



製品システム設計におけるシステムの構造分析と マネジメント

青山 和浩^{*1}・大泉 和也^{*1}・古賀 毅^{*2}

Design Management with Structural Analysis of the Product Systems

Kazuhiro AOYAMA^{*1}, Kazuya OIZUMI^{*1}, and Tsuyoshi KOGA^{*2}

Abstract— As complexity of products increased, management of development project becomes difficult. For better management of product development projects, this paper proposes an integrated model of product, process and organization. The proposed model can be described as MDM (Multiple Domain Matrix). Computational methods to utilize acquired model is discussed in three illustrative examples; design process structuring, organization design and product family structuring. The proposed methods extend techniques on DSM (Design Structure Matrix) and DMM (Domain Mapping Matrix) to deliberate candidate structures of design process, organization and product family. Applied examples show that the proposed project model, which incorporates product, process and organization, provides project managers with arena to discuss various aspects of projects.

Keywords— product model, design process model, organizational structure model, process management, organization management, multiple domain matrix

1. はじめに

現代社会において急速に展開するグローバル化は、製品のユーザ要求の多様化をもたらしている。製造業は、このような市場の変化に適切に対応する必要がある。モノづくりの戦略を検討し、その戦略を実現する方法を探り、戦略を実践するマネジメントの強化が重要となっている。

例えば、疲弊する価格競争を避け、高付加価値製品や特色のある製品の開発を目指す場合がある。この場合、挑戦的な製品開発を効果的に実行できる設計開発のマネジメントが課題となる。また、新興国や発展途上国のマーケットに対しても製品を新たに投入するために、現地向けの専用製品を設計開発する場合がある。この場合、様々なマーケットが要望する種々の品質を満たす多様な製品を効率的に開発するためのマネジメントが必要である。さらには、生産を海外移転してコストを削減するだ

けでなく、研究開発や設計までも新興国へ移転する場合もある。開発拠点の海外移転では、早急に現地において確固とした開発体制を立ち上げることが重要であり、日本国内で培ってきた設計ノウハウを、現地で有効活用できる方策の策定や、設計者のマネジメントが課題となる。

以上から理解できるように、現在のモノづくりは多様となり、複雑なシステムへと進行しており、製品開発のやり方、マネジメントの仕方を転換・発展させていく必要がある。本稿では、製品開発を展開する組織と製品をシステムとして捉え、モノづくりの複雑化に対応するために、システムの複雑化に対するマネジメント手法について考えることとする。

2. モノづくりにおけるシステムデザイン

2.1 モノづくりにおける複雑性のマネジメント

先述したように、経済的な発展やモノの充足、技術の高度化が製品開発を複雑化している。グローバル化によって市場の複雑性が増加し、市場の複雑化は複雑な製品構成を要望する。さらに、複雑な製品構成は設計開発、製造のプロセスを複雑化し、それに対応すべき組織が複雑になる [1]。この様に、市場の複雑性、製品の複雑性、

*1 東京大学大学院工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

*2 山口大学大学院理工学研究科 山口県宇部市常盤台 2-16-1

*1 The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

*2 Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi

Received: 27 January 2016, Revised: 12 February 2016, Accepted: 15 February 2016.

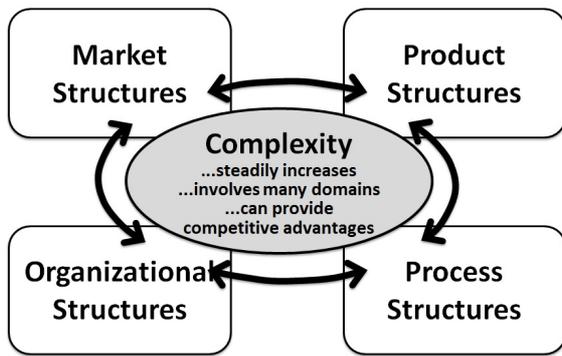


Fig. 1: Interrelated Complexities among Multiple Domains in Product Design ([1]を改変)

プロセスの複雑性、組織の複雑性は互いに影響を及ぼし合い (Fig. 1)、個々の複雑性だけでなく、全体の複雑性の適切な管理が要望される。Lindemann らが提唱するように、対象 (システム) の構造を理解することで、対象の複雑性の管理 (Complexity Management) を容易とすることが期待される [2]。そこで、本稿は、強いモノづくりを実現することを目的に、モノづくりの複雑性をマネジメントするために、モノづくりのシステムの構造を理解して利用する方法を議論する。

2.2 製品システムの複雑化とプロセス、組織の複雑化

市場のニーズに合わせて多くの製品が高度化し、機械系、電気系、および制御系が複雑に絡むような製品システムになると、その設計プロセスは複雑になり、設計開発のマネジメントは困難になる。例えば、製品の部分的な変更に対する設計対応は深刻である。設計変更の影響を十分に把握できない状況で市場に製品が投入されてしまうとリコールが発生するリスクが高まってしまう。日本の製造業では、熟練設計者の高度な能力と経験によって、設計を担当する箇所と影響関係のある部位を担当する技術者と連携を図りながら、現場レベルで摺り合わせによって対応してきた。しかしながら、設計開発のグローバル化やローライゼーションが進展することによって、設計開発の進め方、組織の能力の活かし方を見直す必要性が出ている。

さらに、市場の競争力を高めるために、開発期間を短縮する検討がなされたり、一部の開発プロセスのアウトソーシングなどが試みられたりする。このような戦略に応じて、設計開発プロセスにも常に変革が要望され、それを実現する組織の改革も議論される。近代日本の製造業の競争優位は、高度な組織の能力による部分が大きいと認識される。現組織の競争優位性を上手く活かしながら、将来に必要な能力の醸成へ向けた組織変革を実行することは重要な課題である。そのためにも、製品、プロ

セス、組織を一体として考えたモノづくりのシステムにおける複雑性の理解とマネジメントが要望される。

2.3 製品・プロセス・組織情報の連携に対する要請

現在の先進的なモノづくり環境においては、購買や生産、販売、アフターケアなども含めた業務プロセス情報と製品の設計関連の情報を連携させた情報システムや、会社の経営資源を統合管理し、資源配分の計画システムなどが精力的に利用されている。これらのシステムによるマネジメントをさらに発展させ、製品、プロセス、組織、その他マーケット情報や会計情報などを関連付けてマネジメントすることが強く求められるようになっており、それを実現できる状況にあるとも認識できる。

著者らは、製品、設計開発プロセス、設計組織の情報を活用し、製品の設計開発に関わるマネジメント全般を高度化する手法の構築を目的に研究を進めている。本稿では、製品を開発・設計するにあたって、そのプロセスの構成、及び組織の編成によって開発プロセスのマネジメントをしやすくし、設計品質を高めることを目的とした下記の三つの話題を提供する。

- 製品構造の分析に基づく製品開発プロセスの導出と設計問題の試行錯誤的設定支援 [3]
- 製品構造と組織構造の対応関係の分析に基づく組織編成 [4]
- 製品設計プロセスと設計組織の対応に基づく製品ファミリの設計支援 [5]

3. システムの構造分析法と記述表現

システムの複雑性をマネジメントするために、システム自体を記述表現し、その構造を理解した上で複雑性を定量的に把握するアプローチがある。近年、SysML (System Modeling Language) がシステムの記述言語として注目を集めているが、本研究では、システムの定義となる要素と要素間の関係を記述表現するネットワーク／マトリクスに着目し、システムの構造を理解することを試みる。これにより、システムの複雑性を議論し、システムをマネジメントする手法を提案する。

3.1 システムの表現と構造分析に関する手法

本研究で着目するシステムの表現であるネットワーク／マトリクスに関連する手法について整理する。システムでの複合領域の要素間の関係を対象に、その構造を分析する手法として Multiple Domain Matrix (MDM) がある [6]。Fig. 2 に示すように、MDM はシステムに対して異なった領域 (ドメイン) の情報間の関係性を表現し、システムを分析する手法である。MDM は、異なる領域の要

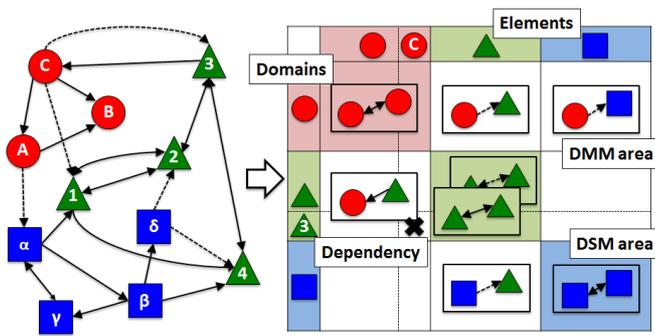


Fig. 2: Composition of MDM ([1] を改変)

素間の関係を記述する Domain Mapping Matrix (DMM) [7] と、同一領域内の要素間の関係を記述する Design Structure Matrix (DSM) [8] から構成される。MDM と同様に、複数の領域間の関係性の記述方法で、エンジニアリングに特化した Engineering Systems Multiple Domain Matrix がある [9]。

MDM を利用して製品、設計開発プロセス、設計組織を記述して、マネジメントを支援する試みが存在する。例えば Eckert や Clarkson は、製品の部分的な変更が他の部分に影響を与え、変更が伝播する問題を DSM の利用によって予測する方法を提案した [10][11]。また、Lindemann は、MDM を複雑システムに対する構造的側面からの理解を与えるツールとして捉え、その広範にわたる適応の可能性を示している [1]。また、製品の複雑性を扱う方策として、適切なシステム分解も議論されている。Eppinger は DSM の分析からシステム分解を示唆する手法を提案し [12]、Alison はシステム設計の分解 (partitioning) と調整 (coordination) の最適化手法を提案している [13]。

