



SWEST15
2013年8月22日(木)~23日(金)
下呂温泉 水明館(岐阜県下呂市)

SWEST/DAS合同基調講演

**モデルベースシステムズエンジニアリングと
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 <http://lab.sdm.keio.ac.jp/nismlab/>

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(2013年度副会長兼務)



西村秀和

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）

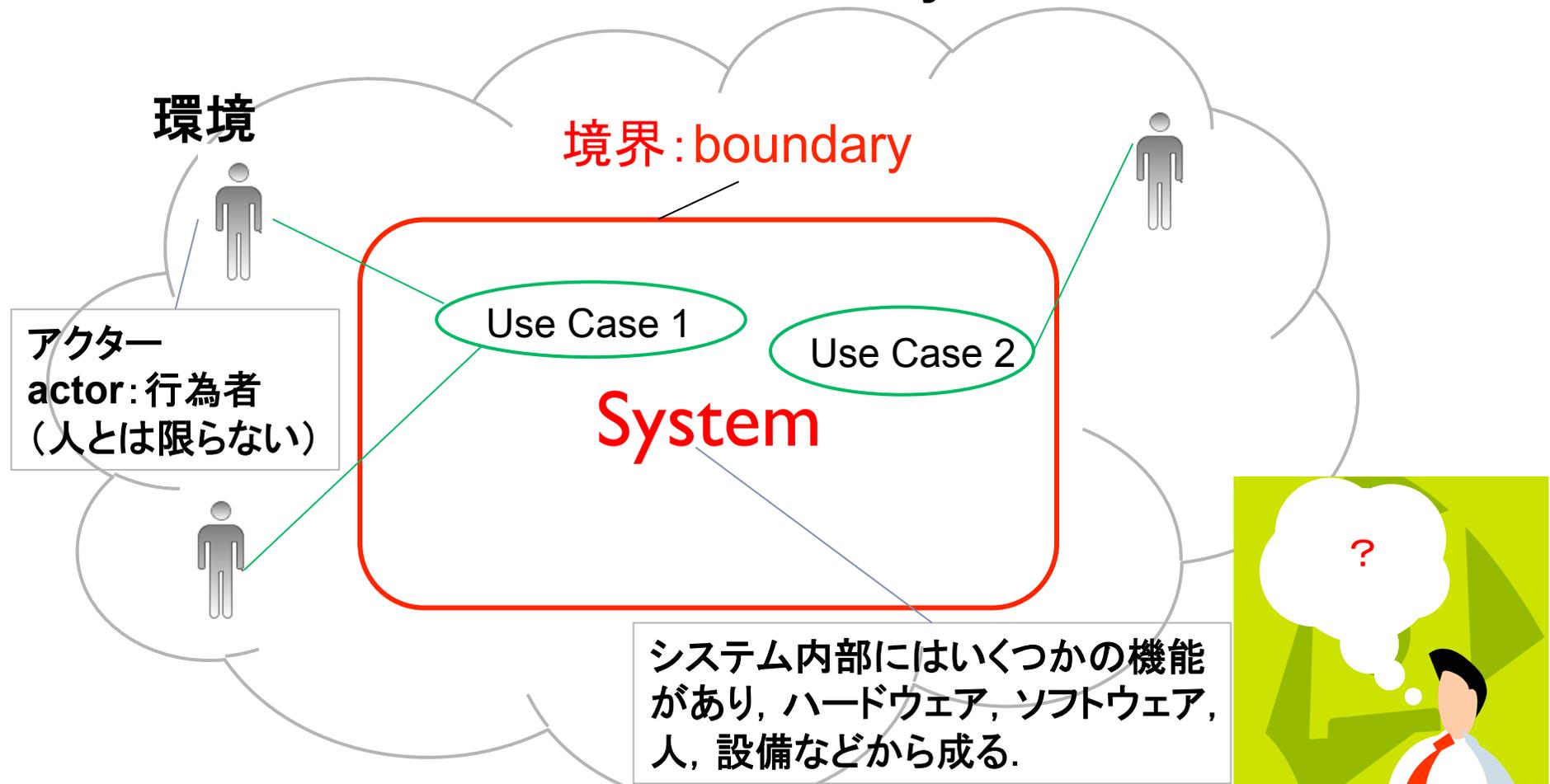
共同研究実績

車両衝突時の乗員保護制御，次世代車両運動統合制御，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

システムとは何か？

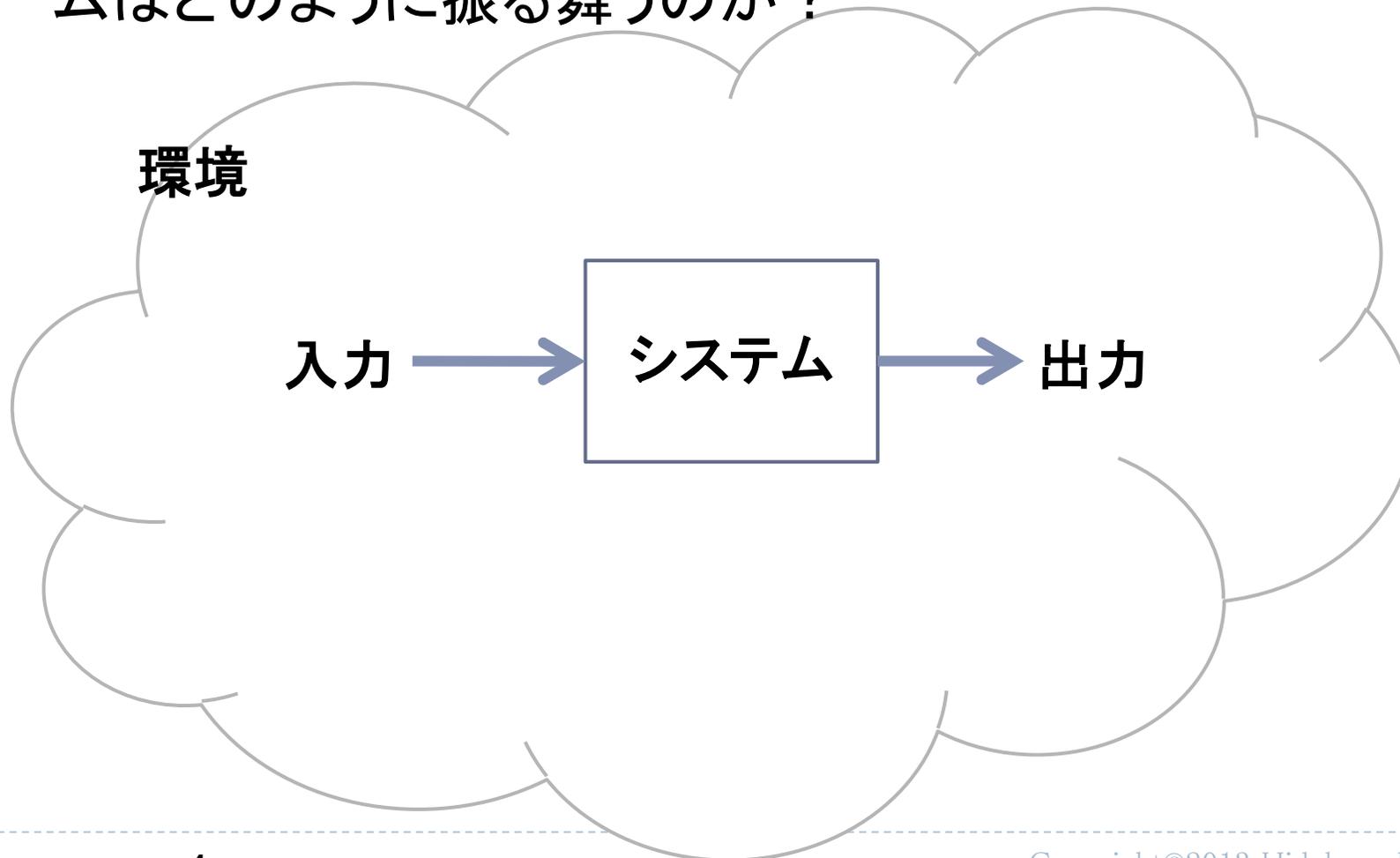
システム：相互に関連があって全体として機能するコンポーネントの集まり

人が〇〇したいと考えた対象 = System of interest



システムの振る舞いとは？

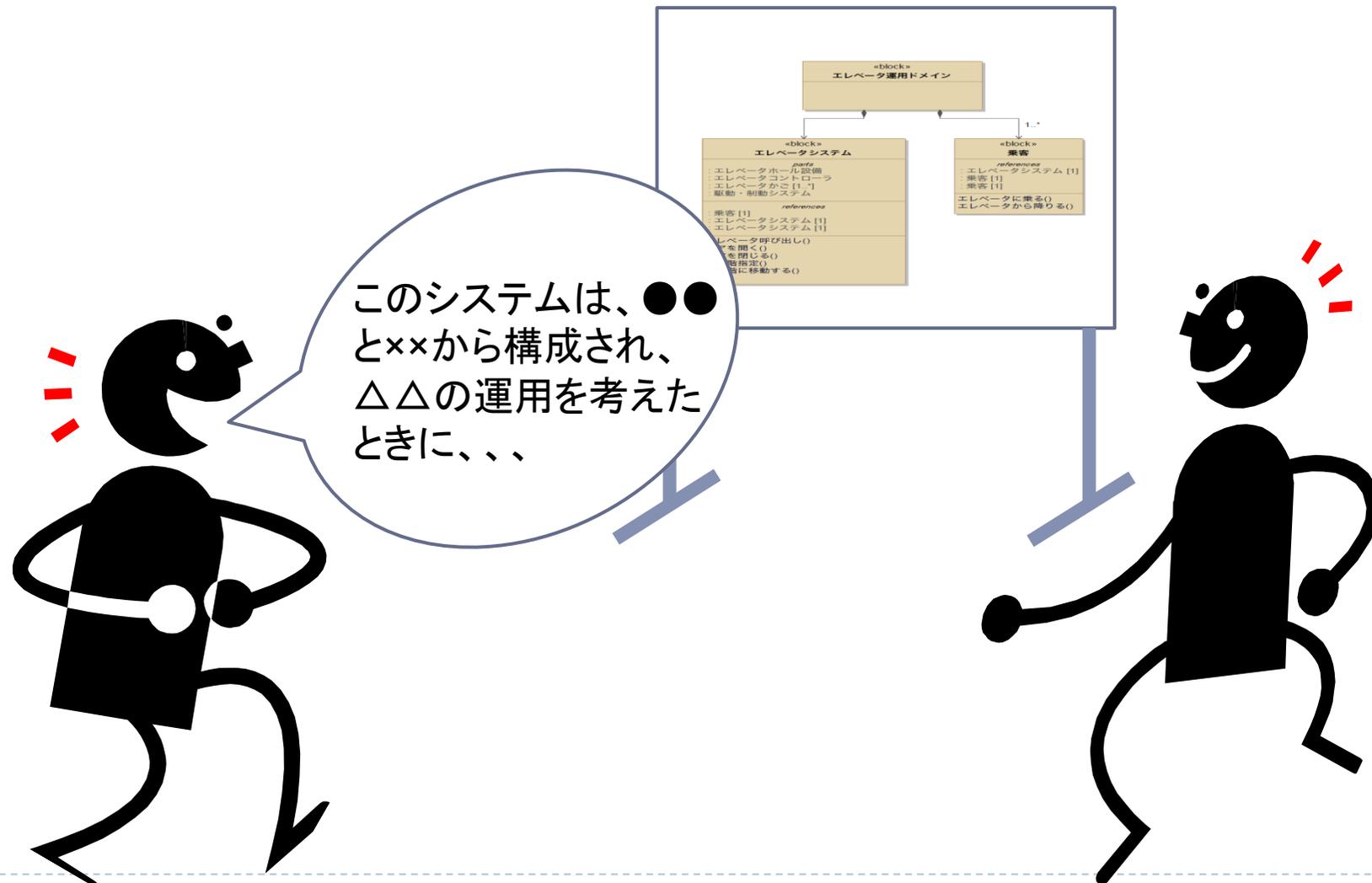
- ▶ 対象システム (System of interest) = 着目しているシステムはどのように振る舞うのか？



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



講義内容の抜粋

- ▶ 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？
- ▶ 2. SysMLによる機能要求分析
 - ▶ 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
- ▶ 3. 車両制御システム開発の事例紹介
 - ▶ オペレーション／機能／物理の視点
 - ▶ 動作シーケンスとインタフェース
 - ▶ システムレベルでの機能・物理モデリング
 - ▶ 機能アーキテクチャ
 - ▶ 最適化問題の設定
- ▶ 4. まとめ

1. モデルベースシステムズエンジニアリング

- ▶ I-1 Dual Vee(二元V字)開発モデル
- ▶ I-2 エンティティV
- ▶ I-3 アーキテクチャの3つの視点とは？
- ▶ I-4 要求定義と検証・妥当性確認の位置づけ
- ▶ I-5 オペレータとシステムの相互作用

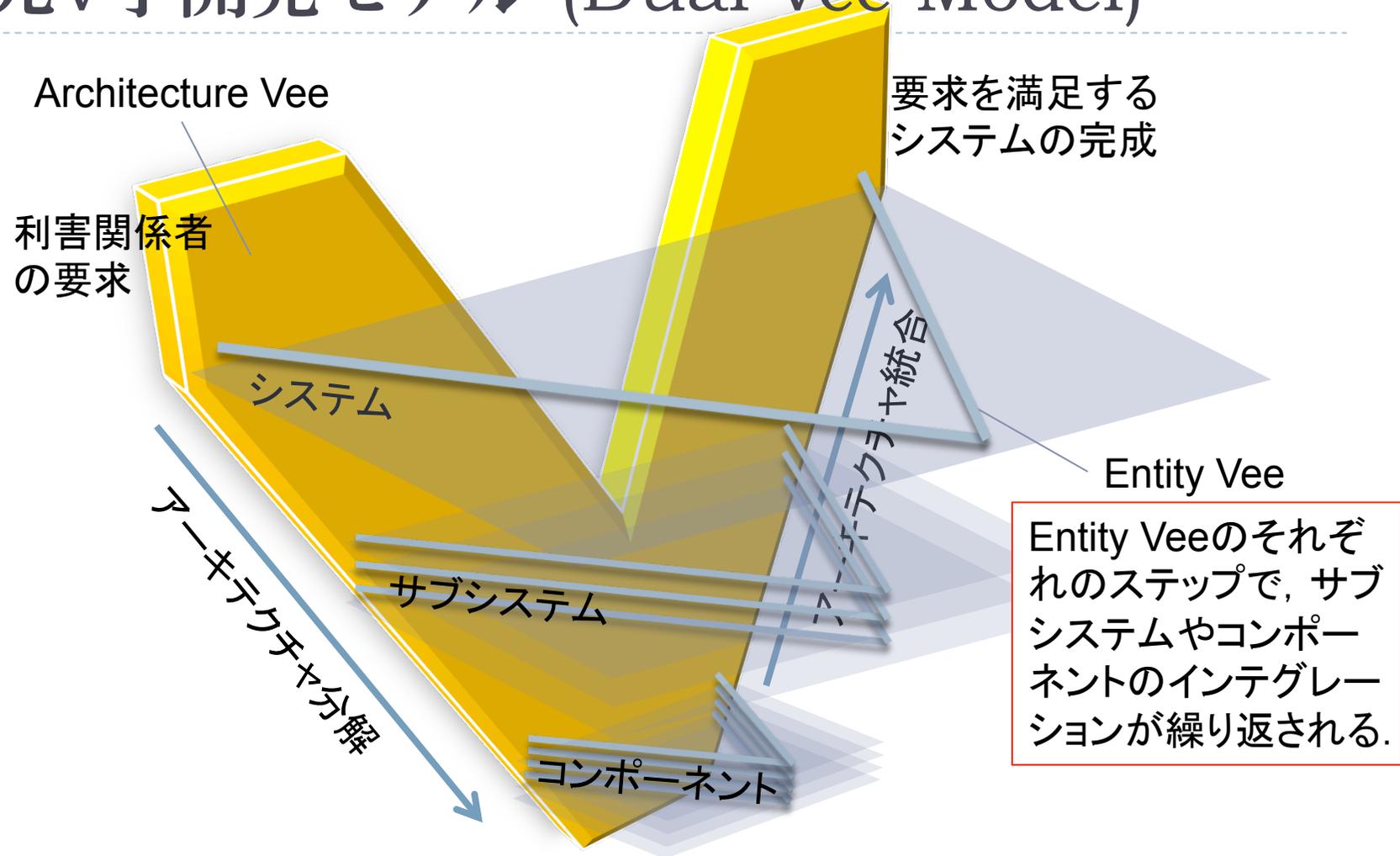
1. モデルベースシステムズエンジニアリング

- ▶ 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
 - ▶ システムズエンジニアリングでは、開発サイクルの初期の段階で**顧客のニーズを明確化**し、**機能要求を定義**し、関連する問題をすべて考慮しながら**設計のための総合とシステムの妥当性確認**を進める。
 - ▶ システムズエンジニアリングでは、**ユーザーニーズに合致した品質の製品を供給することを目的**とし、**ビジネスとすべての顧客の技術的要求の両者を考慮**する。
- ▶ INCOSE: International Council on Systems Engineering

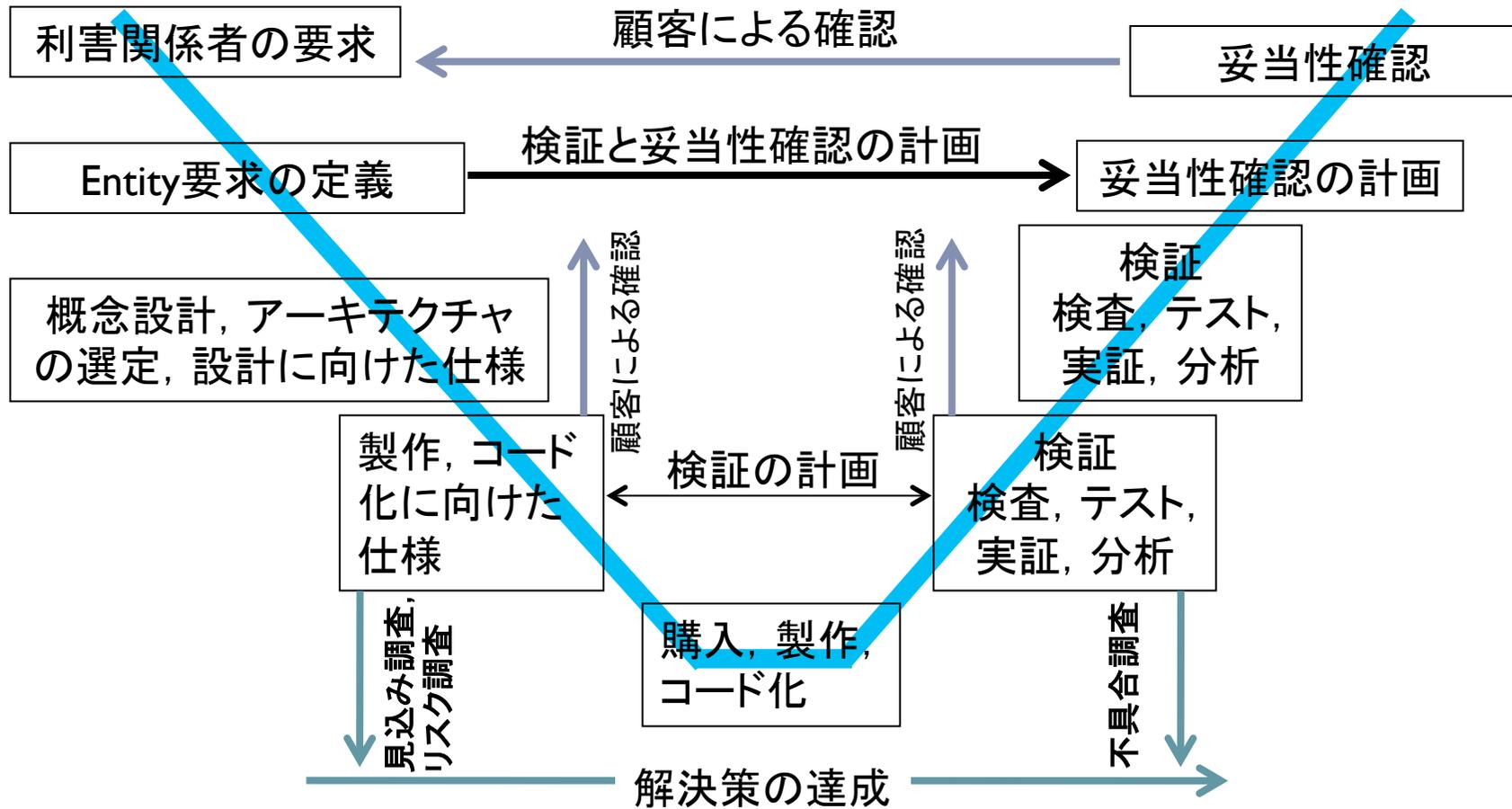
モデルベースシステムズエンジニアリング

- ▶ モデルに基づくシステムズエンジニアリングの必要性
 - ▶ 文書ではすぐに理解できないことが、**図的に表現すること**で理解が容易になる。
 - ▶ **協働してシステム開発をする**には、共通言語が必要であり、それをサポートするには図的な言語が有効である。
- ▶ SysML (Systems Modeling Language)
 - ▶ 有力な図的表現方法として注目されている。
 - ▶ 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観点で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)



