

中間特性と抽象化モデルを活用した  
モデルベース開発手法に関する研究

(A Study on Model-based Development Method  
Utilizing Intermediate Property and Abstracted Model)

広島大学 工学研究科  
システムサイバネティクス専攻  
D190148 中村幸宣

2021年11月

# 目次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第1章 序論.....                        | 1  |
| 1.1 研究背景.....                      | 1  |
| 1.2 モデルベース開発手法の現状.....             | 3  |
| 1.3 本論文の章構成.....                   | 7  |
| 第2章 中間特性に注目したモデルベース開発手法.....       | 8  |
| 2.1 緒言.....                        | 8  |
| 2.2 機能で考える階層化（中間特性法）.....          | 12 |
| 2.2.1 機能の捉え方.....                  | 12 |
| 2.2.2 機能で考える階層化.....               | 13 |
| 2.2.3 各階層での機能ブロック図表現.....          | 14 |
| 2.2.4 各機能ブロックでの定式化と中間特性の抽出.....    | 16 |
| 2.2.5 機能ブロック図からのモデル化と目標割付.....     | 20 |
| 2.3 事例1：ドライバー.....                 | 22 |
| 2.3.1 手順と検討結果.....                 | 22 |
| 2.3.2 考察.....                      | 43 |
| 2.4 事例2：車両運動性能.....                | 44 |
| 2.4.1 手順と検討結果.....                 | 44 |
| 2.4.2 考察.....                      | 52 |
| 2.5 結言.....                        | 54 |
| 第3章 抽象化モデル.....                    | 56 |
| 3.1 緒言.....                        | 56 |
| 3.2 機能で考える階層化の最上位で用いる「抽象化モデル」..... | 59 |
| 3.2.1 抽象化によるモデル作製.....             | 59 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.2.2 抽象化エネルギーモデル .....                  | 59  |
| 3.3 事例：エアコンディショナー .....                  | 62  |
| 3.3.1 手順と検討結果 .....                      | 62  |
| 3.3.2 考察 .....                           | 73  |
| 3.4 結言 .....                             | 74  |
| 第4章 周波数領域における抽象化モデル .....                | 75  |
| 4.1 緒言 .....                             | 75  |
| 4.2 音／振動領域への適用のための手法の拡張 .....            | 75  |
| 4.2.1 周波数領域における抽象化エネルギーモデル .....         | 76  |
| 4.3 事例：エンジンシェイク .....                    | 81  |
| 4.3.1 手順と検討結果 .....                      | 81  |
| 4.3.2 考察 .....                           | 91  |
| 4.4 結言 .....                             | 93  |
| 第5章 結論 .....                             | 94  |
| 参考文献 .....                               | 98  |
| 付録 .....                                 | 101 |
| A. システムズエンジニアリング，およびそのシミュレーションとの融合 ..... | 101 |
| B. 機能での分解とモノ（モジュール／ユニット）での分解 .....       | 104 |
| C. すり合わせ型アーキテクチャとモジュール型アーキテクチャ .....     | 106 |
| D. ブロック図，ツリー図 および 二元表 .....              | 108 |
| E. 機能（Function）と性能（Performance） .....    | 110 |
| 引用既発表論文 .....                            | 111 |
| A. 学術論文誌等掲載論文 .....                      | 111 |
| B. 国際会議講演論文 .....                        | 111 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| その他既発表論文.....      | 112 |
| C. 学術論文誌等掲載解説..... | 112 |
| 謝辞.....            | 113 |

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

わが国の製造業が栄華を誇った時代は「欧米の優れた製品に対して追いつけ追い越せ」という目標があり、良い品質の製品を安く作れば売れた時代であった。

しかし、消費者は生活必需品という観点ではすでに欲しいものは持っており、求められるのは「新しい価値」である。消費者の嗜好はどんどん変化・高度化するため、それを先取りして対応できなければ会社として生き残れなくなっている。すでに成熟した「家電製品」の分野で消費者の嗜好を先取して対応した数少ない例として、例えば英国 Dyson 社（掃除機、扇風機、ドライヤー等）やバルミューダ株式会社（扇風機、トースター等）などを挙げることができるが、これらの会社では経営者の強い個性の寄与が大きそうであり、個人に依らない一般化できる手法が求められる。

消費者ニーズの高度化に伴って、製品はどんどん複雑化・高度化する傾向にあり、特に制御システムの複雑性は増加の一途をたどっている。そのため「不十分な検討→不具合→対策に追われてまた不十分な検討」という「手戻りによる負のスパイラル」から抜け出すのが困難になっている（Fig. 1.1）。すなわち従来の「モノを試作して検証&調整」という開発方法では、もう対応できない状態になっていると言える。この手戻りを減らすために「事前に十分に検討する」こと、すなわち「フロントローディング」が求められて久しい。この「フロントローディング」のために「モノを試作」する前に検証する方法としていわゆる CAE(Computer Aided Engineering)という「シミュレーションによる仮想検証」が 1990 年代より 3D CAD と共に本格的に普及して今日に至っているが、これは 3D 形状ありきの手法となっているため、設計が終わってから実機試作の前に活用するのがその大きな役目となっており「検討のフロントローディング」に対しては大きな寄与は望めない（後の 2.1 にて詳細を説明する）。さらに昨今この手戻りの要因として大きな割合を占めていると思われるのが、複数部署間の連携不足である。製品の複雑化に伴ってますます専門分化が進み、多くの部署・多くの技術者が製品開発に関係する必要性が高まっているが、自分の専門分野以外のことがわからないために、全体俯瞰をして重点を捉えた開発を進めるのがますます難しくなっている。

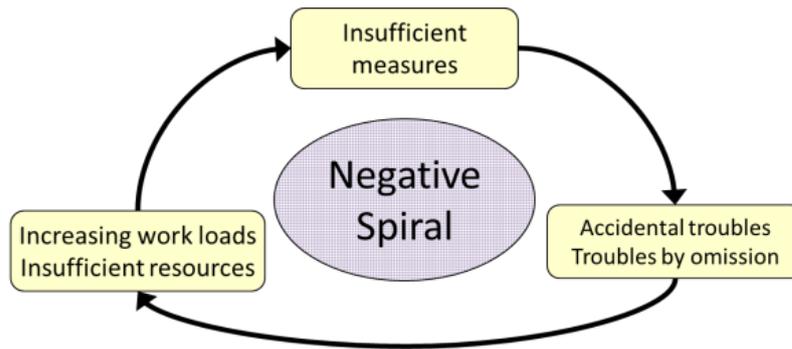


Fig. 1.1 Negative spiral in Product development

こうした状況の中、「ものづくり白書 2017」で謳われたように、エンジニアリングチェーンおよびサプライチェーン全体を結び付ける「デジタルトランスフォーメーション(DX)」に取り組む重要性と、「システムズエンジニアリング(システム工学:SE) ([1], [2], 付録 A)」に基づいた「システム思考」を取り入れて「木を見て森も見る」考え方,すなわち「システム設計」を実施する重要性が注目されてきた[3].

上記の DX のうち,特にエンジニアリングチェーンを改革する手法である「モデルベース開発(MBD)」は,SE の階層的 V 字開発プロセスの考え方を製品の制御開発に適用し,シミュレーションモデルを活用しながら制御システムを開発する手法として広まったものである[4]. 近年はその適用範囲をハードウェア(メカ系)ユニットにも広げ,製品開発全体を階層的に,モデルを用いて開発しようとする広義の MB D の取り組みが活発になっている[5], [6], [7], [8]. 本論文では,この広義の MB D を対象とする. その目的は大きく分けて 2 つある.

1) モノを作らずにモデルで開発検討を進めることで,手戻りを削減し,開発費用と時間を大幅に節約しようという「効率化」の観点.

2) 製品への要求を的確に製品開発に落とし込むことで,従来なかった新しい価値を持った画期的な製品を開発することを,創業者社長のような一部の天才に頼らずに,工学の素養をもった一般の技術者がシステムチックに実施するという観点.

## 1.2 モデルベース開発手法の現状

これらの目標を達成するためには、現在一般的な MBD の考え方をさらに進めて、「SE の階層化の考え方」と「シミュレーションモデルを用いた製品開発の考え方」を適切に融合させることが重要である。しかし、製品開発全体においてこれらの考え方をうまく融合させることは、まだまだ道半ばであり、世界的に見ても著しい成果が出ているのは限定した分野に限られている。例えば、SE、MBD の先進地域である欧米の製造業で SE を推進している技術者らに著者がインタビューした結果、欧米においてはエンジニアリング領域においても分業化が進み、SE を推進する「システムズエンジニア」とシミュレーションによる検証を実施する「アナリスト」とが完全に分かれてしまっているため、業務をうまく融合させるべきと言うモチベーションが働いていない、という知見を得ている。すなわちシミュレーションを伴う階層化手法として体系だったものは世の中に存在しないと云える（付録 A）。

さらに、日本の製造業の多くの会社との対話を通して、日本の製造業において SE の考え方が広まりにくい要因を考察し、以下の2つポイントにまとめた。なお、以下の説明における「機能」と「モノ {モジュール/ユニット}」との違い／考え方については、付録 B を参照されたい。

1) SE においては、要求を達成するために必要な「機能」に落とし込んで、それを実現するためのモジュール/ユニットの開発をする、という考え方が非常に重要である。ソフトウェアのような「モジュール設計」が容易なものは、その機能とモジュールとを「1対1」にすることができるために、SE の適用も容易である。それに対して日本が得意とする「ものづくり」の象徴である（自動車などの）「すり合わせ型アーキテクチャ」の製品 [9]は、機能とユニットとを1対1には対応させられず、一つの機能を複数のユニットで実現させたり、一つのユニットが複数の機能を果たしたりすることが当たり前になっているために、開発している担当者たちも機能とユニット/部品との対応関係を正確には把握していないことが多く、SE を適用するハードルが非常に高い（Fig. 1.2, 付録 C）。

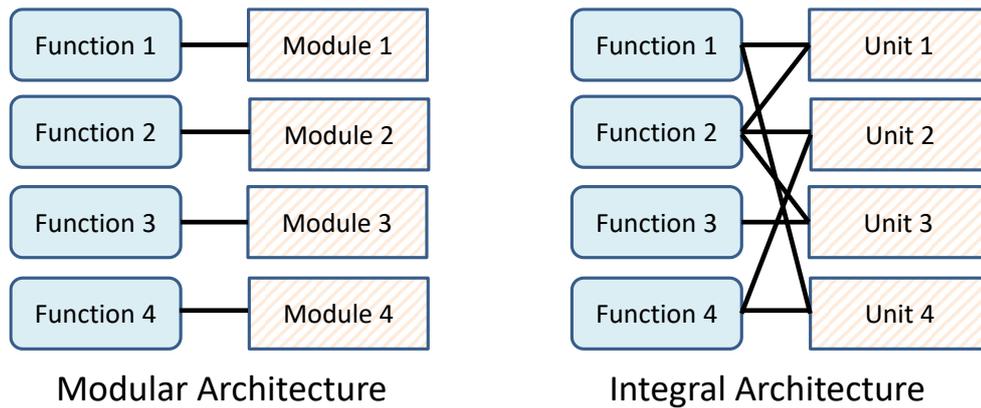
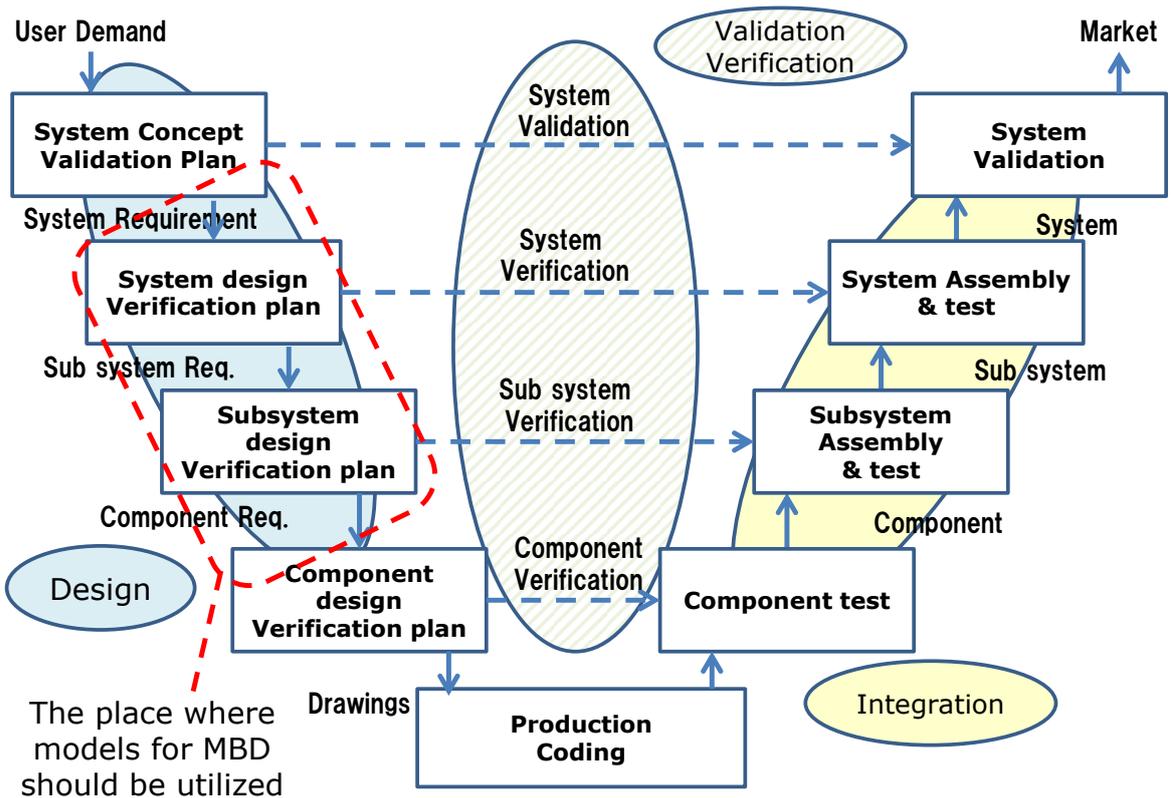


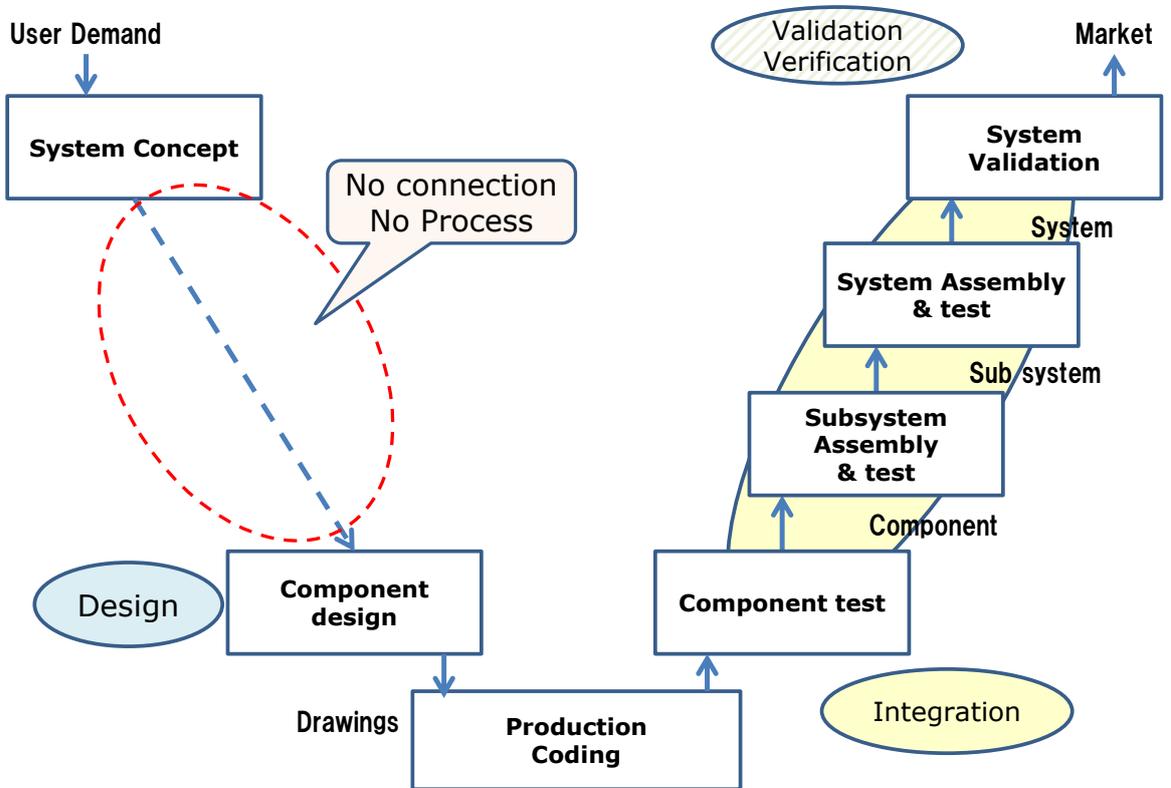
Fig. 1.2 Relations of functions and modules/Units

2) 日本の製造業の多くの会社は、歴史的に「欧米で開発されたものをうまく真似して、より品質の良いものを安く作る」ことに力を注ぐことで成功し、それによって「Japan as No.1」とまで言われる状態を作り上げてきたが、その成功体験がシステム思考での製品開発に舵を切るのを妨げている[10]. Fig. 1.3 に、著者が多くの日本の製造業の会社からヒアリングしてまとめた典型的な日本の製造業の会社の開発プロセスを、一般的な SE の V 字プロセスと比較して示す. このプロセス図(b)の意味するところは「『何のために、どういう構成で作るべきか』を自分たちで考えて、それを仕様に落とし込む」という V 字プロセスの左側の「システム設計」の部分に力を入れずに、開発目標が決まったら従来製品をベースにした詳細設計から始めてしまうということである. すなわち V 字の左側では目標と詳細設計との繋がりが事実上ないことになるが、それでも V 字右で試作&修正を高速で実現できる日本の製造業では、それで競争力のある製品を世に出せていた（これを「ン字」プロセスと著者は呼び、多くの会社の技術者から共感を得ている）. こうした開発の過程で設計資産として残るのは「図面」のみであり、設計検討の過程や考え方などの「設計意図」が残らない. ベテランの退職に伴って開発の知見が失われるという問題が特に日本で顕在化しているのは、この開発プロセスに依るところが大きいと著者は考えている.

こうした理由のため、多くの日本の（ソフトウェア以外の）製造業においては、システム的に要求を仕様に落とし込んで製品を開発するという SE の考え方を導入するだけで大変であり、そこにうまくシミュレーションを融合させる努力は、ようやく広まり始めたところである. 例えば日本機械学会においては、2019 年度より「1DCAE・MBD シンポジウム」を開催して、MBD とそこで使用するモデルのあり方を議論し始めた[11].



**(a) General SE V-Process**



**(b) Japanese Typical Process**

Fig. 1.3 Japanese development process compared to SE V-process

よって、現状を打開するためには、以下の課題に対して取り組む必要がある。

- 1) 製品への要求を、工学的に定量的に製品目標に落とし込む仕組みを持つこと
- 2) 定量的な製品目標に基づいて、目標を達成できるかどうかを「モノを作る前・詳細仕様を決める前」から階層的にシミュレーションにて検討し、目標を割付けることができる仕組みを持つこと
- 3) 上記2つの仕組みは、単純作業等の省力化を図ることはもちろんであるが、いたずらに自動化を進めて設計者が考えなくなる方向ではなく、要求を満たすための設計意図をしっかりと明示し、それらを部署間でお互いに照会しあって議論ができることで設計者がエンジニアとして成長することを後押しすると共に、その情報を残すことで後世のエンジニアへの伝承に役立つものであること
- 4) 上記2つの仕組みが、従来製品の改良の域を脱して「画期的な機能」を持ったものを検討できる仕組みであること

### 1.3 本論文の章構成

そこで本研究では、SE の基本と工学的知見の活かし方、およびシミュレーション技術の基本に立ち返り、「すり合わせ型」製品に代表される「(ソフトウェア以外の)モノの開発」へ適用可能な MBD の手法を構築する。さらに事例を通してその手法の有効性を評価する。その構成を以下に示す。

第 1 章では、本研究の背景となる日本の製造業の危機について述べ、それを解決する一助となりうる MBD とそのベースの SE について、欧米と日本での現状の問題点を考察し、それらを克服するための 4 つの課題を示す。

第 2 章では、4 つの課題を解決するために、MBD と工学的知見に基づく製品開発のあるべき姿を示す。具体的には、要求を満たす機能を階層的に分解しながらブロック図で表現し、ブロックの中身を定式化して「中間特性」を抽出し、それをモデルに結び付ける手法を提案する。さらに事例にてその有効性を検証する。

第 3 章では、4 つ目の課題を効果的に実現するために第 2 章で提案した手法に付け加えるべき「抽象化」の考え方と、そこで用いるシミュレーションモデルについて提案する。さらに事例にて有効性を示す。

第 4 章では、第 3 章の抽象化手法を周波数領域での検討に拡張する方法を述べ、事例にて有効性を考察する。

第 5 章では、本研究の総括、本研究が浸透した場合の製品開発の将来像、および今後の研究展望について述べる。

# 第 2 章 中間特性に注目したモデルベース

## 開発手法

### 2.1 緒言

変化・高度化する消費者の嗜好に対応し、新しい価値を提供するために、製品はますます複雑化・高度化する傾向にあり、製造業は、それに起因して発生する不具合による手戻りで負のスパイラルに陥っている。第 1 章では、SE の階層的開発の考え方をを用いてシミュレーションモデルを活用しながら開発する手法として広義の MBD が取り組まれているが、まだ成功例は多くなく、その原因は主に「すり合わせ型という製品構成の特徴」と「日本型の製品開発のプロセス」にあることを述べた。本章ではより具体的に開発の考え方・手法としての課題を分析し、その解決のための新しい手法を提案する。その議論の中心は、V 字プロセスの左の上方に当たる「システム設計」の領域とする。

本来全く別分野であった「ものづくりの技術(Technique)」に「科学(Science)の知識」を取り入れて「工学(Engineering)」と呼ばれるものができたのは 18 世紀末のフランスからだと言われている[10]。日本で欧米の工学を取り入れ始めたころには、当然シミュレーション技術などと言うものは存在しないので、科学を基にした理論（数式）を使って、手計算あるいはソロバンで性能のあたりをつけながら設計をしていたはずであり、それが「工学的知見を用いた製品開発」の原点である。当時の製品は Fig. 1.3(a)の V 字プロセスを使うほどには複雑ではなかったと推察されるが、この理論計算は V 字プロセスでは左上に当たる。その後、計算機の発達とシミュレーション技術の進展に伴って理論計算での予測精度はどんどん上がって手計算に変わるようになったが、「1.1 研究背景」で述べたように、このシミュレーションが 3D CAD と結びついて 3D CAE と呼ばれるようになると、詳細な形状を決めないと計算ができなくなった。これは、V 字の右の試作検証を仮想的に実施することを意味する (Fig. 2.1 (a))。その頃には製品の複雑化によって、手計算では製品全体の性能を予想するのも難しくなっていき、工学知識は「製品の仕様を決めて行く (V 字左)」際に使うのではなく「仕様を決めた後の検証 (V 字右)」に使うのが主流になったと言える。工学的な知見を基にしたシミュレーションモデルを使って、SE の V 字プロセスの左を階層的に下ろうとする MBD は、言うなれば昔の手計算を現代のシ

ミュレーションモデル化技術を使って復権させ、複雑な製品開発にシステマチックに適用できるようにする試みと言うことができる。そのためには「各階層で検討するためのミュレーションモデルが必要」であることがわかる (Fig. 2.1 (b)) .

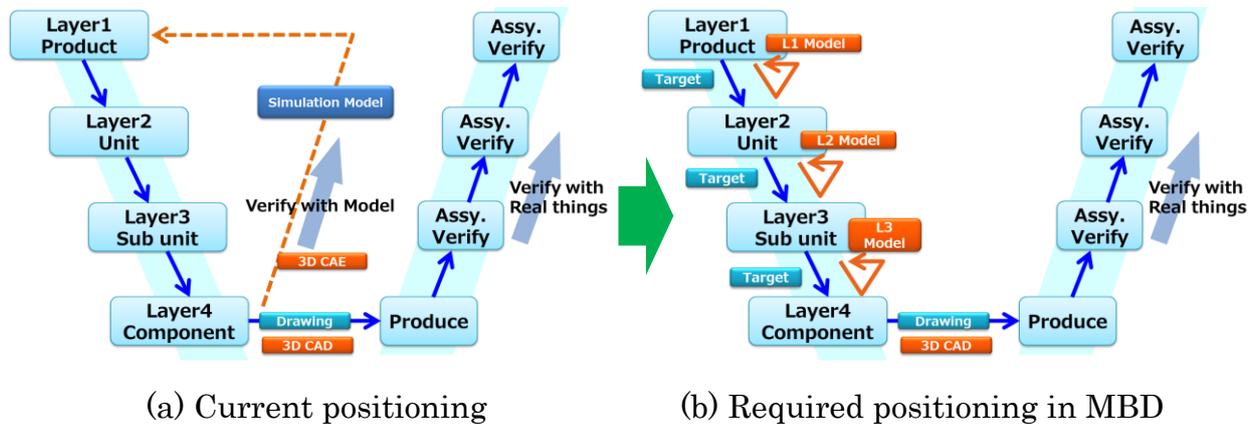


Fig. 2.1 Positioning of Simulation models in V-process

さて SE で階層化する際には、目的志向で「機能で」分解しなければいけないということが提唱されている[1], [2]. しかし SE のフレームワークでは、その具体的な方法が説明されていないため、特にすり合わせ型の大量生産製品に適用した先行例ではその SE の考え方が失われて、ほとんどが既存のユニットや部品 (モノ) ベースで階層化されており、その効果も限定的なものとなっている[12], [13]. この原因は大きく2つ考えられる。

1つ目は、Fig. 2.2 に示すように、既存の製品をシステムと捉えて分解する際には、「モノ (ユニット/モジュール)」でグループ化して分解するのが手っ取り早く、設計者には理解しやすいことが挙げられる。低コストと短期間での開発を強いられる大量生産品の開発では「派生品」の開発がメインになっており、基本機能を考えずに既存の製品やそのモデルをベースに検討することが習慣になっていて、SE/MBD を適用する際にもこの考え方が抜けないということである。そのため階層化は「モノ」ベースになり、新しい技術を持ったアイテムを導入する場合にも「アイテムありきの積み上げ方式」で検討してしまうことになる。すると、結局は細かいチューニングしかできないので、開発の効率化にはなるとしても性能向上への効果は小さい [13].

2つ目は、第1章でも述べたようにすり合わせ型アーキテクチャの製品では機能とモノとが「多対多」で複雑に対応するため、これらを分離して機能で分解する難度が高いこ

とである。それゆえ、機能分解のコツを知らない技術者が「機能で考えるべき」と考えたとしても、それを実施するのが途方もない労力を要すると感じてしまって実行されないことになる。

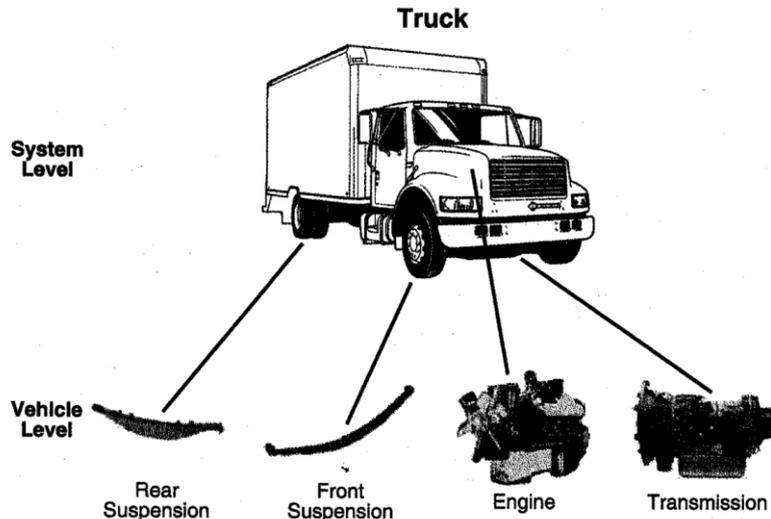


Fig. 2.2 Model Hierarchy of U.S. truck (Ref. [12])

また、MBD でよく用いられる 1D シミュレーションのモデルでは、階層的に分解したものを、また統合してひとつの大規模なモデルを作製する傾向がある。これは精度を求めするために計算も重くなりがちで、また最適パラメータを自動的に見つけようとするために細かいパラメータを入力するべく作り込まれたものが多く、パラメータ数が膨大になって検討に多大な時間がかかるものが多い[12], [13]。「System Simulation」あるいは「Holistic Simulation」という名前を付けた研究でも、理論モデル・数値計算モデル・実験モデルを組み合わせる壮大なモデルを作製した例も見られる[14]。このようなシミュレーションモデルの精度と解析時間とのトレードオフは、昔から議論の種であるが[15]、こうした大規模なシミュレーションモデルは、開発者が階層的に考えずとも設計できることを狙ったものであり、Fig. 2.1 では(b)でなく(a)に近いものとなる。こうした統合化したシミュレーションモデルで検討した場合には、設計意図は残らず、単に「この設計パラメータをこの値にした」という結果しか残らない。

そこで本章では、「機能で適切な粒度に階層化」して、目標を「機能の特性」に割付けながら各階層でシミュレーションして製品を開発する手法を提案し、これが上記の問題を解決することを示す。この「特性」が目標として階層間を仲立ちするという意味で、本手法を「中間特性法(Intermediate property-targeting method)」と名付けた。

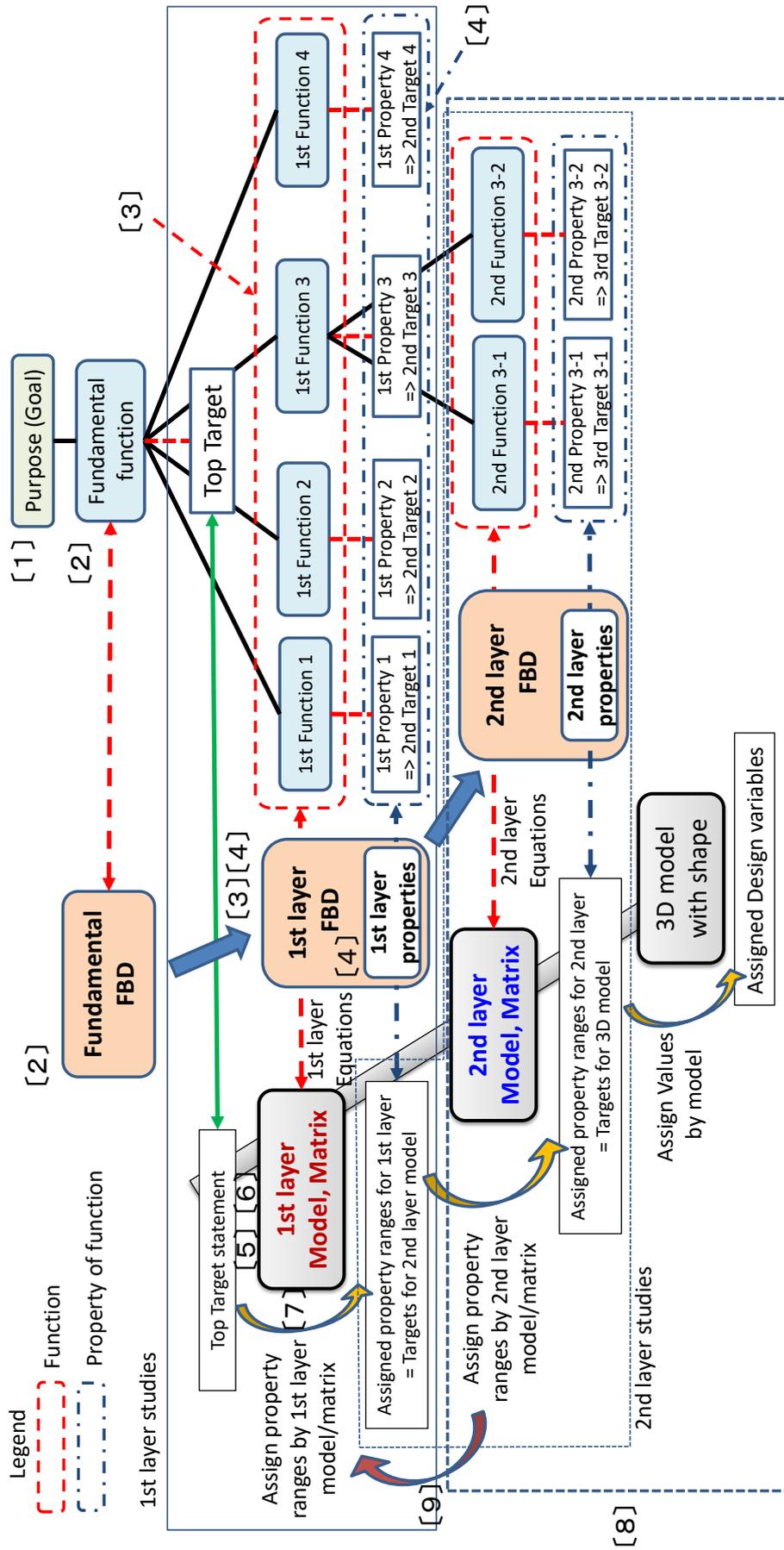


Fig. 2.3 General view of “Intermediate property-targeting method”

## 2.2 機能で考える階層化（中間特性法）

SE のフレームワークには階層構造を示すツリー図と階層内の関係性を示す機能ブロック図（FBD）が含まれている（付録 D）が、それらの具体的な作り方・使い方には触れられておらず、効果的に使うための方法は自ら考えなければならなかった。著者は FBD を軸としてこの 2 つを一緒に作りながら階層化する手法を構築した。その全体像を Fig. 2.3 に示す。Fig. 2.3 中の [ ] 内の数字は以下の本文の手順との対応を示す。

なお以下の説明は「新規開発（実現方式=アーキテクチャも変わる可能性がある）」を想定して、階層ごとに検討の仕組みを作りながら検討を進めて行く手順を示している。

「派生開発」ではアーキテクチャは決まっているので、検討の仕組みを先に作り上げることが可能である。そして派生機種では、前の機種での検討の仕組みがあればそれをほぼそのまま利用することもできる。

### 2.2.1 機能の捉え方

〔手順 1〕顧客要求と目標ステートメント

顧客の声を分析し、製品に対する目標をステートメントとしてまとめる。ステートメントには条件・目標値を記述するが、手段は記述しない（ステートメントのイメージは「2.3 事例 1：ドライバー、2.4 事例 2：車両運動性能」を参照されたい）。

〔手順 2〕基本機能の定義

目標ステートメントを達成するための基本機能(Fundamental function)を機能ブロック図(Function Block Diagram[FBD])としてまとめたものを Fig. 2.4 に示す。

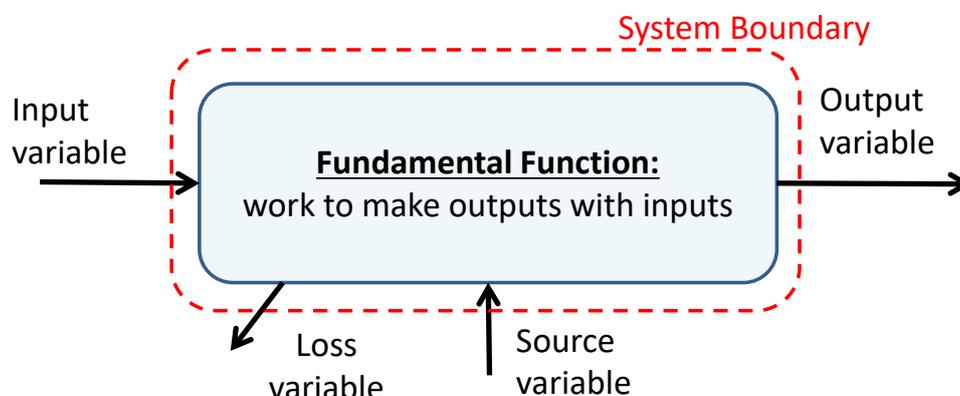


Fig. 2.4 FBD for Fundamental function

「機能(Function)」は「〇〇を△△する」と記述し、「入力を出力に変換する働き」を表す。「性能(Performance)」と混同されがちであるが、性能は「機能が働いた結果の数値」である(付録 E)。機能ブロック図とは、機能の箱を描き、その関係性を線でつないで表現するものである(付録 D)。本手法では、その入力(Input variable)、出力(Output variable)、駆動源(Source variable)、損失(Loss variable)を矢印で記すことをその基本的な使い方とする(Fig. 2.4)。そしてその矢印が示す物理変数を単位を含めて明示し、その後の定式化につなげる。また、開発する対象以外も一緒に機能ブロック図に示す場合もあり、その際には開発対象範囲(System Boundary)を明示することも重要である。

### 2.2.2 機能で考える階層化

「基本機能を実現するために、どのような原理を組み合わせるのか」という観点で、基本機能をサブ機能に分解する。これが Fig. 2.3 の右側の 1 階層目の分解となる。第 1 階層の機能をさらに分解すると第 2 階層の機能となる、という形で機能を階層化してゆく。この際には、各階層の粒度のコントロールが重要である。ツリー構造だけで分解の検討をすると細かく分解しすぎる傾向があり、また抜け漏れが発生しやすくなる。分解した機能間の関係性を考えながら、次項のように、先にブロック図を描くことで、粒度をコントロールし、また抜け漏れを減らすにも有効である。なお、モノではなく機能で分解するという意味については、付録 B を参照されたい。

以下に機能の分解について述べるが、特に第 1 階層の粒度(抽象度)が重要であり、抽象度を高くすることで、取り扱う現象の本質を捉え、また少ないパラメータで検討できるので見通しが良くなる。この抽象度を最高に高める方法は、第 3 章にて説明する。

## 2.2.3 各階層での機能ブロック図表現

〔手順3〕機能分解

基本機能を分解した FBD を描く (Fig. 2.5) . これが Fig. 2.3 の「1st layer FBD」に相当する.

