

解説



自律分散システム†

河野 克己††

1. はじめに

計算機システムを取り巻く環境は、情報あるいは制御の分野共に近年大きく変化している。LSI技術、通信技術の発達は、技術的、経済的にシステムの分散化を可能とした¹⁾。一方、システムの大規模化や厳しい経済情勢が進行する中、システムの一括構築の困難さやシステムの停止による社会的経済的影響は大きく増えつつある。こうした中、システムへのニーズは、システムの無停止や段階的な建設あるいは稼働中の保守の達成へと変わってきた。

これらシステムニーズに応えるため、従来の延長でない新しいシステム概念が求められている。最近の技術動向やニーズ動向を背景に、分子生物学をアナロジーとして提案されたのが自律分散システム概念である。自律分散システムの研究はその最初の概念の提案が1984年に発表されている²⁾。その後、情報システムならびに制御システム分野^{3)~5)}で研究が進められ国内オリジナル技術として発展してきた。産業分野でのいくつかの実用化事例も報告されている。平成2年からは文部省科学研究費・重点領域研究⁶⁾が3年にわたって行われた。さらに平成5年3月には情報処理学会、IEEEならびに計測自動制御学会主催で第1回自律分散国際シンポジウム (ISADS 93: International Symposium on Autonomous Decentralized Systems) が開催され現在新しい大きな展開を迎えようとしている。

本稿では、すでに実用化されている事例を中心にこの自律分散システム概念と、概念に基づく計算機システム技法ならびにその適用事例を紹介する。さらに、急速にその研究対象範囲を広げつつ

ある自律分散システムに関する最近の研究動向、今後の展開について触れる。

2. 自律分散システム概念

自律分散システムという言葉は日本で作られ、世界的にも通用するように至った言葉である。この自律分散システムの最大公約数的な定義は「自律性を持った構成要素(個)がいくつか集まり、相互に協調することによって全体としての秩序とそれにもなう機能を生成するシステム」⁷⁾である。したがって、特定の分野や対象に対する概念ではない。このことが現在、情報や制御あるいは生物、物理までの様々な分野の研究者が新しいシステムパラダイムとして自律分散システムの重要性を認識する理由となっている。

実際のシステムは、「作りながら壊され」「壊されながら直される」という同時並列プロセスを内在する生き物と捉えることができる。つまりシステムは段階的に建設され、時と共に構造が拡張あるいは縮小し、機能は追加、変更され、かつ故障し修復される。自律分散システムの研究の発端は1.で示した計算機システムへの新しいニーズと分子生物学によりもたらされた新たな生物システム観⁸⁾に動機づけられている(図-1)。生物体の新陳代謝や成長といった過程を考えると、これらは構造の常なる変化や部分的な故障を含んだままの機能続行を行うものであり、まさに1.で示したニーズを満たすものであるといえる。この生物の構造や機能を解明し実証しつつあるのが分子生物学である。分子生物学では、生体を構成する細胞がすべて均質で、各細胞は生存に必要なすべての情報をDNA(デオキシリボ核酸)として持ち、こうした細胞の統合したものとして生体を捉えるとしている。このような生物の持つ特徴をアナロジーとして提案され工学的に定義されたのが自律分散システムである²⁾。

† Autonomous Decentralized Systems by Katsumi KAWANO (Systems Development Laboratory, Hitachi Co. Ltd.).

†† (株)日立製作所システム開発研究所

この定義によると、自律分散システムとは、「システムは不稼働なサブシステムを含みうる」との前提で、「それぞれの目的と機能を持つ自律的なサブシステムから統合されたもの」として定義される。自律性とは、いかなるサブシステムが不稼働となっても、残りの他サブシステムがそれぞれ生存するために制御でき（自律可制御性）、かつ互いに協調できる（自律可協調性）ことをいう。各々がやるべきことをやり他に迷惑をかけない、とでもいうことができる。これら自律可制御性、自律可協調性を満たすには、サブシステムの

均質性、平等性があげられる。ここで不稼働とは、単なる異常や障害によるものだけではなく、システム内の拡張や保守などによるものを含む。すなわち、システムの構造や機能があたかも生物の成長のごとく常に変化することを「前提」としてシステムを捉えている概念である。

