

機械産業のグローバル戦略
—DX 指向の自動化システム関連国際規格の進展—
Global Strategy for the Machinery Industry
-Promoting Digital Transformation through Compliance with International
Standards Related to Automation Systems-

機械振興協会経済研究所首席研究員
金子実 (Minoru Kaneko)

〈概要〉

1. 企業の DX（デジタルトランスフォーメーション）に際して、自動化システム（コントローラ、センサ等）と企業のコンピュータ・システムとの間で情報をやりとりするためには、通信プロトコルや情報フォーマット・情報モデルの変換が必要である。そのことに関連する様々な国際規格が作られており、両者の間の情報のやりとりの円滑化に寄与しているが、本稿では、近年策定されたそのような国際規格の中で、製造業企業内におけるセンサ等のフィールドデバイスのデジタル通信の複線化の可能性を広げ、製造業企業の DX のネットワークインフラとしての重要性の高い、IO-Link と Ethernet-APL（Advanced Physical Layer）を取り上げる。そして、それら 2 つの国際規格の策定、普及に多くの企業が参加している欧州においてインタビュー等の調査を行うことにより、それらの国際規格の活用の方後の方向性を明らかにするとともに、それら国際規格に関連して日本の機械産業が今後のグローバル戦略を考える上で考慮すべき事項を提示する。
2. IO-Link は、主として FA（ファクトリーオートメーション）で使われることを想定して、センサ等のフィールドデバイスがコントローラとの間でデジタル通信を行うことを可能にする規格として作られた。その後、コントローラを経由せずにインターネット等の IT（インフォメーションテクノロジー）との間でも直接情報をやりとりする可能性が規格に明示され、センサ等のフィールドデバイスの

デジタル通信の複線化の可能性を広げる規格であることが明確化された。欧州における調査の結果、センサ等のフィールドデバイスのベンダーにより、デジタル通信の複線化を進める様々な独自インターフェースが提供されるようになっており、そのことが直近の IO-Link の安定的な普及をけん引していることが明らかになった。IO-Link でよく使われるセンサを含む HS コード 8536.50 の輸出入額の近年の推移をみると、日本の収支額が減少傾向となっている一方、ドイツの収支額は、中国の収支額が急速に拡大している状況において、ほぼ横ばいで推移している。

3. Ethernet-APL は、主として PA（プロセスオートメーション）で使われることを想定して、センサ等のフィールドデバイスのデジタル通信に Ethernet を使うことを可能にする規格として作られた。Ethernet が使われることにより、通信速度が格段にあがるとともに、IT との間のネットワークにおいてリンク層の通信方式の変換が必要なくなることから、PA のセンサ等のフィールドデバイスのデジタル通信を複線化し、コントローラとの間に加え、企業のコンピュータ・システムとの間の常時接続も進める規格となることが期待されている。PA で Ethernet-APL を使うためには、リンク層の通信方式に Ethernet を使う産業用ネットワークの通信プロトコルを使う必要があるが、欧州における調査の結果、Ethernet-APL 準拠のデバイス等は、欧州発の産業用ネットワークの規格である PROFINET への適合性を認証されたものが先行して提供され始めていることが明らかとなった。また、デバイスデータへのアクセス技術については、Ethernet-APL の普及が、EDDL(Electronic Device Description Language)と FDT (Field Device Tool) 技術の FDI (Field Device Integration) 技術への統合を後押しする可能性があることが明らかになった。PA を IT システムにつなぐインターフェースについては、Ethernet-APL 準拠のデバイスについては PA の情報が FDI パッケージにより PA-DIM (Process Automation Device Information Model) フォーマットに変換され始めており、PA と IT システムとの間に OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) を活用したオープンなインターフェースを導入するという NOA (NAMUR Open Architecture) Concept を、Ethernet-APL の普及が後押しする方向性となっていることが明らかになった。
4. 本稿の作成を通じて、欧州に本社を置く企業と日本に本社を置く企業との間で、これら 2 つの国際規格へのアプローチに、日本の機械産業が今後のグローバ

ル戦略を考える上で考慮すべき2つの違いがあることが明らかになった。1点目は、日本では、国際規格が策定されることにより標準化が完了したと考えられる傾向があるのに対し、欧州では、これら2つの国際規格が策定されることが、独自インターフェースの開発のベースとなったり、規格についての別の検討の必要性を生じさせたりしていることである。日本の機械産業は、これら2つの国際規格が策定されることにより、様々な独自インターフェースについて検討したり、従来馴染みの薄かった産業用ネットワーク等の規格への対応を検討したりすることが必要となる可能性がある。2点目は、2つの国際規格の開発や関連システムの開発へのセンサ等のフィールドデバイスのベンダーの取り組みの程度の違いである。欧州のセンサ等のフィールドデバイスのベンダーは、国際規格の開発や関連システムの開発において、コントローラ等のベンダーと対等に競争したり協調したりしている。日本のセンサ等のフィールドデバイスのベンダーも、コントローラ等のベンダーに比べて規模が小さいからといって国際規格の開発や関連システムの開発をコントローラ等のベンダーに委ねるのではなく、コントローラ等のベンダーとの間で、欧州のセンサ等のフィールドデバイスのベンダーが構築しているような関係を作る可能性を模索すべきである。

機械産業のグローバル戦略
—DX 指向の自動化システム関連国際規格の進展—

I. 序論

経済産業省が 2020 年 11 月 9 日に策定した「デジタルガバナンス・コード 2.0」は、DX を「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること。」と定義している（経済産業省, 2020）。この定義にも見られる通り、DX は、「データとデジタル技術を活用」することにより、「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し」、「競争上の優位性を確立する」ものである。

他方、自動化は、産業革命以降機械の活用により進展したが、第二次世界大戦以降は、デジタル技術を活用した自動化が進展している。そのような中で、1970 年代からは、リレーを使った電気回路による自動化システム（図 1 参照）を、マイクロプロセッサを使った自動化システムに置き換える PLC（Programmable Logic Controller）が普及するなど、デジタル技術を使ってデジタルデータを扱うコントローラ（制御機器）が、自動化システムに使われるようになっている（松隈, 2013; JEMIMA, n.d.; Ken, 2008）。

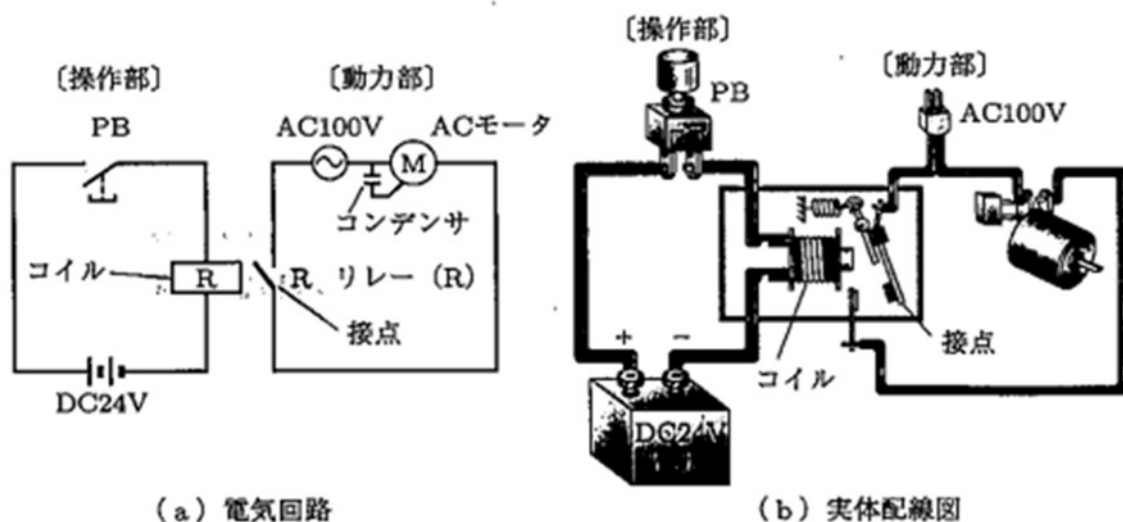


図 1：リレーを使った電気回路

出所)「シーケンス制御を活用したシステムづくり入門」(日野 *et al.*, 2006)。

また、自動化システムに使われるセンサ等についても、マイコンを搭載することにより、デジタル技術を使ってデジタルデータを扱うものが増えている（横河電機, 2010）。

DX におけるデジタル技術においては、企業が情報を効率的に処理し、効果的に活用するための IT が中心的な役割を果たしている。そして、自動化システムで使われるコントローラやセンサ等は、そのような企業の IT と、デジタル通信でデータをやりとりする可能性がある。デジタルトランスフォーメーションという言葉が初めて使われたのは 2004 年のことと言われているが（Stolterman *et al.*, 2004）、それ以前から、自動化システムを企業の IT と連携させるための様々な努力が続けられてきた。

しかし、そのような努力が実を結ぶためには、様々な課題が克服されなければならない、その 1 つに、自動化システムにおけるデータのやりとりと、企業の IT で使われるコンピュータ間のデータのやりとりとの間のタイムフレームの違いがある。自動化システムを企業の IT のコンピュータとつなぐための試みの一つに 1980 年代から推進された CIM

（Computer-Integrated Manufacturing：コンピュータ統合生産）という考え方があり（元吉, 2024; 元吉, 2025）、今日においても使われている生産制御機能とビジネス機能の統合に関する国際規格である ISA（International Society of Automation：国際自動制御学会）- 95（IEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）62264）は、1990 年代に米国のパデュー大学で開発された CIM についての参照モデルに依拠している（ISA, n.d.）。そして、ISA-95（IEC62264）は、企業内の生産制御機能とビジネス機能との間の情報交換をモデル化するため、製造業企業のアクティビティを 5 層の階層に分けている（図 2 参照）。

この階層モデルの中で、自動化システムは主としてレベル 0～2 に位置づけられ、企業の IT で使われるコンピュータは主としてレベル 3～4 に位置づけられる。従って、製造業企業の中で自動化システムと IT で使われるコンピュータとの間のデータのやりとりが行われ、製造業企業の DX に寄与するためには、レベル 0～2 とレベル 3～4 との間のデータのやりとりが行われる必要がある。しかし、両者のアクティビティの間のタイムフレームには、大きな違いがある。

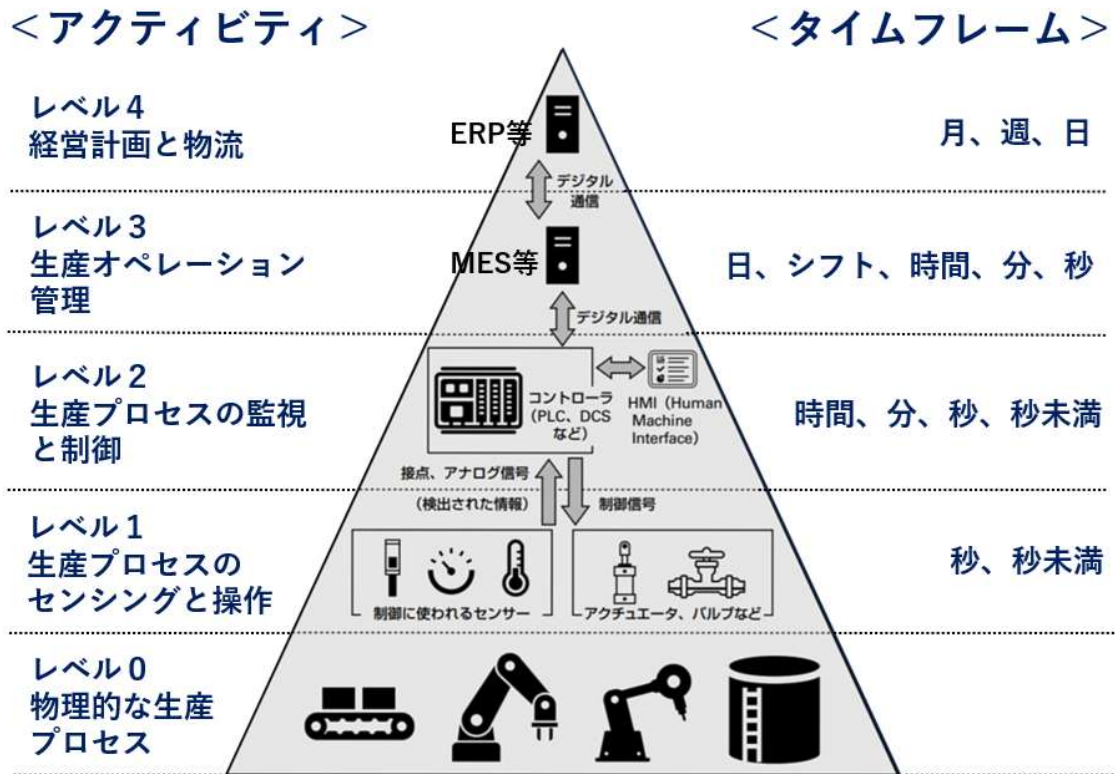


図2：ISA-95（IEC62264）における製造業企業の5層の階層モデルの概念図
出所）IEC, 2013 を基に筆者作成。

レベル0～2における自動化システムのためのデータのやりとりにおいては、秒または秒未満のタイムフレームで、しかも定められた時間内に確実に処理が完了するリアルタイム性が求められることが一般的である。このことから、情報が確実に宛先に届くことが、定められた時間内に情報が届くことより優先される TCP (Transmission Control Protocol) (Postel, 1981; Eddy, 2022) をベースにした通信プロトコルは、使われないことが一般的である。また、秒未満の短い周期で信号を確実に処理できることが優先され、情報フォーマットや情報モデルなどの情報の保有の仕方の整合性には、あまり重きが置かれていないことが一般的である。

これに対して、レベル3～4における IT で使われるコンピュータの間のデータのやりとりにおいては、タイムフレームが自動化システムにおける程短くなく、また定められた時間内に確実に処理が完了することは必ずしも求められないことが一般的である。このことから、情報が確実に宛先に届くことが、定められた時間内に情報が届くことより優先される TCP をベースにした通信プロトコルが、広く使われている。また、情報を、人や機械

が様々な用途のために扱いやすい形でやりとりできることが重要であり、情報フォーマットや情報モデルなどの情報の保有ややりとりの仕方の整合性が、様々な形で図られている場合が多い。

これらのことから、自動化システムと IT で使われるコンピュータとの間のデータのやりとりを円滑化するためには、通信プロトコルや情報フォーマット・情報モデルの変換が必要となる。そのような変換が行われないと、自動化システムのデータは IT で使われるコンピュータでは活用されにくく、自動化システムのデータを活用するためのソフトウェアの蓄積や、それらを活用した製造業企業の DX は進みにくくなる。

自動化システムと IT との間の通信プロトコルや情報フォーマット・情報モデルの変換に関連しては、様々な国際規格が作られており、両者の間のデータのやりとりの円滑化に寄与している。本稿では、近年策定されたそのような国際規格の中で、製造業企業内におけるセンサ等のフィールドデバイスのデジタル通信の複線化の可能性を広げ、製造業企業の DX のネットワークインフラとしての重要性の高い、IO-Link と Ethernet-APL をとりあげる。そして、それら 2 つの国際規格の策定、普及に多くの企業が参加している欧州においてインタビュー等の調査を行うことにより（金子, 2025b; 金子, 2025c; 金子, 2025d）、それらの国際規格の活用の今後の方向性を明らかにするとともに、それらの国際規格に関連して日本の機械産業が今後のグローバル戦略を考える上で考慮すべき事項を提示することを目的とする。

IO-Link については、規格が開発された当初は、センサやアクチュエータ等とコントローラとの間のデジタル通信を可能にすることを想定した規格として作られた。その後、センサやアクチュエータ等がコントローラを経由せずにインターネット等の IT との間でも直接情報をやりとりする可能性が規格に明示され、それを可能にする IO-Link マスタと呼ばれるデバイスが提供され始めた。しかしながら、筆者が視察させて頂いた日本の工場では、そのようなデバイスが使われている工場でも、コントローラとの間のデジタル通信しか行われておらず、インターネット等の IT との間の直接の情報のやりとりが実際にどのように行われるのかについての情報は得られなかった（金子, 2024a）。

