今よりも小型の組込み機器にも IP が普及するだろう。

フィールド・システムの観点で、IPv6 は IPv4 と比較して以下の利点がある。

- ・ NAT に頼らないネットワーク  
IPv4 のアドレス空間は十分に広くないので、NAT (Network Address Translation) が必要となる。NAT はネットワークの対称性を失わせるので、運用に負担をかける (ネットワーク構成の複雑化、運用の複雑化、

潜在的なトラブル要因、トラブル解析の複雑化)。IPv6 は、NAT を必要としない広いアドレス空間を有し、これらの複雑さを排除できる。

- ・ 一意なローカルアドレス  
IPv6 の ULA (Unique Local Unicast Addresses) は、インターネットに接続しないローカルアドレスでも、グローバルな一意性を提供できるので、IPv4 のようなプライベート・アドレスの衝突に伴う、IP アドレスの再割当てや多重 NAT を回避できる。
- ・ アドレス自動設定  
IPv6 はアドレス自動設定機能を有するので、IPv4 のような手動のアドレス設定や、DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) サーバによる割り当てが不要なので、システム構成を単純化できる。
- ・ ルータ探索  
IPv6 はルータ探索機能を有するので、IPv4 のように、デフォルトルートの手動設定や DHCP サーバによる広告が不要なので、システム構成を単純化できる。

### 3. フィールド・システムでの重要性

フィールド・システムで、IP と Ethernet を利用するメリットとして、以下の 2 点が挙げられる。

#### 3.1 ネットワーク構成の自由度

市場競争のグローバル化に伴い、競争要因は常に変わるため、フィールド・システムの構成も柔軟性が求められるだろう。現状の生産システムの接続性は、ERP (Enterprise Resource Planning) や MES (Manufacture Execution System) などの統合化技術の普及と進歩を考慮すると、システムも垂直統合 / 水平統合の対象になり得る。IP と Ethernet は、これらの統合に有利なネットワーク技術である。

#### 3.2 コスト・パフォーマンス

Ethernet と IP は、巨大な市場を有し、コスト・パフォーマンスと進歩に秀でたネットワーク技術である。従って、長期的には、フィールド・システムでも IP と Ethernet が主要な位置の一つを占めると考えられる。例えば、TOE のようなハードウェア化技術や、IEEE802.3ah の 2 線式メタルケーブル技術は、フィールド・システムでの応用が期待できる。

### 4. フィールド・システムでの課題

#### (1) Ethernet の評価と代替リンク技術の検討

- ・ トポロジー  
最新の Ethernet のトポロジーは、スター型とリング型である。フィールド・システムでは、配線の容易さなどからバス型の要求もあるが、しかし、これに

は特有の制約(信頼性や最大距離)を検討する必要がある。

・消費電力

Ethernet は高性能であるがゆえに、消費電力が大きい。フィールド・システムを構成する機器の消費電力に制約が課せられている場合は、代替のリンク技術が必要となる。もし、システムがネットワーク技術に IP を使っているなら、リンク技術の違いは隠蔽されるため、アプリケーションへの影響は無い。

・本質安全防爆

Ethernet が本質安全防爆に対応可能か否かを、代替リンク技術の必要性とともに調査・検討する必要がある。

(2) ディペンダビリティ

他システムとの相互運用性を実現するには、それらと通信インフラを共有せねばならない。このような環境下で、システムの信頼性を実現するため、相互運用が可能なディペンダビリティを実現する枠組みが必要となる。

(3) セキュリティ

ファイアウォールは、特定のトポロジーを仮定するために、ユビキタス環境に適合しない。元来、移動性を持ったデバイスのトポロジーは固定できない。また、無線ネットワークは、ファイアウォールの内側の通信を露出させる。ユビキタス環境では end-to-end のセキュリティを併用する必要があるため、ネットワークの対称性が重要であり、NAT を必要としない IPv6 が必要である。また、フィールド・システムを構成する機器の計算資源は制約されているので、それに適したセキュリティ技術が必要である。

(4) IP のリアルタイム性

組み込み分野では、しばしば IP の処理におけるオーバーヘッドが問題視される。TOE のような IP のハードワイヤード技術が普及すれば、システムを構成する小型組み込み機器に要求されるリアルタイム性(10 msec 程度の応答性能)を実現できるであろう。

(5) スケーラビリティ

フィールド・システムを構成する機器の数は、増加の一途を辿るであろう。これらは、エンジニアリング作業を複雑化させ、コストだけに限らず、ヒューマンエラーの可能性をも増加させる。

5. 取り組み

我々は、前述した分析に基づき、IP(特に IPv6)と Ethernet をネットワークの基盤技術に据え、将来のフィールド・システムが必要とする技術に関して、研究開発を行っている(図1参照)。

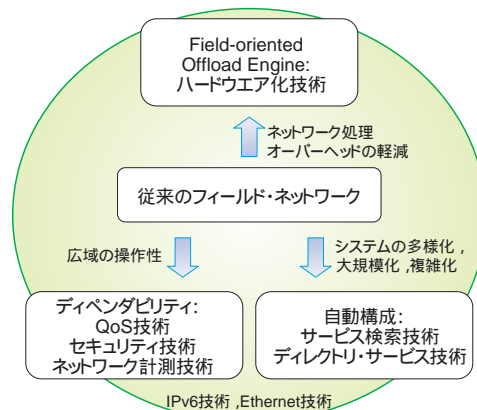


図1 研究アイテム

(1) ディペンダビリティ

フィールド・システムで要求される信頼性は、冗長化に代表される従来のものから、より広義なものに変わるであろう。まず、既存のネットワーク基盤を他のシステムと共用させなければならないので、ネットワークのサービス保証に関する共通の枠組みが必要となる。次に、ファイアウォールだけに頼らないセキュリティ対策が必要である。さらに、ネットワークが健全に運用されていることを観測するためのネットワーク計測技術も必要である。

(2) 自動構成

我々は、3.1節で述べた課題に関して、機器を自動的に構成する機構を研究している。

(3) FOE( Field-oriented Offload Engine )

計算資源の限定されたデバイスから構成されるフィールド・システムに IP と Ethernet を適用するためには、TOE のような IP だけではなく、フィールド・システムに即した部分(例えば、上述した自動構成の機構やセキュリティなど)をも含んだハードウェア化が必要である。

6. おわりに

IP と Ethernet は重要なネットワーク技術だが、単にそれを導入しただけでは、システムの競争力にならない。本稿では、課題を挙げることで、独自性の可能性を示した。当社は、ネットワーク技術を基礎に置き、製品の競争力を通して、社会に貢献する技術の研究と開発を目指している。

