

MES（製造実行システム）のモデルに関する一考察

児玉公信[†]

製造業における経営システムと制御システムの連携に関する国際標準である IEC 62264 では、生産管理システムと製造実行システム（MES）の境界は、状況に依存するとされる。この定義は、あまりに自由度が高く、状況が変化するたびに MES の機能設計も変化するようになる。より安定で、合理的な根拠としてのモデルの提示が望まれる。

製造ビジネスの標準提案団体である APSOM の MESX-JP（Joint-Project）は、約 10 年にわたって、製造業の垂直連携モデルを模索し、階層モデルと層間連携プロトコルを提案してきた。この過程で、MES の再モデル化を行い、MES の本質的な機能として、生産管理システムの Proxy 機能、製造動作への動的展開機能、製造動作の実施機能（Controller との連携）の三つからなるとする。

A Discussion on Model of MES (Manufacturing Execution System)

Kiminobu Kodama[†]

In IEC 62264, the international standard of “Enterprise-Control System Integration” in the manufacturing industry, defines that the boundary between production management system and manufacturing execution system (MES) may be changed according to changing of the situation. This definition, however, is too arbitrary to design of MES, because the situation will be changed frequently. More stable and more rationale MES models are desired.

For about 10 years, MESX-JP (Joint Project for MES using XML) of APSOM, an organization of business manufacturing standard proposal, has been explored the model of vertical collaboration with enterprise management system and manufacturing device control system. Through this modeling process, three essential functions of MES became clear. Those are the proxy function of production management system, the dynamic explosion of the manufacturing operation, the control functions of manufacturing devices.

1. はじめに

製造業の生産管理システムは、見込み生産注文や顧客の個別注文に基づいて、部品や材料の手配と引当、製造スケジューリングを行い、製造指示を製造現場のシステムに渡す。現場のシステムは、受け取った製造指示に基づき、製造機器や搬送装置などを制御し、製造作業を実行する。現場の製造機器が広範で複雑なものになるにつれ、現場のシステムは階層化していった。やがて、現場のシステムの最上位に位置するこのシステムは、製造実行システムと呼ばれるようになった。

生産管理システムは、生産計画の最適性を高めるために、注文や指示、コストなどの“情報”を扱い、製造実行システムは、“情報”と“現実世界”とを仲介する役割を持つ。本報告では、時々刻々変化する“情報”と“現実世界”を適切に仲介するモデルの改訂を提案し、考察を加える。これは、製造業の基幹システムであるだけでなく、製造業以外の企業システムにおいても、さまざまな実行システムの共通の参照モデルとなると期待される。実際、ここに提示するモデルは非製造業の実行システムの分析から得られたものである。

2. 製造実行システム

製造実行システムについて、その歴史を簡単に追いつながら、概要を述べる。

2.1 製造実行システムの成り立ち

製造実行システムなる概念がどのように生まれ、どのように定義されたかについて、時間順にたどってみる。

(1) 自動制御システムと POP

製造現場の自動化（FA, Factory Automation）の歴史は、1970 年代の製造機器の自動制御システムの出現から始まる。自動制御の製造機器と POP（Point of Production）と呼ばれるデータ収集機をつないで、ローカルに製造実績データなどを処理した。これは、流通業で採用され始めた POS（Point of Sales）の考え方に倣って、実績データが発生した“とき”と“ところ”で収集するしくみである。自動制御システムや POP は、局所的なシステムであったため、データは発生場所にとどまり、MRP（Materials Requirements Planning）などの生産計画システムや、他工程のシステムと統合的に連動するまでには至らなかった。

(2) PLC, SFC, CIM

1980 年代に入り、機器制御システムはますます高度化する。PLC（Programmable Logic Controller）や DCS（Distributed Control System）がそれである。POP が高度化されて、局所的なシステムが接続されるようになり、作業進捗や品質データが統合的にとらえられるようになった。そして、1980 年代の後半には、PC や構内通信線の導入が統合化に拍車をかけた。製造現場に設置された PC は、事務所に置かれた生産計画サーバから製造指示データを取り出し、製造機器の簡単な制御を行う、あるいは作業員に作業指示を表示する。また、製造実行の過程や結果で発生した実績データを

[†] (株) 情報システム総研
Information Systems Institute, Ltd.