従来システムとの比較をすると、自律分散システムでは、サブシステムが第一義的に定義されるのに対し、従来システム概念では、まず第一にトータルシステムが定義される。自律分散システムと従来システムとを、システムの評価と制御の面から比較し、図-2 にそれらの位置付けを示した。図-2 中の、原点より負(正)の方向は、システム内に不稼働な部分がない(ある)との前提に立つ。システム内にまったく不稼働がないことが前提なら、システムはコストパフォーマンスで評価される。また、この前提下で制御を考えたシステムでは、不稼働部発生時に制御不能となるため、フォールトアボイダンス(故障回避)の対応がとられる。一方、不稼働部分のあることが前提なら、残りの部分でどれだけ機能を続行できうるかという生存機能効用(ファンクションパフォーマンスと呼ぶ)の評価が適切である。また、この前提下で制御を考えたシステムでは、不稼働部分以外の耐故障性(フォールトトレランス)に対応をした構成となる。

従来の集中システムは、コストパフォーマンスの向上をねらい、冗長化による故障回避に対応したシステムである。階層システムでは、上位サブ

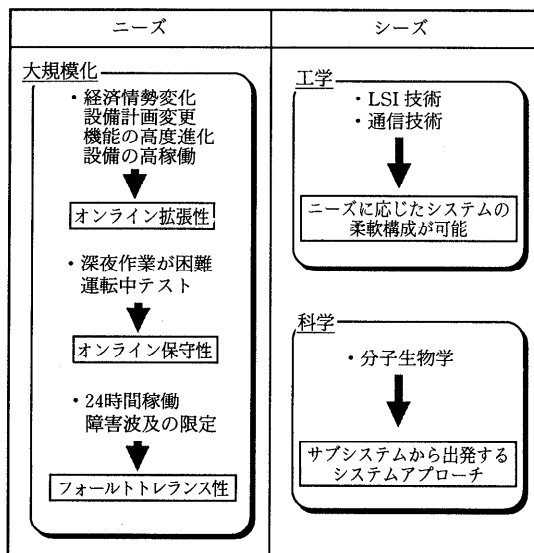


図-1 背景

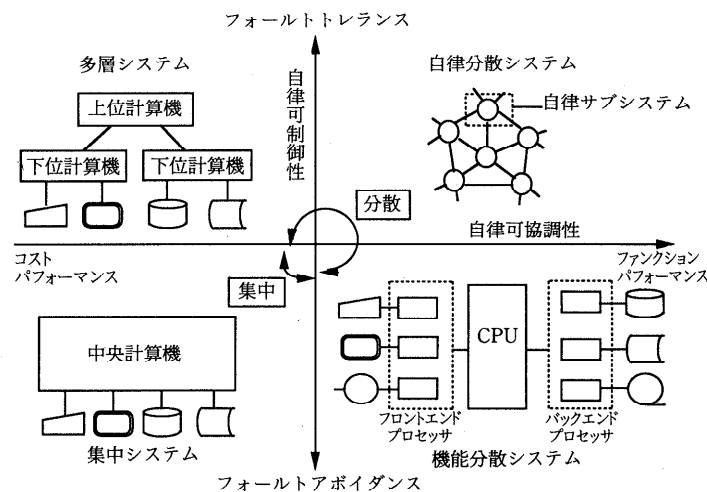


図-2 自律分散システムの位置付け

システムのダウンにも下位サブシステムである程度対応できる。しかし、下位サブシステム間で協調をとれず、結局システムダウンを生じる。機能分散システムでは、サブシステム間で競合が生じないようにシステム全体の機能を分割する。しかし、一部サブシステムの異常により、他サブシステムは情報を得られず、最終的にはシステムダウンを生ずる。一方、自律分散システムは、各サブシステムが均質で、かつ平等で、自律して制御、協調する機能を持つ。

3. 自律分散システムアーキテクチャとその実現

自律分散システム概念に基づいて、いくつかの計算機システムが開発されている。本章ではこれらの例のうちシステムの分散化に基本となるネットワーク、計算機およびこの中に組み込まれるソフトウェアの自律分散化について述べる。

