

設計タスク分析と情報共有によるメカトロニクス協調設計

Concurrent Multidisciplinary Mechanical Design Based on Design Task Analysis and Knowledge Sharing

近藤 浩一
KONDO Koichi

小沢 正則
OZAWA Masanori

森 俊樹
MORI Toshiki

抜本的な設計品質の向上と設計期間短縮を図る次世代メカトロニクス設計の確立を目指して、DSM (Design Structure Matrix) に基づく設計プロセスの立案技術と、集中定数系モデルを用いたコンカレント設計のための情報共有の枠組みを開発した。DSM は、設計作業間の依存関係の最適な設計手順の立案を支援でき、集中定数系モデルを用いた情報共有の枠組みは、複数設計者間での設計初期段階における共同作業を可能にする。

We have developed a systematic design task planning method based on a design structure matrix(DSM) and a lumped model-based framework for knowledge sharing in a concurrent design environment as key techniques for developing higher quality products in a shorter design time. The DSM facilitates systematic analysis of dependencies among design tasks and optimization of the design process. The framework based on a lumped model description of mechanical systems enables concurrent and cooperative work among multidisciplinary designers at an early stage of the design process.

In this paper, we also discuss the relationships between these techniques and the product development flow from product definition to detailed design.

1 まえがき

設計の品質を向上し設計期間を短縮するには、設計の上流段階で製品を的確に定義し、設計作業をわかりやすく実行しやすいタスク(しごと)に分割したうえで、できるだけコンカレント(協調)に進められるようにする必要がある。

ここでは、まず最初に製品定義のための手法であるQFD (Quality Function Deployment : 品質機能展開) および機能・構造マップについて簡単に触れ、製品定義からトップダウンな設計タスク抽出とタスク間の関連性の系統的分析のための手法として、設計タスク間の依存関係を表すDSMを作成する方法と、DSMに基づく設計タスクの分析方法を示す。次に、コンカレントに進行する設計作業の間で適切に情報共有を行い、後工程での後戻りを最小限に抑えるための手法として、設計上流段階での情報共有と性能評価に注目し、集中定数系モデルによる複合解析について述べる。

2 製品定義

顧客ニーズにマッチした製品を市場に的確に提供できるかどうかは、製品定義のよしあしが大きく影響する。製品定義を的確に行うための手法として、QFDがよく知られている。

QFDはVOC(Voice Of Customer : 顧客の声)から出発し、製品をその基本的な特性を示すパラメータであるEM(Engineering Metrics : 例えば、寸法、処理速度など)や、実際

の製品の構成を示す部品構成へとブレイクダウンする手法である。図1に示すとおり、VOCとEMの関係を示すチャートをQFDフェーズ1、EMと部品構成の関係を示すチャートをQFDフェーズ2と呼ぶ。これらを逆にたどれば、部品やサブユニットなどが顧客に対してどのような価値をもたらすかを定量的に評価することができる。QFDにおけるEMには、製品の機能を規定する仕様が盛り込まれるので、QFDフェーズ2は製品の機能がどのような構造や部品構成によって実現されるかを表現すると考えることもできる。

QFDは、VOCという観点から分析を行うが、故障という視点から製品の機能と構造の関係をチェックすることも

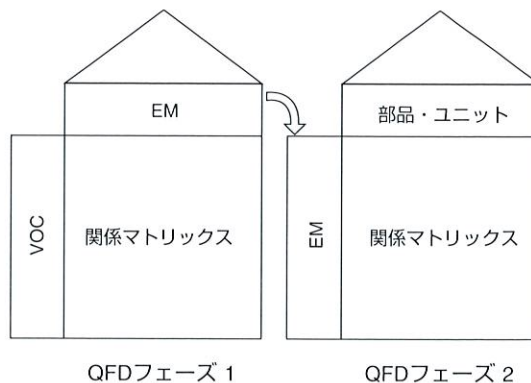


図1. QFD VOCを製品の特性パラメータや部品構成へ、関連性を明確にしながらブレイクダウンする手法である。Quality function deployment (QFD)

重要である。このためには、FMEA (Failure Modes and Effect Analysis) と呼ばれる手法が有効であり、図2のような機能・構造マップを利用した分析をするのがよい。これは、製品の機能がどの部品やユニットにより実現されているかを示すチャートであり、QFDと深い関係があることがわかる。FMEAでは、部品の故障により製品のどのような機能が影響を受け、顧客にとってどのような不具合が発生するかを系統的に分析することが可能になる。

