

Title	アーキテクチャ概念の拡張による製品の多種展開のための設計法に関する研究
Author(s)	澤井, 伽奈
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/72384">https://doi.org/10.18910/72384</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

博士学位論文

アーキテクチャ概念の拡張による  
製品の多種展開のための設計法に関する研究

澤井 伽奈

2019年1月

大阪大学大学院工学研究科



# 目 次

<b>1</b>	<b>緒論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	5
<b>2</b>	<b>アーキテクチャ概念と製品の多種展開に向けた拡張の必要性</b>	<b>9</b>
2.1	緒言	9
2.2	製品アーキテクチャと多種展開のための設計における課題	9
2.2.1	製品アーキテクチャとその意義	9
2.2.2	民生用製品における少品種大量生産から多品種少量生産への流れ	11
2.2.3	産業用製品におけるカスタマイゼーションを伴う多種展開の 必然性と課題	12
2.2.4	製品構造と製造プロセスの複雑化を受けた多種展開の課題	13
2.2.5	多種展開のもとでのモジュール化の必要性	13
2.3	多種展開に向けた製品アーキテクチャ概念の拡張と展開	14
2.3.1	アーキテクチャ設計と Design Structure Matrix	14
2.3.2	アーキテクチャ設計の顧客要求への拡張とその設計の課題	16
2.3.3	アーキテクチャ設計の組立工程への拡張とその設計の課題	17
2.3.4	アーキテクチャのもとでのプラットフォーム設計の課題	17
2.4	結言	18
<b>3</b>	<b>アーキテクチャ設計の顧客要求への拡張とその設計法</b>	<b>21</b>
3.1	緒言	21
3.2	カスタマイゼーションを伴う製品の受発注における課題	21
3.2.1	発注における課題	21
3.2.2	受注における課題	22
3.2.3	顧客要求構造化の必要性	23

3.2.4	本研究のアプローチ	24
3.3	相関ルール分析と顧客要求構造化	24
3.3.1	顧客要求構造化のための分析対象と分析方法	24
3.3.2	相関ルール分析	25
3.3.3	相関ルール分析による顧客要求構造化	27
3.4	顧客要求・物理機能・実体構造を統合したアーキテクチャ設計	27
3.4.1	顧客要求・物理機能・実体構造を統合するアーキテクチャ設計の概要	27
3.4.2	顧客要求・物理機能・実体構造の依存関係・対応関係の明示化	28
3.4.3	発注適正化のための製品アーキテクチャ最適設計問題定式化	30
3.4.4	最適化計算方法	31
3.4.5	受注適正化のための受注プロセス設計	32
3.5	産業用三軸直交ロボットの顧客要求構造化への適用	33
3.5.1	産業用三軸直交ロボットの概要	33
3.5.2	顧客要求構造化	34
3.5.3	相関ルールに対する考察	38
3.6	産業用三軸直交ロボットの製品アーキテクチャ設計への適用	40
3.6.1	製品アーキテクチャ設計の計算条件	40
3.6.2	製品アーキテクチャ設計結果	41
3.6.3	受注プロセス設計結果	72
3.6.4	考察	74
3.7	結言	75
<b>4</b>	<b>アーキテクチャ設計の組立工程への拡張とその設計法</b>	<b>79</b>
4.1	緒言	79
4.2	組立性に起因する製品アーキテクチャ設計の課題	79
4.2.1	組立性と製品アーキテクチャの関係	79
4.2.2	本研究のアプローチ	80
4.3	組立工程を統合する製品アーキテクチャ設計	82
4.3.1	組立作業における順序の明示化	82
4.3.2	組立工程設計の最適化問題としての定式化	84
4.3.3	最適化計算法	86
4.3.4	計算結果の解析と再計算	86
4.4	家庭用エアコンの製品アーキテクチャ設計への適用	87
4.4.1	家庭用エアコンの概要	87
4.4.2	計算条件	87

目次	iii
4.4.3 組立工程設計結果	88
4.4.4 考察	110
4.5 結言	110
<b>5 製品の多種展開の基盤となるプラットフォームの最適設計法</b>	<b>113</b>
5.1 緒言	113
5.2 プラットフォーム設計とその課題	113
5.2.1 プラットフォームに基づく製品展開	113
5.2.2 プラットフォーム設計の課題	114
5.2.3 本研究のアプローチ	115
5.3 簡易モデルを用いたプラットフォーム最適設計	115
5.3.1 簡易モデルの導入の意義とその構築法	115
5.3.2 プラットフォーム最適設計問題の数理モデル	116
5.3.3 最適化計算における条件	118
5.4 産業用三軸直交ロボットのプラットフォーム設計への適用	118
5.4.1 産業用三軸直交ロボットの簡易モデルの構成	119
5.4.2 産業用三軸直交ロボットのプラットフォーム最適設計モデル	120
5.4.3 最適化計算結果	123
5.4.4 考察	124
5.5 結言	129
<b>6 アーキテクチャを基盤とする設計法の各種製品への展開における課題</b>	<b>131</b>
6.1 緒言	131
6.2 個別の設計法の製品種別への依存性と拡張における課題	131
6.3 多種展開の拡張に向けたアーキテクチャ設計の実装レベルと展開領域	133
6.4 アーキテクチャ概念の拡張に関連する設計法の研究動向	134
6.5 モジュールの多種展開を前提とする設計法への拡張における課題	137
6.5.1 顧客要求を起点とした拡張における課題	138
6.5.2 組立工程を起点とした拡張における課題	138
6.6 結言	139
<b>7 結論</b>	<b>143</b>
謝辞	145
研究論文・発表リスト	147



# 第 1 章

## 緒論

### 1.1 研究の背景と目的

製造業が創り出す各種の工業製品は今日の社会や生活において欠くことのできない人工物である。その実態には、そもそもの工業製品そのものが様々な部品などから構成されるシステムであること、それを市場に送り出すためのプロセスには多種多様な関係者が関与していることを受け、きわめて多岐にわたるものごとが関係している。近年、市場競争の激化や顧客要求の多様化を受け、様々な工業製品で設計開発の効率化が強く求められるようになってきている。これに対しては、(1) 機能要素の配列 (2) 機能要素の物理的な構成要素への対応付け (3) 物理的な構成要素間のインタフェースの仕様、を製品アーキテクチャと位置付け<sup>(1)</sup>、製品の機能間、構成要素間の相互関係に基づき独立性の高いモジュールに分割するように製品アーキテクチャを設計することにより、モジュール単位での設計開発や、モジュールの入れ替え・組み換えによる製品展開が行われてきている。しかし、社会や生活の成熟のもとで市場における工業製品へのニーズがますます多様化し個別化していることや、製品の構造や生産プロセスがさらに込み入ったものとなってきていることから、優れた工業製品を市場に送り出すためには、製品アーキテクチャ設計の焦点を製品の機能や実体から拡張し、より広範な視野で顧客要求の多様化や個別化に対応するための製品の多種展開のための設計を行うことが求められている。これを受けて本研究では、上述の定義による製品アーキテクチャを基本アーキテクチャと位置付け、その概念を拡張することにより製品の多種展開のための設計法に向けた考え方を提唱し、アーキテクチャの概念を顧客要求、組立工程への拡張と、製品の实体構造の具体への展開として、製品間で共通化され製品群展開の基盤となるプラットフォームの設計への拡張を行い、それぞれについて具体的な設計法を提案することを目的とする。

そもそも、工業製品に限らず、あらゆる人工物はそれが明示的に行われるかどうかは別にして、設計という過程を経てその実現に向けた計画が立案されたのちに、実現に向けた



取り組みがなされる。その意味において、人工物の優劣は設計の優劣に帰着すると言える。設計では、基本的には、要求される仕様に対して、利用可能なリソースや技術のもとで実現可能で最適な実体の像が策定される。工業製品の起源をどこに定めるかは容易なことではないが、仮に、手工業の時代に遡るとすれば、往時は職人が個々の要求に対して一品一品設計し生産するクラフト方式での製造が行われていたとみることができる。そのような製品も技術の進展のもとで徐々に高度化してくるが、高度化とは取りも直さずシステムとしての複雑化であり、部品数の増加や工程の複雑化に伴って、その社会や生活における有用性と価格面での入手可能性は折り合いがつかなくなってくる。この不整合を根本から解決したのはいわゆる大量生産方式である。大量生産方式では、設計や生産を統一化することにより、省力化を徹底するとともに、規格化を通じた効率化が図られ、品質の安定化や価格の低減などが可能になる。そのような方式は、フォードシステムを典型として、20世紀において、様々な工業製品が社会や生活の中に普及し浸透していくうえで、大きな役割を果たしたと言える。

大量生産方式の発達によって品質や価格面で優れた工業製品が普及し、社会全体の経済的発展に伴う所得の増加に伴い、消費者は次第に製品に新たな価値を求めようになってきた。それに呼応するように、工業製品の生産は、新たな価値を継続的に提供することを目指し、部分的に頻繁なモデルチェンジに対応可能な、より柔軟な大量生産への移行が求められるようになってきた<sup>(2)</sup>。近年、上述のような生産の多様性と工程の柔軟性への要求は、顧客要求の多様化や市場のグローバル化に伴いさらに高まりを見せており、妥当な価格で多様な製品を展開することを実現することが強く求められるようになってきている。しかしながら、生産方式を従来の方式を踏襲したままで少品種大量生産から多様な顧客要求に対応する多品種少量生産に移行すると、生産性が落ち、個々の製品について個別に設計を行い、個々の製品に対応する生産設備が必要になるため、設計や生産に要する時間やコストが増加してしまう<sup>(3)</sup>。細かな顧客要求に対応しながらも、なるべく速く安価に製品を提供するためには、単純に顧客からの個別要求仕様を受け入れるだけでなく、その多様な要求を柔軟にかつ効率的に受け入れることができるシステムが必要になってくる。そのための方策の1つとして、異なる製品の間である部分を共通化したり、異なる企業間でそのような部分を共有化したり、あるいは、製品のある部分を独立させてモジュール化したりすることが行われている<sup>(4)</sup>。例えば、自動車産業では、車種を超えた車台の共通化が行われたり、最近では、モジュール化が行われたりする動きが加速している<sup>(5)</sup>。また、航空機産業では、従来から、航空機エンジンのコア部分をターボプロップエンジンとターボファンエンジンで共通化することが行われていたり<sup>(6)</sup>、航空機の胴体部分をストレッチすることでより収容人数の大きい機体の設計がなされていたりする<sup>(7)</sup>。またこれらのほか、各種の産業用製品においては、製品のモジュール化を進め、受注を受けてから個々の顧客要求に

合わせてモジュールを組み替えたり、標準製品へモジュールを付加したりするカスタマイズを行うことによって、個別の要求仕様に的確に対応した製品を提供している<sup>(8)</sup>。

上述のような設計の効果は、製品の背後にあるモジュールや部品などの共通化や共有化を進めることで開発費や設備費をはじめとする各種の間接費の低減が可能となるだけでなく、製品のモジュール化を進めることでモジュールを入れ替えたり、取り除いたり、追加したりすることによって多様な製品展開を柔軟に行うことができることにある。多様な製品展開を行うことができれば、顧客要求への柔軟性が増し、顧客要求充足の可能性を高めることが可能になる。一方で、特に個別のカスタマイズを伴う製品においては、顧客に対して提供される選択肢が過剰になると、顧客が自らのニーズとそれらの選択肢との適合性が正しく把握できず、顧客がかえって混乱するマス・コンフュージョン (Mass-confusion) が引き起こされる恐れがある<sup>(9)</sup>。また、顧客要求への柔軟性を向上させるためには、製品をより細かな単位でモジュールに分割することが求められる一方で、過度に製品をモジュール化すると、組立が複雑になってしまうため、生産効率が低下してしまう<sup>(10)</sup>。このように、多種展開の製品設計においては複雑なトレードオフ関係が存在する。

製品設計においては、上述のような設計生産に関わる様々な制約・要求間に存在する相互の関係を包括的に捉えて、顧客の要求を満たす最適な設計解を探索することが求められる。しかし、これらの制約・要求は互いに影響を及ぼしあっており、それらが製品設計に及ぼす影響を具体的に把握して設計を進めることは非常に困難である。この課題に対しては、技術製品をシステムとしてとらえ、製品を構成する機能や部品といった要素とその要素間の依存関係で製品を表現し、それらの依存関係に基づいて、製品の分解と分析を行い、各依存関係を考慮した部分設計を繰り返すことで製品の全体設計を行う方法が取られている<sup>(11)</sup>。設計を部分問題へ分ける際の視点は、達成すべき目的によって異なるため、設計生産の各段階において異なる要素・異なる依存関係で製品が捉えられ、それぞれで部分設計へと設計が分割されている。

多種展開の観点からは、製品の物理的な動きや作用である物理機能とそれらの機能を実現するための実体構造、すなわち部品やモジュールなどの構成要素との対応関係を製品アーキテクチャと位置付け、これらの関係性を踏まえて製品を独立性の高いモジュールに切り分けることで、モジュールの入れ替えや追加によって柔軟な製品展開が可能になるとされている<sup>(1)</sup>。製品設計は、顧客要求を物理機能へ、物理機能を実体構造へとそれぞれ展開していくことで製品を具体化していくプロセスを踏むが、製品アーキテクチャ設計においては、顧客要求が元来曖昧なものであり、物理機能や実体構造と同列に扱い数理的に評価することが困難であることから、実務上は物理機能と実体構造のみを考えて製品アーキテクチャをモジュールに分割していた。しかし、製品アーキテクチャの設計は、製品設計プロセスの上流に位置し、顧客要求への柔軟性、製品カスタマイズの可能性、製造的な

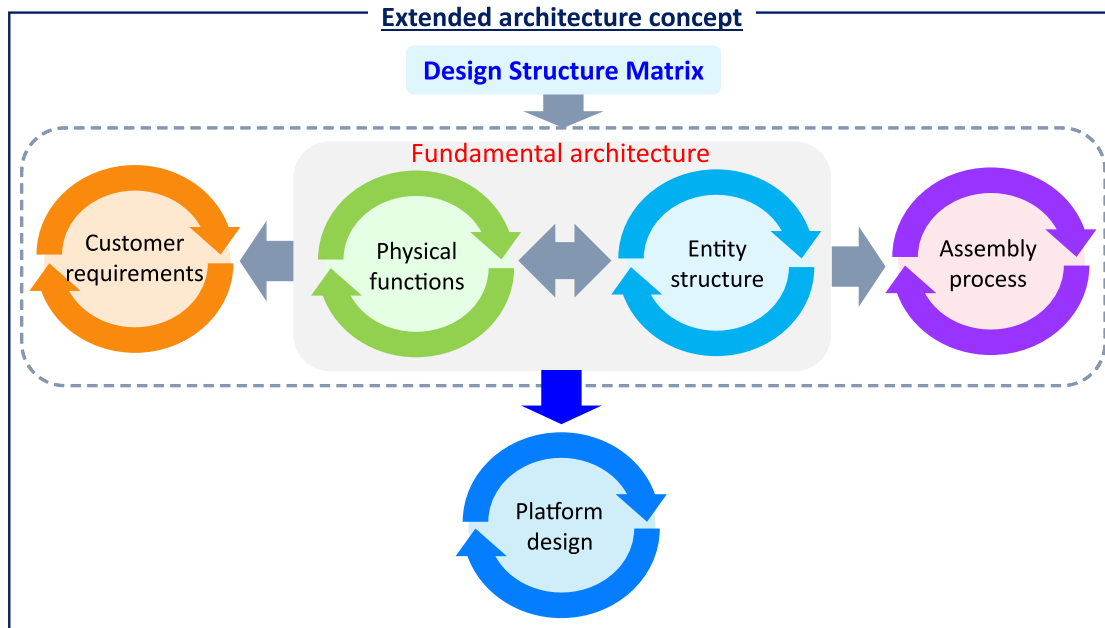


Fig. 1.1 Concept of product architecture for product variety deployment and its extension for enhancing its integrity.

ど多方面の領域へ影響を与える非常に重要なプロセスである。このため、製品アーキテクチャ設計の対象は基盤となる製品の物理機能と実体構造から拡張され、様々な関係領域を統合的に考慮して製品アーキテクチャを設計することが求められるようになってきている。しかし、製品アーキテクチャ設計に関する諸領域からはそれぞれ異なる要求が出されるため、全領域の要求を満たした製品アーキテクチャを設計することは、考えるべき内容が拡散してしまうことのみならず、設計作業そのものを過度に複雑化させてしまうことから、現実的ではない。このため、製品アーキテクチャ設計の目的に応じて、併せて考慮する領域を選択することが重要となる。さらに、技術の高度化により製品構造や製品の製造プロセス自体も複雑性を増しているために、関係領域の問題を構成する要素間の関係性も複雑化している。この課題に対しては、**Design Structure Matrix (DSM)**<sup>(12)</sup> や **Domain Mapping Matrix (DMM)**<sup>(13)</sup> といったツールを用いた製品アーキテクチャ設計が鋭意試みられている。これらの研究では、上記マトリクスにより製品アーキテクチャ設計に関与する領域内・領域間の関係性を記述し、それらの関係性をマトリクス上で分析・操作を行うことにより製品アーキテクチャの設計が行われてきている。

以上を踏まえて本論文は、図 1.1 に示すように、より広義の多種展開のためにアーキテクチャ概念を顧客要求・組立工程・プラットフォーム設計の3方面へ拡張し、そのもとの設計法が満たすべき要件を整理し、各方面について具体的設計法を提案することを目的

とする。この目的に対して具体的には、次の3点に取り組む。

### (1) 顧客要求への拡張とその設計法の構築

産業用製品などに代表されるモジュール組合せにより顧客ごとに異なる製品をカスタマイズして提供される製品における製品アーキテクチャ設計を考える。カスタマイゼーションを伴う多種展開品は、顧客要求の充足度を確保しながらカスタマイズの箇所数、候補数を適切に絞ることで、顧客の製品カスタマイズの難易度の抑制が可能になると見込まれる。これに対して、DSM および DMM を用いて物理機能・実体構造の依存関係に加えて、顧客データの分析から得られる顧客要求間の共起関係を統合した製品アーキテクチャ設計手法を構築する。

### (2) アーキテクチャ設計の組立工程への拡張とその設計法の構築

顧客ごとの製品カスタマイズは伴わないが、多様な製品種を顧客や販売店からの注文量に応じて生産する受注組立生産方式により生産される製品の製品アーキテクチャ設計に取り組む。多種展開品は顧客要求への柔軟性が求められる一方で、理想的には大量生産に近い効率で多種多様な製品を生産することが求められる。これに対しては、DSM および DMM を用いて顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係に加えて組立工程間の相互関係を統合した製品アーキテクチャ設計手法を構築する。

### (3) 製品の多種展開の基盤となるプラットフォームの設計法の構築

プラットフォームは、そこから展開される製品群における性能への影響を評価しながらプラットフォームの種類数・内容を決定することが求められる。一方で、プラットフォーム設計を行う設計の上流段階では、製品の性能を具体的に把握することが困難である。これに対して、簡易モデルを用いたプラットフォームの最適設計手法を構築する。

以上の製品アーキテクチャ設計手法およびその展開としてのプラットフォーム設計手法について、例題への適用を通じてそれぞれの有効性の検証を行う。

## 1.2 本論文の構成

以降の本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、製品仕様の多様化に起因する多種展開の課題について論じる。多種展開のもとでの製品アーキテクチャのモジュール化設計の必要性とその意義について述べ、それを踏まえて、多種展開に向けた製品アーキテクチャ概念の拡張と展開として、顧客要求、組立工程、プラットフォーム設計への拡張・展開を考え、それぞれに対しての課題を明らかにする。

第3章では、製品アーキテクチャ設計を顧客要求へ拡張する設計法の構築に取り組む。カスタマイゼーションを伴う多種展開品においては、幅広い顧客要求に対する柔軟性を確保しながらも、カスタマイゼーションの自由度を適度に抑え、顧客が容易に自身の要求に適合したモジュールを選択して製品を発注できるようにする必要がある。またこの場合、顧客要求を的確に反映した製品を構成するためには、製品受注の際の顧客要求の聞き取り方も重要となる。これに対して本章では、まず顧客データを分析して顧客要求間に存在する共起関係を明示化することにより顧客要求を構造化する手法を構築し、そのもとで従来の製品アーキテクチャ設計が対象としてきた製品の物理機能と実体構造の相互関係に加えて顧客要求間の共起関係をも包括する製品発注適正化のための製品アーキテクチャ設計手法と受注適正化のための受注プロセス設計法を構築する。さらに、産業用三軸直交ロボットの例題への適用を行い、手法の有効性について論じる。

第4章では、製品アーキテクチャ設計を組立工程へ拡張する設計法の構築に取り組む。多種展開品は顧客要求への柔軟性が求められる一方で、理想的には大量生産に近い効率で多種多様な製品を生産することが求められる。このため、顧客要求への柔軟性を確保しつつも、生産効率を向上することが重要であり、そのための方策として、製品の組立性を向上させることにより、製品をより短時間で生産可能にすることが有効であると考えられる。この考えのもと、本章では、製品の顧客要求から組立工程までの相互関係を包括する製品アーキテクチャ設計手法と、組立工程における相互関係の明示化手法を合わせて構築する。さらに、家庭用エアコンディショナー（以下では、「エアコン」と略称する）の例題に適用し、その有効性について論じる。

第5章では、多種展開品における製品群展開の基盤としてのプラットフォームの設計について取り上げる。プラットフォームは、それに基づき展開される製品群全体で性能の過不足が生じないように、種類数や仕様を決定する必要がある。このためには、設計の上流段階で性能への影響を把握することが重要である。上記の点を踏まえて本章では、プラットフォームの設計問題に対する最適化計算法を構築し、最適化計算においては製品の支配的な特徴に的を絞った簡易的な性能の評価モデルを用いることとする。さらに、第3章同様に産業用三軸直交ロボットの例題へ適用し、様々な条件設定のもとで最適化計算を行うことで、性能の評価指標間のトレードオフ関係を把握できることを検証する。

第6章では、第3章から第5章で構築したアーキテクチャ設計法が特定の製品種別を前提としたものであることを製品の生産方式を基軸として系統的に整理した上で、幅広い製品種へと適用可能な汎用的な多種展開のための設計法を構成する上での課題について、関連の研究動向を参照しながら論じる。

第7章では、本論文の結論を述べる。

## 参考文献

- (1) Ulrich, K., The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm, *Research Policy*, Vol. 24, No. 3 (1995), pp. 419–440.
- (2) Hounshell, D. A., *From the American System to Mass Production, 1800-1932* (1984), Johns Hopkins University Press, (和田一夫, 金井光太郎, 藤原道夫 (訳), アメリカン・システムから大量生産へ 1800-1932 (1998), 名古屋大学出版会).
- (3) 片野浩一, マス・カスタマイゼーション戦略のメカニズム—個客対応マーケティングの実践と成果 (2007), 白桃書房.
- (4) 藤田喜久雄, 石井浩介, 製品系列統合化設計とそのタスク構造, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 629 (1999), pp. 416–423.
- (5) 日野三十四, [実践] モジュラーデザイン—時代が求めていた新しい解— (2009), 日経 BP 社.
- (6) Oakley, M. (ed.), *Design Management: A Handbook of Issues and Methods* (1990), Blackwell.
- (7) Sabbagh, K., *Twenty-First Century Jet: The Making and Marketing of the Boeing 777* (1996), Scribner.
- (8) 澤井伽奈, 野間口大, 藤田喜久雄, 顧客ニーズ・物理機能・実体構造の連鎖型デザイン・ストラクチャー・マトリクスによるモジュール化設計法, 日本機械学会第 26 回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2016), Paper No. 2209.
- (9) Huffman, C. and Kahn, B. E., Variety for Sale: Mass Customization or Mass Confusion?, *Journal of Retailing*, Vol. 74, No. 4 (1998), pp. 491–513.
- (10) AlGeddawy, T., Samy, S. N. and ElMaraghy, H., Best Design Granularity to Balance Assembly Complexity and Product Modularity, *Journal of Engineering Design*, Vol. 28, No. 7-9 (2017), pp. 457–479.
- (11) Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. and Grote, K. H., *Engineering Design –A Systematic Approach–*, third edition (2007), Springer, (金田徹, 他 (訳), エンジニアリングデザイン—工学設計の体系的アプローチ, 第 3 版 (2015), 森北出版).
- (12) Eppinger, S. D. and Browning, T. R., *Design Structure Matrix Methods and Applications* (2012), MIT Press.
- (13) Danilovic, M. and Browning, T., Managing Complex Product Development Projects with Design Structure Matrices and Domain Mapping Matrices, *International Journal of Project Management*, Vol. 25, No. 3 (2007), pp. 300–314.



## 第 2 章

# アーキテクチャ概念と製品の多種展開に向けた 拡張の必要性

### 2.1 緒言

本章では、製品仕様の多様化に起因する多種展開の課題と製品アーキテクチャの関係について論じる。それを踏まえて、多種展開のもとでの製品アーキテクチャのモジュール化設計の必要性とその意義について述べる。最後に、本論文で取り組む多種展開に向けた製品アーキテクチャ概念の拡張と展開として、顧客要求、組立工程、プラットフォーム設計への拡張・展開を考え、それぞれに対する課題を明らかにする。

### 2.2 製品アーキテクチャと多種展開のための設計における課題

#### 2.2.1 製品アーキテクチャとその意義

Ulrich<sup>(1)</sup>によると製品アーキテクチャは、次のように定義される。

- (1) 機能要素の配列
- (2) 機能要素の物理的な構成要素への対応付け
- (3) 物理的な構成要素間のインタフェースの仕様

さらに、Ulrich<sup>(1)</sup>はこの製品の機能要素と実体構造の対応関係を製品アーキテクチャとし、機能要素の実体構造への割り当て方によって、インテグラルアーキテクチャとモジュラーアーキテクチャと呼ばれる 2 種類への製品アーキテクチャの分類を定義した。インテグラルアーキテクチャは、図 2.1 (a) に示すように機能要素と実体構造の対応関係が入り組んでいる製品アーキテクチャである。実体構造における構成要素間のすり合わせにより高い性



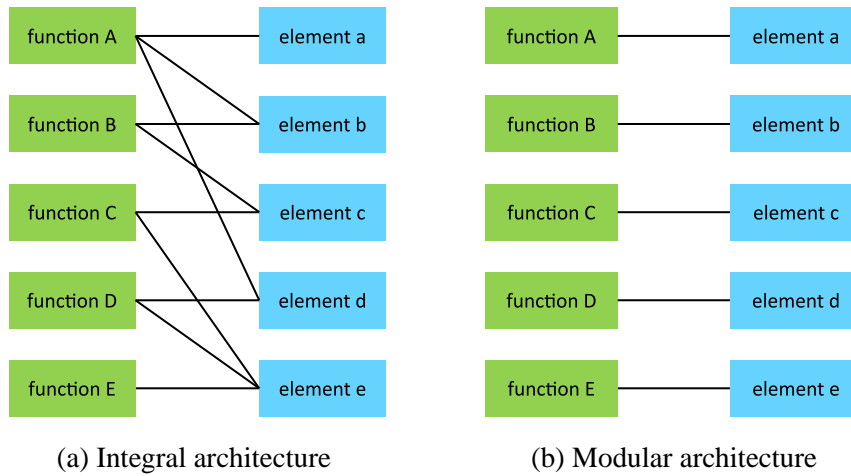


Fig. 2.1 Types of product architecture.

能を発揮しうるが、ある物理機能を実現するために多数の構成要素が関係しているため、製品の物理機能を変更するためには実体構造において関係する構成要素および構成要素間の調整などにおいて多数の変更が求められることから、顧客要求に対する柔軟性には欠ける。一方、モジュラーアーキテクチャは、図 2.1 (b) に示すように機能要素と実体構造が 1 対 1 対応となった製品アーキテクチャである。互いに独立性の高い部分実体を持つため、実体構造を入れ替えることにより製品の物理機能を容易に変更可能であることから、適切なアーキテクチャを導入できれば、多様な顧客要求に対して柔軟な対応が可能になる。近年、市場のグローバル化や顧客要求の多様化に伴い、製造企業は顧客要求に対して柔軟に対応した製品を迅速に提供することがより強く求められるようになってきている。このため、コストを抑えつつ多様な製品バラエティを生み出すための方策として、製品アーキテクチャのモジュール化設計が注目されている。

製品アーキテクチャをモジュール化する際には、モジュール内の構成要素間や物理機能間の相互関係は比較的大きく、モジュール間の相互関係は比較的小さくなるようにすることが推奨されている<sup>(2)</sup>。このような製品アーキテクチャを設計するにあたっては、様々な手法が開発されてきており、そのうちの 1 つとして、システム設計のツールとして用いられていた **Design Structure Matrix (DSM)**<sup>(2)</sup> がある。DSM には、構成要素間の情報・物質・力・エネルギーのやりとりや物理的隣接関係を相互関係として記述する。それらの相互関係を分析・操作することによって、DSM 上で数理的に製品アーキテクチャのモジュール化を行うことができる。

製品アーキテクチャの設計は、製品の設計生産プロセスの上流に位置し、製品の変更、製品展開、部品の共通化、性能、製造性など多方面の領域に密接に関与している<sup>(3)</sup>。このため、製品アーキテクチャ設計はその対象を物理機能と実体構造における関係性のみならず、

様々な関係領域における関係性をも統合的に考慮して製品アーキテクチャを設計することが求められるようになってきている。製品アーキテクチャ設計に関係する諸領域からはそれぞれ異なる要求が出されるため、各領域に適した視点で製品システムを分解・分析し、それぞれの視点における製品システムをすり合わせる必要がある。これに対しては、複数のDSMを用いて各視点における製品システムの要素間の相互関係として記述し、Domain Mapping Matrix (DMM)<sup>(4)</sup>を用いて、それらのDSMを統合することで、各視点における重要な関係性を包括して製品アーキテクチャを設計する試みが鋭意行われている。しかし、全領域の要求を満たした製品アーキテクチャを設計することは、考えるべき内容が拡散してしまうことのみならず、設計作業そのものを過度に複雑化させてしまうことから、現実的ではない。このため、DSMやDMMを用いるとしても、実際には設計対象とする製品に合わせて、考慮する領域を選択する必要がある。なお、DSM・DMMの基本については、改めて2.3.1項で整理する。

### 2.2.2 民生用製品における少品種大量生産から多品種少量生産への流れ

技術製品はその時々々の技術や消費者の価値観・要求などを取り込みながら、生産形態を次第に変えてきており、古くは、顧客個人々の要求に対応する製品を、職人が一品設計・生産するクラフト方式によるものづくりが行われていた。やがて技術発展により、製造工程が機械化され部品の加工精度が上がるにしたがって、同一の製品を繰り返し生産できるようになると、生産する品種を絞った一品種大量生産による大幅なコスト低減を達成することによって、価格面に優れた安価な製品が生産されるようになった。しかし、次第に消費者の嗜好の変化や所得の増加によって、部分的に頻繁なモデルチェンジに対応可能なより柔軟な大量生産が求められるようになり、製品の生産形態はその様相を次第に変えていった。例えば、自動車産業においては、初期には熟練工が製造・組立を行うクラフト的方式による生産が行われていたが、1910年代にフォード社が工場に移動式組立ラインを導入することにより一品種大量生産を実現し自動車の価格を大幅に下げ、さらに1920年代末にゼネラルモーターズ社が複数モデル間、新旧モデル間の部品共通化を行うことにより、ややフレキシブルな生産ラインを実現している<sup>(5)</sup>。このクラフト的方式、一品種大量生産、柔軟な大量生産製品の3段階の変遷において、生産の多様性と工程の柔軟性は第1段階と第3段階で高いが、前者は標準化を伴わない多様性・柔軟性であるのに対して、後者は製品設計や工程設計の標準化を経た上での多様性・柔軟性である<sup>(6)</sup>。

近年、上述のような生産の多様性と工程の柔軟性への要求は、顧客要求の多様化や市場のグローバル化に伴いさらに高まりを見せている。家電製品などに代表される多くの民生用製品においては、地域別や性能別の多様なモデルを、設計生産やサプライチェーンの効率化による小ロット生産を実現して生産可能にしている。また一部の製品では、製品をモ

ジュール化してモジュールの組み替えによって顧客ごとに異なる製品をカスタマイズして提供する受注生産が行われている。例えば、腕時計メーカーの Swatch は、腕時計の文字盤や針、腕輪などの形状を統一的なものにすることで組み合わせ的に多様な製品展開を可能にしている<sup>(7)</sup>。また、コンピュータメーカーの Dell は、顧客の注文を受けてから、注文内容に応じて主要部品を組み合わせてコンピュータを提供している<sup>(8)</sup>。以上のように、民生用製品は、時を経るにしたがって設計生産の効率化とともにその生産形態を少品種大量生産から多様な顧客要求に対応可能な多品種少量生産へと転換してきており、現在では多品種少量生産が主流になってきている。

### 2.2.3 産業用製品におけるカスタマイゼーションを伴う多種展開の必然性と課題

産業用製品における製品展開の様相は、前項で述べた民生用製品のそれとはやや異なる。産業用製品は、需要量が民生用製品と比較して少ないながらも、それぞれの顧客要求に対して的確に応じることが民生用製品以上に求められる製品である。このため、多くの産業用製品は、生産者が顧客の要望を想定して設計した製品を一般市場に投入し、顧客がそれを購入する形式ではなく、一般市場を介さずに生産者と顧客が直接取引をし、顧客の細かな要望に合わせた製品を受注に応じて個別に生産して提供されている<sup>(9)</sup>。そのような製品においては、設計生産の効率化のために 2.2.1 項で述べたように製品のモジュール化を進め、受注を受けてから個々の顧客要求に合わせてモジュールを組み替えたり、標準製品へモジュールを付加したりして個別に製品を提供する注文仕様生産 (Configure-to-Order, CTO) の方式がとられる。前項での Dell の事例<sup>(8)</sup>のように、上述のようなカスタマイゼーションを伴う受注生産は民生用製品でも行われている。しかし、特に産業用機械などの規模の大きい産業用製品になると、民生用製品と比較するとカスタマイゼーションの自由度を大きくする必要がある。

モジュールの単位を小さくしたりモジュールの種類数を多くしたりすると、より緻密なカスタマイズが可能となるため、顧客要求への柔軟性は向上する。一方でカスタマイズ製品では、細かな顧客の要望に対応しようとする、顧客の要求に過剰に反応してしまった結果として、行き過ぎたカスタマイゼーションを引き起こす可能性が存在する<sup>(10)</sup>。具体的には、カスタマイズ製品において、顧客に対して提供される選択肢が過剰になると、顧客が自らのニーズとそれらの選択肢との適合性が正しく把握できず、顧客がかえって混乱するマス・コンフュージョン (Mass-confusion) が引き起こされる恐れがある<sup>(11)</sup>。結果として、顧客が適切な選択を行えず本質的に望んでいる製品を手になかなかたり、あるいは売り手側でも受注の対応が困難になったりするなど、顧客の不満とビジネスとしての採算悪化を招く恐れがある。産業用製品においては、注文仕様生産はカスタマイゼーションが最終組立工程の直前で実施されるため、他の生産方式と比較して容易にオプションを増や

すことができることから、マス・コンフィュージョンに陥りやすい。

#### 2.2.4 製品構造と製造プロセスの複雑化を受けた多種展開の課題

多種展開の目的は、少品種大量生産並みの生産効率で個別受注生産のように個々の顧客要求を反映した製品を提供することにある。このためには、展開する製品種を増やす際に付随して発生する、製品の顧客・技術・製造などの設計生産に関わる様々な領域からの制約・要求を包括的に考慮する必要がある。またその上で、顧客の要求を満たす最適な設計解を探索することが求められる。しかし上述の設計生産に関わる様々な領域からの制約・要求は互いに独立して考えることができるものではなく、それらは相互に影響を及ぼしあっている。さらに、近年の機械製品は技術の高度化により製品構造がより複雑になってきており、その製品構造の複雑化を受けて、製造プロセスも複雑性を増してきている。このため、設計上の決定や変更が、上述のような設計生産に関わる様々な制約・要求に対して、具体的にどのような影響を及ぼすかが一見して予測し難くなっている。したがって、関係する領域からの制約・要求の全てを包括した製品の全体設計は非常に困難なものになっている。

#### 2.2.5 多種展開のもとでのモジュール化の必要性

多種多様な製品において多種展開が行われるようになってきている一方で、生産方式を従来の方式を踏襲したままで少品種大量生産から多様な顧客要求に対応する多品種少量生産に移行すると、個々の製品について個別に設計を行い、個々の製品に対応する生産設備が必要になるため、設計や生産に要する時間やコストが増加してしまう<sup>(10)</sup>。これに対しては、製品をモジュール化し、製品間でのモジュールの共通化により開発費や設備費をはじめとする間接費を削減したり、モジュールの組合せにより多様な製品を柔軟に提供したりすることで、コストを抑えながら多種展開を実現することが有望な方策とされている。

Jiao et al.<sup>(12)</sup> はモジュール性には「機能的モジュール性 (Functional modularity)」「技術的モジュール性 (Technical modularity)」「物理的モジュール性 (Physical modularity)」の3種があるとしている。このうち、「機能的モジュール性」は顧客のグループ化を考慮し、設計生産に要するコストを抑えながらも顧客要求に柔軟に対応した製品を展開できるように機能的な視点からモジュール化を行う。「技術的モジュール性」と「物理的モジュール性」はそれぞれ技術的実現可能性と製造性に主眼を置いた視点であり、技術的観点からモジュール性を考えてモジュール化を行うと、モジュール単位での設計開発が可能になることから、その要素技術の高度化が見込まれる。また、製造性からモジュール性を考えると、モジュール単位でのサブ組立の実現や材料別のモジュール化により製造や組立の効率化が行える。このように、モジュール化は単純に顧客要求に対する柔軟性を増すだけでなく、製品や製

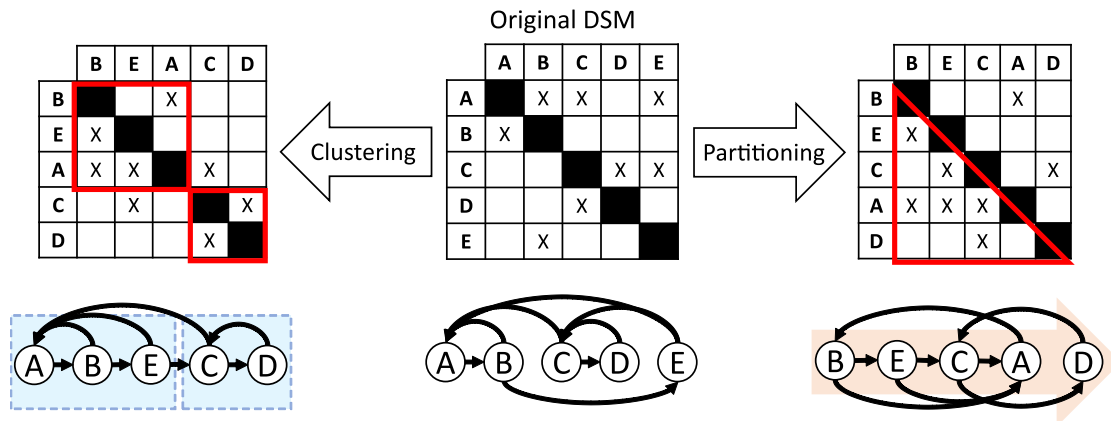


Fig. 2.2 Design structure matrix analysis methods.

造プロセスが高度化、複雑化するなかで効率的な多種展開を行うためには必須の考え方となってきた。

## 2.3 多種展開に向けた製品アーキテクチャ概念の拡張と展開

### 2.3.1 アーキテクチャ設計と Design Structure Matrix

DSM は  $N$  個のシステム要素間の相互関係を  $N$  行  $N$  列の正方マトリクスで表現したものであり、主に設計の上流段階において複雑なシステムに対する解析やマネジメントのためのツールとして用いられる<sup>(2)</sup>。図 2.2 に、有向グラフで示す 5 個の要素から構成されるシステムを表現した DSM モデルを示す。DSM を記述する際には、行または列の一方を入力、他方を出力と定め、適切に設定した情報伝達の視点のもとで構成要素とその相互関係の有無を記入する (図 2.2 の例は行に入力を持つ)。DSM は目的に応じた分析をする必要があり、分析手法にはクラスタリングとパーティショニングという 2 つの代表的な手法がある。クラスタリングは、図 2.2 左部に示すように相互関係のあるシステム要素を集めて部分集合 (クラスタ) をつくる分析手法であり、クラスタの外側にある相互作用の数・大きさとクラスタ内の相互作用の数・大きさを評価する評価関数を構築し、前者は小さく、後者は大きくなるように DSM の要素を並び替えていくことでクラスタリングが行われる。一方パーティショニングは、図 2.2 右部に示すようにシステム要素の設計順序を入れ替えることで分析を行い、マトリクスの上三角または下三角の領域の相互関係をなるべく減らすことでタスクの繰り返し数を小さくする。

DSM は 1960 年代から 80 年代にかけて、Steward<sup>(13)</sup> などが主に設計タスクや設計変数間の相互関係を記述しシステム設計に有用な手法として用いていた。1990 年代になると、

	A	B	C	D	E	a	b	c	d	e	f			
A		X				X	X							
B	X		X	X				X						
C							X				X			
D					X				X					
E		X								X				
a							X	X						
b							X		X			X		
c								X						
d													X	
e												X		
f													X	X

Fig. 2.3 Relationship among DSMs and a DMM which constitute a MDM.

