民生機器開発における機能・構造モデルを用いた分散協調設計* (SysML 製品モデルと DSM を利用したモジュール設計プロセスの計画)

関 研一^{*1}, 西村 秀和^{*1}, 朱 紹鵬^{*2}, Laurent Balmelli^{*3}

A Module Design Approach Using Structural and Functional Modeling for Distributed Consumer Electronics Design Project

Kenichi SEKI^{*1}, Hidekazu NISHIMURA, Shaopeng ZHU and Laurent BALMELLI

^{*1} Graduate School of System Design and Management, Keio University
Hiyoshi 4-1-1, Kohhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa-ken., 223-8526 Japan

This paper describes the utilization of the product model by SysML as a joint platform for distributed design. We introduce a typical design process involving distributed design teams. In particular, this process allows a thermal design of cavities, i.e., air space inside the enclosure, in terms of flow rate, acoustic radiation resistance and so on. Then, we investigate a module-based design optimization approach defining cavity as a module to efficiently support such processes. Authors propose structural and functional modeling that enables all the distributed design sites to share the design information with the product model. Using this design framework, it will be possible to prevent performance defects due to physical coupling between modules, and thus, reduce the iteration of work.

Key Words : Global Engineering, Thermal Design, Consumer Electronics, Product Development Process, SysML, Simulation, Design Structure Matrix

1. 緒 言

近年, 世界各国でのローカルなマーケット需要への対応や, 専門化・高度化した要素技術の早期取り込み, 地域毎に異なる労働コストの最適選択の視点等から民生機器開発の国際分業が急激に増加している. 国際的な大規模分散設計プロジェクトにおいては, 大富⁽¹⁾が指摘する言語・文化の違い, 場所(時刻)の違い, の二点がプロジェクト遂行上大きな課題とされている. 一方, 本研究で取り上げる民生機器の開発に関しては, 同様の課題に加え, 構造は小規模であるものの分散設計サイトの数は比較的多く, かつ短時間での開発が強く求められている. このため, 分業時の QCD (品質, コスト, 時間) の確保が大きな課題となっている.

民生機器の分散設計プロジェクトでは, 従来の垂直分業体制と比較して, 国内での概念設計・機能設計と, 国外の複数の国で実施される各モジュールの詳細設計との間の情報伝達が十分ではなく, 図面等の限られた設計情報を個別にやりとりするにとどまる. また, モジュールの性能評価は, そのコンポーネントのみを切り出した条件下で行われるのみで, 製品全体としての機能を各モジュールの詳細設計に厳密に振り分けることができていない. このため, システム試作後に必要な特性が得られず, 再設計等の手戻りが生じる. 収斂性が悪い事例としては, 熱や騒音, 不要輻射等, 機器の内部空間としての場(以下, キャビティと呼ぶ)に関連する性能不良が多く見られる.

性能と品質がある定められた時間内に確保されるためには, 設計時に各モジュール間の相互作用を検討する必要があるが, 民生機器開発の領域ではまだ十分な設計マネジメントの方法が確立されていない. 労働コストや新規モジュール開発に対する投資抑制を目的に分散設計を進めているが, 超小型・薄型等難易度が高い設計では上

* 原稿受付 2011 年 10 月 13 日

^{*1} 正員, 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 (〒223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1)

^{*2} 正員, 浙江大学 エネルギーエンジニアリング系 (〒310027 中国浙江省杭州市浙大路 38 号)

^{*3} IBM Software Group U.S., Industrial Solutions CTO office, World-wide team
(〒242-8502 神奈川県大和市下鶴間 1623-14)

E-mail: h.nishimura@sdm.keio.ac.jp

述の通り綿密な摺り合わせが叶わないための再設計コストが無視できない場合が多くなってきている。概念設計から詳細設計までの設計者の思考履歴、意思決定手順をモデルとして記述、設計支援に用いようとする様々な研究が行われている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、梅田、富山らは、機能を挙動、状態との関係で表現する「FBS (Function-Behavior-State) モデリング」の枠組みを提案し、機能設計を支援する CAD 技術として提案している⁽⁶⁾。これらの手法は、本稿で課題としている設計構想段階での設計情報記述には好適であるが、分散設計サイトで行われる構造設計に対する具体的な詳細化手順に対しては必ずしも明確にはなっていない。製品システムに対して機能・構造の階層構造を表現する方法として、Balmelli、西村らは、SysML を用いたモデル駆動型システム開発の手法を提案している⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。そこでは、Operational view, Functional view, Physical view 等の多視点の観点から製品対象を共通のモデル表現にて記述し、設計のコンカレント性を高める工夫をしている。また、後藤、江口らは、要求管理から設計の詳細化において、SysML による多層的なモデル構造を検討し、複数の専門領域間で設計意図を共有することの効果を確認している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