\* 本文中の商品名及び名称は、各社の商標又は登録商標です。

## IPv6 チップへの取り組み

### 1. はじめに

IPv6の普及を促進する戦略デバイスとして、IPv6専用LSI(以下「IPv6 チップ」と言う)を試作研究している。IPv6 チップは、IP 層を v6 で構成した TCP/IP オフロードエンジン( TCP/IP Offload Engine )である。従来ソフトウェアで実装されていた TCP/IP スタックを、ハード論理で LSI 化した。ホスト CPU は通信処理を省略でき、IPv6 が容易に導入できる。

### 2. 特 長

ハードウェアの特長である並列処理や高速性を活かし、ソフトウェアでは実現できない機能を搭載した。一方で、動作速度を下げれば、低消費電力になる特性も活用している。さらに、近年の LSI の高集積化を享受することで周辺機能を一体化し、充実した機能、性能を盛り込んだ(表 1)。これらについて順次紹介する。

IPv6の理念は森羅万象のネットワーク化であり、将来続々と登場するであろう IPv6 ノードの大半は、少量のデータ伝送で事足りるはずである。IPv6チップはこのような軽量ノードに簡単に適用できることを目的としており、ホスト CPU とのインタフェースも 8 bit バスである。LSI化に当たり、100BASE-TXの物理層(PHY)を一体化したので、ホストCPUにワンチップマイコンを採用すれば、IPv6チップとの2つのチップでイーサネットノードが簡単に構成できる(図1)。

来るべきユビキタスネットワーク社会でのIPv6の利用に際して、重要な要素に暗号化の問題がある。これは軽量ノードであっても避けられない。しかし、暗号化処理はローエンドCPUの手に余る。IPv6チップは、ハード化の利点を活用して暗号処理を内蔵している。IPsec (Security Architecture for Internet Protocol)はチップ内部で高速かつ自動的に処理されるので、ホストCPUは平文を扱うだけでよい。また、軽量ノード向け鍵交換プロトコル KINK( Kerberized Internet Negotiation of Keys )を支援する機能も搭載した。

既に述べたように、IPv6 チップはユビキタスネットワークノードに簡単に利用できる。既存のネットワークノードには様々な CPU や OS が採用されているので、

表 1 IPv6 チップ仕様

項目	仕様
IP機能	TCP,UDP,ICMPv6
	IPv6,IPsec( AES,3DES,SHA-1 )
	Ethernet MAC・IPv6 over PPPを選択使用
ネットワーク	100BASE-TX・モデムI/Fを選択使用
バスI/F	データバス 8 bit,アドレスバス 14 bit
電 源	3.3 V/2.5 V

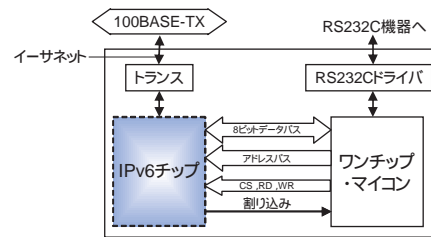


図 1 簡単な IPv6 ノードの構成例  
( LAN/RS232C コンバータ )

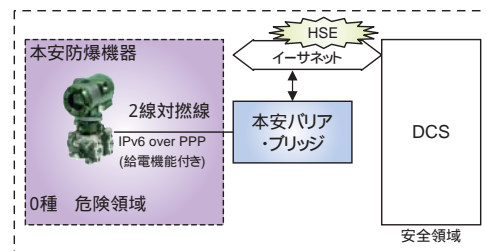


図 2 フィールドセンサシステムへの応用

IPv6をサポートしようとする、プロトコルスタックを開発、実装する作業がCPU毎、OS毎に強いられる。しかし、本IPv6チップを利用すれば、オープン、クローズといったソケット通信を実現するようなパラメータ、データを受け渡すことで簡単にIPv6通信が実現する。しかも、IPv6の互換性規格「IPv6 Ready フェーズ2」に相当する品質が保証される。

さて、当社の製品のなかで、重要な位置を占めているフィールドセンサと呼ばれる製品群がある。これは、信号をアナログの直流電流値で伝送するものが大半であったが、近年FOUNDATION Fieldbus(FF)に代表されるデジタル伝送化が進行し、さらにHSE(High Speed Ethernet)によるIP化も喧伝されている。

IPv6チップでは、その先にあるIPv6化まで視野に入れ、以下のようなフィールドセンサ向け機能を盛り込んでいる(図2)。

- ・ 防爆仕様を満たす低消費電力化
- ・ 2線式伝送システムに対応するIPv6 over PPP(Point-to-Point Protocol)

### 3. おわりに

IPv6 Ready フェーズ2に準拠したTCP/IPv6オフロードエンジンLSIを試作した。OSに依存しない簡単なインタフェースを持ちPHYも内蔵しているので、既存製品の資産を継承しながらIPv6通信機能を容易に実現できる。暗号化にはIPsec、鍵交換はKINKに対応しており、セキュアなネットワークを構成できる。IPv6 over PPP機能、低消費電力特性と併せて将来のフィールドセンサのIPv6化にも対応できる構成とした。

## フィールド無線ネットワーク

### 1. はじめに

無線通信技術は、オフィスの無線LANや携帯電話など様々な分野に使われ、高い利便性を提供している。こうした分野の通信は伝送レートが高く、音声や映像を送受信する用途にも利用され、その無線機器の電力供給は電源駆動、或いは短期間での電池駆動である。

一方、フィールドでは無線センサネットワークが注目されている。ここで取り扱う情報は、映像や音声ではなく、主に極めて狭い帯域で処理できる温度や機器操作などの情報である。また、フィールドでは電磁ノイズや電波障害物が多く、無線通信には極めて厳しい環境である。そうしたフィールドでの無線機器は、数ヶ月から数年の間、電池駆動で動作することが期待される。

我々は、このようなフィールド・システムに適用できるフィールド無線機能要素とシステム化技術を研究開発している。

### 2. 実現すべき課題

フィールド無線ネットワークへの要求は、適用対象の目的によって多様である。本研究では、次に示す要件を満たす最適解を実用化することを第一の課題とする。

#### (1) カバー領域と対象ポイント数

数十m<sup>2</sup>の小規模なサイトから数k m<sup>2</sup>の大規模なサイトまで、さらにはパイプラインのように数百kmにも延びる対象もあり、多様な領域に対応できることが必要である。また、対象カバー領域内には、センサから得られる温度・流量等の物理量、スイッチの状態、あるいは機器の動作状態など、数十から数万の対象ポイントがある。

#### (2) 通信の内容

通信される情報は接点状態やアナログデータなどプリミティブなものであり、その量は数十byteから数百byteと少量である。その利用目的はシステムの監視や保全情報などの補助的な情報の収集・設定であり、アクセス速度は速くても数秒単位、多くは数十秒から分単位である。

#### (3) 通信の品質

利用される環境がオープンなエリアであるので、適切でない箇所からのアクセスや通信データの改竄に対する対応と処置が必要である。また、フィールド環境でのノイズ等による通信経路の切断やデータ欠落への対応が必要である。