Ethernet-APL については、2024 年に、ドイツの自動化関連の業界誌の atp magazin が NAMUR（プロセス産業におけるオートメーション技術のユーザー団体）及び ZVEI（ドイツ電機・電子工業連盟）とともに Ethernet-APL に準拠したデバイス等の提供状況についての調査（Tauchnitz, 2024）を行っており、それによると、欧州に本社を置くベンダーのセンサ等のフィールドデバイスは既に多数提供されているが、日本に本社を置くベンダ

一のセンサ等のフィールドデバイスはその時点では提供されていないとのことであった。そのような状況を反映してか、Ethernet-APL が実際にどのように普及するかの今後の方向性については、日本ではあまり情報を得られなかった。また、NAMUR から、Ethernet によりデバイスデータにアクセスする技術としては FDI 技術が使われることが望ましいとの提言が出されているが、日本では、Ethernet-APL とデバイスデータへのアクセス技術との関係についても、あまり情報を得られなかった。

本稿の構成は、以下の通りである。II.1.では、IO-Link の製造業企業の DX への寄与の可能性について解説する。II.2.では、IO-Link のこれまでの普及の歴史を振り返る。II.3.では、センサやアクチュエータ等とインターネットなどとの間のコントローラを経由しない直接の情報のやりとりが実際にどのように行われるのかについて、欧州におけるインタビュー等の調査の結果も使って報告する。II.4.では、II.3 で見た IO-Link の新たな活用方法を含む関連システムの開発の担い手についての情報を整理する。II.5.では、II.4 で見た IO-Link の関連システムの開発におけるセンサ等のベンダーの寄与を念頭に置いて、関連するセンサの輸出入についてのデータを整理する。III.1.では、Ethernet-APL の製造業企業の DX への寄与の可能性について解説する。III.2.では、Ethernet-APL が活用される場合の産業用ネットワークの通信プロトコルについて、欧州における調査結果も使って報告する。III.3.では、Ethernet-APL が活用される場合のデバイスデータへのアクセス技術について、欧州におけるインタビュー等の調査の結果も使って報告する。III.4.では、Ethernet-APL が活用される場合の PA と IT システムとの間のインターフェースについて、欧州におけるインタビュー等の調査の結果も使って報告する。III.5.では、Ethernet-APL を推進する担い手についての情報を整理する。IV.では、IO-Link と Ethernet-APL の今後の活用の方向性を総括した上で、欧州企業と日本企業との間のこれら 2 つの国際規格へのアプローチの違いを、日本の機械産業が考慮すべき事項として報告する。

II. IO-Link

1. IO-Link によるデジタル通信が製造業企業の DX に寄与する可能性

個別単位で数えられる製品の生産のための自動化システムは一般に FA と呼ばれるが、FA においては、センサ等により検知された情報をもとに PLC などのコントローラに信号が送られ、それを基にコントローラからアクチュエータ等に信号が送られて機器等が作動するシステムが広く使われている。そのようなシステムの場合、コントローラにデジタル技術が使われていても、たくさんのセンサやアクチュエータ等にデジタル通信機能を持た

せるのには少なからずコストがかかることから、センサやアクチュエータ等には電圧や電流の信号により情報をやりとりさせ、コントローラにおいて、またはコントローラとセンサやアクチュエータ等との間にリモート IO と呼ばれるデバイスにおいて、電圧や電流による信号とデジタル信号との間の変換が行われることが多い。

ただ、電圧や電流による信号のやりとりは、一種類の信号を一方向に送ることしかできず、マイコンが搭載されたセンサやアクチュエータ等の持つ多くの情報や機能の活用には使いにくい。IO-Link と呼ばれる国際規格では、センサやアクチュエータ等とコントローラとの間に IO-Link マスタと呼ばれるデバイスを置き、比較的 low コストでセンサやアクチュエータ等にデジタル通信機能を持たせることにより、このような課題に対応している（図 3 参照）。

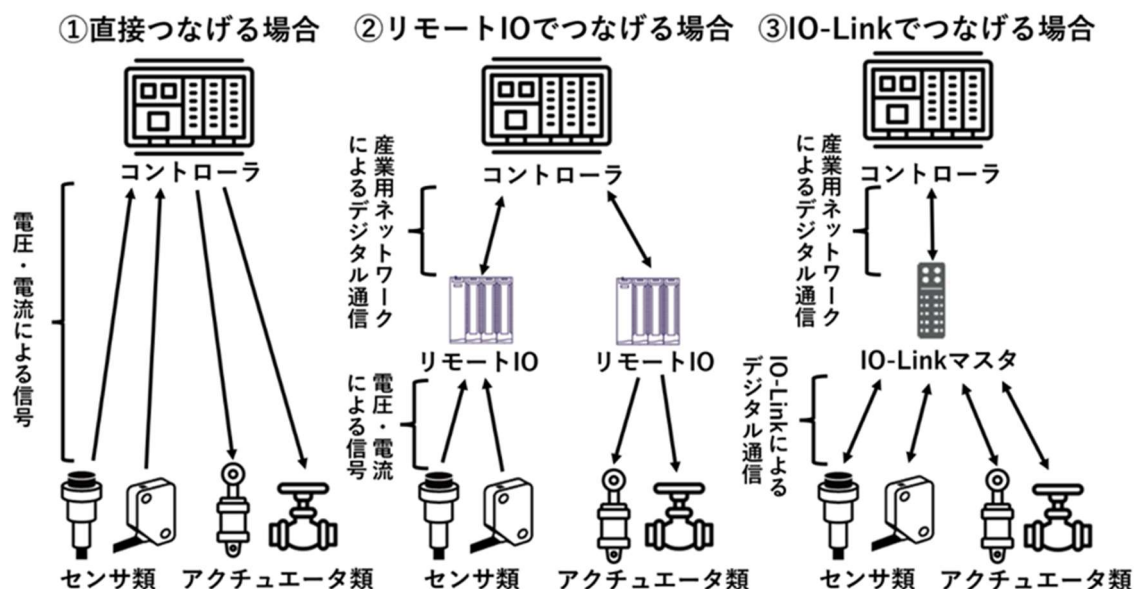


図3：FAにおけるセンサやアクチュエータ等とコントローラとのつなぎ方の3類型

出所) 筆者作成。

センサやアクチュエータ等が IO-Link によるデジタル通信を行う場合には、それらが持つ多様な情報を 1 本のケーブルで送ることが可能となり（図 4 参照）、それらが IT で使われるコンピュータにまで送られることにより、製造業企業の DX が促進される可能性がある（生産現場の多様な情報を低コストで収集することによる、生産管理の改善、製品の製造工程のトレーサビリティの向上、予知保全や AI 活用の可能性の拡大など）。また、セン

サやアクチュエータ等が IO-Link によるデジタル通信を行う場合には、センサやアクチュエータ等に双方向通信をさせることが可能となり、センサやアクチュエータ等が持つパラメータ情報、診断情報、ID 情報などの活用が容易になって、製造業企業の DX が促進される可能性がある（センサやアクチュエータ等のパラメータ設定のネットワークを活用した効率化、センサやアクチュエータ等の診断情報の活用による予期せぬ故障やダウンタイムの回避、センサやアクチュエータ等の ID 情報を活用した補用品管理の効率化など）。

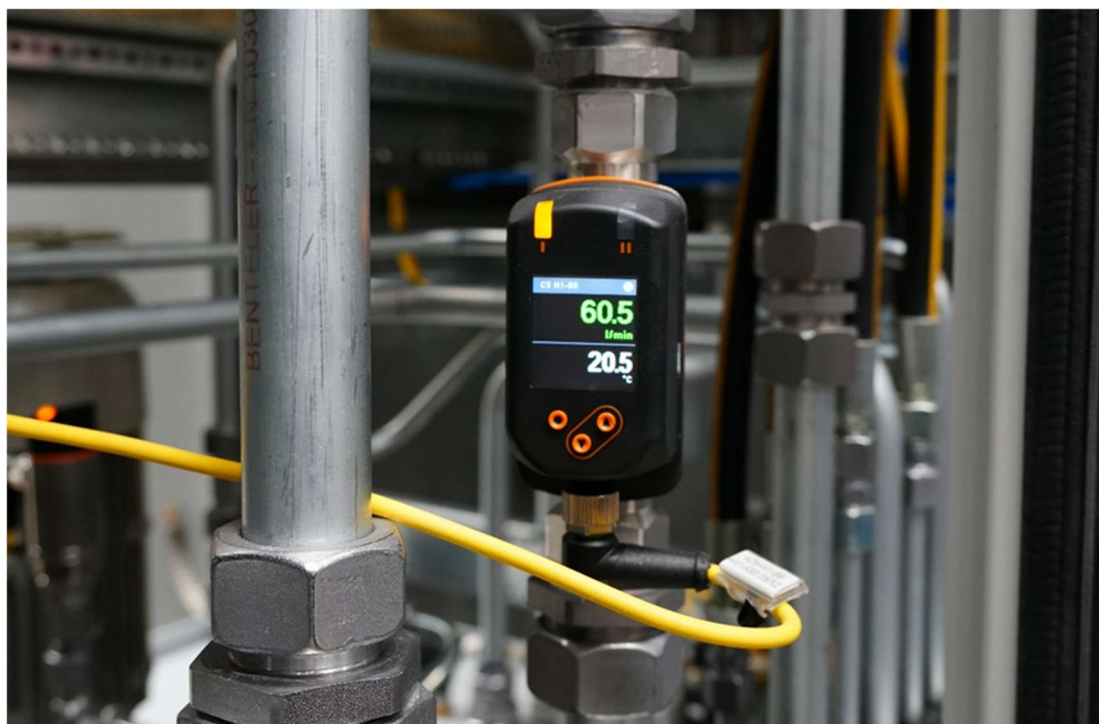


図 4：スターラグ社ビーレフェルト工場（独）で生産される工作機械において流量と温度を測定する IO-Link センサ（ifm electronic 社製）（金子, 2025a）
出所）スターラグ社撮影¹。

2. IO-Link の規格の策定及びその後の普及

欧州発の産業用ネットワークの規格である PROFIBUS、PROFINET の開発・普及団体である PROFIBUS & PROFINET International (PI)（本拠地：ドイツ）の 2006 年 4 月のプレスリリースは（PI, 2006）、「センサ、アクチュエータ、オートメーション技術のよく知

¹ スターラグ社には、同社ビーレフェルト工場を視察させて頂いて、生産されている工作機械の情報システムの貴重な写真の提供を頂いた。記して感謝したい。

られた製造業者が、生産オートメーションにおけるインテリジェントなセンサやアクチュエータのための、フィールドバスから独立した通信インターフェースの仕様の開発を目的として、PI の傘下で IO-Link ワーキンググループを設立した。」と発表している。そして、PROFIBUS & PROFINET International (PI) の 2007 年 6 月のプレスリリースは (PI, 2007)、「PI が物理層とプロトコルの仕様を公表し、IO-Link が、FA における利用に適したセンサとアクチュエータのための、オープンでフィールドバスから独立した通信インターフェースとして、利用可能となった。」と発表している。

これらのプレスリリースで IO-Link がフィールドバスから独立していると書かれているのは、FA の産業用ネットワークには様々な通信プロトコルがある中で、IO-Link は、産業用ネットワークの多くの通信プロトコルとつないで使うことが可能なものとして開発されたことを意味している。図 3 ③で示した通り、IO-Link は、センサやアクチュエータ等と IO-Link マスタとの間の通信に関する規格であり、IO-Link マスタとコントローラとの間の産業用ネットワークの通信プロトコルと組み合わせられて使われることが想定されている。

他方、産業用ネットワークにおいては様々な通信プロトコルが並存している (図 5 参照)。これは、産業用ネットワークにおいては、定められた時間内に確実に処理が完了するリアルタイム性を求められることが一般的であるが、求められるリアルタイム性は自動化システムによって多様であることなどが背景になっていることである。

IO-Link が特定の通信プロトコルの産業用ネットワークとしか組み合わせられない場合には、IO-Link の通信規格に対応したセンサやアクチュエータ等は、その特定の通信プロトコルの産業用ネットワークが使われている場合しか使えないことになってしまう。そのような状況を回避するために、IO-Link は、多くの通信プロトコルの産業用ネットワークと組み合わせることで使える規格として開発されたのである。

IO-Link は、PI により仕様が公表された後、2013 年には IEC61131-9 “Programmable controllers - Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI)”として国際規格になっており、その後今日まで世界で普及が続いている。PI が公表しているデータによれば、IO-Link のノード数は、2013 年には約 100 万ノードであったが、2024 年には約 6,100 万ノードになっている (図 6 参照)。

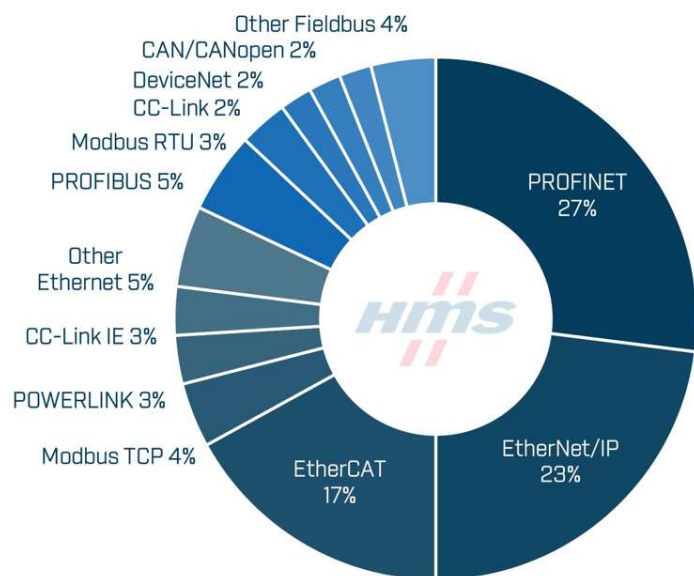


図5：FAにおける産業用ネットワークの通信プロトコル別市場シェア（2025年）
 注）新たにインストールされたノード数を基にしたHMSネットワーク社の推計値
 出所）HMS Networks社Webサイト（HMS Networks, 2025）。

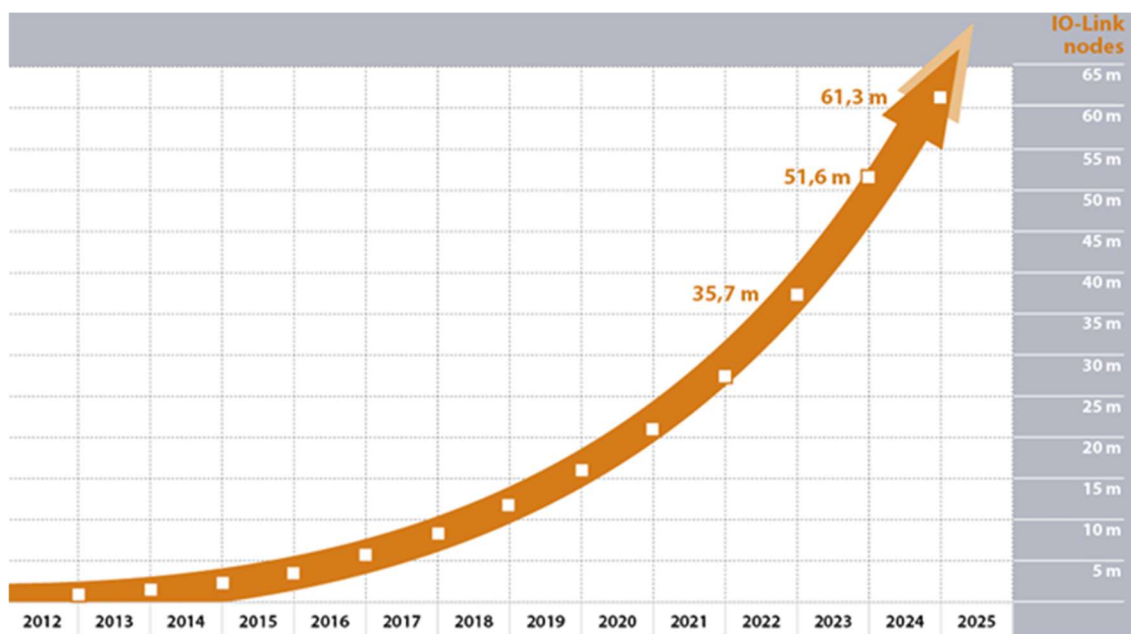


図6：IO-Linkのノード数の推移

出所）PROFIBUS & PROFINET International (PI) Web サイト（PI, 2025）。

3. コントローラを経由しないITとの直接接続へのIO-Linkの拡張

図3③で見た通り、IO-Link は、規格が開発された当初は、センサやアクチュエータ等とコントローラとの間のデジタル通信を可能にすることを想定して開発された。そして、センサやアクチュエータ等の持つ多様な情報を、IT との間でやりとりする場合には、コントローラを経由してやりとりされることが想定された。