収集して、上位の生産計画サーバに報告する。この下位のシステムは、発展型 POP システム、さらには SFC (Shop Floor Control), CIM (Computer Integrated Manufacturing) と呼ばれ、製造現場の総合的な実行制御システムへと構想を進展させていく¹⁾。

(3) AMR の 3 層モデル

1990 年に、米国 AMR Research 社^{a)}は、生産計画システムと機器制御システムのギャップを埋める機能として実行システムという概念を定義し、その重要性を説いた。これが AMR の 3 層モデルである。図 1 は、MES-JP (後述) がオリジナルの図に説明を加えたものである¹⁾。MES (Manufacturing Execution System) という言葉は、この 3 層モデルの考え方と合わせて、1990 年から使われ始めた。

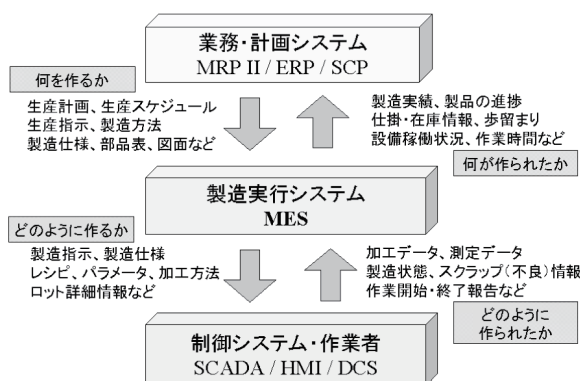


図 1 AMR の 3 層モデル

3 層モデルの業務・計画システムでは、注文、商品、納期、売価などの、対外的なデータを扱う。その実施はオフィス（管理部門や本社）で行われ、その基本的な時間粒度は月、週、日などの比較的長い時間間隔である。制御システムは、製造機器の動作を秒単位で制御する。制御システムの管理対象は、特定の機器または工程（作業区、作業場）である。一方、実行システム、すなわち MES の管理対象は、機器ではなく、現物の製品やロットである。その時間粒度は分、時間であり、管理対象は工場全体をカバーするものとされた。

(4) MESA による MES の定義

MES という新しい概念が生まれると、それまでの生産や製造に関わる概念を再構築する必要が出てきた。1992 年、MES の構築サービスを提供していたベンダやそのユーザが中心となって設立された MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association) International は、MES が持つべき機能として 11 (Resource Allocation and Status, Operations/ Detail Scheduling, Dispatching Production Unit, Document Control, Data Collection/Acquisition, Labor Control, Quality Management, Process Management, Maintenance Management, Product

Tracking and Genealogy^{b)}, Performance Analysis) を挙げた²⁾。

この定義は、AMR の初期の MES の定義を越えて、製造現場のほとんどの活動をサポートする管理システムになってしまっている。たとえば、Management 機能は、業務・計画システムがカバーすべきものではなかったか。あるいは、その境界を本来どこに引くべきだったのか。

(5) IEC 62264 による MES の位置づけ

生産計画システムと MES の連携に関して、ISA (International Society of Automation) は、S95 と称する標準^{c)}の中で、製造管理システムの構造を図 2 のように規定している。この規定は、AMR の 3 層モデルに準拠して階層を定め、階層のレベルごとに活動内容と階層間で授受される情報を整理している。なお、この標準では MES を「製造実行管理 (MOM; Manufacturing Operation Management)」と呼んでいる。

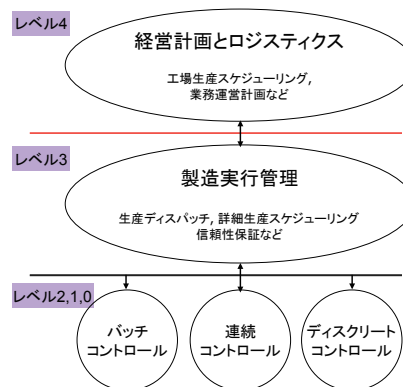


図 2 IEC 62264-1 における生産システムの機能階層

さらに、IEC 62264-3⁴⁾では、MOM が持つべき機能を大きく 4 つの製造業務 (Production, Maintenance, Quality, Inventory) に分類し、それぞれをさらに 8 つの活動 (Detailed scheduling, Resource management, Tracking, Dispatching, Analysis, Definition management, Data collection, Execution management) に分類し、活動間のデータの流れを、DFD を用いて示している。これによると、たとえば Production 業務の活動は、Detailed production scheduling, Production resource management のように表現され、全部で 32 の活動でとらえられる。