#### (4) 設置・運用の方法

数m以上あるタンクや配管などの障害物となる金属体が多く存在し、それらが電波を遮断や反射するため、安定した通信路の確保にはアンテナ指向性、設

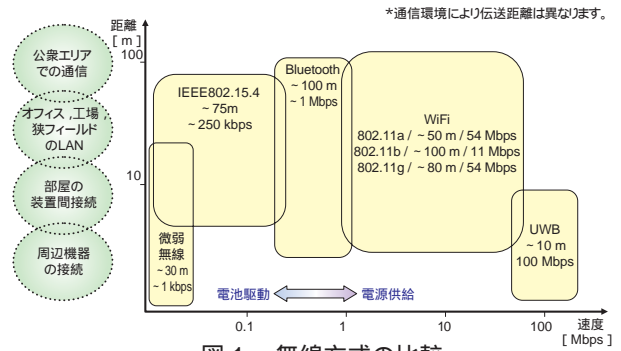


図1 無線方式の比較

置場所などの適切な選択が重要である。また、センサや機器等の稼働期間は、数日以下の極めて短期間から数年間までと多様であり、その期間は電池交換なく動作することが望まれる。一方、無線通信に必要な電力を機器側から供給する場合、利用できる電力は数十mW以下であり、低消費電力での通信の仕組みが必須である。また、無線機能の設置に当たって、通信システムの複雑なコンフィギュレーションを必要とせずに簡便に行えることが要求される。

これらの要件を実現するために、多数ある無線通信技術(図1)の中から、IEEE802.15.4を採用した。その理由は、長期間のバッテリー駆動を前提としている、1つのネットワークに存在できるノード数が約6万個である、広域のフィールドをカバーするためのマルチホップ機能を持っている、世界標準規格である、ことである。

### 3. IEEE802.15.4の特徴とその利用方法

IEEE802.15.4は、無線通信のハードウェア(物理層)とそれを制御する機能(MAC層)から成る(図2)。MAC層はポイントとポイント間の通信制御であり、ネットワーク層は、MAC機能を用いて複数のポイント間の通信制御を行う。ネットワーク層にはツリー型、メッシュ型などのフィールドで有用な各種ネットワークトポロジーが実装され、その上にアプリケーションプラットフォーム、各種アプリケーションが実装できる。我々はIEEE802.15.4の特徴を活用し、先に示したフィールドに必要な特性を、ネットワーク層とアプリケーションプラットフォームに実装する。

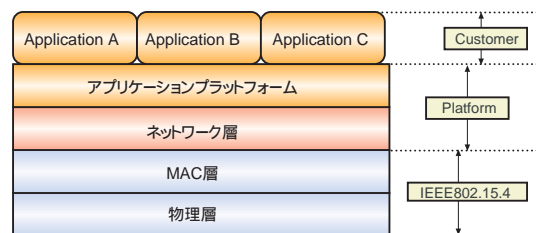


図2 IEEE802.15.4の機能階層



図3 無線ノードの外観



図4 無線ノードの装着例

#### 4. 機能要素

フィールド無線ネットワークの1つの機能要素である無線ノード(図3)と、システム化要素を試作した。本無線ノードは約3 cm x 1.8 cmと、フィールドの機器に組み込むには十分な小型サイズとなっている。図4に、フィールド機器に装着した例を示す。

##### (1) 無線ノード

内蔵ROM/RAM : 56 KB/4 KBの省電力16 bitMPUと、IEEE802.15.4の機能を持つ無線送受信LSIの2つで構成した。MPUには、複数の無線ノードを経由して直接電波が届かない場所と通信するマルチホップ機能と、ネットワークのコンフィギュレーションが不要で無線ノードが自動的にシステムに結合し動作するplug&play機能を搭載する。さらに、plug&play機能は検知したノード情報を上位アプリケーションに伝達できるインタフェースを備え、動的にアプリケーションと無線ノードの結合が行える。また、本無線ノードは、電波法で必要な認定を単体で取得できる設計となっている。

##### (2) システム化技術

フィールド無線ネットワークは設備管理等のために、データサーバや制御システムのネットワークと相互接続する必要がある。そのプロトコル変換機能として、IPネットワークとのGatewayを試作した。これにより、無線ノードとIP側のアプリケーションが相互に接続することができる。さらに、無線ノードの設置や運用管理のために、無線の通信パケットをリアルタイムにモニタできるツールを試作した。

#### 5. 実用化への取り組み

以上で述べたように、フィールド無線ネットワークのために必要な基本的な機能要素の試作を行った。今後は、この機能要素を用いて、フィールドでの新たなコンセプトを具現化していく。以下では、優先して取り組んでいる“テンポラルセンサ”と“保守用サブライン”について、概略を説明する。図5に、システム基本構成を示す。

##### (1) テンポラルセンサ

テンポラルセンサは、定期点検時やプラントの異常

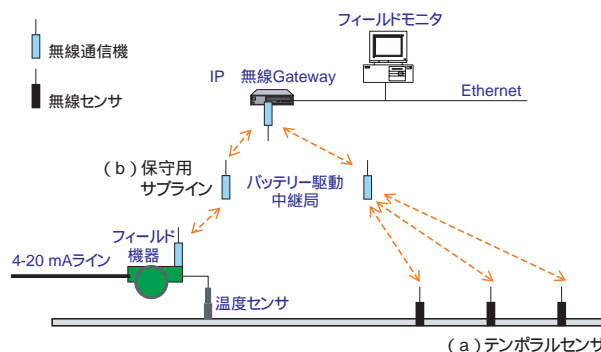


図5 システム基本構成

発生時に、一時的に特定場所をモニタ(図5-a)するものである。この用途では、電源を含めてワイヤレスで設置するための電池駆動機能と、運用の簡易化のためのplug&play機能が必須である。長期間に亘って電池駆動を可能とするために、センサを常時動作させずに間歇動作させる仕組みと動作タイミングをシステムで同期させる仕組みを開発した。plug&play機能は動的にセンサを検出し、設置と同時に監視システムがデータをモニタできる仕組みで実現する。

##### (2) アナログ通信機器の保守用サブライン

4-20 mAのアナログ信号で接続されているセンサやアクチュエータに、遠隔診断/点検機能を付加する保守用のサブラインとしての無線ネットワーク機能(図5-b)を実現する。無線ノードに必要な電力は装着される機器の4-20 mA信号の余剰電力で供給するので、特別な配電は必要としない。この機能を活用すると容易にデジタル通信ラインを導入できるため、部分的にFOUNDATION Fieldbusが実現できる高度な自己診断機能を組み込むことが可能となる。