2つの鉄則、3つの視点

▶ 要求の2つの鉄則

- ✓ 機能要求: “どのように要求を実現するか?”の前に
“それは何か?”, “なぜそれが必要か?”を明確にする。
- ✓ 要求は“測定可能”で“テスト可能”でなければならない。

▶ アーキテクチャの3つの視点

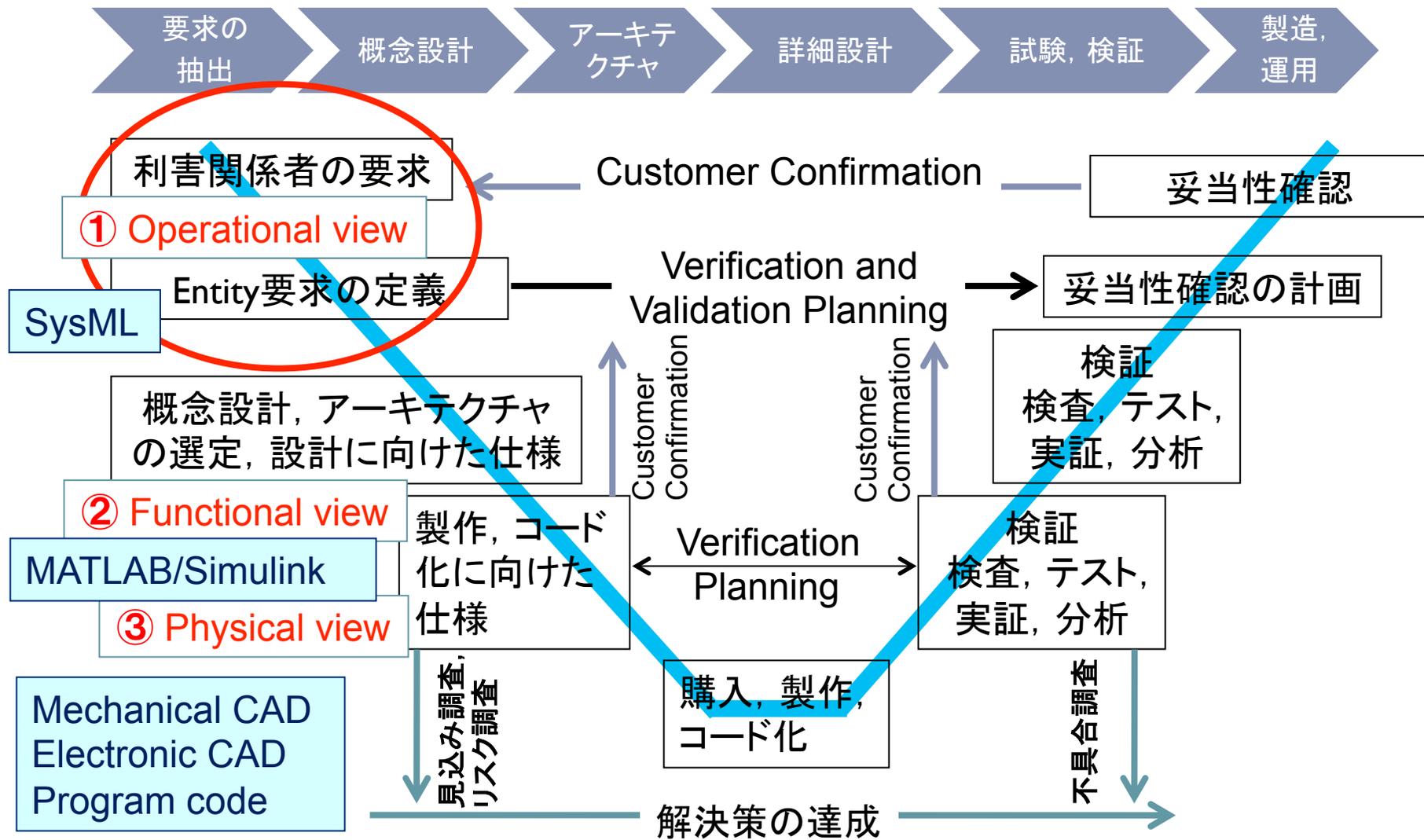
- ✓ Operational view: システムの使い方、動かし方
- ✓ Functional view: システムへ要求される機能
- ✓ Physical view: 機能を実現するハードウェア、ソフトウェア

アーキテクチャの3つの視点

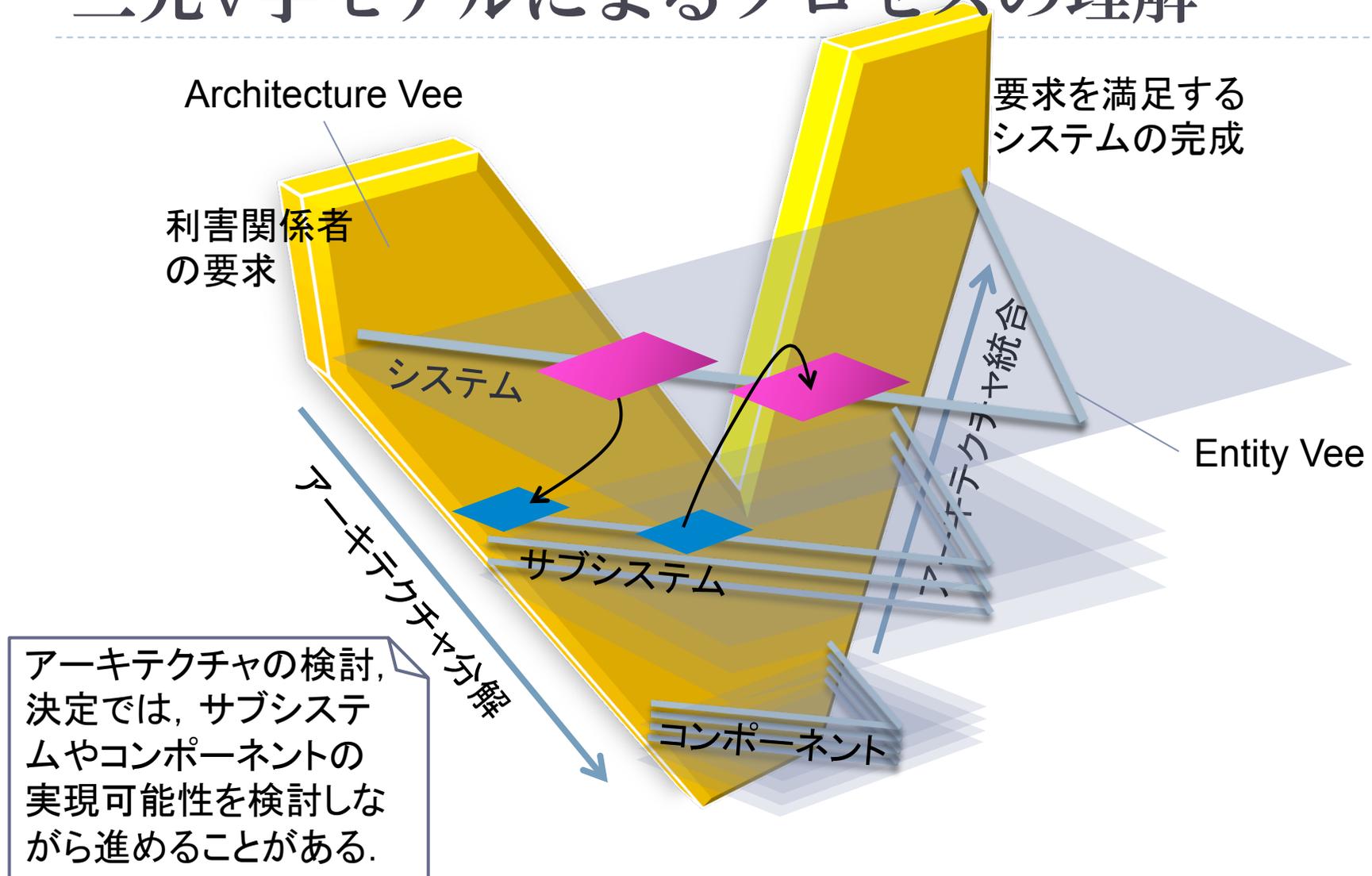
- ▶ **Operational view** (オペレーション)
 - ▶ 開発するシステムはどのように**使用**されるのか？
 - ▶ 開発するシステムは他のシステム(外部)とどのような**相互作用**をするのか？
- ▶ **Functional view** (機能)
 - ▶ システムは**何**をしなければならないか？
 - ▶ システムができること, サービス, 提供される**機能**を定義する.
機能間の**インタフェース**を明確にする.
- ▶ **Physical view** (物理)
 - ▶ **機能**を遂行するためのハードウェアやソフトウェアを定義する.
 - ▶ ハードウェアやソフトウェアを構成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.



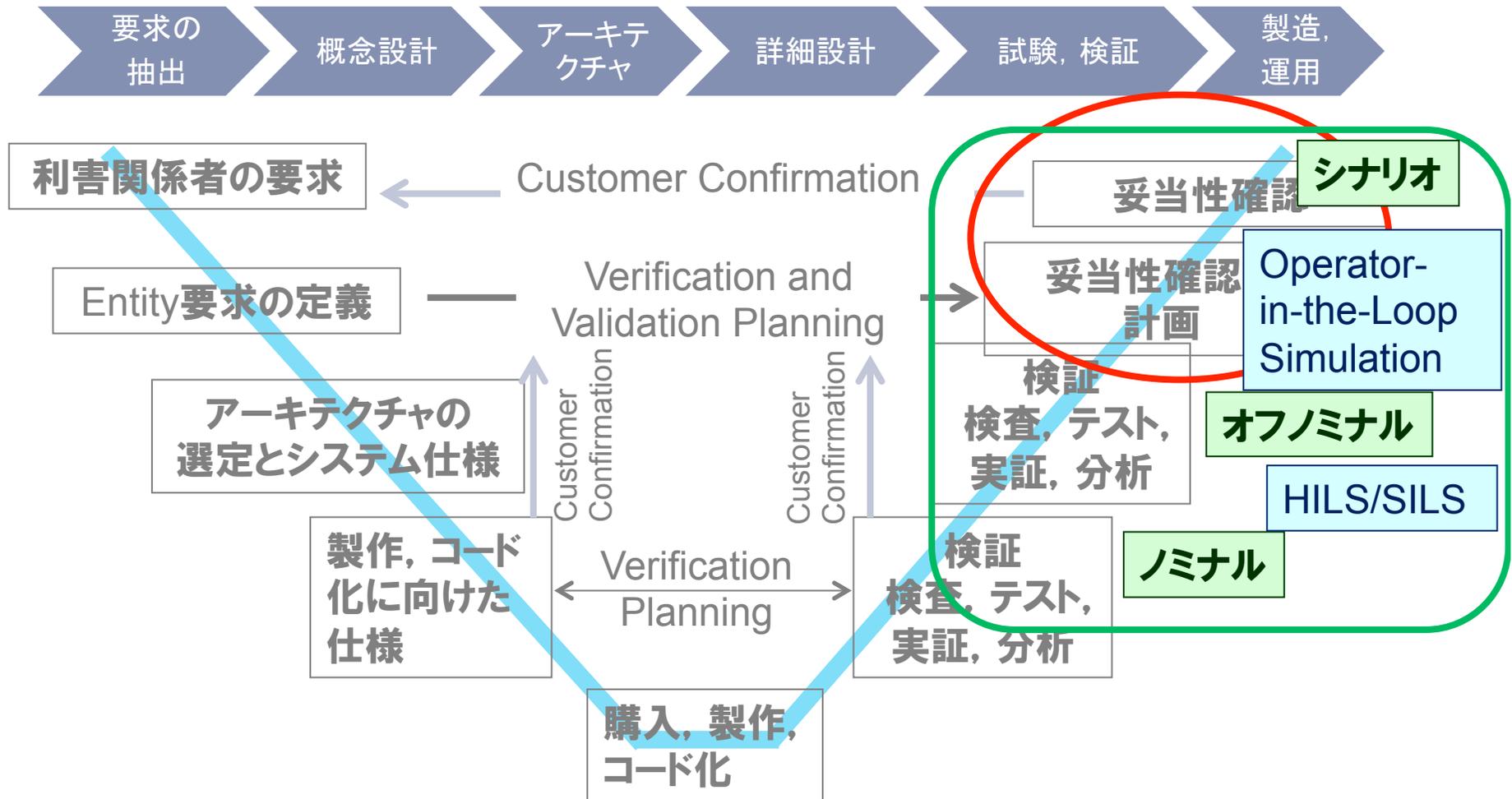
エンティティV: 要求定義の位置付け



二元V字モデルによるプロセスの理解

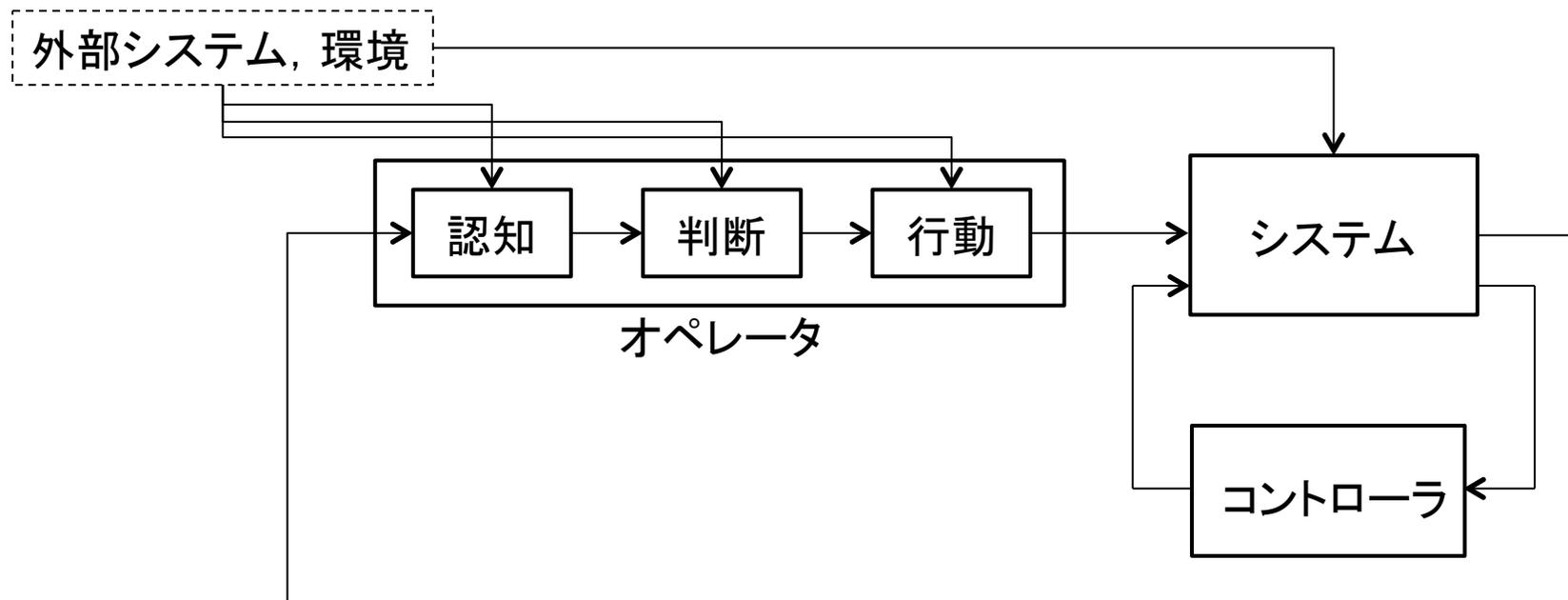


エンティティV：検証と妥当性確認の位置づけ



オペレータとシステムの相互作用

- ▶ オペレータとシステムはどのような相互作用を起こすか？
- ▶ システムがコントローラで制御されている場合、オペレータによる操作とコントローラによる制御の間に矛盾が生じてはいけな。 → **Operator-in-the-loop Simulationによるテスト**
- ▶ 設計段階での考慮 → **Operator-in-the-loop Designの必要性**



2. SysMLによる機能要求分析

- ▶ 2-1 SysMLで何ができるのか？
- ▶ 2-2 構造／振る舞い／要求／パラメトリック制約
- ▶ 2-3 開発するシステムの機能
- ▶ 2-4 ブロック間のインタフェース

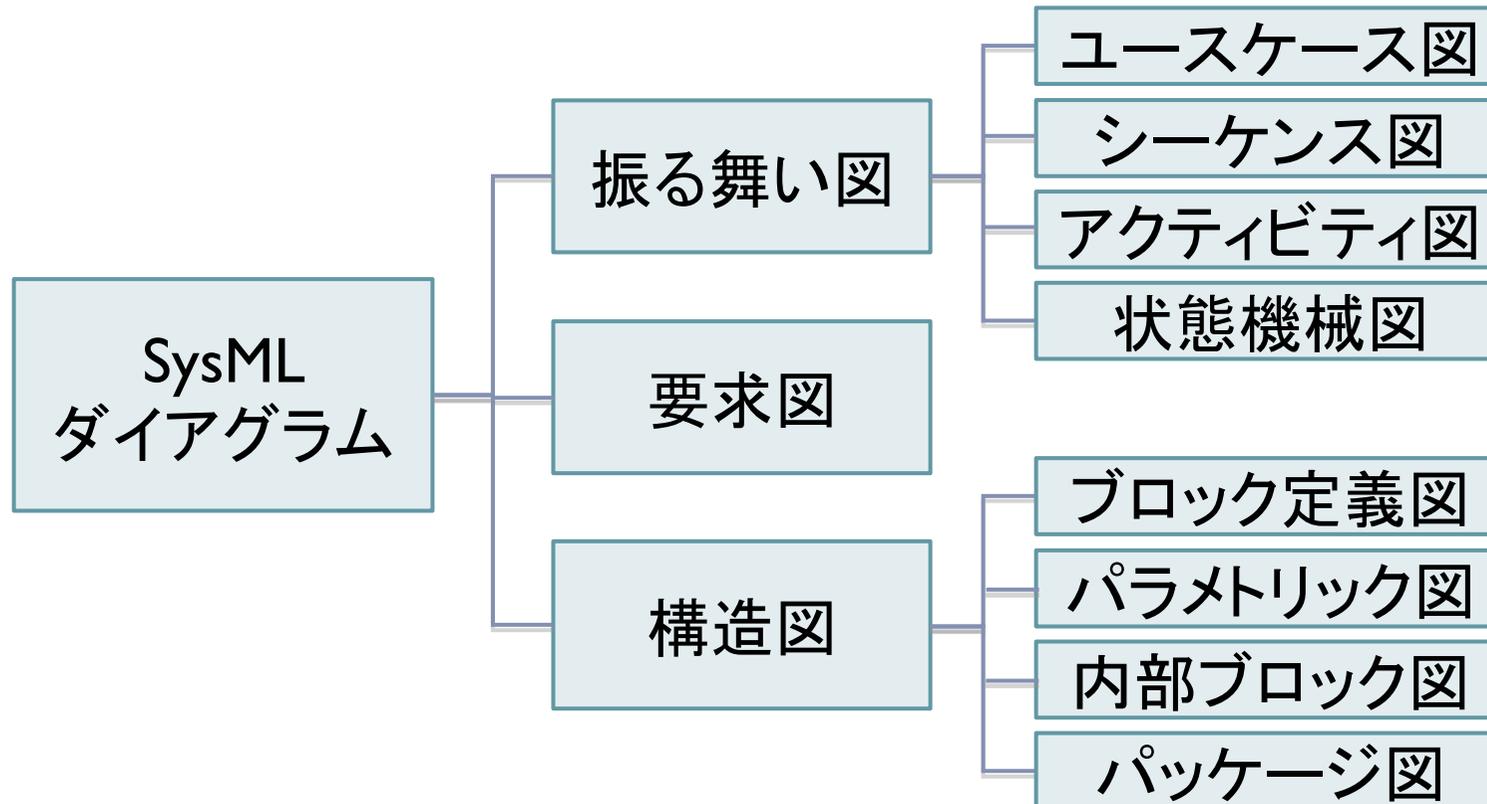
書籍のご紹介(Practical Guide to SysMLの翻訳本)