DSMは複雑なシステムの設計開発プロジェクトにおける設計タスク（プロセスアーキテクチャ）、組織構造（組織アーキテクチャ）などの解析・マネジメントへと用途が広がり、設計タスクや設計チーム間の相互作用を記述したDSMを用いられるようになった<sup>(14)-(17)</sup>。同時期にUlrich and Eppinger<sup>(7)</sup>やUlrich<sup>(1)</sup>により、製品アーキテクチャ設計の考え方が提唱されると、DSMは製品アーキテクチャの代替案生成のための有効なツールとして活用されるようになり、ドメインとして製品の構成要素や機能要素を採用し、それらの相互関係を記述した製品アーキテクチャDSMが用いられるようになった。

DSMの適用対象が広がるにしたがって、異なるドメイン間の相互関係が注目されるようになり、製品アーキテクチャDSMは、複雑な製品開発プロジェクトにおいて他のアーキテクチャのDSMと関連付けて用いられるようになった。Sosa et al.<sup>(18),(19)</sup>は製品アーキテクチャが組織アーキテクチャに影響を与えることを示唆し、Browning<sup>(20)</sup>やEppinger<sup>(21)</sup>らは製品開発プロジェクトにおいて製品アーキテクチャ、組織アーキテクチャ、プロセスアーキテクチャが互いに影響を及ぼしあっていることを示した。これらの研究では、DSMを用いて各アーキテクチャ間の相互関係を横断的に分析することで製品開発プロジェクトのマネジメントに活用している。このように、DSMは複数のドメインの相互関係の分析ツールとして拡張された。Danilovic and Browning<sup>(4)</sup>は、図2.3に示すように、異なるドメインのDSMの要素間の対応関係を記述するためのツールとして、Domain Mapping Matrix (DMM)と呼ばれる矩形マトリクスを提案し、DMMで連結された拡張DSMをMulti Domain Matrix (MDM)<sup>(22)</sup>と名付けた。

DSMに基づく製品アーキテクチャ設計方法論の黎明期においては、新規的な製品の製品アーキテクチャ設計では製品の物理機能に対する技術解が定まっていなかったため物理機能をドメインとして用い、物理機能に対する技術解がある程度定まっている製品の製品アーキテクチャ設計では構成要素をドメインとして用いるとされていた<sup>(3)</sup>。しかし、DMMが提案されてからは、異なるドメインのアーキテクチャを横断的に分析することで、単一ドメインからの分析のみでは得られない情報を統合して、より革新性の高い製品アーキテクチャや高性能な製品アーキテクチャを設計する試みがなされるようになった。Gorbea et al.<sup>(23)</sup>やBonjour et al.<sup>(24)</sup>は製品の物理機能と構成要素をドメインとしたMDMを用い、Deubzer and Lindemann<sup>(25)</sup>は製品の物理機能を機能間の流れ、機能の状態の2つのドメインとして分割し、その物理機能に関する2ドメインと構成要素をドメインとするMDMを用いて製品アーキテクチャ設計を行っている。以上のように、MDMにより複数のドメインを横断的に分析して製品アーキテクチャ設計が行われるようになってきている。製品アーキテクチャ設計においては設計対象とする製品に合わせて、考慮する領域を選択する必要がある。同様に、複数ドメインのDSMを統合する製品アーキテクチャ設計に際しても、ドメインとして用いる領域や適用する分析方法を適切に選択することが設計者には求められる。しかし、MDMの運用方法や分析技術はまだ展開が始まったばかりなこともあり、ドメインや分析手法の選択における指針は明確にはされていない。

### 2.3.2 アーキテクチャ設計の顧客要求への拡張とその設計の課題

製品のアーキテクチャ設計にあたって、モジュールの単位を大きくすれば顧客の発注における難易度を抑制することが期待できるが、それに際しては、大きくなるモジュールがなるべく顧客要求への対応における柔軟性を損なわないようにすることも必要である。ここで、顧客要求の全体的な傾向を考えた場合に、「Aという要求を持つ顧客はBという要求も持ち合わせている場合が多い」といったように、個々の顧客が持つ要求の集合内に多くの顧客において共通する組合せが存在すれば、その共通する要求の組合せに対応する製品の構成要素を同じモジュールに統合しカスタマイズ箇所を減らしたとしても、顧客要求への柔軟性の低下は抑えながらも顧客にとっての選択の容易さを向上させることが可能になると考えられる。また、このような関係を考慮して受注手順を設計すれば、顧客が持つ要求同士の競合の影響を緩和して受注を行うことが可能になると考える。もちろん、製品アーキテクチャ設計において顧客要求間の関係のみに基づいてモジュール化を行った場合、技術的にも製造上も実現不可能な製品アーキテクチャになる。このことから、物理機能・実体構造の依存関係をも含めて一括して考えることが必須である。これに対して、顧客要求間の共起関係をデータ分析手法により明示化し、その関係を記述したDSMと物理機能・実体構造の依存関係を記述したDSMをDMMにより連鎖させたMDMのクラスタリング

を行うことにより、顧客要求・物理機能・実体構造を統合する製品アーキテクチャの設計法を構築することを考える。また、同時に、顧客要求の DSM にパーティショニングを適用することにより、受注プロセスの設計を行う手法を構築する。

### 2.3.3 アーキテクチャ設計の組立工程への拡張とその設計の課題

多種展開品においては、顧客要求に対応した製品展開を行うことに加え、大量生産並みの生産効率を実現するために、生産速度の向上が求められる。そのため、モジュールの構成に応じた適切な部品の組立工程を設計したり、組立性を考慮して製品アーキテクチャのモジュール化を行ったりといった、製品アーキテクチャと組立工程の相互関係を考慮した製品アーキテクチャと組立工程の設計を行うことが求められる。多種展開製品においては、モジュールの粒度を小さくすると、より緻密なカスタマイゼーションが可能となり、顧客要求への柔軟性は向上する。一方で、製造性の観点からは、組立の複雑性と製品のモジュール性はトレードオフの関係にあり<sup>(26)</sup>、モジュールの粒度が小さくなるほど組立工程が複雑になって、製造コストが増加してしまうという問題がある。これに対しては、顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係に加えて組立工程間の相互関係を DSM・DMM を用いて統合することにより、製品アーキテクチャと組立工程の統合設計手法を構築する。

### 2.3.4 アーキテクチャのもとでのプラットフォーム設計の課題

これまでの内容を踏まえると、製品の設計を進めるためには、まず、前提となる製品全体を規定するシステム構造の基盤を定める必要がある。その上で、具体的な製品群を展開するためには、製品間でプラットフォームとして共通化される部分を決定することが求められる。そのもとで、複数の製品で横断的に用いられるモジュール群を用意し、それらを組み合わせたり、あるいは、モジュールを組合せた部分にそれ以外の部分を個別に設計して合わせたりすることによって、個々の製品を構成することができる。例えば、自動車産業では、車種を超えた車台の共通化やモジュールの組み合わせを行い多様な製品展開が行われている<sup>(27)</sup>。また、航空機産業では、航空機の胴体部分の直径を共通化し長さ方向にはストレッチすることでより収容人数の大きい機体の設計がなされていたりする<sup>(28)</sup>。

このように、プラットフォームとモジュールや個別設計部分の組み合わせによって顧客に提供される製品の品揃え（ラインアップ）が編成されるが、そのラインアップが適切かどうかについては市場に存在する顧客要求の分布とラインアップに含まれる個々の製品の要求仕様との対応関係のもとで定まる。共通プラットフォームのもとで展開される製品は、当然従来の単一製品に対する設計よりも性能・デザインの面で多少の劣化が起こるはずである。そのため、特にカスタマイゼーションを伴う多種展開製品のように非常に多様な顧客要求に対する的確に応えた製品提供を求められる場合には、共通化される部分を数種類



準備しておき、それらの中から顧客要求に最も的確に対応できるものを選択できるようにしておくことが重要となる。

## 2.4 結言

本章では、製品仕様の多様化の動向を分析し、製品仕様の多様化に起因する多種展開の課題と製品アーキテクチャの関係について論じた。この議論を踏まえて、多種展開のもとの製品アーキテクチャのモジュール化設計の必要性とその意義について述べた。最後に、本論文で取り組む多種展開に向けた製品アーキテクチャ概念の拡張と展開として、顧客要求、組立工程、プラットフォーム設計への拡張・展開を考え、それぞれに対する課題を明らかにし、DSMおよびDMMと数理最適化によるそれぞれに対する設計法の構築の方針について述べた。

## 参考文献

- (1) Ulrich, K., The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm, *Research Policy*, Vol. 24, No. 3 (1995), pp. 419–440.
- (2) Eppinger, S. D. and Browning, T. R., *Design Structure Matrix Methods and Applications* (2012), MIT Press.
- (3) Pimmler, T. U. and Eppinger, S. D., Integration Analysis of Product Decompositions, in *Proceedings of ASME Conference on Design Theory and Methodology*, Vol. 68 (1994), pp. 343–351.
- (4) Danilovic, M. and Browning, T., Managing Complex Product Development Projects with Design Structure Matrices and Domain Mapping Matrices, *International Journal of Project Management*, Vol. 25, No. 3 (2007), pp. 300–314.
- (5) Hounshell, D. A., *From the American System to Mass Production, 1800-1932* (1984), Johns Hopkins University Press, (和田一夫, 金井光太郎, 藤原道夫 (訳), アメリカン・システムから大量生産へ 1800-1932 (1998), 名古屋大学出版会).
- (6) 藤本隆弘, 生産システムの進化論 –トヨタ自動車にみる組織能力と創発プロセス– (1997), 有斐閣.
- (7) Ulrich, K. and Eppinger, S. D., *Product Design and Development*, sixth edition (2016), McGraw Hil.
- (8) Anderson, D. M., *Build-to-Order & Mass Customization; The Ultimate Supply Chain*

- Management and Lean Manufacturing Strategy for Low-Cost On-Demand Production without Forecasts or Inventory* (2008), CIM Press.
- (9) 澤井伽奈, 野間口大, 藤田喜久雄, 製品系列設計における顧客ニーズ・物理機能・実体構造の相互関係とそれらを包括する設計手法の課題, 日本機械学会第25回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2015), Paper No. 2207.
  - (10) 片野浩一, マス・カスタマイゼーション戦略のメカニズム-個客対応マーケティングの実践と成果 (2007), 白桃書房.
  - (11) Huffman, C. and Kahn, B. E., Variety for Sale: Mass Customization or Mass Confusion?, *Journal of Retailing*, Vol. 74, No. 4 (1998), pp. 491-513.
  - (12) Jiao, R. J., Simpson, T. W. and Siddique, Z., Product Family Design and Platform-Based Product Development: a State-of-the-Art Review, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 18, No. 1 (2007), pp. 5-29.
  - (13) Steward, D. V., The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. EM-28, No. 3 (1981), pp. 71-74.
  - (14) Gebala, D. A. and Eppinger, S. D., Methods for Analyzing Design Procedures, in *Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference* (1991), pp. 199-204.
  - (15) Eppinger, S. D., Whitney, D. E., Smith, R. P. and Gebala, D. A., A Model-Based Method for Organizing Tasks in Product Development, *Research in Engineering Design*, Vol. 6, No. 1 (1994), pp. 1-13.
  - (16) McCord, K. R. and Eppinger, S. D., Integration Problem in Concurrent Engineering, *MIT Sloan School of Management Working Paper*, No. 3594 (1994), pp. 1-13.
  - (17) Eppinger, S. D., A Planning Method for Integration of Large-Scale Engineering Systems, in *Proceedings of the International Conference on Engineering Design* (1997), pp. 227-233.
  - (18) Sosa, M. E., Eppinger, S. D. and Rowles, C. M., Designing Modular and Integrative Systems, in *Proceedings of ASME 2000 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (2000), Paper No. DETC2000/DTM-14571.
  - (19) Sosa, M. E., Eppinger, S. D. and Rowles, C. M., Identifying Modular and Integrative Systems and Their Impact on Design Team Interactions, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 125, No. 2 (2003), pp. 240-252.

- (20) Browning, T. R., Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 48, No. 3 (2001), pp. 292–306.
- (21) Eppinger, S. D., Patterns of Product Development Interactions, in *Proceedings of the International Conference on Engineering* (2001), pp. 21–23.
- (22) Maurer, M. S., *Structural Awareness in Complex Product Design*, Doctoral thesis, Technische Universität München (2007).
- (23) Gorbea, C., Spielmannleitner, T. and Lindemann, E., U. and Fricke, Analysis of Hybrid Vehicle Architectures Using Multiple Domain Matrices, in *Proceedings of 10th International Design Structure Matrix Conference* (2008), pp. 387–375.
- (24) Bonjour, E., Samuel, D. and Micaëlli, J., A Method for Jointly Drawing Up the Functional and Design Architectures of Complex Systems during the Preliminary System-Definition Phase, *Journal of Engineering Design*, Vol. 24, No. 4 (2013), pp. 305–319.
- (25) Deubzer, F. and Lindemann, U., Product Architecture Definition and Analysis Using Matrix-Based Multiple-Domain Approaches, in *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (2009), pp. 1197–1205.
- (26) AlGeddawy, T., Samy, S. N. and ElMaraghy, H., Best Design Granularity to Balance Assembly Complexity and Product Modularity, *Journal of Engineering Design*, Vol. 28, No. 7-9 (2017), pp. 457–479.
- (27) 日野三十四, [実践] モジュラーデザイン –時代が求めている新しい解– (2009), 日経BP社.
- (28) Sabbagh, K., *Twenty-First Century Jet: The Making and Marketing of the Boeing 777* (1996), Scribner.

## 第3章

# アーキテクチャ設計の顧客要求への拡張とその設計法

### 3.1 緒言

本章では、製品アーキテクチャ設計を顧客要求へ拡張する設計法の構築に取り組む。具体的には、カスタマイゼーションを伴う多種展開製品のためのアーキテクチャ設計を取り上げ、顧客要求間の共起関係に着目し、製品の顧客要求・物理機能・実体構造の共起関係・依存関係・対応関係を包括する製品アーキテクチャ設計法と、顧客要求間の共起関係に基づく受注プロセス設計法を構築する。ここでいう顧客要求間の共起関係とは、「Aという要求を持つ顧客はBという要求も持ち合わせている場合が多い」などの、ある顧客要求の組み合わせが多くのお客様において発生する関係にあることを指す。製品の顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係を包括する製品アーキテクチャ設計法の構築にあたっては、それぞれの共起関係・依存関係を記述したDSMをDMMで連鎖させたMDMに対して、記述されている相互関係を統合的に考慮してクラスタリングを行う手法を構築する。受注プロセス設計法の構築にあたっては、上記クラスタリングを適用された顧客要求DSMを対象としたパーティショニング手法を構築する。

さらに、産業用三軸直交ロボットを例題として取り上げ、構築した製品アーキテクチャ設計法と受注プロセス設計法を適用する。これにより得られた製品アーキテクチャ設計結果と受注プロセス設計結果を分析することを通じて、手法の有効性を検証する。

### 3.2 カスタマイゼーションを伴う製品の受発注における課題

#### 3.2.1 発注における課題

自動車やパソコンのような一部の民生用製品や、産業用ロボットや工作機械のような汎用産業用製品などは、製品アーキテクチャを独立性の高いモジュールの集合によって構成

されるモジュラーアーキテクチャにしておき、個々の顧客の注文に応じて部分的あるいは全体的にモジュールを組み合わせるカスタマイズにより製品を構成することが行われており、個々の顧客要求を迅速かつ安価に、つまり、的確に反映した製品提供を可能になっている。多種多様な顧客要求に対応することが求められる製品では、顧客要求への柔軟性を上げるために製品アーキテクチャを小さい単位でモジュール化し、より細かな部位までモジュール組み換えによるカスタマイズを可能とすることが求められるが、カスタマイズ箇所が過剰になるとマス・コンフィュージョンを引き起こす恐れがあるため、顧客の製品カスタマイズにおける選択の難易度を考慮して適切なレベルで製品アーキテクチャのモジュール化を行う必要がある。

製品アーキテクチャのモジュール化に関して、Zamirowski and Otto<sup>(1)</sup> や Dahmus et al.<sup>(2)</sup> は異なる顧客グループに共通する物理機能に着目してモジュール化を行っているが、これらはいずれもカスタマイゼーションを伴わない多種展開を前提としたものになっており、本研究で対象とする多種多様な要求に対応して個々の顧客にモジュールを組み合わせるカスタマイゼーションにより異なる製品を提供する方式を対象としたものとはなっていない。また、マス・コンフィュージョンへの対応策としては、これまでも、過去の顧客の購買情報や注文情報に基づき、顧客の要求に適合する推奨製品を提示するレコメンダシステムが有効であるとされており<sup>(3)</sup>、カスタマイズ製品を対象として、顧客に適切なモジュール候補や製品構成を提示するシステムが提案されている<sup>(4),(5)</sup>。しかしながら、それらのシステムは顧客に提示する選択肢を絞り込むことに留まっており、前提となるアーキテクチャのあり方などを論じていないなどの意味で、カスタマイゼーションを伴う多種展開品の発注における課題の根本である過剰なカスタマイゼーションに対する解決策とはなっていない。

### 3.2.2 受注における課題

カスタマイゼーションを伴う多種展開品では、個々の製品は、顧客の要求に適合するモジュールやオプションを選択して製品にまで組み合わせるカスタマイズを行って提供する。この際、製品販売側は顧客が自身の要求に合わせて製品をカスタマイズしやすいように製品アーキテクチャを設計しておくことが重要となるとともに、個々の顧客要求に対しては、それぞれに適切なモジュールやオプションを引き当て、組み合わせるモジュールやオプションの候補を提示することが求められる。

特に、カスタマイズの自由度が非常に高い製品において顧客が製品に対して専門的な知識を有しない場合、製品販売側が対話的に顧客の要求を1つずつ聞き、その要求に対応するモジュールを順次引き当てて製品仕様を決定していくという手続きを取る必要がある。また、この受注の過程では、先に選択されたモジュールが後に選択するモジュールの候補を制限することがあるため、顧客の要求を聞き取る順番に留意する必要がある。本章で例

題として取り上げる産業用ロボットでの場合を例に挙げると、顧客が「製品を傷つけない」という要求と「製品を速く運びたい」という要求を合わせもっており、前者の要求に起因して後者の要求が発生している場合、この要求間の関係を考慮せずにロボットの受注時にロボットアームの駆動モータや減速器を先に選定すると、製品の移動速度は速くできる一方で、アーム先端に付けるアタッチメントの重量に上限が発生し、アタッチメントの候補が限定されるため、顧客が優先する「製品を傷つけない」という要求の充足度が低下するといった事態が発生しうる。このように、顧客がどの要求を優先しているのかを考慮せずに受注を進めると、ある部分では要求を十分に満たさず、ある部分では要求を過剰に満たすような製品構成にもなりかねない。つまり、顧客の要求に過不足なく適切に応えた製品を提供するためには、顧客が持つ要求同士にどのような関係があるのかを踏まえたうえで、それらの関係に基づいて受注手順を考えることが求められる。

カスタマイゼーションを伴う製品の受注方法としては、製品評価アンケートのような顧客要求に関する情報を含むデータを分析し、各顧客の要求に適合したタブレットコンピュータの構成を提案するもの<sup>(6)</sup>や、コストや顧客の要求性能値に従ってモジュール候補群の中からモジュールを選択して最適な製品構成を求める手法<sup>(7),(8)</sup>が提案されている。しかし、これらの手法では、前述のような受注手順が製品構成に及ぼす可能性は考慮されていない。

### 3.2.3 顧客要求構造化の必要性

製品のアーキテクチャ設計にあたって、モジュールの単位を大きくすれば、カスタマイゼーションの箇所が少なくなるため、顧客の発注における難易度を抑制することが期待できる。一方、それに際しては、大きくなるモジュールがなるべく顧客要求への対応における柔軟性を損なわないようにすることも必要である。ここで、顧客要求の全体的な傾向を考えた場合に、「A という要求を持つ顧客は B という要求も持ち合わせている場合が多い」といったように、ある顧客要求の組み合わせが多くのお客様において発生する共起関係にある場合、その要求の組合せに対応する製品の構成要素を同じモジュールに統合しカスタマイズ箇所を減らしたとしても、顧客要求への柔軟性の低下は抑えながらも顧客にとっての選択の容易さを向上させることが可能になると考えられる。また、このような関係を考慮して受注手順を設計すれば、顧客が持つ要求同士の競合の影響を緩和して受注を行うことが可能になると考える。

上述のような顧客要求間の共起関係を明らかにするためには、顧客の発注時の選択結果が読み取れる顧客データを分析する必要がある。その上で、数理的に製品アーキテクチャ設計を行う上で扱いやすい形式で共起関係を明示化することが求められる。顧客データを分析して顧客要求間の共起関係を明らかにする際には、顧客データとして個別製品の受注データを用いることにすれば、製品の製造企業が既に保有しているデータを活用できる

えに、顧客アンケートやインタビューと異なり受注のたびに新規データが自動的に獲得できることになり、顧客要求の時間的な変化にも比較的対応しやすいと考えられる。このことから、受注データから顧客要求間の共起関係を分析する手法の構築が求められる。この際、受注データは顧客要求が物理機能や実体構造の変更や追加といった形式で記載されており、物理機能と実体構造の情報が入り混じっていることから、顧客要求と物理機能・実体構造の関係を統合的に考慮してアーキテクチャ設計を行うために、顧客要求の形式に受注データの項目を変換し、顧客要求・物理機能・実体構造を明確に区別して考えることが必要となる。

### 3.2.4 本研究のアプローチ

製品のカスタマイズの可能性は、製品アーキテクチャ設計の結果によって規定される<sup>(9)</sup>。それを踏まえ本研究では、3.2.1項および3.2.2項で述べたカスタマイゼーションを伴う製品の受発注の課題に取り組むために、受注データの分析により明示化される顧客要求間の共起関係を考慮した製品アーキテクチャおよびその共起関係に基づく受注プロセスを設計することにより、カスタマイゼーションを伴う多種展開品における受発注の課題の解決、すなわち受発注の適正化を行うことを目指す。言うまでもなく、製品アーキテクチャ設計において顧客要求間の共起関係のみに基づいてモジュール化を行った場合、技術的にも製造上も実現不可能な製品アーキテクチャになりうる。このことから、製品アーキテクチャの基礎である物理機能・実体構造の依存関係をも含めて一括して考えることが必須である。このため本研究では、顧客要求・物理機能・実体構造の共起関係・依存関係をDSMにより明示化し、それらのDSMを統合したMDMに対してクラスタリングすることにより製品アーキテクチャ設計を行い、クラスタリングされた顧客要求DSMに対して顧客要求間の依存関係に基づくパーティショニングを適用することにより、受注プロセスの設計を行うことを考える。

## 3.3 相関ルール分析と顧客要求構造化

### 3.3.1 顧客要求構造化のための分析対象と分析方法

本研究では、顧客要求間の共起関係を抽出するための分析の対象として、企業が保有する大量の過去の受注仕様表を用いることを想定する。このデータは、過去の顧客が選択したモジュールやオプションの追加や変更内容が記載されており、その内容から顧客要求間の共起関係が「オプションAを選択する顧客はオプションBを共に選択する傾向がある」という製品の物理機能や実体構造の形で間接的に抽出することが可能であると考えられる。

上記のデータからオプションの項目間の共起関係を分析する際に重要となるのが、関係の方向性である。データから2項目間の関係を分析する手法としては、統計解析における相関分析が存在するが、この方法では例えば「身長」と「体重」という変数の間に、有意な相関があると判明したとしても、そのどちらが原因となって他方の結果を引き起こしているのか、ということを推測することはできるが、分析結果から項目間の関係の方向性を把握することができない。しかしながら、仕様表に記載されているようなオプションを選択する際には、双方のオプションが互いに共起関係にある双方向性の共起関係となる場合と、共起関係の方向性が一方のみになるものも存在すると考えられる。またこの関係には対象のオプション間に、House of Quality<sup>(10)</sup>の屋根部分に記述するような物理的な相関関係や矛盾関係は必ずしも存在しない。

より要求に的確に応えたモジュール化を行うには、要求間の共起関係の有無とともに、要求間の共起関係の方向性もデータから抽出し、モジュール化の際に情報として用いることが必要であると考えられる。また、オプションの中には、そのオプションを付ける・付けないのみを選択するもののみではなく、ある部品の寸法や数量を選択するものもあり、このようなオプションに関してはその値の大小によって異なる要求に対応している可能性があるため、オプションの選択形式に適した形で共起関係の抽出を行う必要がある。

### 3.3.2 相関ルール分析

前項での議論に基づいて、本研究では、データマイニング手法の一種である相関ルール分析<sup>(11)</sup>を用いて、対象とするデータを分析する。相関ルール分析は、図3.1のようにデータベースで頻出する変数の組み合わせを見つけることを目的とする分析手法である<sup>(12)</sup>。このデータベースを構成するデータはトランザクションデータと呼ばれ、各データはアイテム集合  $I = i_1, i_2, \dots, i_m$  の中から顧客が選択したアイテムの組み合わせで構成されている。相関ルール分析は、全データ  $D$  の中で互いに素な部分集合  $X$  と  $Y$  について「 $X$  を含むデータは  $Y$  も共に含む」という共起関係を求める手法であり、「オプション A を選択する人はオプション B も選択する」といったような顧客の選択や購買の共起関係をデータから求める際に良く用いられる。このとき、抽出される上記のような共起関係を「相関ルール」あるいは「アソシエーション・ルール」などと呼称する。このように、相関ルール分析により抽出された相関ルールは、通常「 $X \Rightarrow Y$ 」のような有向形式で表される。このルールにおいて  $X$  に該当する部分集合を前提部 (antecedent)、 $Y$  に該当する部分集合を結論部 (consequent) という。

相関ルール分析はそのままでは膨大な数の相関ルールを抽出してしまうため、一般的に有効な相関ルールのみを絞り込んで抽出するために、支持度 (support)、確信度 (confidence)、リフト (lift) という3つの評価指標を用いる。



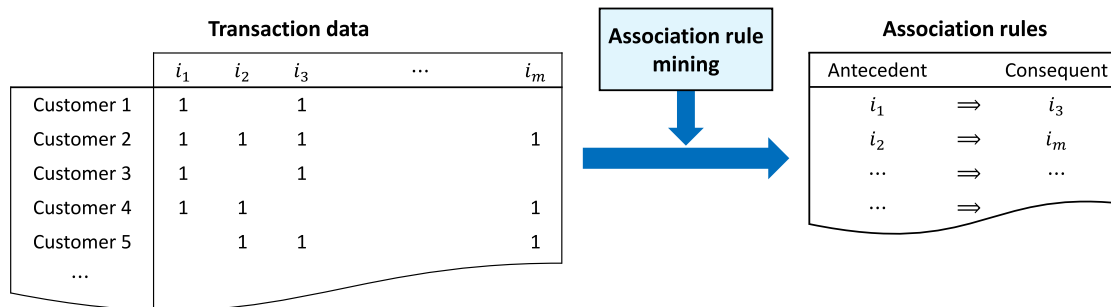


Fig. 3.1 Overview of association rule mining.

アイテムの部分集合  $X$  の支持度  $supp(X)$  は全データ  $D$  の中で部分集合  $X$  を含むデータの比率であり、

$$supp(X) = \frac{X}{D} \quad (3.1)$$

と表す。同様に、ルール  $X \Rightarrow Y$  の支持度

$$supp(X \cup Y) = \frac{X \cup Y}{D} \quad (3.2)$$

は部分集合  $X$  と  $Y$  を含むトランザクションが全体の中に占める比率である。  $X \Rightarrow Y$  の支持度の値が大きいほど、全体の中でそのルールが出現する割合が高いことを意味する。逆に、この評価指標の値が小さければ、このルールの発生確率は低く、重要度の低いルールという事を意味する。

ルール  $X \Rightarrow Y$  の確信度  $conf(X \Rightarrow Y)$  は、全データ  $D$  の中で部分集合  $X$  を含むデータの内  $Y$  も含むものの比率であり、

$$conf(X \Rightarrow Y) = \frac{X \cup Y}{X} = \frac{supp(X \cup Y)}{supp(X)} \quad (3.3)$$

と表される。確信度が大きいほど、 $X$  を選択した際に、 $Y$  も選択する確率が高くなるので、 $X$  と  $Y$  の関連は強いということになる。しかし、 $X$  の選択者のうち、多くの人が  $Y$  も選択するとしても、そもそも  $X$  を選択する者の発生率が低い場合は、利用価値の低いルールとなってしまうことから、確信度と支持度は合わせて考慮する必要がある。また、例えばほぼすべてのデータに  $X$  が含まれているような場合、 $X \Rightarrow Y$  の確信度は必然的に高くなることから、確信度が高くても、 $Y$  が  $X$  に起因して選択されているとはいえない場合がある。そこで、ルールの相対的な強さを評価する評価指標であるリフト

$$lift(X \Rightarrow Y) = \frac{conf(X \Rightarrow Y)}{supp(Y)} \quad (3.4)$$

を確信度、支持度とあわせて用い、相関ルールを絞り込む。リフトは  $X$  によって  $Y$  が何倍発生しやすくなるかを表しており、一般的な判断基準として、評価指標リフトの値が 1 よ

り大きいルールは有効なルールである。確信度、支持度などの指標の下限値の設定は、企業の経営戦略などに応じて決定する。なお、相関ルール分析は  $X$  や  $Y$  がデータ中に出現するか否かすなわち 0-1 形式のデータに適用されることが多いが、前項で述べたオプションに関する寸法や数量を指定し、その大小によって異なる要求に対応しているようなオプション項目の相関ルール抽出に関しては、平均値やデータ数によって、区間を分割し、それぞれの区間を別のデータ項目として扱うことによって対応可能である。

### 3.3.3 相関ルール分析による顧客要求構造化

製品の受注仕様表に相関ルール分析を適用すると「オプション A を付ける顧客はオプション B も付ける傾向がある」というオプション間の相関ルールの形式でルールが抽出される。オプションは物理機能や実体構造の変更や付加などが混在する形で記述されている。本研究では、オプションを選択する際の顧客要求についての相関ルールを抽出する必要があるため、これをすべて顧客要求の形式で統一して記述し、顧客要求間のルールが抽出できるようにする必要がある。そこで本研究では、オプションを選択する理由となる顧客要求を考えてオプションの各項目を顧客要求に翻訳し、オプション間の相関ルールもそれらのオプションの背景にある顧客要求の相関ルールへ変換することとする。抽出した相関ルールは前項で述べたように、支持度・確信度・リフトの下限値を決めて重要なルールのみを絞り込みを行う。以上のようにして抽出された顧客要求間の相関ルールは物理機能・実体構造の依存関係とともにそれぞれ DSM に記述する。

## 3.4 顧客要求・物理機能・実体構造を統合したアーキテクチャ設計

### 3.4.1 顧客要求・物理機能・実体構造を統合するアーキテクチャ設計の概要

本研究で提案するアーキテクチャ設計法の概要を図 3.2 に示す。提案手法は、DSM・DMM による顧客要求・物理機能・実体構造の共起関係・依存関係・対応関係の明示化、発注適正化のための製品アーキテクチャのモジュール化設計、受注適正化のための受注プロセス設計の 3 段階から構成する。

第 1 段階では、顧客要求・物理機能・実体構造における共起関係・依存関係をそれぞれ DSM に記述する。各 DSM 間の対応関係を DMM に記述することにより、図 3.3 に示すように顧客要求・物理機能・実体構造の順に 3 つの DSM を連鎖させた MDM を構成する。第 2 段階では、各 DSM に記述されている共起関係・依存関係に加え、DMM に記述されている DSM 間の対応関係を考慮して、MDM をクラスタリングすることにより、製品アーキテクチャのモジュール化を行う。第 3 段階では、クラスタリングされた MDM のうち、顧

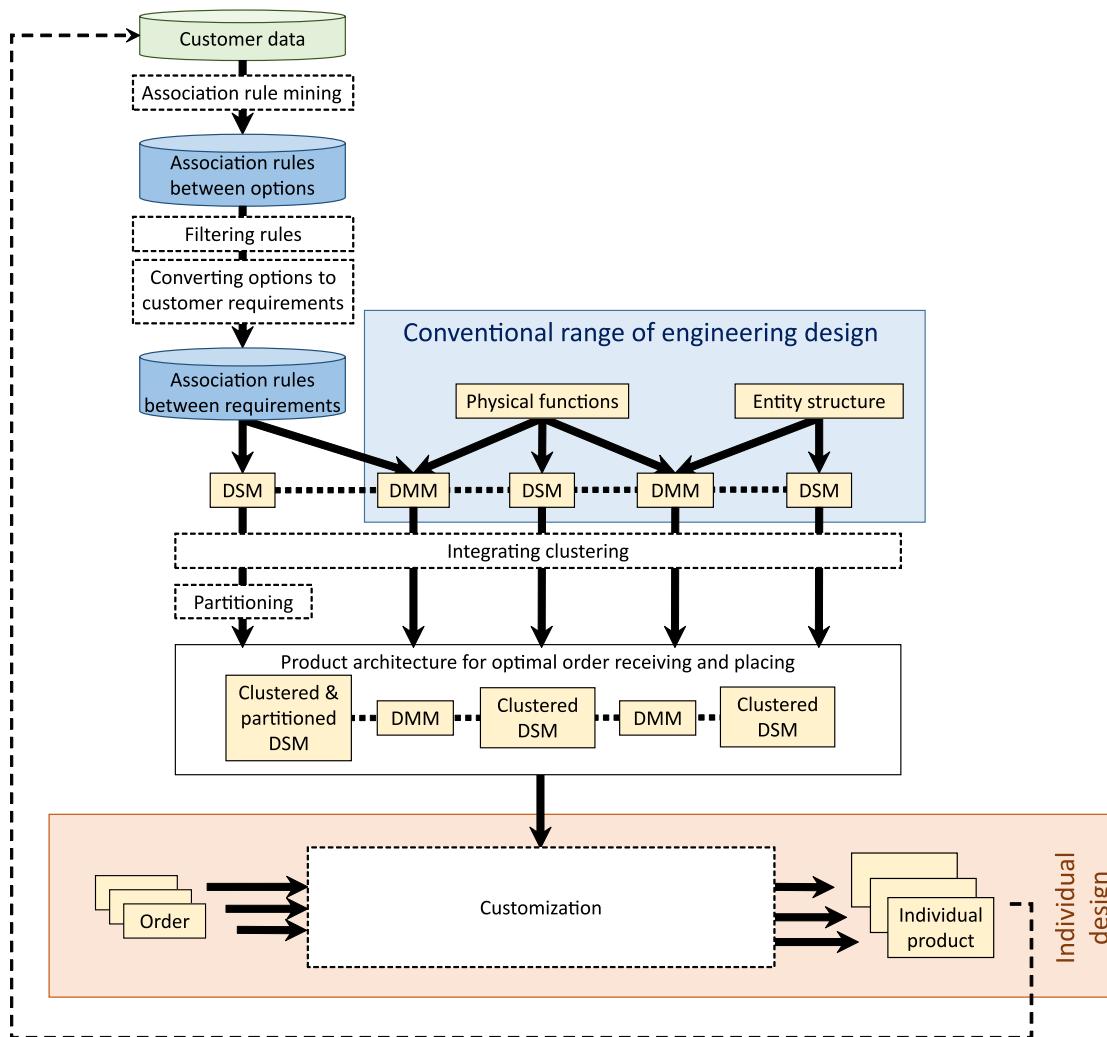


Fig. 3.2 Architecture design for optimal order receiving and placing.

客要求 DSM に対してパーティショニングを適用し、顧客の要求の優先順に従って顧客要求 DSM のクラスターを並び替える。製品の受注の際はパーティショニング結果に沿った順で、各要求クラスターに対応するモジュールの仕様を決定していく。

### 3.4.2 顧客要求・物理機能・実体構造の依存関係・対応関係の明示化

顧客要求・物理機能・実体構造の依存関係・共起関係をそれぞれ DSM で記述することにより明示化し、各 DSM の対応関係を DMM に記述して明示化することにより、図 3.3 に示す MDM を構成する。

顧客要求 DSM は 3.3 節で構築した手法により顧客要求間の共起関係を分析・記述して作成を行う。

	Customer requirements	Physical functions	Entity structure
Customer requirements	Customer requirements DSM	Requirements-Functions DMM	
Physical functions		Physical functions DSM	Functions-Structure DMM
Entity structure			Entity structure DSM

Fig. 3.3 MDM integrating customer requirements, physical functions and entity structure.

物理機能 DSM に記述する物理機能の依存関係としては、物理機能を対象としたモジュール化設計に用いられる機能モデリング<sup>(1),(13)</sup>の方式に従い、物理機能間のエネルギーや物質、電気信号などの入出力関係を記述する。この物理機能間の入出力関係には方向性が存在するため、作成した物理機能 DSM は非対称行列となる。

実体構造 DSM に記述する実体構造の依存関係としては、実体構造を対象とした DSM を用いたモジュール化設計において一般的に記述される、構成要素間の物理的隣接関係や物質・情報・力等のやりとりを記述する。これらの依存関係の中には、部品のはめあいや案内といった物理的な隣接関係や物質の流れなど定義がしやすい関係から、伝熱・振動・電氣的干渉など、ある条件化でのみ生じたり、隠れていたりして、記述が難しいものまで存在する<sup>(14)</sup>ことから、適用事例に応じて記述する相互関係の種類を考慮する必要がある。これらの関係は構成要素間に相互に存在するため、作成する DSM は対称行列となる。

最後に、それぞれの DSM に記述されている要素間の対応関係を DMM に記述する。具体的には、顧客要求を物理的に実現するための物理機能、物理機能に対する技術解である製品の構成要素という関係をそれぞれ DMM に記述する。

### 3.4.3 発注適正化のための製品アーキテクチャ最適設計問題定式化

3.4.1 項で述べたように本研究では顧客要求・物理機能・実体構造の DSM を連鎖させた MDM を用いてカスタマイゼーションを伴う多種展開品の発注適正化のための製品アーキテクチャのモジュール化設計を行う。MDM の構造は図 3.3 に示すように DSM 間を DMM で連結した形になる。この MDM にクラスタリングを適用することにより、顧客要求間の共起関係を考慮した顧客の発注適正化のための製品アーキテクチャの設計を行う。クラスタリングに用いる目的関数は、Yassine et al.<sup>(15)</sup> が Product DSM, Process DSM, People DSM の 3 種の DSM の同時最適化に用いているものを、顧客要求 DSM, 物理機能 DSM, 実体構造 DSM を連鎖させた MDM クラスタリング用に拡張する。

まず、 $DSM_1 =$  顧客要求 DSM,  $DSM_2 =$  物理機能 DSM,  $DSM_3 =$  実体構造 DSM とし、 $DSM_i (i = 1, 2, 3)$  の総クラスタ数を  $C_i$ ,  $DSM_i$  内の  $x$  番目 ( $1 \leq x \leq C_i$ ) のクラスタのインデックスを  $c_i(x)$  とする。このクラスタ  $c_i(x)$  の総要素数を  $|c_i(x)|$  としたとき、クラスタ  $c_i(x)$  内の  $u$  番目,  $v$  番目 ( $1 \leq u, v \leq |c_i(x)|$ ) の要素を表すインデックスをそれぞれ  $e_i(x, u), e_i(x, v)$  とする。

上記のもと、クラスタ  $c_i(x)$  内の空白要素数  $M_i(x)$  は次式で表される。

$$M_i(x) = |c_i(x)|(|c_i(x)| - 1) - \sum_{u=1}^{|c_i(x)|} \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq u}}^{|c_i(x)|} g_i(e_i(x, u), e_i(x, v)) \quad (3.5)$$

ここで、 $g_i(e_i(x, u), e_i(x, v))$  は次式による。

$$g_i(e_i(x, u), e_i(x, v)) = \begin{cases} 1 & \text{if elements } e_i(x, u) \text{ and } e_i(x, v) \text{ are related.} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.6)$$

また、 $DSM_i$  内の  $x$  番目のクラスタ  $c_i(x)$  と  $y$  番目 ( $1 \leq y \leq C_i$ ) のクラスタ  $c_i(y)$  の間に存在する依存関係の数  $M_i(x, y)$  は次式で表される。

$$M_i(x, y) = \sum_{u=1}^{|c_i(x)|} \sum_{v=1}^{|c_i(y)|} g_i(e_i(x, u), e_i(y, v)) \quad (3.7)$$

さらに、顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係を考慮して各 DSM のクラスタリングを行うために、式 (3.5) に  $DMM_i$  ( $DMM_1 =$  顧客要求-物理機能 DMM,  $DMM_2 =$  物理機能-実体構造 DMM) によって記述されている  $DSM_i$  と  $DSM_{i+1}$  との間の対応関係による評価を組み込む。具体的には、 $DSM_i$  内で  $x$  番目のクラスタ内で依存関係にある  $u$  番目の要素と  $v$  番目の要素に  $DMM_i$  上で関連付けられている  $DSM_{i+1}$  内の要素群が所属しているクラスタの数  $d_{i,i+1}(u, v)$  を式 (3.5) に導入し、次式を定める。

$$\overline{M_i(x)} = |c_i(x)|(|c_i(x)| - 1) - \sum_{u=1}^{|c_i(x)|} \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq u}}^{|c_i(x)|} \frac{g_i(e_i(x, u), e_i(x, v))}{d_{i,i+1}(u, v)} \quad (3.8)$$

これにより、 $DSM_i$  内で密な依存関係が存在する要素群に対応する  $DSM_{i+1}$  内の要素群が複数のクラスタに分かれれば分かれるほど、後述する評価関数  $f_i$  の値が悪くなるようになり、 $DSM_i$  内の依存関係を  $DSM_{i+1}$  へと反映させるようにクラスタリングが進められる。つまり、式 (3.5) に  $d_{i,i+1}(u,v)$  を導入することにより、顧客要求・物理機能・実体構造の対応関係を見ながら、共起関係にある顧客要求の組に対応する物理機能・実体構造を同一のクラスタに統合するように各 DSM のクラスタリングが進められる。このため、ある顧客要求を満たすために選択するモジュールの数が抑えられ、発注を容易にすることができる。なお、 $DSM_3$  については下位の DSM が存在しないため、 $\overline{M_3(x)}$  では  $d_{i,i+1}(u,v)$  は常に 1 となるものとする。

$DSM_i$  の顧客要求に対する柔軟性と受注の容易さを評価する評価関数  $f_i$  は、以上のもとで  $\overline{M_i(x)}$  と  $M_i(x,y)$  の重み付き線形和として、次式のように定める。

$$f_i = \frac{1}{N_i^2(N_i - 1)} \left[ \alpha \sum_{x=1}^{C_i} \left\{ \overline{M_i(x)} |c_i(x)| \right\} + (1 - \alpha) N_i \left\{ \sum_{x=1}^{C_i} \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq x}}^{C_i} M_i(x,y) \right\} \right] \quad (3.9)$$

ここで、DSM ごとに要素数が異なるため、評価関数  $f_i$  は 0 から 1 の間の値となるように、DSM の要素数  $N_i$  によって正規化している。 $\alpha$  は、クラスタサイズの調整のための重みパラメータとして導入するものであり、小さくしすぎると、クラスタサイズが過度に大きくなり、クラスタ内に依存関係や対応関係が存在しない要素同士がクラスタに統合され、反対に大きくしすぎるとクラスタサイズが過度に小さくなり、DSM 上では共通するクラスタに対応関係がある要素が DSM 上で分断されてしまうため、各 DSM の関係がよく統合されない。そのため、適切なクラスタサイズが得られるように個別的に  $\alpha$  の値を調整する必要がある。なお、本手法ではクラスタのオーバーラップは考慮しないものとする。

最後に、クラスタリングで用いる目的関数はそれぞれの評価関数  $f_i$  のバランスを調整するための重み  $w_i$  を付加した重み付き線形和として次式により定義する。

$$f = \sum_{i=1}^3 w_i f_i \rightarrow \min \quad (3.10)$$

### 3.4.4 最適化計算方法

前項で定式化された目的関数を各 DSM の要素の並び順を設計変数とした最小化により、顧客要求・物理機能・実体構造の DSM を連鎖させた MDM のクラスタリングを行う。DSM のクラスタリングは組合せ最適化問題である。組合せ最適化問題は目的関数が不連続であり、局所解へ陥る危険性も存在することから、これを回避するために、本研究では焼きなまし法<sup>(16)</sup>によりクラスタリングを実行することとする。焼きなまし法における遷移確率と焼きなましスケジュールを決定するための諸パラメータは Johnson et al.<sup>(17)</sup> によるもの

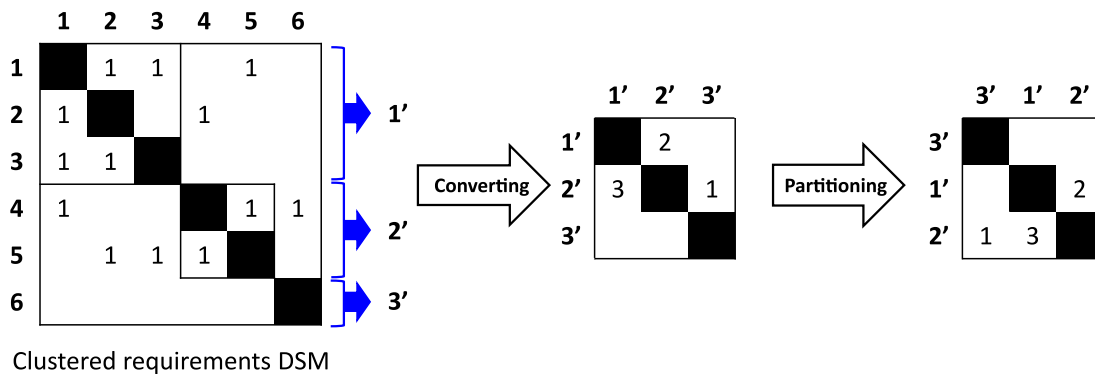


Fig. 3.4 Partitioning method for customer requirements DSM.

を用い、その値は Johnson et al. <sup>(17)</sup> がグラフ分割問題に用いた推奨値に従う。また、より優れた解を探索するために、終了温度に達してから再度温度を上げ冷却を行うことを解が十分に収束するまで繰り返す。焼きなまし法の適用に際しては、DSMの各要素を要素数1のクラスタとした場合を初期解とし、解摂動においては、ランダムに選択したDSMの要素をランダムに選択した場所に移した解を近傍解として探索を行う。

### 3.4.5 受注適正化のための受注プロセス設計

3.2.2項で述べたように、製品受注の際に、よりの確に顧客の要求に適合した製品をカスタマイズするためには、顧客の要求の優先順位に従って顧客の要求を聞いていき、製品仕様を定めていくことが求められる。顧客要求DSMに記述する顧客要求間の共起関係は、ある要求に起因して他の要求が発生するという傾向を記述していることから、これらの共起関係の方向性に従って顧客要求DSMの順番を入れ替えるパーティショニングを適用することによって、顧客要求の優先順を分析する。この際、要求間の調整を容易にするために、図3.4に示すように3.4.3項のクラスタリングを適用した際に構成されるクラスタは固定し、各クラスタをDSMの1要素として顧客要求クラスタDSMを構成し、クラスタ間の共起関係の数によって顧客要求クラスタDSMの要素間の依存関係に重みをつけてパーティショニングを適用することとする。パーティショニングは Gebala and Eppinger <sup>(18)</sup> による次式の目的関数の最小化より実行する。

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (j-i) \cdot w(i,j) \quad (3.11)$$

ここで、 $n$ はDSMの要素数、 $i, j$ はそれぞれDSMの行・列を示し、 $w(i, j)$ は $i$ 行 $j$ 列のセルに記入されている依存関係の重みを表す。

以上に基づき、受注に際しては、パーティショニングされた顧客要求DSMにおける上

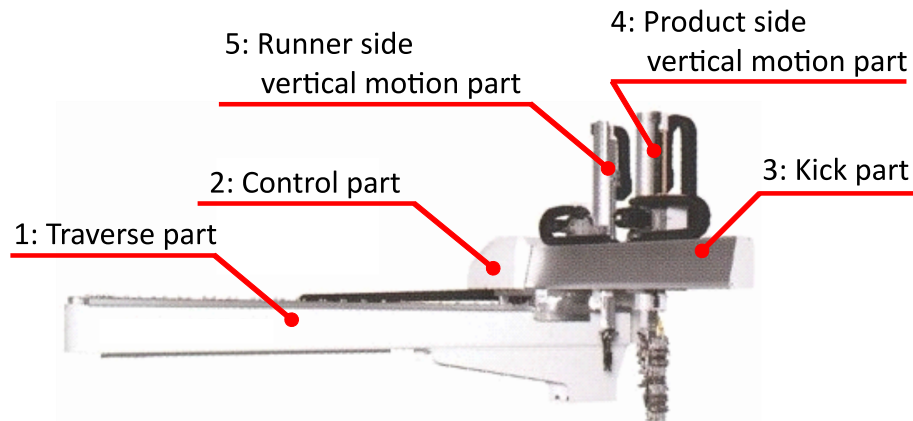


Fig. 3.5 Industrial three-axis linear-type robot.