3.1 自律分散システムアーキテクチャ

2.で述べたシステム概念にのっとったシステムアーキテクチャとして、計算機システムを対象にして次の2つの構成要素を持つ構造が定義されている⁹⁾。

(1) アトム

サブシステムは自らを管理し、かつ必要に応じて他のサブシステムと協調する機能を持っている。この自律したサブシステムをアトムと呼ぶ。

(2) データフィールド

どのアトムでも互いにデータを交換できるようにするため、データの内容について統一の理解を得ることができる。各アトムがデータを交換する場をデータフィールドと呼ぶ。

すなわち、自律分散システムは図-3に示すように、自律したサブシステムであるアトムがデータの流れる場であるデータフィールドに接続された構成をとっている。アトムはデータフィールドに流れるデータから、必要な内容のデータを選択して収集し処理を行う。アトムで処理された結果は、データフィールドに送出される。このようにして、すべてのアトムはデータフィールドだけとインタフェース（ユニインタフェース）を持ち、他のアトムと連携する。各アトムは必要なデータが揃えば起動して、各々まったく非同期に並列して処理を実行する。

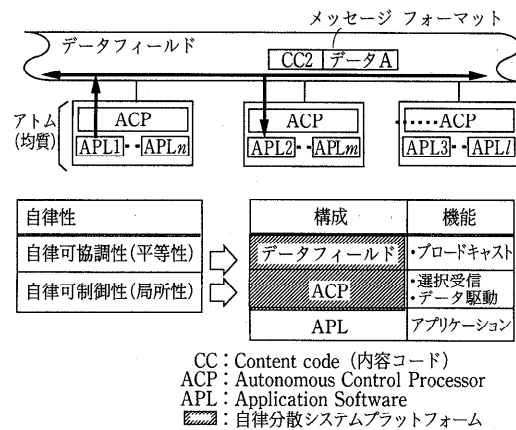


図-3 自律分散システムアーキテクチャ

以上のシステムアーキテクチャを持つ自律分散システムの特徴をまとめると次のとおりである。

(1) 各アトムは、独自の判断でデータフィールドから任意のデータを取り込み、利用することができる。

(2) アトムはデータフィールド上の、どこにいつ接続されても、ただちに機能でき、システム全体の構造や他アトムの状況を知る必要もなく、各々の持つ局所的な情報だけで機能できる。

(3) 各アトムはデータフィールドを介してしか他アトムと連携しないため、各々が独自にデータフィールドから取り込んだデータをチェックすることにより、アトム間の異常波及を容易に阻止できる。

なお、実際の計算機システムではデータフィールドはネットワークに、アトムはこのネットワークに接続する各計算機に相当している。その各々についての実現例を節3.2と節3.3で詳しく述べる。

3.2 ローカルエリアネットワーク (LAN: Local Area Network)

自律分散システムの実用例の中で最初のものが、ループ状伝送システムを自律分散化した自律分散ループ伝送システム (ADL: Autonomous Decentralized Loop Network) である¹⁰⁾。

自律単位 (サブシステム) は、伝送制御装置 (NCP: Node Control Processor) とそこから出る2本の一方方向伝送路と、2つの伝送入力ポートである。1本の伝送路 (ループリンク) をループ方向の隣接 NCP の入力ポートに、あと1本の伝

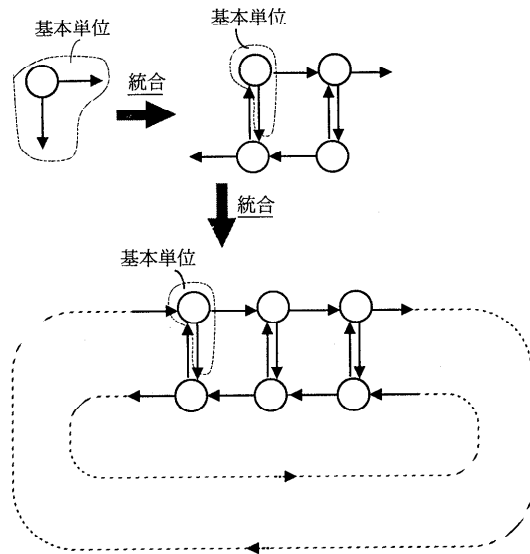


図-4 システムの基本単位とその結合

送路（迂回リンク）を他ループ上で対をなす NCP の入力ポートに接続する。NCP を順次接続することにより、はしご型 2 重ループ伝送システムが構成される（図-4）。ホストコンピュータは各ループ上的一对の NCP にそれぞれ接続される。