- ▶ 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, 翁志強
- ▶ 著者: Sanford Friedenthal, Alan Moore, Rick Steiner
- ▶ 出版社: 東京電機大学出版局



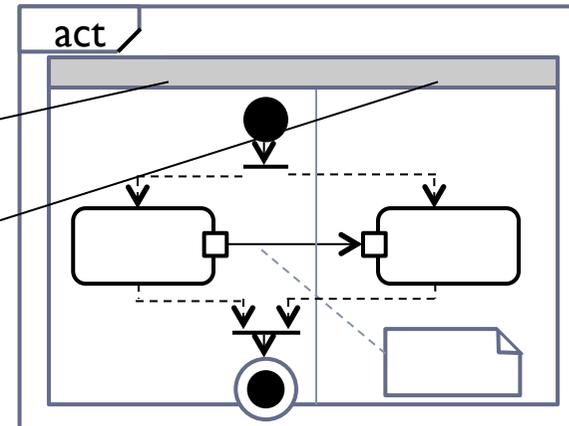
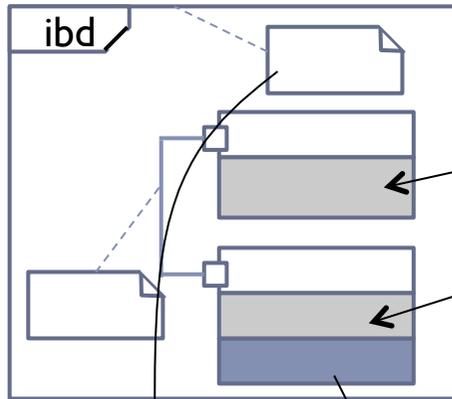
SysMLダイアグラムの分類

SysML: Systems Modeling Language



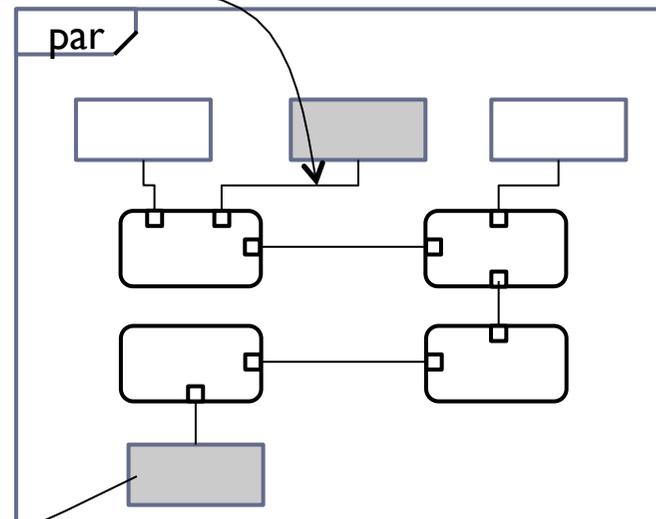
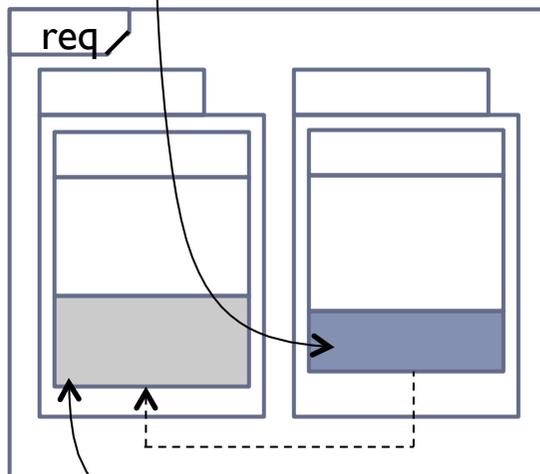
SysMLのダイアグラムは、互いに関連しているので、設計変更があった場合にもその影響を容易に把握できる。

構造



振る舞い

要求

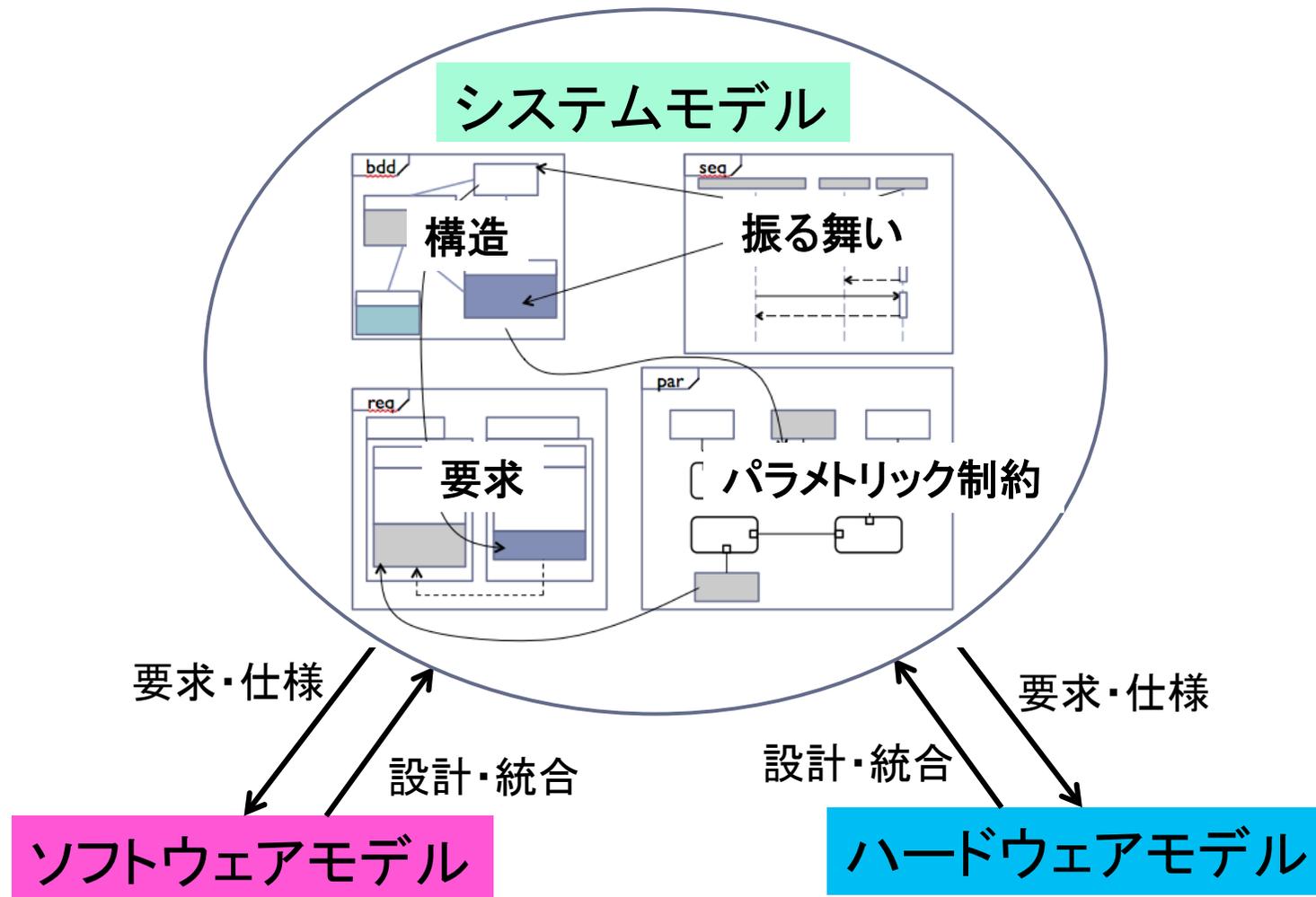


パラメトリック
制約

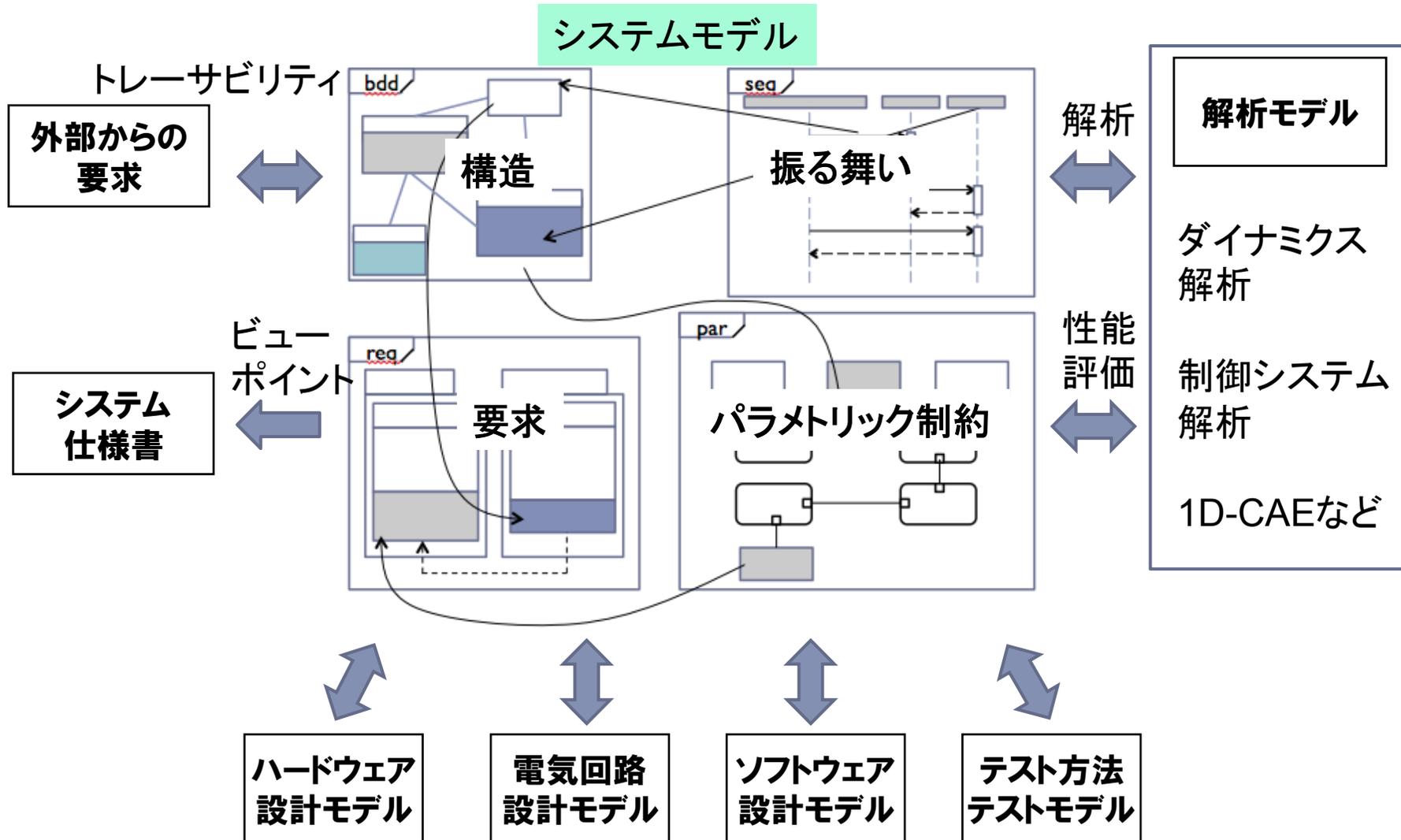
- ・数式表現
- ・運動方程式
などの制約



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

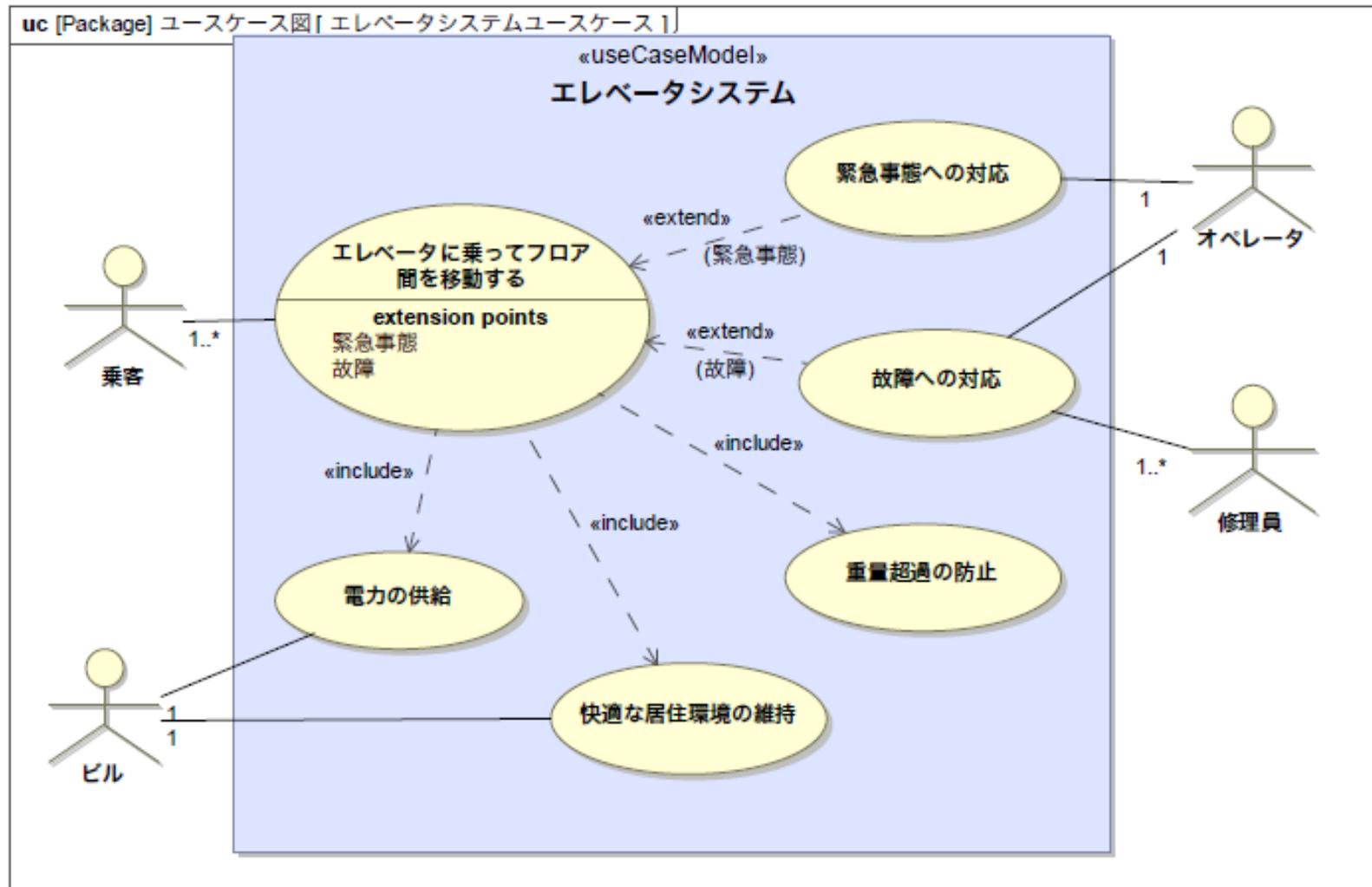


エレベーターに対する要求（例）

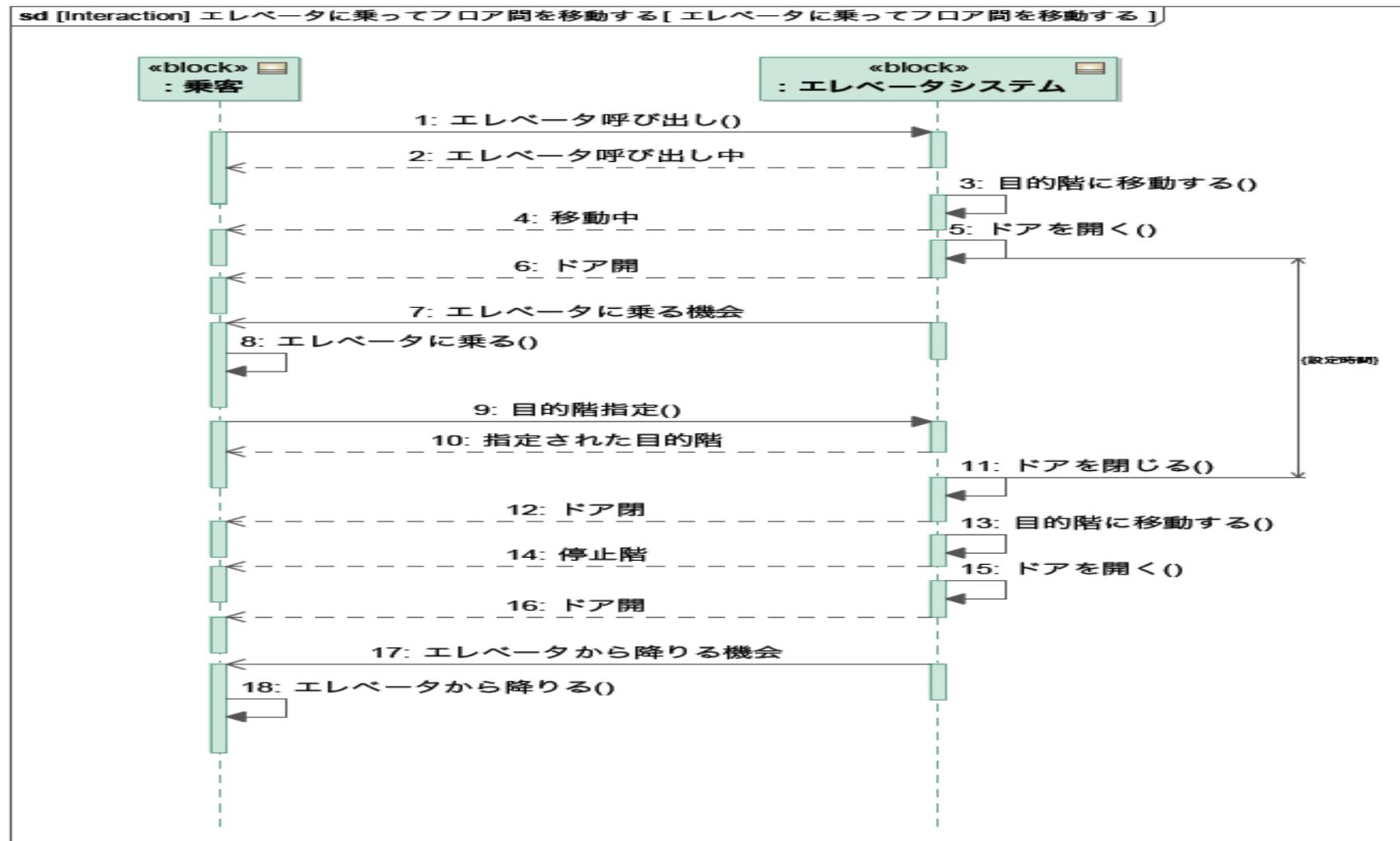
- ▶ エレベーターは、ビルの各階から“コール(呼び)”を受けること。(入力に関する要求)
- ▶ エレベーターは、想定される乗員に対して、エレベーターを呼んでいることを表示すること。(出力に関する要求)
- ▶ エレベーターは、緊急コールに対してビルにある標準電話を利用すること。(外部インタフェースに関する要求)

The Engineering Design of
Systems, - Models and Methods
-, 2nd Edition, Dennis M. Buede,
John Wiley & Sons, Inc.