#### 6. おわりに

フィールド無線ネットワークに対する市場の期待は大きい。今後は、試作した機能要素を用いて、用途別の制約や問題を明確化して、その解決を行っていく。特に、計測制御分野の標準技術である4-20 mA信号配線、FOUNDATION Fieldbusなどと、無線ネットワークとの相乗効果の発現を積極的に進めていく。また、無線ネットワークの標準技術の一つであり、我々が採用しているIEEE802.15.4をベースとしたZigBee<sup>1)</sup>に連携する活動を通して、フィールド・システムにおける標準化に貢献していく。

#### 参考文献

(1) <http://www.zigbee.org/>

\* 本文中の商品名及び名称は、各社の商標又は登録商標です。

## 成長するシステムのフレームワーク

### 1. はじめに

ものつくりの現場での生産システムは、ものつくりの品質、スループット、そして効率の向上を目指してきた。これらの活動では、ネットワークを活用し、現場と経営システムを結び垂直方向の連携、上流から下流工程までの水平方向の連携、加えて過去の経験の時間軸方向での活用による改善がなされてきた。これをネットワーク化による第一期の改善と位置付けると、今、ユビキタス化による第二期の改善が始まろうとしている。

ここで期待されるものは、従来のもものつくりの周辺で発生する様々な課題に、既存システムの枠に縛られずに多重に対応することである(図1)。ものつくりの現場には、工程間に在庫が滞留する問題、生産設備の安全強化、環境・エネルギー問題などの数々の課題がある。課題は年々多様化しており、また、これらはシステムの設計当初には予想し得ないものも多く、常に新たな課題として発生する。課題解決には、既存システムの枠を超えた複数のシステムを横断する、現場の詳細な情報の収集・分析や機能拡張が必要な場合もある。

従来は、課題への対応を行う度にシステムを停止し、多様な機器に対して、個々の機能や機器構成の増改造を行ってきた。しかし、日常化する変化に対応するためには、それぞれの機器に機能を拡張する仕組みと、これらをネットワーク経由で運用管理する仕組みの実現が求められる。我々は機器上に機能拡張のための共通コンピューティング環境の実装と、それをういた課題解決のためのシステムを既存システムに重畳させる仕組みFOA(Field Overlay Architecture)を試作した。本稿では、その概要について説明する。

### 2. FOAの特徴

第一期の改善では、ネットワークによる工程間の接続と、多様な現場データを格納するプロセス情報管理システムの実現が、課題解決の基盤であった。生産業務そのものの改善を、この基盤の上で行ってきた。

第二期の改善では、生産業務の周辺で日常化する課題に対して、必要時に拡張機能を組み込めるコンピューティング環境の実現が鍵となる。

FOAでは、既存システムを成長させるために、システムを構成する機器群に拡張機能のためのコンピューティング環境を構築する。

この環境に期待される特徴として、組み込むべき拡張機能の再利用性から、現場の多様な機器の個々の特性に依存しない共通化されたものであることが望まれる。また、組み込まれた拡張機能は、複数の機器を超えて連携し、さらにシステムの成長に伴い、多重に構成され

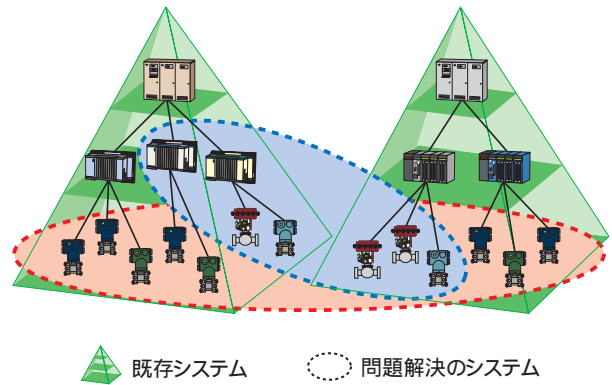


図1 多様に重なり合ったシステム

るであろうことから、拡張機能が互いに独立して動作することが望まれる。最後に、拡張機能の組み込みや実行が、既存システムに要求されるリアルタイム性や信頼性を損なわない十分な配慮が必要である。

### 3. FOAの仕組み

ここでは、FOAの仕組みを2つの視点で説明する。

1つ目の視点では、機器単体のプログラム実行環境に着目し、機器上に拡張機能を実現する仕組みを説明する。

2つ目の視点では、前述の仕組みを持った複数の機器で実現される課題解決のシステムの運用に着目し、複数の課題解決のシステムが既存システムの上に重なる「システム重畳」の仕組みを説明する。

#### 3.1 拡張機能実現の仕組み

機器既存の機能に加えて、付加的な拡張機能を実現するために、機器にFOA動作機構と呼ぶプログラム実行環境を搭載する。その構成を、図2に示す。

この本動作機構は、インタープリタ上に、異なる機器に共通のコンピューティング環境として提供される。これにより、CPUやOSなど機器の物理特性に依存しない

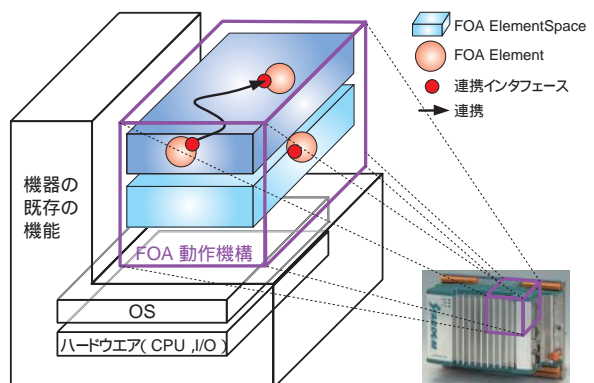


図2 拡張機能実現の仕組み



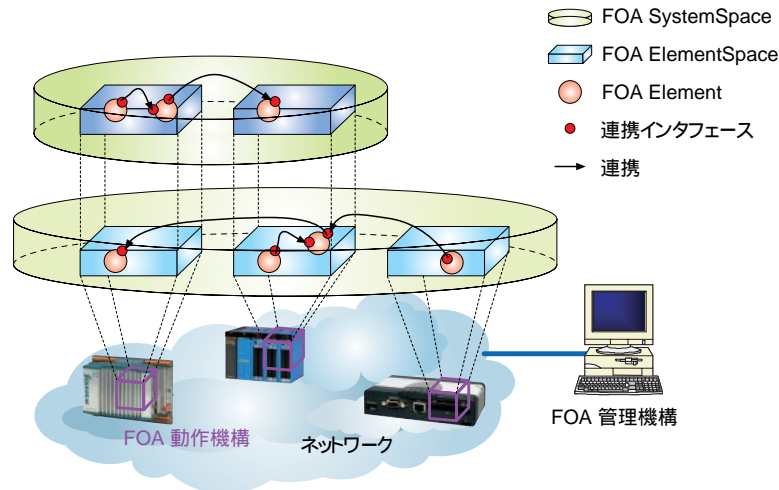


図3 システム重畳の仕組み

で拡張機能を実現できる。また、既存機器がリプレースされても機能の継承ができる。

動作機構上で動作するプログラムは、その機器が持つ情報や機能を活用し、複数のプログラムが並列動作して拡張機能を実現する。また、動作機構は、プログラムおよびその設定情報をネットワーク経由でダウンロードする機能、さらにプログラムの起動・停止などの一連の動作指示を外部からネットワーク経由で行える機能を持つ。

