



第3回慶應システムズスクール  
システムを考える。  
～モデルベースシステムズエンジニアリング・ワークショップ～

モデルベース開発でのSysMLの活用

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  
教授 西村秀和

[h.nishimura@sdm.keio.ac.jp](mailto:h.nishimura@sdm.keio.ac.jp)

<http://lab.sdm.keio.ac.jp/nismlab/>



慶應義塾大学SDM研究所  
システムズエンジニアリングセンター  
<http://lab.sdm.keio.ac.jp/sec/>

慶應システムズスクール  
[facebook.com/groups/keio.systems.school/](https://www.facebook.com/groups/keio.systems.school/)

## 略歴と業績

### 略歴

1985年3月 慶應義塾大学工学部機械工学科卒業  
 1987年3月 同大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了  
 1990年3月 同大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了 工学博士  
 1990年4月より千葉大学工学部機械工学科助手 1995年より同助教授  
 2006年9月～10月 デルフト工科大学訪問研究員  
 2007年2月～3月 バージニア大学訪問准教授  
 2007年4月 慶應義塾大学先導研究センター教授「SDM研究科設立準備」  
 2008年4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教授  
 2011年4月～2012年3月 日本機械学会 機械力学・制御部門 部門長  
 2012年2月～2014年1月 計測自動制御学会 総務担当理事



### 著書

1998年 『MATLABによる制御理論の基礎』（共著），『MATLABによる制御系設計』（共著）  
 2007年 『運動と振動の制御の最前線』（共著）  
 2012年 『システムズモデリング言語 SysML』（監訳 A Practical Guide to SysML）

### 共同研究実績

車両衝突時の乗員保護制御，車両運動統合制御，Adaptive Cruise Control，  
 タワークレーンのアシスト制御，エンジンベンチ制御，熱設計マネジメント，次世代プレス開発など

▶ 3

第3回KSS

2013 Mar. 6

## システム開発プロセスでやるべきこと

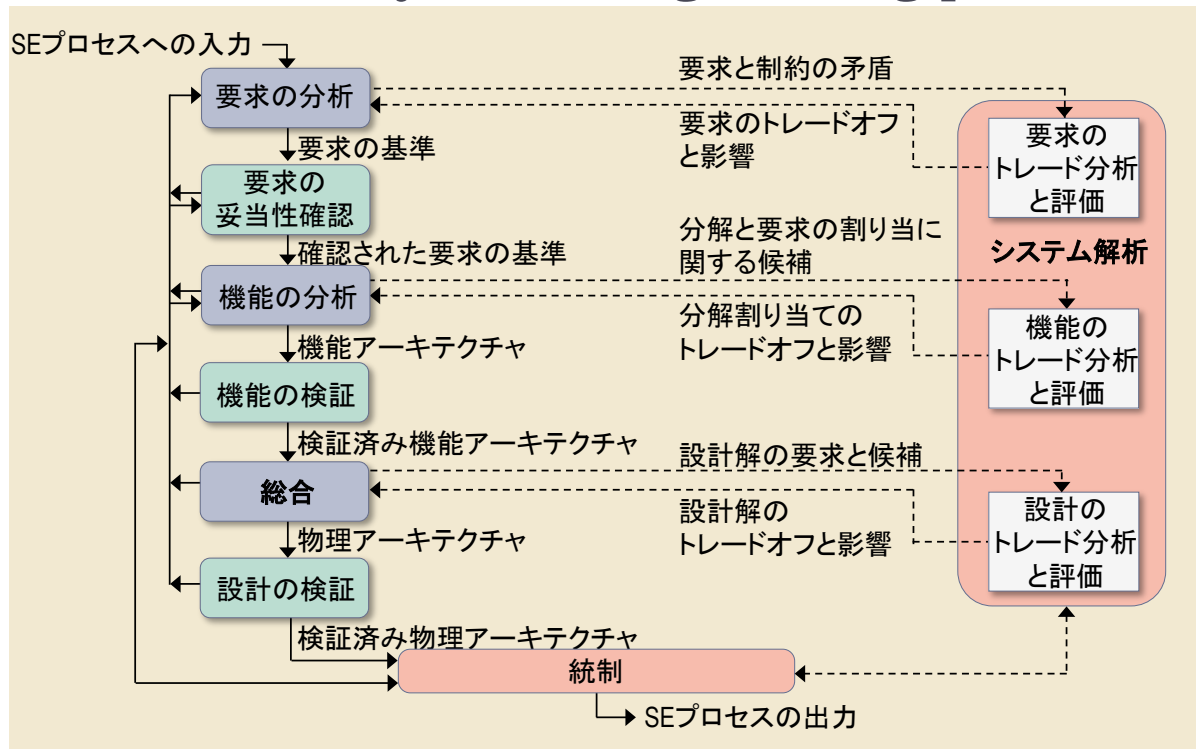
- ▶ システムの総合と解析 Synthesis and Analysis
- ▶ 妥協点を見出す trade study （中国語：商量）  
 → 設計の本質 意志決定：Decision making
- ▶ 最適化問題はコンピュータで解けるが、問題を設定するのは設計者であり、これが重要。
- ▶ 他分野にまたがる開発を行うためには、分野を超えて、開発者たちが、モデルを共有する必要がある。

▶ 4

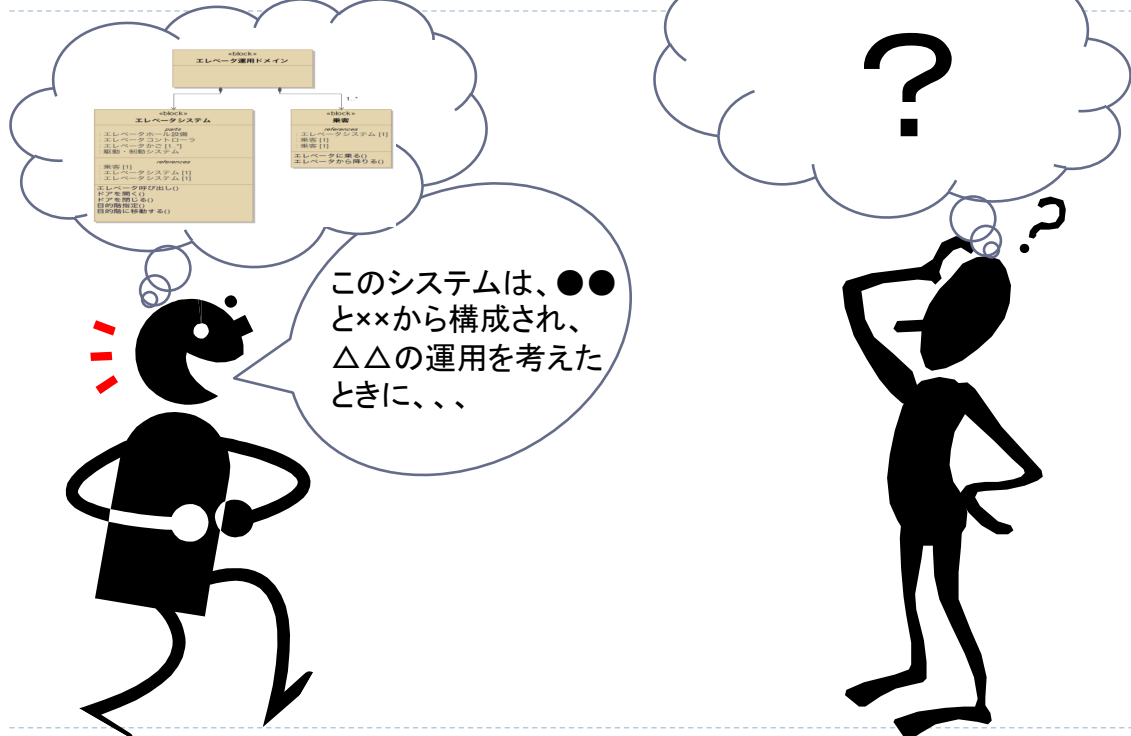
第3回KSS

2013 Mar. 6

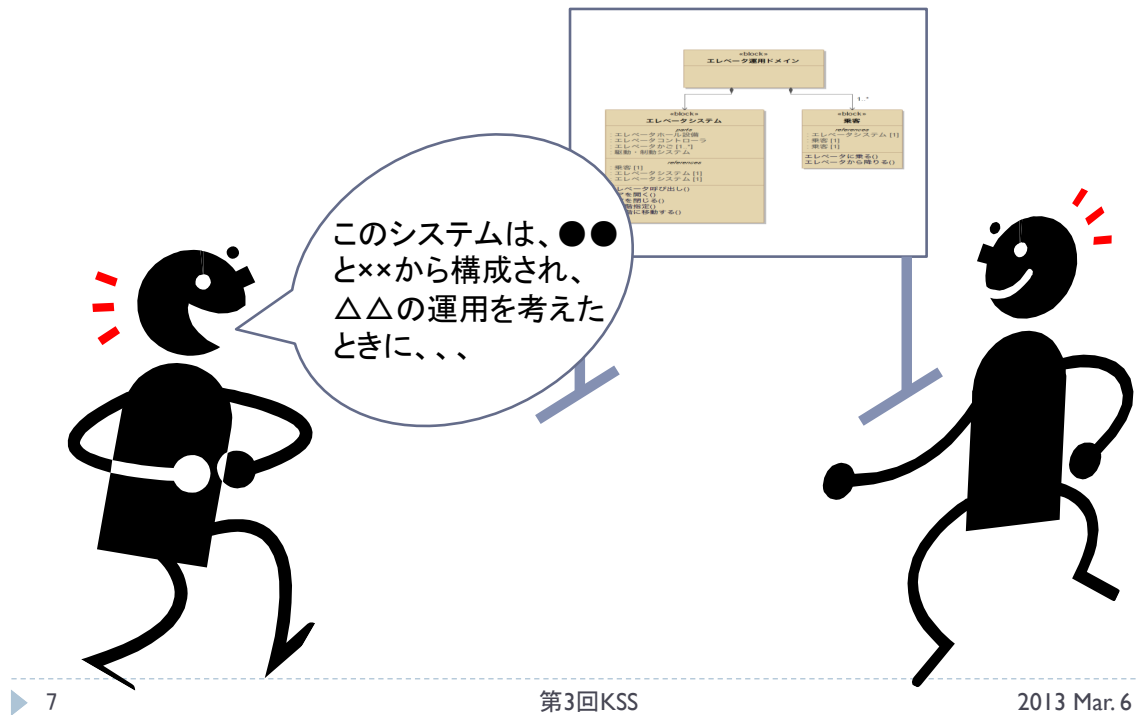
# IEEE 1220 systems engineering process



## コミュニケーションの失敗



## 図を用いたコミュニケーション



▶ 7

第3回KSS

2013 Mar. 6

## 本日の内容

- ▶ 1. モデルベースシステムズエンジニアリング
  - ▶ Dual Vee開発モデル, エンティティV
  - ▶ アーキテクチャの3つの視点とは?
  - ▶ 要求定義と検証, 妥当性確認の位置づけ
- ▶ 2. SysMLによる機能要求分析
  - ▶ SysMLで何ができるのか?
  - ▶ システム表現: 構造/振る舞い/要求/パラメトリック制約
- ▶ 3. SysMLの活用例
  - ▶ エレベータ開発, 二輪自動車のライダーアシスト制御システム設計
  - ▶ 機能要求の導出, システムの振る舞いの把握, インタフェースの明確化
  - ▶ アーキテクチャの検討, 仕様を決定するための解析モデルとテストケースの検討
- ▶ 4. まとめ