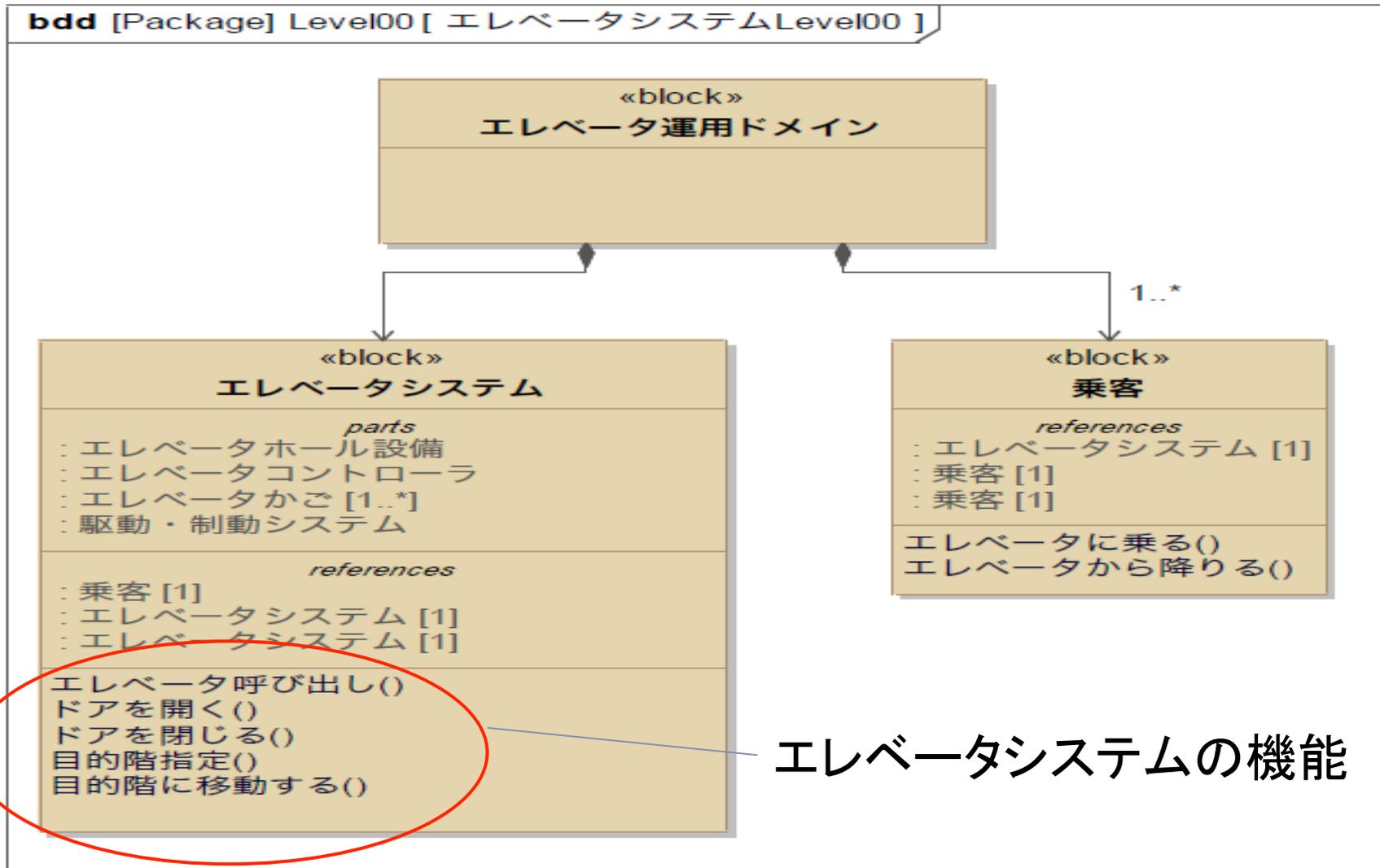
ユースケース図



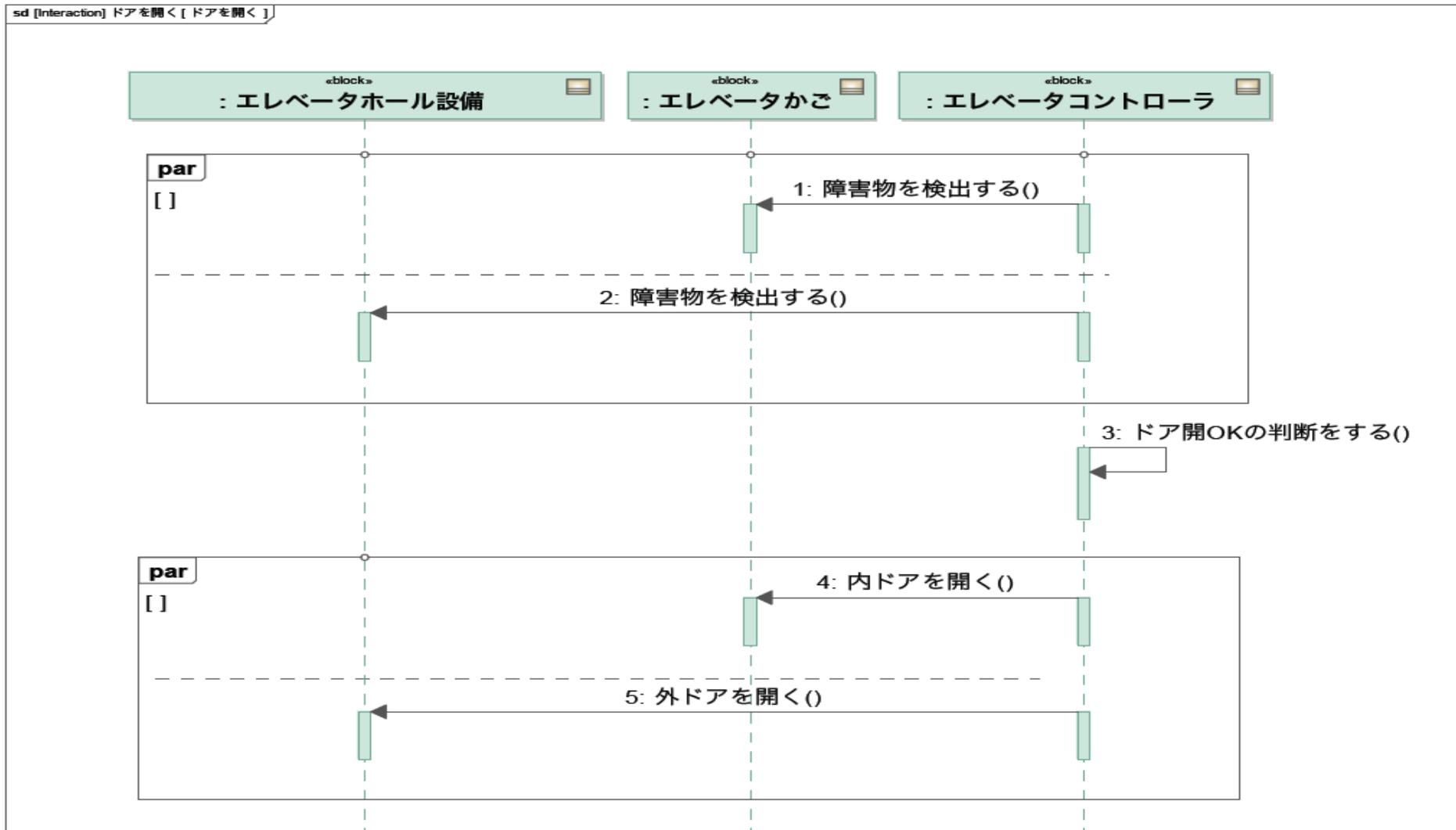
シーケンス図 (コンテキストレベル)



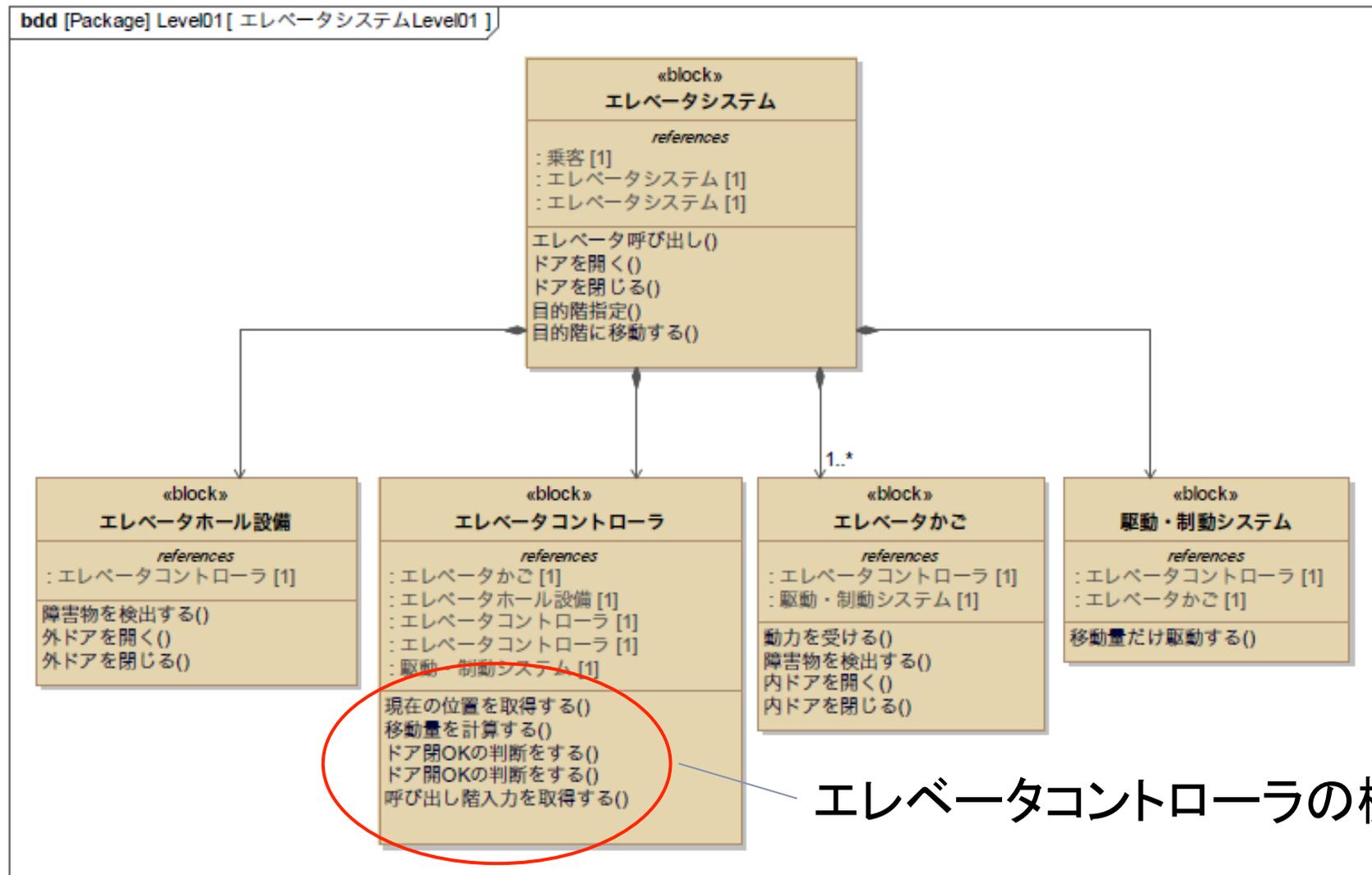
コンテクストレベルでの機能分析



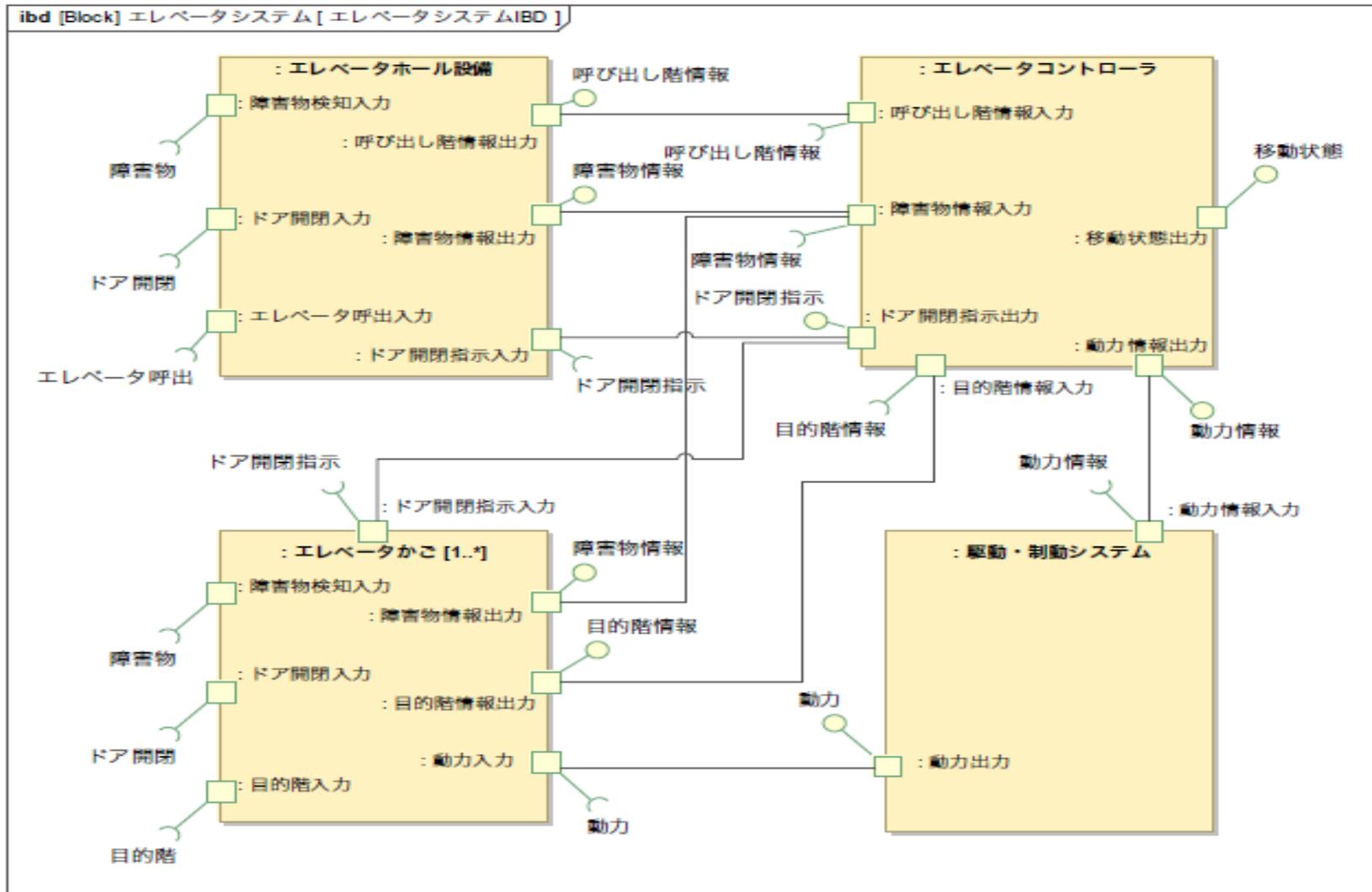
ユースケース「ドアを開く」 →シーケンス図



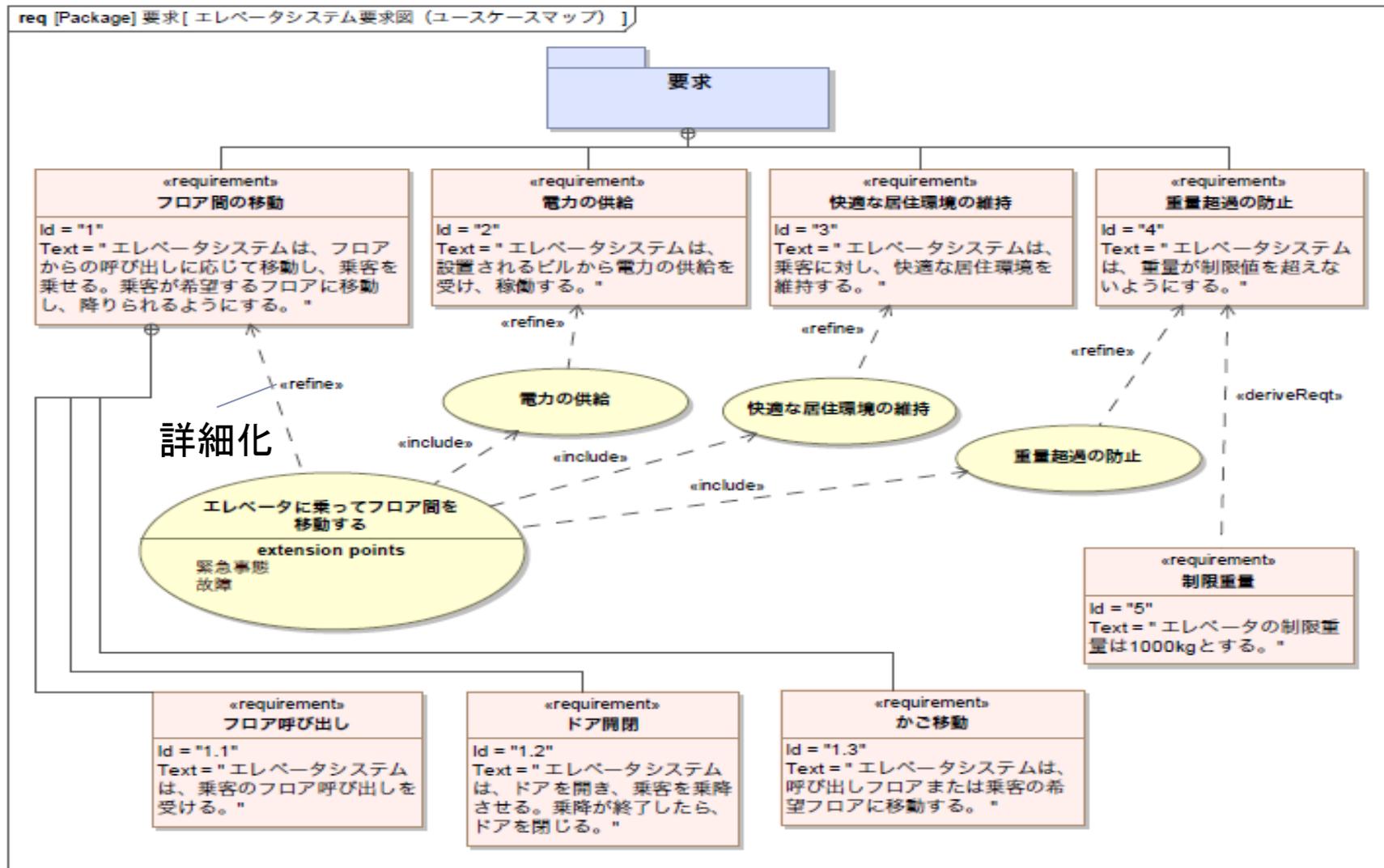
アナリシスレベル01での機能分析



ブロック間のインタフェース



要求を詳細化したユースケース → テストケース



SysMLの活用で見えてくること

- ▶ システムのモデル表現
 - ▶ 構造／振る舞い／要求／パラメトリック制約



- ▶ - What - 何をしなければいけないのか？
 - ▶ オペレータとの相互作用の明確化
 - ▶ 最適化“問題”の設定
 - ▶ トレードオフ“問題”の定義
- ▶ アーキテクチャと仕様決定までのトレース

3. 車両制御システム開発の事例紹介

- ▶ 3-1 コンテキストレベルのユースケース分析
 - ▶ 3-2 オペレーション／機能／物理の視点
 - ▶ 3-3 動作シーケンスとインタフェース
 - ▶ 3-4 システムレベルでの機能・物理モデリング
 - ▶ 3-5 機能アーキテクチャ
 - ▶ 3-6 最適化問題の設定
 - ▶ 3-7 トレードオフ分析とパラメトリック設計
 - ▶ 3-8 システムの本質をつかむシステム解析
- 二輪自動車の前輪
操舵アシスト制御
- 乗員保護システム

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)

二輪自動車の安定化制御

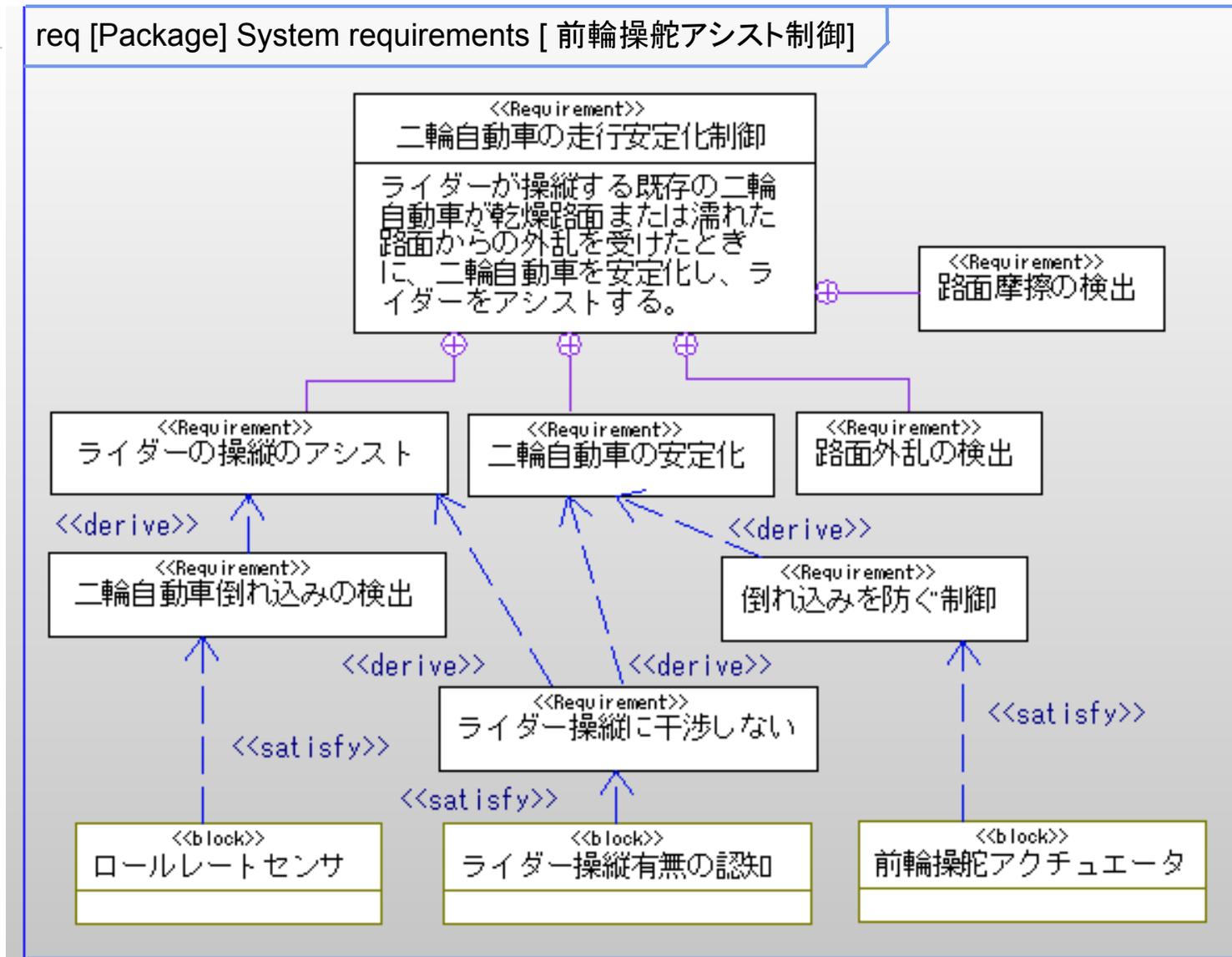
- ▶ 二輪自動車の安全な走行にはライダーによる適切な操作が必要.
- ▶ 突発的な外乱に対して、ライダーが瞬時に正確に二輪自動車を操縦できるとは限らない.