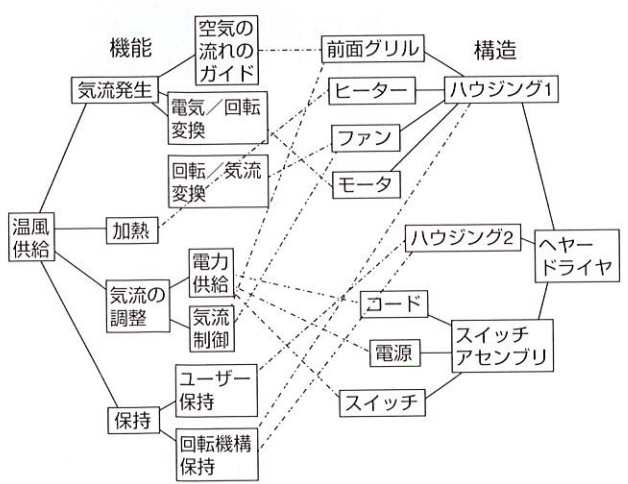


図2. 機能・構造マップ例 ヘヤードライヤの機能と構造を視覚的に整理したマップを示す。
Example of function structure map

3 DSMによる設計タスク分析⁽¹⁾

製品定義段階以降の設計を「ユニットや部品を与えられた制約や機能スペックを満たすように具現化する作業」と考えれば、機能・構造マップはユニットや部品を設計するタスク間の関連性や依存関係を表現していると見ることができる。

DSMはこのような設計タスク間の関連性をマトリックスの形で整理し、これに基づき設計プロセスのコンカレント性の抽出や設計プロセスのボトルネックの分析などを行う手法である。すなわち、設計プロセス全体を見渡した後、戻り要因の分析や独立して実行できる設計タスクの抽出など、設計が始まる前の設計プロセスの分析と効率的な設計プロセスの立案作業を支援する。

図3はDSMの基本的な構造を示している。DSMは正方形行列であり、行と列には個々の設計タスクが割り当てられている。設計タスクの抽出はいかなる方法で行なってもよいが、機能・構造マップにおける構造ツリーの末端ノード(中継点)に対応するユニットや部品の設計を行う作業をまず設計タスクとして列挙し、必要に応じてさらに設計タ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A		△	◎		◎		◎	△		○	
B				◎		○		◎	○		
C	◎				○		◎				
D		△				◎				○	
E	◎	◎					◎	△			◎
F											
G			◎		◎				◎	◎	
H		◎									
I	◎				◎			◎			△
J				○		◎		△			
K			◎				◎				

図3. DSMの基本構造 設計タスク間の直接的な依存関係を、マトリックスの形式で入力する。
Basic structure of design structure matrix

クの細分化を行うのが一つの方法である。カムの断面形状が機構的な機能に関連し、材料と厚さが強度に関連するので、断面形状の設計タスクと強度設計タスクに分割することが設計タスクの細分化例である。

このように設計タスクが抽出されマトリックスの枠組みができると、次にこれら設計タスク間の直接的な関係を入力する。例えば、タスクAの実行にタスクBの結果が必ず必要である場合には、タスクAの行とタスクBの列の交点にもっとも強い関係を示す“◎”を入れる。参考データとして他の設計タスクの結果がある方が望ましい場合など、関係が弱い場合には、その程度に応じて“○”や“△”を入力する。

さらに、機能・構造マップと関連させながら分析を行うと以下のようなメリット(利点)がある。まず第一に、機能・構造マップに基づきタスクを適切に分割しておけば、タスク間の関連がより正確に抜け落ちなく分析でき、設計プロセスのコンカレント性の発見がより容易になる点である。第二はDSM作成の省力化である。DSMにおいてはnの設計タスクがあるとn²の関連性をチェックし、“◎”、“○”や“△”を入力する必要がある。設計タスクの数が増えたとすべての関連性をチェックするのは非常に手間がかかる。機能・構造マップは機能を介して部品やユニット間の関連性を分析したものであり、それをDSM作成に利用することにより、関連性をチェックすべきタスクの組合せを絞り込むことができる。その結果入力ミスを削減でき、DSM作成の労力を大幅に減らすことができる。