3.2 製品システムの記述表現

本研究は、製品、設計開発プロセス、設計組織に横断的に跨る複合領域問題のマネジメントを対象とする。この中で、製品情報は成果物であり、マネジメントの観点では処理の対象として中核となる情報である。そこで、扱うべき製品情報を整理し、Fig. 3 が示すように情報間の関係を表現し、MDM の方式で表現する。

3.2.1 製品の機能と構成要素

製品は様々な機能を持ち、様々な製品要素 (部品など) から構成される。そこで、製品を構成する製品情報として機能と構成要素を定義する。

1) 機能：設計者が製品に実現させたい「働き」を記述する。例えば、自動車の「走る」という働きは、設計の結果として実現させたい「機能」である。機能間には機能構造による関係と階層関係が存在する。

2) 構成要素：構成部位とは製品を構成する物理的実体を意味する。構成要素は設計変数、機能尺度を持つ。構成要素は、製品を構成する物理的な要素であり、要素間には意味的な階層関係と物理的な接続関係が存在する。

3.2.2 属性情報と制約

製品の在り様を具体的に確定するために、製品機能、構成要素の情報を記述、定義するための情報として属性情報を定義する。例えば、自動車の「走る」という機能の属性情報は「最高速度」である。属性情報として、次の様に三種類を整理する。

1) 機能尺度：製品機能を評価するための観測可能な尺度である属性情報である。設計者は要求性能を直接的に決定できず、設計変数の決定を通して要求性能である機能尺度を作りこむ。設計変数は機能尺度に影響を及ぼすといった関係が存在する。この影響関係には感度、特性、操作リスク、操作方針の四種類の情報を付随させることができる。

2) 設計変数：製品を定義する属性情報であり、設計者が直接的に決定できる。機能尺度に対して影響関係を持ちながら、いずれかの構成要素に属する。同一の機能尺度に対して影響関係を持つ設計変数間には調整関係および設計変更の優先関係が与えられる。

3) 制約関係：複数の属性情報間に存在する関係を情報として見做したものである。例えば、ネジをネジ穴に固定するためには「ネジ規格」「ネジ穴半径」「ネジ穴深さ」の三つの属性情報を調節する必要がある。この時、これらの属性情報間には制約関係が存在すると考える。

3.3 MDM によるシステムの記述表現、構造分析の狙い

製品設計の上流段階では、詳細な情報を生成、確定するプロセスや、それを実行する組織の構成を検討し、基本的な方針を決めることが要求される。この際に利用できる情報は、蓄積された過去の経験や、定性的とも言える概略的、抽象的な情報が主であり、具体的で詳細な情報、特に情報間の詳細な関係は明確に定義されていないという特徴が存在する。

このような状況において、抽象度の高い「関係性」に着目し、複合的なシステムの構造を分析する MDM は、設計プロセスの構成や設計組織の編成に示唆を与え、意思決定を支援することが期待できる。また逆に、MDM が要求する程度の詳細さにモデルを留めることで、早い段階での問題定義、分析、解決に必要な情報の収集を活性化し、様々な意思決定に活用することが期待できる。

また、既存の製品、組織をベースに戦略を検討する状況が多い中では、対象の特徴を捉え、抽象的な情報表現、分析を進めることは、複雑な問題を俯瞰する視点を与えることが期待される。

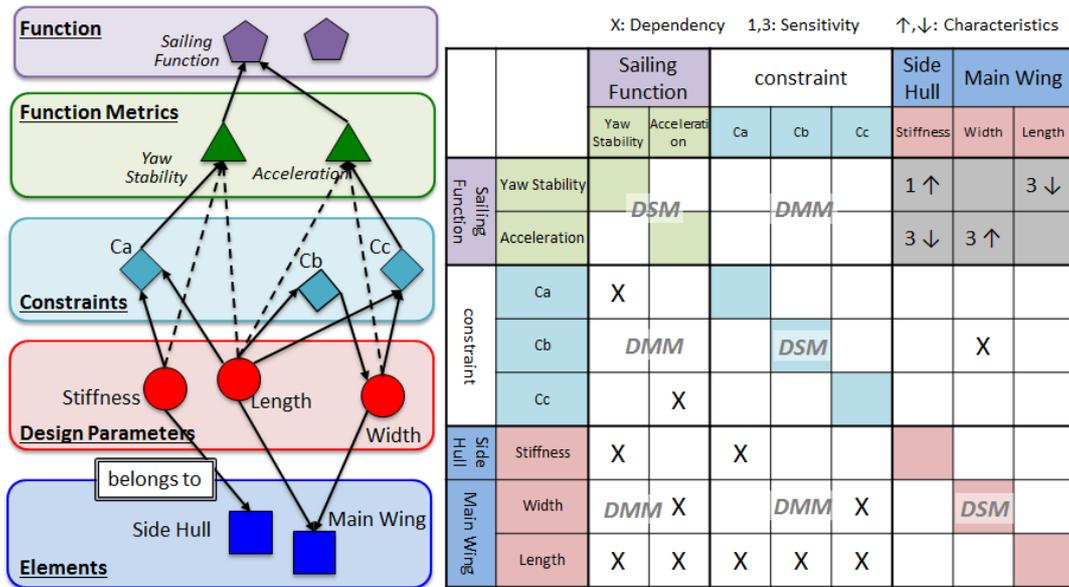


Fig. 3: Network and MDM of Product Information

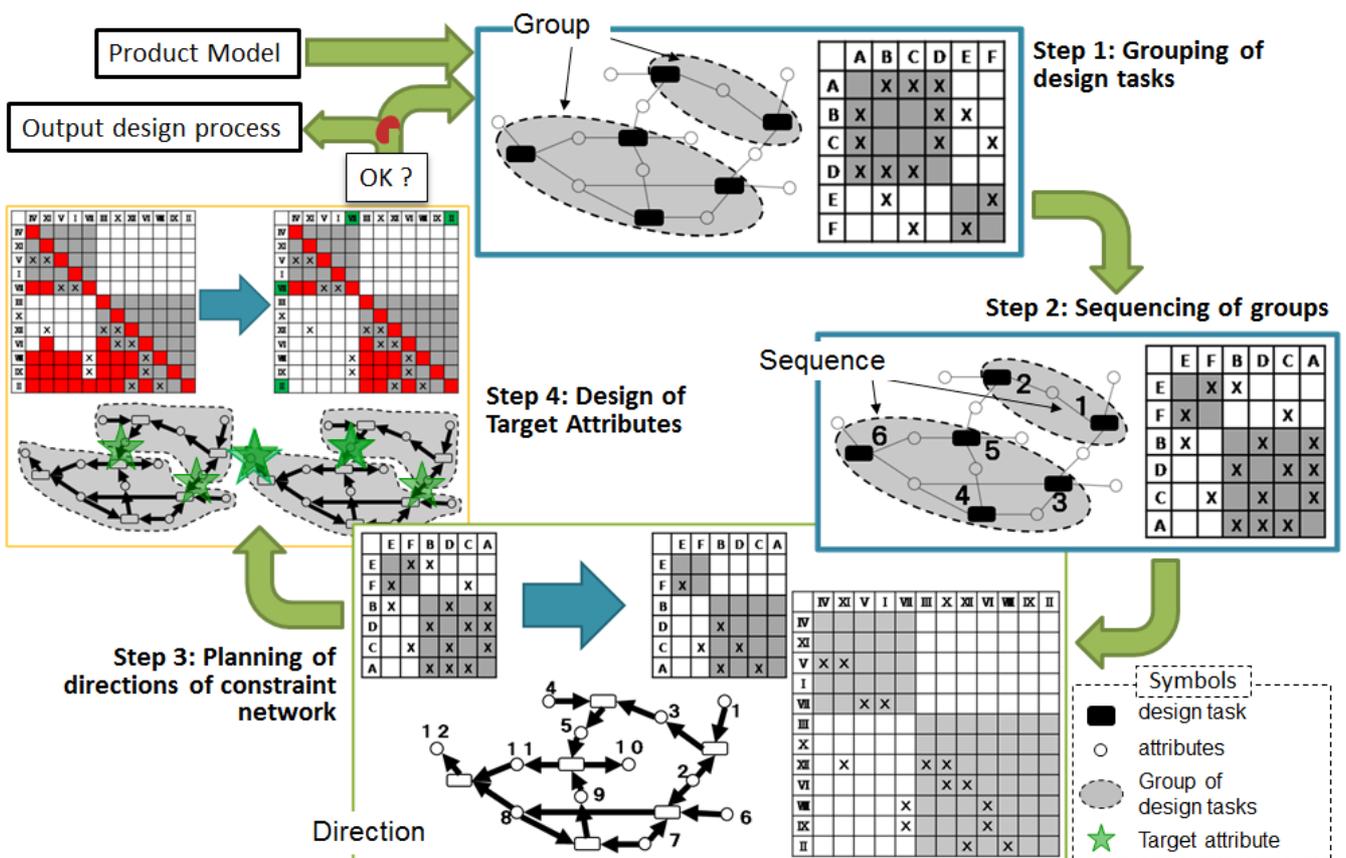


Fig. 4: Design Process Planning Method Based on Determination of Sequences

4. 設計プロセスの抽出とマネジメント

多様な製品のニーズが発生する中、限られたリソースの環境下で迅速に設計を進める必要がある。設計を進める上で問題となることとして設計の手戻りが挙げられ、手戻りが生じないような設計手順を求めることは重要な課題である。本章では、設計の成果物である製品情報の構造的な分析によって、効率的な設計プロセスを導出する手法について議論、提案する [3][14]。