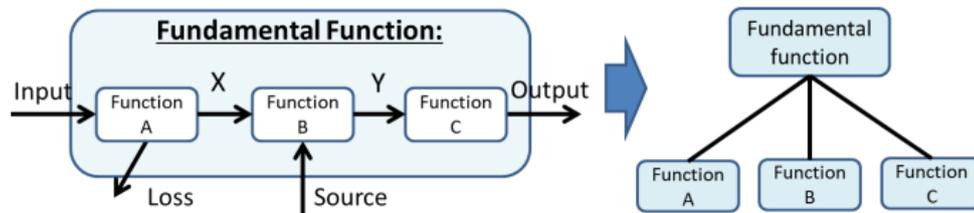


Fig. 2.5 FBD and Tree diagram for Decomposition of Fundamental function

この際には、ある特定のアーキテクチャ（実現方式）をイメージして、分解した機能同士がどんな物理量をやり取りするのかに注目する。やり取りする物理量は、物理領域によって異なり、例えば熱・力・トルク・流体などを挙げることができる。また、「部品単体の機能」のみを考えるのではなく、「部品を組み合わせた機能」あるいは、「一つの部品で複数の機能」を考える場合もある (Fig. 2.6) . これが 1.2 で述べた「すり合わせ型アーキテクチャ」製品での機能分解の際に注意すべき点である。

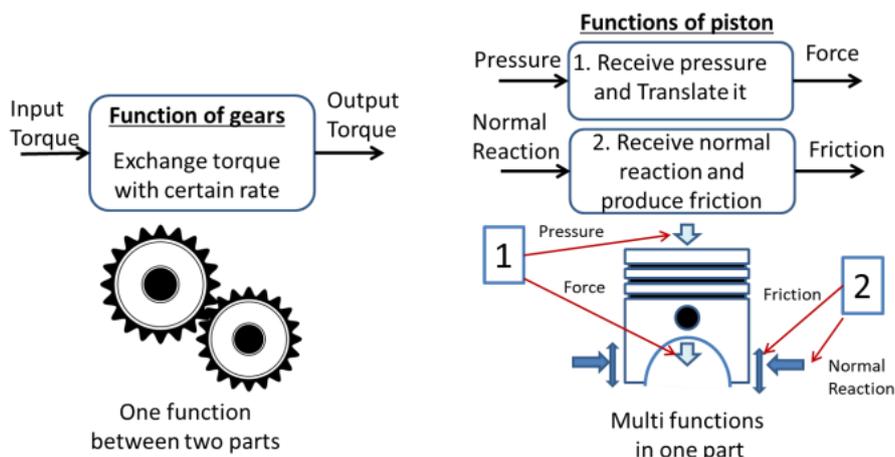


Fig. 2.6 Example of function decomposition

以下に「すり合わせ型アーキテクチャ」での機能分解のコツを列記する.

1) モノを見ながら機能を考える際には、「何のためにこの部品があるのか」という目的から考え、「どう働いているのか」をイメージする. この際には、物理分野に応じて伝

達するもの（熱・力・トルク・流体）になったつもりで、このモノがあるおかげで伝達の仕方がどう変わるか、を考えると働きを見つけやすい。

2) 「すり合わせ型アーキテクチャ」の製品には Fig. 2.6 の左の「ギア」のように、部品の手合わせで初めて機能を発揮するものがあるため、俯瞰したり一つの部品に集中したり、という複数の見方を使い分ける。これが「木を見て森も見る」視点の一つである。

3) 「すり合わせ型アーキテクチャ」の製品には「複合領域」が必ず存在する。例えば熱による変形、あるいは変形による熱などである。これは1) の熱の領域と力の領域が両方とも絡んでくるということになる。この際に、一つの部品だけが複数領域を結ぶ働きをしている場合もあれば、複数部品がまとまってその働きをする場合もあるので、領域によって見る視点を変えながら、2) の「木を見て森も見る」を実施することになる。

4) モノに関する機能を全て挙げるわけではなく、あくまでも現在対象にしている基本機能に関する機能を注目して分解する。「すり合わせ型アーキテクチャ」でモノに関する機能を全て挙げていたら、機能分解はいつまで経っても終わらない。3) に挙げた複合領域の場合には、どちらが現在対象にしている主の機能かを考えて、従の機能は主の機能と複合するものにとどめる。

5) この後〔手順4〕で述べるようにこの機能を「定式化」してゆくのので、「定式化できるように」考えながら機能を言葉で表現してゆくことも重要である。慣れないうちは、言葉で表現して、数式で表現して、言葉を見直して、また数式を見直すということを複数回繰り返して、じっくりくる表現をみつけることになる。

以上述べたように、機能分解を担当するエンジニアには製品全体に関する幅広い工学知識（働きをイメージし、言葉で表現し、数式で表現する）が要求されることになる。これは音楽家が楽譜を見たら音楽が頭の中で鳴り、それを楽器で表現するのと似ている。ただし、全ての楽器を演奏できる音楽家がなかなかいないのと同様に、あらゆる領域の機能分解ができるエンジニアもなかなかいないので、一人のエンジニアだけでなく複数のエンジニアで議論しながら機能分解することが重要である。

FBD で機能が分解できたら、これをツリーで表示する (Fig. 2.5 の右側)。これが Fig. 2.3 の右側ツリー構造の第1階層に相当する。

## 2.2.4 各機能ブロックでの定式化と中間特性の抽出

〔手順4〕各機能の定式化

FBD の各ブロックに対して，入力と出力とを結ぶ「数学関数 (Function)」を定義する。即ち，入力変数を  $x_i(t)$ ，出力変数を  $y(t)$  とすると，一般的に以下の式で表現できる ( $a_1, a_2, a_3$  はパラメータ)。

$$y(t) = f(x_i(t); a_1, a_2, a_3) \quad (1)$$

この式は代数式でも微分方程式でも構わない。取扱う物理法則によって実際の式が決まる。数式の中から機能の特徴づける物理パラメータ (式(1)では  $a_1, a_2, a_3$ ) を抽出し，これを「特性」とする。これを機能ブロック図として記述すると，Fig. 2.7 のようになる。

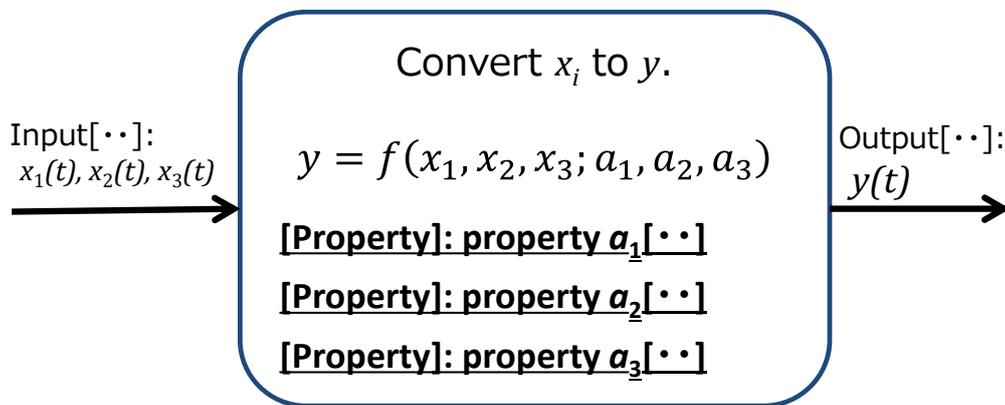


Fig. 2.7 General form of the formulation of each Function block

具体的な例を Fig. 2.8 に示す。これは「オリフィスを通してガスを放出する」機能のブロックを定式化した例である。

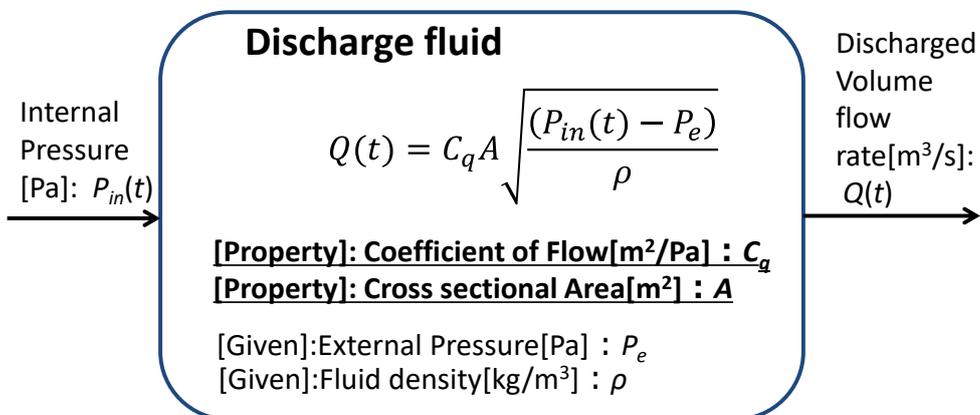


Fig. 2.8 Example of the formulation of each Function block

(1)式, および Fig. 2.7, Fig. 2.8 を見ると, 出力を決めるのは入力と特性であることがわかる. すなわち, 望ましい出力を得るためには入力と特性をコントロールすればよい. ただし, 内部のブロックであれば入力はその前のブロックの出力であるから, 前のブロックの特性を使ってコントロールできるが, システム全体の入力は (システム外から来るので) コントロールはできない. 結局出力をコントロールするために設計者は, 各ブロックの特性をコントロールすることになる. 言い換えると「設計行為とは, 機能の数式を決めて, その中の特性を決めることである」と言える. この特性はコンスタント (不変) にした方がシステムが安定し, また設計をしやすいが, 高度化した要求・目標に対応するため, あるいは物理法則によっては特性を可変にせざるを得ないこともある. 例えば Fig. 2.8 の特性  $C_q$  は, 実際には流れの条件によって変化するものである. あるいは制御を用いて特性を積極的に変化させることもある.

また, Fig. 2.8 の中で「Given」と書かれたパラメータもある. これはあらかじめ決まっていて通常は変えようのないもの, あるいは開発の都合上「変えない」と決めたパラメータである. これはその時の開発の中では, 目標を割付けるべき「特性」とは考えない.

付け加えると, 全ての物理 (化学) 現象に対して Fig. 2.8 のように定式化できるとは限らない. 理論式が見つかっておらず, 実験式・統計式しかない場合 (CAE 等で求めた応答曲面も実験式の一つ), さらにそれすらなく, 入出力の関係を計測したデータしかない場合もある. 具体的な式がなければ (1)式や Fig. 2.7 のような一般的な表現に止めるしかない. その部分は技術的に解明されていない **Black Box** であるということになる. そうして, この後の〔手順6〕でモデル化する際には, そうした実験式・統計式等をモデルに組み込むことになる. この場合, モデルでシミュレーションするという点では足りるが, 製品開発の際に特性を変えてそこに目標を割付けることは難しい. 製品開発の際にその部分の特性を変えたければ, **Black Box** を解明して **White Box** にしなければいけないということであり, それが技術開発であると言える. さもないと, その **Black Box** が原因で試作検証を繰り返す状態になる. これが第1章で述べた「負のスパイラル」の大きな要因と考える.

このように, 機能分解して定式化することで, 技術開発するべきところがあぶり出されてくるという点も, 本手法の価値である.

以上述べてきたように言葉として定義した機能を数学的な関数に置き換え、さらにそこから特性を抽出するところが本手法の大きな特徴である。この「特性」をどの範囲にすれば目標を達成できるのかをシミュレーションモデルで検討して、その「範囲、値」が次の階層の目標となるという形で目標が階層化されることになる。これが Fig. 2.3 の右側ツリー構造の第 1 階層の Function にぶら下がった「1st Property = 2nd Target」に相当する。目標を上位から割り付けて行くというイメージを明示するために、Fig. 2.3 の左側の斜め線（V 字の左側を表現）部分に白い四角で「Assigned properties for 1st layer = Targets for 2nd layer」と書いたのも同様の意味である。「重要な特性に目標を割付けることで次の階層に伝える」という意味で、この特性を「中間特性（Intermediate Property）」と呼ぶことにした。

SE では目標の階層化（Target Cascading）が重視される（付録 A）が、機能の階層化（Functional cascading）に付随して目標が階層化されるべきであると筆者は主張する。加えて各階層の機能の「特性」の中からいくつかを選定して、そこに目標を割付けるということが、設計の意図を表現することになる。これは「選択と集中」を意味し、選択しなかった特性は重要視しないということである。この選択を行うことで、製品開発の検討が大幅に効率化できる。（その例を、2.3 事例 1 で示す。）

検討の途中で、内部のサブシステムだけ取り出して注目したい場合がある。その際には、その入力も含めてコントロールすることを考える（Fig. 2.9）。サブシステム内の特性  $a_{Bi}$ ,  $a_{Ci}$  だけでなく、変数 1（Variable 1）によってシステムの出力が変わるからである。この場合には、この変数 1 にも目標を割付けることになるため、このような変数を「中間変数（Intermediate Variable）」と呼ぶことにする。このサブシステムの検討だけでは変数 1 の目標は決められてもコントロールはできないが、この後の検討で、機能 A の特性  $a_{Ai}$  を検討して変数 1 をコントロールすることになる。

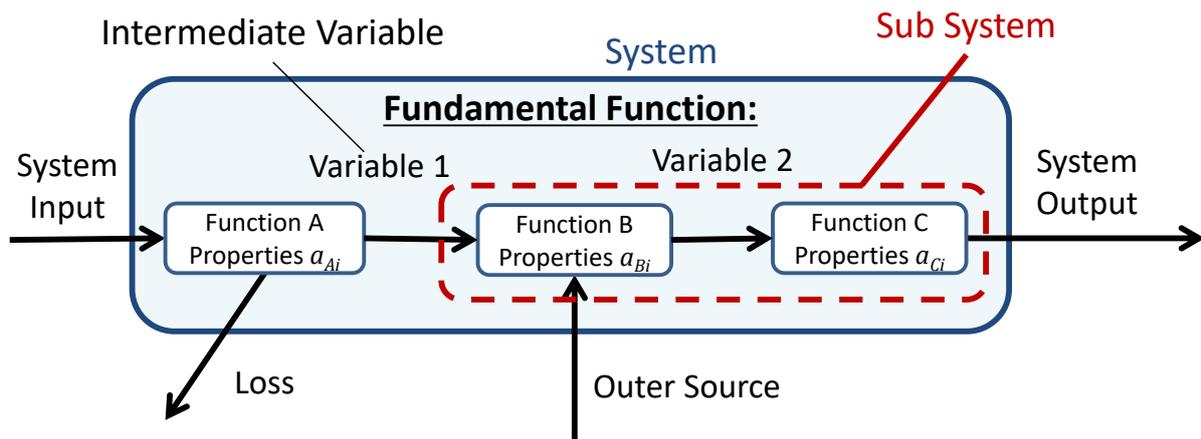


Fig. 2.9 Example of formulation of each Function block for the subsystem study

〔手順5〕 二元表作成

FBD と各ブロックの定式化内容，抽出した特性をもとに，目標，各階層の特性を順に結ぶ「二元表 (Property Matrix)」を定義する (Table 2.1) . この二元表を参照することで，目標を満たすためにはどの特性に注目すべきかが瞬時にわかり，検討内容と設計意図が明確になる。

Table 2.1 Example of Matrix for Targets and Properties.

|            |            | Performance Targets and Functions |              |              |              |              |              |              |
|------------|------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|            |            | Target Item1                      |              |              | Target Item2 |              |              |              |
|            |            | Function 1-1                      | Function 1-2 | Function 1-3 | Function 2-1 | Function 2-2 | Function 2-3 | Function 2-4 |
| Properties | Property 1 | +○                                |              |              |              |              |              |              |
|            | Property 2 | +○                                | -○           |              |              |              | +○           |              |
|            | Property 3 |                                   |              | +○           |              |              |              |              |
|            | Property 4 |                                   |              |              | -○           | +○           |              |              |
|            | Property 5 |                                   |              |              | +○           |              | -○           |              |
|            | Property 6 |                                   |              | -○           |              |              |              | -○           |
|            | Property 7 |                                   | +○           |              |              | -○           |              |              |
|            | Property 8 |                                   |              | -○           |              |              |              | +○           |

Legend ○ : Directly Effective

Sign of ○ : "+" means the performance is up with the property, "-" means inverse

## 2.2.5 機能ブロック図からのモデル化と目標割付

### 〔手順6〕モデル化

全てのブロックについて得られた数式を連立させると、それがシミュレーションモデルとなる。この考え方は Modelica[16]や VHDL-AMS[17]などのいわゆる 1D シミュレーション言語と同様である。著者が主張するのは、本手法では FBD とその定式化内容が、シミュレーションモデルの仕様書となって連携している点である。

実際のモデル作成は、上記のような 1D シミュレーション言語で一から作製してもいいし、市販のツールやライブラリを改修してもよい。その際のポイントは、「この階層で抽出した特性をパラメータとして直接振ることができるモデルにすること」である。そうしないで詳細な設計パラメータを入力するモデルにしてしまうと、本章の緒言で述べた「パラメータが多くて階層的な検討から遠いモデル」になってしまう。

このように数式と特性でつながることで、FBD がシミュレーションモデルの仕様書となることを意味し、このことによってシミュレーションモデルを作製していない人にも中身が明示されることになるため、専門外の人たちとシステムを俯瞰した議論が可能になる。

### 〔手順7〕モデルによる目標割付

Fig. 2.3 の左側の「1st layer Model」に相当するモデルができたなら特性をパラメータとしてシミュレーションを実施し、目標を達成させるための特性の範囲を求める（目標割付）。この際には、二元表を参照しながら検討を進めることで、重点的に注目すべき特性はどれなのかを明示することが出来るため、ポイントを絞った効果的な検討を進めることが可能になる。これは「目標達成のために支配的な特性を優先的に使って製品開発をすべき」ということであり、効果的な製品開発のための原則とも言える。それゆえ、感度解析を実施して重要な特性を絞り込むことも有効である。さらに、目標割付に使用した特性を二元表に記すことで、設計意図を明示的に残すことが可能になる。こうして目標を割付けた特性の範囲が、次の階層の目標となる。

#### 〔手順8〕 次の階層での機能分解・定式化・二元表化・モデル化・目標割付

次の階層「2nd layer」でも、同様に FBD 作成／定式化／二元表化／モデル化を行い、ツリー図の階層も増やす。これらの準備ができたなら、上位から割付けられた目標値・範囲を実現するために必要な、この階層の特性の「値・範囲」を割付ける。この検討の際には、上位で「重要」と考えられた特性の目標のみに注目して検討すれば良いので、検討が非常に効率化される。この効率化の様子は、2.3 事例 1 にて具体的に記す。

各階層での検討を繰り返して、最終的には割付けられた目標値が部品レベルの目標となり、詳細設計を実施する。詳細設計では形状に紐づける必要があるので、3D シミュレーション (Fig. 2.3 下の 3D Model) が力を発揮する。

#### 〔手順9〕 上位階層へのフィードバック

割付けられた目標を満たすことが難しい場合には、上位に戻して割付を再検討する。決めたアーキテクチャで実現が難しい場合には、他のアーキテクチャを検討する。これらは SE で提唱している「小さな手戻り」であり、これによって試作後にやり直すような大きな手戻りを防ぐことにつながる。

## 2.3 事例 1 : ドライヤー

本手法を適用した事例を，ドライヤーを題材として示す.

### 2.3.1 手順と検討結果

〔手順 1〕 顧客要求と目標ステートメント

「髪を傷めずにできるだけ早く乾かしたい」という顧客の声を分析し，開発するドライヤーに対する目標を以下のようにステートメントとしてまとめた.

現行製品：「外気温 25℃の際に，72℃の温風を毎分 1.0m<sup>3</sup>送風し，消費電力は 1015W」  
に対して，

開発目標：「外気温 25℃の際に，60℃～65℃の温風を毎分 1.2m<sup>3</sup>以上送風し，消費電力は 1000W 以下にする」.

〔手順 2〕 基本機能の定義

目標ステートメントを達成するための基本機能を FBD にまとめた (Fig. 2.10) .

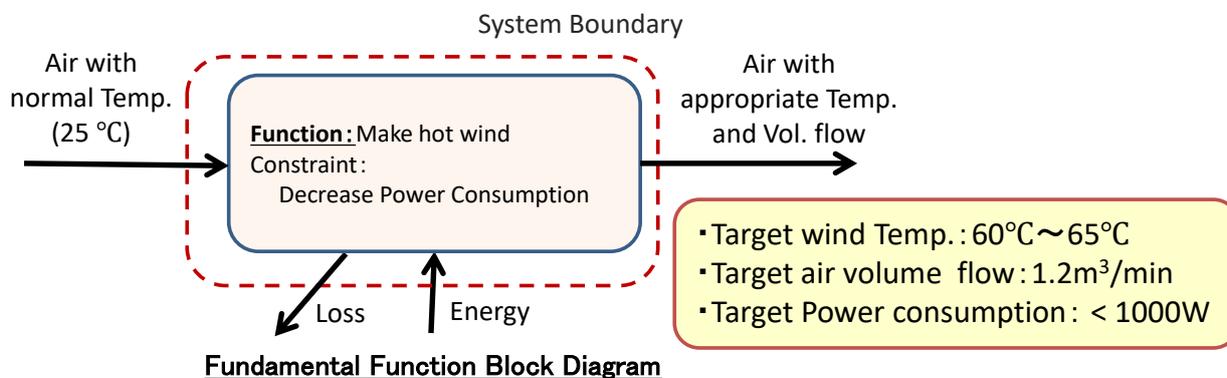


Fig. 2.10 Fundamental Function block and Target Statements for New Hair Dryer

〔手順3-1〕機能分解：第1階層

ドライヤーの基本的なアーキテクチャを考慮しながら，基本機能の FBD を第1階層の FBD に分解した (Fig.2.10) .

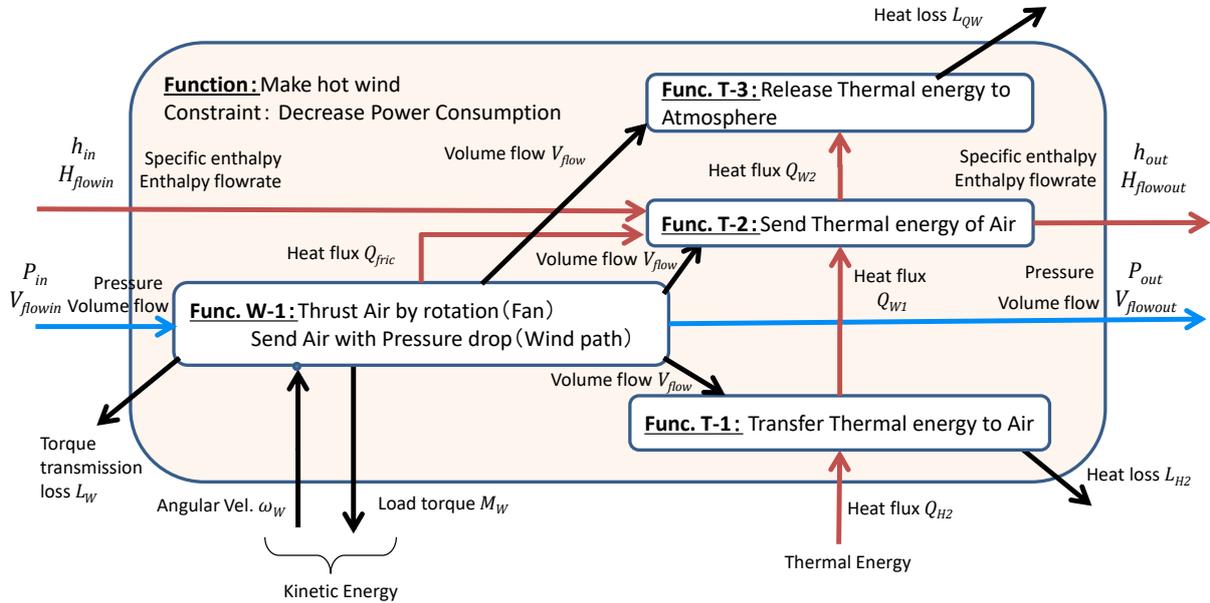


Fig. 2.11 Function Block Diagram of the 1st layer

この段階では，入力エネルギーを電気に限定せず，「空気をファンで送る機能」と「空気に熱を与え，一部を外気に逃がす機能」に注目するために，「電気エネルギーを回転運動に変える機能」と「電気エネルギーを熱に変える機能」を除いたサブシステムにて考えている．これは Fig. 2.9 の考え方に該当する．ここで電気部分を除いたということは，3つの目標のうち，消費電力の目標のウェイトが他の2つよりも低く，ソフトな制約条件として後で確認するという意味する．

[手順4-1] 各機能の定式化：第1階層

Fig. 2.11 の各機能ブロックを，式 (1)の形で定式化した．以下に全ての定式化内容を Fig. 2.12～Fig. 2.16 に示す．（赤い下線が特性，青い点線下線が Given）

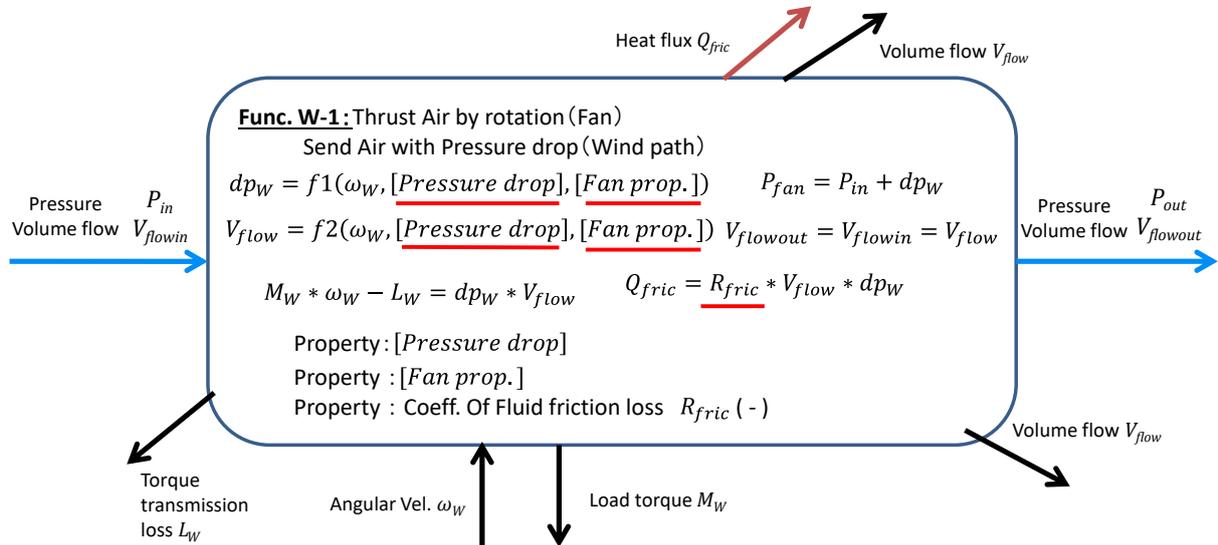


Fig. 2.12 Formulation of the function W-1

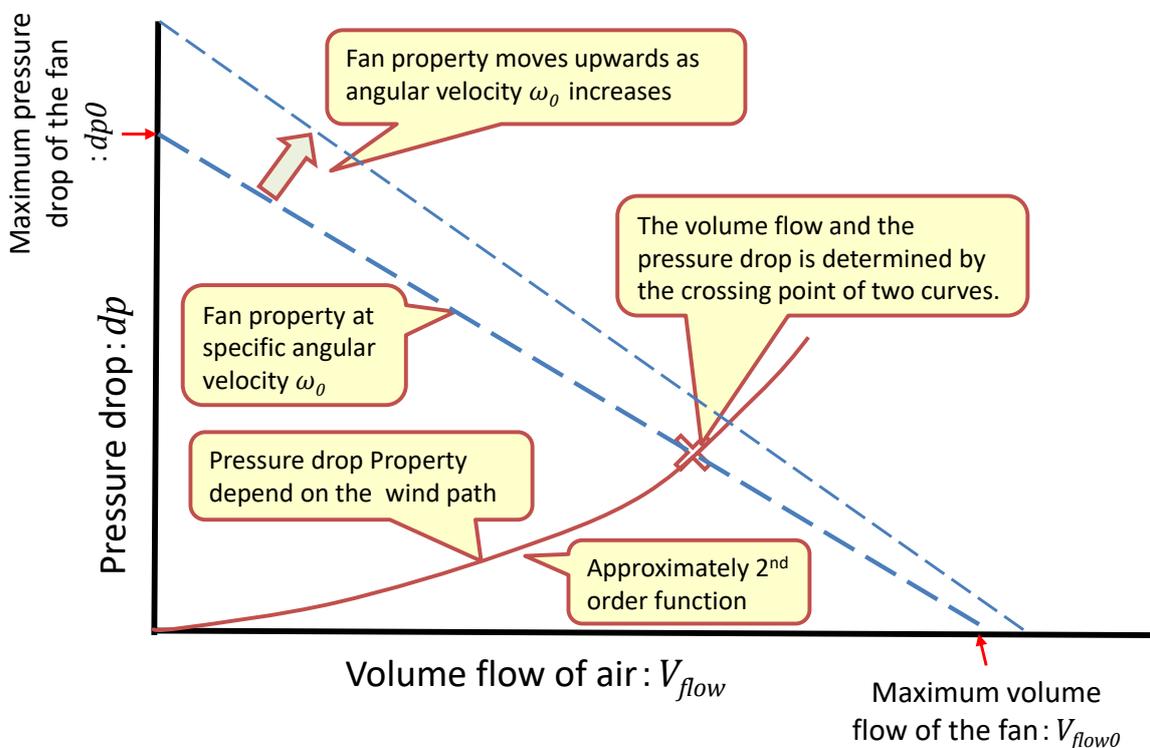


Fig. 2.13 Fan prop. and Pressure drop Prop. in W-1 formulation

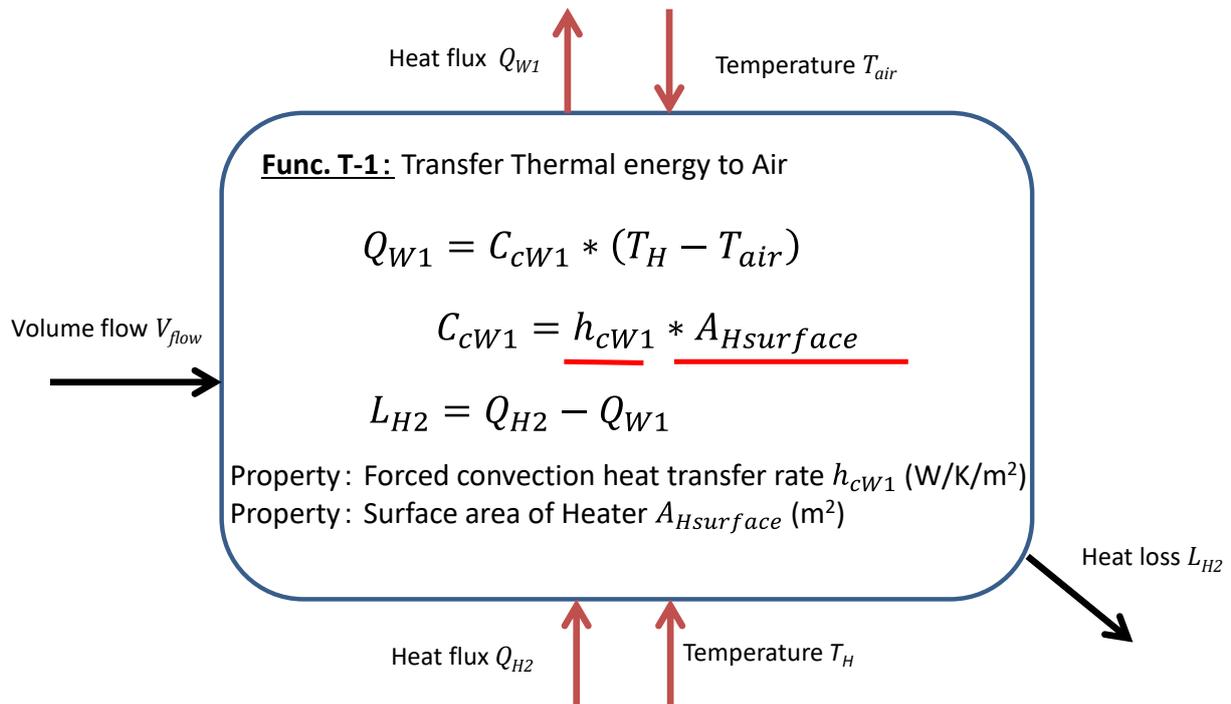


Fig. 2.14 Formulation of the function T-1

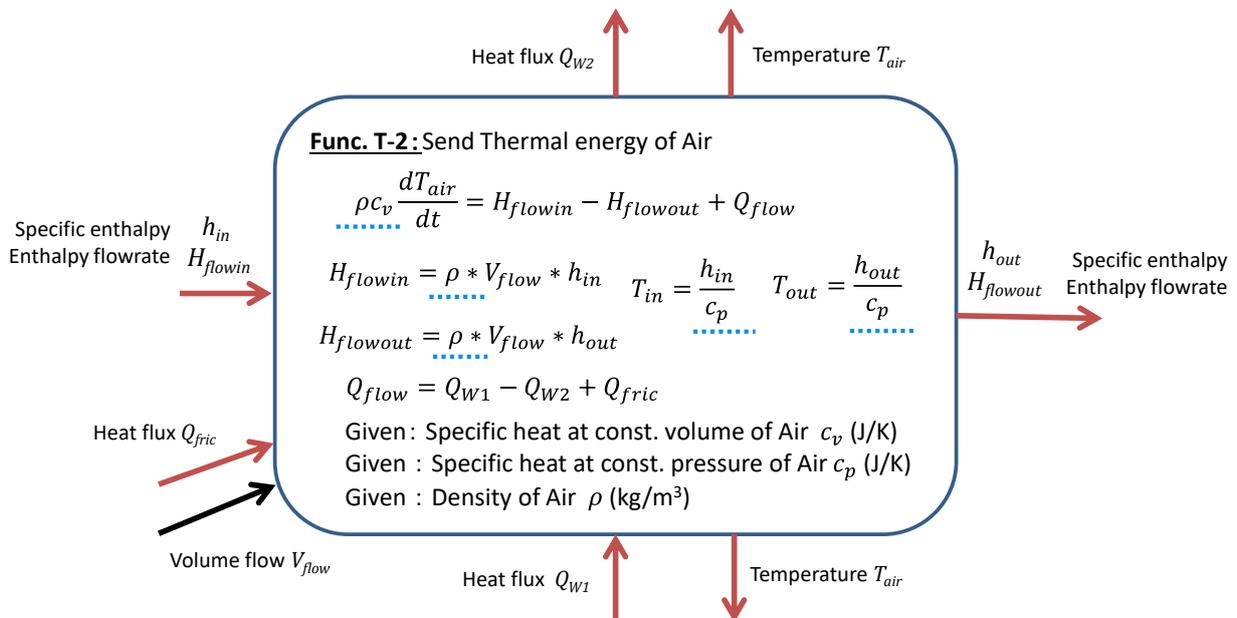


Fig. 2.15 Formulation of the function T-2

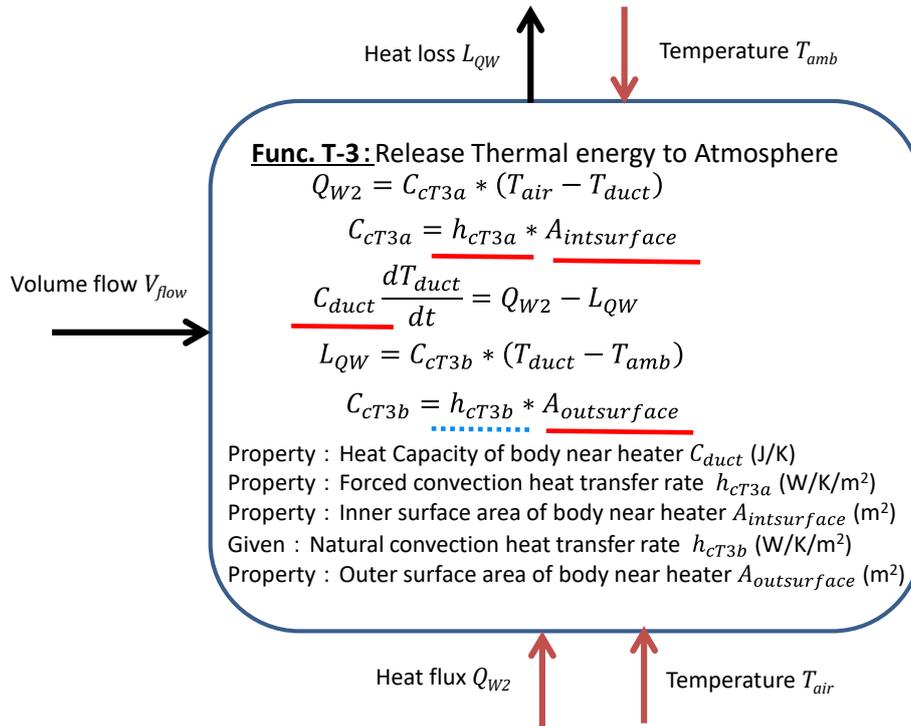


Fig. 2.16 Formulation of the function T-3

〔手順5－1〕二元表作成：第1階層（目標－特性間）

FBD と各ブロックの定式化内容，抽出した特性をもとに，目標と特性とを結ぶ二元表を作成したものを Table 2.2 に示す．この時点では，Fig. 2.9 のように本来のシステムの一部を検討しているので，特性だけでなく変数も二元表には出ている．

Table 2.2 Matrix for Target performance to Intermediate Properties/ Variables

|                         |                   |                     | Performance Item |            |                   |
|-------------------------|-------------------|---------------------|------------------|------------|-------------------|
|                         |                   |                     | Air quantity     | Wind Temp. | Power consumption |
| Intermediate Properties | Fan               | P-Q Prop.           | +○               |            |                   |
|                         | Wind path         | Pressure drop Prop. | -○               |            |                   |
|                         | Heat wire - Air   | Heat transfer Prop. |                  | +○         |                   |
|                         | Air - Body        | Heat transfer Prop. |                  | -○         |                   |
|                         | Body - Atmosphere | Heat transfer Prop. |                  | -○         |                   |
| Intermediate Variables  | Fan/ Wind path    | Air quantity        | +○               | -○         |                   |
|                         | Fan               | Driving torque      |                  |            | +○                |
|                         | Fan               | Angular Velocity    | +○               |            | +○                |
|                         | Heat wire         | Heat flux           |                  | +○         | +○                |

Legend ○ : Directly Effective (Gray means self-evident)  
 Sign of ○ : "+" means the performance is up with the property/variable, "-" means inverse

### 〔手順6－1〕モデル化：第1階層

各ブロックの定式化内容をつないで「第1階層のモデル」を構築したものを Fig. 2.17 に示す。ここでは Modelica 言語を用いてモデル化した。左から右に一直線になっている部分が空気の流れを表現し、そこに左下からファンを回すエネルギーが入り、右下から熱が入り一部が右上に逃げて行くという、FBD と似た形のモデルとなっている。なおモデル化のライブラリの都合上、空気を流す機能 (W-1) とそこに熱を流す機能 (T-2) は同じ一つの要素が担っている。これは、すり合わせ型アーキテクチャでの機能とユニットとの関係性に似ている。抽出した特性をパラメータとして入力できるモデルになっているので、これで問題はない。特性 (パラメータ) の値は現行機種値を入れて、計算結果が現行機種に合うように整合性を取った。

