

Title	エンジニアークテクチャ構築に向けた熱効率の観点からのシステムモデル
Sub Title	System model from thermal efficiency perspectives for engine architecture
Author	原山, 元希(Harayama, Motoki) 西村, 秀和(Nishimura, Hidekazu)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2015
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2015年度システムエンジニアリング学 第210号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002015-0048

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文

2015 年度

エンジニアークテクチャ構築に向けた
熱効率の観点からのシステムモデル

原山 元希

(学籍番号 : 81433403)

指導教員 教授 西村 秀和

2016 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

論 文 要 旨

学籍番号	81433403	氏 名	原山 元希
論文題目： エンジンアーキテクチャ構築に向けた熱効率の観点からのシステムモデル			
(内容の要旨) 大気汚染や地球温暖化といった環境問題への対策として、今日の自動車に対する環境性能の要求は年々高度になっており、電気自動車や、水素ガスを利用する燃料電池車などが開発されている。しかしながら、これらがハイブリッド自動車あるいは従来の自動車に完全に取って代わるには数十年程度かかると予想され、こうした背景の中で、先進国を中心とした各国政府は、自動車用エンジンに対する環境規制を年々厳しくしている。自動車関連企業はこれに対処するため、エンジンに高度な制御技術を次々と導入している。この結果、エンジンは、メカ、エレキなどのハードウェアとソフトウェアが複雑に絡み合ったシステムとなっており、エンジン開発を担う技術者のこれまでの経験則だけでは QCD (Quality (品質), Cost (コスト), Delivery (納期)) を守る開発が行えない状況になっている。これはエンジンの全体像がつかめないうまま、対処療法的なアプローチをとっていることに起因している。たとえば、先行開発段階で効果が検証されたある要素技術を量産開発で採用したとしても、エンジン全体での性能が保証されていないことがそこで初めて明るみに出るといった問題を生じている。 そこで本研究では、モデルベースシステムズエンジニアリングのアプローチを用いて、自動車エンジンをシステムとして正しく捉え、アーキテクチャを構築する。自動車用エンジンの場合、熱効率、出力、運転応答性、エミッションなど様々な特性を持つことが要求されており、この中で本論文では、エンジンの最も基本的な原理を示す熱効率の観点に着目し、アーキテクチャ記述を行う。アーキテクチャを記述する言語として、2006年に OMG(Object Management Group)にて制定された SysML(Systems Modeling Language)を採用した。 システムモデル記述では、エンジンのコンテキストを分析し、エンジンに求められる機能を明確にする。そして、エンジンの機能を分析し、エンジンを構成するサブシステム、コンポーネントへ機能を割り当て、構成要素間の関係性を定義する。このように定義されたエンジンアーキテクチャをもとに、熱効率低下の要因分析を行い、構造的にこれを示している。そして、熱効率低下の要因と熱効率向上技術の関係性や熱効率向上技術とエンジンのシステムモデルの関係性を明らかにしている。これにより、熱効率低下の要因に対してそれを防ぐ技術を導入するというこれまでの対処療法的な検討に代え、システムモデルを用いてエンジン全体への影響を把握しながら、熱効率低下の要因に対する解決策の検討を行う方法論を提案している。さらに、ある企業でエンジンの効率向上に必要であるとしている 7つの因子が、本論文で定義したエンジンアーキテクチャ中で、どのような関係性を有しているかを明確にしている。また、自動車会社 3社のエンジン開発を行っているエンジニアとのディスカッションとそれに基づくアンケート調査を行い、開発現場でのシステムモデルの活用に関するレビューを受け、定義したエンジンアーキテクチャの有効性を検証している。最後に、これらの結果をもとに、今後の展望についての考察を行っている。			
キーワード (5 語) モデルベースシステムズエンジニアリング、システムアーキテクチャ、SysML(Systems Modeling Language)、自動車エンジン、熱効率			

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	81433403	Name	Motoki Harayama
Title : System Model from Thermal Efficiency Perspectives for Engine Architecture			
<p>Abstract</p> <p>In recent times there has been a lot of demand for environmental performance year upon year, leading to the development of electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles as countermeasures to environmental issues such as global warming and air pollution. Nevertheless, it is estimated that it could take several decades before these vehicles can replace hybrid, or regular vehicles. Meanwhile governments of, mainly developed, countries have been implementing stricter environmental regulations on car engines year on year. Automotive related companies are dealing with this by constantly introducing newer and better performing control technologies for engines. As a result, the situation has become such that engineers working to develop engines, which are systems composed of a complex intertwining of mechanical and electrical hardware and software, are now not able to follow QCD (Quality, Cost, Delivery) in development as a rule of thumb. The cause of this is that approaches are dealing remedially with the problem without being able to look at the overall picture of engines. There are, for example, problems where individual technologies that have had their effects verified in advanced development stages do not guarantee performance of the entire engine when used in mass production development, where problems only surface for the first time when the entire engine is put together.</p> <p>This research formulates an architecture by correctly capturing automobile engines as a system through a model based systems engineering approach. Several demands are made for automobile engines, such as thermal efficiency, power output, responsiveness and emissions. Among these, this paper conducts an architecture description focusing on thermal efficiency, which exhibits the most fundamental principle of an engine. The language used in order to perform the architecture description is SysML (Systems Modeling Language) which was recognized by OMG (Object Management Group) in 2006.</p> <p>In describing the system model, a context analysis is performed on the engine in order to clarify the functions required by the engine. Then the interaction between components is defined through functional analysis of the engine, and the allocation of the functions to the subsystems and components that make up the engine. By utilizing the engine architecture that has been defined previously, factor analysis was performed on thermal efficiency decrease factors, showing this more structurally. Furthermore, the relationship between factors that decrease thermal efficiency and thermal efficiency increasing technologies, and the relationship between thermal efficiency increasing technologies and the system model of the engine is made clear. Thus in the place of the remedial investigations used until present in which technologies were introduced to counter the factors decreasing thermal efficiency, a methodology whereby solution strategies to the thermal efficiency decreasing factors are investigated while grasping the effects on the entire engine through the system model is proposed. In addition, there is clarification on what kind of relationship the engine architecture defined in this paper has with the seven factors of engine efficiency increase defined by a certain company. Also, by conducting a discussion with engineers from three automobile companies that develop engines, and by conducting a survey based upon this, feedback on how the system model could be utilized in actual development is received, the effectiveness of the engine architecture is validated. Finally, through these results, prospects for the future are considered.</p>			
<p>Key Word(5 words)</p> <p>Model-Based Systems Engineering, System Architecture, SysML(Systems Modeling Language), Automotive Engine, Thermal Efficiency</p>			

目次

1. 序論	6
1.1 自動車エンジンを取り巻く環境	6
1.1.1 自動車のパワートレイン別普及台数予測	6
1.1.2 自動車に対する環境・燃費規制	6
1.1.3 自動車エンジンの複雑化	6
1.2 本研究のスコープ	7
1.3 研究目的とアプローチ方法	7
1.4 自動車エンジン開発にシステムモデルを用いる利点	7
1.5 本論文の構成	8
2. システムモデルを用いたシステムズエンジニアリングアプローチ	11
2.1 システムズエンジニアリングの概要	11
2.2 システムアーキテクチャ	12
2.3 モデルベースシステムズエンジニアリングの概要	13
2.4 システムモデル記述言語 SysML	15
2.5 システムモデルとその他のエンジニアリング要素との関係	19
2.6 自動車ドメインにシステムズエンジニアリングを適用した先行研究	20
3. エンジンのシステムモデル構築	21
3.1 エンジンシステムモデル構築の前提条件	23
3.2 エンジンシステムモデル構築のプロセス	24
3.3 エンジンシステムのコンテキスト分析	28
3.3.1 自動車レベルでのコンテキスト分析	28
3.3.2 駆動・走行系レベルでのコンテキスト分析	32
3.3.3 エンジンレベルでのコンテキスト分析	36
3.4 エンジンシステムアーキテクチャ検討	39
3.5 エンジンシステムモデル記述のまとめ	56
4. システムモデルを用いたエンジンシステムの熱効率向上へ向けた考察	59
4.1 熱効率低下の要因分析	59
4.1.1 エンジンシステムの熱効率・エネルギー損失の分類分け	59
4.1.2 機能・物理の観点から見たエネルギー損失の要因分析	61
4.2 熱効率向上技術の分析	78
4.3 分析結果を用いた熱効率向上へ向けた考察	85
5. 有効性評価	91
5.1 マツダスカイアクティブ開発で用いられた7つの因子とアーキテクチャの関係性	91
5.2 専門家とのディスカッション	98

6. 結論と今後の展望	114
7. 謝辞	112
参考文献	

1. 序論

1.1 自動車エンジンを取り巻く環境

現代のガソリンエンジン自動車の原型である「ベンツ・パテント・モートルヴァーゲン」は、ドイツ人のカール・ベンツによって 1885 年に世界で初めて制作された。以来ガソリンエンジンは、100 年以上に渡り人々の移動をサポートし続けている。今後も科学技術の進歩によるエンジンの高性能化や米国で始まったシェールガス革命による石油価格の下落により、自動車の動力源の内燃機関依存は続くことが予想される。しかし、環境問題や原油の枯渇問題などにより、自動車エンジンに関する各国の規制は年々厳しくなっている。これに対応するため、エンジンのエレクトロニクス化が進み、今日の自動車エンジンはメカ、エレキ、ソフトウェアが複雑に絡み合ったシステムとなっている。そして、この影響は開発現場の技術者の負担を増加させている。つまり、エンジンの複雑により、今までの経験則に基づいた開発では目標性能に届かないことや、研究レベルである要素技術についての効果が検証されても、エンジン全体の効率としてどうなっているのかが不明であるなどの問題を抱えている。

1.1.1 自動車のパワートレイン別普及台数予測

IEA(International Energy Agency)が 2012 年に公表した、「Energy Technology Perspectives 2012」では、自動車のパワートレイン別普及台数予測が示されている[1]。この予測によると、近年のシェールガス開発による石油価格の下落や内燃技術の進化などの要因により、2040 年でのハイブリット車を含む内燃機関を搭載した自動車の割合は約 77%と予測されており、自動車の動力源の内燃機関への依存は今後も続くことが予想される。そのため、自動車エンジンのさらなる高性能化は必須であるといえる。

1.1.2 自動車に対する環境・燃費規制

自動車による燃費・排ガス値は、日本、米国、ヨーロッパなどの先進国を中心に規制が設けられている[2]。この規制値は年々厳しくなっており、燃費、排ガス中の NO_x、PM 値はヨーロッパの EURO6、米国の Tier2Bin5、日本のポスト新長期などにより、制限されている。このような年々厳しくなっている排ガス規制や燃費への要求に、エンジン技術者は対応しなければならない

1.1.3 自動車エンジンの複雑化

1.1.1、1.1.2 から自動車エンジンは今後も需要があり、さらなる高性能化が求められていることがわかる。これらの要求に対応するために、電気、電子制御技術を導入して高性能化、高効率化を目指している。経済産業省の管轄で行われた、「第一回高度情報化社会における情報システム・ソフトウェアの信頼性およびセキュリティに関する研究会」では、自動車全体

の制御に用いるソフトウェアの複雑度を表すプログラムのコード数の把握が行われた[3]。この結果、年を追うごとにコード数が増加しており、技術の進歩とともに、制御が複雑していることが示されている。車両全体では、プログラミングのコード数は1億行を突破し、また、エンジン ECU(Engine Control Unit)の数も50を超えているとされている。

以上のことから、自動車エンジンは年々複雑化しており、研究・開発現場の負担も大きくなっていることが伺える。

1.2 研究の範囲

エンジンには熱効率、出力、運転性、エミッションなど様々な特性を持っている。そのため、本論文ではエンジンの最も基本的な原理を表す熱効率の観点に着目し、システムモデル記述を行う。

1.3 研究目的とアプローチ方法

本研究の目的は、自動車エンジンシステムの性能設計をきちんと行えるようにし、開発現場の負担を減らし、狙った通りの性能を出せるように仕様決めを行えるようにすることと、数ある要素技術を俯瞰し、それぞれの関係性を明確にすることである。

そのための手段として、自動車エンジンのアーキテクチャを構築し、構成要素や機能間の関係性を明確化する。具体的には、熱効率の観点から、自動車エンジンのアーキテクチャをモデルベースシステムズエンジニアリングのアプローチを用いて SysML で記述する。その記述されたシステムモデルをもとに、熱効率低下の要因を機能の視点、物理の視点に分けて分析する。この要因分析の結果から、熱効率向上技術についての分析や考察を行う。これについて、現場やマネジメント層のエンジニアとディスカッションし、システムアーキテクチャの結果であるシステムモデルの有効性を確認する。

1.4 自動車エンジン開発にシステムモデルを用いる利点

本節では、自動車エンジン開発にシステムモデルがあることによるメリットを記述する。ここでは、そのメリットを現状のエンジン開発における問題点とエンジン開発のあるべき姿に分けて記述する。

Figure1-1 に自動車エンジン開発の現状を表した図を示す。この図では、現状の自動車エンジン開発で生じている問題について説明をしている。自動車エンジン開発には、物理的な形状などエンジンの仕様を決める設計とさらなるエンジンの高性能化にむけた要素技術の研究・開発の2種類がある。設計では、経験のあるエンジニアが、理論や経験則のもとに物理形状の設計を行い、その結果として性能、すなわち、物理現象が見えてくる。これをテスト工程で調整するか、ソフトウェアを用いて適合させて市場へ出荷できるようにする。仮にエンジンがシンプルな構造であれば、理論や経験則を用いた設計である程度は上手くいくが、

複雑化により目標性能に到達させるためには、テスト工程で多大な負担をかけるか、あるいはもう一度設計を見直さなければならない。また、研究・開発では、1つ1つの要素技術に着目して効果を検証しているため、全体として効率がどれだけ上がるか、あるいは他の要素にどこまで、どのような影響が及ぶかは明確でない。

これに対し、Figure1-2に示すように、理想的なエンジン設計は初めに実現可能な性能を設計し、その性能を実現する仕様設計を行う。これにより、手戻りなくエンジン設計を行うことができる。また要素技術開発では、それぞれの要素技術同士の関係性が明確にすることで、システミックに全体の効率を考えながら研究開発を行うことができる。これらは、前述の通り、システムモデルを用いたモデルベースシステムズエンジニアリングで実現することができる。

Figure1-1 Current Situation of Engine Development

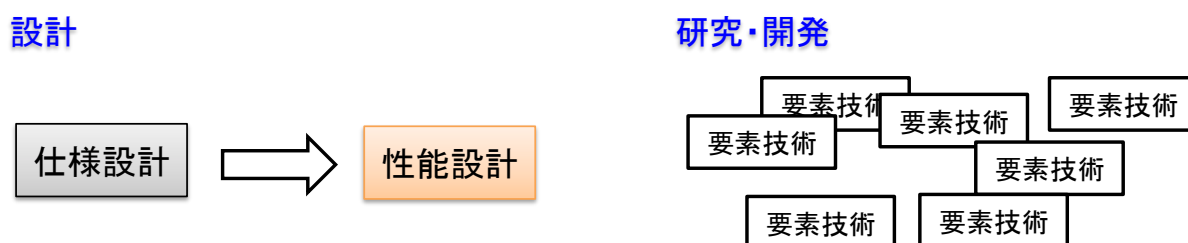
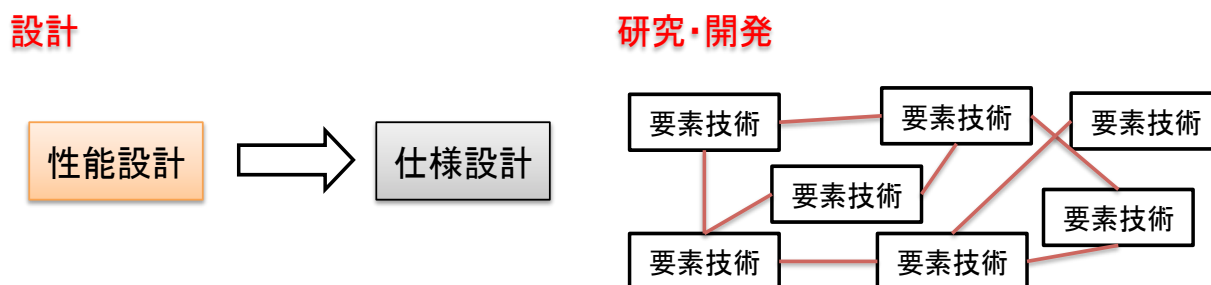


Figure1-2 Ideal Situation of Engine Development



1.5 本論文の構成

本論文の構成を以下の Figure1-3 に示す。

1.序論では、本研究の背景である自動車エンジンを取り巻く環境、スコープ、目的およびアプローチ手段について述べる。

2.システムモデルを用いたシステムズエンジニアリングアプローチでは、序論の「1.3 研究目的とアプローチ方法」と「1.4 研究の成果物と期待される効果」について詳しく説明する。そして、「2.1 システムズエンジニアリングの概要」について説明したのち、システムズエンジニアリングにおいて重要な概念である「2.2 システムアーキテクチャ」について詳しく説明する。そしてアーキテクチャを表現するモデルを用いてシステムズエンジニアリングを進めていく「2.3 モデルベースシステムズエンジニアリング」について述べ、「2.4 システムモ

明する。そしてアーキテクチャを表現するモデルを用いてシステムズエンジニアリングを進めていく「2.3 モデルベースシステムズエンジニアリング」について述べ、「2.4 システムモデル記述言語」では、モデルベースアプローチで用いるモデルの SysML (System Modeling Language)の説明を行う。「2.5 システムモデルとその他のエンジニアリング要素との関係」では、すでに行われている現状のエンジニアリングのプロセスやシミュレーションとの関係性を明確にしている。「2.7 自動車エンジンを取り巻く環境」では、今後の自動車の普及予測や各国の環境規制についてまとめて、自動車エンジンの現状や今後について述べる。こうした背景をもとに、「2.8 自動車エンジン開発にシステムモデルを用いる利点」でシステムモデルの必要性を述べる。

3.エンジンのシステムモデル構築では、「3.1 システムモデル構築の前提条件」で対象とするシステムの境界を明確化する。「3.2 エンジンシステムモデル構築のプロセス」では、モデリングの流れを説明し、3.3 以降で本題のシステムモデル構築に入っていく。「3.3 エンジンシステムのコンテキスト分析」では、エンジンのコンテキストを自動車レベル、走行・駆動系レベル、エンジンレベルの3つに切り分けてそれぞれ分析を行う。コンテキスト分析の結果とシステムズエンジニアリングアプローチの考え方を用いて「3.4 エンジンシステムアーキテクチャ」で、熱効率の観点からのシステムアーキテクチャを記述する。その結果を「3.4 アーキテクチャの観点から得られた成果物」にまとめる。

4.システムモデルを用いたエンジンシステムの熱効率向上へ向けた考察では、3.4 を用いて「4.1 熱効率低下の要因分析」と「4.2 熱効率向上技術の分析」を行う。機能と物理の視点に切り分けてそれぞれ分析しているところが、本研究の新規性である。これらの分析の結果をもとに、「4.3 分析結果を用いた熱効率向上へ向けた考察」を行う。

5.有効性評価では、以上の結果を用いて、「5.1 マツダスカイアクティブ開発で用いられた7つの因子とアーキテクチャの関係性」と「5.2 専門家とのディスカッション」により、有効性確認を行った結果を記す。

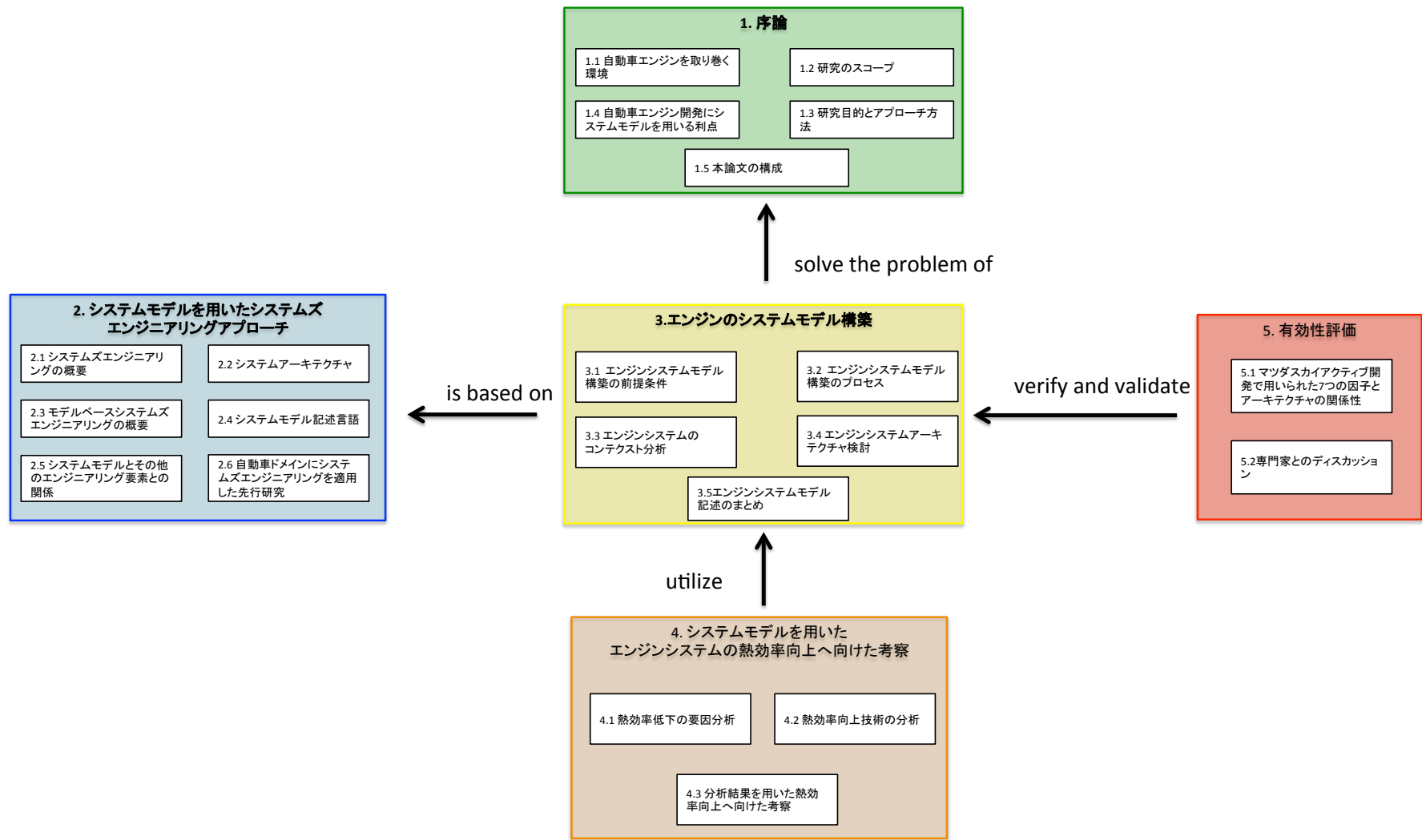


Figure1-3 Master Thesis Each Chapter Relationship Description

2. システムモデルを用いたシステムズエンジニアリングアプローチ

2.1 システムズエンジニアリングの概要

システムズエンジニアリングは、INCOSE(International Council on Systems Engineering)によって「システムを成功裏に実現させることができる、複数のドメインにまたがるアプローチおよび手段」と定義されている。システムズエンジニアリングを行うプロセスの標準としてはISO/IEC 15288やANSI/EIA632、IEEE 1220がある。これらの標準プロセスはシステム開発のベストプラクティスから帰納的に導かれたものであり、それぞれカバーするライフサイクルの範囲がことなる。ISO/IEC 15288は概念設計から廃棄までライフサイクルを広範囲にわたってカバーし、さらに技術面だけでなく、ビジネスや開発組織への記述があるものの、あまり詳細なプロセスの記述ではない。それに対し、ANSI/EIS 632は利用前まで、IEEE1220は開発部分のみをカバーし、それぞれのカバー範囲内で詳細な記述が行われている。これらの標準の中で定義されているシステムズエンジニアリングのプロセスは、①システム設計、②システムエンジニアリング管理、③評価・解析の3つの活動を含む。①システム設計は、要求分析とアーキテクチャ設計からなり、Figure2-1に示すアーキテクチャVモデルにおける下位への要求を導出する活動である[7]。②システムズエンジニアリング管理は、各活動の計画や実施、さらには評価を行う活動である。③評価・解析は、アーキテクチャVモデルの右側に表現されている解析、検証・妥当性確認等の活動である。以上がシステムズエンジニアリングの活動内容である。

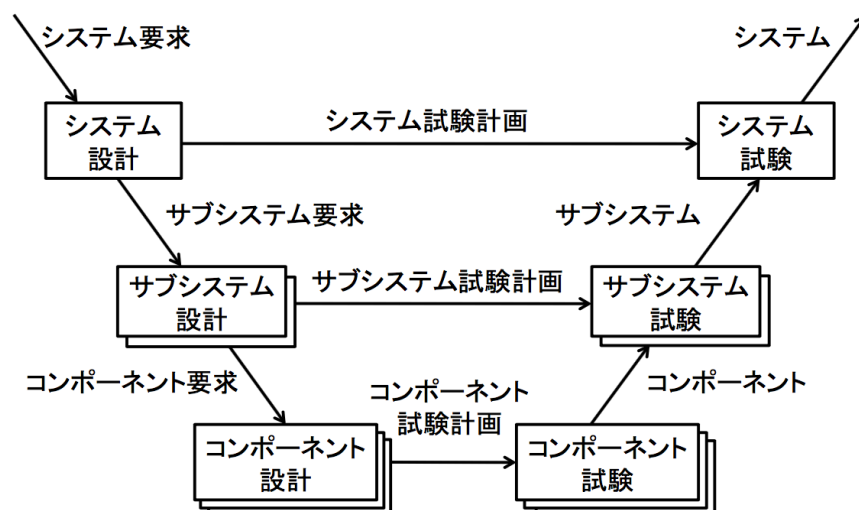


Figure2-1 Architecture Vee Model

2.2 システムアーキテクチャ

システムアーキテクチャは、ISO/IEC24765において、「構成要素の設計や進化を左右するような構成要素の構造、構成要素間の関係、そして原理や指針」と定義されている[5]。

Figure2-2 にシステムアーキテクチャについて説明した図を示す。ISO42010によると、システムは必ず1つのアーキテクチャを持つ[6]。そして、システムアーキテクチャは Architecture Description によって表現される。Architecture Description は対象とするシステムに関するステークホルダーの様々な Concern を抜けもれなく表現する。また、Architecture Description は、ステークホルダーの Concern から導かれる1つ以上の視点 (Architecture Viewpoint) に対応して、ビュー (Architecture View) として切り出すことができる。

この Architecture Description という考え方により、システムに関するステークホルダーの Concern や視点を適切に整理してアーキテクチャを設計することが非常に重要である。システム設計プロセスの各活動において、どのような視点を設定するかは、開発対象とするシステムの特性に依存するため、Architecture Description では特定の視点の規定はしていない。一般的に用いられる視点は、IEEE1220 に規定される①Operational view、② Functional view、③Physical view である[7]。すなわち、①開発対象とするシステムの運用シナリオを明確化し、②明確化した運用シナリオを実現するための機能を明確化し、③その機能を実現するための物理(ハードウェアやソフトウェア)を明確化するという視点である。

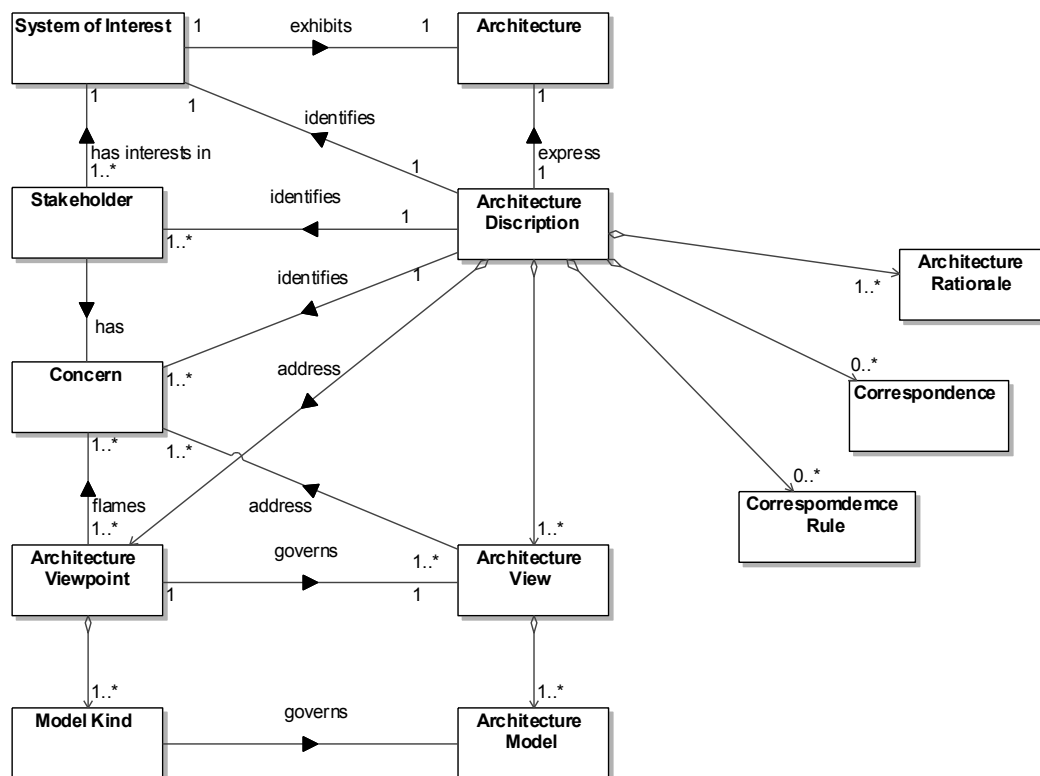


Figure2-2 Ontology of Architecture Description

2.3 モデルベースシステムズエンジニアリングの概要

モデルベースシステムズエンジニアリングとは、前節で述べたシステムズエンジニアリングをモデルベースで実践することである。そして、そのプロセスは上記のISO15288やIEEE1220のシステムズエンジニアリングプロセスとも対応している。歴史をたどるとシステムズエンジニアリングは、長年NASA（米国航空宇宙局）で、文書ベースで実施されてきた。しかし、コンピュータ技術などの技術の発展によるシステムの大規模、複雑化に対し、文書ベースでシステムズエンジニアリングを実践することが困難なため、モデルベースでシステムズエンジニアリングを行うMBSE(Model-Based Systems Engineering)が一般的になりつつある[8]。MBSEの中で、モデルは、対象とするシステムの仕様、設計、分析、そして検証に関する情報を網羅したものである。以下のFigure2-3は、一般的なシミュレーションの文脈で使われる“モデル”とMBSEで用いられる“モデル”についての違いを示している[8]。Symbolic Modelとは、何か対象物を表すモデルを指す。そして、そのモデルは記述モデルまたは非実行形式モデル(Descriptive Model)と分析モデルまたは実行形式モデル(Analytical Model)の2種類に大別される。一般に自動車業界で、MBD(Model Base Development)と言われる場合には、実行形式モデルのみに注目している場合がほとんどである[9]。MBSEにおけるシステムモデルとは、記述モデルと実行形式モデルの両方を適切に使って構築される。さらに、記述モデルは、CADの3次元モデルなどの形状を表すGeometric ModelとSysMLによる要求図や構造図などを表すLogical Modelに分けられる。Logical Modelでは、システムの機能性、接続関係、トレーサビリティなどの論理的な関係性が記述される。本論文で扱うシステムモデルはLogical Modelのことを指し、このモデルで扱うのは、システムと関係する外部システム、環境やシステムの要求、構造、振舞い、パラメトリック制約などである。そして、このシステムモデルの記述をサポートするツールとして、次節に述べるSysMLなどが用いられる。

Figure2-4に代表的なシステムズエンジニアリングにおける標準的なプロセス、アーキテクチャフレームワーク、モデリング方法論、モデリングとシミュレーション標準を示す[8]。システムズエンジニアリング標準としては、2.1節で示したようにEIA632、ISO15288、IEEE1220があり、それぞれライフサイクルのカバー範囲が異なるため、設計対象とするシステムやプロジェクトによって使い分けると良い。次にアーキテクチャフレームワークについては、イギリス国防省のMODAF(Ministry of Defense Architecture Framework)や米国の国防省のDoDAF(Department of Defense Architecture Framework)、また企業レベルで使われるステークホルダーの視点を考慮したZachman Frameworkなどがある。これらはある分野のシステムのアーキテクチャ記述に特化しており、その分野におけるステークホルダーのConcernの抜けもれがないような視点を設定することで、開発やプロジェクトの効率化を図るものである。モデリング方法論は、IBMのHarmonyやOOSEM(Object-Oriented Systems Engineering)などがある。システムモデリングには、IDEF0やSysML、シミュレーションにはMatlab/Simulinkがある。

システムズエンジニアリングを始めるときには、これらのプロセス標準、アーキテクチャフレームワーク、モデリング方法論、モデリングとシミュレーション標準をそれぞれ目的と対象とするシステムに合わせて選択すると良い。もちろん、対象とするシステムに既存の方法論やツールがない場合は、自らつくり上げることが必要である。

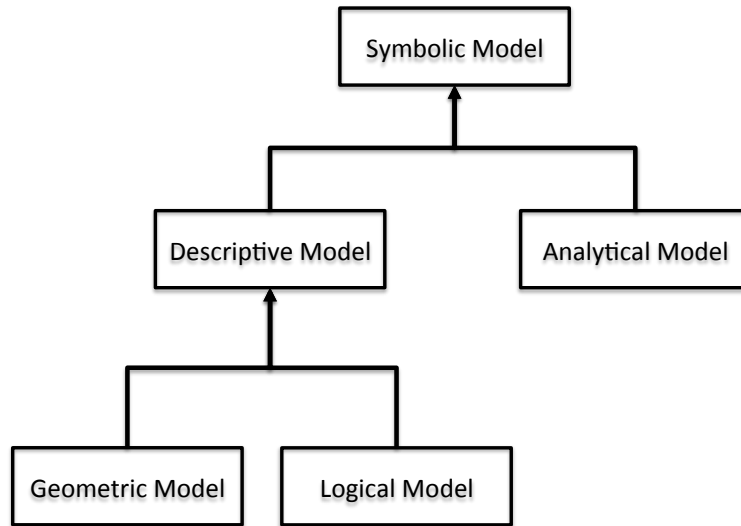


Figure2-3 Model Taxonomy

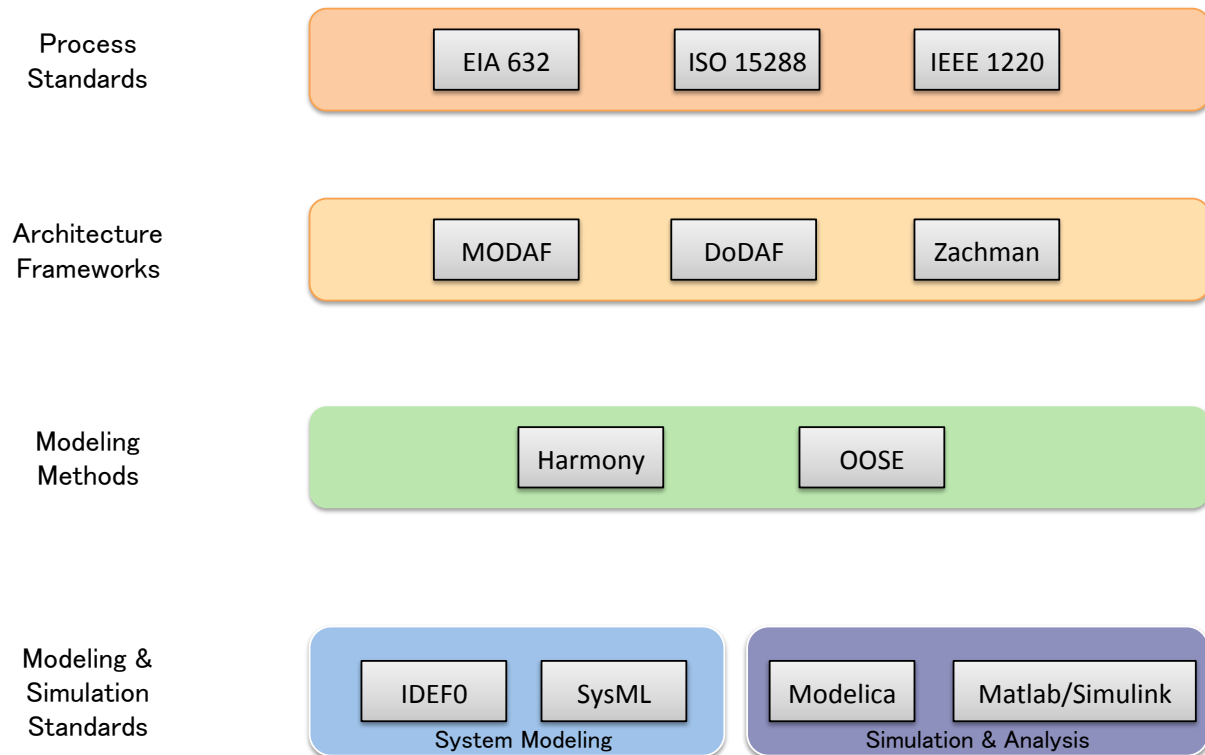


Figure2-4 Systems Engineering Standards Taxonomy

2.4 システムモデル記述言語SysML

本研究では、システムモデルを記述する言語としてSysML(Systems Modeling Language)を採用した。SysMLは、2006年にOMG(Object Management Group)によって採用されたシステム記述言語であり、現在v1.4が公刊されている[10]。SysMLはソフトウェア開発用に用いられていたUML2.0(Unified Modeling Language)の拡張付きサブセットとして、システムモデル構築を目的に開発、整備された。Figure2-5にSysMLとUMLの関係を示す。SysMLで新しく追加された図は要求図(Requirement Diagram)と(Parametric Diagram)の2つであり、その他の図は、UML2.0のものが再利用されている。SysMLに定義される9種類の図の構成を以下のFigure2-6に示す。これら9つの図は、Figure2-7に示すSysML4つの柱の中に整理することができる。4つの柱とは、1.Structure (構造)、2.Behavior (振る舞い)、3.Requirements (要求)、4.Parametrics (制約)である。1.Structure (構造)には、Block Definition Diagram (ブロック定義図)とInternal Block Diagram (内部ブロック図)がある。2.Behavior (振る舞い)には、Activity Diagram(アクティビティ図)、Sequence Diagram (シーケンス図)、Use Case Diagram (ユースケース図)そしてState Machine Diagram (状態機械図)がある。3.Requirement (要求)には、Requirement Diagram (要求図)があり、4.Parametricには、Parametric Diagram (パラメトリック図)がある。これら4つの柱は、それぞれ他の柱との関係性を持っている。

また、それぞれのDiagramは何かの表現に特化した表現方法であり、何を表現するかは、システムズエンジニアリングプロセスにそって、決めていく必要がある。それぞれのDiagramの詳細をTable2-1にまとめる。SysMLでは、この4つの柱を組み合わせることで、対象とするシステムのアーキテクチャを記述する。このときに、9種類の図を必ずしもすべて使用する必要はなく、前述のとおり、システムズエンジニアリングプロセスにそって、必要な図を選択し、必要な枚数だけ記述すれば良い。

さらに重要な事は、それぞれの図の中の要素は、他の図の要素と互いに関係性を持たせることができ、これによりトレーサビリティの獲得に貢献する。また、選択した図同士の関係性の定義を行うこともシステムモデリングの重要な工程といえる。

SysML 記述ツールは、各社から様々なソフトウェアが販売されている。2016年現在、OMGの公式ウェブサイトで紹介されている9つのツールをTable2-2にまとめる。本研究ではその中から、NoMagic社から販売されているCameo Enterprise Architecture18.2を用いた。