▶ 8

第3回KSS

2013 Mar. 6

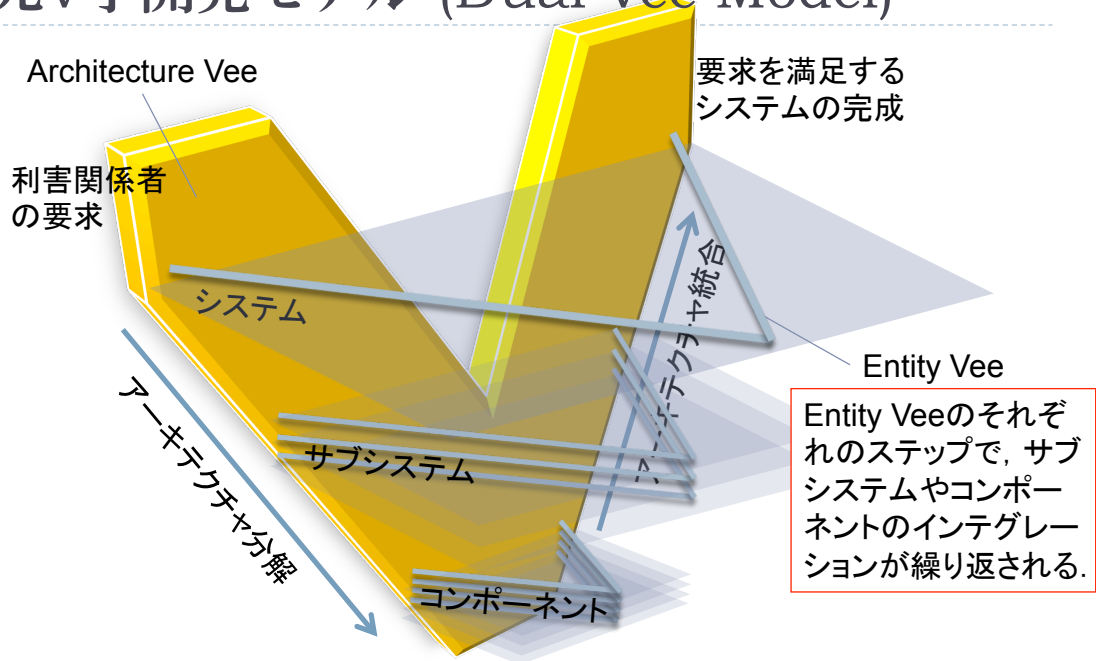
## 1. モデルベースシステムズエンジニアリング

- ▶ Dual Vee (二元V字) 開発モデル
- ▶ エンティティV
- ▶ アーキテクチャの3つの視点とは？
- ▶ 要求定義と検証・妥当性確認の位置づけ

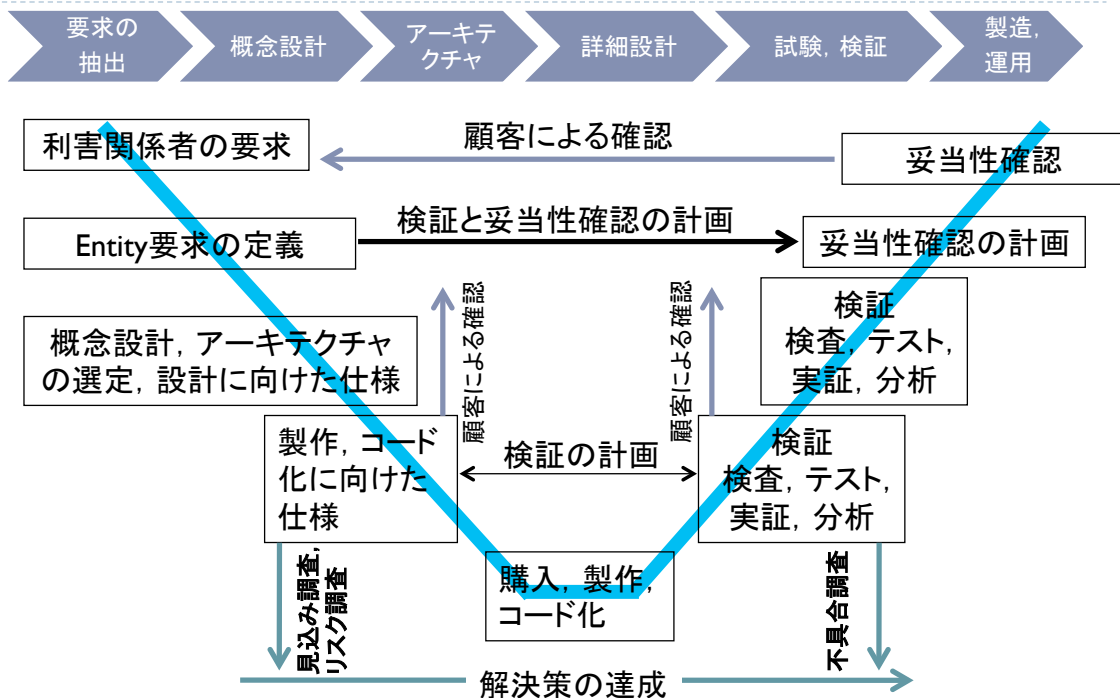
## 1. モデルベースシステムズエンジニアリング

- ▶ システムズエンジニアリング：
  - ▶ システムを成功裏に実現するための複数の分野にまたがるアプローチおよび手段
  - ▶ INCOSE: International Council on Systems Engineering
- ▶ モデルに基づくシステムズエンジニアリングの必要性
  - ▶ 図的に表現することで容易な理解が可能
  - ▶ システムの協働開発では図的な共通言語が有効
  - ▶ モデルの再利用による開発の効率化, 生産性の向上
- ▶ SysML (Systems Modeling Language)
  - ▶ 複雑なシステムを構造、振る舞い、要求、パラメトリック制約の面から図的に表現することができる。

## 二元V字開発モデル (Dual Vee Model)



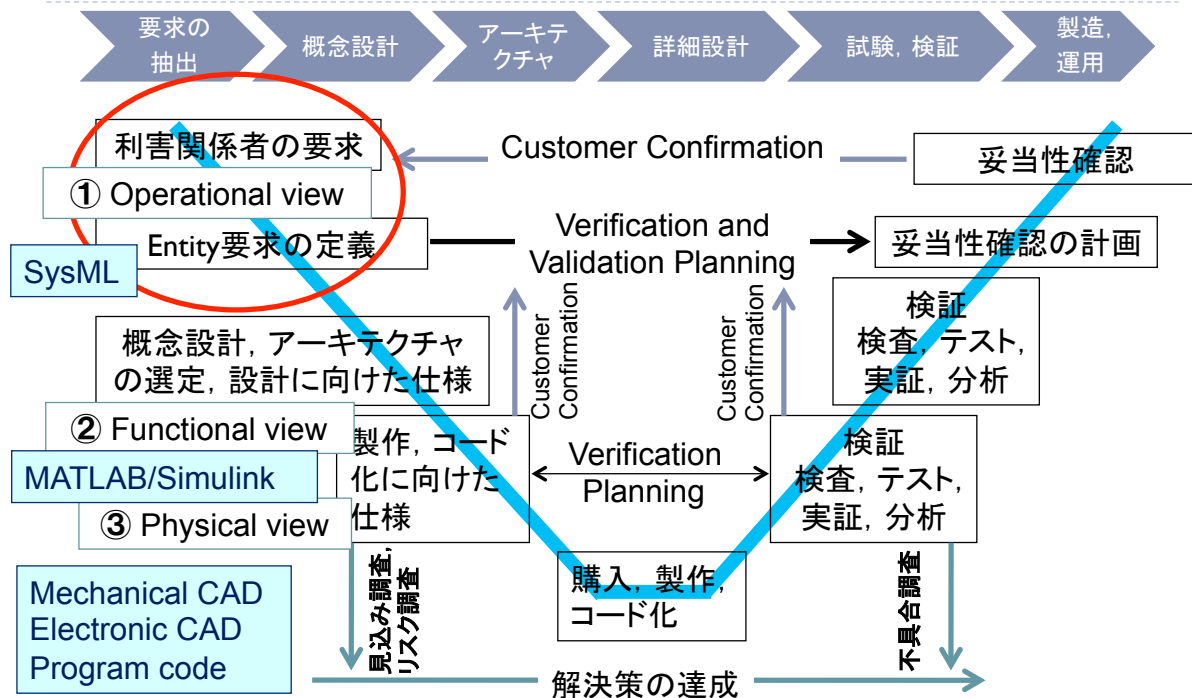
## エンティティV (Entity Vee)



# アーキテクチャの3つのビュー

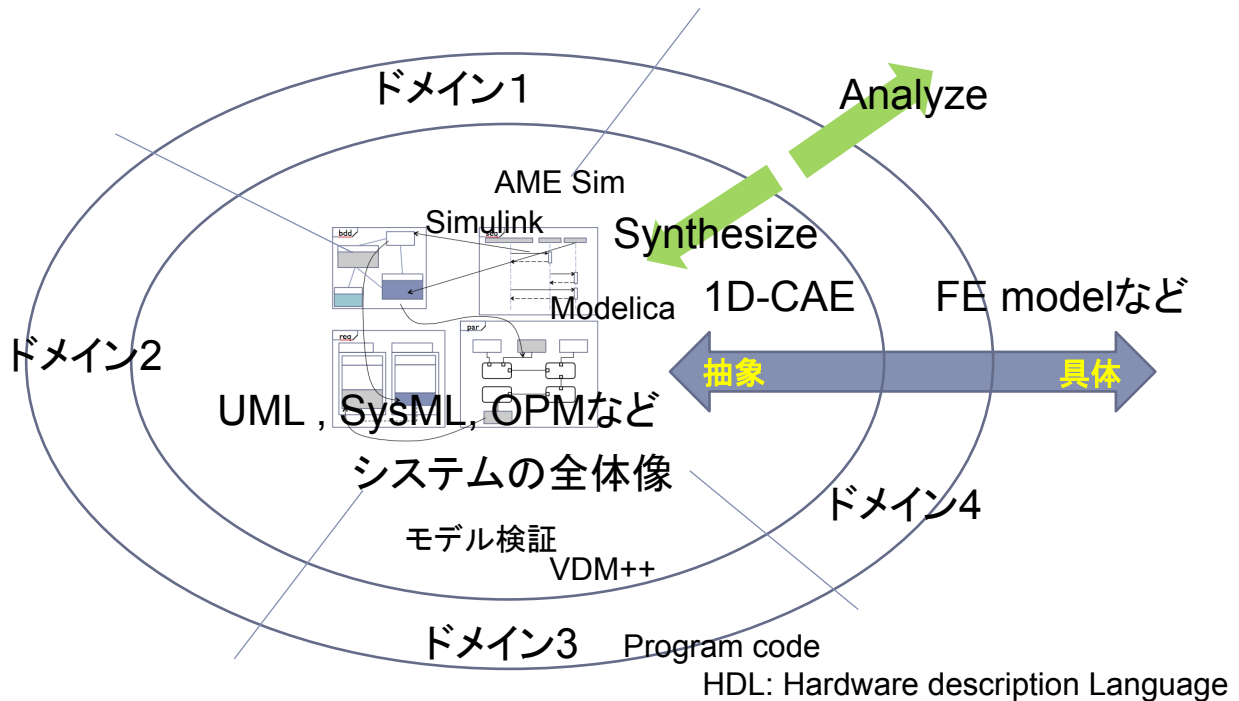
- ▶ Operational view (オペレーション)
  - ▶ 開発するシステムはどのように使用されるのか? → 要求の明確化
  - ▶ 開発するシステムは他のシステム(外部)とどのような相互作用をするのか?
- ▶ Functional view (機能)
  - ▶ システムは何をしなければならないか? → 機能要求の明確化
  - ▶ システムができること, サービス, 提供される機能を定義する. 機能間のインタフェース, 相互作用を明確にする.
- ▶ Physical view (物理)
  - ▶ 機能を遂行するためのハードウェアやソフトウェアを定義する.
  - ▶ モジュールやアイテム間のインタフェースを明確にする.
  - ▶ システムアーキテクチャの完成へ向けて, システム要求, サブシステム要求, コンポーネント要求を定める.