しかし、IO-Link システムのセンサやアクチュエータ等の情報のやりとりが、すべてコントローラを通して行われることについては、それらの情報を IT で活用する上での制約になっているという見方がある。例えば、現在 IO-Link Community において技術開発のかじ取り役を担う Steering Committee の議長となっている Joachim R. Uffelmann 氏が著者の一人となっている “IO-Link The DNA of Industry 4.0” (Uffelmann *et al.*, 2019) の P58 には、次のような一節がある。

「現在、PLC は IO-Link 信号と IT 系システムとの間にあるゲートウェイとなっているが、これが通信の流れを致命的に阻害している。制御装置 (PLC) は、センサから PC やデータベースへと送られる膨大な量のデータを扱うことを前提には設計されていない。PLC は機械制御向けの言語を用いるため PC よりも高速に動作するが、記憶容量が小さく、そのデータをさらに先へ送信するには不十分である。インダストリー4.0 が要求するように、IO-Link の生データ解析アルゴリズムをソフトウェアで利用しようとするのであれば、そのデータは転送され、かつ保存されなければならない。これは、PLC を経由する経路が、必要となる高度なデータベース運用や、このデータ量に対して要求される高い伝送速度の観点から見て、ほぼ完全に閉ざされていることを意味する。」(筆者和訳。)

このような見方を反映して、IO-Link の仕様が記載されている IO-Link Interface and System Specification は、2019 年 6 月に公表された Version 1.1.3 (IO-Link Community, 2019) から、その前の Version 1.1.2 (2013 年 7 月公表) まではなかった Standardized Master Interface (SMI) という概念を導入し、IO-Link マスタが、PLC などのコントローラとの間で情報をやりとりするだけでなく、インターネットなどとの間で直接情報をやりとりする可能性があることを明示している (図7 参照)。そして、いくつかの IO-Link マスタのベンダーが、PLC などのコントローラとの間で産業用ネットワークの通信プロトコルで情報をやりとりするだけでなく、IT システムとの間でも、TCP をベースとした通信プロトコルで情報をやりとりすることのできる IO-Link マスタを提供している。

図7においては、IO-Link マスタがインターネットなどとの間で情報をやりとりする方法として、IO-Link マスタに Web サーバ機能を搭載する方法と OPC UA と呼ばれる情報交換規格を使う方法が記載されている。

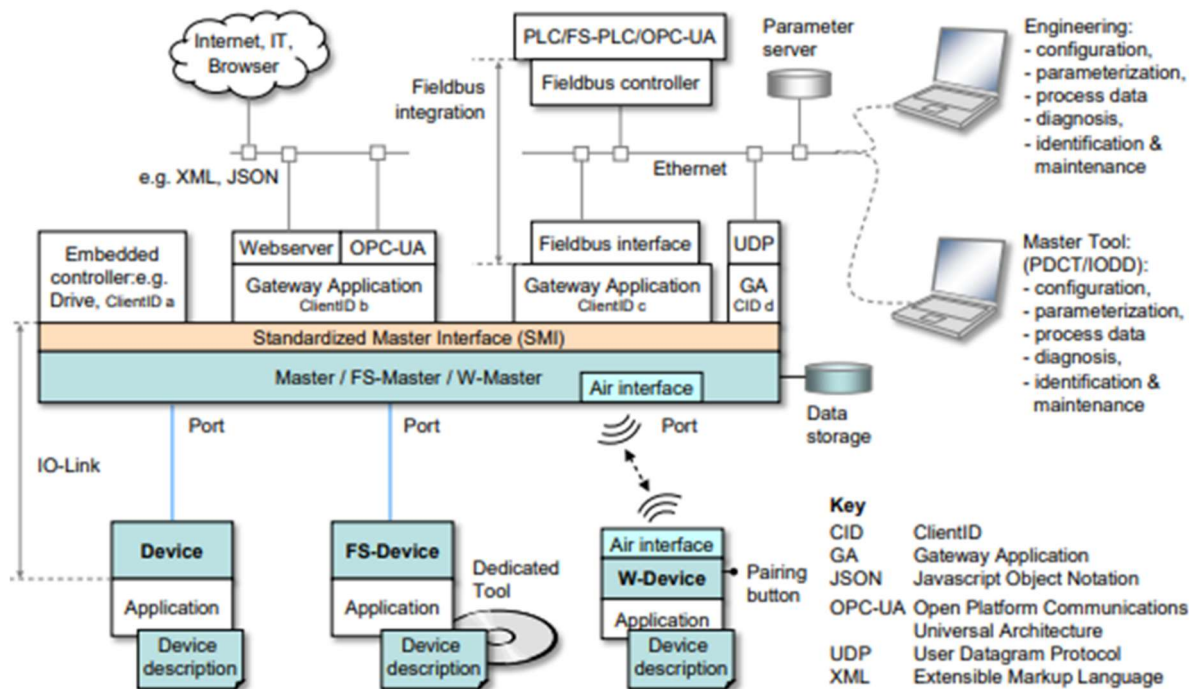


図 7 : SDCI (IO-Link) と自動化技術の一般的関係

注) IO-Link は、Device (センサ等) と Master (IO-Link マスタ) との間のデジタル通信の規格である。本図の下方で Device と Master との間で IO-Link 通信によってやりとりされた情報は、本図の上方の右側で示されているように PLC 等との間でやりとりされる可能性があるとともに、本図の上方の左側で示されているように Internet 等との間でやりとりされる可能性もあることが示されている。Standard Master Interface (SMI)は、IO-Link マスタが、PLC 等と情報のやりとりをする際も Internet 等と情報のやりとりをする際も、共通に持つインターフェースのことである。

出所) IO-Link Interface and System Specification Version 1.1.3

(IO-Link Community, 2019)。

しかし、欧州におけるインタビュー等の調査を行った結果、これらの方法以外にも、REST API (Representational State Transfer Application Programming Interface) と呼ばれる通信インターフェースや MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) と呼ばれる通信プロトコル等を活用する IO-Link マスタの重要性が増大していることがわかった。これらの通信プロトコル等は、TCP/IP モデルの 4 層構造の中のトランポート層において TCP が使われた上で、最上位の層であるアプリケーション層に位置づけられるものである

が（表 1 参照）、このアプリケーション層で様々なベンダー独自のインターフェースが提供されて、提供されるインターフェースによって、IT システムと IO-Link システムとの間の直接の情報のやりとりについて、様々な使い勝手が提供されるようになっている。

各層の名称	各層の役割等
アプリケーション層	インターネットプロトコル群の最上位に位置づけられる層。
トランスポート層	アプリケーションに両端間通信サービスを提供する層。
インターネット層	データを送信元から送信先に運ぶ層。
リンク層	直接接続されたネットワーク上で通信する層。

表 1：TCP/IP モデルの 4 層構造

出所) Requirements for Internet Hosts -- Communication Layers,
RFC 1122 を基に筆者作成(Braden, 1989)。

例えば、ifm electronic 社は、PLC などのコントローラとの間で情報をやりとりするための制御用ポートと IT システムとの間で情報をやりとりするための IoT ポートとの 2 種類のポートを搭載した IO-Link マスタを提供し（図 8 参照）、それらのうち IoT ポートに IoT core という HTTP（Hypertext Transfer Protocol）及び JSON（JavaScript Object Notation）を使ったインターフェース等を搭載し、同社が開発した moneo というソフトウェアを搭載した PC 等とつなぐことにより、IO-Link システムの情報を、様々な用途に応じて、簡易な操作で活用できるシステムを提供していた（図 9 参照）（金子, 2025d）。

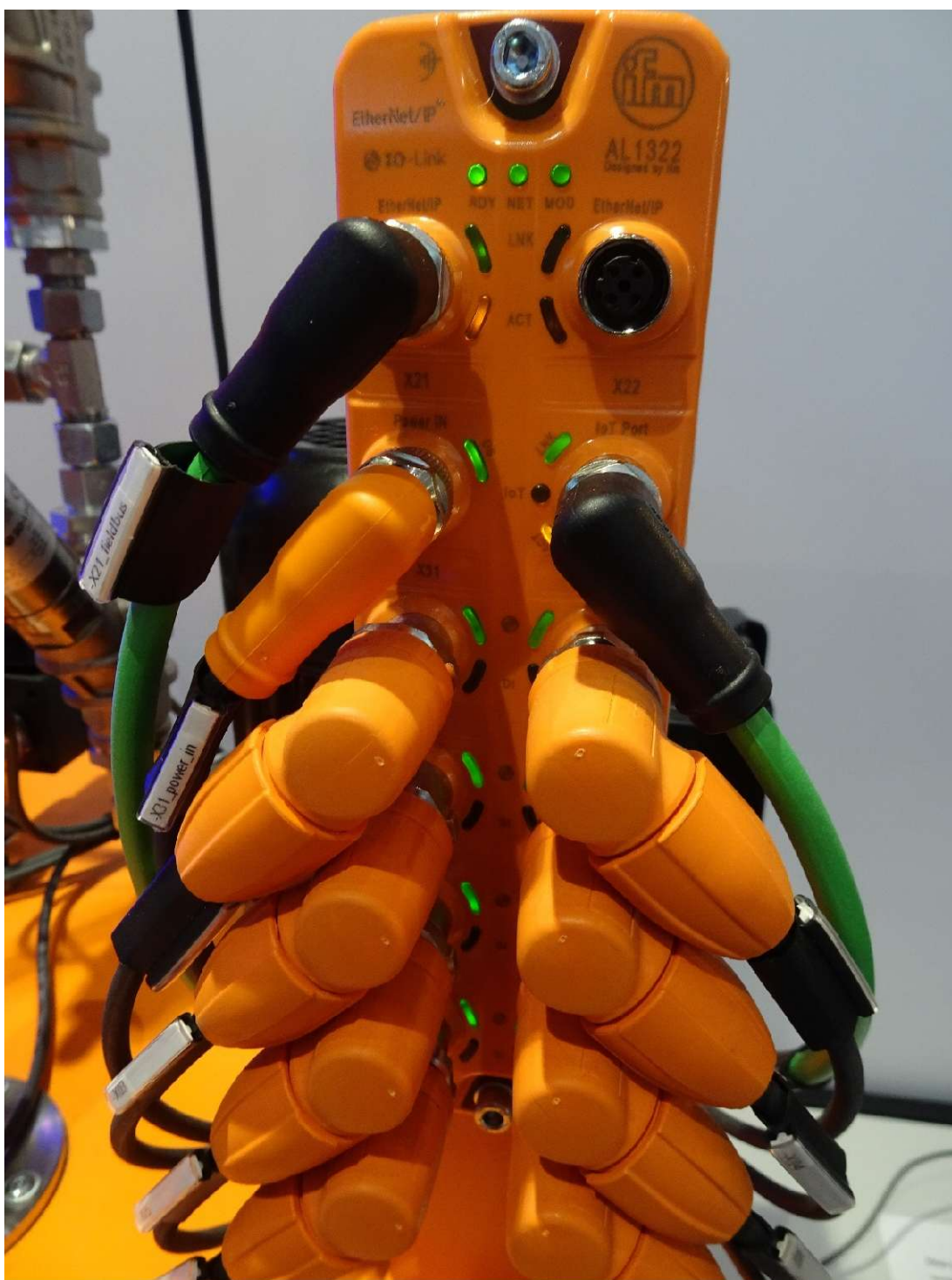


図 8：制御用ポートと IoT ポートがついている ifm electronic 社の IO-Link マスタ
注) 最も上段についている 2 つのポート (EtherNet/IP と書かれている) が制御用ポート
で、上から 2 段目の右側のポート (IoT Port と書かれている) が IoT ポート。

出所) ハノーバーメッセ 2025 の ifm electronic 社のブースで筆者撮影。

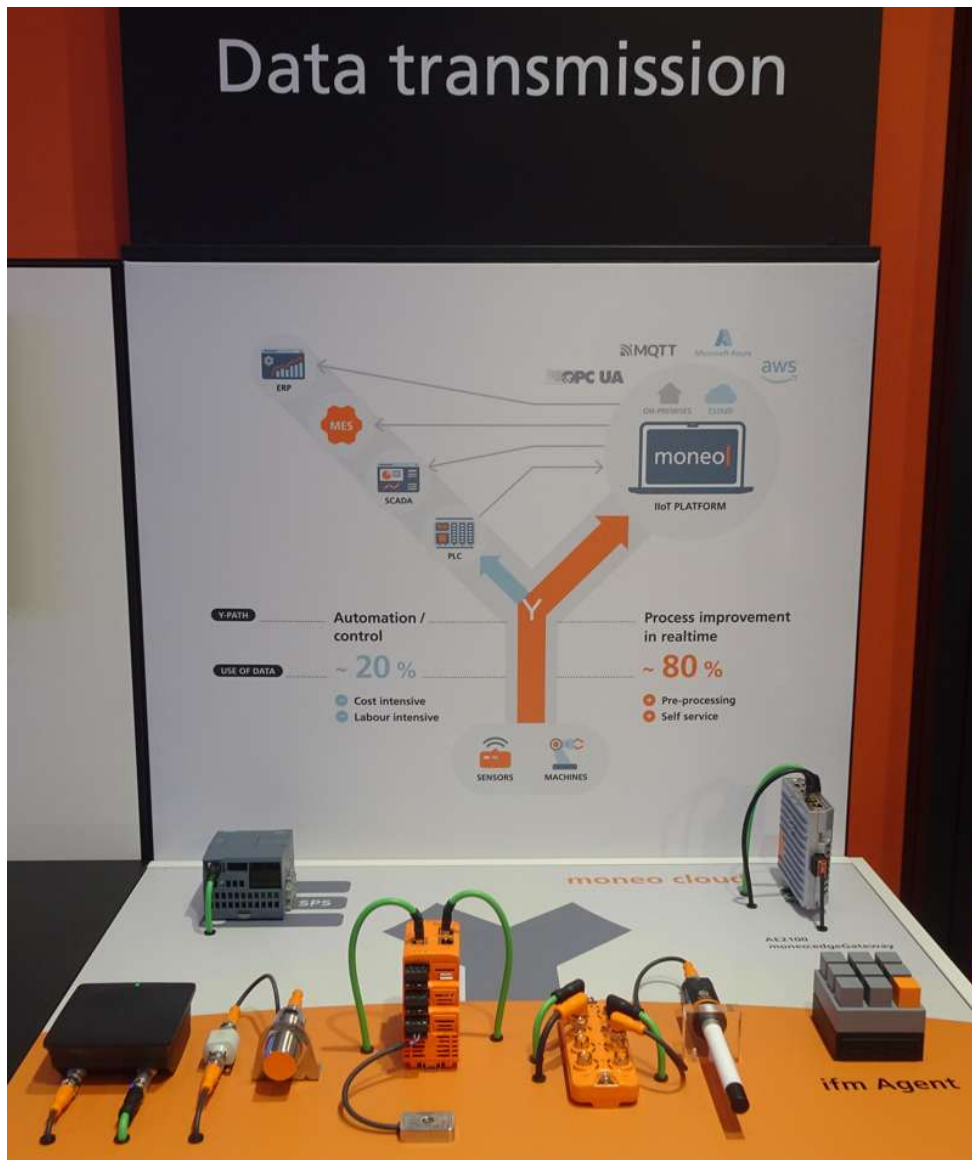


図9：Yパス（フィールドバスとIoT）、moneo ソフトウェアプラットフォーム、それらと関連する機器・ソフトウェアによるデータ伝送の概念図と展示
出所）ハノーバーメッセ 2025 の ifm electronic 社のブースで筆者撮影。

IO-Link マスタがコントローラとの間で情報をやりとりするシステムの場合、そのためのシステムは、コントローラのベンダーにより提供される場合が多い。例えば、ドイツのシーメンス社は、同社の PLC と IO-Link システム等を PROFINET によりつなぐために、TIA ポータルと呼ばれるシステムを提供しており、欧州を中心に広く使われている。一方、シーメンス社は、IO-Link マスタも提供しているが、同社の IO-Link マスタには、IT

