MaaS 時代の System of Systems 開発

2019 年 5 月 22 日

兼平 靖夫[†]

あらまし クルマがつながる時代となり MaaS の実現が現実味を帯びてきた、自動車単体でも ADAS 統合制御、自動運転の開発が、駆動の電動化と相まって非常に複雑なシステムとなってきた。本論では車と車、モビリティとインフラが一体となるような複雑なシステムを開発する手法として、システムズ・エンジニアリングを紹介し、System of Systems から実際の実装部品まで、いかにシームレスにプラットフォーム上で開発されるかを示す。

1. 産業の状況

自動車業界の最近の動向としてはダイムラーが中期経営戦略として CASE（Connected / Autonomous /Shared&Service / Electric）と定め、コネクティッドとシェア＆サービスを来るべき世界と定め Daimler(2018), KPMG(2019)は 2030 年までの自動車業界幹部による主要トレンドとして、1 位コネクティッドとデジタル化、2-4 位電動モビリティ(電池、燃料電池、ハイブリッド)としており、コネクティッドと電動化が産業の動向としている。

また同時に自動車をモビリティの一つの要素として考える MaaS (Mobility as a Service)が現実のものとなってきている。例えば、田中(2018)

自動車単体に目を向けるとこれまでには無かった様々な新しいセンサー（例えばステレオ・カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR）が搭載され、車載システムの複雑さが増し、同時に各種位置情報をやり取りするために車が外部ネットワークと接続されるなど、車と車、車と交通インフラが一体となる。これは層状の非常に複雑なシステムを形成する。このような複雑な製品開発は新しい手法を要求する。

図 1. つながる時代の自動車

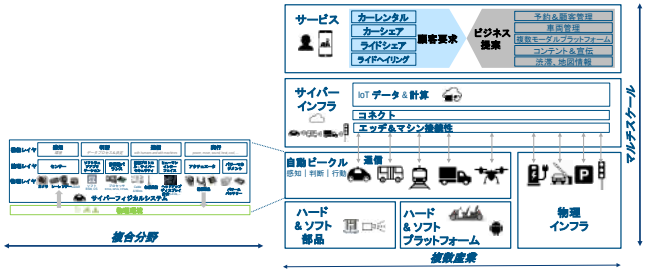


図 2. Mobility as a Service

2. システムズ・エンジニアリング

自動車は機能・構造関係が多対多対応で複雑に絡み合ったアーキテクチャであり、「インテグラル型」（すり合わせ型）であり　藤本(2014)　複雑な製品を開発部間のたくみな調整により開発をしてきた。

しかしながら MaaS のように車と交通インフラが一体となると、複雑さが増大し、すり合わせでは限界をむかえる。岡部(2016)

MaaS のような複合したシステムをシステムのシステム(System of Systems ;SoS)といい、このような複雑なシステム開発を可能にするものとしてシステムズ・エンジニアリングがある。

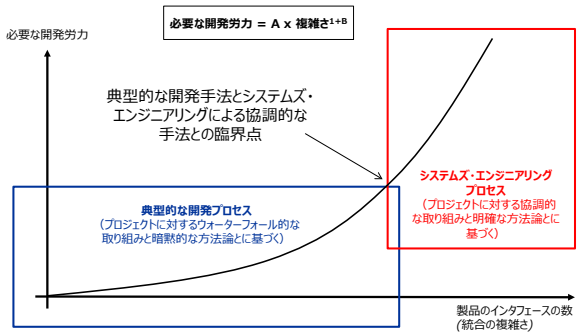


図 3. システムズ・エンジニアリング導入　岡部(2016)

† ダッソーシステムズ株式会社
システムズ・エンジニアリング・プリンシパル
Yasuo.Kanehira@3ds.com

Rev1.2

システムズ・エンジニアリングは、「システムを成功裏に実現するための、学際的なアプローチ及び手段」西村(2019)である。

システムズ・エンジニアリングは特定の手法を意味せず、Estefan(2008)はシステムズ・エンジニアリングを PMTE(プロセス，メソッド，ツール,環境(Environment))により構成されるメソドロジと定義し、それぞれの間関係を図４とした。