さらに IEC 62264-3 は、レベル 3 とレベル 4 との境界は、環境によって異なるとし、図 3 の A から E の太い破線で示すように^{d)}、任意に設定してよいことになっている。つまり、上記(4)の問い「その境界を本来どこに引くべきなのか」に対する答えは、環境によって異なるということになる。

^{b)} ある部品がさまざまなプロセスを経て一つの製品になるまでの“一生”を追跡すること。

^{c)} この標準は、ANSI/ISA-95.00.01-2000 となり、IEC 62264-1:2003 Enterprise-control system integration³⁾のシリーズとなっている。

^{d)} 図 3 は Production 業務の例であり、同様に Maintenance, Quality, Inventory の各業務でも、レベル 3 とレベル 4 の境界を任意に決められる。

^{a)} AMR Research 社は、2009 年 12 月に Gartner 社に買収されている。

2.2 MES 製品の標準仕様定義

生産システムを構築する際に、MES の仕様が標準的に定められていると、ソフトウェア製品比較や入手が容易になる。これを目的として、1997 年から 1999 年まで、FA オー

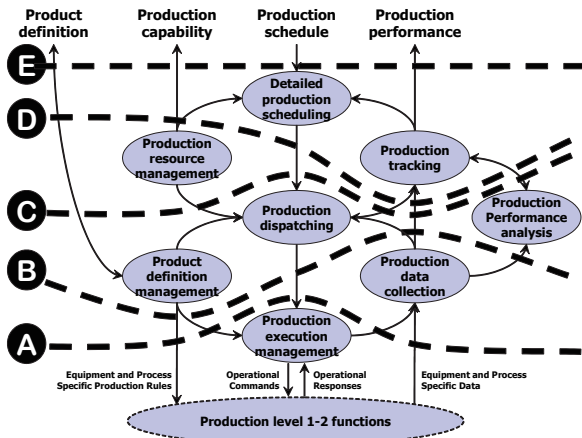


図3 IEC 62264-3 における MOM の境界の幅

ブン協議会 (FAOP) において、「分散オブジェクト指向技術を利用した製造運用システム、生産システムモデル」専門委員会 (OpenMES) が設立された。ここでは、環境によって異なる MES の構築を、必要なソフトウェア部品の組合せとそのカスタマイズによって柔軟に実装できるよう、8 つの機能グループ (工場管理、製品仕様管理、工程仕様管理、工程管理、資材管理、搬送管理、スケジュール管理、設備管理、製造指示管理、共通) とその間インタフェースが定められた。

この仕様書の中で、MES の実装モデルが提示されている。それを図 4 に示した。残念ながら、このモデルはドメインモデルではなく、モジュール構造図でしかない。

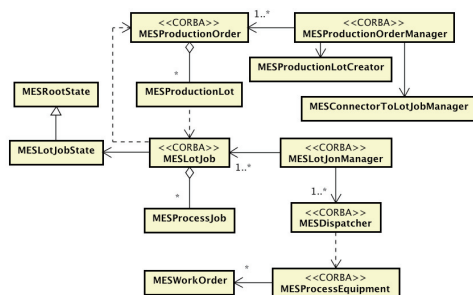


図4 FAOP の OpenMES の実装モデル

2.3 MESX のモデル

(1) APSOM の活動

2001 年、日本型の柔軟な生産方式をサポートできる生産管理システムを実現するため、日本の APS (Advanced Planning and Scheduling) 製品のベンダが集まって、入出力データの仕様を XML によって標準化する試みがなされた。これが PSLX コンソーシアムである。従来のスケジューリング作業は、MRP が立てた計画 (所要量展開) データを受け

取って設備能力の引当を行うもので、多くの計算資源を使用した。これに対し APS は、所要量展開と同時に能力引当も高速に行うという点で、高度なスケジューラであると見なされていた。やがて、この機能は生産計画システムの本質的な部分であることが理解されてきて、同コンソーシアムは 2007 年に、ものづくり APS 推進機構 (APSOM) に改組・改称する。