システムとの間で TCP をベースとした通信プロトコルで直接情報をやりとりする機能を付与していないとのことだった（図 10 参照）（金子, 2025c）。

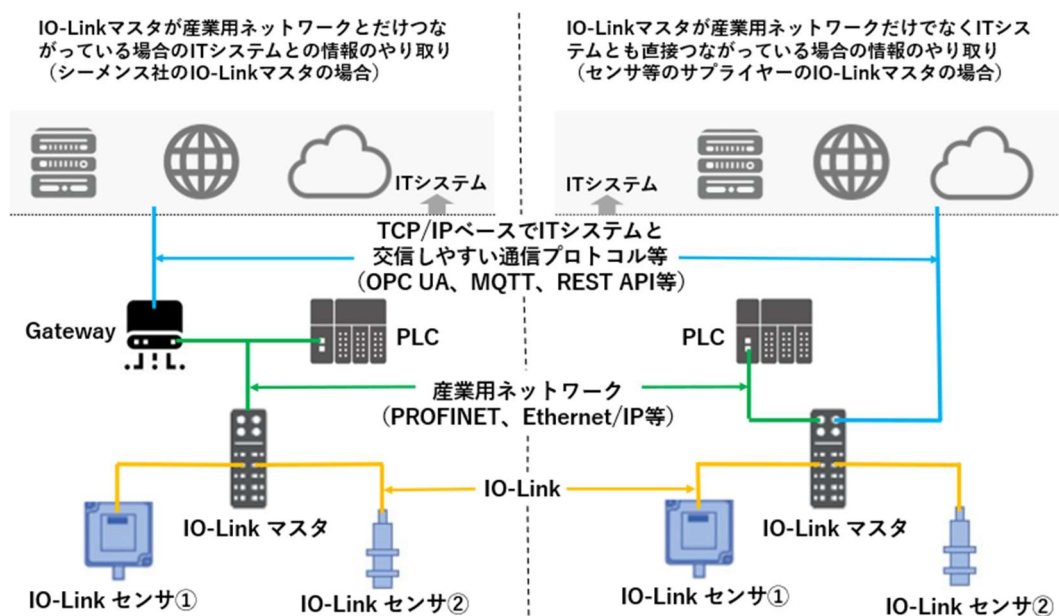


図 10：IO-Link マスタと IT システムとの間の情報のやりとりの 2 類型
（シーメンス社の IO-Link マスタの場合と IT システムとの間で直接情報をやりとりする
機能を持った IO-Link マスタの場合）

出所）筆者作成。

シーメンス社に、IO-Link マスタに TCP をベースとした通信プロトコルで IT システムと直接情報をやりとりする機能を持たせることについての見方を尋ねたところ、IO-Link センサを主として状態監視のために使う際には合理性があり、IO-Link マスタにそのような機能を持たせているのは、主としてセンサのベンダーだとの見方を示していた。そして、IO-Link にかかわっている企業は、シーメンス社やベッコフオートメーション社等のオートメーションのベンダーと、ifm electronic 社や Balluff 社等のセンサ等のベンダーに大別され、直近の IO-Link の安定的な普及の主なけん引役はセンサ等のベンダーだとの見方も示していた。

IO-Link マスタが、PLC などのコントローラとの間で情報をやりとりするだけでなく、インターネットなどとの間で直接情報をやりとりする可能性があることが 2019 年に IO-Link の仕様に明示された後、センサ等のベンダーがそのための様々な独自インターフェー

スを開発することにより、IO-Link の普及はその活用方法を多様化しつつ進んでいることが明らかになった。

4. IO-Link 関連のシステム等の開発の担い手

IO-Link は、既に見たように、ドイツに本拠地を置く PI の傘下で、センサ、アクチュエータ、オートメーション技術の製造業者により開発された後、2013 年に IEC61131-9 として国際規格化された。その後の IO-Link 関連のシステム開発が、どのような企業により行われているかについては、IO-Link の普及団体である IO-Link Community において技術開発のかじ取り役を担う Steering Committee のメンバーの企業の構成が一つの参考になると考えられる (IO-Link Community, 2025; IO-Link Community, n.d.a)。以下においては、この Steering Committee のメンバーの企業構成をいくつかの側面から検討して、そのインプリケーションを考えて見たい。

まず Steering Committee のメンバーの企業を、センサ等のベンダーと、コントローラ等のベンダーと、その他の企業に分類する。その際、センサ等のベンダーの中には、IO-Link の規格ができた後にコントローラを提供し始めた企業もあるが、そのような企業は、コントローラ等のベンダーには分類せず、センサ等のベンダーとして分類することとする。他方、IO-Link の規格ができる前からコントローラを提供しているベンダーの多くはセンサ等も提供しているが、そのような企業はコントローラ等のベンダーに分類することとする。

表 2 は、以上の方針の下で、Steering Committee のメンバーの企業（企業グループの一部である場合には企業グループ全体）を、各企業の Web サイトの情報を参考にして筆者が分類し、それに企業の本社所在国と従業員規模の情報を加えた結果である。

メンバーの企業	分類	本社所在国	従業員規模
Analog Devices	その他の企業	米国	24,000 人
Balluff	センサ等のベンダー	ドイツ	3,600 人
Banner Engineering	センサ等のベンダー	米国	5,500 人
Baumer	センサ等のベンダー	スイス	2,900 人
Beckhoff Automation	コントローラ等のベンダー	ドイツ	5,300 人
Endress+Hauser	センサ等のベンダー	スイス	17,046 人
Festo	コントローラ等のベンダー	ドイツ	20,596 人
Turck	センサ等のベンダー	ドイツ	5,000 人
Ifm	センサ等のベンダー	ドイツ	9,055 人
Leuze electronic	センサ等のベンダー	ドイツ	1,600 人
Murrelektronik	その他の企業	ドイツ	3,000 人
OMRON	コントローラ等のベンダー	日本	28,450 人
Pepperl+Fuchs	センサ等ベンダー	ドイツ	6,450 人
PHOENIX CONTACT	コントローラ等のベンダー	ドイツ	21,000 人
Sick	センサ等のベンダー	ドイツ	11,804 人
Siemens	コントローラ等のベンダー	ドイツ	327,000 人
TEConcept	その他の企業	ドイツ	24 人
Texas Instruments	その他の企業	米国	34,000 人
TMG TE	その他の企業	ドイツ	不明

表 2：IO-Link Community の Steering Committee のメンバーの企業の分類（センサ等のベンダー、コントローラ等のベンダー、その他の企業）、本社所在国、従業員規模

出所) IO-Link Community の Web サイト及び IO-Link Community の Steering Committee のメンバーの企業の Web サイト等を基に筆者作成。

表 2 をみると、Steering Committee のメンバーの企業の中で日本に本社を置く企業は 1 社で、コントローラ等のベンダーなのに対し、その他の国々（ドイツ、スイス、米国）に本社を置く企業には、9 社のセンサ等のベンダーが含まれている。日本に本社を置くセンサ等のベンダー（コントローラは提供していない）の場合、IO-Link Community の会員に

なっている企業はあるが、Steering Committee のメンバーになっている企業はない。直近の IO-Link の安定的な普及の主なけん引役はセンサ等のベンダーだとのシーメンス社の見方を既に紹介したが、そのようなセンサ等のベンダーは、主として日本以外の国々に本社を置く企業であることが想定されていると考えられる。

次に、Steering Committee のメンバーの企業の中のセンサ等のベンダーとコントローラ等のベンダーの従業員規模を比較する。センサ等のベンダー（ドイツに本社を置く企業 6 社とスイスに本社を置く企業 2 社と米国に本社を置く企業 1 社）の従業員規模を平均すると 6,995 人なのに対して、コントローラ等のベンダー（ドイツに本社を置く企業 4 社と日本に本社を置く企業 1 社）の従業員規模を平均すると 80,469 人で、前者は、後者に比べて小さい。コントローラ等のベンダーのうち、Siemens 社はオートメーション以外にも様々な部門を持つ企業であり、従業員規模が他のコントローラ等のベンダーに比べてけた違いに大きいことから、Siemens 社を除いたコントローラ等のベンダー（ドイツに本社を置く企業 3 社と日本に本社を置く企業 1 社）の従業員規模を平均すると 18,837 人で、なおセンサ等のベンダーの従業員規模の平均の方が小さい。

以上のことから、直近の IO-Link の安定的な普及の主なけん引役はセンサ等のベンダーだとすると、それらの企業の従業員規模は、コントローラ等のベンダーの従業員規模に比べて小さい傾向がある。そして、日本以外の国々に本社を置く従業員規模の比較的小さいセンサ等のベンダーにおいて、IO-Link 関連のシステム開発が活発に行われているとみられる。

5. IO-Link の国際規格化後の関連のセンサの輸出入額の推移

以上の検討から、日本と日本以外の国々との間では、特にセンサ等のベンダーについて、IO-Link 関連のシステム開発の活発さに違いがあるとみられる。そこで、センサ等のベンダーが Steering Committee のメンバーにはなっていない日本と、センサ等のベンダーの Steering Committee におけるメンバー数の最も多いドイツについて、IO-Link でよく使われるセンサの輸出入額と近似している可能性の高いデータの推移をみる。具体的には、IO-Link は、主として FA における利用に適した規格として開発されたことから、FA でよく使われるセンサである光電センサと近接センサが含まれる HS コード 8536.50 の輸出入額の推移をみる。輸出入額を見る国としては、日本とドイツに加えて、近年輸出入額及び収支額が急速に拡大している中国についてもみる。

まず、図 11 は、日本、ドイツ、中国の HS コード 8636.50 の収支額（輸出額－輸入額）の推移を、2005 年以降について暦年ベースでみたものである。

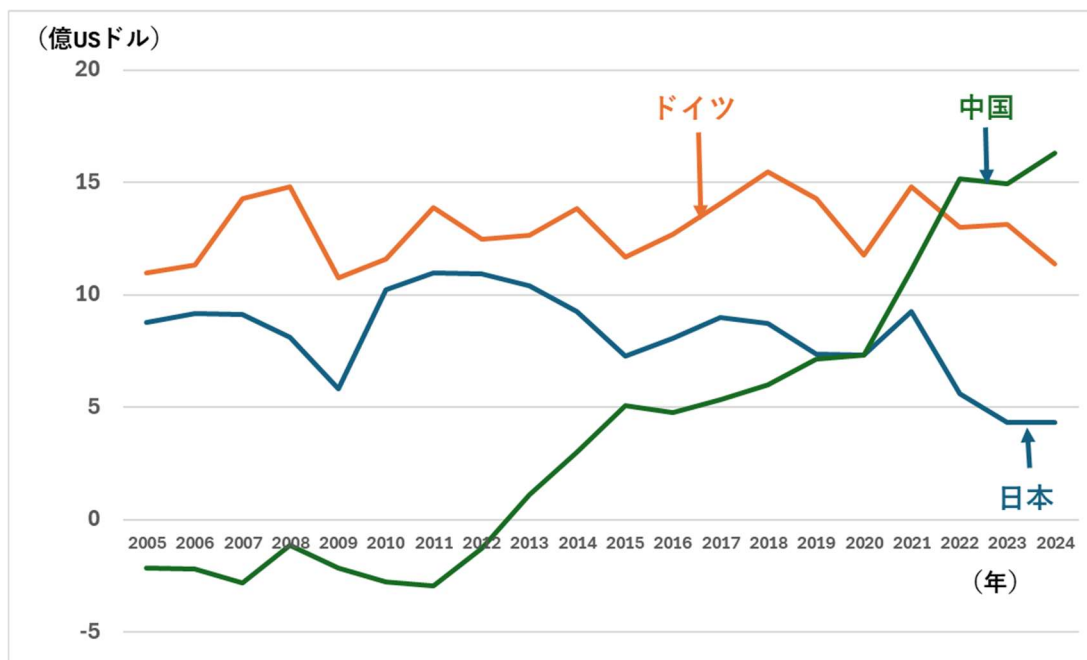


図 11：HS コード 8536.50 の（輸出額－輸入額）の推移（日本、ドイツ、中国）
出所）Global Trade Atlas より筆者作成。

図 11 をみると、IO-Link が国際規格化された 2013 年頃までは、日本の収支額もドイツの収支額も概ね横ばいで推移したのに対し、2013 年頃以降は、日本の収支額は減少傾向となり、特に 2021 年頃以降は減少傾向が顕著となっている一方、ドイツの収支額は引き続き概ね横ばいで推移している。他方、中国の収支額は、2013 年頃以降急速に増加し、特に 2021 年頃以降増加が加速している。

次に、日本及びドイツの中国との輸出入額の推移をみる。図 12 は、HS コード 8536.50 の日本の対中国の輸出入額の推移、図 13 は、HS コード 8536.50 のドイツの対中国の輸出入額の推移をみたものである。

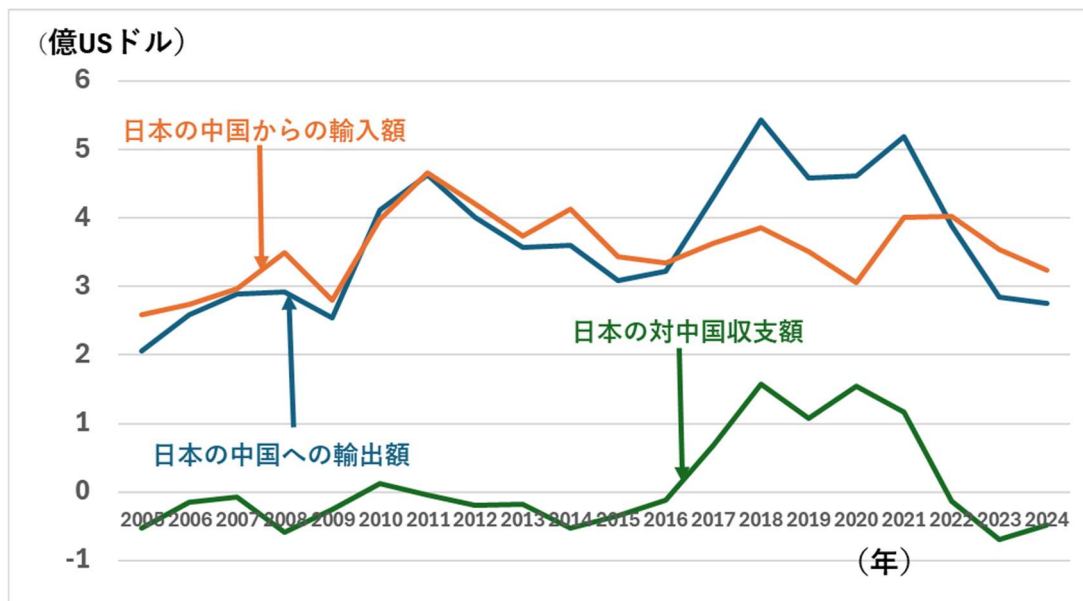


図 12：HS コード 8536.50 の日本の対中国輸出額、輸入額、収支額の推移
出所) Global Trade Atlas より筆者作成。

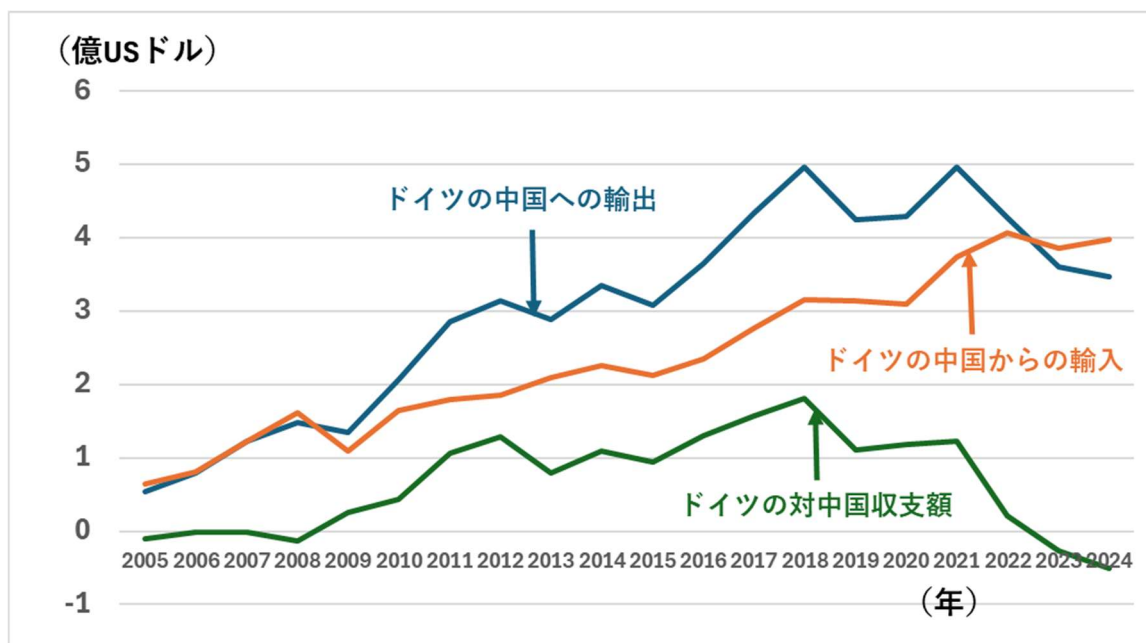


図 13：HS コード 8536.50 のドイツの対中国輸出額、輸入額、収支額の推移
出所) Global Trade Atlas より筆者作成。

図 12 と図 13 を比較すると、IO-Link が国際規格化された 2013 年頃以前は、日本の対中国輸出入額の方がドイツの対中国輸出入額より大きかったのが、2013 年頃以降は、ドイツの対中国輸出入額に増加傾向がみられ、2020 年頃以降は、日本の対中国輸出入額とドイツの対中国輸出入額が概ね同程度で推移している。