このような問題に対して著者らは、各モジュール間の物理的なインタフェースを支配するキャビティを一つのモジュールと捉えることで、キャビティ特性によって決まる各モジュールの外部境界初期目標値 (Initial target values: ITVs) を分散設計サイトに分配する設計フレームワークを示した⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。さらに、国際的に分散する開発環境で、製品の放熱や静音に関する機能・構造の階層的な SysML 製品モデルを共有し、分散設計サイト毎に独立したモジュール設計を実現する具体的な詳細化方法を提案した⁽¹⁶⁾。

本論文ではさらに、キャビティ特性によって決まる各モジュールの外部境界条件である ITVs を機能設計段階で定量的に算出するためのシミュレーションモデルを、SysML によって記述した製品モデルから導出する方法を示す。また、モジュール間の物理的な連成を表す機能・構造モデルと設計タスク DSM (Design Structure Matrix) を互いに参照し、ITVs 更新のためのタスク間制約を設定する。これによってプロジェクト進捗中に ITVs が常に更新され、システム全体としての熱的特性およびコスト制約に対する準最適解が導出可能であることを示す。

2. SysML による機能・構造モデリング

本章では、まず民生機器の放熱設計を対象として、システムモデリング言語 SysML を用いることにより、機能および構造モデルからなる製品モデルを導出する。製品全体としての冷却機能を分散設計サイト間で共有するためにこの製品モデルを用いる。最初に機能設計のプロセスで、シーケンス図を用いることによりモジュール間のインタフェースを明確化し、そのインタフェース分析からシミュレーションモデルを導出できることを示す。さらに機能レベルから構造レベルへのシステム分解の際に、シミュレーションによって算出される ITVs (温度や流速等の初期値) を付加することによって、システムとしての外部境界条件を定量的に考慮したモジュール詳細構造の設計が可能となることを示す。また最後に、分散して実行される構造設計の進捗中に、モジュール設計とシステム設計のトレードオフを実現する設計タスク間連携を、パラメトリック図を用いて明確化する方法について説明する。

2・1 シーケンス図によるモジュール間インタフェースの明確化と機能モデリング

図 1 左上に、簡略化した民生機器の構造を示す。ここでは、回路基板、半導体、ストレージデバイスが筐体に格納され、内部空間のキャビティも含め、M1~M4 とキャビティの 5 つのモジュールからなる機器を想定している。これらのモジュール間の熱的なインタフェースを整理し、機能モデルとして、挙動連成マトリクス (BCM: Behavior Coupling Matrix⁽¹⁴⁾) と物理シミュレーションモデル (Physical Simulation Model) を導出する手順を図 1 にまとめている。なお、機能アーキテクチャー候補の妥当性の検証を目的としたシミュレーションに用いるモデルを、本論文では物理シミュレーションモデルと呼ぶ。

本研究で対象とする設計課題は前述のように放熱や静音、不要輻射 (EMC) 等、場に起因する問題である⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。従来からの、部品・モジュールの物理的な連結を基本にした物理シミュレーションモデルの構築に対して⁽²⁾、著者らのアプローチでは、エネルギー交換が生じる三次元的な場を一モジュールとして切り出し、キャビティの温度場、流れ場等の挙動を設計変数の関数として表現する。これによって、従来のモジュールに加えて、キャビティについても同様の設計コントロールが可能となる。場をモジュール化することによって、シーケンス図