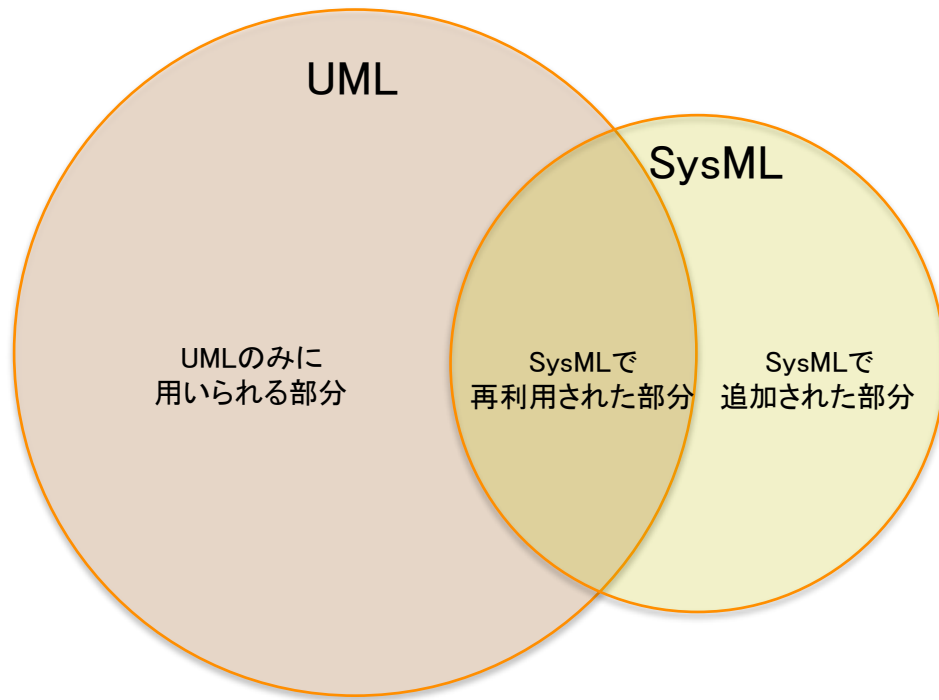


Figure2-5 Overview of SysML/UML Interrelationship

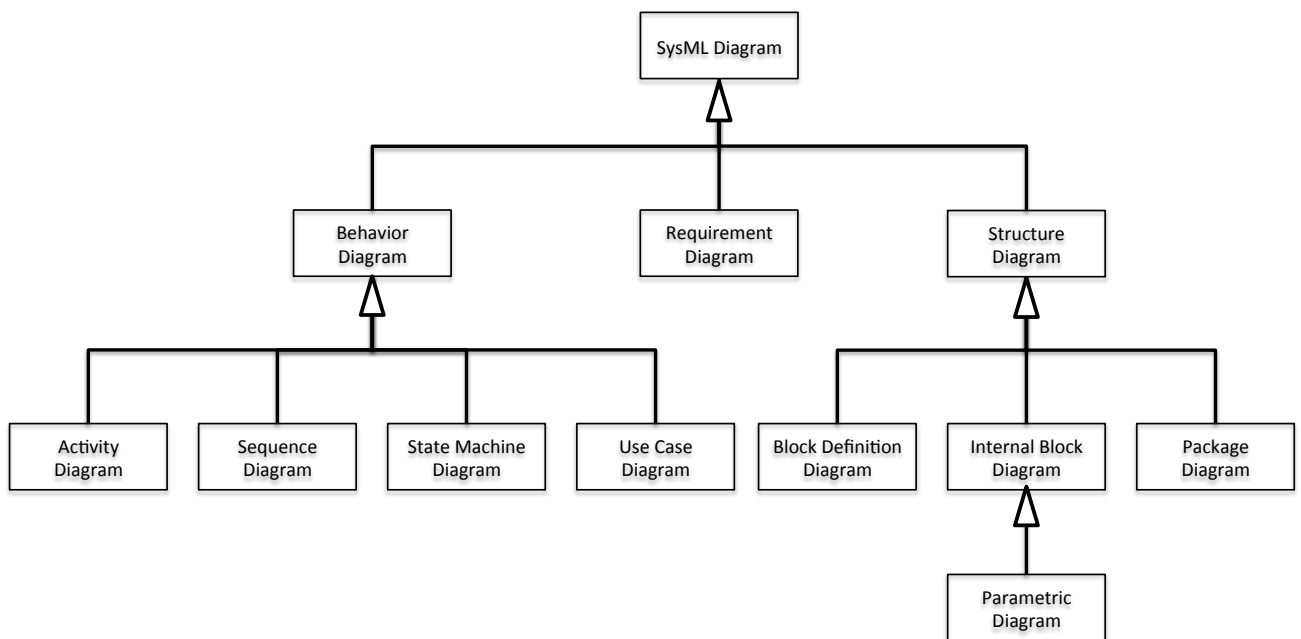
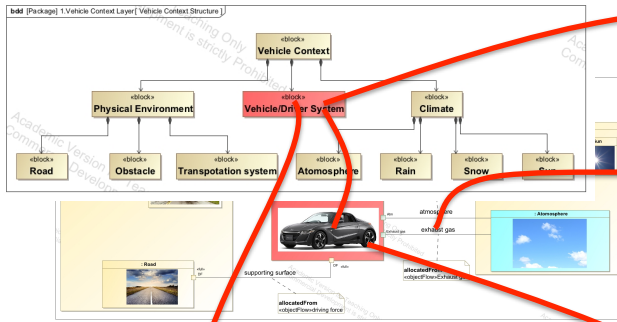
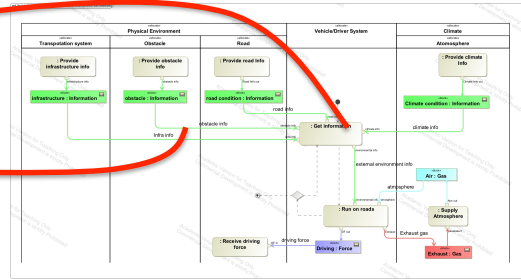


Figure2-6 SysML Diagram Types

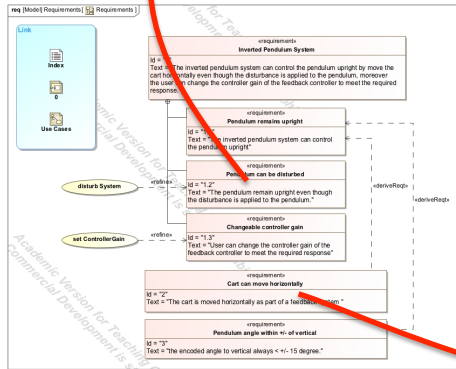
1. Structure



2. Behavior



3. Requirements



4. Parametrics

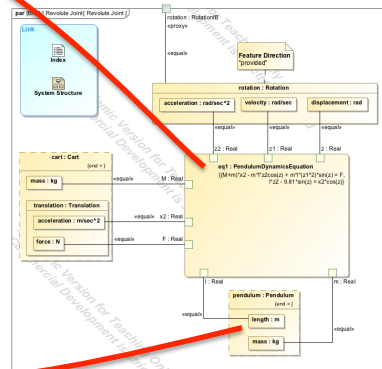


Figure2-7 The Four Pillars of SysML

Table2-1 Description of SysML Diagram

Package Diagram パッケージ図	モデルの構成を表す表現方法
Requirement Diagram 要求図	要求を表す表現方法
Activity Diagram アクティビティ図	アクティビティの論理的な流れと、機能フローとして、動的な「振る舞い」を表す表現方法
Sequence Diagram シーケンス図	要素間の相互作用を時系列に並べることで、動的な「振る舞い」を表す表現方法
State Machine Diagram 状態機械図	状態の遷移として、動的な「振る舞い」を表す表現方法
Use Case Diagram ユースケース図	システムのユースケースと関連するアクターを示して、動的な「振る舞い」を表す表現方法
Block Definition Diagram ブロック定義図	構成要素の親子関係を定義して、静的な「構成」を表す表現方法
Internal Diagram 内部ブロック図	構成要素間の接続関係を定義して、静的な「構成」を表す表現方法
Parametric Diagram パラメトリック図	要素が持つ変数間の支配的な関係性を表す表現方法

Table2-2 Software and Vendors of SysML Tools

ベンダー名	ソフトウェア名
Atego	Artisan Studio
ChangeVision	Astah SysML
IBM	Rhapsody
NoMagic	Cameo Enterprise Architecture
intercax	
SOFTEAM MODELIOSOFT	System Architect Solution
Eclipse	Papyrus
Visio Stencil for SysML	Microsoft
Sparx Systems	Enterprise Architect

2.5 システムモデルとその他のエンジニアリング要素との関係

本節では、前節までに示した MBSE のアプローチで、作成したシステムモデルが、実際の開発において、他のエンジニアリング要素とどのように関係しているかを示す。

現在 INCOSE に CAB メンバーとして参加している企業は、米国の航空・宇宙産業の企業を中心に自動車、IT、ソフトウェアベンダー、コンサルティング、大学など様々である[11]。その中でも、MBSE を巨大な企業の中でいかにうまく既存のシミュレーションなどのエンジニアリング要素と組み合わせるかが注目されている[12]。そのため、毎年行われている INCOSE の IW(International Workshop)では、各企業の MBSE 導入に取り組み例が数多く報告されている[13]。ここでは、米国の intercax 社の取り組み事例を紹介する。intercax 社はソフトウェアエンジニアリングの企業であり、システムズエンジニアリングのための複雑なモデルの統合を専門としている[14]。

Figure2-8 に既存の組織におけるシステムズエンジニアリングを用いて開発を行う環境と SysML と intercax 社が提供する SLIM(Systems Lifecycle Management)[12]を中心に据えた開発の比較を示している。図の左側の既存の開発環境の場合、各エンジニアリング要素の間を SE(System Engineer)が管理している様子を示している。これに対し、右側の SysML と SLIM を用いた開発環境の場合、SysML や SLIM が中心となるため、全体を SE が管理しやすくなっており、開発時に情報のトレースの容易化や部署間のコミュニケーションの円滑化が見込まれる。

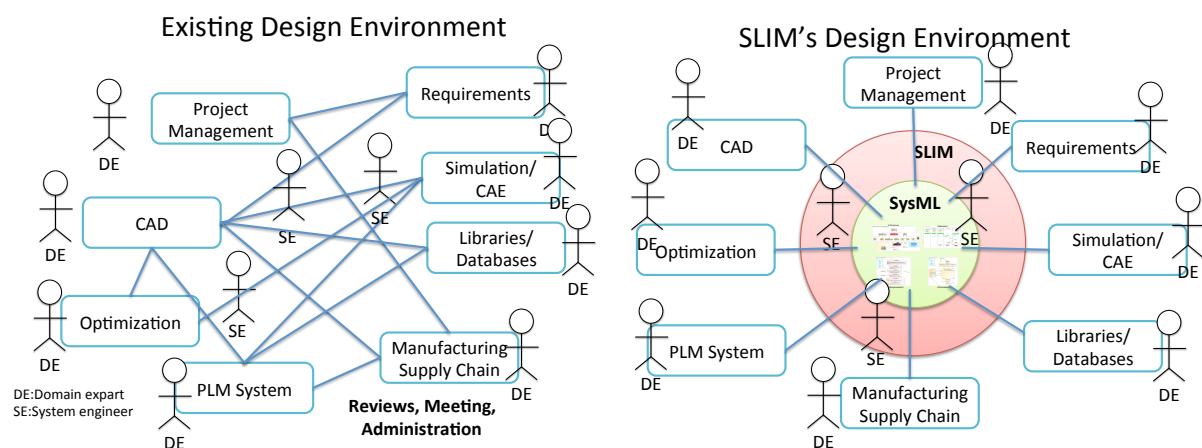


Figure2-8 Comparison of Existing Design Environment and SLIM's Design Environment for Complex Systems [15]

2.6 自動車ドメインにシステムズエンジニアリングを適用した先行研究

研究背景にも示した通り、自動車エンジンの熱効率向上技術に関する研究は、ある限定した要素技術単位でしかなく、数ある熱効率向上技術とエンジンシステムのアーキテクチャの関係性を明確にするような研究例はいままでされていない。

本研究のアプローチ方法でもあるシステムズエンジニアリングアプローチについては、主に航空、宇宙業界で数多くの研究例や実用例が報告されている。しかし、自動車関係の分野では、それほど多くの報告例はないが、2015年のINCOSEのInternational Workshopでワーキング・グループができたように、近年注目され始めている。Ford社が2014年のInternational Workshopで、「Integrating Descriptive Models with an Analytical Model Culture-Lessons Learned at Ford」というタイトルで、SysMLを用いたシステムモデルと分析に用いるシミュレーションモデルをうまく組み合わせ、活用していくための検討の発表を行った[16]。これらの検討は、自動車レベルで行われ、自動車の運用の視点、機能の視点、物理の視点の3つに切り分けてシステムモデル記述を行っている。記述したシステムモデルをベースにSimlinkを用いたシミュレーションによる分析やPLM(Product Life Cycle Management) Systemの管理を行っている。

また、ジョージア工科大学とFord社が2013年に公表した、「Supporting Multidisciplinary Vehicle Analysis Using a Vehicle Reference Architecture Model in SysML」では、自動車のReference Architectureを作り、シミュレーションモデルとの自動変換について述べられている[17]。

以上の様に、自動車レベルでシステムモデルを用いた検討を行うケースはいくつかあるが、自動車エンジンの機能を分析し、エンジンを構成するサブシステム、コンポーネントへ機能を割り当て、構成要素間の関係性を定義するような研究は行われていない。また、先行研究では、シミュレーションとの接続を重視しているが、本研究では、シミュレーションを行わず、システムモデルを用いてエンジンシステムの機能、物理の観点から熱効率の低下要因を分析し構造化した、さらに、熱効率向上技術とアーキテクチャの関係性を明らかにし、影響範囲の検討が出来るシステムモデルを構築した。

3. エンジンのシステムモデル構築

本章では、研究対象であるエンジンシステムのシステムモデル構築のプロセスを示す。まずはエンジンシステムのコンテキスト分析を行い、その後、機能分析、物理構造の検討を経てエンジンシステムのアーキテクチャをシステムモデルで記述する。システムズエンジニアリングプロセスでは、初めにライフサイクルステージを定義するが、時間とエンジン開発経験の制約から、エンジンシステムの運用ステージの定常運転フェーズについてのシステムアーキテクチャを検討し、システムモデルを構築する。

システムモデルの記述にあたっては、トレーサビリティを確保したうえで、不整合のないモデル記述のために、No Magic 社のソフトウェア Enterprise Architecture18.2*を利用した。以下の Figure3-1 に、モデル全体の構成を示すパッケージ図を添付する。また、それらのパッケージの定義を Table1 に示す。さらに、ソフトウェア内で、パッケージのツリー構造がどのように見えるかを Figure3-2 に示す。[18]

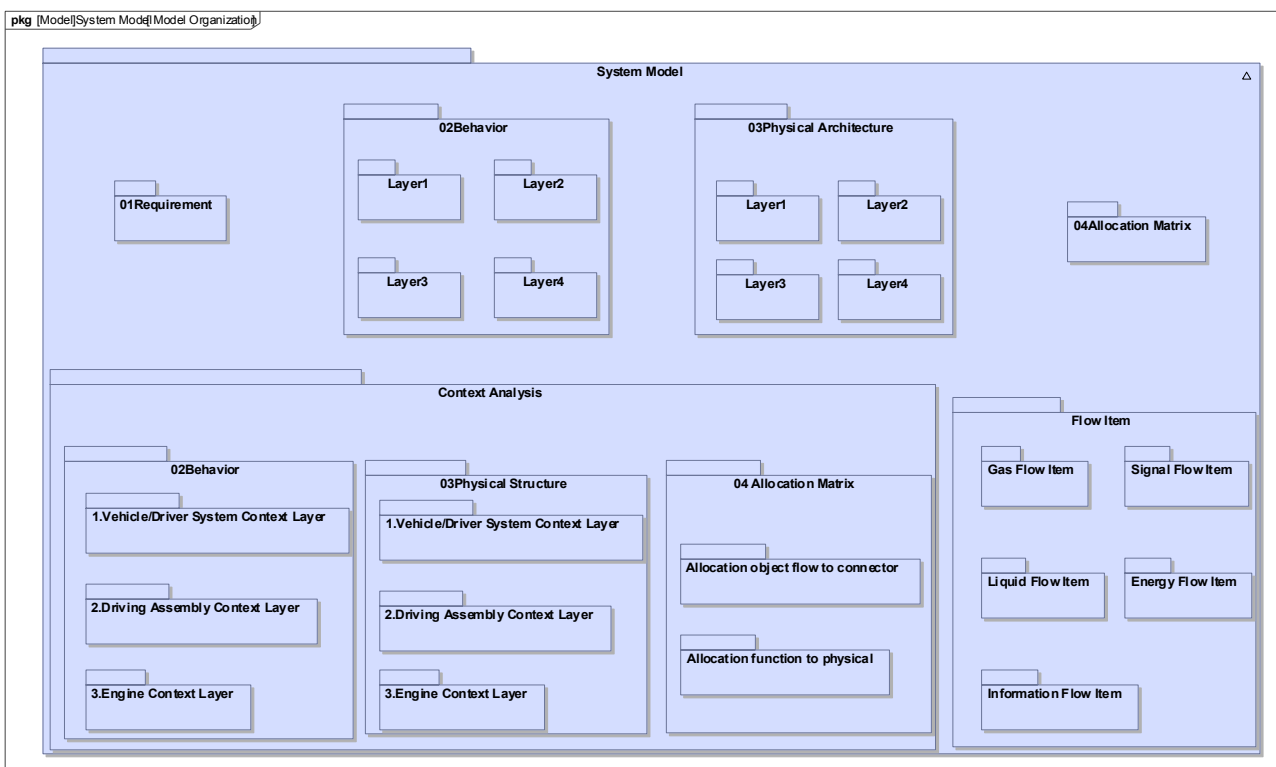


Figure3-1 System Model Organization

Table3-1 Model Organization Description

Requirement パッケージ	要求を整理し、それらの要求がシステムによってどう実現させるかを整理する。
Behavior パッケージ	システムの振舞いを記述し、機能分析を行う。
Physical Architecture パッケージ	システムの振舞いを実行する物理的な構成要素や接続関係を記述し、物理設計を行う。
Allocation Matrix パッケージ	システムの機能をどの物理で実現するかを記述し、トレーサビリティを確保するとともに、システムの整合性を確認する。
Context Analysis パッケージ	システムのコンテキストを構成する要素が含まれており、さらにそれらの構成要素と System of Interest との間の振舞いや物理的接続関係を記述し、コンテキスト分析を行う。
Flow Item パッケージ	インターフェースやブロック特性など、システム内の様々な変数をまとめる。

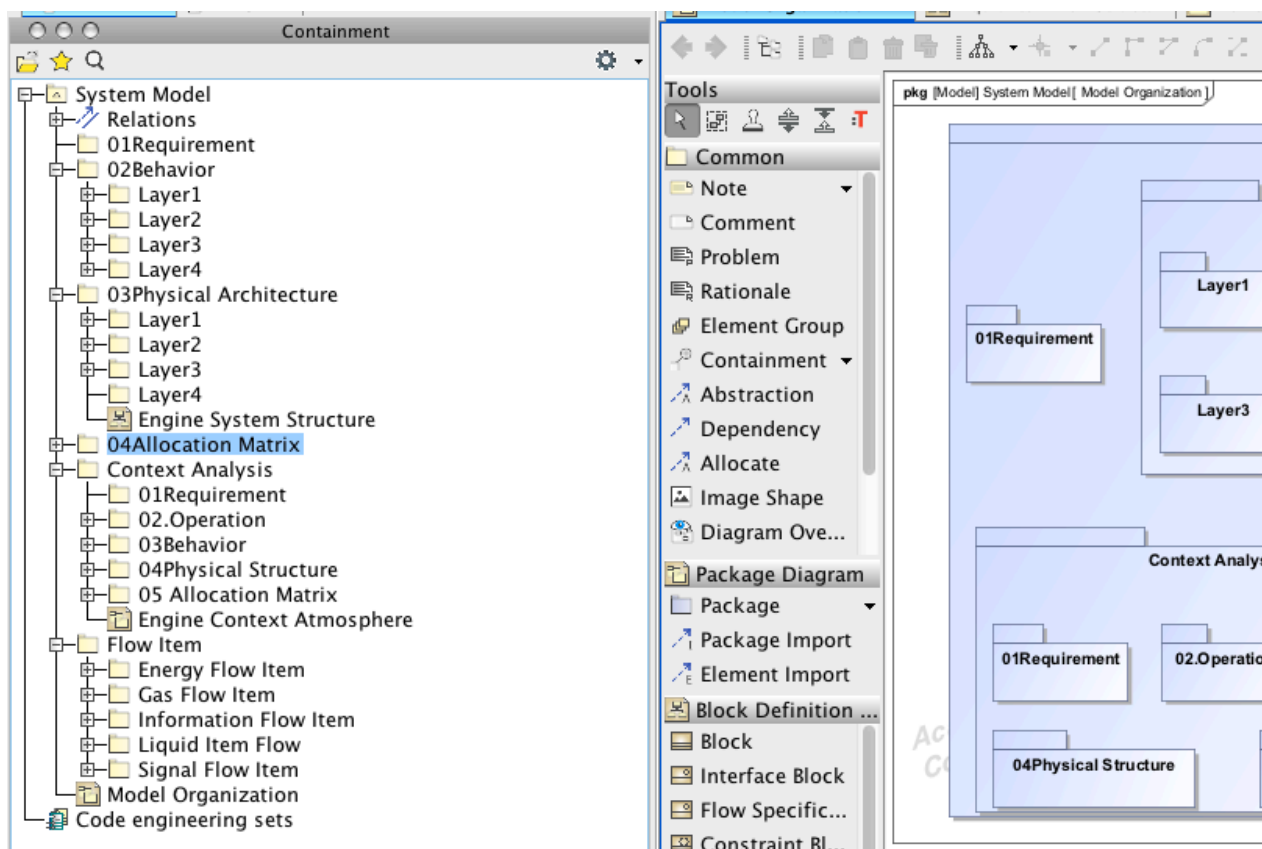


Figure3-2 Model Organization Tree Structure in Enterprise Architecture18.2

3.1 エンジンシステムモデル構築の前提条件

エンジンのシステムモデルを記述する際に、前提となる条件を以下に示す。

1. Reciprocating Engine（レシプロエンジン）であること。
2. ガソリンエンジンであること。
3. 吸気、圧縮、膨張排気の4工程を行うエンジンであること。
4. 内燃式であること。
5. 回転数一定の定常運転時を想定すること。
6. 環境要因が変化しないこと。
7. 単気筒であること。

以上のような条件がないと、現状のエンジンのアーキテクチャではないものが出来上がってしまうおそれがある。例えば、条件1.がないと航空機のような推進機構を持ったエンジンが考えられる。

次にシステムモデルで記述する観点に関する条件を設定する。Figure3-3にエンジンに求められている要求を記述する[19]。この図よりエンジン開発に求められている観点は①熱効率、②高出力化、③低騒音、振動、④低エミッション、⑤良運転性（過剰応答）、⑥小形化、軽量化、⑦高信頼性、耐久性、メンテナンスフリー、⑧低コストの8つである。エンジンシステムのアーキテクチャを構築する際に、これら8つの観点が必要であるが、本研究では、最もエンジンの基本的な原理を表す観点である①の熱効率に注目をする。基本に注目してシステムモデル構築を行うことで、後に他の観点を追加するときに、この基本となるシステムモデルに追加し、モデルを発展させることで、完全なエンジンシステムのアーキテクチャを構築の構築を目指すことができる。

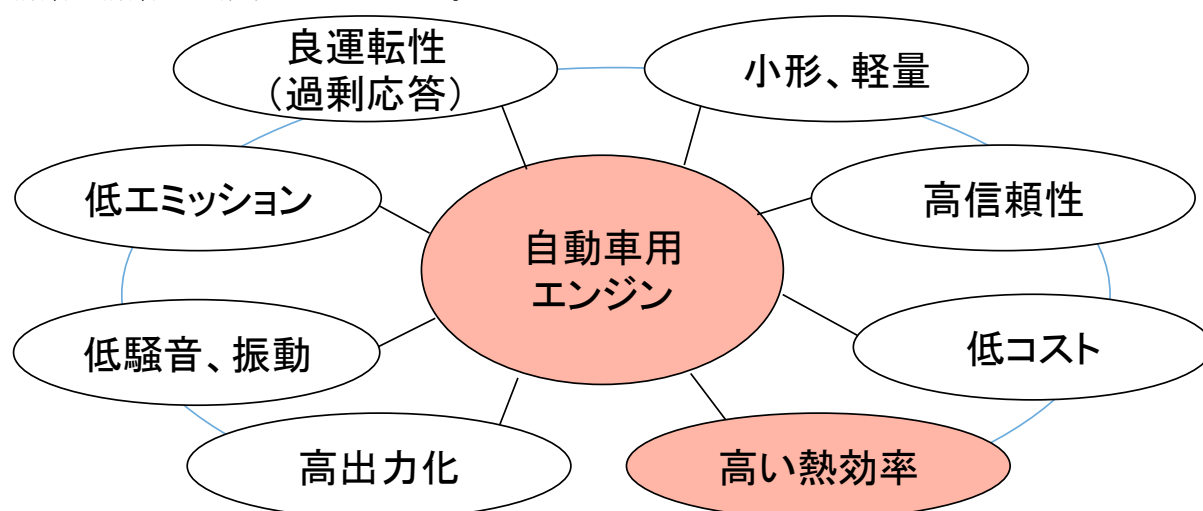


Figure3-3 Necessary Perspectives of Engine System Development and System Boundary

3.2 エンジンシステムモデル記述のプロセス

エンジンのシステムモデルを記述する上で、基本となる機能、物理構成要素間の関係性を表すダイアグラムの関係を Figure3-4 に示す。図の上部にある Block Definition Diagram では、物理構成要素の階層性を表している。左側の Activity Diagram では、それぞれの機能が object flow でつながっており、機能の入出力関係を表している。右側の Internal Block Diagram では、物理構成要素間の接続関係を表している。それぞれの Diagram は、機能から物理へのアロケーション関係などの関係性を持っており、それらをマトリックス形式で管理するのが、Traceability Matrix である。

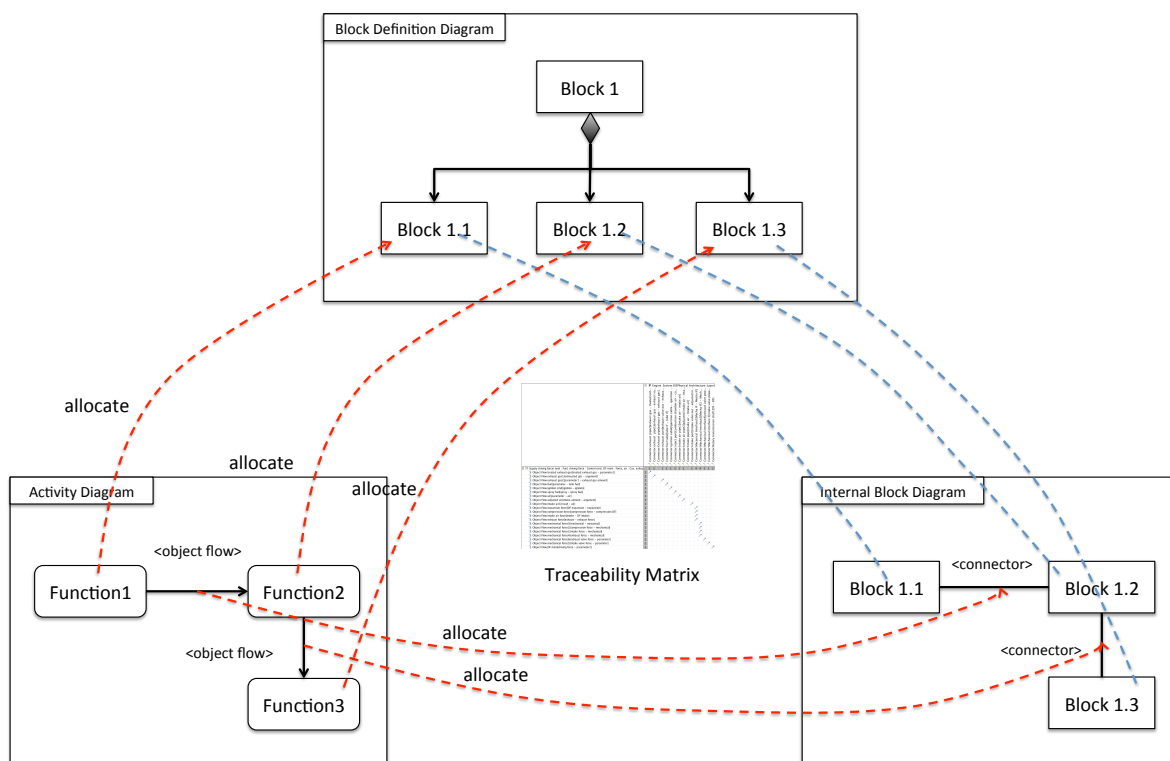


Figure3-4 Relationship between Diagrams

Figure3-5 で示す通り、BDD(Block Definition Diagram)と IBD(Internal Block Diagram)を物理的な関係性を示す Physical Architecture、Activity Diagram を機能間の関係性を表す Logical Architecture と呼ぶ。

次節以降のシステムモデル構築では、Figure3-4 で示したダイアグラム間の関係性を基本にして、エンジンのコンテキストからエンジン内部の各レイヤーにおいて、機能、物理間の関係性を明確にしていく。この様子を Figure3-6 に示す。ここでは、Layer1,2 でそれぞれ、BDD, IBD, Activity Diagram の 3 つのダイアグラムを用いてそれぞれの階層の機能、物理の関係性を明確にしている。仮に赤枠で囲った Layer1 の Block1.1 を SOI(System Of Interest)とすると、これは、Layer2 で Block1.1.1、Block1.1.2, Bloc1.1.3 に分解されている。このように、各レイヤーで、機能、物理の関係性を明確にしなが、各レイヤー間でもトレ

ースを取ることで、上位から下位まで整合性が確保されたアーキテクチャを記述することが出来る。

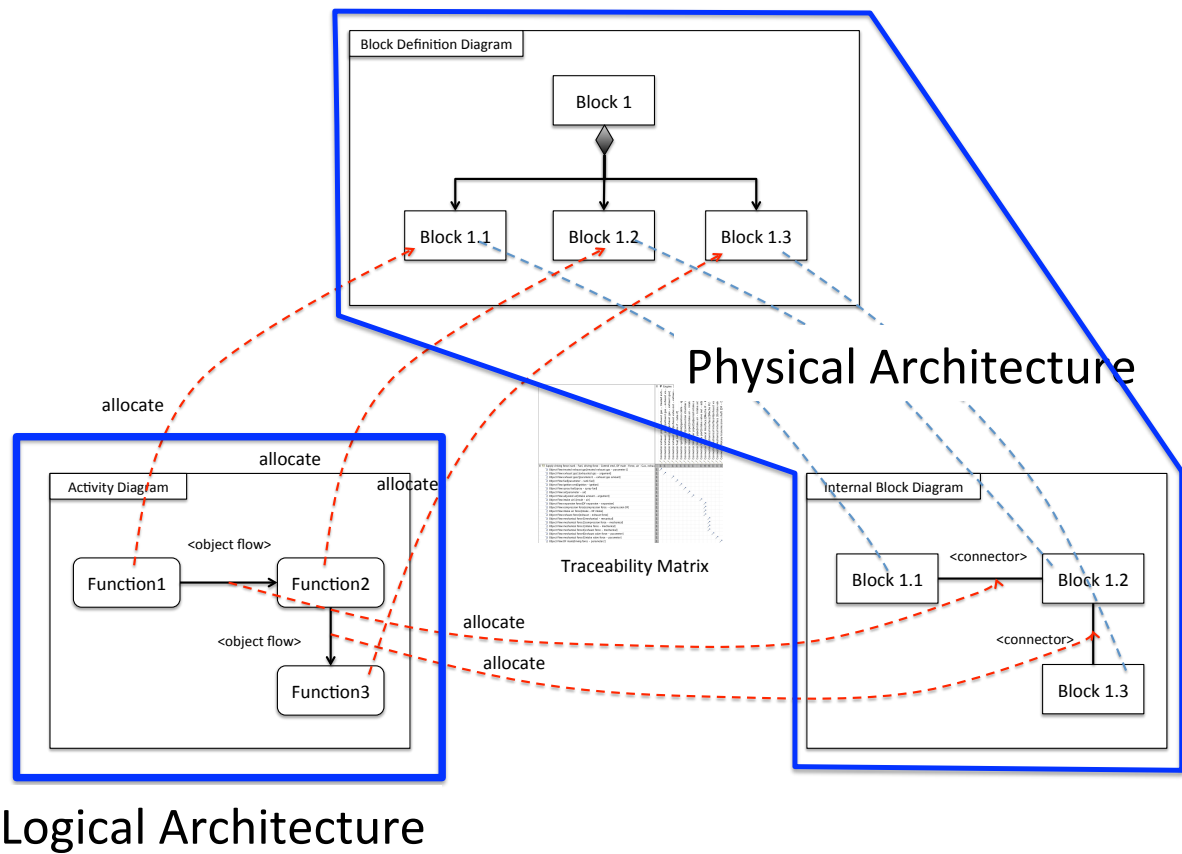


Figure3-5 Relationship between Diagrams Emphasis on Physical Architecture and Logical Architecture

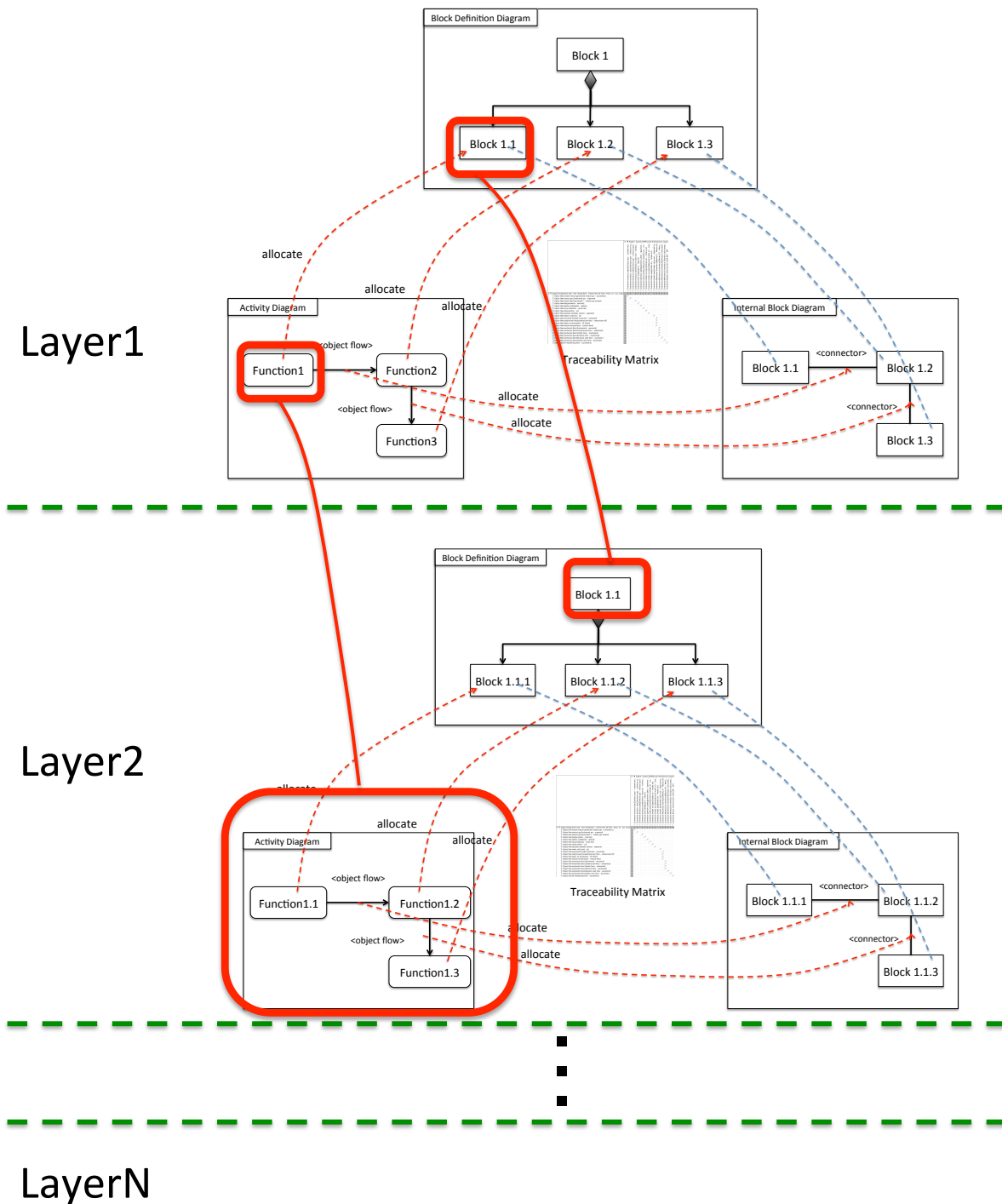


Figure3-6 Relationship between Each Layer

Figure3-7に Magic Draw で、記述したダイアグラムを俯瞰するためのナビゲーションに用いる図を示す。このマトリックスの行は、各 Layer を表しており、列は Requirement、Behavior、Structure、Allocation Matrix を表している。そして、マトリックスの中に表示しているダイアグラムは、ソフトウェア上で、ダブルクリックをすると、そのダイアグラムを表示するようにリンクが付いている。このようなナビゲーションは設計者の負担を軽くする上で、大変役立つものである。

		Requirement	Behavior	Structure	Allocation Matrix
Context Context Analysis	Vehicle/Driver System Level		Vehicle/Driver System Context Behavior	Vehicle/Driver System Context Structure Vehicle/Driver System Context	Allocation function to physical (Driving Assembly Context Layer) Allocate object flow to connector (Driving Assembly Context)
	Driving Assembly Level		Driving Assembly Context Behavior	Driving Assembly Context Structure Vehicle/Driver System	Allocation function to physical (Engine Context Layer) Allocate object flow to connector (Engine Context)
	Engine Level		Provide driving force	Engine Context Structure Driving Assembly	Allocation function to physical (Vehicle/Driver Context Layer) Allocate object flow to connector (Vehicle/Driver Context)
System of Interest	Engine Subsystem Level		Supply driving force (Layer2) Supply driving force with swimlane (Layer2)	Engine System Structure (Layer1,2) Engine System (Layer2)	allocate function to physical (Layer2) allocate object flow to connector (Layer2)
	Engine Component Level		Supply driving force (Layer3) Supply driving force with swimlane (Layer3)	Engine System Structure (Layer1,2,3) Engine System (Layer3)	allocate function to physical (Layer3) allocate object flow to connector (Layer3)

Figure3-7 Diagram Navigation in System Model

3.3 エンジンシステムのコンテキスト分析

3.3 節では、エンジンシステムのコンテキスト分析のプロセスと結果を示す。エンジンシステムは自動車の駆動・走行系の一部であり、駆動・走行系は自動車の一部という階層性を持っている。そこで、コンテキストを Vehicle Context、Driving Assembly Context、Engine Context の3階層に分けて分析した。3.3.1で Vehicle Context、3.3.2で Power-Train Context、3.3.3 で Engine Context の分析のプロセスと結果を示す。

3.3.1 自動車レベルでのコンテキスト分析

まずは Figure3-8 に Block Definition Diagram で Vehicle Context を構成する要素の階層構造を記述した。Vehicle Context は Physical Environment、Climate、そして本研究の System of Interest であるエンジンシステムが含まれている Vehicle/Driver System の3つに分類した。そして、Physical Environment の構成要素として、Road、Obstacle、Transportation system、Climate の構成要素として、Atmosphere、Rain、Snow、Sun を記述した。これらの構成要素は完全なものではなく、自動車に影響を与える大きな要因となり得るものをピックアップしている。このときに、注意すべき点としては、構成要素を網羅的にあげる必要はないが、重要な要素を忘れると十分なコンテキスト分析ができず、良いアーキテクチャ設計ができないという点である。

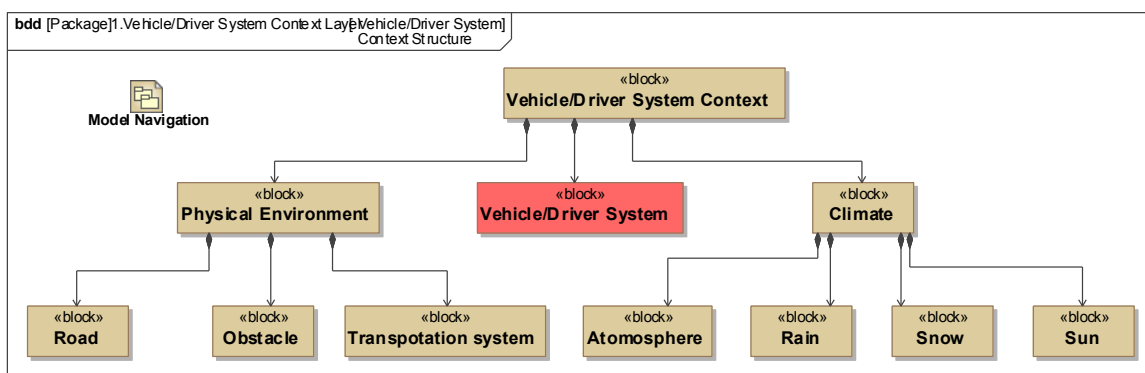


Figure3-8 Vehicle Context Composition hierarchy

次に Figure3-9 に Vehicle Context の振舞いの検討を行った結果を示す。この図では、Vehicle Context の構成要素の振舞いや機能フローを記述している。Physical Environment、Climate はともに、Vehicle/Driver System に視覚情報を提供していることがわかる。また、Physical Environment の Road は Vehicle/Driver System から Driving force を受けており、Climate の Atmosphere は Air を Vehicle/Driver system に供給し、Exhaust gas を受け取っている。

これらの結果を用いて、Vehicle Context の構成要素間の接続関係を明らかにした。その図を Figure3-10 に示す。

以上の分析により Vehicle Context の構成要素と構成要素間の関係性が明確になった。次項より、Driving Assembly のコンテキスト分析を行う。