(2) MESX の活動

少し時間は戻って、2003 年、PSLX コンソーシアムと FAOP は、IEC 62264 のレベル 4 を APS で、レベル 3 を MES で、レベル 2 を PLC でそれぞれ実装し、それらを垂直連携のための具体的なインタフェースを標準化するため、MESX-JW (Joint Working) を立ち上げた。この活動は、PSLX コンソーシアムが APSOM に移行した際に、MESX-JP (Joint Project) と改称されて現在に至る。

ここでは、IEC 62264 のレベル 2~4 のそれぞれのドメインモデルを記述し、レベル間の semantic gap を明らかにした上で、インタフェースを設計する方針を採った。図 5 はそのレベル 4 のモデル、CHARM (Cross Hierarchical Account=Resource Model) の第 2 版である (67)。このモデルでは、すべての生産活動が会計仕訳のパターンを用いて表現できるものとしている。

(3) MESX ドメインモデル

図 6 は、レベル 3 の初期のドメインモデルである。この図の左半分が CHARM に対応している。図は左右が反対になっていて、資源→品目、移動→投入/産出、取引→作業方

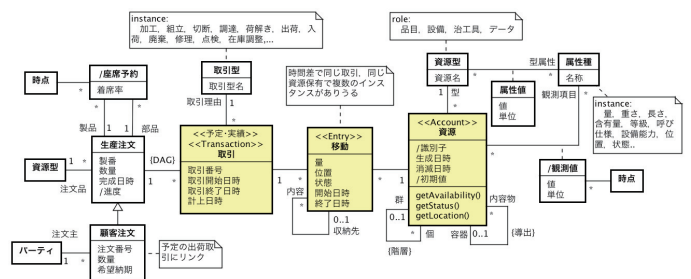


図5 レベル 4 のシステムのモデル (CHARM2)

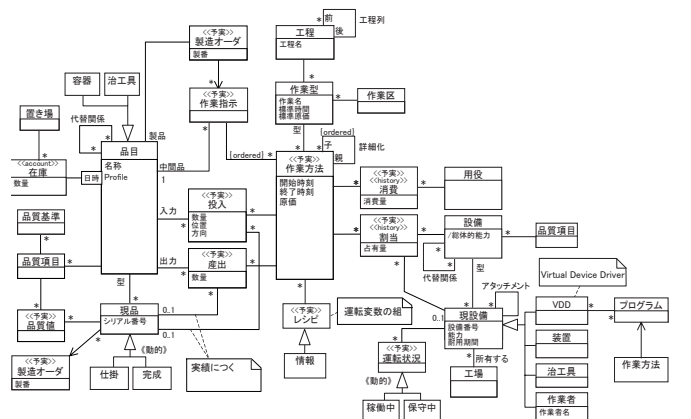


図6 MESX の初期のモデル

法と読み替えることで相同になる．この構造は、全体として製造指示を表している．製造指示は、レベル4と重複しているが、それがどのような意味を持つのか、当時は分からなかった．右半分は機器の操作を、同様に勘定パターンで表している．

なお、このモデルは ISO/IEC 16100-5 Manufacturing software capability profiling for interoperability-Part 5⁸⁾の Annex-B の例として採用されている．

3. MES の再定義と考察

生産システム全体で、生産指示がドメインをまたいで重複している理由が分かったのは、非製造業の基幹システムの全体アーキテクチャを設計している時であった．理解のキーワードは Proxy である．

3.1 Supervisory Control の実現としての Proxy

Proxy とは、一般に通信ネットワーク上でメッセージをキャッシュすることで、重複する情報へのアクセス頻度を減少するシステム構築手法⁹⁾を指す．ここでは、通信機能だけでなく、ローカルコンピュータへの処理の分散も含める．この分散は、ローカルに対処可能なタスクはそこで処理し、サーバ側で処理すべきタスクのみをサーバに渡す方式を採用．これを Supervisory Control (監視制御) と呼ぶ．このイメージを図7に示す．