2013 年頃以降のこのような変化の背景には、IO-Link の普及がドイツの対中国輸出入額を増加させたことがあるとみられる。IO-Link Community のウェブサイトによれば、IO-Link 関連の技術開発支援や試験サービス等を行う IO-Link テストセンターは、現在世界に 5 か所あり、そのうち 3 か所はドイツに、2 か所は中国にある (IO-Link Community, n.d.b)。中国のテストセンターは、一つ目が 2023 年に合肥市に (PI, 2023)、二つ目は 2024 年に南京市に (PI, 2024) でできているとのことである。

以上をまとめると、IO-Link が国際規格化された 2013 年頃以降、IO-Link でよく使われるセンサである光電センサ、近接センサが含まれる HS コード 8536.50 の輸出入収支額は、日本では減少傾向となっているのに対し、ドイツでは概ね横ばいで推移しており、この背景には、日本に本社を置くセンサ等のベンダーに比べてドイツに本社を置くセンサ等のベンダーにおいて、IO-Link 関連のシステム開発が活発に行われていることがあるとみられる。ドイツの収支額が概ね横ばいで推移しているのは、中国の収支額が急速に増加している間におけることであり、中国の国際競争力が急速に高まっている間にも、ドイツの国際競争力は低下していないとみられる。

他方、HS コード 8536.50 のドイツと日本の対中国輸出入額の 2013 年頃以降の推移をみると、日本の対中国輸出入額には傾向的な変化は見られないのに対して、ドイツの対中国輸出入額には増加傾向がみられる。IO-Link のテストセンターは、世界に 5 か所あるうち 3 か所はドイツに 2 か所は中国にあり、中国のテストセンターは、2023 年、2024 年にできていることから、IO-Link 関連のシステム開発がドイツから中国に広がっていることが、ドイツの対中国輸出入額の増加傾向の背景にあるとみられる。

III. Ethernet-APL

1. Ethernet-APL が製造業企業の DX に寄与する可能性

個別単位で数えられる製品の生産のための自動化システムが FA と呼ばれるのに対し、プラントにおける連続生産のために使われる自動化システムは PA と呼ばれ、石油化学産業などで使われている。FA における産業用ネットワークにおいては、表 1 で見た TCP/IP

モデルの4層構造の最下層のリンク層の通信方式として Ethernet が既にかなり普及している（図 14 参照）。

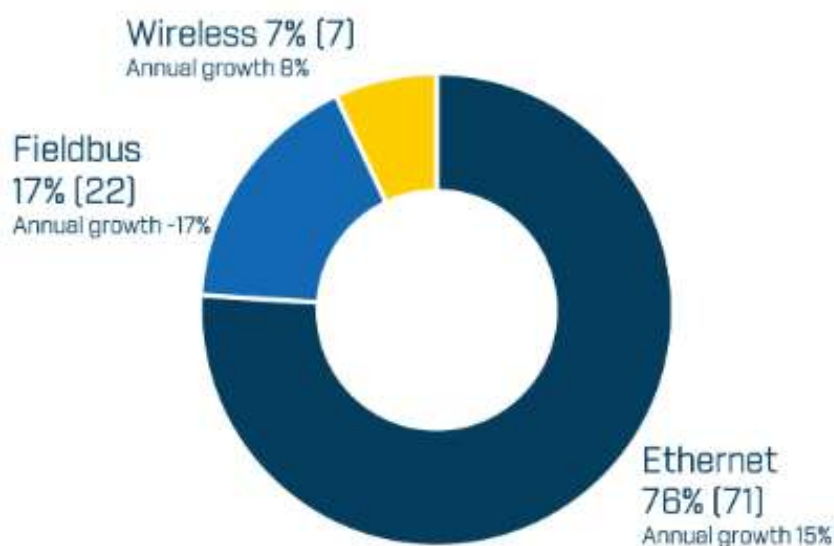


図 14：FA における産業用ネットワークの接続方式別マーケットシェア（2025 年）

注）新たにインストールされたノード数を基にした HMS ネットワーク社の推計値
出所）HMS Networks 社 Web サイト（HMS Networks, 2025）。

これに対し、PA における産業用ネットワークにおいては、従来 Ethernet は普及していなかった。これは、Ethernet のケーブルは一般に 100m 程度以下で、PA が使われる広大なプラントでは長さが不十分な場合が多く、また Ethernet では可燃性ガスの放出される可能性のある危険場所で使われるための本質安全防爆の考慮がなされていなかったことなどによる（FieldComm Group *et al.*, 2021、表 3 参照）。

そのため、従来、PA におけるセンサ等と DCS(Distributed Control System：分散制御システム)などのコントローラとの間の情報のやりとりには、4～20mA の電流によるアナログ信号やシリアル通信（FOUNDATION Fieldbus、PROFIBUS PA）が使われてきた。そして、センサ等が 4～20mA の電流によるアナログ信号で DCS などのコントローラと情報をやりとりする場合において、マイコンを搭載したセンサ等がデジタル通信を行えるようにするためには、アナログ信号にデジタル信号を重畳する HART（Highway Addressable Remote Transducer：ハイウェイアドレス可能遠隔トランスデューサ）通信が広く使われてきた（図 15 参照）。

PA ネットワーク のリンク層の 通信方式	HART 通信 (4-20mA の アナログ信号 に周波数変調 で重畳)	シリアル通信 (FOUNDATION Fieldbus、 PROFIBUS PA)	Ethernet 100BASE-TX (産業用 Ethernet で広 く活用)	Ethernet 10BASE-T1L (Ethernet- APL、Single Pair Ethernet)
ケーブル長(上限)	2769～708m	1,900m	100m	1000m
通信速度(上限)	1.2kbit/s	31.25kbit/s	100Mbit/s	10Mbit/s

表 3：PA ネットワークのリンク層の通信方式別のケーブル長、通信速度の上限

出所) IEEE Computer Society, 2022; IEC, 2023; HART Communication Foundation, 2013; Fieldbus Foundation, 1996などを基に筆者作成。

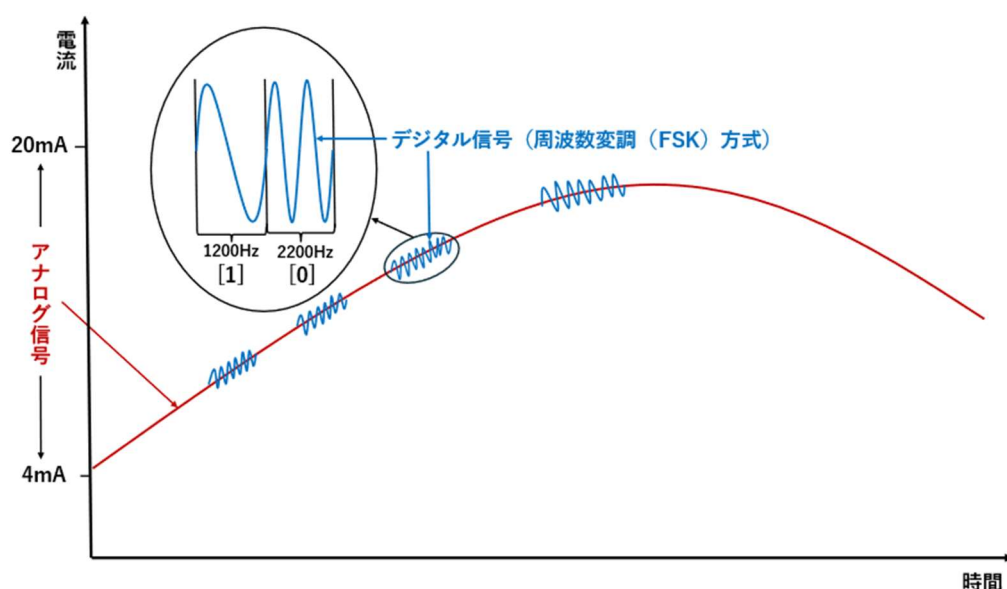


図 15：HART 通信におけるアナログ信号へのデジタル信号の重畳の概念図

出所) 筆者作成。

しかし、PA で使われる HART 通信やシリアル通信の通信速度は、Ethernet ベースの産業用ネットワークの通信プロトコルの通信速度に比べて遅い。また、IT システムにおける有線通信には Ethernet が広く使われており、PA で使われる HART 通信やシリアル通信は、IT システムとつなぐ場合に通信方式の変換が必要となる。(NAMUR APL Task Force *et al.*, 2024、表 3 参照)。

これらの課題に対処するため、4つの産業用ネットワーク標準開発・普及団体（FieldComm Group, ODVA（Open Device Vendor Alliance）, OPC Foundation, PROFIBUS & PROFINET International (PI)）と PA の主要ベンダー12社との協力の下で、PA で使うための Ethernet をベースとした通信規格の開発が行われた。その結果、2019年には1000メートルまでの2線式のツイストペアケーブルによる Ethernet 通信を可能にする国際規格として 10BASE-T1L（IEEE Computer Society, 2022）が策定され、2021年には、10BASE-T1L を本質安全防爆とする給電などの規格である IEC TS 60079-47（IEC, 2021）が策定された。10BASE-T1L に準拠して、本質安全防爆とする必要はないので IEC TS 60079-47 には準拠しないことも可能で、そのようなケースは、SPE（Single Pair Ethernet）の規格に準拠していると位置づけられる（図 16 参照）。

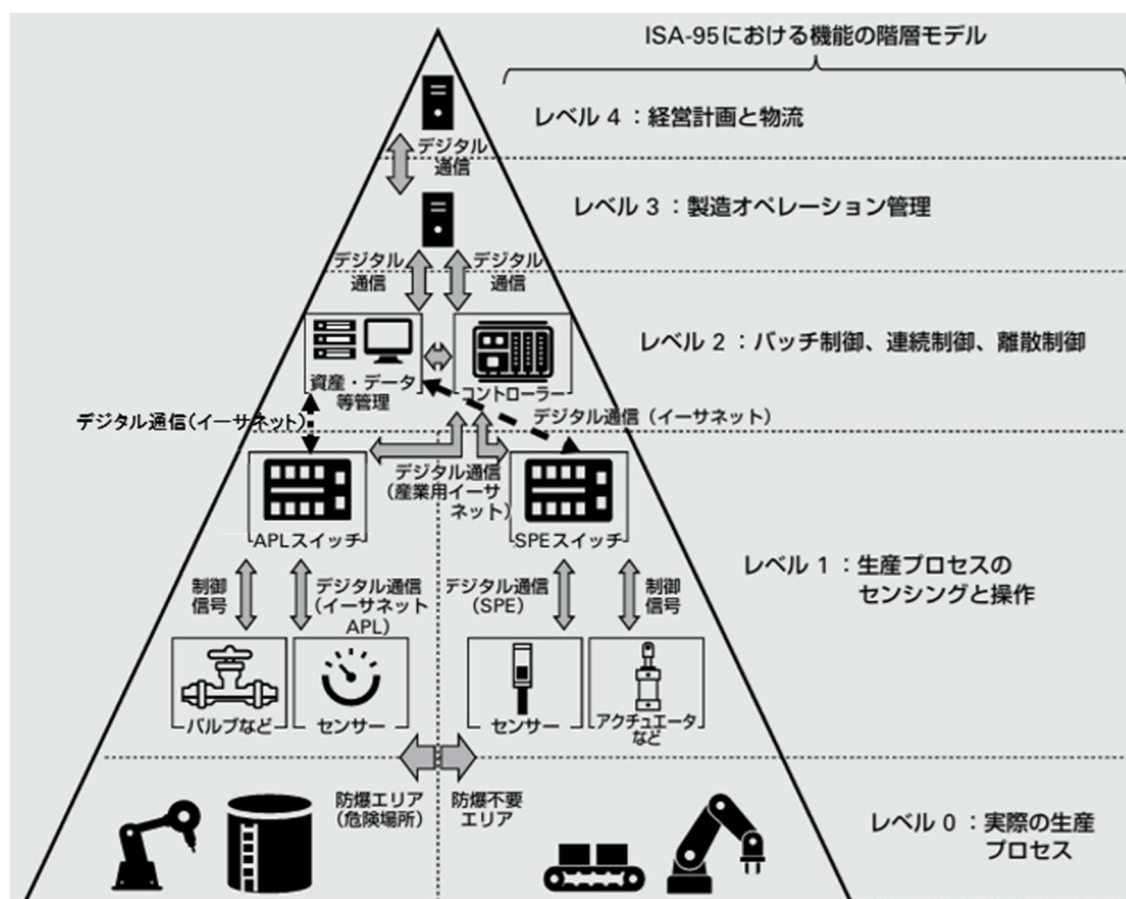


図 16：センサ等が Ethernet-APL や SPE で情報をやりとりする場合の製造業企業内のネットワークの概念図

出所）筆者作成。

今日 PA において最も広く使われているセンサ等のフィールドデバイスの情報のやりとりの方法は、DCS などのコントローラとの間のやりとりには 4~20mA の電流によるアナログ信号を使い、センサ等との間でデジタル通信を行うためには、アナログ信号に HART 信号（デジタル）を重畳させる方法であるが、そのような場合に HART 信号を活用するためには、HART 信号を何らかの方法でアナログ信号と分けてやりとりする必要がある。HART 信号をアナログ信号と分けてやりとりする方法には、大別して、必要な時だけハンドヘルドコミュニケータなどを接続する方法と、AMS（Asset Management System：資産管理システム）などのコンピュータ・システムに常時接続する方法があるが、HART 信号を企業の IT システムでも活用して、製造業企業の DX につなげるためには、後者の方法の方が望ましい（図 17 参照）。