等を活用したインタフェースの整理も容易になり、物理シミュレーションモデルの導出の効率化、Sys 製品モデルへの組み込みに繋げることができる。

図1左上に示した製品に対して、システム放熱の視点から機能モデルの導出を考える。先ず図中左下に M1～M4 およびキャビティのモジュール間のエネルギー交換を SysML シーケンス図によって整理した結果を示す。一般的な民生機器システムの放熱機能は、外気から空気を導入しキャビティ内に流路を形成、筐体の外部に排出する流体系と、モジュール間 (M1～M4, キャビティ) の伝熱系の二つの事象として捉えることができる。先ず流体系の事象に対しては、キャビティモジュールの仕様としてのシステムインピーダンス $S.I$ と、吸排気孔間の圧力差 ΔP 及び通気流量 Q_{flow} の関係式にてシステム流体特性が表現できる。一方、伝熱系については、各モジュール間の熱コンダクタンス $C_{mi mj}$ からなる熱バランス方程式を用いて表現する。また図では、M2 を例にエネルギー交換量を示しているが、流体系の方程式で決まるキャビティの流速 U_{sys} 、温度 T_{sys} は、図下の伝熱系の熱バランス方程式でも参照され、流体系と伝熱系はここで連成する。両式の係数部分は、シーケンス図で整理するモジュール間インタフェースと各モジュールの属性から導出できる。このようにして導出したシミュレーションモデルを使用することによって、各モジュールに分配する外部境界初期目標値 (ITVs) の定量的な見積りが可能となる。また、シーケンス図は BCM に変換することができ、物理シミュレーションモデルと合わせて設計対象の機能モデルを構成する。民生機器の設計においては、製品モデルとして 3DCAD 等の形状情報が主に用いられ、分散設計環境化でも形状データの共有を進める場合が多く見られる。一方、上述した SysML を用いた機能モデルによって、モジュールによる機能分担検討段階で十分なシステム性能検討が可能になり、その結果がモデルとして蓄積される。さらに分散設計サイトへの ITV の分配によって、次節で説明するシステム全体を考慮したモジュールの構造設計が可能になる。

Fig. 1 Functional modelling with Sequence diagrams

2・2 機能から構造へのシステム分解と感度解析によるトレードオフ⁽¹⁶⁾

図2に製品開発プロセスに従って詳細化されて行く設計データ（Design information）の一例を示す．前節で説明した機能設計段階からその後の具体的な構造設計まで、各モジュール毎に管理される属性の推移を表している．図中右側にはそれぞれの段階で利用するシミュレーションの種類も合わせて示している．

機能設計ではモジュール仕様（Module specification）として各モジュールの概略特性が整理され、システム分解の後、各分散設計サイトにて具体的な詳細構造が設計される．半導体モジュールを例にとると、機能レベルで整理されたモジュール総消費電力や熱容量等の情報を受け、構造設計としてはパッケージ内での詳細なチップサイズや三次元レイアウト、さらに放熱対策部品の有無等が検討される．他のモジュールも同様に、機能から構造へのシステム分解のプロセスを経て設計データが段階的に詳細化される．それらの結果 DV_n はモジュール内部設計変数（Internal design variables）として格納される．

本研究で提案するシステム分解の特徴は、物理シミュレーションモデルを用いて算出した ITVs を各モジュール構造の外部設計変数（External design variables）として内部設計変数と一体で管理する点となる．構造設計フェーズでは、各モジュールで達成すべき性能指標も具体化される．半導体モジュールの熱設計の場合、パッケージ内部の論理チップやメモリー等、それぞれ個別の温度制約を満たす詳細構造を検討する．この段階で適用するシミュレーションを詳細モジュールシミュレーションと呼ぶ．ITVs と、内部設計変数を入力として、温度制約が課された各部の温度を予測するシミュレーションツール構成になっている⁽¹⁴⁾．

法人や国境を越えた分散設計サイトでの独立した設計を進めながらも、機能モデルをもとに導出・分配された ITVs を用いることによって、各モジュール毎にシステム全体を考慮した構造設計が可能になる．しかし、上述の半導体内部の放熱対策部品のような各モジュール毎の熱対策、およびキャビティモジュールとしてのシステムレベル熱対策について、製品全体を俯瞰した上での性能・コストバランスの確保は、分散設計では特に難しい．本研究で目指す分散協調設計フレームワークのもうひとつの目的である．