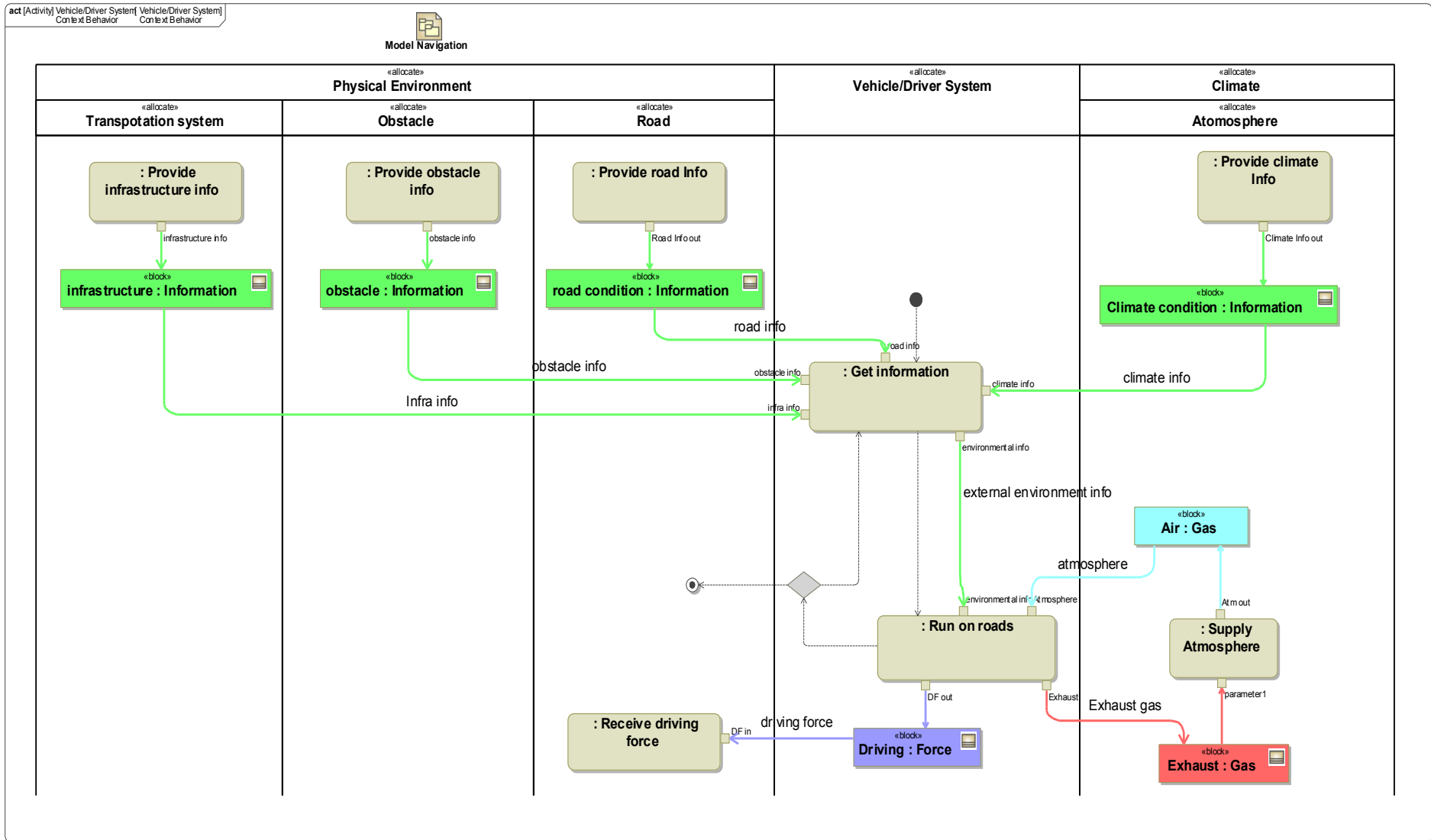


Figure3-9 Vehicle Context Behavior and object flow

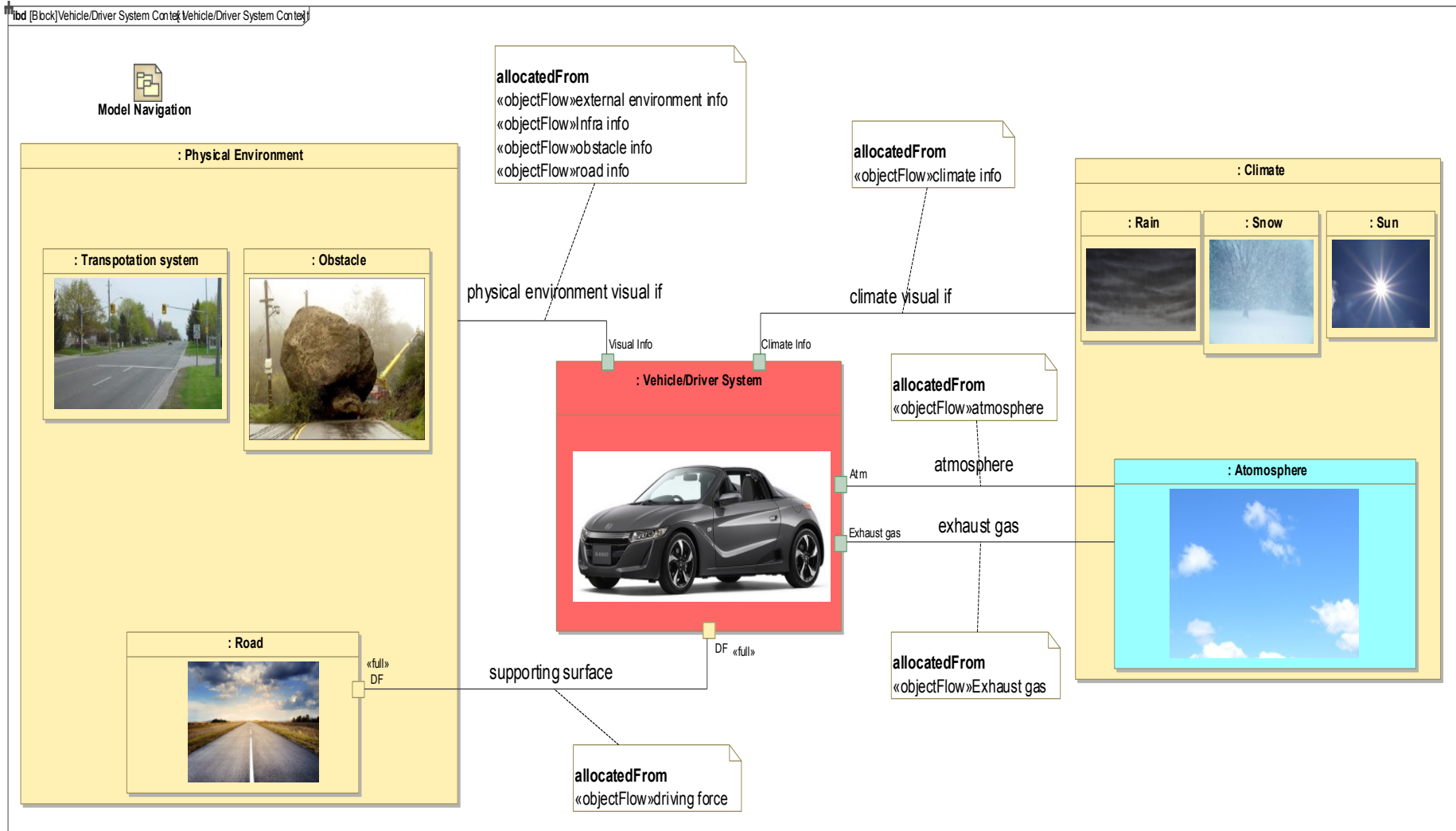


Figure3-10 Vehicle Context Composition Interconnection

3.3.2 駆動・走行系レベルでのコンテキスト分析

3.3.1 の Figure3-8 の赤い色のブロックである Vehicle/Driver System の物理階層構造を以下の Figure3-11 に示す。ここで、Driving Assembly も赤い色のブロックにしている理由は、同じく本研究対象であるエンジンシステムが含まれているからである。また、Vehicle/Driving System の構成要素は Driving Assembly のコンテキストと同義と捉える。

ここで、Vehicle/Driving System は、Body Assembly、Driver、Driving Assembly、Electrical Assembly、HMI Assembly の 5 つから構成されると定義した。それぞれの詳細な部分への記述は、今回の研究の対象外であるため行っていないが、Body Assembly は自動車の内装、外装部のことで、この図ではエンジンシステムに関係のある Fuel Tank のみを Body Assembly の構成要素として記述している。次に Electrical Assembly は主に電力で何かの機能を実行する構成要素の集合として記述している。この図では、エンジンシステムにドライバーからの命令を受け信号を伝える役割があるため、Vehicle Control System を記述した。HMI Assembly は Driver からの操作を受ける構成要素の集合である。ここではあえて記述していないが、ハンドルやペダル、室温調節操作部などである。

ここで、重要なことは各構成要素を網羅的に列挙することではなく、抜け漏れがないように適切な抽象度で必要十分な構成要素を記述することである。

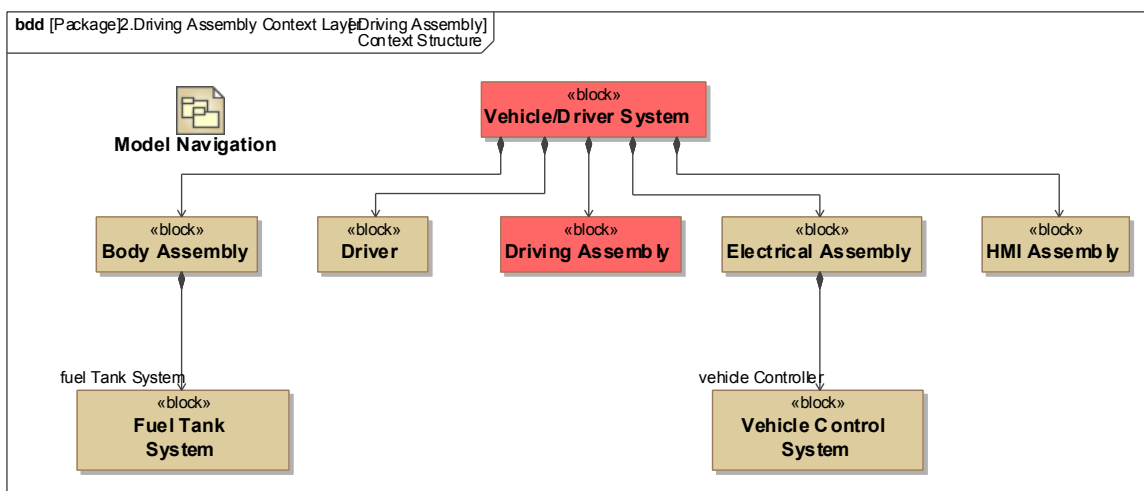


Figure3-11 Vehicle/Driver System Composition hierarchy

Figure3-12 は、駆動・走行系のコンテキストの振舞いと機能フローを示している。ここで、赤枠で示しているのは、エンジンシステムの振舞いである「駆動力を供給する」である。この図より Driver の操作が HMI Assembly に伝わり、HMI Assembly は Electrical Assembly を通して、Driving Assembly に送られることがわかる。また、大気とのガスのやりとりや地面への力の伝達、燃料の供給も Driving Assembly の「駆動力を供給する」という振舞いのみに関係していることがわかる。

Figure3-13 では、Figure3-12 の機能フローを実現している走行・駆動系のコンテキストの構成要素間の物理的接続関係を示している。

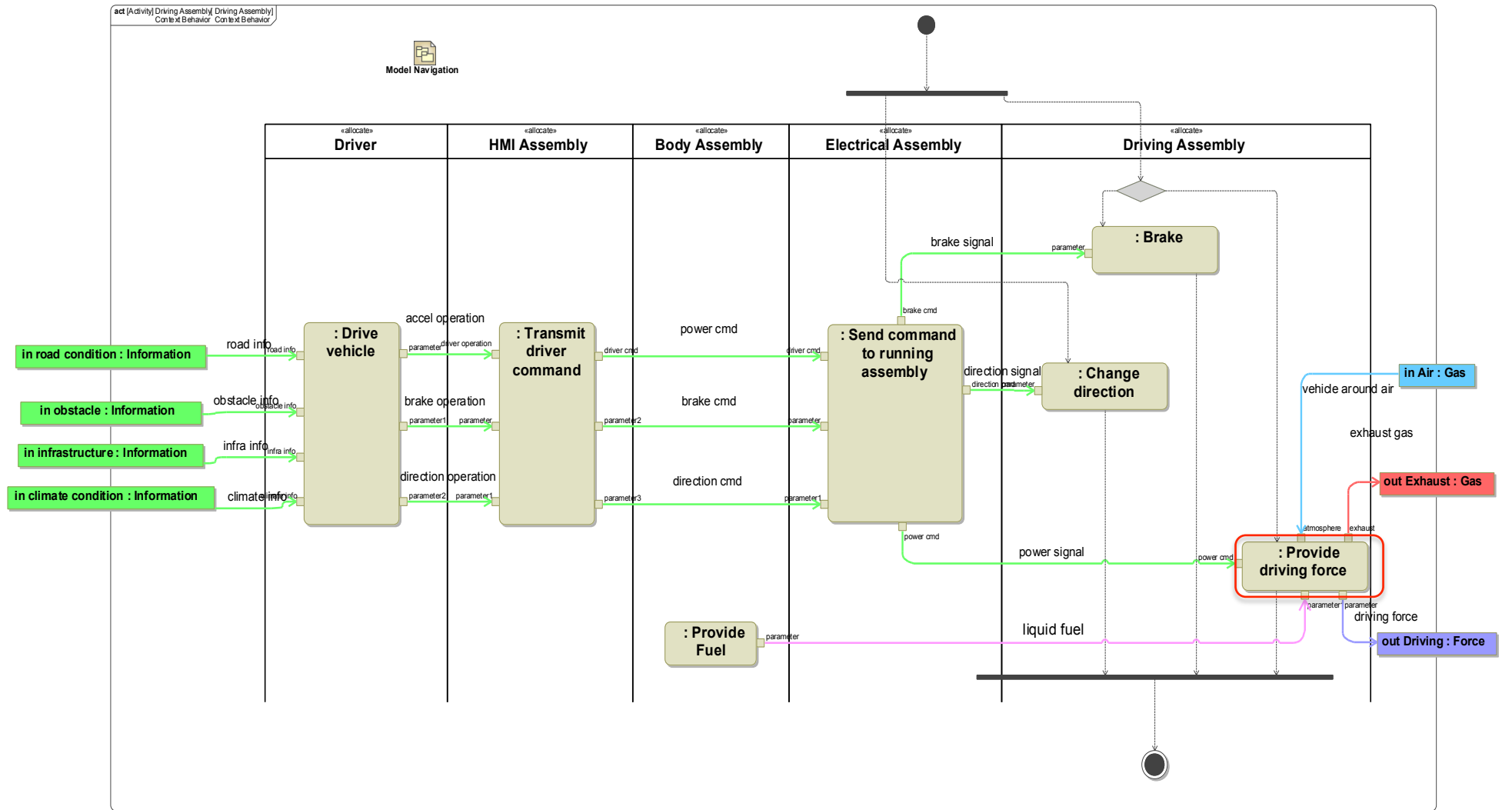


Figure3-12 Driving Assembly Context Behavior and object flow

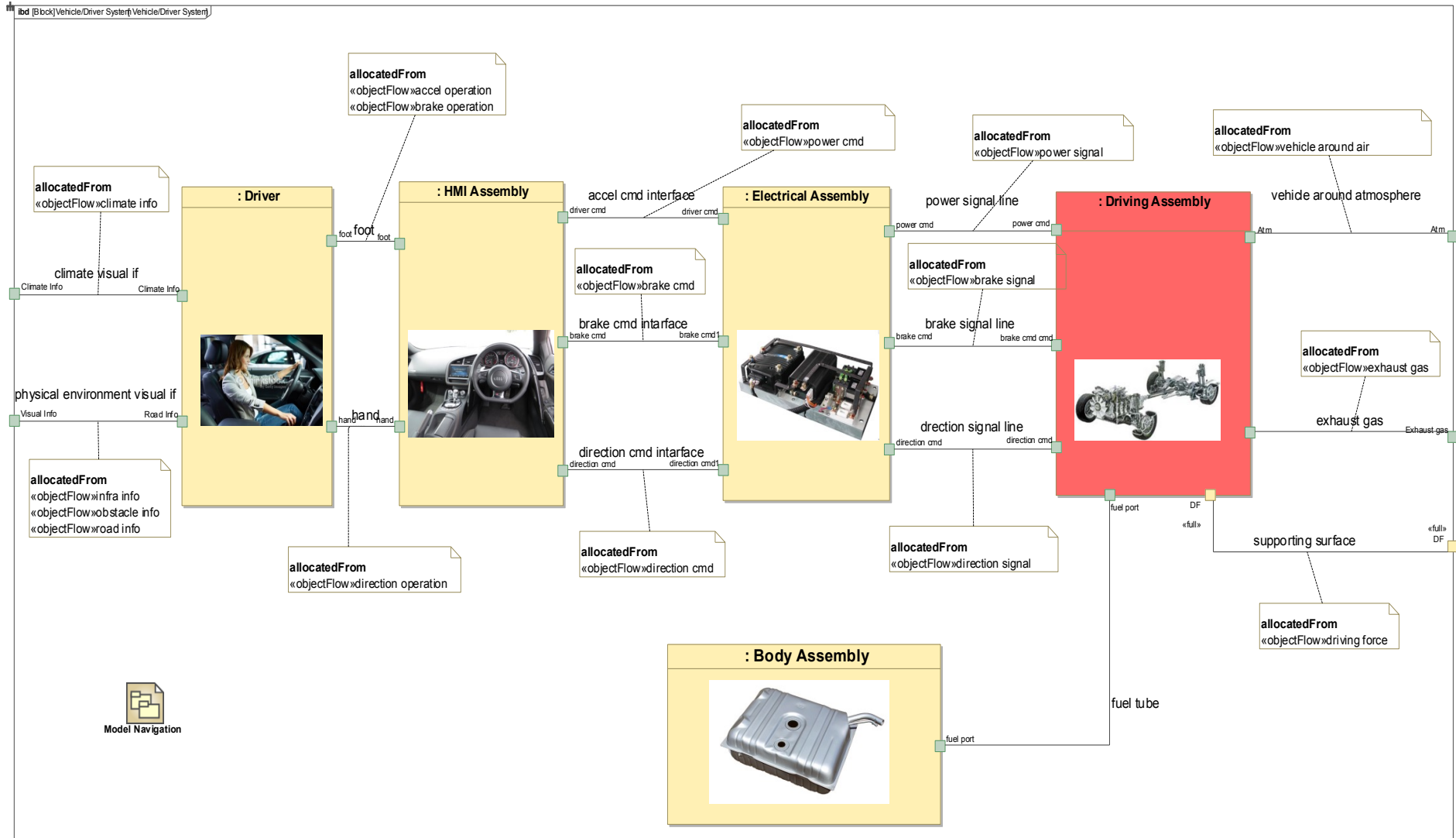


Figure3-13 Driving Assembly Context Composition Interconnection

3.3.3 エンジンレベルでのコンテキスト分析

3.3.2のFigure3-11の赤い色のブロックであるDriving Assemblyの物理階層構造を以下のFigure3-14に示す。ここで、Driving Assemblyも赤い色のブロックにしている理由は、同じく本研究対象であるエンジンシステムが含まれているからである。また、Vehicle/Driving Systemの構成要素はDriving Assemblyのコンテキストも同時に表している。そのため、SysML1.4の表記に即して、構成要素を表す黒ダイヤと構成要素ではないが、参照するために表示してある白ダイヤを使い分けている。

次にEngine Contextを構成する要素の振舞いを表したアクティビティ図をFigure3-15に示す。

ここで、Figure3-14に示したDriving Assemblyの構成要素すべてが、アクティビティ図に記述されていない理由は、Engine Contextの「駆動力を供給する」という振舞いに対し関与していないからである。

Figure3-15のアクティビティ図をもとに、Engine Contextの構成要素同士の物理的接続関係を記述した図をFigure3-16に示す。

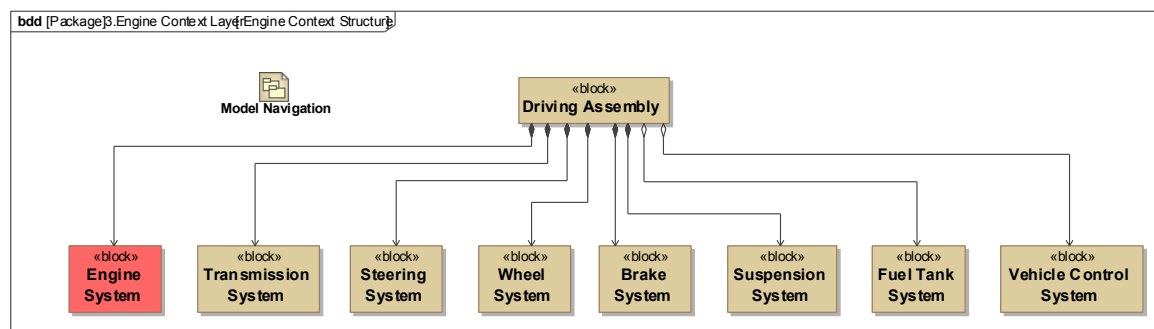


Figure3-14 Engine Context Composition Hierarchy

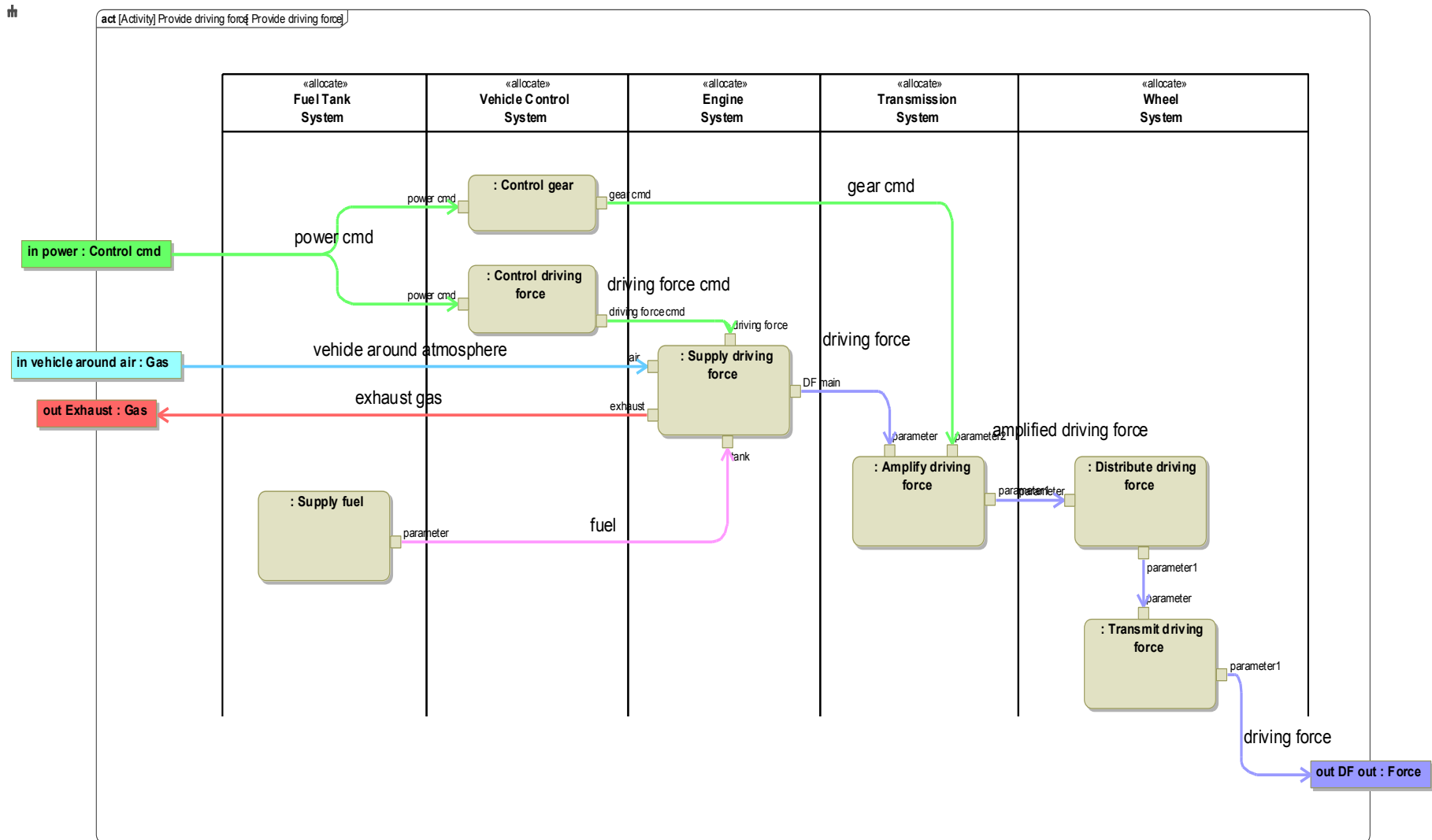


Figure3-15 Engine Context Composition Behavior

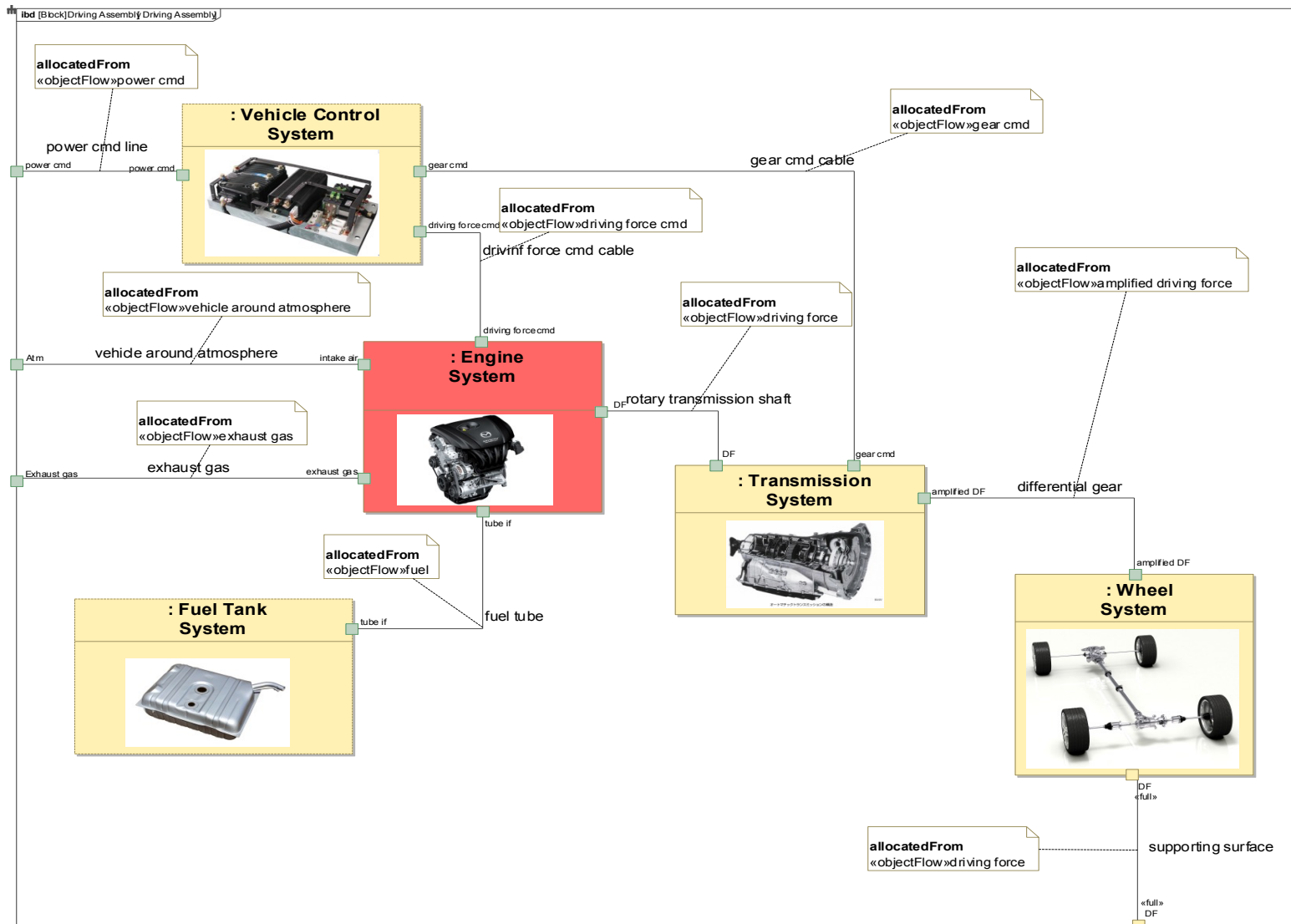


Figure3-16 Engine Context Composition Interconnection

3.4 エンジンシステムアーキテクチャ検討

3.3 のコンテキスト分析の結果を用いて以下にエンジンシステムのアーキテクチャ表すシステムモデルを用いて検討したプロセスを示す。ここで、注意したいのは、コンテキスト分析とシステムモデル構築は一方向的に進むものではなく、分析あるいはシステムモデルを構築している途中に何度も行き来し、平行して進めていくものである。エンジンシステムのアーキテクチャはエンジンシステムを分解したサブシステムレベルのアーキテクチャとサブシステムレベルを分解したコンポーネントレベルのアーキテクチャの2つを示す。2つのレベルに分けてアーキテクチャを検討する理由は、抽象度レベルを考慮せずに機能や物理を考えていくと、細部の詳細設計に入ってしまうからである。システム全体での検討を十分に行わないまま、いきなり詳細設計に入ってしまうと、システム全体をうまく捉えることができず、ある視点に偏った検討ばかりしてしまい、結果として後から欠陥に気づき、大幅な手戻り我必要になるおそれがある。さらに、サブシステムレベルやコンポーネントレベルといったレベルの違う成果物のセットを作ることは、図面や仕様書などといった詳細設計の成果物や単体設計の結果など、それらひとつひとつ、の意味や目的を上流の設計意図や要求まで明確に追跡することを可能にし、トレーサビリティを高めることができる。

Figure3-17 に示すのは、エンジンシステムの最上位機能である「駆動力を供給する機能」の下位機能の構造を表した図である。ここでは、エンジンシステムの基本的な機能である「1. 吸気をする機能」、「2. 圧縮をする機能」、「3. 燃焼をする機能」、「4. 膨張をする機能」、「5. 排気をする機能」、「6. 気体体積膨張を力に変換する機能」、「7. 駆動力を供給する機能」の7つの機能に分解した。

Figure3-18 に Figure3-17 で分解した機能間のフローを検討し、FFBD(Function Flow Block Diagram)を記述した。このとき、先ほどのコンテキスト分析で定義したエンジンシステムとの外部とのフローのIN/OUT 関係はソフトウェアが自動に出力してくれるため、ユーザーは抜け漏れを自力で確認する必要がなく、設計負荷が軽くなる。Figure3-18 の「1. 吸気をする機能」では、空気と吸気のための力が入力され、吸気が出力されている。「2. 圧縮をする機能」では、吸気と圧縮のための力が入力され、圧縮された吸気が出力されている。「3. 燃焼をする機能」では、圧縮された吸気と燃料が入力され、燃焼ガスが出力されている。「4. 膨張をする機能」では、燃焼ガスが入力され、燃焼ガスと膨張による力が出力されている。「5. 排気をする機能」では、燃焼ガスと排気のための力が入力され、排気ガスが出力されている。「6. 気体体積膨張を力に変換する機能」では、膨張による力が入力され、動力が出力されている。「7. 駆動力を供給する機能」では、動力が入力され、吸気、圧縮、排気のための力と駆動力が出力されている。FFBD で機能の流れを記述することで、機能分解の妥当性などの論理的正しさを確かめることができる。

しかし、この図では、緑の Driver からのコマンドがどの機能にも入力されていない。これは、本モデルが熱効率に範囲を絞ったものであるということと、システムモデルの抽象度

が高く、まだどの機能に **Driver** からのコマンドを入力するかを定義していないためである。電気信号も同様である。機能と物理を詳細化していき、それぞれの機能をどのハードウェア、ソフトウェアで実現するかといった具体的な検討に入ったあとで、どの機能に **Driver** からのコマンドが入力するかの検討を行う。

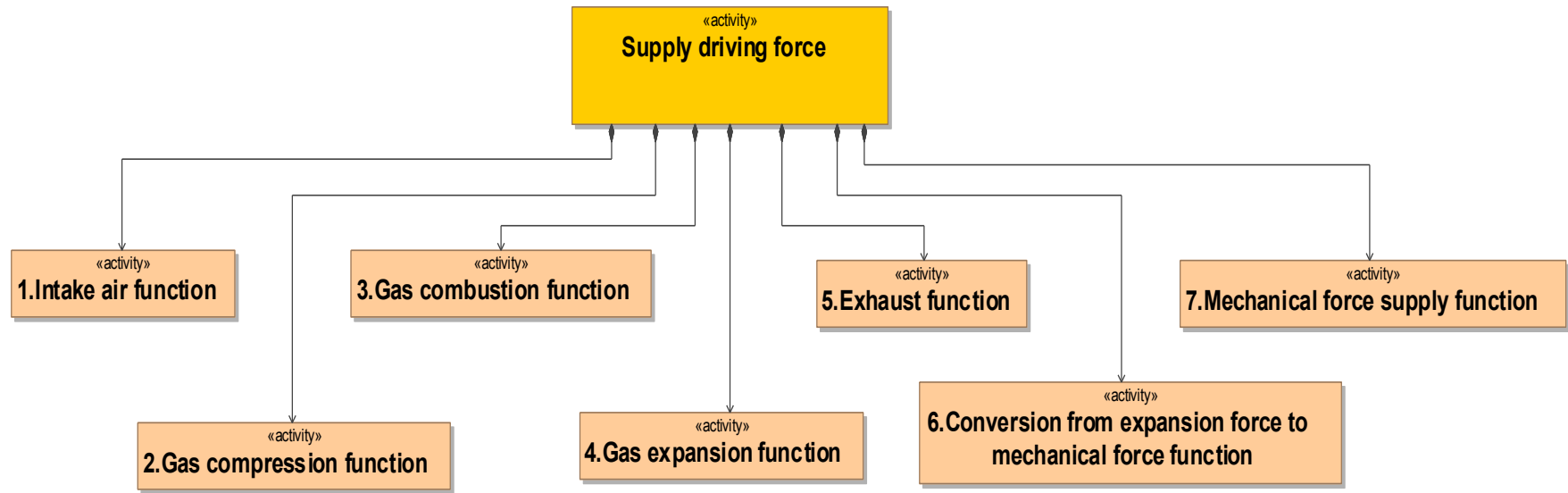


Figure3-17 Subsystem Function Decomposition of Subsystem Level

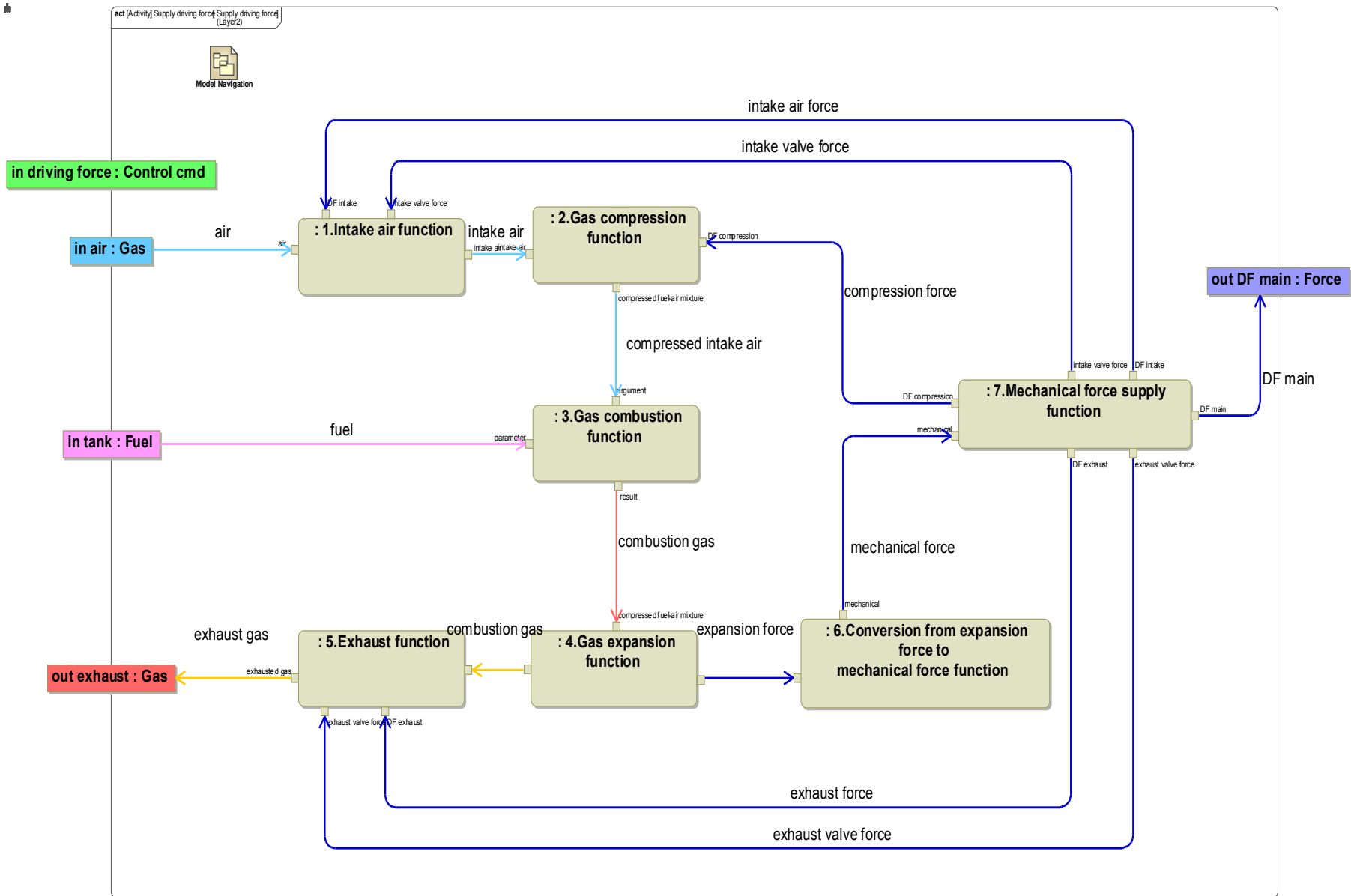


Figure3-18 Function Flow Block Diagram of Engine Subsystem Level Function

Figure3-19 にエンジンシステムをサブシステムレベルに分解した構造を示す。ここでは、「エンジンシステム」を「燃焼サブシステム」と「回転運動変換サブシステム」に分解した。次に、Figure3-18 で分析したサブシステムレベルの機能を「燃焼サブシステム」と「回転運動変換サブシステム」にアロケーションした結果を Figure3-20 に示す。ここで、機能を区切っている線は、スイムレーンと呼ばれ、どの機能がどの物理構成要素にアロケーションされているかを示すものである。ここで、機能間のつながりは、明確になったが、物理的にどのように接続しているかはまだ明確にしていなかったため、Figure3-21 に構成要素間の物理的接続を示した、内部ブロック図を示す。ここで、FFBD で表した機能間のフローは、内部ブロック図の要素間をつなぐコネクタにアロケーションし、正しく機能モデルと物理モデルの整合が取れていることを確認する。図中のコネクタに吹き出し形式でどの機能フローが割り当てているかを明示している。また、数が多くなると図を見比べてトレースを確保することが困難になるため、マトリックス形式でもアロケーション関係を確認することができる。この図を Table3-2 に示す。このマトリックスは縦軸が機能、横軸が物理となっており、縦軸の要素から横軸へ、つまり機能から物理へ矢印が向いており、アロケーション関係を示している。この関係性は、Figure3-20 のスイムレーンに機能のブロックを入れた時に、ソフトウェアが自動で関係性を定義するが、このマトリックスからもアロケーションの関係性を定義することができる。

以上が Subsystem Level のシステムモデルである。次節に Component Level のシステムモデルを示す。

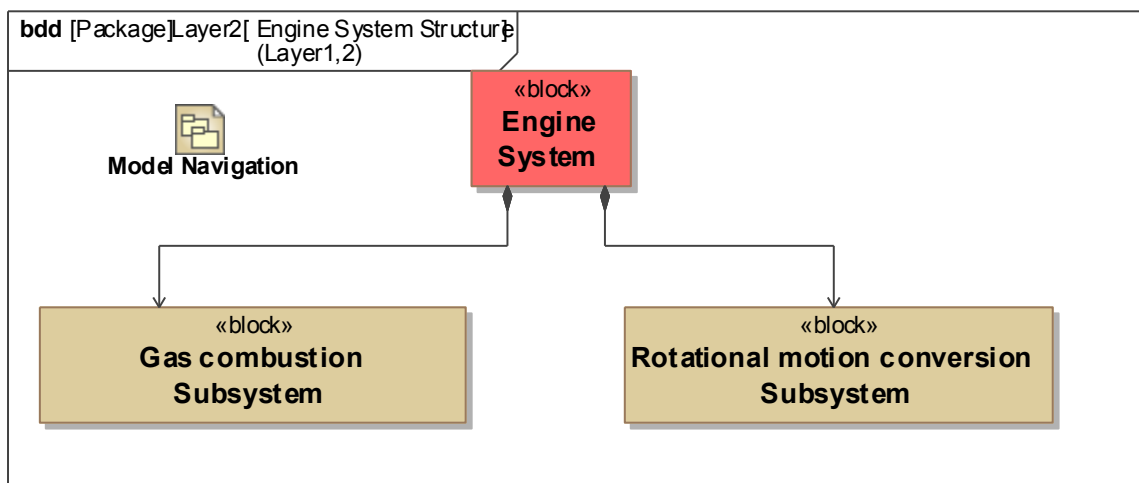


Figure3-19 Engine System Structure (Subsystem Level)