このように、まったく均質な伝送サブシステムを単に接続した構造の下で、各伝送サブシステムは、次の基本的な 2 つの機能により、自律性を達成できる。

(1) 選択受信機能（内容コード通信方式）

従来、データを送る際、送信側は、受信側をアドレスにより指定していた。これに対し、自律分散システムは、データはその内容に対応したコード（内容コードと呼ぶ）と共に、伝送路上にブロードキャストされる。各 NCP は、伝送路上に流れるデータのうち、必要な内容コードを持ったデータのみを選択して収集する。

このように、各 NCP は、状況に応じ自らの判断でデータを選別するもので、前もって送受信 NCP 間を取り決めておく必要はない。よって、ネットワーク全体の構造が未定であったり、構造が変化したとしても、NCP の送受信管理に何ら影響なく、オンライン拡張・保守性が達成される。

(2) 自律迂回/回復機能

いつ、いかなる NCP や伝送路の異常にも対応

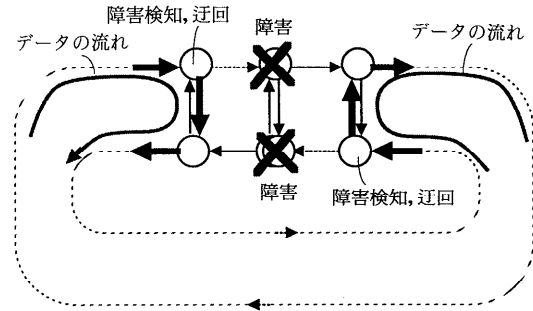


図-5 ADL の障害検知と回復（再構成）

するため、すべての NCP は、自律的に異常を検知し回復処理する機能を持つ。

たとえば、図-5 に示すように一对の NCP が故障しデータがループを一巡できなくなると、各 NCP は独自に隣接 NCP へデータを送るかどうかのチェック（小ループチェック）を行う。このチェックのための信号が戻ってこなければ、各 NCP は、隣接箇所に異常があるとして、迂回路を構成する。その後、異常の回復を検知するため、迂回路を構成中の NCP は小ループチェックを繰り返す。これにより、異常の回復を検知すれば、迂回路を解除する。

このように、各 NCP は、独自の判断に基づき異常の検知/回復処理を行い、他 NCP から何ら指示を受けることはない。また、いかなる NCP も、システム全体の状況を知る必要もない。

このようにネットワーク上のいかなる部分の異常によっても、残りの部分で伝送を続行でき、従来システムに比べ、フォールトトレランス性は向上する。

3.3 ソフトウェア管理

複数のソフトウェアモジュールからなるソフトウェアが、1 つ以上の計算機に分散して配置されているシステムにおけるソフトウェアの自律分散化について説明する¹¹⁾。

従来のソフトウェアシステムは、モジュール全体を OS (Operating System) が集中的に管理していた。複数の計算機にモジュールが分散しているときには、これら計算機間あるいはモジュール間に設置したネットワークや共有メモリを介して各モジュールを連携させていた。しかし、いずれの場合でも、計算機間で親子関係を付けたり、あるいは連携する計算機やモジュールの位置（アド

レス)を意識した管理が必要であった。

これに対し、自律分散ソフト管理方式では、各モジュールの自律性を達成するため図-3に示すような構造と機能を持つ。すなわち、各アトムは自らを管理するための分散OS ACP (Autonomous Control Processor) とアプリケーションソフトウェアモジュールからなり、各モジュールはデータフィールド (DF) とのみ接続される。モジュール内で発生したデータは、その内容に対応した内容コードを付けて DF に流され、また各モジュールは、DF 内を流れてきたデータから、必要な内容のデータを選択し収集する。モジュールにとり必要なすべてのデータが揃えば、処理を実行する。こうした管理はすべて各アトムにて ACP により自律して行われる。

この方式により、いかなるモジュールも、他モジュールを起動することではなく、自律的に処理を実行する。また、各モジュールは、DF を介した宛先を用いない自律的なデータ配信と選択収集の手段により、互いに連携する。なお、DF は、データ伝送ネットワークに対応する。

