

自律分散情報制御システム

○高橋 由泰 (日立) 加藤 博光 (日立) 入江 直彦 (日立)

Autonomous Decentralized Information and Control Systems

* Y. Takahashi (Hitachi), H. Kato (Hitachi), N. Irie (Hitachi)

Abstract— As people's needs and the business environment are constantly changing, the systems that support society must also continue to change to keep up with the world's trends. Autonomous decentralized information and control systems are a system concept that originated from the model of living organisms. It has been applied to many social infrastructure systems such as railways and steel, which require non-stop operation, flexibility, and maintainability, and supports sustainable system growth by realizing non-stop modification and gradual expansion.

Index terms— ADS, Autonomous decentralized information and control systems, SoS, System of Systems

1. 推薦対象および推薦理由の概要

本稿では「自律分散情報制御システム」をコトつくり至宝に相応しい対象として推薦し、その理由について考察する。

自律分散システムの定義はいくつか存在するが、分かりやすい定義としては「システムを構成する各要素（サブシステム、個）が、個々に自律性を保ちつつ行動しながらお互いに協調し、システム全体として秩序を生成するシステムのこと」が挙げられる¹⁾。すなわち、自律分散システムは1980年代にあって、初めから System of Systems として定義されたシステムと言え、System of Systems の先駆けと言える。特にIEEEの国際会議 IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS) は自律分散情報制御システムの研究者らによって立ち上げられて以来、継続的に開催され、次回ISADS2023²⁾は15回目の開催となる。これらにより、世界で研究がなされる日本発のシステムアーキテクチャとなり、学問としてのシステムエンジニアリング研究の発展に大きく寄与している。

実用面でも鉄道運行管理システムや鉄鋼製造管理システム等、世界中の様々な社会・産業分野で多数の適用実績があり³⁾、そのネットワークはISOやIECの国際標準となっている⁴⁾など、世界の大規模情報制御システムにおける代表的なアーキテクチャの一つとして、活用されている。

また、その発展形は今でも研究・開発され続けており⁵⁾、今後Society5.0を迎える上で、ますます大規模化、複雑化する社会システムの基盤情報システムアーキテクチャとしても期待できる。

このように、自律分散情報制御システムは情報システムアーキテクチャの研究や、System of Systems の発展、その実用に対し、国内外にて大きく寄与しており、コトつくりの至宝として十分な価値を持つと考えられる。

2. 推薦対象の定義及び構成要素

本稿における自律分散情報制御システムとは「大規模情報制御システムにおいて、フォールトトレランス性、段階的拡張性、稼働中の保守性の3つの性質の確保を目的にまとめられた自律分散コンセプトと、当該コンセプトに基づくシステムアーキテクチャとして定義された自律分散情報制御システムアーキテクチャ、

およびそのアーキテクチャに従って具体的に実装された個別の具体システム群、によって達成された、分散情報制御システムの変化」を指している。また、各手段は当該コトつくりにおいて以下に示す役割を果たしたものと考えられる。

A) 自律分散コンセプト

自律分散コンセプトは、生物を範として生まれたシステムコンセプトである³⁾⁸⁾⁹⁾。自律分散システムは1977年より開発が始まり、以来、鉄道¹⁰⁾や鉄鋼¹¹⁾などの一般産業向け情報制御システムに適用されてきている。

適用先の情報制御システムにおいて、開発当時、信頼性、計画的拡張性、定期的保守性の改善が大きなニーズとなっていた。しかし、システムの規模が拡大するに伴い、システム全体をリプレースして拡張したり、部分的に修正・追加するたびにシステムを停止することが許されなくなってきていた。すなわち、ニーズとして、システムのフォールトトレランス性、段階的拡張性、稼働中の保守性が大きくなりつつあった。これらはトータルシステムの分割されたものとしてサブシステムを考える従来の大規模システムでは、サブシステムの部分的な停止を許容できないため、解決が難しい課題と考えられた。⁹⁾

この課題の解決法として、自律分散システムコンセプトが考えられているが、その検討においては、まずこれら課題を解決していると考えられた生体を検討しなおしている。⁹⁾

生体は活動しつつ成長できる。生体は器官レベルでは異なるものの、細胞単位で見ると均質な細胞からなっている。特に成長という観点からは、脳がすべてを管理するというのではなく、すべて均質な細胞から様々な器官へ成長できるようになっている。これは複雑なシステムでも均質なサブシステムだけで構成できることの示唆を与えている。