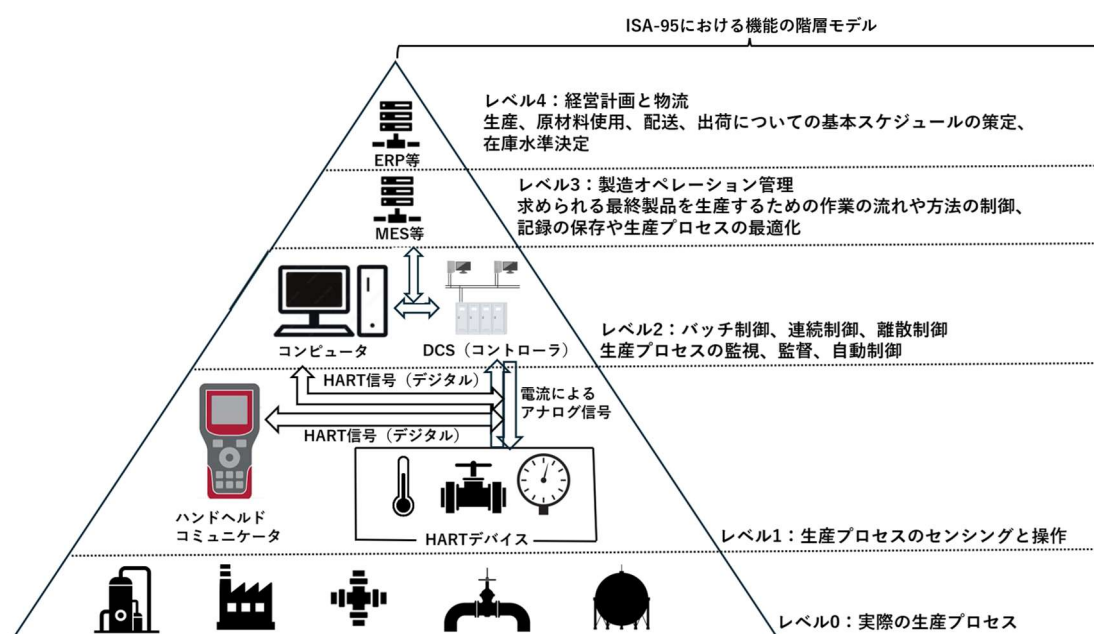


図 17：センサ等がアナログ信号及び HART 信号（デジタル）を使って情報をやりとりする場合の製造業企業内のネットワークの概念図

出所）筆者作成。

しかしながら、実際に HART 通信が使われている製造業企業においては、HART 信号は必要な時だけハンドヘルドコミュニケータなどを接続する方法により活用して、何らかのコンピュータ・システムに常時接続して HART 信号を活用することは、まだ行われてい

ないケースも多いのではないかと推測される。例えば、2023 年に HART 信号を AI に活用したことにより FieldComm Group の Plant of the Year を受賞した先進的なプラントにおいても、長い間、HART 信号は、パラメータ設定等のためにハンドヘルドコミュニケータ等を現場で接続する方法によってしか活用されておらず、コンピュータ・システムに常時接続することによる HART 信号の活用が始まったのは、2017 年とのことだった（金子，2024b）。そして、2017 年までは、PA で使われているセンサ等のフィールドデバイスの情報で IT システムにより活用されていたのは、アナログ信号により DCS に送られていた情報のみとのことだった。

HART 通信が使われているにもかかわらず、HART 信号の IT システムにおける活用が進んでいない要因としては、HART 通信の通信速度が遅いことや、HART 信号の活用のためにコンピュータ等を常時接続するためには、追加のインフラ等が必要になること等がある（NAMUR APL Task Force *et al.*, 2024）。Ethernet-APL を活用して PA で使われるセンサ等のフィールドデバイスが Ethernet により情報をやりとりするようになれば、PA で使われるセンサ等のフィールドデバイスのデジタル通信の通信速度が上がり、その AMS などのコンピュータ・システムへの常時接続に必要なインフラの追加が少なくてすむようになる。これらのことから、Ethernet-APL の普及が、PA で使われるセンサ等のフィールドデバイスの企業のコンピュータ・システムとの常時接続を進めることにより、そのデジタル通信を複線化し、その情報の製造業企業の DX における活用を進めることが期待されている。

2. Ethernet-APL が活用される場合の産業用ネットワークの通信プロトコル

従来、PA の産業用ネットワークのリンク層の通信方式としては、HART 通信かシリアル通信が使われ、シリアル通信が使われる場合の通信プロトコルとしては、FieldComm Group が普及する FOUNDATION Fieldbus か、PROFIBUS & PROFINET International (PI) が普及する PROFIBUS PA が使われてきた。PA で Ethernet-APL が使われるようになるためには、リンク層の通信方式に Ethernet を使う産業用ネットワークの通信プロトコルを使う必要があることから、Ethernet-APL の開発は、リンク層の通信方式に Ethernet を使う 4 つの産業用ネットワークの標準開発・普及団体（FieldComm Group, ODVA, OPC Foundation, PROFIBUS & PROFINET International (PI)）により共同で行われた。そして、デバイス等の Ethernet-APL の規格への適合性のテストは、それら 4 つの産業用

ネットワーク標準開発・普及団体が、各団体の普及する産業用ネットワークの通信プロトコルへの適合性の認証において行うこととなっている。

atp magazin が NAMUR 及び ZVEI とともに 2024 年に行った Ethernet-APL に準拠したデバイス等の提供状況についての調査 (Tauchnitz, 2024) では、どの産業用ネットワークの通信プロトコルに準拠したデバイス等が提供されているかについての調査が行われている。その結果によると、2024 年末までに市場で提供される見込みの Ethernet-APL 準拠のセンサ等のフィールドデバイスは 18 機種あり、それらすべてが PROFINET への適合性を認証されるものだとのことである。

制御用の産業用ネットワークの通信プロトコルとしては、ODVA が普及している EtherNet/IP などが使われる可能性もあり、上記の atp magazin の調査では、6 機種につき EtherNet/IP への適合可能性も検討されているとされている。しかし、2025 年 4 月にハノーバーメッセ 2025 を筆者が視察した際に ODVA のブースで問い合わせたところ、その時点では EtherNet/IP への適合性を認証された Ethernet-APL 準拠のデバイス等はまだないとのことだった。他方、PROFIBUS & PROFINET International (PI) のブースには、PROFINET への適合性を認証された Ethernet-APL 準拠のデバイス等が、多数展示されていた (図 18 参照)。

PROFIBUS & PROFINET International (PI) は、PA 向けには従来からシリアル通信ベースの PROFIBUS PA を普及してきている一方、Ethernet ベースの産業用ネットワークとしては従来から PROFINET を普及してきていることから、両者の蓄積を活かして、PA 向けの Ethernet-APL 準拠のデバイス等の PROFINET への適合性の認証を、いち早く行えた可能性がある。他方、ODVA は、Ethernet ベースの産業用ネットワークとして従来から EtherNet/IP を普及してきているが、FA 向け中心に普及してきており、PA 向けの産業用ネットワークの普及はあまり行ってこなかったことから、PA 向けの Ethernet-APL 準拠のデバイス等の EtherNet/IP への適合性の認証には、時間がかかっている可能性がある。

従来 PA において主として使われてきた産業用ネットワークの 3 種類の通信プロトコル (HART、FOUNDATION Fieldbus、PROFIBUS PA) のうち、PROFIBUS PA は、日本における PA のベンダー、ユーザーにとって比較的馴染みの薄い通信プロトコルであったことから、PROFINET もやはり馴染みの薄い通信プロトコルであるとみられる。今後も Ethernet-APL 準拠のデバイス等は主として PROFINET への適合性を認証されたものであり続ける可能性があり、日本における PA のベンダー、ユーザーも、そのような状況への対応を求められる可能性がある。

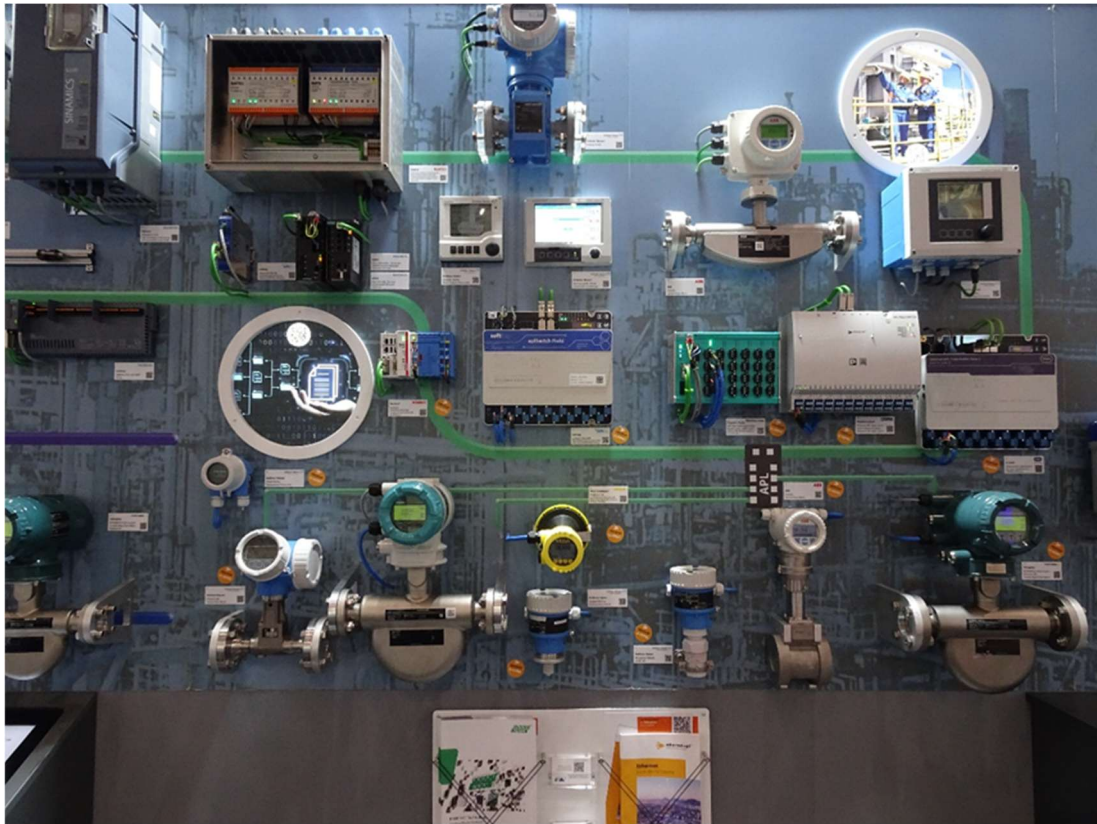


図 18：ハノーバーメッセ 2025 の PROFIBUS and PROFINET International (PI) のブースにおける PROFINET への適合性を認証された Ethernet-APL 準拠のセンサ等の展示
出所) 筆者撮影。

他方、図 5 で見た通り、FA 向けの産業用ネットワークにおいては様々な通信プロトコルが並存しており、PLC 等のコントローラとそれにつながるデバイス等の準拠する産業用ネットワークの通信プロトコルを揃えることが必要となっている。日本では、日本発の通信プロトコルである CC-Link IE と、国際的に普及している通信プロトコルである EtherNet/IP のシェアが大きく、同じ工場内で両者が並存しているために通信プロトコルや情報モデルの変換を行わなければならないケースもあるとみられる。

今後、EtherNet/IP などへの適合性の認証を受けた Ethernet-APL 準拠のデバイス等が増えて、Ethernet-APL を使う PA の状況も、現状の FA のように複数の通信プロトコルが並存する状況になっていく可能性がある。日本における PA のベンダー、ユーザーは、そのような可能性も勘案して、製品開発や PA が使われるプラントの設置等について検討する必要がある。

3. Ethernet-APL が活用される場合のデバイスデータへのアクセス技術

1980 年代に PA で使われる多くのデバイスがデジタル通信で情報をやりとりするようになって以降、デバイスが持つデジタルデータへのアクセス技術が、様々な変遷を経て発展してきた。日本では、Ethernet-APL 準拠のセンサ等のフィールドデバイスの提供が欧州に比べて進んでいないことから、Ethernet-APL とデバイスデータへのアクセス技術との間の関係についてあまり情報を得ることができなかったが、欧州におけるインタビュー等の調査を行った結果、今後 Ethernet-APL が普及すると、デバイスデータへのアクセス技術について新たな展開が見られる可能性があることが明らかになった。

PA で使われるデバイスが持つデジタルデータへのアクセス技術のこれまでの変遷を振り返ると、PA で使われるセンサ等のデジタル通信の通信プロトコルとして早くから普及した HART に準拠したデバイスのデータにアクセスするための DDL (Device Description Language) と呼ばれるデバイスプロファイルの記述言語が、まず早くから普及した。その後、PA にシリアル通信を使うための通信プロトコルとして FOUNDATION Fieldbus と PROFIBUS PA という 2 つの通信プロトコルが作られ、それぞれの通信プロトコルに準拠したデバイスプロファイルの記述言語も作られた。そして、それらと DDL との整合性が図られた結果、EDDL と呼ばれるデバイスプロファイルの記述言語となって、2000 年代半ばに IEC61804 として国際規格化された。その結果、PA で使われるデバイスのベンダーは、広く EDDL に準拠したデバイスプロファイルの記述を提供するようになった。

それと並行して、コンピュータ技術の進歩を背景として、デバイスのベンダーが DTM (Device Type Manager) と呼ばれるソフトウェアを提供することにより、操作性の高いグラフィカルユーザーインターフェースによりデバイスのデータにアクセスすることを可能にする FDT と呼ばれる技術が開発された。FDT 技術は、2010 年前後に IEC62453 として国際規格化されたが、通信プロトコルの違いをソフトウェアによって吸収できる技術であり、デバイスベンダーが多く集まる欧州市場を中心として利用が広がったと言われている (竹内, 2022)。

EDDL と FDT 技術が並存することとなった結果、デバイスデータにアクセスするホストコンピュータは、EDDL をベースにしたものと FDT 技術をベースにしたものに分かれるようになった。両者間の変換はある程度可能なものの、多くのデバイスベンダーは、同じデバイスについて、EDDL に準拠したデバイスプロファイルの記述と DTM の両者を提供するようになった。そこで、EDDL と FDT 技術を統合するための技術開発が始めら

れ、FDI と呼ばれる技術が作られ、2015 年に IEC62769 として国際規格化された。FDI 技術では、デバイスのベンダーは、デバイスについての FDI パッケージを提供することを求められ、それにはデバイスプロファイルや UID(User Interface Description)と呼ばれるユーザーインターフェースについての記述などを含めなければならない、更に UIP (User Interface Plug-in) と呼ばれるユーザーインターフェースについてのソフトウェアなどを含めることもできる。

デバイスのベンダーは、2021 年から、EDDL に準拠したデバイスプロファイルに代えて FDI パッケージの提供を求められるようになった。ただ、日本では、これまでところ FDI パッケージの活用はあまり進んでおらず、EDDL や FDT 技術が今後もデバイスデータへのアクセス技術のベースであり続けると考えている PA のベンダーやユーザーが多いとみられる。

他方、NAMUR は、Ethernet によるデバイスデータへのアクセスには、FDI パッケージが使われることが望ましいとの提言を出している (NAMUR, 2018, 2024)。筆者が欧州における調査においてセンサ等のベンダーである Endress+Hauser 社にインタビューしたところ、Ethernet-APL に準拠したセンサ等については、FDI パッケージのみを提供し、DTM は提供しないとのことだった (金子, 2025b)。同社は、FieldCare と呼ばれる FDT 技術に準拠するホストコンピュータシステムを提供しており、Ethernet を使わないセンサ等については、広く DTM を提供している。そのような同社が、Ethernet-APL に準拠したセンサ等については、FDI パッケージのみを提供し、DTM は提供していないことは、Ethernet-APL の普及が、EDDL と FDT 技術の FDI 技術への統合を後押しする可能性を示唆している。なお、同社は、ホストコンピュータシステムとしては、Ethernet-APL に準拠したシステムにおいても FDT 技術に準拠する FieldCare を提供し続けるとのことで、FDI パッケージを使ったデバイスへのアクセスのためには、iDTM (Interpreter DTM) と呼ばれる DTM を使って、アクセス技術の変換を行うとのことだった。

FDI 技術は、FDT 技術と違って通信プロトコルの違いをソフトウェアで吸収できる技術ではなく、FDI パッケージは、デバイスが準拠する通信プロトコルへの適合性を認証されて提供される (表 4 参照)。既にみた通り、これまでに認証された Ethernet-APL 準拠のセンサ等のフィールドデバイスは、PROFINET への適合性を認証されており、FDI パッケージも PROFINET への適合性を認証されたものが提供されている。