4.1 設計プロセスの抽出における課題

現況の設計プロセスを分析し、設計タスク間の順序関係を与え、設計の手戻りを生じなせない最適な設計プロセスを探索する手法として DSM がある。しかしながら現実の設計では、設計タスク間の順序関係は状況に応じた関係であり、設計者の知識や経験に基づいて判断される場合が多い。最適な設計プロセスを算出するためには結果としての設計タスクを前提とするのではなく、設計タスクの前提となる情報を考慮する必要がある。そこで、設計タスクの成果物である製品情報を分析し、製品の属性情報や制約関係の情報から包括的な設計プロセスを探索支援する手法を提案する。

4.2 製品情報の記述と設計プロセスの抽出

本研究では、設計者により製品の構成要素、属性情報と制約関係の情報が製品情報として記述されている状況を想定する。ここで、各制約関係が、どの属性情報を入力、出力とするかは定義されていないとする。設計者は、複雑さの原因となる制約関係の処理順序を検討した後に、影響方向や設計プロセスを考えることで効率的な設計プロセスを導くという仮説を定め、Fig. 4 に示すような設計プロセスを導出する支援方法を構築する。

1) 制約関係のグループ化と処理順序の仮定：設計行為の最小要素は、「設計変数といった製品の属性情報を決定すること」と考えることができる。この決定には制約関係が関係する。この制約関係のグループを生成し、設計プロセスを構成する設計タスクのベースとする (Fig. 4 Step 1)。グループ内部の設計と、グループ間の協調に分割して設計プロセスを検討する (Fig. 4 Step 2)。

2) 制約関係に対する属性情報の入出力関係を仮定することによる設計プロセスの探索：設計変数を製品の機能尺度との関係や構成要素との関係にしたがってグループ化する。このグループ間の相互依存関係という視点から見直すことで、より良い設計変数の構造化を試みる。本研究では、設計変数のグループ同士の依存関係を表現したマトリクスを用いて、構造化手法 (ISM 法: Interpretive Structural Modeling method) を用いることで、二次的な依存関係を低減できるような目標設定を行った。さらに、制約関係に対する属性情報の入出力関係に対して、探索

的に順序を与えることで、手戻りを最小化するような設計変数のグループ間の依存関係を決定する (Fig. 4 Step 3)。

3) 設計プロセスの導出段階におけるグループの妥当性の評価・検証：設計変数のグループ間への分割と、目標の割付、およびサブ問題間の依存関係の調整を繰り返すことで、問題全体を構造化する。Fig. 4 Step 4 に、得られる構造化された問題を示す。多くの依存関係が存在し、フラットな構造だった状態から、目標を持った各サブ問題の連携という形で、問題が構造化されていることが確認できる。

4) 設計プロセス (ワークフロー) の抽出：クラスタリングによって得られた制約関係の塊は、それ自体が設計タスクであると認識することもできる。この制約関係の塊は、属性情報の依存関係の情報も有している。そこで、依存関係を表したマトリクスから、設計タスクと、設計タスクの実行順序の情報を取り出し、ワークフローを抽出する。

4.3 システム LSI の設計における設計プロセスの抽出

システム LSI の概念レベルの設計問題に対して、設計プロセスの導出方法の検証を行った。製品情報として、構成要素が 30 個、属性情報は 170 個、制約関係が 100 個存在し、属性情報と制約関係との間のリンクが 379 本と定義されるシステム LSI を対象とした。

Fig. 5 (A) は、システム LSI の設計における制約関係 (技術課題間の依存関係) を、DSM を用いて構造化したものである。制約関係は、パラメータ間の数式ベース、あるいは実データベースの関係を表す。この一つの制約を、最小の設計タスクとして認識すると、Fig. 5 (A) はタスク・ベース DSM と理解でき、設計プロセスを計画できることになる。

Fig. 5 (A) が示す設計タスクの相互作用を表現した DSM を、MDM として定義された機能、構成要素、設計変数などの領域を参照し、クラスタリングして Fig. 5 (B) を生成する。この結果、機能と構造を考慮した、階層的なクラスターが生成される。機能的な関係性を重視するか、構造上の関係性を重視するかは、設計の問題の性質に依存するところがある。このため、計算機システムとしては、まず候補を挙げ、設計者がそれら候補を確認しながら選択し、確定する、という対話的な方法を採用している。Fig. 5 (B) は、クラスタリングの一つの結果を表している。特に、制約は基本的に双方向の依存関係によってお互いに繋がりが合っているため、このような機能的・物理的クラスタリングは、設計プロセスを導出するうえで、有益な情報をもたらす。

Fig. 5 (C) は、170 個の設計パラメータをクラスタリングし、設計方向 (計算の方向など) を選択し、順序計算

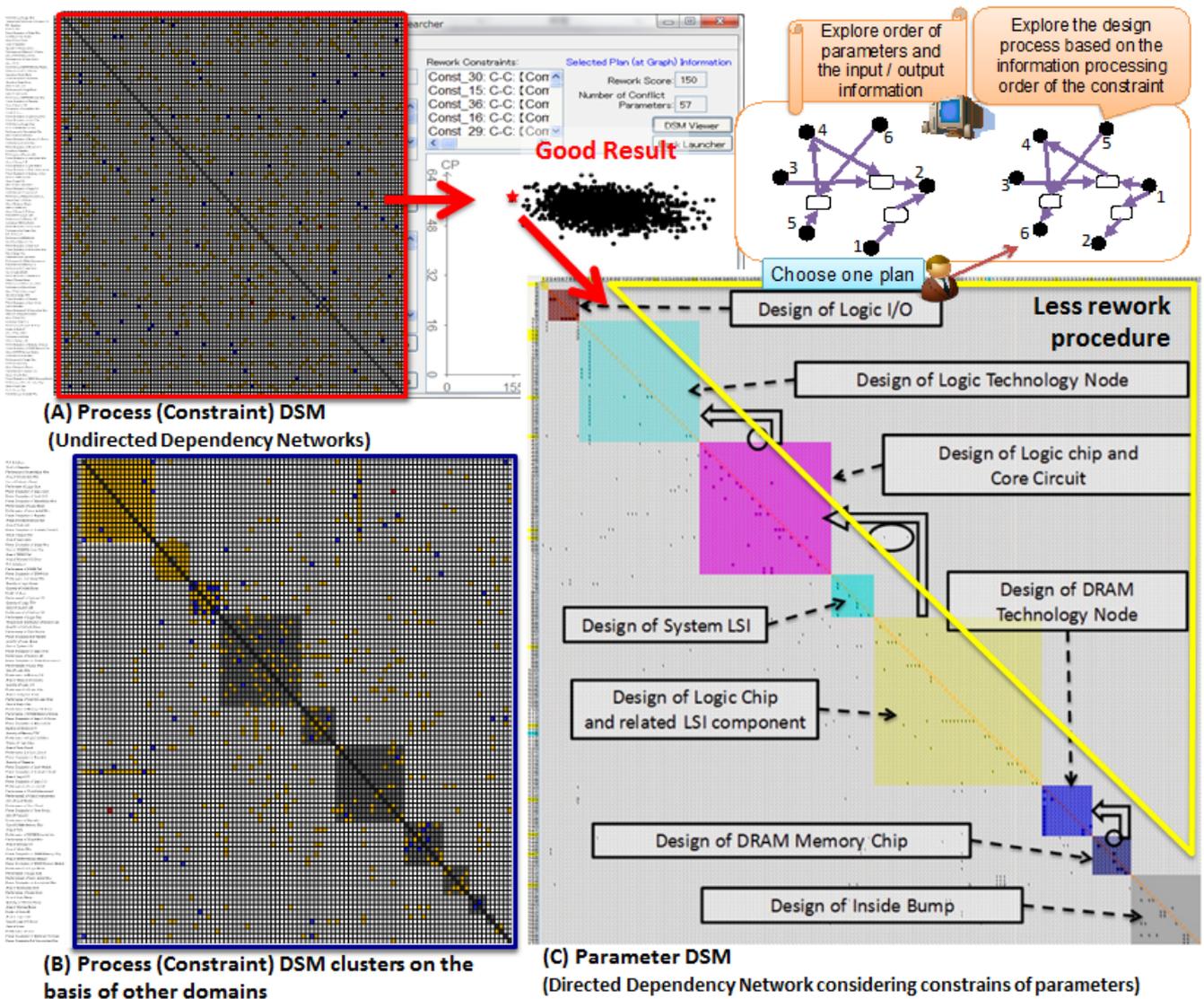


Fig. 5: Generating Design Process through Structural Analysis

を適用した結果生成した、MDMにおけるパラメータ・ベース DSM を表している。Fig.5 (C) は、プロセスを算出するための順序計算を二回実行している。一回目はクラスターの順序計算、二回目はクラスター内部の順序計算である。Fig.5 (C) は、システム LSI の全体的な設計プロセスを示唆しており、図上部に示す解空間のパレート上における Good Result の選択によって作成された設計順序を示している。システム LSI の設計プロセス構造化の結果、下記の知見が導出され、示唆された [15]。

- 1) DRAM の設計の前に、Logic Chip の設計を終了させるべきである。
- 2) テクノロジノード (トランジスタ間隔) は DRAM や Logic Chip の設計より先に設計すべきである。
- 3) インサイド・バンプ (Logic Chip と DRAM Chip のインタフェース) は最後に設計すべきである。