		Design Information			
		PWB	Semicon	Cavity	Simulation
Functional Design process Structural Design process	“Module Specifications”	• Heat dissipation of PWB • Thermal conductivity • Capacity	• Heat dissipation of Package • Thermal conductivity • Capacity	• System Impedance (S.I.) • Acoustic emission efficiency	《Physical Simulation》 ⇒ Calculate “ITVs”
	“Design Variables” <i>(internal design variables)</i> <hr/> “ITV” <i>(external design variables)</i>	• Dimensions • Layer config. • Conductivities, Capacity • Chip layout U_{sys} T_{sys}	• Dimensions of chips etc. • 3D layout • Conductivities, Capacity U_{sys} T_{sys} T_b	• Fan spec. • Grille at openings • Geometry of cavity	《Detailed module Simulation》 ⇒ Use “ITVs” as boundary condition

Fig.2 Design information

次に、モジュール内部設計変数と、同じくシステムとしての振る舞いをコントロール可能な外部設計変数とを合わせて、システム全体での準最適化を目指す、感度解析を用いたトレードオフ設計の枠組みについて説明する。式(1)および(2)

$$\text{External sensitivity : } ES_{ji} = \frac{\partial P_{RQj}}{\partial ITV_i} \cdot \Delta ITV_i \quad (1)$$

$$\text{Internal sensitivity : } IS_{jn} = \frac{\partial P_{RQj}}{\partial DV_n} \cdot \Delta DV_n \quad (2)$$

を用いて感度 ES_{ji} 、 IS_{jn} を算出する。まず、詳細モジュールシミュレーションにて、外部設計変数 ITV_i および内部設計変数 DV_i を摂動させた際の性能要求 P_{RQj} の応答差分より微係数を計算する。それにコスト等も踏まえた設計変更候補 (ΔITV_i および ΔDV_i) を乗じることによってトレードオフ設計に用いる感度を求めることができる。分散設計サイトでは、場所とスケジュールの違いからシステム側の詳細な設計変数の把握が困難であるが、 $ITVs$ を介してモジュール外部感度の概略値が把握可能となる。前者の感度が高い場合はシステム側での対応が、後者が高い場合はモジュール内部設計での設計対応がシステム全体としては有利であることを示しており、各分散設計サイトで独立した設計を行いながら性能要求に対するモジュール内部・外部設計変更のトレードオフの判断が可能となる。

2・3 機能・構造モデルと設計プロセス

前節までに、製品を包括的に記述するモデルとして SysML による機能・構造モデルについて示した。実際の国際分業においては、この製品モデルを複数の分散設計サイトで共有し、製品開発プロセスに従って設計データを蓄積して行くことになる。図3に、上述した機能・構造モデルに、製品開発プロセスのフローチャートを加え、製品モデルとそれを構築する設計プロセスとの関係を示した。SysML 製品モデルとしては、図中左上のシーケンス図、部品構成や属性情報を定義する左下のブロック定義図、およびシミュレーションモデルにより製品全体の機能と構造が記述され、このモデルを用いて複数の分散サイト間で設計データが製品開発プロセスの進捗中随時共有されることになる。

各モジュール毎の設計タスクの視点では、まず、機能モデルにて算出されたモジュール外部境界初期目標値 ($ITVs$) を受け取り、詳細構造の設計に入る。モジュールとシステムのバランスを鑑み、適宜、感度解析と機能モデルを用いて $ITVs$ を更新する。全てのモジュール設計で実行されるこの機能レベルと構造レベルを跨ぐ一連のプロセスを SysML パラメトリック図で定義することにより、各分散設計サイトにおける設計タスク間の連携が明確化される。分散して実行されるが各モジュール設計が、SysML 製品モデルの共有を通してプロジェクト進捗に応じて適宜設計データを交換し、最終的にシステムとしての準最適解を導くことが可能となる。

図4には、図3中に示した(1) $ITVs$ の計算、(2) $ITVs$ の分配、(3)詳細設計・トレードオフ、(4) $ITVs$ の更新からなる4つのステップの設計タスク連携を記述したパラメトリック図を示す。