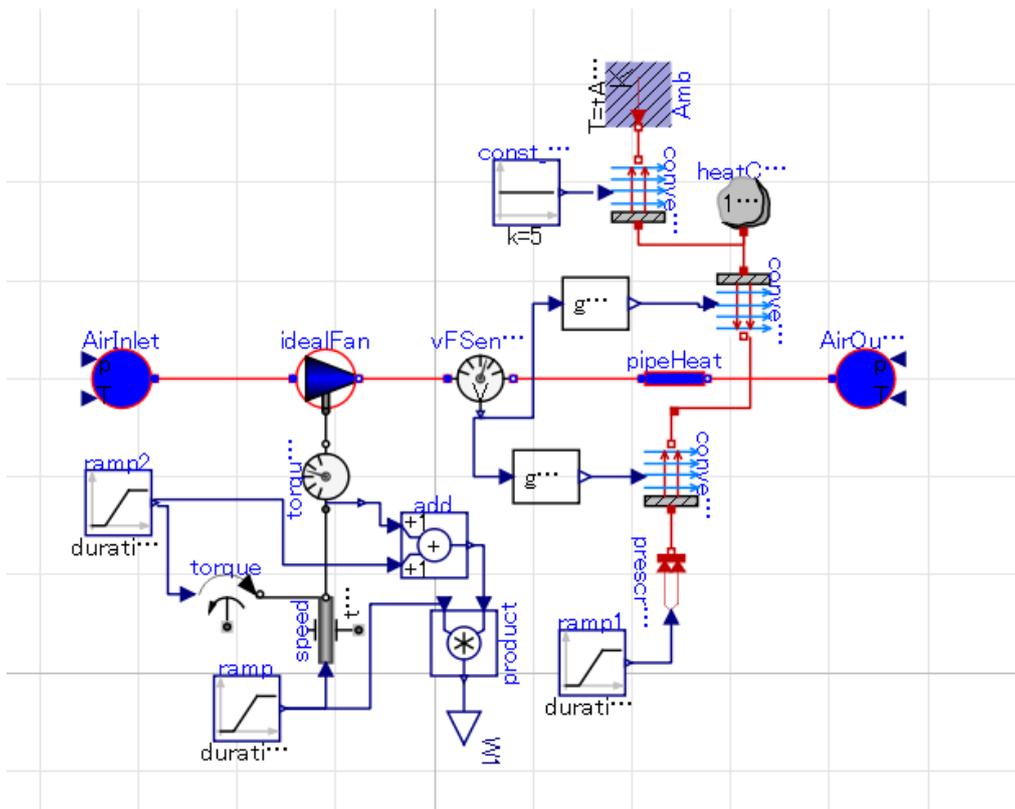


Fig. 2.17 Simulation model for the 1st layer

〔手順7-1〕モデルによる目標割付：第1階層

目標の温度／風量／消費電力を満たすように、Table 2.2 の二元表に示された特性を割付けた。二元表の内容より、風温度が風量に依存することから、まずは風量を決めるように、以下の手順とした。

1) 風量を目標範囲にするために、PQ 特性と圧損特性の目標を決める

さらに、そのために必要な駆動トルクと回転数を求める

2) 上記の風量で風温度を目標範囲にするために空気に与えるべき熱流束を決める

目標性能に対して感度が高く、かつ設計的に変えやすい特性のみ (Table 2.2 の赤枠囲み部分) 調整することとした。

PQ 特性と圧損特性の変更の仕方 (割付結果) を Fig. 2.18 に示す。

1) PQ 特性を上げるためにここではファンの回転数を 20,000rpm から 22,000rpm に上げることにした。

さらに、圧損特性を 16%以上上げることにした (体積流量 1.2m<sup>3</sup>/min の時の圧損を 800Pa から 670Pa に低減)。これによって流量が現行機種種の 1.0m<sup>3</sup>/min から 1.2m<sup>3</sup>/min に上がる見込みである。

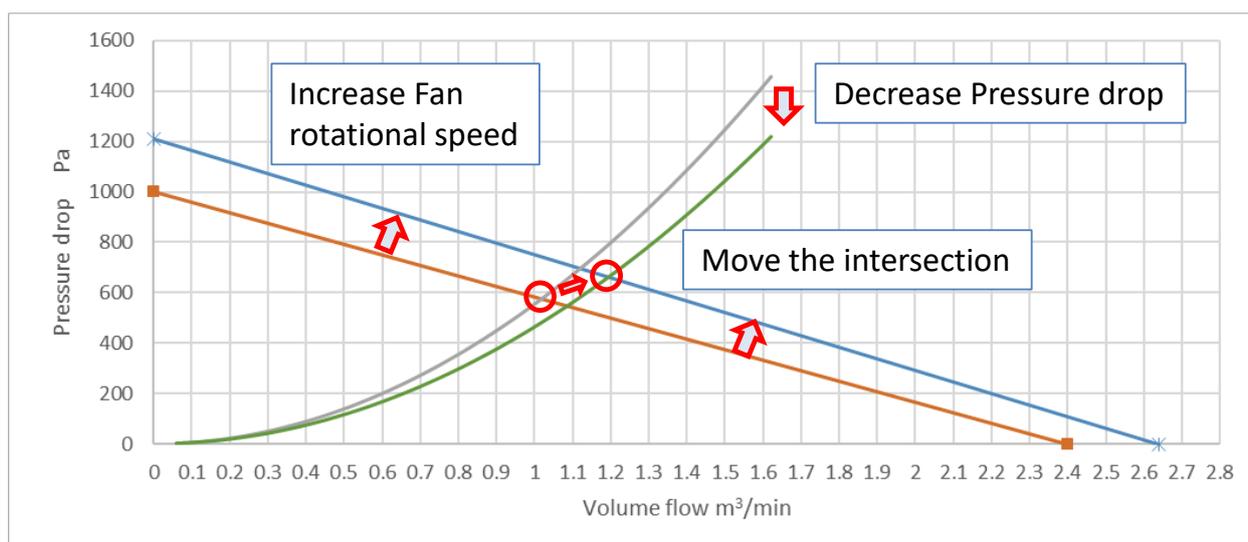


Fig. 2.18 Changes in PQ curve and Pressure drop curve

風量の確認結果を Fig. 2.19 に示す. なお, ファンを駆動するために必要なトルクが 0.00467Nm から 0.00572Nm が増えることが計算の結果わかった.

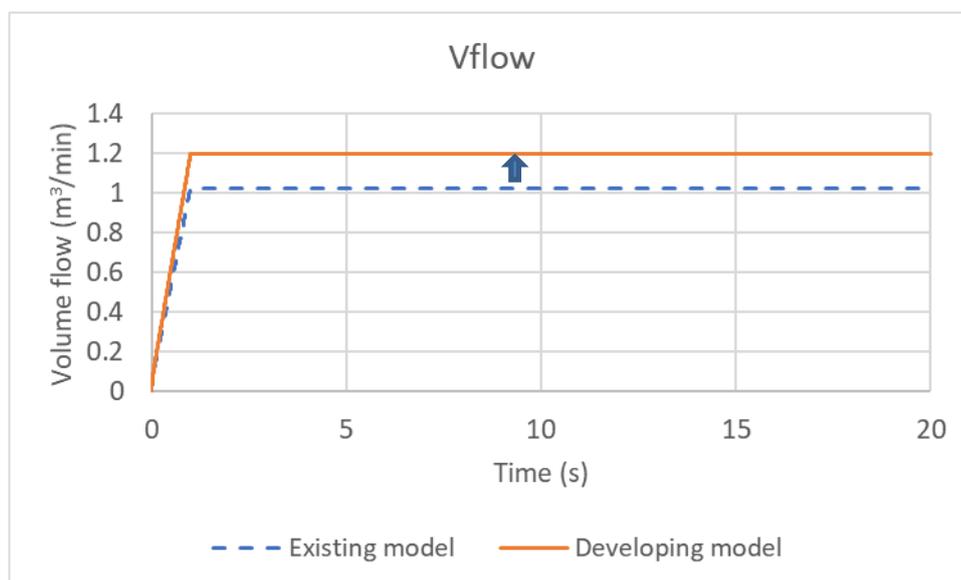


Fig. 2.19 Simulation result [Volume flow] of the 1st layer

2) この風量に対して, 風温度を目標範囲 ( $60^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$ ) にして, かつ消費電力を目標 ( $1000\text{W}$ ) 内に抑えるために, 空気に与える熱量を  $875\text{W}\pm 5\text{W}$  にすることにした. この状態で消費電力は  $950\text{W}$  程度と計算された. ただし, この階層のモデルには, 電気系のロスが入っていないため, 実際には消費電力はもう  $50\text{W}$  程度増える見込みである.

ここで「見込み」を考えなくてはいけないのは, サブシステムとして電気回路部分を除いた部分に注目したからである. すなわち, 電気部分を除いたということは, 3 つの目標のうち, 消費電力の目標のウェイトが他の 2 つよりも低いという判断があったからなので, 「見込み」が入っても十分ということを意味する. もしも消費電力の目標のウェイトが高く第 1 階層から電気系のロスを精度よく検討したいなら, 第 1 階層にも電気回路は入れなければならないことになる.

温度と消費電力の確認結果を Fig. 2.20~2.21 に示す.

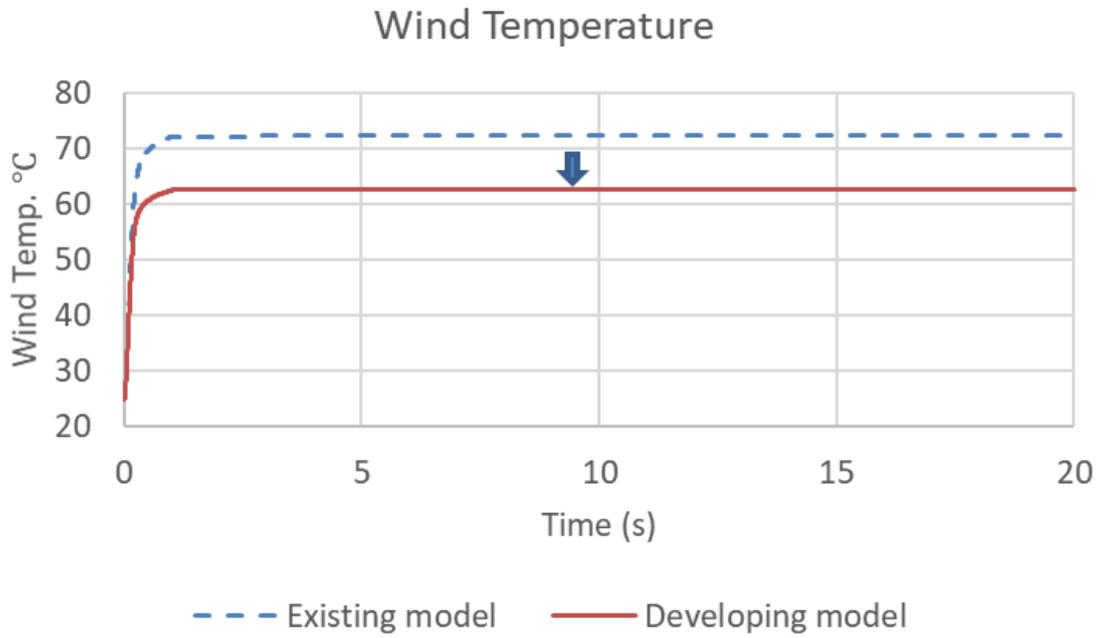


Fig. 2.20 Simulation result [Wind Temp.] of the 1st layer

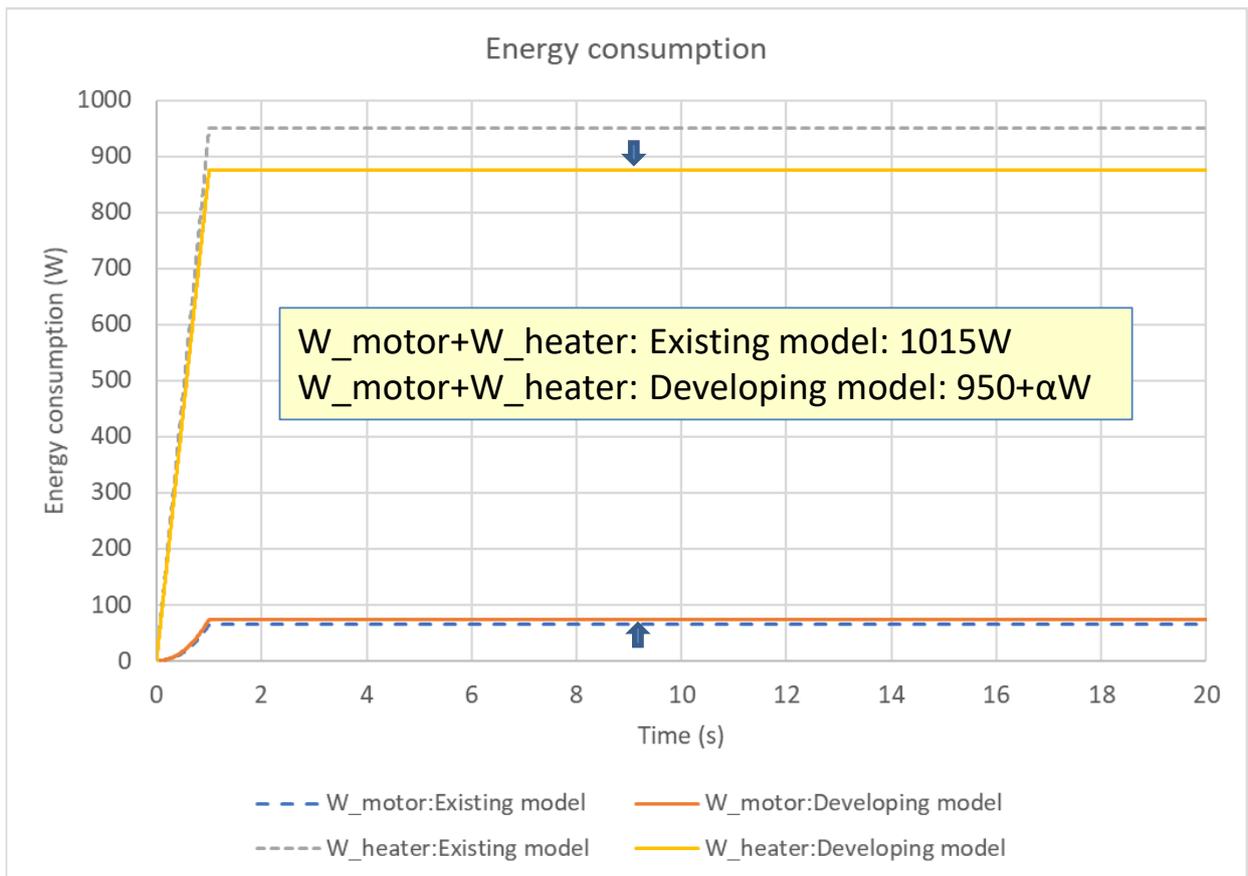


Fig. 2.21 Simulation results [Energy consumption] of the 1st layer

〔手順 3 - 2〕 機能分解：第 2 階層

ドライヤーの基本的なアーキテクチャを考慮しながら，第 1 階層の FBD を分解・追加して第 2 階層の FBD を作成した (Fig. 2.22) .

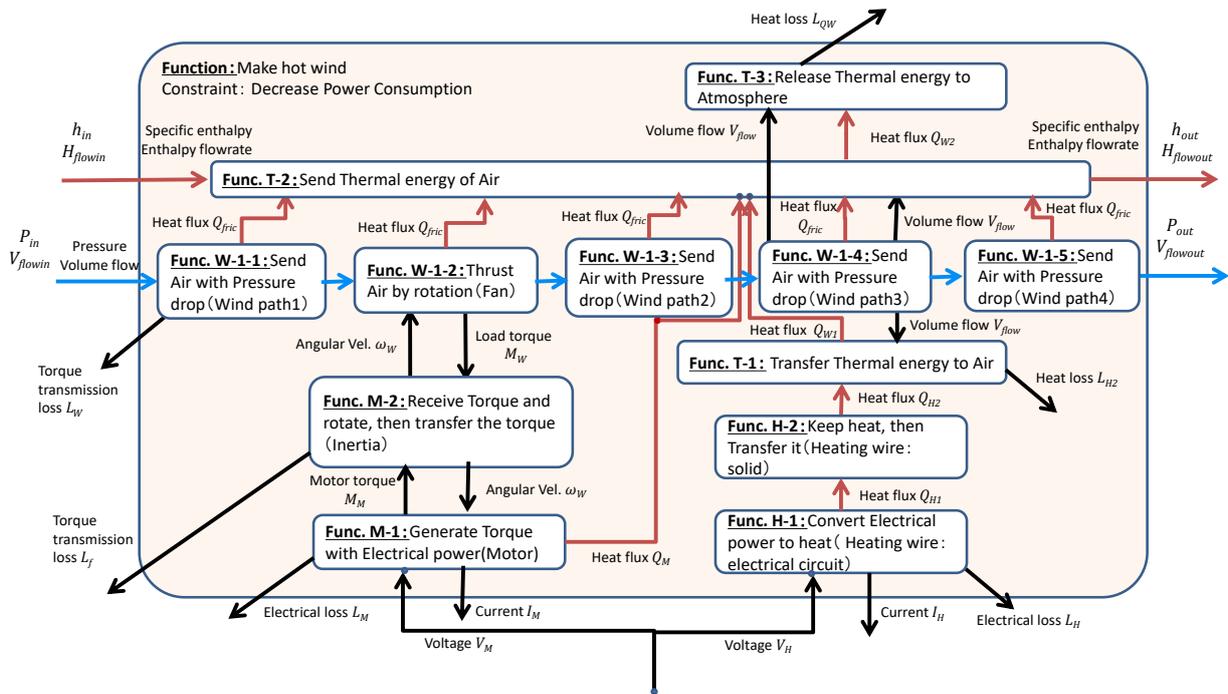


Fig. 2.22 Function Block Diagram of the 2nd layer

この階層では，空気を流す流路の機能を 4 分割し，空気を駆動する機能とも分離した。流路の分割は，下位の形状による圧損と紐づけるためである。さらに入力を電気エネルギーに定め，そこからファンの駆動と熱の供給を行うアーキテクチャとした。

〔手順 4 - 2〕 各機能の定式化 第 2 階層

Fig. 2.22 の各機能ブロックを，式 (1) の形で定式化した。第 1 階層になかった定式化内容を Fig. 2.23～Fig. 2.26 に示す。なお機能 W-1 の分割は，Fig. 2.13 の PQ 曲線と圧損カーブを分離し，さらに圧損カーブを構成要素に分割したということで説明できるので，詳細は省略する。

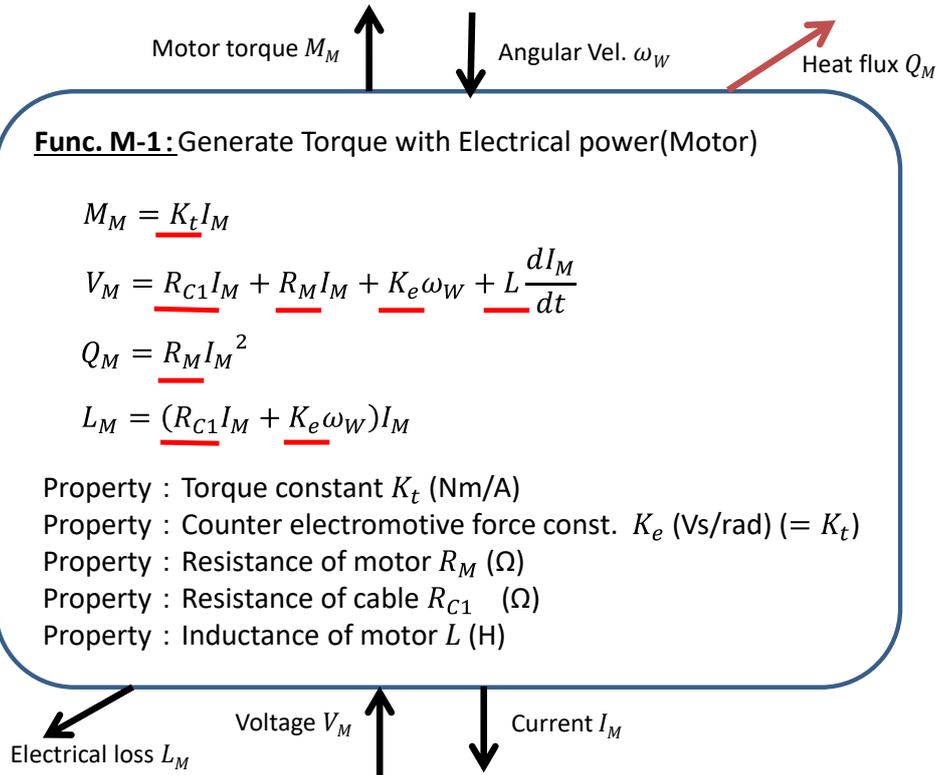


Fig. 2.23 Formulation of the function M-1

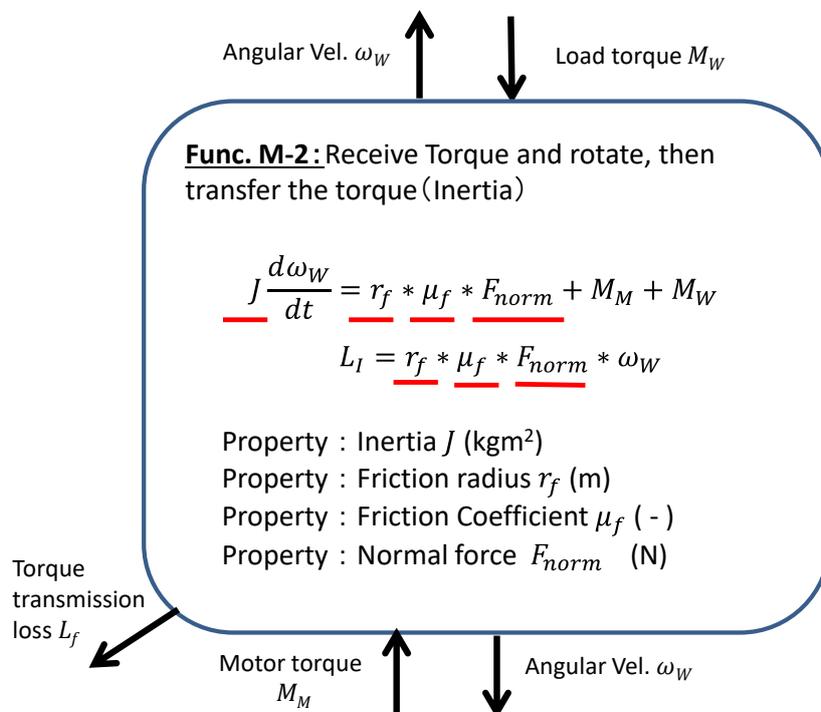


Fig. 2.24 Formulation of the function M-2

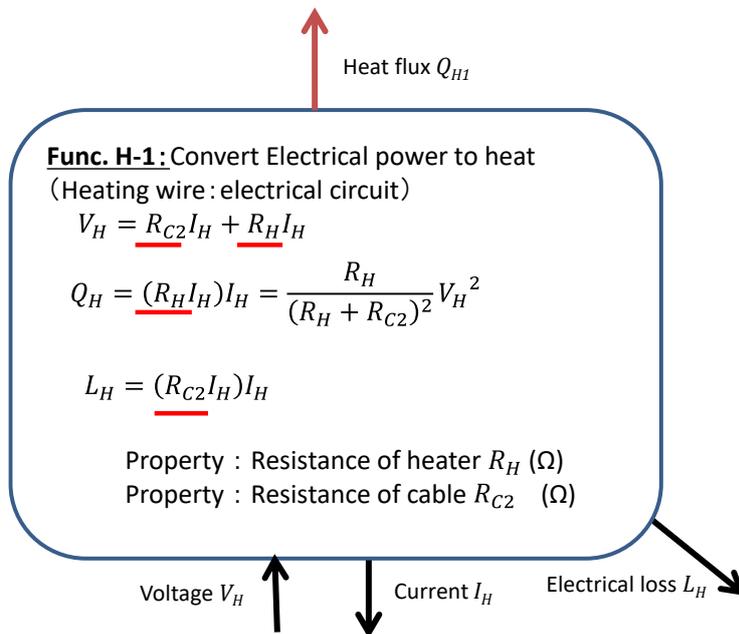


Fig. 2.25 Formulation of the function H-1

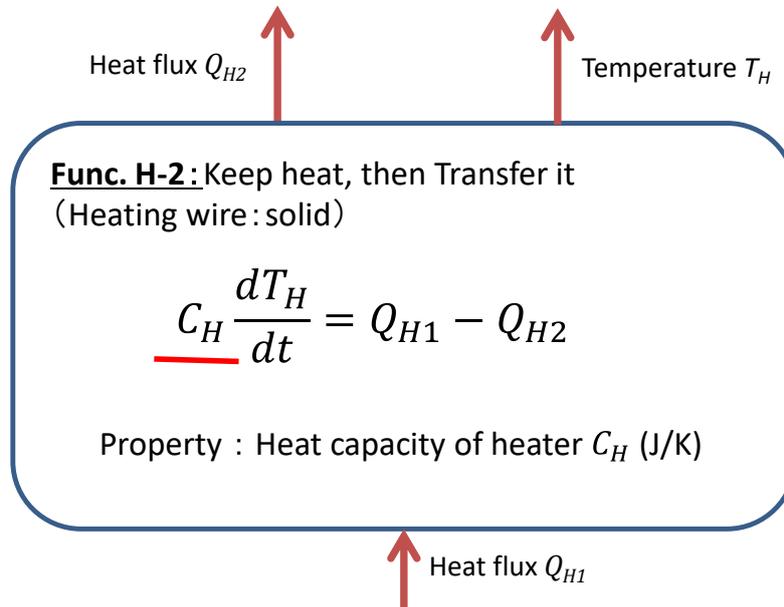


Fig. 2.26 Formulation of the function H-2

〔手順5－2〕二元表作成：第2階層（特性間）

FBD と各ブロックの定式化内容，抽出した特性をもとに，第1階層と第2階層の特性間を結ぶ二元表を作成したものを Table 2.3 に示す．

Table 2.3 Matrix for 1st Properties/ Variables to 2nd Properties

|                                   |                       |  | 1st layer Intermediate properties |                     |                     |                     |                     | 1st layer Intermediate variables |                  |           |
|-----------------------------------|-----------------------|--|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|------------------|-----------|
|                                   |                       |  | Fan                               | Wind path           | Heat wire - Air     | Air - Body          | Body - Atmosphere   | Fan                              | Fan              | Heat wire |
|                                   |                       |  | P-Q Prop.                         | Pressure drop Prop. | Heat transfer Prop. | Heat transfer Prop. | Heat transfer Prop. | Driving torque                   | Angular Velocity | Heat flux |
| 2nd layer Intermediate properties | Fan                   | P-Q Prop.  | +○                                |                     |                     |                     |                     |                                  |                  |           |
|                                   |                       | Pressure drop in Entrance part                     |                                   | +○                  |                     |                     |                     |                                  |                  |           |
|                                   |                       | Pressure drop in Fan part                          |                                   | +○                  |                     |                     |                     |                                  |                  |           |
|                                   | Wind path             | Pressure drop in Heater part                       |                                   | +○                  |                     |                     |                     |                                  |                  |           |
|                                   |                       | Pressure drop in Exit part                         |                                   | +○                  |                     |                     |                     |                                  |                  |           |
|                                   | Heat wire - Air       | Heat transfer Prop.                                |                                   |                     | +○                  |                     |                     |                                  |                  |           |
|                                   | Air - Body            | Heat transfer Prop.                                |                                   |                     |                     | +○                  |                     |                                  |                  |           |
|                                   | Body - Atmosphere     | Heat transfer Prop.                                |                                   |                     |                     |                     | +○                  |                                  |                  |           |
|                                   | Rotating system       | Friction   |                                   |                     |                     |                     | +○                  | -○                               |                  |           |
|                                   | Motor system          | Torque const. (Counter electromotive force const.) |                                   |                     |                     |                     | ±○                  | ±○                               |                  |           |
|                                   | Electrical resistance |  |                                   |                     |                     | -○                  | -○                  |                                  |                  |           |
| Heater system                     | Electrical resistance |  |                                   |                     |                     |                     |                     | -○                               |                  |           |

Legend ○ : Directly Effective (Gray means self-evident)  
 Sign of ○ : "+" means the 1st property/variable is up with the 2nd property, "-" means inverse

この二元表では，第1階層の全ての特性／変数に対して第2階層の特性の関係を示しているが，のちに〔手順7－2〕で示すように，選択と集中によって実際にはこのうちの赤太線枠で囲った部分のみに注目すれば良いことになる．すなわち，二元表をこのように使うことで全体俯瞰と集中箇所の可視化が両方できることになり，ここにも「木を見て森も見る」という SE の考え方の実践を示すことができる．

〔手順6－2〕モデル化：第2階層

各ブロックの定式化内容をつないで「第2階層のモデル」を構築した。ここでは Modelica 言語を用いてモデル化した (Fig. 2.27)。第1階層モデルに比べ、流路を「入口部、ファン部、ヒーター部、出口部」に4分割し、また以下の部分を具体化した。

ファン：モーター駆動

熱：電熱線から供給

電気回路：モーター側と電熱線側の並列回路

この階層でも、入力パラメータは定式化にて抽出した「特性」となるようにモデル化し、特性の値は現行機種の特性を代入して、計算結果が現行機種に合うように整合性を取った。

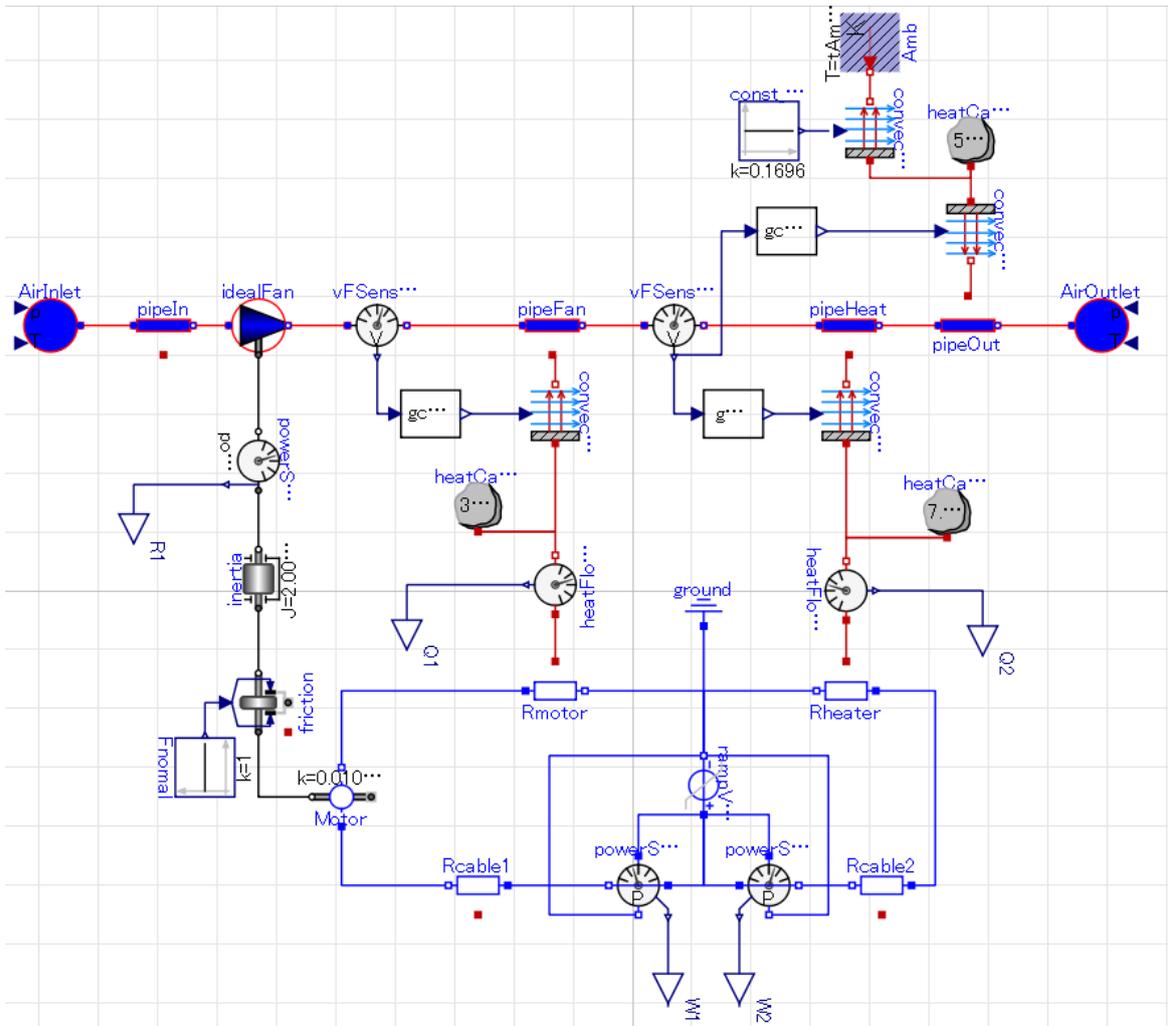


Fig. 2.27 Simulation model for the 2nd layer

〔手順7-2〕モデルによる目標割付：第2階層

第1階層で割付けた中間特性の目標値を満たすように、Table 2.3の赤太枠二元表に示された第2階層の中間特性を割付けた。二元表の内容より、関係する特性がわかっていることから、無駄なパラメータスタディをすることなく、以下の手順で目標の割付けができた。

- 1) ファンの回転数を22,000rpmにするために必要なトルク0.00572Nmをモーターが発生するように、電流を増やすべくモーター側の電気抵抗を減らした。確認結果をFig. 2.28に示す。

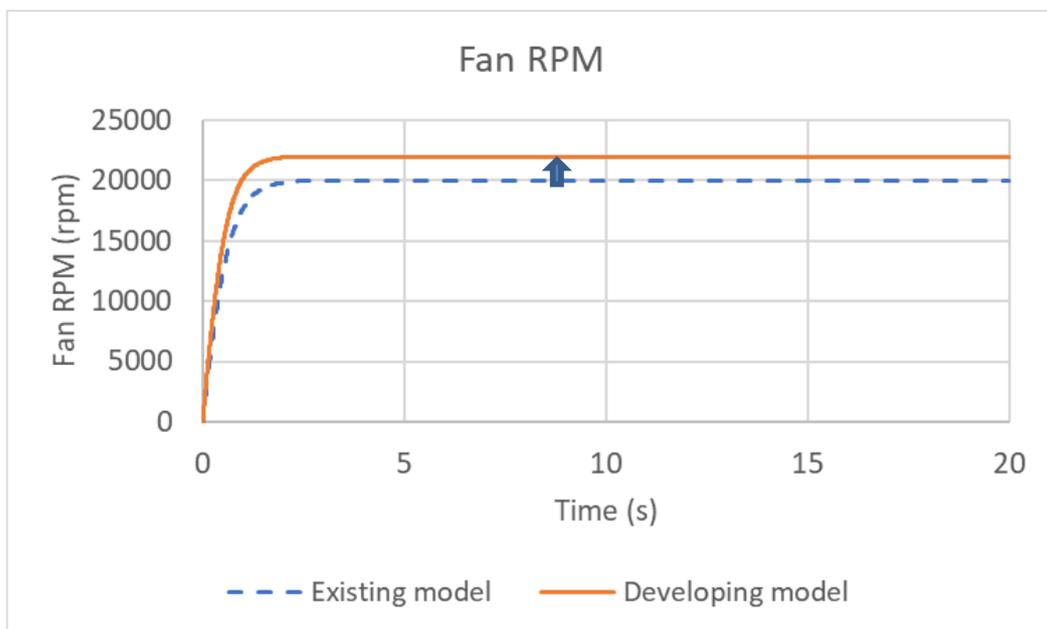


Fig. 2.28 Simulation result [Fan rpm] of the 2nd layer

- 2) 圧損を入口部とファン部にて低減することにした（低減代が存在することを確認済み）。
- 3) 熱線は現行機種と変えずに、発熱量を低減するために、ヒーター側の電気抵抗を増やした。