また、生体は免疫システムによって生体に障害を引き起こすような細菌を排除するような仕組みを持っている。これも脳が生体全体の状況を大局的情報として収集し、障害の検知と回復を行っているのではなく、個々の細胞が局所的情報によって相手が細菌であるか、自分と同じ生体の細胞であるかの判断をしている。すなわち、変化し続けるシステムにあっては、情報の局所性が基本にあるという示唆を与えている。

また、生物は進化する。その進化は新しい遺伝子を

持つ細胞が生まれることで生じるが、新しい遺伝子を持つ細胞が生まれる時点では、その優劣が別の特別な細胞によって判断されているのではない。すなわち、次々に新たなシステムを融合させるには、機能における平等性があるという示唆を与えている。

上記のような均質、局所、平等という細胞の条件、および異常が正常という生体全体の性質を、システムの世界に取り込んだのが、自律分散システムのコンセプトと言える⁹⁾。自律分散システムでは、以下の前提がある。

- サブシステムの統合がシステムである。
- システムには機能不稼働なものを含む。

自律分散コンセプトは、当該コトづくりにおいて、次に説明する自律分散情報制御システムアーキテクチャを導出する指針としての役割を果たしている。この役割は、従来の大規模システムでは実現できなかった、フォールトトレランス性、段階的拡張性、稼働中の保守性を実現するために必要となるシステムの性質を明確化したことにより、果たせるようになった。

B) 自律分散情報制御システムアーキテクチャ

自律分散システムのアーキテクチャは、自律分散コンセプトに基づいて導出されている。まず、自律分散システムは、数学的には以下の性質から定義されている¹²⁾。

- 自律可制御性
他のサブシステムの機能不稼働にもかかわらず、生存しているサブシステムは自らを制御できる。
- 自律可協調性
他のサブシステムの機能不稼働にもかかわらず、生存しているサブシステムは互いに協調できる。

上記、数学的定義に基づき、データフィールドを通信路として用いる分散情報制御システムというアーキテクチャが提案された。

このアーキテクチャにおいては、すべてのサブシステムは、データフィールドとのみに接続された均質な構造となっている。データはデータフィールド上にメッセージとして流される。そして当該メッセージはブロードキャストされて全てのサブシステムが平等に見ることができ、受信側が受信を選択するようにしている。受信側が適切なメッセージを選択受信可能とするため、メッセージは内容コードを与え、受信側とメッセージと言う局所情報のみで選択受信可能としている。

まとめると、自律分散システムアーキテクチャにおける、機能と構成要素のマッピングはTable 1のようになる。

Table 1: ADS Functions.

機能	構成要素	観点
通信路	データフィールド	均質
通信形態	ブロードキャスト	平等
メッセージ内容	内容コード	局所

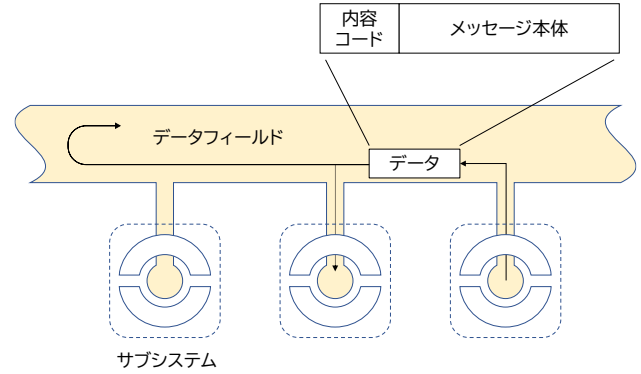


Fig. 1: ADS Data Field. (Modified from original¹²⁾)

この自律分散情報制御システムアーキテクチャは、当該コトづくりにおいては、個別の具体システムを設計する際のリファレンスアーキテクチャとしての役割を果たしている。

自律分散システムアーキテクチャの特徴を挙げると以下のとおりである。

まず、新たなサブシステムをデータフィールドに接続しようとしたとき、均質性からその接続可能性が保証されている。また平等性により、他のサブシステムが新たなサブシステムを認識しなくても、通信内容に触れることができる。また局所性により、自分に必要な通信かどうかを新たなサブシステムが把握することができる。

これにより、フォールトトレランス性は、サブシステムをバックアップするようなサブシステムを随時追加することにより達成できる。すなわち、重要度に応じてサブシステムの多重化が容易なアーキテクチャとなっている。

また、段階的拡張性も、新たなサブシステムを随時追加することにより達成できる。新たなサブシステムが新たなメッセージをデータフィールドに送信したとしても、既存サブシステムは単純に自分に無関係なメッセージと判断すれば受信しない。そのため、新たなサブシステムは随時接続可能となっている。