このように自律分散システムは、システム内のハードウェアだけではなくソフトウェアも含めた、オンライン拡張性保守性ならびにフォールトトレランス性の保証を容易にするシステムアーキテクチャとなっている。以下に示すようにハード/ソフトの部分的な故障はもちろんのこと拡張・保守といった不稼働部が存在してもシステム全体が停止することはない。これらを従来の計算機システムと比較すると次のようなことがいえる。

(1) 耐故障性

ハードウェアのフォールトトレランス性のみを保証している従来の計算機システムでは、耐故障性を実現するために計算機自体の多重化を行い同期させる方式をとっている。したがって、従来方式ではプログラムすべてを多重稼働させなければならなかった。自律分散システムでは、上記で示した機能により計算機やプログラムはそれぞれ自己の都合だけで稼働し、データが多重に発生することに対しては、受信側それぞれでの多重データに対する多数決論理で解決できる方式となっている。したがって重要なプログラムを選択的に多重化することができる。これによりハードウェア故

障だけではなくソフトウェア故障もその波及が食い止められ、故障は局所化できる。さらに、部分的に故障があっても残りのサブシステムが協調して機能を代行しその機能を維持してゆくことを可能としている。

(2) オンライン拡張性

従来システムでは、現状構成の定数テーブルを作りこれに基づき集中管理しているため、システムの部分的な追加や変更時には他の既設部分の変更も必要となっていた。自律分散システムでは、このような全体構成を管理する必要がない。このため、既設部分の変更なしに、しかもプログラムのモジュール単位での追加拡張がシステム稼働中に容易にできるものとなっている。

(3) オンライン保守性

自律分散システムでは、情報が流されているために、特別な計算機やプログラムを必要としないで、かつオンライン稼働中システムに外乱を与えずに、システム状態の診断を行うことができる。また、保守のためのプログラムのテストでは、そのプログラムが必要とするオンラインデータをテスト用に並行して取り組むことができる (パララントテスト)¹²⁾。

自律分散システムのアプリケーションプログラムモジュールはデータフィールドのみとインタフェースしており、各々の機能は入力メッセージと出力メッセージの対でカプセル化されている。モジュール間での直接のリンケージを持たないため、たとえ全体のシステムフローが決まっていなくても、他モジュールを意識せずボトムアップで設計することができる。こうしたことから上記(1)~(3)の特長の他にさらに、ソフトウェアの生産性を向上させることができたとの報告もある¹⁴⁾。

4. 適用例

プロセス制御や CIM あるいは鉄道システムの分野では従来の集中型のシステムに代わって新しいユーザーズに 대응できるシステムの実現が望まれている。自律分散システムは、こうした分野ですでに実用化されている。ここでは、1つの適用例として鉄鋼システムを紹介する^{11),13),14)}。