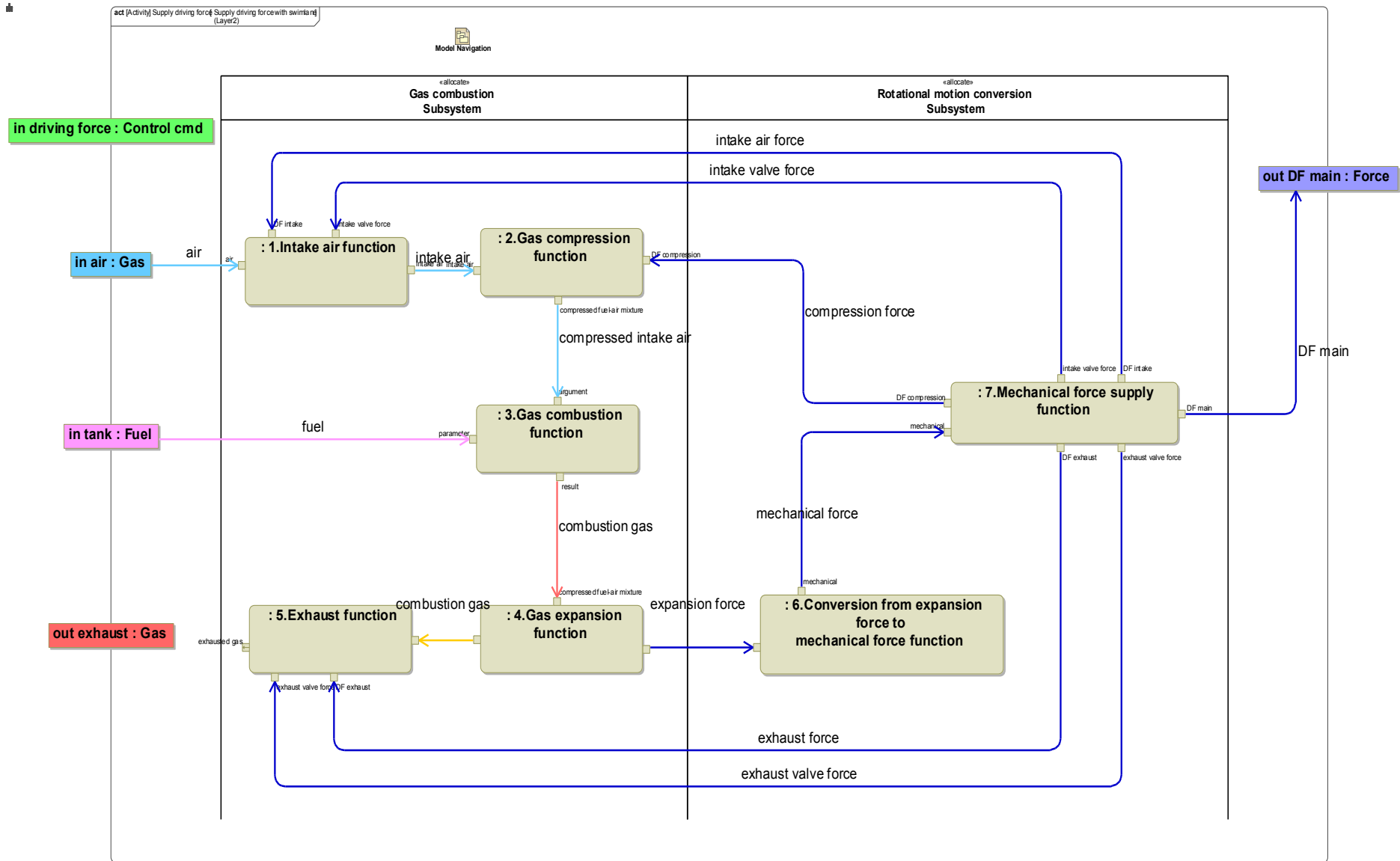


Figure3-20 Engine System Function Flow Block Diagram with swimlane (Subsystem Level)

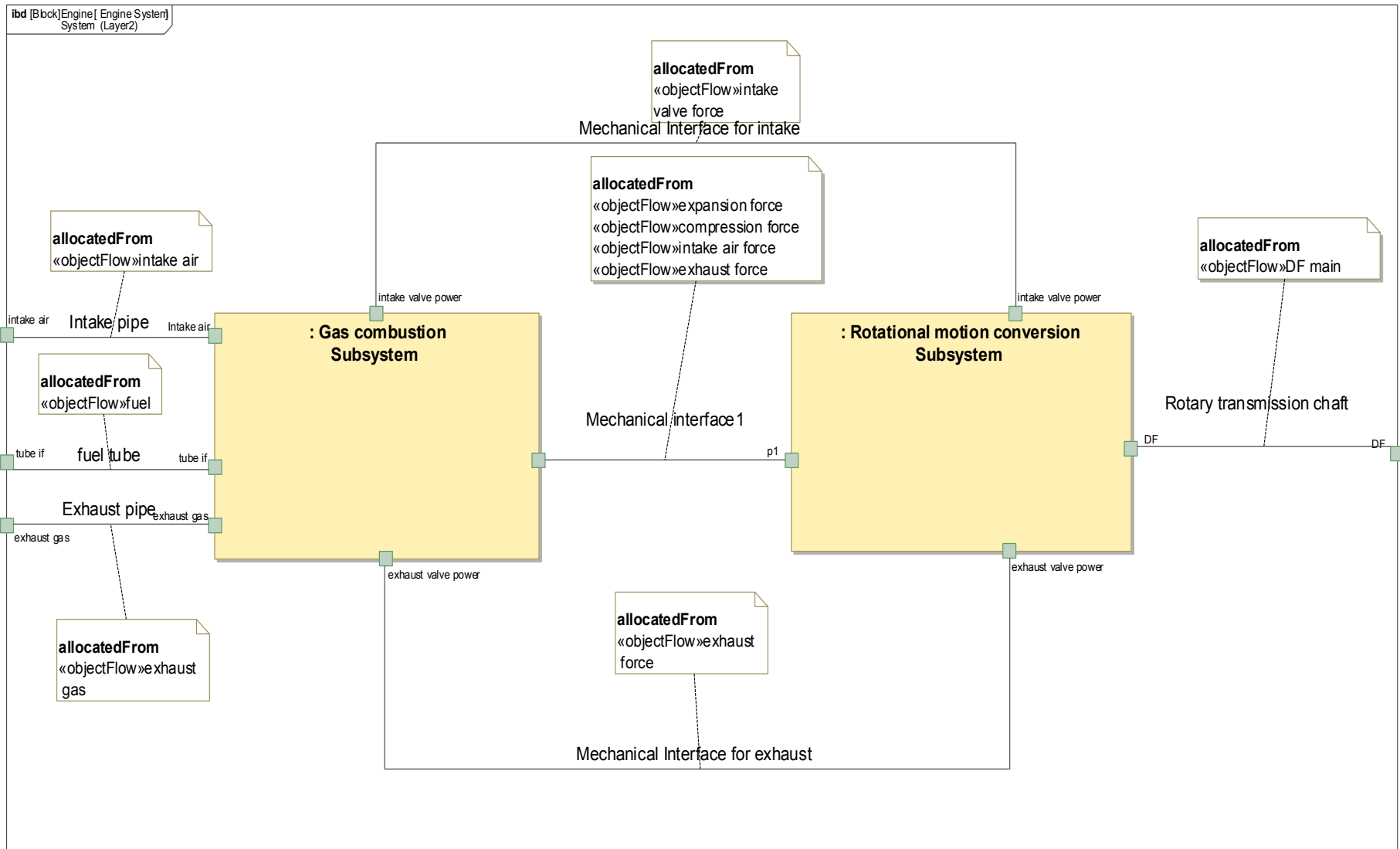


Figure3-21 Engine System Composition Interconnection (Subsystem Level)

**Table3-2 Allocation Matrix Between Function and Physical
(Subsystem Level)**

	Engine	System	[Layer
	Connector:Exhaust pipe[exhaust gas - exhaust gas]		
	Connector:fuel tube[tube if - tube if]		
	Connector:fuel tube[tube if - tube if]		
	Connector:Intake pipe[intake air - Intake air]		
	Connector:Mecanical Interface1[Mecha IF - Mecha IF]		
	Connector:Mecanical Interface for exhaust[exhaust v...		
	Connector:Mecanical Interface for intake[intake valve...		
	Connector:Rotary transmission shaft [DF - DF]		
Supply driving force(tank : Fuel, driving force : Control cmd, DF main : For	1	1	1
Object Flow:exhaust gas[exhausted gas - parameter1]	1		
Object Flow:fuel[parameter - parameter]	1		
Object Flow:fuel[parameter - tank fuel]	1		
Object Flow:intake air[intake air - intake air]	1		
Object Flow:expansion force[DF expansion - expansion]	1		
Object Flow:exhaust force[exhaust - exhaust force]	1		
Object Flow:compression force[compression force - compression DF]	1		
Object Flow:intake air force[intake - DF intake]	1		
Object Flow:exhaust force[DF exhaust - DF exhaust]	1		
Object Flow:intake valve force[intake valve force - intake valve force]	1		
Object Flow:DF main[driving force - parameter2]	1		

以上でサブシステムレベルでのエンジンシステムの機能、物理構成要素間の関係性の明確化を行ったため、下記にコンポーネントレベルのシステムモデル記述を記す。もちろんこのプロセスは、各レイヤー間を行ったり来たりしながらシステムモデル記述を行っており、一度記述が終われば、そのレイヤーに戻ることがないウォーターホール型プロセスではないことに注意したい。

Figure3-22 にサブシステムレベルの機能をさらに一段階分解した構造図を示す。サブシステムレベルでは、エンジンシステムの基本的な機能である「1.吸気をする機能」、「2.圧縮をする機能」、「3.燃焼をする機能」、「4.膨張をする機能」、「5.排気をする機能」、「6.気体体積膨張を力に変換する機能」、「7.駆動力を供給する機能」の7つの機能に分解した。「1.吸気をする機能」は、「1.1 塵埃を除去する機能」、「1.2 吸気量を調整する機能」、「1.3 吸気を充填する機能」の3つの機能に分解される。「2.圧縮をする機能」は、「2.1 ガスを圧縮する機能」、「2.2 圧縮ガスを密閉する機能」の2つに分解される。「3.燃焼をする機能」は、「3.1 燃料を供給する機能」、「3.2 混合気を作る機能」、「3.3 混合ガスを点火する機能」、「3.4 混合ガスを燃焼する機能」の4つに分解される。「4.膨張をする機能」は「4.1 燃焼室体積を拡大する機能」、「4.2 燃焼ガスを密閉する機能」の2つに分解される。「5.排気をする機能」は、「5.1 燃焼ガスを排出する機能」、「5.2 排気ガス量を調整する機能」、「5.3 排気ガスを処理する機能」の3つに分解される。「6.気体体積膨張を力に変換する機能」は「膨張力を動力に変換する機能」に分解された。「7.駆動力を供給する機能」は「7.1 駆動力を供給する機能」、「7.2 吸気のための力を供給する機能」、「7.3 圧縮のための力を供給する機能」、「7.4 排気のための力を供給する機能」の4つの機能に分解される。

以上のように分解された機能の論理的正しさを確認するために機能間の流れを表す Function Flow Block Diagram を記述し検討した。この結果を Figure3-23 に示す。

Figure3-24 にコンポーネントレベルの物理構成要素の構造図を示す。この図より、「Gas combustion Subsystem」は「Engine body Component」、「Fuel feed Component」、「Ignition Component」、「Intake treatment Component」、「Exhaust treatment Component」、「Valve mechanism Component」の6つのコンポーネントに分解される。また、「Rotational motion conversion Subsystem」は「Reciprocation mechanism Component」と「Rotation transmission Component」の2つに分解される。

これらの分解したコンポーネントを実現する機能に割り当てた図を Figure3-25 に示す。ここで、それぞれの機能の物理構成要素へのアロケーション関係が明確になったため、次に物理構成要素間のインターフェースを示す内部ブロック図を Figure3-26 に示す。また、機能フローと内部ブロック図のアロケーション関係を示した表を Table3-3 に示す。

Table3-4 に、機能から物理へのアロケーション関係をまとめた表を示す。ここで、縦軸に機能、横軸にシステムの物理構成要素を表し、アロケーション関係が定義された箇所矢印で記してある。この形式は、物理構成要素の仕様一覧をみることができ、技術の進歩など

により物理構成要素が他のもので代替する場合、機能はそのままで物理構成要素だけを変えて使うことができるので、システムの進化にも、対応できるものである。

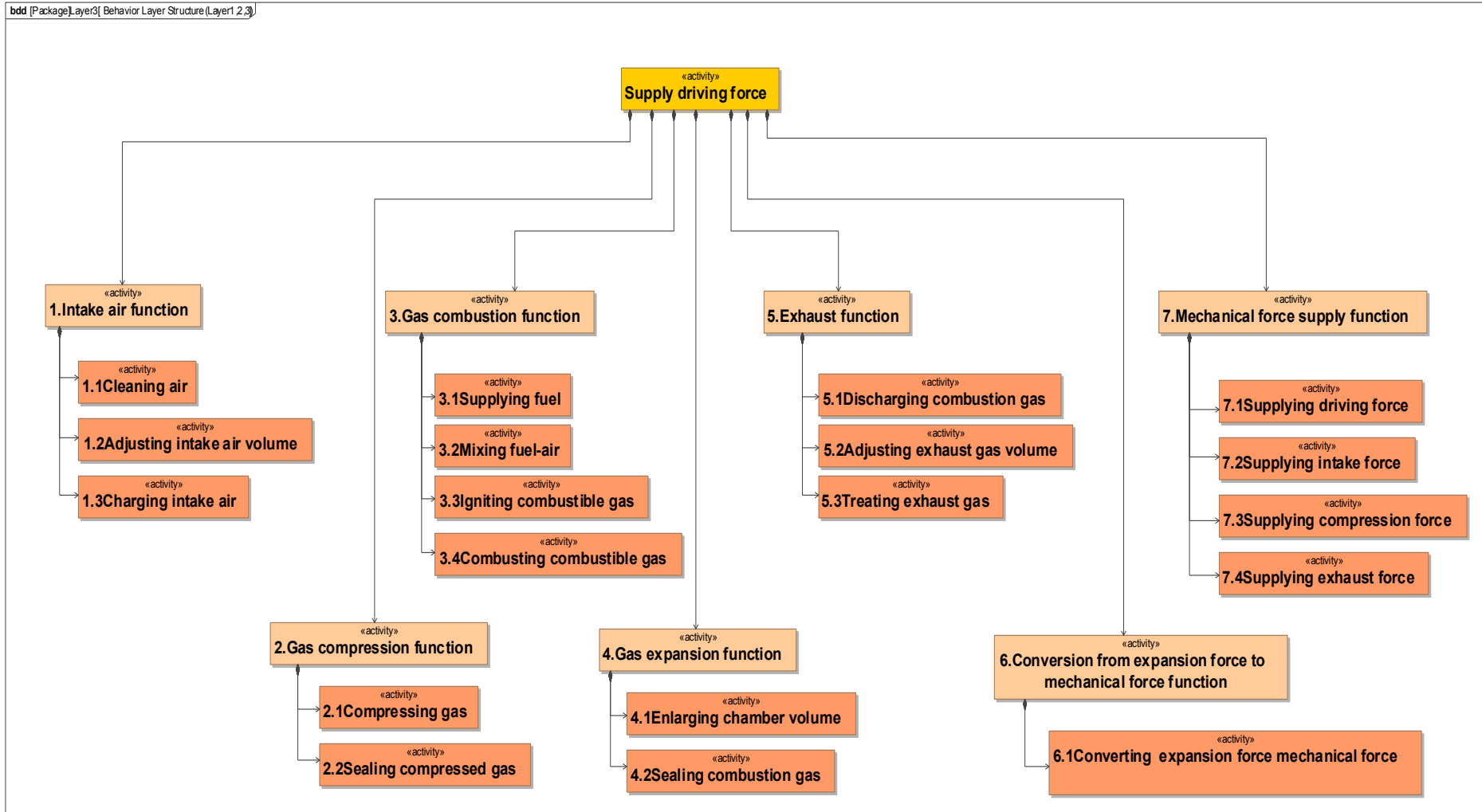


Figure3-22 Engine System Function Structure (Component Level)

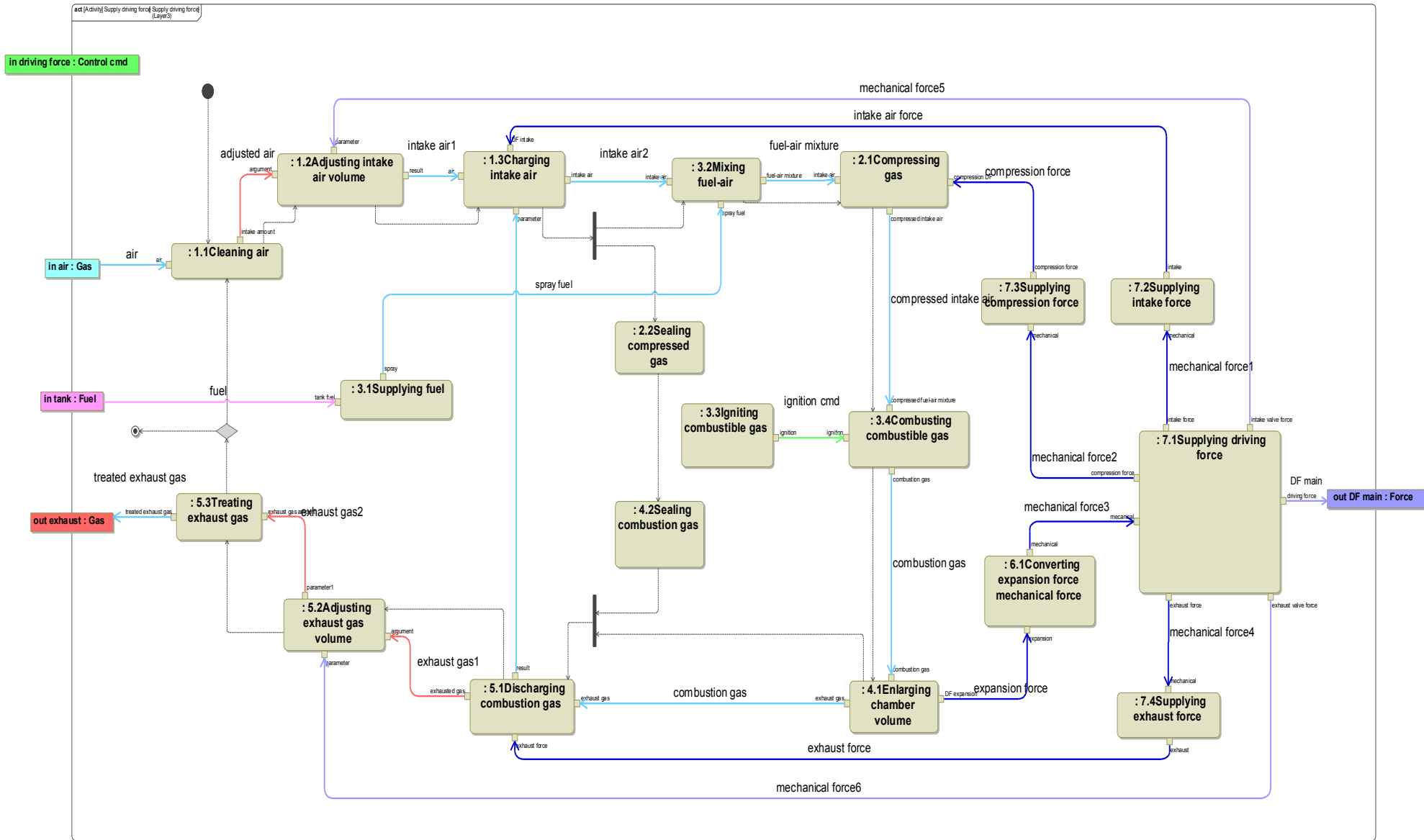


Figure3-23 Function Flow Block Diagram of Engine Component Level Function

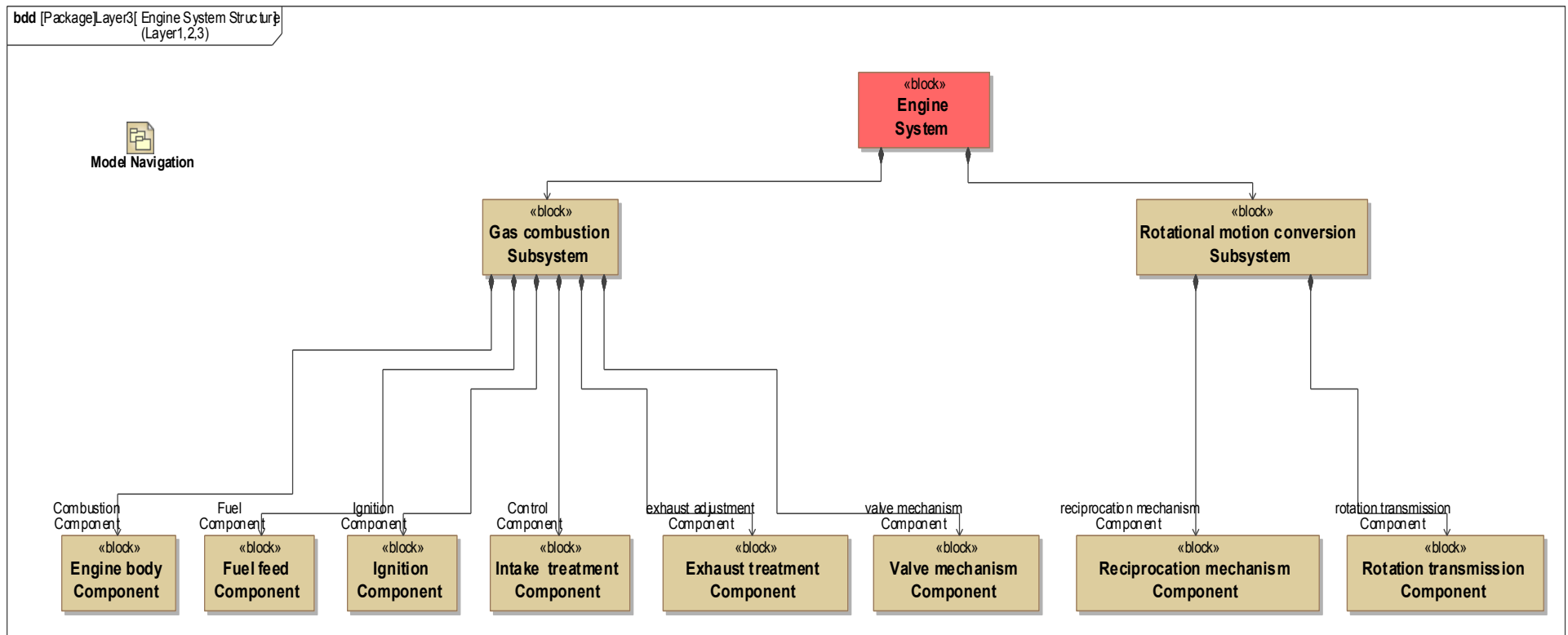


Figure3-24 Engine System Structure (Component Level)

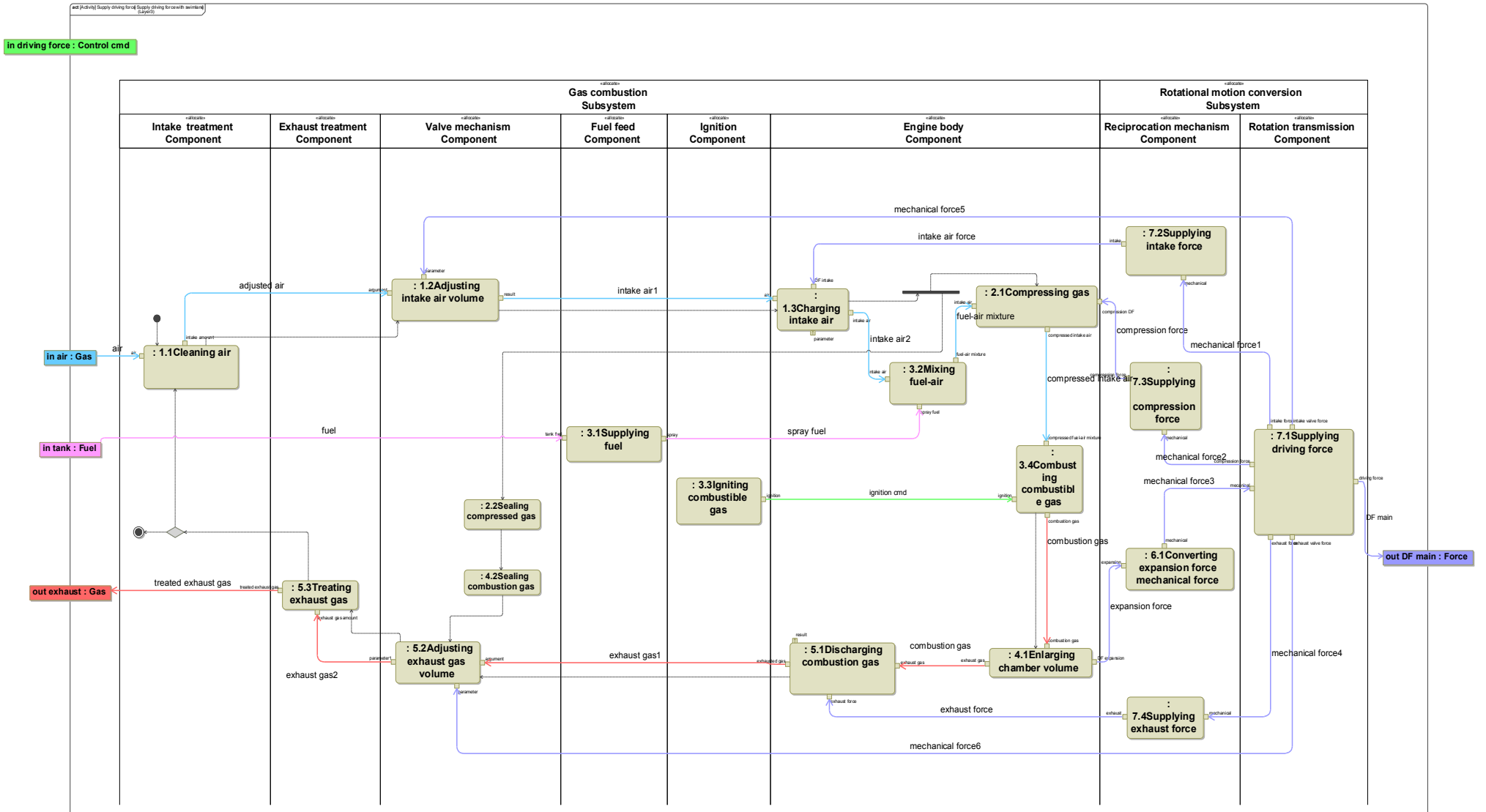


Figure3-25 Function Flow Block Diagram of Engine Component Level Function

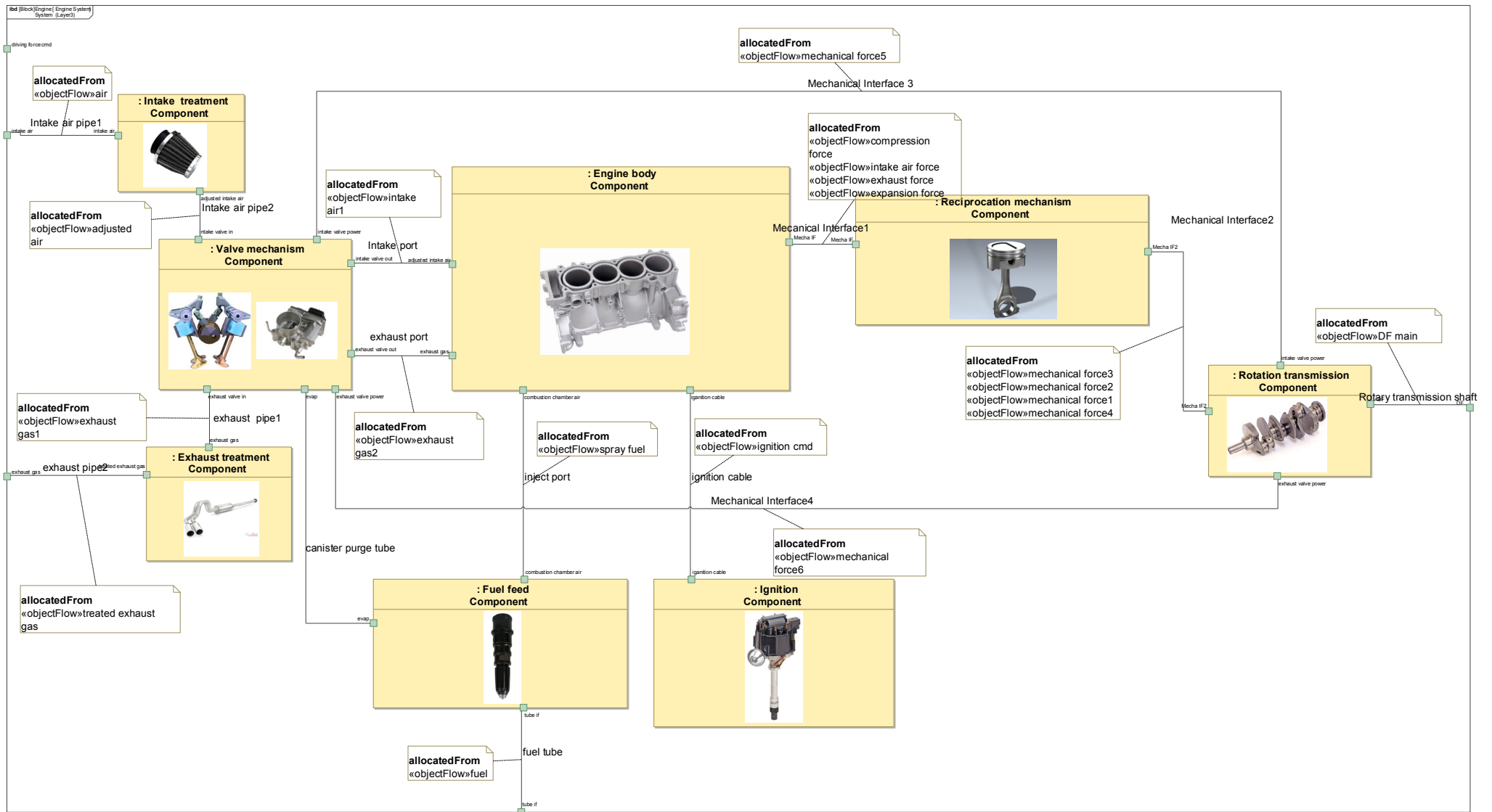


Figure3-26 Engine System Composition Interconnection (Component Level)

Table3-3 AllocationMatrix Between Function and Physical (Component Level)

	Connector:exhaust pipe2[exhaust gas - treated exh...	Connector:exhaust pipe1[exhaust gas - exhaust va...	Connector:Exhaust pipe[exhaust gas - exhaust gas]	Connector:exhaust port[exhaust valve out - exhaust...	Connector:fuel tube[tube if - tube if]	Connector:ignition cable[ignition cable - ignition ...	Connector:inject port[combustion chamber air - co...	Connector:Intake air pipe1[intake air - intake air]	Connector:Intake air pipe2[adjusted intake air - inta...	Connector:Intake pipe[intake air - Intake air]	Connector:Intake port[intake valve out - adjusted in...	Connector:Mecanical Interface1[Mecha IF - Mecha IF]	Connector:Mecanical Interface2[Mecha IF2 - Mech...	Connector:Mecanical Interface4[exhaust valve pow...	Connector:Mecanical Interface 3[intake valve powe...	Connector:Rotary transmission shaft [DF - DF]
Supply driving force(tank : Fuel, driving force : Control cmd, DF main : Force, air : Gas, exhau	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	1	1	1
Object Flow:treated exhaust gas[treated exhaust gas - parameter1]	1															
Object Flow:exhaust gas1[exhausted gas - argument]	1															
Object Flow:exhaust gas2[parameter1 - exhaust gas amount]	1															
Object Flow:fuel[parameter - tank fuel]	1															
Object Flow:ignition cmd[ignition - ignition]	1															
Object Flow:spray fuel[spray - spray fuel]	1															
Object Flow:air[parameter - air]	1															
Object Flow:adjusted air[intake amount - argument]	1															
Object Flow:intake air1[result - air]	1															
Object Flow:expansion force[DF expansion - expansion]	1															
Object Flow:compression force[compression force - compression DF]	1															
Object Flow:intake air force[intake - DF intake]	1															
Object Flow:exhaust force[exhaust - exhaust force]	1															
Object Flow:mecanical force3[mecanical - mecnical]	1															
Object Flow:mecanical force2[compression force - mecnical]	1															
Object Flow:mecanical force1[intake force - mecnical]	1															
Object Flow:mecanical force4[exhaust force - mecnical]	1															
Object Flow:mecanical force6[exhaust valve force - parameter]	1															
Object Flow:mecanical force5[intake valve force - parameter]	1															
Object Flow:DF main[driving force - parameter2]	1															

Table3-4 Allocation Matrix Between Function and Physical

	Layer2		Layer3															
	Gas combustion Subsystem	Rotational motion conversion Subsystem	Engine body Component	Exhaust treatment Component	Fuel feed Component	Ignition Component	Intake treatment Component	Reciprocation mechanism Component	Rotation transmission Component	Valve mechanism Component								
Layer2	5	2																
1.Intake air function(air : Gas, intake air : Gas, D	1																	
2.Gas compression function(intake air : Gas, con	1																	
3.Gas combustion function(argument, result : Ga	1																	
4.Gas expansion function(compressed fuel-air n	1																	
5.Exhaust function(exhaust gas : Gas, exhauste	1																	
6.Conversion from expansion force to mechanical	1																	
7.Mechanical force supply function(DF compress	1																	
Layer3	15	5	6	1	3	2	1	4	1	4								
1.1Cleaning air(intake amount : Gas, air)	1		1															
1.2Adjusting intake air volume(parameter, argu	1		1															
1.3Charging intake air(air : Gas, DF intake : Forc	1		1															
2.1Compressing gas(intake air : Gas, presse	1		1															
2.2Sealing compressed gas			1															
3.1Supplying fuel(tank fuel : Fuel, fuel amount : S	1		1															
3.2Mixing fuel-air(intake air : Gas, spray fuel, fu	1		1															
3.3Igniting combustible gas(ignition timing : Sign	1		1															
3.4Combusting combustible gas(compressed fue	1		1															
4.1Enlarging chamber volume(combustion gas :	1		1															
5.1Discharging combustion gas(exhaust gas : Ga	1		1															
5.2Adjusting exhaust gas volume(parameter, ar	1		1															
5.3Treating exhaust gas(exhaust gas amount, tr	1		1															
6.1Converting expansion force mechanical force	1		1															
7.1Supplying driving force(mechanical : Force, dri	1		1															
7.2Supplying intake force(mechanical, intake : Fo	1		1															
7.3Supplying compression force(mechanical : Fo	1		1															
7.4Supplying exhaust force(mechanical, exhaust	1		1															
Adjust fuel amount(fuel amount : Signal)	1		2															
Adjust fuel injection timing(fuel injection timing :	1		1															
Adjust ignition timing(parameter : Signal)	1		1															

3.5 エンジンシステムモデル記述のまとめ

以上のシステムモデルでアーキテクチャを記述した結果を用いて、サブシステムレベルの機能・物理の構成要素と構成要素間の関係性を表現したアーキテクチャ図を **Figure3-27** に示す。この図では、灰色のコンポーネントの中に、色のついた機能・機能フローを表示し、視覚的に情報を把握しやすくしている。ここで、SysML1.4 と同じように実線の矢印は、機能フローを表し、点線の矢印は論理的な順序を示すコントロールフローの意味で使用している。また、コンポーネントレベルの機能・物理の構成要素と構成要素間の関係性を表現したアーキテクチャ図を **Figure3-28** に示す。

これらのアーキテクチャを表す図は、システムの全体像を表す図として、開発を行うエンジニアはもちろんそれ以外の非エンジニアらとのコミュニケーションツールとしても十分有効な成果物といえる。例えば、研究を行っている詳細な技術要素や開発の進展による詳細な内容の説明を行うときにも、初めにシステムの全体像を表す高い抽象度のアーキテクチャのモデルがあると、話し手の説明もスムーズに進み、聞き手の理解の容易化にも繋がる[20]。

次章からは、システムモデルで表したアーキテクチャ結果を用いて、熱効率の低下の要因分析を行う。さらに、それらと熱効率向上技術の関係性を明らかにする。

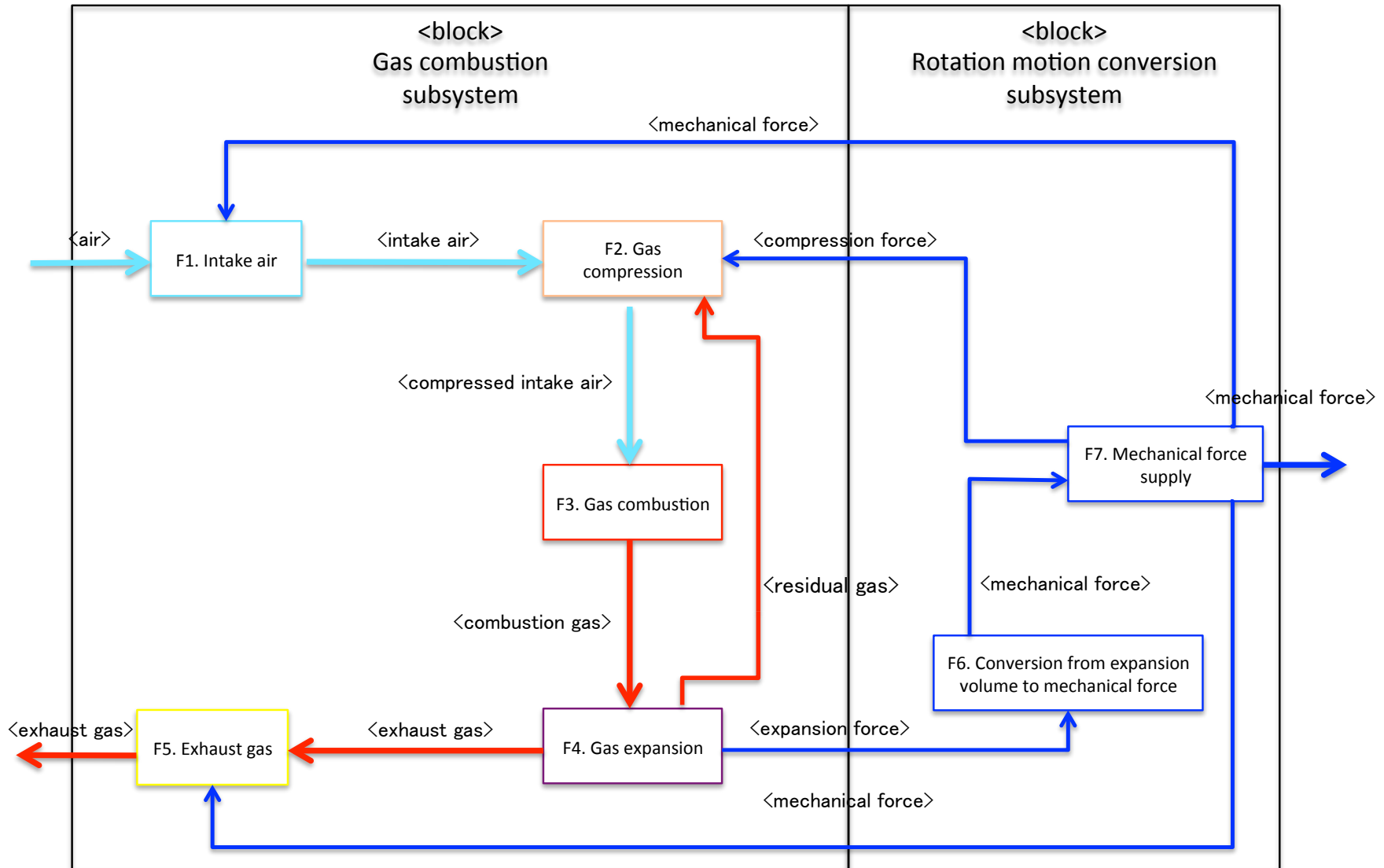


Figure3-27 Engine System Architecture Diagram (Subsystem Level)