確認結果を Fig. 2.29～2.31 に示す。

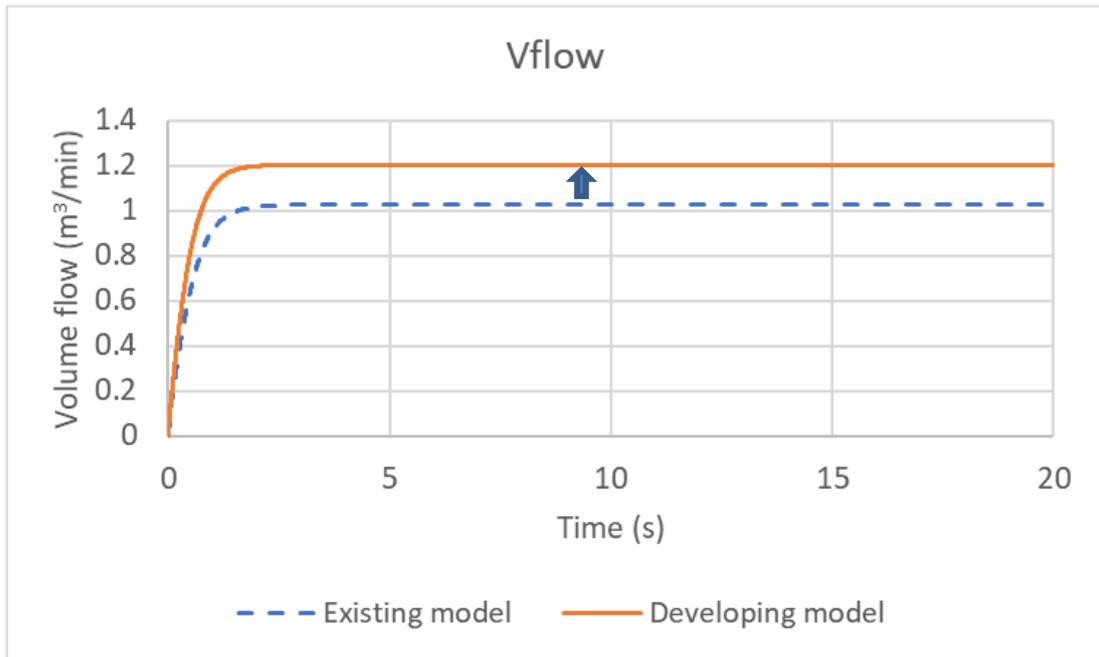


Fig. 2.29 Simulation result [Volume flow] of the 2nd layer

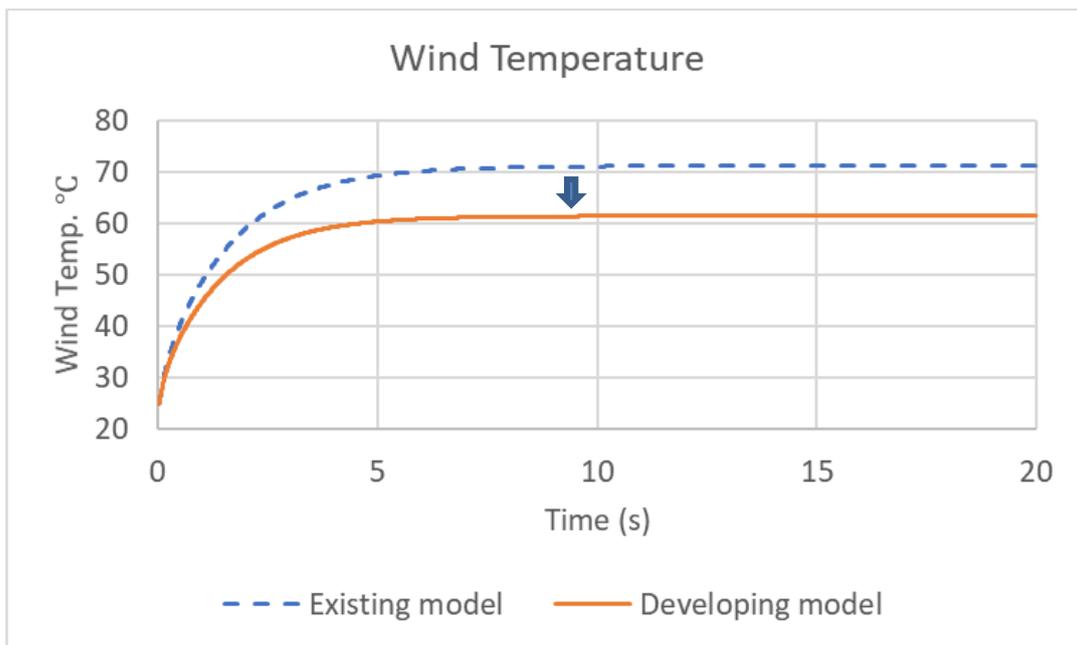


Fig. 2.30 Simulation result [Wind Temp.] of the 2nd layer

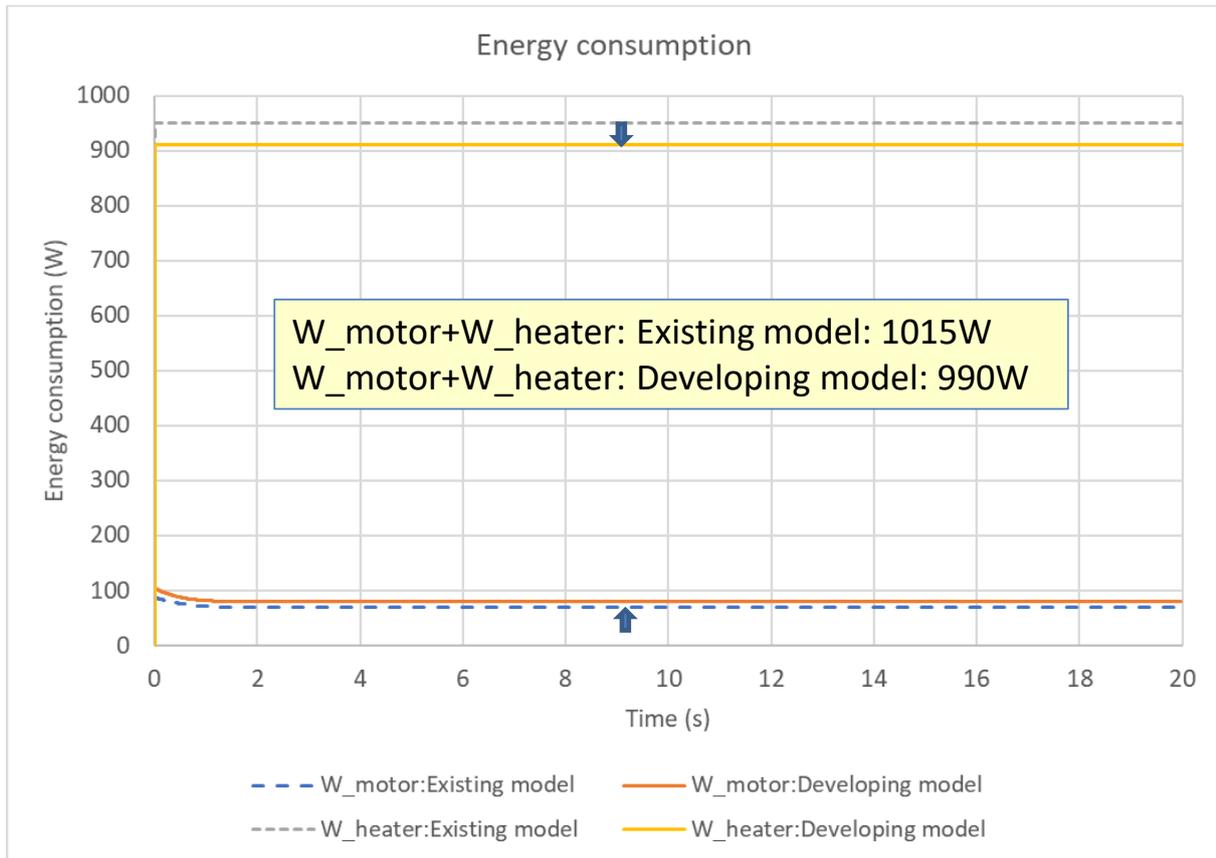


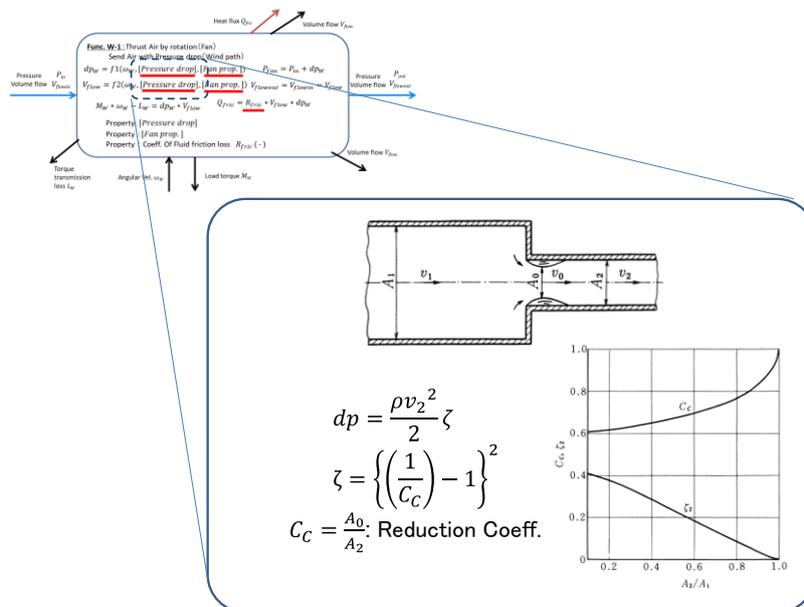
Fig. 2.31 Simulation results [Power consumption] of the 2nd layer

〔手順4－3〕各機能の定式化 第3階層

本事例では、第3階層は第2階層と同じ機能ブロックを用い、定式化内容をさらに詳細にするものとした。具体的には、以下の部分を定式化した（式は機械工学便覧を参照した。この内容自体は本論文の本質ではないので、詳細は略する）。

- 1) 流路圧損：以下の圧損を考慮することで、流路の寸法、障害物の寸法と圧損とを紐づけした。
  - ・粘性摩擦圧損（層流・乱流），断面急拡大／縮小圧損，入口圧損，出口圧損，助走区間圧損，障害物による圧損（ヒーター熱線[円筒横置き]，モーター[円筒縦置き]）
- 2) ヒーター熱線の電気抵抗，熱容量
  - ・電気抵抗は熱線の長さに比例，断面積に反比例。熱容量は熱線の体積に反比例。
- 3) 熱伝達特性
  - ・強制対流熱伝達（ヒーター熱線と空気，空気と流路壁），自然対流熱伝達（筐体壁と外気）

例として、断面急縮小圧損の定式化内容を Fig. 2.32 に、熱線の電気抵抗と熱容量の定式化内容を Fig. 2.33 に示す。



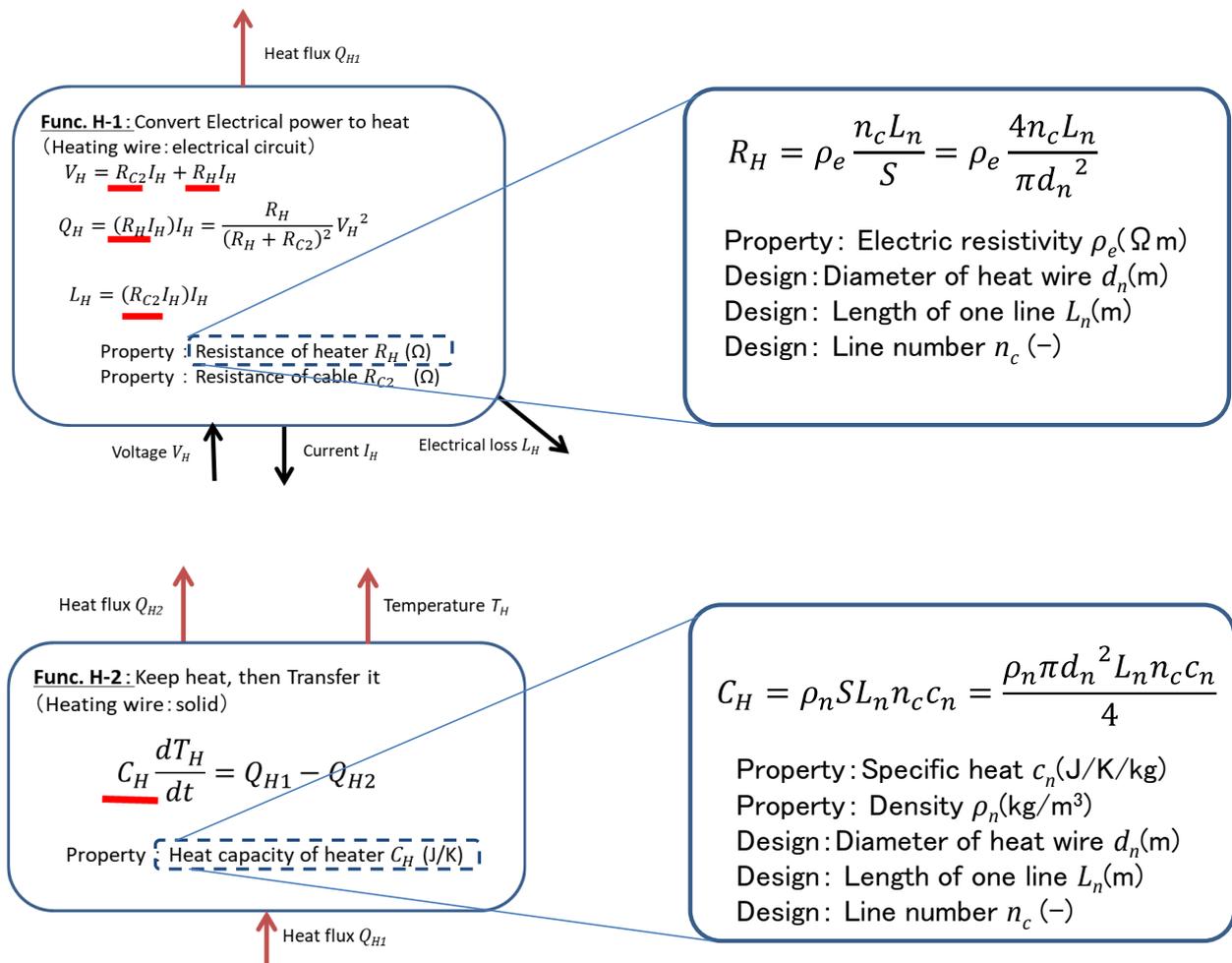


Fig. 2.33 Examples of the Formulation in 3rd layer  
[Electric resistance/ Heat capacity of hot wire]

〔手順5－3〕二元表作成：第3階層（特性間）

定式化内容，抽出した特性をもとに，第2階層特性－第3階層特性の間を結ぶ二元表を作成したものを Table 2.4 に示す。

Table 2.4 Matrix for 2nd Properties to 3rd Properties

|                                   |                 | 2nd layer Intermediate properties |                           |                              |                            |                     |                     |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|--|-----------------------|----|----|
|                                   |                 | Wind path                         |                           |                              | Heat wire - Air            |                     | Air - Body          |                     | Body - Atmosphere   | Rotating system | Motor system                                       | Heater system         |    |    |
| Fan                               |                 | Pressure drop in Entrance part    | Pressure drop in Fan part | Pressure drop in Heater part | Pressure drop in Exit part | Heat transfer Prop. | Heat transfer Prop. | Heat transfer Prop. | Heat transfer Prop. | Friction        | Torque const. (Counter electromotive force const.) | Electrical resistance |    |    |
| 3rd layer Intermediate properties | Fan             | P-Q Prop.                         | +O                        | +O                           |                            |                     |                     |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | Section area                      |                           |                              |                            |                     |                     |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | Blade number                      |                           |                              |                            |                     |                     |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | Blade angle                       |                           |                              |                            |                     |                     |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | Path length                       | +O                        | +O                           | +O                         | +O                  |                     |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | path section area                 | -O                        | -O                           | -O                         | -O                  |                     |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | Sudden change in area             | +O                        | +O                           | +O                         | +O                  |                     |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | Surface area of path              |                           |                              |                            |                     | +O                  |                     |                     |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | Outer surface area of body        |                           |                              |                            |                     |                     |                     | +O                  |                 |  |                       |    |    |
|                                   |                 | Heater                            |                           |                              |                            |                     | +O                  | +O                  |                     |                 |  | -O                    | +O |    |
|                                   | Rotating system |                                   |                           |                              |                            |                     |                     |                     |                     |                 |  | +O                    |    |    |
|                                   | Motor system    |                                   |                           |                              |                            |                     |                     |                     |                     |                 |  |                       | O  |    |
|                                   | Heater system   |                                   |                           |                              |                            |                     |                     |                     |                     |                 |  |                       |    | +O |

Legend  
 O : Directly Effective (Gray means self-evident)  
 Sign of O : "+" means the 2nd property is up with the 3rd property, "-" means inverse

### 〔手順6－3〕モデル化：第3階層

定式化内容を「第3階層のモデル」にした。この階層の式は代数計算のみで済むため、表計算にてモデル化した。

### 〔手順7－3〕モデルによる目標割付：第3階層

圧損の低減を入口部とファン部にて行う検討を第3階層モデルにて実施した。Table 2.4の赤太枠で示された以下の部分の形状修正で圧損低減が達成できる見込みを確認した。

- 1) 入口部：ファンに向かうところの断面急縮小がなくなるように、断面変化を滑らかにする。
- 2) ファン部：モーター直後に断面が急拡大する部分がなくなるように、モーター後端に流線形のしっぽを付ける。

形状修正の詳細は、本論文としては本質的でないので省略する。

合わせて、モーター側回路全体の電気抵抗を下げる検討を実施した。モーター自体の特性は変えられないので、モーター以外の抵抗値を下げることにした。

同様に、熱線側回路全体の電気抵抗を上げる検討をした。熱線の寸法は他の特性で決められているので、熱線以外の抵抗値を上げることにした。

### 2.3.2 考察

ここでは検討に必要な時間について、本手法と従来ありがちな統合的モデルを比較する。

2.1 にて述べたように、いわゆる従来のモデルの使い方では、モデルを一つの詳細モデルに統合しがちであり、パラメータ数が膨大になって検討に多大な時間がかかるものが多い。ここでは、上記の第2階層と第3階層とを組み合わせる詳細な形状パラメータを入力できるようにしたものを従来モデルとする。すると考え得る詳細パラメータが23個にもなり、単因子実験で感度の高いものに絞っても18個となった。

一方本手法では、これまで説明した通り3階層に分けて検討を進めることで、検討する特性を絞り込みながら進めることができた。そのために、一度に大量のパラメータスタディをシミュレーションモデルにて実施することはなかった。第1階層では8つの特性から4つを選定して検討し、第2階層ではこれらに関する特性のみを別々に検討すればよい。第2階層以降は一度に検討するパラメータは最大でも2つ、多くは1つのパラメータのみを調整するのみとなった。これらを考慮して検討時間を比較したのがTable 2.5である。本手法ではモデルを3つ作成しなければならないということを考慮しても、大幅に検討時間が短縮できることがわかる。

Table 2.5 Comparison to usual study in time

|  | Used model            | Working Item                              | Study method     | NO. of Param. | Unit study time(min) | Study time(min) |
|--|-----------------------|---|------------------|---------------|----------------------|-----------------|
| Whole Parameter study with usual way     | 2nd layer + 3rd layer | Building Model                            | -                | -             | -                    | 800             |
|  |                       | Sensitivity analysis                      | Single factorial | 23            | 10                   | 230             |
|  |                       | Parameter study                           | Full factorial   | 18            | 20                   | 3060            |
|  |                       |   |                  |               |                      | <b>total</b>    |
| Hierarchical study with this methodology | 1st layer             | Building Model                            | -                | -             | -                    | 120             |
|  |                       | Sensitivity analysis                      | Single factorial | 8             | 10                   | 80              |
|  |                       | Parameter study                           | Full factorial   | 4             | 20                   | 120             |
|  | 2nd layer             | Building Model                            | -                | -             | -                    | 480             |
|  |                       | Sensitivity analysis in each 1st property | Single factorial | 2             | 10                   | 20              |
|  |                       | Parameter study in each 1st property      | Full factorial   | 2+1+1         | 20                   | 80              |
|  | 3rd layer             | Building Model                            | -                | -             | -                    | 300             |
|  |                       | Sensitivity analysis in each 2nd property | Single factorial | 0             | 10                   | 0               |
|  |                       | Parameter study in each 2nd property      | Full factorial   | 1+1+1+1       | 20                   | 80              |
|  |                       |   |                  |               |                      | <b>total</b>    |

"a+b+c" means sum of the independent studies with parameter a, b, and c

## 2.4 事例 2 : 車両運動性能

事例 1 では、複数の目標はあるがそれらを一つの基本機能で表現できる例で階層化と目標の割付を説明した。しかし、実際の開発では基本機能が複数あり、それらを同時に検討しなければならない場合が多い。特に特定の特性が複数の性能に影響し、両立が難しい場合には検討に苦勞する。

本事例はそのような背反する性能を調整するために本手法を使用した例であり、特に制御系を含むシステムを、ハードありきではなく、ハードとソフトの両方を同時に検討した事例である。

### 2.4.1 手順と検討結果

#### 2.4.1.1 目標ステートメント

〔手順 1〕 目標ステートメント

次世代の自動車（自動運転を想定）の操縦安定性に対する目標を以下のようにステートメントとしてまとめた。

- ・ 応答性と安定性を以下のように高度に両立させる
  - (a) 直進状態からの回頭性：時速 60km/h から一定の操舵角で得られる旋回半径を基準車の 2/3 にする。
  - (b) 横風安定性：25m/sec の横風を 0.4sec 受けた後、横ずれ量が 0.01m 以下に収束するまでの時間を 1sec 以下にする。

#### 2.4.1.2 目標 (a) : 回頭性に対する検討

〔手順 2 (a)– 1, 3 (a)– 1, 4 (a)– 1〕 基本機能の定義・機能分解・各機能の定式化

ステートメントの目標 (a) を達成するための基本機能を FBD にまとめ、定式化した (Fig. 2.34) 。ここで最も抽象度が高いのは、上側のブロックであり、モーメントを受けて、その積分で角運動量（保存量）が変化するというブロックである。車両システムとしてはモーメントを発生する粒度まで考えなければならないので、下側のブロックも含めた。それぞれのブロックでの特性は、慣性モーメント  $I$  と操舵をモーメントに変換する係数  $C_{sm}$  となる。

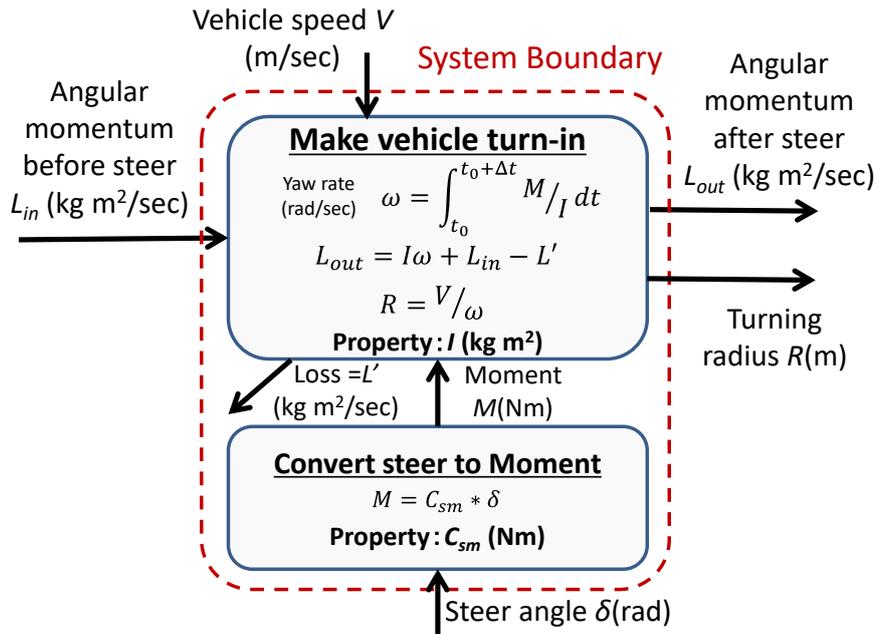


Fig. 2.34 Fundamental FBD for the Target (a)

〔手順 5 (a)－1〕 二元表作成：目標 (a)第 1 階層

目標と特性との関係を二元表にて表現した (Table 2.6) .

Table 2.6 Matrix for Target performance to Intermediate Properties

|                         |                              | Performance Item |
|-------------------------|------------------------------|------------------|
|                         |                              | 1/Turning radius |
| Intermediate Properties | Moment of Inertia of Vehicle | -○               |
|                         | Moment Coeff. from Steer     | +○               |

Legend : ○ : Directly Effective (Gray means self-evident)

Sign of ○ : "+" means the performance is up with the property

"-" means inverse

〔手順 6 (a)－1〕 モデル化：目標 (a)第 1 階層

各ブロックの数式をつないでシミュレーションモデルを構築した.

〔手順 7 (a)－1〕 モデルによる目標割付：目標 (a)第 1 階層

目標 (a) を満たすように、特性を変えてシミュレーションし (Fig. 2.35) , 以下のように特性の目標割付をした.

- ・慣性モーメント  $I$  : 基準車の 0.8 倍以下
- ・操舵をモーメントに変換する係数  $C_{sm}$  : 1.3 倍以上

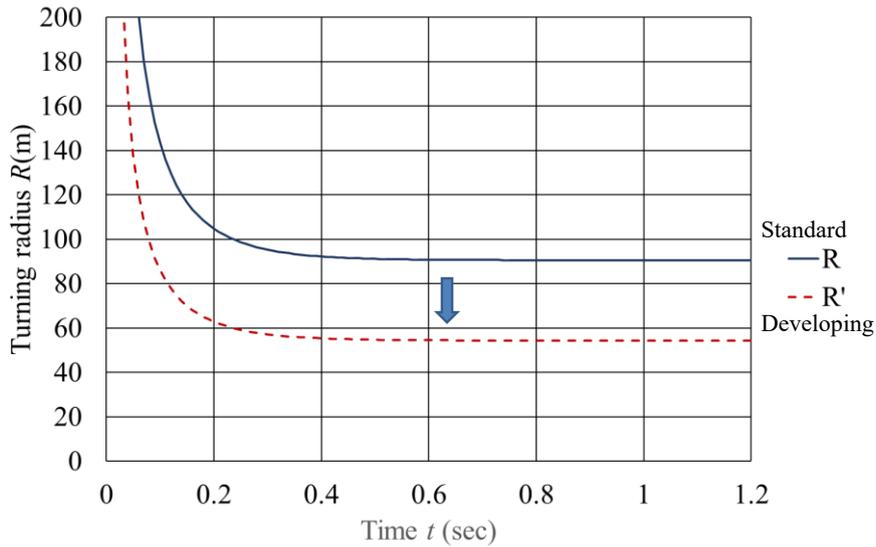


Fig. 2.35 Study of the 1st layer to achieve the Target (a)

〔手順 3 (a)– 2, 4 (a)– 2〕 機能分解・各機能の定式化：目標(a)第 2 階層

「前輪操舵」方式を念頭に置いて、Fig. 2.34 の FBD を分解し、つぎの階層の FBD を作成し、定式化した (Fig. 2.36) . ここでは四輪を抽象化した二輪モデルを採用した. 第 1 階層での変換係数  $C_{sm}$  が、この階層ではホイールベース前側  $L_f$  と前輪コーナリングパワー  $K_f$  の 2 つに分解されている. また、第 1 階層の上側のブロックが、この階層では右側のブロックになり「滑り角  $\beta$ 」と「ヨー角速度  $\omega$ 」の 2 つの運動方程式のブロックが連成するようすが示されている.

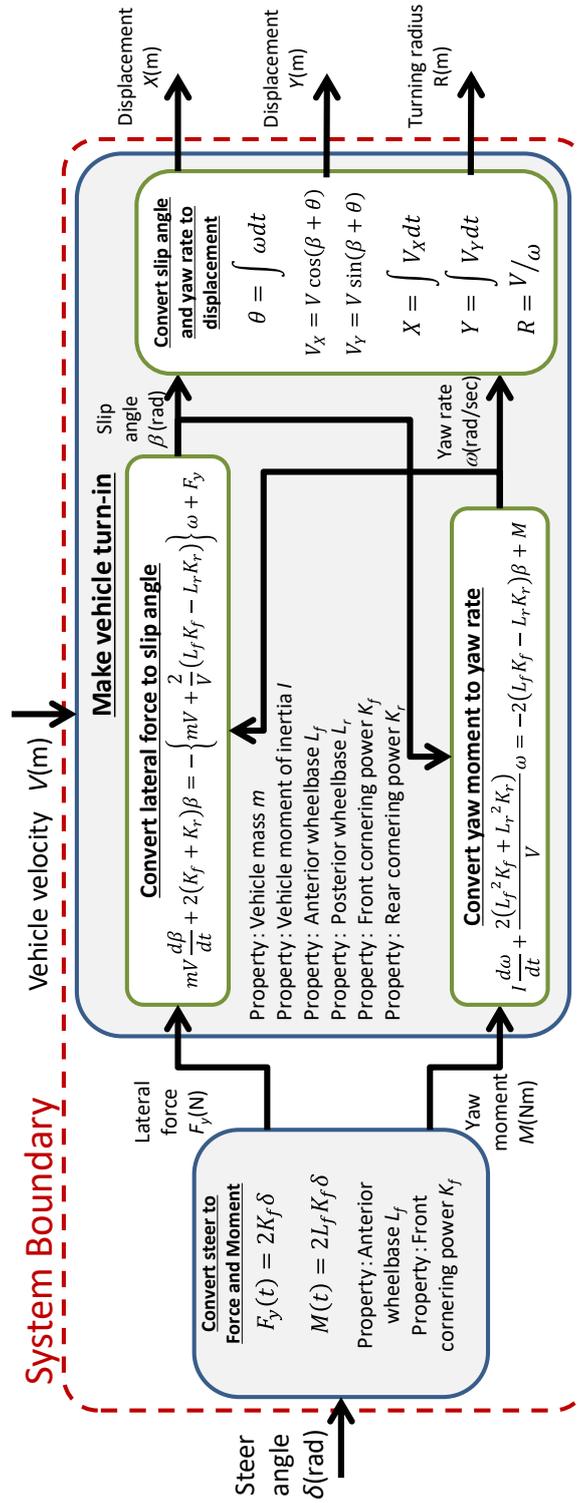
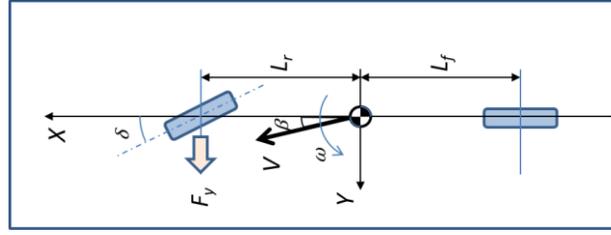


Fig. 2.36 FBD of the 2nd layer for the Target (a)

[手順 5 (a)– 2] 二元表作成：目標(a)第 2 階層

第 1 階層と第 2 階層との特性間の関係を二元表にて表現した (Table 2.7) .

Table 2.7 Matrix for the 1st Properties to 2nd Properties (a)

|                                   |         |                            | Targets                           |                          |
|-----------------------------------|---------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
|                                   |         |                            | 1st layer Intermediate properties |                          |
|                                   |         |                            | 1/Turning radius                  |                          |
|                                   |         |                            | Moment of Inertia of Vehicle      | Moment Coeff. from Steer |
| 2nd layer Intermediate properties | Vehicle | Vehicle mass               |                                   |                          |
|                                   |         | Vehicle moments of inertia | -○                                |                          |
|                                   |         | Anterior wheelbase         |                                   | +○                       |
|                                   |         | Posterior wheelbase        |                                   | -○                       |
|                                   | Wheel   | Fr. Cornering power        |                                   | +○                       |
|                                   |         | Rr. Cornering power        |                                   | -○                       |

Legend : ○ : Directly Effective (Gray means self-evident)

Sign of ○ : "+" means the 1st property is up with the 2nd property, "-" means inverse

#### 2.4.1.3 目標 (b) : 横風安定性に対する検討

[手順 2 (b), 3 (b), 4 (b)] 基本機能の定義・機能分解・各機能の定式化：目標(b)

目標ステートメントの目標 (b) を達成するための基本機能を FBD にまとめ、定式化した (Fig. 2.37) . ここで Vehicle System と書かれている部分のブロックは、Fig. 2.36 のブロックに横風の外乱を加えたものとほぼ同様となるために詳細の記述を省略するが、操舵の仕方が違うので別の現象を表すブロック図となる。第 1 階層としては細かい粒度であるが、この粒度が必要なのは、横風の外乱による横ずれを収束させる働きを適切に評価するには車両システムの内部状態量として「滑り角  $\beta$ 」と「ヨー角速度  $\omega$ 」の両方の微分方程式を表現しないとイケないからである。また自動運転を想定したコントローラーは人間が操舵する場合の制御を最もシンプルに表現する「1 次遅れ+比例」のコントローラーとし、特性を以下の 2 つとした。

ゲイン :  $h$ , 時定数 :  $t_L$

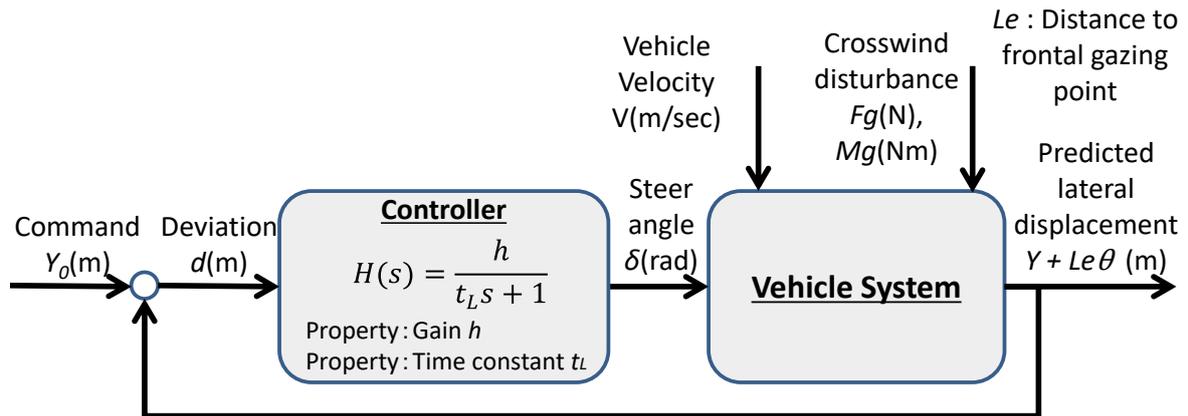


Fig. 2.37 FBD of the 1st layer for Target (b)

〔手順 5 (a, b) - 2〕 二元表作成：目標(a, b)

目標(b)と特性との間の関係を目指(a)と合わせて二元表にて表現した (Table 2.8) .

Table 2.8 Matrix for Target/1st Properties to 2nd Properties

|                                   |         |                            | Targets                           |                          |                      |
|-----------------------------------|---------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
|                                   |         |                            | 1st layer Intermediate properties |                          |                      |
|                                   |         |                            | 1/Turning radius                  |                          | Cross wind stability |
|                                   |         |                            | Moment of Inertia of Vehicle      | Moment Coeff. from Steer | -                    |
| 2nd layer Intermediate properties | Vehicle | Vehicle mass               |                                   |                          | +○                   |
|                                   |         | Vehicle moments of inertia | -○                                |                          | +○                   |
|                                   |         | Anterior wheelbase         |                                   | +○                       | -○                   |
|                                   |         | Posterior wheelbase        |                                   | -○                       | +○                   |
|                                   | Wheel   | Fr. Cornering power        |                                   | +○                       | -○                   |
|                                   |         | Rr. Cornering power        |                                   | -○                       | +○                   |
|                                   | Control | Control gain               |                                   |                          | ±○                   |
|                                   |         | Time constant of control   |                                   |                          | -○                   |

Legend : ○ : Directly Effective (Gray means self-evident)

Sign of ○ : "+" means the property/performance is up with the 2nd property, "-" means inverse

〔手順 6 (a, b) - 2〕 モデル化：目標(a, b)

目標(a)の第 2 階層と目標(b)のそれぞれに対して、モデルを構築した。

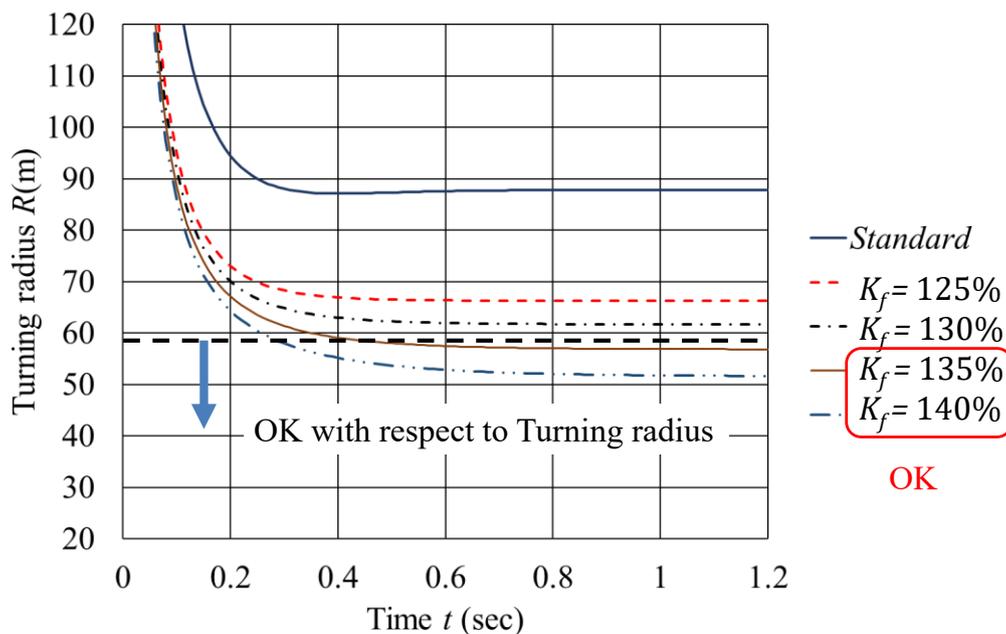
〔手順7(a, b)– 2〕モデルによる目標割付：目標(a, b)

目標 (a) の第2階層と目標 (b) の検討を同時に行い、ハードウェアと制御系への目標をそれぞれ割り付けた。検討の最終結果のみを記す。

特性の目標割付結果：

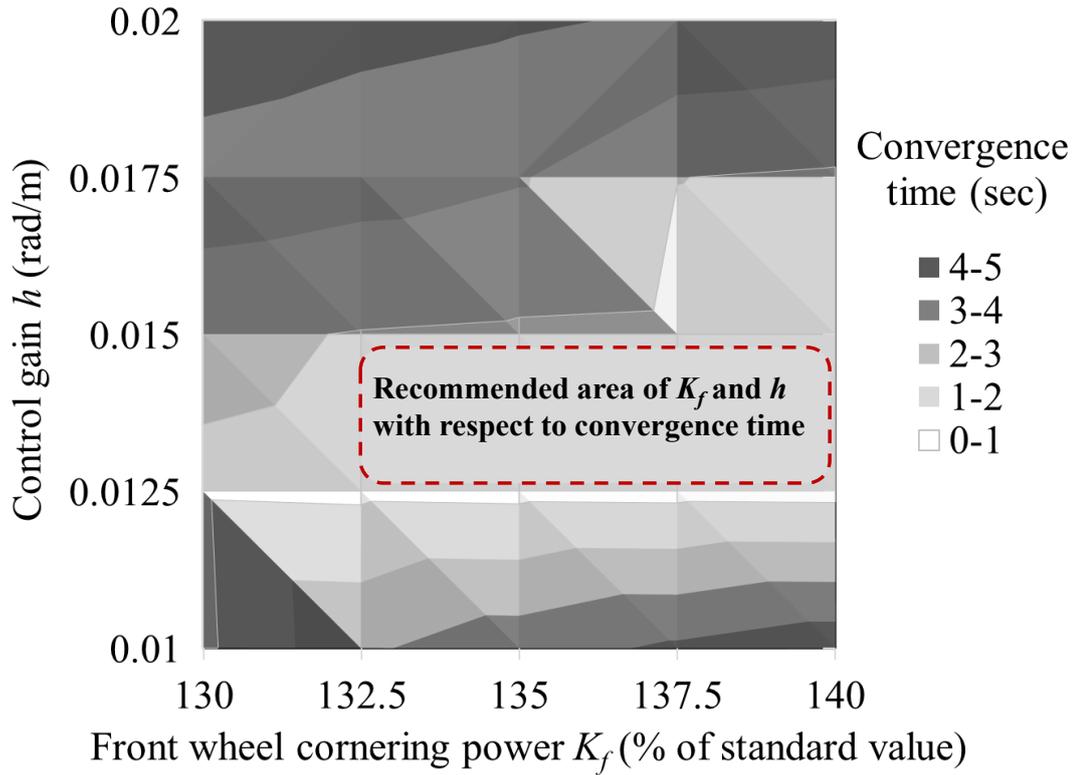
$L_f$  : 1 倍,  $K_f$  : 1.35 倍~1.4 倍,  $h$  : 0.0125~0.015,  $t_L$  : 0.1 以下