4.4 設計における問題設定

最近の製品設計は、製品に対する要求や適用可能な技術が多様化した結果として、「何を作れば良いのか」という問題設定自体が不明確となりつつある。例えば、システム LSI では、製造プロセスルールの微細化や処理能力の向上が主要な設計問題であったが、二次元的に実装する SoC (System-On-a-Chip) と、三次元的に実装する SiP (System-In-Package) のどちらのアーキテクチャが良いかという問題が存在する。このような問題は、何を重視すべきか、何を境界条件とし、何を前提とすべきかなど、目標や意思決定の根拠を設定することを含む設計問題であり、容易には解を導出できない。このような問題に対処するためには、「良い問題設定」を課題として考えるべきであり、問題設定自体を効率的に検討できる環境が必要であると考えられる。そこで、設計プロセスの導出

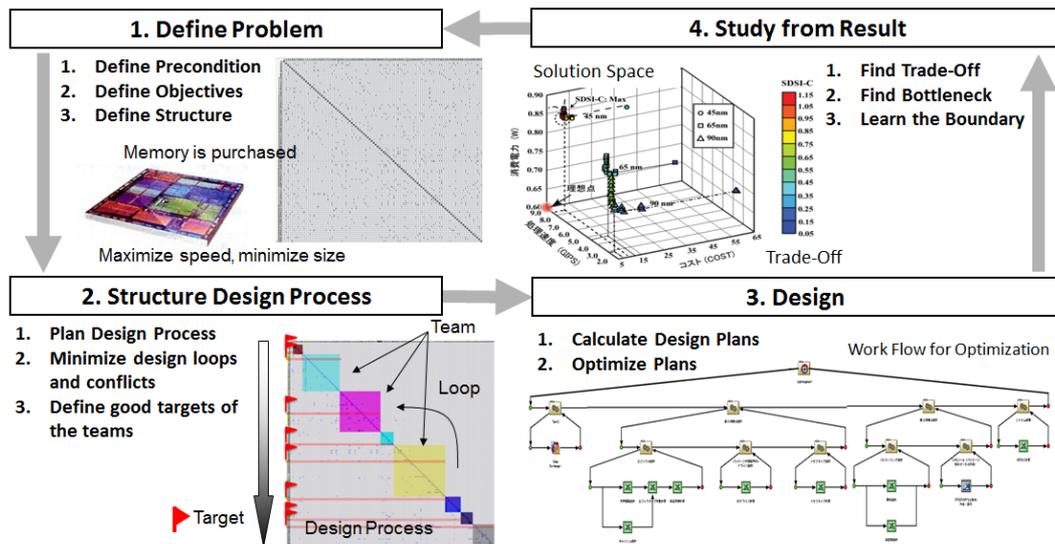


Fig. 6: Iteration to Find 'Good Problem' incorporating DSM [16]

を支援する方法を活用した問題設定の試行錯誤の支援を提案する。Fig. 6で示すように、以下の手順により、「良い問題の設定」を支援する [16]。

- Step 1: 設計者が問題を設定（仮定）する。製品情報の記述モデルを用いて、設計における前提条件や、目的関数、対象として考える製品情報を入力する。
- Step 2: 製品情報に定義された重要度や目的、前提条件、製品構造を分析し、問題を解くための設計プロセスを導出する。これを構造化と呼び、計算機によって、入力された問題設定と、製品の情報モデルを用いて、設計が効率的に行えるように、設計プロセスを導出する。
- Step 3: 導出された設計プロセスにしたがって設計を進め、計算による解探索の実行を可能とする。
- Step 4: 得られた解から知見を得て、問題定義にフィードバックする。ここで、Step3で得られた解空間を俯瞰し、知見を得る。設計パラメータ間のトレードオフ関係や、ボトルネックとなる設計要素、あるいは最適化の限界を、解空間から導く。

5. 製品と組織の構造分析に基づく設計マネジメントスタイルの決定

製品の設計開発プロジェクトをマネジメントするためには、設計プロセスにおける調整作業を十分に考慮し、マネジメントがし易いように設計プロセスを構成しておくことが肝要である。例えば、各設計者に対して、担当する設計に対する「仕事の定義」を明確に与えることで、設計開発プロジェクトの複雑さの低減が期待できる。

設計ポイントは様々な箇所が存在し、市場における競争優位性に繋がる箇所もあれば、そうではない箇所もある。各箇所の特徴を見極め、適切なマネジメントの有り方を戦略的に考える必要がある。そこで、製品とその設計プロセス、およびその設計を実行する設計組織の統合モデルを統合的に検討した設計開発のマネジメント手法を提案する [17][18][19][20][21]。

5.1 設計マネジメントの背景と基本方針

本研究では、設計プロセスを構成するタスク間の関係性、および設計組織を構成する人材間のインタラクションを分析することによって、設計・開発プロセスの構成と設計組織の編成を支援するために、製品情報、設計プロセスと設計組織のモデル化を行い、計算可能な形式で記述表現する。具体的には、MDM (Multiple Domain Matrix) の形式を用いて、製品情報、設計プロセス、設計組織の各要素からなるプロジェクトを構成する情報間の関係性をマトリクスで記述表現する。MDMは、DMMとDSMの二種類のマトリクスから構成するが、品質機能展開 (Quality Function Deployment - QFD) の品質表を、製品情報を記述するDMMモデルとして活用する。QFDの製造業での認知度は高く、実際の設計現場で利用する事例も多い理由から、有効活用する。

製品情報については3章で述べているが、QFDを製品情報として利用する概念をFig. 7(A)(B)に示す。Fig. 3では、属性情報である機能尺度や設計変数が制約関係で関連付けられていたが、QFDベースの製品情報では、制約関係を介さない形式で、機能尺度と設計変数の対応関係が表現されることが特徴である。

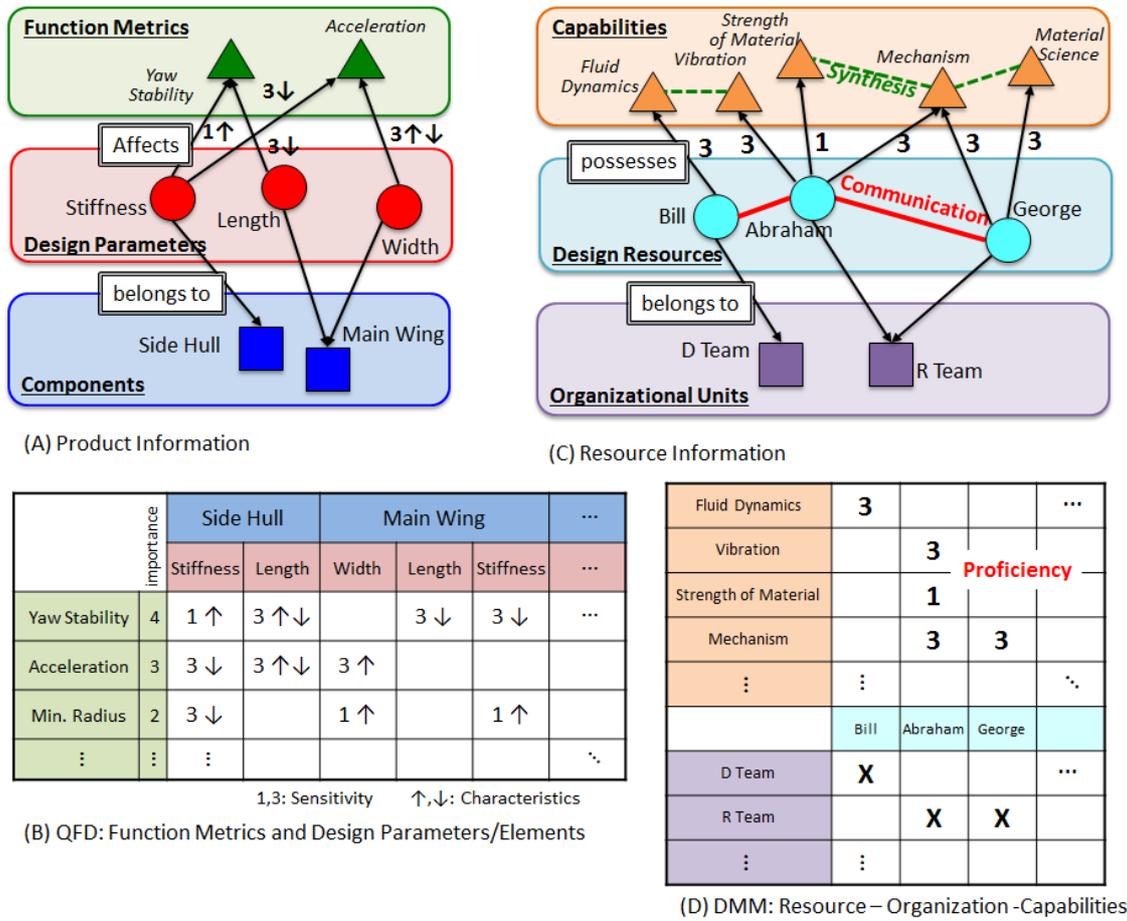


Fig. 7: DMMs of Design Process and Design Organization

5.2 設計プロセスと設計組織のモデル化

設計マネジメントを実現する上で必要な情報モデルとして設計プロセスと設計組織のモデルを次のように定義する。これらのモデルは互いに関連し、統合モデルを形成する。

(1) 製品開発プロセスモデル 製品開発において様々なタスクが存在するが、本稿では、下記のタスクを中心にモデルを検討している。

設計タスク：設計タスクとは単一もしくは複数の設計変数の決定を行う設計行為を指す。設計タスク間には実施順と情報交換関係がある。また、一連の設計タスクとその実施順、それを管理する検討タスク群をまとめて設計プロセスを表すと捉え、当該部分を設計プロセスモデルと呼称する。