# エンティティV: 要求定義の位置付け



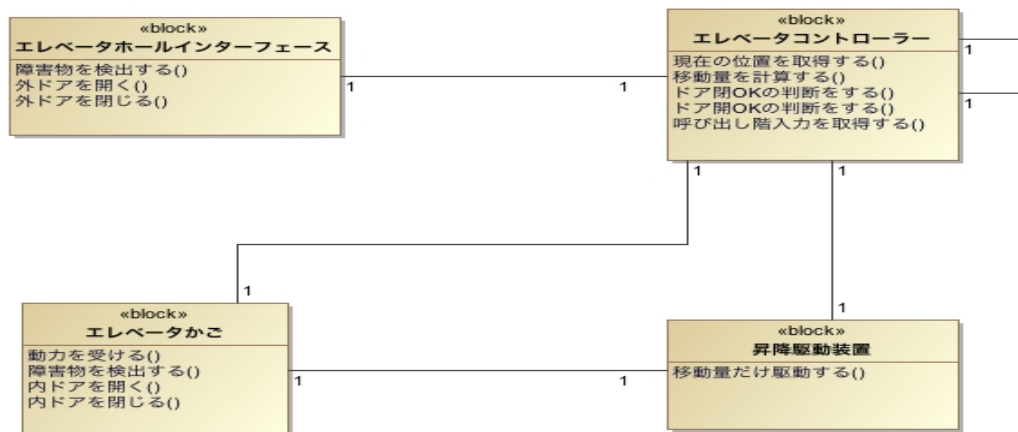


# モデルを抽象化することの重要性 システムモデルって何？



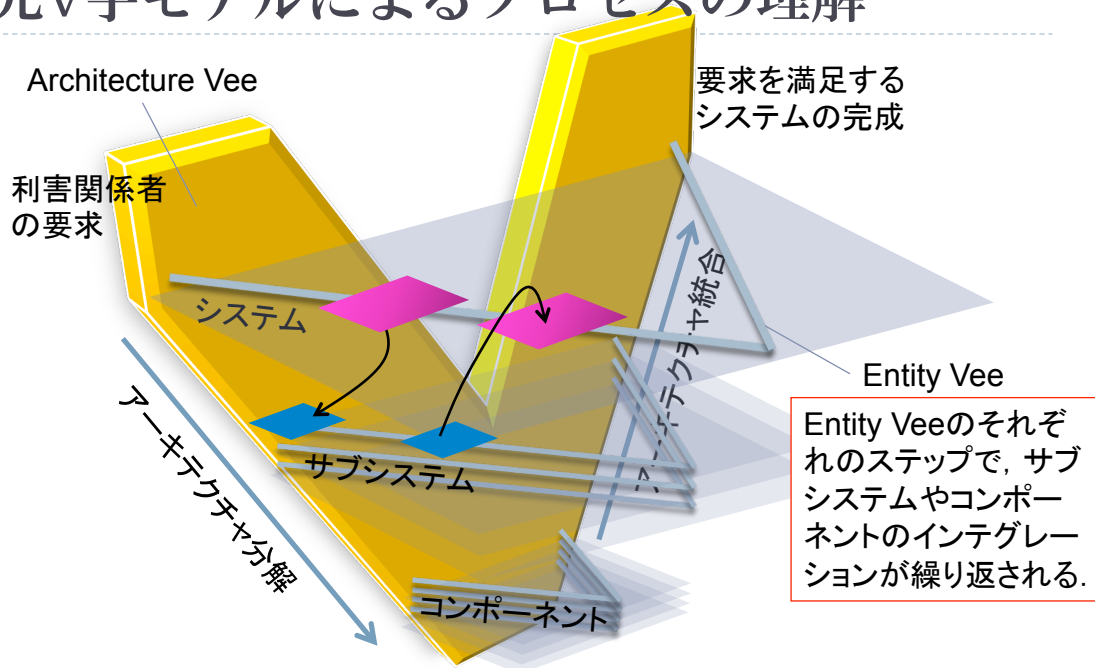
## システムの分解の考え方

- ▶ システムへの要求から機能を明確にし、構成するサブシステムやコンポーネントに機能を割り当てる。
- ▶ 構成するサブシステムやコンポーネント間のインターフェースを明確にし、構成要素の仕様を明確にする。





## 二元V字モデルによるプロセスの理解



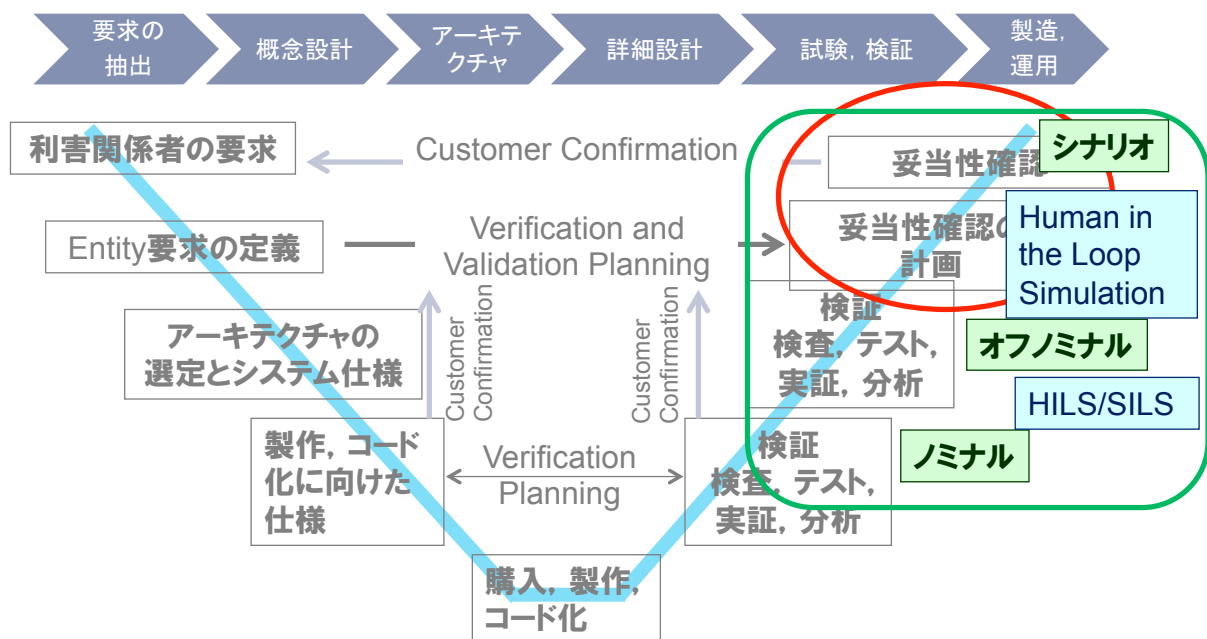
## 検証と統合の考え方

- ▶ 要求・機能を検証、確認するためのテストケースを計画する。
  - ▶ 検証の計画は要求・機能が明確になったときに行う。
- ▶ 要求・機能が満足されているかをテストケースで検証する。
  - ▶ テストケースはユースケースにもとづいて検討する。
- ▶ ハードウェア／ソフトウェア等に関する個々の検証が済んでから、統合する。
  - ▶ 個々の検証が終わっていないのに、統合して不具合がわかったとき、どこに不具合が発生しているのかが判別できない。

# 検証と妥当性確認 (Verification & Validation)

- ▶ 検証(verification)
  - ▶ 設計・開発したシステムが, システム要求, 仕様を満足しているか?
  - ▶ *Did you test what you were supposed to test?*
  - ▶ *Are We Building the Product/System Right?*
  
- ▶ 妥当性確認(validation)
  - ▶ 設計・開発したシステムが利害関係者のニーズに合致しているか?
  - ▶ *Did you test the right things?*
  - ▶ *Are We Building the Right Product/System?*

# エンティティV： 検証と妥当性確認の位置づけ



## テストケースの計画と管理

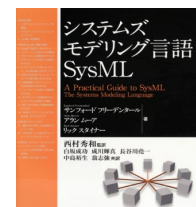
- ▶ テストケースの検討
  - ▶ 「要求」は測定可能, テスト可能でなければならない。
    - ↓
    - ▶ ユースケースシナリオから導き出された「要求」を検証
    - ||
    - ▶ ユースケースシナリオのとおり検証することが理想
      - ▶ これには外部システムが必要
- ▶ HILS/SILS等で何をなすべきか？
  - ▶ 開発されたシステムが要求を満たすことを検証
  - ▶ 外部システムの一部あるいはすべてをsimulateする
  - ▶ オペレータが必要 → Human-in-the-loop Simulation