動作機構上のプログラムをFOAではElementと呼ぶ。Elementは、拡張機能実現のアプリケーション部品として実装される。Elementはデータやイベントを相互に交換するための連携インタフェースを持つ。Elementはこれらをつなぎ合わせて連携し、拡張機能を形成する。

動作機構は、この拡張機能を独立して複数に実行させる環境を提供する。この環境をElementSpaceと呼ぶ。ElementSpaceは、一つの動作機構上に複数存在し、お互いに影響を及ぼさずにElementの実行やそれらの操作が可能である。

### 3.2 システム重畳の仕組み

課題解決のシステムを構成するために、機器上のElementは、機器を横断して情報交換を行う。課題解決のシステムは、それぞれ課題の内容、システムの機器構成や担当者が異なり、課題や担当区分毎に独立して運用する必要がある。そのために、システム毎の操作のアクセス権限、および機器資源や機器既存の機能の割り当てを制御する仕組みを提供する環境が必要である。この環境をSystemSpaceと呼び、その構成要素を、図3に示す。

SystemSpaceは、機器上に生成されたElementSpace群から構成される。従って、ElementはElementSpaceの環境下で動作し、同一SystemSpaceに含まれる他のElementと連携して、拡張機能を実現する。

SystemSpaceは、機器群に複数重ねて構築することができ、それによって複数の課題解決のシステムを並行して運用することができる。このような運用の実現が、本FOAの目指すコンセプトであり、そのシステムの運用形態を「システム重畳」と呼ぶ。

システム重畳の仕組み実現のための管理機能として、FOA管理機構がある。管理機構は、課題解決のシステムを構築する機能として、複数のSystemSpace、ElementSpace、Elementの構成情報を登録し、動作機構にこの構成情報およびElementプログラムをネットワーク経由でダウンロードし、実行させる仕組みを持つ。また管理機構は、システムの構成や動作状態を把握・監視する機能を持つ。

管理機構の機能は、FOAシステム全体を管理するFOA管理者用と、課題解決のシステムを担当するSystemSpace管理者用に分けて提供される。FOA管理者のみが、SystemSpace毎のアクセス権限や機器資源などの運用条件を定義し、SystemSpace管理者に、SystemSpaceとして割り当てる権限を持つ。SystemSpace管理者は、割り当てられたSystemSpace内の構築・運用を、他のSystemSpaceとは独立して行う権限を持つ。

## 4 各機構の実装と運用例

我々は、FOAの基本機能を試作した。図4に、そのシステム構成を示す。また、現在の実装を用いた運用例を説明する。

### 4.1 実装

FOA動作機構を、SH3/Linuxを搭載する組み込み実験機上に試作した。試作した動作機構は、Javaインタプリタを用いたアプリケーション実行環境JEROS(Java Embedded Real-time Operating System)に、システム重畳の機能拡張を実装し実現した。JEROSは、メール機

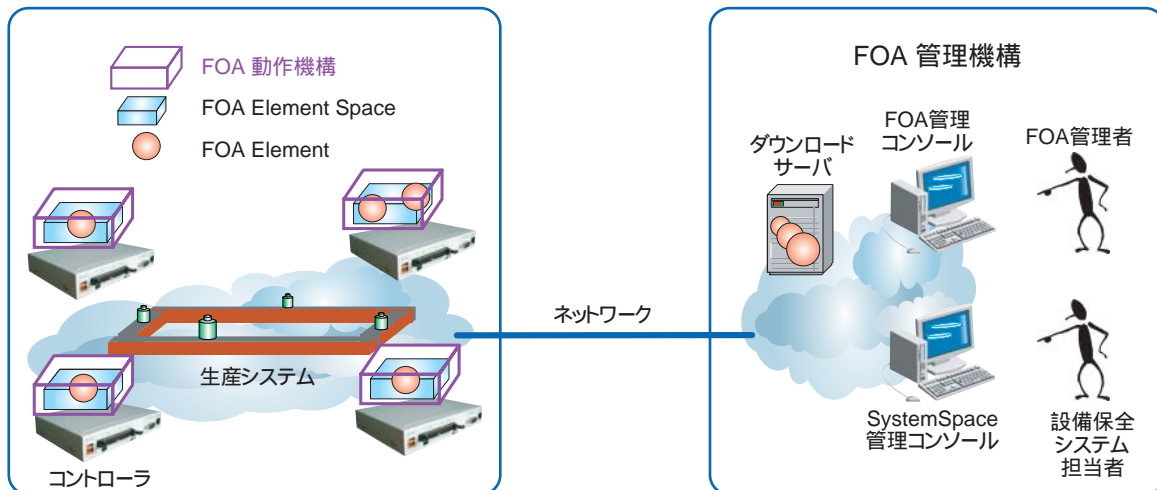


図4 現在の実装のシステム構成

能，Webサーバを持ち，搭載する機器の情報発信のための拡張機能をJavaプログラムで柔軟に追加できる仕組みである。JEROSは，既にDUONUS<sup>1)</sup>やSTARDOM<sup>2)</sup>などの当社製品に組み込まれている。

また，FOA管理機構を，パーソナルコンピュータ(PC)上に実装した。本管理機構は，管理者が構成情報を操作するための管理コンソール，SystemSpace毎の構成情報を管理するデータベース，およびElementと構成情報を動作機構へダウンロードするダウンロードサーバから構成される。

#### 4.2 運用例

生産システムにFOAを適用し，課題解決のシステムとして，故障傾向診断システムを重畳する例を示す。まず，システム稼働までの流れを説明する。

FOA管理者は，FOA管理コンソールから診断システムに割り当てる新しいSystemSpaceを定義し，各動作機構上にElementSpaceを生成する。そして，SystemSpace上に診断システムを構築・運用する設備保全システム担当者に，SystemSpace管理者としてのアクセス権限を与える。

担当者は，自部署のPCからSystemSpace管理コンソールを起動し，診断システムを構成するデータ収集，判定，通知を行うElementの配置や連携関係を定義する。その定義された構成情報は，管理機構上のデータベースに格納される。

担当者は，構成情報とElementプログラムをダウンロードサーバに登録後，動作機構に対し，ダウンロード指示およびElement起動指示を行う。動作機構は，ダウンロードした構成情報に従って，で作成されたElementSpace上にElementを生成し，Elementは他のElementとの連携を確立する。