民生機器のモジュール構成としては、通信・チューナー・画像処理・音声処理・出力系・電源等の基本モジュールとそれらを構成する多くの小規模モジュール・部品から製品が成り立っている。管理が必要な分散サイトの数も少なくない。製品モデルと設計プロセスとの関係について、図3ではM1に関連する部分のみを図示しているが、分散設計プロジェクトの計画時には上述の4ステップを製品を構成する全モジュールについて定義する必要があり、この部分の効率的な設定方法については次章の実施例で詳述する。

Fig.3 Product model and Design process

Fig.4 Parametric diagram (SysML)

3. SysML 機能・構造モデルの熱設計プロセスへの適用

本章では、過去に実施された分散設計プロジェクトの設計履歴に対して、SysML 製品モデルを用いた分散協調設計フレームワークを適用し、その実用性や手戻り防止の可能性を検討する。特に、製品モデルとそれを開発プロセスの中で構築して行く設計タスクとの関係について考察する。モジュール間の物理的な連成を共有可能とした SysML 製品モデルに、分散設計サイトの設計タスク間依存関係を表現する DSM を組み合わせ、システム全体としての最適解を導くことが可能な分散協調設計プロジェクトの計画フローを示す。

3・1 Design Structure Matrix による設計履歴レビュー

図5に国際分業体制において開発された AV 機器の内部構造の概略を示す。リアルタイム画像処理を受け持つ System in Package (SiP) が実装されたオーディオビジュアル系の回路基板、およびその他基板やデバイスが冷却ファンによって強制空冷される放熱構造となっている。ここでは、同製品の設計履歴をもとに、前章で示した SysML 製品モデルを用いた分散協調設計手法を検証する。図6には、モジュール設計間のタスク連成の履歴をまとめた DSM の中に特にモジュール設計の手戻りが生じたことを示している。この分散設計プロジェクトでは、設計プロセスは次の順番で進んでいる。構想設計の後、機能設計段階で全体アーキテクチャーの検討が行われ、分散設計体制下で SiP、回路基板の詳細設計が続き各種デバイスの選定・調達も並行して行われる。その後、システムとして統合し、全てのモジュールを筐体の指定位置に設置し、設計プロセスは品質保証段階へと進む。

図6に示す DSM の行と列はそれぞれ設計タスクを示し、X印は設計データの依存関係を表している、つまり n 列のタスク n は同列に X 印のある各行のタスクにデータをインプットするという意味である。このプロジェクトのケースでは、最終的に熱設計が収束するまでに、関連するモジュール設計の手戻り（図6中国～④）が生じてしまっている。表1には設計履歴及びその手戻りの主要原因をまとめてある。なお、表中の Step # は図6の手戻り①～④に対応している。システム状態で SiP の内部構造の一部であるメモリーの温度上昇が問題となり半導体、回路基板の各モジュールの再設計が検討された。しかし、各モジュールの開発スケジュールの制約も大きく、最終的には内部流量増加のための筐体通風口の意匠設計のやり直し、内部各モジュールレイアウトの変更や基板への対策部品の追加等、コスト・重量面で必ずしも最適とは言えないシステム構成に収束した。つまり、手戻りに関する主な問題点としては、設計初期段階でのシステムとの相互作用を見越したモジュール設計目標値の設定と、システム統合フェーズでのコストや複数性能制約のトレードオフプロセスの二点にあると考えられる。従来の DSM を用いたタスクの組み換えによる設計プロセスの最適化⁽²⁰⁾のみでは現実的な解決が見込めず、モジュール間の物理的な連成状況を踏まえた各分散サイト間の設計タスク連携のしくみを新たに導入する必要がある。

Fig. 5 CE product system

Fig.6 Design Structure Matrix (Original)

Table 1 Design history for the thermal design iteration

Step#	Redesign history (unplanned iteration)	Initial design failure (root cause of iteration)
1	In the detailed design phase, one of the design targets (temperature of memory in SiP) could not be satisfied	—
2	The mechanical engineers began investigating design modifications such as considering a 3D layout of each module in the system, an additional fan, and a heat sink to the SiP that exceeds the temperature target	Poor trade-off handling between thermal and acoustics
3	Simultaneously, the PWB design group began investigating the possibility of making changes in the layout of LSIs and altering board manufacturing to improve thermal conductivity	Overestimation of radiation to the cavity, not optimal SiP/ASICs layout
4	SiP design groups considered redesigning package structures such as the as heat spreader installation and 3D layout inside the SiP to reduce thermal resistance	Overestimation of radiation to the PWB, inadequate heat spreading in package