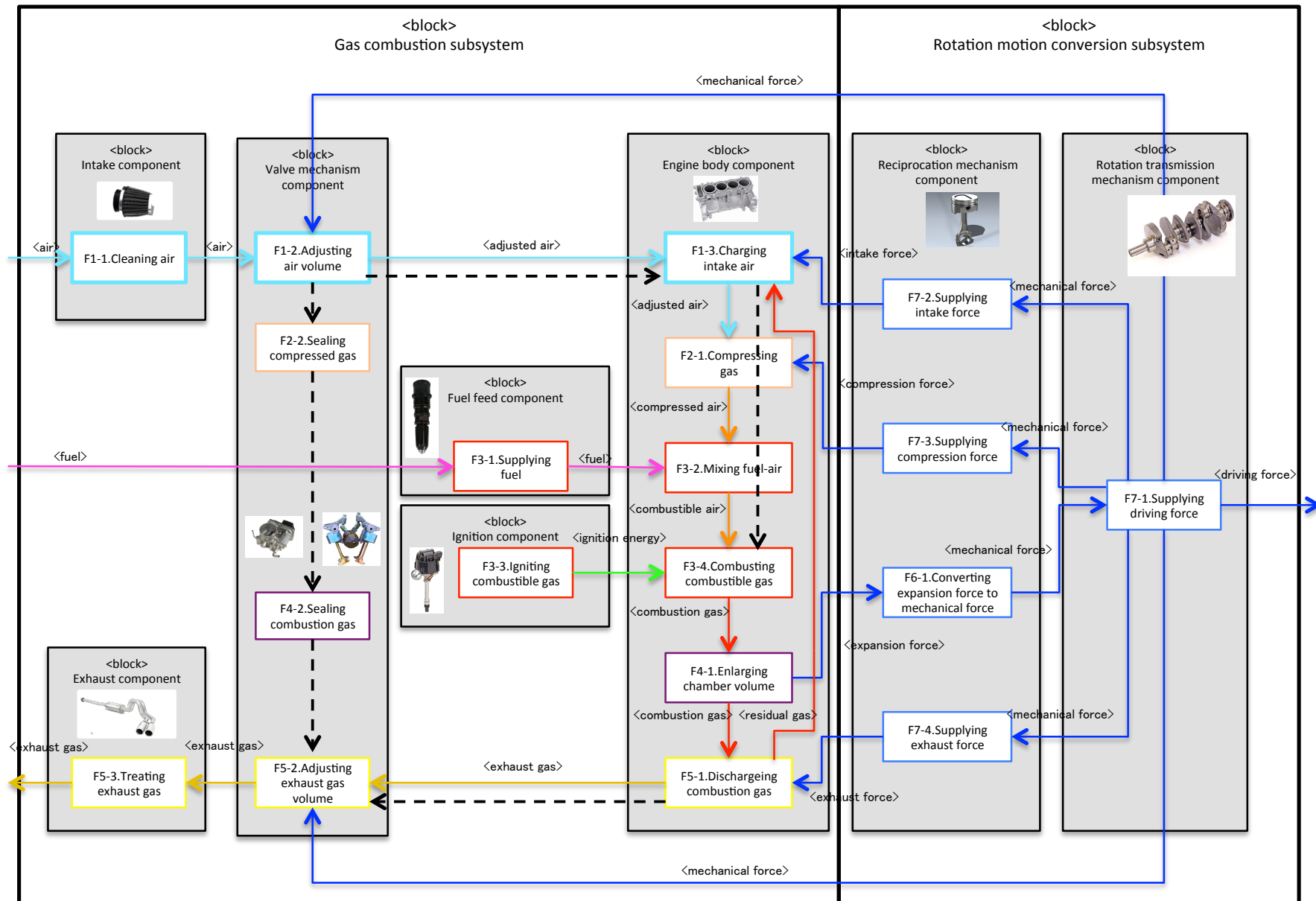


Figure3-28 Engine System Architecture Diagram (Component Level)

4. システムモデルを用いたエンジンシステムの熱効率向上へ 向けた考察

本章では、第3章で記述したシステムモデルを用いて、熱効率低下の要因を機能・物理の視点で切り分けて分析していく。そして、その分析結果と熱効率向上技術の関係性を明らかにし、システムモデルを用いてエンジン全体への影響を把握しながら、熱効率低下の要因に対する解決策の検討を行う方法論を提案している。

4.1 熱効率低下の要因分析

本節では、熱効率の観点からのシステムモデルを用いて熱効率低下の要因を分析していく。

4.1.1 エンジンシステムの熱効率・エネルギー損失の分類分け

Figure4-1 にエンジンシステムの熱効率と熱効率低下の原因となるエネルギー損失の分類分けを示す[21]。そして Figure4-2 にガソリンエンジンのサイクルを表すオットーサイクルの P-V 線図を示す。Figure4-2 の左側の図では、Figure4-1 のエネルギー損失をオットーサイクル上で表現した。

エンジンの熱効率を向上させるには、理論熱効率を向上させるか、エネルギー損失を減らすかの 2 通りである。理論熱効率の向上には、圧縮比を増加させるか比熱比を増加させるかの 2 通りである。

エンジンの熱効率を低下させるエネルギー損失には、排気による損失、冷却による損失、ポンピングによる損失がある。ここで、排気損失とは、排気としてエンジンから排出されるガスの熱や圧力のエネルギーの損失のことを指す。つまり、ピストンを動かす仕事に変換できなかった分の損失である。排気損失は主に、ピストンが上死点から下降した後も燃焼が続くことによる燃焼期間による損失やピストンが上死点の位置にあるときに、燃焼しないことによる燃焼タイミングによる損失、さらに、燃焼室内のガスが完全に燃え切らないことによる不完全燃焼による損失の 3 つがあげられる。次に冷却による損失とは、燃焼により温度、圧力が増加したガスの熱がシリンダー壁面を通じて移動することによる損失のことである。ポンピング損失とは、吸排気時のガス交換時に、バルブ開度や管形状により、圧力損失が発生する。

一般に熱効率向上技術とは、圧縮比と比熱比を上げて理論熱効率を向上されるか、いずれかの損失を減らすものである。

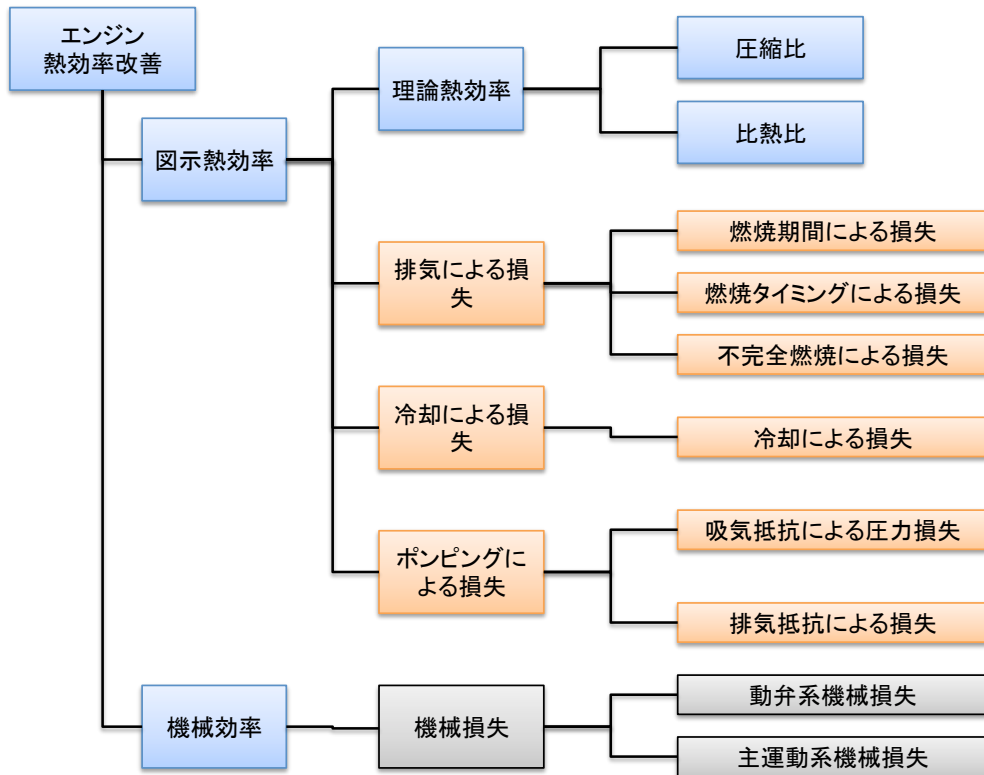


Figure4-1 Heat Efficiency and Energy Loss Structure

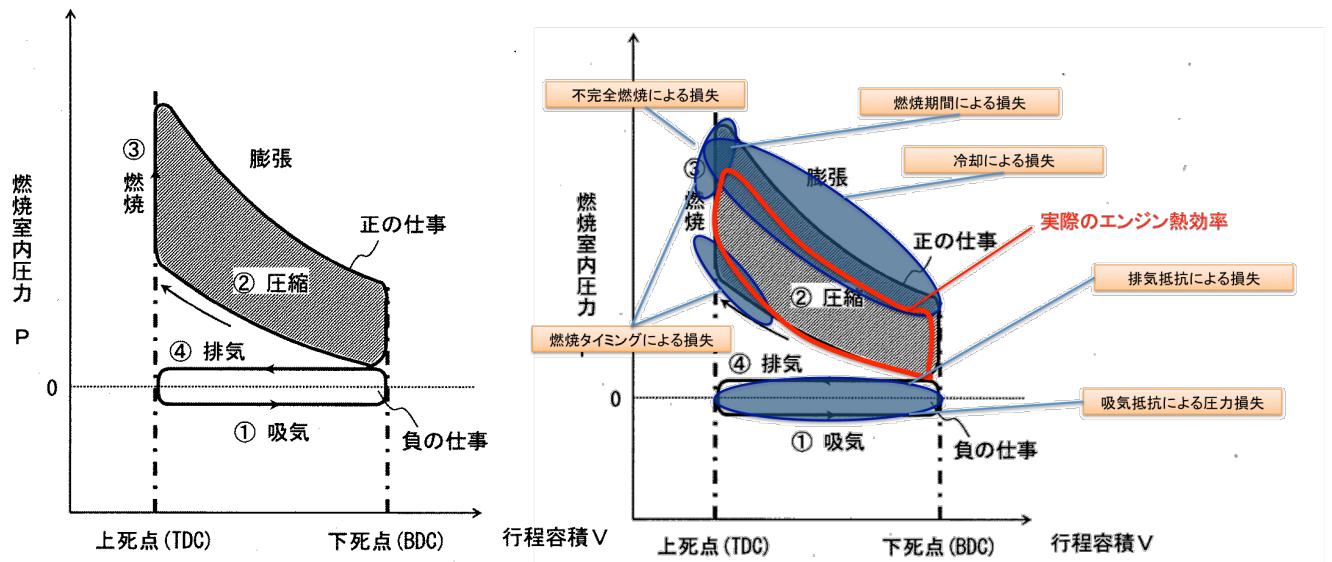


Figure4-2 Otto Cycle with Energy Loss

4.1.2 機能・物理の観点から見たエネルギー損失の要因分析

本節では、エンジンシステムのアーキテクチャの結果からエネルギー損失の要因を機能・物理の観点から分析する。Figure4-3 にエンジンシステムのコンポーネント、機能とエネルギー損失の要因の関係性を示す。この図より物理的なコンポーネントは、機能を持っており、その機能は入力に対し、何かを出力する。そして、入力と出力のエネルギーの差分をエネルギー損失と定義する。そして、エネルギー損失の要因を機能の観点から見たエネルギー損失の要因と物理の観点から見たエネルギー損失の要因の2つに分けて考える。機能の観点からの要因とは、ある機能を実行するのに必要な入力や機能を実行した結果の出力が損失の要因となるものを指す。物理の観点からの要因とは、物理的な機構、材質、形状、質量など、損失の大きさを決定する物を指す

このように損失の要因を機能・物理の観点から分析した例は今までになく、新しいアプローチである。

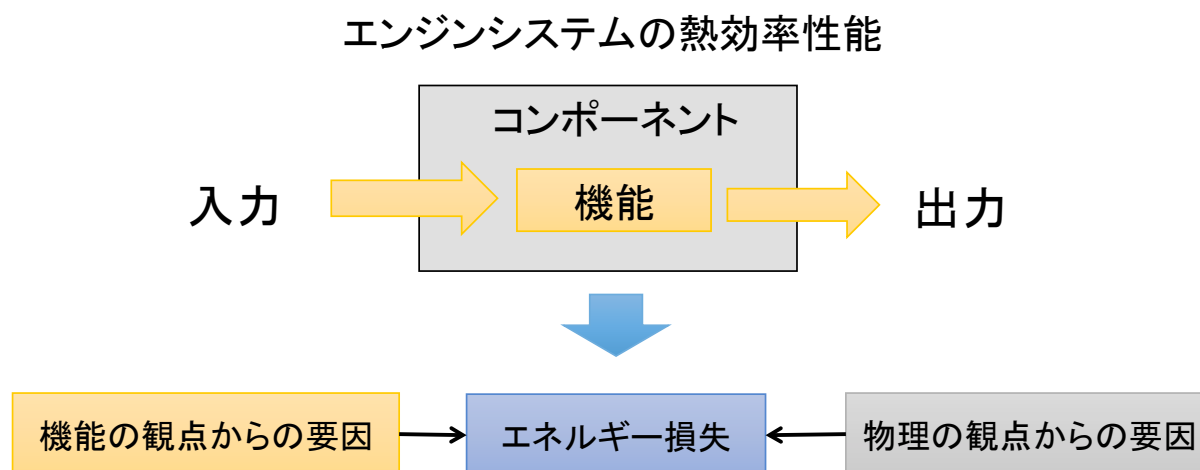


Figure4-3 Concept of Energy Loss Factor from Perspective of Function and Physical

Figure4-4 に第3章で作成したコンポーネントレベルのアーキテクチャ図に機能とコンポーネントを強調させた図を載せる。この図で物理（コンポーネント）を灰色の四角で表し、機能は物理の中に色をついた四角で表している。水色の四角は吸気に関する機能、橙色の四角は圧縮に関する機能、赤色の四角は燃焼に関する機能、紫色の四角は膨張に関する機能、黄色の四角は排気に関する機能、青色の四角は力の伝達に関する機能を表している。

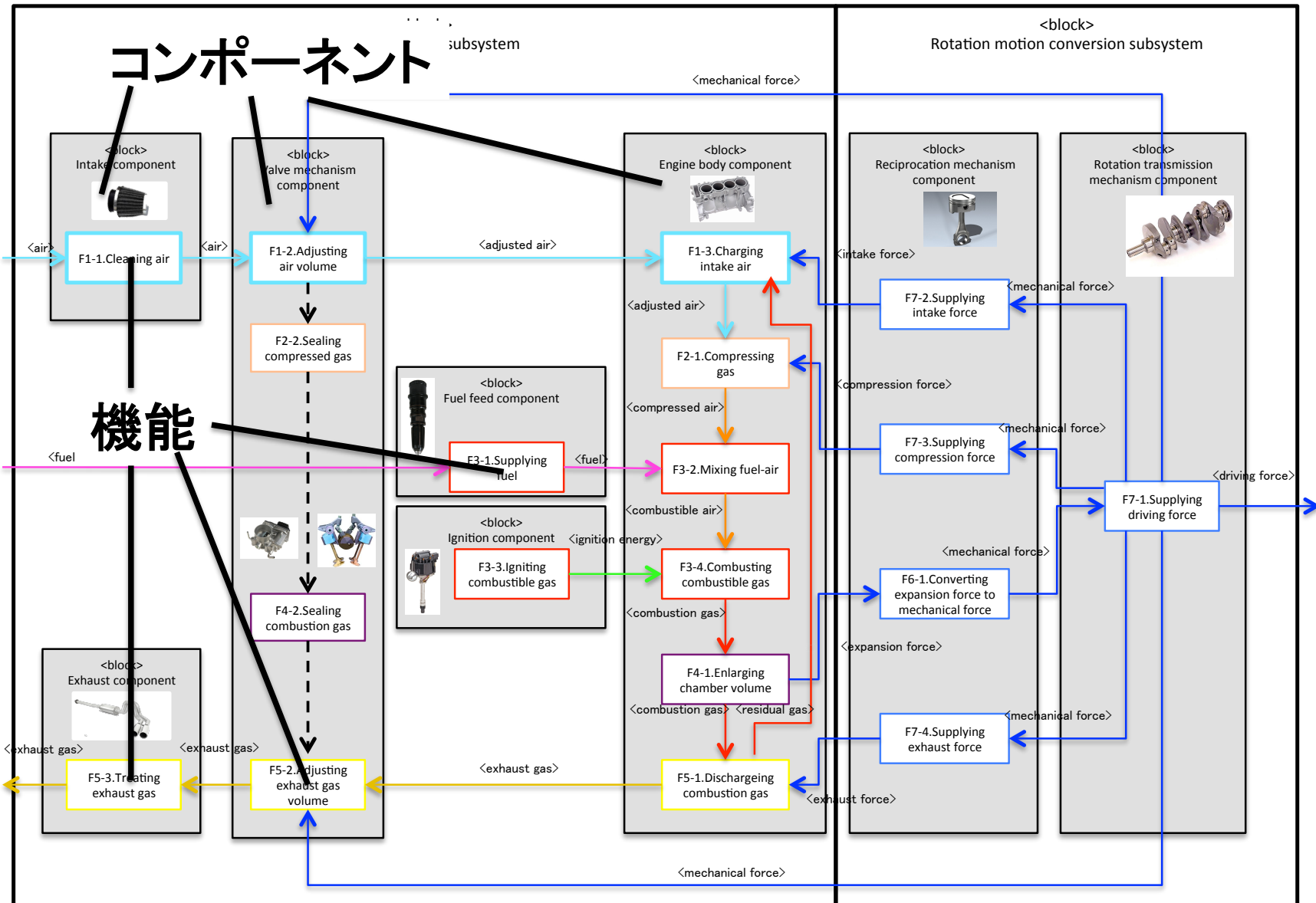


Figure4-4 Engine System Architecture (Component Level) with Emphasis on Function and Physical

次に、Figure4-4 のアーキテクチャを表す図から、1つ1つの機能と物理がどのような損失の要因があるかを検討した。吸気機能に関する検討結果を Figure4-5 に示す。吸気機能の場合、エネルギー損失として圧力損失が挙げられる。圧力損失とは、「流体と流路壁面との間に生じる摩擦や渦の発生によるエネルギー損失」のことを指す。自動車エンジン分野では、ポンプ損失と呼ばれるものであり、作動流体の速度の2乗に比例し、断面積に反比例する関係を持っている。以上のことから、物理にアロケーションされた、吸気機能の入力、出力間にはエネルギー損失（圧力損失）があるといえる。入出力を示す機能フローでは、空気が流れているため、機能の観点から見た損失の要因は、流体の流量や圧力となる。また、物理の観点から見た損失の要因は、流路断面積といった流路形状となる。さらに、吸気量を調整するため、機械損失も発生する。

Figure4-6 に、圧縮、膨張機能についての検討結果を示す。圧縮、膨張機能では、エネルギー損失として、漏れによる損失や冷却損失が挙げられる。機能の観点からの要因としては、入出力の機能フローであるガスの圧力が高いことやガス温度に起因するため、ガス状態が考えられる。また、物理の観点からの損失要因としては、圧縮比や膨張比、燃焼室体積、形状、材質が挙げられる。

Figure4-7 に、燃焼機能についての検討結果を示す。燃焼機能では、エネルギー損失として、主に燃焼タイミングのずれによる損失、燃焼期間が長いことによる損失、不完全燃焼による損失があげられる。機能の観点からみた要因としては、燃焼ガス状態、混合気状態、点火状態が挙げられ、物理の観点から見た損失としては、点火機構、燃料噴射機構、火炎伝播距離、燃焼室形状が考えられる。

Figure4-8 では排気機能についての検討結果を示す。排気機能では、エネルギー損失として、吸気機能同様、圧力損失が挙げられる。このため、機能の観点からみた要因としては、排気の圧力、量が挙げられ、物理の観点から見た要因としては、燃焼室体積、形状、バルブ形状、タイミング、排ガス処理装置形状が考えられる。

F1. Intake air

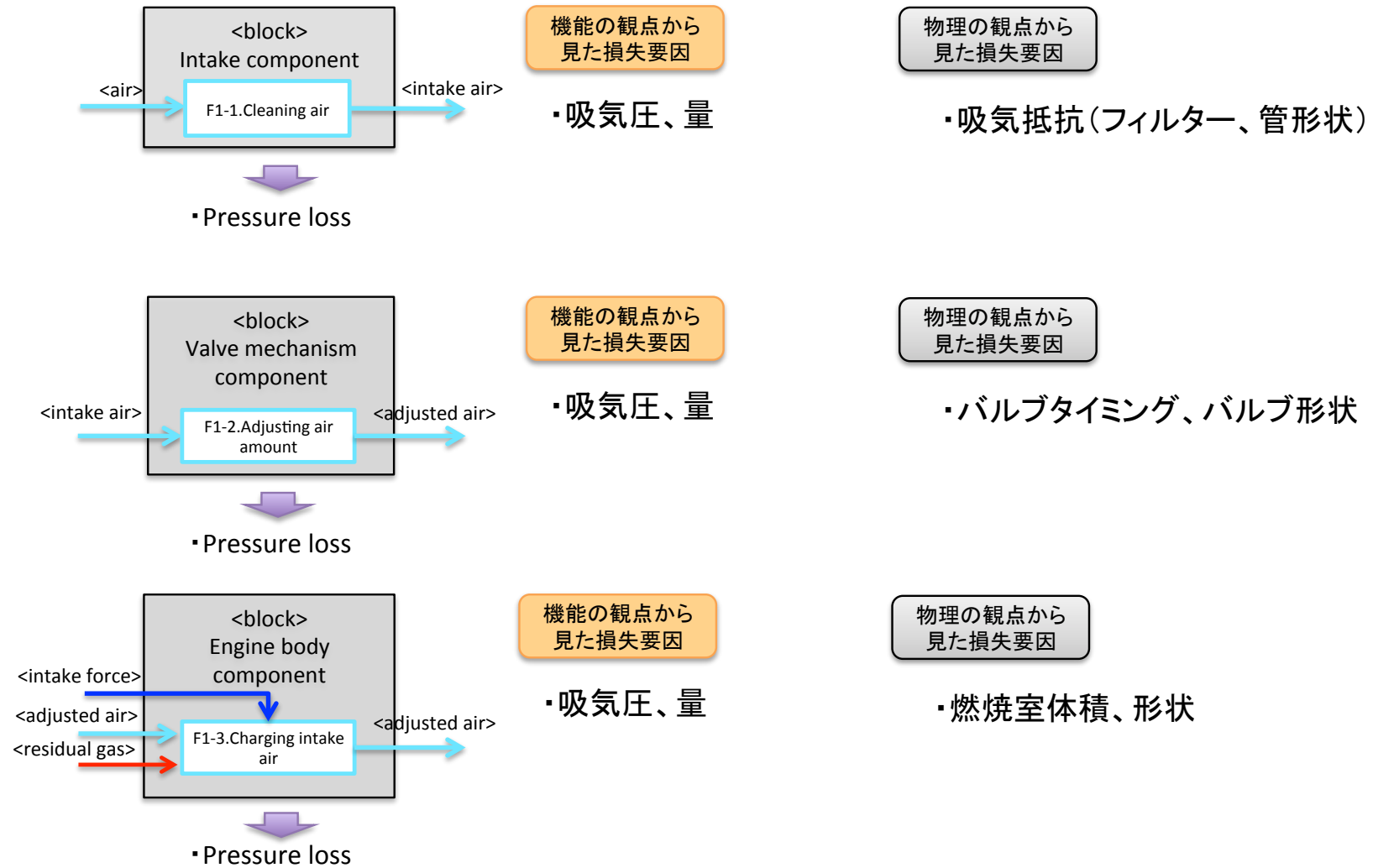
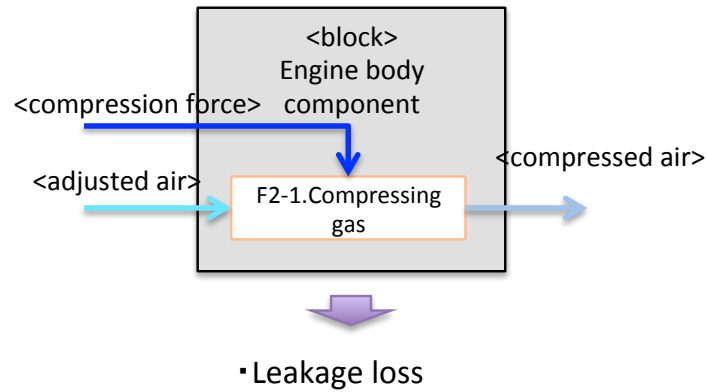


Figure4-5 Energy Loss Factor Analysis of "Intake air Function"

F2. Gas compression



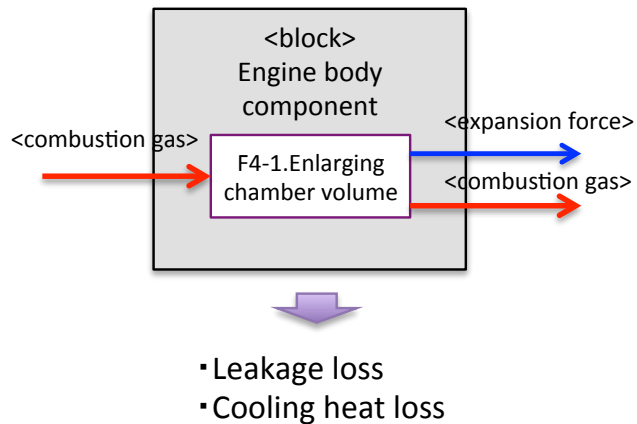
機能の観点から見た損失要因

- ・圧縮空気状態(温度・圧力・量)

物理の観点から見た損失要因

- ・燃焼室体積、形状
- ・圧縮比

F4. Gas expansion



機能の観点から見た損失要因

- ・燃焼ガス状態(温度、ガス、量)
- ・膨張時間

物理の観点から見た損失要因

- ・伝熱面積
- ・熱伝達率
- ・膨張比

Figure4-6 Energy Loss Factor Analysis of "Gas compression" and "Gas expansion Function"

F3. Gas combustion

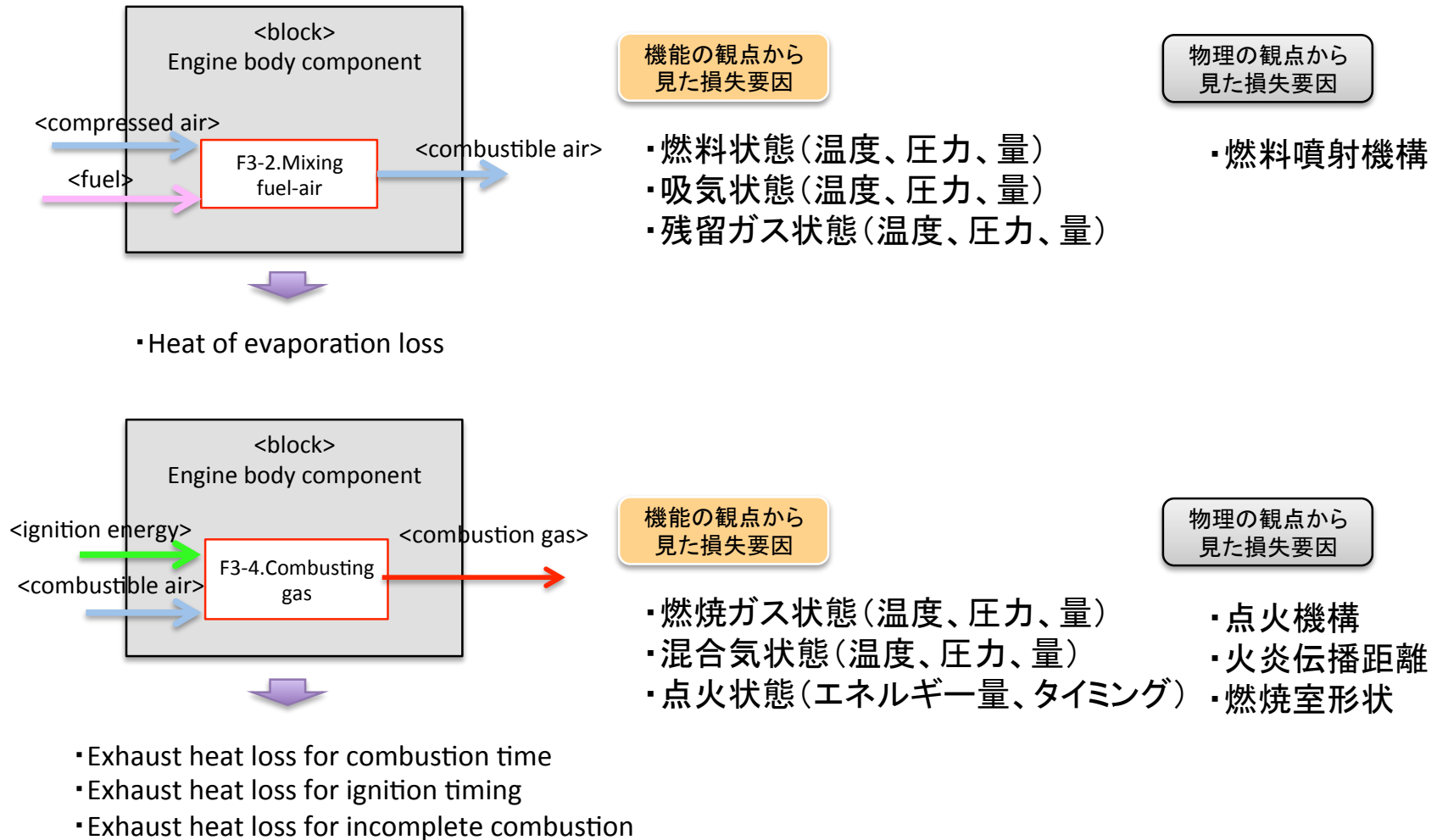
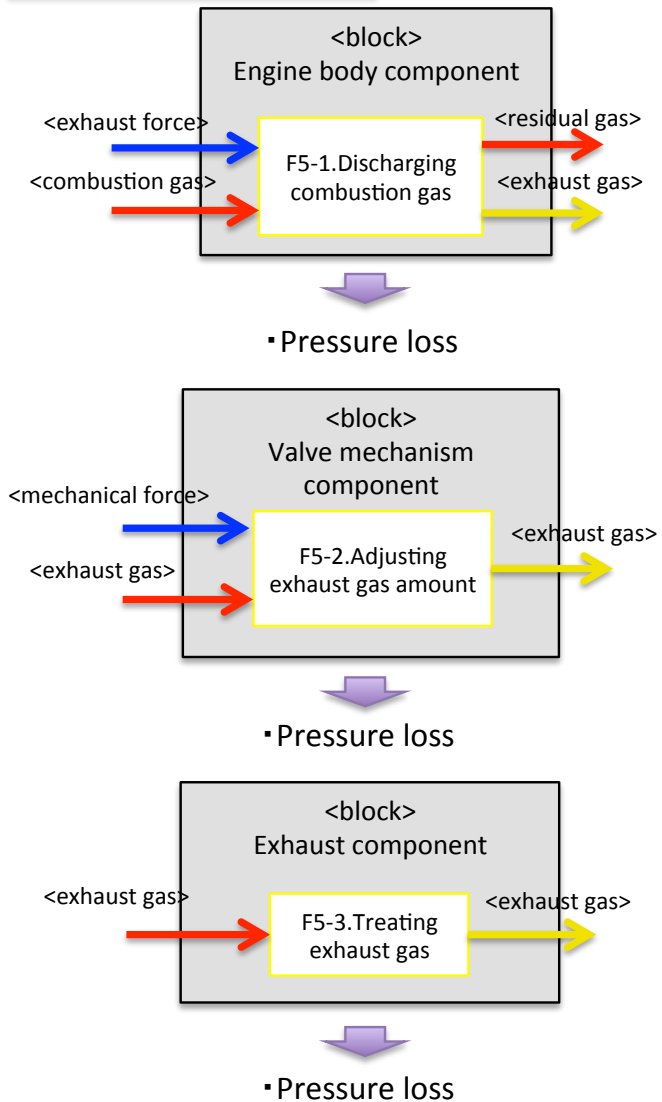


Figure4-7 Energy Loss Factor Analysis of “Gas combustion Function”

F5. Exhaust gas



機能の観点から見た損失要因

・排気圧、量

物理の観点から見た損失要因

・燃焼室体積、形状

機能の観点から見た損失要因

・排気圧、量

物理の観点から見た損失要因

・バルブ形状
・バルブタイミング

機能の観点から見た損失要因

・排気圧、量

物理の観点から見た損失要因

・排ガス処理装置形状

Figure4-8 Energy Loss Factor Analysis of “Exhaust gas Function”

以上の機能、物理の観点からみたそれぞれの要因を分析した結果をまとめた表を Table4-1 に示す。この表はコンポーネントレベルの機能、物理を分析し、どのような損失の要因があるか、また損失の要因は何かを行単位で対応させている。さらに、赤枠で囲った場所は、改善の余地のある損失を表し、青枠で囲まれた場所は、機能・物理の観点から見たエネルギー損失の要因であり、設計や技術により、コントロール可能である。また、赤枠と青枠はそれぞれ、原因と結果の関係性を持っており、この原因に当たる青枠のエリアをいかにうまくコントロールできるかで、低減できる損失の大きさは変わってくるといえる。

この青枠で囲まれたエリアを見てみると、エネルギー損失の要因間の依存関係が見えてくる。この依存関係をまとめた表を Table4-2 に示す。この表より、残留ガス状態は、排気量や排気圧に依存し、混合気状態は吸気状態と燃料状態、残留ガス状態に依存している。そして、燃焼ガス状態は混合気状態と点火状態に依存している。このように各要因間の依存関係を明確にした。

Table4-3 に熱効率とエネルギー損失とその要因との関係を表でまとめた。この表より、どのエネルギー損失がどのエネルギー損失の要因に対応しているかがわかる。

Table4-1 Energy Loss Factor Analysis Table from Perspective of Function and Physical

エンジンシステムの性能 熱効率の観点から見た エネルギー損失	エンジンシステムの機能		エンジンシステムの物理	
	エンジンシステム機能(Layer3)	機能の観点から見た エネルギー損失の要因	エンジンシステムのコン ポーネント(Layer3)	物理の観点からみた エネルギー損失の要因
吸入損失	F1-1.塵埃を除去する機能	吸気圧、流量	吸気コンポーネント	吸気抵抗(フィルター、管形状)
吸入損失、機械損失	F1-2.吸気量を調整する機能	吸気圧、流量、力の大きさ	バルブコンポーネント	形状、摩擦係数、熱膨張率
作動流体の漏れによる損失	F2-1.空間を密閉する機能	圧縮混合気状態		圧縮ガス封入機構、熱膨張率
作動流体の漏れによる損失	F4-2.空間を密閉する機能	燃焼ガス状態		燃焼ガス封入機構、熱膨張率
排気押し出し損失	F5-2.ガスの排出量を調整する機能	排気圧、体積流量、力の大きさ		形状、摩擦係数、熱膨張率
燃料供給に必要なエネルギーによる損失	F3-1.燃料を供給する機能	燃料状態(圧力・量、タイミング、粒径)	燃料供給コンポーネント	燃料供給機構
点火に必要なエネルギーによる損失	F3-3.可燃性ガスに点火する機能	点火状態(エネルギー量・時間、タイミング)	点火コンポーネント	点火方式
吸入損失	F1-3.吸気を充填する機能	吸気状態(圧力、温度、吸気量)	エンジン本体コンポーネント	燃焼室体積、形状、吸入方式
冷却による損失	F2-1.ガスを圧縮する機能	圧縮混合気状態(温度、圧力)		伝熱面積、熱伝達率、圧縮比
気化潜熱による損失	F3-2.混合気を作る機能	燃料状態(温度・量、粒径)、吸気量・温度、残留ガス量・温度		燃料供給機構
燃焼期間による損失	F3-4.可燃性ガスを燃焼する機能	燃焼ガス温度・圧力、混合気状態(圧力、温度、均一度)、点火状態		火炎伝播距離、燃焼室形状
燃焼タイミングによる損失				
不完全燃焼による損失				
冷却による損失	F4-1.体積を拡大する機能	燃焼ガス温度・圧力、膨張比		熱伝達面積、熱伝達率
排気押し出し損失	F5-1.ガスを排出する機能	排気圧、流量		燃焼室体積、形状、排気方式
排気押し出し損失	F5-3.排気ガスを浄化する機能	排気圧、流量	排気コンポーネント	排気抵抗(排気浄化装置、管形状)
機械損失	F6-1.体積変化を駆動力に変換する機能	燃焼ガス状態(圧力、体積)	往復運動コンポーネント	摩擦係数、質量、形状、熱膨張率
機械損失	F7-2.吸気のための力を与える機能	吸気のための力の大きさ		
機械損失	F7-3.圧縮のための力を与える機能	圧縮のための力の大きさ		
機械損失	F7-4.排気のための力を与える機能	排気のための力の大きさ		
機械損失	F7-1.駆動のための力を与える機能	トルクの大きさ		

改善の余地のある損失



コントロール可能

Table4-2 Dependency Relationship between Energy Loss Factor

機能による損失要因	
結果	原因
残留ガス状態 (量・温度・圧力)	排気圧・温度、排気量
混合気状態 (圧力、温度、均質度)	吸入圧・温度・吸気量
	燃料量・温度・圧力・粒径
	残留ガス量・温度・圧力
燃焼ガス状態 (温度・圧力・量)	混合気状態(圧力、温度、均一度)
	点火エネルギー・タイミング
比熱比	混合気状態(圧力、温度、均一度)
	燃焼ガス状態(温度・圧力・量)

物理による損失要因	
結果	原因
火炎伝播距離	燃焼室形状
伝熱面積	燃焼室形状
熱伝達率	燃焼室材質
	吸気抵抗(フィルター、管形状)
	排気抵抗(管形状)
	摩擦係数
	質量
	回転体形状

Table4-3 Relationship between Energy Loss and Energy Loss Factor from Perspective of Function and Physical

			機能による損失要因	物理による損失要因	
正味熱効率	図示熱効率	理論効率	圧縮比、膨張比 比熱比		
		排気損失	燃焼期間による損失	燃焼ガス温度・圧力・量、 混合気状態(圧力、温度、均一度)	燃焼室形状、 火炎伝播距離
			燃焼タイミングによる損失	燃料量・温度・圧力・粒径 残留ガス量	燃焼室形状、 火炎伝播距離
			不完全燃焼による損失	点火エネルギー・タイミング	燃焼室形状、 火炎伝播距離
	冷却損失	冷却による損失	燃焼ガス温度・圧力、膨張比	伝熱面積、熱伝達率、材質	
	ポンプ損失	吸入による損失	吸気圧・温度、吸気量	吸気抵抗 (フィルター、管形状)	
		排気による損失	排気圧・温度、排気量	排気抵抗(排気浄化装置、管形状)	
機械効率	機械損失	動弁系機械損失	吸排気量調整のための力の大きさ	形状、質量、摩擦係数	
		主運動系機械損失	膨張のための力の大きさ 吸気のための力の大きさ 圧縮のための力の大きさ 排気のための力の大きさ トルクの大きさ	摩擦係数、質量、回転体形状	

以上のエネルギー損失と機能の観点からみたエネルギー損失の要因の関係を図で表すとFigure4-9 のようになる。機能の観点からエンジンのエネルギー損失は、大きくガス状態と力の伝達状態に起因する。さらに、ガス状態は吸気状態、残留ガス状態、燃料状態、混合気状態、点火状態、燃焼ガス状態、排気状態の7つに分けられる。これらは、損失の要因であり、各損失との関係を青色の実線で表す。赤色の破線はエンジン内を表しており、空気は外部から入ってきて、排気ガスは外部に排出されている様子を表す。以上の機能の観点からみたエンジンの熱効率に関係する8個の因子と呼ぶ。

Figure4-10 では、先ほどの図に物理の視点からのエネルギー損失の要因も加え、詳細化したエネルギー損失要因の構造を示す。まずは、先ほどの機能の観点から導き出した8つのエネルギー損失を細分化した。例えば、燃焼ガス状態は「燃焼ガス体積、圧力、温度」、「燃焼速度、時間」、「比熱比」の様に詳細化できる。そして、それぞれの状態を細分化した因子と、物理の視点から導出した因子を関連付ける。ここで、それらの物理因子は、機能の観点から導いたエネルギー損失の要因となるガス状態を決定する。また図の左から右に原因と結果の関係にあるということが出来る。

Figure4-11 には、先ほどの Figure4-10 に実現手段（物理や技術）が変わっても変化しない領域と変化する領域を示している。

エンジンの熱効率に関係する8個の因子(機能の視点)