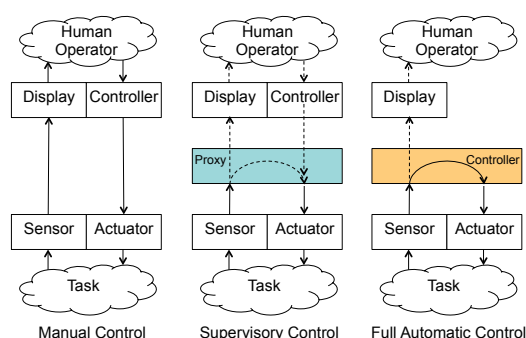


図7 Supervisory Control のイメージ¹⁰⁾

Sheridan¹⁰⁾は、これを地球から無人の月面車を操作するたとえで説明している．月面で起きた状況を地球で知るのには1.3秒後である．それを判断して月面に指令を出しても、それが到着するのは1.3秒後である．その約3秒間に月面車はさらに進んで、クレータに転落してしまうかもしれない．そうならないように、月面側でも必要最小限の即時対応機能が必要となる．

つまり、Proxy とは、上位システムと下位システムとの中間にあって、ローカルで対応可能な即時反応を司る機能を指す．図7では、Human Operator+Display と Controller の組が上位システム、Task+Sensor と Actuator の組が下位システムになる．

3.2 MES は生産管理システムの proxy である

生産管理システムの全体構造において、MES はまさに

Proxy である．MES 上にある「製造指示」は、生産計画システム上の「製造指示」のキャッシュであり、読み取り専用のコピーなのである．これで重複の意味が理解できた．

Proxy に負わせる責務は即時反応機能だけでよいとわかった．それを判定する基準は、通信の遅れ時間である．下位システムと上位システムの連携の遅れがもたらすリスクやコストを基に決めればよい．たとえば、上位システムが製造現場に設置されるのであれば、原則的に MES は必要ない．ただし、一般的に高価な上位システムを製造現場にたくさん配置するわけにはいかないだろう．逆に、ほとんどの機能が即時応答を必要とする場合、あるいは上位システムを遠隔地に設置することになると、多くの機能を MES に負わせなければならない．これが IEC 62264-3 におけるレベル4とレベル3の境界が、環境によって異なることの説明である．

また、AMR の3層モデルで、各層の基本的な時間粒度について言及していたことも、許容できる通信の遅れ時間との関連でとらえなおすこともできる．

3.3 提案する MES のモデル

このような気づきに基づいて、図6で示したモデルを再検討して書き直したのが図8である．

(1) 製造指示をキャッシュする

上半分が上位システムの「製造指示」のキャッシュであることを表示している．これがキャッシュであることの認識が、設計判断においては重要な要因となる．

Façade のステレオタイプが付いている「MES 通信」クラスは、上位システムとの通信処理を集約する．受け取った「製造指示」メッセージは、Application Façade¹¹⁾として展開される．

(2) 作業を動作に展開する

図8の下半分は、知識を参照して作業を動作に分解し、下位システムに命令を投げる構造になっている．これらのオブジェクトは永続化対象となる．動作への展開は、動作の結果によって変化する「制御状態」および外部事象を総合して、制御オブジェクト「動作展開」が{動的}に導出する．これは、次の動作をあらかじめ決めることができないためである．実行結果は、履歴として記録しておく．

「実行ループ」は、次に実行すべき動作を監視し、決定したらレベル2の下位システムへ制御の電文を渡す．

(3) 制御を Delegate する

MES が Proxy だとすれば、図7にあるように制御は、もともと下位システムの責務であり、Proxy は制御を行わない．これを図8のモデルでは、ステレオタイプ《delegate》を付けた「制御」クラス中の属性「*関数」で表している．

Delegate は、関数ポインタを持つ変数を引数で渡して、呼び出すメソッド側で関数を実行させるテクニックである．変数の値を動的に変えることによって、動的に振る舞いを変えることができる．