Step# corresponds to the number in Fig. 5

3・2 シーケンス図と挙動連成マトリクス (BCM) の作成

まず、図5に示すモジュール構造に対して、システム冷却の視点から作成したシーケンス図を図7に示す。この製品の熱設計の視点で着目する機能モジュールは6個あるが、さらに前述のように各モジュールのインタフェースを支配するキャビティを7つ目のモジュールとして定義している。また、シーケンス図より変換した BCM を図8に示す。

試作後の品質試験で温度上昇が問題となった SiP については、モジュール設計段階では評価基板に実装され、オープンエア状態の条件下でパッケージ設計が進められていた。この境界条件が実際のキャビティ内環境、また他の素子も実装された基板等、システム状態でのモジュール周囲環境と異なることにより、SiP からの放熱を過剰に見積ることとなっていた。次節では、このような手戻りの要因を取り除くための、機能・構造モデルを用いた設計プロセス改善方法を検討する。

Fig. 7 Behavior model for a CE product

	ASIC1	SiP1	SiP2	PWB1	PWB2	Cavity	Enclosure
ASIC1		0	0	1	0	1	0
SiP1	0		0	1	0	1	0
SiP2	0	0		0	0	1	0
PWB1	1	1	0		0	1	0
PWB2	0	0	1	0		1	0
Cavity	1	1	1	1	1		0
Enclosure	0	0	0	0	0	1	

Fig. 8 Behavior coupling matrix (BCM)

3・3 機能・構造モデルを活用した熱設計プロセスの見直し

本論文で提案する機能・構造モデルを用いた設計プロセス改善は、システム性能を表現する機能モデルを用いてモジュール間挙動連成を各分散設計サイトで常に共有するアプローチをとる。そこで、初期の設計目標の導出・分配や、システムとしての制約条件摺合せのためのトレードオフプロセスの設定の際には、タスクベースの DSM に加えて、各モジュールの挙動連成を表す BCM を合わせて活用し、分散協調設計全体のプロセスを計画する。具体的には、前節で作成した図8の BCM と、設計タスク DSM をマッピングし、全てのモジュールに対して ITVs の分配から更新までの設計タスク連携を定義する。図9に示す機能・構造二階層 DSM を用いて、モジュール毎に挙動連成により関連性を持つ他モジュールのタスクを見極め、設計タスク連携の計画を立てる。プロジェクトリーダーが定義する分散協調設計のための新たなタスクフローは以下のとおりとなる：

- (1) 機能設計段階におけるモジュール間の相互作用を整理する SysML シーケンス図の作成。同図より導出される物理シミュレーションモデルを用いた各モジュールに分配する外部境界初期目標値 (ITVs) を決定するタスク。
- (2) BCM を参照する分散設計サイトへの ITVs を受け渡すタスク。
- (3) 各分散サイトにおけるモジュール内部・外部設計トレードオフのための詳細モジュールシミュレーションおよび感度解析を行い、そして、モジュールの再設計、または ITVs を更新するタスク。
- (4) 物理シミュレーションモデルでの ITVs 更新の妥当性を検証し、各サイトでのプロジェクトの進捗と BCM を参照した ITVs 更新値の再配分をするタスク。

前章の図3では M1 モジュールについてのみパラメトリック図による設定を示したが、モジュール数が多い民生機器の分散設計プロジェクト計画の際には、機能・構造二階層 DSM を用いて全へのモジュールに対して上述のタスク設定を行うことになる。

図10には、上記(1)～(4)のタスクフローを設計プロセスに設定したDSMを示す。図に示されるとおり、各モジュール設計では、仮決めされた外部境界初期目標値 (ITVs) に従いモジュールとしての詳細仕様が構造レベルで策定され、モジュール～システムトレードオフのプロセスにより必要に応じてITVsがアップデートされる。その際、システムとしての整合性は、物理シミュレーションモデルを用い機能レベルでその都度確認されるため、後のプロセスにおいては構造レベルでの手戻りは生じないこととなる。