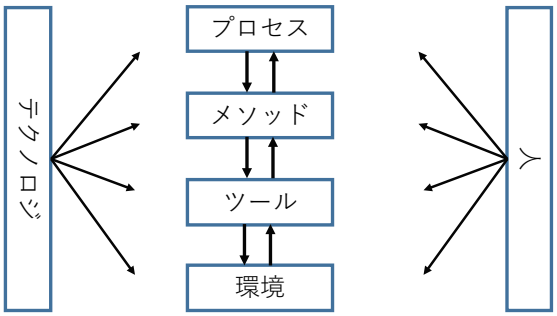


図 4.PMTE メソドロジ　Estifan(2008)

プロセスはシステムズ・エンジニアリングの専門家団体である INCOSE やアメリカ航空宇宙局 NASA などが定義をするが、プロセスでは実行する内容の定義であり、実施方法は定義しない、よって次段のメソッドによって、いかにシステムを開発していくかを定義する。

メソッドには各種あり Estifan(2008) それぞれ長所・短所があり、対象に応じて最適なメソッドを選択することが重要である。

ダッソー・システムズはフランス CESAMES 社が考案した 9 Views Krob(2015) それを拡張した Modeling Methodology for Systems © (MMS)、NoMagic 社 MagicGrid などのメソッドをサポートする。

また、初期のシステムズ・エンジニアリングは文書によってなされたが、文書を使ってのシステムズ・エンジニアリングは意思疎通に祖語や変更があった際に修正が極めて難しいため、モデルを使ってシステムズ・エンジニアリングを行う手法、モデル・ベースド・システムズ・エンジニアリング(以下 MBSE)の利用が進んでいる。

以下 MagicGrid を例にとって説明すると、横軸には対象の捕らえ方、要求、振舞い、構造、パラメータなどのビュー。

縦軸には対象をいかにとらえるか問題、ソリューション、実装という観点で分解する。

さらにすべてを貫くものとして、特化型エンジニアリングがあり、これはセーフティやセキュリティなどの観点でシステムをみるものである。

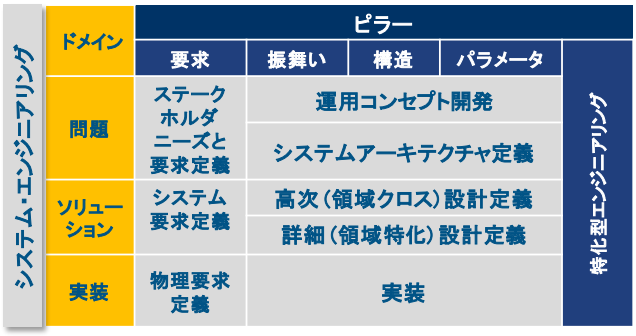


図 5. MagicGrid によるメソッド

このように縦、横軸でそれぞれ異なるビュー、上位ではどう実現するかではなく、何を行うのかのサービスの視点でモデル化（ブラックボックス）、して考えるために想定・検証もれが少なくなりや意思の疎通が良くなる利点がある。

以下メソッドは対象の複雑さ、開発形態によって下図のようにサブシステム、そのサブシステムと層状に展開されていき、マルチ・デシプリン（車載システムの場合、メカ、電気電子、ソフトウェア）へと分割していく。

図 5. メソッドのサブシステム、コンポーネントへの展開

MaaS で対象となる SoS を記述した場合、最上位はその運用の観点から様々なサービス（配車、ナビゲート、充電）や利用するモビリティなどがサブシステム、サブサブシステムと展開されていき、その過程で対象が機能レベル(Functional)、論理レベル(Component)に展開されていく。