診断システムが稼働する。

次に，診断システム稼働後の運用について説明する。設備保全システム担当者は管理機構を用い，必要に応じて診断システムの構成や稼働状態を監視する。

運用中に機器交換が発生した場合は，新しい機器上の動作機構に，使用してきた構成情報とElementをダウンロードさせるだけで，運用の再開が可能である。また，アプリケーションの更新に伴う機器上のElementのアップグレード作業を行う場合は，機器を止めずに他のシステムを運用しながら，SystemSpace単位での作業がネットワーク経由で可能である。

#### 5. おわりに

稼働している既存システム上に新たに課題解決のシステムを重畳させるアーキテクチャ「FOA」を考案し，試作によってその有効性を確認している。今後，実用化に向けてFOAの機能を充実させ，多様な機器へのFOA動作機構の移植性について取り組む予定である。

また，動作機構を各機器に搭載するだけでなく，動作機構のみを搭載した専用機を既存機器に外部接続する形態についても取り組むことを考えている。

#### 参考文献

- (1) 野口哲，伊原木正裕，大野毅，岩村太信，“工業用ネットワークコンピュータ‘DUONUS’”，横河技報，Vol. 42，No. 4，1998，p. 173-178
- (2) STARDOM 特集号，横河技報，Vol. 46，No. 1，2002，p. 3-26

\* DUONUS，JEROSは横河電機(株)の登録商標，STARDOMは商標です。その他，本文中の商品名および名称は，それぞれ各社，または個人の商標または登録商標です。

## プラントモデルのリアルタイム活用

### 1. はじめに

石油精製，石油化学，鉄鋼，製紙など素材産業の生産現場での自動化は進んでいるが，生産計画に関する最終的な意思決定や異常事態への対応などでは，まだまだ人の判断に頼ることが多い。一方，プラント建設時から高度成長期を支えてきた団塊世代の熟練技術者が現場を去るといった，所謂2007年問題に対応したプラント操業の新たな仕組みが望まれている。また，環境問題，安全問題への関心が高まっており，安全・安心に関わる技術への期待も大きい。

近年，ネットワーク技術の発展により，遠隔操業やフィールド情報の統合が進み，これらが2007年問題，あるいは安全・安心なプラント操業に対する一つの解となることが期待される。さらに，その先の姿を考えた時，現実の情報を利用者がそれぞれの視点で変形・再構成して，使い易い形で提供していくことが重要となる。そこで，人による意思決定や操作を支援する技術として，プラントのより本質的な状況を把握することを可能にするため，プラントモデルのリアルタイム活用を提案する。

また，物流コストや環境コストを削減し，大規模な事故のリスクを回避するために，必要なものを必要なところで生産するユビキタス生産が進むと考えられる。類似したプラントを世界中に配置したり，あるいは，小型化して消費地に分散配置したりすると，それらを遠隔から集中して保守し，監視・運転することが必要となってくる。その時に，個々のプラントの実装上の違いが大きいと，遠隔から個別の対応となり，集中しての保守・監視・運転のメリットを活かすことができない。そこで，個々の実装上の違いをローカルに吸収させて，多くの類似プラントを同じように扱うことができ，共通に計画，操業，監視，保守を実施できる仕組みが期待される。そのためにも，プラントモデルをリアルタイムで活用して重要なインデックスを算出し，各プラントに共通の本質的な状況を把握できるようにすると同時に，共通の制御変数で操業できるようにする技術が必要とされる。

2章では，モデリングとシミュレーション技術に関してのこれまでの取り組みを示し，ダイナミック・シミュレーションにおけるパラメータ同定と初期値作成の問題の重要性について述べる。3章では，これらを解決するプラントモデルのリアルタイム活用の仕組みと，それにより生まれる新しいプラント操業の姿を示す。4章では，ミニプラント実験装置を用いた取り組み状況を紹介する。

### 2. モデリングとシミュレーション技術

当社は，主に石油精製あるいは石油化学プラントを対象として，プラントのダイナミック・シミュレーション

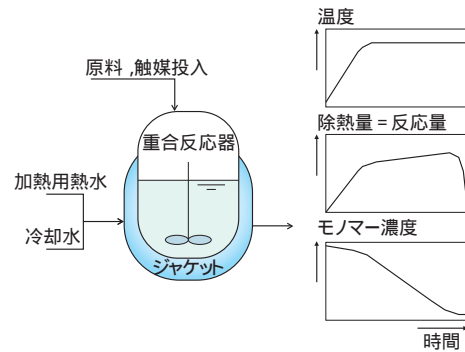


図1 バッチ重合反応器

および定常シミュレーションを含めた統合ソリューションの提供を行ってきた。また，規制緩和による点検機会の減少，および装置，システムの高信頼化により，非定常な操作を行う機会が減少したオペレータや新人を対象として，プラントの立ち上げ，立ち下げ，異常事態への対応などの操作の習得を目的としたトレーニング・シミュレータを開発してきた。トレーニング・シミュレータの需要は大きく，石油化学系のプラントを中心に，多くの実績を上げている。

以下に，シミュレータの精度向上のためのいくつかの取り組みについて記す。

#### (1) パラメータ同定

石油化学系のプラントでは，シミュレーション用のモデルや物性計算法の開発が進み，現実をかなりの精度で再現できるようになっている。しかしながら，プロセス固有の反応特性などについては，運転データからパラメータを個々に合わせ込む必要がある。図1のバッチ重合反応器においても，物理化学的法則や物性データから，予めおおよその数式モデルとパラメータは得られるが，表1に示すように，いくつかのパラメータについては，運転データから同定する必要があった<sup>(1)</sup>。

バッチ重合反応器では，エチレン，プロピレン，塩化ビニルなどのモノマーを仕込み，触媒や添加剤と共に加熱してポリマーへ反応させる。この反応は発熱反応であり，全てのモノマーが反応すると発熱が収まり，バッチが終了する。反応熱量は冷却熱量と等しく，冷却熱量は冷却水の $Q$ (出口熱量)-(入口熱

表1 パラメータ同定

パラメータ	同定に用いる運転データ
モノマー 反応熱 ポリマーの	1バッチの総反応量と総冷却熱量の関係
モノマー 反応速度定数 ポリマーの	濃度計算値と冷却熱量の関係
熱伝導率	流量と冷却熱量の関係
冷却器の遅れ時定数	制御系の応答波形