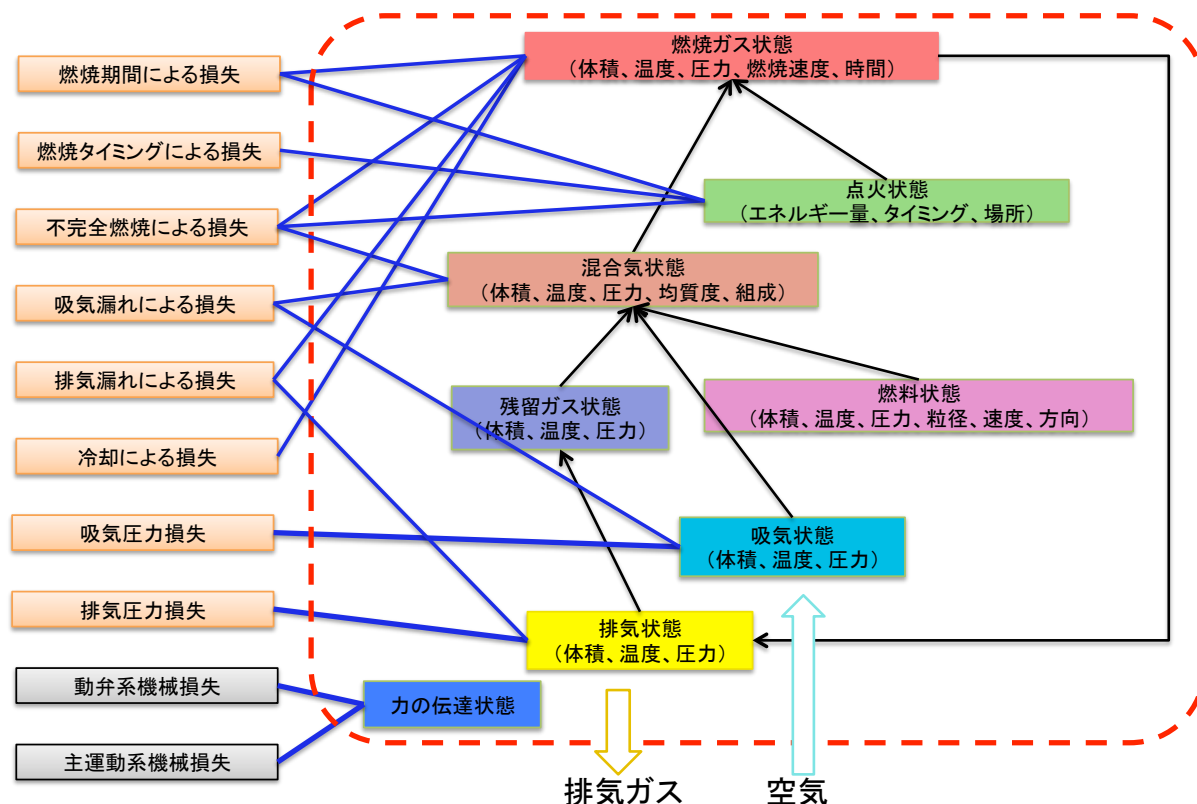


Figure4-9 Energy Loss Factor from Perspective of Function

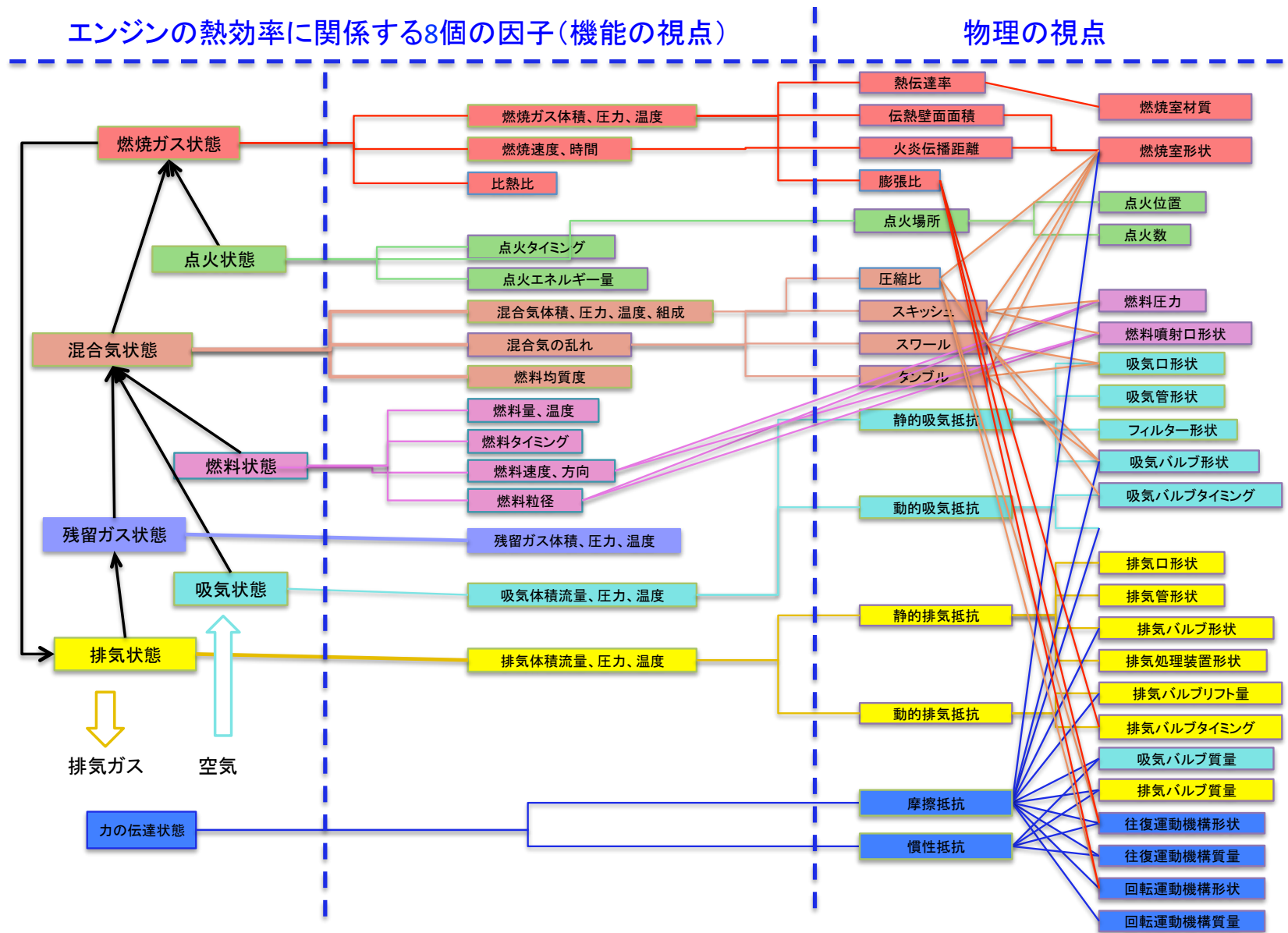


Figure4-10 Detail Energy Loss Factor from Perspective of Function and Physical



Figure4-11 Detail Energy Loss Factor from Perspective of Function and Physical with Emphasis on Dependency on Technology

Figure4-12 に示すのは、Figure3-28 で示したエンジンのアーキテクチャの図と Figure4-10 の熱効率低下要因との対応図である。ここで、アーキテクチャの図と熱効率低下要因の関係を明確にすることで、どの要因がどの機能あるいはコンポーネントと関係しているかがわかるようになる。つまり、今までエンジン開発を行っていたエンジニアが頭のなかで考えていたエンジンの振る舞いをモデルで検討することができる。

さらに Figure4-13 では、Figure4-12 を参考に、機能の観点から導出した各因子間の関係性を記述した。これにより、さらに詳細な熱効率低下の要因同士の関係性を明確化させ、次節以降の熱効率向上技術の分析に役立つ。

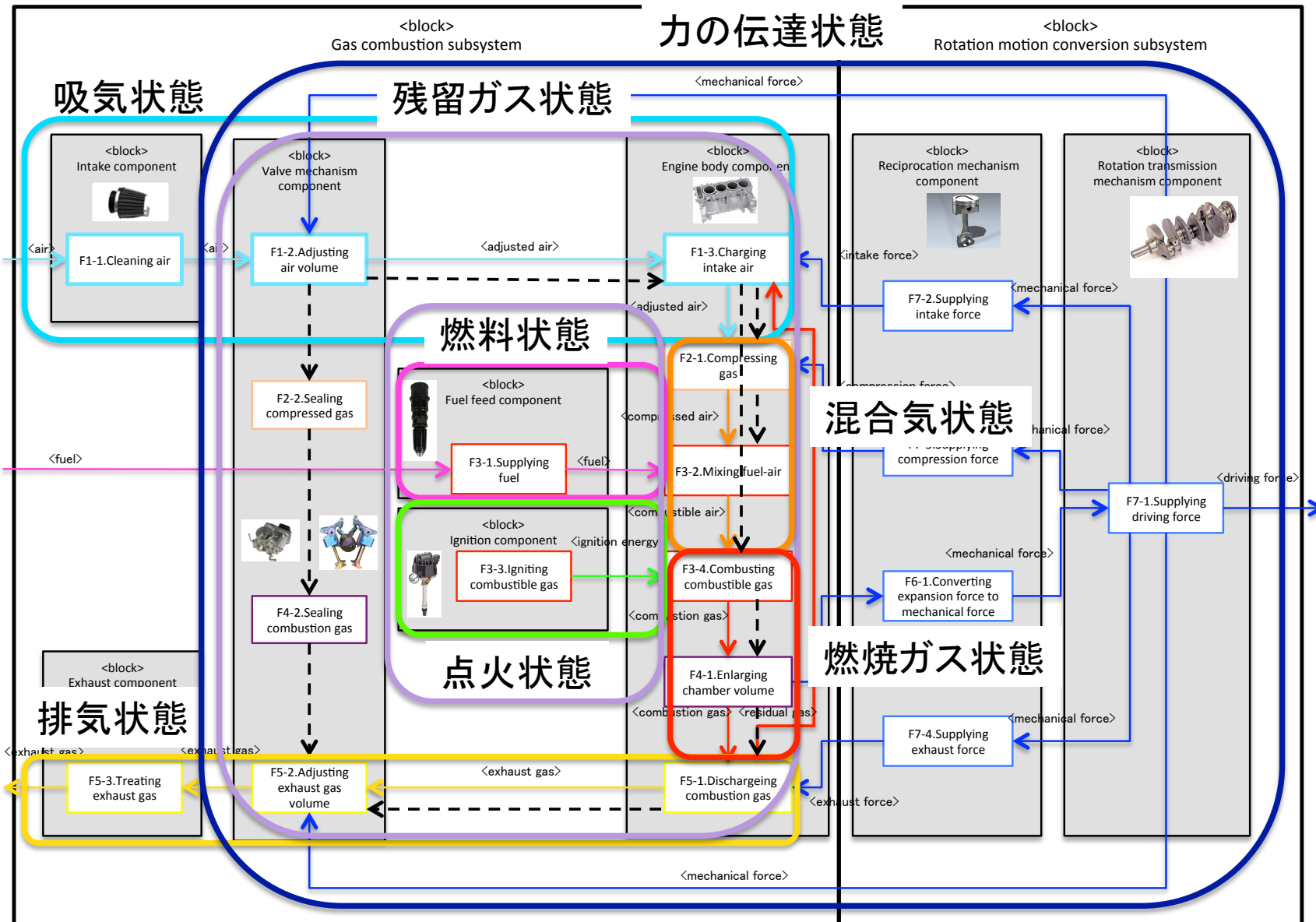


Figure4-12 Engine Architecture Related to Engine Energy Loss Factor

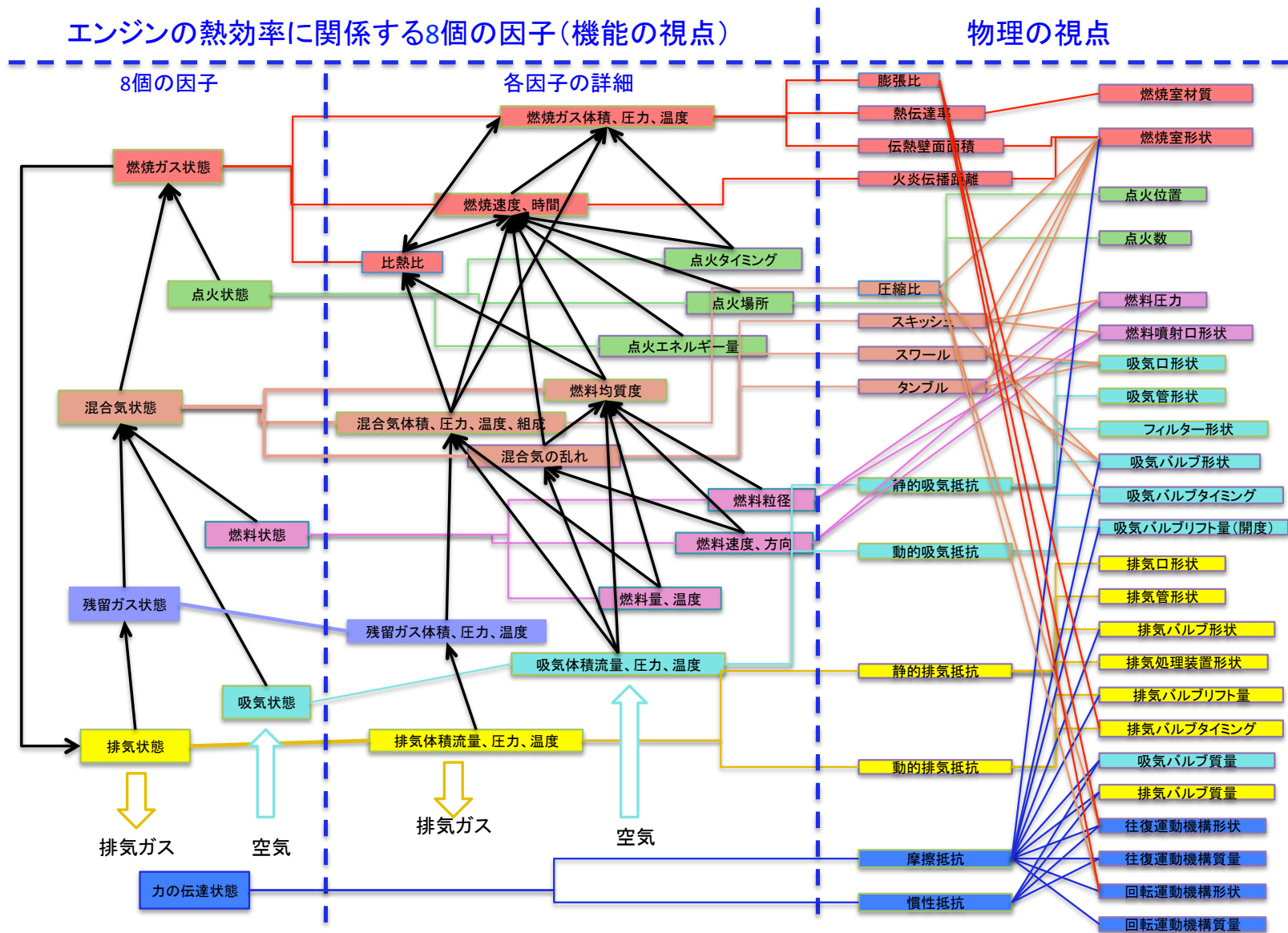


Figure4-13 Engine Energy Loss Factor with Emphasis on Dependency on Energy Loss Factors

4.2 熱効率向上技術の分析

本節では、第3章で構築したエンジンのシステムモデルと4.1節の熱効率低下の要因分析の結果を用いて、熱効率向上技術の分析を行っていく。Figure4-14で、現状の効果が期待させる主要な熱効率向上技術を機能ごとに分類した図を示す。ここでは、Subsystem Levelで分解した7つの機能ごとに現状の熱効率向上技術を当てはめている。ここで、ダウンサイジングのみが唯一カテゴライズされていないが、その理由は、ダウンサイジングはある1つの機能の性能を高めるものではなく、全体の機能に関わるからである。

Table4-4にそれぞれの熱効率向上技術の簡単な説明を記述した。この記述より、熱効率向上技術は、何の損失を減らすために、どこをコントロールしているかがわかる[22],[23],[24],[25],[26],[27],[28]

Table4-4の熱効率向上技術をFigure4-10のエンジンの熱効率低下要因を対応させた図をFigure4-15に示す。熱効率向上技術は、熱効率の低下要因のどこかをコントロールして、熱効率の向上を目指すものである。この図では、熱効率向上技術がいったいどこの因子をコントロールしようとしているのかがわかる。

次に、Figure4-16に熱効率向上技術とエンジンの機能・物理の関係性を明確化したアーキテクチャを対応させた図を示す。ここでは、熱効率向上技術がどこの機能・物理に影響していて、他のどの機能・物理に2次的な影響を与えているか、視覚的に理解でき、影響を分析することができる。

これら、熱効率低下要因とアーキテクチャを用いた分析をまとめた表をTable4-5に示す。ここでの気付きとしては、Table4-5のような表を埋める際には、Table4-4のような説明文だけでは、2次的な影響が見えてこないということである。つまり、熱効率向上技術は、何かの因子をコントロールして損失を低減しているが、その結果他のどの因子に影響が及ぶかまでは、明確にわからない。現場のエンジニアは長年の経験により、エンジンの振る舞い等が頭に入っているため、どこに影響が及ぶかは容易に想像できるが、経験がない、あるいは専門領域ではないエンジニアや非エンジニアには影響範囲の特定は難しい。

また、Table4-5では、近年数多くの研究が行われているリーンバーンやHCCIといった最先端の熱効率向上技術についての検討を行った。この2つは燃焼そのもののコントロールをするため、その他の熱効率向上技術よりも遥かに課題が多い。その様子をFigure4-17に示す。この図より、熱効率低下の要因は、右から左に様々な要因が集約されるとともに、ガスの流れは下から上に依存関係があることがわかる。このことから、燃焼状態には、すべての因子が関わっており、それゆえにコントロールが難しいことが明確にわかる。これこそ、全体俯瞰の目的であり、可視化することで明確に説明することができる。

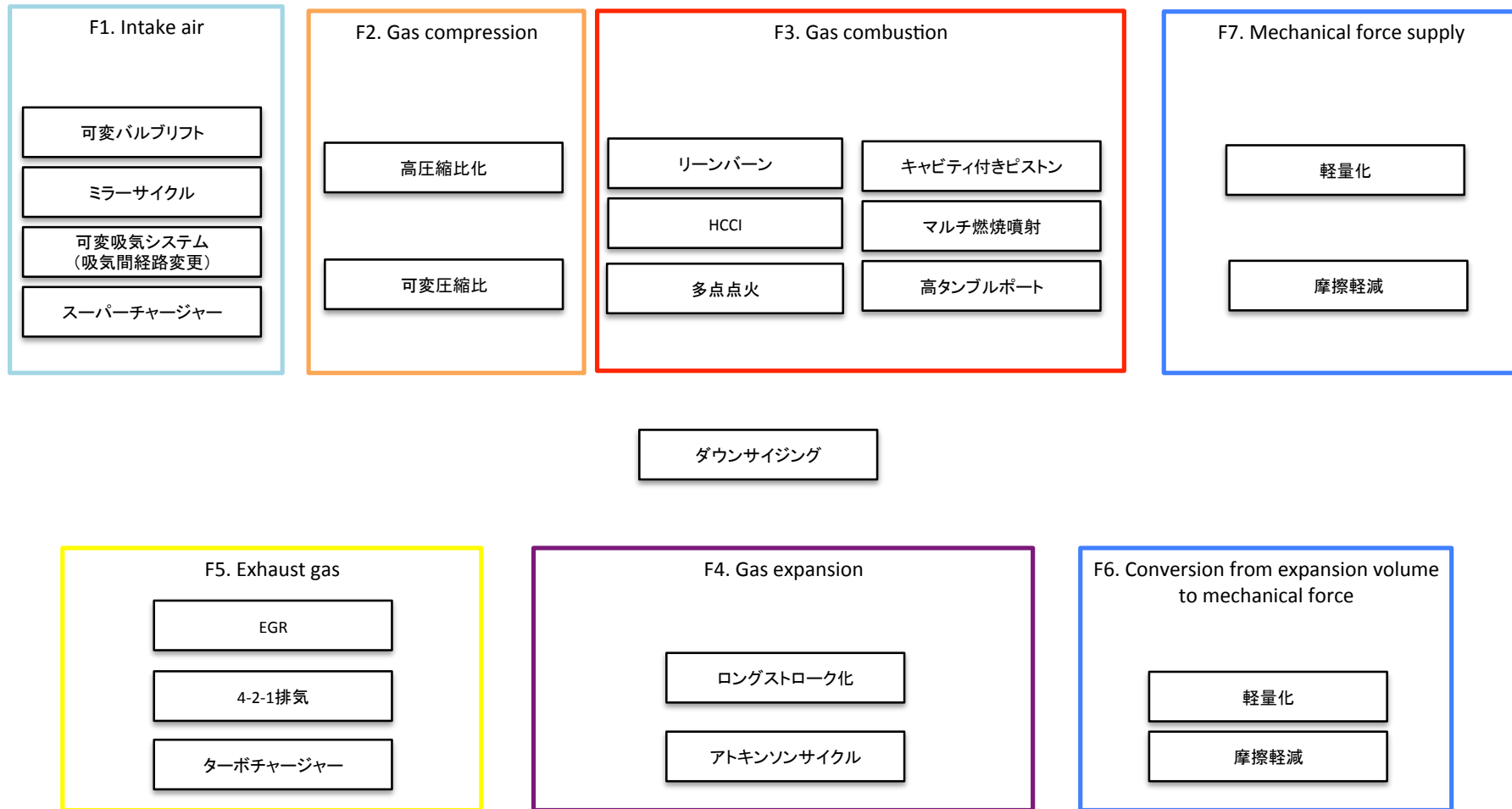


Figure4-14 Classification of Engine Heat Efficiency Improvement Technology

Table4-4 Description of Engine Heat Efficiency Improvement Technology

	熱効率向上技術	熱効率向上技術の説明
F1. Intake Air	可変バルブリフト	吸気バルブのリフト量を可変にすることで、スロットルバルブによる調整を不要にし、吸気抵抗を減らす。
	ミラーサイクル(遅閉じ)	吸気バルブのタイミングを可変にすることで、吸気バルブを遅閉じにすることで、見かけの圧縮比を下げ、膨張比を高くするアトキンソンサイクルを達成する。また、バルブを大外時にすることで、吸気抵抗を減らすことができる。
F2. Gas combustion	高圧縮比	高圧縮比化することで、理論熱効率を向上させる。
	可変圧縮比	圧縮比を可変にすることで、運転状態に応じて最も効率の良い圧縮比で動作することができる。
F3. Gas combustion	リーンバーン	通常よりも希薄な混合気で燃焼する。このため、比熱比が増加し、理論熱効率が向上する。さらに、燃焼温度が下がるので、冷却損失も低減できる。ただし、燃焼状態の悪化が問題である。
	HCCI	予混合圧縮着火と呼ばれ、ガソリンエンジンをディーゼルエンジンの様に自己着火させる次世代燃焼方式である。メリットは、速い燃焼速度と低い燃焼温度であり、デメリットは燃焼制御の難しさである。
	キャビティ付きピストン	ピストン冠面に窪みを設けることで、燃焼ガスがピストン冠面やシリンダー壁面に触れて燃焼状態が悪くなるのを防ぐ。
	マルチ燃料噴射	広範囲に燃料を噴射することで、ガソリンと空気との混合をより良くする。
	多点点火	点火点数を増やすことで、燃焼にかかる時間を短縮する。
F4. Gas expansion	ロングストローク化	燃焼室体積に対するシリンダー壁面面積の割合を下げ、冷却損失を低減させる。
	アトキンソンサイクル	膨張比を大きくすることで、捨てるはずの燃焼ガスの熱を仕事に変換できる。
F5. Exhaust gas	EGR	排気ガスを再び吸気に混合させることで、比熱比を大きくしたり、燃焼温度を下げるができる。
	ターボチャージャー	排気ガスの圧力を動力に変換することで、捨てられるはずのエネルギーを回収できる。
F6. Conversion from expansion volume to mechanical force	軽量化	各部品の軽量化を行う、慣性抵抗や摩擦抵抗を減らす。
F7. Mechanical force supply	摩擦低減	表面形状や機構を工夫し摩擦抵抗を減らす。

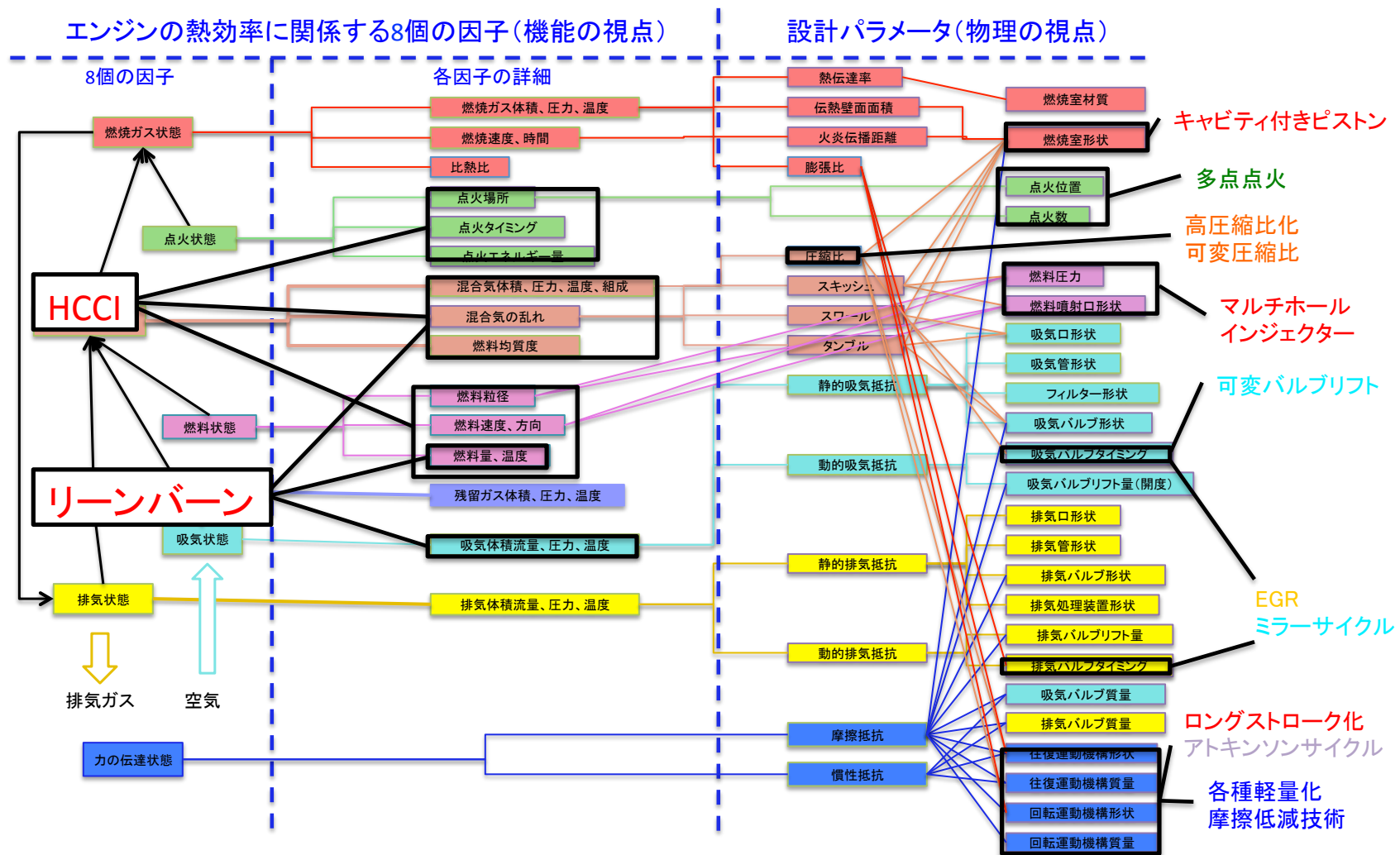


Figure4-15 Expressing of Engine Heat Efficiency Improvement Technology on Engine Energy Loss Factor

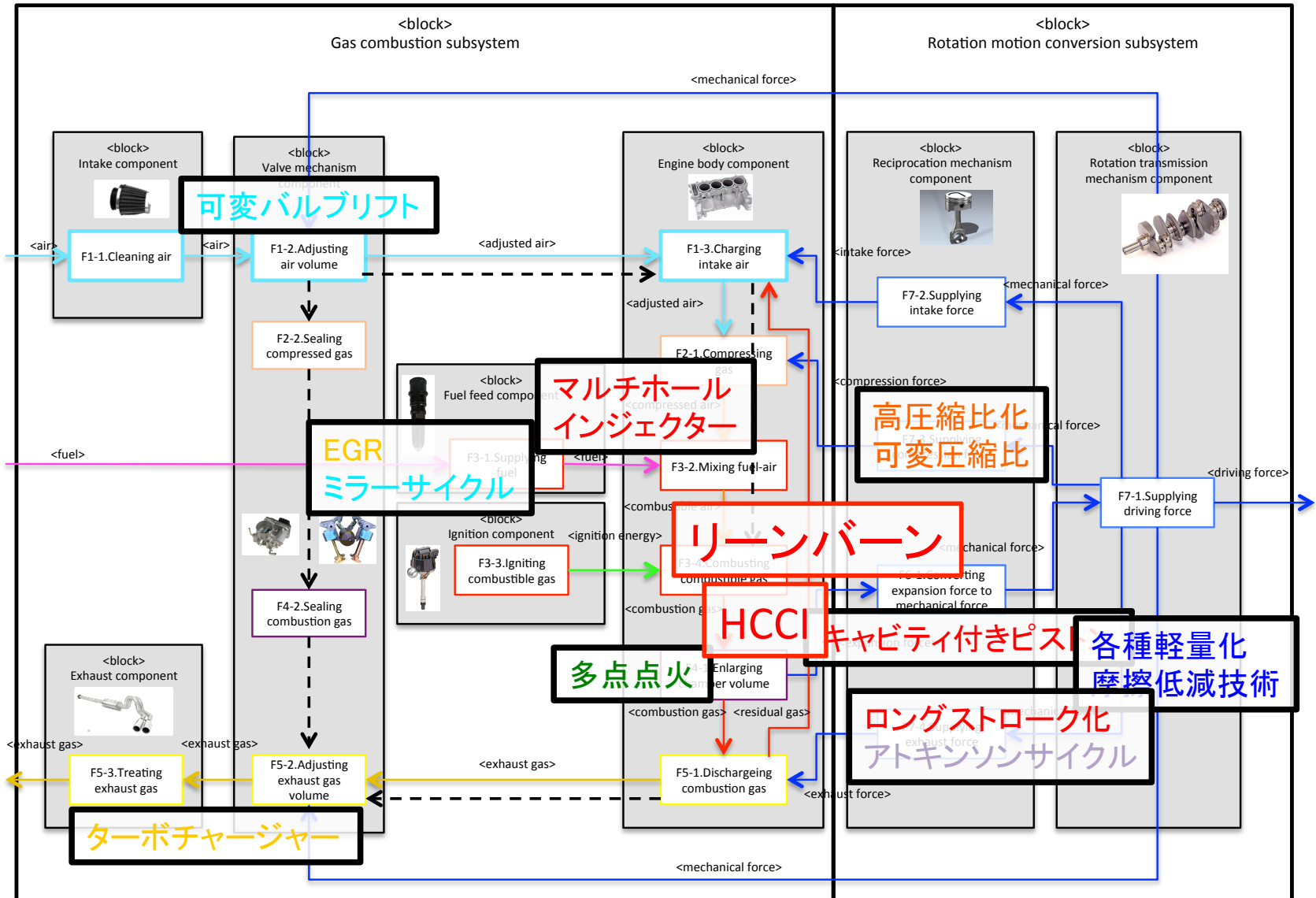


Figure4-16 Expressing of Engine Heat Efficiency Improvement Technology on Engine Architecture

Table4-5 Analysis of Engine Heat Efficiency Improvement Technology

熱効率向上技術	損失の要因 (機能)	設計パラメータ		システムモデルとの対応		2次の影響 (関係する機能)	関係する熱効率損失	
				機能	コンポーネント		低減する損失	増加する損失
可変バルブリフト	吸気状態	吸気抵抗	吸気バルブリフト量	F.1-2	Valve mechanism component	F.1-3 ,F.2-2, F.7-2	吸気抵抗による損失	動弁系機械損失
ミラーサイクル	吸気状態 混合気状態	吸気抵抗、圧縮比	吸気バルブタイミング	F.1-2	Valve mechanism component	F.1-3 ,F.2-2, F.7-2	吸気抵抗による損失	
高圧縮比	混合気状態	圧縮比		F.2-1	Engine body component Reciprocation mechanism component	F.1-3 F.3-1,F.3-2, F.7-3	理論熱効率の向上	冷却による損失
可変圧縮比	混合気状態	圧縮比		F.2-2	Engine body component Reciprocation mechanism component	F.1-3 F.3-1,F.3-2, F.7-3	理論熱効率の向上 冷却による損失の低減	主運動系機械損失
リーンバーン	吸気状態 燃料状態 混合気状態	燃料均質度 燃料量 吸気流量		F.3-1 F.3-4	Fuel feed component Engine body component	F.3-1 F.3-2 F.3-3,F.3-4	冷却による損失 吸入抵抗による損失	燃焼期間による損失
HCCI	混合気状態 燃料状態 点火状態	ガスの乱れ 燃料粒径 燃料量 点火タイミング	燃焼室形状 吸気バルブ形状 燃料圧力 燃料噴射口形状	F.3-1 F.3-2 F.3-3 F.3-4	Fuel feed component Ignition component Engine body component	F.3-1 F.3-2 F.3-3 F.3-4	燃焼期間による損失 不完全燃焼による損失 冷却による損失	燃焼タイミングによる損失
キャビティ付きピストン	燃焼ガス状態	火炎伝播距離 伝熱面積	燃焼室形状	F.4-1	Engine body component	F.3-3,F.3-4	冷却による損失	
マルチ燃料噴射	燃料状態	燃料粒径 燃料量 燃料温度	燃料圧力 燃料噴射口形状	F.3-1	Fuel feed component	F.3-2	燃焼期間による損失 不完全燃焼による損失	
多点点火	点火状態	点火ロケーション 点火タイミング 点火エネルギー量	点火位置、点火数	F.3-3	Ignition component	F.3-4	燃料期間による損失 不完全燃焼による損失	
ロングストローク化	燃焼ガス状態	膨張比 熱伝達面積 火炎伝播距離	燃焼室形状	F.4-1	Engine body component Reciprocation mechanism component	F.3-4,F.5-1	冷却損失による損失	主運動機械損失
アトキンソンサイクル	燃焼ガス状態	膨張比		F.4-1	Engine body component Reciprocation mechanism component	F.3-4,F.5-1	理論熱効率の向上 吸気抵抗による損失	主運動系損失
EGR	排気状態 残留ガス状態	排気抵抗 吸気抵抗 比熱比	排気バルブタイミング 排気形状 吸気バルブタイミング	F.5-2	Valve mechanism component	F.1-2 F.5-1 F.5-3	冷却による損失 吸気抵抗による損失	燃焼期間による損失
ターボチャージャー	排気状態	排気抵抗		F.5-3	Exhaust component			
4-2-1排気	排気状態	排気抵抗	排気管形状	F.5-3	Exhaust component	F.5-1,F.5-2	排気抵抗による損失	

また、理想の熱効率を実現するエンジン開発を行う上で、Figure4-19のような各機能・物理から出る各種エネルギー損失を低減していかなければならない。そのためには、エネルギー損失の要因を検討し、それらに対処する技術を導入する工夫が必要である。このアイデア創出の助けとなるのが、熱効率低下の要因に機能と物理の視点に切り分けてアプローチすることである。

Figure4-20 にエンジン熱効率を低下させるエネルギー損失へのアプローチの模式図を示す。エンジンの機能は Figure4-9 に示す通り「ガス状態」あるいは「力の伝達状態」をコントロールしている。このため、機能の視点として、「〇〇状態」を、その機能を実現する物理、制御の視点では、「〇〇コンポーネント」、「〇〇制御」といった、状態をコントロールしている実現手段を考える。このように周囲との関係性や実現手段を明確にしたうえで、エネルギー損失を低減させるために、熱効率低下の要因をコントロールしていく必要がある。

これらの損失の要因に対処する熱効率向上技術を考える際に、Figure4-21 で示すように、エンジン全体の機能、物理関係性が明確なアーキテクチャの図を用いて検討すると良い。検討の例としては、クランクシャフトから吸排気バルブ駆動のための力を伝達するときに、ベルトを用いて機械的に接続する場合とモーターを用いて、電気に一度変換してから力に変えて伝達する場合との比較検討、EGR などの新しい技術を導入する際の他への影響の検討、さらに、ある機能が故障等の不具合により実行されない場合の影響分析や、物理構成要素の材質や形状の変更に伴う変更管理の検討ができる。

Figure4-22 では、EGR の影響分析について、詳しく検討した図を示す。EGR は、排気ガスを再び吸気側に送り込むことで、燃焼温度を下げる技術であるが、排気が吸気側に流れこむことにより、吸気圧力損失を減らす効果も見える。さらに、燃焼温度が下がり、冷却による損失を低減させることができるが、デメリットとしては、燃焼状態の悪化による燃焼期間による損失や不完全燃焼による損失などの二次的な影響も考えられる。このような検討は、エンジン開発のコンセプト段階に無知いるのに非常に有効であり、計算しなくてもある程度の予測の根拠となるため、現場への負担も軽減することが出来る。

今日の高度で複雑化したエンジンは、大勢の現場のエンジニアが細部に気を配り、ロボットのように精密な制御で動くように開発されている。このようなシステムをつくり上げるときに、詳細な部分にばかり目を向け、議論してしまうことは当然のことであるが、モデルを用いて適切な抽象度で機能、物理間の関係性が明確となったアーキテクチャを記述することでエンジンの全体像を正しく捉え、なおかつ詳細な部分も検討することが可能となる。まさに、「木を見て森も見る」の言葉通り、個別最適ではなく、常に全体最適を考えることができる。