さらに稼働中の保守性も、稼働中のサブシステムのメッセージを観測することは容易であり、データフィールドを流れるデータを選択して読み取ればよいことにより達成されている。各サブシステムが定期的にデータフィールドにメッセージを流すようにしておけば、Keep aliveによる各サブシステムの状態監視機能が実現できる。また何らかのテストを実施する場合には、テストであることを内容コードに記載しておけば、オンラインテストに対応可能なサブシステムについては、オンラインテストが可能となる。当該オンラインテストは、メッセージに関わらないサブシステムは単純に受信しないだけであり、影響を及ぼさない。

このように、サブシステムにおいて柔軟性が大きく保たれるシステムアーキテクチャとなっている。

さらに、自律分散システムアーキテクチャでは、サーバ（マスタ）への負荷集中を解消でき、マルチキャスト通信によってネットワーク負荷を低減できる¹³⁾。これにより、高性能化にも寄与することとなった。

また、当初の自律分散情報制御システムアーキテクチャは、空間的にサブシステムを分割し、ゲートウェイで接続する機能や、履歴データをデータフィールドに保持し、時間的な連続性を保持する機能などが追加されることにより、適用可能な範囲・規模が拡大することとなった。

C) 個別の自律分散情報制御システム

個別の自律分散情報制御システムの例は多い。文献¹³⁾によれば、2000年当時で例えば以下の産業応用がある。

- ▶ 新幹線の列車制御
- ▶ 首都圏の鉄道制御
- ▶ 自動車生産システム
- ▶ タイヤ生産システム
- ▶ ビール生産システム
- ▶ 新聞製作システム

これらはフォールトトレランス性、段階的拡張性、稼働中の保守性を実現したシステムである。具体例の一つとして、首都圏の鉄道制御について述べる。

首都圏の鉄道制御に向け、省力化した要員体制で超高密度鉄道の安定した輸送を確保して、サービス改善と保安度向上を可能にする「東京圏輸送管理システム（ATOS）」が開発されている。これは形態が複雑な超高密度鉄道の列車群を指令員だけで自在に操れるように全自動制御するものであるが、その開発事項の一つに段階構築可能な自律分散技術が挙げられている¹⁴⁾。

東京圏輸送管理システムは、当時中央線だけでも最大級の鉄道制御システムだったが、東京全域への構築は列車運転を続けながら長期間にわたるため、段階構築に必要な機能を付加した自律分散技術を開発している¹⁴⁾。東京圏輸送管理システムにおいては、駅ごとに分散設置した新型電子連動装置が自律的に動作しながら、中央コンピュータも一構成要素として全体統括を分担し、トータルで一つのシステムとして稼働できる。これを実現するためにデータフィールドを機能コードが付加されたメッセージが流れるアーキテクチャとなっている。

なお東京圏輸送管理システムは、優れた研究成果として、日本学術振興会によって卓越研究データベースに登録されている¹⁵⁾。

3. 当該コトづくりの背景

自律分散情報制御システムが開発される以前は、第2章でも述べたように、中央集中型システムが使われていた。

適用先の情報制御システムにおいて、開発当時、信

頼性、計画的拡張性、定期的保守性の改善のための技術開発が推進されていた。しかし、システムの規模が拡大するに伴い、システム全体をリプレースして拡張したり、部分的に修正・追加するたびにシステムを停止することが許されなくなってきた。すなわち、達成すべき課題はシステムのフォールトトレランス性、段階的拡張性、稼働中の保守性にあった。これらはトータルシステムの分割されたものとしてサブシステムを考える従来の大規模システムでは、サブシステムの部分的な停止を許容できないため、解決が難しい課題と考えられていた。

4. 達成された内容および生じた状態変化

当該コトづくりによって大規模情報分散システムを実現できるようになり、大規模な鉄道のスムーズ・フォールトトレランス性な運行、自動車やタイヤ、ビール、新聞といった大量かつ高速な生産物の監視・制御システムを実現することができるようになった。

その結果、例えば首都圏において高密度な鉄道運行を省力化して実現することができるようになるなど、社会においてより便利なサービスを楽しむことができる、というコトが実現された。

5. 主たる貢献者

当該コトづくりでは、自律分散システムアーキテクチャの開発初期から、システムアーキテクチャや応用システムを数多く開発してきた(株)日立製作所が主たる貢献者であると推測する。

6. 価値の観点による考察

自律分散システムの価値は以下のように大きいものと考えている。

- 先導力
システムコンセプトとしてまとめ、それを数学的に定義した点で、のちに続くモノづくりの指針となり、多くのモノを製作できた。それにより、より便利なサービスを楽しむことができるというコトを数多く作れた。