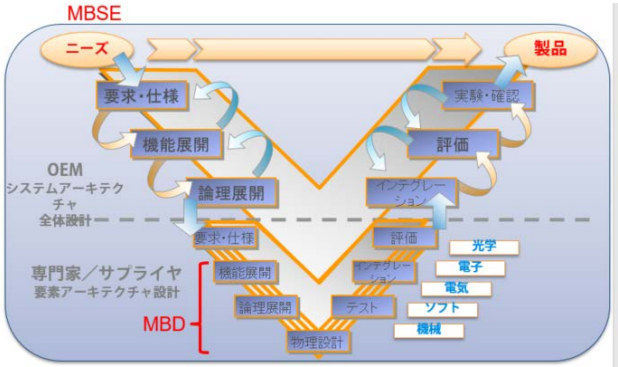


図 6. 上位要求から下位要求への開発

MBSE では記述言語を問わないが、現在システムの記述言語としては SysML が多く使われる。

SysML で記述された上位モデルは必ずしもシミュレーション実行や下位モデルに自動変換される必要はなく、まずステークホルダ間で開発対象への意思の疎通を果たす。

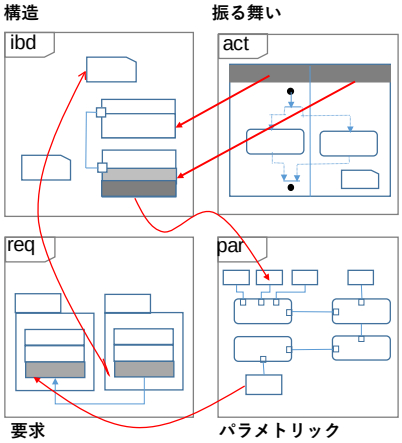


図 7. SysML 基本モデル Friedenthal(2009)

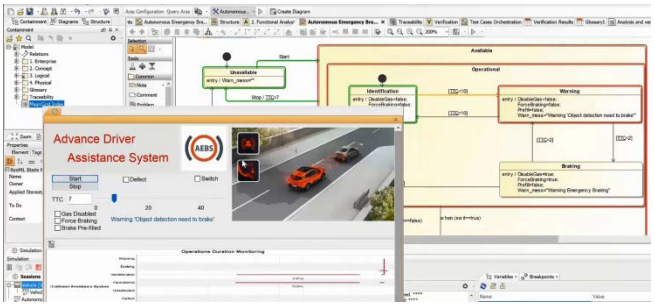


図 8. SysML 記述による初期検証

問題からソリューションに進む段階で、MBSE の特徴であるアーキテクチャ定義を行う、その利点を示すために、まずシステム視点ではない開発を示す、仕様より、メカ・電子・制御（ソフト）の割り付けは通常はメカ、電子、制御いずれかの部署においてなされ、全体システムの観点が抜けている、そのため、実装時に手戻り、機能の無理な実装が行われることがある。

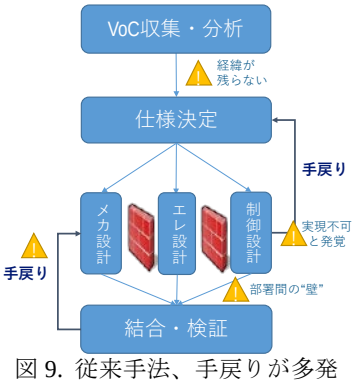


図 9. 従来手法、手戻りが多発

次に MBSE を適用したフローを示す、ここで特筆すべきことはアーキテクチャ分析であり、ここで機能を行うために最適な割り付けを行う、

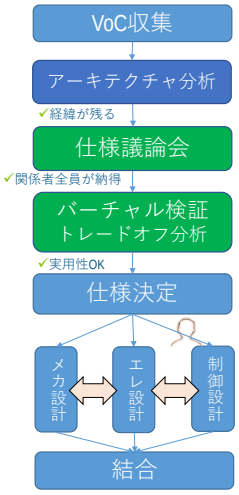


図 10. アーキテクトが全体最適

以下、サブシステムとして車載システムが選定された例を見ていく

3. モデルベース開発

MBSE はライフサイクルを含むシステム開発・運用全般を含み、この項で説明するモデルベース開発 MBD も含むが、ここでは詳細設計定義（開発）として説明を行う。

機能レベル、論理レベルにまで設計が進むと、対象を詳細モデルで記述できる、これは先の SysML が記述型モデルと呼ばれ、基本シミュレーションが出来ないのに対し [1]

この詳細モデルは分析型モデルと呼ばれシミュレーションに供することが出来、バーチャルに検証が行える。開発の抽象度が高い上流工程でシミュレーションにより検証が出来れば、処理スピードも