検討タスク：検討タスクとは、設計タスク間で設計変数間の調整がどのようになされるべきか方針を検討・決定する行為を指す。あるいは、先の検討タスクにて決定された方針のもと設計行為が行われ、設計対象間の整合が取れていることを確認する行為を

指す。

以上のタスク以外にも、単一もしくは複数の構成部位を試作する試作タスクや、試作された構成部位を用いて機能尺度が要求されるレベルを満たしているかどうかを評価する評価タスクなどが存在する。

(2) 設計組織モデル (Fig. 7 (C)(D))

設計組織を表現するために、以下の要素を定義する。

設計リソース：設計を行う人材を表現するモデルとして定義する。ケーパビリティを持ち、組織ユニットに所属する。コミュニケーションの有無が設計リソース間に記述される。

組織ユニット：設計を実行する組織の基本単位をモデルとして定義する。複数の設計リソースが所属する。同一の組織ユニットに属する設計リソース間には、情報交換、知識・経験の共有などのコミュニケーションが存在すると考える。設計リソースのケーパビリティの保有に関しては、①設計能力として利用可能、②設計能力として利用可能ではないものの他者の設計論理を理解可能、の二段階の熟練度

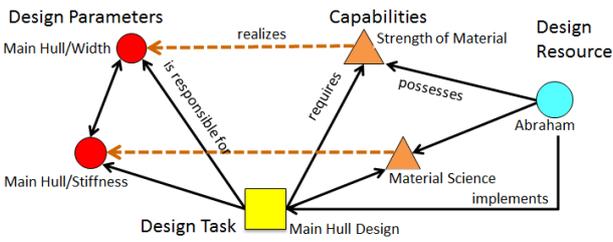


Fig. 8: Relationships between Design Parameters, Capabilities, Design Task and Design Resource

される。本研究では、リーダーシップや人材のマネジメントなどの人的資質については言及しない。

5.4 製品構造の分析に基づく開発プロセスの構成

設計活動は機能尺度が要求品質を達成するように設計変数の改善を行っていく一連の活動と捉えることができる。4章では、製品情報として記述された制約関係と設計変数、機能尺度の属性情報を利用して設計プロセスを導出する手法を示した。

しかしながら、設計の上流では、設計変数から機能尺度を決める具体的な制約関係の情報が未定の場合が多く、制約関係の情報を利用した設計プロセスを導出は難しい場合がある。このような場合への対応として、設計変数と機能尺度に対する影響関係から設計プロセスを導出する手法を検討した。これは、Fig. 9に示すように設計変数間の優先関係を算出し、便宜的に設計プロセスを導出する手法である。

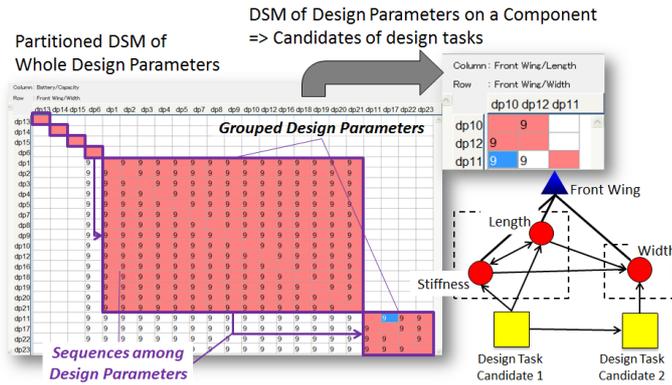


Fig. 9: Extracting Design Tasks and Design Process

を記述する。また、設計リソースの持つケーパビリティの醸成が行われるものと捉える。

5.3 製品情報、設計プロセス、設計組織の統合モデル

設計プロセスは製品情報との関係から記述される。設計タスクと設計変数との間のリンクは、当該設計タスクが当該設計変数の決定を行うことを示している (Fig. 8)。

また、設計プロセスと設計組織は、設計プロセスを構成するタスクに対し、それを実行する設計リソースを割り当て、連携させる。各タスクが担当する設計変数間に調整関係が存在する場合、自ずとそれらタスクの間にも調整関係が存在することになる。これによって、設計プロセスのマネジメントの有り様を、それを行う人的側面から検討することができる。

設計プロセスと設計組織の連携については、設計者のケーパビリティ (能力) に注目し、共通してケーパビリティをモデルに記述することで、設計プロセスと設計組織のモデルを連携する。

ケーパビリティ：設計を行うために必要な能力を表現する情報をモデル化する。ケーパビリティ間には、異なるケーパビリティ間の分野横断的な連携が記述

設計変数間の優先関係は機能尺度毎に、1) 感度、2) リスク、3) 前提条件設定の三つの視点から与えられる。リスクとは、当該設計変数を当該機能尺度の向上のために、その影響特性と同方向に設計変数を変更した場合に、他の機能尺度に及ぶ悪影響の度合いを表す。リスクは影響特性と機能尺度の重要度、および前提条件設定を利用して計算によって求まる順位尺度とした。

設計変数間の優先関係は二つの設計変数間に与えられるものだが、それを製品モデル全体にわたって分析することで、設計変数の決定を数段階の序列にすることができる。この算出された序列を以って設計の実施順とする。この処理においても、DSMのPartitioning手法を適用する。

5.5 設計タスクと設計リソースとの割り当て関係

マネジメントすべき対象は、製品の設計変数を決定する設計タスクおよびその実行者である設計リソースの割り当て関係である。設計リソースを設計タスクに割り当てる際には、そのタスクを実行する能力の有無確認だけでなく、そのタスクが調整関係を持つ他の設計タスクとの関係を考える必要がある。設計タスク間の調整関係は各タスクが決定をする設計変数間の関係によって与えられ、そこから、調整が重要なタスク間の関係などがわかる。

タスク間の調整に対しては、各タスクの実行者が自身のタスクと関係する他のタスクの理解度が影響を及ぼす。つまり、担当する設計者の設計タスクに対する理解度が、設計プロセスのマネジメント性に大きく影響を与える。

Fig. 10は、熟練度の指標を定義し、設計リソースの各設計タスクにおける設計論理の理解度を算出する方法を示している。この理解度を、設計プロセスのマネジメ

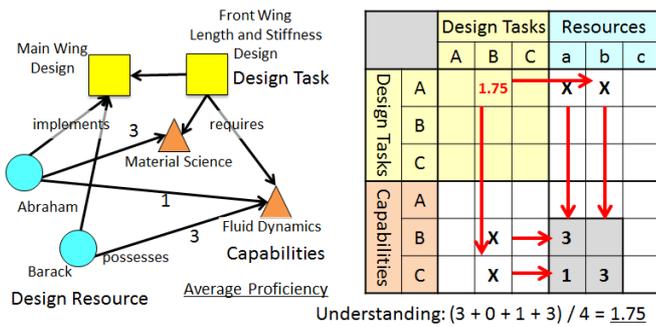


Fig. 10: Calculating Understanding between Tasks by Proficiency

ント性を評価する指標として使用する。また、各設計タスクは複数のケーパビリティを要求するために複数の設計者によって実行されることもある。関連タスクが要求するケーパビリティのすべてに対して、それぞれの設計リソースがどの程度の熟練度を有しているかによって設計タスク間の理解度を算出する。

5.6 設計プロセスの実行体制のマネジメント性評価

設計リソースの設計タスクへの割り当てが変われば、各設計プロセスに対する理解度は変わる。したがって、設計プロセスのどの様な実行体制が、設計プロセスのマネジメント性の観点から適切なのか検討する必要がある。

Fig. 11 は、設計プロセスと設計タスクの担当によって算出される実行体制案と設計プロセスの実行マネジメントの難度の対応を示している。左側に設計タスクと設計担当の対応を示し、右側は、設計タスク間の実行マネジメント難度を記述した DSM (Design Task Implementing Management Difficulty DSM) である。タスク間のマネジメント難度がセルに示され、難度に応じてセルが色分けされている。青に近いほど易しく、赤に近いほど難しい。また、数字の色は当該タスクとの間の前後関係の有無を示す。対角セルは自身との調整であり水色に、前後関係のあるタスク間は緑色、無い場合は赤になっている。

Fig.11(A) は、能力の高い設計リソースに仕事を集中させることによってマネジメント性を最大化している。その結果、担当者：rsc5 はタスクに割り当てられていない状況が確認される。Fig.11(B) は、タスク分担が均一化された担当案となっている。能力に劣る設計リソースにタスクに割り充てている理由により、マネジメントの難易度は上がる結果が示されている。

6. 設計組織を考慮した製品ファミリー設計の支援

製造業は、多様化する顧客要求にフレキシブルに対応し、効率良く製品設計する必要に迫られている。このよ

うな中で、製品設計手法の一つとして注目されている手法として製品ファミリーの設計がある。製品ファミリーとは、複数の製品においてプラットフォームやモジュール、部品などが共用化された製品群である。複数の製品で共通する部分を最大化し、独自に設計すべき固有の部分を最小化ことで開発コストを抑え、製品の多様性を実現する設計手法である。本章では、製品と組織の構造を考慮した製品ファミリーの設計を議論する。

6.1 製品ファミリーの設計における課題

近年、自動車などのインテグラル型の製品をモジュール化し、モジュールを共通化することで製品ファミリーを設計する戦略的な取組が多く見られる。しかしながら、インテグラル型の製品は部品間の相互依存関係が強いため、モジュールの構造を決定することは容易ではないといった課題があり、モジュールの設計支援が要望される。

モジュールの構造は、製品の種類や設計品質に関係するため、設計の上流段階におけるモジュールの構造決定は非常に重要である [22]。そこで、設計の上流段階の特徴である製品の機能構造に着目し、その構造分析と組織構造を考慮した製品ファミリーの設計を支援するための設計手法を提案する。