実際の民生機器開発プロジェクトでは、全ての分散サイトの設計イベントに対して厳密なタイミング制御を行うことは困難であるため、上述のようにパラメトリック図による設計タスク連携の制約条件によって常にITVsの状態をオープンにすることにより、設計進捗毎に最適な設計仕様を決定し、最終的に妥当なシステム解に収束させることが可能となる。

Fig. 9 Behavior Coupling Matrix / Design task DSM

Fig. 10 Design Structure Matrix (Optimized)

図 11 には、再構築後の DSM をもとに、図 5 の機種設計プロジェクトの時間軸設計履歴（ガントチャート）を修正した設計フロー図の一例を示す。図の下部には、トレードオフの判断に用いる感度解析の結果も示している。同図によって、分散協調設計フレームワークによる手戻り防止の可能性を確認した結果、民生機器開発プロセスにおける以下の改善点が見出される。

- ① 定量的な外部境界条件（ITVs）の導入によって、従来の設計よりも最終システムに近い環境設定で、各モジュールの詳細設計が行われる。
- ② 感度解析を導入したことで、モジュールとシステムの双方で要求性能を満足する設計が検討できる。
- ③ 段階的に性能目標を満足させているため、手戻りが防止でき、システム試作後の再設計に伴うスケジュールの遅れが回避可能となる。さらに、表 1 に示した設計プロセス最終工程での大型ヒートシンク等の部品追加を中心とする熱対策と比較して、各モジュールレベルでの追加対策部品を必要としない効率的な設計仕様が導出可能となる。

- ・ SiP の設計ではパッケージ内部のインターポーザ基板の材料変更とともに、PWB 温度（ITVs）を変更
- ・ PWB の設計では、素子レイアウト変更と、キャビティ内の流れパターン・流速（ITVs）を変更

これらの各モジュール仕様の収束形態は、各分散設計サイト間での設計情報の流通が制限される従来の設計プロジェクト体制では得ることが難しい。本論文では、機能・構造モデルを用いた ITVs の配分とその更新を骨子とする分散協調設計フレームワークの有効性を示すことができた。

Fig. 11 Example of Flow diagram (Thermal design)

4. 結 言

分散する設計サイトの数が比較的多く、かつ短時間での設計が強く求められる民生機器の国際分業において、モジュールベースの設計を基本とするシステムチックな分散協調設計フレームワークを提案した。すなわち、商品を構成するモジュール間のインタフェースを支配するキャビティを1つのモジュールと捉え、積極的に設計コントロールし、分散設計環境下でも商品全体としての最適化を目指すために、各モジュールに外部境界条件の初期目標値 $ITVs$ を分配し、早期にシステム全体を俯瞰したモジュール設計を可能にする新たな枠組みを提案した。

従来、設計情報共有に活用されていた 3DCAD をベースとする構造の形状データに加え、機能アーキテクチャーの検討から詳細な構造設計までの情報がモデルとして蓄積される SysML 製品モデルを開発プロジェクト全体で共有し、分散設計で生じる不要な手戻りを回避できる可能性を示した。

機能モデルから導出するシステム全体を評価する物理シミュレーションモデルにより、分散設計サイトに配分する ITVs を精度良く算出することができ、各モジュールの詳細設計パラメータとシステムレベルの設計仕様を感度解析によりトレードオフ可能とした。そして、ITVs の分配から更新までの一連の設計タスクの連携をパラメトリック図で表現することで、各モジュール毎の設計進捗に依存せず、設計プロジェクト進捗中リアルタイムで商品全体の性能レファレンスを参照できる環境を実現できることを示した。そして、開発したフレームワークを過去に実施された国際分散設計プロジェクトの設計履歴に適用し、同手法の実際の分散設計プロジェクトへの適用方法と有効性を検討した。

機能・構造モデルをもととした本提案手法は、本論文で示したハードウェアのみならずソフトウェアも含む製品設計全体への適用が可能と考えている。今後は、実際の製品開発プロジェクトへ適用範囲を拡大し、本提案手法の妥当性を検証するとともに、必要に応じて改善したい。