位のクラスタから順に要求に関するヒアリングを顧客に行っていくことにより、各要求に対応するモジュールを DSM と DMM の関係を辿ることで特定し、各モジュールの仕様を円滑に決定していくことができるようになる。

### 3.5 産業用三軸直交ロボットの顧客要求構造化への適用

#### 3.5.1 産業用三軸直交ロボットの概要

本研究では産業用ロボットの一種である産業用三軸直交ロボット (図 3.5) を例題とし、前節で述べた相関ルール分析により顧客要求を構造化し、アーキテクチャのモジュール化を行うこととする。

産業用三軸直交ロボットは、サーボモータ駆動で3つのフレームを移動させ成形品を自動的に成形機から生産ラインまで運搬するロボットである。この三軸直交ロボットは顧客によって異なる成形品を運搬する必要があるため様々な使用環境に対応できるように大きさや機能が異なる複数の機種が存在し、それらに付加する多数のオプションも準備されている。顧客は40を超えるオプションから選択を行う必要があり、それらの個々の項目の選択肢の中には、ロボットの各フレーム長や取り出した成形品を何箇所に分けて置くか(成形品の開放箇所数)など具体的な数値を指定する必要があるものも存在する。

上述のように産業用ロボットは、モジュールごとに多種類の選択肢を用意したり新たなオプションパーツを提供したりすることで作業内容ごとにユニットを容易に付け替えられるようにし、行う作業の種類や使用環境に応じた様々な顧客要求への対応を行っている<sup>(19)</sup>。このため産業用ロボットは、新しい要求が提示されるたびに新たなモジュールやオプションの提供を行うといったようなある種場当たりの設計が行われがちである。その結果、



企業があるロボットに対して提供するモジュール数やオプション数は増加の一途をたどっている。またその増加するオプションやモジュールと顧客の提示する要求との対応関係を企業側も整理できておらず、顧客が提示する要求に対して適切なオプションやモジュールを提示して製品を提供するような受発注システムも整備されていない。結果として個々の顧客にとっては過剰な種類のモジュールやオプションが提示されてしまい、かえって顧客の混乱を招いてしまっている。以上のような点から、カスタマイゼーションを伴う多種展開品特有の受発注の課題を抱えた製品例として産業用ロボットを取り上げ、その一例として三軸直交ロボットを例題の対象として選定した。

### 3.5.2 顧客要求構造化

本例題では、100件の受注仕様表を分析対象として相関ルール分析を適用し、三軸直交ロボットのオプション間の相関ルールを抽出する。各オプションに対してはそのオプションを選択する理由となる顧客要求を考え、抽出されたオプションルールについて、前提部と結論部のそれぞれにおいて、それらのオプションに対応する顧客要求を対応させることにより、オプション間の相関ルールを顧客要求間の相関ルールへと変換する。

オプションの中には複数の顧客要求を持つものも存在するが、対応付けを行う時、そのすべての顧客要求があてはまるようにする。このとき相関ルールは「前提部 ⇒ 結論部」の形式であるため、前提部も結論部もオプションが複数の顧客要求に対応する時、それらすべての組み合わせについて顧客要求ルールを抽出する。例えば、オプションにおける相関ルール「 $A \Rightarrow B$ 」が存在したとする。また、オプションAに対応する顧客要求は $a, b, c$ であり、オプションBに対応する顧客要求は $d, e$ であるとする。このときオプション間の相関ルール $A \Rightarrow B$ に対して抽出される顧客要求ルールは3個と2個の組み合わせである $a \Rightarrow d, a \Rightarrow e, b \Rightarrow d, b \Rightarrow e, c \Rightarrow d, c \Rightarrow e$ の6種類が存在するように変換する。またフレーム長や製品の開放箇所数など数値の大小によって対応する要求が異なると考えられる項目に関しては、データ数がおおむね等しくなるように数値を2つの区間に分け、例えばフレーム長の場合は比較的短いものは「速く移したい」、比較的長いものは「遠くまで移したい」というようにそれぞれ別の要求に変換するようにする。なお本研究では、受注仕様表への相関ルール分析適用、および相関ルール抽出をデータ分析ソフトウェア「Natto<sup>(20)</sup>」を用いて行うこととする。抽出された相関ルールは、3.3.2項で述べたように、確信度・支持度・リフトの各指標を経営戦略などに応じて下限値を設定し、絞り込む必要があるが、本例題では簡単化のため支持度・確信度・リフトの統合指標である符号付J-measure<sup>(21)</sup>と呼ばれる指標を用い、この下限値を3に設定して相関ルールの絞り込みを行う。

以上の方法で三軸直交ロボットの受注仕様表に相関ルール分析を適用し、抽出されたオプション間の相関ルールを顧客要求間の相関ルールに変換した結果、顧客要求間の相関

ルールは 152 抽出された。抽出した顧客要求間の相関ルールを表 3.1 に示し、これらの相関ルールを DSM 形式で記述したものを図 3.6 に示す。なお、変換の結果前提部と結論部が同一となったルールに関しては除外している。

Table. 3.1 Association rules of the industrial three-axis linear-type robot.

Antecedent	Consequent
Adaptability to existing equipment	⇒ Carrying heavy products
Adaptability to existing equipment	⇒ Carrying products apart from the injection mold
Adaptability to existing equipment	⇒ Carrying products to the specified position
Adaptability to existing equipment	⇒ Carrying various products
Adaptability to existing equipment	⇒ Designability
Adaptability to existing equipment	⇒ Inhibiting the occurrence of defective products
Adaptability to existing equipment	⇒ Putting products side by side
Adaptability to existing equipment	⇒ Reducing defective products
Adaptability to existing equipment	⇒ Removing unnecessary portions
Adaptability to existing equipment	⇒ Shortening retooling time
Adaptability to new equipment	⇒ Adaptability to existing equipment
Adaptability to new equipment	⇒ Carrying various products
Adaptability to new equipment	⇒ Durable body
Adaptability to new equipment	⇒ Reducing defective products
Adaptability to other equipment	⇒ Grasping current production status
Carrying a lot pf products at a time	⇒ Carrying small products
Carrying a lot pf products at a time	⇒ Distributing products to several places
Carrying a lot pf products at a time	⇒ Putting products side by side
Carrying heavy products	⇒ Adaptability to existing equipment
Carrying heavy products	⇒ Carrying a lot pf products at a time
Carrying heavy products	⇒ Carrying products quickly
Carrying heavy products	⇒ Carrying products without damaging
Carrying heavy products	⇒ Carrying small products
Carrying heavy products	⇒ Putting products in an arbitrary direction
Carrying products apart from the injection mold	⇒ Adaptability to existing equipment
Carrying products apart from the injection mold	⇒ Adaptability to other equipment
Carrying products apart from the injection mold	⇒ Carrying products to the specified position
Carrying products apart from the injection mold	⇒ Grasping current production status
Carrying products quickly	⇒ Carrying heavy products
Carrying products quickly	⇒ Complying with environmental regulations
Carrying products quickly	⇒ Coping with the robot's trouble quickly
Carrying products quickly	⇒ Easy maintenance
Carrying products quickly	⇒ Putting products side by side
Carrying products quickly	⇒ Reducing costs
Carrying products to the specified position	⇒ Adaptability to existing equipment
Carrying products to the specified position	⇒ Carrying products apart from the injection mold
Carrying products to the specified position	⇒ Carrying products without damaging
Carrying products to the specified position	⇒ Durable body
Carrying products to the specified position	⇒ Grasping current production status

Table 3.1 continued from previous page.

Antecedent	Consequent
Carrying products to the specified position	⇒ Protect the robot's body from machine troubles
Carrying products to the specified position	⇒ Reducing defective products
Carrying products without damaging	⇒ Carrying a lot pf products at a time
Carrying products without damaging	⇒ Carrying heavy products
Carrying products without damaging	⇒ Carrying products to the specified position
Carrying products without damaging	⇒ Carrying small products
Carrying products without damaging	⇒ Carrying various products
Carrying products without damaging	⇒ Designability
Carrying products without damaging	⇒ Durable body
Carrying products without damaging	⇒ Easy maintenance
Carrying products without damaging	⇒ Inhibiting the occurance of defective products
Carrying products without damaging	⇒ Meeting restriction in the installation place
Carrying products without damaging	⇒ Putting products side by side
Carrying products without damaging	⇒ Reducing defective products
Carrying products without damaging	⇒ Shortening retooling time
Carrying small products	⇒ Adaptability to existing equipment
Carrying small products	⇒ Adaptability to new equipment
Carrying small products	⇒ Carrying a lot pf products at a time
Carrying various products	⇒ Carrying products without damaging
Carrying various products	⇒ Coping with the robot's trouble quickly
Carrying various products	⇒ Distributing products to several places
Carrying various products	⇒ Durable body
Carrying various products	⇒ Putting products in an arbitrary direction
Carrying various products	⇒ Putting products side by side
Carrying various products	⇒ Reducing costs
Carrying various products	⇒ Reducing defective products
Carrying various products	⇒ Shortening retooling time
Complying with environmental regulations	⇒ Carrying products quickly
Complying with environmental regulations	⇒ Easy to use for operators in various countries
Complying with environmental regulations	⇒ Meeting restriction in the installation place
Complying with environmental regulations	⇒ Reducing costs
Coping with the robot's trouble quickly	⇒ Carrying various products
Coping with the robot's trouble quickly	⇒ Easy maintenance
Coping with the robot's trouble quickly	⇒ Easy operation for any operator
Coping with the robot's trouble quickly	⇒ Easy to use for operators in various countries
Coping with the robot's trouble quickly	⇒ Shortening retooling time
Designability	⇒ Adaptability to existing equipment
Designability	⇒ Adaptability to new equipment
Designability	⇒ Carrying products without damaging
Designability	⇒ Carrying various products
Designability	⇒ Durable body
Designability	⇒ Putting products in an arbitrary direction
Designability	⇒ Putting products side by side
Distributing products to several places	⇒ Carrying a lot pf products at a time

Table 3.1 continued from previous page.

Antecedent	Consequent
Distributing products to several places	⇒ Carrying small products
Durable body	⇒ Adaptability to new equipment
Durable body	⇒ Carrying products to the specified position
Durable body	⇒ Carrying products without damaging
Durable body	⇒ Carrying various products
Durable body	⇒ Designability
Durable body	⇒ Grasping products
Durable body	⇒ Inhibiting the occurrence of defective products
Durable body	⇒ Meeting restriction in the installation place
Easy maintenance	⇒ Carrying heavy products
Easy maintenance	⇒ Carrying products without damaging
Easy maintenance	⇒ Coping with the robot's trouble quickly
Easy maintenance	⇒ Preventing products from sticking impurities
Easy maintenance	⇒ Reducing costs
Easy maintenance	⇒ Reducing defective products
Easy operation for any operator	⇒ Coping with the robot's trouble quickly
Easy operation for any operator	⇒ Easy to use for operators in various countries
Easy to use for operators in various countries	⇒ Complying with environmental regulations
Easy to use for operators in various countries	⇒ Coping with the robot's trouble quickly
Easy to use for operators in various countries	⇒ Easy operation for any operator
Easy to use for operators in various countries	⇒ Reducing costs
Grasping current production status	⇒ Adaptability to other equipment
Grasping products	⇒ Durable body
Grasping products	⇒ Meeting restriction in the installation place
Inhibiting the occurrence of defective products	⇒ Carrying products without damaging
Inhibiting the occurrence of defective products	⇒ Reducing defective products
Keeping the factory's sanitation	⇒ Improving production speed
Keeping the factory's sanitation	⇒ Preventing products from sticking impurities
Keeping the factory's sanitation	⇒ Reducing costs
Meeting restriction in the installation place	⇒ Carrying products without damaging
Meeting restriction in the installation place	⇒ Complying with environmental regulations
Meeting restriction in the installation place	⇒ Durable body
Meeting restriction in the installation place	⇒ Grasping products
Preventing products from sticking impurities	⇒ Improving production speed
Preventing products from sticking impurities	⇒ Reducing costs
Putting products in an arbitrary direction	⇒ Carrying heavy products
Putting products in an arbitrary direction	⇒ Carrying products to the specified position
Putting products in an arbitrary direction	⇒ Carrying various products
Putting products in an arbitrary direction	⇒ Designability
Putting products in an arbitrary direction	⇒ Inhibiting the occurrence of defective products
Putting products in an arbitrary direction	⇒ Reducing defective products
Putting products in an arbitrary direction	⇒ Shortening retooling time
Putting products side by side	⇒ Adaptability to existing equipment
Putting products side by side	⇒ Carrying a lot of products at a time

Table 3.1 continued from previous page.

Antecedent	Consequent
Putting products side by side	⇒ Carrying small products
Reducing costs	⇒ Adaptability to new equipment
Reducing costs	⇒ Carrying products quickly
Reducing costs	⇒ Carrying various products
Reducing costs	⇒ Complying with environmental regulations
Reducing costs	⇒ Easy maintenance
Reducing costs	⇒ Easy to use for operators in various countries
Reducing costs	⇒ Keeping the factory's sanitation
Reducing costs	⇒ Preventing products from sticking impurities
Reducing costs	⇒ Reducing defective products
Reducing defective products	⇒ Adaptability to existing equipment
Reducing defective products	⇒ Adaptability to new equipment
Reducing defective products	⇒ Carrying products to the specified position
Reducing defective products	⇒ Carrying products without damaging
Reducing defective products	⇒ Carrying various products
Reducing defective products	⇒ Easy maintenance
Reducing defective products	⇒ Inhibiting the occurrence of defective products
Reducing defective products	⇒ Putting products in an arbitrary direction
Removing unnecessary portions	⇒ Adaptability to existing equipment
Removing unnecessary portions	⇒ Reducing costs
Shortening retooling time	⇒ Adaptability to existing equipment
Shortening retooling time	⇒ Coping with the robot's trouble quickly
Shortening retooling time	⇒ Putting products in an arbitrary direction
Shortening retooling time	⇒ Carrying products without damaging
Shortening retooling time	⇒ Carrying various products

### 3.5.3 相関ルールに対する考察

以下に抽出された顧客要求間の相関ルールの中から数例を挙げてその妥当性を考察する。

#### 1. 「新たな設備に対応できる ⇒ 多種類の成形品を移せる」

顧客要求「新たな設備に対応できる」は、三軸直交ロボットが今まで取り出していた成形品とは異なる新しい成形品を取り出す際に、それに伴う新たな設備に対応したいという要求を示している。顧客要求「多品種の成形品を移す」は、多種類の成形品を取り出すことに対する要求である。そのため、相関ルール「新たな設備に対応できる ⇒ 多種類の成形品を移せる」は、複数の成形品を取り扱うことを考慮した顧客要求に関する相関ルールとなっており、妥当性がある。

## 2. 「重い成形品を運びたい ⇒ 速く移したい」

顧客要求「重い成形品を運びたい」は、三軸直交ロボットの吸着力や運搬力を向上させることにより、比較的重い成形品でも問題なく取り出せるようにすることに対する要求である。このような重い成形品を運搬する場合、軽量の成形品を運搬する場合と比較して運搬速度は遅くなってしまふことが多い。相関ルール「重い成形品を運びたい ⇒ 速く移したい」はこのような欠点を解消し重い成形品をスピードも保ちつつ運搬できるようにしたいという顧客の考えを表した相関ルールであると言え、妥当な相関ルールとなっていると考える。

## 3. 「環境制限に合わせられる ⇒ 様々な国の作業員に対応できる」

顧客要求「環境制限に合わせられる」は、製品における環境基準を満たしている事を意味する。例えば、CEマークは、その製品がEU加盟国の基準を満たすものに付けられる基準適合の内容を示すマークであり、EU加盟国向けに三軸直交ロボットを出荷する場合にはCEマークの基準に適合している必要がある。このように、三軸直交ロボットは使用される環境によって、満たすべき基準が存在する。顧客要求「様々な国の作業員に対応できる」は、三軸直交ロボットが海外で使用される場合などに、現地の作業員にも扱いやすいようにするための顧客要求である。そのため、相関ルール「環境制限に合わせられる ⇒ 様々な国の作業員に対応できる」は、海外で使用される場合などの、その地の基準や労働員に対応する内容に関する顧客要求間の相関ルールであり、妥当である。

## 4. 「多種類の成形品を移せる ⇒ コスト削減」

顧客要求「多種類の成形品を移す」は、多種類の成形品を1台のロボットで取り出すことに対する顧客要求である。顧客要求「コスト削減」は三軸直交ロボットを使用する上で発生するコスト(電気代、メンテナンス部品費用)を抑えることに対する顧客要求である。三軸直交ロボットは取り出す成形品の形状や成形品間のピッチなどに応じて成形品を吸着したり掴んだりするアーム先端のアタッチメントを変更したり調整する必要がある。そのため、1台の成形機で複数種類の成形品が生産されるような場合、これらを取り出すために成形品の種類が変わるごとに成形品を掴むロボットのアタッチメントを逐一変更したり調整したりする必要が生じる。特にアタッチメントを変更する場合は複数種類のアタッチメントを所持する必要がある、またそれ専用の取付具が必要になる場合もあり、コストがかさんでしまう傾向にあることから、相関ルール「多種類の成形品を移せる ⇒ コスト削減」は妥当な相関ルールであると言える。

以上から、提案手法により妥当性のある顧客要求間の相関ルールが抽出されたと言える。



Fig. 3.6 Customer requirements DSM of the industrial three-axis linear-type robot.

### 3.6 産業用三軸直交ロボットの製品アーキテクチャ設計への適用

前節に引き続き、例題として産業用三軸直交ロボットを取り上げ、構築した手法を適用し、その妥当性と効果を検証する。具体的には、提案手法により顧客要求・物理機能・実体構造のそれぞれの共起関係・依存関係を統合的に考えた製品アーキテクチャの設計と顧客の要求の優先順位を考慮した受注プロセスの設計を行うことができているかを確認する。

#### 3.6.1 製品アーキテクチャ設計の計算条件

例題に用いる顧客要求 DSM は、前節の例題で作成したものをを用いる。物理機能 DSM については 121 項目の物理機能と機能間の入出力関係を依存関係として記述した。実体構造

は図 3.7 中 a, b で示す部位の可換可能な要素を含む 177 の構成要素とその間の電気や物質の流れを記述した。顧客要求と物理機能、および物理機能と実体構造の間の対応関係を記述する DMM をそれぞれ記述して各 DSM を連鎖させることで、顧客要求・物理機能・実体構造の MDM を作成した。

上述のようにして作成した顧客要求・物理機能・実体構造の MDM に対して、提案手法を適用してクラスタリングを行い、三軸直交ロボットの製品アーキテクチャのモジュール化設計を行った。あわせて、提案手法が顧客要求・物理機能・実体構造の共起関係・依存関係を統合できているか検証するために、提案手法と従来手法、すなわち、実体構造のみ、あるいは実体構造と物理機能を製品アーキテクチャ設計の対象とした場合の比較として、

**Case 1** 提案手法による結果 (顧客要求の共起関係、物理機能と実体構造の依存関係およびそれらの間の対応関係のすべてに基づいてクラスタリングを行った結果)

**Case 2** 式 (3.10) における重み  $w_1$  を 0 として物理機能と実体構造の依存関係・対応関係に基づいてクラスタリングを行った結果

**Case 3** 同  $w_1, w_2$  を 0 として実体構造の依存関係のみに基づいてクラスタリングを行った結果

の 3 つの結果の比較を行う。クラスタリング計算に際しては、式 (3.9) の重みパラメータ  $\alpha$  は、予備計算により適切なクラスタサイズが得られるように調整し、 $\alpha = 0.4$  とした。また、式 (3.10) の重み  $w_i$  は、上記で特に指定している場合を除き、いずれも  $w_i = 1$  とした。

### 3.6.2 製品アーキテクチャ設計結果

Case 1~3 のクラスタリングを行った結果、Case 1 のクラスタリング適用後は三軸直交ロボットの実体構造は 21 モジュールにモジュール化された。それに対して、物理機能と実体構造の依存関係・対応関係に基づくクラスタリングを行った Case 2 では 31 モジュールに、実体構造の依存関係のみに基づくクラスタリングを行った Case 3 では 38 モジュールにそれぞれモジュール化された。

各結果のモジュール構成の比較を図 3.8 に、Case 1~3 のクラスタリング後の MDM をそれぞれ図 3.9~3.11 に示す。図 3.8 中の点線は、Case 1~2 間および Case 2~3 間の構成要素の対応を示している。図 3.9~3.11 中 DSM 内の薄紅で着色されている要素は、依存関係や対応関係が該当する要素間に存在することを意味する。また、Case 1 (図 3.9) の MDM を構成する各 DSM・DMM を図 3.12~図 3.16 に、Case 2 (図 3.10) の MDM を構成する各 DSM・DMM を図 3.17~図 3.19 にそれぞれ示す。なお、図 3.9 および図 3.12 に示す Case 1 の顧客要求 DSM に関しては、次項で行うパーティショニングを適用した後の結果を示



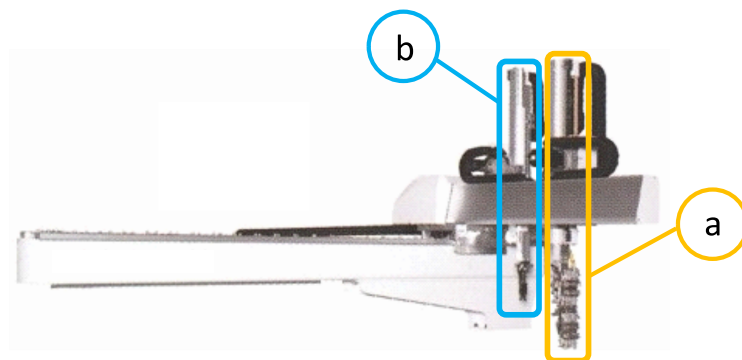


Fig. 3.7 Product side and runner side vertical motion parts.

している。図 3.8 を見ると、各結果でモジュールの分割点や各モジュールの構成が異なっており、さらに提案手法 (Case 1) による結果は、Case 2, Case 3 の結果と比較して、比較的モジュールのサイズが大きくなっていることが分かる。

Case 1~3 でモジュールの構成や分割点が異なる部位を比較することにより、提案手法により顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係を統合して製品アーキテクチャのモジュール化が行われているかを検証する。比較する部位として、図 3.8 中の黄色と青色で示している部位を取り上げ、それぞれ比較を行う。黄色・青色で示している部位は、図 3.7 において a, b で示されている部位にそれぞれ該当する。前者は、成形品を把持・運搬する製品側上下部、後者は成形品のランナの把持・運搬・廃棄等を行うランナ側上下部である。これらのフレームは成形品や金型の種類に応じて変更が求められる部位であるため、顧客ごとのカスタマイズが行われやすい部位である。以下で各部位のモジュール化結果について考察を行う。

### (1) 製品側上下部

図 3.8 中の黄色で示されている製品側上下部について、Case 1~3 の結果の比較を行う。当該部位は DSM 上で、図 3.16, 図 3.19, 図 3.11 上の 1A, 2A, 3A に対応する。図 3.8 を見ると、当該部位について、Case 1 では 5 モジュール、Case 2 では 7 モジュール、Case 3 では 11 モジュールと統合する領域が増えるに従い、モジュールに多くの要素が統合され、全体のモジュール数が少なくなっていることが分かる。ここでまず、図 3.8 において Case 2 と Case 3 を比較すると大きく異なる点として次の点が挙げられる。

1. Case 3 でモジュール 4 に属していた近接センサや上下部フレームが、Case 2 においては上記モジュールの他の構成要素から分離されるとともに、Case 3 のモジュール 5~8 と統合される形でモジュール 1 とモジュール 2 が構成されている。
2. Case 3 のモジュール 1~3 が、Case 2 ではモジュール 1 として統合されている。

上記 1. に関して、Case 2 のモジュール 1 は上下部先端の成形品を把持するヘッドの周辺部品がまとめられ、モジュール 2 に関しては近接センサやスピードコントローラなどのセンサ類が集合している。ここで、物理機能-実体構造 DMM (図 3.18) を見ると、図 3.18 内の 2B, 2C で示すように、モジュール 1 が機能クラスタ 1, 2, 3, 5 と多くの対応関係を持つものに対して、モジュール 2 はこれらの機能クラスタとの対応関係は一切存在しない。一方で、モジュール 2 は機能クラスタ 13 との対応関係 (図 3.18 内 2D) を多く持っているものに対して、モジュール 1 に属する要素はこの機能クラスタとは対応関係が無い。機能クラスタ 13 は上下部先端のヘッドを動かすピストンのスピード検知やヘッドの動きの検知などのセンシング関係の機能からなる機能クラスタであるため、この機能クラスタとの対応関係の違いによって、センサ類がモジュールとして統合されたものと考えられる。また、2. に関しては、Case 3 のモジュール 1~3 は対応する機能クラスタ 1 や 2 と関係しており、対応関係がある機能の共通性からモジュール 1 として他の部品に統合されたものと考えられる。

次に、図 3.8 において Case 1 と Case 2 の結果を比較すると、次の点が異なっている。

1. Case 2 のモジュール 2 に存在するスピードコントローラやピストンシリンダ類が、モジュール 2 から分離して、Case 2 のモジュール 3 に統合されるような形で、Case 1 のモジュール 3 が形成されている。
2. Case 2 でモジュール 6, 7 に点在しているシャフトガイド 2 本が Case 1 ではモジュール 2 に集約されている。
3. Case 2 におけるモジュール 4, 5 が Case 3 ではモジュール 4 として 1 つのモジュールに統合されている。

まず物理機能-実体構造 DMM (図 3.15) を見ると、図中の 1B, 1C で示すように、Case 1 のモジュール 2, 4 と物理機能クラスタ 7 に対応関係が多く存在していることが分かる。この機能クラスタ 7 は Case 2 における機能クラスタ 9 と機能クラスタ 4 の一部の機能が統合されたクラスタである。これらの機能が 1 つのクラスタ内に集約されることで、Case 2 の物理機能 DSM (図 3.17) においてクラスタ外に存在していた依存関係が Case 1 ではクラスタ内に入っている。クラスタ内に依存関係が多くなると、対応関係にある構成要素を統合する作用が強くなることから、上記 2. や 3. のような構成要素の統合が発生したものと考えられる。これに対して、上記 3. については、Case 1 のモジュール 3 に統合されたスピードコントローラなどの構成要素は機能クラスタ 7 と対応関係が存在しない。さらに図 3.8 に示す Case 3 のモジュール化結果でこれらの要素が他の要素と独立したモジュールとなっていることから分かるように、これらの要素は他の構成要素との実体構造の依存関係が弱い。これにより、2. や 3. によるクラスタサイズの肥大を抑制するために、他の

モジュールへ分離されたものと考えられる。この際、これらの構成要素は Case 2 においてモジュール 3 に存在する構成要素と同じく、機能クラスタ 13 に対応関係が存在しているため、この Case 2 のモジュール 3 に属する構成要素と統合され、モジュール 3 が形成されたと考えられる。よって上記 1. ～3. の変化に強く影響している Case 1 の機能クラスタ 7 が構成された理由としては、図 3.13 の顧客要求-物理機能 DMM において、図中 1E で示す顧客要求クラスタ 3, 4 との対応関係が影響していると思われる。

要求クラスタ 3 では、成形品の運搬速度やロボットのメンテナンス性向上に関する要求が機能クラスタ 7 と対応している。要求クラスタ 4 では「成形品を指定の位置に運搬する」、「様々な成形品を運搬する」、「新規設備に対応する」などの要求が対応関係にある。運ぶ成形品を変更したり、新規設備を導入したりすると、フレームの停止位置や成形品の取り出し位置が変更されるため、それに合わせて機体の調整を行う必要が存在する。Case 1 では機能クラスタ 7 との対応関係によって、フレームの上下運動のための要素が同じモジュールに集約されているため、上記の調整が行いやすく、メンテナンス性が向上しているほか、フレームの素早い動作の安定と位置決め精度の向上が見込まれる。したがって、上記の顧客要求に対応したモジュール化結果となっていると言える。

Case 1		Case 2	Case 3
Module No.	Parts name	Module No.	Module No.
1	Nipper	1	1
1	Pressure reducing valve	1	2
1	Concentrated exhaust unit	1	3
1	Solenoid valve	1	4
1	IP cable cover	1	4
1	Bracket	1	4
1	Attachment head	1	4
1	Product chuck	1	4
1	Vertical revolving unit	1	4
1	Horizontal revolving unit	1	4
1	NC reversing unit	1	4
1	Head changer	1	4
1	Head detachable tool	1	4
1	Weight detecting device	1	4
1	Sprue chuck	1	4
2	VP proximity sensor (P)	2	4
2	VP frame (P)	2	4
2	Arm	2	4
2	Reversing part proximity sensor	2	4
2	Weight detecting monitor	2	5
2	VP dog (P)	2	6
2	Air tube fixing plate	2	7
2	VP rollers (P)	2	7
2	VP shaft guide (P)	2	7
2	VP shaft guide (P)	2	7
3	Speed controller	2	8
3	Speed controller	3	8
3	Cylinder fixing frame	3	8
3	VP air cylinder (P)	3	8
3	Terminal base plate	4	8
3	Manifold	4	9
3	Terminal	4	9
4	VP lock nut (P)	5	9
4	VP block (P)	5	10
4	VP clumper (P)	5	10
4	VP pulley (P)	5	10
4	VP pulley (P)	5	10
4	VP timing belt (P)	6	10
4	VP timing pulley (P)	6	10
4	VP clumper (P)	7	10
5	Lower linear guide (R)	7	10
5	VP rollers (P)	7	10
5	Upper linear guide (P)	7	10
5	Lower linear guide (P)	7	10
5	KP rail	7	10
5	VP pulley cover (P)	7	10
5	VP servo motor (P)	7	11
5	VP reduction gear (P)	7	11
5	VP base (P)	8	11

Note. KP: Kick part, VP: Vertical motion part,  
 TP: Traverse part, (P): Product side,  
 (R): Runner side

Fig. 3.8 Results of modularization of the industrial three-axis linear-type robot (part 1).

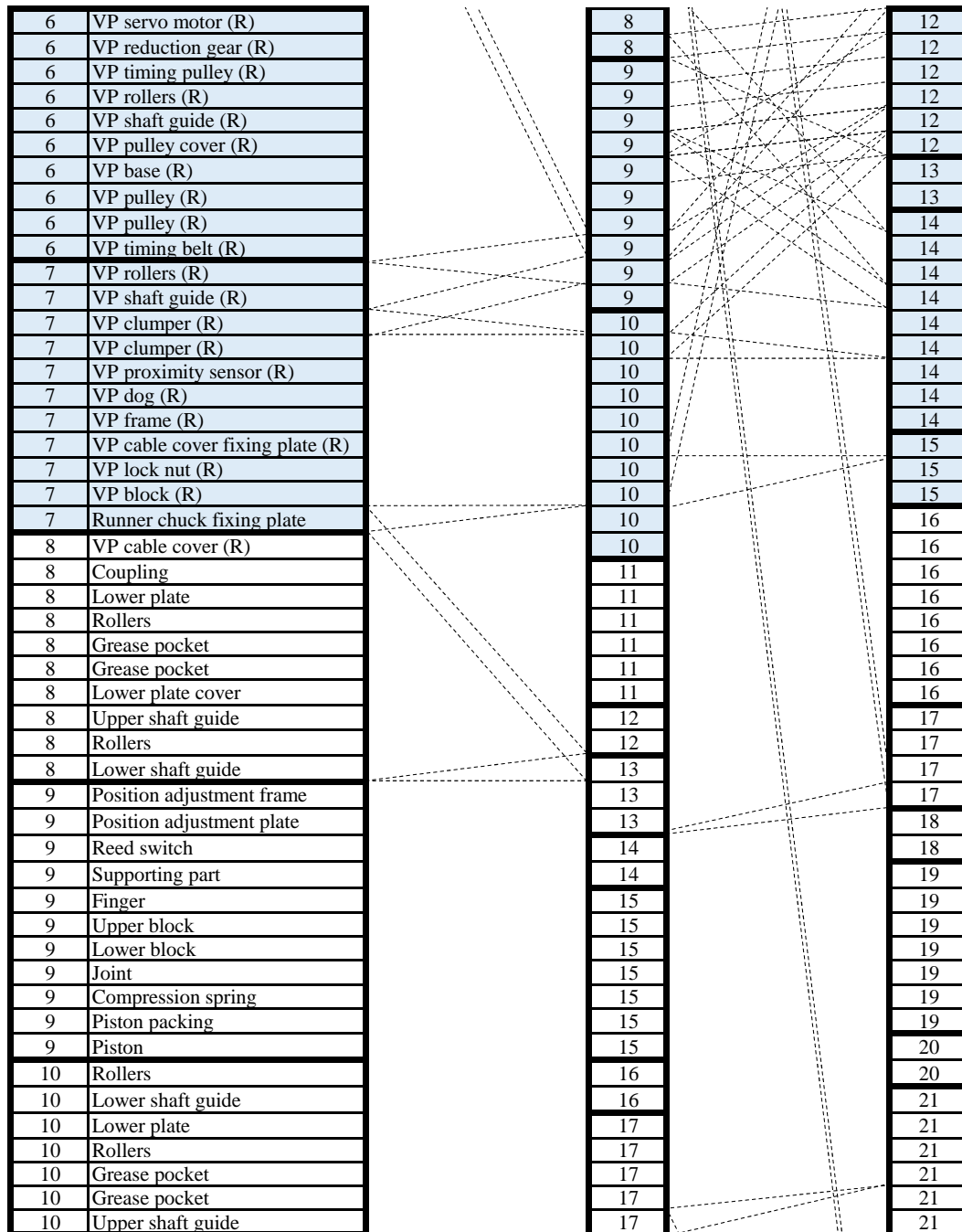


Fig. 3.8 Results of modularization of the industrial three-axis linear-type robot (part 2).



18	Digital pressure sensor plate	28	33
18	Digital pressure sensor	28	33
18	Air suction	28	33
18	Vacuum ejector	28	33
19	KP block (P)	29	34
19	KP lock nut (P)	29	34
19	KP pulley (P)	29	34
19	Pulley supporting plate (P)	29	34
19	KP timing pulley (P)	29	34
19	KP timing belt (P)	29	34
19	Belt clip guide (P)	29	34
20	KP block (R)	30	35
20	KP lock nut (R)	30	35
20	KP pulley (R)	30	36
20	Pulley supporting plate (R)	30	36
20	KP timing pulley (R)	30	36
20	KP timing belt (R)	30	36
20	Belt clip guide (R)	30	36
21	KP servo motor (P)	31	37
21	KP reduction gear (P)	31	37
21	KP servo motor (R)	31	38
21	KP reduction gear (R)	31	38
21	KP plate	31	38

Fig. 3.8 Results of modularization of the industrial three-axis linear-type robot (part 4).





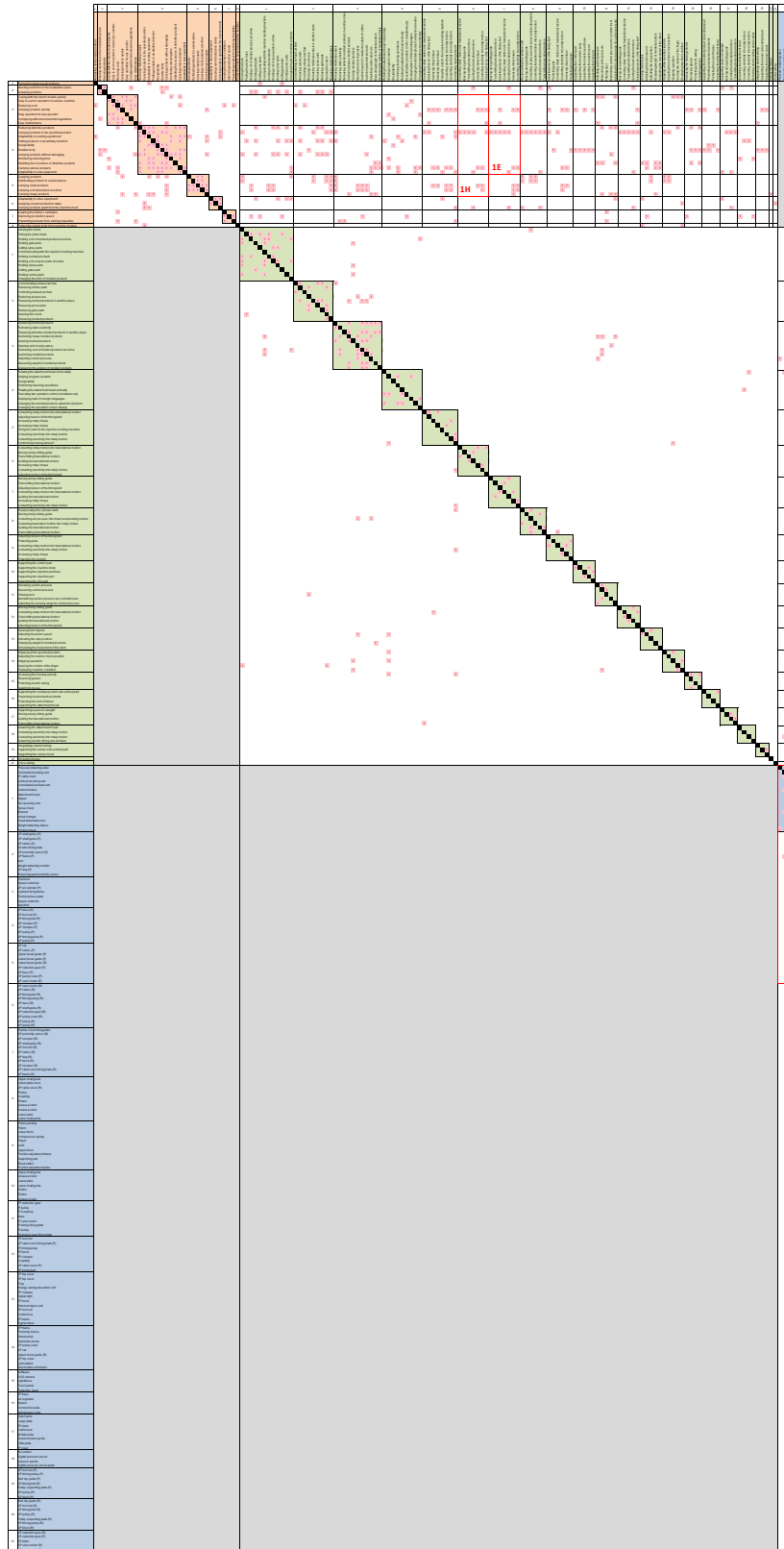


Fig. 3.9 Clustering result of the industrial three-axis linear-type robot (Case 1) [left half part].  
 Note: Each DSM and each DMM are respectively shown in Fig. 3.12 to 3.16.

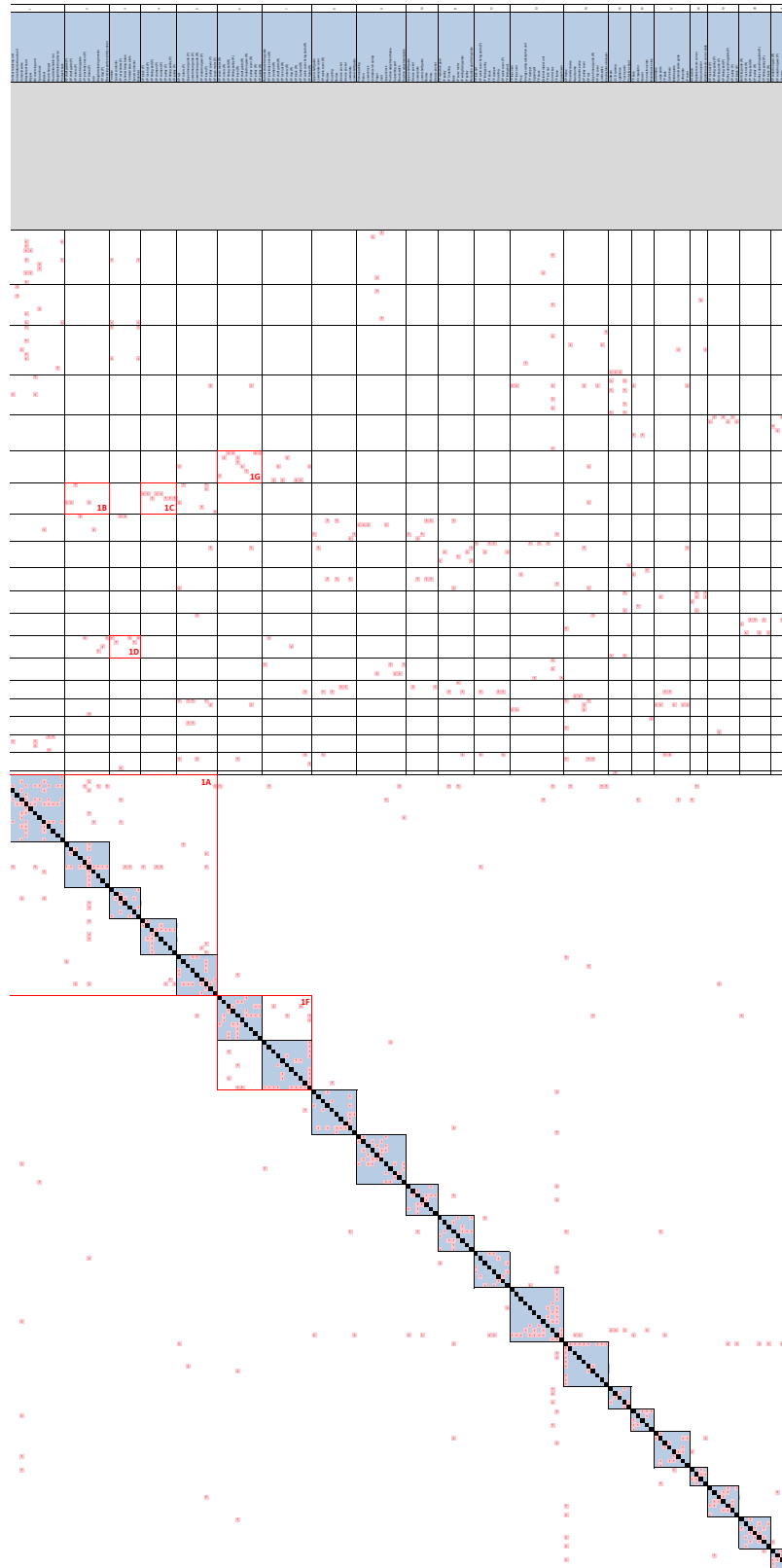


Fig. 3.9 Clustering result of the industrial three-axis linear-type robot (Case 1) [right half part].