[1] 本来 SysML は記述型モデルであるので、シミュレーション等は出来ないが、最近のツールでは例えばシーケンス図などはシミレーションできる。

速いため、効率よく検証ができる。また問題があっても、その手戻りも少なくなる。

以下に電子制御、機械制御の活用例を示す。

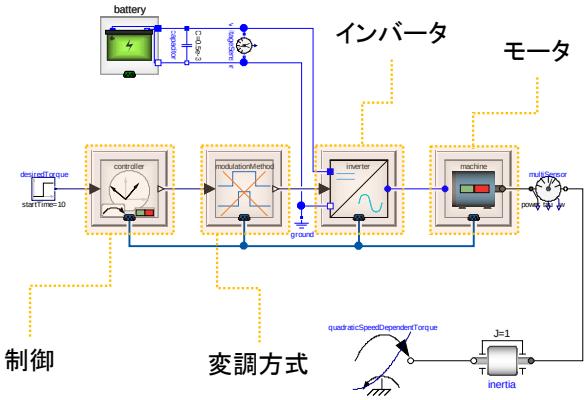


図 11. Modelica による電動モータ制御

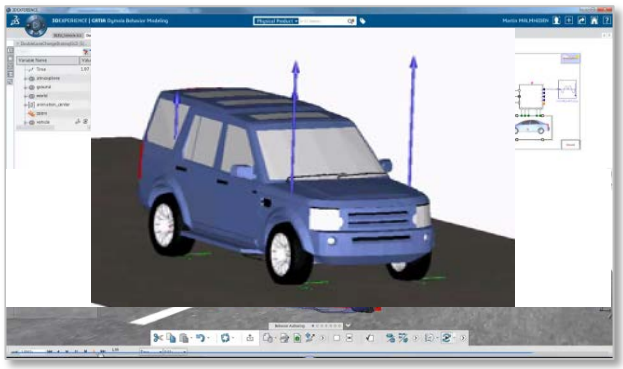


図 12 メカ連携例

MBD では ECU 内部で組込みソフトウェアになる制御部分は Mathworks 社 Simulink©などで記述されることが多く、モーター、トランスミッションなどプラントモデルは Modelica アソシエーションが定義したモデリング言語 Modelica がよく利用される。

Modelica には電動モビリティでよく使われるコンポーネント、電動モータ、インバータ、トランスミッション等のモデルもサードベンダーから提供されていいる。また 3D メカは CAD データから Modelica 機構データに変換でき、Functional Mockup Unit (FMU)を用いれば、Simulink©/Modelica で書かれたモデルによりメカ＝電気＝ソフト（制御）の複合物理の検証が出来る。

図 13. FMU による連携シミュレーション

例えばサプライヤにサブシステム開発を依頼するケースであれば、サプライヤは内部のコードを開示することなく FMU を作成でき、早期での検証が行える。

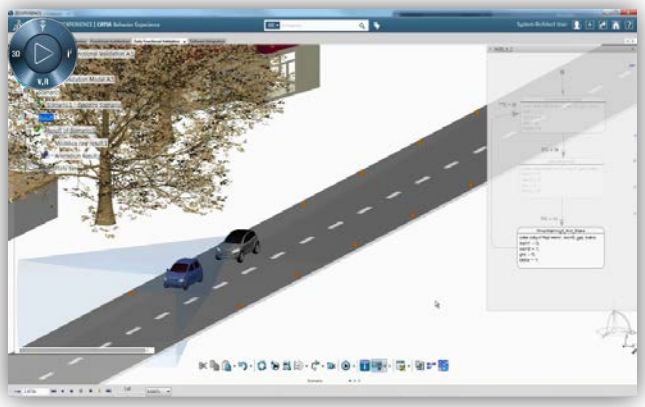


図 14. 周辺環境も含めたシミュレーション

各種シミュレーション条件は設定により自動実行され、例えばメカ＝電子＝ソフト間で、どの組み合わせが対象に対して最適であるかのトレードオフが開発の初期に可能となる。実行結果がレーダチャートで表示され、コスト、性能などの条件比較により最適な組み合わせを選択する。