6.2 製品情報のモデル化

製品設計の上流段階を想定し、提案する「製品ファミリーのアーキテクチャの決定」を、以下の二つの視点から考える。

- 1) モジュールの分割構造の決定：製品を分割する単位であるモジュールを決定する。
- 2) モジュールの共有構造の決定：上記 1) で決まったモジュール分割構造において、各モジュールの製品群内での共有構造を決定する。

本研究では、以下の情報を所与とした上での製品ファミリーアーキテクチャの設計問題とする。

- A) 想定する製品ファミリーの種類：製品ファミリーにおける種類、および各種類に要望する機能尺度の情報は既に定義されている状況を想定する。
- B) 製品の機能構造の情報：A) で定義した機能尺度と設計変数（設計対象となる値）の対応関係が既知であるとする。この情報は QFD (Quality Function Deployment) の品質表の情報を活用する。

Fig. 12 にソーラーボートのプロジェクト演習を題材とした設計開発プロジェクトの製品情報、モジュール情報、組織情報の例を示す。構成する情報は様々な関係によって結びつけられており、必要に応じて関係情報が抽出され、システムの特徴量として指標化される。

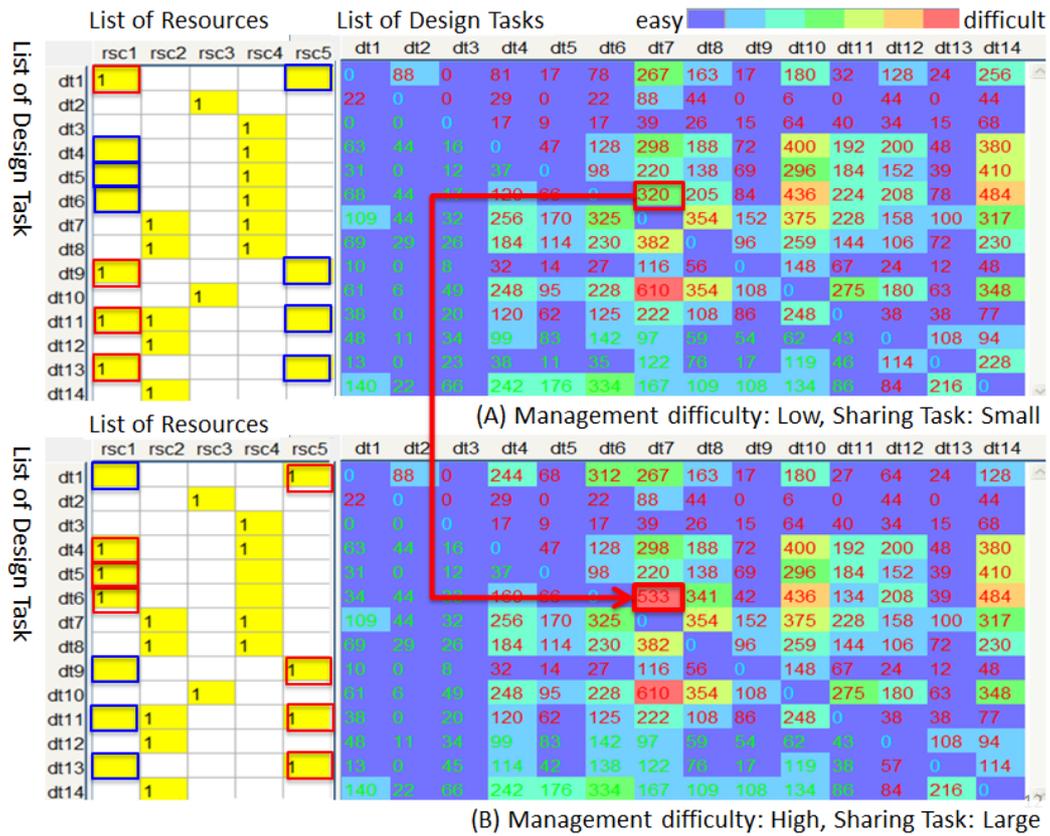


Fig. 11: Change of Management Difficulties by Task Allocation

Fig. 12 に示すように、本研究では、機能構造に基づき、設計変数間の調整関係を定義する。各製品ファミリー案を調整関係のネットワークで表現し、これを分析することで製品ファミリーの評価をおこなう。設計変数間の調整関係は、ともに機能尺度に影響関係を持つという共役性から導かれると定義する。調整関係の重みの大きさは、設計変数間の調整をする際の仕事量を表すものであると定義する。本研究では、調整関係をする際の調整作業量は、設計変数が与える影響感度に依存すると仮定する。設計変数間の調整関係は二種類に分類される。

- インタフェイリンク：異なるモジュール間の調整関係であり、個々のモジュールの仕様決めや制約条件を決めるといったモジュール間の決めごと一般を指す
- 摺り合わせリンク：モジュール内でおこなう調整関係であり、インタフェイリンクの決定後に個々のモジュールの設計をする際に考慮する調整の関係

6.3 設計組織のモデル

モジュールの分割構造は、分業の構造を規定していると解釈できる。そこで、「製品ファミリーを設計する際

に、モジュールの種類に応じて、モジュールを統括する設計ユニットが存在し、設計ユニット間がコミュニケーションを取り、意思決定をすることでモジュール間のインタフェイスを決めている」と仮定する。

一方、設計組織は木構造により表現され、設計組織の階層は調整作業の順序を規定していると理解できる。組織構造が調整作業の順序を規定しているという理解から、製品ファミリーと組織構造の適合性を評価することによって、最適な組織編成を議論する。

6.4 モデルを用いた各評価指標

- 1) 総調整数：製品モジュールの共有化による調整作業の低減量を示す指標であり、製品ファミリーの調整関係のリンクの重みの総和を算出する。
- 2) 妥協率：異なる製品でモジュールを共有化することは、部品の過剰性能を許容する方向となり、製品毎に最適化が困難となり、妥協が発生する。そこで、この妥協を定量化する妥協率を定義し、指標化する。妥協率は、モジュールが共有化される製品同士における各機能の要求レベルの相違から算出される。
- 3) 調整時間：モジュール構造は分業構造を規定するた

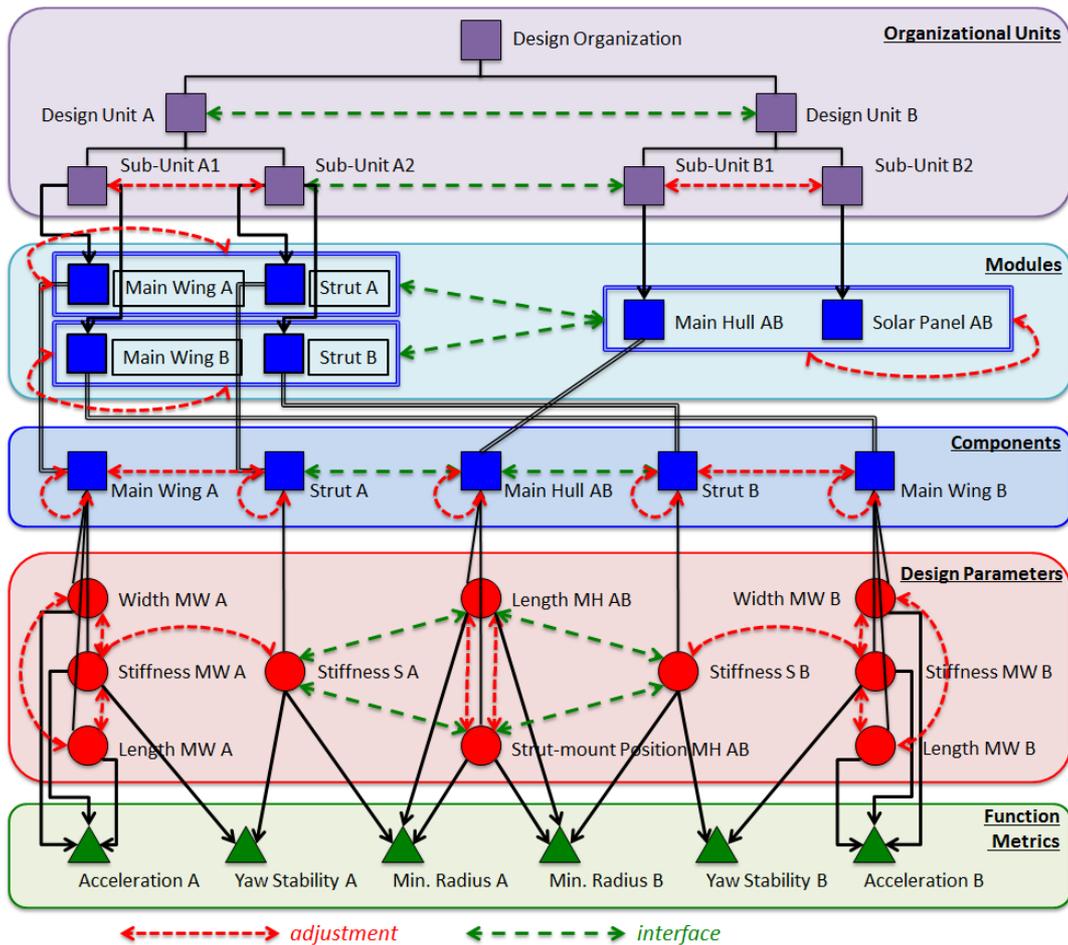


Fig. 12: Information Model for Product Family Design and Resource Management

め、設計開発のリードタイムに影響を及ぼす。製品ファミリア案の調整ネットワークの構造から調整時間を算出することで、分業の効率性を評価する。

- 4) 調整障害度：分業することにより調整作業は障害される。設計の組織構造における業務ユニット間の業務距離から障害される調整作業の量を算出する方法を定義し調整障害度を算出する。