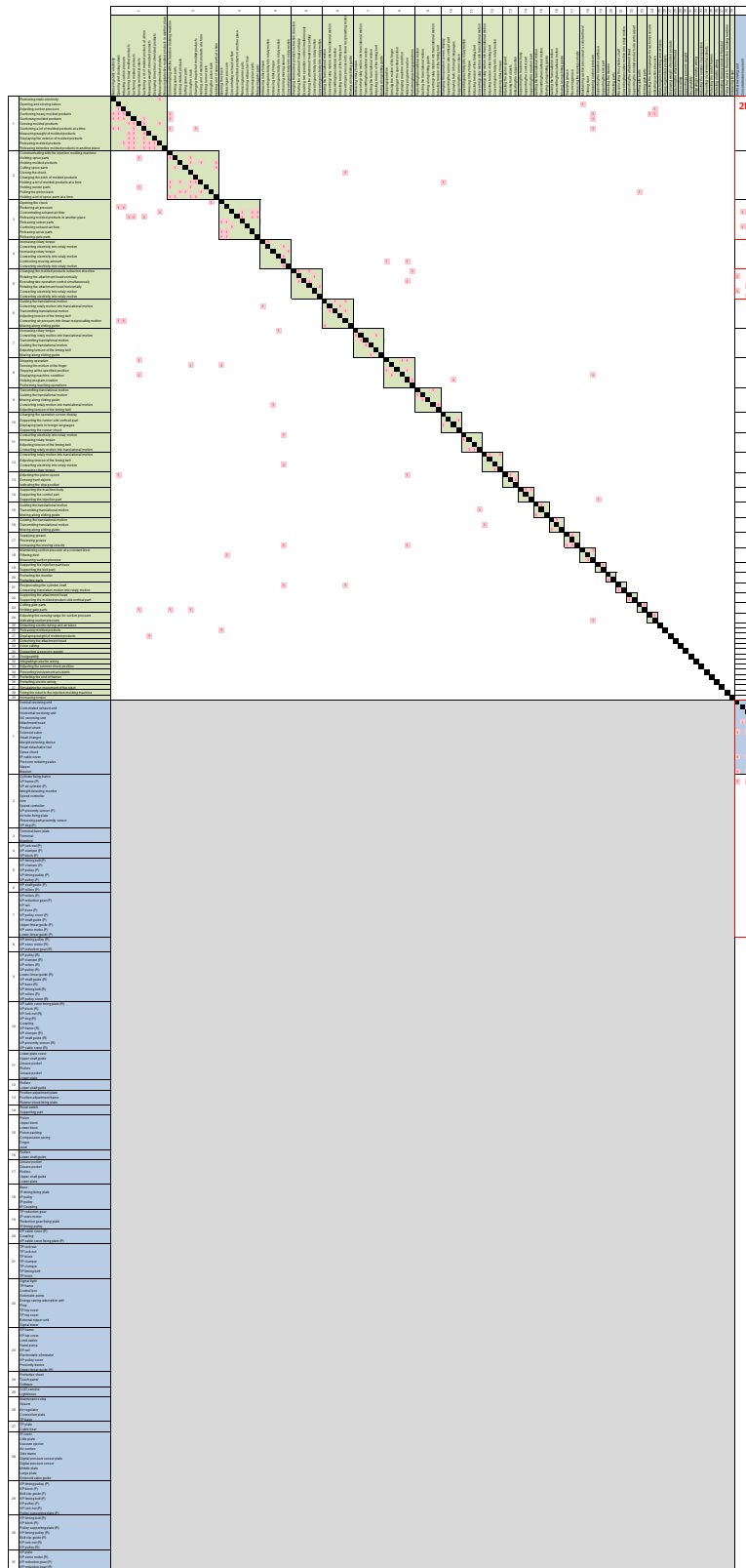


Fig. 3.10 Clustering result of the industrial three-axis linear-type robot (Case 2) [left half part].

Note: Each DSM and each DMM are respectively shown in Fig. 3.17 to 3.19.

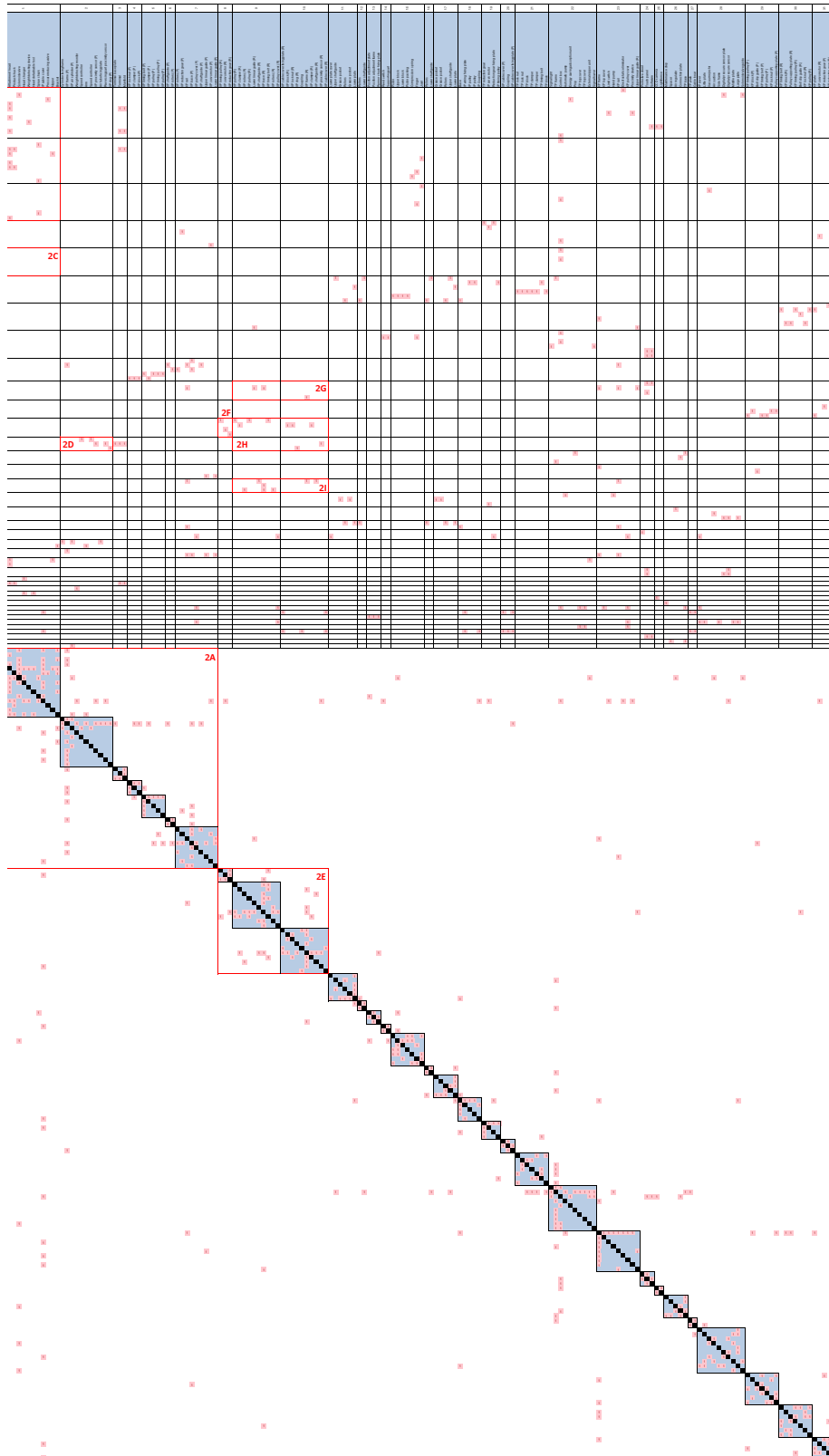


Fig. 3.10 Clustering result of the industrial three-axis linear-type robot (Case 2) [right half part].



Fig. 3.11 Clustering result of the industrial three-axis linear-type robot (Case 3) [left half part].

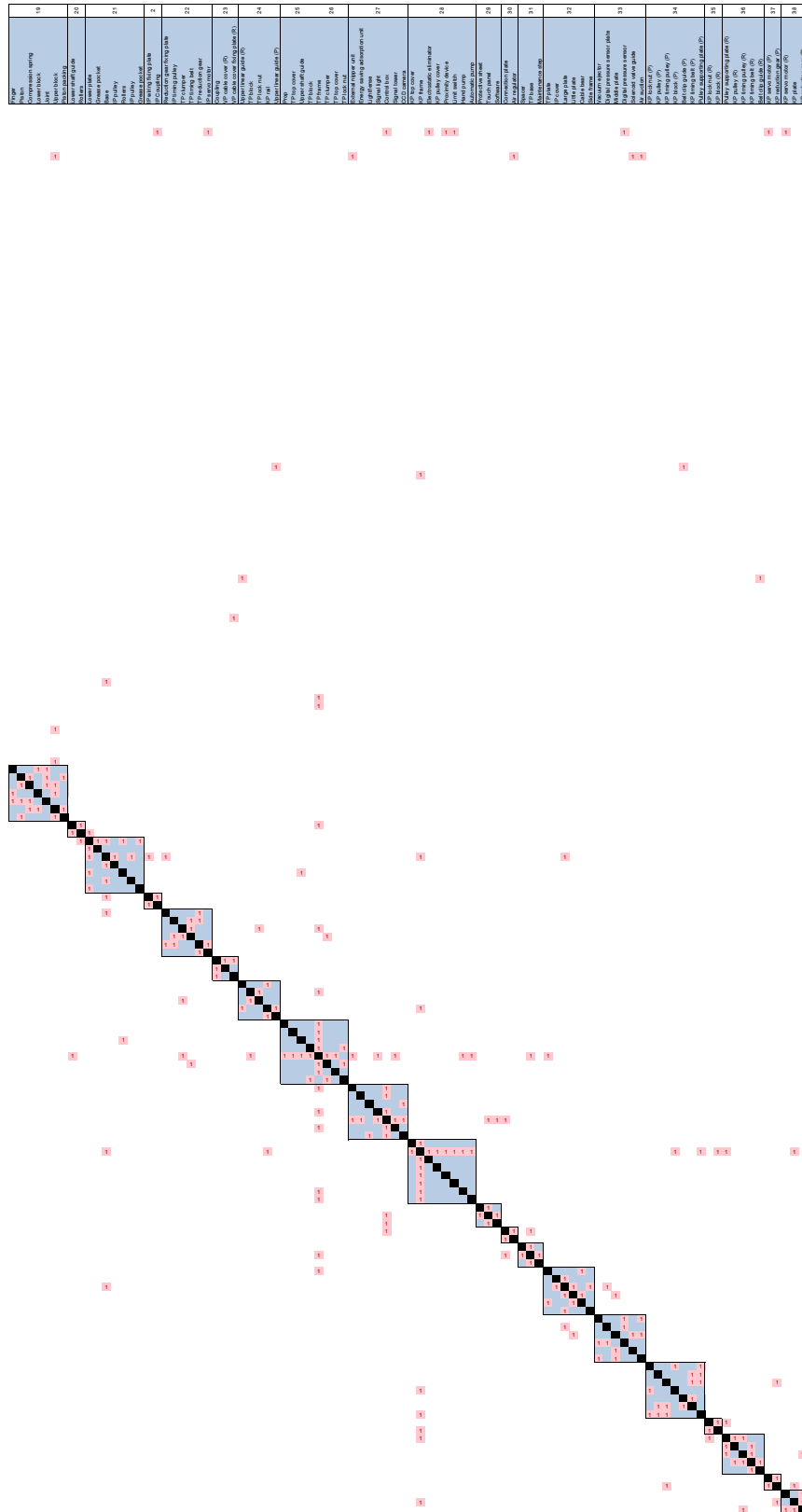


Fig. 3.11 Clustering result of the industrial three-axis linear-type robot (Case 3) [right half part].



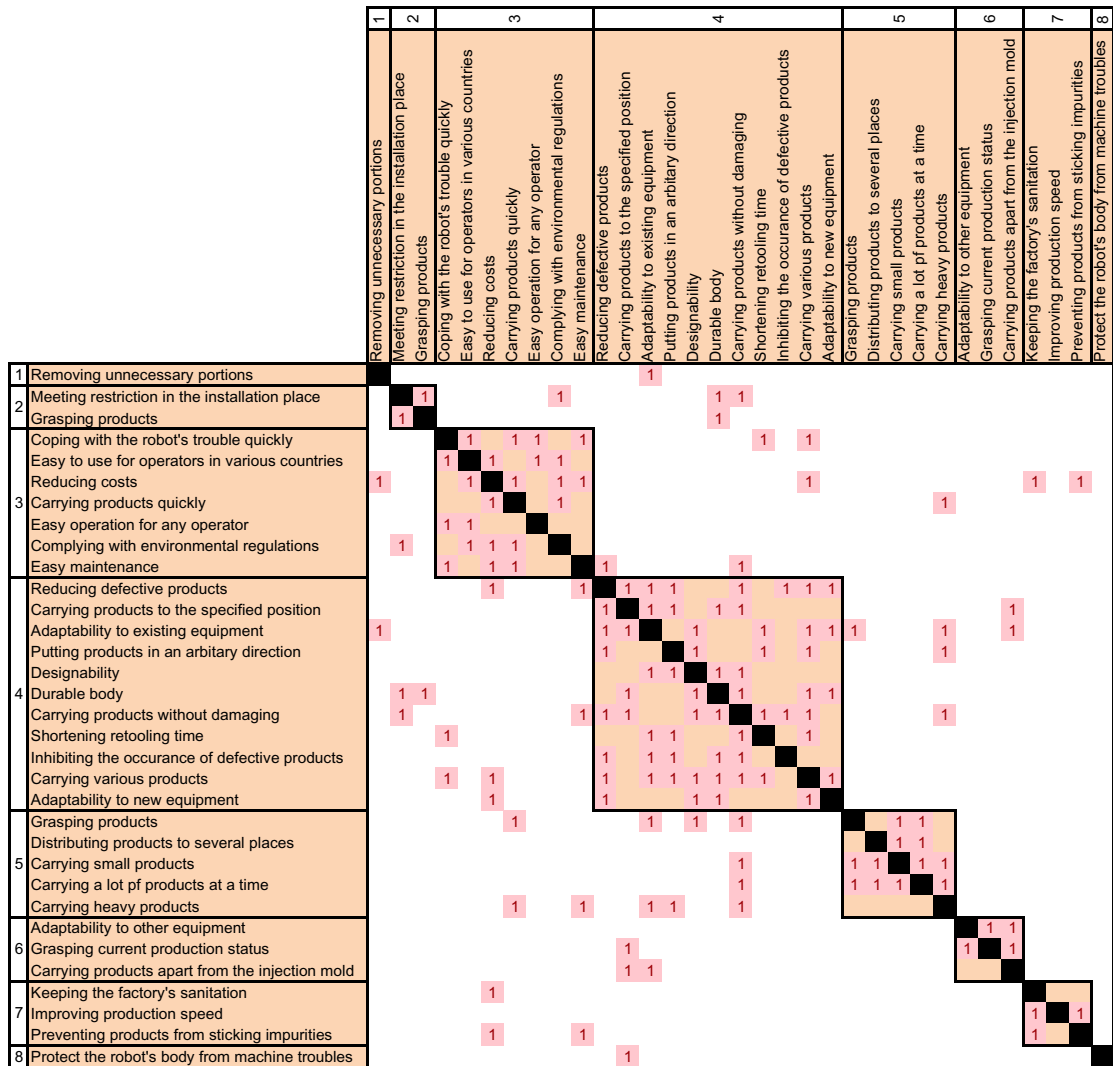


Fig. 3.12 Clustering and partitioning result of the customer requirements DSM (Case 1).



	1	2	3	4	5	
	Closing the chuck Pulling the piston back Holding a lot of molded products at a time Holding gate parts Cutting sprue parts Communicating with the injection molding machine Holding molded products Holding a lot of sprue parts at a time Holding sprue parts Cutting gate parts Holding runner parts Changing the pitch of molded products Concentrating exhaust air flow Releasing runner parts Controlling exhaust air flow Reducing air pressure Releasing molded products in another place Releasing sprue parts Releasing gate parts Opening the chuck Releasing molded products Releasing molded products Removing static electricity Releasing defective molded products in another place Suctioning heavy molded products Sensing molded products Opening and closing valves Suctioning a lot of molded products at a time Suctioning molded products Adjusting suction pressure Measuring weight of molded products Displaying the exterior of molded products Rotating the attachment head horizontally Helping program creation Designability Performing teaching operations Rotating the attachment head vertically Executing two operation control simultaneously Displaying texts in foreign languages Changing the molded products extraction direction Changing the operation screen display Converting rotary motion into translational motion Adjusting tension of the timing belt Increasing rotary torque Fixing the robot to the injection molding machine Converting electricity into rotary motion Converting electricity into rotary motion Controlling moving amount Converting rotary motion into translational motion Moving along sliding guide Transmitting translational motion					
1 Removing unnecessary portions	1	1				
2 Meeting restriction in the installation place						
Grasping products	1 1 1 1 1 1	1	1 1 1			
Coping with the robot's trouble quickly		1				
Easy to use for operators in various countries						
Reducing costs		1 1				
3 Carrying products quickly						
Easy operation for any operator						
Complying with environmental regulations				1		
Easy maintenance				1		
4 Reducing defective products	1	1	1 1 1 1	1	1 1 1	1 1 1 1
Carrying products to the specified position	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Adaptability to existing equipment	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Putting products in an arbitrary direction	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Designability	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Durable body	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Carrying products without damaging	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Shortening retooling time	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Inhibiting the occurrence of defective products	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Carrying various products	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Adaptability to new equipment	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
5 Grasping products	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Distributing products to several places	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Carrying small products	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Carrying a lot of products at a time	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Carrying heavy products	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
6 Adaptability to other equipment	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Grasping current production status	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Carrying products apart from the injection mold	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
7 Keeping the factory's sanitation	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Improving production speed	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
Preventing products from sticking impurities	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1
8 Protect the robot's body from machine troubles	1	1	1 1 1 1	1	1 1	1 1 1 1

Fig. 3.13 Clustering result of the requirements-functions DMM (Case 1) [left half part].



		1	2	3	4	5	6		
		Closing the chuck Pulling the piston back Holding a lot of molded products at a time Cutting sprue parts Communicating with the injection molding machine Holding molded products Holding a lot of sprue parts at a time Holding sprue parts Cutting gate parts Holding runner parts Cutting runner parts Concentrating exhaust air flow	Releasing runner parts Controlling exhaust air flow Reducing air pressure Releasing molded products in another place Releasing sprue parts Releasing gate parts Opening the chuck Releasing molded products	Removing static electricity Releasing defective molded products in another place Suctioning heavy molded products Sensing molded products Opening and closing valves Suctioning a lot of molded products at a time Suctioning molded products Adjusting suction pressure Measuring weight of molded products Displaying the exterior of molded products	Rotating the attachment head horizontally Helping program creation Designability Performing teaching operations Rotating the attachment head vertically Executing two operation control simultaneously Displaying texts in foreign languages Changing the molded products extraction direction Changing the operation screen display	Converting rotoly motion into translational motion Adjusting tension of the timing belt Increasing rotary torque Fixing the robot to the injection molding machine Converting electricity into rotoly motion Contoroling moving amount	Converting rotoly motion into translational motion Transmitting translational motion Guiding the translational motion Increasing rotary torque Converting electricity into rotoly motion Adjusting tension of the timing belt	Moving along sliding guide Transmitting translational motion Adjusting tension of the timing belt Converting rotoly motion into translational motion Guiding the translational motion Increasing rotary torque Converting electricity into rotoly motion	Reciprocating the cylinder shaft Moving along sliding guide Converting air pressure into linear reciprocating motion Converting translation motion into rotoly motion Guiding the translational motion Transmitting translational motion
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	1	1	1	1	1	
3	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	1	1	1	1	1	1	1	1	
7	1	1	1	1	1	1	1	1	
8	1	1	1	1	1	1	1	1	
9	1	1	1	1	1	1	1	1	
10	1	1	1	1	1	1	1	1	
11	1	1	1	1	1	1	1	1	
12	1	1	1	1	1	1	1	1	
13	1	1	1	1	1	1	1	1	
14	1	1	1	1	1	1	1	1	
15	1	1	1	1	1	1	1	1	
16	1	1	1	1	1	1	1	1	
17	1	1	1	1	1	1	1	1	
18	1	1	1	1	1	1	1	1	
19	1	1	1	1	1	1	1	1	
20	1	1	1	1	1	1	1	1	
21	1	1	1	1	1	1	1	1	

Fig. 3.14 Clustering result of the physical functions DSM (Case 1) [left half part].

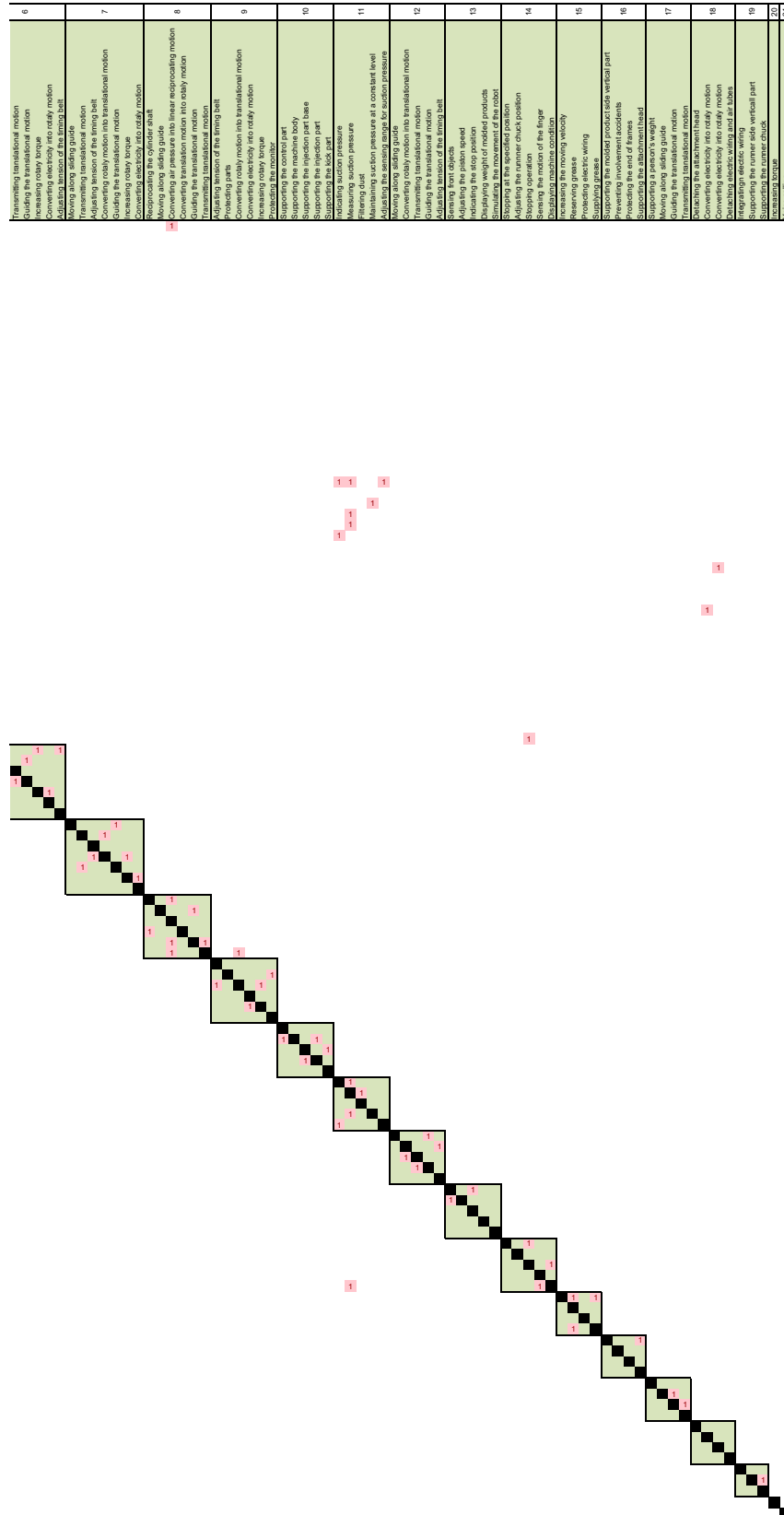


Fig. 3.14 Clustering result of the physical functions DSM (Case 1) [right half part].

	1	2	3	4	5	6	7	8
Clipping the chuck								
Pulling the piston back								
Holding a lot of molded products at a time								
Holding gate parts								
Cutting sprue parts								
Communicating with the injection molding machine								
Holding molded products								
Holding a lot of sprue parts at a time								
Holding sprue parts								
Cutting gate parts								
Holding runner parts								
Changing the pitch of molded products								
Concentrating exhaust air flow								
Releasing runner parts								
Controlling exhaust air flow								
Reducing air pressures								
Releasing molded products in another place								
Releasing sprue parts								
Releasing gate parts								
Opening the chuck								
Releasing molded products								
Releasing molded products								
Releasing molded products								
Removing static electricity								
Releasing defective molded products in another place								
Suctioning heavy molded products								
Densifying molded products								
Opening and closing valves								
Suctioning a lot of molded products at a time								
Suctioning molded products								
Adjusting suction pressures								
Measuring weight of molded products								
Displaying the number of molded products								
Rotating the attachment head horizontally								
Helping program creation								
Debuggability								
Performing teaching operations								
Rotating the attachment head vertically								
Releasing low operation control simultaneously								
Displaying texts in foreign languages								
Changing the molded products extraction direction								
Changing the operation screen display								
Converting rotary motion into translational motion								
Adjusting tension of the timing belt								
Increasing rotary torque								
Fixing the robot to the injection molding machine								
Converting electricity into rotary motion								
Controlling moving amount								
Converting rotary motion into translational motion								
Moving along sliding guide								
Transmitting translational motion								
Guiding the translational motion								
Increasing rotary torque								
Converting electricity into rotary motion								
Adjusting tension of the timing belt								
Moving along sliding guide								
Transmitting translational motion								
Adjusting tension of the timing belt								
Converting rotary motion into translational motion								
Guiding the translational motion								
Increasing rotary torque								
Converting electricity into rotary motion								
Reciprocating the cylinder shaft								
Moving along sliding guide								
Converting air pressure into linear reciprocating motion								
Converting translation motion into rotary motion								
Guiding the translational motion								
Transmitting translational motion								
Adjusting tension of the timing belt								
Protecting parts								
Converting rotary motion into translational motion								
Converting electricity into rotary motion								
Increasing rotary torque								
Protecting the monitor								
Supporting the control part								
Supporting the machine body								
Supporting the injection part base								
Supporting the injection part								
Supporting the lock part								
Indicating suction pressure								
Measuring suction pressure								
Filtering dust								
Maintaining suction pressure at a constant level								
Adjusting the sensing range for suction pressure								
Moving along sliding guide								
Converting rotary motion into translational motion								
Transmitting translational motion								
Guiding the translational motion								
Adjusting tension of the timing belt								
Sensing front objects								
Adjusting the piston speed								
Indicating the stop position								
Displaying weight of molded products								
Simulating the movement of the robot								
Stopping at the specified position								
Adjusting the runner chuck position								
Stopping operation								
Sensing the motion of the finger								
Displaying machine condition								
Increasing the moving velocity								
Receiving grease								
Protecting electric wiring								
Supplying grease								
Supporting the molded product side vertical part								
Preventing involvement accidents								
Protecting the end of frames								
Supporting the attachment head								
Supporting a person's weight								
Moving along sliding guide								
Guiding the translational motion								
Transmitting translational motion								
Detaching the attachment head								
Converting electricity into rotary motion								
Converting electricity into rotary motion								
Detaching electric wiring and air tubes								
Integrating electric wiring								
Supporting the runner side vertical part								
Supporting the runner chuck								
Increasing torque								
Voice calling								

Fig. 3.15 Clustering result of the functions–structure DMM (Case 1) [left half part].



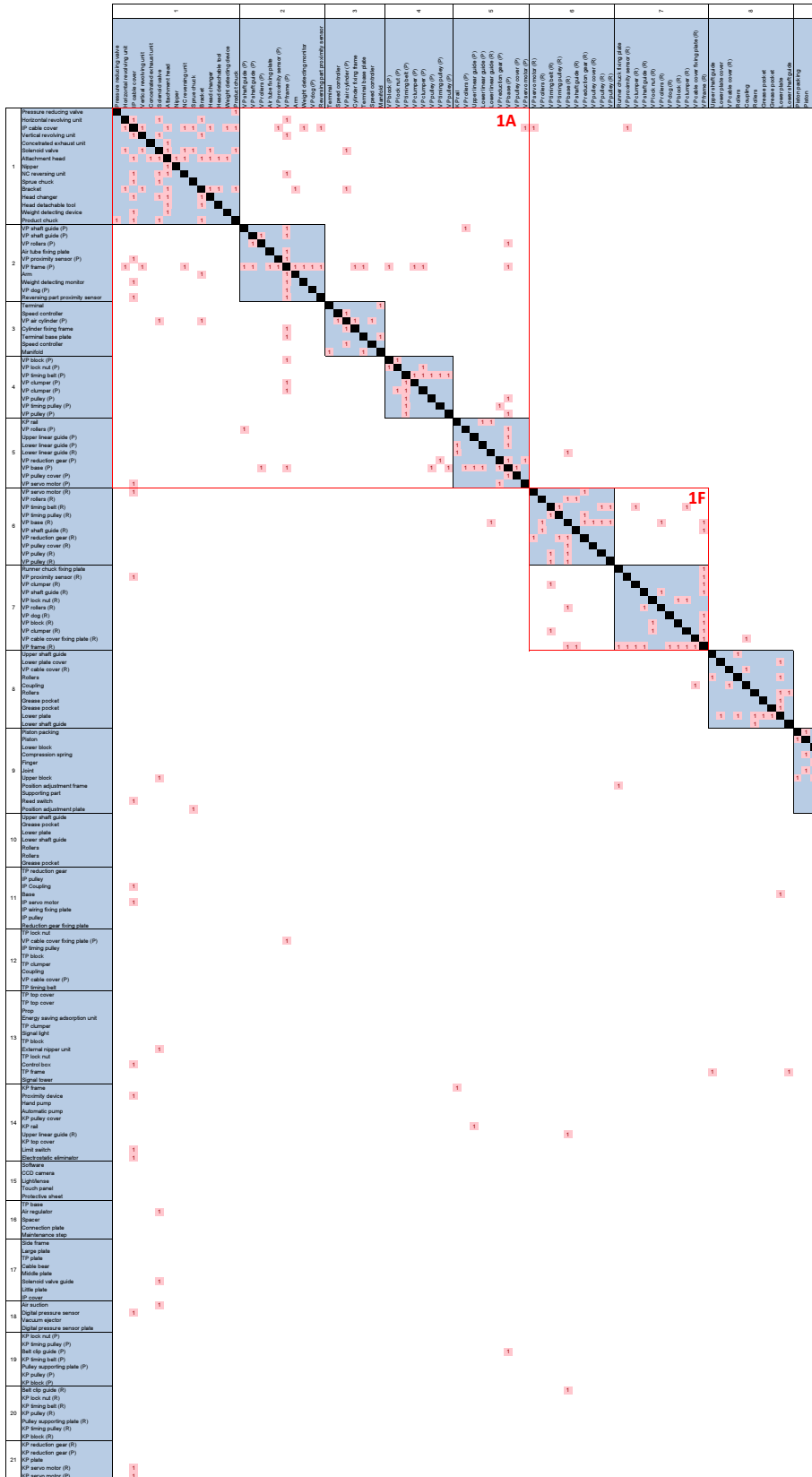


Fig. 3.16 Clustering result of the entity structure DSM (Case 1) [left half part].

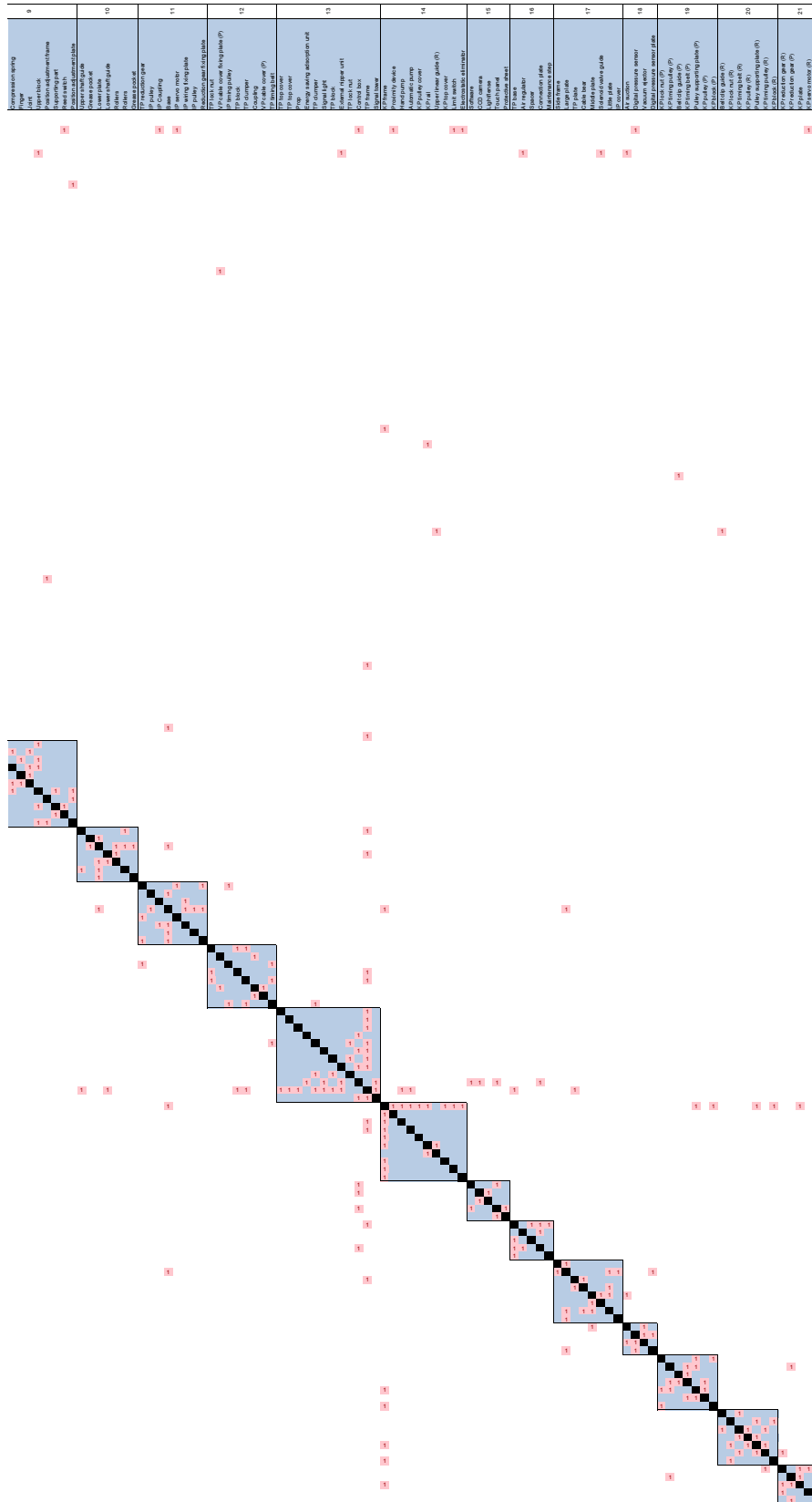


Fig. 3.16 Clustering result of the entity structure DSM (Case 1) [right half part].



	1	2	3	4	5	6	7
1	1						
2		1					
3			1				
4				1			
5					1		
6						1	
7							1

1	Removing static electricity	Opening and closing valves	Adjusting suction pressure	Suctioning heavy molded products	Suctioning molded products	Sensing molded products	Suctioning a lot of molded products at a time	Measuring weight of molded products	Displaying the exterior of molded products	Releasing molded products	Releasing defective molded products in another place
2	Communicating with the injection molding machine	Holding sprue parts	Holding molded products	Cutting sprue parts	Closing the chuck	Changing the pitch of molded products	Holding a lot of molded products at a time	Holding runner parts	Putting the piston back	Holding a lot of sprue parts at a time	
3	Opening the chuck	Reducing air pressure	Concentrating exhaust air flow	Releasing molded products in another place	Releasing runner parts	Controlling exhaust air flow	Releasing sprue parts	Releasing gate parts	Increasing rotary torque	Converting electricity into rotary motion	
4	Increasing rotary torque	Converting electricity into rotary motion	Increasing rotary torque	Converting electricity into rotary motion	Controlling moving amount	Converting electricity into rotary motion	Converting electricity into rotary motion	Changing the molded products extraction direction	Rotating the attachment head vertically	Executing two operation control simultaneously	
5	Rotating the attachment head horizontally	Converting electricity into rotary motion	Converting electricity into rotary motion	Converting electricity into rotary motion	Guiding the translational motion	Converting rotary motion into translational motion	Transmitting translational motion	Adjusting tension of the timing belt	Converting air pressure into linear reciprocating motion	Moving along sliding guide	
6	Increasing rotary torque	Converting rotary motion into translational motion	Transmitting translational motion	Guiding the translational motion	Adjusting tension of the timing belt	Moving along sliding guide	Stopping operation	Sensing the motion of the finger	Stopping at the specified position	Displaying machine condition	
7	Helping program creation	Performing teaching operations	Transmitting translational motion	Guiding the translational motion	Moving along sliding guide	Converting rotary motion into translational motion	Adjusting tension of the timing belt	Changing the operation screen display	Supporting the runner side vertical part	Displaying texts in foreign languages	
8	Supporting the runner chuck	Converting electricity into rotary motion	Increasing rotary torque	Adjusting tension of the timing belt	Converting rotary motion into translational motion	Adjusting tension of the timing belt	Converting electricity into rotary motion	Increasing rotary torque	Adjusting the piston speed	Sensing front objects	
9	Indicating the stop position	Supporting the machine body	Supporting the injection part	Guiding the translational motion	Transmitting translational motion	Moving along sliding guide	Supplying grease	Receiving grease	Increasing the moving velocity	Maintaining suction pressure at a constant level	
10	Filtering dust	Supporting the injection part base	Supporting the kick part	Protecting the monitor	Protecting parts	Reciprocating the cylinder shaft	Converting translation motion into rotary motion	Supporting the attachment head	Supporting the molded product side vertical part	Cutting gate parts	
11	Holding gate parts	Adjusting the sensing range for suction pressure	Indicating suction pressure	Detaching electric wiring and air tubes	Releasing molded products	Displaying weight of molded products	Detaching the attachment head	Voice calling	Supporting a person's weight	Designability	
12	Integrating electric wiring	Adjusting the runner chuck position	Preventing involvement accidents	Protecting the end of frames	Protecting electric wiring	Simulating the movement of the robot	Fixing the robot to the injection molding machine	Increasing torque			

Fig. 3.17 Clustering result of the physical functions DSM (Case 2) [left half part].



Function	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Removing static electricity												
Opening and closing valves												
Adjusting suction pressure												
Suctioning heavy molded products												
Suctioning molded products												
Opening molded products												
Suctioning a lot of molded products at a time												
Measuring weight of molded products												
Displaying the exterior of molded products												
Releasing molded products												
Releasing defective molded products in another place												
Communicating with the injection molding machine												
Holding sprue parts												
Holding molded products												
Cutting sprue parts												
Closing the chuck												
Changing the pitch of molded products												
Holding a lot of molded products at a time												
Holding runner parts												
Pulling the piston back												
Holding a lot of sprue parts at a time												
Opening the chuck												
Reducing air pressure												
Concentrating exhaust air flow												
Releasing molded products in another place												
Releasing runner parts												
Controlling exhaust air flow												
Releasing sprue parts												
Releasing gate parts												
Increasing rotary torque												
Converting electricity into rotary motion												
Increasing rotary torque												
Converting electricity into rotary motion												
Controlling moving amount												
Converting electricity into rotary motion												
Changing the molded products extraction direction												
Rotating the attachment head vertically												
Executing two operation control simultaneously												
Rotating the attachment head horizontally												
Converting electricity into rotary motion												
Converting electricity into rotary motion												
Guiding the translational motion												
Converting rotary motion into translational motion												
Transmitting translational motion												
Adjusting tension of the limiting belt												
Converting air pressure into linear reciprocating motion												
Moving along sliding guide												
Increasing rotary torque												
Converting rotary motion into translational motion												
Transmitting translational motion												
Guiding the translational motion												
Adjusting tension of the limiting belt												
Moving along sliding guide												
Stopping operation												
Sensing the motion of the finger												
Stopping at the specified position												
Displaying machine condition												
Helping program creation												
Performing teaching operations												
Transmitting translational motion												
Guiding the translational motion												
Moving along sliding guide												
Converting rotary motion into translational motion												
Adjusting tension of the limiting belt												
Changing the operation screen display												
Supporting the runner side vertical part												
Displaying texts in foreign languages												
Supporting the runner chuck												
Converting electricity into rotary motion												
Increasing rotary torque												
Adjusting tension of the limiting belt												
Converting rotary motion into translational motion												
Converting rotary motion into translational motion												
Adjusting tension of the limiting belt												
Converting electricity into rotary motion												
Increasing rotary torque												
Adjusting the piston speed												
Sensing heat objects												
Indicating the stop position												
Supporting the machine body												
Supporting the control part												
Supporting the injection part												
Transmitting translational motion												
Guiding the translational motion												
Moving along sliding guide												
Guiding the translational motion												
Transmitting translational motion												
Moving along sliding guide												
Supplying grease												
Releasing grease												
Increasing the moving velocity												
Maintaining suction pressure at a constant level												
Filtering dust												
Measuring suction pressure												
Supporting the injection part base												
Supporting the lock part												
Protecting the monitor												
Protecting parts												
Reciprocating the cylinder shaft												
Converting translation motion into rotary motion												
Supporting the attachment head												
Supporting the molded product side vertical part												
Cutting gate parts												
Holding gate parts												
Adjusting the sensing range for suction pressure												
Indicating suction pressure												
Detecting electric wiring and air tubes												
Releasing molded products												
Displaying weight of molded products												
Detecting the attachment head												
Voice calling												
Supporting a person's weight												
Recognizability												
Integrating electric wiring												
Adjusting the runner chuck position												
Preventing involvement accidents												
Protecting the kind of frames												
Protecting electric wiring												
Facilitating the movement of the robot												
Fixing the robot to the injection molding machine												
Increasing torque												

Fig. 3.18 Clustering result of the functions–structure DMM (Case 2) [left half part].





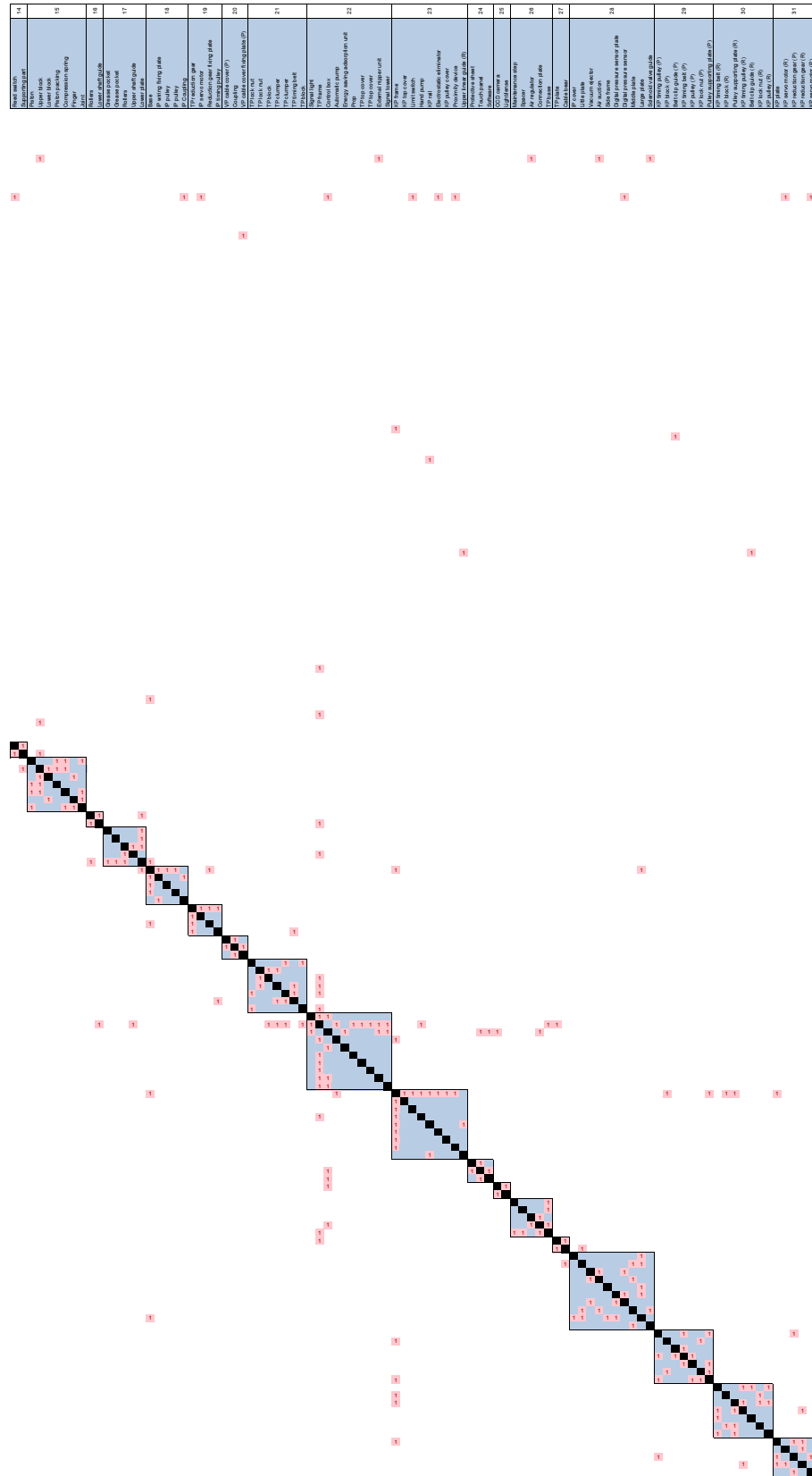


Fig. 3.19 Clustering result of the entity structure DSM (Case 2) [right half].