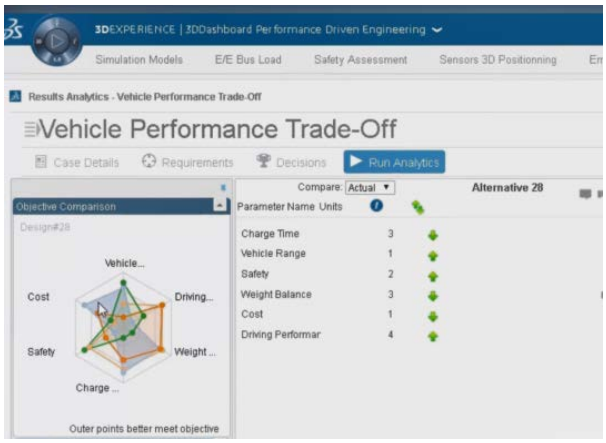


図 15. 各種 KPI によるトレードオフ支援

4. E/E アーキテクチャ設計

ここまででシステムから機能レベルまでの検証が完成している、ここから論理レベル、実装レベルに展開をしていく。

車のような組込み機器では、処理を実行するコンピュータ(ECU)は複数あり、それらがバスで接続されている。

今日の車載電気電子のシステム(以下 E/E システム)では使われる ECU は 100 近くあり、接続されるセンサー、アクチュエータ合わせると、非常に複雑な E/E アーキテクチャを構成する。

また ECU の心臓部であるマイコン(MCU；Micro Controller Unit)は半導体であり、新しい世代になるとスピード、メモリ容量などが数倍になることも珍しくないが、ソフトウェアの移植性、リアルタイム性などの問題により実際には追加機能毎に新しい ECU が追加される事も多く、車載システムで利用する ECU の個数が増大する。

これを避けるため機能をフレキシブルに E/E システムに再割り当てが出来る事が求められている。

3D EXPERIENCE プラットフォームでは機能レベルから ECU のアーキテクチャを定義し、機能を後述する車載ソフトウェア標準規格 AUTOSAR 準拠を採用し、各 ECU にフレキシブルな割当てが行える。

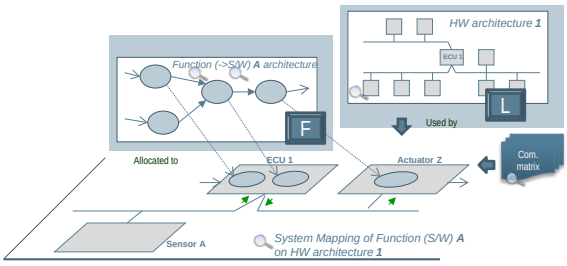


図 16. 機能の ECU アーキテクチャへのマッピング

この段階でいくつの ECU で構成するか、どのようなバス構成にするかが柔軟に試行出来る。

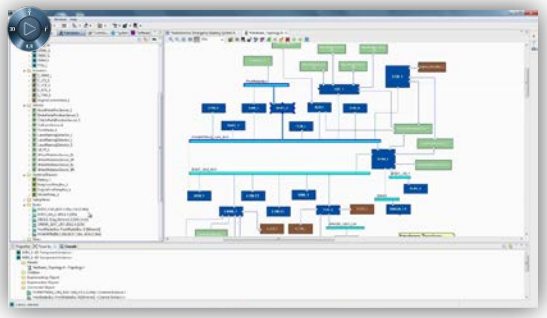


図 17. ECU アーキテクチャの構築

またこの抽象度でバスの負荷を見積もる事も可能で、実装後の手戻りを大きく減らす。

図 18. バス容量の見積もり

5. 車載ソフトウェア標準 AUTOSAR 実装

ECU 内部にある MCU は半導体ベンダーから供給され、命令アーキテクチャが異なり、また周辺ペリフェラルも異なり複数の ECU を統合することは非常に困難な作業となる。

機能の ECU へのフレキシブルな割付はソフトウェア（特にアプリケーション）の標準化が必要となる。これを一つの目的に制定された車載ソフトウェアの標準規格 AUTOSAR(AUTomotive Open System ARchitecture)はソフトウェアに層別のアーキテクチャを導入し、車載アプリケーションソフトウェアにソースレベルでの互換性を持たそうとしている。

下図は AUTOSAR の概念図で従来のソフトウェアはハードウェア(ECU)構造と密接に関連し(くさびの形で表現)、他の ECU には移植しにくいのに対し、AUTOSAR では中間に ECU の構造の違いを吸収する中間レイヤーを入れることによりアプリケーションの移植性を向上させている。兼平(2007)