## 2. SysMLによるシステム表現

- ▶ SysMLで何ができるのか？
- ▶ 構造／振る舞い／要求／パラメトリック制約
- ▶ 協働作業
- ▶ コンカレントエンジニアリング

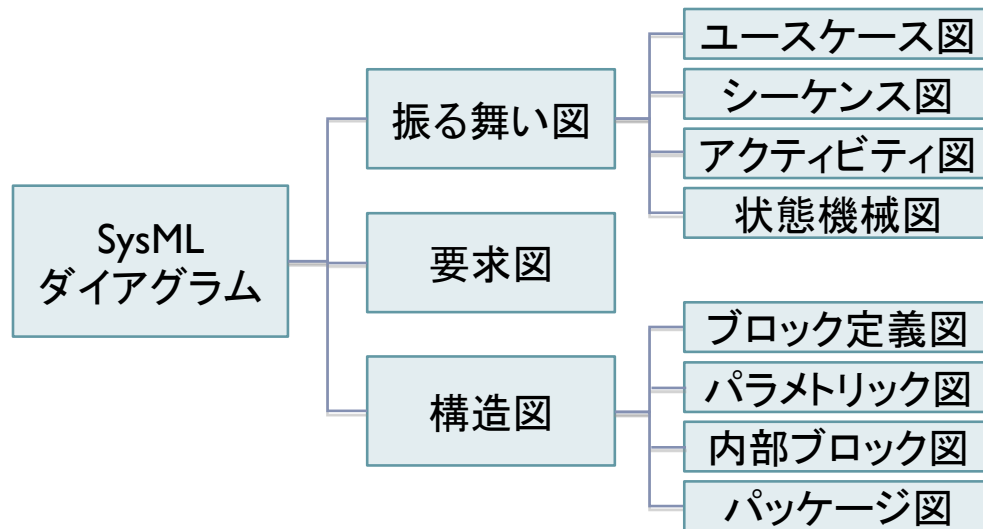
### 書籍のご紹介(Practical Guide to SysMLの翻訳本)

- ▶ システムズモデリング言語 SysML
- ▶ 西村 秀和(監訳), 白坂成功, 成川輝真, 長谷川堯一, 中島裕生, 翁志强
- ▶ 著者: Sanford Friedenthal, Alan Moore, Rick Steiner
- ▶ 出版社: 東京電機大学出版局
- ▶ 発売日: 2012年5月10日



## SysMLダイアグラムの分類

SysML: Systems Modeling Language



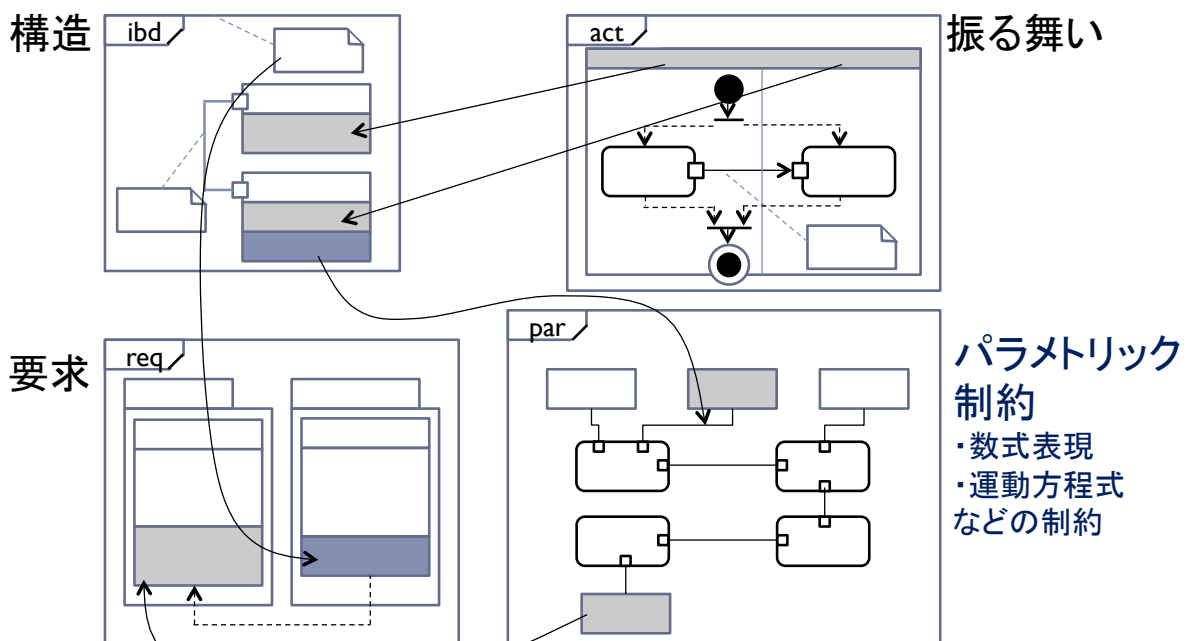
## SysMLダイアグラム

- ▶ 要求図 (requirement diagram) : 要求のトレーサビリティをサポートするために、テキストベースの要求と、他の要求、設計要素、テストケースとの関係を表す。
- ▶ アクティビティ図 (activity diagram) : 入力, 出力, および制御の使用可能性に基づくアクションの順序付けと、アクションの入出力間の変換方法に関する振る舞いを表す。
- ▶ シーケンス図 (sequence diagram) : パート間で交換されたメッセージのシーケンスに関する振る舞いを表す。
- ▶ 状態機械図 (state machine diagram) : イベントによって引き起こされる状態間の遷移に関するエンティティの振る舞いを表す。
- ▶ ユースケース図 (use case diagram) : 一連の目標を達成するための、外部のエンティティ(すなわち、アクター)によるシステムまたは他のエンティティの用いられ方に関して機能性を

## SysMLダイアグラム (続き)

- ▶ パラメトリック図 (parametric diagram) : エンジニアリング解析をサポートするのに用いられる  $F=ma$  などの属性値の制約を表す。
- ▶ ブロック定義図 (block definition diagram) は、ブロックと呼ばれる 構造要素 とそれらの合成, および分類を表す。
- ▶ 内部ブロック図 (internal block diagram) は、ブロックのパート間の 相互接続 と インタフェース を表す (UML の合成構造図の変更)。
- ▶ パッケージ図 (package diagram) : モデル要素を含むパッケージに関して モデルの編成 を表す。

SysMLのダイアグラムは、互いに関連しているので、設計変更があった場合にもその影響を容易に把握できる。



## SysMLによるMBSEのサポート

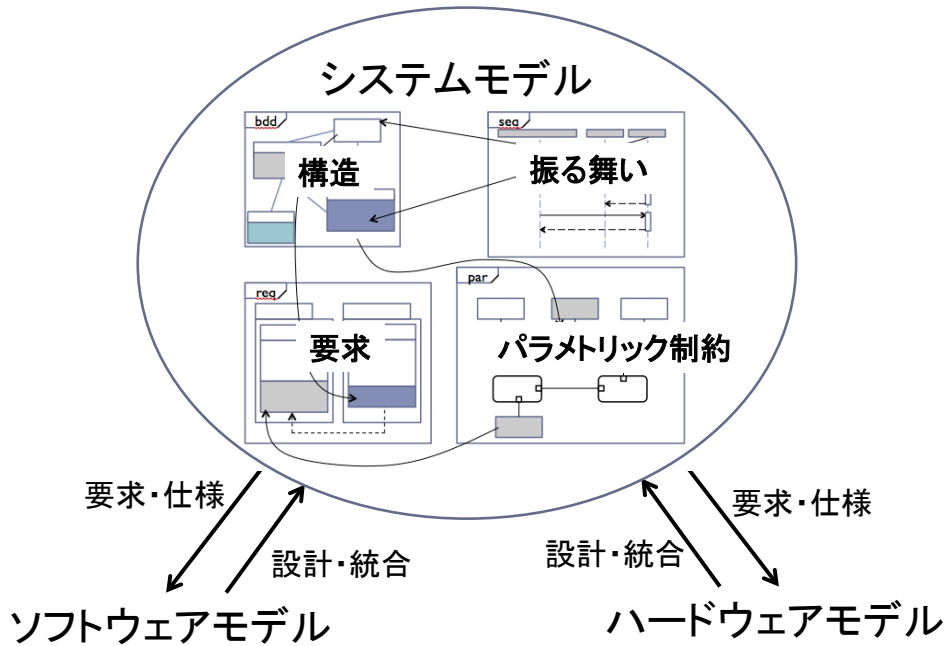
### システム仕様の決定 ← 以下の活動の反復

- ▶ ブラックボックスのシステム要求の取得と分析
  - ▶ 要求管理ツールでの文書ベース要求の獲得
  - ▶ SysMLモデリングツールへの要求のインポート
  - ▶ システムのユースケースに関するトップレベルの機能の特定
  - ▶ ユースケースと要求間のトレーサビリティの獲得
  - ▶ ユースケースシナリオの実現: アクティビティ図, シーケンス図, 状態機械図
  - ▶ システムコンテキスト図の創出
  - ▶ システム検証をサポートするシステムのテストケースの特定
- ▶ 要求を満たすシステムアーキテクチャ候補の開発
  - ▶ ブロック定義図を用いたシステムの分解
  - ▶ アクティビティ図またはシーケンス図を用いたパート間の相互作用の定義
  - ▶ 内部ブロック図を用いたパート間の相互接続の定義

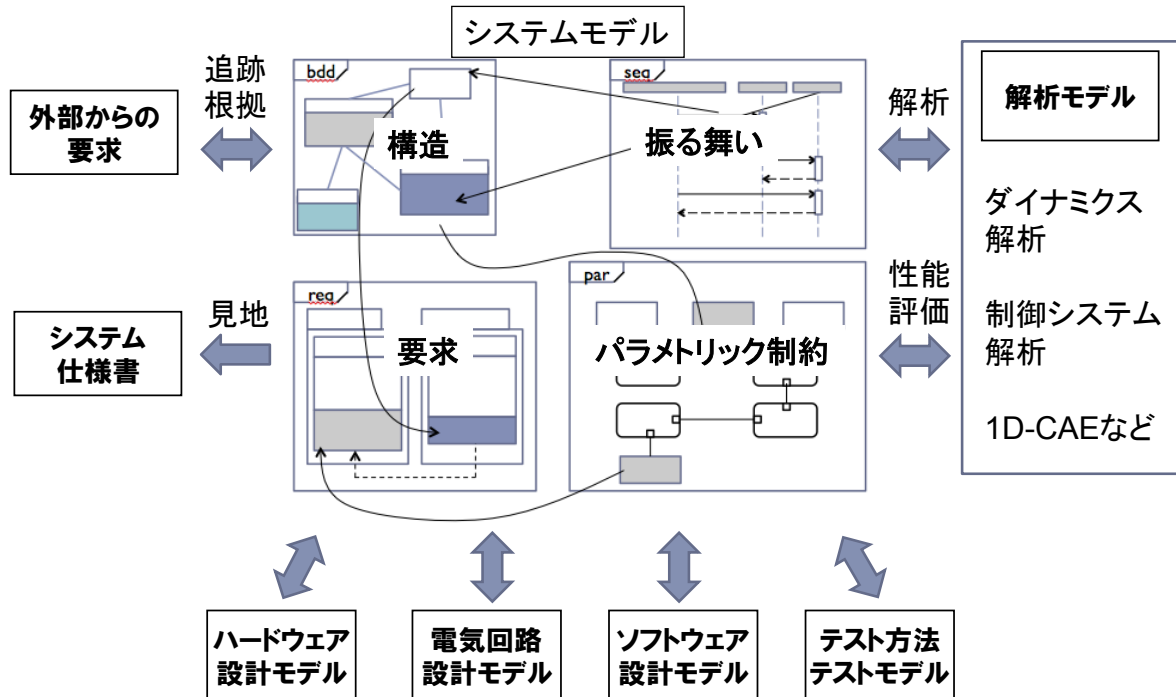
## SysMLによるMBSEのサポート (続き)