## (2) ランナ側上下部

図 3.8 中の青色で示されているランナ側上下部について、Case 1～Case 3 の結果の比較を行う。当該部位は DSM 上で、図 3.16, 図 3.19, 図 3.11 上の 1F, 2E, 3B に対応する。まず、図 3.8 において Case 2 と Case 3 を比較すると大きく異なる点として Case 3 においてモジュール 12, 14 に存在していたサーボモータ・減速器・タイミングプーリが Case 2 ではモジュール 8 として分離・統合されていることが挙げられる。これに関しては、物理機能-実体構造 DMM (図 3.18) を見ると、図中 2F で示すように、Case 2 のモジュール 8 は機能クラスタ 12 のみと対応関係を持つのに対して、モジュール 9, 8 は 2G, 2H, 2I で示すように機能クラスタ 10, 12, 13, 16 など多数の機能クラスタと対応関係にあることが分かる。この違いにより、Case 2 ではモジュール 8 が他の構成要素と分離してモジュール化されたものと見られる。

次に Case 1 と Case 2 の結果を図 3.8 上で比較すると、Case 2 におけるモジュール 8, 9 が Case 1 では 1 つのモジュールとしてモジュール 6 に統合されているという違いがある。この結果は、Case 3 と大きく異なっている。物理機能-実体構造 DMM (図 3.15) 上の 1G で示されるように、Case 1 のモジュール 6 は機能クラスタ 6 との対応関係により統合されていることが分かる。この機能クラスタ 6 は、Case 2 においては機能クラスタ 12, 16 の 2 つのクラスタに分かれていた機能が統合されたものであり、これによって Case 1 のモジュール 6 が構成されたものと考えられる。機能クラスタ 6 はフレームを移動させる動力の発生・伝達に関する機能が集まっている。この結果、Case 1 のモジュール 6 にはモータやプーリ・タイミングベルトといった動力発生・伝達部品が集約されている。この Case 1 の機能クラスタ 6 は顧客要求-物理機能 DMM (図 3.13) を見ると、図中 1H で示す顧客要求クラスタ 3, 4, 5 との対応関係によって構成されたことが分かる。要求クラスタ 3, 4 は製品側上下部の分析において述べたように、ロボットのメンテナンス性や運搬能力に関する要求で構成されている。要求クラスタ 5 は小型成形品の運搬や一度に多数の成形品を運搬することに対する要求で構成されている。動力の発生・伝達に関する部品が 1 つのモジュールに集約されることで、メンテナンス性が向上するほか、このモジュールをカスタマイズして能力の高いものに交換することで、運搬能力が高い構成に変更することも考えられる。また、一度に多数の小型成形品が成形される場合にはランナの取り出しに時間がかかるため、モジュールをカスタマイズして運搬速度を向上することも考えられる。以上より、Case 1 のモジュール 6 は対応する顧客要求を反映したものとなっていると言える。

### 3.6.3 受注プロセス設計結果

前項のクラスタリングを適用した Case 1 の MDM のうち、顧客要求 DSM に対して 3.4.5 項のパーティショニング手法を適用し、受注プロセスの設計を行った。パーティショニン

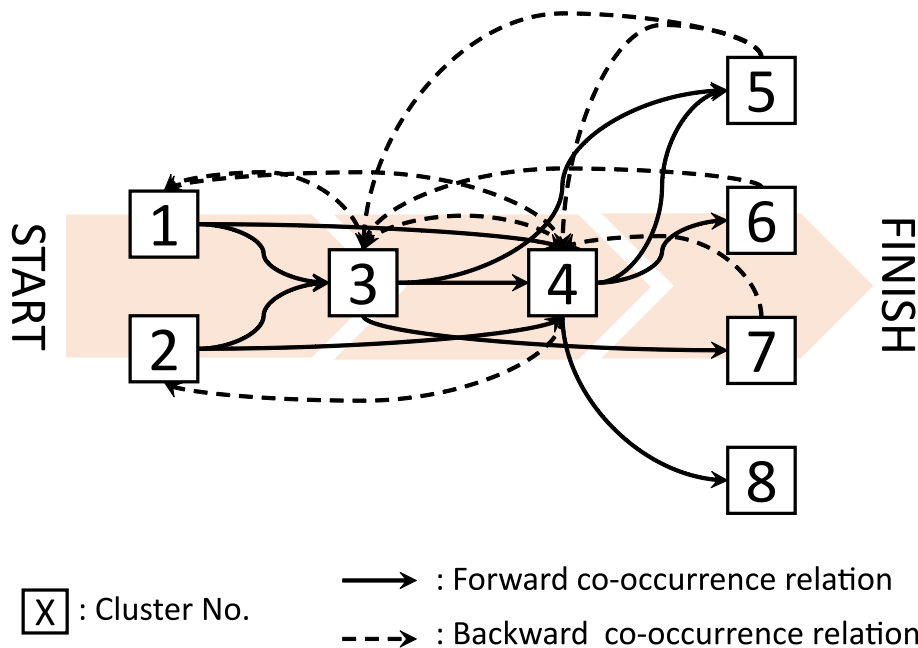


Fig. 3.20 Order receiving process of the industrial three-axis linear-type robot.

グの適用結果を図 3.12 に示す。これを見ると、要求クラスタ 1 と 2 および要求クラスタ 5 ～8 は、互いに依存関係が存在しないため、並行して要求の聞き取りを進めることができる部分である。この結果、受注手順は図 3.20 のような流れになる。図中の点線の矢印は手戻り方向の流れを示す。ここでいう手戻りとは、聞き取った要求に対応するために先に決定した製品仕様を修正する、製品仕様決定の手戻りのことを指す。3.2.2 項で述べたように、顧客要求に対してモジュールを引き当てて製品仕様を決定する順番によって、顧客要求の製品への反映のされ方が異なるため、優先的な要求から聞き取りを行って製品仕様を決定しなければ、顧客要求を十分に満たした製品を提供できない、あるいは受注の後工程で製品仕様を再考する必要性が生じて製品仕様の決定により多くの時間を要するなど、顧客満足度の低下を招く恐れがある。

図 3.12 を見ると、互いに共起関係を有する要求クラスタ同士も、パーティショニングに際しては共起関係の数が考慮され、手戻り方向の関係が少なくなるように受注プロセスが設計されていることが分かる。これによって、製品仕様を後から修正する回数を抑えることができ、製品仕様決定の手戻りの発生が抑えられている。このように、顧客要求 DSM にパーティショニングを適用したことにより、顧客要求 DSM における受注手順と逆方向の顧客要求間の共起関係が、受注手順方向への共起関係よりも少なくなっており、比較的製品仕様決定の手戻りが少なく、顧客の要求の優先順位に沿った要求の聞き取りが行える受注手順が得られることが分かった。3.2.2 項で述べたように、顧客要求を対話的に聞き取



り、製品仕様を順次決定していく受注形式をとる場合、得られた受注手順のように顧客要求の共起関係に着目して要求を聞きとり、製品仕様を決定していくことで、受注に要する時間も短縮して要求を満たした製品仕様を決定することが可能であると考えられる。

受注を行う際には、図 3.20 の流れに従って、各クラスタ単位で要求の有無や要求の詳細について顧客から聞き取りを行う。例題の三軸直交ロボットの対象部位では、要求クラスタ 1, 2 の要求に関しては並行して要求の聞き取りを行うことができ、それらの聞き取りを行ってから要求クラスタ 3 の要求の聞き取りを行う。より具体的には、要求クラスタ 3 は「速く移したい」「様々な使用者に対応できる」「環境制限に合わせられる」などの要求が含まれる。これに対しては、どれくらいのサイクルタイムで運搬したいのか、どのような人が操作をするのか、設置場所の環境基準はどうなっているかについて聞き取りを行う。聞き取り内容に応じて、当該要求に MDM 上で対応するモジュールの仕様を決定していく。

### 3.6.4 考察

前項で得られた結果において 3.2 節で述べた各課題が提案手法により解決されたかどうかを考察する。

顧客要求間の共起関係を DSM の形式で明示化し、物理機能・実体構造の依存関係・共起関係を記述した DSM とそれらとの対応関係を記述した DMM でつないだ MDM を作成し、顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係を明示化することができた。作成した MDM に提案手法によるクラスタリングを適用することにより、製品アーキテクチャのモジュール化を行うことができた。提案手法によるモジュール化結果では、顧客要求を考慮せず物理機能や実体構造の依存関係・対応関係のみに基づいてクラスタリングを行った場合の結果と比較して、より多くの要素が 1 つのモジュールに統合されており、さらに各モジュールの分割点も異なった結果が得られた。この提案手法による各モジュールの構成を分析すると、モジュールのサイズが単純に大きくなったのではなく、顧客要求間の共起関係、物理機能間の依存関係、実体構造における依存関係が統合的に考慮されて関係の深い部品が効果的にモジュールにまとめられていることが分かった。すなわち、これは多くの顧客が共通して持つ要求の組合せに対応する製品の構成要素が同じモジュールに統合されていることを意味し、顧客が望む製品を得るためにカスタマイズする箇所を効果的に少なく抑えられており、顧客にとって発注がより容易になっていると言える。以上のことから、3.2.1 項で述べた課題への対応ができていくことが分かる。

クラスタリングされた顧客要求 DSM に提案手法によるパーティショニングを適用することで、製品を受注する際の顧客要求の聞き取り手順が得られた。得られた聞き取り手順は、顧客要求間の共起関係の方向性に従い、他の要求の起点となる顧客にとって優先度のより高い要求から聞き取りを行い、製品仕様を決定するものとなっていることが確認でき

た. よって, 3.2.2 項で述べた課題にも対応できていることが分かる.

### 3.7 結言

本章では, アーキテクチャ設計を顧客要求へと拡張した設計法として, カスタマイゼーションを伴う多種展開製品のためのアーキテクチャ設計を取り上げ, アーキテクチャ設計法の構築を行った. アーキテクチャ設計法の構築にあたっては, まず, 製品アーキテクチャ設計法として製品の顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係を記述した MDM のクラスタリング手法を構築し, 受注プロセス設計法として, 顧客要求 DSM に記述されている顧客要求間の共起関係に基づく顧客要求 DSM のパーティショニング手法を構築した. さらに, 産業用三軸直交ロボットの例題を取り上げて構築した手法を適用し, 顧客要求-物理機能-実体構造 MDM のクラスタリングと顧客要求 DSM のパーティショニングを行った. クラスタリング結果については, 物理機能-実体構造 MDM のクラスタリング結果および実体構造 DSM のクラスタリング結果と比較して結果の分析を行うことで, 提案手法により顧客要求まで反映した製品アーキテクチャが設計されていることを示し, パーティショニング結果の分析から製品仕様決定の手戻りが少ない受注プロセスが得られていること示して, 構築した手法の有効性を示した.

### 参考文献

- (1) Zamirowski, E. J. and Otto, K. N., Identifying Product Family Architecture Modularity Using Function and Variety Heuristics, in *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences*, Vol. 4 (1999), pp. 1–12, Paper No. DETC99/DTM-8760.
- (2) Dahmus, J. B., Gonzalez-Zugasti, J. P. and Otto, K. N., Modular Product Architectur, *Design Studies*, Vol. 22, No. 5 (2001), pp. 409–424.
- (3) Felfernig, A., Friedrich, G. and Schmidt-Thieme, L., Guest Editors' Introduction: Recommender Systems, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 22, No. 3 (2007), pp. 18–21.
- (4) Moon, S. K., Simpson, T. W. and Kumara, S. R. T., An Agent-Based Recommender System for Developing Customized Families of Products, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 20, No. 6 (2009), pp. 649–659.
- (5) Mavridou, E., Kehagias, D. D., Tzovaras, D. and Hassapis, G., Mining Affective Needs of Automotive Industry Customers for Building a Mass-Customization Recommender System, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 24, No. 2 (2013), pp. 251–265.

- (6) Li, S., Nahar, K. and Fung, B. C. M., Product Customization of Tablet Computers Based on the Information of Online Reviews by Customers, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 23, No. 1 (2015), pp. 97–110.
- (7) Zhou, C., Lin, Z. and Liu, C., Customer-Driven Product Configuration Optimization for Assemble-to-Order Manufacturing Enterprises, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 1 (2008), pp. 185–194.
- (8) Wei, W., Fan, W. and Li, Z., Multi-Objective Optimization and Evaluation Method of Modular Product Configuration Design Scheme, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 9–12 (2014), pp. 1527–1536.
- (9) 赤井亮太, 藤田喜久雄, プラットホーム群の先行設計と個別調整設計による製品系列展開とその最適設計に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 778 (2011), pp. 2430–2440.
- (10) Hauser, J. R. and Hauser, J. R., The House of Quality, *Harvard Business Review*, Vol. 66, No. 3 (1988), pp. 63–73.
- (11) Agrawal, R., Imieliński, T. and Swami, A., Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases, in *Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data* (1993), pp. 207–216.
- (12) Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J., *The Elements of Statistical Learning –Data Mining, Inference, and Prediction*, second edition (2009), Springer, (杉山将, 井手剛, 神尾敏弘, 栗田多喜夫, 前田英作 (監訳), 井尻善久, 他 (訳), 統計的学習の基礎–データマイニング・推論・予測 (2014), 共立出版).
- (13) Stone, R. B. and Wood, K. L., A Heuristic Method to Identify Modules from a Functional Description of a Product, in *Proceedings of the 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences* (1998), Paper No. DETC98/DTM-5642.
- (14) Eppinger, S. D. and Browning, T. R., *Design Structure Matrix Methods and Applications* (2012), MIT Press.
- (15) Yassine, A. A., Chidiac, R. H. and Osman, I. H., Simultaneous Optimisation of Products, Processes, and People in Development Projects, *Journal of Engineering Design*, Vol. 24, No. 4 (2013), pp. 272–292.
- (16) Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., Optimization by Simulated Annealing, *Science*, Vol. 220, No. 4598 (1983), pp. 671–680.
- (17) Johnson, D. S., Aragon, C. R., McGeoch, L. A. and Schevon, C., Optimization by Simulated Annealing: an Experimental Evaluation. Part I, Graph Partitioning, *Operations*

- Research*, Vol. 37, No. 6 (1989), pp. 865–892.
- (18) Gebala, D. A. and Eppinger, S. D., Methods for Analyzing Design Procedures, in *Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference* (1991), pp. 199–204.
- (19) Benhabib, B. and Dai, M. Q., Mechanical Design of a Modular Robot for Industrial Applications, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 4 (1991), pp. 297–306.
- (20) ef-prime, Inc., Natto ver. 1.0.4.
- (21) Smith, P. and Goodman, R., An Information Theoretic Approach to Rule Induction From Databases, *IEEE Transaction Knowledge and Data Engineering*, Vol. 4, No. 2 (1992), pp. 301–316.



## 第4章

# アーキテクチャ設計の組立工程への拡張とその設計法

### 4.1 緒言

本章では、アーキテクチャ設計を組立工程へと拡張する設計法として、顧客要求から組立工程までの相互関係を包括する製品アーキテクチャと製品組立手順の統合的設計法を構築する。製品アーキテクチャと製品組立手順の統合的設計を行うために、その前提となる組立工程の相互関係の明示化手法を構築し、明示化された相互関係を記述した組立工程 DSM と実体構造-組立工程 DMM を用いて顧客要求・物理機能・実体構造・組立工程を統合した MDM を作成する。次に、顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係から導かれる製品アーキテクチャの組立の実行可能性と効率を考慮する実体構造-組立工程 MDM のパーティショニング手法を構築する。さらに、家庭用エアコンディショナー(エアコン)を例題として取り上げ、構築した手法を適用し、その有効性について論じる。これにより得られた製品アーキテクチャと組立工程の設計結果を分析することを通じて、構築した手法の有効性を検証する。

### 4.2 組立性に起因する製品アーキテクチャ設計の課題

#### 4.2.1 組立性と製品アーキテクチャの関係

多種展開製品では、コスト低減のために多種の製品を高い生産効率で生産することが求められる。これに対しては、製品・部品在庫の削減による在庫管理費低減や、需要変動に応じた生産量の柔軟な変更を可能にすることを目的として、顧客や小売店から注文を受けてから最終組立作業を行う受注組立生産方式がとられる場合がある。このような方式で製品を生産する場合には、製品の受注から完成までのリードタイムにおいて製品の最終組立のリードタイムが主に支配的な因子となるため、第3章で取り上げたような受注後のカス

タマイゼーションを伴う場合と比較して、短納期での製品納入が可能になる<sup>(1)</sup>。しかし、納期に最終組立のリードタイムが直接的に影響を与えることを考えると、短納期での製品納入を可能とするためには最終組立工程の効率化が不可欠である。

組立性設計 (Design for Assembly, DFA) では、部品などの詳細に至ることなく、組立工程の概要を端的に表現して評価を行うための図式としてフィッシュボーン・ダイアグラムが用いられることがある<sup>(2)</sup>。このフィッシュボーン・ダイアグラムは、ステープラーの組立工程を例に示すと、図 4.1 のようになる。DFA の理論では、組立時間短縮のためには組み立てる部品の点数を減らすことが重要であるとされており<sup>(3)</sup>、これは、組立の工程数削減を目的としたものである。したがって、最終組立工程における組立時間短縮のためには、図 4.1 のステープラーの組立工程例に示すようにモジュール単位で部分組立を最終組立の前に集約させておき、最終組立ではなるべくモジュール間の組立作業のみを行えるように製品アーキテクチャと組立工程を設計することと、モジュールの単位を大きくするよう製品アーキテクチャを設計して組み付けるモジュールの数を少なくすることが有効であると考える。しかし、2.3.3 項で述べたように、モジュールの粒度を大きくすると、製品の顧客要求に対する柔軟性が損なわれるため、効率的に多種展開を行うことが難しくなる。また最終組立工程数を削減するためにはモジュールの粒度を大きくする際に、モジュール単位での部分組立の実現性を確保しておく必要がある。したがって、顧客要求に対する柔軟性と組立の実現性の双方を統合的に考慮した製品アーキテクチャと組立工程の設計を行うことが求められる。

上記に対して、例えば、Lin et al.<sup>(4)</sup> や Lugo-Márquez et al.<sup>(5)</sup> はモジュールに基づいた組立工程の設計を行う手法を提案しているが、製品アーキテクチャを設計する際に顧客要求が考慮されておらず、多種展開を効率的に行える製品アーキテクチャとはなっていない。また、AlGeddawy et al.<sup>(6)</sup> は顧客要求に対する柔軟性と組立の複雑性のトレードオフ関係を考慮するために、組立の複雑性の評価に基づきモジュールの粒度を決定する手法を提案している。しかし、この手法は組立工程を設計するには至っていない。さらに、構成要素間の依存関係を記述する際に、2つの部品間が隣接関係にある場合でもその部品間で組立が関係しない場合にはそれらの部品間に依存関係がないものとして考えているため、本来はモジュール化設計で考えるべき機能やモジュールの独立性が悪化している可能性がある。

#### 4.2.2 本研究のアプローチ

上述の議論を踏まえて本研究は、多種展開品の組立性向上による生産の効率化を目指し、顧客要求から組立工程までの相互関係を包括して製品アーキテクチャと製品の組立工程を設計する。具体的には、第3章で構築した顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係を統合する製品アーキテクチャ設計法を拡張し、組立手順を記述した組立工程 DSM を含めた

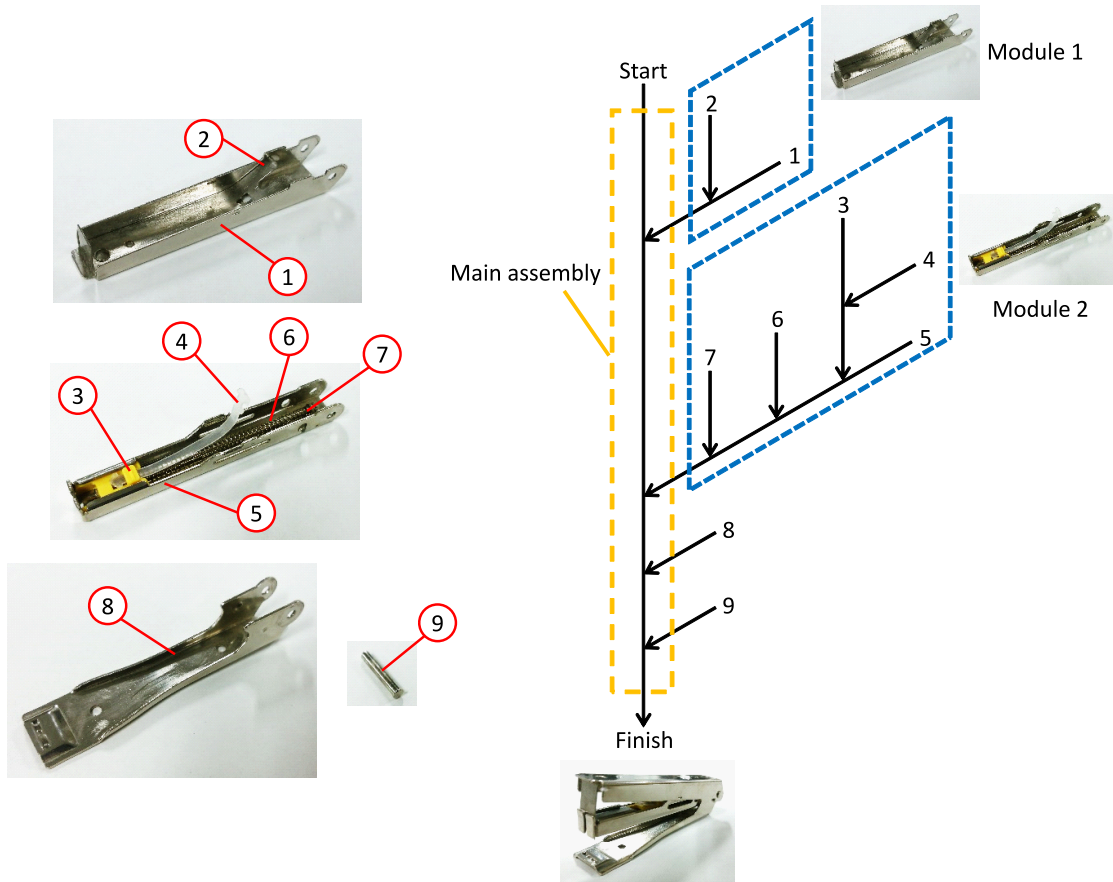


Fig. 4.1 Assembly process flowchart for the stapler.

MDMの解析と操作に基づき製品アーキテクチャのモジュール化設計と組立工程設計を行う。MDMの解析と操作に関して、組立性の実現性を考慮するために、組立工程DSMに関してはパーティショニング分析による評価を行う。これに際して、パーティショニング分析とDSMによるモジュール化に用いるクラスタリング分析とで性質が異なることと、組立工程が実体構造に強く影響されることから、図4.2に示すようにまず顧客要求-物理機能-実体構造MDMのクラスタリングを行い、クラスタリングされた実体構造DSMと組立工程DSMを統合したMDMをパーティショニング分析することにより、組立工程の設計を行う。上記MDMのパーティショニング結果を分析し、製品アーキテクチャと組立工程の整合性が取れていない箇所を特定し、モジュールの構成や構成要素間の依存関係の調整を行う。この後、必要に応じて顧客要求-物理機能-実体構造MDMのクラスタリングを再び行う。



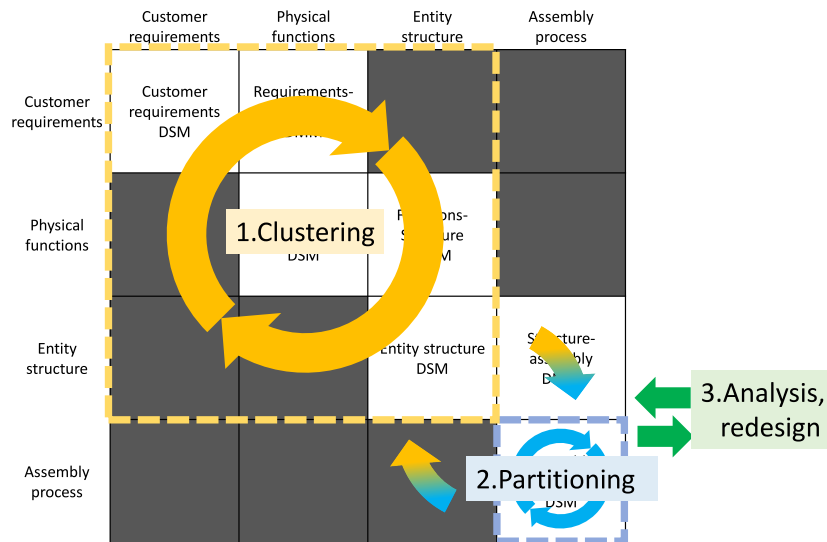


Fig. 4.2 Architecture and assembly process design.

### 4.3 組立工程を統合する製品アーキテクチャ設計

#### 4.3.1 組立作業における順序の明示化

組立工程における工程間の依存関係として、部品間の組立作業の優先順位を記述する。例えば、図 4.3 に示すような A, B, C, D の 4 部品からなる製品を考えたとき、組立作業は A-B 間の組付け、A-D 間の組付け、C-D 間の組付け、B-C 間の組付け、の 4 つの組立作業から構成されている。このとき、A-D 間の組付け、C-D 間の組付けに関しては、形状による制約により、A-B 間の組付け、B-C 間の組付けが完了していなければ、一度組み付けた部品を取り外さない限り行えない。したがって、A-B 間、B-C 間の組立作業を A-D 間、C-D 間の組立作業の入力として DSM 上に記述する。このとき、例えば部品 D がスナップフィットなどで部品 A と C に対して 1 工程で組み付けられる場合は、例外的に組立作業を A-C-D 間の組付けとしてまとめて記述することとする。以上により構成される組立工程 DSM にパーティショニングを適用することによって組立工程を導出することが可能である。

次に、実体構造と組立工程の対応関係を DMM 上に記述する。これは、組立工程 DSM 上の各組付作業とその作業に関与している実体構造 DSM に記述されている製品の構成要素とをマッピングするものとする。この際、実際の工場における製品組立を考えると、図 4.4 のように部品間に大きなサイズ差があったり部品間の組付けや部品単体での安定性を欠いたりするような部品の組付けでは、部品 b のように大きい方の部品や安定性の高い部

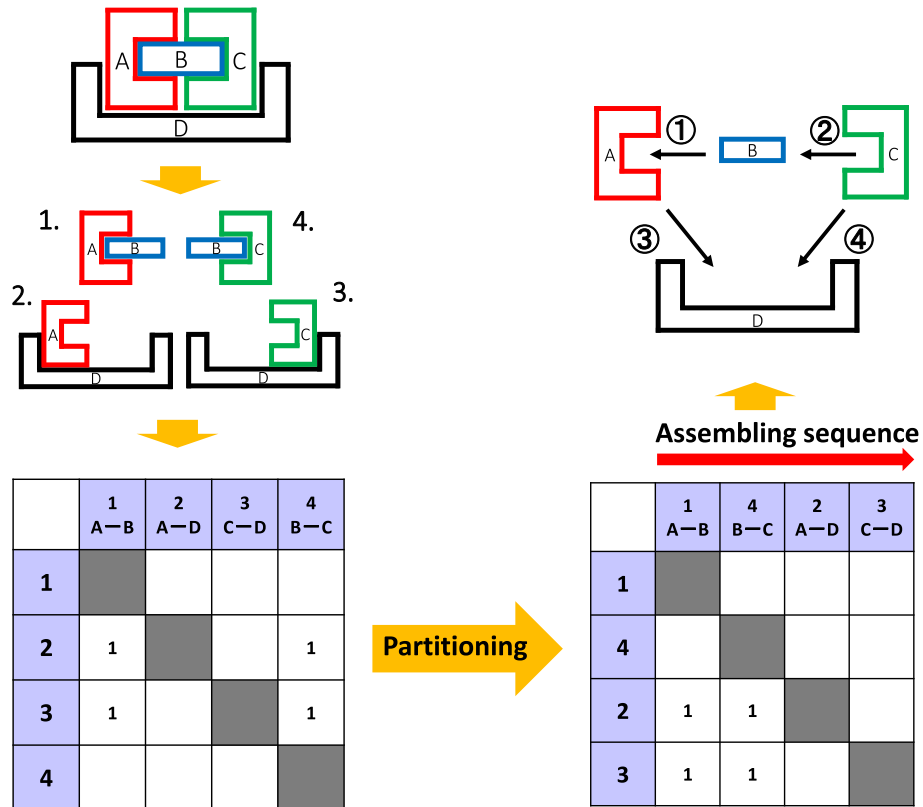


Fig. 4.3 Assembly DSM partitioning.

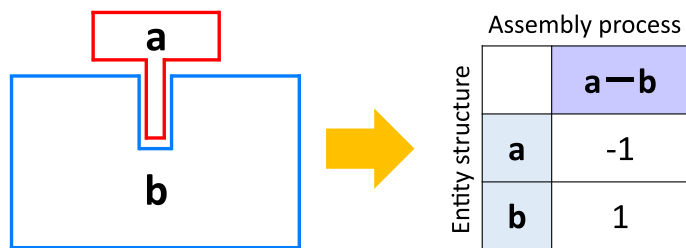


Fig. 4.4 Relationships of assembling among components.

品を先んじて組立ラインや組立セル上に設置しておき、部品 a の方をそこに組み付けるといふ部品間に付ける・付けられるの関係性が明らかな場合がある。この関係性をパーティショニングの際に考慮するために、DMM を記述する際には、図 4.4 に示すように付ける側の部品を -1、付けられる側の部品を 1 として区別して、図 4.5 に示すように DSM 間をマッピングすることとする。上述のような関係性が存在しない部品間の組立では、両部品とも 1 でマッピングを行う。

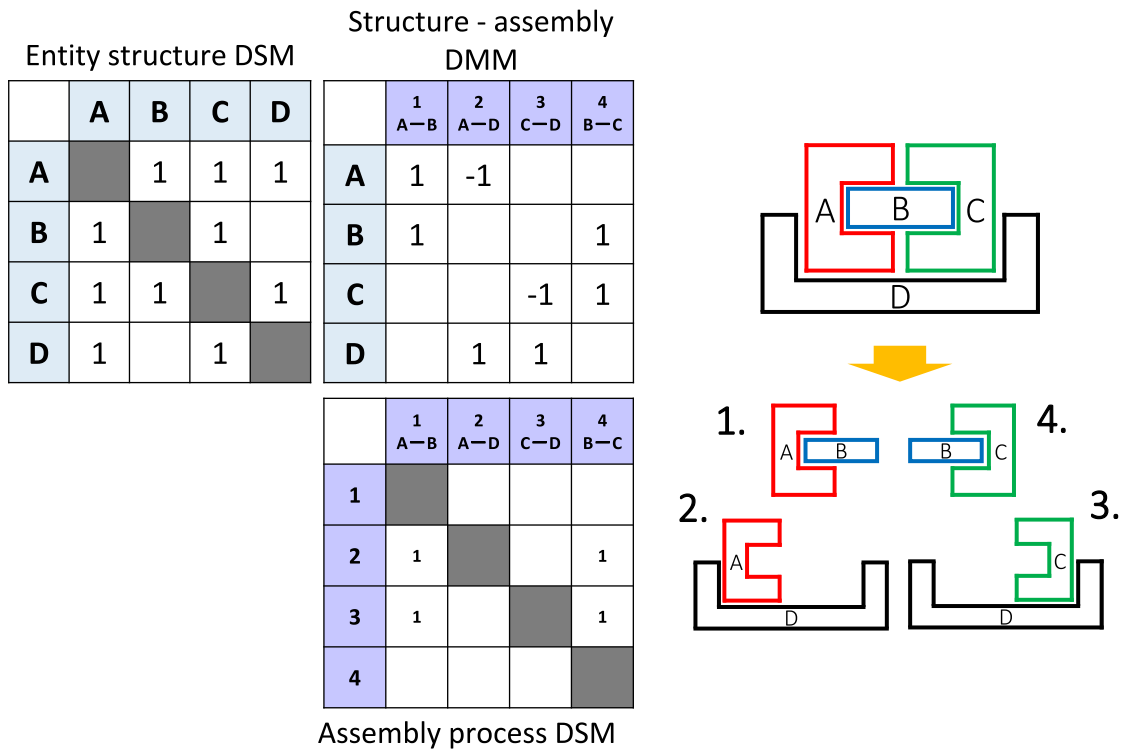


Fig. 4.5 DMM between entity structure DSM and assembly DSM.

### 4.3.2 組立工程設計の最適化問題としての定式化

まず、組立工程 DSM のパーティショニングの評価関数は、次式の Gebala and Eppinger<sup>(7)</sup> によるものを用いる。

$$f_{DSM} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (j-i) \cdot w(i, j) \quad (4.1)$$

ここで、 $n$  は DSM の要素数、 $i, j$  はそれぞれ DSM の行・列を示し、 $w(i, j)$  は  $i$  行  $j$  列のセルに記入されている依存関係の重みを表す。上式を最小化することにより、プロセスの手戻りの最小化が行われる。

次に図 4.6 に示すような実体構造 DSM と組立工程 DSM を対応付ける DMM 上の対応関係について考える。モジュール単位の組立をなるべく最終組立の前に完了させることを考えると、理想的にはモジュール内で完結する組立作業は集約した上でモジュール間の組立に先んじて行い、モジュール間の組立は後工程に存在するような組立工程が望ましい。特に、モジュール間の組立においては、前項で述べたような、付ける・付けられるの関係性がモジュール間に存在する場合、付けられる側のモジュールは付ける側のモジュールより先に組立を完了し、組立ラインや組立セル上に存在している必要がある。これは、例えば図 4.6 に示す実体構造 DSM 上のあるモジュール  $m_k$  においては、DMM 上で当該モジュール

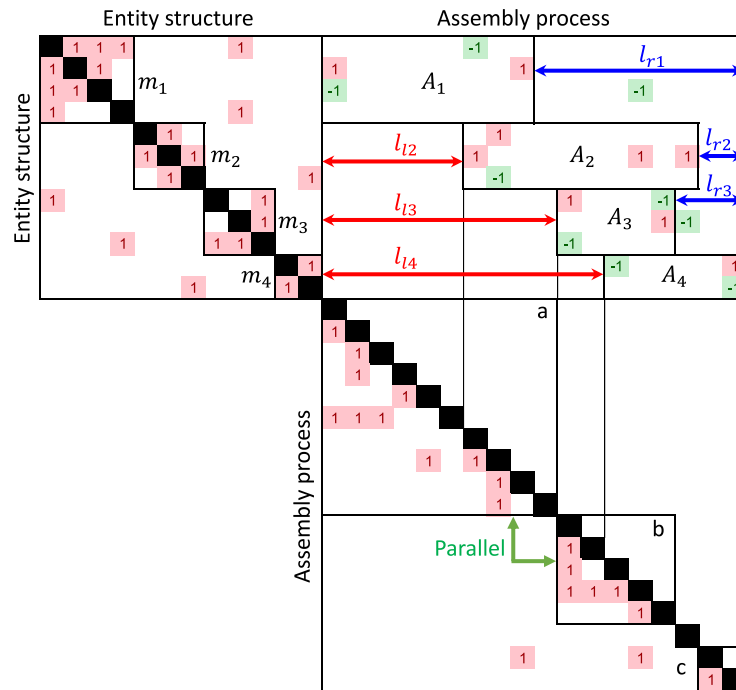


Fig. 4.6 Overview of the evaluation function for structure-assembly DMM

ルに対応する組立工程のうち、1 または  $-1$  が記述されているものの中で最も左に位置する工程から、最も右に位置する 1 が記述されている工程までの工程数をなるべく少なくすることに相当する。さらに、各モジュールに対応する上述の範囲の工程を DMM 上のクラスタと位置付けると、DMM の左端から各クラスタの左端までの列数  $l_{lk}$  と、DMM の右端から各クラスタの右端までの列数と  $l_{rk}$  を最大化することと同意である。

以上の要件から、DMM 上の対応関係に関しては、DMM の左端から各クラスタの左端までの列数  $l_{lk}$  および DMM の右端から各クラスタの右端までの列数  $l_{rk}$  の最大化を考える。この際、実体構造 DSM におけるモジュールの要素数による差を是正するために、モジュール  $m_k$  の要素数  $|m_k|$  を重みとして乗じることとする。これにより、上記の最大化は DMM 上のクラスタの面積  $A_k$  の最小化として帰着する。ここで、実体構造 DSM の要素数を  $N_1$ 、組立工程 DSM の要素数を  $N_2$ 、とすると、モジュール  $m_k$  に対応する DMM 上のクラスタの面積  $A_k$  は次のように表される。

$$A_k = |m_k|(N_2 - l_{rk} - l_{lk}) \quad (4.2)$$

このとき、前述の実体構造-組立工程 DMM 上のクラスタの定義に基づくと、付けられる側となっている組立作業、つまり DMM 上で対応する部分に 1 が記述されている列を有しないモジュールについてはクラスタの右端が定まらず  $l_{rk}$  が求められない。このため、上

記のような場合は DMM クラスタの幅を 1 として扱い、 $A_k = |m_k|$  とする。この条件のもと、DMM の評価関数  $f_{DMM}$  を全モジュール  $A_k$  の和として次のように定式化する。

$$f_{DMM} = \sum_{k=1}^n A_k \quad (4.3)$$

ここで、 $n$  は実体構造 DSM 上のモジュール数を表す。

最後に、パーティショニングで用いる目的関数はそれぞれの評価関数のバランスを調整するための重み  $w_1, w_2$  を付加した重み付き線形和として次式により定義する。

$$f = w_1 f_{DSM} + w_2 f_{DMM} \rightarrow \min \quad (4.4)$$

以上により、モジュール内の組立作業を集約するとともに、モジュール間の付ける・付けられるの関係を踏襲して組立工程 DSM がパーティショニングされる。

### 4.3.3 最適化計算法

顧客要求・物理機能・実体構造の DSM を連鎖させた MDM のクラスタリングは第3章の計算方法に準じて行う。実体構造・組立工程を連鎖させた MDM のパーティショニングは、前項で定式化された目的関数を、組立工程 DSM の要素の並び順を設計変数とした最小化により実行する。DSM のパーティショニングはクラスタリング同様、組合せ最適化問題である。そのため、第3章の MDM のクラスタリングと同様に焼きなまし法<sup>(8)</sup>を用いて最適化を行い、パーティショニングを実行することとする。焼きなまし法の遷移確率と焼きなましスケジュールを決定するための諸パラメータは Johnson et al.<sup>(9)</sup> によるものを用い、その値は Johnson et al.<sup>(9)</sup> がグラフ分割問題に用いた際の推奨値を参考に、予備実験を行って適宜妥当なパラメータに変更する。また、より優れた解を探索するために、終了温度に達してから再度温度を上げ冷却を行うことを解が十分に収束するまで繰り返す。焼きなまし法の解摂動においては、ランダムに選択した組立工程 DSM 上の要素をランダムに選択した場所に移した解を近傍解として探索を行う。

### 4.3.4 計算結果の解析と再計算

パーティショニングの結果から、図4.6内の a と b で示すような互いに依存関係が存在しない組立工程のクラスタを特定する。これらの組立工程は互いに独立して並行作業が行えることを意味している。このとき、図4.6内の a と b のように組立工程のクラスタに複数のモジュールの組立作業が混在している場合は、それらのモジュールの統合や、実体構造の設計変更を行うことにより組立工程における依存関係を変更することを考える。モジュールの統合を考えるとときには、顧客要求-物理機能-実体構造 MDM のクラスタリング結果と

照らし合わせ、それらのモジュールを統合することによる顧客要求に対する柔軟性に対する影響を鑑みて、モジュールの統合の是非を判断する。また、パーティショニング結果において、手戻り方向の依存関係が発生した場合にも、実体構造の設計変更を行うにより組立工程における依存関係を変更することを考える。以上により、実体構造上の依存関係に変更が生じた場合、必要に応じて顧客要求-物理機能-実体構造 MDM のクラスタリングから再度計算を行う。

## 4.4 家庭用エアコンの製品アーキテクチャ設計への適用

### 4.4.1 家庭用エアコンの概要

家庭用エアコンを例題として前節で構築した手法を適用し、その有効性を検証する。家庭用エアコンは設置する部屋の面積や、機能のグレードに応じた多数の製品ラインアップを有する多種展開品である。エアコンは、その製品ラインアップの多さやサイズの大きさのため、完成品の在庫管理費が大きく、さらに気候による需要変動が激しい製品であるため、完全な見込み生産を行うことが難しい。このため、大半の需要に対しては、顧客個人あるいは小売店からの発注を受けてから最終組立を行って製品を納入する受注組立生産方式で製品を提供している。このため組立工程においても、多種展開におけるモジュール性との整合性を図って顧客要求に対する柔軟性を適切に確保することが重要になっている。

### 4.4.2 計算条件

受注組立生産方式をとる製品では個別のカスタマイズを行わないため、顧客要求 DSM に記述する顧客要求間の共起関係を求めるためには、受注仕様表を対象とした相関ルール分析ではなくアンケートデータに対する分析などを行う必要があるが、本例題では顧客要求間の共起関係は仮想的なものを用いる。各 DSM には、顧客要求が 50 項目、物理機能が 86 項目、実体構造が 84 項目それぞれ記述された。なお、エアコンは室内機と室外機で完全に独立して組立作業が行われることから、本例題では、組立工程を考える際、室外機は含めず室内機のみを対象として組立工程を考えることとする。

顧客要求-物理機能-実体構造 MDM のクラスタリングに際しては、第 3 章の式 (3.9) の重み  $\alpha$  は予備実験をもとに  $\alpha = 0.4$  とした。パーティショニングの目的関数の式 (4.4) における重み  $w_1, w_2$  は、目的関数のオーダーをそろえるために、 $w_1 = 1, w_2 = 10$  とした。パーティショニングの計算の焼きなまし法に用いる諸パラメータは予備実験を行い、Johnson et al. <sup>(9)</sup> が推奨するパラメータ値から CUTOFF パラメータを 0.95 へ変更して計算を行った。

### 4.4.3 組立工程設計結果

まず、顧客要求-物理機能-実体構造 MDM のクラスタリング結果は、図 4.7 に示すようなものとなり、全体で 13 のモジュールに実体構造がモジュール化された。このクラスタリングされた実体構造 DSM を用いた実体構造-組立工程 MDM のパーティショニング結果を図 4.8 に示す。これらの MDM 上で薄紅と薄緑で着色されているセルは依存関係・対応関係が記述されている。特に、薄緑で着色されているセルは -1 が入力されており、4.3.2 項で述べた部品間の組立における付ける・付けられるの関係性において、付ける側であることを意味している。この結果と、組立工程 DSM のみを対象として式 (4.1) の最小化によるパーティショニングを適用した結果 (図 4.9) を比較し、その効果を検証する。

図 4.7 および図 4.8 の MDM を構成する各 DSM・DMM を図 4.10~図 4.16 に示す。図 4.8、図 4.9 に示す両結果において、組立工程 DSM 上でいくつかの依存関係が DSM の上三角に存在する。これは組立工程間の手戻りを示し、実行不可能な組立工程になっていることを意味する。しかしこのうち図 4.16 中 B で示す部分と図 4.9 中で赤枠で示す部分に存在するすべての手戻り方向の依存関係はエアコンの電線をまとめて電子部品を組み付ける作業であり、どの作業を先に行ってもよい関係にあることから、この部分の手戻り方向の依存関係は無視してもよいものとなっている。ここで、組立工程 DSM のみを対象とした結果 (図 4.9) を見ると、上記の手戻り方向の依存関係を除くと他の手戻り方向の依存関係が存在しないため、実行可能な組立工程となっていることが分かる。一方で、全体的に組立工程間の依存関係は集約されておらず、並行作業が可能な組立工程のクラスタを特定することは難しい。他方、提案手法による結果では図 4.16 中 1~4 に示すような組立工程のクラスタを特定することができ、1, 2, 3 と 3, 4 に該当する組立作業はそれぞれ並行して行うことが可能となっている。また、実体構造-組立工程 DMM (図 4.15) を見ても、実体構造のモジュールに対応する組立作業がそれぞれで集約されており、またモジュール間の組立作業が比較的工程の下流側に、モジュール内で完結する組立作業は比較的工程の上流側に来ていることがわかる。この結果から、4.3.2 項で述べた DMM の評価関数を導入する目的が達成されていることが分かる。しかし、この組立工程にはいくつかの問題点も存在する。まず、組立工程 DSM 上のクラスタ 1, 2, 4 は、組立工程のクラスタは組立工程にそれぞれ 2 つのモジュールの組立工程が混在しているため、モジュール単位での部分組立となっていない。さらに、図 4.16 に示す組立工程 DSM 上 A で示される組立工程間の依存関係は、工程間の手戻りとなっており、この部分に関しては実行不可能な組立工程となっている。これらの問題に対して、製品アーキテクチャと組立工程を分析し、モジュールの構成や構成要素間の依存関係の調整を行うことによって解決可能かを検証する。