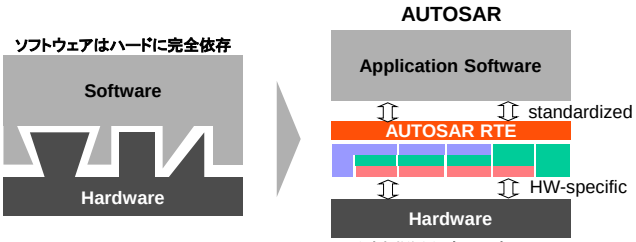


図 19. AUTOSAR による移植難易度の変化

AUTOSAR Builder は AUTOSAR 準拠の開発ソリューションであり、コンポーネント定義、コントラクトフェーズ RTE 生成、ECU 割り当て、ジェネレーションフェーズ RTE 生成のメソドロジをサポートする。

また下位の ECU 決定以前の VFB(Virtual Function Bus)レベル、上位サービス層のみを考慮したレベル、BSW まで統合した完全レベルなど、各種抽象度でシミュレーション機能を提供する。

6. 協働協調開発プラットフォーム

これまで見た MBSE, MBD, EE アーキテクチャ設計および AUTOSAR による実装までの開発はウオーターフォールのように上位から下位に一方向に行うのではなく、各工程間で修正・変更をアジャイルに繰り返すことが効率的な開発につながる。

また自動運転においては対象となる条件パターン(例えば、対処しなければいけない道路のシーン、シナリオなど)が指数関数的に増大し、これまでの管理では破綻する可能性がある。

その様な複雑な開発にも 3D EXPERIENCE プラットフォームは威力を発揮する。

OEM-サプライヤ間、また全世界に点在する拠点で同時に開発・変更を繰り返す開発プロセスにおいて起こりがちな、要求変更もれ、仕様 - モデル - ソースコード間の一貫性などを保つことは、協働開発プラットフォームで管理しないと非常に難しい作業となる。

また現在では複雑な制御システムの安全を確保するために、従来の IATF16949 に加え、電気電子システムには機能安全 ISO26262 の適応が求められ、開発プロセス管理には AutomotiveSPICE への適用も多くの OEM、サプライヤで要求される。

ISO26262 / AutotmotiveSPICE では開発プロセスでの成果物の定義、承認管理、一貫性、トレーサビリティなどの管理を要求する。兼平(2013)

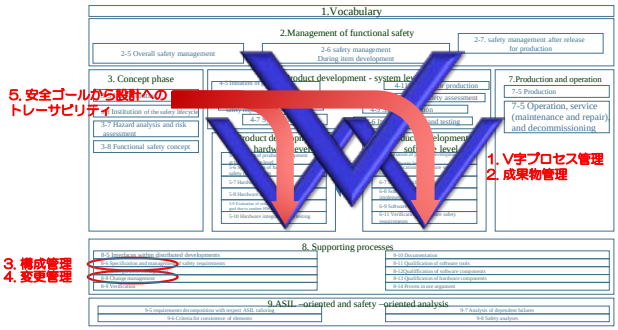


図 20. ISO26262 で要求されるデータ管理

これまで見たような System of Systems の定義から System 多くの Sub System までの膨大なデータに対し、要求される成果物管理、その一貫性、トレーサビリティの確保は多大な労力を要する。

一般に V 字開発においてステージ毎に検証を行い、成果物等を保存する。

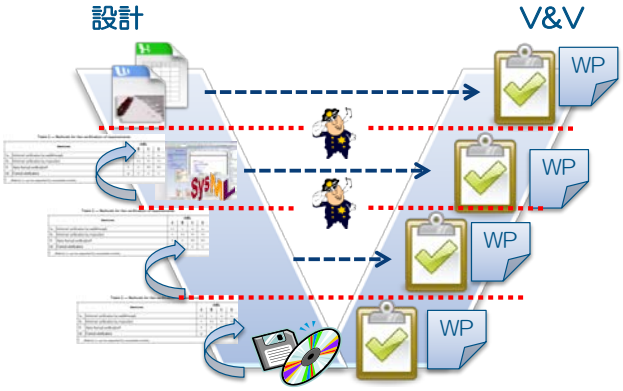


図 21. V 字開発での成果物管理

現在の車載開発においては先の機能安全に加えセキュリティも考慮して開発を行う必要があり、そのデータ管理は煩雑を極める。Klauda(2015)