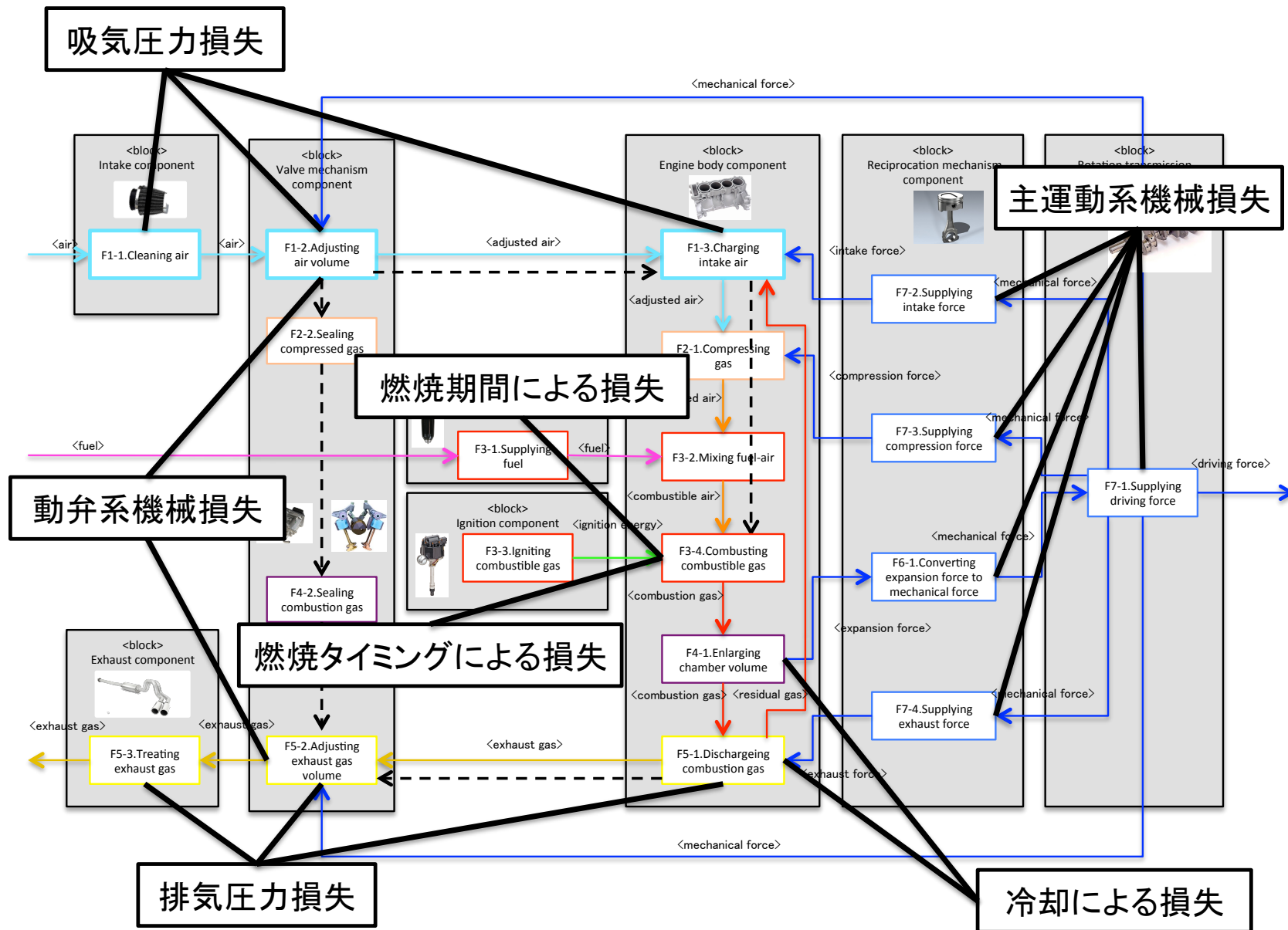


Figure4-19 Engine Architecture Related to Energy Loss

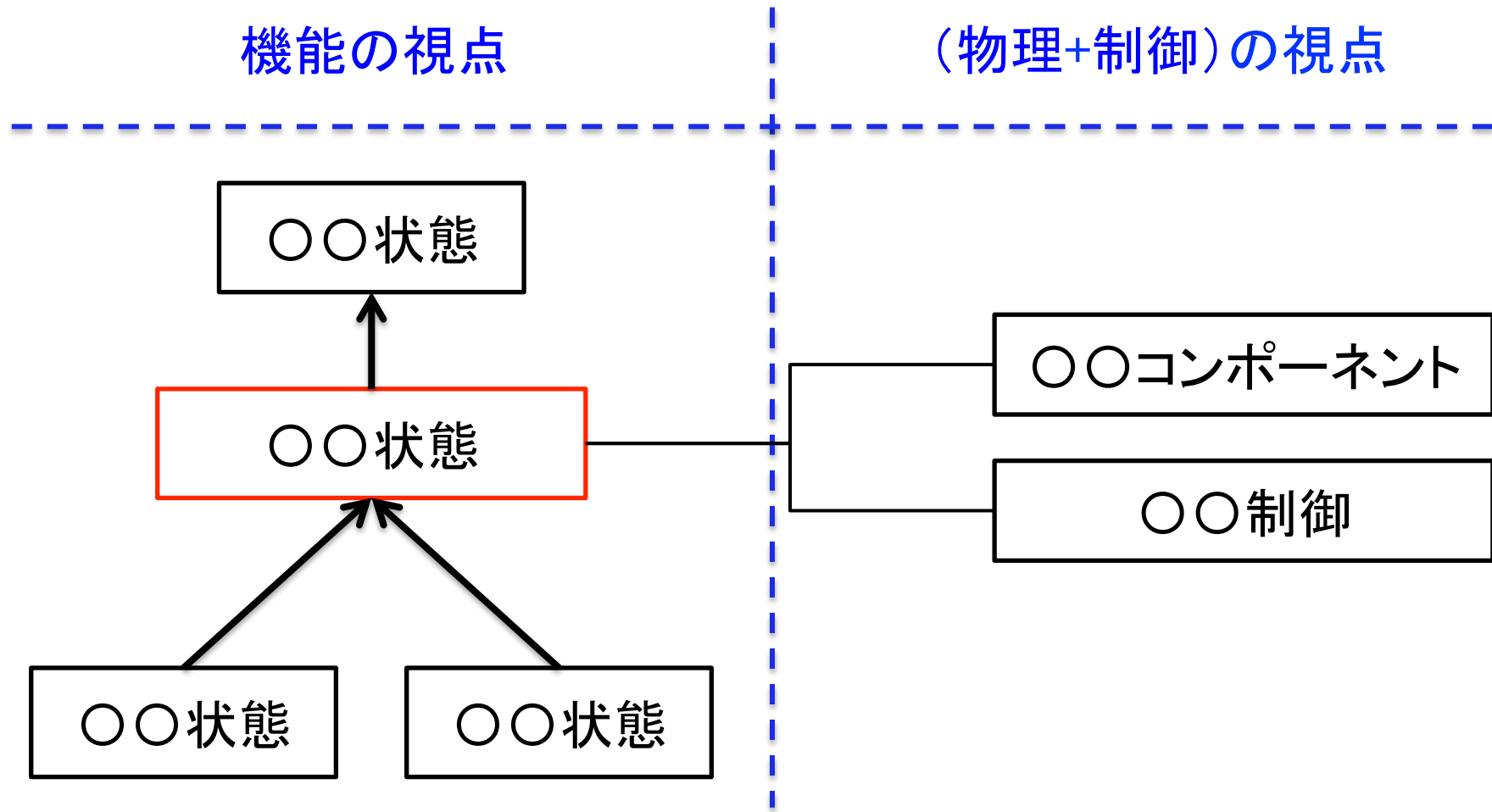


Figure4-20 Concept of Reducing Engine Energy Loss Approach

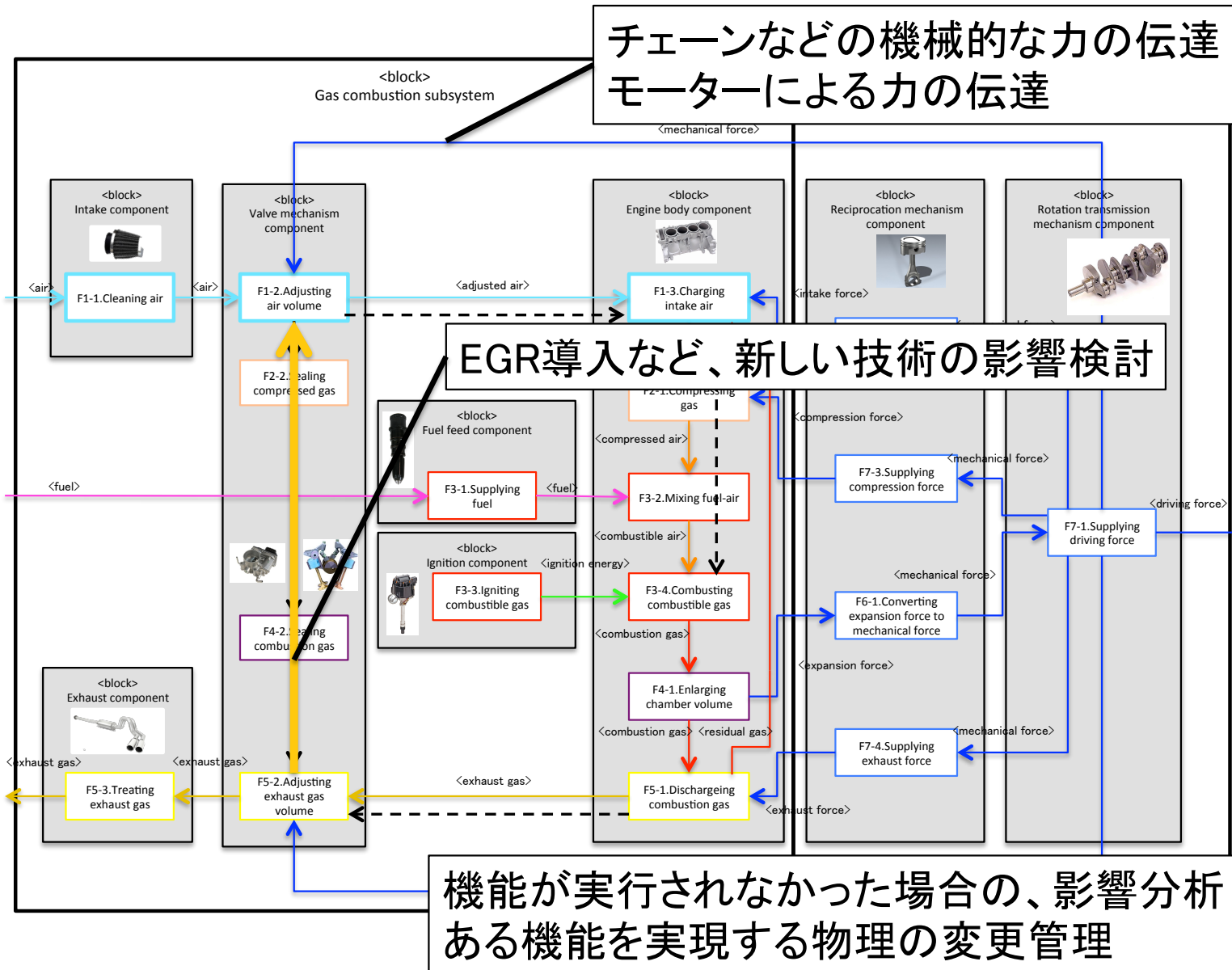


Figure4-21 Trade Study of Engine Heat Efficiency on Architecture Diagram

排気再循環:EGR (Exhaust Gas Recirculation)

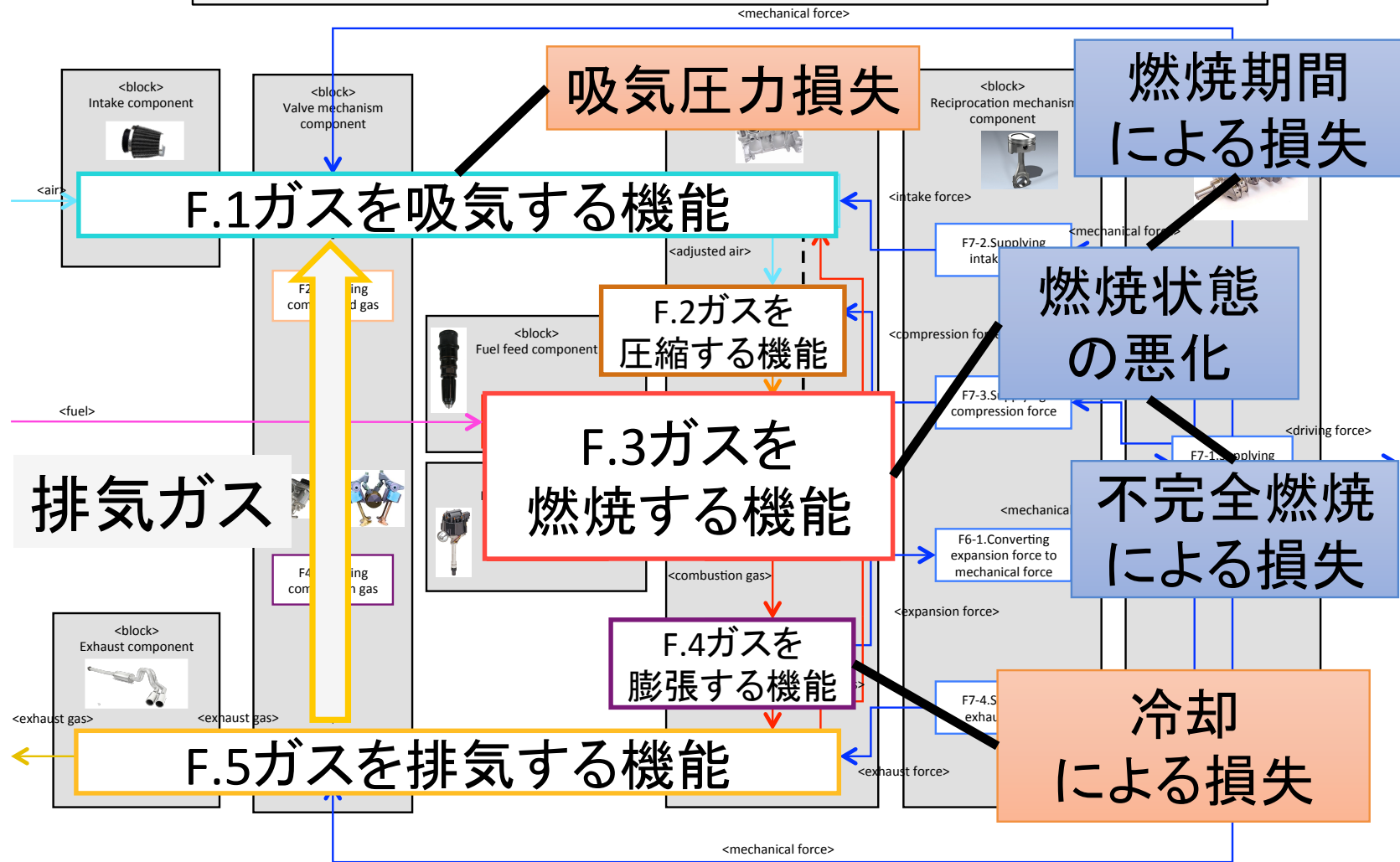


Figure4-22 Impact Analysis of EGR on Architecture

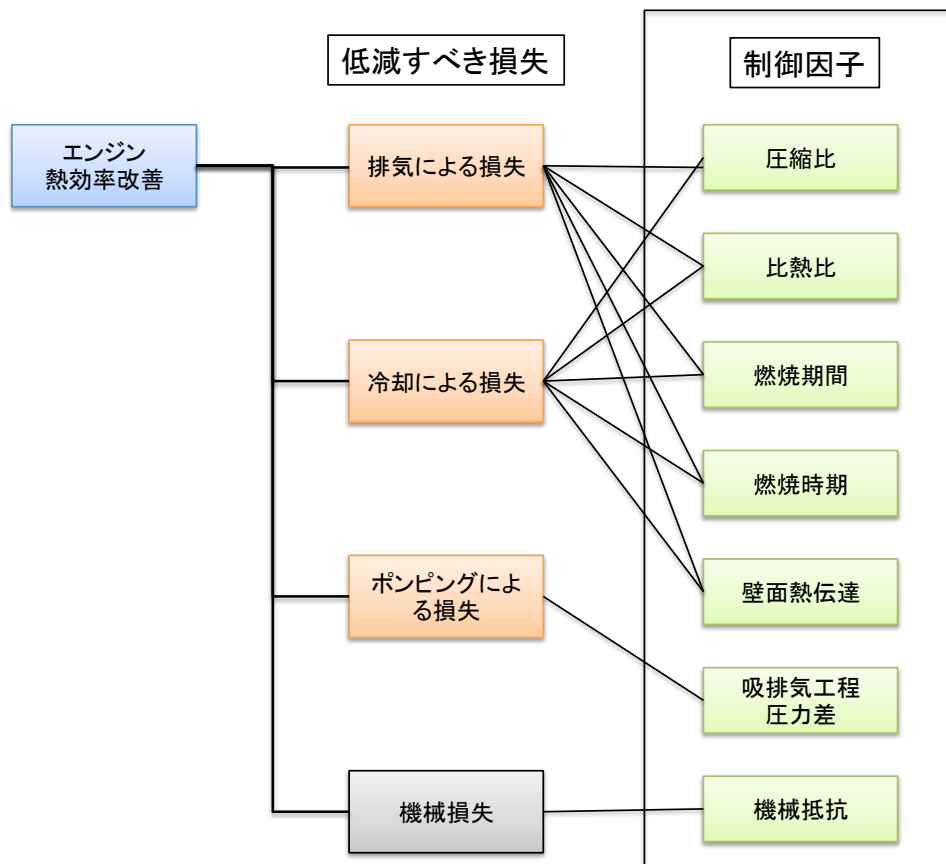
5. 有効性検証

本章では、第4章で明確化したシステムモデルと熱効率低下の要因、熱効率向上技術の関係性を用いた熱効率向上へ向けた考察の正しさを検証する。5.1 でマツダのスカイアクティブ開発でエンジンの効率向上に必要であるとしている7つの因子が、本論文で定義したエンジンアーキテクチャの中で、どのような関係性を表現しているかを明確にすることでアプローチとアウトプットの正しさを検証する。5.2 では、自動車会社3社のエンジン開発を行っているエンジニアとのディスカッションとそれに基づくアンケート調査を行い、開発現場でのシステムモデル活用に関するレビューを受け、定義したエンジンアーキテクチャの有効性を検証している。

5.1 マツダスカイアクティブ開発で用いられた7つの因子とアーキテクチャの関係性

Figure5-1 に示すのは、マツダが SKYACTIV エンジン開発において、指針にした熱効率改善のための7つの因子である。エンジン技術者の数だけ技術提案があるといわれるほど膨大な熱効率向上技術を整理したところ、7つの因子に集中された。マツダはその7つの因子を徹底的に理想状態に近づけることで、究極の内燃機関を完成させるというロードマップを描いた。この7つの因子は「圧縮比」、「比熱比」、「燃焼期間」、「燃焼時期」、「壁面熱伝達」、「吸排気工程圧力差」、「機械抵抗」であり、それらがどの低減すべき損失と関連しているかをこの図では示している[29]。

現状では、エネルギー損失に対して、7つの因子を構造的に表していたが、これでは、制御因子同士の関係性や、エンジンの機能とどのように関係しているか、見えないという問題がある。これに対し、アーキテクチャを表す図があることで、エンジニアが制御因子間の関係性を頭のなかで描きながら考えるのではなく、エンジンの振る舞いを表す図を用いて、因子間の関係性を明確にする必要がある。



効率改善 = 制御可能な因子を理想に近づけていく取り組み

Figure5-1 MAZDA SKACTIVE Engine Development Control Factor

Figure5-2 に、エンジンのシステムアーキテクチャ上で、7 つの因子とエンジンの機能、物理がどのような関係性を有しているかを示す。これにより、7 つの因子で、エンジンのガス流れや力の伝達に関する機能全体で、損失を低減しようとしていることがわかる。

Figure5-3 に、熱効率低下要因の構造の図(Figure4-10)に、Figure5-1 のマツダの7 つの制御因子を当てはめた図を示す。この結果、燃焼期間と比熱比、壁面熱伝達は、燃焼ガス状態に、燃焼タイミングは点火状態に、圧縮比は混合気状態に、吸排気圧力差は吸気状態と排気状態に、機械抵抗は力の伝達状態に含まれることが明確になった。これより、マツダの7 つの因子は、エンジンがコントロールしている8 個の状態（吸気状態、残留ガス状態、燃料状態、混合気状態、点火状態、燃焼ガス状態、排気状態）を理想状態にするのに寄与していることが示せる。今までは、エンジニアの経験からおおよそ、このマツダの7 つの因子はエンジン全体をカバーしているものと考えられてきたが、熱効率低下要因の構造図のように全体俯瞰の図があることで、全体をカバーしているということが出来る。このように、経験や頭の中の考えでコミュニケーションを行うのではなく、モデルを用いることで、根拠のある議論を行うことができる。

ここで、エンジンの熱効率向上に有効な7 つ因子は、長年エンジン開発に携わったことに

よるエンジニアの知識や経験から抽出されるものであり、それに対し、本研究のシステムモデルは、エンジンの熱効率低下の要因を論理的に、網羅的に示したものである。すなわち、機能、物理の観点から熱効率低下の要因を網羅的に導出することは可能だが、それらの要因の中で、どの要因が重要なのかは、長年のエンジニア経験や理論、実験解析などを用いる必要がある。ただし、それを行うにもこのような全体像が見える図は必要である。

2010年に発表されたマツダのSKYACTIV-Gは、量産ガソリンエンジンとしては世界一の圧縮比14.0を実現し、燃費、トルクともに従来比で15%の向上を図った。このエンジンでは、先ほどの7つの制御因子のうち、「圧縮比」、「吸排気工程圧力差」、「機械抵抗」に特に注力し、理想状態に近づけた[30][31]。Figure5-4にアーキテクチャの図でそれらの技術を表した図を示す。まず、赤枠で囲ったF.3-4のガスを燃焼する機能で、燃焼ガス状態を良くするために、諸問題を解決し、橙色の枠で囲った「圧縮比」を14.0に上げた。その結果、吸気バルブを閉じるタイミングを遅らせて、吸気抵抗を減らす青枠で囲った「遅閉じミラーサイクル」の技術を導入しても、燃焼状態の悪化が問題にならない領域が拡大し、ポンピングによる損失を大幅に減らすことができた。さらに、青枠で囲った「力の伝達」でのロスを減らすため、摩擦抵抗の低減や各部品の軽量化、力の伝達方式（ローラフォロアなど）の変更などにより、機械損失を減らした。さらに、これらの熱効率向上技術を導入するにあたり、制御などのソフト面、形状の最適化などのハード面の両面に対して、Figure5-5に示すように様々な技術が導入されている[32]。これらの技術は、個別最適ではなくエンジン全体の効率をうまく上げるように採用されており、アーキテクチャの図からそれらの熱効率向上技術の関係性を把握することが出来る。

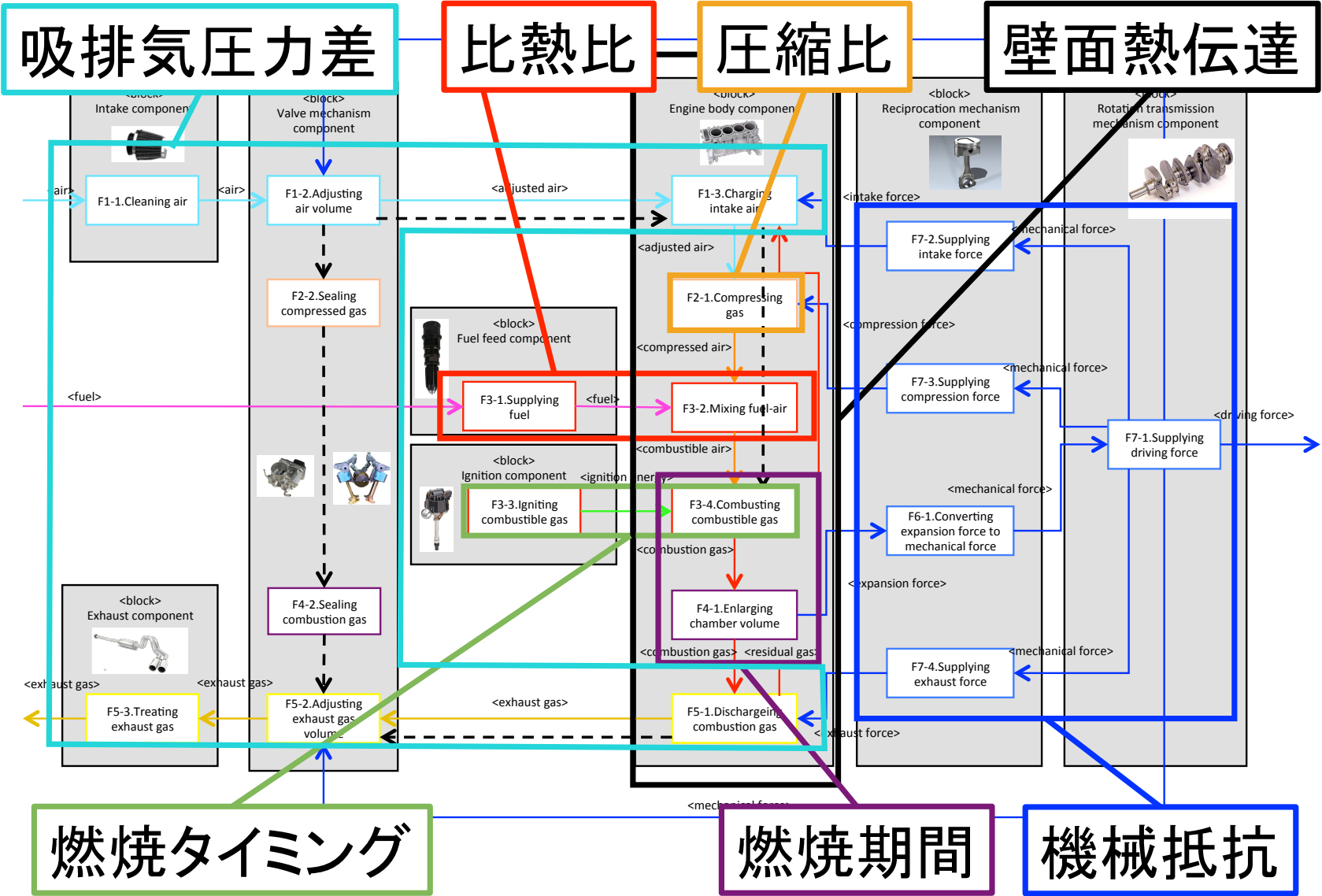


Figure5-2 Engine System Architecture with Emphasis on MAZDA Engine Control Factor

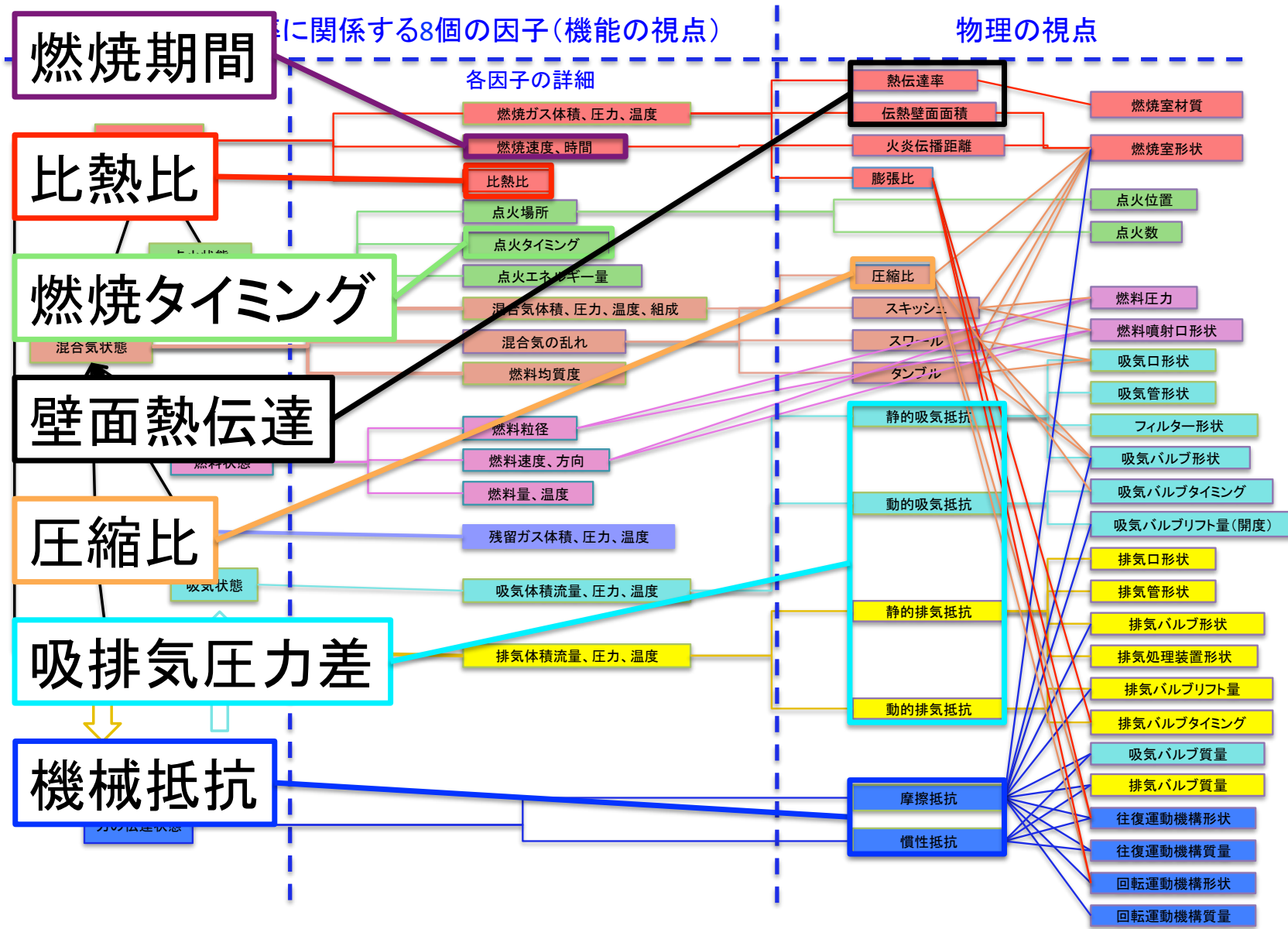


Figure5-3 Detail Energy Loss Factor Structure from Perspective of Function and Physical with MAZDA Engine Control Factor

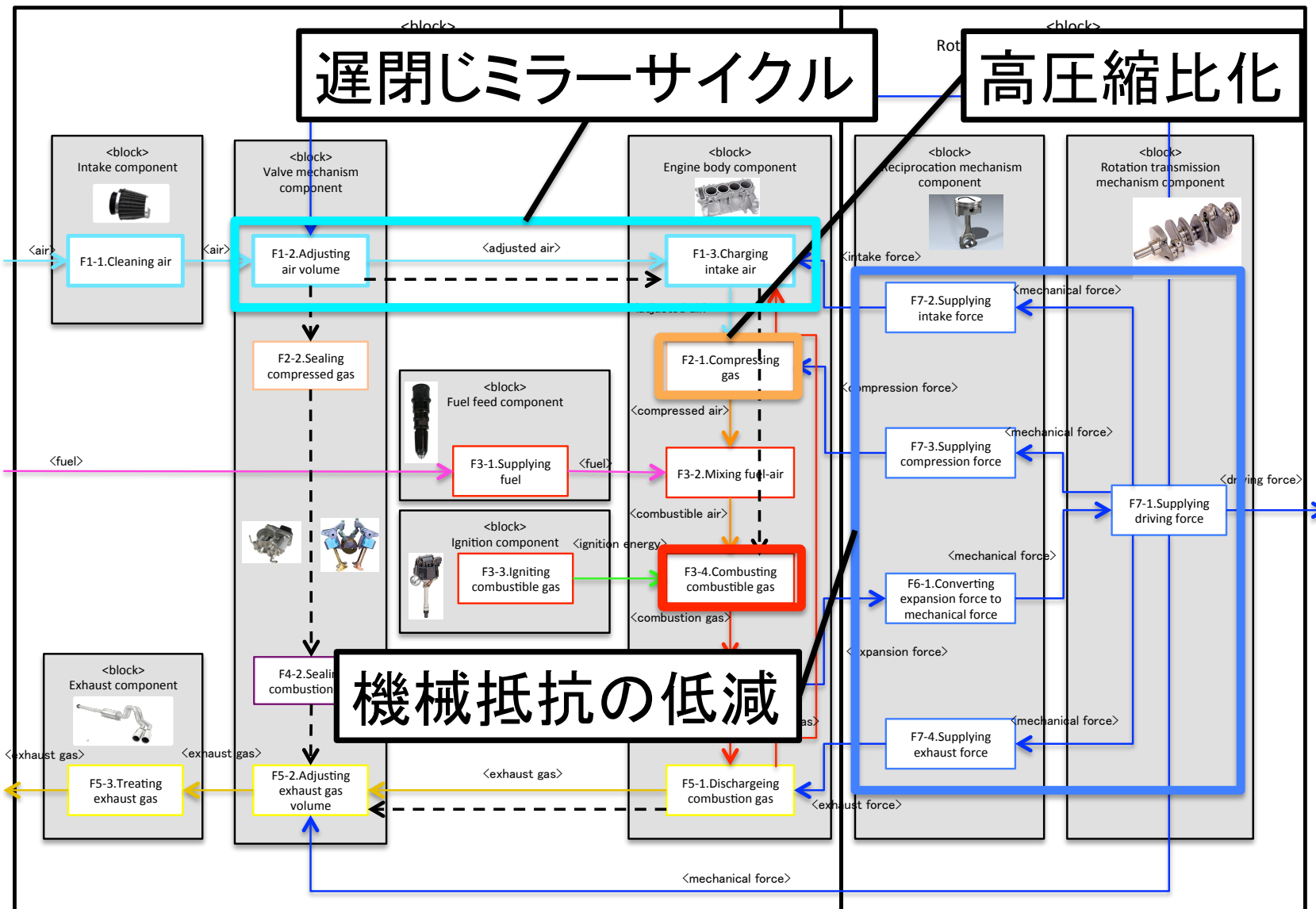


Figure5-4 Engine System Architecture (Component Level) with Emphasis on Heat Efficiency Improvement of MAZDA SKYACTIV-G

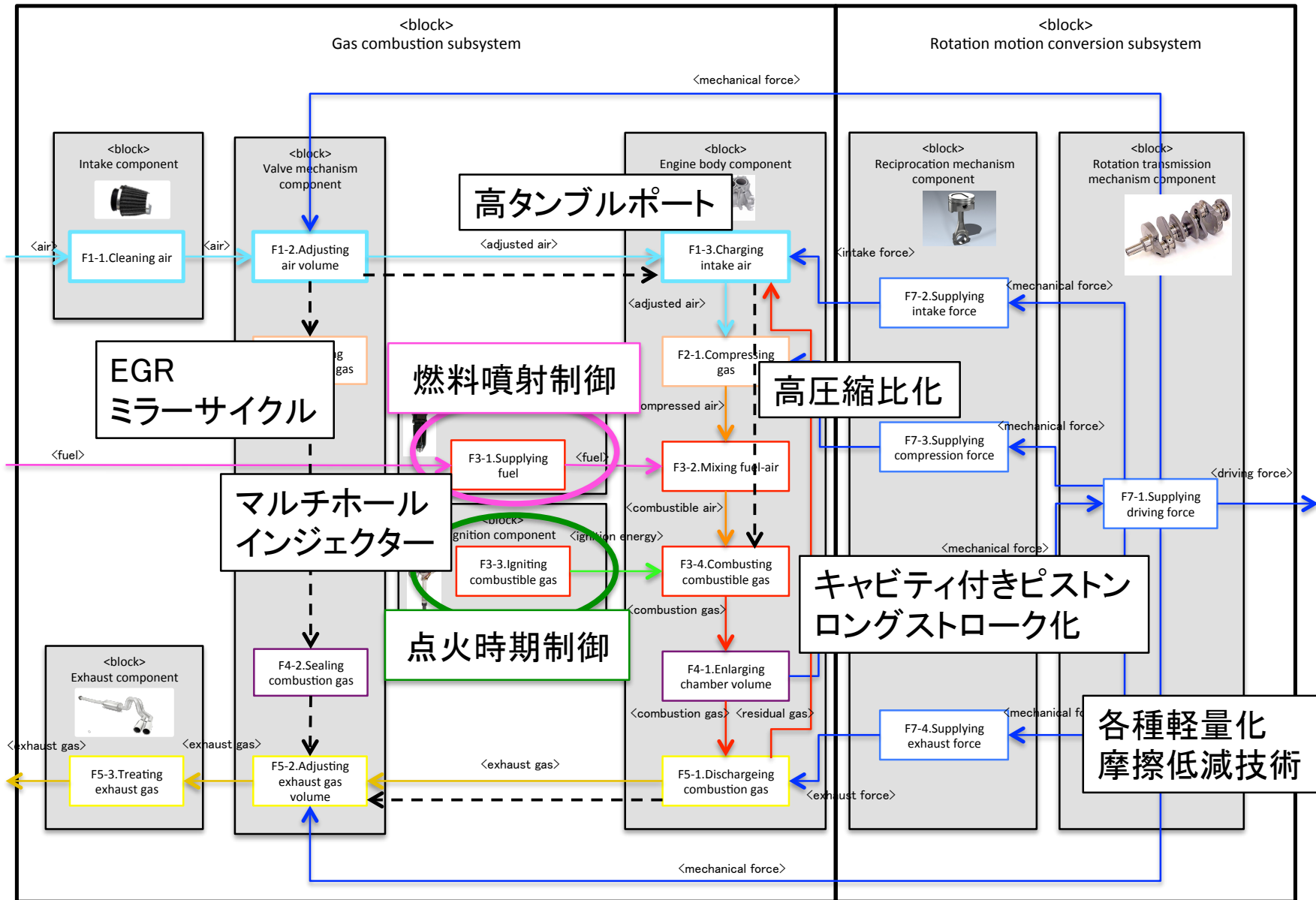


Figure5-5 Engine System Architecture (Component Level) with Emphasis on Technologies of MAZDA SKYACTIV-G

5.2 専門家とのディスカッション

本研究のアウトプットの有効性を評価のために、エンジニアとのアンケートとディスカッションを2016年1月に行った。ここでいう専門家とは、実際に自動車メーカーで開発を行っており、なおかつシステムズエンジニアリングに関する知識を持っているエンジニアを対象としている。Table5-1に示すように、アンケートおよびディスカッションは自動車会社3社、計16名に対して行った。

アンケート内容は大きくバックグラウンドに関する質問とシステムの有効性に関する質問の2つに別れる。バックグラウンドに関する質問は、今までに行ってきた業務分野と大学での専攻、システムモデルに対する有効性に関する質問は、誰にとって、いつ、何をするとき、どのように役立つかについてと開発環境の中でどのようにシステムモデルを用いるかについての4項目についてである。これらは、幅広い意見を引き出すため、複数回答可の自由記述形式にて実施した。

Table5-1 List of Interviewees

A社

会社の規模	中規模
インタビュー人数	7人

B社

会社の規模	大規模
インタビュー人数	5人

C社

会社の規模	大規模
インタビュー人数	4人

A社へのアンケート結果を Table5-2 に、ディスカッション内容を Table5-3 にまとめる。この中で、特に重要なポイントをまとめると、以下のようになる。

- 排気量違いの相似形を開発しようとするときにとても有効である。
- Excel での機能展開を業務で行っているが、全体像がなかなか見えてこない。このようにモデルベースで表現することで、格段に見やすくなる。
- 将来的には、機能や要因同士の関係性が数式で表わされることで、設計パラメータの自動最適化が出来るると便利になる。
- 過渡状態もモデルに組み込むことにより、定常担当者とかと担当の議論に役立つ。
- 損失と要因、アーキテクチャ図との関連性を明確にしたものは、見たことがない。上流設計から下流まで、トレースできることは有意義だ。

排気量違いの相似形とは、排気量の違うエンジンでも同じような特性をもつエンジンの開発を行うことであり、それにより、適合工程において大幅な工数の低減が見込まれる。本研究のシステムモデルは、エンジンの基本的な原理に着目しており、その点から相似形の開発に活かせるという意見がでた。さらに、モデル化の利点である視覚的に全体像を把握しやすくなる点や設計の上流から下流へのトレース、担当者間の議論への有用性といった点が評価された。

Table5-2 Questionnaire Result of A Company

バックグラウンドに関する質問		システムモデルの有効性に関する質問			
研究、開発歴	大学での専攻	Q1.本研究のシステムモデルは、量産・研究開発のどのフェーズで役立つか？	Q2.どのような人たちにとってメリットがあるか？	Q3.何を行うときに、どのように役立つか？	Q4.ITツールとしてどう使うか？
エンジン制御部品3年 パワートレイン企画3年 制御システム開発2年	機械系	コンセプト検討段階で、背反性能を評価する際に、ある機能を高めた時に他の機能がどう悪化するかの影響が見れると思う。	部署間を横断するプロジェクトチーム。全体観が見れるので、畑違いの人にとっての共通言語となりうる。	Q1.に同じ	システムズエンジニアリングのエンジンで、上位の要求、拡張に、機能・物理が上から下へとつながり、それらの妥当性も同時に評価できるSimulationと連携/連生までされていると素晴らしいと思います
エンジン制御18年 EV/HEV5年	機械系	新規エンジンのコンセプト企画・設計フェーズ エンジン開発のドメイン知識がない中で、システムズエンジニアリング手法だけでここまで分析できているのは驚き。	現状ではメリットが出ないので、エンジン開発に携わっているエンジニアと共同で、技術メニューごと効果かどを現実的にして完成させると良いと思う。		
実験6年 制御系の実車テスト(車両系)	建築系	新技術の導入により、設計変更が必要な部品がすぐに分かるような仕組みが欲しいと思っていた。	Q2.の他に、マネジメントは鳥瞰図のような、物事を俯瞰した資料を持って来いとよくいうので、それに使えそう。		
エンジン冷却系機械設計 3年 FCV設計10年	機械系	研究開発フェーズおよび技術企画フェーズ	技術開発領域のマネジメント。現在の技術開発の方向が正しいかを見極め、自社の技術開発方向を決める人。 ただしこの領域のまとめ方は、パワートレインの燃焼開発に携わる人なら、末端まで必要な思考の整理法であり、どの領域でもあれば有用	技術開発の方向性を決めるとき 技術開発に行き詰まり、新たな方向性を探るとき、 新たな因子を探るとき	思考を整理し、上位者とレビューするだけなら、A0の紙とポストイットで書いただけが良い。自由に柔軟に考えることが大事。細かい検討はひたすら手で行い、最後の結果のみPPTにのせ、レビュー等で使う。 シミュレーションと組み合わせるのを無理に行う必要はないと思う。
マンマシンシステム研究 20年 EV開発3年 車両運動制御5年	機械系	物理アーキテクチャの設計、機能配置の最適化	ユニットの機能、性能仕様を決める所。 変更点が管理できる。	ユニットの機能・性能仕様に基づきが示せる。 変更対象の影響範囲がわかる。	機能、性能に関係するユニットやスペックがわかる。 シミュレーションでスペックを最適化する。
水素ロータリーHEV制御 開発3年 EV制御開発3年	物理系	量産系の不具合対策にも役立つと思う(開発した人がいなくなったときなど)	個人:対象の理解 部署内のチーム:情報共有 部署間でのやりとり:責任範囲の明確化	Q2と同じ	
パワートレイン制御20年		要素技術だけでなく、量産開発においても役立つと思うが、情報としてRichな状態で、どう個々の情報に重み/優先順位を付けて活用するかが、そこから重要と思う。	スペシャリストから新人への伝承に効果があると思うが、むしろ、10年に1度の新しいアーキテクチャを検討し、マネジメントに承認を得る場合にも、可視化という視点で有効と思う。	システムの構造分析から部品の検討を行うときには、必ずどこかでトレードオフの検討が必要。この時に、個別の検討ではなく、システムモデルと結びついていれば、企業としてはうれしい。 今回の検討からなにかツールの一本化に向けた提言ができるとう良い・エンジンの運転はほとんど過渡状態なので、それもモデルに組み込めたらもっと実用的になってくる。	

Table5-3 Discussion Result of A Company

A社ディスカッション内容
<ul style="list-style-type: none">・業務で機能展開図を書いているが、全体像がなかなか見えてこないこともある。このように表現できていることはすごいと思う。・エンジン開発経験のない学生がここまで出来るのはすごい。・将来的には要因同士の関係性が数式で表わされることで、自動で設計パラメータの最適化を行ってくれると良い。・そうしたら、GT Powerなどのシミュレーションと繋がってさらに良い。・トレードスタディできるのではないか。・排気量違いの相似形を開発しようとするときにとても有効であると思える。・過渡領域での議論をもっとできるようになると良いのに。そのときに、本体の情報を持っている人間と、制御する人間が議論できるようになる。・例えば、定常担当とかと担当で意見がよくずれる。このモデルで過渡をどう捉えると良いかを考えると良い。・損失の原因とトレースが取れていることは素晴らしい。このように関連性を明確にした図は見たことがない。