組立工程 DSM (図 4.16) 上のクラスタ 1 について、DMM 上で実体構造との対応関係を見ると、DMM 上 C で示すモジュールの組立作業が、DMM 上で上側に隣接しているモジュール

ルへの部品取付けから開始されていることが分かる。したがって、このモジュールはモジュール単位での組付けではなく、他のモジュールに部品を組み付けていくような組立方法が取られる。したがって、組立工程の観点からは、これらの2つのモジュールは、独立性が薄いモジュールとなっている。このため、最終組立工程の効率化のためには、実体構造 DSM (図 4.14) 上 E で示される2つのモジュールを統合し、組立工程 DSM 上のクラスタ 1 内の組立作業を最終組立前に終了させておくことが望ましいと考えられる。ここで、物理機能-実体構造 DMM (図 4.13) でこれらのモジュールに対応する物理機能を見ると、これらのモジュールはともにフィルタの掃除機能に関わるモジュールであるため、図中 H で示すように、共通性が高いことが分かる。このため、これらのモジュールを統合しても、顧客要求の柔軟性に対する影響は比較的小さい。したがって、製品アーキテクチャを変更し、これらのモジュールは組立工程改善のために統合することが推奨されるといえる。

組立クラスタ 2 についても同様に、実体構造 DSM (図 4.14) 上の F で示される2つのモジュールの組立作業が混在しているため、これらのモジュールは組立工程の観点からは独立性の低いモジュールである。この2つのモジュールのうち、実体構造-組立工程 DMM (図 4.15) 上 D に示す組立工程に対応するモジュールは1つの部品のみから構成されている特殊なモジュールである。この理由として、この部品は他の部品との依存関係が少なく、実体構造 DSM のクラスタリングを行う際に、この要素をクラスタ内に含むとクラスタ内の空白要素が多くなってしまふことがあげられる。このためこの部品は他の部品と独立したモジュールとなったものと考えられる。ここで、図 4.13 上でこれらのモジュールと物理機能との対応関係を見ると、1つの要素のみで構成されているモジュールは I で示すように1つの物理機能としか対応関係を持たないうえに、同じ機能と対応関係を持つ他の部品が属するモジュールとは、実体構造における依存関係が存在しないため、F で示す2つのモジュールを統合しても顧客要求の柔軟性に対する影響は小さいものと考えられる。したがって、製品アーキテクチャを変更し、これらのモジュールは組立工程改善のために統合することが推奨されるといえる。

一方、組立クラスタ 4 で示す組立作業に関わる実体構造 DSM (図 4.14) 上で G で示される2つのモジュールは、物理機能-実体構造 DMM を見ると全く異なる機能とそれぞれ対応しているため、これらを統合すると顧客要求に対する柔軟性が大幅に損なわれてしまう。そのため、製品アーキテクチャは変更せず、これらの組立作業は最終組立工程で行うことが推奨される。また、組立工程 DSM (図 4.16) 上 A で示されている依存関係は、隣接する2つの組立作業間に存在する関係であることから、これらの作業に関係する部品の取付方法を見直して組立作業間の依存関係の方向性を逆転させるように設計変更を行うか、あるいはこの組立作業に関係するモジュールの組立効率はやや損なわれるが、それを許容して組立工程の前後関係を入れ替えるといった対策が考えられる。



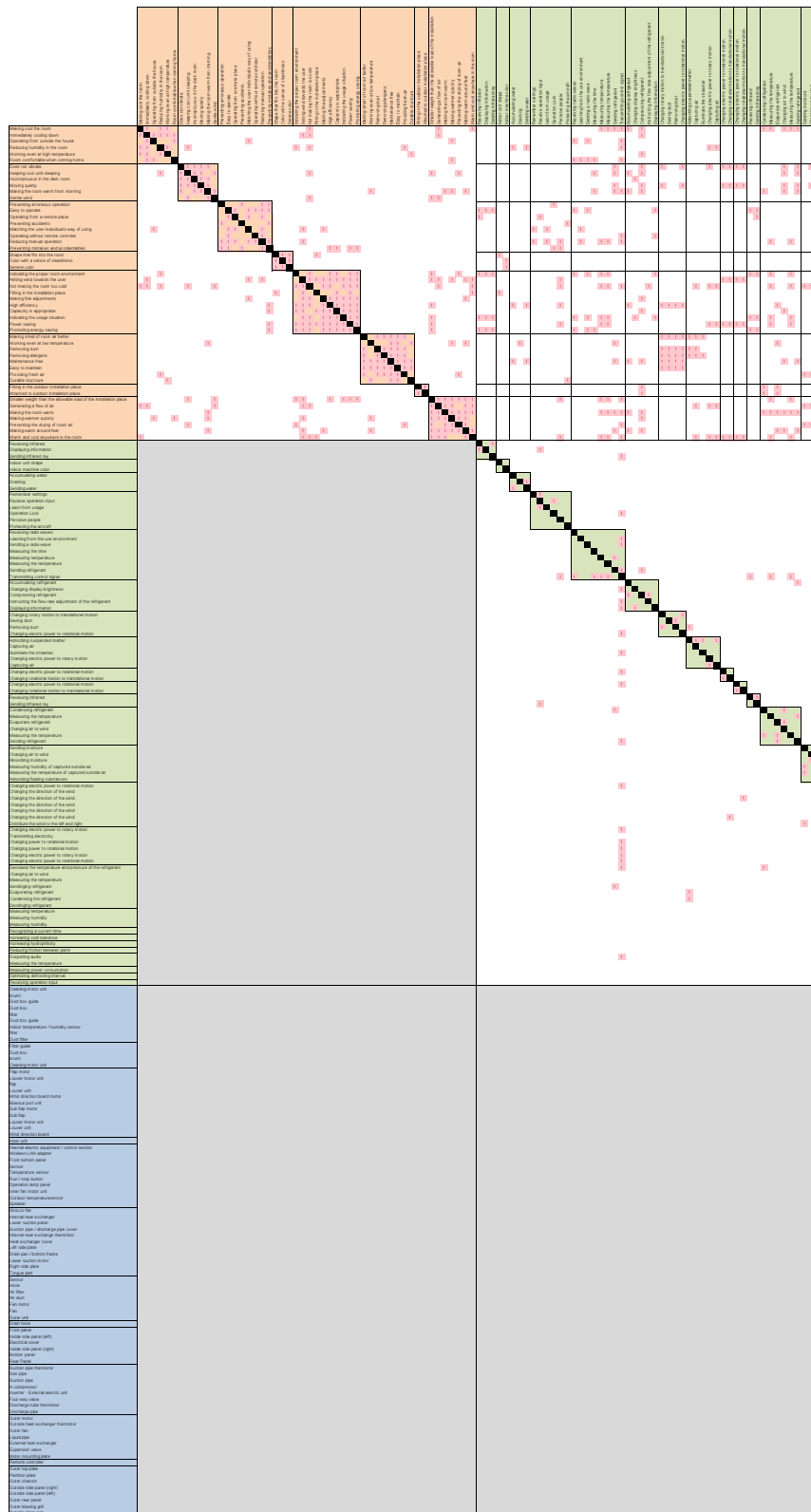


Fig. 4.7 Requirements–functions–structure MDM clustering result of the air conditioner [left half part]. Note: Each DSM and each DMM are respectively shown in Fig. 4.10 to 4.14.

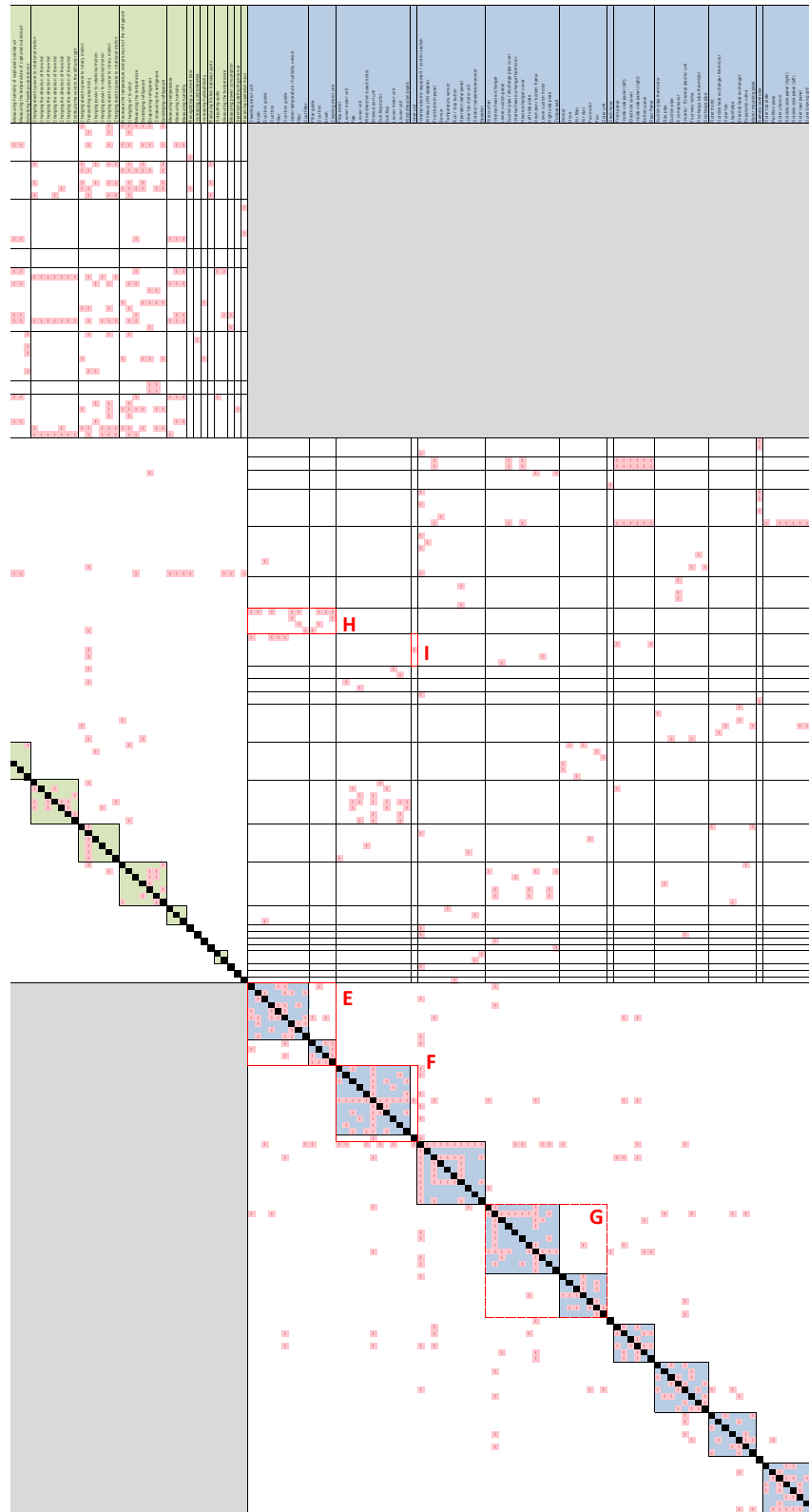


Fig. 4.7 Requirements–functions–structure MDM clustering result of the air conditioner [right half part].

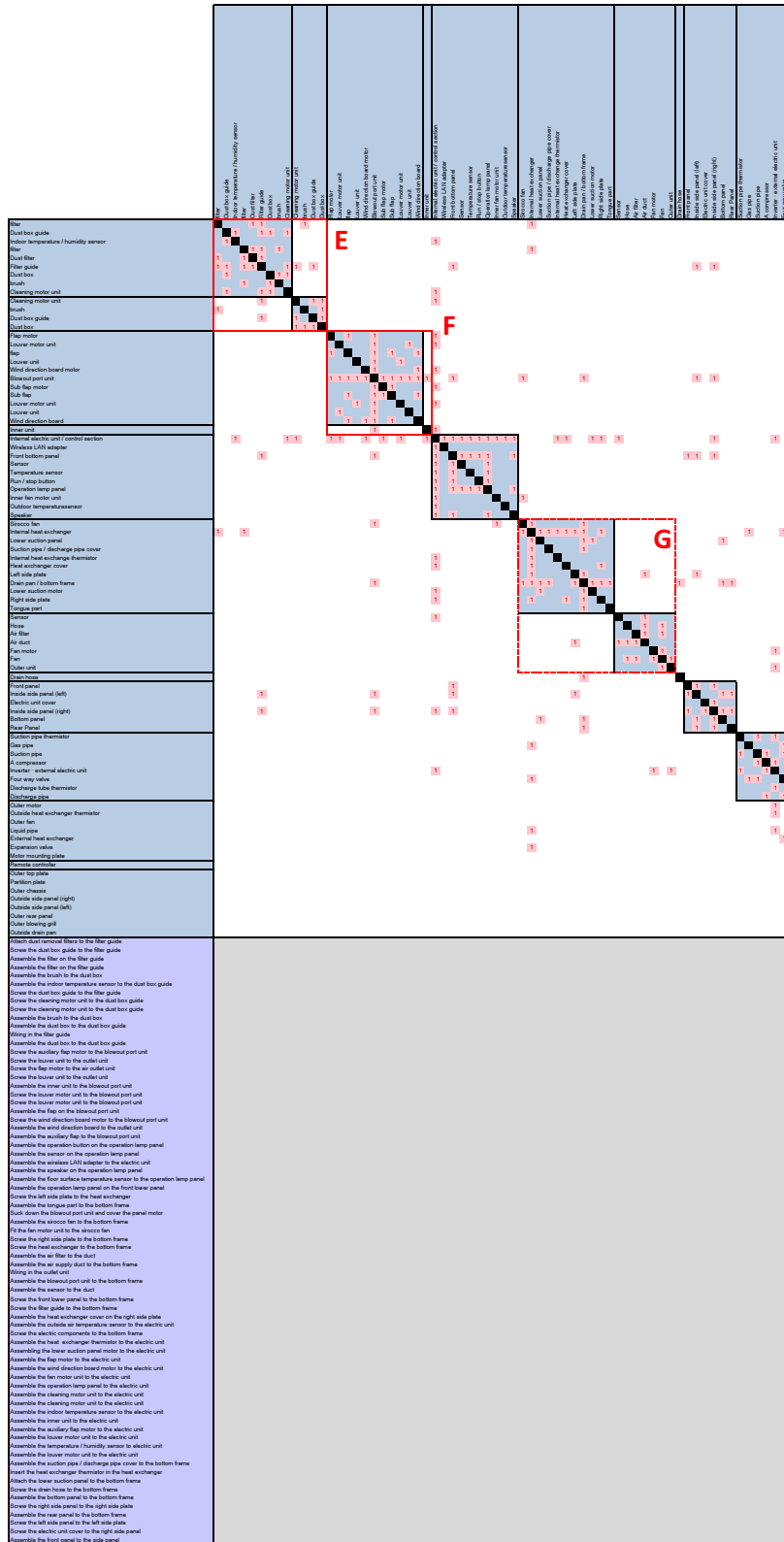


Fig. 4.8 Structure-assembly MDM partitioning result of the air conditioner [left half part].  
 Note: Structure-assembly DMM and assembly DSM are respectively shown in Fig. 4.15 and 4.16.





Fig. 4.9 Assembly process DSM partitioning result of the air conditioner without considering relationships with entity structure [left half part].

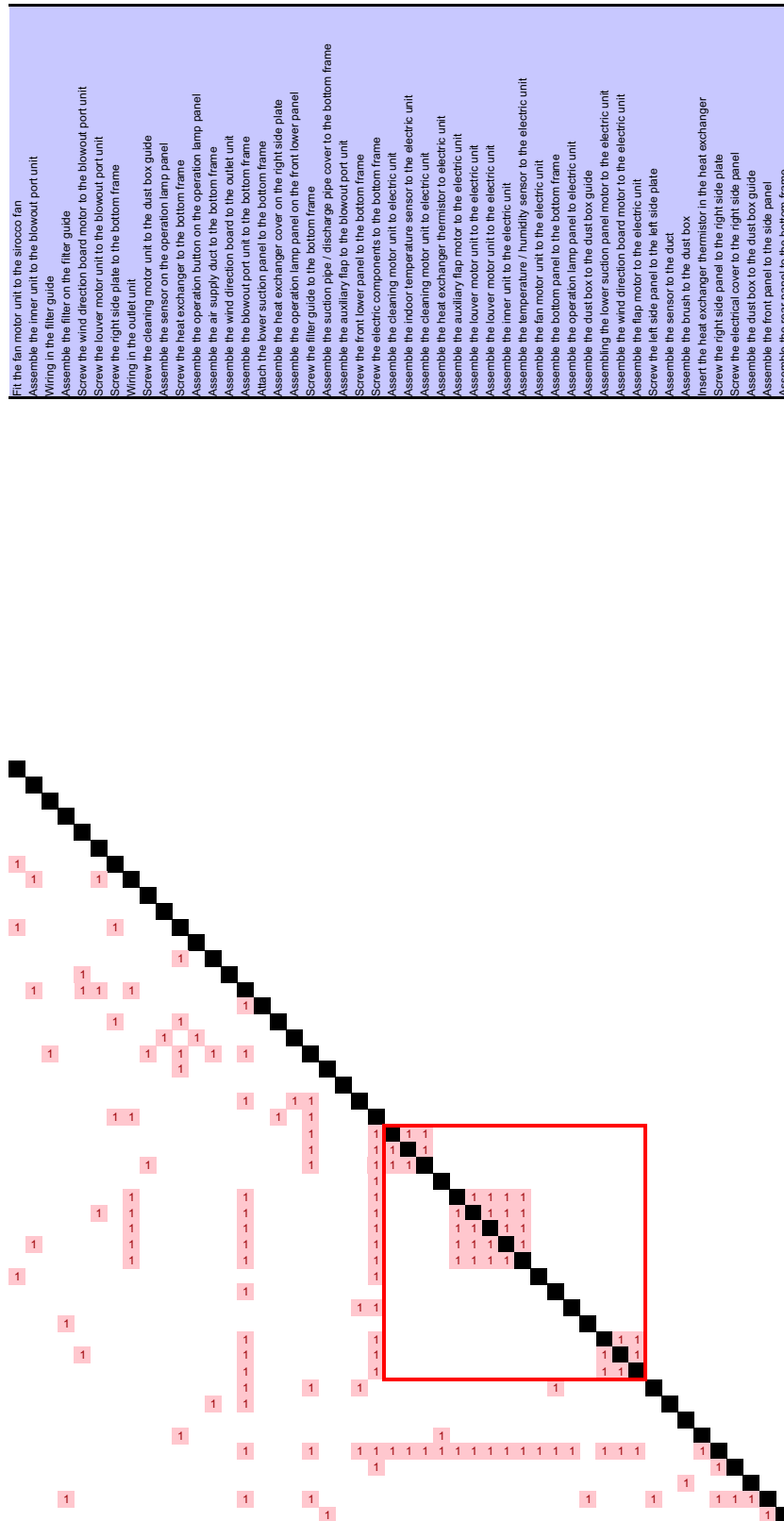


Fig. 4.9 Assembly process DSM partitioning result of the air conditioner without considering relationships with entity structure [right half part].







	Receiving infrared Displaying information Sending infrared ray	Indoor unit shape Indoor machine color Accumulating water Draining Sending water	Remember settings Receive operation input Learn from usage Operation Lock Perceive people Protecting the aircraft	Receiving radio waves Learning from the use environment Sending a radio wave Measuring the time Measuring temperature Measuring the temperature Sending refrigerant Transmitting control signal	Accumulating refrigerant Changing display brightness Compressing refrigerant Instructing the flow rate adjustment of the refrigerant Displaying information	Changing rotary motion to translational motion Saving dust Removing dust Changing electric power to rotational motion Adsorbing suspended matter
Making cool the room				1 1 1 1 1	1 1	
Immediately cooling down					1	
Operating from outside the house				1 1	1	
Reducing humidity in the room		1 1			1	
Working even at high temperature					1	
Room comfortable when coming home				1 1 1 1	1	
Does not vibrate					1	1
Keeping cool until sleeping				1	1	1
Inconspicuous in the dark room					1	1
Moving quietly					1	1
Making the room warm from morning				1	1 1 1	1
Gentle wind					1	1
Preventing erroneous operation			1			
Easy to operate	1 1 1			1 1		1
Operating from a remote place	1		1			
Preventing accidents			1			
Matching the user-individual's way of using			1	1		
Operating without remote controller			1			1
Reducing manual operation			1 1 1	1	1 1	
Preventing mistakes and accidentalities			1 1		1	
Shape that fits into the room		1				
Color with a sense of cleanliness		1				
Serene color		1				
Indicating the proper room environment	1 1 1			1 1 1 1		1
Aiming wind towards the user			1			
Not making the room too cold			1		1 1 1	1
Fitting in the installation place		1				
Making fine adjustments					1	
High efficiency		1 1	1		1	1 1 1 1
Capacity is appropriate					1	
Indicating the usage situation	1 1 1		1	1 1 1 1	1	1
Power saving			1	1 1		
Promoting energy saving	1 1 1			1 1 1		
Making smell of room air better					1	1 1 1 1 1
Working even at low temperature		1				1
Removing dust						1 1 1 1 1
Removing allergens						1 1 1 1 1
Maintenance free		1 1			1 1 1	1 1 1 1
Easy to maintain						1 1 1 1
Providing fresh air						1 1 1 1
Durable structure			1			
Fitting in the outdoor installation place					1	
Attached to outdoor installation place					1	
Smaller weight than the allowable load of the installation place			1		1 1 1	
Generating a flow of air					1 1 1 1 1	1
Making the room warm					1 1 1 1 1	1
Making warmer quickly					1	
Preventing the drying of room air					1	1
Making warm around feet					1	1
Warm and cool anywhere in the room			1		1 1 1	

Fig. 4.11 Requirements–functions DMM clustering result of the air conditioner [left half part].





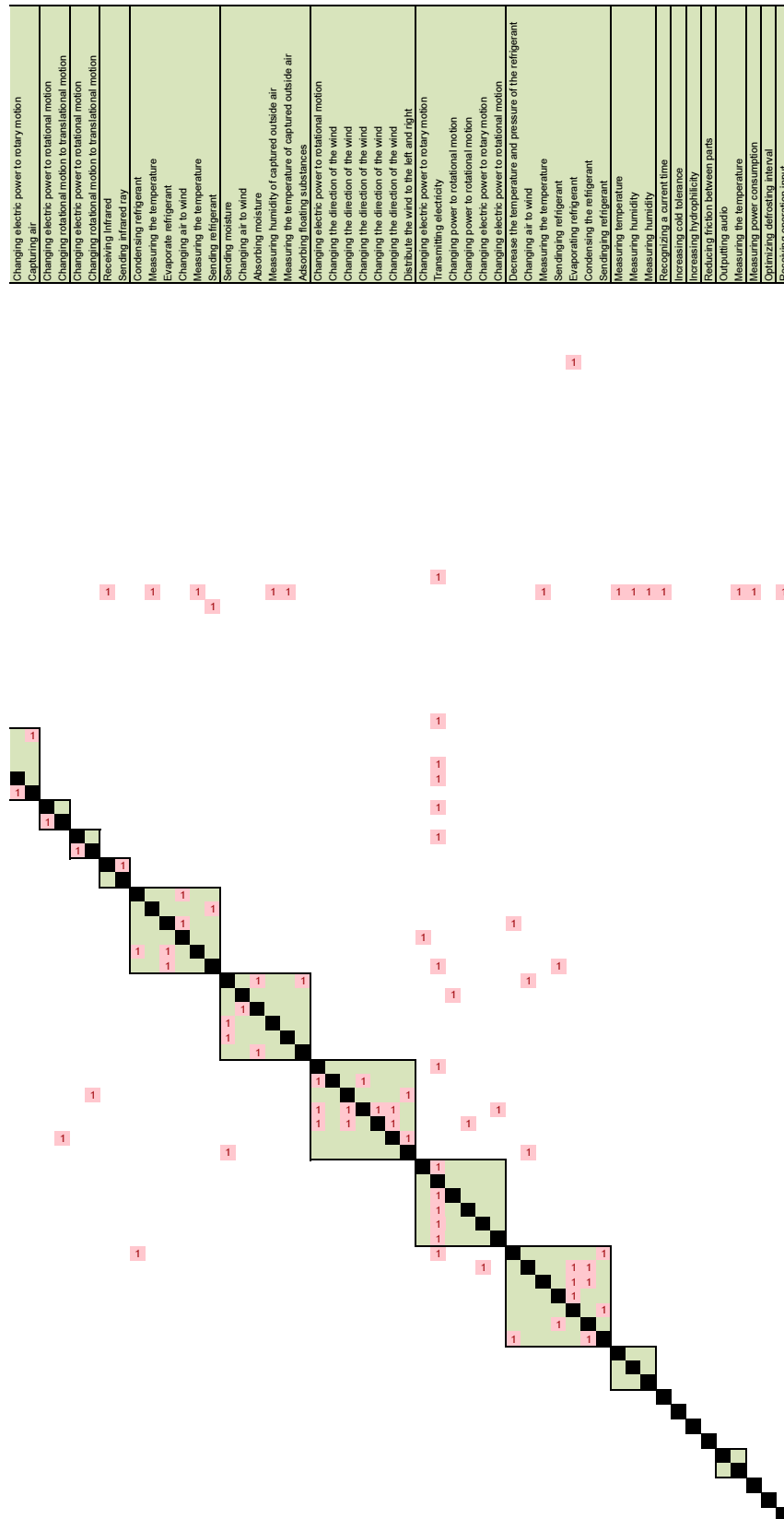


Fig. 4.12 Physical functions DSM clustering result of the air conditioner [right half part].

	Cleaning motor unit brush Dust box guide Dust box filter Dust box guide Indoor temperature / humidity sensor filter Dust filter	Filter guide Dust box brush Cleaning motor unit	Flap motor Lower motor unit flap Lower unit Wind direction board motor Blowout port unit Sub flap motor Sub flap Lower motor unit Lower unit Wind direction board Inner unit	Internal electric equipment / control section Wireless LAN adapter Front bottom panel Sensor Temperature sensor Run / stop button Operation lamp panel Inner fan motor unit
Receiving Infrared				
Displaying information				
Sending infrared ray				1
Indoor unit shape				1
Indoor machine color				1
Accumulating water				
Draining				
Sending water				
Remember settings				1
Receive operation input				1
Learn from usage				1
Operation Lock				1
Perceive people				1
Protecting the aircraft				1
Receiving radio waves				1
Learning from the use environment				1
Sending a radio wave				1
Measuring the time				1
Measuring temperature	1			
Measuring the temperature				
Sending refrigerant				1
Transmitting control signal				1
Accumulating refrigerant				
Changing display brightness				1
Compressing refrigerant				
Instructing the flow rate adjustment of the refrigerant				1
Displaying information				
Changing rotary motion to translational motion	1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1		
Saving dust	1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1		
Removing dust	1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1		
Changing electric power to rotational motion	1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1		
Adsorbing suspended matter	1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1		
Capturing air				1
Illuminate the streamer				1
Changing electric power to rotary motion				1
Capturing air				1
Changing electric power to rotational motion				1
Changing rotational motion to translational motion				1
Changing electric power to rotational motion				1
Changing rotational motion to translational motion				1
Receiving Infrared				1
Sending infrared ray				1
Condensing refrigerant				
Measuring the temperature				
Evaporate refrigerant				
Changing air to wind				
Measuring the temperature				
Sending refrigerant				
Sending moisture				
Changing air to wind				
Absorbing moisture				
Measuring humidity of captured outside air				
Measuring the temperature of captured outside air				
Adsorbing floating substances				
Changing electric power to rotational motion				
Changing the direction of the wind				
Changing the direction of the wind				
Changing the direction of the wind				
Changing the direction of the wind				
Changing the direction of the wind				
Distribute the wind to the left and right				
Changing electric power to rotary motion				1
Transmitting electricity				1
Changing power to rotational motion				1
Changing power to rotational motion				1
Changing electric power to rotary motion				1
Changing electric power to rotational motion				1
Decrease the temperature and pressure of the refrigerant				
Changing air to wind				
Measuring the temperature				
Sending refrigerant				
Evaporating refrigerant				
Condensing the refrigerant				
Sending refrigerant				
Measuring temperature				1
Measuring humidity				1
Measuring humidity	1			
Recognizing a current time				1
Increasing cold tolerance				1
Increasing hydrophilicity				
Reducing friction between parts				
Outputting audio				
Measuring the temperature				
Measuring power consumption				1
Optimizing defrosting interval				
Receiving operation input				1

Fig. 4.13 Functions–structure DMM clustering result of the air conditioner [left half part].



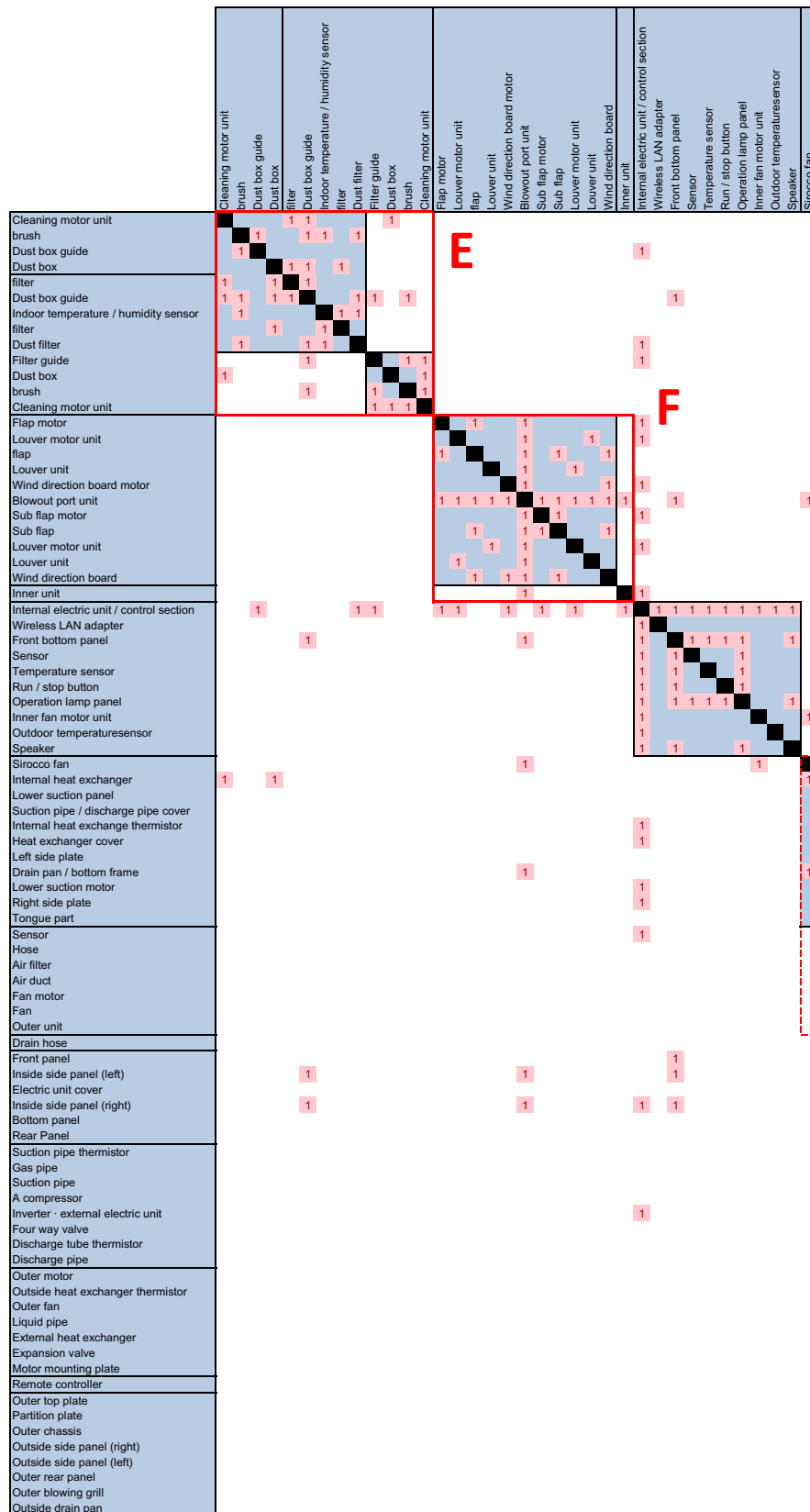


Fig. 4.14 Entity structure DSM clustering result of the air conditioner [left half part].







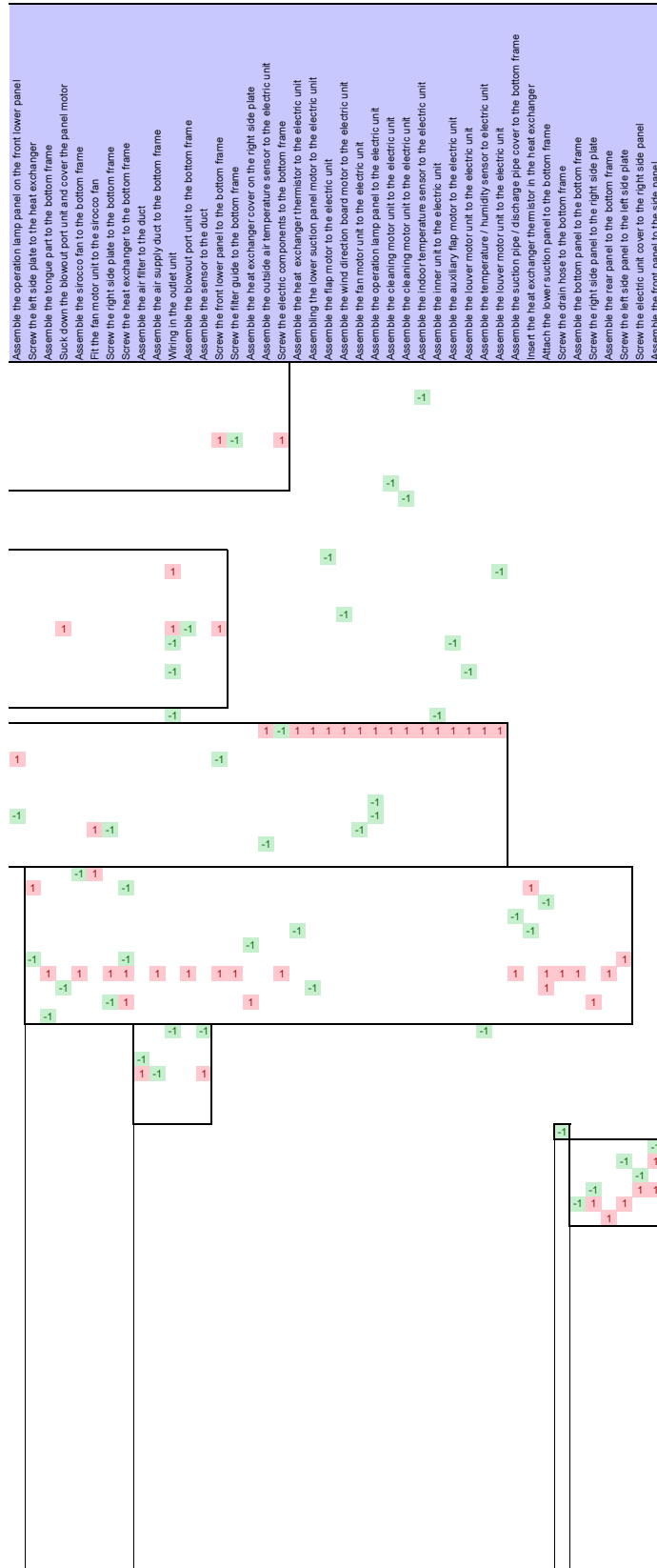


Fig. 4.15 Structure-assembly DMM partitioning result of the air conditioner [right half part].



Fig. 4.16 Assembly process DSM partitioning result of the air conditioner [left half part].

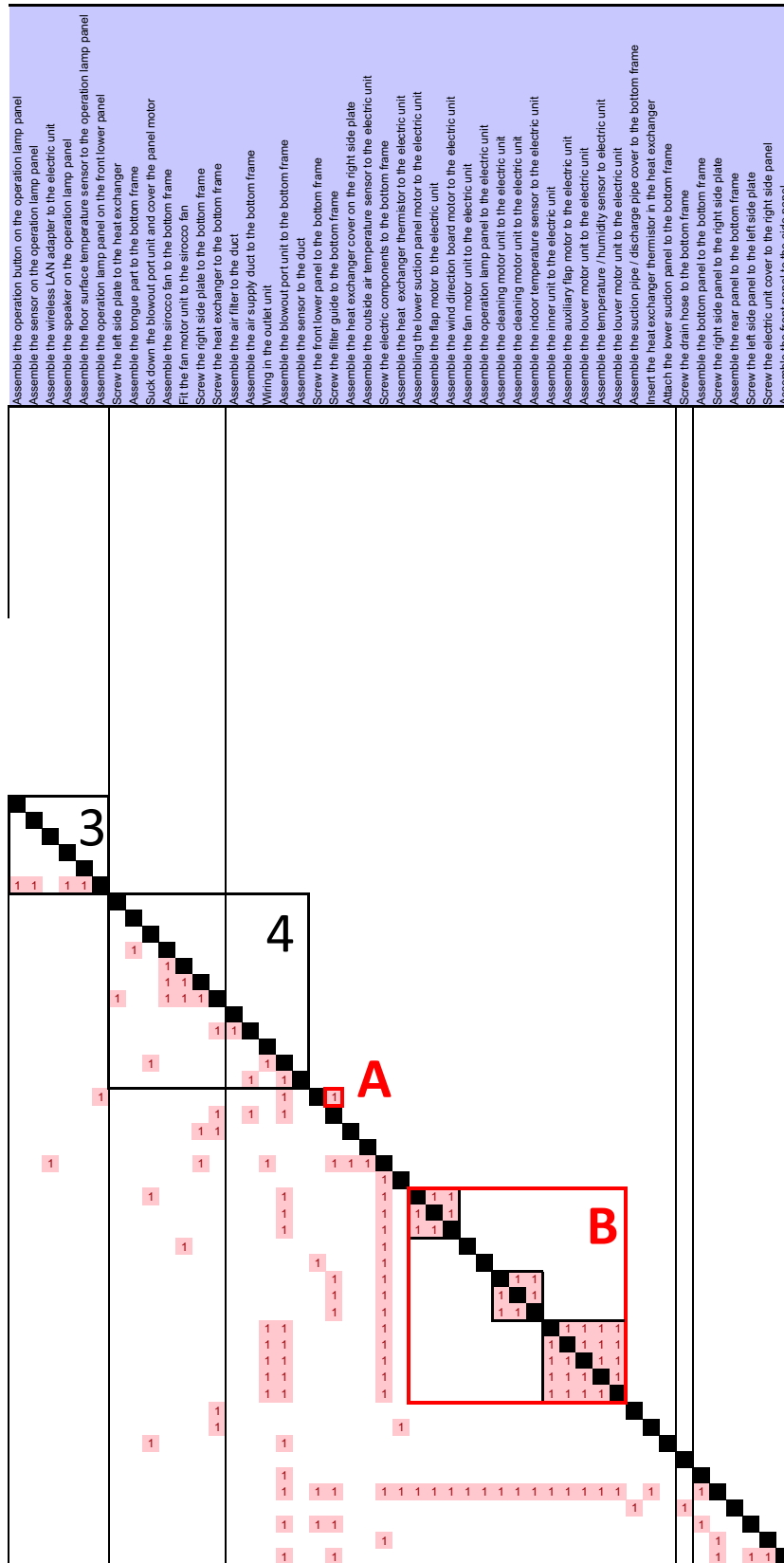


Fig. 4.16 Assembly process DSM partitioning result of the air conditioner [right half part].

#### 4.4.4 考察

前項で得られた結果において、4.2.1項で述べた課題が提案手法により解決されたかどうかを考察する。

提案手法では、顧客要求-物理機能-実体構造 MDM のクラスタリングによりクラスタリングされた実体構造 DSM と部品の組立作業の優先関係を記述した組立工程 DSM を DMM で連鎖させた MDM に提案手法を適用することで、組立工程の設計を行うことができた。提案手法により設計された組立工程と実体構造との対応関係は考慮せず組立工程 DSM のみを対象としたパーティショニングにより設計された組立工程の比較から、提案手法による組立工程は、モジュール内での組立作業を集約し、部分組立を行える箇所がなるべく多くなるように設計されていることが分かった。これによって、最終組立での組立工程数が少なくなり組立時間の短縮が見込まれる。また、提案手法による組立工程の設計結果と実体構造のモジュールの対応関係を分析し、整合性が取れていない箇所の製品アーキテクチャを、顧客要求・物理機能・実体構造上の相互関係を踏まえながら見直すことで、顧客要求への柔軟性に対する影響を抑制しつつ組立工程を効率化するモジュール間の統合を選択的に行うことができた。以上のことから、提案手法により、4.2.1項で述べた課題に対応できていることが分かる。

#### 4.5 結言

本章では、アーキテクチャ設計を組立工程へと拡張する設計法として、まず、組立工程の相互関係の明示化手法を構築し、明示化された相互関係を記述した組立工程 DSM と実体構造-組立工程 DMM を用いて、顧客要求・物理機能・実体構造の相互関係から導かれる製品アーキテクチャの組立の実行可能性と製品の最終組立における組立作業の効率を考慮する実体構造-組立工程 MDM のパーティショニング手法を構築した。さらに、家庭用エアコンを例題として取り上げ、構築した手法を適用し、顧客要求-物理機能-実体構造 MDM のクラスタリングと、クラスタリングされた実体構造 DSM と組立工程 DSM を DMM で連鎖させた MDM に提案手法によるパーティショニングを適用し、家庭用エアコンの室内機の組立工程を設計した。提案手法による組立工程の設計結果は、組立工程 DSM のみを対象としたパーティショニング分析により得られる組立工程との比較から、モジュール内の組立工程が集約され、なるべく多くの組立作業が部分組立として行える組立工程が得られていることが示された。さらに、顧客要求・物理機能・実体構造の対応関係を分析しながら、提案手法によって得られる組立工程と整合するように製品アーキテクチャの修正を行うことで、顧客要求への柔軟性をなるべく損なわず組立工程を効率化する製品アーキテクチャの再設計を行うことができることを示して、構築した手法の有効性を示した。

## 参考文献

- (1) 高田淳, 石塚淳志, 中村博茂, 受注組立生産と週需給を支援する生産計画システム, 東芝レビュー, Vol. 56, No. 5 (2001), pp. 40–43.
- (2) Whitney, D. E., *Mechanical Assemblies –Their Design, Manufacture, and Role in Product Development* (2004), Oxford University Press.
- (3) Boothroyd, G., Dewhurst, P. and Knight, W. A., *Product Design for Manufacture and Assembly –Second Edition Revised and Expanded –* (2001), CRC Press.
- (4) Lin, M. C., Lin, C. C., Tai, Y. Y., Chen, M. S. and Tseng, C. C., A Modularized Contact-Rule Reasoning Approach to the Assembly Sequence Generation for Product Design, *Concurrent Engineering*, Vol. 20, No. 3 (2012), pp. 203–221.
- (5) Lugo-Márquez, S., Grisales, G., Alvaro, Rubio, O. and Eder, W. E., Modular Redesign Methodology for Improving Plant Layout, *Journal of Engineering Design*, Vol. 27, No. 1-3 (2016), pp. 50–74.
- (6) AlGeddawy, T., Samy, S. N. and ElMaraghy, H., Best Design Granularity to Balance Assembly Complexity and Product Modularity, *Journal of Engineering Design*, Vol. 28, No. 7-9 (2017), pp. 457–479.
- (7) Gebala, D. A. and Eppinger, S. D., Methods for Analyzing Design Procedures, in *Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference* (1991), pp. 199–204.
- (8) Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., Optimization by Simulated Annealing, *Science*, Vol. 220, No. 4598 (1983), pp. 671–680.
- (9) Johnson, D. S., Aragon, C. R., McGeoch, L. A. and Schevon, C., Optimization by Simulated Annealing: an Experimental Evaluation. Part I, Graph Partitioning, *Operations Research*, Vol. 37, No. 6 (1989), pp. 865–892.