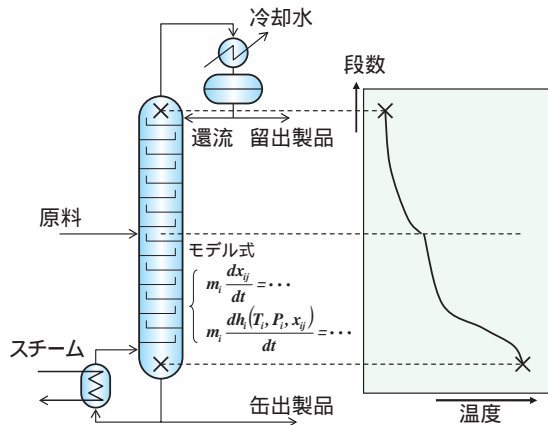


図2 蒸留塔モデルと内部状態

量] × (流量) により求めることができる。そこで、1バッチの冷却熱量の合計を原料モノマー量で割ると、単位量当たりの反応熱が求まる。また、反応速度は、ポリマーの増大に伴って低下する現象が知られている。冷却熱量から反応量とモノマー濃度を時々刻々と計算して、モノマー濃度とモノマー転化率(反応した割合)との関係をプロットしたものを反応速度モデルとした。これとは独立に、熱交換器の熱伝導率は、流量に依存することが知られているので、流量と伝熱量の関係をプロットし、熱伝導率の流量依存性をモデル化した。

最後に、PID制御による温度制御系の振動的な応答波形から、温度測定の変位を同定して、一次遅れモデルとした。このように、バッチ反応器では、運転条件が刻々と変化するため、反応速度の濃度依存性や、熱伝導率の流量依存性のような特性も、1バッチの運転データから求めることができた。

なお、連続プロセスにおいては、情報量が少なく、いくつかの定常状態に着目して、バランスデータからパラメータをフィッティングすることが多い。

リアルタイム活用においては、さらに長期間継続してシミュレータを使うため、パラメータを逐次調整していく仕組みが必要になる。

(2) 初期値作成

ダイナミック・シミュレーションを行うためには、モデル内部の全ての状態の初期値を用意する必要がある。定常状態であれば、定常シミュレータにより初期値を求めることができるが、非定常状態の場合には、初期値を求めることは困難である。我々は、得られた測定値から、より平衡状態に近いという評価関数、具体的には状態変数の微分係数の二乗和を最小化することにより、全ての状態変数の初期値を決める方法を提案した<sup>(2)</sup>。例えば、図2の蒸留塔モデルの場合には、内部状態である途中の棚段の温度、組

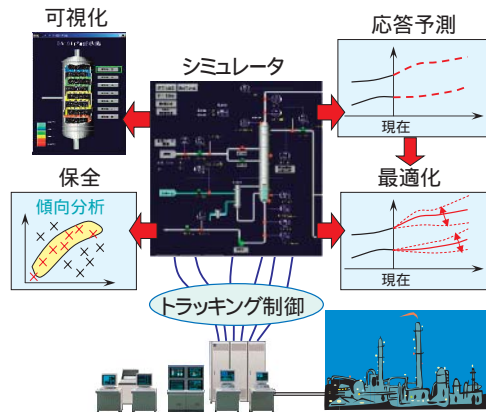


図3 トラッキング・シミュレータ

成などの初期値を用意する必要があった。文献<sup>(2)</sup>では、より簡単な3段水槽系を例とし、提案した手法により初期値を求め、その後の応答を予測するシミュレーションを行った結果、現実の応答に近い結果が得られた。

以上、これまでの取り組みのなかで、パラメータ同定と初期値作成に関するいくつかの手法を示した。次章に述べるトラッキング・シミュレータおよび予測シミュレータでは、より一般的にこの問題を扱い、プラントモデルのリアルタイム活用を実現する仕組みを提供する。

3. 実現する技術

図3に、トラッキング・シミュレータを中心にしたリアルタイム操業支援の全体像を示す。

(1) トラッキング・シミュレータ

シミュレータをリアルタイムで実プラントと並行して動かすトラッキング・シミュレータ方式を提案する。トラッキング・シミュレータにおいては、センサから得られた値と、シミュレータが計算した値のずれを減らす方向に、モデルのパラメータを逐次修正する。但し、トラッキング・シミュレータには、PID制御系を含み、また、実プラントのフィールド条件や環境条件を全て取り込む必要がある。トラッキング・シミュレータにより、実プラントのコピーがコンピュータ上に再現できれば、図3に示すように、内部状態の推定、将来の予測、保全、最適化など様々な形で利用できる。

トラッキング・シミュレータは、シミュレータ導入時には、未知のパラメータの同定ツールとして動作する。また、プラントの特性が時間と共に変動する場合には、特性変動に追従して、性能劣化や異常検知などにも活用できる。

(2) 予測シミュレータ

予測シミュレータは、現状の操作が続くと、どのよ

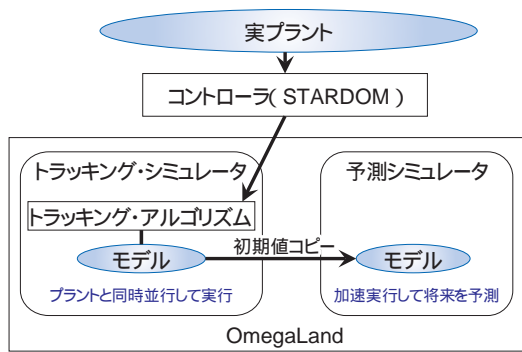


図4 予測シミュレータ

うな状態になるかを予測する。目標状態に近づくことを確認できれば良いが、操作量や制御量の制約ぎりぎりまで運転している場合など、制御不能状態に陥らないか、危険な状態に陥らないかなど、事故の発生を事前にキャッチすることが可能になり、安全・安心な操業の助けとなる。

予測シミュレータの実行方法としては、トリガーを与えた時点からパラメータと入力値を固定して、数十倍から数百倍に加速して実行する。図4に示すように、トラッキング・シミュレータは、常に実プラントと並行して動き続ける必要があるため、予測シミュレータは全く同じシミュレータをもう一つ用意し、トリガーと同時にトラッキング・シミュレータのパラメータや変数値などの内部状態をコピーして、それを初期状態として加速実行させることにした。予測シミュレータの初期値は、トラッキング・シミュレータからコピーするため、改めて初期値を作成する必要がないという特長を持っている。

(3) 操業の透過性

ここでは、同じ製造方法による同種のプラントが、場所を問わずに複数存在する場合を考える。トラッキング・シミュレータを用いて、プラントの測定していない状態を推定することにより、生産量や性状などの重要なインデックスを得ることができる。そこで、バルブやセンサの配置などのプラント毎の差

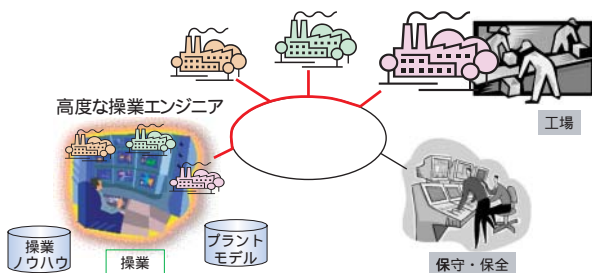


図5 ネットワーク環境でのプラント操業

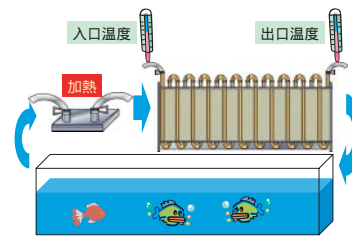


図6 ミニプラント実験装置1(簡易冷却ユニット)