6.5 製品ファミリア案と設計組織構造案の導出方法

製品ファミリア案は、製品のモジュール分割構造と共有構造によって定義される。モジュール分割構造は、与えられた製品の構成要素のネットワークを対象にグラフ分割アルゴリズムを用いて算出される。算出されたモジュール構造に対して共有化パターンを検討することによって、可能性のある全ての製品ファミリア案を導出する。

6.6 プロトタイプシステムの実装と検証例

6.2 節の例題と同様に、ソーラーボートに製品ファミリア戦略を展開することを想定して、設計要求が異なる三

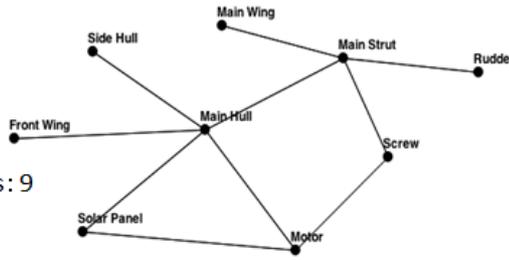
種類の製品ファミリアを実現するモジュールの分割構造、共通構造、組織構造を検討する (Fig. 13 (A))。

製品情報として製品要素は9要素、設計変数は25変数、機能尺度は6尺度からなる製品を設計対象とする (Fig. 13 (A))。この製品から算出される製品ファミリアの全案は17,450案となる。妥協率と総調整数を軸とした解空間には、Fig. 13 (B) に示すようなパレート面が存在する。調整作業を減らそうとすると妥協率が上がり、妥協率を小さく抑えようとする総調整量が増加するトレードオフ関係の存在が理解でき、総調整数と妥協率を高いレベルでバランスする案を抽出する際に貴重な示唆を与える。Fig. 13 (C) は、設計開発の実行体制を考慮したファミリア案の相違を示している。分業を重視したファミリア案は Plan I、摺り合わせを重視した案は Plan II である。調整時間と調整障害度の相違がグラフから理解でき、ファミリア案の特徴と、組織構造の組合せを議論する意味を理解できる。

Fig. 14 に設計の組織編成の導出結果を示す。パレート付近の組織構造案 (Structure Type 1-3) においては、赤



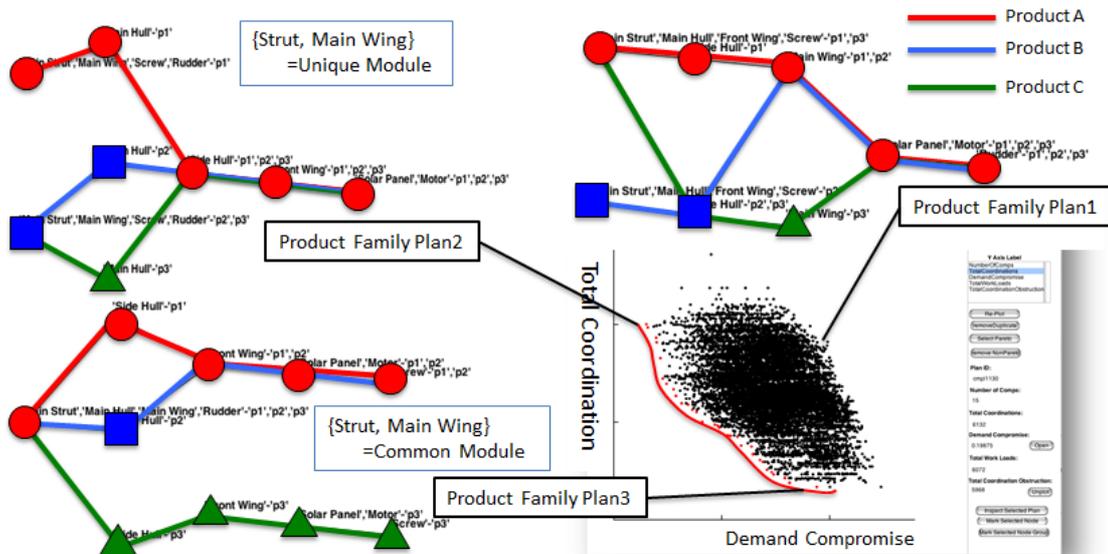
Function Metrics: 6
 Product Elements/Components: 9
 Design Parameters: 25
 Number of Modules: 5
 Total Numbers of Elements: 27 ⇒ 15



Required Products	Product A	Product B	Product C
Maximum Speed	5	3	1
Acceleration	5	3	3
Role Stability	3	5	3
Yaw Stability	3	3	5
Minimum Radius low speed	3	1	1
Minimum Radius high speed	3	3	5

Relationship of Influence DMM Based on QFD	Main Strut/Length	Main Strut/Width	Main Strut/Stiffness	Main Hull/Length	Main Hull/Width	Main Hull/Stiffness	Main Hull/Wings Coordinate	Side Hull/Length	Side Hull/Width	Side Hull/Stiffness	Main Wing/Length	Main Wing/Width	Main Wing/Stiffness	Front Wing/Length	Front Wing/Width	Front Wing/Stiffness	Solar Panel/Length	Solar Panel/Width	Solar Panel/Output Capacity	Motor/Torque	Motor/Revolution	Screw/Size	Screw/Number	Rudder/Length	Rudder/Depth
Maximum Speed	1	3		1	3	1					1	1	1	1	1	1			3	1	3	3	3		
Acceleration	1	3		1	1	1					3	3		1	1	1			3	3	1	3	3		
Role Stability			1		1	1	3	1	1		1	3								1				1	1
Yaw Stability			1	3	1	1	3				1	1	1							1				3	1
Minimum Radius low speed	1	1		3				3			1	1	1											3	3
Minimum Radius high speed	1	1		3							1	1	1											3	3

(A) Definition Problem: Solar Boat

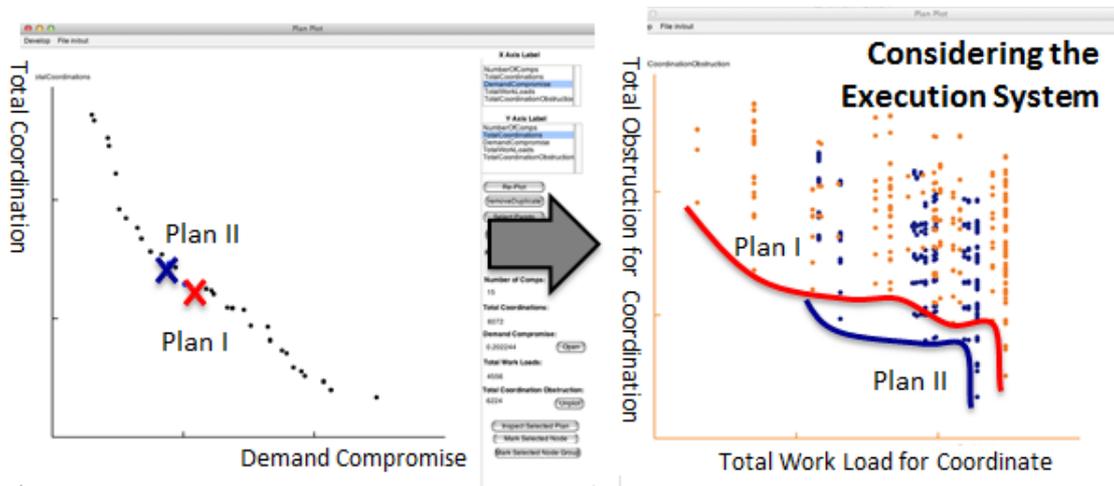


(B) Calculated Product Family Plans

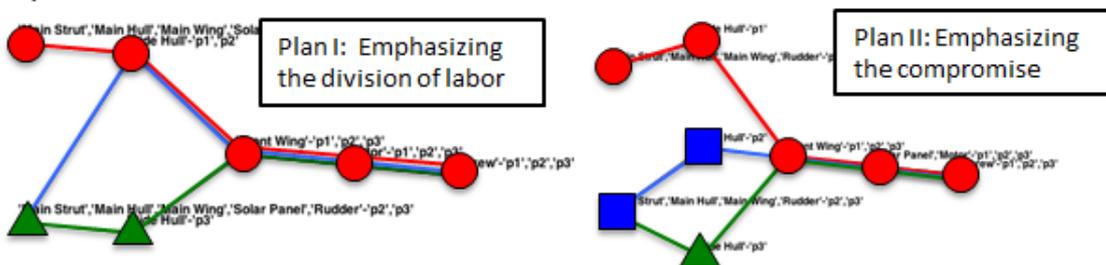
Fig. 13: Example of Product Family Design (Solar Boat)

枠で囲んだ組織構造が共通である。これは、モジュール I {ストラット, 主翼, 舵} を担当する設計組織 (Unit 1) とモジュール II {主船体, 副船体} を担当する設計組織 (Unit 2) が同一階層に存在することを意味する。これは、この二つのモジュールの間には大きな調整関係があ

る理由によると考えられる。また、この二つのモジュールは同じ共有構造であるので、設計の組織構造案1のように、この二つのモジュールを他のモジュールと切り離して調整作業をできるようにすると各モジュールを独立して設計できるようになる。これによって、設計の組織



Extraction of Pareto chart: Select a plan in consideration of the execution system



(C) Checking Total Coordination and Demand Compromise

Fig. 13: Example of Product Family Design (Solar Boat)

構造案 1 は大幅に設計時間を短縮していることがわかる。調整作業における分業と調整のしやすさを同時に考慮したバランスのとれた設計組織編成案を生成することができた。