DSMは設計タスク間の依存関係を表すグラフであり、グラフ理論のアルゴリズムを適用して、設計タスク間のコンカレント性を抽出したり、総設計時間が最短となるようにタスクに順序つけることができる。図4は、“◎”で表現さ

れているタスクの関連性だけに注目した場合に、設計タスクがどのようにグループ分けされるかを示している。図3のDSMでは直感的に理解することはできないが、例えばA, C, E, G, I, Kのタスクはハッチングで示されているとおり非常に密に関係していることがわかる。

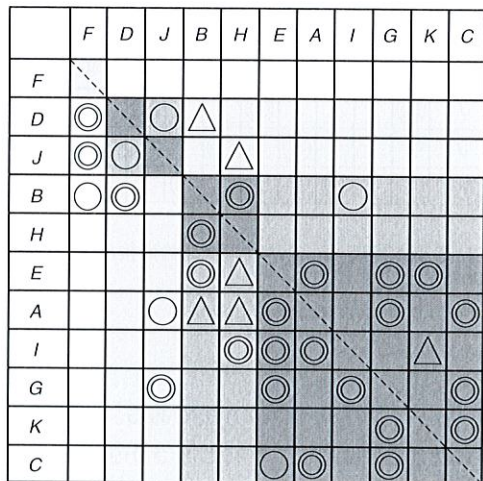


図4. 設計タスクのグルーピング タスク間の依存関係に着目し、タスクを自動的にグルーピングできる。
Design task grouping

このようなタスクのまとまりにおいては、一般に後工程の設計タスクの結果が前工程の入力となっているなどで、時間順序で並べることができない。実際の設計においては、後工程で決定される値を設計者が経験に基づいて仮に概算したり、会議で検討するなどして、時間軸に添って実行可能なスケジュールが作られる。設計の後戻り原因はこのような前工程での性能などの見積り精度不足の場合が多く、どのような項目をどの段階で事前に評価しておくかを正しく把握することは、設計をコンカレントに効率よく行ううえできわめて重要である。

どこかの設計タスク間の依存関係をあらかじめ性能見積りなどで一次的に考慮しないでよいと考えることができれば、設計プロセス全体として見通しがよくなり、コンカレント性も大きく改善することができる。

タスク間の依存関係を無視してもよいものをDSMにおいて“●”に変更し、タスク分析を再度実行してみた結果が図5である。この場合少なくとも“◎”の関連性だけに着目すれば、タスクを時間順序で並べ替えることが可能になり、図6のようになる。DRと表示されているのは、“●”に置き換えた関係に相当し、かっこで示されたタスクに関する内容について検討を行う課題先取り型のデザインレビューの必要があることを示し、後ろ向きの矢印は設計後、“●”に置き換えたことに関連して、問題がないか確認する

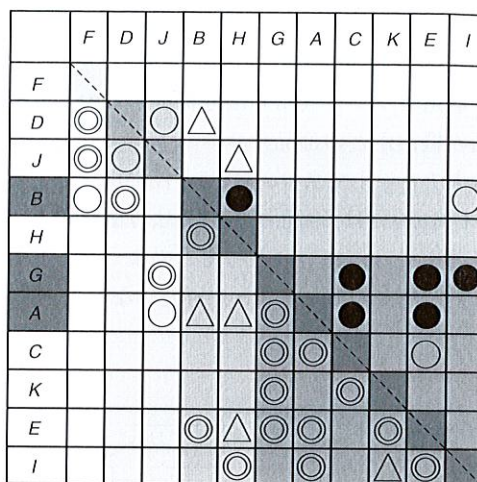


図5. 設計タスクの順序付け 依存関係を考慮しながらタスクの順序付けを行なった結果を示す。
Design task sequencing

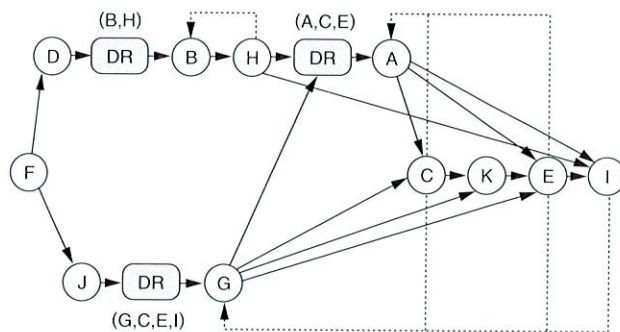


図6. 設計プロセスと必要なレビューのタイミング 図5の順序付けに対応して、タスク間の関係を考慮してどのようなレビューやチェックを行うべきかを抽出できる。
Design process and recommended review timing