- ▶ 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)

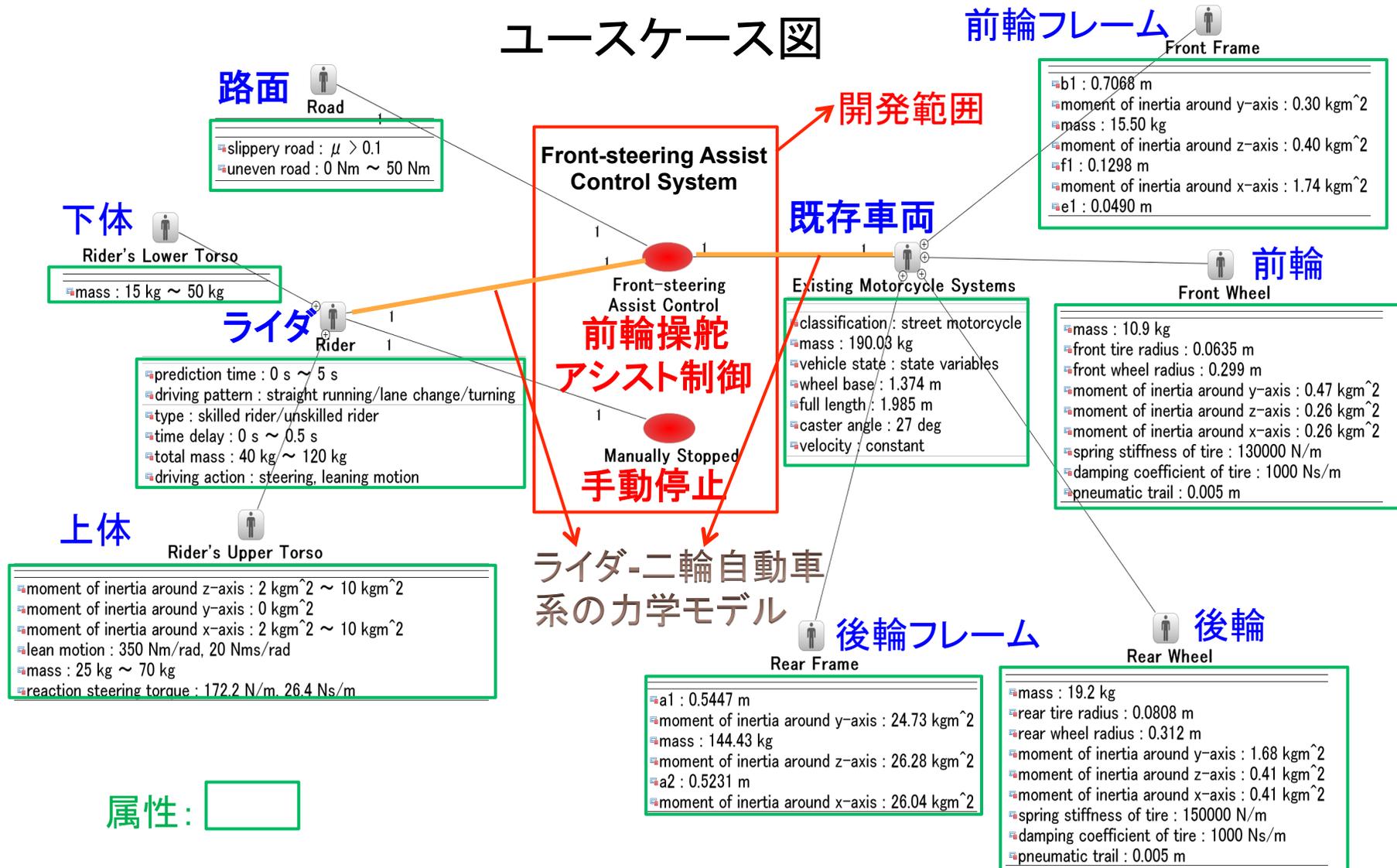


要求図

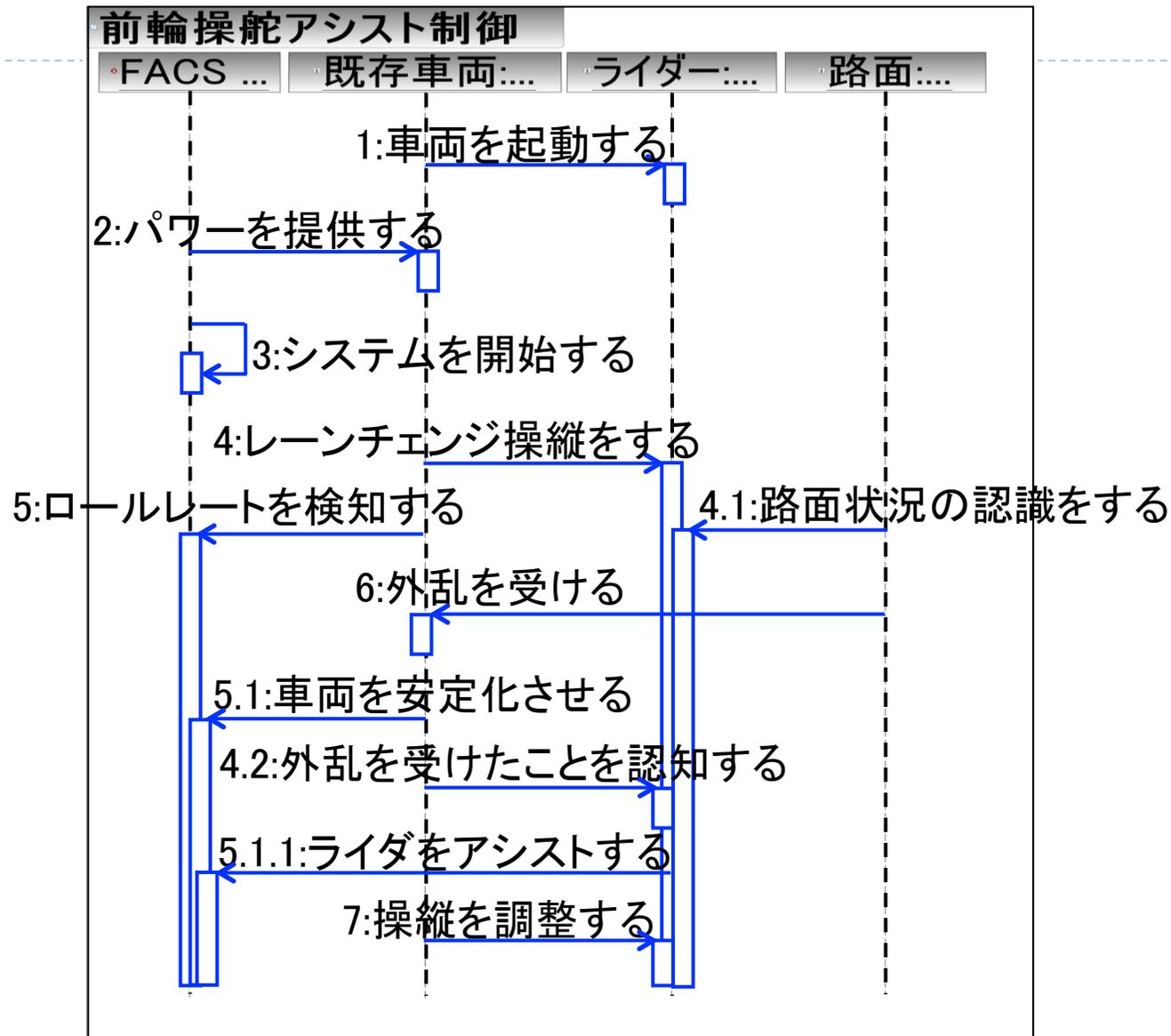


コンテクストレベルのユースケース分析

ユースケース図



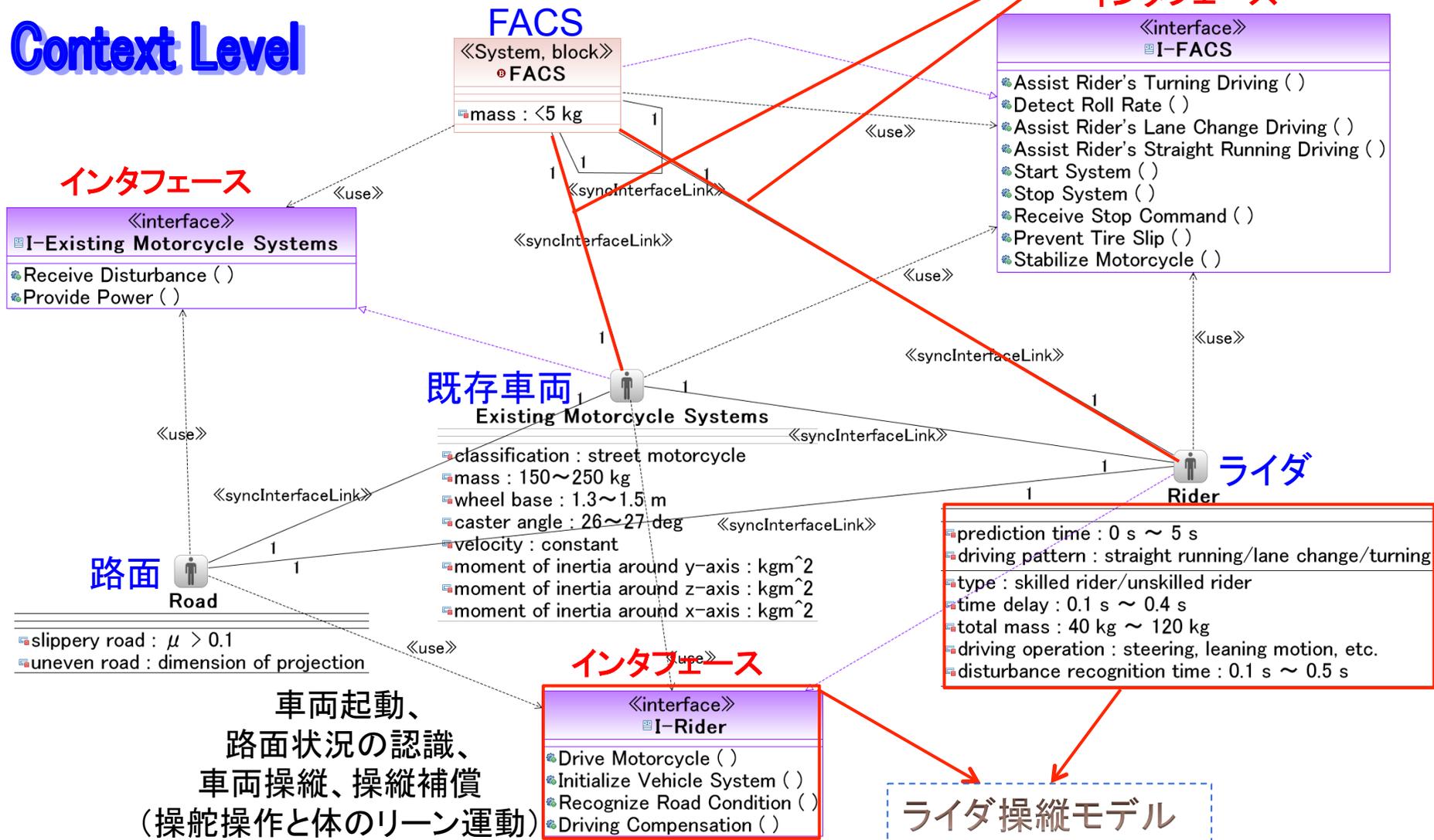
前輪操舵アシスト制御のシーケンス図



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

ライダー-二輪自動車系の
力学モデル

Context Level

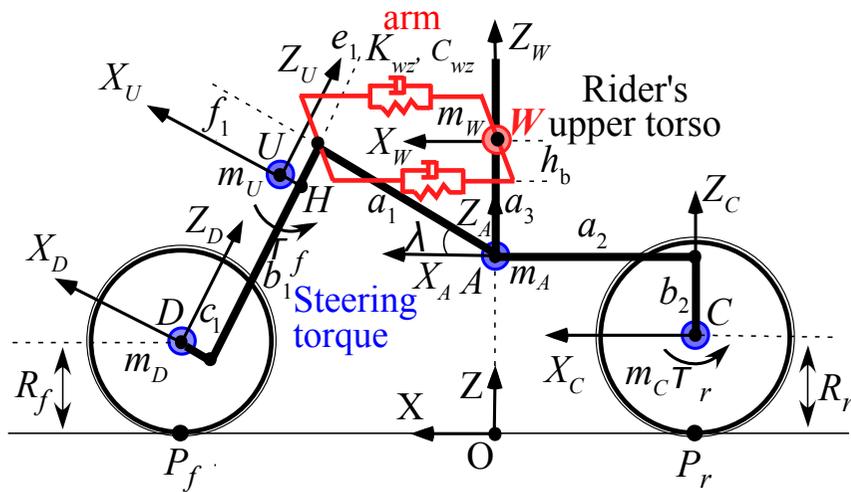


何をモデル化するべきか？

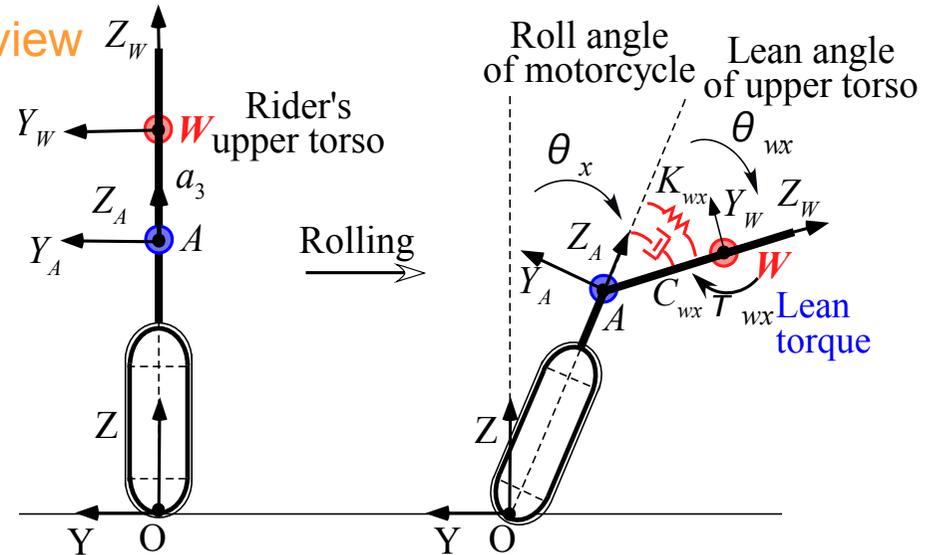
エンジニアリング解析のための機能・物理モデルの構築

ライダー二輪自動車モデル

Side view



Rear view



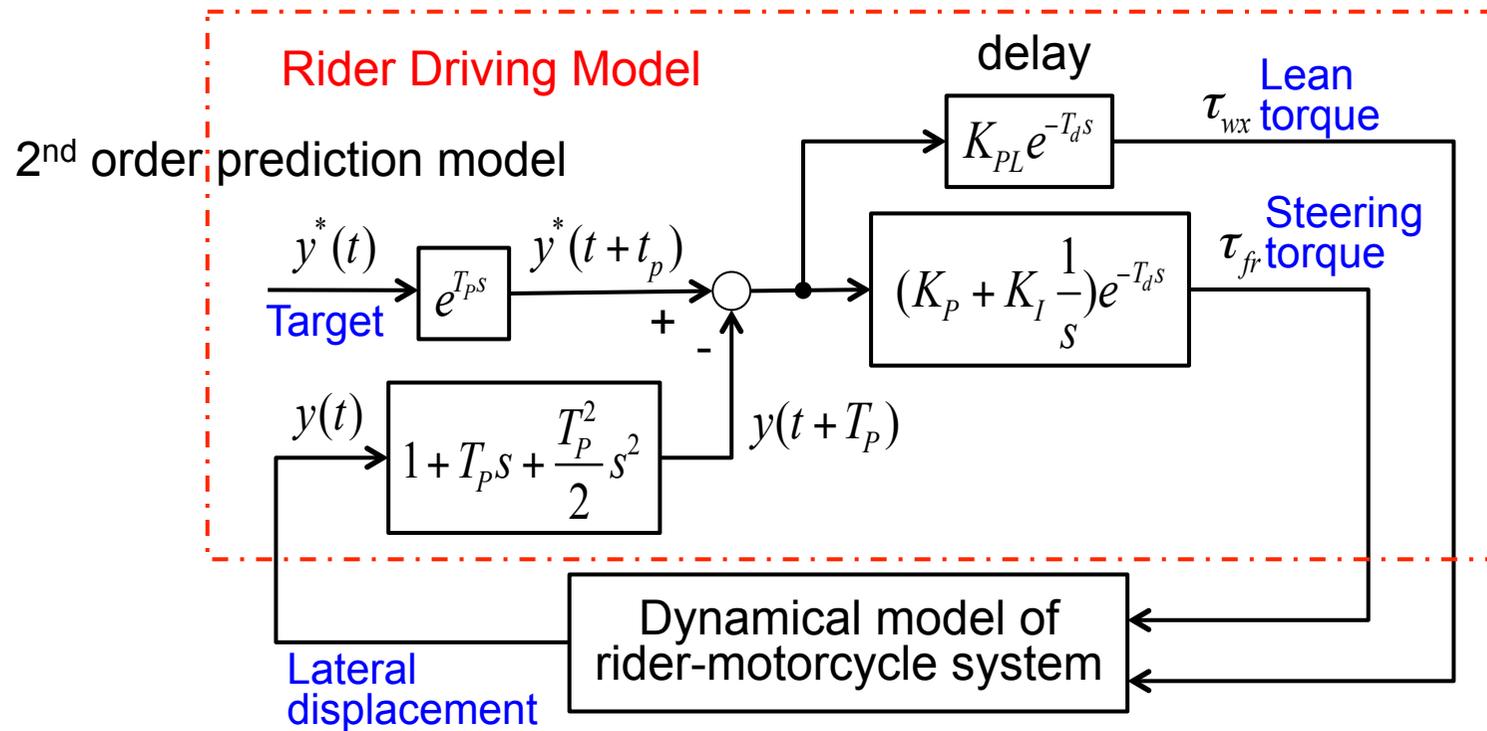
低次元化モデルに基づく制御システム設計

$$\mathbf{x}_{kd}(k+1) = \mathbf{A}_{kd} \mathbf{x}_{kd}(k) + \mathbf{B}_{kd} \Delta \dot{\theta}_{xd}(k)$$

$$\Delta \tau_{fc}(k) = \mathbf{C}_{kd} \mathbf{x}_{kd}(k) + \mathbf{D}_{kd} \Delta \dot{\theta}_{xd}(k)$$