また、新たな知的活動を誘発する先導力を持ち、国際会議の立ち上げ等、システムエンジニアリングの分野の学問の進展に貢献した。

以上のように新たな知的活動を数多く誘発し、先導性を持ち得ていたと考えられる。

- 規範力
自律分散コンセプト、およびそのシステムアーキテクチャによって、業種の枠を超えて様々な情報制御システムで長年使われるという規範力を持っていたと考えられる。

特に ADS-net が国際標準になり、数多くの実シ

システムにおいて使われたという点も、規範力を十分に持ち合わせていた点と考えている。

- 意味力

System of Systems の先駆けと言え、ISADS の開催によって新たな学問分野を切り開き、国内外含め多くの人々が参加する意味力を持ち合わせていたと考えている。

- 解決力

従来手法では実現できなかった大規模な情報制御システムを実現し、鉄道運行管理など実社会において社会課題を解決してきた。その影響力は大きいものと考えている。

7. まとめ

以上述べたように、自律分散情報制御システムは情報システムアーキテクチャの研究や、System of Systems の発展、その実用に対し、国内外にて大きく寄与しており、先導力、規範力、意味力、解決力を高いレベルで合わせ持つものと考えられる。コトづくりの至宝として十分な価値を持つものと考え、推薦する。

参考文献

- 1) 伊藤正美, 自律分散システムはいかにして構成されるか, 計測と制御, **29**, 10, 877/881 (1990).
- 2) IEEE 15th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, <https://www.isads2023.org/> (2022/11/3 閲覧).
- 3) 加藤博光, 自律分散システムのご紹介, 経済産業省 産業構造審議会 商務流通情報分科会 情報経済小委員会 第3回分散戦略ワーキンググループ資料4 (2016).
- 4) Industrial automation systems and integration – Open systems application integration framework – Part 4: Reference description for Ethernet-based control systems, ISO 15745-4:2003.
- 5) Industrial communication networks. Fieldbus specifications, IEC/PAS 62953:2015
- 6) 飯島光一郎, 福本恭, 志村明俊, 加藤博光, 平澤茂樹, 社会インフラを支えるシステム技術, 日立評論, **93**, 12, 832/837 (2011).
- 7) 小川雅昭, 野水拓馬, 清水勝人, 小林伊織, 飯島光一郎, 川上真澄, 次世代自律分散アーキテクチャとDXを支える制御エッジコンピュータ, 日立評論, **103**, 3, 340/345 (2021).
- 8) 自律分散システムアーキテクチャ, https://www.hitachi.co.jp/products/it/control_sys/platform/autonomy_dispersion/index.html (2022/10/22 閲覧).
- 9) 森欣司, 研究開発の変遷, 電学誌, **121**, 2, 100/104
- 10) 井原廣一, 松丸宏, 大島弘安, 刈谷志津郎, 堀孝正, 自律分散制御の交通システムへの応用, 日立評論, **63**, 11, 779/784 (1981).
- 11) 森淳, 鳥越英俊, 中井耕三, 森欣司, 増田崇雄, 鉄鋼計算機制御システムにおける自律分散情報制御システムの適用, 日立評論, **70**, 5, 521/526 (1988).
- 12) 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一, 自律分散概念の提案, 電学論C, **104**, 12, 303/310 (1984).
- 13) 新誠一, ADS-net と国際標準化活動, 計測と制御, **39**, 3, 209/215 (2000).
- 14) 北原文夫, 岩本孝雄, 伊藤聡, 藤原和紀, 藤原道雄, 超高密度鉄道の列車群を自律分散制御する東京圏輸送管理システムの開発, 電学論D, **118**, 4, 534/541 (1998)
- 15) 超高密度鉄道の列車群を自律分散制御する東京圏輸送管理システム(ATOS)の開発, 発見と発明のデジタル博物館, 534
- 16) 湯浅秀男, 伊藤正美, 自律分散情報制御システムの構造理論, 計測自動制御学会論文集, **25**, 12, 1355/1362 (1989).
- 17) 伊藤正美, 自律分散情報制御システム研究の課題と将来, 計測と制御, **32**, 10, 789/796 (1993).
- 18) Motohisa Funabashi, Katsumi Kawano, Shigetoshi Sameshima, Hiromitsu Kato, Evolution of Autonomous Decentralized Systems for Information and Control, SICE J. of Control, Measurement and System Integration, **1**, 3, 184/191 (2008).
- 19) 新誠一, 放送型FA制御ネットワーク, バーコード, **11**, 7 (1998).
- 20) 世界に広がる自律分散システム, LANDFALL, **48**, 1/5.