作業またはレビューの必要性を示している。すなわち“●”は設計プロセスにおける後戻り要因として注目しておくべき項目である。

このようにDSMを用いることにより、設計タスクの関連性を系統的に分析し、適切な設計手順を客観的に立案することが可能になる。

4 集中定数系モデルによる知識共有⁽²⁾

DSMによる設計タスク分析は、製品定義からトップダウンに設計プロセスを立案するための技術である。立案プロセスを効果的に実行するためには、設計情報を設計者や設計タスク間で共有するとともに、その情報に基づき定量・定性的に性能を見積もらなければならない。集中定数系モデルによる複合解析はいまいで、概略的な情報しかない設計初期の段階でこれを行う手段である。集中定数系を用

いる理由としては下記事項が挙げられる。

- (1) 設計初期の、製品の詳細形状がまだ確定していない段階では、分布定数系のモデルを作成するのに十分なデータがない。また、記述量が比較的少なく直感的に理解しやすい集中定数系という縮退した形で表現しておけば、各専門家のアイデアが出しやすく、多くの試行錯誤が可能になる。
- (2) メカトロニクス製品における組込みシステム、ファームウェア設計では、集中定数系による制御対象のモデリングで十分な場合が比較的多い。

設計情報共有および設計制約を容易に記述する手段として、CML(Compositional Modeling Language)⁽³⁾を採用した。CMLは、オブジェクト指向^(注1)言語の一種で、設計制約を宣言的に記述できる。宣言型の利点として、CMLで記述された複雑な設計制約モデルが自動的に数値解析により挙動解析され、設計者は計算手続きに煩わされることなく知識の記述に専念できる点がある。

以下、CMLでDVD用光学ピックアップヘッド(PUH)の設計制約を記述・分析した例を述べる。PUHの構造自体は、理想的にはトラッキング方向とフォーカシング方向の2自由度だけをもつばねとマス(質量)とダンパ系で表現されるシンプルなものである。しかし実際には、駆動力や重心の位置誤差などに起因する有害な回転成分や、上記二方向どうしの干渉に起因するクロストークなどが発生し、制御系設計を難しくしている。また、コストやサイズ、性能などの厳しい制約により、種々の非線形性がモデルに介在する。CMLでは、これらの非線形性が判明するごとに宣言的に追加することができ、検討の深さに応じて逐次挙動解析の精度を上げることが可能であり、試行錯誤の多い設計初期の性能検証に非常に適した言語となっている。

CMLの特長は、分散協調設計環境に実装し、各種専門工学ツールと情報を授受することでさらに活かされる(図7)。CMLデータを外部アプリケーションソフトウェアと授受する機能を利用し、三次元CADや制御系CADとをネットワーク上で接続した。

解析結果を図8に示す。図8(a)は、稼働中のPUHの温度上昇や、それに起因する物理諸元の変化を、CMLで同時解析した結果である。図8(b)は、その結果をリアルタイムに反映したPUHのステップ応答の結果である。温度上昇によるPUHのダイナミクスの変化がわかる。これらの情報を制御系CADに通知し解析することで、図8(c)のボード線図に示されるように、プラントモデルの変化が把握され、直ちに制御系設計を最適化することができる。また、この変化

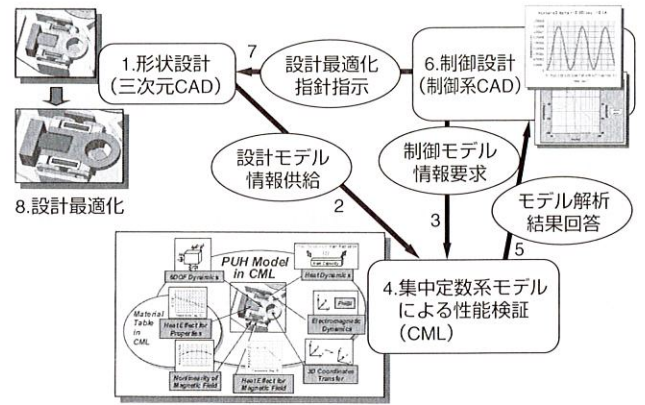


図7. 分散環境におけるCMLに基づく情報共有 三次元CADなどと分散環境で通信しながら、設計情報共有が行われる際のシステム例を示す。

Joint ownership of information based on Compositional Modeling Language (CML) in distributed environment