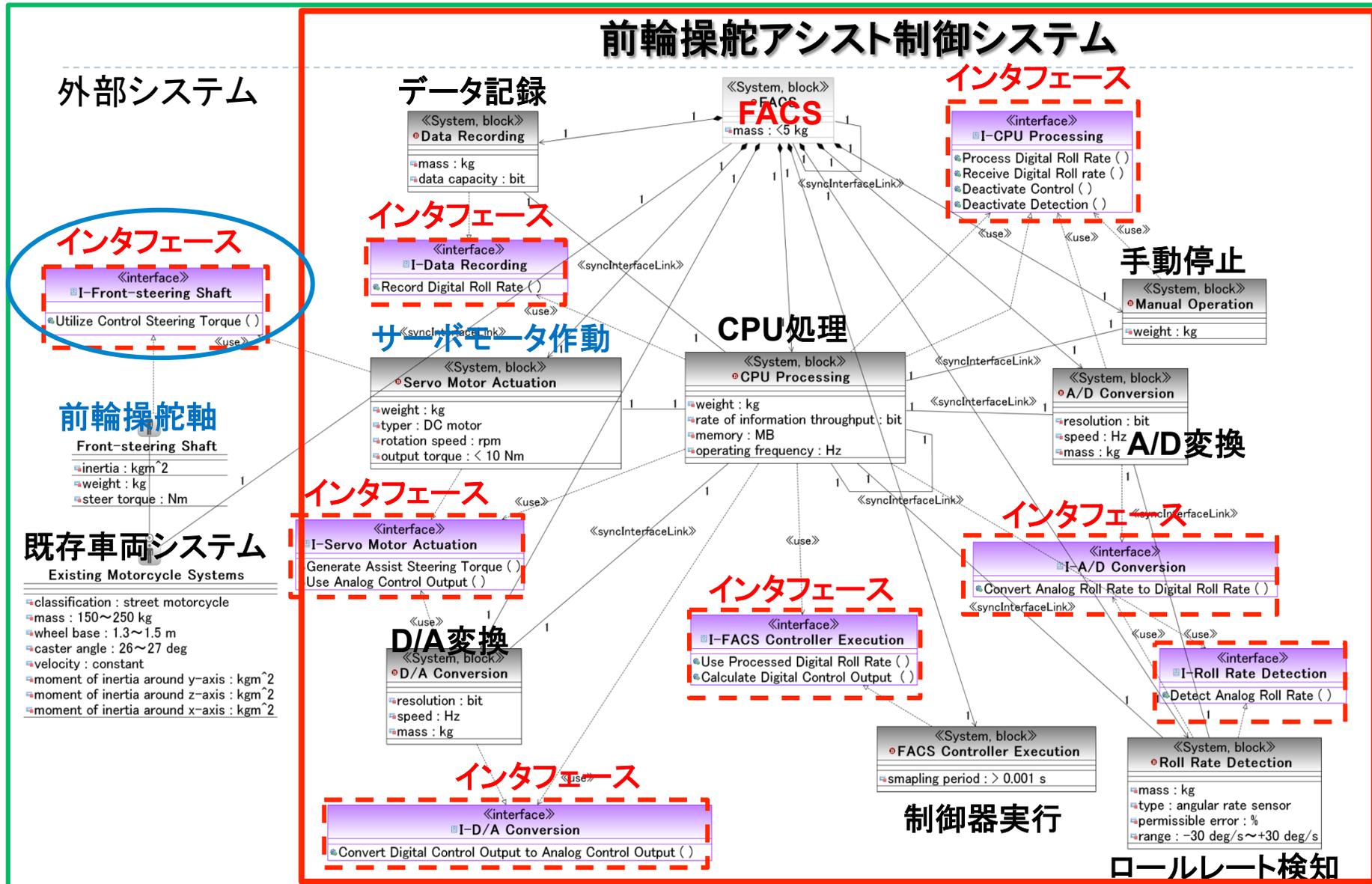
$\Delta \dot{\theta}_x$: roll rate, the feedback signal,
 $\Delta \tau_{fc}$: control steering torque, control output.

ライダー操縦モデル

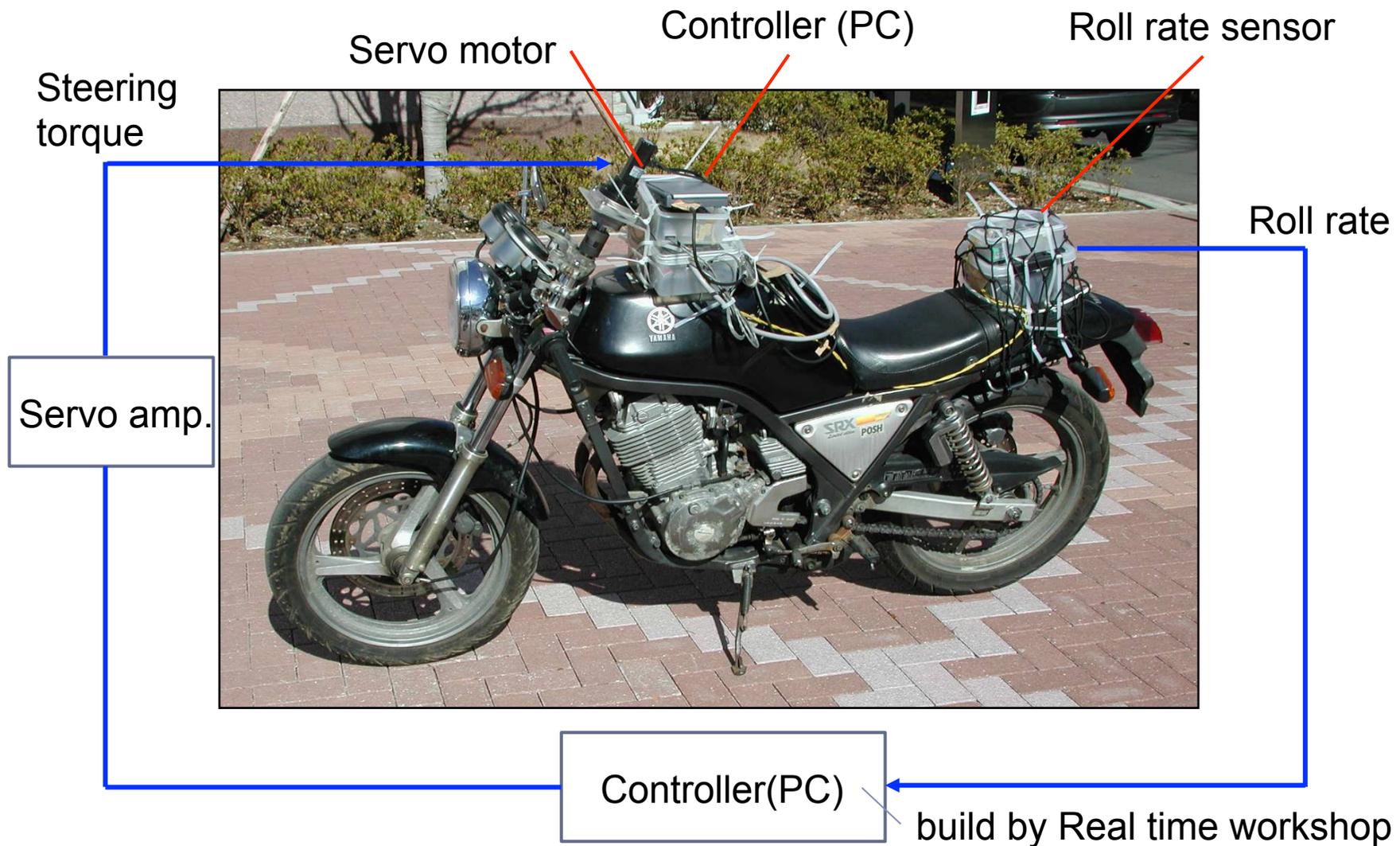


	Time delay T_d	Prediction time T_p	Proportional gain K_P	Proportional gain K_{PL}	Integral gain K_I
Unskilled rider	0.2 s	1.2 s	8	1.6	5
Skilled rider	0.1 s	1.5 s	5.2	1.04	4.5

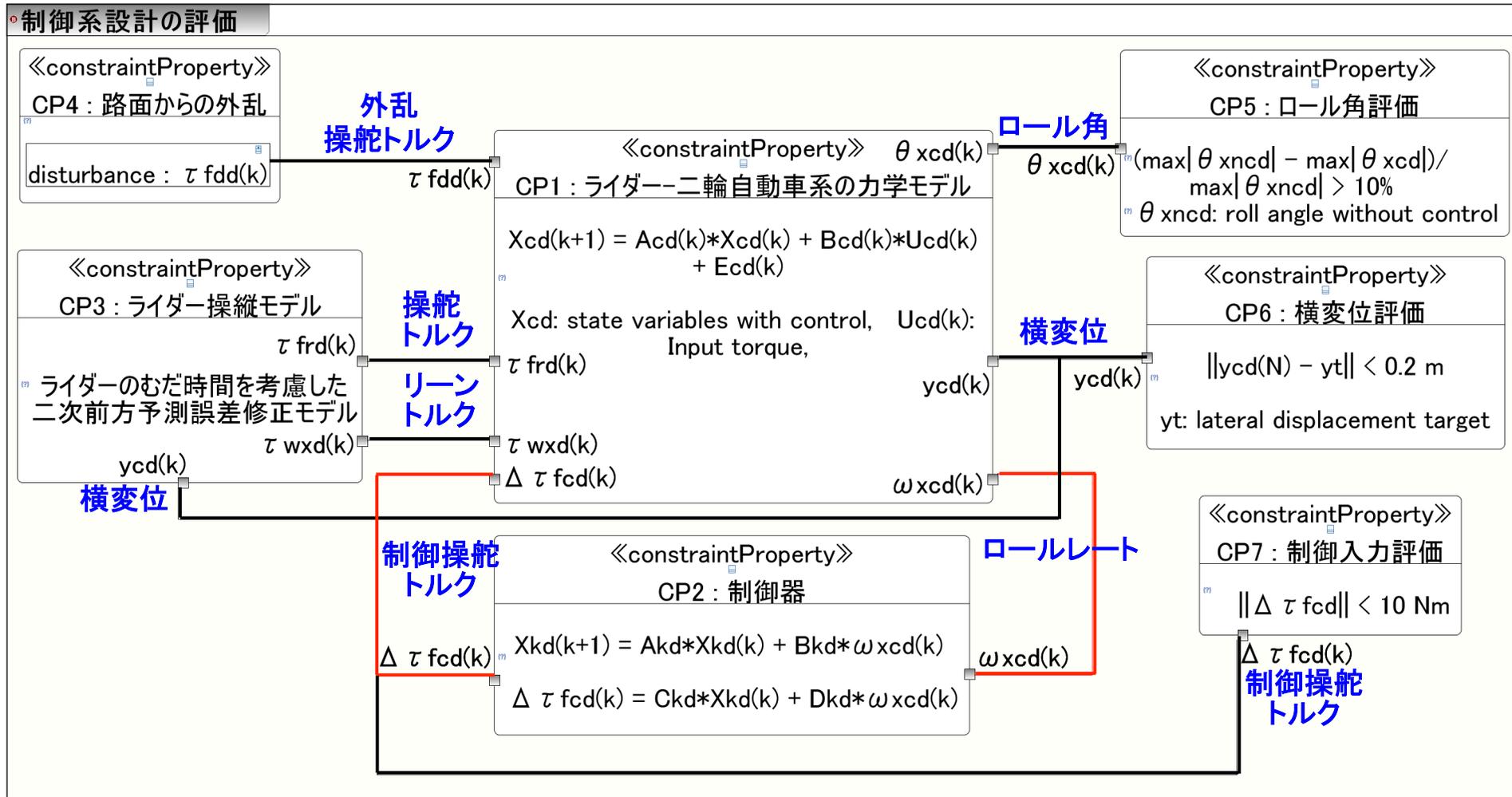
機能アーキテクチャの例



実験用プロトタイプ



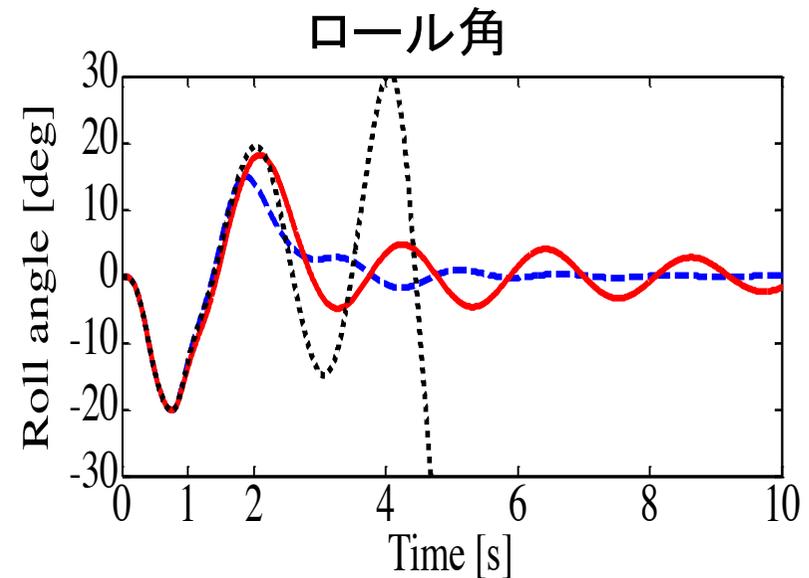
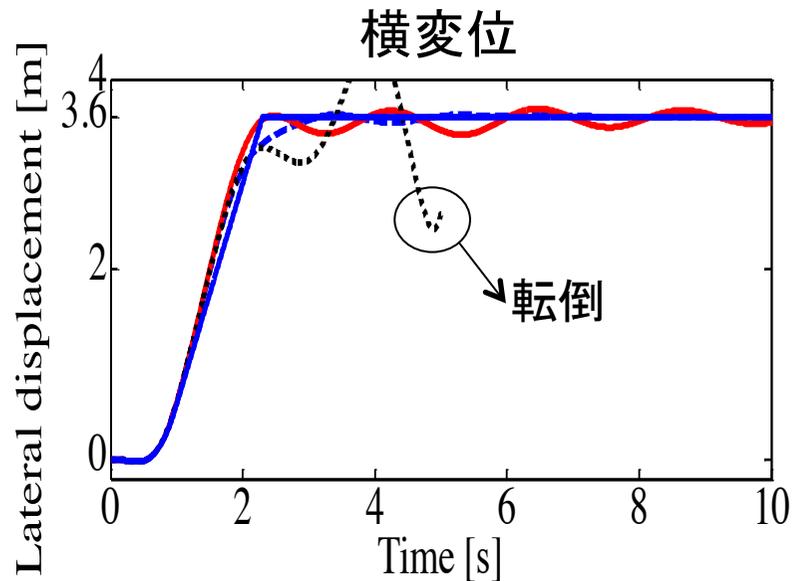
制御システム設計評価のためのパラメトリック図



レーンチェンジ時の妥当性確認

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以降
 未熟練ライダーの補償動作は1.0 s以降

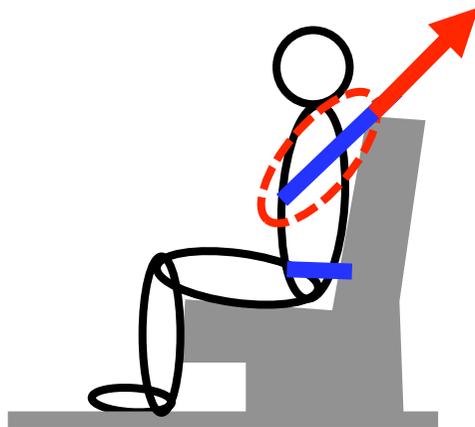
- (Red solid line): 未熟練ライダー(制御あり)
- ⋯ (Black dotted line): 未熟練ライダー(制御なし)
- - - (Blue dashed line): 熟練ライダー(制御なし)



乗員保護システム

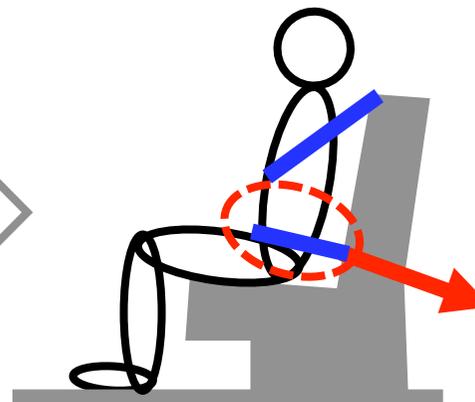
- ▶ 乗員保護システムの動作プロセス例
- ▶ 葛西ら(2008)
 - ▶ ショルダとラップのプリテンショナー, エアバッグを適切なタイミングで動作させることで効果的に乗員を拘束する.

ショルダプリテンショナー



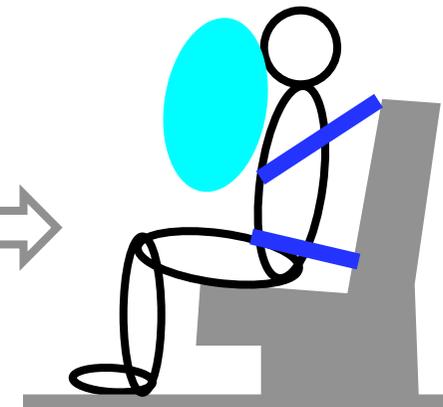
シートベルトのたるみをとる

ラッププリテンショナー



腰移動量を制限

エアバッグ



残りのエネルギー吸収

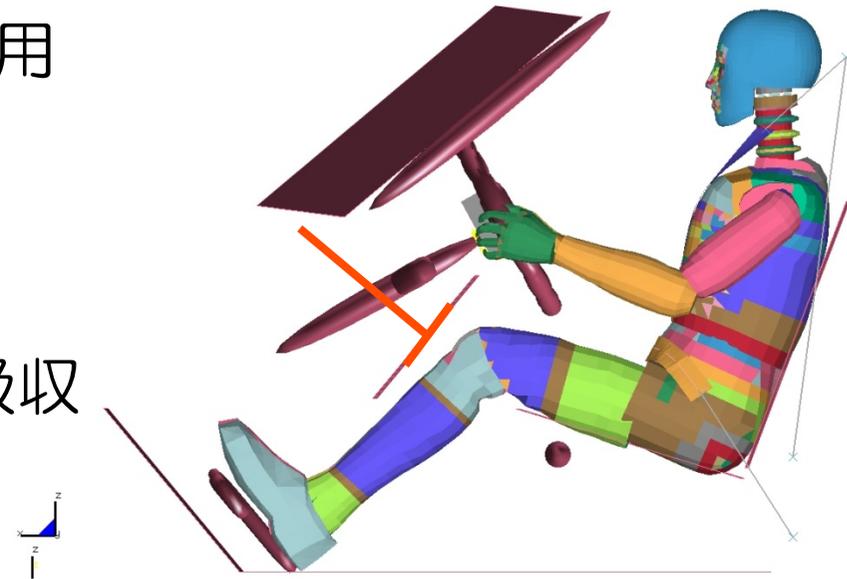
*葛西ら, 最新の衝突安全性能開発, 日産技報, No. 63, 2008, pp. 28-31

膝受け装置（ニーボルスター）

- ニーエアバッグ
- 材料の弾塑性変形特性を利用した衝撃吸収装置

目的：

- **大腿骨荷重の低減**
- 乗員の運動エネルギーの吸収
- 乗員の前方移動量の抑制
- 乗員の膝保護

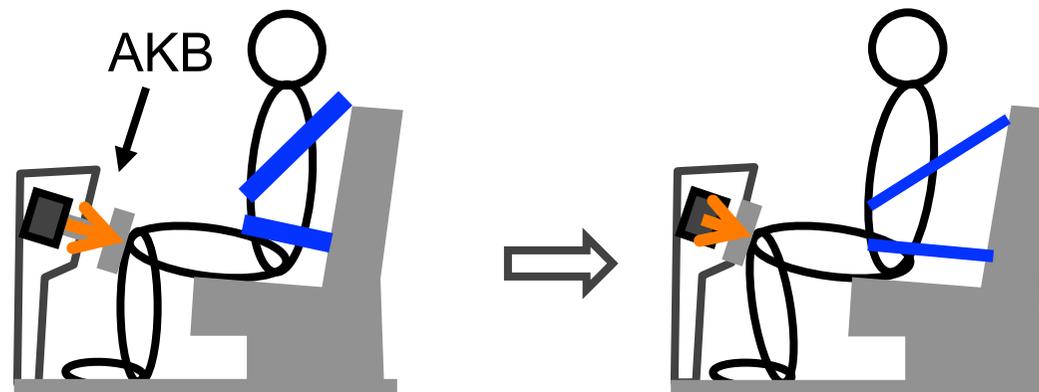


衝撃のアクティブ制御の適用

- 従来のニーボルスターに対する性能向上
- 異なる衝突初速度に対する衝撃吸収性能の維持

先行研究 (Kato, Nishimura et al., 2007)