	Ethernet を使わない場合（従来）	Ethernet-APL が使われる場合
デバイスの通信プロトコル	<ul style="list-style-type: none"> ・ HART（アナログ信号にデジタル信号を重畳） ・ FOUNDATION Fieldbus（シリアル通信） ・ PROFIBUS PA（シリアル通信） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Ethernet-APL（リンク層） +Ethernet ベースの産業用ネットワークの通信プロトコル（PROFINET 等）
デバイスデータへのアクセス技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ EDDL（Electronic Device Description Language）に準拠したデバイスプロファイルの記述（通信プロトコル別） ・ FDT（Field Device Tool）技術（デバイスのベンダー等が提供する DTM（ソフトウェア）と DTM を管理する FRAME（ソフトウェア）） （通信プロトコルの違いは、通信 DTM で吸収できるので、デバイス毎の機器 DTM は、通信プロトコル別でなくて良い）	<ul style="list-style-type: none"> ・ FDI パッケージ（デバイスプロファイルの記述や UID（User Interface Description）+UIP（User Interface Plug-in）（ソフトウェア）等） （通信プロトコル別） <ul style="list-style-type: none"> ・ FDT（Field Device Tool）技術（ただし、Ethernet 対応のデバイスについては機器 DTM が提供されないケースがあり、その場合には FDI パッケージを、iDTM を使って活用）

表 4：PA で使われるデバイスの通信プロトコルとデバイスデータへのアクセス技術
（Ethernet を使わない場合（従来）と Ethernet-APL が使われる場合）

出所）筆者作成。

従来、PA で使われるセンサ等のフィールドデバイスは HART に準拠したものが多く、HART に準拠したセンサ等のフィールドデバイスの FDI パッケージについては、HART の普及団体である FieldComm Group が適合性の認証等を行っている。これに対し、PROFINET への適合性を認証された Ethernet-APL 準拠のセンサ等のフィールドデバイスの FDI パッケージは、PROFINET の普及団体である PROFIBUS & PROFINET International (PI)が適合性の認証等を行っている。

既にみた通り、従来 PA において主として使われてきた産業用ネットワークの 3 種類の通信プロトコル（HART、FOUNDATION Fieldbus、PROFIBUS PA）のうち、PROFIBUS PA は、日本における PA のベンダー、ユーザーにとって比較的馴染みの薄い通信プロトコルであったことから、FDI パッケージについても、PROFIBUS & PROFINET International (PI)の適合性の認証等を受けたものを提供したり使ったりしているケースは、少ないとみられる。今後は、日本における PA のベンダー、ユーザーも、Ethernet-APL 準拠のセンサ等のフィールドデバイスの FDI パッケージについて、PROFIBUS & PROFINET International (PI)の適合性の認証等を受けたものを提供したり使ったりするケースが増える可能性がある。

また、EtherNet/IP への適合性を認証された Ethernet-APL 準拠のセンサ等のフィールドデバイスも今後増えて、EtherNet/IP の普及団体である ODVA が認証する FDI パッケージ と PROFIBUS & PROFINET International (PI)が認証する FDI パッケージが並存するようになる可能性もある。日本における PA のベンダー、ユーザーは、そのような可能性も勘案して、デバイスデータへのアクセス技術の今後の活用方法を検討する必要がある。

4. Ethernet-APL により PA を IT システムにつなぐためのインターフェース

既に見たように、IT システムにおける有線通信においては Ethernet が広く使われていることから、PA で Ethernet-APL が使われるようになれば、TCP/IP モデルの 4 層構造の最下層のリンク層の通信方式については、変換なく PA を IT システムにつなぐことができるようになる。ただ、PA において Ethernet-APL が使われるためには、それに加えてリアルタイム性を持った産業用ネットワークの通信プロトコルが使われる必要があり、産業用ネットワークによりやりとりされる情報は、そのまま IT システムにおいて使えるようには、一般になっていない。

NAMUR は、2020 年に NAMUR Open Architecture NOA Concept という提言を出し（NAMUR, 2020）、産業用ネットワークを使った PA は、安定的で信頼できるプラントの長期間にわたる操業をサポートするものであることから、これには影響を与えないようにして、PA とモニタリングや最適化のための IT システムとの間にオープンなインターフェースを導入すべきであるとしている。そして、このオープンなインターフェース導入のための標準として、OPC UA を推奨している。

NOA Concept は、産業用ネットワークを使った PA には影響を与えないようにして、OPC UA を活用したオープンなインターフェースで PA を IT システムにつなぐ方法を 2 つ示している。一つは、PA で使われるセンサ等のフィールドデバイスに OPC UA サーバを搭載して、その情報を OPC UA を活用したオープンなインターフェースで IT システムにつなぐ方法である。もう一つは、PA で使われるセンサ等のフィールドデバイスの情報を産業用ネットワークの専有インターフェースで DCS 等につないだ上で、インターフェースを OPC UA を活用したオープンなインターフェースに変換して IT システムにつなぐ方法である（図 19 参照）。

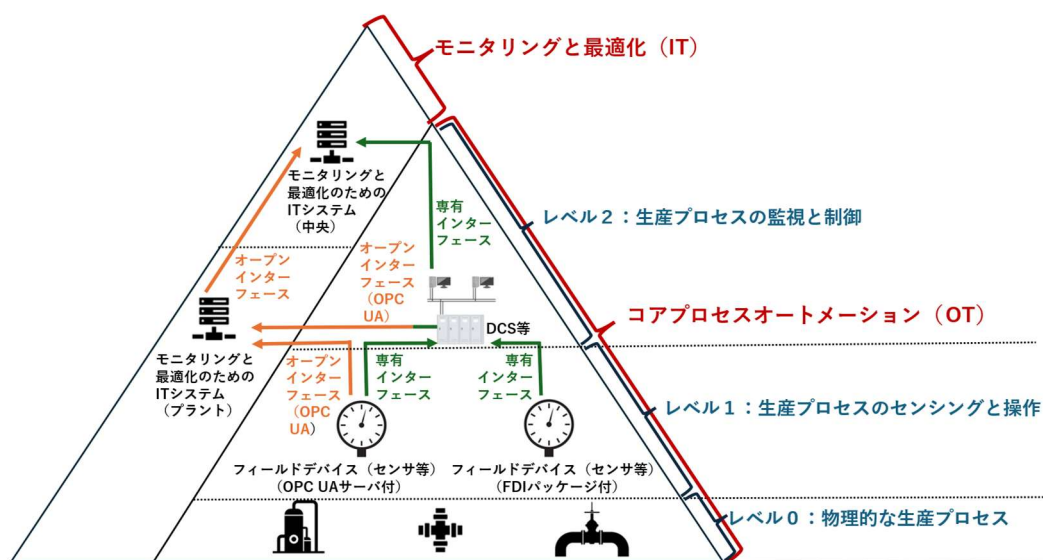


図 19：NOA Concept に基づいて OPC UA を活用したオープンなインターフェースで PA を IT システムにつなぐ場合の概念図
出所）NAMUR, 2020 を基に筆者作成。

OPC UA は、産業オートメーション分野やその他業界におけるデータ交換を目的とした相互運用を行うための標準規格で、自動化システムなどの情報をモデル化するためのフレームワークを持っている。そして、PA の情報を、OPC UA のフレームワークにおいてアクセスし解釈しやすくするための情報モデルとしては、PA-DIM と呼ばれる情報モデルが、2020 年に OPC Foundation と FieldComm Group により作られている。NAMUR は、Ethernet によるデバイスデータへのアクセスには FDI パッケージが使われることが望

ましいとの提言を行っていることは既にみたが、その提言では、AMS (Asset Management System : 資産管理システム) は、デバイスデータを、FDI パッケージに含まれている PA-DIM への変換テーブルにより、PA-DIM フォーマットで提供されなければならないとの提言も行っている。

日本では、Ethernet-APL 準拠のセンサ等のフィールドデバイスの提供が欧州に比べて進んでいないことから、Ethernet-APL の普及が PA の情報の PA-DIM フォーマットでの提供をどの程度後押しするのかについての情報を得ることができなかった。しかし、筆者が欧州における調査においてセンサ等のベンダーである Endress+Hauser 社にインタビューしたところ、同社の Ethernet-APL に準拠したセンサ等は PROFINET への適合性を認証されたもので、その認証にあたっては FDI パッケージに PA-DIM への変換テーブルを含めることは必須ではなかったが、同社としては、自主的に FDI パッケージに PA-DIM への変換テーブルを含めているとのことで、Ethernet-APL の普及が PA の情報の PA-DIM フォーマットでの提供を後押しする方向性になっていることが明らかになった (金子, 2025b)。

atp magazin が NAMUR 及び ZVEI とともにに行った 2024 年の調査で、2024 年末までに市場で提供されている見込みの Ethernet-APL 準拠のセンサ等のフィールドデバイスは 18 機種あることは既に見たが、同調査によると、この 18 機種のうち、14 機種の FDI パッケージは PA-DIM をサポートしているとのことである (Tauchnitz, 2024)。この調査結果も、Endress+Hauser 社へのインタビューの結果と同じ方向性を示唆している。

5. Ethernet-APL を推進する担い手

Ethernet-APL は、既に見たように、4 つの産業用ネットワーク標準開発・普及団体と PA の主要ベンダー 12 社との協力の下で開発され、2021 年に本質安全防爆の規格ができて利用可能な技術となった (FieldComm Group *et al.*, 2021)。NAMUR が Ethernet-APL の普及のために 2022 年から 2024 年の間に設置していた NAMUR APL Task Force による Ethernet-APL を活用したプロジェクトについての 2024 年 9 月の調査結果によると

(Trunzer, 2025)、実際の生産に Ethernet-APL を活用するプロジェクトは 12 件あり、それらのうち、実現されつつある段階にあるものは 3 件、決定済みの計画段階のものは 1 件、まだ決定されていない計画段階のものは 2 件、計画策定の初期段階のものは 6 件あるが、既に実現されたものはないとのことだった。

このように、Ethernet-APL は、まだ今後の普及が期待される段階にあることから、以下では、Ethernet-APL の開発に協力した主要ベンダー12 社（以下「主要ベンダー12 社」という。）の構成をいくつかの側面から検討して、Ethernet-APL を推進する担い手についてのインプリケーションを考えてみたい。まず、IO-Link の Steering Committee のメンバーの企業について行ったのと同じように、主要ベンダー12 社を、センサ等のベンダーと、コントローラ等のベンダーに分類する。既に見た atp magazin、NAMUR 及び ZVEI の 2024 年の調査（Tauchnitz, 2024）は、主要ベンダー12 社を調査対象に含んでおり、各企業が Ethernet-APL に準拠したセンサ等や DCS 等を提供しているか否かを調査しているので、分類はその結果を使って行う。

DCS 等のコントローラを提供している企業の多くはセンサ等も提供しているが、IO-Link について分類した際と同様、そのような企業はコントローラ等のベンダーに分類する。atp magazin、NAMUR 及び ZVEI の調査は、各企業が Ethernet-APL に準拠したセンサを提供しているか否かとアクチュエータを提供しているか否かを区別して調査しているので、ここで行う 12 社の分類も、センサ等のベンダーとアクチュエータ等のベンダーを区別して分類し、両者を合計する場合にはセンサ等のフィールドデバイスのベンダーと呼ぶこととする。

表 5 は、以上の方針の下で、主要ベンダー12 社を、atp magazin、NAMUR 及び ZVEI の調査結果を基に筆者が分類し、それに各企業（企業グループの一部である場合には企業グループ全体）の Web サイトの情報を参考にして企業の本社所在国と従業員規模の情報を加えた結果である。表 5 をみると、主要ベンダー12 社の中で日本に本社を置く企業は 1 社で、コントローラ等のベンダーなのに対し、その他の国々（ドイツ、スイス、米国）に本社を置く企業には、7 社のセンサ等のフィールドデバイスのベンダーが含まれている。従って、日本以外の国々に本社を置く企業については、センサ等のフィールドデバイスのベンダーも、Ethernet-APL の推進において大きな役割を果たす可能性があると思われる。

メンバーの企業	分類	本社所在国	従業員規模
ABB	コントローラ等のベンダー	スイス	110,000 人
Emerson	コントローラ等のベンダー	米国	71,000 人
Endress+Hauser	センサ等のベンダー	スイス	17,046 人
KROHNE	センサ等のベンダー	ドイツ	4,253 人
Pepperl+Fuchs	センサ等のベンダー	ドイツ	6,450 人
PHOENIX CONTACT	センサ等のベンダー	ドイツ	21,000 人
Rockwell Automation	コントローラ等のベンダー	米国	26,000 人
SAMSON	アクチュエータ等のベンダー	ドイツ	4,500 人
Siemens	コントローラ等のベンダー	ドイツ	327,000 人
STAHL	センサ等のベンダー	ドイツ	1,743 人
VEGA	センサ等のベンダー	ドイツ	2,600 人
YOKOGAWA	コントローラ等のベンダー	日本	17,670 人

表 5：Ethernet-APL の開発に協力した主要ベンダー12 社の分類（センサ等・アクチュエータ等のベンダー、コントローラ等のベンダー）、本社所在国、従業員規模
出所） Tauchnitz, 2024 及び Ethernet-APL の開発に協力した
主要ベンダー12 社の Web サイト等を基に筆者作成。

筆者が欧州における調査においてセンサ等のベンダーである Endress+Hauser 社のスイスの本社を訪ねたところ、同社等の約 200 のセンサ等を、米国に本社を置くコントローラ等のベンダーである Emerson 社の DCS 等に、Ethernet-APL を使って接続するテストが行われていた（図 20 参照）。米国及び欧州に本社を置く Emerson 社以外のコントローラ等のベンダーも、Endress+Hauser 社のスイスの本社で、Ethernet-APL を使った接続テストを行ったことがあるとのことで（金子, 2025b）、センサ等のフィールドデバイスのベンダーも、Ethernet-APL の推進に大きな役割を果たす可能性があることを示す事例といえる。

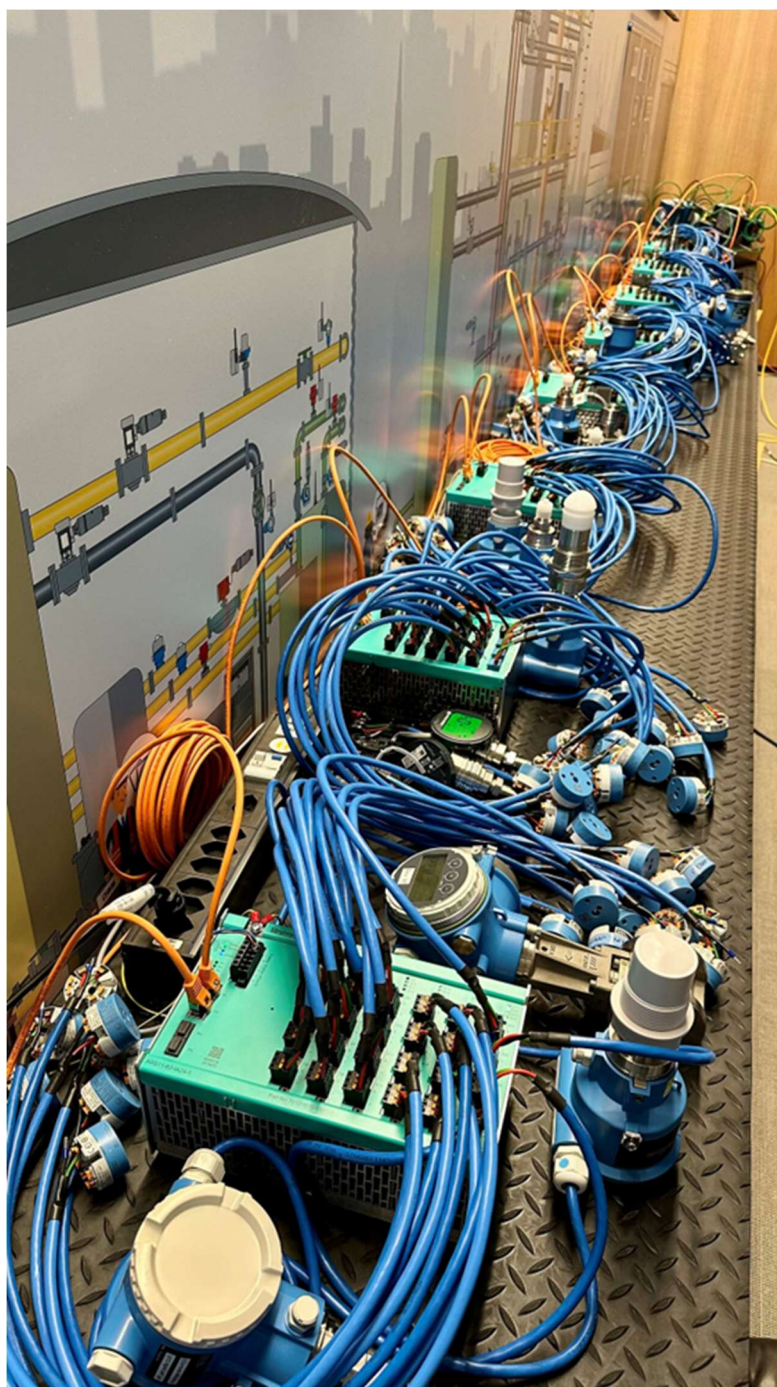


図 20：Ethernet-APL 準拠の Endress+Hauser 社等の約 200 のセンサ等を Emerson 社の DCS 等に接続するテストの様子（金子, 2025b）