目標 (a) と目標 (b) に対する検討結果を Fig. 2.38 に示す。Fig. 2.38(1) は  $K_f$  による目標 (a) の達成を確認し、Fig. 2.38 (2) は目標 (b) の収束性が  $K_f$  と  $h$  によってどう変化するかを調べたものである。 $K_f$  と  $h$  の範囲はこれら 2 つの結果をもとに選定した。Fig. 2.38(3) を見ると、 $h$  が小さいほど収束時間が短くなるが、小さすぎるとオーバーシュートをするのがわかる。これが Fig. 2.38 (2) で  $h$  が小さいときに収束性が悪化している理由である。これらの結果より、回頭性を良くするために  $K_f$  を増やすことが横風安定性を悪化させるが、それを制御で補っていることが示されている。こうした設計意図と特性の目標範囲を詳細なハードウェアと制御系の設計に渡して、V 字プロセスを進めてゆくことになる、この先の開発では、上記の特性範囲を実現するための検討をすることになるが、この事例の狙いはシステム設計の例を示すことなので、この先の詳細検討は省略する。

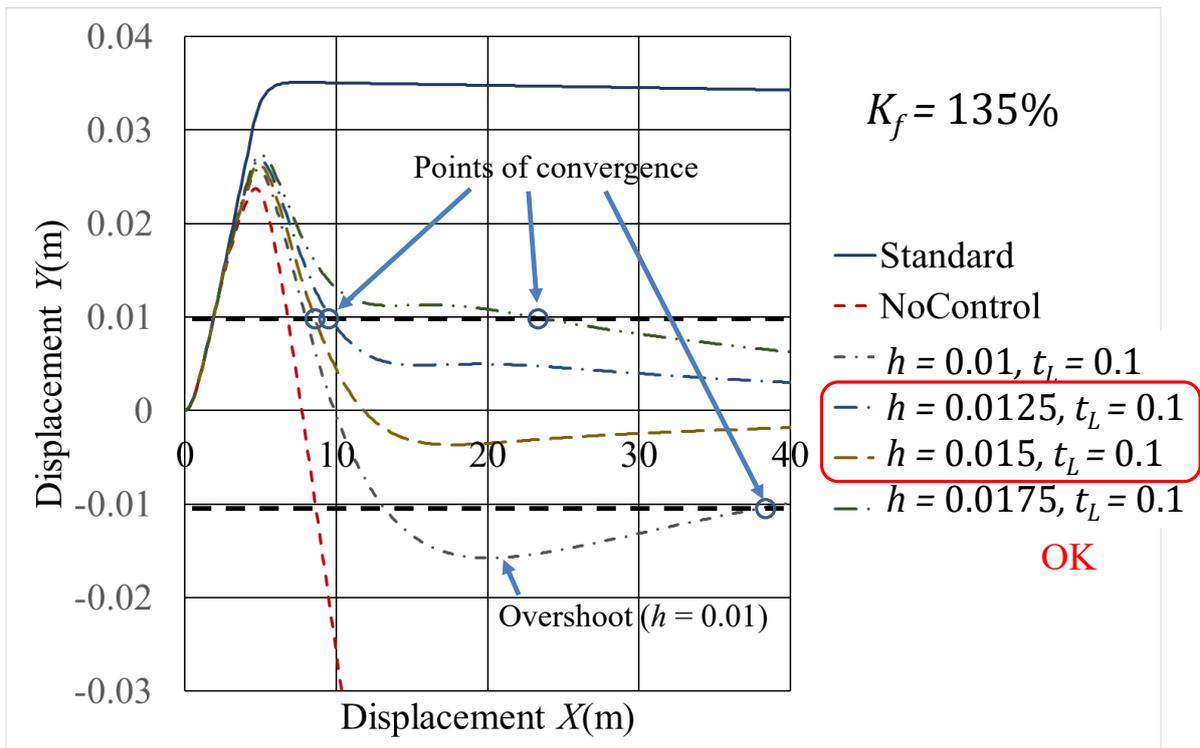


(1) Results of turning radius for the requirement (a)

Fig. 2.38 Study to achieve both requirements (a) and (b)



(2) Response surface for the requirement (b)



(3) One of the results of vehicle loci for the requirement (b) ( $K_f=135\%$ )

Fig. 2.38 Studies to achieve both requirements (a) and (b)

## 2.4.2 考察

2.4 では本手法を自動車の操縦性と安定性の検討に活用し、それらを高い次元で両立させることが可能になることを示した。

この事例は、四輪の自動車で前輪操舵という方式（アーキテクチャ）を前提として考えているが、その中でも回頭性と安定性という相反する性能を高度なレベルで成り立たせるために、従来のしがらみから離れて操舵輪のコーナリングパワー特性を大きくした例である。自動車のステア特性は、通常は安定性を重視して「軽いアンダーステア」にすることがほとんどである。これは応答性をある程度犠牲にしていることを意味する。制御で操縦を補助するとしても、そうして設計されたハードを前提として制御設計するやり方であった。これをフロー図に描くと Fig. 2.39 のようになる。それに対してこの事例では Fig. 2.40 のように「システム設計」の段階で「応答性」と「安定性」の両方の目標を考慮して、しかもそれをハードと制御系両方で成り立たせるという考えで初めから検討することで、2つの相反する目標を高いレベルで両立することができたことになる。その際に、四輪操舵システムなどのコストのかかるシステムを使わなくても両立ができることを示したことも重要である。これは性能を上げる際に「アイテムありき」の足し算の思想ではなく、抽象化して原理に立ち戻って、かつ定量的に検討するから可能になることであり、ここに機能分解の第1階層の抽象度を上げる価値が表れている。

なお、本事例では目標 (a) の検討の第2階層で操舵は前輪だけとしたが、より一般的にはこの検討の際に、前輪操舵、四輪操舵などの複数のアーキテクチャを比較して性能とコストなどのバランスを考えることとなるであろう。



Fig. 2.39 Typical conventional automotive vehicle dynamics & control development process

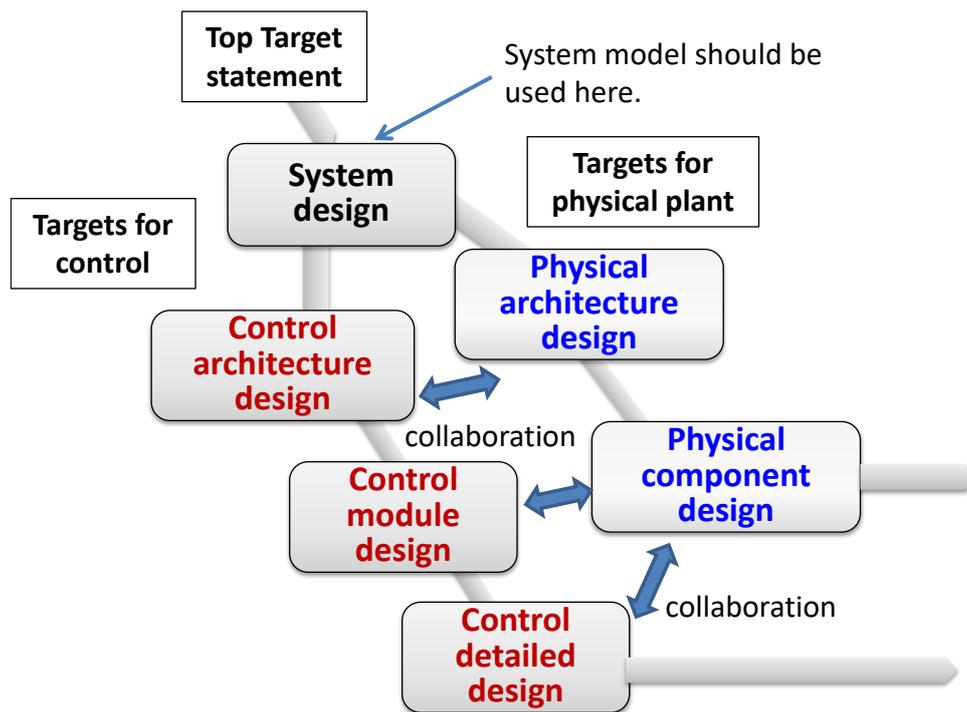


Fig. 2.40 System design before physical and control design

## 2.5 結言

本章では、「SE の階層的開発の考え方をを用いて、シミュレーションモデルを活用しながら開発する手法として MBD が取り組まれているが、まだ成功例は多くない」ことに対して、その課題を分析し、その解決のための手法を提案した。

この手法は具体的には、「機能で階層化」して目標を割付けながら製品を開発する手法であり、機能ブロック図に数式を組み込み、またその定式化の際に特性を抽出する手法である。この特性に目標を割付けることで「目標の階層化(Target Cascading)」という SE の考え方を具体的な方法論として実装できたことになる。特性が階層間をつなぐという意味で、本手法を「中間特性法」と名付けた。

機能で階層化するためには、「機能」と「モノ」を分離することが必要である。既存の製品を見ながらもこれを抽象化し、注目する目標を成立させるために「得たい働き」を考え、その後で「実現手段（アーキテクチャ）」を選択することが重要である。

2.2 で示したように、筆者はそれらの SE の考え方に加えて、すり合わせ型アーキテクチャの製品での機能の考え方を具体化し、また機能を「物理・化学の数式」と捉えなおして「定式化」することによって、シミュレーションモデルにつなげるという価値を明確に示した。これが、2.1 で述べた「昔の手計算を現代のシミュレーションモデル化技術を使って復権させ、複雑な製品開発にシステムチックに適用できるようにする試み」に相当する。単なる温故知新ではなく、そうした検討を「ベテランの頭の中だけで実施する」ものから、「可視化して複数の技術者で議論しながらシステムチックに進める」ものに変えたことも、本手法の価値と考える。

次に MBD でのモデルの使い方に対しては、機能から抽出した「特性」をパラメータとしてシミュレーションすることで、この特性に値やその範囲を割付けながら階層的に目標を割付けてゆくことができるという新しい考えを提案した。

この方法論を、2つの事例に適用し、その利点や効果を確認した。

1 つ目の例では、ドライヤーの開発を例に、本手法の具体的な使い方を示した。複数の物理現象にわたる機能の連鎖を FBD にて表現し、これを定式化することで、製品開発の

見通しがとても良くなることを示した。この事例は説明をわかりやすくするためにドライヤーという比較的単純な製品を選んだが、製品が複雑になればなるほど、複数の関係部署、複数の性能項目を俯瞰的に見ながら製品開発をすることが重要になり、本手法が有効になる。さらに定式化の結果抽出された複数の特性の中から重点を置く特性を選択し、それに中間的な目標を割付けることで、効率的な設計検討を可能にし、また、どの特性に重点を置くかが「設計思想」を反映しているため、後世に設計思想とそのための技術を伝承するという観点でも本手法が有効であることを述べた。加えて、本手法で階層的に検討することは遠回りに見えて、実はシステム全体を統合したようなモデルで一度に検討するよりも効率的であることを示した。

2 つ目の事例では、複数の基本性能を同時に満たすために複数のモデルを使いながら中間特性でバランスさせる例を示した。この例では同時に、制御を含んだ製品開発をする際に、従来の「ハードありき」ではなく、ハードを設計する前にシステムとして検討する例にもなっていた。システムとして俯瞰して「こうあるべき」という検討をした後に、ハードと制御の設計に移行する考え方をすると、設計空間が広がり、より高いバランスを取った製品開発が可能になること、またその検討にも本手法が有効であることを示した。

本手法のもう一つの特徴である、「既存製品のアーキテクチャから一旦離れることで今までになかった機能あるいは注目されていなかった特性に注目して開発することにより、従来なかった画期的な製品を開発するポテンシャルが生まれる」という点に関しては、検討の際の抽象度が重要となる。本章の方法でも抽象度を上げて実施することは可能ではあるが、第1階層の抽象度を最高に上げて検討する方法を、次章にて説明する。

## 第 3 章 抽象化モデル

### 3.1 緒言

消費者は必要なモノをすでに持っており，工業製品に求められる「新しい価値」を発掘して行かなければ，製造業は生き残れなくなっている」と第 1 章で述べた。

第 2 章で提案した手法の中で，機能を階層的に考えていく際に，特に第 1 階層の抽象度が重要であると述べた。世の中の物理現象・化学変化などを考えると，それを駆動しているのはエネルギー変換であり，エネルギーとして表現することが最も抽象度が高くなる。すなわち，分解の第 1 階層の機能を「エネルギー変換・伝達機能」として取り扱い，エネルギーの流れを検討するモデルにすることで，製品の本質にまで遡った思考が喚起され，「新しい価値」を生み出すような「新しいアーキテクチャ」を考えやすくなる。

エネルギーに注目したモデリング手法の先行研究としては，ボンドグラフ[18]や High Level Model Description(HLMD)[19]などが提案されているが，それらは下位の物理法則を含んで統合的なモデル化をするものである。例えばボンドグラフは，「エフォート」と「フロー」の物理変数を考えて，それらを掛けると「パワー（エネルギーの時間変化）」になるという考え方でモデルを構築するものであるが，実際には「エフォート」，「フロー」それぞれの物理変数で計算するため，物理法則を含んだ複雑なものになる。同様に HLMD は保存則と言う観点で一般化したモデルを構築するが，その中に物理量レベルの式が内包されているというものであり，やはり計算は物理法則レベルのものとなる。

そこで本章では，第 2 章で取り上げたような一般の物理・化学現象をさらに抽象化して，エネルギーモデルを導き，計算の際にはその物理現象・化学変化を切り離すことを提案し，これを「抽象化エネルギーモデル(Abstraced Energy Model)」と命名する。エネルギーのレベルで見ることによって，全ての物理・化学現象を統一的に扱うことができ，全体俯瞰して理想状態との差を考えながら新しいアーキテクチャを創造することが容易となる。

抽象化エネルギーモデルを含んだ中間特性法の全体像を Fig. 3.1 に示し，検討手順を以下に記す。Fig. 2.3 と異なるのは，第 1 階層をエネルギー変換の視点で機能分解し，定式化，モデル化することである。

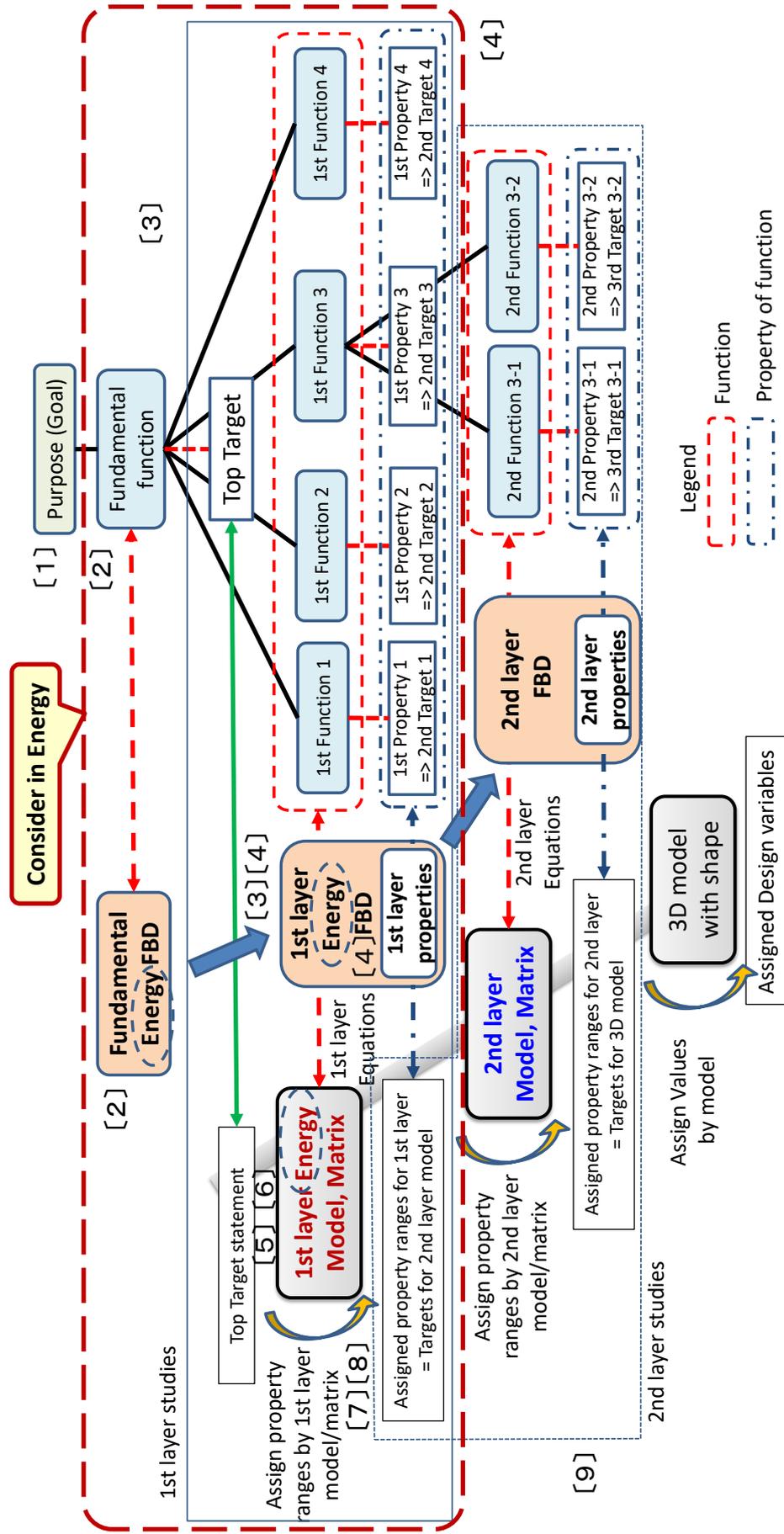


Fig. 3.1 General view of “Intermediate property-targeting method” including “Abstracted Energy model”

この抽象化エネルギーモデルは、以下の特徴を持つ。

1) 一般の物理現象／化学変化などを抽象化して「エネルギー変換／伝達機能」として取り扱うことで、異なる分野を統一的に扱えるようにする。

2) 保存則とエネルギーの流れ方（分岐，伝達等）のみをよりどころとして，内包されている物理／化学法則を一旦脇に置いてエネルギーの流れをどうしたいのかを定量的に検討することで，現行製品のしがらみから離れた新しいアーキテクチャを創造することを容易にする。

3) モデルの特性（パラメータ）である「エネルギー変換／伝達係数」の現状値を得るためには，既存製品を対象とした物理現象／化学変化レベルのシミュレーションモデルから抽出した各部位のエネルギーデータを用いる。

特に上記 2) の太字下線部が，上記の先行研究と大きく異なるところである。ボンドグラフ[18]も HLMD[19]も，エネルギーの流れを図示し保存則を考慮するところは本手法と似ているが，計算する際には下位の物理・化学の式を用いているため，従来と同じ数式を用いた同じ方式の製品を前提とした計算になる。それに対して抽象化エネルギーモデルは，そうした前提を取り払って抽象度が高いままで検討ができるため，目的志向でより広い設計空間を考えることができることになる。すなわち，保存則が成り立つ範囲で「このようなエネルギーの流れにしたい」ということをまず決めて，その実現手段（アーキテクチャ）は後で決めるということである。従来的手段でそれが実現できない場合には，新しい手段を検討する契機となることになる。そこに新しい価値が生まれてくるわけである。

## 3.2 機能で考える階層化の最上位で用いる「抽象化モデル」

### 3.2.1 抽象化によるモデル作製

「抽象化エネルギーモデル」を作成するには、まずは第2章の手順と同様に、目標を必要な機能に分解するが、その際に「エネルギー変換の観点から分解」する。さらに定式化後にモデル化する際には「物理量レベルのシミュレーションモデル」の結果からエネルギーを抽出して「特性」の現状値を求める。

以下に、詳しい手順を示す。なお、手順の番号は第2章と対応させてある。

### 3.2.2 抽象化エネルギーモデル

〔手順1, 2〕顧客要求と目標ステートメント、および基本機能の定義

顧客の声を分析し、製品に対する目標をステートメントとしてまとめる。ここは第2章の手順と同様である。続いて、そのために必要な基本機能をエネルギーの観点から定義する。これはこの後の機能分解を「エネルギーの流れ・変換」の観点で実施するためである。

〔手順3〕機能分解：エネルギー表現

基本機能をエネルギーの流れ・変換を考慮して複数のブロックに分解する。分解のイメージは「3.3 事例 エアコンディショナー」を参照されたい。

〔手順4〕各機能の定式化：エネルギー表現

基本機能を分解した FBD の各ブロックに対して、エネルギー変換の観点で定式化する。保存量の収支バランスは、化学工学における物質収支 (Mass balance)[20]、あるいは流体力学の保存則 (Conservation law)[21]と同様に、流入(in)／流出(out)／蓄積(accumulate)／発生(generate)／損失(loss)を考慮して、一般的に (2a)式あるいは(2b)式の形に書ける。前者は定常状態、後者は過渡状態を表現するのに向いている。後者は前者の時間微分に相当している。なお、 $E$  はエネルギー、 $P$  はその時間変化のパワーを意味している。

$$E_a = E_{in} - E_{out} + E_g - E_l \quad (2a)$$

$$\frac{dE_a}{dt} = P_{in} - P_{out} + P_g - P_l \quad (2b)$$

これ以降は、代表として(2a)式の場合を示すが、(2b)式の場合も同様となる。この関係

式を考慮して、ブロック図中の一つのブロックについての各エネルギー項は一般的に Fig. 3.2 のようになる。図中の変換係数  $\alpha_x$  (添字の  $x$  は  $a, in, out$  などの総称。以下同様) が、この階層の「特性」を表し、下位の階層に目標を割付けるための「中間特性」となる。

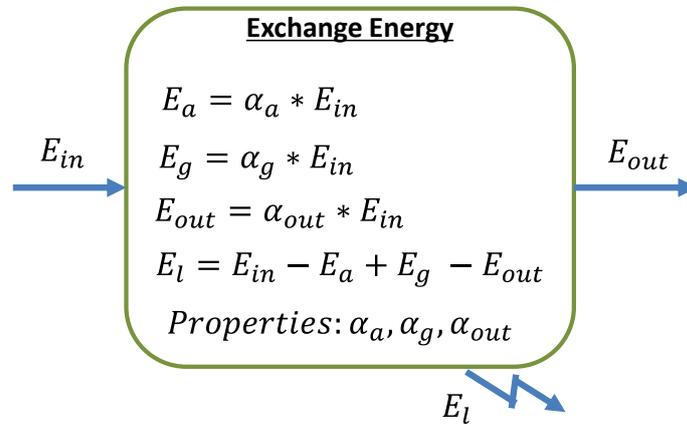


Fig. 3.2 Energy terms in one block

〔手順5〕 二元表作成：エネルギー変換特性

第2章と同様に、目標と特性との関係性を二元表に表す。

〔手順6〕 モデル化：抽象化エネルギーモデル

全てのブロックのエネルギー変換の式を全て集めて連立方程式を作成して「抽象化エネルギーモデル」を構築する。このモデルで検討するためには変換係数  $\alpha_x$  のノミナル値（現状値）を決めなければならない。そのためには、下位の物理レベルのシミュレーションモデルを用いてエネルギー計算をする（前の機種モデルがあればそれを用い、なければ作る）。以下に抽象化エネルギーモデルの構築手順を示す。

1) システム全体のブロックについて、下位の物理レベルのシミュレーションモデルより Fig. 3.2 の各エネルギー項  $E_x$  を求める。

まずこの各エネルギー項の時点で、システム全体としても個々のブロックについても、保存則が成立しているはずである。

2) 各エネルギー項から逆算して変換係数  $\alpha_x$  を求める。

例えば Fig. 3.2 の  $\alpha_a$  のノミナル値は次式で求まる。

$$\alpha_a = E_a / E_{in} \tag{3}$$

3) 今度は、上記で求めた係数  $\alpha_x$  をパラメータとして（デフォルトとしてノミナル値を入れて）、Fig. 3.2 内の式のように入力エネルギー  $E_{in}$  から各部のエネルギー  $E_x$  を計算するモデルを構築する。

〔手順7〕モデルによる目標割付：抽象化エネルギーモデル

エネルギー変換レベルの特性は、どこに重点を置いて選定すべきかの経験が少ない場合が多いので、まず感度検討を実施するのが望ましい。上記のモデルにおいていずれかのエネルギー変換係数  $\alpha_x$ （特性）のみを一定幅で一つずつ変動させて評価部分のエネルギーの変化率（感度）を求め、この感度が高い係数の中から目標割付に使用する特性（係数）を選定する。

次に選定した係数  $\alpha_x$  をパラメータとして少しずつ値を変えながら抽象化エネルギーモデルで計算し、この係数  $\alpha_x$  をどのくらいのレベルにしたら目標とするエネルギーレベルとなるかを考える。このエネルギー変換係数の係数  $\alpha_x$  の値・範囲を、次の階層での検討の目標とする。

〔手順8〕次の階層での機能分解・定式化・二元表化・モデル化・目標割付

これ以降は、抽象化エネルギーモデルを用いない場合と同様の手順となる。一つ下位の階層のシミュレーションモデルにて、係数  $\alpha_x$  に割り付けた目標を達成する特性（パラメータ）を検討する。この際に、エネルギー変換係数  $\alpha_x$  のノミナル値を求めるために使用したシミュレーションモデルで目標を達成できれば、そのアーキテクチャで OK であるが、目標達成が難しければ別のアーキテクチャを検討することになる。

### 3.3 事例：エアコンディショナー

本手法を適用した事例を，エアコンディショナーを題材として示す。

#### 3.3.1 手順と検討結果

〔手順1〕 顧客要求と目標ステートメント

顧客の声を分析し，製品開発の意図を込めて，次世代のエアコンディショナーに対する目標を以下のようにステートメントとしてまとめた。

「空気熱容量  $4000\text{J/K}$  の部屋を以下の条件下で摂氏  $20$  度まで  $60$  秒で冷やす。さらにその後は上下  $2^\circ\text{C}$  以内に保つ。」

最も厳しい条件：外気温度  $30^\circ\text{C}$ ，初期室温  $38^\circ\text{C}$ ，太陽放射による入熱量  $800\text{ W}$

〔手順2〕 基本機能の定義

目標ステートメントを達成するための基本機能を FBD にまとめた (Fig. 3.3)。熱の物理領域は，それ自体がエネルギーの伝達を意味しているため，ここではエネルギーという言葉は使っていないが，この後エネルギー変換の観点で機能を分解するのに支障はない。

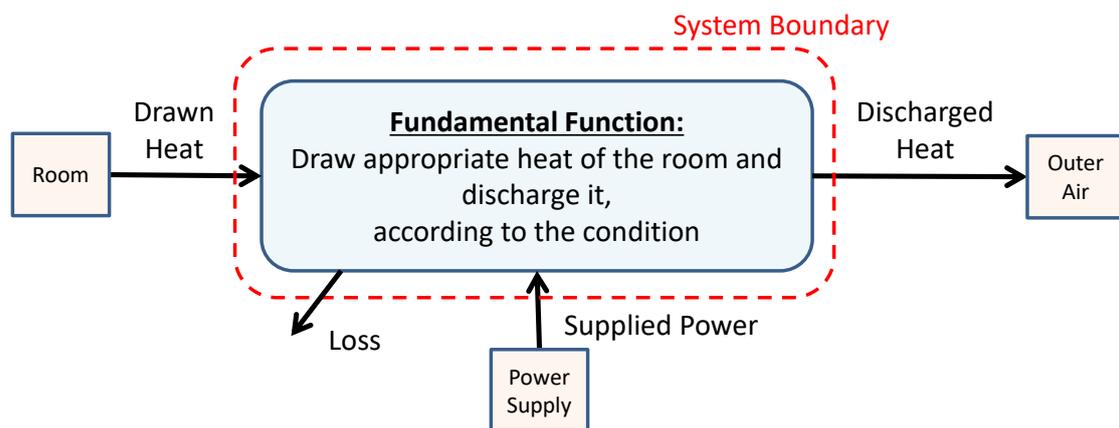


Fig. 3.3 Fundamental FBD to achieve the top target

〔手順3〕機能分解：エネルギー表現

エアコンディショナーの基本的なアーキテクチャを考慮しながら、基本機能の FBD を分解するが、その前にエアコンディショナーの本質的な機能を考察した (Fig. 3.4)

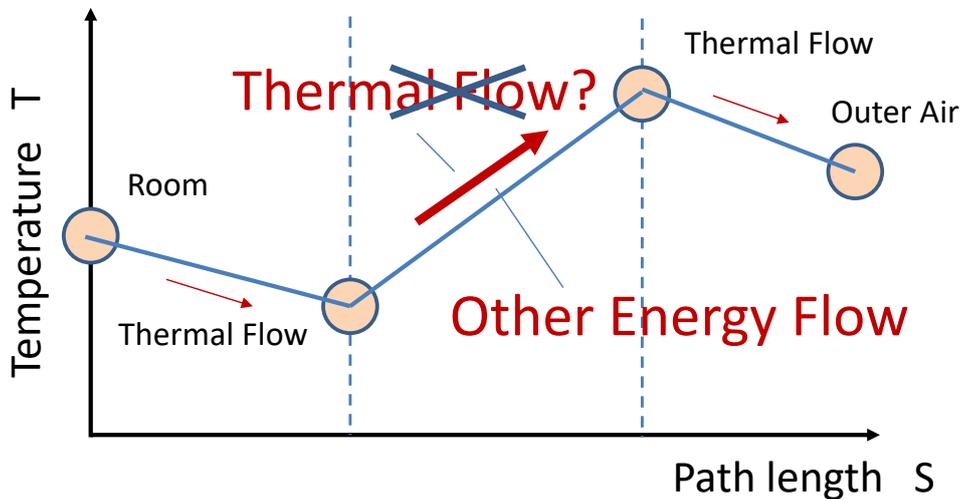


Fig. 3.4 Considering Fundamental function of Air Conditioner

室温よりも温度が高い外気に熱エネルギーを放出するためには、エアコンディショナーの冷却装置内で温度の低いところから高いところに熱を移動させなければならないが、そのままでは物理の法則に反する。これを克服するために、冷却システムでは必ず、熱エネルギーを別の形態のエネルギーに変換して、温度の高いところへ運んでいる。

この原理を考慮して、エネルギー変換・伝達を表現する FBD に分解した (Fig. 3.5) 。この例では 3 つの大きな機能ブロックに分解し、真中のブロックに「熱エネルギーを別の形態のエネルギーに変換して温度の高いところへ運ぶ機能」を含めた。あらゆる冷却システムがこの原理を用いている。すなわち、この FBD は、一般的な蒸気圧縮方式だけでなく、ペルチェ方式など、Table 3.1 のような様々な冷却方式を網羅しており、目的・目標に応じて様々なアーキテクチャに展開できる潜在性をもっているということになる。そして必要なエネルギー変換係数の程度に応じて、冷却方式を選定すれば良いことになる。このようなことは、全く新しい冷却製品を開発する際には無意識に実施していることとも言えるが、それを明示的にブロック図として表現し、定量的に検討できるモデルを構築することになる。これが FBD を抽象度が最も高いエネルギーレベルで考える大きなメリットである。

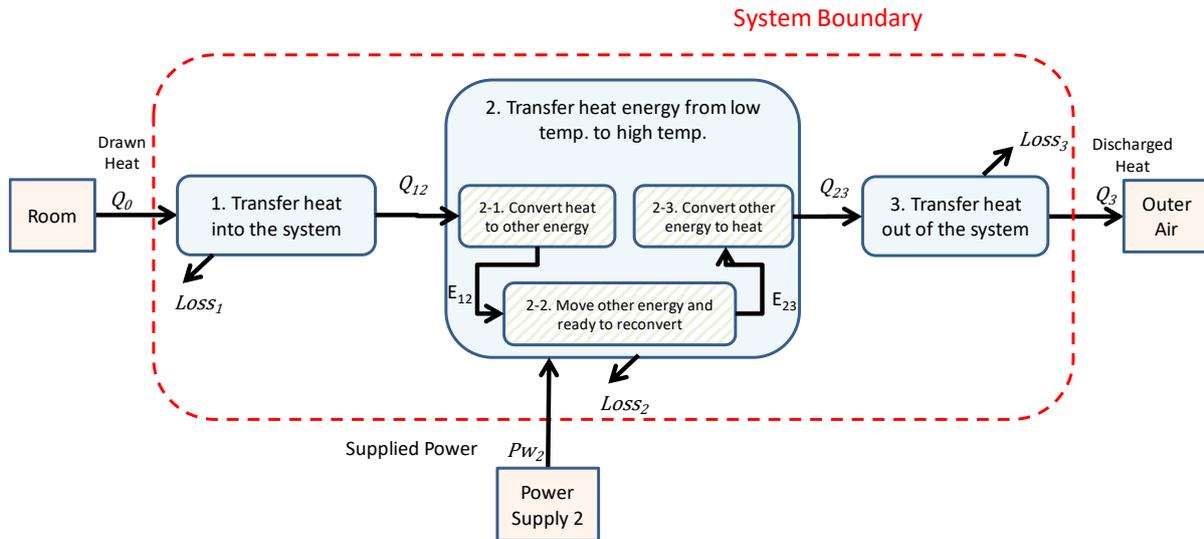


Fig. 3.5 Decomposition of the fundamental function: Energy flow FBD

Table 3.1 Various Refrigerating architectures

| Architecture name        | Medium(Carrier)        | Energy form   | Method of Transfer            |
|--------------------------|------------------------|---|-------------------------------|
| Vapor Compression        | Refrigerant            | Latent heat   | Circulation by compressor     |
| Peltier effect           | Electron/Electron hole | Energy level  | Electrical current            |
| Magneto-caloric effect   | Magnetic field         | Entropy of magnetic substance                               | Cycle of magnetic field       |
| Thermoacoustic effect    | Operating gas(He-Ar)   | Acoustic resonance (adiabatic compression/expansion of gas) | Gas transfer by acoustic wave |
| Hydrogen absorbing alloy | Hydrogen               | Chemical change of Hydrogen                                 | Circulation by compressor     |

〔手順4〕各機能の定式化：エネルギー表現

Fig. 3.5 の各機能ブロックを定式化した．ここでは代表として Fig. 3.5 のブロック 1 とブロック 2-2 について定式化した例を Fig. 3.6 に示す．

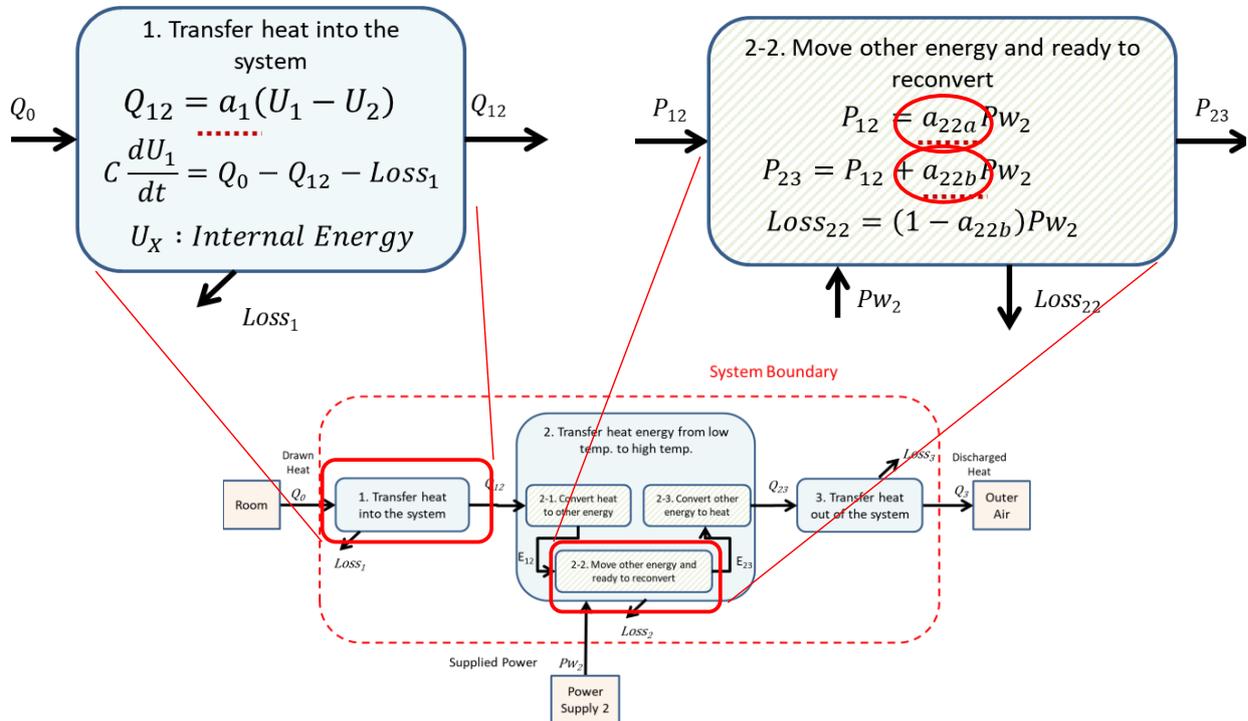


Fig. 3.6 Formulation of each function block

〔手順5〕二元表作成：エネルギー変換特性

第1階層の定式化内容に基づいて作成した目標と特性との二元表を Table 3.2 に示す．

Table 3.2 Matrix for Target performance to Intermediate Properties

|                                |              |                                  | Performance Item            |
|--------------------------------|--------------|----------------------------------|-----------------------------|
|                                |              |                                  | Temperature decreasing rate |
| Energy Intermediate Properties | Function 1   | Thermal energy transfer coeff.   | +○                          |
|                                |              | Thermal energy mass              | -○                          |
|                                | Function 2-1 | Energy convert coeff.            | +○                          |
|                                | Function 2-2 | Energy transfer coeff. $a_{22a}$ | +○                          |
|                                |              | Drive energy coeff. $a_{22b}$    | +○                          |
|                                | Function 2-3 | Energy reconvert coeff.          | +○                          |
|                                | Function 3   | Thermal energy transfer coeff.   | +○                          |
| Thermal energy mass            |              | -○                               |                             |

Legend

○ : Directly Effective (Gray means self-evident)

Sign of ○ : "+" means the performance is up with the property, "-" means inverse

〔手順6〕モデル化：抽象化エネルギーモデル

各ブロックのエネルギー変換係数 $a_{xx}$ のノミナル値を、既存のエアコンディショナーモデルで求めたエネルギー値から計算し、定式化内容をつないだ「抽象化エネルギーモデル」を構築した。

〔手順7〕モデルによる目標割付：抽象化エネルギーモデル

エネルギー変換係数 $a_{xx}$ の感度を考慮して、2つの特性 $a_{22a}$ と $a_{22b}$ とを「中間特性」として選定した。これは Fig. 3.6 の赤丸印の変換係数であり、Table 3.2 の赤実線枠で囲った特性である。目標ステートメントを満たすように、これら2つのエネルギー変換係数を用いたパラメータスタディを実施した。結果を Fig. 3.7 に示す。この検討の結果、最も厳しい条件の際のこれら2つの中間特性の目標は以下のように定めた。

$$a_{22a} > 2.9, a_{22b} > 0.8 \quad (4)$$

このエネルギー変換係数を満たすようなアーキテクチャを考えられれば、従来とは全く別のアーキテクチャでも、今回の開発目標を達成する製品を開発できる可能性があるということになる。