謝 辞

研究成果は文部科学省グローバル COE プログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」によるものであることを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) 大富 浩一, “国際協調プロジェクトにおけるコンカレント製品開発”, 日本機械学会 設計工学・システム部門講演会講演論文集, (2003), pp. 454-456.
- (2) 手塚 明, “上流設計と実験, 計算工学をつなぐ ID-CAE”, 設計工学, Vol.45, No.6 (2010), pp. 264-272.
- (3) 野間口 大, 下村 芳樹, 富山 哲男, “設計者の思考過程のモデルを利用した設計知識管理システム”, 人工知能学会論文誌, Vol.45, (2005), pp. 11-24.
- (4) 藤田喜久雄, 菊池慎市, “分散協調型設計支援システムのためのプロセスモデルと操作モデル (第 1 報, プロセス構造についてのモデル)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.666 (2002), pp. 657-665.
- (5) 吉村 允孝, 藤見 善久, 泉井 一浩, “評価特性の相互関係に基づく意思決定順序最適化手法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No.668 (2002), pp. 1310-1318.
- (6) 梅田 靖, 富山 哲男, 吉川 弘之, “機能設計支援のための FBS モデリングの提案”, 精密工学会誌, Vol.63, No.6 (1997), pp. 795-800.
- (7) Balmelli L., “An Overview of the Systems Modeling Language for Products and Systems Development”, *The Journal of Object Technology*, Vol. 6, No. 6 (2007), pp. 149-177.
- (8) 西村 秀和, “モデルベースシステムズエンジニアリングと SysML への期待”, 設計工学, Vol.46, No.5 (2011), pp. 241-246.
- (9) Zhu S., Nishimura H., Balmelli L., “System Integration of Motorcycle Driving Stability Control Using SysML”, *Proc. of 3rd Asia-Pacific Conference on Systems Engineering*, (2009), pp. 1-10.
- (10) 江口 隆夫, 後藤 禎, 古賀 毅, 青山 和浩, “複合製品における段階的な要求モデルの定義に基づく設計変更の影響分析”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771 (2010), pp. 2772-2781.
- (11) 後藤 禎, 江口 隆夫, 古賀 毅, 青山 和浩, “製品の論理構造を基にした製品要求のモデリング (SysML を利用した機械・回路・ソフト複合製品のモデル駆動型設計支援)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771 (2010), pp. 2754-2763.
- (12) Seki K., Nishimura H., Ishii K., “Optimal thermal design for Consumer Electronics: A Simulation based unplanned iteration management”, *Proc. of the Asia-Pacific Conference on Systems Engineering (APCOSE 2008)*, (2008), Paper#MA33
- (13) Seki K., Nishimura H., Ishii K., Balmelli L., “Thermal/Acoustic trade-off design for Consumer Electronics in a distributed design environment”, *Proc. of The International Council on Systems Engineering (INCOSE 2009)*, (2009), 0723.pdf.

- (14) Seki K., Nishimura H., “A module-based thermal design approach for distributed product development”, *Research in Engineering Design*, Vol. 22, No.4, (2011), pp. 279-295
 - (15) 関 研一, 西村 秀和, 大富 浩一, “国際分散設計環境下での協調設計手法の研究 一場をモジュールとして取り扱う民生機器放熱静音設計”, デザインシンポジウム, (2010), dss10-0102.pdf.
 - (16) Seki K., Nishimura H., Zhu S., Balmelli L., “A Parametric Design Framework to Support Structural and Functional Modeling of Complex Consumer Electronics Products”, *Proc. of International Conference on Engineering Design 2011(ICED11)*, (2011), pp. 282-291.
 - (17) Kimber M., Suzuki K., Kitsunai N., Seki K., Garimella SV, “Pressure and flow rate performance of piezoelectric fans”, *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions*, Vol.32, No.4 (2009), pp. 766-775.
 - (18) Lee, M., Bolton, J., Yoo, T., Ido, H., Seki, K., “Fan Noise Control by Enclosure Modification, *Proc. of Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, (2005)
 - (19) Yamauchi T., Seki K., Minorikawa G., Hasegawa S., Mechanical design for sound quality improvement of audio visual equipments, *Proc. of the 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, (2010), 852.pdf
 - (20) Ulrich, K.T. and Eppinger, S.D., *Product Design and Development* (2007), p. 336, McGraw-Hill, New York, NY
-