- ▶ 所望のアーキテクチャの評価と選択のためのエンジニアリング解析とレードオフ分析の実行
  - ▶ 性能, 信頼性, コスト, その他の重要なプロパティの分析をサポートするためのパラメトリック図を用いたシステムプロパティの制約の獲得
  - ▶ システムプロパティの予算を決定するためのエンジニアリング解析の実行 (通常, 別のエンジニアリング解析ツールで行われる)
- ▶ コンポーネント要求の規定とシステム要求に対するコンポーネント要求のトレーサビリティの規定
  - ▶ アーキテクチャにおける, 各コンポーネント(ブロック)のための機能要求, インタフェース要求, 性能要求の獲得
  - ▶ システム要求へのコンポーネント要求のトレース
- ▶ システムレベルでのテストケースの実行→システム設計に関する要求の充足の検証

# SysMLを用いた協働作業



# コンカレントデザインを促進するフレームワーク





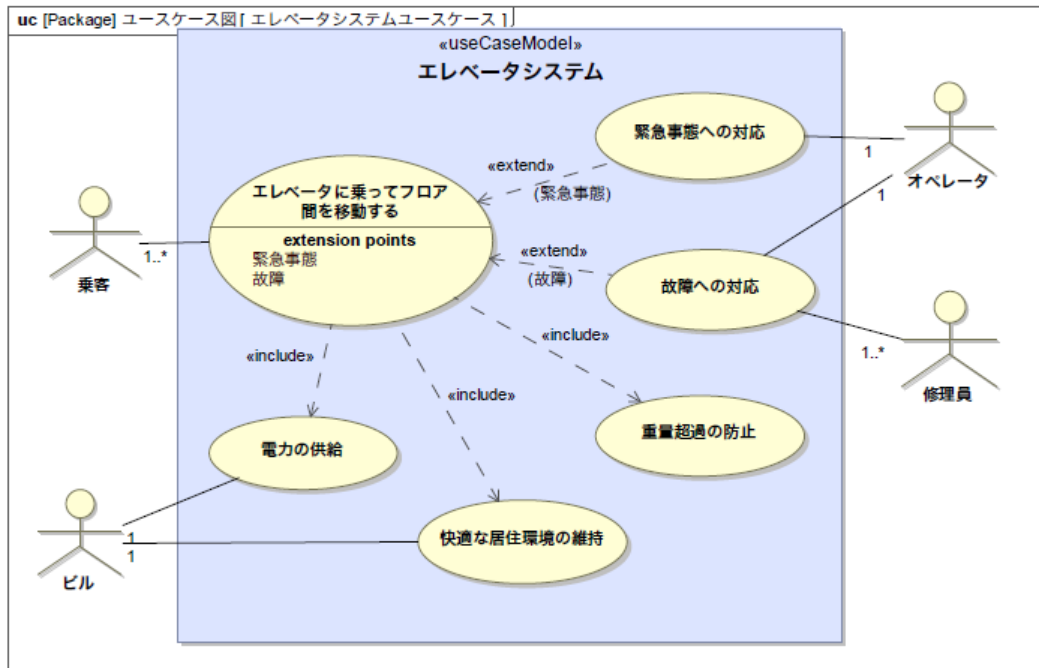
## SysMLの活用例

- ▶ エレベータのシステム開発
  - ▶ システムの機能を記述するユースケース
  - ▶ シーケンス図 → 機能要求分析
  
- ▶ 二輪自動車のライダーアシスト制御システム設計
  - ▶ システムの振る舞いの明確化
    - ▶ ライダーの操縦との相互作用
  - ▶ シーケンス図による機能分析
  - ▶ ユースケース分析 → テストケースの明確化
  - ▶ システム解析のシミュレーションに必要な機能モデルの明確化

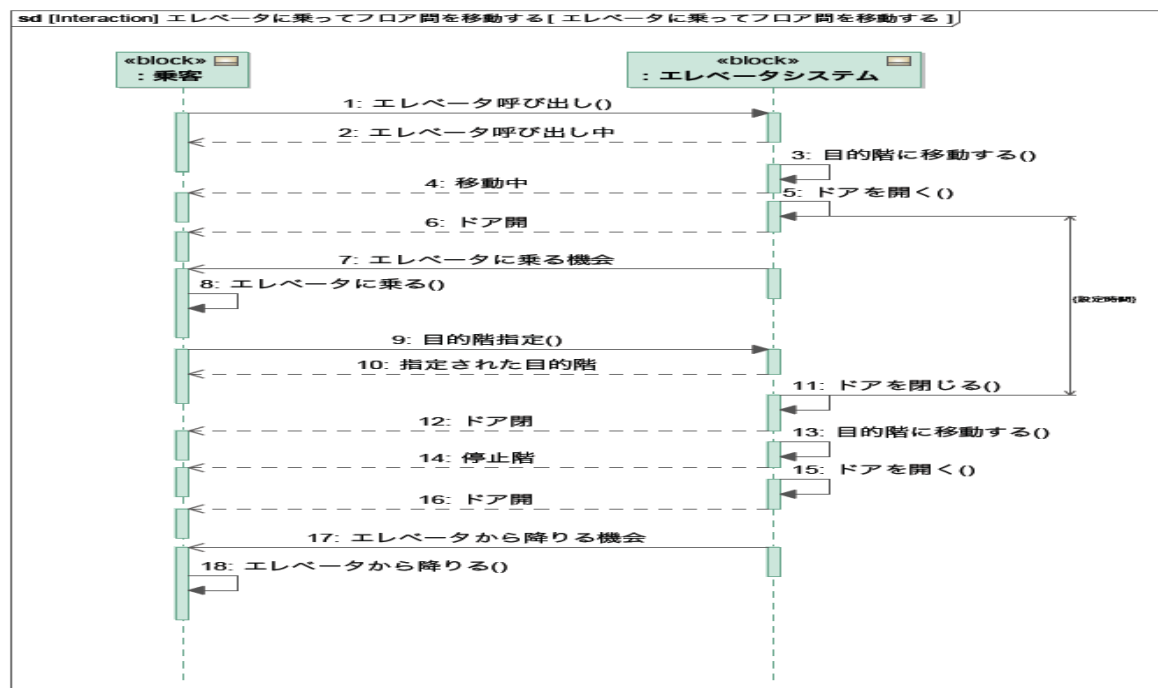
## エレベーターに対する要求（例）

- ▶ エレベーターは、ビルの各階から“コール(呼び)”を受けること。(入力に関する要求)
  
- ▶ エレベーターは、想定される乗員に対して、エレベーターを呼んでいることを表示すること。(出力に関する要求)
  
- ▶ エレベーターは、緊急コールに対してビルにある標準電話を利用すること。(外部インターフェースに関する要求)

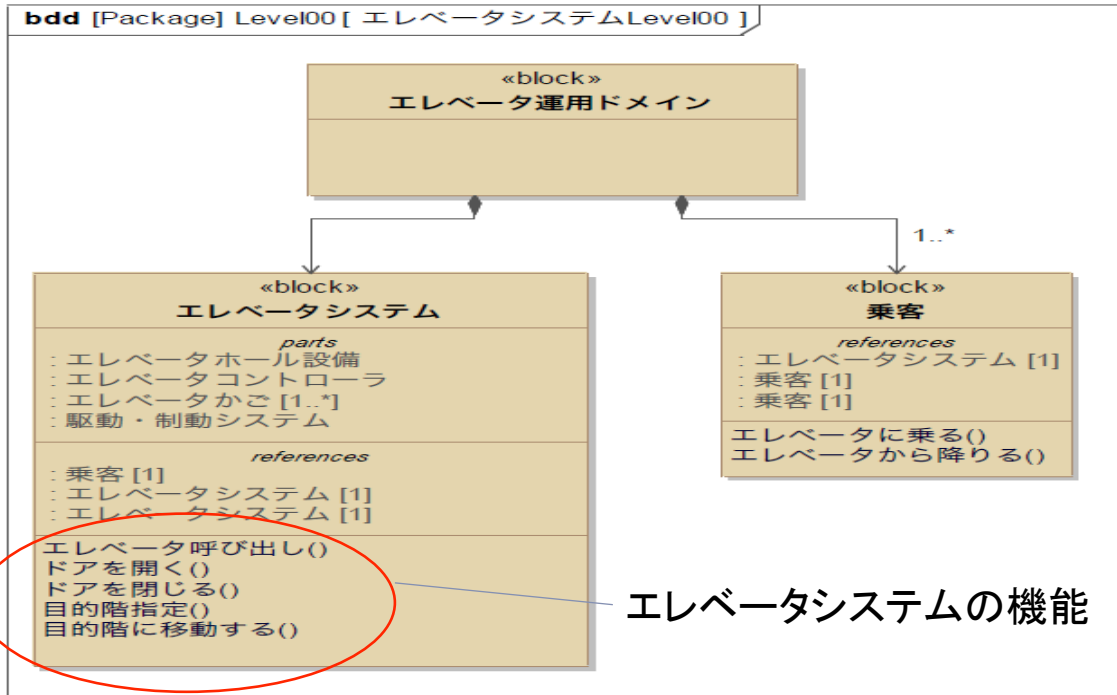
# ユースケース図



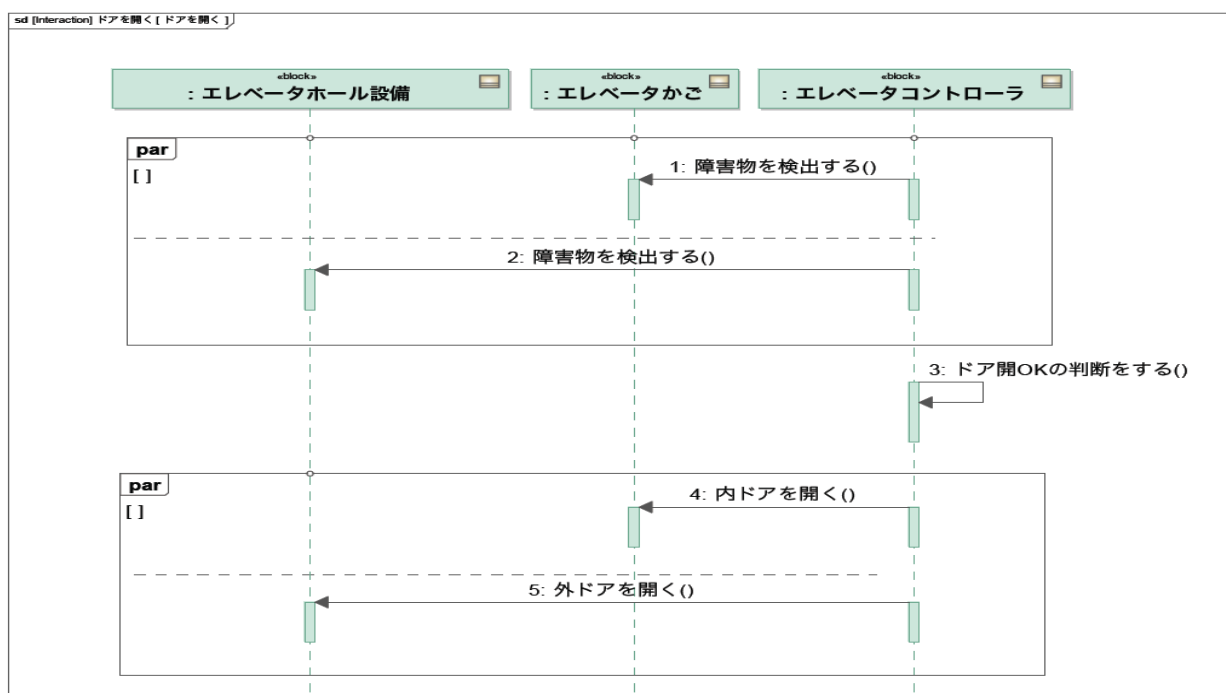
# シーケンス図 (コンテキストレベル)