## 第5章

# 製品の多種展開の基盤となるプラットフォームの最適設計法

### 5.1 緒言

多種展開品において、具体的な製品群を展開するためには、前提となる製品アーキテクチャを定めた上で、製品間でプラットフォームとして共通化される部分を決定することが求められる。これを踏まえて本章では、基本アーキテクチャの具体への展開として、多種展開製品における製品群展開の基盤としてのプラットフォームの設計について取り上げ、その設計問題についての数理モデルと最適化計算法を構築する。数理モデルを構築するにあたっては、プラットフォームの最適設計では、製品の詳細が未定な設計の上流段階で性能への影響を把握することが重要であることから、製品の支配的な特徴に的を絞って簡略化した性能の評価モデルを導入する。さらに、第3章と同様に産業用三軸直交ロボットの例題へ適用する。この際、プラットフォームの種類数が異なるケースについてそれぞれ最適化計算を行う。これにより得られる計算結果を分析し、性能の評価指標間のトレードオフ関係を把握できることを検証する。以上の検証を通じて、構築したモデルと最適化計算法の有効性について考察する。

### 5.2 プラットフォーム設計とその課題

#### 5.2.1 プラットフォームに基づく製品展開

第1章で述べたように、細かな顧客要求に対応しながらも、迅速かつ安価に製品を提供するためには、単純に顧客からの要求を受け入れるだけでなく、その多様な要求を柔軟にかつ効率的に受け入れることができるシステムが必要になる。これを受けて、製造企業は設計開発や生産の効率化に取り組んできている。その方策の1つとして、異なる製品の間



である部分を共通化したり、異なる企業間でそのような部分を共有化したり、あるいは、製品のある部分を独立させてモジュール化したりすることが行われている<sup>(1)</sup>。複数の製品間で横断的に用いられる共通モジュールはプラットフォームと呼ばれ、プラットフォームを基盤として製品の他の部分はモジュールを組み合わせた製品ごとに個別に設計したりすることで、設計開発費や設備費などの各種間接費を抑えながらも多様な製品展開が可能になる。一方で共通化を進めると、顧客要求に対して個別製品を設計する場合と比較すると、共通プラットフォームから展開される製品は性能が犠牲になる<sup>(2)</sup>。このため、共通化を過度に進めると、顧客が要求する性能を充足することができず、販売機会の損失が発生してしまう。したがって、顧客の要求仕様の広がりや需要の分布などを鑑みながら、製品のターゲットとする顧客全体の要求を充足できるよう複数種類のプラットフォームを設定して製品展開を行うことが有効であると言える。

## 5.2.2 プラットフォーム設計の課題

モジュールの組合せで製品が展開される多種展開品において具体的製品群を展開するにあたっては、製品アーキテクチャを定めるだけでなく、その製品アーキテクチャのもとで共通化部分を決定し、顧客要求への柔軟性とコストのトレードオフを考慮しながらその種類数と内容を適切に決定する必要がある。この際、第3章で取り上げたカスタマイゼーションを伴う多種展開製品の場合には、個々の顧客要求を事前に把握できない。このため、展開される個別製品の仕様を明確に定めた上でプラットフォームを設計することは困難である。したがって、製品ラインアップ全体で顧客からの受注が見込まれる要求仕様の範囲を想定し、その範囲のすべてに対して要求仕様を満たす製品を提供できるようにプラットフォームを設計する必要がある。

プラットフォーム設計を考えるにあたって、多種多様な顧客要求への対応が求められることを前提として、顧客が要求する性能の項目は複数存在する場合を本論文では考える。この場合、顧客満足を得る優れた設計を実現するためには、それらの性能の評価指標のすべてを考慮しつつプラットフォームの最適設計を行う必要がある。すなわち、個々の製品の設計問題が多目的最適化問題であることを前提とした、プラットフォーム最適化手法を考える必要がある。またこのためには、展開される製品群の性能値を評価する上記のすべての性能の評価指標をそれぞれ構築することが必須となるが、プラットフォーム設計を行う設計の上流段階では、製品の詳細情報が定まっていないため、個別製品の性能値を具体的に求めることは不可能であり、製品の性能の評価を行うことが難しい。

上記に対して、カスタマイゼーションを伴う多種展開製品に対するプラットフォーム設計については、例えば、Dai and Scott<sup>(3)</sup>はユーザ全体の要求に沿った製品の展開が可能なプラットフォームを設計するために、製品ユーザの選好関数を目的関数に組み込みプラッ

プラットフォーム設計を行う手法を提案した。しかしこれは単一プラットフォームのもとで製品展開を行うことを前提としており、複数プラットフォームのもとでの製品展開は考えられていない。Chen and Wang<sup>(4)</sup> や赤井ら<sup>(5),(6)</sup> は複数プラットフォームによる製品展開を前提としてプラットフォームの最適設計を行っているが、カスタマイゼーションにおいて顧客から要求される性能項目が複数存在する場合を考えておらず、対象が限定的なものに留まっている。

### 5.2.3 本研究のアプローチ

本研究では以上の論点に基づいてカスタマイゼーションを伴う多種展開品のためのプラットフォームの最適設計を行うことを目指す。具体的には、製品群にまたがるプラットフォームの設計問題に適した簡易モデルを構築し、製品の詳細が未確定な設計の構想段階で押さえておくべき評価指標を適格に設定する。これにより構成される設計問題に対応できる数理的定式化とその解法を独自に構成する。

## 5.3 簡易モデルを用いたプラットフォーム最適設計

### 5.3.1 簡易モデルの導入の意義とその構築法

顧客が求める性能が多数ある場合、顧客満足を得るためにはこれらの性能をすべて考慮しつつ最適設計を行う必要があるが、それらを設計の上流で明確に把握することは困難である。これに対して近年、設計の構想設計・概念設計段階から適用可能な設計支援手法として 1DCAE というコンセプトが注目されてきている<sup>(7)</sup>。1DCAE では、設計問題を見通しの良いシンプルなモデルで表現し、物理モデルシミュレーションなどを用いることよって設計を全体最適化するといった手法が開発されている。この 1DCAE のように、設計の上流段階で、製品の機能や性能の大まかな傾向を踏まえた上で、設計を進めることは、設計の効率化や開発期間の短縮に寄与すると考えられる。これを踏まえ本研究では、プラットフォーム設計においても同様の考え方を導入し、製品の特徴に絞りを簡略化したモデルを構築することにより、製品の性能の傾向を評価してプラットフォーム設計を行う。

プラットフォーム設計に適した簡易モデルは、下記のような手順に沿って構築する。下記手順は大まかなガイドラインであり、その順番や各プロセスにおける具体的内容は製品ごとに適宜変更・調整が求められる点に留意されたい。

1. 製品の中で顧客ごとの調整が求められる仕様の項目を特定する。
2. 顧客が最大化や最小化を要求する性能項目を特定する。

3. 2. で特定した性能項目に影響を与える部品やその設計パラメータを特定する.
4. 1. から3. を踏まえたうえで, 設計対象の設計パラメータを, 個別調整すべきものとプラットフォームとして共通化すべきものを決定する.
5. 以上の条件のもとで, 2. で特定した性能項目の性能値と3. で特定したパラメータとの関係式を構築する.

上記3. はプラットフォームから展開可能な製品の可能性を規定する重要な決定項目であり, その決定に関しては慎重に行う必要がある. この際の考え方のガイドラインとして, Gao et al.<sup>(8)</sup> は, 製品の設計・金型・機械加工・組立・サービス性・管理などの観点を, プラットフォームとして共通化すべきパラメータを選択する際の基準とすることを提案としている. また5. については, 2. や3. で考えた重要な設計パラメータを除く部分や製品の詳細な形状については簡略化や近似をしたり, 設計パラメータ間の相関関係を考えたりすることにより, 最適設計の計算が行える程度に設計変数を減らすことを考える.

### 5.3.2 プラットフォーム最適設計問題の数理モデル

2.3.4 項でのカスタマイゼーションを伴う多種展開製品に対するプラットフォームの最適設計問題についての検討を踏まえ, カスタマイゼーションを伴う多種展開製品に対するプラットフォーム最適設計問題の定式化を行うために, 共通化される部分と展開する具体的な製品群を決定するプラットフォーム最適化の数理的構造についての分析を以下で行う. なおここでの数理モデルは, 先行研究での最適設計の考え方<sup>(5),(6)</sup>を基盤としつつ, 個別製品の設計問題が多目的最適化として定式化される場合について独自の拡張を行う.

#### (1) 個別要求仕様に対する最適設計

プラットフォームの最適設計問題を論じるにあたり, まずある個別製品  $P_i$  の内容  $\mathbf{x}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) がある特定の要求仕様  $\mathbf{p}_i$  に対して設計される場合についての最適化設計問題を考えると, 以下のように問題が記述される.

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}_i \\ \text{that minimizes } \mathbf{f} = (f_1(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i), \dots, f_n(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i)) \\ \text{subject to } \mathbf{x}_i \in \text{Feasible}(\mathbf{p}_i) \\ \text{under the given } \mathbf{p}_i \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

ここで  $\mathbf{x}_i$  は製品  $P_i$  のある内容を表す設計変数,  $\mathbf{f}$  は性能指標などの最小化すべき複数の評価基準,  $\text{Feasible}(\mathbf{p}_i)$  は  $\mathbf{p}_i$  によって制限された実行可能領域を意味する. 製品に対して複数の評価基準が存在する場合問題はこのように多目的最適化問題となり, このままでは

計算が困難である．そこで，本研究では，複数の目的関数の中の1つ  $f_k(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i)$  に着目し，その他の目的関数  $f_l(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i)$  ( $l = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots$ ) は制約条件  $f_l(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i) \leq \varepsilon_l$  とすることで，多目的最適化問題を単一目的関数の最適化に帰着する方法を取ることにする．この場合，問題は次のような単一目的最適化問題となる．

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}_i \\ \text{that minimizes } f_k(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i) \\ \text{subject to } \mathbf{x}_i \in \text{Feasible}(\mathbf{p}_i) \\ f_l(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i) \leq \varepsilon_l \quad (l = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots) \\ \text{under the given } \mathbf{p}_i, \varepsilon_l \end{array} \right\} \quad (5.2)$$

## (2) 単一プラットフォーム設計問題の定式化

次に，複数種類のプラットフォームの最適設計を行う前段階として，ある要求仕様  $\mathbf{p}$  を与えて，ある共通部分  $\mathbf{x}^c$  のもとで顧客ごとの個別調整部分  $\mathbf{x}^s$  を最適に調整することにより製品を提供する場合を考える．その定式化は以下のようになる．

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}^s \\ \text{that minimizes } f_k(\mathbf{x}^c, \mathbf{x}^s, \mathbf{p}) \\ \text{subject to } (\mathbf{x}^c, \mathbf{x}^s) \in \text{Feasible}(\mathbf{p}) \\ f_l(\mathbf{x}^c, \mathbf{x}^s, \mathbf{p}) \leq \varepsilon_l \\ \text{under the given } \mathbf{p}, \mathbf{x}^c, \varepsilon_l \end{array} \right\} \quad (5.3)$$

一方，ある要求仕様  $\mathbf{p}$  に対して，後ほど個別調整部分  $\mathbf{x}^s$  の内容を式 (5.3) により最適に調整できることを前提として，共通部分  $\mathbf{x}^c$  を設計する問題は以下のように定式化できる．

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}^c \\ \text{that minimizes } \min_{\mathbf{x}^s} \tilde{f}_k(\mathbf{x}^s, \mathbf{x}^c, \mathbf{p}) \\ \text{under the given } \mathbf{p} \end{array} \right\} \quad (5.4)$$

ただし目的関数の  $\min_{\mathbf{x}^s} \tilde{f}_k(\mathbf{x}^s, \mathbf{x}^c, \mathbf{p})$  は式 (5.3) が実行可能である場合の，式 (5.3) による最適値を表す．これらを踏まえて一連の要求範囲  $\mathbf{p} \in R$  に対してある共通部分を設計する問題は以下のようになる．

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } \mathbf{x}^c \\ \text{that minimizes } \max_{\mathbf{p} \in R} \left[ \min_{\mathbf{x}^s} \tilde{f}_k(\mathbf{x}^s, \mathbf{x}^c, \mathbf{p}) \right] \\ \text{under the given } R \end{array} \right\} \quad (5.5)$$

### (3) 複数プラットフォーム設計問題の定式化

最後に、ある共通部分  $x^c$  ではなく、 $J$  種類の共通部分  $x_j^c (j=1, \dots, J)$  を用いる場合について前項の最適設計問題を考える。この問題は式 (5.5) を拡張することによって、以下の多目的最適化問題として定式化される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } [\mathbf{x}_1^{cT}, \mathbf{x}_2^{cT}, \dots, \mathbf{x}_J^{cT}]^T \\ \text{that minimizes } \max_{\mathbf{p} \in R} \left[ \min_{j=1,2,\dots,J} \left\{ \min_{\mathbf{x}^s} \tilde{f}_k(\mathbf{x}^s, \mathbf{x}_j^c, \mathbf{p}) \right\} \right] \\ \text{under the given } R \end{array} \right\} \quad (5.6)$$

この目的関数は、ある要求仕様  $\mathbf{p}$  に対して全種のプラットフォームについて最適設計を行い、それにより得られる個別製品のうち性能が最も高いものに着目し、すべての要求仕様の範囲  $R$  について同様のことを行い、個々の要求仕様について性能が最も高い製品のうち全要求範囲についてみたときに性能が最も低い製品の性能を最良とする最適化を示している。

#### 5.3.3 最適化計算における条件

プラットフォームの最適設計問題を定式化した式 (5.6) は、多重のミニ・マックス構造を含む複雑なものであり、さらには、顧客の要求仕様の範囲である  $R$  が連続空間であるため、そのままでは最適化計算が困難である。そのため、まず要求仕様の範囲  $R$  を、 $N$  個の代表点の集合  $R = \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N$  に置き換え、このもとで以下の簡略された最適化問題を解くこととする。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } [\mathbf{x}_1^{cT}, \mathbf{x}_2^{cT}, \dots, \mathbf{x}_J^{cT}]^T \\ \text{that minimizes } \max_{q=1,\dots,N} \left[ \min_{j=1,2,\dots,J} \left\{ \min_{\mathbf{x}^s} \tilde{f}_k(\mathbf{x}^s, \mathbf{x}_j^c, \mathbf{p}_q) \right\} \right] \\ \text{under the given } \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N \end{array} \right\} \quad (5.7)$$

また、上式の最適化問題の求解においては、プラットフォームの種類数  $J$  を固定して行うこととする。

## 5.4 産業用三軸直交ロボットのプラットフォーム設計への適用

構築したプラットフォーム最適設計法が有効であることを例示するために、第3章から引き続き、三軸直交ロボットを例題として手法の適用を行う。

### 5.4.1 産業用三軸直交ロボットの簡易モデルの構成

本例題の対象とする成形品の取出しに用いられる産業用三軸直交ロボットは、最大可搬質量やフレームのストローク距離や位置決め精度がロボットの使用状況に対応している必要があるため、顧客ごとに異なる要求に応えることが求められる製品である。それに加えて顧客要求は概ね、運搬物の移動速度および運搬物把握部の位置決め精度の向上、機体重量・機体サイズの最小化である。三軸直交ロボットのうち移動速度・位置決め精度・機体重量・機体サイズの性能に大きく関わっている部分は、モータおよび各フレームである。そのため、これらはなるべく共通化せず種類を豊富にすることが求められる。一方、フレーム同士の接続部は製品を移動させる際にフレーム上を摺動する部分であるため、共通化を行ってもフレーム同士の接続部分の前述の性能への影響は小さい。またこれらの部分は可動部周辺であり、フレームと比較して故障の生じやすい部分となっている。したがって共通化を行うと、顧客や製造企業が所持するメンテナンス部品の在庫の削減にもつながる。よってこの部分はなるべく共通化するべき部分であると考えられる。これらの部分は、フレーム上を摺動する部分を含むため、フレームの断面形状を共通化することにより、接続部の共通化を進めることが可能である。フレームの断面形状を共通化することができれば、フレームを製造する際の金型の種類を減らすことができ、製造コストの削減にもつながる。以上より、フレームの断面形状をプラットフォームとし、その長さは顧客要求に応じて展開させることとする。

以上の条件のもとで、三軸直交ロボットのプラットフォーム設計において考慮すべき性能の評価指標を構築する。三軸直交ロボットは、速度と精度の最大化および機体重量と機体サイズの最小化が求められているため、これらの定量的な評価指標が必要である。精度は製品側昇降アーム先端における静的変位で評価することとする。三軸直交ロボットはフレームの組合せで構成されているため、それらを近似的に梁に置き換えて表現することができることから、図 5.1 のように簡単な梁構造で表現し静的変位を求め、評価指標とする。具体的にはフレームやフレームの自重は等分布荷重として扱い、モータ等を含む接続部や接続されている全フレーム重量を集中荷重に置き換えて考える。また、横行フレームの変形に関しては変形が全体への影響が大きいため、横行フレームのみねじりを考えることとする。また、機体重量の最小化によりある程度速度の最大化・機体サイズの最小化を行えるものと考えこれを評価指標とする。さらに、製品を単純化して考え最適設計の計算を行うために

- 各フレームは長方形断面の中実角柱とする
- 横行フレーム断面形状の縦横比は 縦：横 = 3：2 で固定とする
- 製品側昇降アームの断面は正方形とする

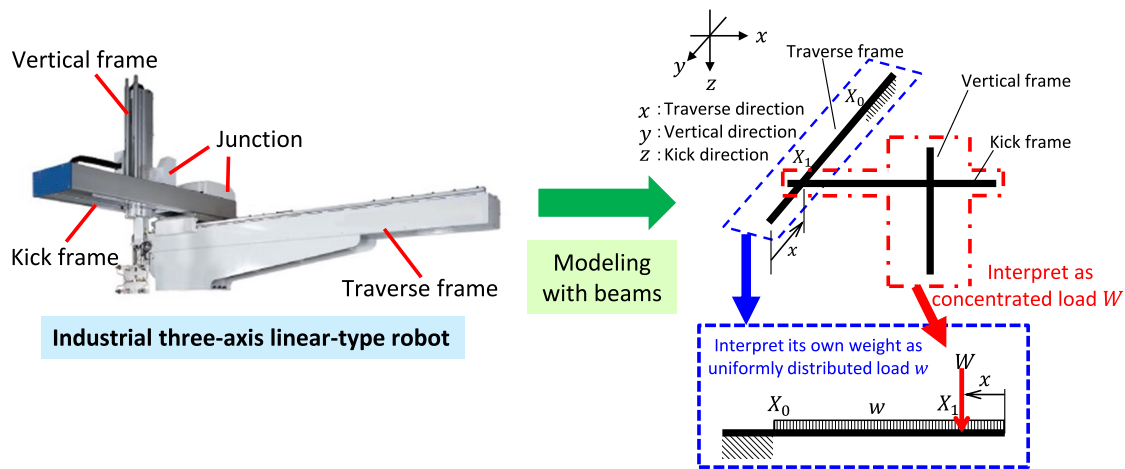


Fig. 5.1 Model of the three-axis linear-type robot.

- 接続部のがたつき等による傾きは無視する
- 接続部重量はモータのみを考慮する
- モータ重量はフレーム等の重量から連続的に求める

といった条件を置く。

#### 5.4.2 産業用三軸直交ロボットのプラットフォーム最適設計モデル

前項の簡易モデルを用いて最適化計算のためのモデルを構築する。前項のモデルのもとでは、設計変数は横行フレーム断面の高さ  $h_1$  [mm], 引抜フレーム断面の高さ  $h_2$  [mm], 幅  $b_2$  [mm], 昇降アーム断面の高さ  $h_3$  [mm] のみとなる。また、前項の議論に基づき、顧客の要求仕様を運搬物重量  $m_p$  [kg] と各フレームの長さ  $L_1$  [mm],  $L_2$  [mm],  $L_3$  [mm] として与える。目的関数は運搬物把握時の昇降アーム先端の静的変位による移動距離  $d_c = d_c(m_p, L_1, L_2, L_3)$ , 運搬物開放時の同距離  $d_r = d_r(m_p, L_1, L_2, L_3)$ , 機体重量  $M = M(m_p, L_1, L_2, L_3)$  の最小化とするため、この問題は多目的最適化問題となる。形状・強度に関する制約条件を与えると、

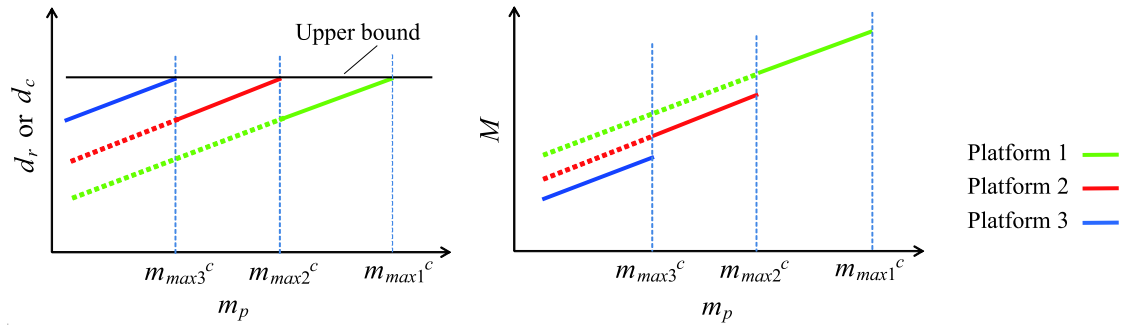


Fig. 5.2 Optimality relationship among three objectives,  $M$ ,  $d_c$  and  $d_r$  over a set of platforms

三軸直交ロボットの個別製品の最適設計問題は以下のように定式化される。

$$\begin{array}{ll}
 \text{find} & h_1, h_2, h_3, b_2 \\
 \text{that minimizes} & M \\
 \text{and minimizes} & d_c \\
 \text{and minimizes} & d_r \\
 \text{subject to} & 100 \leq h_1 \leq 350 \quad 100 \leq h_2 \leq 300 \\
 & 50 \leq h_3 \leq 300 \quad 50 \leq b_2 \leq 300 \\
 & \sigma_3 \leq \sigma_a \\
 \text{under the given} & m_p, L_1, L_2, L_3, \sigma_a
 \end{array} \quad (5.8)$$

ここで  $\sigma_3$  は運搬物を把握している状態で昇降アームに生じる最大の引張応力であり、 $\sigma_B$  はその許容応力である。

次に、式(5.2)と同様に、式(5.9)を単一目的の最適化問題へと帰着させる。現在目的関数は運搬物把握時の昇降アーム先端の静的変位による移動距離  $d_c = d_c(m_p, L_1, L_2, L_3)$ 、運搬物開放時の同距離  $d_r = d_r(m_p, L_1, L_2, L_3)$ 、機体重量  $M = M(m_p, L_1, L_2, L_3)$  の最小化としている。プラットフォームを複数種類提供することで過剰設計を無くすことを目指すと、運搬物が軽くなるにしたがって機体の剛性が小さくなる、つまり機体重量  $M$  が小さくなることが望ましい。しかし、機体を軽くしすぎるとトレードオフの関係により剛性が小さくなると昇降アーム先端の変位  $d_c, d_r$  が大きくなってしまふ。ここで複数種のプラットフォームを提供し、運搬物質量  $m_p$  の要求範囲を満たすときの各プラットフォームの  $M$  と  $d_c, d_r$  の関係を考えると、両者の関係ははだまかに図 5.2 のようになると予想されるので  $d_c, d_r$  の最大値に制約を与えると、 $d_c, d_r$  を製品系列全体である程度均一しつつ機体重量  $M$  の最小化が行えるものとする。よって、 $d_c, d_r$  に最大制約を与えて制約条件にして、目的関数は機体重量  $M$  の最小化のみとし、問題を単一目的の最適化問題へと帰着させる。以上により式(5.9)は次のような単目的最適化問題へと帰着する。



$$\begin{array}{ll}
\text{find} & h_1, h_2, h_3, b_2 \\
\text{that minimizes} & M \\
\text{subject to} & d_c \leq d_c^* \qquad d_r \leq d_r^* \\
& 100 \leq h_1 \leq 350 \qquad 100 \leq h_2 \leq 300 \\
& 50 \leq h_3 \leq 300 \qquad 50 \leq b_2 \leq 300 \\
& \sigma_3 \leq \sigma_a \\
\text{under the given} & m_p, L_1, L_2, L_3, \sigma_a, d_c^*, d_r^*
\end{array} \quad (5.9)$$

次に一連の要求範囲  $R$  を満たすように単一の共通部分を設計することを考える。本例題では、運搬質量物とフレーム長さの要求範囲  $R$  を満たすように三軸直交ロボットの3つのフレーム(横行フレーム・引抜フレーム・昇降アーム)の断面形状を組として、この断面形状の組をプラットフォームとして共通化する。そのため、本例題では個別調整部分は存在せず、各フレーム断面の寸法  $h_1, h_2, h_3, b_2$  がすべて共通部分となり、一連の要求範囲  $R$  に対して共通のフレーム断面  $h_1^c, h_2^c, h_3^c, b_2^c$  を設計することとなる。さらに、1種の断面で要求範囲をすべて満たすためには、要求される最大の運搬物質量と各フレーム長さに合わせて断面形状を最適化する必要がある。すなわち、要求範囲における運搬物質量の最大値  $m_{max}$ 、各フレーム長さの最大値を  $L_{max1}, L_{max2}, L_{max3}$  とすると、このときの  $m_p = m_{max}, L_1 = L_{max1}, L_2 = L_{max2}, L_3 = L_{max3}$  に対する  $h_1^c, h_2^c, h_3^c, b_2^c$  を求めることになる。さらにこのとき、機体重量  $M$  の最小化を考えると、機体重量  $M$  は、 $L_1 = L_{max1}, L_2 = L_{max2}, L_3 = L_{max3}$  のとき最大となることは自明である。このときの機体重量を  $M_{max}$  とすると、断面から提供されるすべての個別製品のうち機体重量が最大のを最小化するということは、 $M_{max}$  を最小化することを意味する。さらに、 $L_1 = L_{max1}, L_2 = L_{max2}, L_3 = L_{max3}$  のとき  $d_c, d_r$  が最大となることも自明であるため、このときの  $d_c, d_r$  をそれぞれ  $d_{cmax}, d_{rmax}$  とすると、この  $d_{cmax}, d_{rmax}$  に対して制約を与えると、この単一プラットフォームから提供されるすべての個別製品が制約条件を満たすことになる。よって、一連の要求範囲  $R$  を満たすように単一の共通部分  $h_1^c, h_2^c, h_3^c, b_2^c$  を設計する問題は以下のように定式化される。

$$\begin{array}{ll}
\text{find} & h_1^c, h_2^c, h_3^c, b_2^c \\
\text{that minimizes} & M_{max} \\
\text{subject to} & d_{cmax} \leq d_c^* \qquad d_{rmax} \leq d_r^* \\
& 100 \leq h_1^c \leq 350 \qquad 100 \leq h_2^c \leq 300 \\
& 50 \leq h_3^c \leq 300 \qquad 50 \leq b_2^c \leq 300 \\
& \sigma_3 \leq \sigma_a \\
\text{under the given} & m_{max}, L_{max1}, L_{max2}, L_{max3}, \sigma_a, d_c^*, d_r^*
\end{array} \quad (5.10)$$

最後に、 $J$ 種のプラットフォームで一連の要求範囲  $R$  を満たすことを考える。この場合、

$J$ 種の共通部分  $h_{1j}^c, h_{2j}^c, h_{3j}^c, b_{2j}^c$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) を設計することになる. 三軸直交ロボットは最大可搬質量により製品が区分されるので, 運搬物の質量の要求範囲全体に対応できるように各プラットフォームで運搬する最大の質量すなわち最大可搬質量  $m_{maxj}^c$  を決定する必要がある. したがって, 各プラットフォームの最大可搬質量  $m_{maxj}^c$  も設計変数に追加し,  $m_{max1}^c$  は要求される運搬物質量の最大値で固定し, 他のプラットフォームの最大可搬質量  $m_{maxj}^c$  が  $m_{min} \leq m_{maxj}^c \leq m_{max1}^c$  の範囲にあるものとする. このような条件のもと, 各々のプラットフォームから提供される機体の最大重量  $M_{maxj}$  を比較し, その値が最大であるプラットフォームの  $M_{maxj}$  を最小化するように最適化を行う.

以上より,  $J$ 種のプラットフォームを設計する製品系列設計問題は以下のように定式化される. なお, ここでの  $h_{1j}^c, h_{2j}^c, h_{3j}^c, b_{2j}^c$  は式(5.10)の制約を満たすものとする. また,  $L_{max1j}, L_{max2j}, L_{max3j}$  を各プラットフォームにおけるアームの最大長さとする.

$$\left. \begin{array}{l} \text{find } (h_{11}^c, h_{21}^c, h_{31}^c, b_{21}^c), \dots, (h_{1J}^c, h_{2J}^c, h_{3J}^c, b_{2J}^c), m_{max2}^c, \dots, m_{maxJ}^c \\ \text{that minimizes } \max_{j=1,2,\dots,J} M_{maxj} \\ \text{subject to } m_{min} \leq (m_{max2}^c, \dots, m_{maxJ}^c) \leq m_{max1}^c \\ \text{under the given } m_{min}, m_{max1}^c, (L_{max11}, L_{max21}, L_{max31}), \dots, (L_{max1J}, L_{max2J}, L_{max3J}) \end{array} \right\} \quad (5.11)$$

### 5.4.3 最適化計算結果

三軸直交ロボットのプラットフォーム最適化の計算を行うにあたっては, 計算条件として  $m_{min} = 5[\text{kg}]$ ,  $m_{max1}^c = 25[\text{kg}]$ ,  $d_c^* = 0.3[\text{mm}]$ ,  $d_r^* = 0.2[\text{mm}]$  と与え, その範囲を格子状に配置した  $8 \times 4$  の 32 点に置き換える. 各プラットフォームにおけるアームの最大長さは実機データの分析から最大可搬質量  $m_{maxj}^c$  に応じて以下のように決定されるものとする.

$$L_{max1j} = 0.2491(m_{maxj}^c)^3 - 15.43(m_{maxj}^c)^2 + 665.5m_{maxj}^c \quad (5.12)$$

$$L_{max2j} = 36m_{maxj}^c + 1215 \quad (5.13)$$

$$L_{max3j} = 503.3(m_{maxj}^c)^{0.4195} \quad (5.14)$$

また, プラットフォームの設計を行うためには, 前項で導いた最適設計モデルやその前提となっている 3つの評価指標の他, そのもののプラットフォームの数を定めて, それによる諸項目への影響を評価する必要がある. そこで, プラットフォームの種類数  $J$  については  $J=1, 2, 3$  の 3つの場合を考え, それぞれに対して前述の方法で最適化を行う. これらの最適化は, OPTIMUS Ver.10.9<sup>(9)</sup> による遺伝的アルゴリズムを多目的に拡張した NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)<sup>(10)</sup> を用いて設計変数を操作して行う.

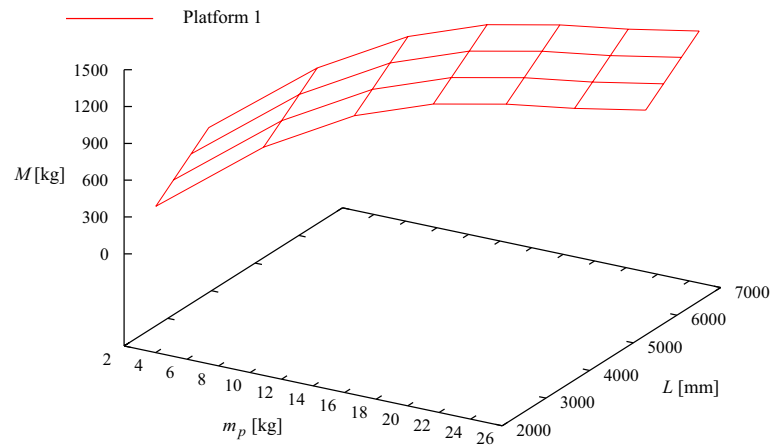
以上の条件のもと、前項の方法によりプラットフォームの最適化計算を行った結果を図 5.3～図 5.5 に示す。図 5.3 (a), (b), (c) はそれぞれプラットフォーム種類数  $J=1, 2, 3$  の場合について、運搬物質量  $m_p$  とフレーム長さ  $L_1, L_2, L_3$  の合計値  $L$  の要求仕様を横軸にとり各要求仕様に対しての機体重量  $M$  を三次元的に格子で図示したものである。同様に図 5.4 は運搬物開放時の昇降アーム先端の移動量  $d_r$  を、図 5.5 は運搬物把握時の昇降アーム先端の移動量  $d_r$  をプラットフォーム種類数  $J=1\sim 3$  の場合について示している。表 5.1 はこれらの結果をまとめたものである。

#### 5.4.4 考察

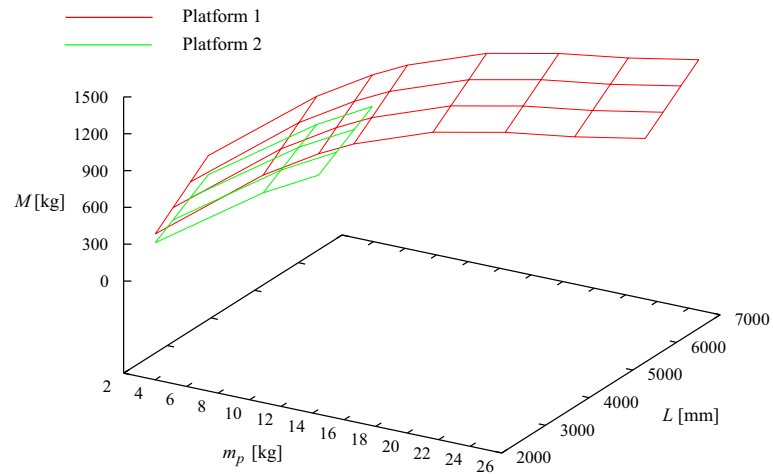
図 5.3 に示すプラットフォームが 1 種類の場合 (図 5.3 (a)) と 2 種類の場合 (図 5.3 (b)) を比較すると、前者ではプラットフォーム 1 によってすべての要求範囲に対応しているが、後者ではプラットフォームが 2 種類に増えたことにより、運搬物質量が軽い範囲においてプラットフォーム 2 が対応する形になっている。さらにプラットフォームが 3 種類の場合 (図 5.3 (c)) を見ると、より運搬物質量が軽い範囲においてプラットフォーム 3 が対応する形になっている。図 5.4, 図 5.5 においても同様の現象が見られる。これらの結果から分かるように断面形状が 1 種類の時は、重量物に対応可能な断面で軽量物にも対応していることから、運搬物が軽量の範囲では剛性が必要以上に高く、機体重量が過度に重いという、過剰設計が生じているものの、その過剰設計が、5.4.2 項で考えたように、断面形状の種類数を増やすことにより  $d_c, d_r$  が全体的に均一化され、解消されているといえる。これより、目的関数であった  $d_c, d_r$  を制約条件としたことは妥当であったと言える。断面形状の種類が増加するにしたがって、過剰設計が解消されるとともに、プラットフォームから展開される製品群の機体重量が全体的に軽量化されるため、全体での販売量の増加も見込まれる。一方で、プラットフォームの種類を増やすと、フレームの製造に要する金型の種類の増加や在庫管理費の増加などにより生産コストが増大するという問題がある。プラットフォーム設計では、上記のようなトレードオフ関係を考慮しながら、プラットフォームの種類数を決定する必要がある。

以上のように、プラットフォームの種類数が増加するにしたがって、プラットフォームから展開される製品群の全体で、過剰設計を減らすとともに、顧客要求が最小化や最大化を求める性能項目の水準も向上していくことがこの結果から確認することができる。これより、構築した手法により、プラットフォーム設計におけるトレードオフ関係の傾向を定量的に明示化されていると言える。

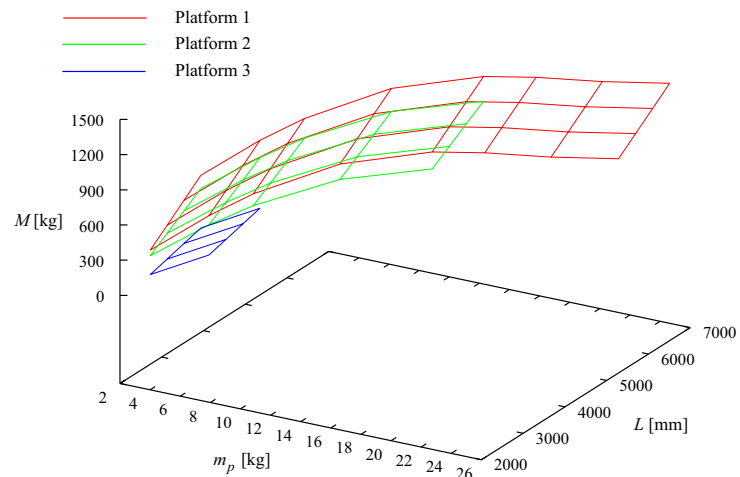
プラットフォーム設計に用いる簡易モデルは、対象の製品を非常に簡素に表したものであり、多くの仮定を導入するため、実機との間には差が生じているものと考えられる。製品の性能の傾向などをモデルから把握するためには、この差をなるべく小さくする必要がある。



(a) Single platform result.

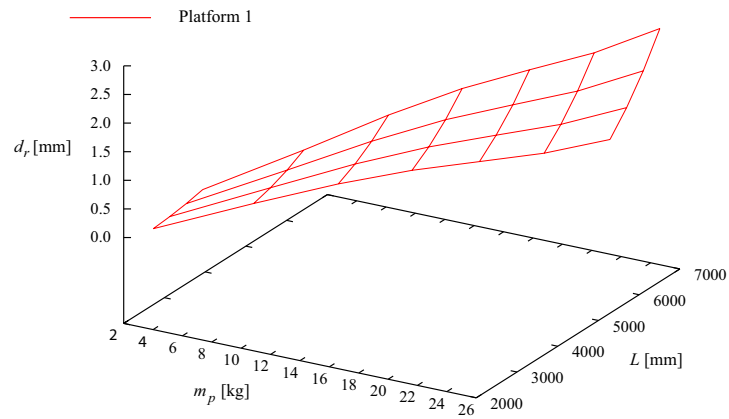


(b) Two platforms result.

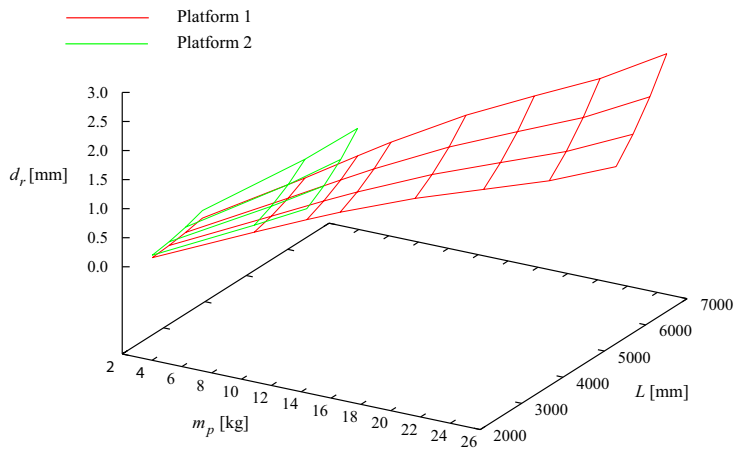


(c) Three platforms result.

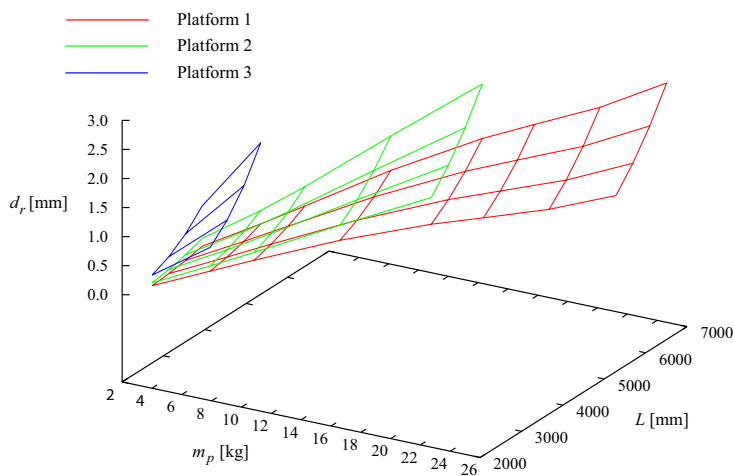
Fig. 5.3 Weight of robots' body with optimal platforms.



(a) Single platform result.

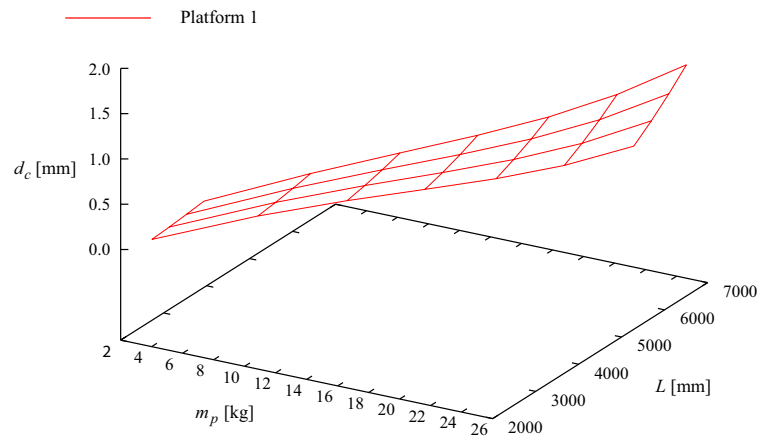


(b) Two platforms result.

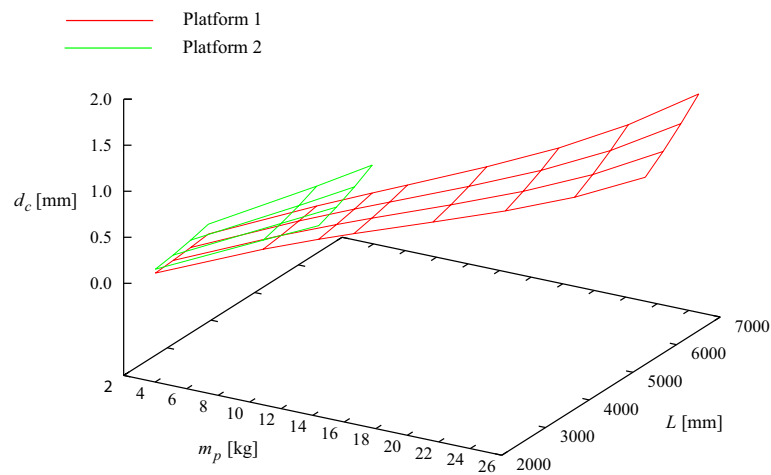


(c) Three platforms result.

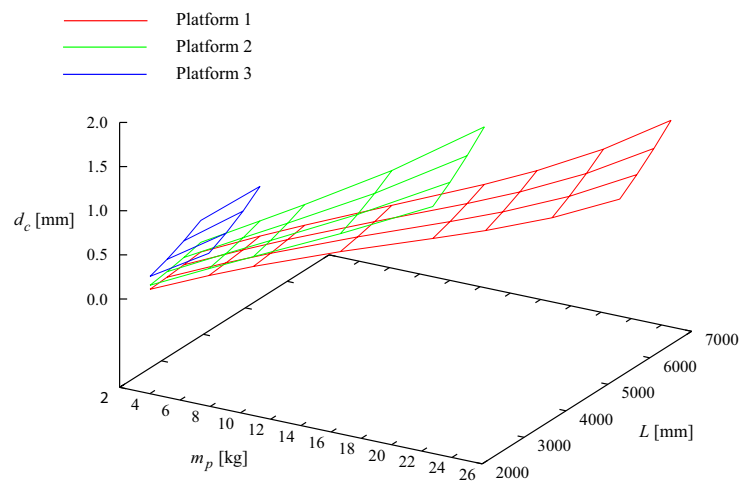
Fig. 5.4 Displacement of the vertical frame head at the product release point with optimal platforms.



(a) Single platform result.



(b) Two platforms result.



(c) Three platforms result.

Fig. 5.5 Displacement of the vertical flame head at the product catch point with optimal platforms.