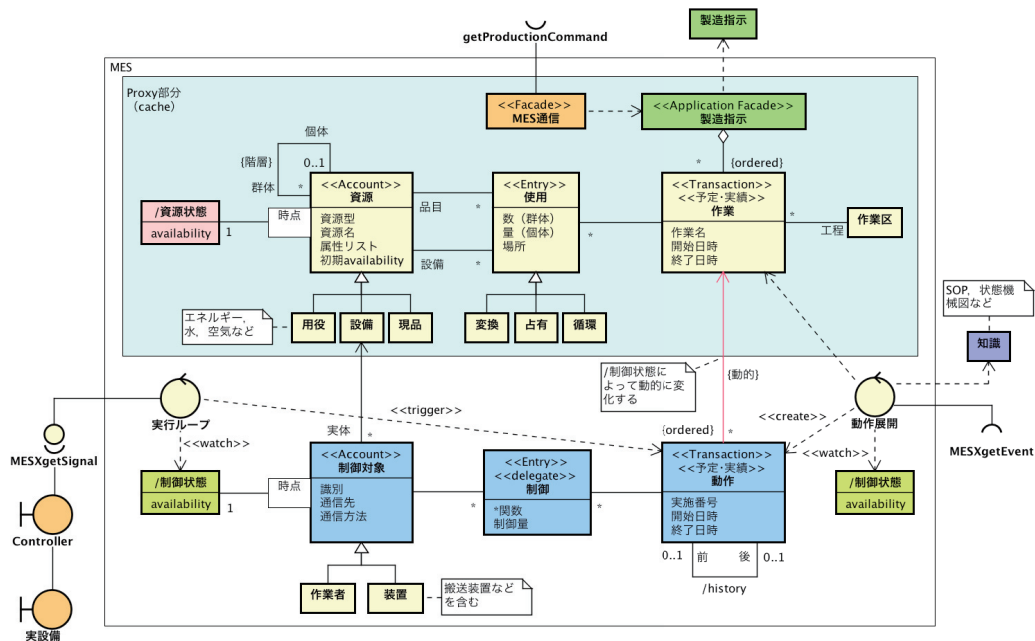


図 8 提案する MES のモデル

3.4 製造指示を動的に生成すべきか

動作が動的に展開されるのに対し，上位システムでは一度展開されれば，変更することは少ない．つまり静的に展開されている．スケジュールを立てるということは，起こるべき事象をある程度予測してしまうことを前提としている．実際は予測に反して実績は変わる．その変化を想定何納めるために，生産歩留まりとか，予備在庫などを考慮してスケジュールは立てられる．

実際，レベル 4 で製造指示を動的に展開する状況を，いまのところ思い浮かぶことができない．この問いは“管理”の意味を突いているのかもしれない．

4. おわりに

MES が持つべき機能については，歴史的に変動していた．MES ベンダが，ビジネスのために機能領域を拡大することについては非難できない．むしろ，標準を定めるに当たっては，機能の採否について，明確な基準を示すべきであった．今回，MES の上位システムに対応する部分を，その Proxy であると思なすことによって，データの重複の積極的な意味が見いだせた．同時にその設計上の扱いについても方向が見いだせた．

MES の対下位システム部分において，動的計画展開を行っているとの気づきも，上位システムにおける計画展開の意味を問い直させた．また，制御は行わず，下位システムに delegate するとの気づきも，コンパクトで flexible な MES を設計するための重要な知見である．

今後は，提案したモデルを MESX-JP において実装し，その妥当性を検証していく予定である．

参考文献

- 1) MESX ジョイントワーキンググループ: MESX ホワイトペーパー, 製造科学技術センター (2004).
- 2) 中村 実, 正田耕一: MES 入門—ERP, SCM の世界と生産現場を結ぶ情報システム, 工業調査会 (2000).
- 3) IEC 62264-1: Enterprise-control system integration — Part 1: Models and terminology (2003).
- 4) IEC 62264-3: Enterprise-control system integration — Part 3: Activity models of manufacturing operations management (2006).
- 5) FAOP: Specifications of the OpenMES Framework, <http://www.orbitimes.com/Download/Specifications%20of%20the%20OpenMES.pdf> (2000).
- 6) 児玉公信, 水野忠則: 少量多品種型生産管理システムの一般モデル CHARM の提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 49(2), 902-909 (2008).
- 7) 児玉公信: 計画・実行システムの一般モデル — 生産管理システムと金融業務システムの共通性 —, 情報システムと社会環境研究会 (2009/9/14).
- 8) ISO/IEC 16100-5: Manufacturing software capability profiling for interoperability — Part 5: Methodology for profile matching using multiple capability class structures (2009).
- 9) Buschmann, F., et al: Pattern-Oriented Software Architecture - A System of Patterns, John Wiley (1996). 金澤ほか訳: ソフトウェアアーキテクチャ, トッパン, 259-273 (1999).
- 10) Ferrell, W. R. and Sheridan, T. B.: Supervisory control of remote manipulation, IEEE spectrum October 81-88 (1967).
- 11) Fowler, M., 堀内監訳: アナリシスパターン, ピアソンエデュケーション, 1998