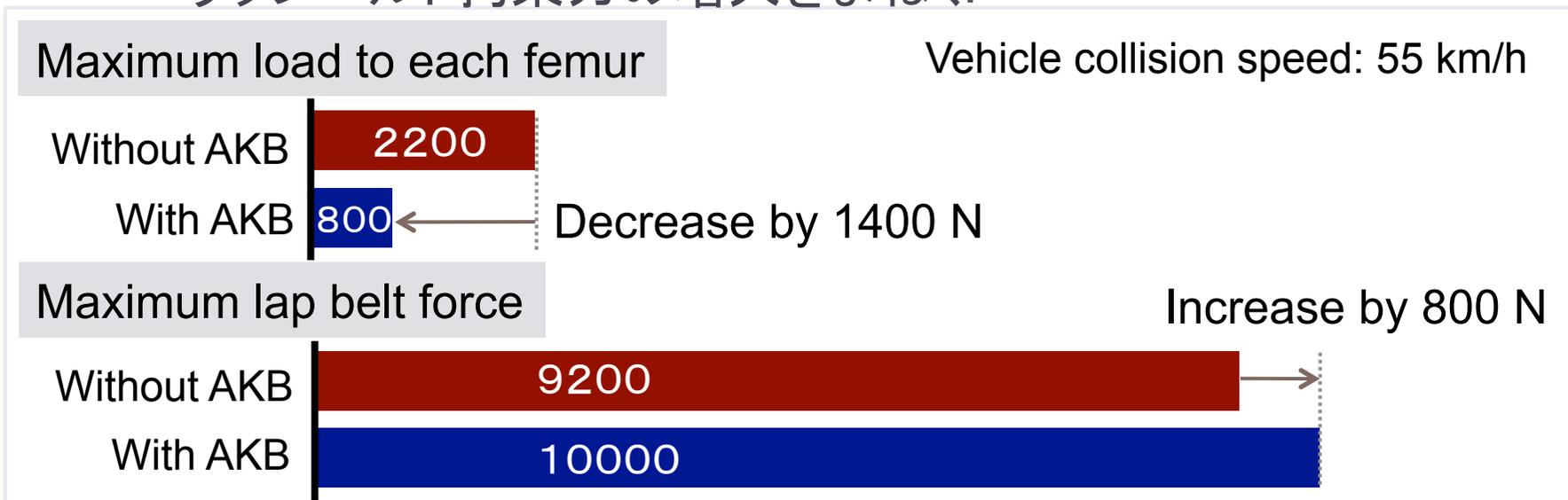
- ▶ アクティブニーボルスターによる損傷保護(AKB)
 - ▶ ニーボルスターにより、インストゥルメントパネルと膝が接触している間の大腿骨の変形を抑制する。
- ↓
- ▶ ニーボルスターは乗員の前方移動を抑制するが、大腿骨の変形を抑制することと相反して、腰移動量は若干増えてしまう。
→ラップベルト拘束力の増大をまねく。



M. Kato, H. Nishimura, Y. Amano, and T. Shimogo, "Injury protection control of occupant legs by active knee bolster," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, **73**(736), 3185-3192, (2007).

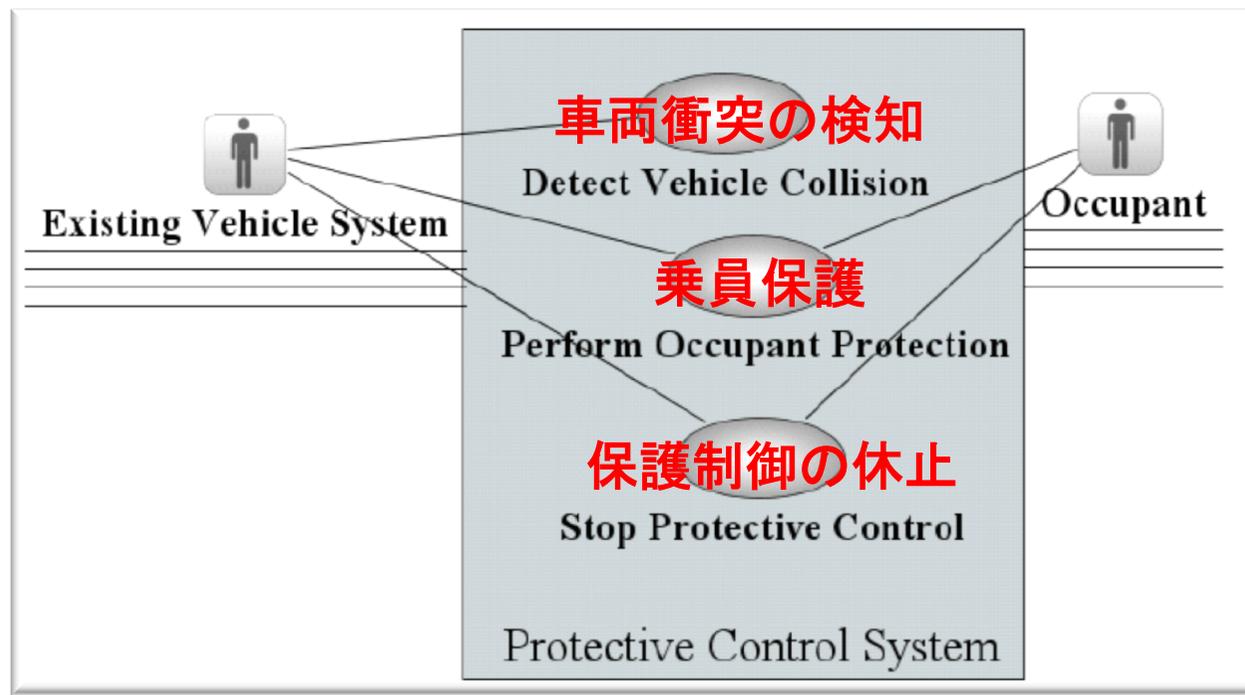
先行研究 (Kato, Nishimura et al., 2007)

- ▶ アクティブニーボルスターによる損傷保護(AKB)
 - ▶ ニーボルスターにより, インstrumentパネルと膝が接触している間の大腿骨の変形を抑制する.
 - ↓
 - ▶ ニーボルスターは乗員の前方移動を抑制するが, 大腿骨の変形を抑制することと相反して, 腰移動量は若干増えてしまう.
→ラップベルト拘束力の増大をまねく.



ユースケースシナリオ

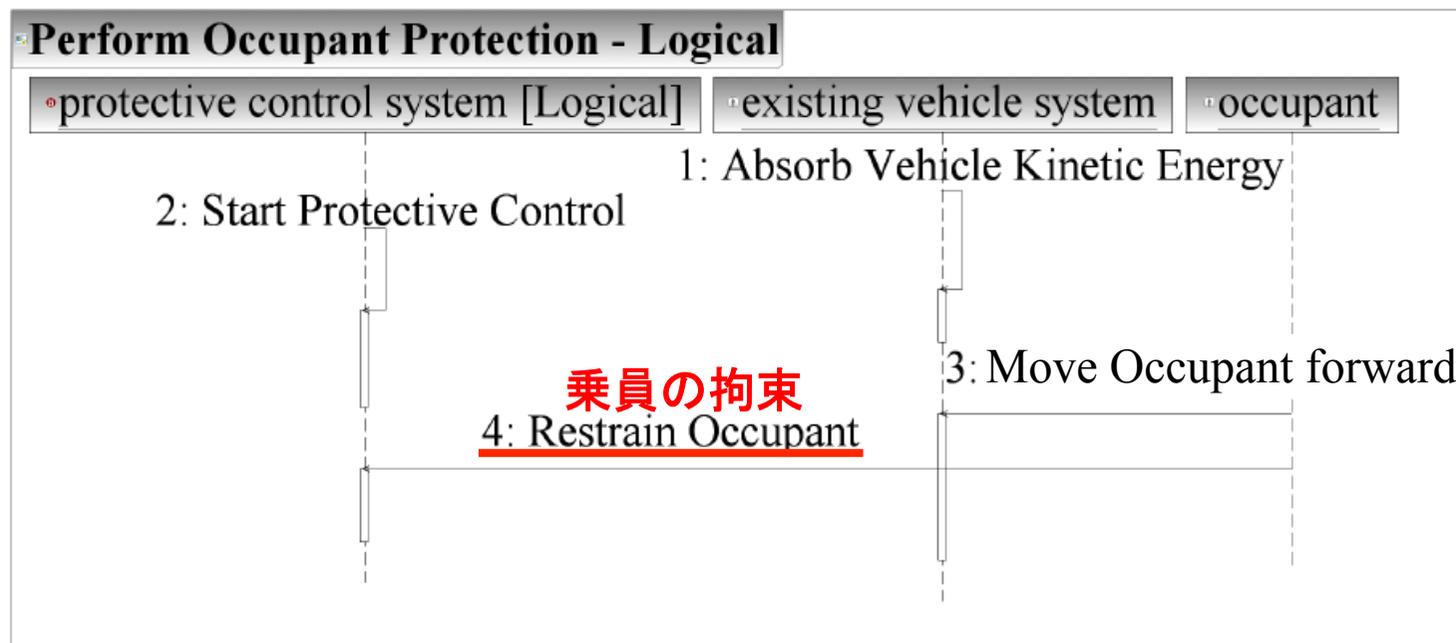
- ▶ コンテキストレベルでユースケースシナリオを考える.
- ▶ ユースケースはシステムの機能を記述する.



- ▶ さらに, シーケンス図でユースケースを実現する.

乗員保護

- ▶ シーケンス図: 乗員を保護する.
- ▶ 車両は衝突で変形して, 車両の運動エネルギーを吸収する.
- ▶ 乗員は減速を受けて前方に移動する.
- ▶ 乗員保護システムが乗員を拘束する.

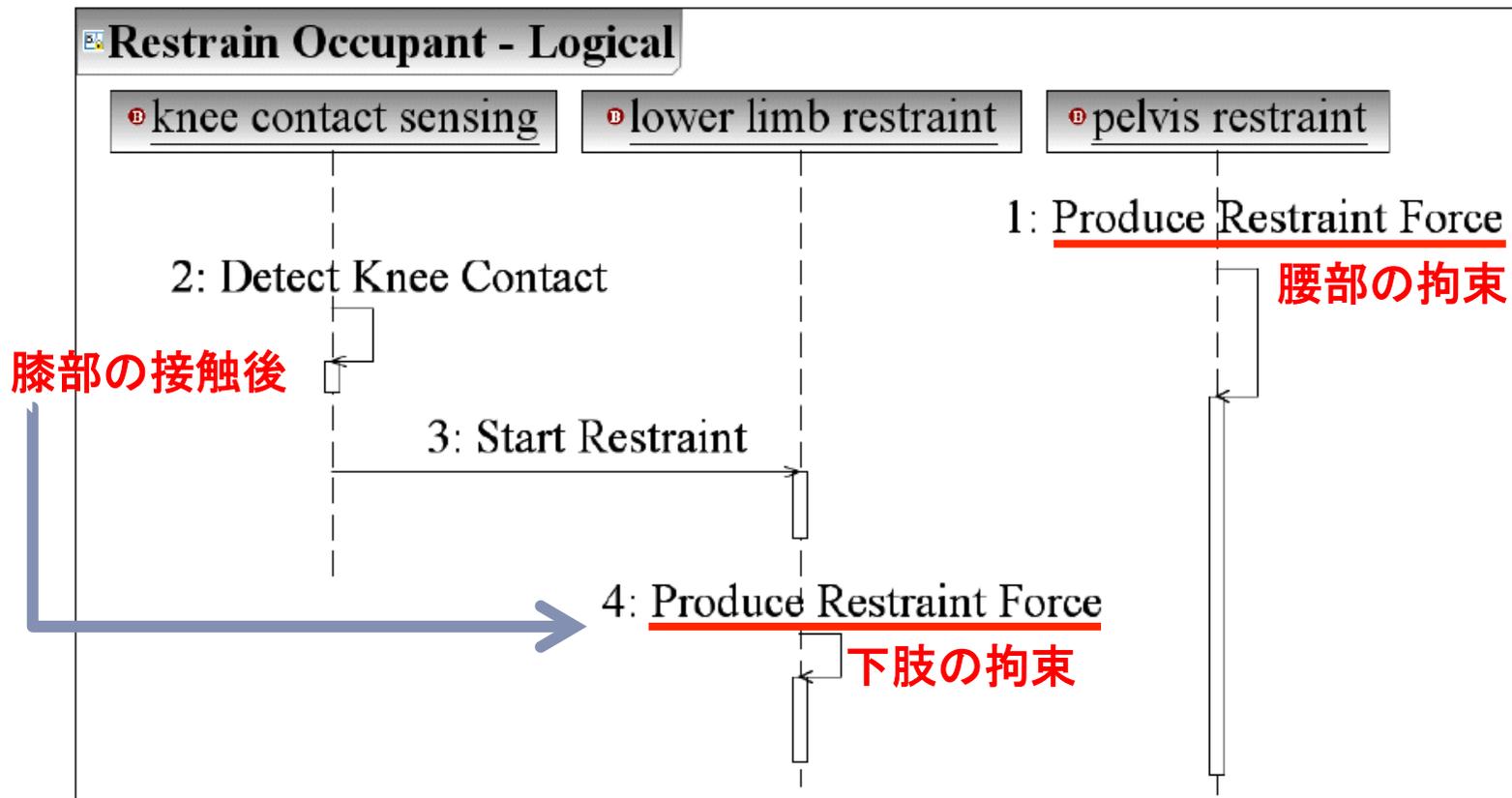


機能分解

- ▶ シーケンス図による分析から、乗員保護システムは以下の機能に分解される。
 - ▶ 車両衝突の判断
 - ▶ 車両減速度の検知
 - ▶ 保護制御の開始
 - ▶ 乗員の拘束 → さらにこの機能を分析する.
 - ▶ 乗員の状態の検知
 - ▶ 乗員保護システムの休止

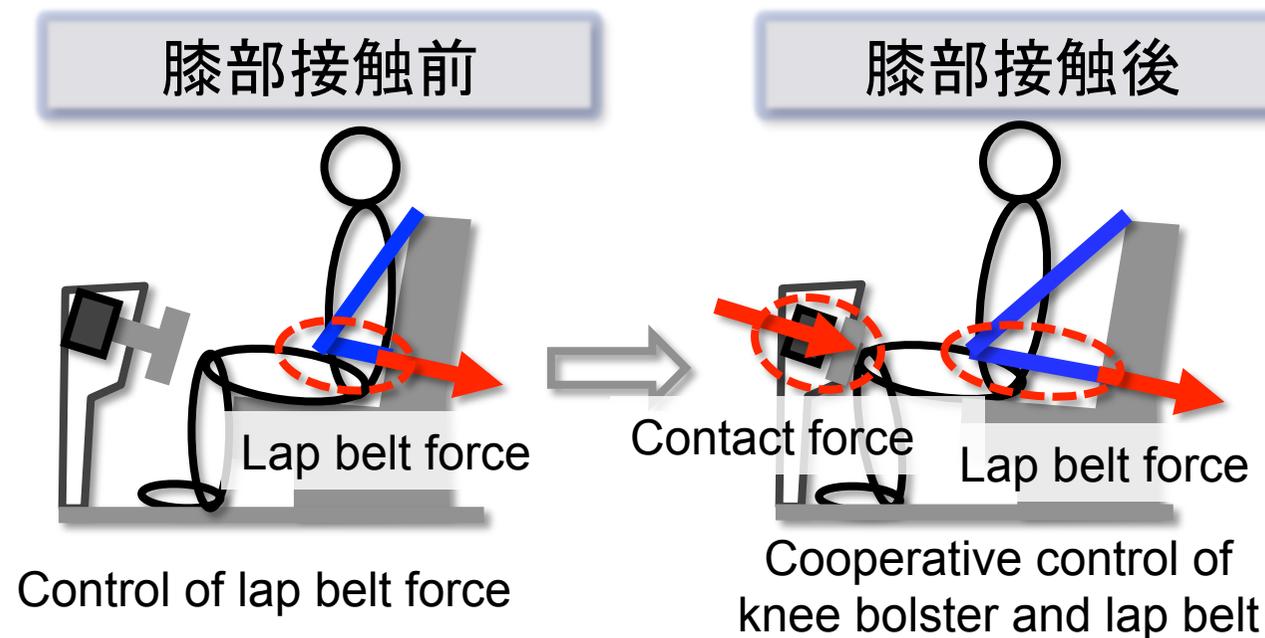
乗員の拘束（アナリシスレベル）

- ▶ サブシステムの構成
 - ▶ 膝部の接触検出器, 下肢拘束, 腰部拘束



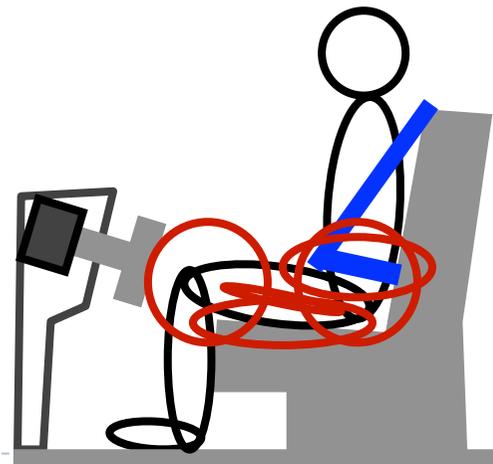
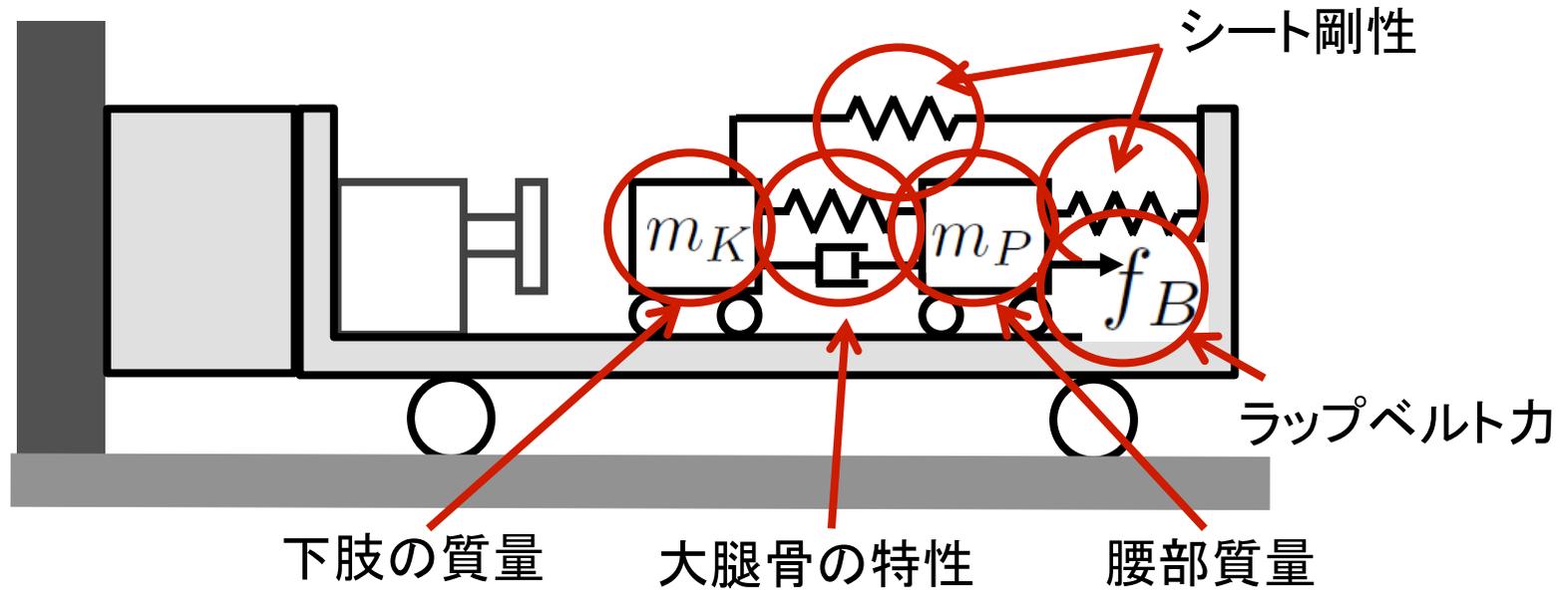
損傷保護の協定制御

- ▶ アクティブニーボルスターの拘束力制御のみならず，ラップベルトの拘束力も**協調して制御する**。
- ▶ 大腿骨荷重とラップベルト荷重の両方を同時に抑制する。