異を認識していれば、それらをプラント毎にローカルに補わせることにより、複数のプラントを共通のインデックスを用いて、同じように操業することが可能になる。このことを操業の透過性(トランスパレンシー)と呼ぶ。これにより、プロセスを熟知した高度なエンジニアが、ネットワーク経由で複数のプラントの操業に寄与することが可能になる。また、そこで得られた操業ノウハウは、同種のプラント全てにおいて再利用可能となる。

(4) ネットワーク分業

図5に示すように、将来のプラントにおいては、高度なエンジニアによる操業と、工場での現場作業と、設備・機器に関する保守・保安が、ネットワークを介して分業されると考えている。プラントモデルをリアルタイムで活用することにより、コンピュータ上にプラントを再現できる。これにより、将来の予測や操業の透過性を実現することが可能になり、同じようなプラントを世界中に持つプラント・オーナー、あるいは、複数のプラントに関する機器メンテナンスを行う会社にとって、大きな武器になる。

4. ミニプラント実験装置を用いた取り組み

ここで、実証用に開発したミニプラントにおける実験例を示す。まずは、図6に示す簡易冷却ユニットに対して、トラッキング・シミュレータの実験を行った。セン

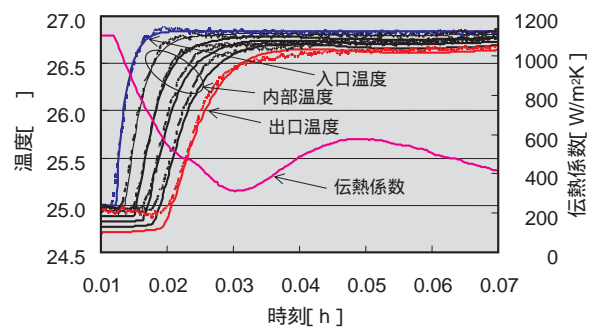


図7 トラッキング・シミュレーション例 (簡易冷却ユニット)



図8 ミニプラント実験装置(改質反応プロセス)

サによる測定値は、当社のネットワーク・コントローラ STARDOM 経由でネットワークを介して、ダイナミック・シミュレータ OmegaLand へ送られ、OmegaLand 上でトラッキング・シミュレーションを行った。図7に、その結果を示す。ここでは、出口温度が実測値に近づくように伝熱係数を調整している。点線が測定値、実線がシミュレーション結果を示している。内部状態については、冷却ユニットの途中にも、検証用に熱電対を設けて温度を測定した。内部の温度も、シミュレーションにより、ほぼ正確に推定できていることが分かる。

次に、図8の改質反応プロセスにおいて、予測シミュレーションを行った。改質反応プロセスは、燃料電池向けにメタンを水蒸気改質して水素を生成する。ここでも、トラッキング・シミュレータの温度が実測値に近づくように、伝熱係数を調整した。図9の予測シミュレーションの結果を見ると、伝熱係数の調整が進み、トラッキング・シミュレータの温度が実測値に近づくに従って、予測シミュレーションの結果が現実の応答に近づいていることが分かる。

また、このプロセスで操業の透過性について考える。図10は、主な操作として、立ち上げ、生産量増減指示、立ち下げ、異常時操作があると想定して、その一つの実産量増減指示を細分化したものである。ここで、階層的

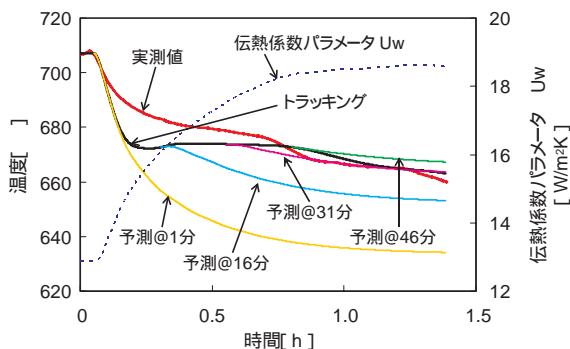


図9 予測シミュレーション例(改質反応プロセス)

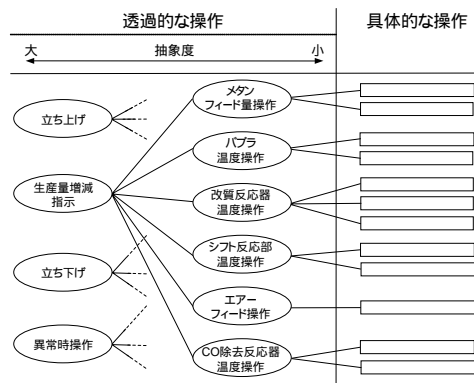


図10 操業の透過性の例(改質反応プロセス)

に分解した時、中央の列はプラント毎の差異がなく、同種の複数のプラントに対して共通の操作になっているので、操業の透過性が実現されている。一方で、右側の列は、プラント固有のローカルな情報に依存した現場で行われる具体的な操作を想定している。そうした具体的な操作でオペレーションの自動化シーケンスを組んだとしても、そのプログラムやノウハウは、同種の別のプラントにおいては全く役に立たない。そのため、操業の透過性を実現するために、プラント毎の差異をプラント毎に補う仕組みを構築することが重要である。

### 5. おわりに

プラントモデルをリアルタイムに活用することにより、実現できるいくつかの新しいオペレーションの姿を示した。シミュレータの活用により、「将来を予測して事故の未然防止等に利用する技術」、「操業に透過性をもたらすことでプラント操業を機器構成に依存しないものとし、異なる複数プラントへの統一したインタフェースを提供する技術」を実現することができる。そして、これらがユビキタスな生産方式においてネットワーク分業を容易にし、安全と安心を実現するためのコア技術となる。

### 参考文献

- (1) 大谷哲也, "モデリング技術とシミュレータ", 第9回SICE制御理論応用部会研究会, 1994
- (2) 大谷哲也, "プロセスシミュレータにおける初期状態の一構成法", SICE 97 徳島, 1997, p. 713-714
- (3) 三浦真太郎 他, "OmegaLandの開発コンセプトと機能概要", 横河技報, Vol.45, No.1, 2001, p. 63-66
- (4) Ohtani Tetsuya, et al., "On-line Process Simulator for Plant Operation", International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, 2005, p. 153-156

\* STARDOMは、横河電機(株)の商標、OmegaLandは、(株)オメガシミュレーションの商標です。