鉄鋼システムの分野では従来から省力化や省エネルギー化を目指して少品種大量生産方式をとつ

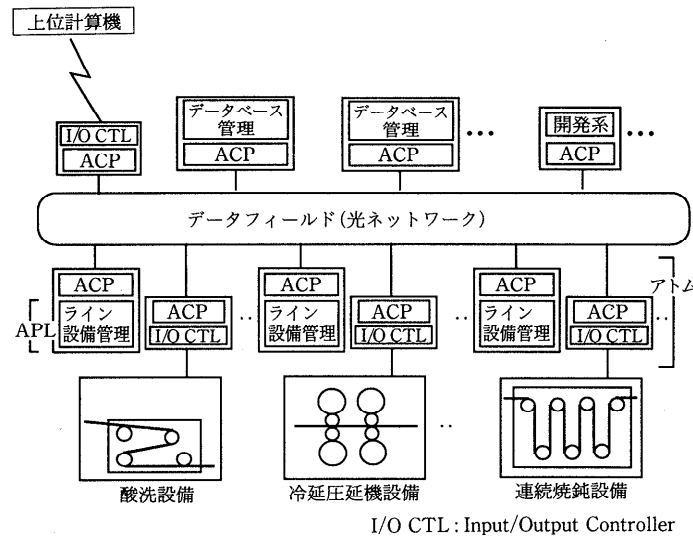


図-6 自律分散鉄鋼情報制御システム構成例

ていた。しかし近年の経済情勢の変化やニーズの多様にもなって、短納期でしかも高品質生産の多品種小量生産方式に転換せざるを得なくなってきた。こうした要求に応えるため、自律分散鉄鋼情報制御システムが開発されている。図-6にシステム構成例を示す。本システムは、情報系と呼ばれる生産管理システムや開発・シミュレーションシステムと、制御系と呼ばれるリアルタイムプロセス制御システムの各サブシステムとから構成されている。各サブシステムは、データフィールドである光ネットワークに接続されている。また、各計算機には自律分散OSであるACPが組み込まれている。設備側との直接のインタフェースはI/O CTL (Input/Output Controller)で行われる。このI/O CTLは、アプリケーションプログラムから直接I/Oに対するコマンドを使用させることなく、すべて内容コードインタフェースでI/OできるようにI/O処理に専念する計算機である。これらプラットフォームの持つ機能によって、設備の追加はもちろんアプリケーションプログラムの追加、改修に対してもシステムを止めることなく対応できる。特にアプリケーションプログラムの追加、改修に際しては、データフィールド上を流れている、実際の制御で使われているデータをそのまま使ったパラランテストが開発系にサポートされている。以上よりハードウェアはもちろんソフトウェアまで含めた拡張や保

守を行うシステムの成長を可能にしている。

5. 最近の研究動向

自律分散システムという言葉は日本で作られ、世界的にも通用するようになった言葉である^{5),15)}。平成2年からは文部省科学研究費・重点領域研究に指定され3年にわたって活動が行われた。そして平成5年3月には第1回の自律分散システム国際シンポジウムISADS 93 (International Symposium on Autonomous Decentralized Systems) が川崎市で開催された。本会議は自律分散システム技術に関する最近の研究の国際化はもちろん対象技術分野の広がりを示す象徴的なシンポジウムとなった。

ISADS 93はIEEE Computer Society, (社)情報処理学会, (社)計測自動制御学会の主催, IFIP, IFACの協賛により開かれたものである。自律分散システムの計算機, ネットワークや制御技術のほか, 生物や経済へのインパクトも報告され学術的な広がりが見された。さらに実アプリケーションへの適用例が多く示されたのも大きな特徴となっている。

計算機, ネットワーク技術関連では, 自律分散の考えにのっとった広域分散ネットワークや分散OS¹⁶⁾, ソフトウェアの高信頼化技術¹⁷⁾, オブジェクト指向アプローチを用いたソフトウェア開発技術¹⁸⁾などが注目すべき報告といえよう。

制御技術関連では、移動ロボットやマニピュレータの自律分散制御、自己組織化の理論的アプローチ、さらには生物運動パターンの生成技法などの幅広いテーマの発表があった。

第1回の成功により、ISADSは2年ごとに米国、欧州、アジアの順に開催されることが決定した。これを受け、平成7年4月には米国アリゾナで、ISADS 95が開催された。その発表内容は、ISADS 93と比較すると、情報分野と広域ネットワーク分野の発表が増大し、制御分野が減少した。また、第1回には見られた自律分散システムの定義、従来技術との相違点などの議論がほとんどなくなり、最終プログラムのパネルでは、以下の議論がなされた。

(1) 自律分散システムの定義とその有効性の共通認識は得られてきた。

(2) すでに、その技術の一部は実用化され、さらに拡大しつつある。

(3) 個々に見ると実現技術は他にも考えられるが、それらのバックグラウンドとなるコンセプトは、自律分散以外には、今のところなく、さらなる自律分散システムの発展が期待される。

次回のISADS 97は、ドイツのベルリンで平成9年春に開催される。自律分散システム概念に基づく技術、応用分野がますます広がってきているため、次回からメインテーマを設定することとなり、ISADS 97では、それをtele-communicationとすることに決定した。

6. おわりに

本稿では、実用化されている技術を中心に自律分散システム概念と概念に基づく計算機システム技法を紹介した。あわせて、最近大きく展開しつつある国内生まれの自律分散システム技術の国際化と対象分野の広がりを示した。