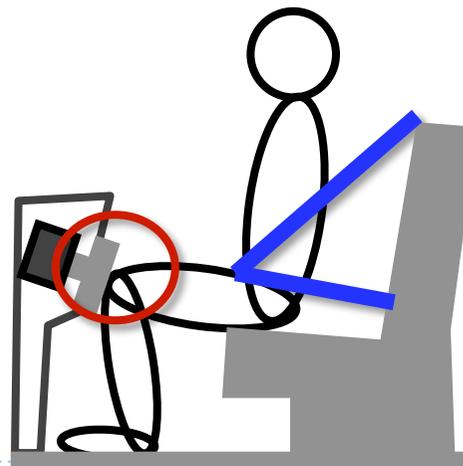
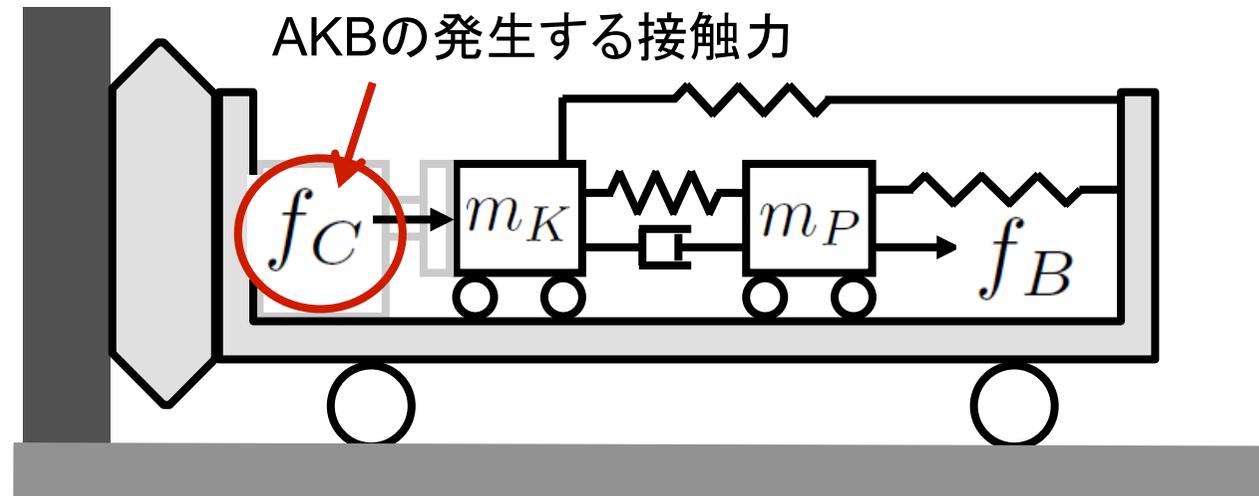
膝部接触前

システムの本質を表す低次元モデル



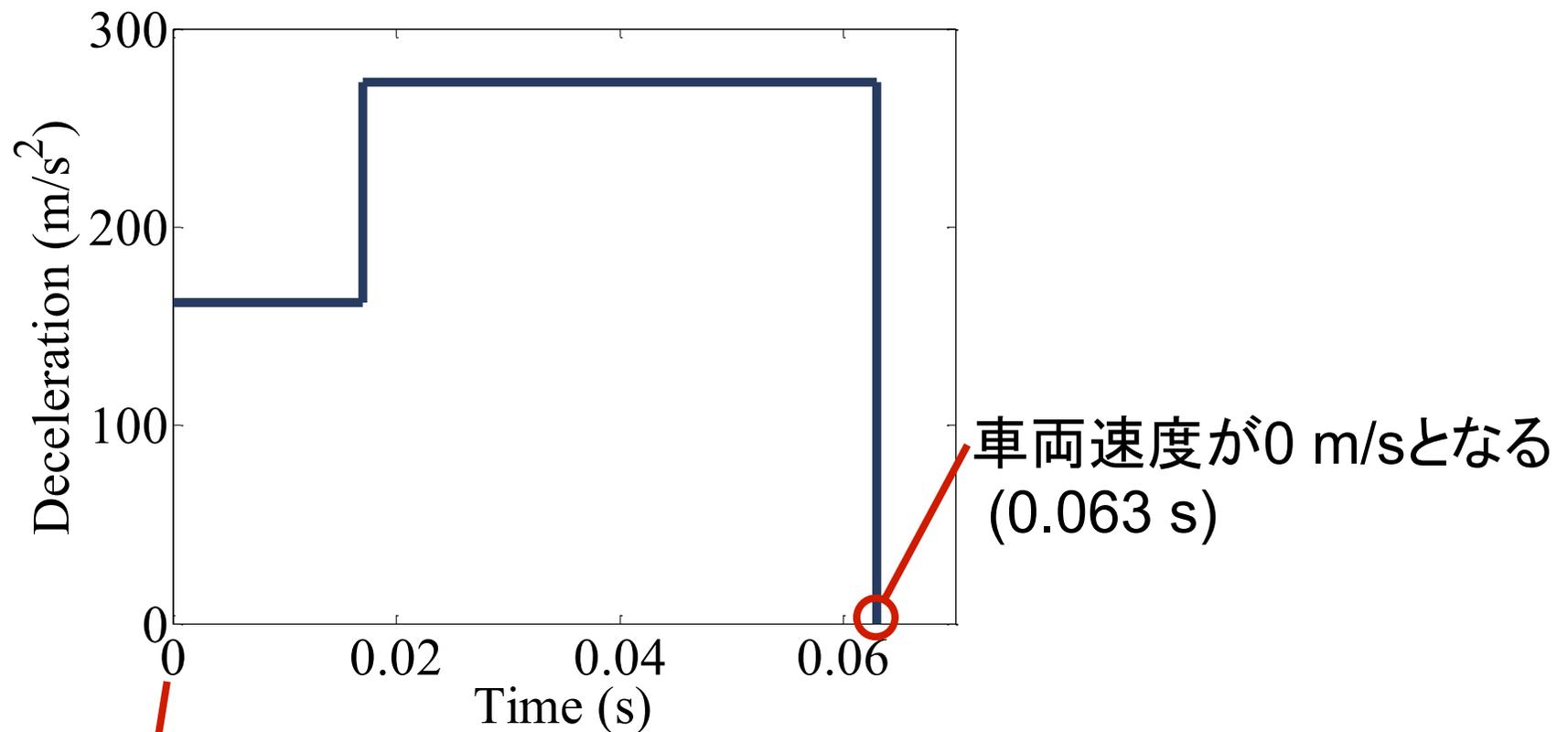
膝部接触後

システムの本質を表す低次元モデル



前面車両衝突時の車両減速度 (ユースケース)

- ▶ 初期車両速度 : 55 km/h



前面衝突時刻

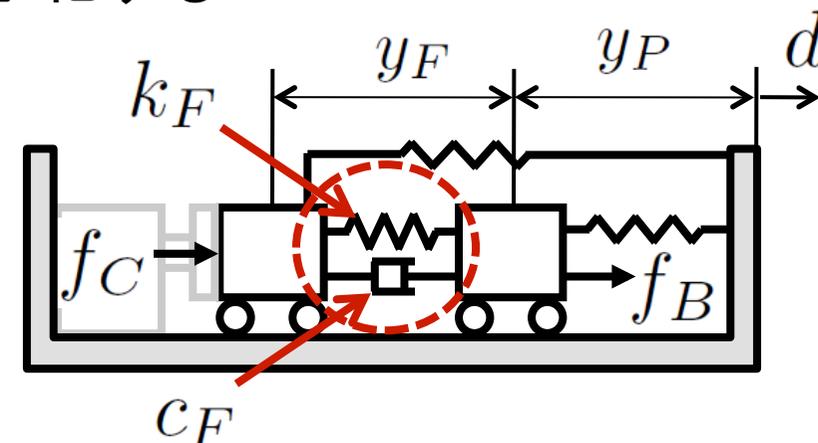
低次元モデルに対する制御入力の最適化

- ▶ ラップベルト力 f_B と膝接触力 f_C の決定
 - ▶ 大腿骨荷重の最大値の最小化
 - ▶ ラップベルト力の最大値の制約
- ▶ 目的関数
 - ▶ 大腿骨荷重の最大値を最小化する

$$\min_{\mathbf{x}, f_B, f_C} f_{EF}^{max}$$

$$f_{EF}^{max} = \max |f_{EF}(t)|$$

$$f_{EF} = -\frac{1}{2}k_F y_F - \frac{1}{2}c_F \dot{y}_F$$



低次元モデルに対する制御入力の最適化

▶ 制約条件

膝部接触時刻

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\mathbf{u} + D\ddot{d} \text{ for } t \in [0 \quad t_C] : \text{膝部接触前}$$

$$\dot{\mathbf{x}} = A_C\mathbf{x} + B_C\mathbf{u} + D_C\ddot{d} \text{ for } t \in [t_C \quad t_F] : \text{膝部接触後}$$

$$\mathbf{x}(0) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T : \text{初期状態}$$

車両速度0 m/sの時刻

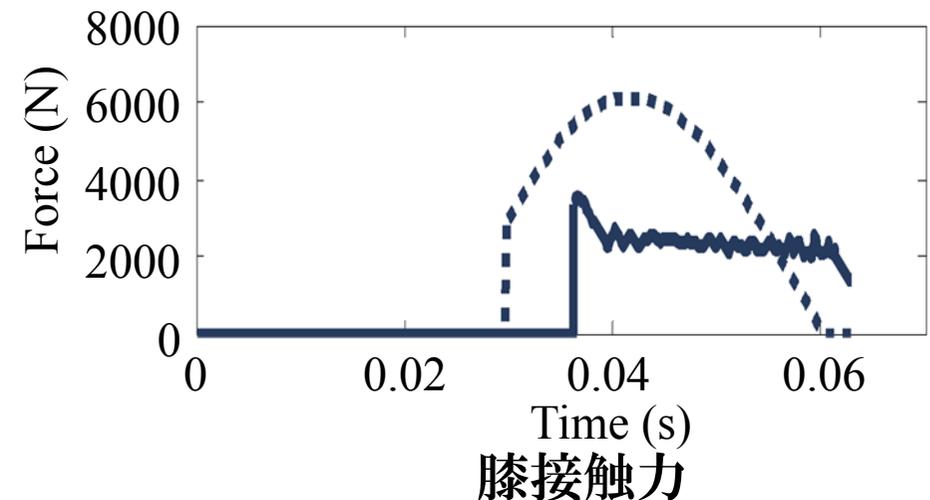
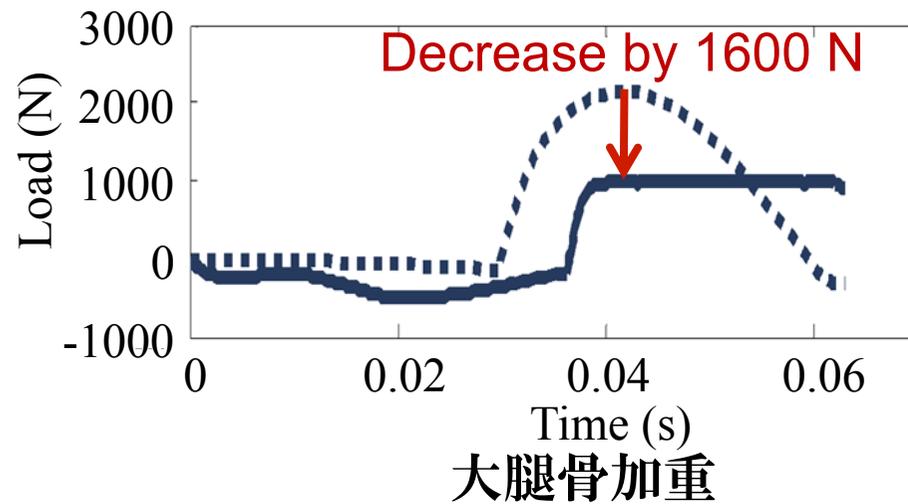
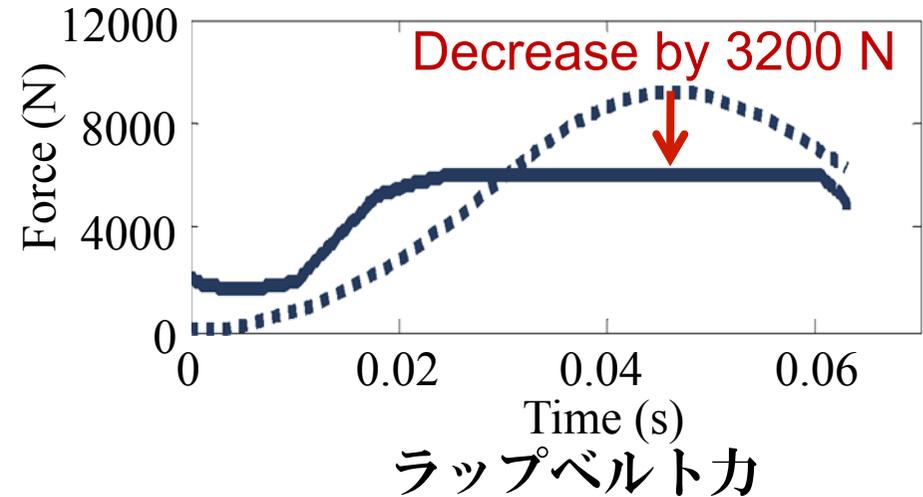
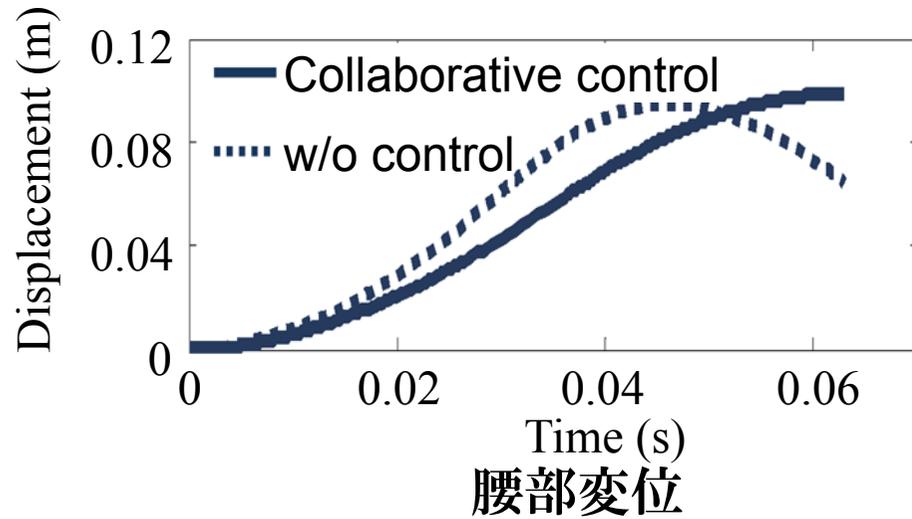
$$f_B(t) \geq 0 \text{ for } t \in [0 \quad t_F] \quad \text{ラップベルトは乗員を後方に引く力のみを発生する}$$

$$f_B(t) \leq f_B^{\max} \text{ for } t \in [0 \quad t_F] \quad \text{ラップベルト力の最大値}$$

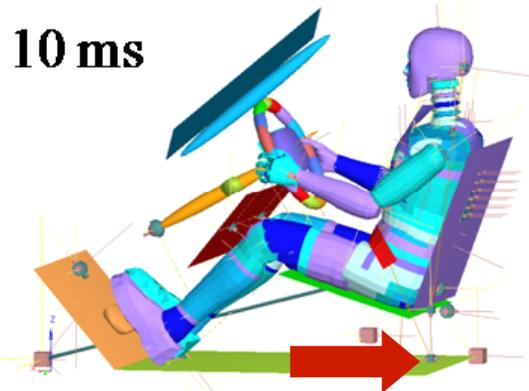
$$f_C(t) \geq 0 \text{ for } t \in [0 \quad t_F] \quad \text{接触力は乗員を後方に押す力のみを発生する。}$$

$$\dot{y}_P(t_F) \leq 0. \quad \text{車速0 m/sのときに、乗員の運動は負の速度を持つこと=乗員運動の拘束}$$

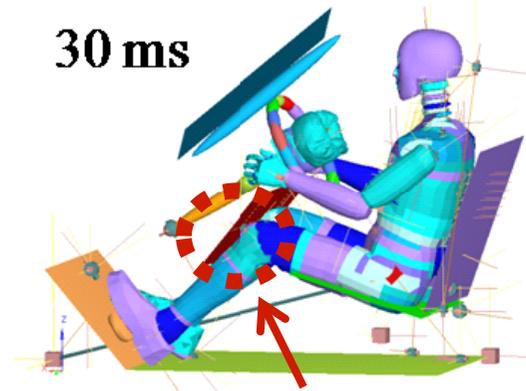
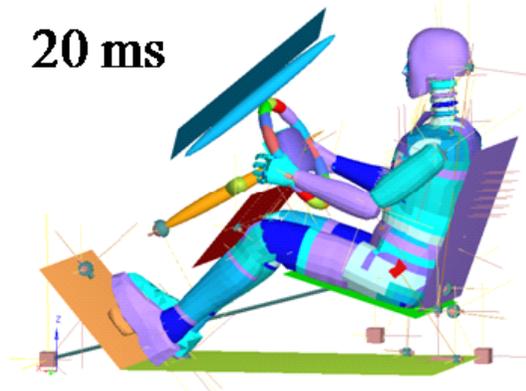
協調制御の最適化結果



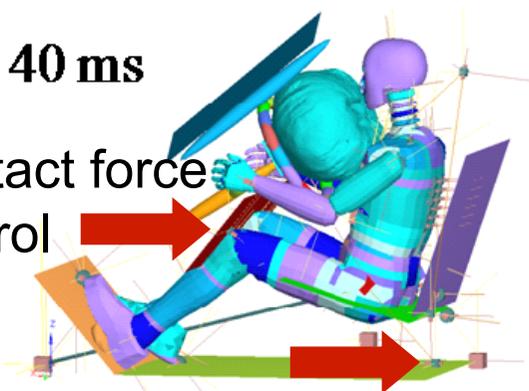
3次元モデルシミュレーション



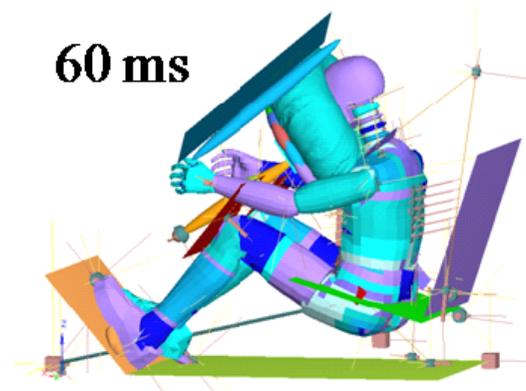
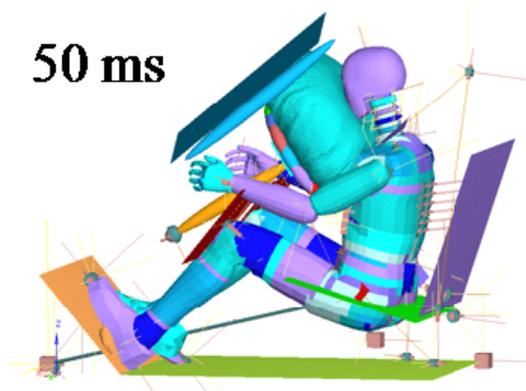
Lap belt force control



Knee contact



Lap belt force control



4. まとめ

- ▶ モデルを用いてシステムを表現することにより、設計を進めるシステムズエンジニアリングのプロセスを示した。モデルベースシステムズエンジニアリング (MBSE) の一つの表記方法として、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。
- ▶ SysMLの活用例として、エレベータ開発、二輪自動車の前輪操舵アシスト制御システム設計、乗員保護システム設計を取り上げ、システムの振る舞いの把握、インタフェースの明確化、機能要求の導出の手順を示した。また、これらの手順の中から、仕様を決定するための解析モデルの検討、最適化問題の設定を行うことができることを示した。

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.
- ▶ 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, 2012
- ▶ The Engineering Design of Systems, - Models and Methods -, 2nd Edition
Dennis M. Buede, John Wiley & Sons, Inc.
- ▶ 西村秀和, 二輪自動車のコーナリング特性と走行安定化制御, 自動車技術会, Vol.
64, No. 12, (2010), pp. 43-48
- ▶ Shaopeng Zhu, Hidekazu Nishimura, Laurent Balmelli, Model-Based Design of Front-
Steering Assist Control System for Motorcycles , 4th Asia-Pacific Conference on
Systems Engineering (APCOSE 2010), Keelung, Taiwan October 4-6, 2010
- ▶ Terumasa Narukawa and Hidekazu Nishimura, Control System Design for Occupant
Lower Extremity Protection in Vehicle Frontal Collision (Cooperative Control of Active
Knee Bolster and Active Lap Belt), Journal of System Design and Dynamics, Vol. 5,
No. 5, 2011, pp. 1176-1187