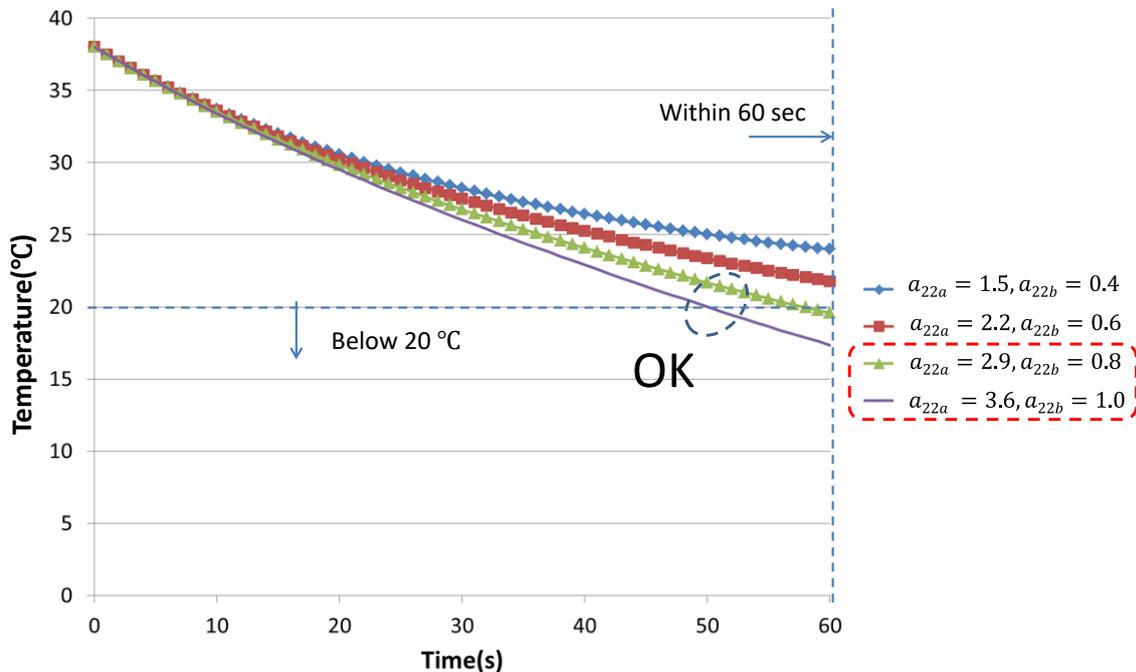


Fig. 3.7 Study of  $a_{22a}$  and  $a_{22b}$  to achieve the target with Abstracted energy model

続いて、温度が目標に達した後に維持するための制御について検討した。まずはこの階層のモデルで、どの特性（変換係数）をどの程度調整しなければいけないかを調べ、以下の2つの特性を選定した（Table 3.2 の紫一点鎖線枠）。これらの2つを調整する制御の内容を具体的に検討するのは次の階層とする。

①機能ブロック1の  $a_1$  (Fig. 3.6 の左のブロックの点線下線)

②機能ブロック2の  $a_{22a}$  ((4)の1つ目の特性と同じ)

〔手順8a〕 次の階層での機能分解・定式化・二元表化

Fig. 3.5 のエネルギーFBD を分解して、次の階層の物理的 FBD を作成した (Fig. 3.8) 。なお、本章の手法のメリットを最大限に見せるには、一般的でないアーキテクチャでの検討を示す方が望ましいが、本事例では通常の蒸気圧縮方式を選定したものとして説明する。

さらに、各ブロックに対して物理的な定式化を行った。伝熱の方程式や冷媒の相変化特性 (P-h 線図) などを用いた。ここでは例として一つ目の伝熱部分と、2 つ目の冷媒の状態変化のブロックを示す (Fig. 3.9) 。

第 2 階層における特性と、第 1 階層での特性との関係性を二元表にまとめたものを、Table 3.3 に示す。

次に、第 1 階層で制御のために選定した2つのエネルギー変換係数を調整するべく、センシングする変数と制御ロジックを決めて、制御の機能ブロックを加えた (Fig. 3.10) 。

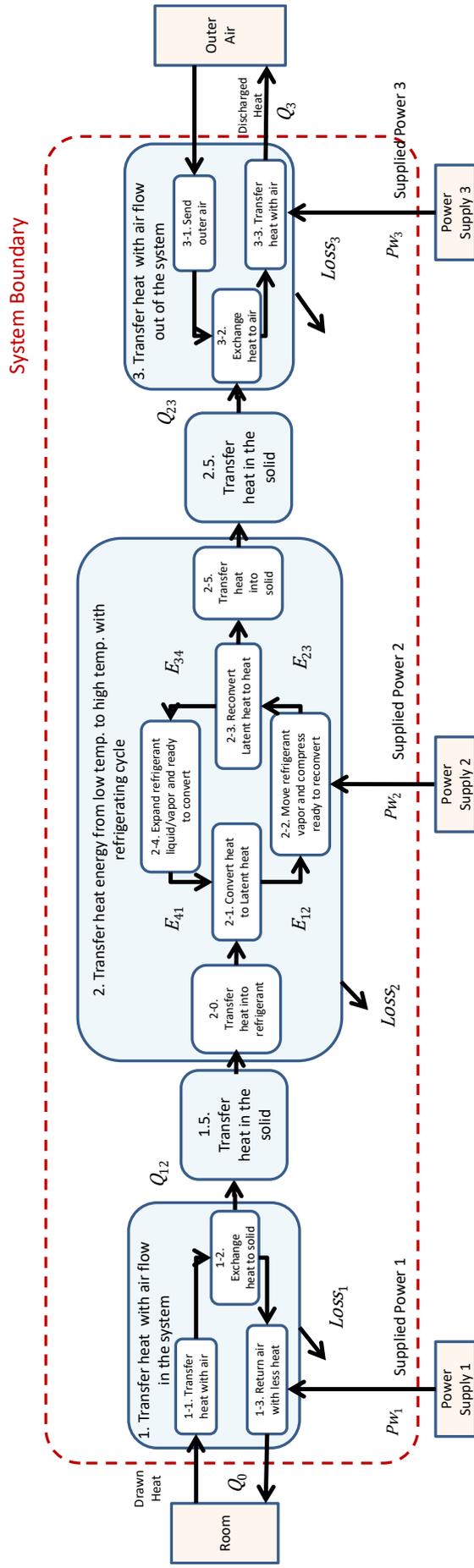


Fig. 3.8 FBD of the 2nd level physical function model (Vapor compression architecture)

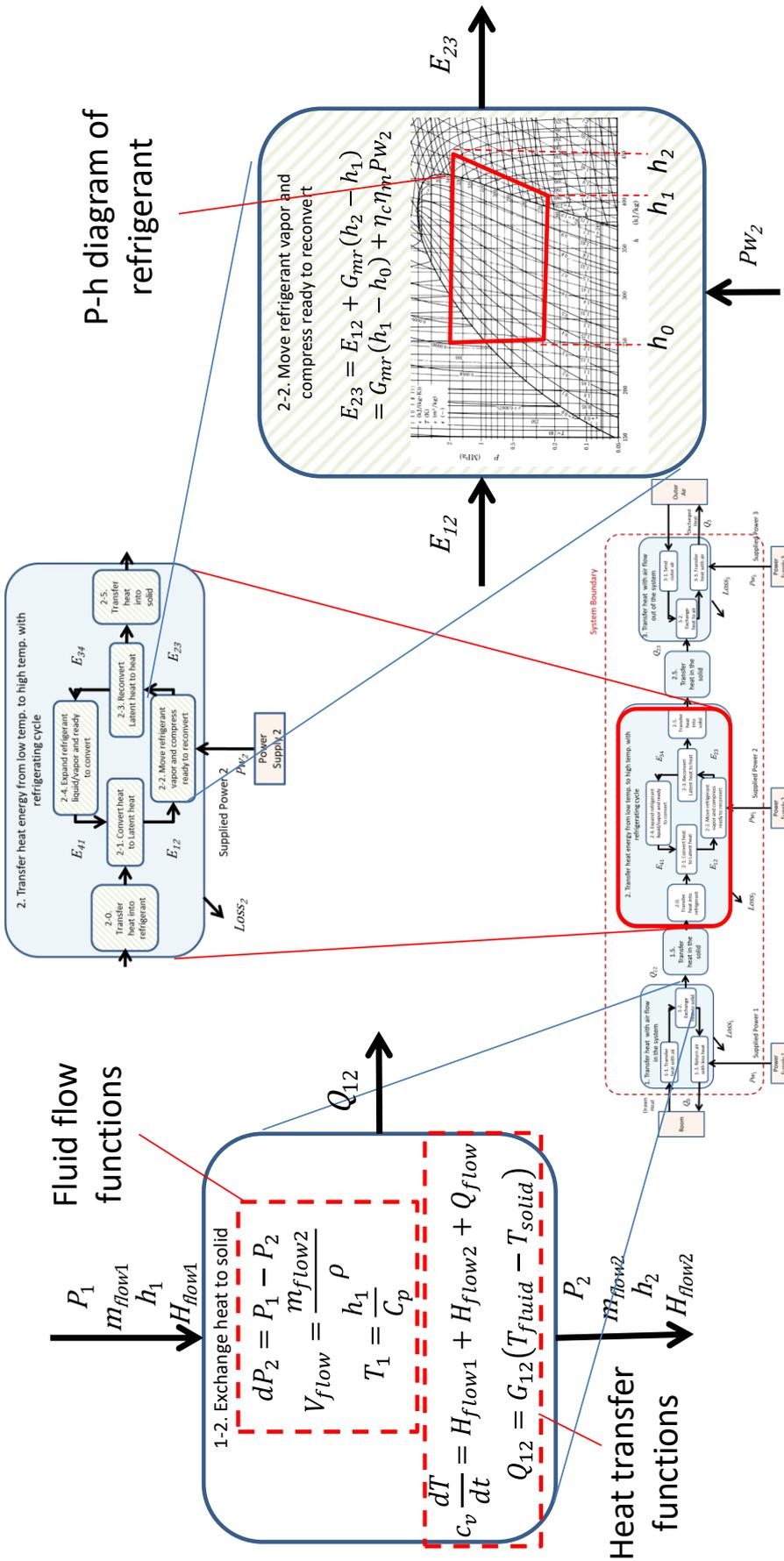


Fig. 3.9 Formulation of the 2nd layer blocks

Table 3.3 Matrix for the 1st Properties to the 2nd Properties

|                                   | 1st layer Intermediate properties              |                     |                       |                        |                     |                         |                                |                     |            |    |
|-----------------------------------|--|---------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------|------------|----|
|                                   | Function 1                                     |                     | Function 2-1          |                        | Function 2-2        |                         | Function 2-3                   |                     | Function 3 |    |
|                                   | Thermal energy transfer coeff.                 | Thermal energy mass | Energy convert coeff. | Energy transfer coeff. | Drive energy coeff. | Energy reconvert coeff. | Thermal energy transfer coeff. | Thermal energy mass |            |    |
| 2nd layer Intermediate properties | Wind path from room                            | +O                  |                       |                        |                     |                         |                                |                     |            |    |
|                                   | Pressure drop                                  | -O                  |                       |                        |                     |                         |                                |                     |            |    |
|                                   | Heat transfer coeff. from air to solid         | +O                  |                       |                        |                     |                         |                                |                     |            |    |
|                                   | Heat exchanger room side                       |                     | +O                    |                        |                     |                         |                                |                     |            |    |
|                                   | Heat transfer coeff. from solid to refrigerant | +O                  |                       |                        |                     |                         |                                |                     |            |    |
|                                   | Refrigerant path                               |                     |                       | -O                     | -O                  | -O                      | -O                             |                     |            |    |
|                                   | Pressure drop                                  |                     |                       | +O                     | +O                  | +O                      | +O                             |                     |            |    |
|                                   | Displacement                                   |                     |                       | +O                     | +O                  | +O                      | +O                             |                     |            |    |
|                                   | Rotational frequency                           |                     |                       | +O                     | +O                  | +O                      | +O                             |                     |            |    |
|                                   | Compressor                                     |                     |                       | +O                     | +O                  | +O                      | +O                             |                     |            |    |
|                                   | Volumetric efficiency                          |                     |                       |                        |                     |                         |                                |                     |            |    |
|                                   | Heat transfer coeff. from refrigerant to solid |                     |                       |                        |                     |                         |                                | +O                  |            |    |
|                                   | Heat exchanger exhaust side                    |                     |                       |                        |                     |                         |                                |                     | +O         | +O |
|                                   | Heat transfer coeff. from solid to air         |                     |                       |                        |                     |                         |                                |                     | +O         |    |
| Wind path to outer air            |  |                     |                       |                        |                     |                         |                                | +O                  | -O         |    |
| Pressure drop                     |  |                     |                       |                        |                     |                         |                                |                     |            |    |

Legend

O : Directly Effective (Gray means self-evident)

Sign of O : "+" means the 1st property is up with the 2nd property, "-" means inverse

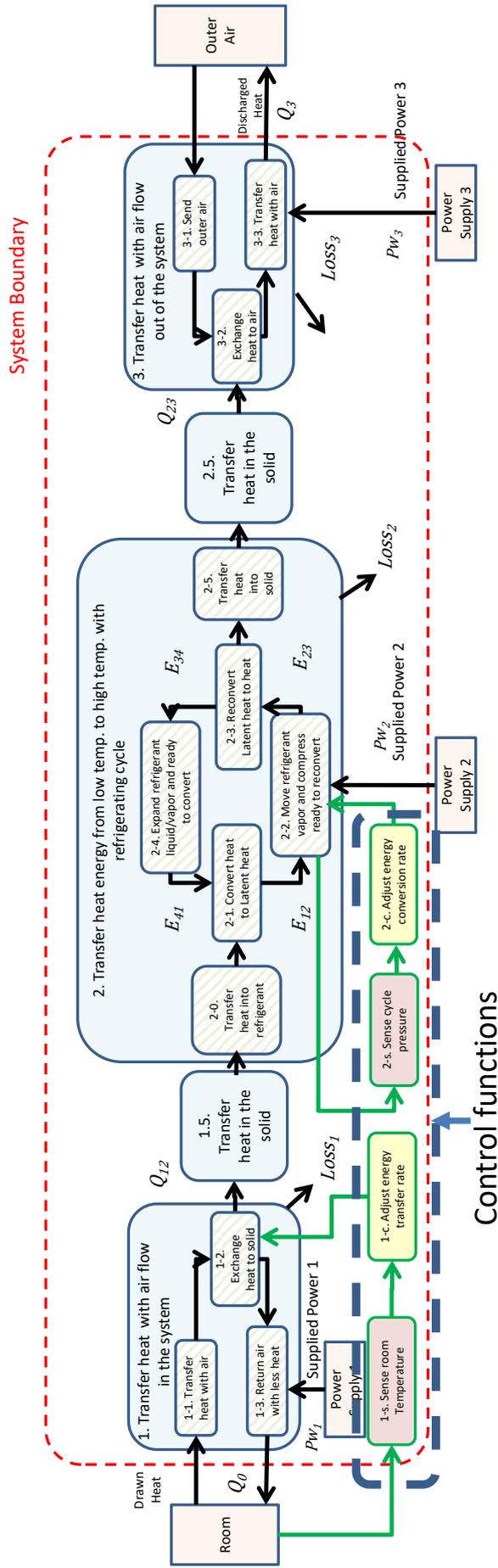


Fig. 3.10 FBD of the 2nd layer with controls

[手順 8b] 次の階層でのモデル化・目標割付

制御ブロックも含めて、全ての定式化内容を連立させてシミュレーションモデルを構築した。次に、制御なしで 2 つの中間特性が目標範囲(4)に入るように Table 3.3 の赤枠の特性を定め、制御を入れた場合にも中間特性が目標範囲で、かつ、最終目標がステートメントを満たすことを確認した (Fig. 3.11, Fig. 3.12) .

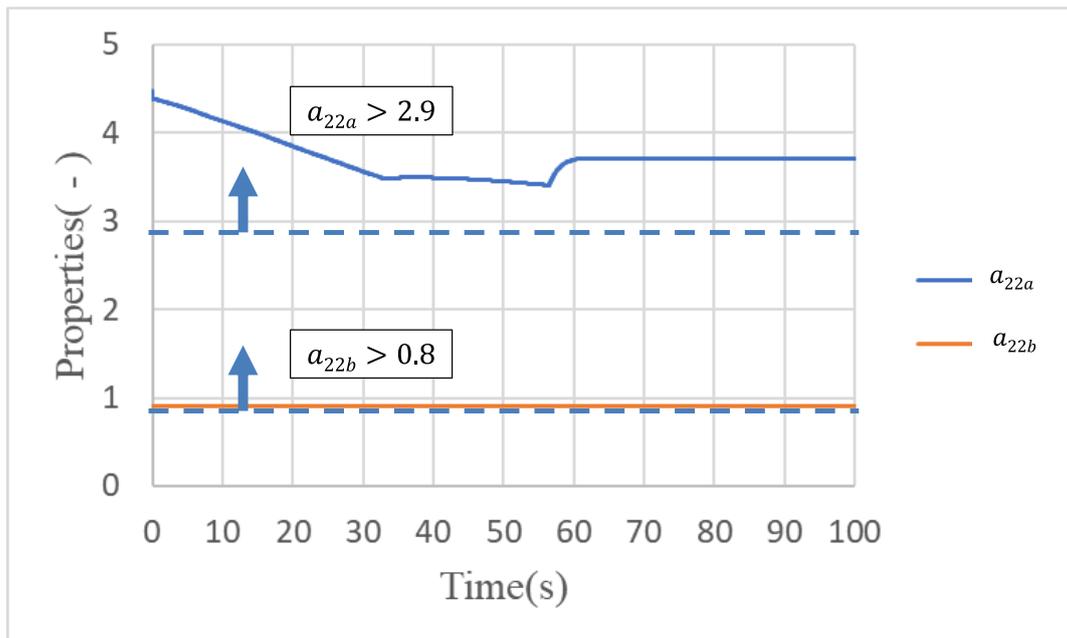


Fig. 3.11 Verification of the two Intermediate properties

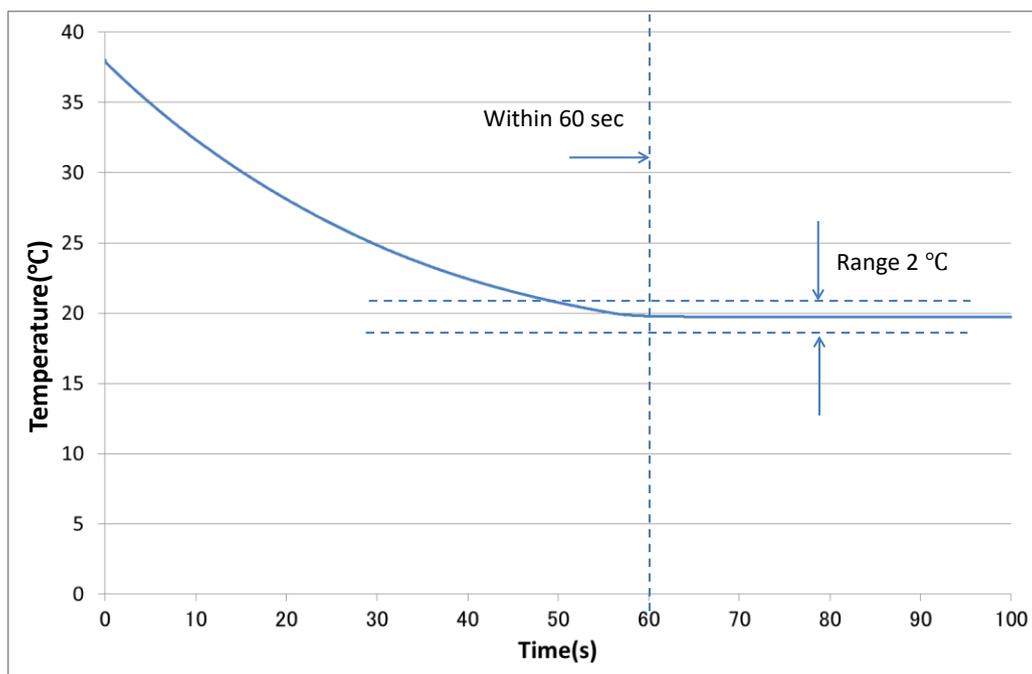


Fig. 3.12 A simulation result of the 2nd layer model

抽象化エネルギーモデルで注目すべき特性を絞ることができているので、第2階層で検討する範囲を格段に狭くすることができた。

### 3.3.2 考察

本事例では、エネルギーの流れをどうするかという検討を、下位の物理法則と切り離れた単純な変換係数によるモデル「抽象化エネルギーモデル」で実施できることを、エアコンディショナーの事例で示した。この抽象化エネルギーモデルは、単純で見通しが良く、計算も非常に軽いという利点があるが、現行機種シミュレーション結果から求めたエネルギーのノミナル値を基にした線形モデルであるため、その基準状態から係数を変化させた結果が線形とみなせる範囲での検討のみ有効であるという制限も持っている。しかし、現行機種のアーキテクチャを超えて抽象化したレベルでシミュレーションできる効果は非常に大きく、上記の制限があっても有効性は高いと考える。

なお、本章の手法では、非定常のエネルギーモデルとして表現できる式は、エネルギーの時間変化が一階微分の方程式までである。振動現象が現れる二階微分の方程式の場合には「エネルギー変換係数」の掛け算で表現するのが難しくなるからである。次章の周波数領域での手法は、これに対応する一つのやり方を示していると考えられる。

### 3.4 結言

本章では、「工業製品に求められるのは『新しい価値』であり、これを発掘していかなければ、製造業は生き残れなくなっている」という課題に対して、その解決のための一つの手法を提案した。

具体的には、第2章で提案した階層的に機能で考える手法において、第1階層の機能を「エネルギー変換・伝達機能」として取り扱い、下位の階層で扱う物理現象・化学変化をさらに抽象化してエネルギーモデルを導出した上で、検討の際には下位階層の物理現象とは一旦切り離して計算できるようにすることで、製品の本質にまで遡った思考が喚起され、「新しい価値」を生み出すような「新しいアーキテクチャ」を考えやすくなるというものである。

この手法を、エアコンディショナーの事例に適用し、具体的な実施方法を示すとともに、下位階層の物理現象と切り離された「抽象化エネルギーモデル」で、実際に特性の検討ができること、さらにそれが従来のアーキテクチャではなく他のアーキテクチャを考える契機となりうることを示した。

また、抽象化エネルギーモデルの時点で、どの特性（エネルギー変換係数）をどの程度変化させることで望ましい制御を実現できそうかの見極めができるため、次の階層にて実際に制御系を開発する際に、見通し良く無駄なく検討が進められることを確認した。

本章で提案した手法は、定常状態、あるいは一階微分の方程式で表現される時間変化をもったエネルギーの流れを時間領域で解く場合に適用できるものである。次の章では、この考え方を周波数領域に拡張しNV（音／振動）の検討に用いることについて述べる。

# 第 4 章 周波数領域における抽象化モデル

## 4.1 緒言

第 1 章で述べたように、近年、工業製品に対する要求がより高度／多様になり、それに応えるために製品の複雑性が増した結果、開発下流での手戻りや不具合の増加が問題になっている。音／振動(NV) の分野は、古くから実験とシミュレーションを組み合わせた手法[22]による検討が進んでいる[23]にもかかわらず、そうした手戻りや不具合の顕著な例となっている[24]。これは、NV の原因がシステム全体に広く潜んでいる一方で、NV 現象が形や構造に大きく依存するために、開発上流では全体俯瞰をした検討を実施するのが難しく、他性能の要求を基に基本構造が決まってから NV 検討を実施するためと考えられる。すなわち、開発上流のシステム設計段階で NV の検討をする手法が求められるということである。そのためには、第 3 章と同様に抽象度の高いエネルギーレベルで検討することが重要と考えられる。

NV の検討をエネルギーレベルで考えるという点での先行研究としては、高周波振動のエネルギー伝播の検討に用いる「解析 SEA」 [25]を低周波振動に用いた「振動の二段階設計」という考え方がある [24], [26]。この手法は第 1 段階では平均化してモードのピークをならし、また位相を考えない検討をすることによってシンプルな検討を実現している。

一方、第 3 章で提案した抽象化エネルギーモデルは、定常問題や熱等の時間領域での問題にはそのまま適用可能であるが、NV で用いられる周波数領域での問題には適用できない。

そこで本章では、抽象化エネルギーモデルの考え方を周波数領域に拡張することで NV のシステム設計をより効果的にする手法を提案する。低周波振動を取り扱うことを考え、モードと振動の位相を考慮したままでエネルギーでの検討ができるような手法とする。さらに、自動車の NV 現象に適用してこの手法の具体例を示す。

## 4.2 音／振動領域への適用のための手法の拡張

抽象化エネルギーモデルを時間領域から周波数領域に拡張して NV 現象に活用する手順を以下に示す。それぞれの実施内容の具体的なイメージは「4.3 事例：エンジンシェイク」を参照されたい。なお、本章の〔手順〕は、第 2 章、第 3 章とは異なり、周波数領域

での抽象化エネルギーモデルを活用するための手順のみに絞っていることに注意されたい。

## 4.2.1 周波数領域における抽象化エネルギーモデル

### 4.2.1.1 時間領域での振動エネルギー

〔手順1〕対象とする振動現象のメカニズムを基にして時間領域でのエネルギーフローのブロック図を作成する。このブロック図中の一つのブロックについての各振動エネルギー項は一般的に Fig. 4.1 のようになり，収支バランスの式は第3章と同様に (5) 式の形に書ける。

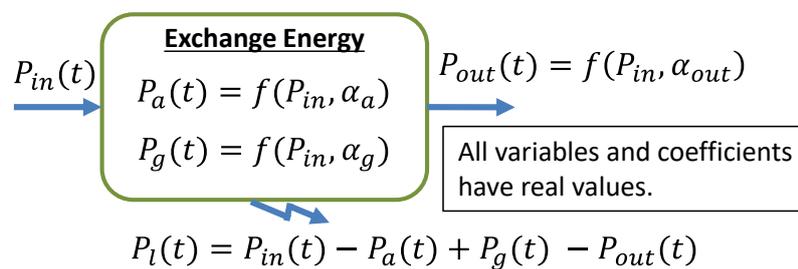


Fig. 4.1 Energy terms in one block (time domain)

$$P_a(t) = P_{in}(t) - P_{out}(t) + P_g(t) - P_l(t) \quad (5)$$

これは第3章の(2b)式に対して，今回は周波数領域に変換するために時間微分を意識せずに，全てのパワーは単位時間当たりと考えた表記にしたものである。さらに，振動の伝達を時間領域で表現するには一般に畳み込み積分が必要となるため，Fig. 4.1 の各 $P_{in}(t)$ から各パワーへの変換は $f(P_{in}, \alpha_x)$ という一般の関数の形で表現している。そもそも音／振動の分野で周波数領域で検討するのが一般的なのは，この畳み込み積分を使わずにシンプルに扱うためであるとも言える。

Fig. 4.1 の5種類の項と振動現象の各エネルギーとの対応，ならびにその値の計算方法を Table 4.1 に示す。このうち「蓄積エネルギー」に相当するのが「質量およびイナーシャの運動エネルギー」と「バネの弾性エネルギー」であり，それらが仕事(work)を介して周期定常的にやり取りされるのが「モード」を持つ低周波振動現象の特徴である [27]。なお，「エネルギー」と「パワー(エネルギー／仕事の時間微分)」とは，時間積分をすることでしか関係があるため，エネルギー保存とパワー保存とは同義であり，本章ではパワーを用いてエネルギーモデルを構築することにした。これは，減衰等はエネルギー波

形では累積されて波形の非振動部分が大きくなるのに対し、パワーの波形では振動の特徴がわかりやすいためである。時間積分をしたエネルギーモデルを作製する場合には Table 4.1 の計算式を全て時間で積分する必要がある。

Table 4.1 Kinds of energy(power) in vibration

| General Energy Term | Typical Symbol | In case of Vibration              | Calculation                  |                                   |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|                     |                |                                   | Translation                  | Rotation                          |
| Input power         | $P_{in}$       | Power received from outside       | $P_{in} = F_{in} * v$        | $P_{in} = T_{in} * \omega$        |
| Output power        | $P_{out}$      | Power acted to outside            | $P_{out} = F_{out} * v$      | $P_{out} = T_{out} * \omega$      |
| Accumulated power   | $P_a$          | Kinetic power (mass or inertia)   | $P_a = F_{mass} * v$         | $P_a = T_{inertia} * \omega$      |
|                     |                | Elastic power (spring)            | $P_a = F_{spring} * v_{rel}$ | $P_a = T_{spring} * \omega_{rel}$ |
| Generated power     | $P_g$          | Self-excited vibration power      | $P_g = F_{excited} * v$      | $P_g = T_{excited} * \omega$      |
| Loss power          | $P_l$          | Damped power (Damper or friction) | $P_l = F_{damper} * v_{rel}$ | $P_l = T_{damper} * \omega_{rel}$ |

〔手順2〕物理現象レベルのシミュレーション結果から、上記の各パワー項 $P_x(t)$  (添字の  $x$  は a, in, out などの総称。以下同様)を時系列データ $\{P_x(t_1), P_x(t_2), \dots, P_x(t_n)\}$ として求める。

まずこの時系列データの時点で、システム全体としても個々のブロックについても、全ての時刻において保存則が成立する。もしもこの段階のエネルギーのブロック図を元に計算モデルを作製すれば、第3章と同様の時間領域での抽象化エネルギーモデルとなる。その場合の(5)式および Fig. 4.1 の各 $P_x(t)$ および $\alpha_x$ は実数値となる。しかし、手順1にて記したように時間領域では変換係数 $\alpha_x$ をシンプルに扱うのが難しくなる。

#### 4.2.1.2 振動エネルギーデータの周波数領域への変換

〔手順3〕時系列データを FFT 処理(Fast Fourier Transform)して周波数領域に変換する。

Fourier 変換によってエネルギー積分の値が保存されることは、パーセバルの定理 (Parseval's theorem) にて保証されているが、この保存則は周波数全体を積分した状態で成立するだけでなく、各周波数ごとに成立することが確認できる。これを式で表すと (6)式となる。

$$P_a(\omega) = P_{in}(\omega) - P_{out}(\omega) + P_g(\omega) - P_l(\omega) \quad (6)$$

ただし、(6)式の各項は「振幅と位相を持った複素数値関数」である。エネルギー変換のブロック図は Fig. 4.2 のように表現できる。

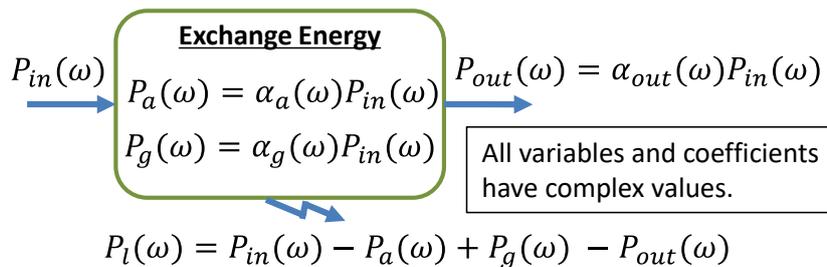


Fig. 4.2 Energy terms in one block (frequency domain)

一般に NV の解析で用いられるような運動方程式の係数が定数の場合には、振動の伝達は周波数領域では伝達関数を掛算することで表現できるため、Fig. 4.2 ではそのエネルギー伝達関数を変換係数 $\alpha_x(\omega)$ として表示している。

#### 4.2.1.3 対象とする振動の特徴的な周波数での切出し

〔手順4〕全てのブロックの各エネルギー項 $P_x(\omega)$  (FFT 結果データ) より, 対象とする振動を特徴づける周波数において振幅と位相を切出し, エネルギー値の複素数 $P_x$ とする。ただし, 振動エネルギーは変位や速度などの二乗に相当する次元を持つため, 通常注目する周波数の2倍の周波数で切出す必要があることに注意する。

特定の周波数で切出すのは, ポイントを絞ってシンプルにし, 後出の Fig. 4.8, Fig. 4.9 のように図示して全体俯瞰をするためである。切出した複素数値に基づいたエネルギー保存の式および変換のブロック図は, (6)式および Fig. 4.2 において, 周波数の複素数値関数である各エネルギー項 $P_x(\omega)$ および変換係数 $\alpha_x(\omega)$ を特定の複素数 $P_x, \alpha_x$ に置き換えたものとなる。この複素数値係数 $\alpha_x$ が, 第3章 3.2.2 で述べた「エネルギー変換/伝達係数」を周波数領域に拡張したものとなる。なおこの時点で変換係数 $\alpha_x$ の具体的な値は未知である。

#### 4.2.1.4 抽象化エネルギーモデルの構築

〔手順5〕各ブロックにおいて〔手順4〕で切出したエネルギーの複素数 $P_x$ を基に変換係数 $\alpha_x$ のノミナル値(現状値)を求める。

例えば Fig. 4 の $\alpha_a$ のノミナル値は次式の複素数演算で求まる。

$$\alpha_a = P_a/P_{in} \quad (7)$$

〔手順6〕今度は〔手順5〕で求めた係数 $\alpha_x$ をパラメータとして(ノミナル値をデフォルトとして入れて), Fig. 4.2 内の式のように入力エネルギー $P_{in}$ から各部のエネルギー $P_x$ を計算するモデルを構築する。

これが「周波数領域における抽象化エネルギーモデル」である。係数 $\alpha_x$ は複素数であるので, それぞれ振幅と位相の2つの自由度を持つが, 本章ではそのうちの振幅のみを目標割付のための「中間特性」として使用する。これについては 4.3.2 考察にてコメントする。

#### 4.2.1.5 感度検討と対象特性の選定, 目標割付

〔手順7〕 エネルギー変換レベルの特性は, どこに重点を置いて選定すべきかの経験が少ない場合が多いので, まず感度検討を実施するのが望ましい. 上記のモデルにおいて, いずれかの係数 $\alpha_x$ の振幅 $|\alpha_x|$ のみを一定幅で一つずつ変動させて評価部分の振動エネルギーの変化率(感度)を求め, この感度が高い係数の中から目標割付に使用する特性(係数)を選定する.

選定した係数 $\alpha_x$ の振幅 $|\alpha_x|$ をパラメータとして少しずつ値を変えながら抽象化エネルギーモデルで計算し, この振幅 $|\alpha_x|$ をどのくらいのレベルにしたら目標とする振動エネルギーレベルとなるかを考える. このエネルギー変換係数の振幅 $|\alpha_x|$ を, 次の階層での検討の目標とする.

#### 4.2.1.6 下位階層での特性検討

〔手順8〕 1つ下位の階層のシミュレーションモデルにて, 係数 $\alpha_x$ の振幅 $|\alpha_x|$ に割り付けた目標を達成する特性(パラメータ)を検討する.

検討するためのモデルは, エネルギーを抽出するのに用いたモデルが良いが, 何らかの構造情報を持っている場合には, できるだけそれを排除したモデルに改修するのが, 設計空間を広げて新しいアーキテクチャを検討するのに役立つ. 構造検討はさらに下位で検討するという意味である. これについては 4.3.1.7 で詳しく説明する. また, 抽象化エネルギーモデルで割付けた目標を達成するのが難しければ, 下位のアーキテクチャを変えることを検討する. これは第3章と同様である.

## 4.3 事例：エンジンシェイク

### 4.3.1 手順と検討結果

#### 4.3.1.1 エンジンシェイク現象

自動車の NV 現象の中で比較的自由度が少なく説明しやすいエンジンシェイク現象を題材に、本手法の適用例を説明する。エンジンシェイクはタイヤのアンバランスや路面の凹凸などからの加振入力があるエンジンの 10Hz 程度の上下並進振動を励起する現象である[28]。一般的にはエンジンマウントの上下の剛性や減衰を増加させることで対応するが、一方でエンジン起振振動の伝達低減を考えるとマウントの剛性や減衰は低減した方がよく、互いに背反する。そこで周波数領域の抽象化エネルギーモデルで考えることにより「エンジンマウントの上下の剛性や減衰の増加」以外の新しい対応案を考案するきっかけとなりうることを本事例で示す。

現象を表現するポンチ絵は Fig. 4.3 のようになり、運動方程式は (8)式で表現される [28] .