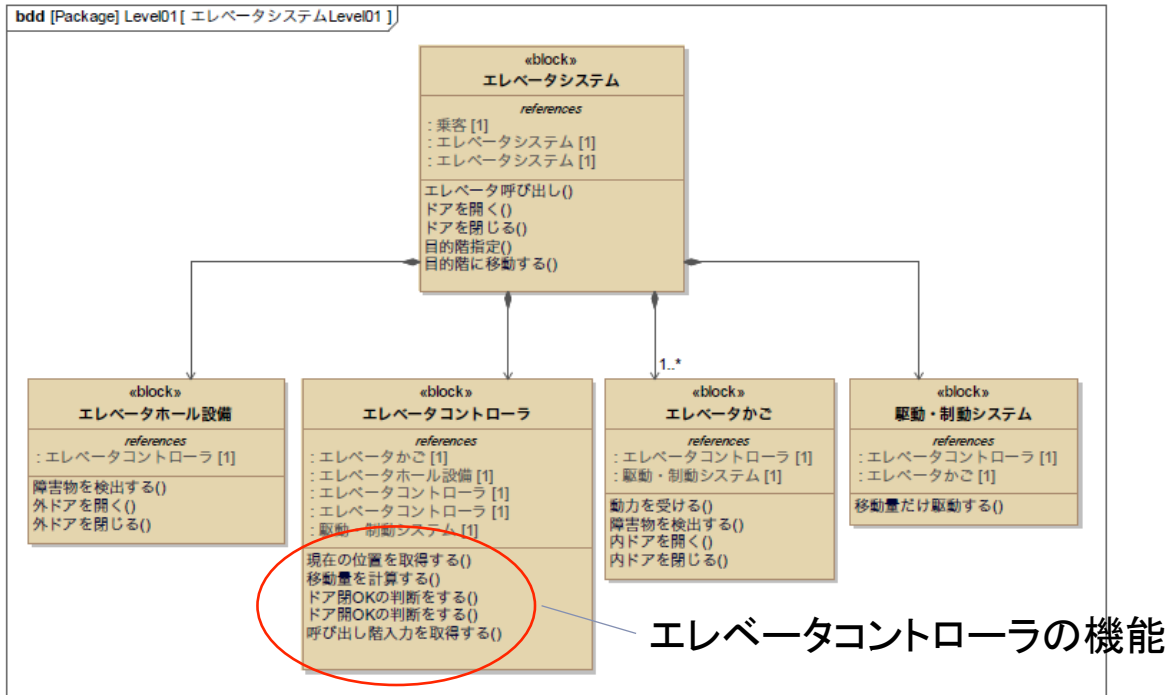
# コンテキストレベルでの機能分析



# ユースケース「ドアを開く」 →シーケンス図



## アナリシスレベル01での機能分析



## 二輪自動車の安定化制御

- ▶ 二輪自動車の安全な走行にはライダーによる適切な操作が必要.
- ▶ 突発的な外乱に対して, ライダーが瞬時に正確に二輪自動車を操縦できるとは限らない.



- ▶ ライダーの操縦をアシストする方法はないか？

- ▶ ABS (Anti-lock Brake System)
- ▶ TCS (Traction Control System)
- ▶ ...
- ▶ パワーステアリングのように前輪操舵をアシストしてはどうか？  
FACS (Front-steering Assist Control System)



# 制御実験

検証試験: 操舵軸まわりからのインパルストルク外乱(10 Nm)に対する応答



without control, 15 km/h

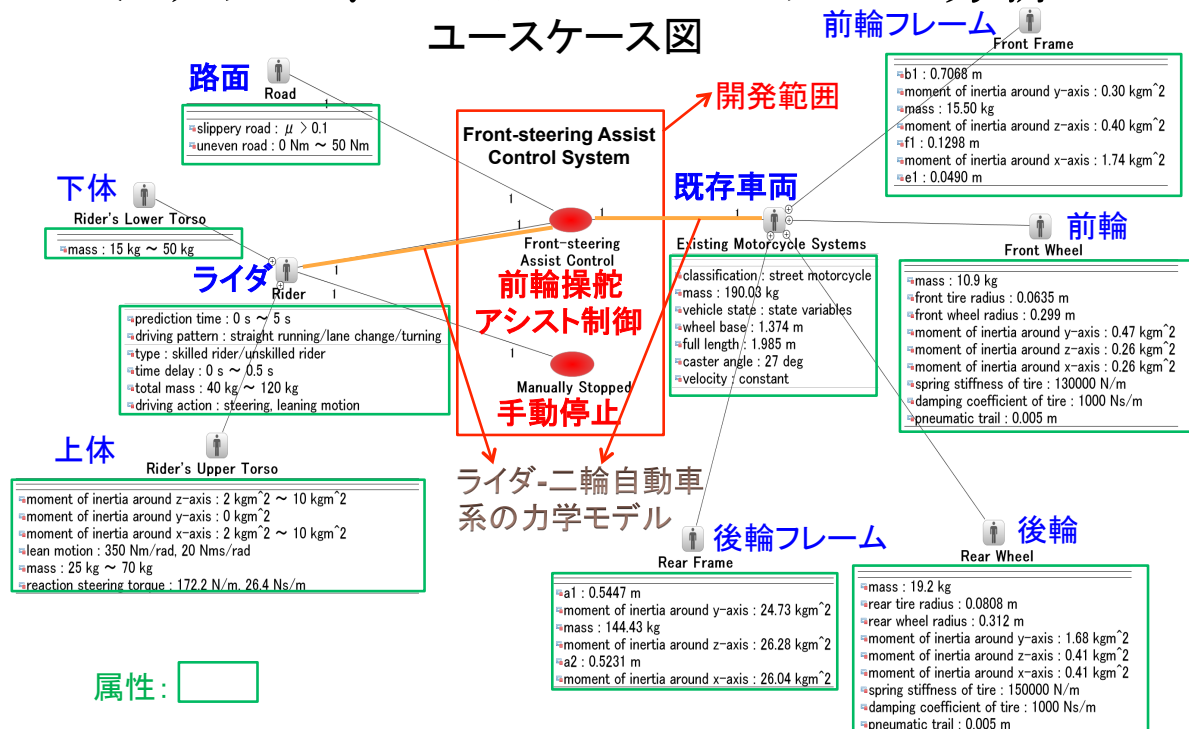


in control, 15 km/h

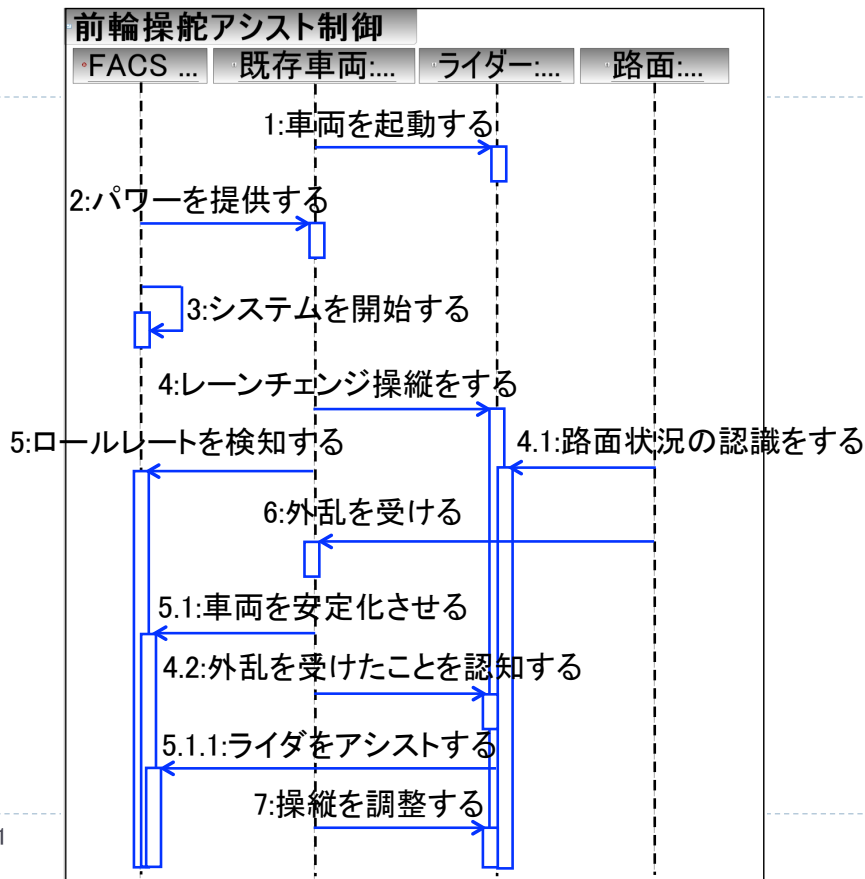
Yutaka Kamata, Hidekazu Nishimura, Hidekuni Iida, System Identification and Front-Wheel Steering Control of Motorcycle, Trans. of the JSME, Series C, Vol.69, No.688, pp.3191-3197, (2003)  
 Yutaka Kamata, Hidekazu Nishimura, System Identification and Attitude Control of Motorcycle by Computer-Aided Dynamics Analysis, JSAE Review, Vol.24, No.4, pp.411-416, (2003)