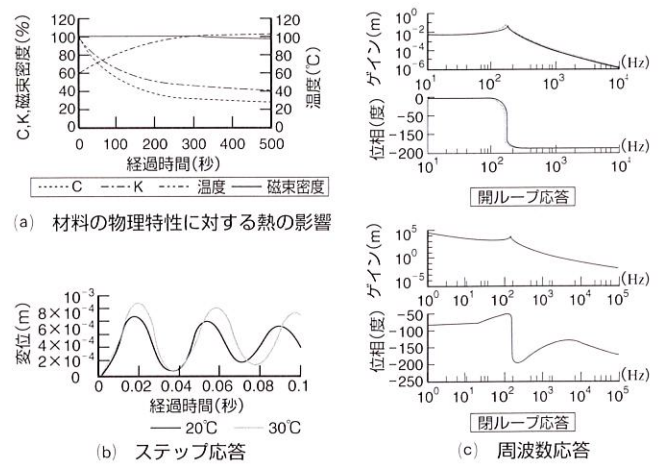


図8. PUHの解析事例 PUHの例で、解析を実行した結果の例を示す。

Example of pickup head (PUH) analysis

が設計仕様の許容範囲を逸脱する場合、制御系設計者は三次元CAD側に、具体的な設計変更指針を提示し、早期に設計最適化を実施することができる。

このようにCMLは、複数ドメイン(領域)にまたがる設計制約を管理し、複雑なモデル挙動を解析するとともに、機械系三次元CADや制御系CADなどにまたがる情報共有を円滑に進める機能をもつ。

5 あとがき

製品定義から設計プロセスの立案、コンカレント設計における情報共有といった流れに着目して、製品設計品質の向上と設計期間短縮を実現する技術について述べた。特に、

(注1) 関連するデータとそのデータを扱う手順の集合とを含んだソフトウェアパッケージをオブジェクトと呼び、このように定義されたオブジェクトをベースに分析、設計、開発を進めていく、ソフトウェアの範例の一つをオブジェクト指向と呼ぶ。

設計タスク間の依存関係を系統的に分析するための手法としてDSMを紹介し、協調設計における情報共有のための枠組みとして、集中定数系によるメカトロニクス記述に関して述べた。設計期間短縮などを現実のものとしていくには、地道な努力が欠かせないが、一方でこの論文で述べたような手法を系統的に適用し、客観的に検証していくことも重要である。

今後は、より多くの適用事例を基に、さらに系統だった手法へ発展させる予定である。

謝 辞

この研究は、スタンフォード大学との共同研究として行われた。同大学Mark Cutkosky教授、Kosuke Ishii教授、Richard Fikes教授、Gautum Biswas教授、Yumi Iwasaki氏および関係各位のご指導とご協力に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Mori, T., et al. "Task Planning for Product Development by Strategic Scheduling of Design Reviews". Proc. of ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference. Las Vegas, NV.199909, ASME.1999.

- (2) Ozawa, M., et al. "Multi Disciplinary Early Performance Evaluation via Logical Description of Mechanisms: DVD Pick Up Head Example". Proc. of ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference. Atlanta, GA.199809, ASME.1998.
- (3) Falkenhainer, B., et al. "CML: A Compositional Modeling Language, Technical report KSL-94-16, 1994, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University."



近藤 浩一 KONDO Koichi, D.Eng.

研究開発センター システム技術ラボラトリー主任研究員、工博。システムモデリング技術、三次元CAD技術、シミュレーション技術などの研究・開発に従事。精密工学会、ACM会員。

System Engineering Lab.



小沢 正則 OZAWA Masanori

研究開発センター システム技術ラボラトリー研究主務。システムモデリング技術、メカトロ製品の性能検証・設計最適化、設計情報共有、品質工学応用などの研究・開発に従事。ASME会員。

System Engineering Lab.



森 俊樹 MORI Toshiki

研究開発センター システム技術ラボラトリー研究主務。協調設計技術、設計プロセス管理技術などの研究開発に従事。精密工学会、ACM会員。

System Engineering Lab.