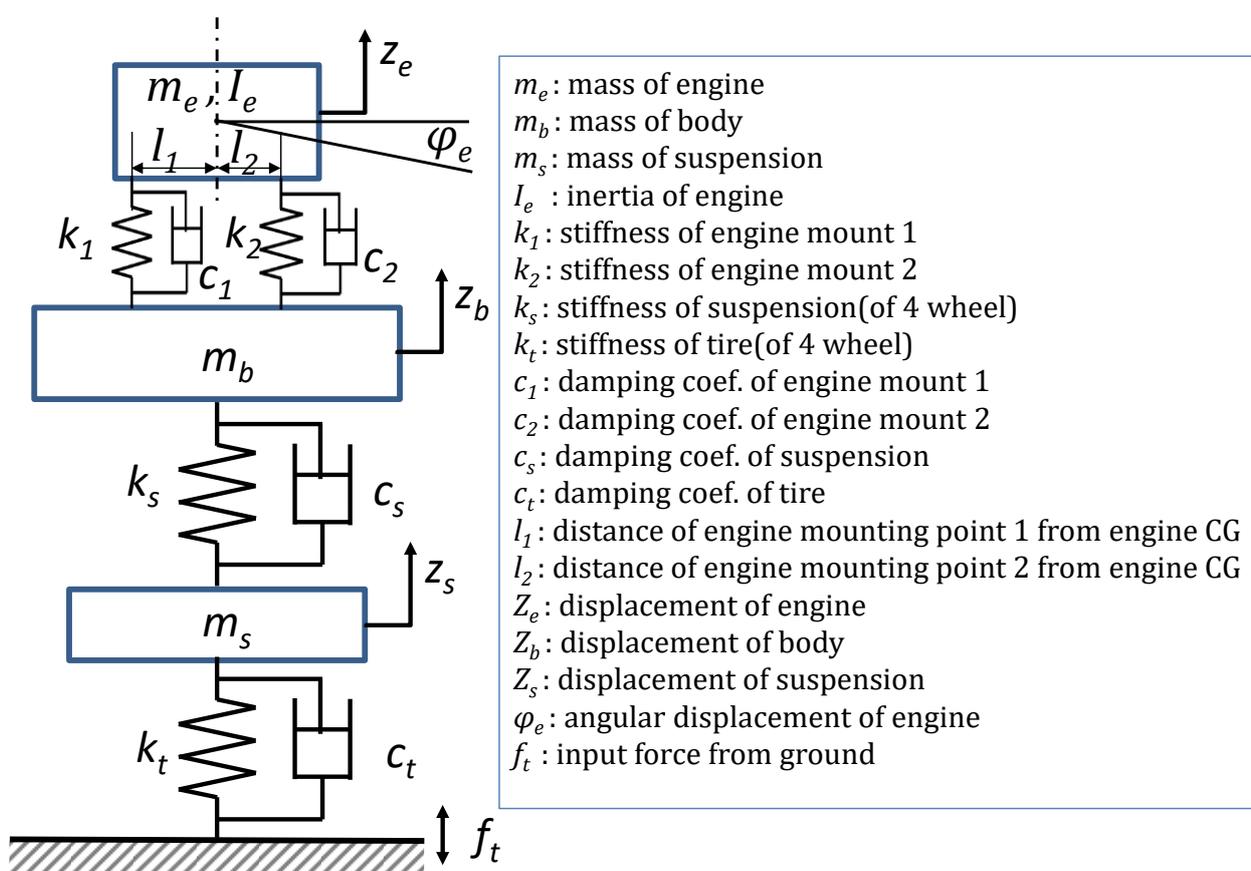


Fig. 4.3 Diagram of typical engine shake

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Z}_e \\ \ddot{\phi}_e \\ \ddot{Z}_b \\ \ddot{Z}_s \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_1 l_1 + c_2 l_2 & -c_1 - c_2 & 0 \\ -c_1 l_1 + c_2 l_2 & c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 & c_1 l_1 - c_2 l_2 & 0 \\ -c_1 - c_2 & c_1 l_1 - c_2 l_2 & c_1 + c_2 + c_s & -c_s \\ 0 & 0 & c_s & c_t + c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_e \\ \dot{\phi}_e \\ \dot{Z}_b \\ \dot{Z}_s \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_1 l_1 + k_2 l_2 & -k_1 - k_2 & 0 \\ -k_1 l_1 + k_2 l_2 & k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 & k_1 l_1 - k_2 l_2 & 0 \\ -k_1 - k_2 & k_1 l_1 - k_2 l_2 & k_1 + k_2 + k_s & -k_s \\ 0 & 0 & k_s & k_t + k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_e \\ \phi_e \\ Z_b \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

この運動方程式より物理現象レベルのモデルを構築し、文献[28]の標準値をパラメータとして 0Hz~40Hz のスイープ加振条件で解いた。各マスおよびイナーシャの振動変位を FFT 処理した結果（振幅）を Fig. 4.4 に示す。

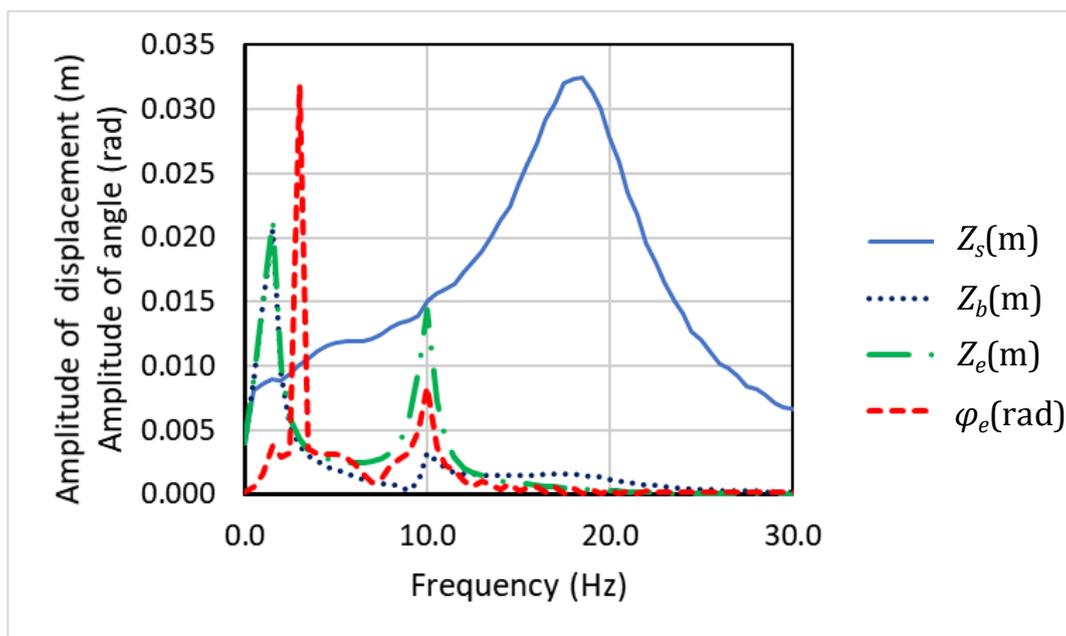


Fig. 4.4 Vibration of each mass / inertia in frequency domain

Fig. 4.4 は並進と回転との二種類の縦軸を重ねており、それらの高さの比較はできないが、顕著な振動の周波数は横軸で以下のように読み取れる：

サスペンション( $Z_s$ ) : 18Hz, 車体( $Z_b$ ) : 1.5Hz,

エンジン上下並進( $Z_e$ ) : 10Hz, エンジン回転( $\phi_e$ ) : 3Hz

#### 4.3.1.2 時系列の振動エネルギーデータの抽出

〔手順1〕 Fig. 4.3 と (8)式を基にエネルギーフローブロック図を作成した (Fig. 4.5) .

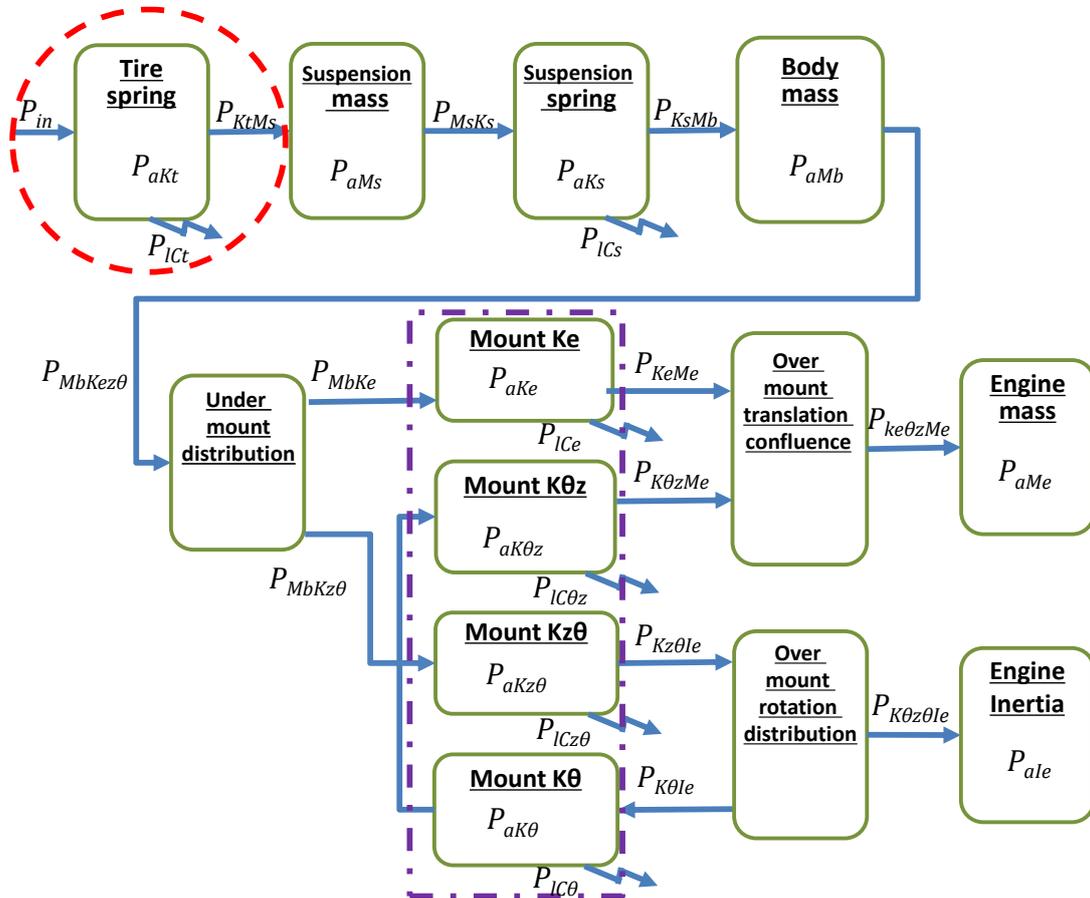


Fig. 4.5 Energy flow block diagram of engine shake

図中のパワーは以下の規則で名前を付けた.

- ブロック間の矢印で示すパワー:  $x$  から  $y$  へ伝達する仕事率  $P_{xy}$

例:  $P_{KtMs}$  とは,  $k_t$  (タイヤバネ) から  $m_s$  (サスペンションマス) に伝わる仕事率.

- ブロック内のパワー: ブロック  $x$  内で吸収/放出するパワー  $P_{ax}$

例:  $P_{akt}$  とは,  $k_t$  (タイヤバネ) で吸収/放出するパワー

- ブロック  $x$  から下へ出る矢印で示すパワー: パワーロス  $P_{lx}$

例:  $P_{lct}$  とは,  $c_t$  (タイヤ減衰) で減衰するパワー

エンジンマウント部分 (Fig. 4.5 の一点鎖線四角囲み) は並進と回転の運動が連成する部分であり, マウント部の剛性マトリクス ( (8)式の青破線四角部) および減衰マトリクスの同等部分を通じて相互にエネルギーをやり取りするフローとした. その部分の剛性を (9)式のように読み替えて, Fig. 4.5 のパワーの命名に用いた(減衰係数も同様).

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_1 l_1 + k_2 l_2 \\ -k_1 l_1 + k_2 l_2 & k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_e & -k_{\theta z} \\ -k_{z\theta} & k_{\theta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

さらにエンジンマウント部分の前後には「パワーを並進と回転に分配するブロック」と「二つのパワーを合流させるブロック」を置いた.

なお, 4.2 では「周波数領域への拡張」を説明するためにエネルギーフローのブロック図が時間領域から周波数領域に変わって行く様子を説明したが, ブロック図全体の形は変わらないため, 本事例ではブロック図は一つだけ描いて流用し, その中のパワー項を最終的に「複素数値」とみなした.

[手順2] (8)式のモデルによる結果から, 各エネルギー項 $P_x(t)$ の時系列データを求めた. 例として Fig. 4.5 の赤破線丸部に当たるタイヤバネ部のパワーの時系列データを Fig. 4.6 に示す.

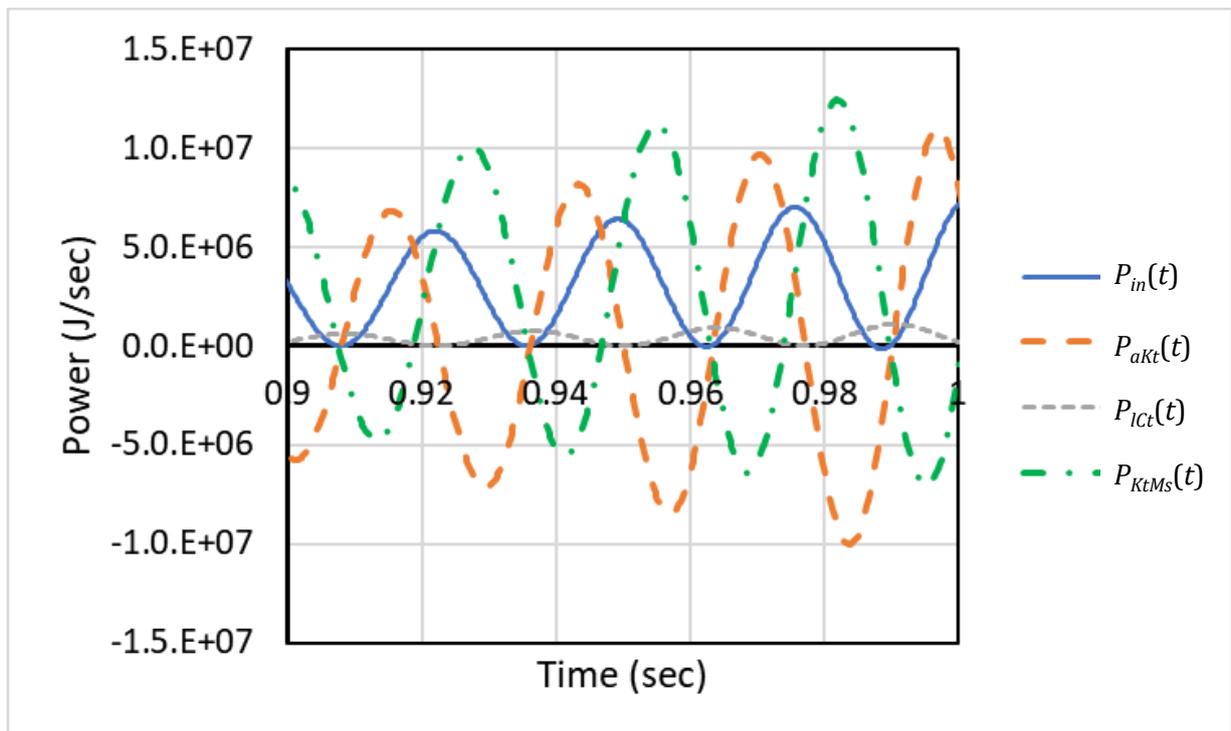


Fig. 4.6 Time history of Power in tire spring part

「 $P_{in}$ 」が主に「 $P_{aKt}$ 」と「 $P_{KtMs}$ 」に変換されているが、いずれも変換後の振幅の方が大きいことがわかる。これは位相差のためであり、各時刻で比較すると(5)式は常に成り立っていることを確認した。この事実が、のちに抽象化エネルギーモデルでエネルギー変換の計算をする際に位相を考慮する重要性を示している。

#### 4.3.1.3 振動エネルギーデータの周波数領域への変換

〔手順3〕続いて、時系列のパワーのデータを FFT 処理して周波数領域に変換した。例としてエンジンの上下振動のパワー $P_{aMe}$ の FFT 結果を Fig. 4.7 に示す。

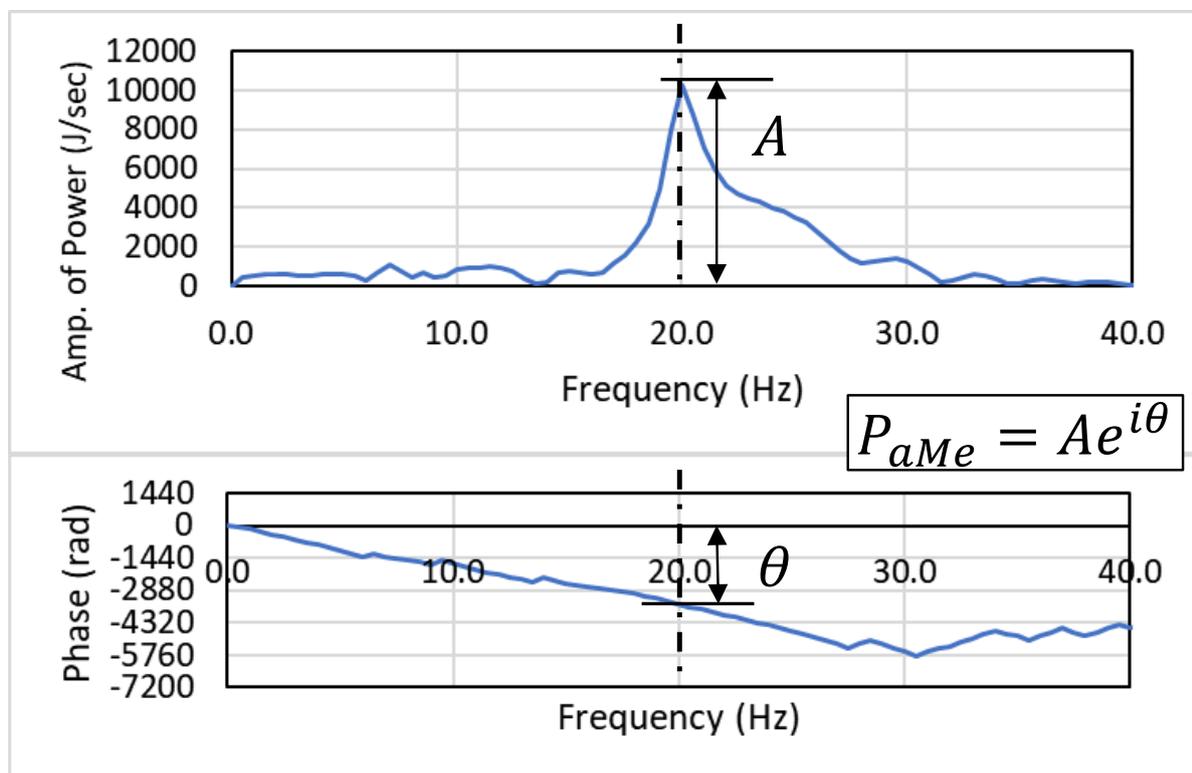


Fig. 4.7 FFT result of engine translation kinetic power  $P_{aMe}$

パワーなので Fig. 4.4 の  $Z_e$  の 2 倍の周波数でピークが出ていることが確認できる。この時点で各周波数において振幅と位相を考慮した（複素数としての）保存則 (6)式が成り立っていることを確認した。

#### 4.3.1.4 対象とする振動の特徴的な周波数での切出し

〔手順4〕本現象を特徴づけるのはエンジンの上下振動なので、Fig. 4.7 より 20Hz に注目し、Fig. 4.5 のエネルギーフロー図の全てのパワー項について 20Hz (Fig. 4.7 の一点鎖線の位置) で振幅  $A$  と位相  $\theta$  を切出した。それらを複素平面上で「円」と「半径の角度」として図示するとともに数値を記した (位相は deg 表示)。特に Fig. 4.5 左上の「タイヤバネ」と「サスペンションマス」の部分拡大したものを Fig. 4.8 に示す。各要素を通過する際にパワーの振幅と位相が変化の様子が表現されている。

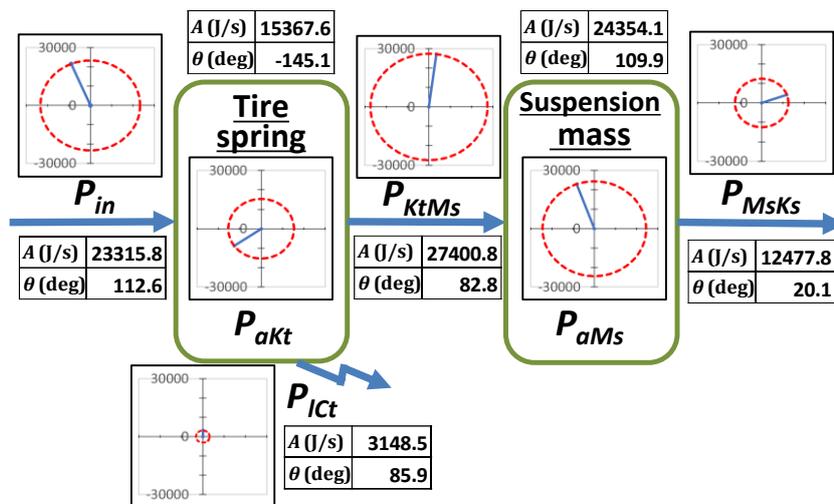


Fig. 4.8 Energy flow with complex power values (partial)

エネルギーフロー図全体にパワーの振幅と位相を書き込んだものを Fig. 4.9 に示す。全体を俯瞰するために複素平面の図はスケールを最大振幅に合わせた。振幅が小さいところは点になって位相も見えないが、その部位の全体への影響が小さく、必要なら数字を読めば良いことから、この表記で十分と考える。

Fig. 4.9 より「路面からタイヤに入った振動エネルギーが次第に減衰されながら伝達するが、エンジンで並進の振動エネルギー  $P_{aMe}$  として蓄積されている」様子 (まさにエンジンシェイク現象) がわかる。さらに、現状ではエンジンの回転の振動エネルギー  $P_{ale}$  は  $P_{aMe}$  に比べて 1/60 程度と小さく、ここへエネルギーを送り込めば  $P_{aMe}$  は減るだろうと予想できる。これを定量的に検討するのが抽象化エネルギーモデルの役割である。以下ではエンジン並進の振動エネルギー低減目標を仮に 20% とする。この目標値については「4.3.2 考察」でコメントする。ここで回転方向の振動と並進方向の振動とを同じ軸で比較することができるのは同じ次元だからであり、Fig. 4.4 の縦軸では比較できなかったものがエネルギーレベルで見ることによって可能になったと言える。

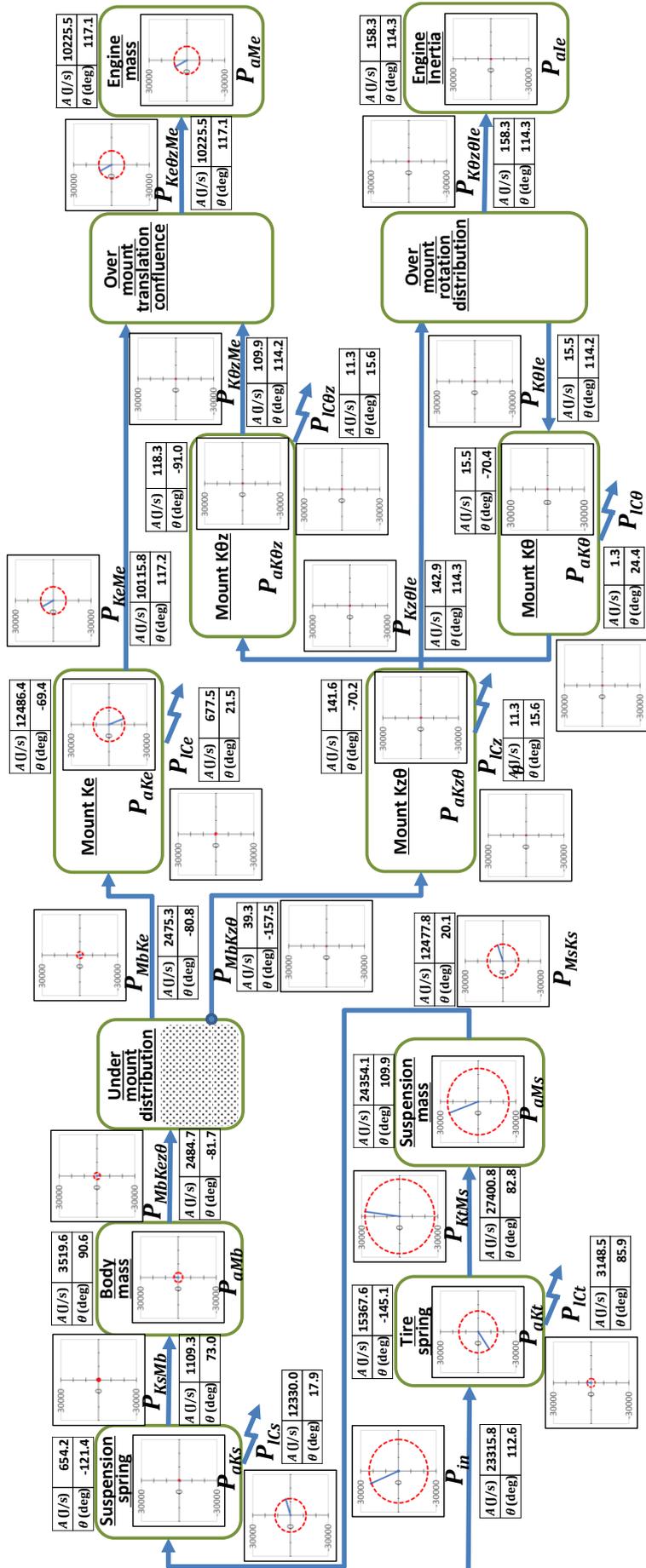
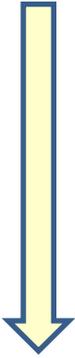


Fig. 4.9 Energy flow block diagram with complex power values in 20Hz

#### 4.3.1.5 抽象化エネルギーモデルの構築

〔手順5, 手順6〕エネルギー変換係数 $\alpha_x$ を各ブロックで求めて、抽象化エネルギーモデルを構築した。Fig. 4.10 は表計算で作成した抽象化エネルギーモデルの例（一部抜粋）である。複素数の四則演算さえできればモデルの形式は問わない。

Direction of the Energy Flow



| Name          | Amplitude A | Phase $\theta$ | Re       | Im      |
|---------------|-------------|----------------|----------|---------|
| $P_{in}$      | 23315.8     | -10.602        | -8943.5  | 21532.3 |
| $\alpha_{kt}$ | 0.6591      | 14.353         |          |         |
| $P_{akt}$     | 15367.6     | 3.751          | -12603.6 | -8792.7 |
| $\alpha_{ct}$ | 0.1350      | 12.102         |          |         |
| $P_{lct}$     | 3148.5      | 1.500          | 222.9    | 3140.6  |
|               |             |                |          |         |
| $P_{ktMs}$    | 27400.8     | -11.121        | 3437.2   | 27184.4 |
| $\alpha_{Ms}$ | 0.8888      | 6.7560         |          |         |
| $P_{aMs}$     | 24354.1     | -4.3654        | -8282.9  | 22902.3 |
|               |             |                |          |         |
| $P_{MsKs}$    | 12477.8     | 0.3503         | 11720.0  | 4282.1  |
| $\alpha_{Ks}$ | 0.0524      | -40.168        |          |         |
| $P_{aKs}$     | 654.2       | -39.817        | -340.6   | -558.6  |
| $\alpha_{Cs}$ | 0.9882      | -6.3219        |          |         |
| $P_{lCs}$     | 12330.0     | -5.9716        | 11736.4  | 3779.8  |

 are parameter input fields

Fig. 4.10 Abstracted energy model (partial)

#### 4.3.1.6 感度検討と対象特性の選定, 目標割付

[手順7] 抽象化エネルギーモデルの各変換係数 $\alpha_x$ の振幅(Fig. 4.10 の太枠部入力欄)を 10%変動させた際のエンジン上下の振動エネルギーの変化率(感度)を比較した. エンジンシェイクへの一般的な対応策である「エンジンマウントの上下の剛性の調整」に相当する「マウント並進バネで蓄積エネルギーに変換する」係数の感度はもちろん高いが, それ以外に「マウント部で並進から回転へエネルギーを分配する部分」(Fig. 4.9 の網掛部)の係数の感度が高いことがわかった. 従来の対応策以外の案を探すという意味で, 後者の特性(係数)を目標割付に使用することにした.

「並進から回転へのエネルギー分配率」を変化させてエンジン並進の振動エネルギー $P_{aMe}$ の振幅を 20%低減する条件を探した. この分配率はもともと 1.6%程度しかなかったものであるが, これを 25%以上にすれば良いことが抽象化エネルギーモデルでの計算からわかり, これを次の階層での目標とした.

#### 4.3.1.7 下位階層での特性検討

[手順8] (8)式のシミュレーションモデルを再び用いて, 上記の目標を達成する特性(パラメータ)を検討した. 並進から回転へエネルギーを多く分配するために, エンジンマウント部の剛性マトリクスの非対角項を大きくすることを試みた. ただし(8)式は 2つのマウントを水平に位置させるという構造上の前提を置いて, この非対角項の剛性はマウント上下の剛性( $k_1, k_2$ )とマウント取付位置( $l_1, l_2$ )で決まるように構成されており, 構造情報を含んだモデルである. できるだけ構造情報を排除するために, 剛性マトリクス要素((8)式の赤一点鎖線四角部)を(10)式に示すように修正して, これらの値を直接入力できるようなモデルに改修した(減衰マトリクスも同様).

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_1 l_1 + k_2 l_2 & -k_1 - k_2 \\ -k_1 l_1 + k_2 l_2 & k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2 & k_1 l_1 - k_2 l_2 \\ -k_1 - k_2 & k_1 l_1 - k_2 l_2 & k_1 + k_2 + k_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_e & -k_{\theta z} & -k_e \\ -k_{z\theta} & k_{\theta} & k_{z\theta} \\ -k_e & k_{\theta z} & k_e + k_s \end{bmatrix} \quad (10)$$

これはブロック図を作成するときの(9)式と同様な抽象化である. この階層の抽象化は本章のメインテーマではないが, この抽象化によって「実現方法は後にしてエンジンマウント群全体の等価剛性マトリクスをどうしたいかを考える」目的志向の発想が可能となり, 第2章で述べた「機能で考えながら設計を具体化していく」考え方の実践となる. ただし

剛性マトリクスは対称でなければならず、また正定値 (positive definite) でないと系が不安定になるため、(10)式の要素を直接変える場合に注意しながら検討した。

剛性マトリクスの非対角項  $k_{z\theta}$  ( $=k_{\theta z}$ )の大きさを 2.5 倍、減衰マトリクスの非対角項  $c_{z\theta}$  ( $=c_{\theta z}$ )の大きさを 5 倍にすることで、並進から回転へのエネルギー分配率が約 26%となり、エンジン並進の振動エネルギー  $P_{aMe}$  の振幅を約 20%低減することができた(Fig. 4.11)。

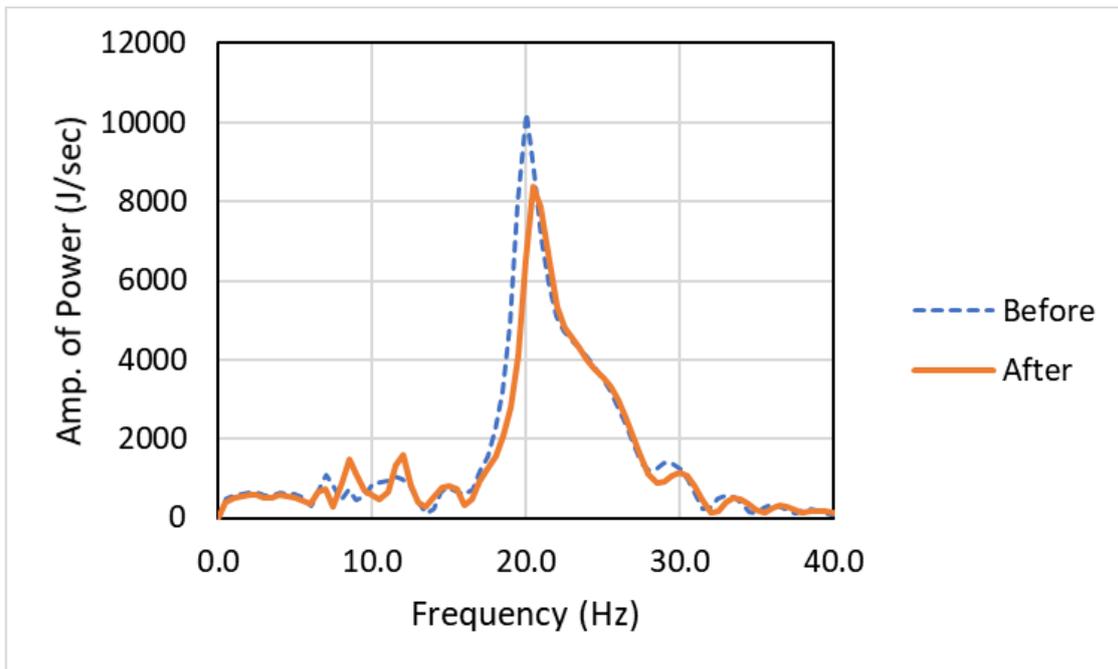


Fig. 4.11 FFT result of engine translation kinematic power  $P_{aMe}$

以上のように、従来一般的な「エンジンマウントの上下の剛性／減衰を増加させる対応案」以外の「並進運動のエネルギーを回転運動に移動させる案」が考案できたことになる。

なお、上記の案を実現する具体的な構造案としては、マウントの位置と剛性とをうまくバランスさせる、あるいはアクチュエータを使うなどが考えられるが、そうした検討は、本論文の本質ではないので省略する。V字の左を下る階層的設計検討として重要なのは「特性としてこうなればよい」とわかることであり、詳細な設計案は製造方法やコスト計画など様々な要因を考慮しながら、V字左の最下層にて決めることになる。

### 4.3.2 考察

本手法では、NV 現象に対して抽象度を上げて振動エネルギーの分配を考えることでシステム全体を俯瞰できるようにしたことが特長である。すなわち、本章の事例は説明をわかりやすくするために自由度の少ないものにしたが、本手法が真価を発揮するのは自動車一台分のように数多くの要素や経路を持った複雑な NV 現象を扱う場合であると考えられる。

つぎに、NV 現象をエネルギーレベルで検討することにより回転方向の振動も並進方向の振動も同じ次元となり、定量的に比較して分配を考えられるようになることも、本手法の大きなメリットである。

加えて、Fig. 4.9 のように現状の特定の周波数の振動エネルギーの分配状況を可視化したことも本手法の特長であり、全体を俯瞰する必要のあるシステム設計ではこのような可視化の仕組みも重要であると考えられる。例えば今回の検討部位ではないが、Fig. 4.9 の「サスペンションマスからサスペンションバネ部に伝わるエネルギー  $P_{Msk_s}$ 」と「サスペンションバネ部の減衰エネルギー  $P_{Ics}$ 」は複素数としてほぼ同等であり、かつ「サスペンションバネ部のバネ蓄積エネルギー  $P_{aks}$ 」はこれらに比べて小さいことから、該当する周波数においてこの部分のダンパーが効果的に振動エネルギーを減衰させていると判断できる。これに比べると、タイヤ部やエンジンマウント上下方向の減衰エネルギー  $P_{Ict}$ ,  $P_{Ice}$  はそれぞれのバネの蓄積エネルギー  $P_{akt}$ ,  $P_{ake}$  に比べて小さく、減衰効果が小さいことがわかる。すなわち、注目している周波数でのこれらの部分の減衰効果は、適切な装置を考案すればもっと上げられる可能性があることが、この振動エネルギーの可視化で見えたことになる。

ここで、本手法の本質について考えてみる。低周波振動現象において特徴的な「共振」とは「システムの一部が振動しやすい周波数で加振し続けることで振動エネルギーをその部分に蓄積させること」であり[29]、共振しやすさを表現する物理的なモデルなしでは共振を変化させる検討はできない。しかし本手法は「共振現象を含んだエネルギー分配状態のデータ」をベースにしてモデル化することで、内包されている物理法則の式を使わずに現状の共振を前提とした理想的なエネルギーの分配を検討できるものと考えられる。ただし、この本質には本手法の限界が含まれている。それは、複数の共振周波数の順序が入れ替わるなど、共振状態を大きく変更するような検討には対応できないということである。

一方、本手法をシステム設計に活用することを考えると、この限界はあまり不利益には

ならない。すなわち，システム検討段階では共振状態を変えずに全体的なエネルギー分配を考え，その後の詳細検討で必要に応じてモード（共振状態）を変化させることを考えれば良いということである。共振を検討するにはどうしても形や構造に依存してしまうので，形や構造が決まる前のシステム設計段階では共振状態を現状維持として NV での全体のエネルギーの流れを計画することにするという考え方である。これは，計算手法は全く異なるが，本章の始めに示した先行研究と考え方は近い。文献[24], [26]の手法は第 1 段階では平均化してモードのピークをならした状態の検討をしており，本提案手法では現状のモードを保持したままであるという違いはあるが，いずれにしてもエネルギーの伝達をどうコントロールするかを検討していることになる。

また事例では，振動の運動エネルギーで約 20%の低減を目標とした。速度は運動エネルギーの 0.5 乗に比例するので，これは $[(1 - 0.2)^{0.5} \cong 1 - 0.1]$ と考えると振動速度で約 10%の低減を狙ったことに相当すると考えられる。ただしあらゆる場合にこの式で物理量の効果へ正確に換算ができるとは限らず，またこの程度の低減効果で十分かどうかは開発の状況による。しかしそれでも開発の早い段階で NV の改善可能性が想定できるメリットは大きく，他の性能によって基本構造が固まる前に，必要ならば NV を有利にするような要望を早めに出せるという点で，本手法は有効と考える。

また，エネルギーモデルの構築の際にエネルギー計算の順番をあらかじめ決めている点は，本来双方向に影響し合う振動エネルギーに対して，影響の方向性（定常振動になるまでのエネルギーの流れ）を仮定していることになると思う。今回の事例では，影響の方向をある程度明確に想定することができたが，もっと複雑なエネルギーの流れが想定される場合には，双方向のエネルギーの流れを想定した収束計算を適用することも有効と考えられる。

さらに，本事例では〔手順 7, 8〕においてエネルギー変換係数の大きさのみをパラメータとしているが，これはこの係数の位相を変える（すなわちエネルギー変換の際の位相を変える）物理的意味がまだ十分に検討されておらず，第 2 階層での実現手段に結び付けることが難しいためであり，この意味を明らかにして，位相の変換量を変える実用的な実現手段の例を検討することも今後の課題と考える。ただし，検討するパラメータとして位相を考えていないだけであり，手順 2 で重要性を述べたエネルギー変換計算自体にはしっかりと位相を考慮していることを強調したい。

## 4.4 結言

本章では、NV の分野での手戻りや不具合を減らすために開発上流で NV 分野での検討をする手法が求められていることに対応して、第 3 章で提案した「抽象化エネルギーモデル」を周波数領域に拡張し、NV 性能を検討できる手法として提案した。

具体的には、時間領域での「抽象化エネルギーモデル」を Fourier 変換して周波数領域で表現し、エネルギーとその変換係数を「大きさと位相を含む複素数」として扱って、可視化し、計算できるようにした。

本手法のメリットは以下の通りである。

- ・形や構造に依存しない、抽象度が高いモデルで全体を俯瞰しながら NV 現象を検討できる。
- ・従って、他の性能によって形や構造が決まる前の段階で NV を有利にする基本構造への要望を早めに出せるため、開発下流での手戻りや不具合を減らすポテンシャルを持つ。

さらに、エンジンシェイクの事例によって、本手法を用いると「振動のエネルギーの流れを変える」という発想で、従来とは違う対応策を見つけることが可能になるということを示した。

今後は、双方向のエネルギーの流れを考慮するなどの改良をしながら本手法をより複雑な振動問題に適用するとともに、他の分野にも抽象化エネルギーモデルを拡張し、システム設計段階で複数の異分野の性能の背反を検討できるようにしたいと考えている。

## 第5章 結論

本研究では、多様化・高度化する消費者ニーズに対応するためにますます複雑化する工業製品開発において、システムズエンジニアリング（SE）の考え方を取り入れた広義のモデルベース開発（MBD）を推進しようとする日本の製造業に対して、その推進のための課題を整理し、それを解決するための検討手法「中間特性法」を提案して、その事例を示した。

具体的には、まず課題を以下の4つに整理した。

- 1) 製品への要求を、工学的に定量的に製品目標に落とし込む仕組みを持つこと
- 2) 定量的な製品目標に基づいて、目標を達成できるかどうかを「モノを作る前・詳細仕様を決める前」から階層的にシミュレーションにて検討し、目標を割付けることができる仕組みを持つこと
- 3) 上記2つの仕組みは、単純作業等の省力化を図ることはもちろんであるが、いたずらに自動化を進めて設計者が考えなくなる方向ではなく、要求を満たすための設計意図をしっかりと明示し、それらを部署間でお互いに照会しあって議論ができることで設計者がエンジニアとして成長することを後押しすると共に、その情報を残すことで後世のエンジニアへの伝承に役立つものであること
- 4) 上記2つの仕組みが、従来製品の改良の域を脱して「画期的な機能」を持ったものを検討できる仕組みであること