# コンテクストレベルのユースケース分析

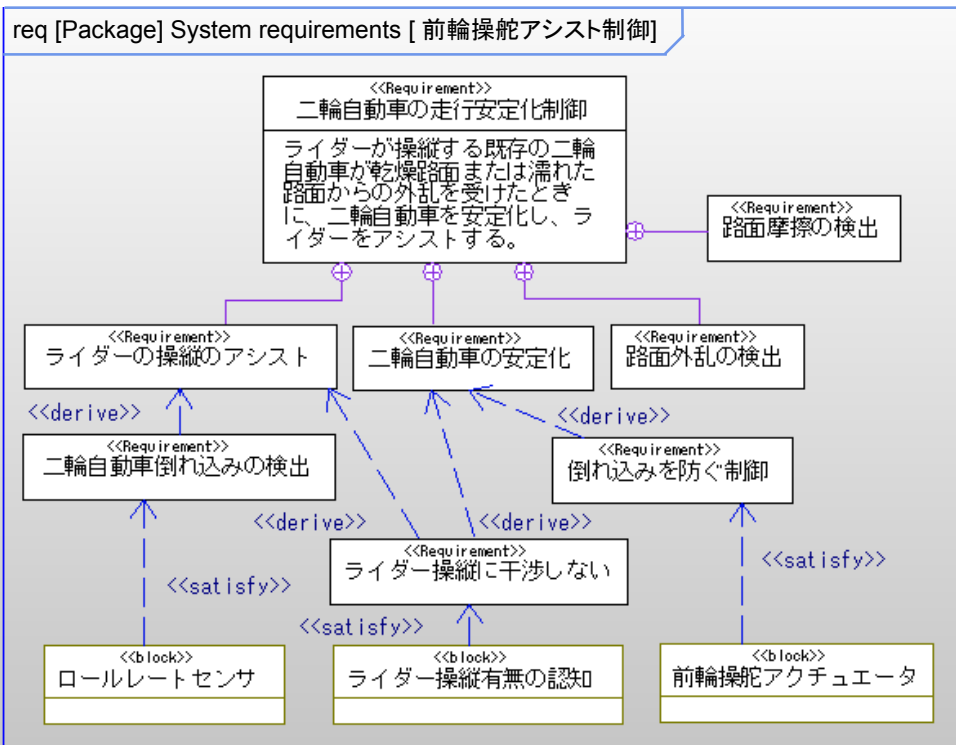
ユースケース図



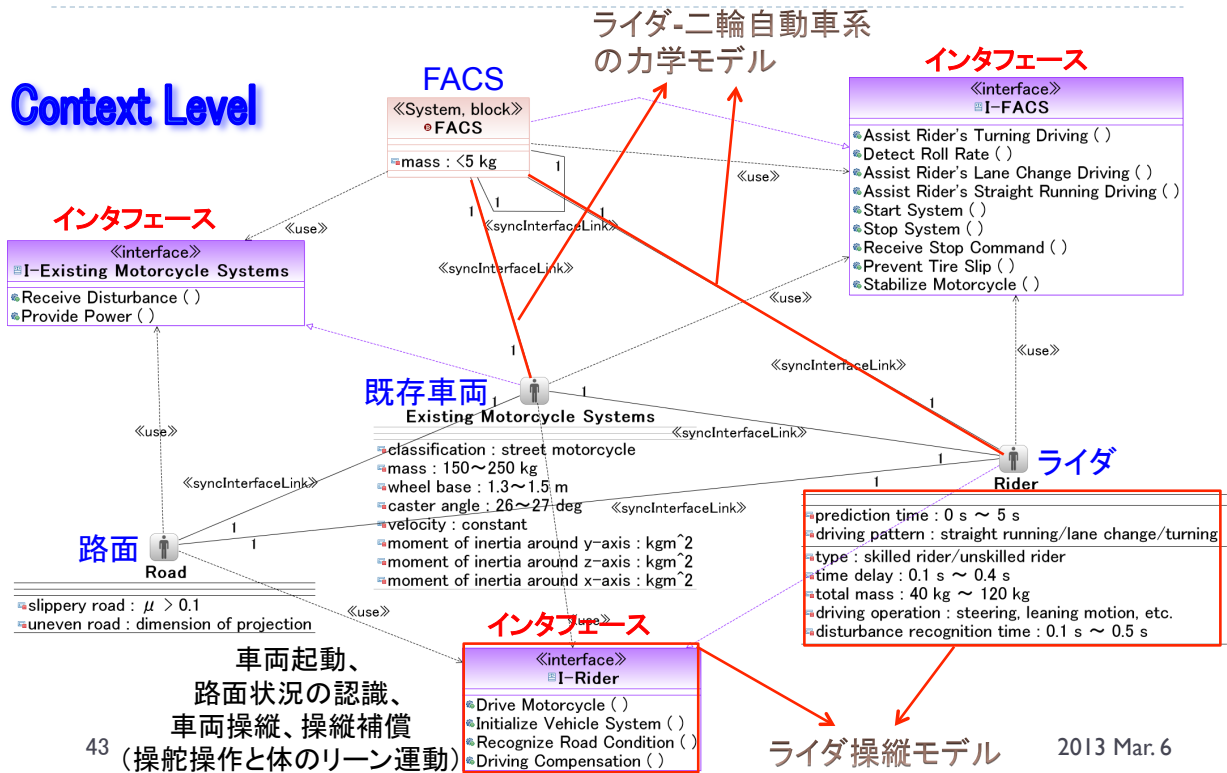
# 前輪操舵アシスト制御のシーケンス図



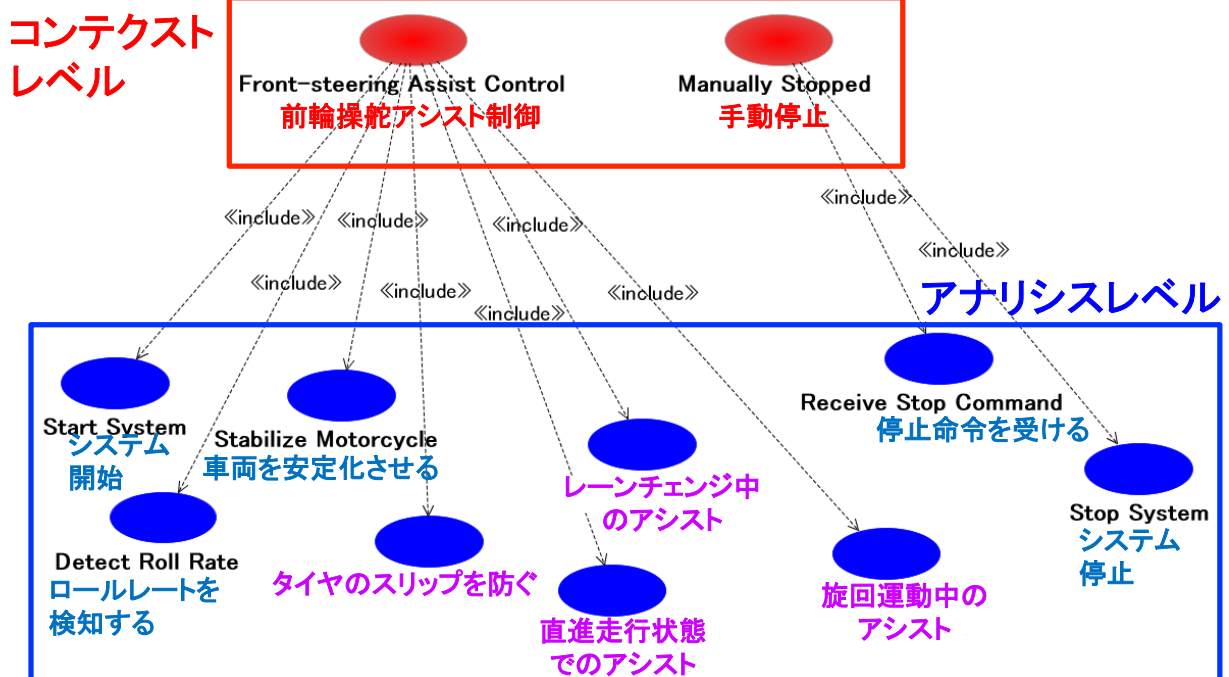
# 要求図



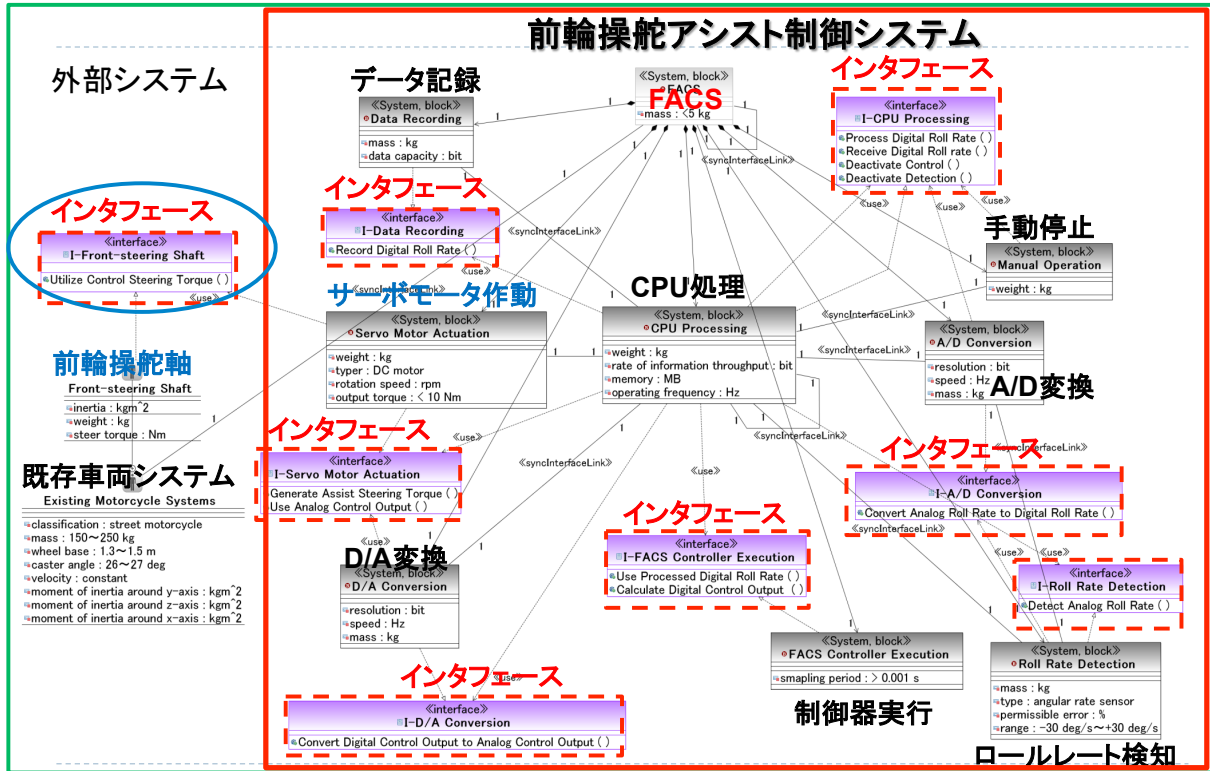
# 前輪操舵アシスト制御システム： FACSと外部関連システムの統合



# ユースケース分析とテストケース





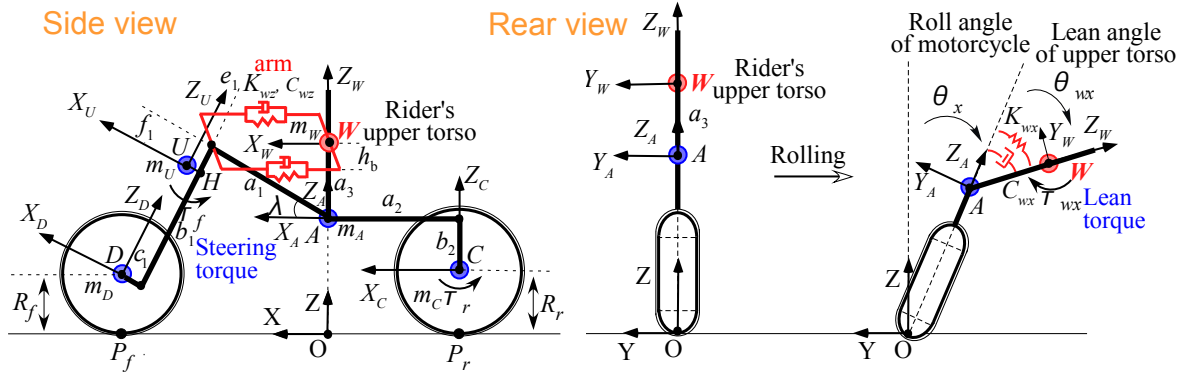


## 二輪自動車の前輪操舵アシスト制御



# システム解析のために何をモデル化するべきか？ ～機能・物理モデルの構築～

## ライダー二輪自動車モデル

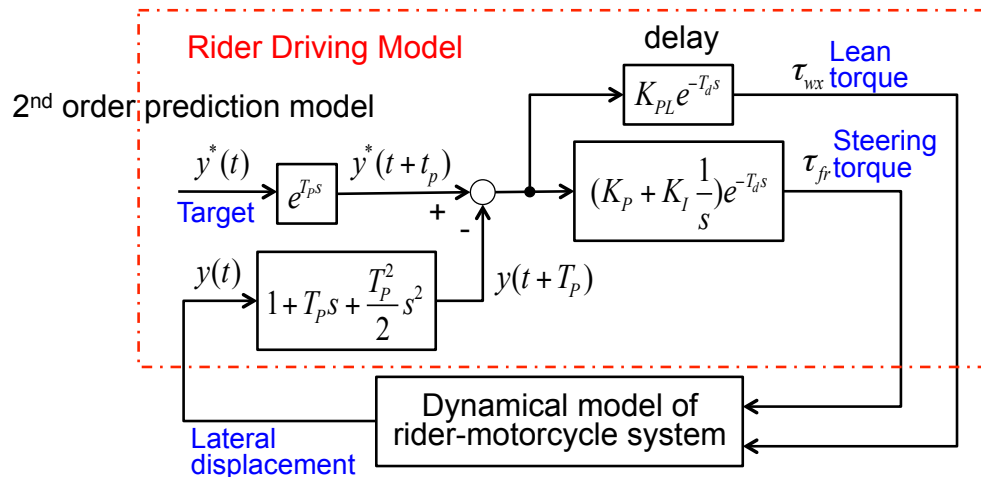


## コントローラモデル(システムレベルでの設計)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}_{kd}(k+1) &= \mathbf{A}_{kd} \mathbf{x}_{kd}(k) + \mathbf{B}_{kd} \Delta \dot{\theta}_{xd}(k) \\
 \Delta \tau_{fc}(k) &= \mathbf{C}_{kd} \mathbf{x}_{kd}(k) + \mathbf{D}_{kd} \Delta \dot{\theta}_{xd}(k)
 \end{aligned}$$

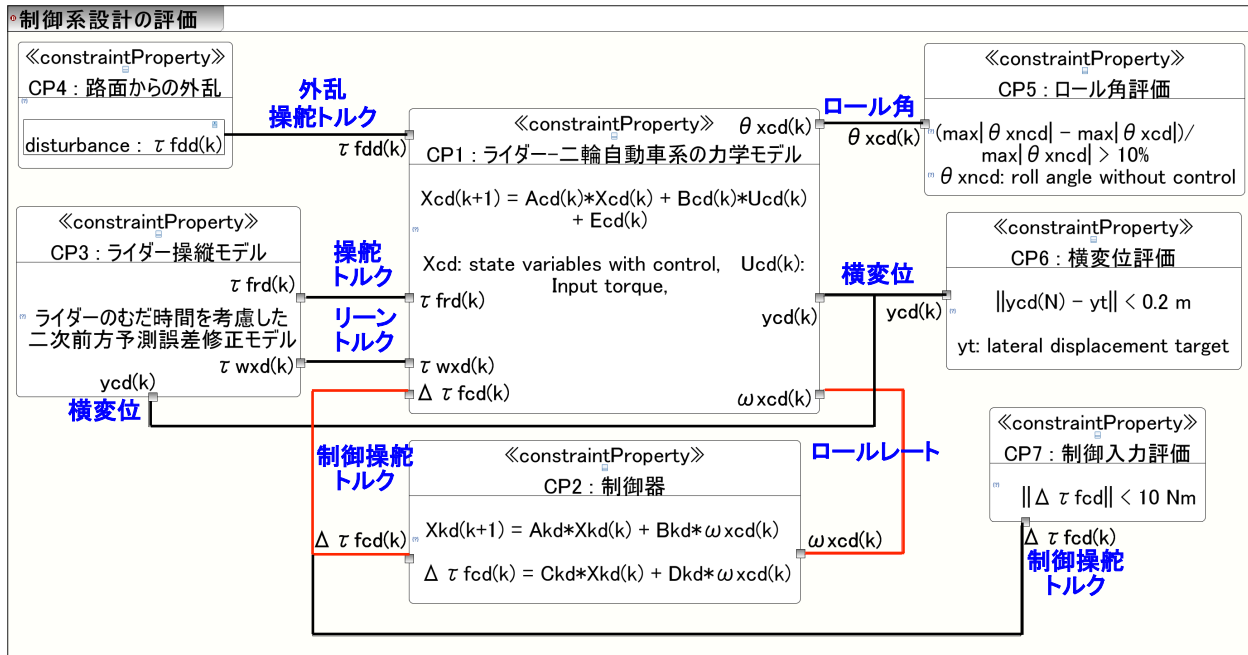
$\Delta \dot{\theta}_x$ : roll rate, the feedback signal,  
 $\Delta \tau_{fc}$ : control steering torque, control output.

# ライダー操縦モデル



	Time delay $T_d$	Prediction time $T_p$	Proportional gain $K_p$	Proportional gain $K_{PL}$	Integral gain $K_I$
Unskilled rider	0.2 s	1.2 s	8	1.6	5
Skilled rider	0.1 s	1.5 s	5.2	1.04	4.5

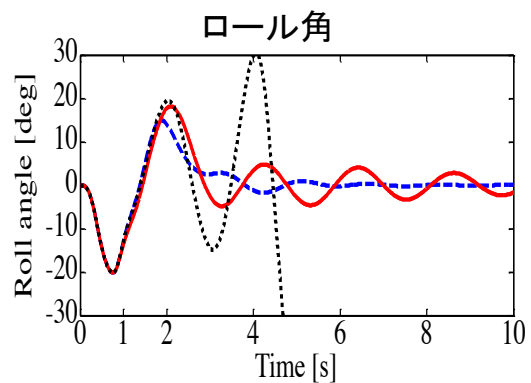
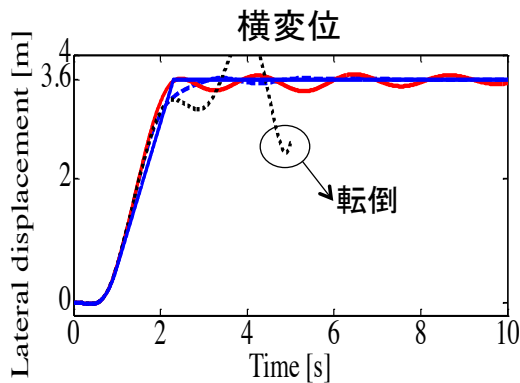
# 制御系設計評価のパラメトリック図



# テストケースに基づく妥当性確認： レーンチェンジ時のアシスト制御

非線形モデルシミュレーション  
 横変位3.6 mのレーンチェンジ  
 車速: 60 km/h  
 インパルス外乱: 25 Nm, 0.7 s~0.88 s  
 アシスト制御開始: 0.7 s~  
 未熟練ライダーの補償動作は1.0 s~

- : 未熟練ライダー(制御あり)
- ..... : 未熟練ライダー(制御なし)
- - - : 熟練ライダー(制御なし)



## まとめ

- ▶ システムズエンジニアリングのプロセスをDual Veeモデルで示した。そして、モデルベースシステムズエンジニアリング(MBSE)の一つの表記法として、構造／振る舞い／要求／パラメトリック制約を表すことができるSysMLを紹介した。
- ▶ エレベータ開発の事例ではシーケンス図から機能要求の導出を行う方法を示した。
- ▶ 二輪自動車のライダーアシスト制御システム設計を取り上げ、機能要求の明確化、システムの振る舞いの把握、アーキテクチャの検討手順を示した。これらの手順の中から、仕様を決定するためのシステム解析に必要な力学モデルの検討を行えることを示した。ユースケース分析で、テストケースの検討を行えることに注意されたい。