計算機システムを取り巻く環境は近年大きく変化しており、必然としての分散化が進行する中、無停止や段階建設あるいは稼働中の保守など従来にはなかった新たなシステムニーズへの対応が求められている。自律分散システムはこうしたニーズに答えるための新しい概念として注目を集めているものである。その研究範囲は近年になって大きく広がろうとしている。近年ますますその重要度が増しているソフト生産性の問題を例にとつて

も、自律という言葉に込められた考えに1つの大きな可能性が期待できるであろう。逆にいうと自律分散システムの研究はまだ緒に着いたばかりであり、まだまだ解決すべき課題は多いといえよう。

コンピュータソフトウェアの世界では日本は常に欧米に遅れをとるといわれてきた。とくに基本コンセプトではその傾向が顕著だといわれる。本技術がさらに広く国際的に認知されかつ技術的にも深度化されてゆくことを期待したい。

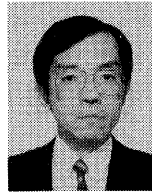
参 考 文 献

- 1) Stankovic, J. A.: A Perspective on Distributed Computer System, IEEE Trans. Computer, Vol. 33, No. 12, pp. 1102-1115 (1984).
- 2) 森 欣司他: 自律分散概念の提案, 電気学会論文集, Vol. 104-C, No. 12, pp. 303-310 (1984).
- 3) 特集: 分散と協調, 計測と制御, Vol. 26, No. 1 (1987).
- 4) 特集: 自律分散システム, 計測と制御, Vol. 29, No. 10 (1990).
- 5) 特集: 自律分散システムの新たなる展開, 計測と制御, Vol. 32, No. 10 (1993).
- 6) 文部省科学研究費重点領域研究「自律分散システム」, Newsletter (1990~1993).
- 7) 西川偉一: 自律と人工, 計測と制御, Vol. 32, No. 10, p. 787 (1993).
- 8) 石井威望: 分子生物学とシステム工学, 電気学会誌, Vol. 102, No. 1, pp. 42-45 (1982).
- 9) Ihara, H. et al.: Autonomous Decentralized Computer Control Systems, IEEE Computer, Vol. 17, No. 8, pp. 57-66 (1984).
- 10) Mori, K. et al.: On-line Maintenance in Autonomous Decentralized Loop Network: ADL, Proc. COMPCON '84, pp. 323-331 (1984).
- 11) Mori, K. et al.: Autonomous Decentralized Software Structure and Its Application, Proc. Fall Joint Computer Conference, pp. 1056-1062 (1986).
- 12) Kawano, K. et al.: Autonomous Decentralized System Test Technique, Proc. COMPSAC '89, pp. 52-57 (1989).
- 13) Yoshinaga, S. et al.: Application of Autonomous Decentralized Process Computer System to Cold Rolling, Proc. of AISE Annual Convention (1991).
- 14) Mashino, Y. et al., An Autonomous Decentralized Process Computer System for Steel Production, Proceedings of ISADS 93, pp. 390-397 (1993).
- 15) 小林重信: 自律分散システムからの新たなる飛翔, 計測と制御, Vol. 32, No. 10, pp. 858-861 (1993).
- 16) Zeletin, R.: Y-Architecture for the Integra-

tion of Autonomous Components, Proceedings of ISADS 93, pp. 21-27 (1993).

- 17) Kim, H. K. : Structuring DRB Computing Stations in Highly Decentralized LAN Systems, Proceedings of ISADS 93, pp. 305-314 (1993).
- 18) Yau, S. S. : An Object-Oriented Approach to Software Development for Autonomous Decentralized Systems, Proceedings of ISADS 93, pp. 37-43 (1993).

(平成6年8月29日受付)



河野 克己 (正会員)

1954年生. 1978年早稲田大学
理工学部電気工学科卒業, 1980年
同大学院修士課程修了. 1980年
(株)日立製作所入社. 現在, 同社

システム開発研究所に勤務. 入社以来, 鉄鋼, 鉄道, FA
分野の大規模情報制御システムを対象に一貫して自
律分散システムの研究開発に従事. ニーズ分析からシ
ステムコンセプト作りと, さらに, そのシステムアー
キテクチャ, 基本ソフトウェアの研究開発を手掛けて
きた. IEEE Computer Society, 計測自動制御学会各
会員.