B社へのアンケート結果を Table5-4 に、ディスカッション内容を Table5-5 にまとめる。この中で、特に重要なポイントをまとめると、以下のようになる。

- 熱効率の低下要因と損失をアーキテクチャから導出したことで、根拠のある繋がりを示したことは、は大きな成果といえる。
- 全体俯瞰のメリットとして、それぞれの影響範囲の明確化とアイデア創出の2点があげられる。
- 要因のツリー構造から要求を導出出来るのではないか。
- スカイアクティブ開発は損失に影響する要因を定義し、分解しているが、要求からアプローチしたら新しいアイデアが出てくるのではないか。

先ほどのA社とは違い、B社とのディスカッションではシステムモデルを開発の効率化というよりは、新しい技術要素の開拓に用いるメリットについて考える方が多い結果となった。このことから、会社の規模や方針に応じて、システムモデルの活用方法が変わってくることを示している。つまり、ISO42010にあるように Stakeholder の Concern に応じた Architecture Description (システムモデル) を考える必要がある。また、ディスカッションの中で、エンジニアは、要因分析は得意だが要求分析は苦手という意見も出てきた。こうしたモデルを用いて、顧客の要求から各要因に結びつけることで、さらに要求を考えた設計や研究開発を行うことができるようになる。

Table5-5 Questionnaire Result of B Company

バックグラウンドに関する質問		システムモデルの有効性に関する質問			
研究、開発歴	大学での専攻	Q1.本研究のシステムモデルは、量産・研究開発のどのフェーズで役立つか？	Q2.どのような人たちにとってメリットがあるか？	Q3.何を行うときに、どのように役立つか？	Q4.ITツールとしてどう使うか？
エンジンテスト20年 開発効率向上 担当7年	機械系	システムモデルは「なぜ」を「なに」にすること。 多数の人が共有できることが重要と考えるため、すべてのフェーズで使えるものを目指すべきと思う。	システムモデルは様々な視点で利用可能と考えるため、そういった利用を逆にすべきと思う。	「なぜ」、「何」をやったかを説明できるため、多くの場面で使えると思う。	再利用を考えたツール化をする必要が有るため、ITのちからは必要だと考える。
リサーチ部門	情報系	量産開発での問題解決、コミュニケーション、トレードオフ分析	部署間、性能領域と設計領域、視点の異なる人達のコミュニケーション		ITツールとして考えた場合、全体のシステムモデルとして整合性を保ちつつ、視点ごと、もしくはロールごとに必要な情報を提示したり、編集できるひつようがあると思う。プロセスと連携させて、コンカレントかつイタレーティブに扱えると思う。
IT系20年	理学系	研究開発 議論	部署内でのチーム	同じ絵を見て議論ができる が大切である。	ツールもあるが、エンジニアの頭のなかを整理することがより大切なことだと思う。
エンジン制御系20年		コンセプトベースの整合等のスタート時	部署内のチーム	全体感を総合的に繋げられると新しいアイデア創出に繋がるかもしれない	現状不明
機構CAE5年 流体、性能1年 エンジン開発3年	電気電子系	リサーチの研究、アイデア創出 量産開発の因子の関係性	部署間のやり取り、機能間のやり取り、教育	弾みを分析するとき 新しい技術の開発	燃焼が大事であれば、そこから決めて開発するプロセスを組み込むのに使える。 教育
エンジン性能設計・ 計算10年 エンジン性能研究・ 計測9年	機械系	研究テーマの創出フェーズ エンジン企画フェーズ 製品開発、企画段階	①基礎研究者と製品開発者 ②プロジェクトメンバー(設計・試験・制御メンバー) ③技術戦略を検討する企画室メンバー	①特に研究の価値議論と研究テーマの創出において ②しよとテスト結果の考察を行う議論のプラットフォームとして ③企画シミュレーションによる技術・商品ロードマップ作成において	

Table5-5 Discussion Result of B Company

B社ディスカッション内容
<ul style="list-style-type: none"> ・損失と8個の要因の関係が、なぜ、どうやってつなげたかが明確にトレース出来ることが、システムモデルの肝なのではないか。 ・システムモデルというのは、正しさを保証するものであり、いつ使うかやどこで使うかはあまり重要ではないのではないか。 ・根拠のある論理的な記述ができているということを示せると良い。 ・自分で新しいことに気が付かなくても、モデルを見てアイデアを持つ人はたくさんいる。これがモデル化の意味ではないか。 ・論拠のあるモデルを用いて議論することで、無駄な議論が減る。 ・燃料状態のところでは噴射タイミングがとても重要(これが燃焼期間に効いてくる) ・③は逆のような気がする。例えば、リーンバーンが〇〇という損失を減らすと言うよりは、「〇〇という損失を減らすにはリーンバーンが良いのではないか」ということが、このシステムモデルから導ける」という表現にするほうが良いのではないか。 ・可変バルブリフトはもともと吸気損失を減らすためではないため、今回の熱効率の観点からのシステムモデルでは、導出できない気がする。 ・マツダのスカイアクティブ開発は、要因から攻めている。逆に要求からアプローチをしたら新しい物が出てくるのではないか。 ・要求と要因モデルはにているのではないか？ ・今は要因はパラメトリックなものとして扱っている。エンジン開発のエンジニアは、要因分析はみんな得意だが、要求分析は苦手である。 ・全体俯瞰のメリットは2つあり、1つめは、システムモデルと熱効率低下要因、熱効率向上技術の3つがお互いの関係性を明確にし、何かが変わった時にどこに影響が及ぶのかがわかるようにすること。2つめは、アイデア創出。

C社へのアンケート結果を Table5-6 に、ディスカッション内容を Table5-7 にまとめる。この中で、特に重要なポイントをまとめると、以下のようになる。

- 先行開発の場合、1つの技術に着目することが多いので、視野が狭くなりがちだが、システムモデルがあることで、他への影響の検討がしやすくなる。
- 全体俯瞰のモデルがあることで、部署間でのコミュニケーションがスムーズに進む。そして、詳細な部分は熱効率低下の要因図で議論すると良い。
- 新人教育にも活用できるのではないか。

今まで、エンジン全体の機能と構造を表したアーキテクチャの図がなかったので、このような図があると、エンジンに詳しくない人とでも意思伝達が容易になるという評価を得た。さらに、視野が狭くなりがちな先行開発でもシステムモデルを用いることで、開発の周辺との関係性が明確になり、量産開発につながりやすくなるとの意見がでた。また、システムモデルは複雑なエンジンの全体像を把握するのに最適で、新人教育に活用できるのではないかとの意見もあった。

Table5-6 Questionnaire Result of C Company

バックグラウンドに関する質問		システムモデルの有効性に関する質問			
研究、開発歴	大学での専攻	Q1.本研究のシステムモデルは、量産・研究開発のどのフェーズで役立つか？	Q2.どのような人たちにとってメリットがあるか？	Q3.何を行うときに、どのように役立つか？	Q4.ITツールとしてどう使うか？
エンジン設計18年	通信系	精度が上がれば量産設計で使えそう	熱性能設計 エンジン性能設計	仕様検討時の成立性	部品手配前の性能適正度確認 シミュレーションとの関連は、モジュール化とスペック変更のトレースができる状態で行うと良い
トランスミッション制御開発9年	電気系	研究開発で使えそう。専門技術開発をして視野が狭くなっている人が影響範囲を考慮した性能の検討ができるようになる。	部署間(主に違う専門性を持つ人)でのやり取り。プロジェクト開発(先行開発での影響範囲が見れるので、量産が楽になる。)	関係者との議論 個人での検討だけであればモデル化しなくても頭に入っている。	システムモデルとシミュレーションの連携
エンジン開発10年	機械系	量産と先行開発両方使えそうと考える。	部品設計者	部品変更、システム変更時の影響範囲の検討	アーキテクチャ図をもでるとして、シミュレーションできれば、ものづくりをしなくてもある程度Studyできると思う。。
ブレーキ設計5年 インバータ設計4年 エンジン1年	電気電子系	量産開発、派生開発のベースに使用	部署担当者のコミュニケーション 設計抜け漏れチェック	システム変更時の影響分析 新人教育	設計時のベースとして活用できるかも

Table5-7 Discussion Result of C Company

C社ディスカッション内容
<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="224 438 2016 502">・実際のエンジンでは、損失は熱や振動や音といったエネルギー伝達があるが、その経路等はどう表わされるのか。<li data-bbox="224 582 2016 678">・現場である現象に対する因子分解は行われているが、アーキテクチャの図を考えて因子分解を行うことで全体が見れるのではないか。<li data-bbox="224 726 2016 821">・アーキテクチャの図があると、エンジンを知らない人とも議論ができる。これと詳細な因子同士の関係性を表す細かい図と組み合わせると効果的ではないか。<li data-bbox="224 869 2016 965">・先行開発では、どうしてもある技術に特化するため視野が狭くなってしまう。このため、アーキテクチャの図があると他への影響も考慮することが出来るのではないか。

以下では、アンケート結果のまとめについての考察を行う。

Figure5-6では、「Q1.システムモデルはどのフェーズで役立つか？」の質問についての回答人数と回答をまとめた棒グラフを示す。回答が1番多いのが「企画コンセプト段階」、次いで「設計段階」、「解析段階」、「すべてのフェーズ」、「不具合対策」となっている。やはり、システムモデルは初期検討に役立つという意見が多かった一方で、設計、解析、不具合対策といった使い方によってはすべてのフェーズでの使用可能性も示唆されている。

Figure5-7では、「Q2.システムモデルはどのような人たちにとってメリットがあるか？」の質問についての回答人数と回答をまとめた棒グラフを示す。ここでは、「個人」での思考整理、「チーム内」での意見の統一や「異なる部署間」でのコミュニケーションを行う人にメリットが有るとの回答が多かった。

Figure5-8では、「Q3.システムモデルは何を行うときに役立つか？」の質問についての回答人数と回答をまとめた棒グラフを示す。ここでは、「コミュニケーション」、「企画、方向性検討」、「影響分析」を行うときに役立つという意見が多かった。さらに、なぜ？と問われた時の根拠となる情報のトレースへの活用やエンジンの全体像把握や新人教育に役立つという意見も出てきた。

Figure5-9では、「Q4.システムモデルをITツールとしてどのように活用するか？」の質問についての回答人数と回答をまとめた棒グラフを示す。ここで、1番多い意見は「シミュレーションとの連動」であった。やはり実際の開発現場では常に効率的に、物事を進めていかなければならないため、既存のシミュレーションに繋がるようなシステムモデルの構築は必須である。その他には、「パワーポイント上での検討で十分」といった意見や「評価・検証プランへの活用」や「要求との結びつき」、「開発プロセスの検討」といった意見もあった。

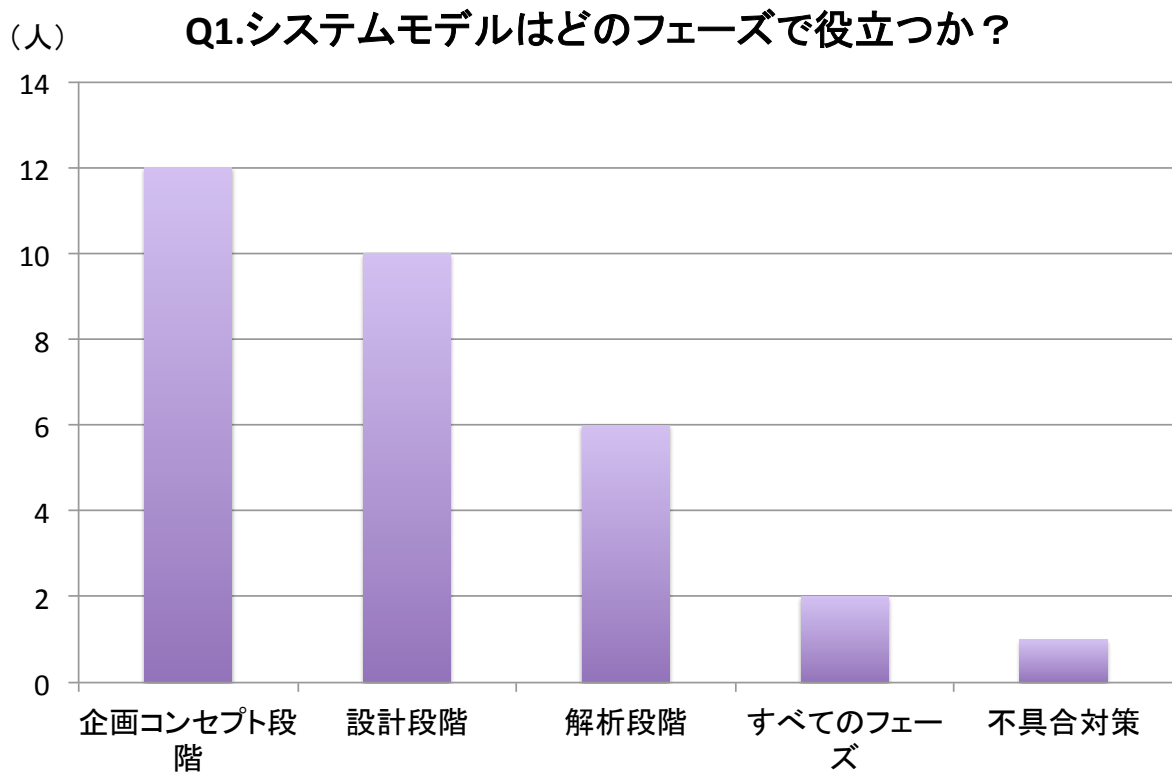


Figure5-6 Questionnaire Result of Question1 about “When is system model useful?”

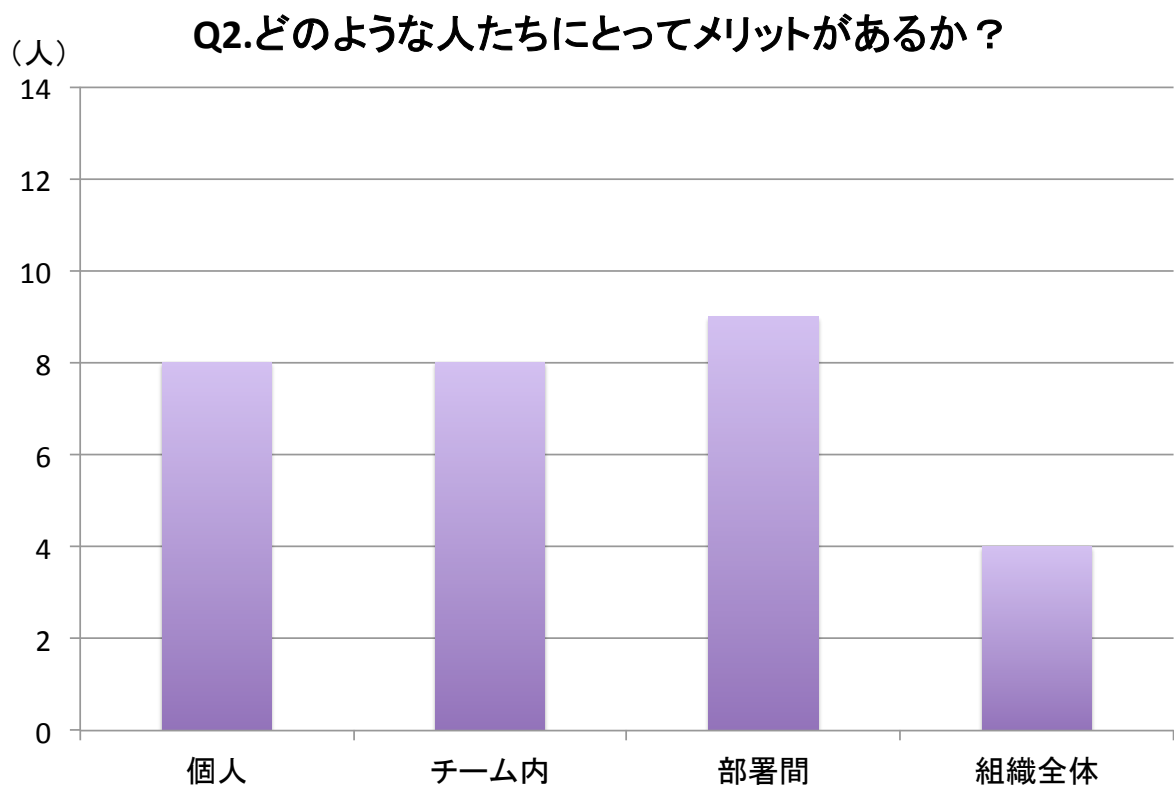


Figure5-7 Questionnaire Result of Question2 about “Who will get benefit from system model? ”

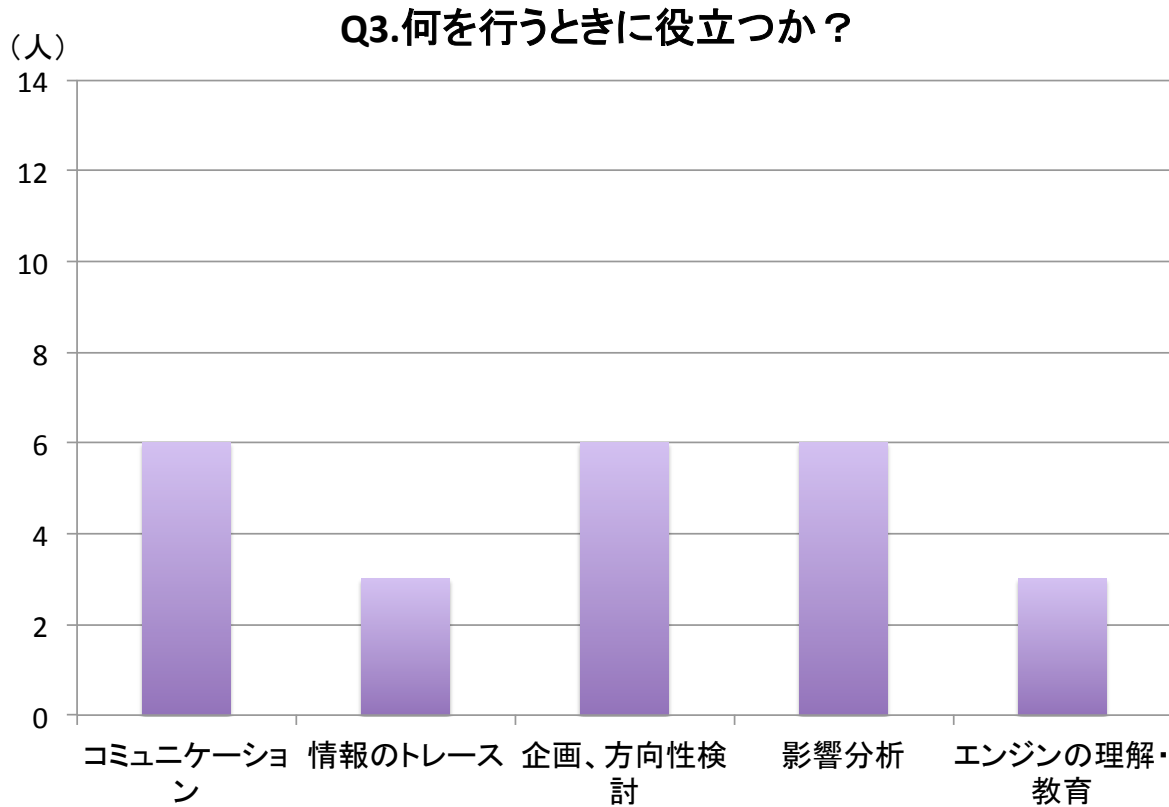


Figure5-8 Questionnaire Result of Question3 about “What is benefit from system model? ”

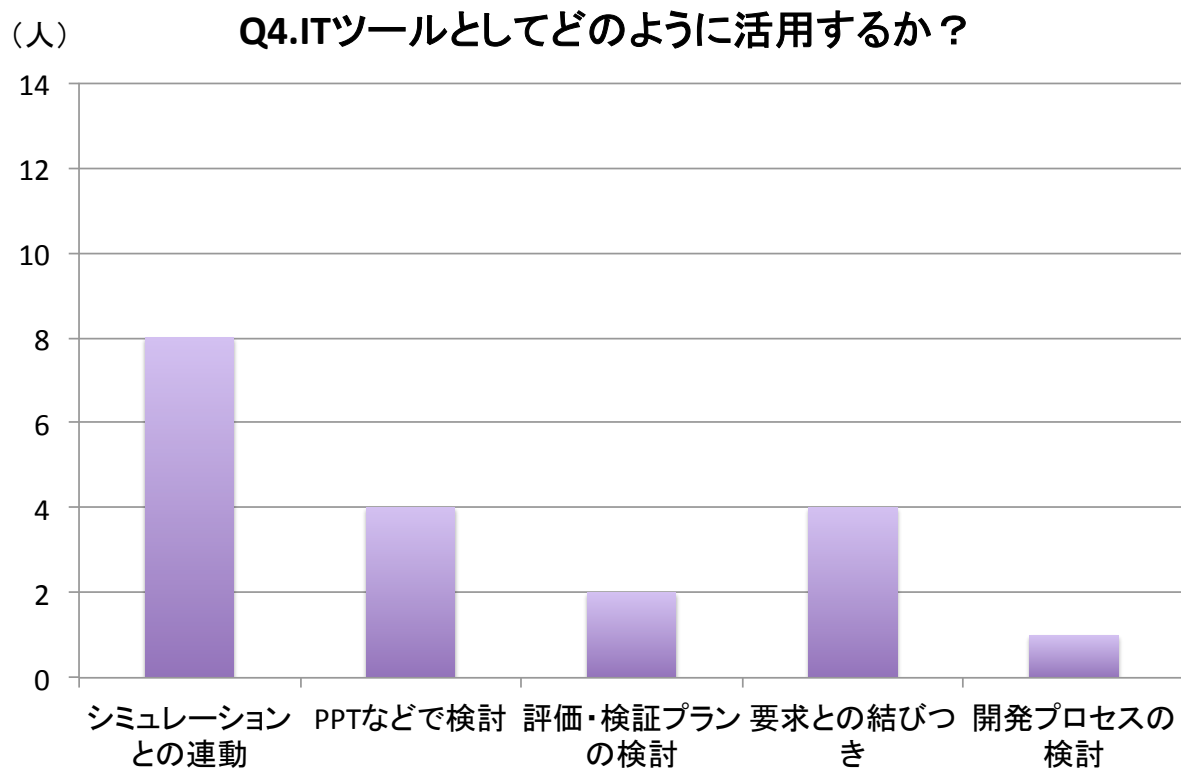


Figure5-9 Questionnaire Result of Question4 about “How use system model as a IT tool? ”

さらに、会社ごとに分類したアンケート結果を Figure5-10,11,12,13 に示す

Figure5-10 では、A 社は開発の初期段階でシステムモデルを活用する意識が高かった。対照的に C 社では、設計や解析段階での検討に用い用途する意識が高いことが見受けられる。

Figure5-11 では、会社の規模が大きい B,C 社ほど部署間のコミュニケーションに役立つと答えていることがわかる。

Figure5-12 では、システムモデルの活用の幅が広いため、各社のエンジニアが多様な活用方法を記述した。

Figure5-13 では、実際の開発現場で使用するために、現状の設計、解析に用いるシミュレーションとの連携が期待されていることがわかる。

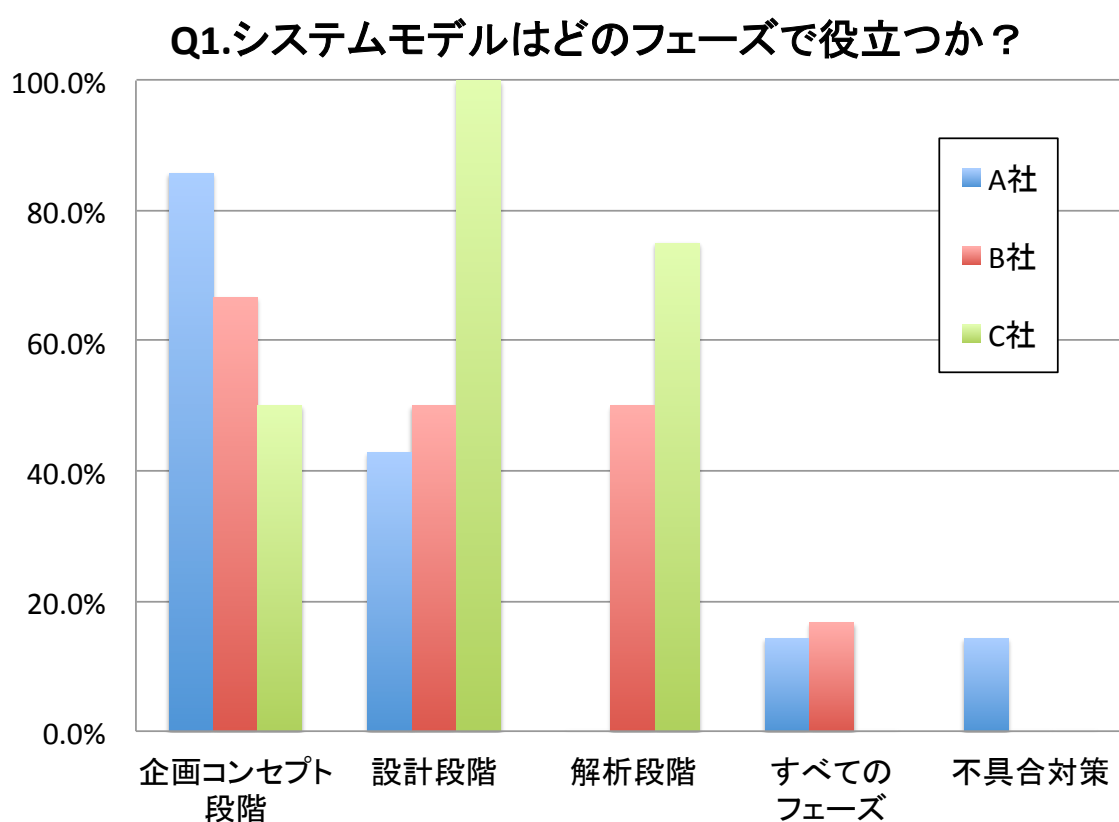


Figure5-10 Each Company Questionnaire Result of Question1 about “When is system model useful?”

Q2.どのような人たちにとってメリットがあるか？

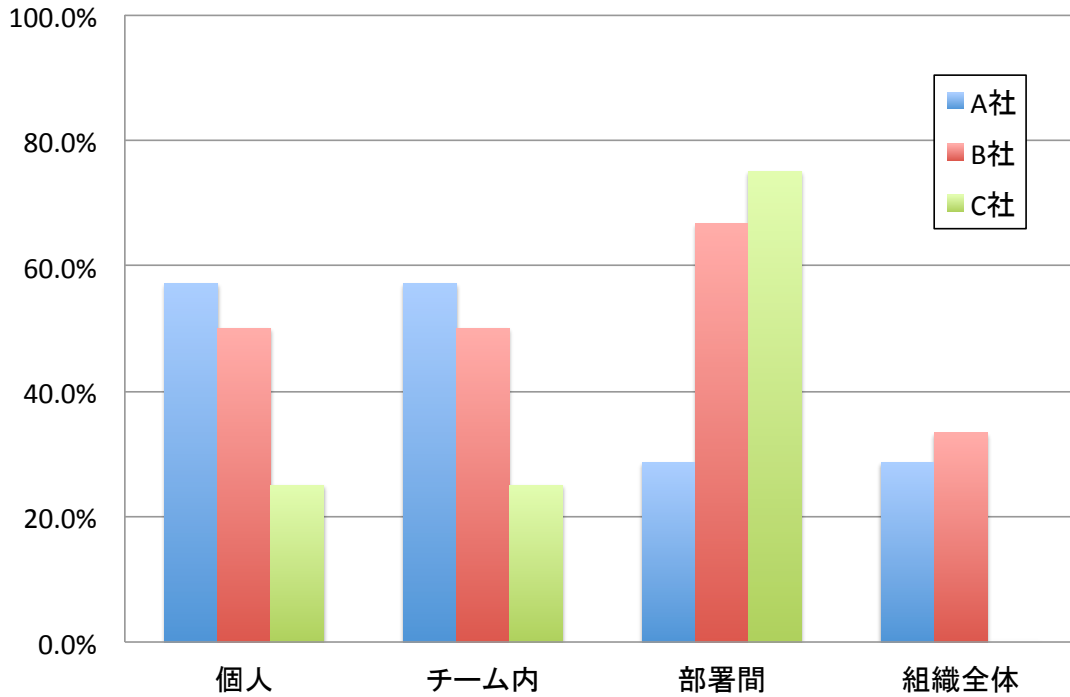


Figure5-11 Each Company Questionnaire Result of Question2 about “Who will get benefit from system model? ”

Q3.何を行うときに役立つか？

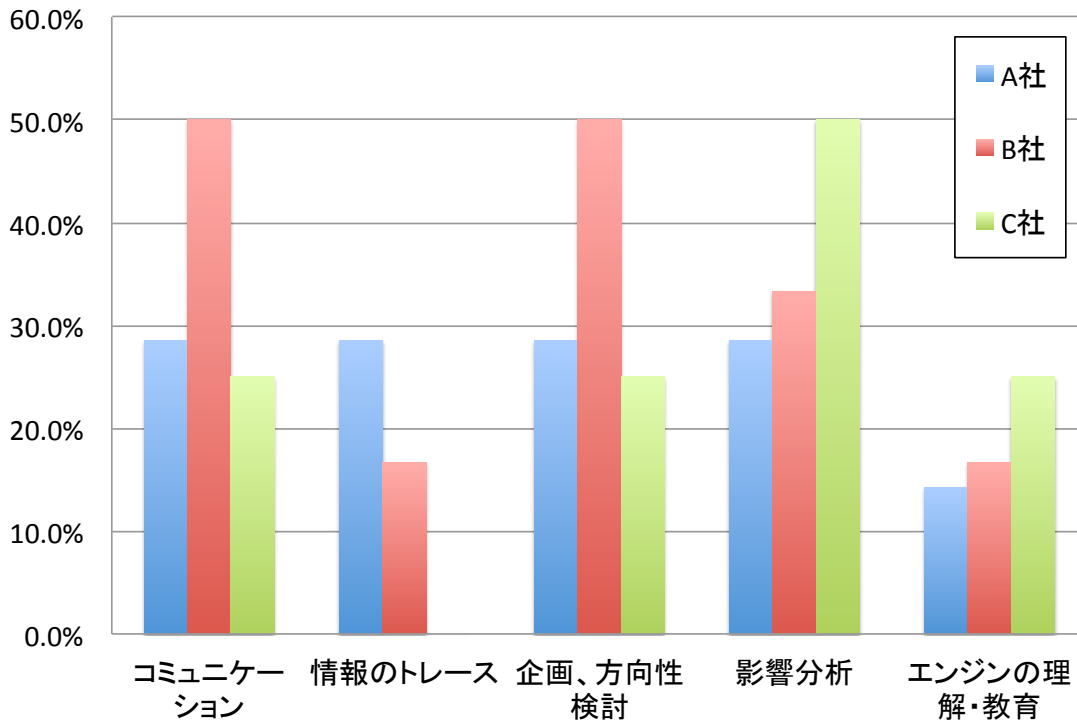


Figure5-12 Questionnaire Result of Question3 about “What is benefit from system model? ”

Q4.ITツールとしてどのように活用するか？

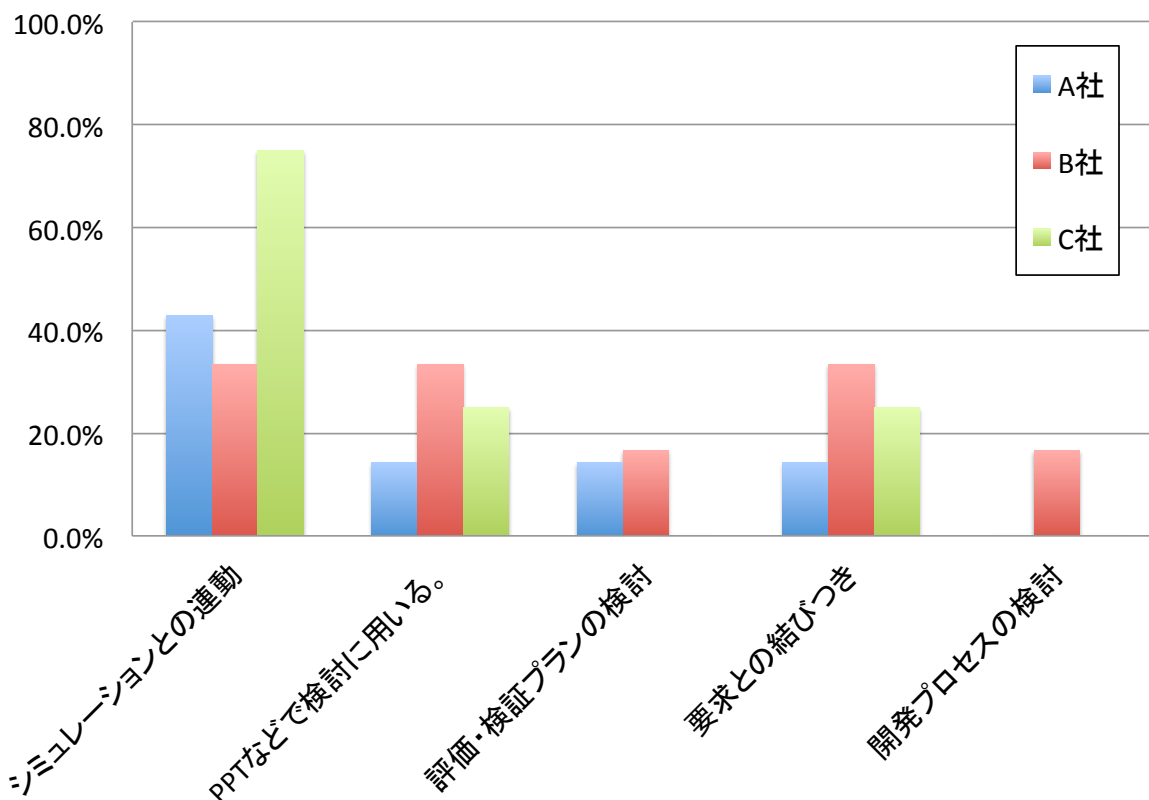


Figure5-13 Each Company Questionnaire Result of Question4 about “How use system model as a IT tool? ”

6. 結論と今後の展望

本論文では、システムモデルは、対象のエンジンシステムを熱効率の観点から捉え、アーキテクチャ記述を行った。これにより、熱効率低下の要因に対してそれを防ぐ技術を導入するというこれまでの対処療法的な検討に代え、システムモデルを用いてエンジン全体への影響を把握しながら、熱効率低下の要因に対する解決策の検討を行う方法論を提案した。

システムモデル活用の有効性を検証するために、自動車会社のエンジン開発を行っているエンジニアとディスカッションやそれに基づくアンケート調査を行った結果、誰にとって、どのようなことに役立つかといった具体的なメリットを明らかに示すことができた。

今後の展望としては、本論文では範囲外とした熱効率以外の出力、エミッション、質量、コストなどの観点や過渡状態、環境などの外的変化の観点をシステムモデルに加えていき、抜けもれなくアーキテクチャを検討していく必要がある。さらに、エンジニアから、システムモデルはエンジン開発に有効であるとの意見が得られたが、実際に企業レベルで導入していくためには、まずは部署単位で、開発プロセスにシステムモデルを活用していき、実績を積み上げていく必要がある。そのためには、今開発現場で用いられているシミュレーションや解析などの開発環境とシステムモデルをうまく融合させていく必要がある。

また、ボトムアップで、成果を積み上げていくだけでなく、トップにも、重要性を理解させる必要がある。このあたりは、会社の中でのキーマンの存在や会社の状況などにも依存するが、新しい開発プロセスを適用するには、戦略的に考え方を浸透させていく必要がある。

今日のエンジンの複雑さは日々増加しており、現状の開発では、QCDを守る開発が厳しくなっている。そんな中で、モデルベースシステムズエンジニアリングのアプローチは自動車業界で、注目されつつある。本研究が、正しくシステムズエンジニアリングを理解することの助けになり、今後さらに多様な分野で、システムズエンジニアリングが普及していくことを望む。

7. 謝辞

本研究を行うにあたっては、多くの方々からご支援とご協力を頂きました。この場を借りて、心よりお礼申し上げます。

まず、本論文の主査であり、指導教員として2年間ご指導頂きました、西村秀和教授には、深く感謝申し上げます。先生のご指導のおかげで、システムズエンジニアリングを中心に多くのことを学ぶことができ、成長することができました。ありがとうございました。

副査の当麻哲哉先生には、お忙しい中お時間取っていただき、研究に対して、有益なアドバイスを数多く頂くことができました。ありがとうございました。

石橋金徳特任助教には、自動車エンジンとシステムズエンジニアリング両方の分野の相談に載っていただきました。当初は思ってもみなかった研究結果が出せたのも、石橋先生のおかげです。本当に心から感謝申し上げます。

また、本研究の有効性検証のために、お忙しい中たくさんの自動車会社のエンジニアの方々のご協力をいただきました。自動車エンジンの開発経験のない私の足りない部分を補完するような、貴重な意見を聞くことができ、研究を深めることができました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

最後に、日頃の学生生活をともに過ごさせていただいた西村研究室の皆様、他研究室の皆様にも深く感謝いたします。おかげさまでとても有意義な学生生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] IEA (International Energy Agency), “Energy Tehnology Perspectives 2012”: Pathways to a Clean Energy System
- [2] 経済産業省 製造産業局 自動車課, 「自動車産業をめぐる構造変化とその対応について」, (2015)
- [3] 経済産業省, 「第一回高度情報化社会における情報システム・ソフトウェアの信頼性及びセキュリティに関する研究会」, (2008)
- [4] Kevin Forsberg, Hal Mooz, Howard Cotterman, Visualizing Project Management : Models and Frameworks for Mastering Complex Systems, 3rd ed, p.109
- [5] ISO/IEC/IEEE Std 24765. “Systems and Software Engineering—Vocabulary.” (2010): 1-418
- [6] ISO/IEC/IEEE Std 42010. “Systems and Software Engineering—Architecture Description.” (2011) : 1-46.
- [7] IEEE1220.”IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process.” IEEE Std 1220-2005 (2005) : 1-87
- [8] Friedenthal, S., A. Moore, and R. Steiner.”A Practical Guide to SysML : The Systems Modeling Language” , (2012)
- [9] 独立行政法人 情報処理推進機構, 「組み込みシステムの先端的モデルベース開発実態調査」, 調査報告書, (2012)
- [10] OMG.”OMG SysML”, accessed 2016/01/11, <http://www.omg.org/spec/SysML/1.4/>
- [11] INCOSE, Corporate Advisory Board (CAB) Organization, [accessed, 2016/01/11], <http://www.incose.org/ChaptersGroups/CAB>
- [12] INCOSE, “INSIGHT”, December 2009, Volume 12, Issue 4
- [13] INCOSE, ”International Workshop”, [accessed, 2016/01/11], <http://www.incose.org/newsevents/EventIW>
- [14] SIEMENS, ”Partner Search Results”, [accessed, 2016/01/11], http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/partners/partnerSearchResults.
- [15] INCOSE International Symposium,20-23 June 2011,Denver CO, USA, “Satellites to Supply Chains, Energy to Finance-SLIM for Model-Based Systems Engineering” ,Part1:Motivation and Concept of SLIM
- [16] INCOSE, ”International Workshop” 2014, [accessed, 2016/01/18], INCOSE, http://www.omgwiki.org/MBSE/doku.php?id=mbse:incose_mbse_iw_2014
- [17] Jaclyn M. Branscomb, “Supporting Multidisciplinary Vehicle Analysis Using a Vehicle Reference Architecture Model in SysML, Conference on Systems Engineering Research, (2013)
- [18] David Long, ”A Primer For Model-Based Systems Engineering 2nd Edition”, Vitech, (2011)
- [19] 自動車技術会編 : 自動車技術ハンドブック, 基礎理論編(1990), p.4
- [20] Balmeli, L.”SysML-the Systems Modeling Language.”IBM Research Division

- [21] 村中重夫, 「自動車用ガソリンエンジン」,養賢堂(2011), P.34
- [22] 人見光夫, 「マツダ スカイアクティブエンジンの開発」, 三木書房, (2012)
- [23] 中田光一, 「ガソリンエンジンの熱効率向上技術」,自動車技術会 vol.65,(2011)
- [24] 高木章智, 「新型 2.0L ガソリンエンジンの開発」,自動車技術会 vol.65,(2011)
- [25] 日産自動車 VRC ピストンクランクシステム, [accessed, 2016/01/12],
<http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/vcr.html>
- [26] 飯島晃良, 「HCCI 期間の現状と将来」,自動車技術会 vol.65,(2011)
- [27] HONDA Exlink, [accessed, 2016/01/12], <http://www.honda.co.jp/tech/power/exlink/#n3>
- [28] 飯塚昭三, 「ガソリンエンジンの高効率化」,グランプリ出版, (2012)
- [29] 富澤和廣, 「新型デミオのエンジン技術」, マツダ技報, No.29, (2011)
- [30] 増田幸男, 「SKYACTIV-G における開発プロセス変革」,マツダ技報, No.29, (2011)
- [31] 白田浩平, 「SKYACTIV の MBD 検証環境について」,マツダ技報, No.31, (2013)
- [32] 長谷川裕一, 「CX-5 SKYACTIV-G のエンジン技術」,マツダ技報, No.30, (2012)