本研究では、製品に対して、モジュール分割構造を決め共有構造を決める問題として捉えたが、実際には共有化の構造は様々なレベル（モジュール、サブモジュール、部品などのレベル）であると考えられ、段階的な共有構造を検討できる支援環境の構築が望まれる。

7. おわりに

本稿では、製品の設計開発を対象に、製品、設計組織のシステムをネットワーク/マトリクスで表現し、その分析による問題解決に関するアプローチを紹介した。その中で、特に、様々な情報の相関関係（影響、依存等）の情報を有効活用することの重要性を確認できた。詳細な情報が未確定な状況である上流工程においても、情報間の関係情報を有効活用し、その関係の背後にある多様な情報を抽出し、意思決定のマネジメントに活用されることが期待される。

本稿で中心的に議論した構造化手法など、情報間の

関係から必要とされる情報を抽出する手法を整理し、体系化することはシステム設計の手法として重要となる。アナログ時代の情報獲得には限界が存在したが、デジタル時代、クラウド時代では情報獲得の敷居は低くなり、多種多様な情報をまとめて取り扱うことも可能となっている。情報の相関関係から組織の集合知を収集し、有効活用する事は組織力の観点で重要である。システムを俯瞰して捉え、問題解決を進める方向に役立てば幸いである。

参考文献

- [1] Lindemann, U., Maurer, M. and Braun, T., Structural Complexity Management, An Approach for the Field of Product Design, Springer, 2009.
- [2] Maurer, M. and Lindemann, U., Facing Multi-Domain Complexity in Product Development, CiDaD Working Paper Series, Vol. 3, No. 1, pp. 1-12, 2007.
- [3] Akihiro Hirao, Tsuyoshi Koga, and Kazuhiro Aoyama, Planning Support of Initial Design Process Based on Clustering and Ordering of Tasks –Design Example of an Integrated Circuit, Proceedings of the 12th International Design Structure Matrix Conference, pp. 83-96, Cambridge, UK, 2010.

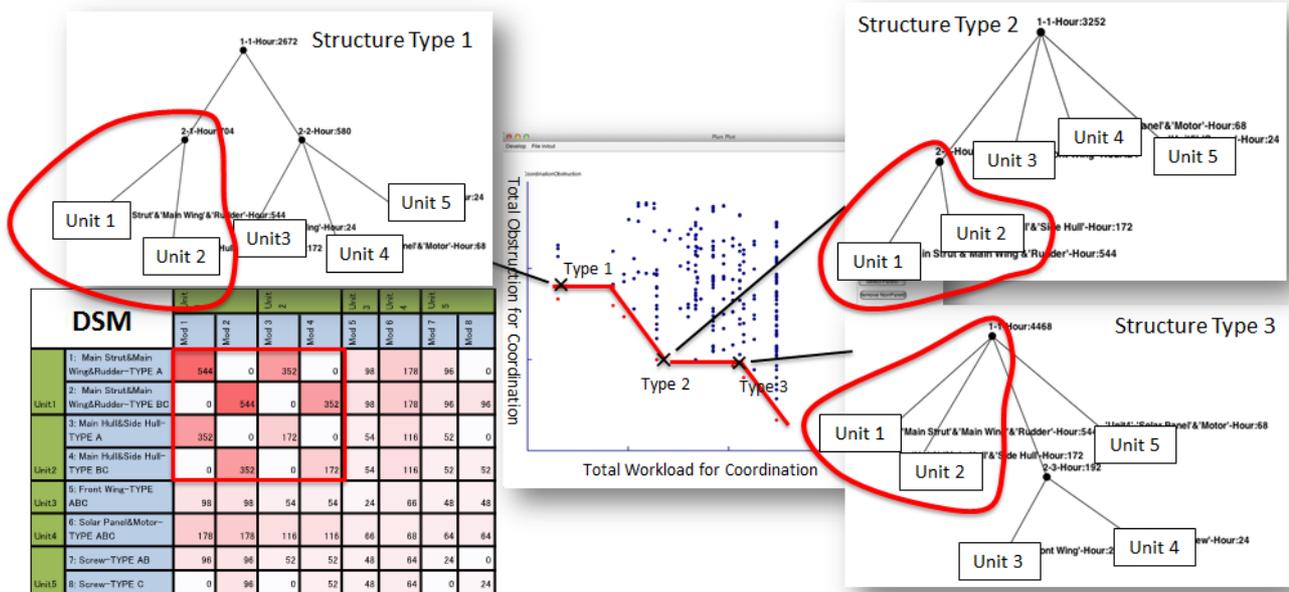


Fig. 14: Organizational Structure Design in View of Product Family

[4] 大泉和也, 青山和浩, ケーパビリティのモデル化による設計プロセスと設計組織の協調設計に関する研究, 日本機械学会 第 21 回設計工学・システム部門講演会, 米沢, 2011.

[5] 森 健樹, 大泉和也, 青山和浩, 製品アーキテクチャーを考慮したモジュラー設計のための設計の標準化および設計組織の編成に関する研究, 日本機械学会 第 23 回設計工学・システム部門講演会, 2013.

[6] Danilovic, M. and Börjesson, H., MANAGING THE MULTIPROJECT ENVIRONMENT, In The Third Dependence Structure Matrix (DSM) International Workshop, Boston, 2001.

[7] Steward, D. V., The design structure system - A method for managing the design of complex systems, IEEE Transactions on Engineering Management, EM-28, pp. 71-74, 1981.

[8] Bartolomei, J. E., Hastings, D. E., de Neufville, R. and Rhodes, D. H., Engineering Systems Multiple-Domain Matrix: An organizing framework for modeling large-scale complex systems, Systems Engineering, Vol. 15, Issue 1, pp. 41-61, 2012.

[9] Eckert, C. M., Keller, R., Earl, C. and Clarkson, P. J., Supporting change processes in design: Complexity, prediction and reliability. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 91, pp. 1521-1534, 2006.

[10] Clarkson, P. J., Simons, C. and Eckert, C., Predicting Change Propagation in Complex Design, ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Pennsylvania, 2001.

[11] 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, pp. 1-13, 1994.

[12] Alison, J. T. and Papalambros, P. Y., Optimal Partitioning and Coordination Decisions in System Design Using an Evolutionary Algorithm, 7th World Congress on Structural Multidisciplinary Optimization, Seoul, 2007.

[13] Honathan R.A. Maier, Georges M. Fadel, Strategic Decisions in the Early Stage of Product Family Design, Proc. Of the ASME DETC/CIE, DFM-21200, PA, USA, 2001.

[14] Akihiro Hirao, Kazuya Oizumi and Kazuhiro Aoyama, Finding parameter constraint networks in a product system, Proceedings of the 14th International DSM Conference Kyoto, Japan, ISBN: 9783446433540, 2012.

[15] 村田秀則, 岩田剛治, 多屋淳志, 佐藤了平, 森永英二, 岡本和也, 工藤啓治, 青山和浩, 古賀毅, システムデザイン手法 SDSI-Cubic を用いたシステム LSI の適正設計, エレクトロニクス実装学会誌, pp. 17-7, 29-541, 2014.

[16] 古賀 毅, 尾野 航, 平尾 彰啓, 青山 和浩, “設計タスク間の順序と依存関係に着目した製品開発プロセスの構造化,” 第 20 回設計工学・システム部門 講演会論文集, 2010.

[17] Oizumi, K., Kitajima, K., Yoshie, N., Koga, T. and Aoyama, K., Management of Product Development Projects Through Integrated Modeling of Product and Process Information, International Conference on Engineering Design (ICED11), Copenhagen, 2011.

[18] 大泉和也, 青山和浩, ケーパビリティのモデル化による設計プロセスと設計組織の協調設計に関する研究, 日本機械学会 第 21 回設計工学・システム部門講演会 米沢, USB, 2011.

[19] Oizumi, K. and Aoyama, K., Product Oriented Organization of People toward Fostering Capabilities in Product Design, International Design Conference - DESIGN 2012, Dubrovnik, 2012.

[20] Oizumi, K. and Aoyama, K., Coordination of Product Design Process in View of Product and Organizational Structures. ASME 2012 Design Engineering Technical Confer-

ences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago/ASME, 2012.

- [21] 大泉和也, 古賀 毅, 北島圭, 青山和浩, 品質表を利用した設計方針の検討手法, 日本設計工学会論文集, Vol. 50, No. 3, pp. 30-37, 2015.
- [22] 古賀 毅, 青山和浩, 製品ファミリ・モデルの提案に基づく共通モジュールとオプション構造の設計手法, 日本設計工学会論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 30-39, 2010.

青山 和浩



1963年10月18日生。1989年東京大学大学院工学研究科修士課程船舶海洋工学専攻修了。2008年東京大学工学系研究科教授（システム創成学専攻）、現在に至る。システム工学、設計工学、生産システム工学、溶接工学、船舶工学などの研究に従事。工学博士。日本船舶海洋工学会功労員、日本機械学会フェロー、人工知能学会、情報処理学会、溶接学会などの会員。

大泉 和也



1984年3月4日生。2013年東京大学大学院工学研究科博士課程システム創成学専攻修了。東京大学工学系研究科特任研究員（システム創成学専攻）、現在に至る。システム工学、設計工学などの研究に従事。工学博士。日本機械学会、設計工学会などの会員。

古賀 毅



1973年5月28日生。2005年東京大学大学院工学研究科博士課程環境海洋工学専攻修了。2011年山口大学大学院理工学研究科准教授（機械工学専攻、システム設計工学系専攻）、現在に至る。システム工学、設計工学、生産システム工学などの研究に従事。工学博士。日本機械学会、設計工学会などの会員。