## 参考文献

- ▶ Systems Engineering Handbook Ver.3.2, INCOSE, 2010
- ▶ Visualizing Project Management, Third Edition
  - ▶ Kevin Forsberg, Hal Mooz, Howard Cotterman, John Wiley & Sons, Inc.
- ▶ A Practical Guide to SysML
  - ▶ Sanford Friedenthal, Alan Moore, and Rick Steiner, The Morgan Kaufman OMG Press
- ▶ システムズモデリング言語 SysML (A Practical Guide to SysMLの翻訳本)
  - ▶ 西村 秀和(監訳), 白坂成功, 成川輝真, 長谷川堯一, 中島裕生, 翁志強,
  - ▶ 東京電機大学出版局, 発売日:2012年5月10日
- ▶ The Engineering Design of Systems, - Models and Methods -, 2<sup>nd</sup> Edition
  - ▶ Dennis M. Buede, John Wiley & Sons, Inc.
- ▶ 西村秀和, モデルベースシステムズエンジニアリングとSysMLへの期待, 設計工学, 日本設計工学会, Vol.46, No.5, pp.241-246, (2011)

## 参考文献

- ▶ Kenichi Seki, Hidekazu Nishimura, Kosuke Ishii, Laurent Balmelli, Thermal/Acoustic Trade-off Design for Consumer Electronics in A Distributed Design Environment, Proceedings of The 19<sup>th</sup> Annual International Symposium of INCOSE, (2009), 0723.pdf.
- ▶ 関研一、西村秀和、大富浩一、国際分散設計環境下での協調設計手法の研究-場をモジュールとして取り扱う民生機器放熱静音設計-、日本機械学会設計工学・システム部門Designシンポジウム2010, (2010), dss10-0102.pdf.
- ▶ Kenichi Seki, Hidekazu Nishimura, Shaopeng Zhu, Laurent Balmelli, A Parametric Design Framework to Support Structural and Functional Modeling of Complex Consumer Electronics Products, International Conference on Engineering Design 2011
- ▶ Kenichi Seki, Hidekazu Nishimura, A module-based thermal design approach for distributed product development, Research in Engineering Design, DOI: 10.1007/s00163-011-0113-x
- ▶ 関 研一, 西村 秀和, 朱 紹鵬, Laurent Balmelli, 民生機器開発における機能・構造モデルを用いた分散協調設計 (SysML製品モデルとDSMを利用したモジュール設計プロセスの計画), 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 785, pp. 187-200 (2012)

ご静聴ありがとうございました。