Table. 5.1 Comparison of three cases by the contents of optimally designed platforms

Number of platforms		1	2	3	
Design variables	Platform 1	$h_1$ [mm]	276	275	275
		$h_2$ [mm]	184	182	184
		$h_3$ [mm]	51.9	50.0	50.0
		$b_2$ [mm]	50.2	50.0	50.0
		$m_{max}$ [kg]	25.0	25.0	25.0
	Platform 2	$h_1$ [mm]	—	241	248
		$h_2$ [mm]	—	130	169
		$h_3$ [mm]	—	50.0	89.2
		$b_2$ [mm]	—	61.9	50.0
		$m_{max}$ [kg]	—	8.84	14.9
	Platform 3	$h_1$ [mm]	—	—	159
		$h_2$ [mm]	—	—	104
		$h_3$ [mm]	—	—	56.4
		$b_2$ [mm]	—	—	50.0
		$m_{max}$ [kg]	—	—	5.00
Objective functions	Platform 1	$M_{max}$ [kg]	1342	1329	1334
		$d_r max$ [mm]	2.70	2.72	2.70
		$d_c max$ [mm]	1.41	1.43	1.39
	Platform 2	$M_{max}$ [kg]	—	881.5	1088
		$d_r max$ [mm]	—	1.30	2.49
		$d_c max$ [mm]	—	0.564	1.19
	Platform 3	$M_{max}$ [kg]	—	—	313.7
		$d_r max$ [mm]	—	—	1.76
		$d_c max$ [mm]	—	—	0.704

ある。しかしモデルの構造をより実機に近づけると、モデルが複雑になってしまい、最適化や評価指標の構築が困難になってしまう恐れがある。これに対しては、製品の表現は単純な形式のまま、評価指標の値に適宜補正を行うことが有効であると考えられる。

## 5.5 結言

本章では、カスタマイゼーションを伴う多種展開品において製品群展開の基盤となるプラットフォームの設計について取り上げた。そのプラットフォーム最適設計手法を構築するにあたっては、製品の詳細が未定な設計の上流段階で性能への影響を把握するための簡易モデルの構築について検討を行い、先行研究の手法を拡張して個別製品の設計問題が多目的最適化問題として定式化される場合のプラットフォームの設計問題の数理モデルを構築するとともに、問題を解くための最適化計算法を構築した。さらに、第3章と同様に産業用三軸直交ロボットの例題を取り上げ、構築した手法を適用し、プラットフォームの種類数が1~3種類の各ケースについてそれぞれ最適化計算を行った。得られた計算結果を分析し、プラットフォーム設計問題における各種のトレードオフ関係を明示化できることを示し、構築したモデルと最適化計算法の有効性を示した。プラットフォーム設計に用いる簡易モデルで製品の性能の傾向などを把握するためには、実製品との差をなるべく小さくする必要がある。これに対しては、製品の表現は単純な形式のままで、評価指標の値に適宜補正を行うことが有効であると考えられる。

## 参考文献

- (1) 藤田喜久雄, 石井浩介, 製品系列統合化設計とそのタスク構造, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 629 (1999), pp. 416–423.
- (2) Nelson, S. A. and Parkinson, M. B., Multicriteria Optimization in Product Platform Design, in *Proceedings of 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences* (1999), Paper No. DETC99/DAC-8676.
- (3) Dai, Z. and Scott, M. J., Effective Product Family Design Using Preference Aggregation, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128, No. 4 (2006), pp. 659–667.
- (4) Chen, C. and Wang, L., Multiple-Platform Based Product Family Design for Mass Customization Using a Modified Genetic Algorithm, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 19, No. 5 (2008), pp. 577–589.
- (5) 赤井亮太, 藤田喜久雄, 製品系列展開における共通化・カスタマイゼーション・ラインアップ調整による包括的な最適設計問題に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 769 (2010), pp. 2316–2324.
- (6) 赤井亮太, 藤田喜久雄, プラットホーム群の先行設計と個別調整設計による製品系列展開とその最適設計に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 778 (2011), pp. 2430–2440.



- (7) 大富浩一, 羽藤武弘, 1DCAE によるものづくりの革新, 東芝レビュー, Vol. 67, No. 7 (2012), pp. pp.7–8.
- (8) Gao, F., Xiao, G. and Simpson, T. W., Module-Scale-Based Product Platform Planning, *Research in Engineering Design*, Vol. 20, No. 2 (2009), pp. 129–141.
- (9) Noesis Solutions, OPTIMUS ver. 10.9 (2012).
- (10) Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T., A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2 (2002), pp. 182–197.

## 第6章

# アーキテクチャを基盤とする設計法の各種製品への展開における課題

### 6.1 緒言

本章では、第3章から第5章で構築したアーキテクチャ設計法が、特定の製品種別を前提としたものであることを系統的に整理した上で、幅広い製品種に適用可能な多種展開のための設計法を構成する上での課題について、関連の研究動向を参照しながら論じる。

### 6.2 個別の設計法の製品種別への依存性と拡張における課題

第3章から第5章では、多種展開のための設計法を構築することを目指してアーキテクチャの概念を顧客要求・組立工程・プラットフォーム設計の3方面へ拡張し、それぞれについて具体的な設計法の構築を行った。設計法の構築に際しては、各方面にアーキテクチャ設計を拡張するにあたり解決すべき課題を具体的に把握するために、各方面への拡張が重要となる特定の製品種別を想定し、その前提のもとで設計法の構築に取り組んだ。第3章で取り組んだアーキテクチャ設計の顧客要求への拡張とその設計法の構築および第5章で取り組んだプラットフォーム最適設計法の構築については、多様な顧客要求への対応が重要視される、モジュールの組合せによるカスタマイゼーションを伴う方式により生産される多種展開品について考えた。第4章で取り組んだアーキテクチャ設計の組立工程への拡張とその設計法の構築については、顧客や小売店から注文を受けてから最終組立作業を行う方式により生産される多種展開品について考えた。さらに、構築したそれぞれの設計法を上述の特定の生産方式に該当する例題に適用し、その有効性を検証した。

製品の生産方式は、生産と受注の関係から未来の需要を予測して最終製品または半製品をあらかじめ生産しておき、在庫として準備しておく見込み生産方式 (Make-to-Stock,

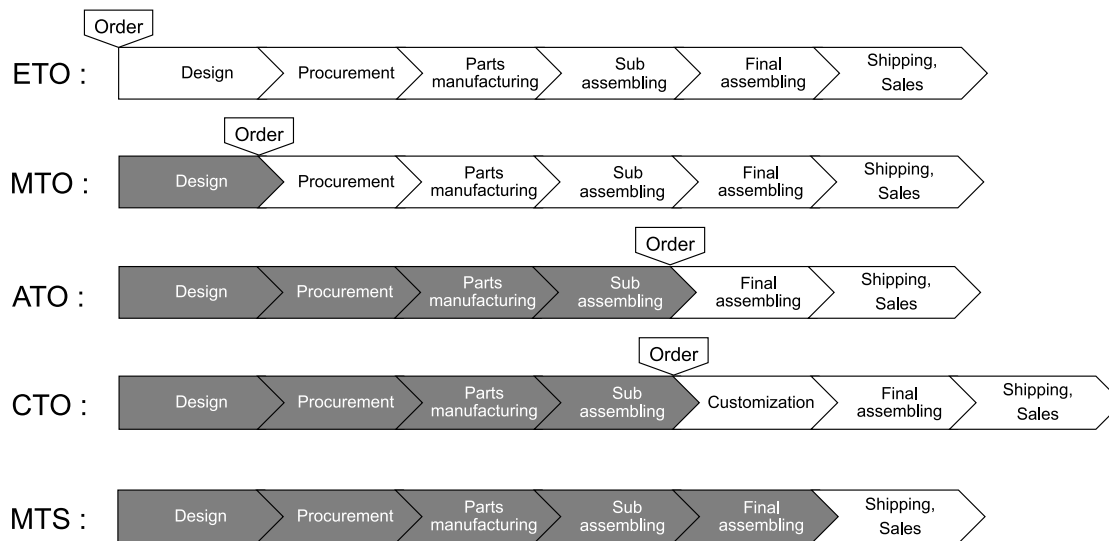


Fig. 6.1 Production processes of ETO, MTO, ATO, CTO and MTS.

MTS) と、注文を受けてから製品の生産を開始する受注生産方式に大別される<sup>(1)</sup>。それらの中で、受注生産方式は受注後の製品生産開始段階と受注内容に応じた個別調整の有無によって、さらに下記のように分類される。

**ETO (Engineering-to-order)**：受注設計生産方式。顧客からの要求に従って製品を設計し、資材などを手配-生産-納入する方式を指す<sup>(2)</sup>。

**MTO (Make-to-order)**：狭義の受注生産方式。受注に従って材料、購入品などを手配し、生産-納入する方式を指す<sup>(2)</sup>。

**ATO (Assemble-to-order)**：受注組立生産方式。主要部品やモジュールを在庫として用意しておき、受注に従ってそれらを組み立てて最終製品を提供する方式<sup>(3)</sup>。狭義では特に、注文を受けてから顧客ごとのモジュール組み換えによるカスタマイズを行わず最終製品の組立のみをして製品提供をおこなう生産方式を指す<sup>(4)</sup>。

**CTO (Configure-to-order)**：注文仕様生産方式。ATOの中でも、部分組立品を個々の顧客の注文内容に応じて組み合わせて最終製品の組立を行う生産方式を限定してCTOと称する<sup>(4)</sup>。

見込み生産方式と上記の各受注生産方式の生産の進め方を図6.1に示す。上述の生産方式による分類に基づくと、第3章および第5章で対象とした多種展開品は注文仕様生産品に、第4章で対象とした多種展開品は受注組立生産品に該当する。このように第3章から第5章では、アーキテクチャ設計の概念を顧客要求、組立工程、プラットフォーム設計へ拡張

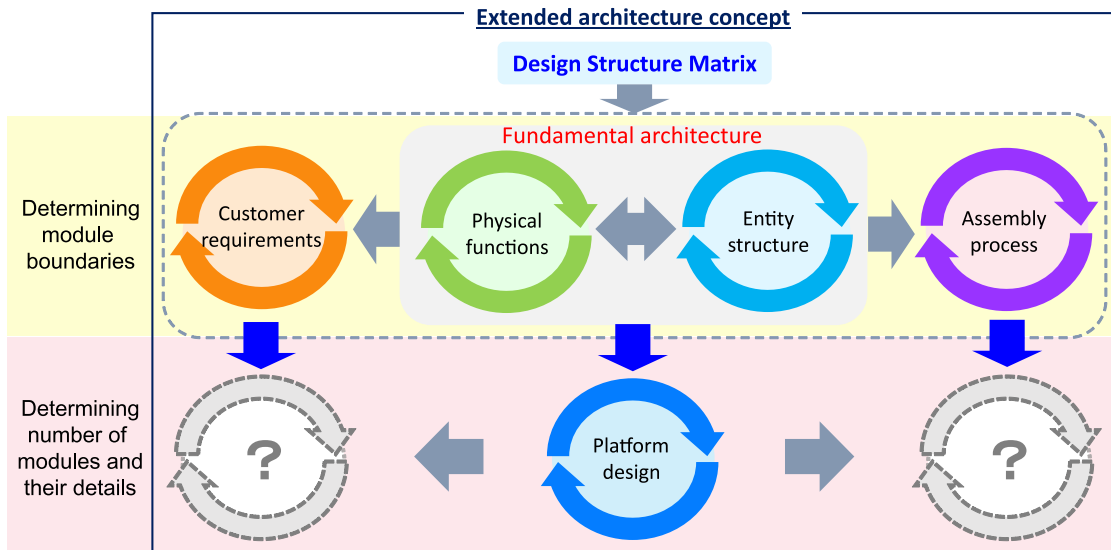


Fig. 6.2 Current and future scope of this research.

する汎用的な設計法の基礎を築くことを目指し、それぞれへの拡張が重要視される製品種を具体的に想定して各方面への拡張における固有の課題を明らかにすることによって、具体の設計法を構築した。したがって、構築した設計法について、対象とした特定の製品種別に対しての有効性は検証した一方で、他の製品種別については、本論文で構築した設計法の有効性は具体的には検証できていない。このため、第3章から第5章で構築した設計法が多様な製品種別に対して普遍的に有効性を持つものであるか否かを明言するためには、今後のさらなる検討が必要になる。

### 6.3 多種展開の拡張に向けたアーキテクチャ設計の実装レベルと展開領域

製品アーキテクチャ設計は、製品設計のプロセスにおいて、上流に位置するものであり、製品アーキテクチャが決定されても、それを製品として実装するためには、細部の設計が決定される必要がある。これに関して、個々のモジュールが何種類かに展開され、それらのモジュールの組合せにより多種展開される製品においては、アーキテクチャを製品として実装する際の実装のレベルは大きく分けて以下の2段階に分けられる。

1. 製品のモジュール群への分割 (モジュール間の境界の決定)
2. 各モジュールの具体の決定とそれを受けた種類数の確定

1. は製品をモジュールに分割する際のモジュール間の境界を決定する段階である。2. は、1. で分割された各モジュールに対して、組み替える候補となるモジュールの種類数とそのそれぞれの仕様を具体的に決定する段階である。この両段階を経て初めて製品の多種展開が達成される。図 6.2 に示すように、第3章と第4章で構築したアーキテクチャの概念を顧客要求および組立工程へと拡張した設計法は、上述のアーキテクチャ設計の実装レベルの1. に主に焦点を当てている。一方、第5章で取り組んだプラットフォーム設計への拡張については基本アーキテクチャを対象として2. への展開に部分的に踏み込んでいる。しかし、プラットフォームの種類数を決定するまでには至っていない。このため、第3章から第5章で構築した設計法は、顧客要求や組立工程へと拡張したアーキテクチャの設計結果を製品として実装するレベルまで包括したものとはなっていない。したがって、2. については本研究のさらなる展開が必要とされると考える。これに関しては、単純により多くの設計法が必要であるということに留まらず、製品の内容や多種展開の幅などの性質を踏まえて、設計法を使い分けていくことなども必要である。

## 6.4 アーキテクチャ概念の拡張に関連する設計法の研究動向

前節で述べたアーキテクチャ設計の実装レベルについて、関連研究がどのレベルに焦点を当てているか、その動向を調査する。アーキテクチャ設計に関しては、表 6.1 に示すようにこれまで多数の手法が提案されており、アーキテクチャ概念を拡張した設計法についても研究が行われている。表 6.1 は各アーキテクチャ設計法が対象とする視点を、顧客要求 (Requirements)、機能 (Functionality)、設計パラメータ (Parameters)、製品仕様・性能 (Specification)、構成要素 (Components)、組立 (Assembling) の6項目で整理している。表中のA~IはDSMにより視点の拡張を行う製品アーキテクチャ設計法、a~jはDSMを用いない製品アーキテクチャ設計法である。

DSMにより視点の拡張を行う製品アーキテクチャ設計法のうち、Pimmer and Eppinger<sup>(5)</sup> や Helmer and Yassine<sup>(11)</sup> は構成要素間の情報、エネルギー、物質のやり取りや物理的な隣接関係を相互関係として記述し、クラスタリングを適用することで製品アーキテクチャのモジュール化を行っている。また、Zakarian and Ruston<sup>(6)</sup> は物理機能間の相互関係に基づいて自動車のコックピットシステムをモジュール化している。Braun and Deubzer<sup>(7)</sup> や Alizon et al.<sup>(8)</sup> は複数製品の構成要素をドメインとしたDSMを重ね合わせることで、対象を製品系列へ拡張し、製品群にわたる共通モジュールや製品ごとの固有モジュールの識別が行われた。Gorbea et al.<sup>(9)</sup> や Bonjour et al.<sup>(12)</sup> は製品の物理機能と構成要素をドメインとしたMDMを用いて製品アーキテクチャの分析を行い、Deubzer and Lindemann<sup>(10)</sup> は製品の物理機能を機能間の流れ、機能の状態の2つのドメインとして分割し、その物理機能に関す

Table. 6.1 Scope of product architecture design methods.

References	Target	Product example	Scope					
			Requirements	Functionality	Parameters	Specification	Components	Assembling
A: Pimpler and Eppinger (1994) <sup>(5)</sup>	Product	Automotive climate control system					X	
B: Zakarian and Rushton (2001) <sup>(6)</sup>	Product	Cockpit system of an automotive vehicle		X				
C: Braun and Deubzer (2007) <sup>(7)</sup>	Product family	–					X	
D: Alizon et al. (2007) <sup>(8)</sup>	Product family	Single-use camera					X	
E: Gorbea et al. (2008) <sup>(9)</sup>	Product	Hybrid electric vehicle		X			X	
F: Deubzer and Lindemann (2009) <sup>(10)</sup>	Product	Drive train of an automotive vehicle		X			X	
G: Helmer and Yassine (2010) <sup>(11)</sup>	Product	Jet engine					X	
H: Bonjour et al. (2013) <sup>(12)</sup>	Product	Diesel engine		X			X	
I: AlGeddawy et al. (2017) <sup>(13)</sup>	Product	DC vibration motor					X	X
a: Ulrich and Eppinger (1995) <sup>(14)</sup>	Product	Printer		X				
b: Erixon (1998) <sup>(15)</sup>	Product	Vacuum cleaner	X		X		X	
c: Zamirovski and Otto (1999) <sup>(16)</sup>	Product family	Printer	X	X		X		
d: Yu et al. (1999) <sup>(17)</sup>	Product family	Instant camera	X			X		
e: Stone et al. (2000) <sup>(18)</sup>	Product	Power screwdriver		X				
f: Dahmus et al. (2001) <sup>(19)</sup>	Product family	Power tool	X	X		X		
g: Borjesson (2009) <sup>(20)</sup>	Product family	Cordless vacuum cleaner	X		X	X	X	
h: ElMaraghy and AlGeddawy (2012) <sup>(21)</sup>	Product family	Washing machine	X	X		X	X	
i: Lin et al. (2012) <sup>(22)</sup>	Product	Coffee maker					X	X
j: Li et al. (2017) <sup>(23)</sup>	Product	Large tonnage crawler crane		X				

る 2 ドメインと構成要素をドメインとする MDM を用いて製品アーキテクチャ設計を行っている。AlGeddawy et al.<sup>(13)</sup> は、DSM 形式で統合はしていないものの、組立性の評価指標を用いることにより、構成要素をドメインとした DSM のクラスタリングの粒度を、組立性を考慮して決定している。

DSM を用いない製品アーキテクチャ設計法のうち、Ulrich and Eppinger<sup>(14)</sup> は製品の機能構造に着目していくつかの機能要素をモジュールとしてまとめる製品アーキテクチャを設計し、Stone et al.<sup>(18)</sup> も機能要素間の入出力関係を記述する機能モデリングを用いて機能要素間の関係に基づくヒューリスティックにより製品アーキテクチャのモジュール化を行っている。Li et al.<sup>(23)</sup> は機能モデリングを用いたクラスタリング手法を構築し、複雑な製品を対象とした機能モデリングによる製品アーキテクチャのモジュール化手法を提案した。Erixon<sup>(15)</sup> は顧客要求・製品仕様・構成要素の展開を行うとともに、構成要素を 12 種のモジュールドライバに基づきモジュールに統合する Modular Function Deployment (MFD) を提案した。また、Lin et al.<sup>(22)</sup> は構成要素間の相互関係と組立手順を統合的に考慮し、製品アーキテクチャのモジュール化と組立工程の同時設計を行った。これらの手法はいずれも

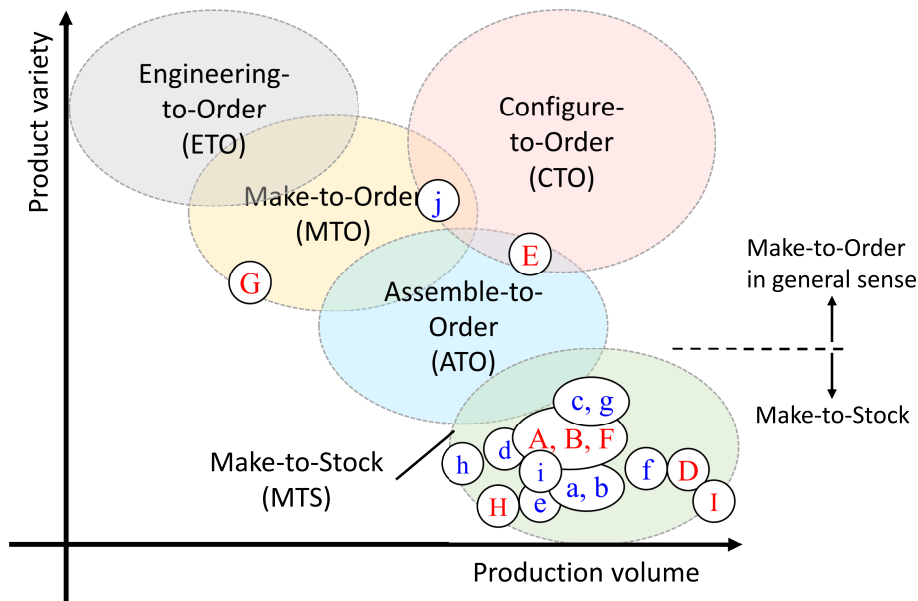


Fig. 6.3 Classification of product architecture design methods in table 6.1 and production methods based on product variety and production volume.

個別製品を対象としている。Zamirowski and Otto<sup>(16)</sup> や Dahmus et al.<sup>(19)</sup> は製品アーキテクチャ設計の対象を製品系列へと拡張し、機能モデリングをベースとして顧客要求・機能・製品仕様を統合的に考慮することで、幅広い顧客要求に対応可能な製品アーキテクチャとプラットフォームを選定する手法を提案し、Borjesson<sup>(20)</sup> はMFDを拡張して展開する製品の仕様も合わせて考慮する製品系列の製品アーキテクチャ設計手法を提案した。また、Yu et al.<sup>(17)</sup> は顧客要求と市場需要の分析に基づき製品アーキテクチャを決定し、ElMaraghy and AlGeddawy<sup>(21)</sup> はマーケットセグメントを考え、各セグメントにおける顧客の要求機能とその仕様を考慮しながら、製品の構成要素を階層的クラスタリングによってモジュールに分割している。

以上の手法のうち、表中のA~IのDSMにより視点の拡張を行う製品アーキテクチャ設計法は、本論文と同様に前項で述べたアーキテクチャ設計の実装レベルの1. モジュール間の境界の決定について主に焦点を当てた手法である。本論文は、1. については表6.1中の項目のうち、顧客要求、機能、構成要素、組立を考慮している。一方、表6.1から分かるようにこれらのDSMにより視点の拡張を行う製品アーキテクチャ設計法の多くが、機能と構成要素のみを対象としており、顧客要求、機能、構成要素、組立の全てを包括する手法は提案されていない。また、表中a~jのDSMを用いない製品アーキテクチャ設計法についても、顧客要求、機能、構成要素、組立の全てを包括したものは存在しない。した

がって、本論文はモジュール間の境界の決定においてその視点を機能、構成要素、組立、具体的には顧客要求間の共起関係・物理機能間の相互関係・実体構造における構成要素間の相互関係・組立工程へと広げた点において新規性を有すると言える。また、表 6.1 に示す各製品アーキテクチャ設計法を製品のバラエティと生産量を軸として分類し、6.2 節で述べた各生産方式との対応関係を示すと図 6.3 のようになり、既存の製品アーキテクチャ設計法はその多くが見込み生産 (MTS) 品を対象とするものであることが分かる。これに対して、第 3 章で構築した設計法は注文仕様生産 (CTO) 品を対象とし、第 4 章で構築した設計法は受注組立生産 (ATO) 品を対象としている。見込み生産品は一般的に広義の受注生産方式と比較して製品の種類数が少ないことから、本論文で構築したアーキテクチャ設計法は、アーキテクチャ設計の適用対象をより多種多様な展開を行う製品へと拡張するものとして位置付けることができる。

表中 a~j の DSM を用いない製品アーキテクチャ設計法の多くは、アーキテクチャ設計の実装レベルの 1. について機能や構成要素のみを視点としてモジュール間の境界を決定している。一方、アーキテクチャ設計の実装レベル 2. 各モジュールの具体の決定とそれを受けた種類数の確定においては、設計パラメータや製品仕様・性能といった製品の具体についても考慮している。したがって、DSM を用いない製品アーキテクチャ設計法は、DSM を用いた手法と比較するとアーキテクチャ設計の実装レベル 2. に重点を置いたものとなっている。DSM により視点の拡張を行う製品アーキテクチャ設計法は、同一の形式で多数の視点を包括してモジュールの境界を決定することが可能である一方で、DSM を用いない製品アーキテクチャ設計法で行われているようなモジュールの種類数・具体的内容の決定については未だ踏み込めていない。したがって、DSM により視点の拡張を行う製品アーキテクチャ設計の今後の展開の大きな方向性として、アーキテクチャ設計の実装レベルのより具体の方向、すなわちモジュールの種類数・具体的内容の決定まで包括して行うことが望まれている。このことから、本研究の今後の展開として、顧客要求や組立工程を考慮したモジュールの種類数・具体的内容の決定方法について考えることは、強く求められるものであると言える。

## 6.5 モジュールの多種展開を前提とする設計法への拡張における課題

ここまでで述べたように、個々のモジュールが多種展開され、それらを組み合わせて製品を展開する場合を前提として、6.3 節で述べたアーキテクチャ設計の実装レベルの両段階を包括する設計法への拡張を本研究の今後の展開として考える。以下では、その拡張について、顧客要求と組立工程を起点にして考え、それぞれにおける具体的な課題について検討する。



### 6.5.1 顧客要求を起点とした拡張における課題

モジュールの種類数・具体的内容の決定について、第5章ではプラットフォーム設計を行う際に、顧客要求への影響を推測しながら共通化する部分を選択し、そのうえで顧客の要求仕様を範囲として与え、その範囲全体に対して製品を提供することを考えて複数種類のプラットフォームを展開するプラットフォーム最適設計法を構築した。一方で、6.3節で述べたように、モジュールの種類数を明確に決定するには至っていない。

モジュールの種類数・具体的内容は、製品の設計開発や生産に要するコストに大きく影響することから、顧客の要求に対して過不足ない種類数・内容のモジュールを提供することが求められる。これについて、Yu et al.<sup>(17)</sup>は顧客へのアンケートデータをもとに、顧客の要求機能について、その性能や仕様に対する需要の分布および需要の時間変化を明らかにし、それをもとに展開するモジュール数やその仕様を決定する手法を提案している。また、ElMaraghy and AlGeddawy<sup>(21)</sup>は製品を投入する各マーケットセグメントについて、顧客が要求する機能とその性能の水準を分析し、各モジュールの種類数と性能水準を決定している。

上述のように、実際の市場における製品需要においては、要求仕様の範囲全体で均等に需要があるのではなく、需要の分布に偏重が存在する。モジュールの多種展開を考える上では、この需要の分布に対して過不足ない展開を行うことが望ましい。一方、上述の手法は、本論文で扱ったカスタマイゼーションを伴う多種展開品については考えられていない。したがって、モジュールの組み換えによるカスタマイゼーションを伴うことを前提として、顧客データから顧客の要求性能値の分布や需要量を分析し、需要のボリュームゾーンでより高い性能が発揮できるようにモジュールの種類数と具体的内容を決定するプラットフォームの最適設計を考えることが求められる。また、顧客データを組み込むことに関しては、近年のデータサイエンス分野の発展を見ると、ビッグデータ分析によって購買データや需要量といった単純なデータのみならず顧客個々人の製品の使用状況や顧客の属性と要求の関連性などの分析、未来の顧客要求の予測などの新しい顧客データを組み込むことも、将来的な展開として考えることができる。

### 6.5.2 組立工程を起点とした拡張における課題

第4章では組立手順の前後関係のみを考え、組立工程の設計と製品アーキテクチャのモジュール化設計を統合する設計法を構築した。組立性設計の理論や例題への適用結果から、構築した手法を適用することで得られる組立工程と、モジュールの構成は、モジュール単位での部分組立を行えるように組立工程の設計とモジュール構成の調整を行うことで組立時間を短縮し、効率的な組立を可能にすることが分かった。一方、本論文ではモジュールの種類数や具体的内容を決定する上で、それらの結果が組立時間にどのように影響するか

については考えてない。

組立性設計においては、組立の効率や難易度には、部品の形状や製品内での部品の種類数が大きく影響するとされており、このため部品の具体の設計改善による組立性向上が重要視されている<sup>(24),(25)</sup>。例えば、部品間のインタフェースが、正確な位置合わせが求められたり取付けの際に工具を要したりするものになっていると、部品同士の組立に多くの時間を要するため設計改善の対象となる。また、製品内で共通する部品が少ないほど組み立ての複雑性が増すため、締結具などは共通化することが望ましいとされている。上述のような部品の形状や種類数の組立性への影響は、モジュール単位でも同様のことが言える。したがって、アーキテクチャ設計において組立性を考慮するにあたっては、モジュールの具体の内容を考える段階まで踏み込む必要がある。具体的には、モジュール間のインタフェースの種類や形状の決定や、組立の際の取り回しのしやすさを考えたモジュールのサイズや形状の決定などを包括的に考えることが求められる。また、設計変更を行う上で、設計生産に要するコストへの影響や製品の性能への影響も考える必要があり、そのためには、本論文の第5章で行った製品の性能評価のみならず、組立性についても定量的な評価を行うことが求められる。この点については、組立性設計でも行われている<sup>(24),(25)</sup>ように、各組立作業に要する時間を概算して評価する必要があると考える。

また多種展開品においては、展開される製品全体の視点で組立性を考えることもさらなる展開として考えられる。製品間での共通化はその共通部分に基づいて展開される製品群すべての組立工程に影響を与えることは自明である。特に多種展開品では、設備投資を抑えながらも小ロット単位での多種多様な製品を生産するために、複数種類の製品を同一ライン上で生産する場合がある。このような混流生産が行われる場合を考えると、製品間で構造が異なる部分が多いほど、組立ライン上に流す製品を変更した際の設備や人員の配置変更時間に時間やコストを要することになる。このため、製品間のモジュール間の境界やそれらのモジュール間のインタフェースの共通化を行うことで組立工程を共通化し、組み立てる製品を変更に伴う設備・人員配置の変更の発生を抑えることが求められる。このような組立工程の共通化を考える場合、組立工程の共通化に伴う構造の共通化の程度が各製品の機能や性能に与える影響を考慮して、組立工程の共通化を行うべき部分を特定し、共通部分の種類数を決定したり、共通部の具体の設計を考えたりする必要がある。

## 6.6 結言

本章では、第3章から第5章で構築したアーキテクチャ設計法が、特定の生産方式により生産される製品種を前提として構築されたものであり、その効果の普遍性については、さらなる検証が必要であることを述べるとともに、幅広い製品種へと汎用可能な多種展開

のための設計法を構成するためには、本論文で構築した設計法をモジュールの種類数と具体的内容の決定までを包括するように拡張する必要があることを述べ、その拡張を行う上での課題について、関連の研究動向を参照しながら論じた。

## 参考文献

- (1) Zaerpour, N., Rabbani, M., Gharehgozli, H. A. and Tavakkoli-Moghaddam, R., Make-to-Order or Make-to-Stock Decision by a Novel Hybrid Approach, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 22, No. 2 (2008), pp. 186–201.
- (2) 中根甚一郎, マスカスタマイゼーションを実現する BTO 生産システム (2000), 日刊工業新聞社.
- (3) Song, X. S. H., J. H. and Liu, B., Order-Fulfillment Performance Measures in an Assemble-to-Order System with Stochastic Leadtimes, *Operation Research*, Vol. 47, No. 1 (1999), pp. 131–149.
- (4) Cheng, F., Ettl, M., Lin, G. and Yao, D. D., Inventory-Service Optimization in Configure-to-Order Systems, *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol. 4, No. 2 (2001), pp. 114–132.
- (5) Pimpler, T. U. and Eppinger, S. D., Integration Analysis of Product Decompositions, in *Proceedings of ASME Conference on Design Theory and Methodology*, Vol. 68 (1994), pp. 343–351.
- (6) Zakarian, A. and Rushton, G. J., Development of Modular Electrical Systems, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 6, No. 4 (2001), pp. 507–520.
- (7) Braun, T. and Deubzer, F., New Variant Management Using Multiple-Domain Mapping, in *Proceedings of the 9th International Design Structure Matrix Conference* (2007), pp. 363–372.
- (8) Alizon, F., Moon, S. K., Shooter, S. B. and Simpson, T. W., Three Dimensional Design Structure Matrix with Cross-Module and Cross-Interface Analysis, in *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers* (2007), pp. 941–948, Paper No. DETC2007-34510.
- (9) Gorbea, C., Spielmannleitner, T. and Lindemann, E., U. and Fricke, Analysis of Hybrid Vehicle Architectures Using Multiple Domain Matrices, in *Proceedings of 10th International Design Structure Matrix Conference* (2008), pp. 387–375.

- (10) Deubzer, F. and Lindemann, U., Product Architecture Definition and Analysis Using Matrix-Based Multiple-Domain Approaches, in *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (2009)*, pp. 1197–1205.
- (11) Helmer, R., Yassine, A. and Meier, C., Systematic Module and Interface Definition Using Component Design Structure Matrix, *Journal of Engineering Design*, Vol. 21, No. 6 (2010), pp. 647–675.
- (12) Bonjour, E., Samuel, D. and Micaëlli, J., A Method for Jointly Drawing Up the Functional and Design Architectures of Complex Systems during the Preliminary System-Definition Phase, *Journal of Engineering Design*, Vol. 24, No. 4 (2013), pp. 305–319.
- (13) AlGeddawy, T., Samy, S. N. and ElMaraghy, H., Best Design Granularity to Balance Assembly Complexity and Product Modularity, *Journal of Engineering Design*, Vol. 28, No. 7-9 (2017), pp. 457–479.
- (14) Ulrich, K. and Eppinger, S. D., *Product Design and Development*, sixth edition (2016), McGraw Hil.
- (15) Erixon, G., *Modular Function Deployment –A Method for Product Modularisation*, Doctoral thesis, The Royal Institute of Technology (1998).
- (16) Zamirowski, E. J. and Otto, K. N., Identifying Product Family Architecture Modularity Using Function and Variety Heuristics, in *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences*, Vol. 4 (1999), pp. 1–12, Paper No. DETC99/DTM-8760.
- (17) Yu, J. S., Gonzalez-Zugasti, J. P. and Otto, K. N., Product Architecture Definition Based upon Customer Demands, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 121, No. 3 (1999), pp. 329–335.
- (18) Stone, R. B., Wood, K. L. and Crawford, R. H., A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures, *Research Policy*, Vol. 21, No. 1 (2000), pp. 5–31.
- (19) Dahmus, J. B., Gonzalez-Zugasti, J. P. and Otto, K. N., Modular Product Architectur, *Design Studies*, Vol. 22, No. 5 (2001), pp. 409–424.
- (20) Borjesson, F. S., Improved Output in Modular Function Deployment Using Heuristics, in *Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design*, Vol. 4 (2009), pp. 1–12.
- (21) ElMaraghy, H. and AlGeddawy, T., New Dependency Model and Biological Analogy for Integrating Product Design for Variety with Market Requirements, *Journal of Engineering Design*, Vol. 23, No. 10-11 (2012), pp. 722–745.

- (22) Lin, M. C., Lin, C. C., Tai, Y. Y., Chen, M. S. and Tseng, C. C., A Modularized Contact-Rule Reasoning Approach to the Assembly Sequence Generation for Product Design, *Concurrent Engineering*, Vol. 20, No. 3 (2012), pp. 203–221.
- (23) Li, Y., Wang, Z., Zhang, L., Chu, X. and Xue, D., Function Module Partition for Complex Products and Systems Based on Weighted and Directed Complex Networks, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 139, No. 2 (2017), pp. 021101–021101–13.
- (24) Boothroyd, G., Dewhurst, P. and Knight, W. A., *Product Design for Manufacture and Assembly –Second Edition Revised and Expanded –* (2001), CRC Press.
- (25) Whitney, D. E., *Mechanical Assemblies –Their Design, Manufacture, and Role in Product Development* (2004), Oxford University Press.

## 第7章

### 結論

本論文では、顧客要求の多様化や製品の構造・生産プロセスの複雑化の動向を受け、より広範な視野で製品の多種展開を行うための包括的な設計法を提案することを目的として、製品の物理機能と実体構造のそれぞれを構成する要素間の概念的な対応関係を意味するアーキテクチャの概念を顧客要求、組立工程、プラットフォーム設計のそれぞれに向けての拡張することを考え、拡張の各方向性に対する設計法を構築するとともに、具体の例題への適用を通じてその有効性を示した。以下に、各章で得られた成果を総括する。

第1章では、製品の多種展開を取り巻く状況を整理するとともに、本研究が考えるアーキテクチャの概念を示し、本研究の目的を述べた。

第2章では、過去から現在に至るまでの顧客要求の多様化と製品構造・生産プロセスの複雑化の動向について調査し、本論文で取り組む多種展開の設計において考えるべき多種展開を実現する上での課題と製品アーキテクチャの関係について明らかにし、多種展開のもとでの製品アーキテクチャのモジュール化の必要性とその意義について述べた。さらに、DSMとDMMにより異なる視点を包括した設計法を示し、それらに基づくアーキテクチャ設計の顧客要求、組立工程、プラットフォーム設計への拡張の可能性と、その課題を明らかにした。

第3章では、アーキテクチャ設計を顧客要求へと拡張するために、その前提となる製品アーキテクチャ設計において考慮すべき顧客要求間の関係性を、顧客要求間の共起関係と定めるとともに、共起関係に基づき顧客要求の構造化を行うために、受注仕様表を対象として相関ルール分析により顧客要求間の共起関係を分析する手法を構築した。さらに、その共起関係を物理機能・実体構造の相互関係とともに記述したMDMを構成し、顧客要求を考慮したMDMのクラスタリング手法を構築した。あわせて、カスタマイゼーションを伴う製品において、顧客が望む製品を得るために、受注時の顧客要求の聞き取り手順が重要な要因であるという考えのもと、聞き取りの手戻りが少ない受注プロセス設計を行うために、顧客要求DSMに記述されている顧客要求間の共起関係に基づく顧客要求DSMの

パーティショニング手法を構築した。さらに、産業用三軸直交ロボットの例題を取り上げて構築した手法を適用し、その有効性を示した。

第4章では、アーキテクチャ設計を組立工程へと拡張するために、製品の組立工程の依存関係を DSM と組立工程 DSM と顧客要求-物理機能-実体構造 MDM を結ぶ実体構造-組立工程 DMM の記述法を構築し、実体構造におけるモジュール構成との整合性を考慮した組立工程を設計するための組立工程 MDM のパーティショニング手法を構築した。さらに、家庭用エアコンの例題に構築した手法を適用し、その妥当性と有効性を示した。

第5章では、製品群展開の基盤となるプラットフォームの設計について取り上げた。そのプラットフォーム最適設計手法を構築するにあたっては、製品の詳細が未定な設計の上流段階で性能への影響を把握するための簡易モデルの構築について検討を行い、先行研究の手法を拡張して個別製品の設計問題が多目的最適化問題として定式化される場合のプラットフォームの設計問題の数理モデルを構築するとともに、問題を解くための最適化計算法を構築した。さらに、産業用三軸直交ロボットについて、簡易モデルによる最適設計問題を構成し、プラットフォーム設計問題における各種のトレードオフ関係を明示化できることを示した。

第6章では、第3章から第5章で構築したアーキテクチャ設計法が、特定の生産方式により生産される製品種を前提として構築されたものであることを系統的に整理して論じ、その効果の普遍性については、さらなる検証が必要であることを述べた。その上で、幅広い製品種へと汎用可能な多種展開のための設計法を構成するためには、本論文で構築した設計法をモジュールの種類数と具体的内容の決定までを包括するように拡張する必要があることを述べ、その拡張を行う上での課題について、関連の研究動向を参照しながら論じた。

以上のように、本論文は製品の多種展開に関して、DSM に基づくアーキテクチャ設計法を起点として、アーキテクチャ概念を顧客要求・組立工程・プラットフォーム設計へと拡張することによる3つの具体的な設計法を提案するとともに、汎用的な多種展開のための設計法への拡張に向けた課題を論じた。本論文は、アーキテクチャ概念を拡張することにより、製品設計において基本アーキテクチャ設計より上流や下流に位置する段階で考慮していた要因までも統合的に考慮した製品アーキテクチャの設計を可能にするものであり、製品の多種展開のための包括的な設計法の確立に向けた基本的な考え方として位置付けられるものである。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始御懇切な御指導および御助言を賜りました、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 藤田喜久雄教授に、心より深く感謝の意を表します。研究の歩みの遅い私がここまで研究を続け、本論文をまとめることができたのも、先生が辛抱強くお付き合い下さったからに他なりません。今後の人生においても、先生に教えて頂いたことを糧に精進してまいります。

本論文を作成するにあたり、御懇切な御校閲と御助言をいただきました、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 小林英樹教授、榎本俊之教授、野間口大准教授に深く感謝いたします。あわせて、野間口大准教授には、日頃より研究の細部に関して多角的にご議論いただきましたことに感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、随所において有益な御意見をいただきました大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 山崎慎太郎准教授、矢地謙太郎助教に深く感謝いたします。

本論文で取り上げた産業用三軸直交ロボットと家庭用エアコンの例題は、匿名の企業から御提供賜りました。両企業および関係各位には、本研究への御協力および御支援をいただきましたことに深く感謝申し上げます。

大阪大学工学部応用理工学科機械工学科目での卒業論文研究への取り組みとして、本研究に参画いただきました馬場崇斗氏、丸山人嗣氏、小林正秀氏、ならびに、研究を進める上でのディスカッションに度々加わり、有益な御意見を提示いただきました大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程 戸井誠人氏に感謝いたします。

また、研究のみならず研究室生活における様々な事柄において御協力、御助言をいただきました機械工学専攻統合デザイン工学講座設計工学領域（藤田・山崎・野間口研究室）の各位に感謝いたします。皆様のお陰で長きにわたる研究室生活を楽しく過ごすことができました。

大阪大学博士課程教育リーディングプログラムの1つである超域イノベーション博士課程プログラムの3期生各位には、専門分野は異なるものの志を同じくする者として、大きな刺激を受け、研究のモチベーションを維持することができました。深く感謝いたします。皆様との縁、ともに過ごした時間は、何物にも代えがたいかけがえのないものです。



本研究の一部は、大阪大学博士課程教育リーディングプログラム独創的教育研究活動経費および日本学術振興会特別研究員奨励費（研究課題番号 JP17J01571）の助成を受けて行われました。

最後になりましたが、私を温かく見守り、そして挫けそうときには励ましの言葉をかけ、これまでの研究生生活を支えてくれた母に、深く深く感謝いたします。

## 研究論文・発表リスト

### 学術誌掲載論文

- (1) Sawai, K., Nomaguchi, Y., Fujita, K., Fundamental Framework toward Optimal Design of Product Platform for Industrial Three-Axis Linear-Type Robots, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 2, No. 3 (2015), pp. 157–164.
- (2) Sawai, K., Nomaguchi, Y., Fujita, K., Case Study of Extended Product Architecture Design for Modularization Reflecting Customer Needs of Industrial Robots, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 11, No. 4 (2017), p. JAMDSM0050.
- (3) 澤井伽奈, 野間口大, 藤田喜久雄, 受発注適正化のためのマルチドメインマトリクス分析による注文仕様生産製品のアーキテクチャ設計法, *日本機械学会論文集*, Vol. 85, No. 870 (2019), p. 18–00301.

### 国際会議論文

- (1)' Sawai, K., Nomaguchi, Y., Fujita, K., Fundamental Framework toward Optimal Design of Product Platform for Industrial Three-Axis Linear-Type Robots, in *Proceedings of the Asian Conference on Design and Digital Engineering 2014 (ACDDE2014)* (2014), Paper No. P000018 [改訂版が学術誌に (1) として掲載されている] .
- (4) Sawai, K., Nomaguchi, Y., Fujita, K., Extended Product Architecture Design of Industrial Robots for Integrating Customer Needs, Physical Functions and Entity Structure, in *Proceedings of the Asian Conference on Design and Digital Engineering 2016 (ACDDE2016)* (2016), Paper No. 160071.

### 国内会議論文

- (5) 澤井伽奈, 野間口大, 藤田喜久雄, 産業用三軸直交ロボットのためのプラットフォームの最適設計に関する研究 (低次元モデルの導入と多目的最適化による統合化設計の基本構想), *日本機械学会第 24 回設計工学・システム部門講演会講演論文集* (2014), Paper No. 1201.

- (6) 澤井伽奈, 野間口大, 藤田喜久雄, 製品系列設計における顧客ニーズ・物理機能・実体構造の相互関係とそれらを包括する設計手法の課題, 日本機械学会第25回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2015), Paper No. 2207.
- (7) 澤井伽奈, 野間口大, 藤田喜久雄, 顧客ニーズ・物理機能・実体構造の連鎖型デザイン・ストラクチャー・マトリクスによるモジュール化設計法, 日本機械学会第26回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2016), Paper No. 2209.
- (8) 澤井伽奈, 馬場崇斗, 野間口大, 藤田喜久雄, 産業用機器における顧客ニーズ・物理機能・実体構造の相互関係の明確化とモジュール化設計, Design シンポジウム 2016 講演論文集 (2016), Paper No. 2202.
- (9) 澤井伽奈, 野間口大, 藤田喜久雄, 相関ルール分析による顧客ニーズの構造化に基づく産業用ロボットのアーキテクチャデザイン, 日本機械学会第27回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2017), Paper No. 2211.
- (10) 澤井伽奈, 野間口大, 藤田喜久雄, DSMに基づく製品アーキテクチャ設計方法論の製品種別や生産方式への依存性, 日本機械学会第28回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2018), Paper No. 1107.
- (11) 澤井伽奈, 顧客価値を最大化する製品アーキテクチャ最適設計の取り組み, 日本機械学会 2018 年度年次大会講演論文集 (2018), Paper No. F121002.