出所）Endress+Hauser 社撮影²。

² Endress+Hauser 社には、同社の本社で行われていた Ethernet-APL の接続テストを視察させて頂き、その様子の貴重な写真の提供を頂いた。記して感謝したい。

次に、主要ベンダー12社の中のセンサ等のフィールドデバイスのベンダーとコントローラ等のベンダーの従業員規模を比較する。センサ等のフィールドデバイスのベンダー（ドイツに本社を置く企業6社とスイスに本社を置く企業1社）の従業員規模を平均すると8,227人なのに対して、コントローラ等のベンダー（米国に本社を置く企業2社と日本に本社を置く企業1社とドイツに本社を置く企業1社とスイスに本社を置く企業1社）の従業員規模を平均すると110,334人で、前者は、後者に比べて小さい。以上のことから、主要ベンダー12社の中の欧州に本社を置くセンサ等のフィールドデバイスのベンダーの従業員規模は、コントローラ等のベンダーの従業員規模に比べて小さい傾向があるとみられる。

これらのことを総合すると、欧州に本社を置くベンダーと日本に本社を置くベンダーのEthernet-APLの推進への関わり方は、欧州に本社を置くベンダーは、比較的規模の小さいセンサ等のフィールドデバイスのベンダーも多数関わっているのに対して、日本に本社を置くベンダーは、比較的規模の大きいコントローラ等のベンダーだけが関わっているという点で異なっている。

IV. 結論

本稿では、近年策定されたDX指向の自動化システム関連国際規格の中で、製造業企業のDXのネットワークインフラとしての重要性の高いIO-LinkとEthernet-APLを取り上げて、これら2つの国際規格の策定、普及に多くの企業が参加している欧州においてインタビュー等の調査を行うことにより、それらの国際規格の活用の今後の方向性を明らかにした。

IO-Linkについては、規格が開発された当初は、センサやアクチュエータ等とコントローラとの間のデジタル通信を可能にすることを想定した規格であったが、その後コントローラを経由せずにインターネットなどとの間でも直接情報をやりとりする可能性が規格に明示され、そのような情報のやりとりについて様々なベンダー独自のインターフェースが提供されることにより、様々な使い勝手が提供されるようになっていることが明らかになった。それらの独自インターフェースは、センサ等のベンダーによって提供されることが多いが、IO-Linkでよく使われるセンサを含むHSコード8536.50の輸出入額の近年の推移をみると、日本の収支額が減少傾向になっている一方、ドイツの収支額は、中国の収支額が急速に増大している状況において、ほぼ横ばいで推移している。

Ethernet-APL については、Ethernet-APL 準拠のデバイス等は、PROFINET への適合性を認証されたものが先行して提供され始めていることが明らかになった。また、デバイスデータへのアクセス技術については、Ethernet-APL の普及が、EDDL と FDT 技術の FDI 技術への統合を後押しする可能性があることが明らかになった。PA を IT システムにつなぐインターフェースについては、Ethernet-APL 準拠のデバイスについては、PA の情報が FDI パッケージにより PA-DIM フォーマットに変換され始めており、PA と IT システムとの間に OPC UA を活用したオープンなインターフェースを導入するという NOA Concept を、Ethernet-APL の普及が後押しする方向性となっていることが明らかになった。

本稿の作成を通じて、欧州に本社を置く企業と日本に本社を置く企業との間で、これら 2 つの国際規格へのアプローチに、日本の機械産業が今後のグローバル戦略を考える上で考慮すべき 2 つの違いがあることが明らかになったので、それらについて報告して本稿を終わりたい。

1 点目の考慮すべきアプローチの違いは、日本に本社を置く企業では、国際規格が策定されることにより標準化が完了したと考えられる傾向があるのに対し、欧州に本社を置く企業では、国際規格が策定されることが独自インターフェースの開発のベースとなったり、規格についての別の検討の必要性を生じさせたりしていることである。

IO-Link においては、国際規格によりセンサ等のフィールドデバイスと IO-Link マスタとの間の通信プロトコルの標準ができたことをベースにして、IO-Link マスタと IT との間に、様々な独自インターフェースが開発されている。独自インターフェース間には競争があって、競争力のある独自インターフェースが生き残るので、日本の機械産業は、独自インターフェースだからと言って検討の対象としないのではなく、様々な独自インターフェースについても検討した上で、IO-Link についての戦略を考える必要がある。

Ethernet-APL においては、これまでのところ、日本における PA のベンダー、ユーザーにとって比較的馴染みの薄い産業用ネットワークである PROFINET への適合性を認証された Ethernet-APL 準拠のデバイス等が提供されており、今後は複数の産業用ネットワークへの適合性を認証されたデバイス等が並存する状況になる可能性もある。デバイスデータへのアクセス技術については、産業用ネットワーク別の FDI パッケージをベースとしたものへの統合が進む可能性がある。従って、日本の機械産業は、これまでは馴染みの薄かった産業用ネットワークを使うことの検討や、複数の産業用ネットワークの並存の可能性を勘案した検討を求められたりする可能性がある。

2点目の考慮すべきアプローチの違いは、国際規格の開発や関連のシステム開発への、センサ等のフィールドデバイスのベンダーの取り組みの程度の違いである。本稿で検討した2つの国際規格は、センサ等のフィールドデバイスの情報を企業のDXにつなぐネットワークを、コントローラ経由のネットワークだけでなく、より複線化されたネットワークにする可能性を広げるものである。このような性格を持つ国際規格の開発や関連のシステム開発においては、センサ等のフィールドデバイスのベンダーの重要性が、従来の自動化システムに関連したシステム開発におけるよりも高いとみられる。欧州に本社を置く企業においては、多くのセンサ等のフィールドデバイスのベンダーが、これら2つの国際規格の開発や関連のシステム開発に取り組んでいる。これに対して、日本に本社を置く企業においては、主としてコントローラ等のベンダーが、これら2つの国際規格の開発や関連のシステム開発に取り組む傾向が見られる。

このような違いは、日本に本社を置く企業においては、国際規格の開発や関連のシステム開発への取り組みが、従業員規模の比較的大きい企業に委ねられる傾向があることにより起こっている可能性がある。しかし、センサ等のフィールドデバイスのベンダーの適正規模は、コントローラ等のベンダーの適正規模に比べて小さい可能性がある。そうであれば、日本に本社を置くセンサ等のフィールドデバイスのベンダーは、従業員規模が小さいからといって国際規格の開発や関連のシステム開発を、より従業員規模の大きいコントローラ等のベンダーに委ねるべきではない。

欧州に本社を置くセンサ等のフィールドデバイスとのベンダーは、これら2つの国際規格の開発や関連のシステムの開発において、コントローラ等のベンダーと対等に競争したり協調したりしている。日本のセンサ等のフィールドデバイスのベンダーも、コントローラ等のベンダーとの間で、欧州に本社を置くセンサ等のフィールドデバイスのベンダーが構築しているような関係を作る可能性を模索すべきである。

〈参照文献〉

(邦文)

1. JEMIMA (一般社団法人日本電気計測器工業会) : 「プロセス計測制御機器の技術解説」、JEMIMA official website、(n.d.) 閲覧日 : 2025 年 12 月 20 日
<https://www.jemima.or.jp/tech/1.html>
2. 金子実 : 「日本の機械産業における IO-Link の活用ーニューロン工業株式会社の製袋機の例ー」、一般財団法人機械振興協会経済研究所 (2024a)
https://www.jspmi.or.jp/system/file/6/166/202411Column_Kaneko.pdf
3. 金子実 : 「HART 信号を活用した AI の精度向上ーダイキン工業株式会社鹿島製作所の例ー」、一般財団法人機械振興協会経済研究所 (2024b)
https://www.jspmi.or.jp/system/file/6/167/202412Column_Kaneko.pdf
4. 金子実 : 「スターラグ社ビーレフェルト工場 (独) で生産される工作機械の情報システムの視察結果報告」、一般財団法人機械振興協会経済研究所 (2025a)
https://www.jspmi.or.jp/system/file/6/174/202505Column_Kaneko.pdf
5. 金子実 : 「エンドレスハウザー社への FDI、Ethernet-APL についてのインタビュー」、一般財団法人機械振興協会経済研究所 (2025b)
<https://www.jspmi.or.jp/system/file/6/175/202506columnKaneko.pdf>
6. 金子実 : 「シーメンス社 (独) への IO-Link 関連のシステム、製品についてのインタビュー」、一般財団法人機械振興協会経済研究所 (2025c)
https://www.jspmi.or.jp/system/file/6/177/202507Column_Kaneko.pdf
7. 金子実 : 「ifm electronic 社 (独) への IO-Link の IoT 活用についてのインタビュー」、一般財団法人機械振興協会経済研究所 (2025d)
https://www.jspmi.or.jp/system/file/6/179/202508Column_Kaneko.pdf
8. 経済産業省 : 「デジタルガバナンス・コード 2.0」 (2020)
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/investment/dgc/dgc2.pdf
9. 竹内徹夫 (横河電機) : 「フィールド機器のシステム統合技術の進化 (その 1) IEC/SC65E/WG4, WG7 のエンジニアリング自動化関連技術」、JEMIMA 会報. Vol. 59 No. 2/2022 (2022)
<https://www.jemima.or.jp/about/file/2022%E5%B9%B4%E6%9C%88%E5%8F%B7.pdf>
10. 日野満司・熊谷英樹 : 「シーケンス制御を活用したシステムづくり入門」、森北出版株式会社 (2006)

11. 松隈隆志 (PLCopen Japan 代表幹事／オムロン株式会社) : 「PLC の国際標準プログラミング入門 (1) IEC 61131-3 と PLCopen の目的とは」、アイティメディア株式会社『MONOist』 (2013)
<https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/1311/05/news005.html>
12. 元吉伸一 : 「産業用ネットワークオープン化の歴史(1)」、アイティメディア株式会社『MONOist』 (2024)
13. 元吉伸一 : 「産業用ネットワークオープン化の歴史(2)」、アイティメディア株式会社『MONOist』 (2025)
14. 横河電機編 : 「(計装メーカーが書いた) フィールド機器・虎の巻」 (第二版)、工業技術社 (2010)

(英文)

1. Braden, Robert, Ed.: “Requirements for Internet Hosts -- Communication Layers, RFC 1122”, Internet Engineering Task Force (IETF) (1989)
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1122>
2. Eddy, Wesley M., Ed. “Transmission Control Protocol (TCP), RFC 9293”, Internet Engineering Task Force (IETF) (2022)
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9293>
3. Fieldbus Foundation: “Wiring and Installation 31.25 kbit/s, Voltage Mode, Wire Medium, Application Guide, FOUNDATION™ fieldbus” (1996)
https://www.fieldcommgroup.org/sites/default/files/imce_files/technology/documents/FF_wiringinstallationguide.pdf
4. FieldComm Group, ODVA, INC, OPC Foundation, PROFIBUS & PROFINET International (PI): “Engineering Guideline Ethernet To the Field” (2021)
https://www.ethernet-apl.org/wp-content/uploads/2022/08/Ethernet-APL_Ethernet-To-The-Field_EN_FINAL_June-2021.pdf
5. HART Communication Foundation: “HART Communication Application Guide” (2013)
https://www.fieldcommgroup.org/sites/default/files/imce_files/technology/documents/HART_ApplicationGuide_r7.1.pdf
6. HMS Networks: “Annual HMS Networks report confirms growing dominance of

Industrial Ethernet”(2025)

<https://www.hms-networks.com/news/news-details/27-05-2025-hms-networks-report-industrial-trends-2025>

7. IEC (International Electrotechnical Commission): “Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology, IEC 62264-1:2013” (2013)
8. IEC (International Electrotechnical Commission): “Explosive atmospheres - Part 47: Equipment protection by 2-wire intrinsically safe ethernet concept (2-WISE), IEC TS 60079-47:2021” (2021)
9. IEC (International Electrotechnical Commission) “Industrial communication networks - Fieldbus specifications - Part 2: Physical layer specification and service definition, IEC 61158-2:2023” (2023)
10. IEEE Computer Society: “IEEE Standard for Ethernet, IEEE Std 802.3™ - 2022” (2022)
11. IO-Link Community: “IO-Link Interface and System Specification Version 1.1.3” (2019)
12. IO-Link Community: “Election of the Steering Committee at the IO-Link Members Assembly 2025” (2025)
<https://io-link.com/news/news-detail/election-of-the-steering-committee-at-the-io-link-members-assembly-2025>
13. IO-Link Community: “Members of the Steering Committee”, IO-Link Community official website, (n.d.a) Retrieved on December 20, 2025
<https://io-link.com/community/organization/steering/working-groups>
14. IO-Link Community: “IO-Link Test Center: Device Development, Testing Services, and Certification”, IO-Link Community official website, (n.d.b) Retrieved on December 20, 2025
<https://io-link.com/community/services/test-center>
15. ISA (International Society of Automation): “ISA-95 Series of Standards: Enterprise-Control System Integration”, ISA official website, (n.d.) Retrieved on December 20, 2025
<https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>
16. Ken, Ball: “How Programmable Logic Controllers Emerged from Industry Needs”, Control Engineering, WTW Media, LLC. (2008)

<https://www.controleng.com/how-programmable-logic-controllers-emerged-from-industry-needs/>

17. NAMUR: “Requirements for an Ethernet communication system for field level, NE 168” (2018, 2024)
18. NAMUR: “NAMUR Open Architecture NOA Concept, NE 175” (2020)
19. NAMUR APL Task Force, ZVEI APL Task Force: “Ethernet-APL: Use-Cases” (2024)
https://www.namur.net/fileadmin/media_www/Dokumente/NAMURZVEI_APLUseCases_Summary_en.pdf
20. Postel, John: “Transmission Control Protocol, RFC 793”, Information Sciences Institute, University of Southern California (1981)
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc793>
21. PI (PROFIBUS & PROFINET International): “PRESS RELEASE Fieldbus-Independent Sensor/Actuator Communication With IO Link” (2006)
<https://www.profibus.com/newsroom/press-news/fieldbus-independent-sensor/actuator-communication-with-io-link>
22. PI (PROFIBUS & PROFINET International): “PRESS RELEASE Launch of the first IO Link products” (2007)
<https://www.profibus.com/newsroom/press-news/launch-of-the-first-io-link-products>
23. PI (PROFIBUS & PROFINET International): “First Accredited IO-Link Test Lab in China” (2023)
<https://www.profibus.com/newsroom/press-news/first-accredited-io-link-test-lab-in-china>
24. PI (PROFIBUS & PROFINET International): “Second IO-Link Test Laboratory in China” (2024)
<https://www.profibus.com/newsroom/press-news/second-io-link-test-laboratory-in-china>
25. PI (PROFIBUS & PROFINET International): “PI Technologies Hold Their Ground in the Current Economic Situation”(2025)
<https://www.profibus.com/newsroom/press-news/pi-technologies-hold-their-ground-in-the-current-economic-situation>
26. Stolterman, Erik, Anna Croon Fors: “Information Technology and the Good Life”, IFIP International Federation for Information Processing (2004)
https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/1-4020-8095-6_45.pdf

27. Tauchnitz, Thomas: "Update on APL Market Survey: Availability of APL Components", atp magazine 5/2024 (2024)
<https://atpinfo.de/produkte-und-loesungen/apl-market-survey-update-download-the-results-free-of-charge/>
28. Trunzer, Emanuel, Maria C. Molina Cintas: "Ethernet-APL: Last chance for digital field communication" (2025)
https://www.valveworldexpo.com/en/Media_News/News/Topics/Ethernet-APL_Last_chance_for_digital_field_communication
29. Uffelmann, Joachim R., Peter Wienzek, Dr. Myriam Jahn: "IO-Link The DNA of Industry 4.0", Vulkan-Verlag GmbH (2019)