続いてこれらの課題を解決する手法を説明した。1)の課題に対しては、要求を達成するために必要な機能を、原理原則に立ちかえって検討し、それを基本機能ブロック図に落とし込むことが有効な手段となる。2)の課題に対しては、基本機能ブロック図を段階的に機能で分解し、その機能を数式で表現し、それをもとにシミュレーションモデルを作ることが有効である。この際に、適切な粒度で各階層を分解することで、シミュレーションモデルも詳細になりすぎないようにコントロールすることが可能になる。さらに、各階層の機能を決める「特性」に対して目標を順に割り付けて行くことで、3)の課題の設計意図を表現し、ブロック図や定式化内容を他部署と共有することで、シミュレーションツールを使えない人、専門分野が違って詳細がわからない技術者とも、概要を理解し合って、

全体を俯瞰した議論が可能になる。ブロック図の中身を読み解いて、また自ら改善してゆくことで技術者としての成長を促し、ベテランからの技術の伝承も、このブロック図と定式化内容、および「各開発プロジェクトでどの特性に注目して開発したかという情報」を用いて明示的に可能になる。さらに、4)の課題に対しては、ブロック図を分解する最初の階層の抽象度が重要であり、より抽象度を上げて考えることで、従来なかった新しい仕組みを検討しやすくなる。そのための手法として最上位をエネルギー変換機能として抽象化する手法を提案した。またこの手法を、時間領域のみならず周波数領域にも拡張して、NVの検討にも使用できる方法として提案した。

以下に本論文の各章に対する概要と結論を総括する。

第2章では、本手法の基本的な考え方と手順を説明し、それに則った事例を2つ紹介した。基本的な考え方として説明したのは、目標を達成するための機能をブロック図で表現すること、ブロック図やツリー図、二元表の使い方である。手順として説明したのは、階層的に機能を分解するやり方（特にすり合わせ型製品の場合の考え方）、定式化の仕方、定式化内容のうち特に「特性」を重視し、それを直接パラメータとして入力できるようにシミュレーションモデルを作ること、さらには階層間の目標の連鎖のさせ方である。特性の中から重要なものを選定して階層間の目標連鎖に用いることから、本手法を「中間特性法」と呼ぶことにした。

事例の1つ目は、ドライヤーの事例とした。この事例では、上記で説明した内容を具体的に示すとともに、この手法を使わずに詳細まで統合的にモデル化した場合との検討時間を比較した。階層的に分けてモデルを3つ使う方が手間も時間もかかりそうだが、実は検討の見通しが良くなるので無駄な検討をせずに済み、結局は効率的であることを示した。

事例の2つ目は、車両の運動性能の事例とした。これは2つの相反する目標を両立させる問題であり、このような場合にも本手法で見通し良く検討できることを示した。さらに、従来の制御開発の場合には「ハードありき」で後から制御系を設計していたものを「ハードと制御の全体システム」で考えることで、実はハード側を従来と違う考え方で特性を決めると、全体バランスを取りやすくなること、並びにその検討が本手法で考えやすくなる、ということを示した。

第3章では、本手法の第1階層での検討に「エネルギーモデル」を導入し、このモデル

を下位のモデルでの結果から抽象化することで作り上げる手法を説明し、これを「抽象化エネルギーモデル」と名付けた。このモデル構築には下位のモデルでの結果得られたエネルギー値を用いてはいるが、計算の際には下位と分離することで、現行機種のアーキテクチャに囚われない新しい発想をしやすいことを説明した。

事例としては、エアコンディショナーを取り上げ、エネルギー変換の視点で考えたブロック図は様々な冷却方式を包含しているので、より広い視点で検討しやすくなること、および物理現象レベルと切り離れた抽象化エネルギーモデルでも目標を満たす特性の範囲の検討が可能であることを示した。

第4章では、「抽象化エネルギーモデル」を周波数領域に拡張することで、振幅と位相とを考慮した振動エネルギー伝達をモデル化することが可能になることを示した。

事例としては、自動車のエンジンシェイクを取り上げ、「エネルギーの流れをどうしたいか」と考えることで、他の要件との背反を避けるような従来なかった発想での対応案を出せることを示した。加えて振動エネルギーの流れを複素数の大きさと位相として図示すると俯瞰しやすいことも示した。

続いて、本手法が提供しうる製品開発の将来像について述べる。本手法が浸透した開発現場では、ベテラン開発者の知見と過去の製品の設計意図は、全てブロック図とその定式化内容に残っており、新しく職場に来た人でもそれを見れば短時間で即戦力になるであろう。あるシミュレーションモデルを初めて使用する人は、そのもとになったブロック図と定式化内容を見ればその意味や意図が明確になって、すぐに無駄のない検討ができるし、改良したいところはホワイトボックスなので容易に改良できるであろう。開発プロジェクトの進行中には、自部署の専門分野のことだけでなく他部署での検討内容や考え方がブロック図で可視化されているため、開発全体における自部署の位置づけが容易に把握できて、他部署との議論も円滑に進むことで、手戻りの原因となることに早めに対応することが可能となるであろう。文献[30]に、「発明者には『図面を描く』よりも『工学計算する』よりも『心眼』が必要である」ということが書かれているが、これは日本でいうところの「匠の技」ではないかと考える。本手法が浸透した開発現場では各々の技術者の「心眼」で考えた、いわゆる匠の「暗黙知」[31]が「形式知」化されて共有されていると言えるのではないかと考える。

ただし、本手法を普及・浸透させるにはいくつかの関門が考えられる。一つ目の関門は自社・自業界が置かれている状況への危機感の認識欠如である。あらゆる業務改革に共通して言えることであるが、危機感が共有されていない組織では現状維持の志向が強く働くため、改革を進めることが困難となる。二つ目の関門は短期的な成果を重視する志向である。本手法を導入して成果が出るまでにはある程度の時間を要することから、会社のマネジメント層が強い意志で粘り強く成果が出るのを待つ決意が必要である。これは一つ目の危機意識と相関すると考える。三つ目の関門は改革を推進する組織の意識が維持できるかである。最初に「やるべき事の多さ」にめげずに、社内からの反対勢力の圧力に屈せず、将来の果実を信じて改革を推進し続ける意志の強さが求められる。著者は本手法を日本の製造業に普及・浸透させる活動を実施しているが、上記のことを肝に銘じて活動して行きたい。

最後に、本研究の将来に向けた展望を述べる。まず、手順として手作業になっている部分をツール化することで、作業効率が上がり、本手法を普及させやすくなることが考えられる。抽象化エネルギーモデルの課題としては、第4章に示した「エネルギー伝達の向きの件」、「振動エネルギーの位相コントロールを積極的に開発に活用する方法」などをはじめとして、考え方の拡張・補間がまだ可能であると考えられる。次に、現在の手法としては「要求・目標」が決まってからそれを工学的に定量的な仕様に落とし込むためのものになっているが、「要求・目標」自体を論理的に探索して定量化することも非常に重要であり、その分野にも拡張したい。ここを手法化できて初めて、序論にて述べた「個性の強い経営者」に頼らずに顧客の嗜好を先取りする製品開発が本当の意味で可能になると考える。ただしこの部分は工学的な知見のみならずマーケティングや経営判断なども含まれる領域であるため、体系化の難易度が飛躍的に高い。まずはマーケティングの一部として必要な「製品を使用する人」の観点として、生体工学的分野から始めるのが研究として進めやすいと考える。さらに方法論として考えるべきは、昨今進展が著しいAI（機械学習）との棲み分け、取り入れ方となろう。機械学習は、データをもとに機械に判断をしてもらうということであり、今の技術ではブラックボックス化が避けられなさそうである。本手法のホワイトボックス化の方向性とは逆であるが、これらは必ずしも敵対するものではなく、うまく取り入れて製品開発の手法をさらに高めることが可能であると考えられる。

# 参考文献

- [1] INCOSE Systems Engineering Handbook 4e 2015 07
- [2] NASA systems engineering handbook. NASA SP-2016-6105 Rev2 supersedes SP-2007-6105 Rev 1
- [3] ものづくり白書 2017, 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省 (2017)  
[https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2017/honbun\\_pdf/index.html](https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2017/honbun_pdf/index.html)  
(2021年11月18日検索)
- [4] dSPACE Japan : モデルベース開発, 日経 BP 社 (2013)
- [5] 山本, 脇谷, 原田, 香川, 足立, 沖, 原田 : 実習で学ぶモデルベース開発, 1/10, コロナ社 (2018)
- [6] 藤川智士 : マツダの目指すモデルベース開発, マツダ技報, **31**, 44/47 (2013)
- [7] 横畑, 佐藤, 和田, 田所, 小林, 植木 : SKYACTIV エンジンの性能開発に活用した MBD, マツダ技報, **31**, 54/59 (2013)
- [8] 中井英二 : 日常を豊かにする技術とモデルベース開発, マツダ技報, **36**, 1/2 (2019)
- [9] 藤本隆宏 : 能力構築競争 日本の自動車会社はなぜ強いのか, 中央公論新社 (2003)
- [10] 木村英紀 : ものづくり敗戦, 日本経済新聞出版社 (2009)
- [11] 大富浩一 他 : 1DCAE・MBD シンポジウム, 日本機械学会 (2019 より)  
<https://1dcae.jp/sympo/> (2021年11月18日検索)
- [12] Kim, H. M., Michelena, N. F., Papalambros, P. Y. and Jiang, T., 2000, "Target Cascading in Optimal System Design," Proceedings of the 2000 ASME Design, Engineering Technical Conferences. September 10-13, Baltimore, MD, DETC2000/DAC-14265.
- [13] Kim, H. M., et al. "Target cascading in Vehicle redesign: a class VI truck study", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 29, No. 3, 2002
- [14] Georg Stoll "Holistic Simulation and Optimization of NVH behavior for light-

- weight design", International Noise Optimization EV/HEV, 2019
- [15] 廣瀬, 小木, 田村 : シミュレーションの思想, 東京大学出版会 (2002)
- [16] Modelica Association: Modelica® - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling Language Specification Version 3.4 (2017)
- [17] IEEE 1076.1-2017 - IEEE Standard VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions
- [18] Paynter, Henry M: "Analysis and Design of Engineering Systems", The M.I.T. Press. (1961)
- [19] Akira OHATA, Hisashiro ITO, Swaminathan GOPALSWAMY, Katsuhisa FURUTA: "Plant Modeling Environment Based on Conservation Laws and Projection Method for Automotive Control Systems", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 2008 Volume 1 Issue 3 Pages 227-234 (2008)
- [20] 橋本, 荻野 : 現代化学工学, 18/22, 産業図書 (2001)
- [21] 異 友正 ; 流体力学, 4/5, 培風館 (1982)
- [22] 長松昭男 : モード解析入門, コロナ社 (1993)
- [23] 自動車技術会ハンドブック編集委員会 : 自動車技術ハンドブック 基礎・理論編<第1分冊>, 377/505 (2015)
- [24] 池田, 山崎 : 解析 SEA を活用した初期設計による低周波数帯域の平均振動低減, 日本機械学会論文集, 86-891, 1/11(2020)
- [25] 大野, 山崎 : 機械音響工学, 森北出版, 157/167 (2010)
- [26] 山崎, 三山, 中村, 宮崎 : モードと波動の両視点による機械構造物の振動低減設計, 自動車技術会論文集, 47-6, 1373/1379 (2016)
- [27] 長松, 長松 : 実用モード解析入門, 6/7, コロナ社 (2018)
- [28] 森村, 尾方 : エンジンシェイクの解析, 日本機械学会論文集 (C 編) , 69-688, 3221/3227 (2003)
- [29] 井上, 木村, 古池, 佐藤, 佐藤, 鈴木, 田中, 森井, 矢鍋 : 振動の考え方・とらえ方,

9/21, オーム社 (1998)

[30] E. S. Ferguson : *Engineering and the Mind's Eye*, 邦訳 : 藤原, 砂田 : 技術屋の心眼, 平凡社 (2009)

[31] 野中郁次郎 : 知識創造企業, 東洋経済新報社 (1996)

[32] A. D. Hall : *A Methodology for Systems Engineering*, 監訳 : 熊谷三郎 : システム工学方法論, 共立出版株式会社 (1969)

[33] 西村, 藤倉 : モデルに基づくシステムズエンジニアリング, 日経 BP 社 (2015)

[34] 岡, 奈良岡 : 進化型 QFD による技術情報の“使える化”, 日科技連出版社 (2019)

# 付録

## A. システムズエンジニアリング，およびそのシミュレーションとの融合

システムズエンジニアリング (Systems Engineering [SE], システム工学)とは，送電網・電話網開発や宇宙開発などの超巨大な複雑システムを開発するために考えだされた手法であり，1960年代から体系化が進み[32]，上記のような物理的なシステムの外，ソフトウェア開発などへの応用が広く知られている[1]，[2]。

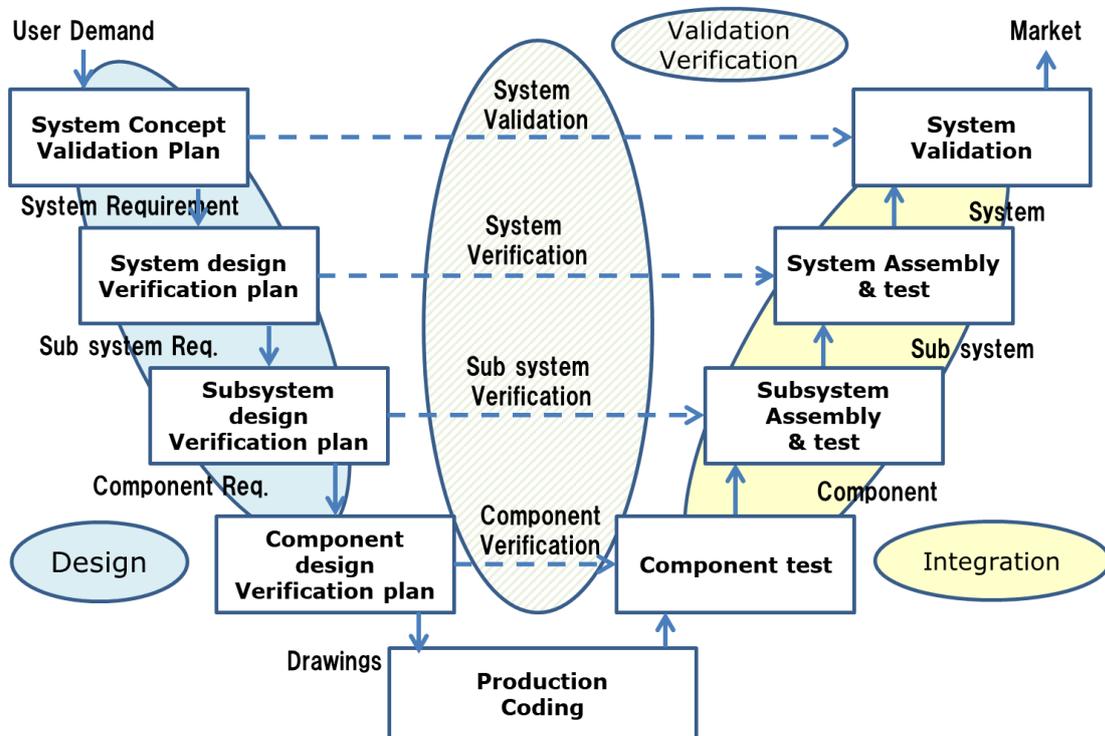


Fig. A1 V-Process in Systems Engineering

SEでは，階層化した「V字プロセス」を開発に適用する (Fig. A1)．これは一人の人間が全体の細部まで把握することが不可能なくらい複雑なものを開発する際に，目的志向で階層化することにより「人が俯瞰できるレベルの複雑さ」の階層に分割して目標を順次割付け，検証もその階層を逆にたどる方法と言える．目的志向であるがゆえに「アーキテクチャ」と呼ばれる実現方式自体の良し悪しも検討して「画期的な製品」を開発するポテンシャルを持っている．そのために重要なのが「機能で階層化」することであり，この階層化に合わせて「目標も階層化 (Target Cascading)」することである．SEのフレーム

ワークとしてこれを求めているが、その具体的なやり方は SE の実施者に任されており、製造業にて実施する際にハードルが高い一つの原因になっている。

モデルベース開発 (MBD) とは、この SE の V 字プロセスをベースに「モデルを用いた製品開発」を実施するものであるが、本論で述べたように、現在一般的な MBD の考え方では、上記の SE の「機能での階層化」「目標の階層化」がなされていない例が多い。すなわち、MBD の考え方を進化させるためには、「SE の考え方」と「シミュレーションモデルを用いた製品開発の考え方」を適切に融合させることが重要である。そこで SE, MBD が非常に進んでいると思われる欧米において、下記のように SE と MBD との融合の進捗度合いをインタビューし、議論する機会を複数回得た。欧米においては一般に分業化が進んでいると言われるが、「エンジニアリング領域」においても分業化が進んでいて、SE を推進する「システムズエンジニア」とシミュレーションによる検証を実施する「アナリスト」とが完全に分かれてしまっており、業務をうまく融合させるべきと言うモチベーションが働いていない、という知見を得ている。「システムズエンジニア」はしっかりと機能分解をしているが、その「機能」は言葉での定義に留まっているために定量的に検証できない。また「アナリスト」は、各階層においてシミュレーションで検証するという意識がない (Fig. A2)。

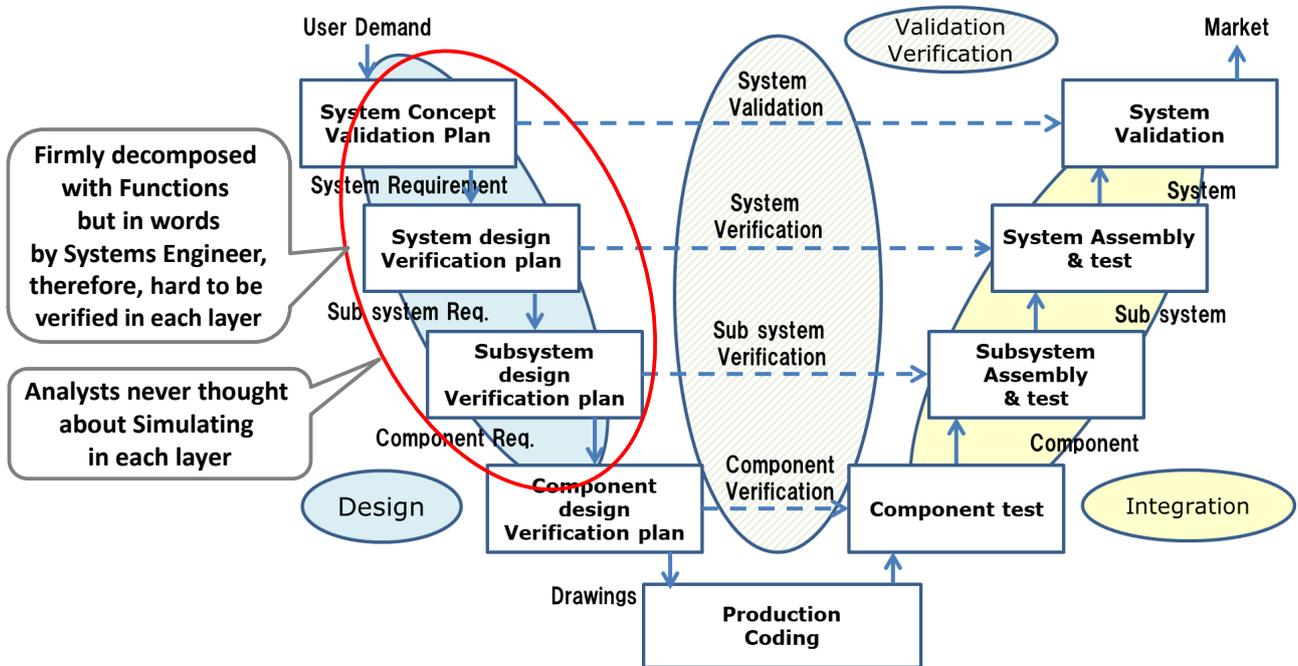


Fig. A2 Weak collaboration between SEs and Analysts in Europe & U.S.

### ① 2013年のインタビュー

対象：ドイツおよびフランスの自動車メーカーにて SE を推進している「システムズエンジニア」

### ② 2019年の議論

対象：ドイツの Fraunhofer 研究機構にて SE を推進している「システムズエンジニア」、および「アナリスト」

### ③ 2019年の発表聴講および議論

対象：ドイツ，米国，英国の自動車メーカーにて NV（音／振動）のシステムモデルを構築している技術者

インタビューと議論から得られた知見は以下の通りである。

1) SE を推進する「システムズエンジニア」はシステム的な考え方で要求を仕様に落とすところや，その開発プロジェクトをうまく管理するところに力を注ぐが，開発の中で必須の「シミュレーションによる検証」については，シミュレーションの専門家に任せればいい，という考え方である。

2) シミュレーションの専門家たる「アナリスト」は，周りから要望されたシミュレーションのうち「既存の技術でできること」を実施しているだけであり，何をどのように検証すれば，開発全体が良くなるのかという観点が欠けている。

①のドイツおよびフランスの自動車メーカーの「システムズエンジニア」は上記の分業による弊害を問題として認識していたが，②の Fraunhofer 研究機構の「システムズエンジニア」はそのことを問題とは認識しておらず，打ち合わせの場に「アナリスト」を呼んで，その場で業務を融合させる可能性について議論を始めた状態であった。また，③の NV（音／振動）のシステムモデルを構築している技術者は，そもそも機能で分解する重要性を理解しておらず，モノで分解したモデルを「システムモデル」と呼んでいた。

以上のように，SE・MBD が非常に進んでいると思われる欧米においても，自動車のような量産の製造業においては，SE・MBD の適用は道半ばの感があり，本論文にて提案した手法は，それと比較しても新規性の高い手法であると考えられる。

## B. 機能での分解とモノ（モジュール／ユニット）での分解

製品をシステムとして分解して考えるには、モノベース（モジュール／ユニットベース）と機能ベースの 2 つの考え方がある。Fig. B1 は、第 3 章の事例で示したエアコンディショナーの機能分解とモノ分解、ならびにそれらの関係性をツリー図（付録 D）で示したものである。モノベースの分解は、図面の階層化（Bill of Materials [BOM]）と似ており、Fig. B1 の右側に当たる。一方、機能ベースの階層化は、その製品に対する要求を実現するために必要な「機能」をベースとして考える分解方法であり、Fig. B1 の左側に当たる。

モノベースの分解は、目に見えるもの（現行製品）を分解してゆくという点で理解が容易であり、実施もしやすい。さらに、その分解をベースにシステムモデルを構築して、パラメータをチューニングするのも実施しやすい。しかし、そのパラメータチューニングで得られるのは、現行製品の若干の改良でしかなく、現行製品がよほど改良の余地が大きくなければ、労多くして得られるメリットは多くない。

それに対して、機能ベースの分解は、その製品への要求を達成するためにどのような働きが必要なのか、その本質を検討するものであり、その実現方法（SE の用語ではこれを「アーキテクチャ(Architecture)」と呼ぶ）の全体あるいは一部を一旦白紙にして考えることを可能にする。これによって、設計空間を広く取ることができて、従来なかった画期的な製品を生むきっかけとなりうることになる。

別の言い方をすると、消費者がある製品を買うときに求めているのは、その機能と機能によって実現される価値であって、製品と言うモノではない、とも言える（形の美しさを求める場合を除く）。消費者にとって、実現手段は大きな問題ではなく、求める機能が実現できればいいということになる。近年、よく使われる「『モノづくり』から『コトづくり』へ」という言葉の「コト」とは、消費者が求める価値とそれを実現する機能のことを指しており、モノよりもコト、すなわち機能の重要性が再認識されていると言える。

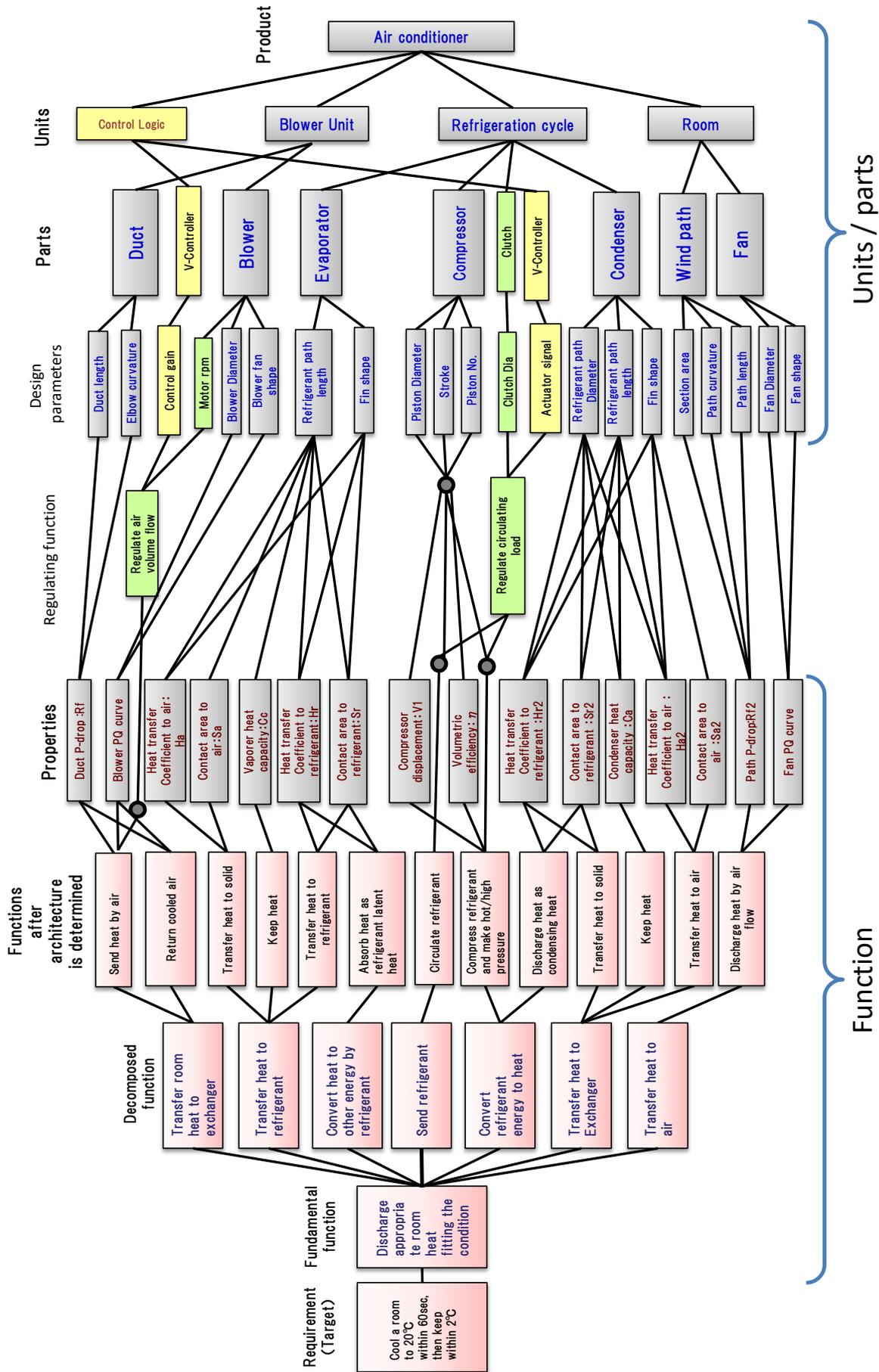


Fig. B1 Functional decomposition and Units / Parts decomposition

## C. すり合わせ型アーキテクチャとモジュール型アーキテクチャ

今日の工業製品の設計思想を大別すると、すり合わせ型(Integral)アーキテクチャとモジュール型(Modular)アーキテクチャに分類できる[9].

アーキテクチャとは、どのように製品を構成部品に分割し、そこに機能を配分し、必要になる部品間のインターフェイスを如何に設計・調整するかに関する基本的な設計思想と定義されている。

### モジュール型アーキテクチャ (Fig. C1 左)

機能と構造との対応関係が1対1であり、一つの部品(モジュール)に独立性の高い機能が与えられている。従って各モジュールの設計者は、インターフェイスのルールさえ守れば、他のモジュールのことをあまり気にしなくて済む。

代表的なモジュール型製品は、パソコン、自転車、ソフトウェアなどである。

### すり合わせ型アーキテクチャ (Fig. C1 右)

機能と構造との対応関係が錯綜し、一对多、多対一、あるいは多対多の関係になっているために、部品(ユニット)設計者は相互に綿密な連携を行い、設計の微調整をしなければならない。

代表的なすり合わせ型製品は、自動車などである。

例えば、車の「乗心地」はタイヤ、サスペンション、ショックアブソーバー、シャシー、ボディ、エンジン、トランスミッションなどの多数のユニットが互いに関係しあって機能を発揮することで、所望の性能を出している。

また逆に、一つのユニットが複数の機能を担っている場合もある。例えばボディは、安全性・居住性・空力特性・デザイン性などの複数の機能を担っている。

すり合わせ型アーキテクチャとモジュール型アーキテクチャのイメージを Fig. C1 に示す。

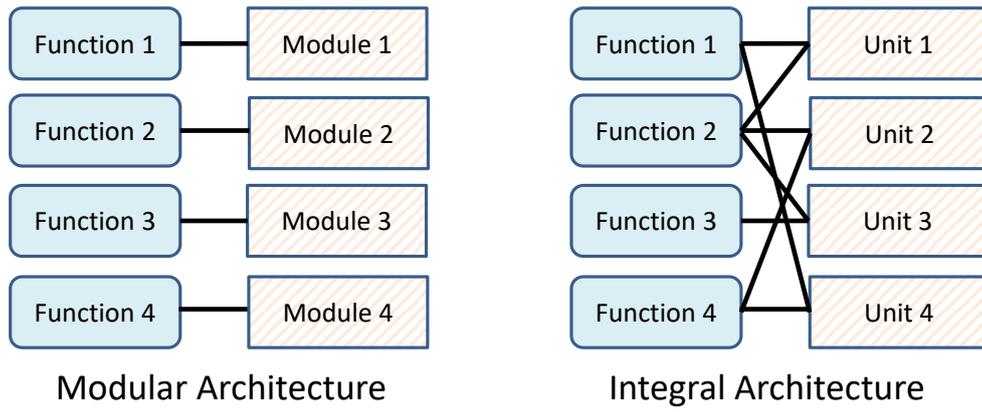
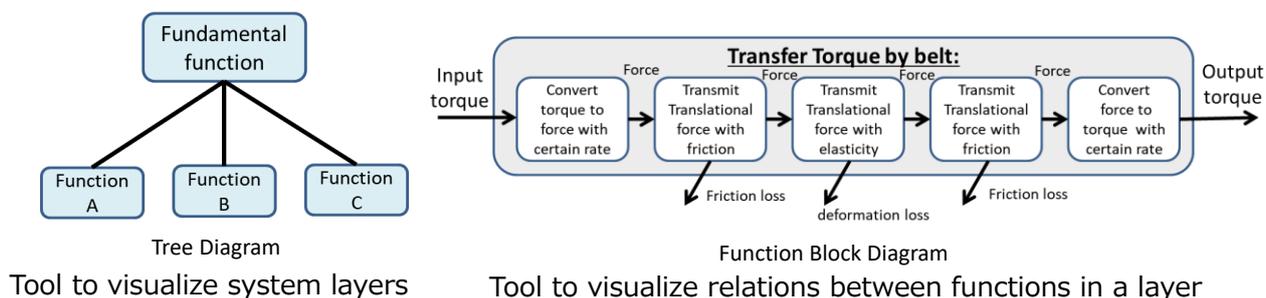


Fig. C1 Modular Architecture and Integral Architecture

## D. ブロック図, ツリー図 および 二元表



|            |            | Performance Targets and Functions |              |              |              |              |              |              |
|------------|------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|            |            | Target Item1                      |              |              | Target Item2 |              |              |              |
|            |            | Function 1-1                      | Function 1-2 | Function 1-3 | Function 2-1 | Function 2-2 | Function 2-3 | Function 2-4 |
| Properties | Property 1 | +○                                |              |              |              |              |              |              |
|            | Property 2 | +○                                | -○           |              |              |              | +○           |              |
|            | Property 3 |                                   |              | +○           |              |              |              |              |
|            | Property 4 |                                   |              |              | -○           | +○           |              |              |
|            | Property 5 |                                   |              |              | +○           |              | -○           |              |
|            | Property 6 |                                   |              | -○           |              |              |              | -○           |
|            | Property 7 |                                   | +○           |              |              | -○           |              |              |
|            | Property 8 |                                   |              | -○           |              |              |              | +○           |

Matrix

Tool to visualize relations between two groups of factors

Fig. D1 Function Block Diagram, Tree Diagram and Matrix

システムを記述するための道具として、SE の分野でブロック図(Block Diagram)およびツリー図(Tree Diagram)は、古くから使われてきた[32]。ツリー図は階層構造の階層間の主従関係を示すのに適し、ブロック図は同一階層の要素間の横の関係性を示すのに適している (Fig. D1)。ただし、これらの道具の使い方はユーザーに任されており、効果的に使うための方法は自ら考えなければならなかった [1][2]。

近年は、ブロック図やツリー図を含んだ「図示的表現」を「SysML」という記述言語として体系化して SE で使用する流れがある[1]，[33]。例えば、ブロック図とツリー図で表現できるものは以下のような図示的表現が紹介されている。

ブロック図相当：ブロック定義図，内部ブロック図，パラメトリック図など

ツリー図相当：要求図など

しかし、これらの記述言語で表現できる図の範囲は広がったが、自由度が高すぎて実際に有効に使用するための使い方は、やはりユーザー自らが工夫することになっている。

本論文ではシンプルにブロック図とツリー図を組み合わせ、特にブロック図の使い方を大幅に改良し、機能分解とその定式化内容を図示するために用いる方法を示したもので

ある.

二元表(Matrix)は 2 種類の要素群間の関係性を示す (Fig. D1) ために古くから様々な分野で使われてきたが, 製品開発との関連では, QFD (品質機能展開: Quality - Function Deployment) にて複数の要素群間の関係性を示すために多用されている [34]. さらに QFD 自体が SE の中に取り入れられている [1].

本論文ではこの二元表を, 「要求と製品が持つべき機能の特性との間の関係性」および「特性間の関係性」を階層的に表現して, 多数ある特性の中で注目すべき特性がどれなのかを明示するために用いている. 英語で名付けるとしたら「Property matrix」となるであろう.

## E. 機能 (Function) と性能 (Performance)

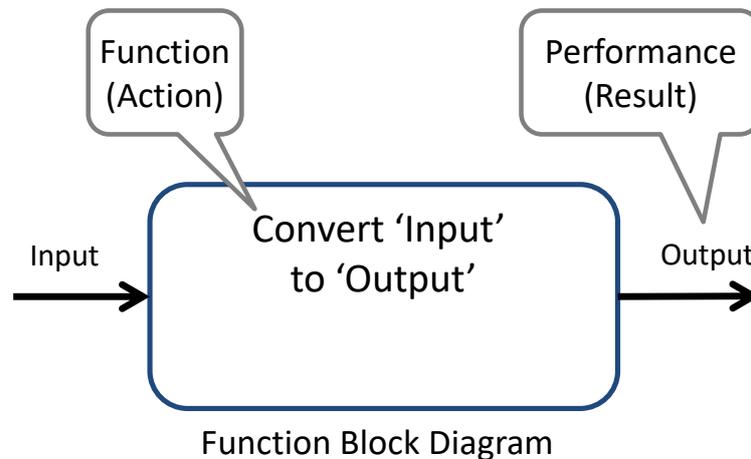


Fig. E1 Function and Performance

日本語において「機能」と「性能」は混同されがちである。これは日本語ではいずれも「能」という文字が入っており、能力と関係するイメージがあるからと考えられる。しかし、英語で表記すると全く別の言葉であることがわかる。Fig. E1 に、機能ブロック図上でその違いを明示した。

機能 (Function) とは、何かアウトプットを出すための働きである。多くは何らかのインプットを変換してアウトプットを出している。これは、分野は異なるが数学で「関数 (Function)」と呼ばれるものと同様の意味である。

一方、性能 (Performance) とは、アウトプット自体であり、例えば自動車の加速性能、燃費性能など、ユーザーに訴求するためのものが多く、開発の際の最終目標は、通常は性能で与えられることが多い。

本手法は、性能で与えられた目標を達成するための機能を考え、その機能のレベルを「特性」で表現して、その特性の「範囲、値」に目標値を割付ける、という考え方を体系化したものである。

# 引用既発表論文

## A. 学術論文誌等掲載論文

[1] 中村幸宣, 羽山信宏, 山本透, “システムズエンジニアリングと MBD における機能の階層化と抽象化エネルギーモデル”, 電気学会論文誌 C, 第 140 巻, 3 号, pp 296-302, 2020

[1'] Yukinobu Nakamura, Nobuhiro Hayama, Toru Yamamoto EngD, “Functional cascading and abstracted energy model in systems engineering and model-based development”, Electronics and Communications in Japan, Volume103, Issue8, pp 38-45, 2020 ( [1]の英訳版)

[2] 中村幸宣, 羽山信宏, 山本透, “音 / 振動を対象としたシステム設計のための周波数領域における抽象化エネルギーモデリング手法”, 計測自動制御学会論文集, 第 57 巻, 11 号, pp470-477, 2021

## B. 国際会議講演論文

[1] Yukinobu Nakamura, Nobuhiro Hayama, Toru Yamamoto, “Function-based model cascading in systems engineering and model-based development”, Proceedings of the SICE Annual Conference, pp 633-637, 2019

# その他既発表論文

## C. 学術論文誌等掲載解説

[1] 中村幸宣, “MBD が真価を発揮するモデル作製&活用法”, 日本画像学会誌, 第 59 巻, 第 5 号, pp 514-520, 2020

# 謝辞

本研究の推進および本論文の執筆は、多くの方々のご支援と御助言によって完遂することができました。ここに感謝の意を表し、御礼を申し上げます。

広島大学大学院先進理工系科学研究科 山本 透 教授には、研究の推進や論文の執筆および各学会への投稿につきまして、多大なるご指導と御高配を賜りました。心より御礼を申し上げます。

また、広島大学大学院先進理工系科学研究科 西崎一郎教授、高木 健教授、並びに脇谷伸准教授には、論文に対する様々な示唆、ご指導をいただきました。深く感謝いたします。

また、広島大学大学院先進理工系科学研究科 中本昌由 助教、木下拓矢 助教には、本研究を進めるにあたり、多くのアドバイスをいただきました。感謝いたします。

株式会社 ISID エンジニアリング顧問 羽山信宏 氏には、研究のきっかけとなる考え方を教えていただくと同時に、研究内容について様々なご助言を賜りました。心より感謝いたします。

また、株式会社 ISID エンジニアリング社長 武田正利 氏には、研究環境の構築、研究を業務に活かす上での多大な助言を賜りました。深く感謝いたします。

また、株式会社エステックの諸氏、株式会社 ISID エンジニアリングの諸氏には、第 4 章研究のベースとなったプロジェクトにてモデル構築、技術的な議論等を通して多くのご協力をいただきました。深く感謝いたします。

最後に、広島大学大学院博士課程への進学、学位取得へ向けた活動に賛同し、常に支えてくれた 妻 恵理子に心から感謝します。