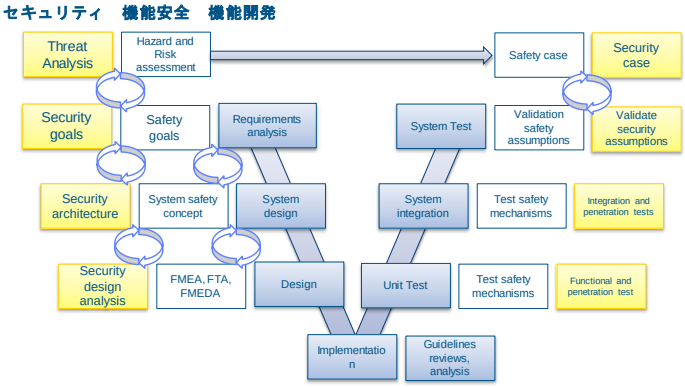


図 22. セキュリティ、機能安全、機能開発でのプロセス管理 Klauda(2015)

3D EXPERIENCE プラットフォーム上でプロセスのタスク、成果物を管理し、レビューのゲートも定義できる。

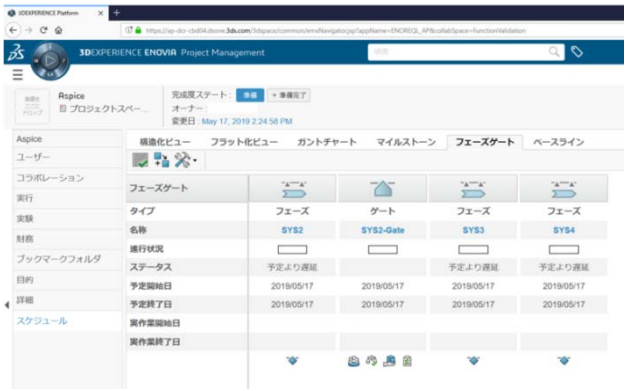


図 23. フェーズゲート管理

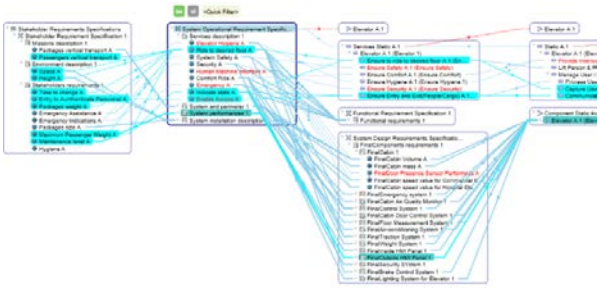


図 24. 小粒度でのトレーサビリティ

同時に ISO26262 / AutomotiveSPICE では要件単位でのトレーサビリティが要求される。

これまでに説明した MBSE/MBD/構成管理ツール群は全て 3D EXPERIENCE プラットフォーム上で統合されており、ユーザは上位要求から実装部品まで、変更管理・構成管理・プロジェクト管理が可能である。またそれぞれのプロセス間のレビューなど承認管理、成果物管理も厳密に管理する。

その全ての過程で要求は任意の粒度でトレーサビリティが提供される。

全体の進捗状況はコックピット機能によりグラフ化され、ボトルネック箇所などが容易に分かる。

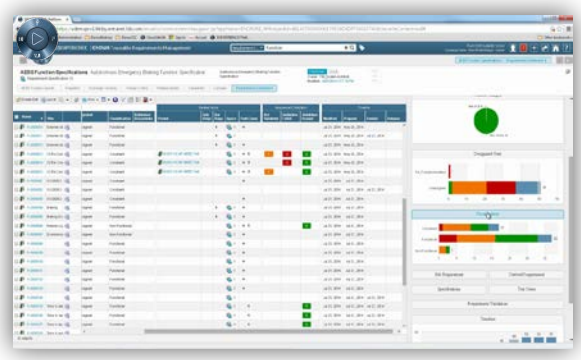


図 25. 検証状況をコックピットで俯瞰

6. むすび

MaaS の時代には極めて複雑なシステムに対処する必要がある、その複雑さに対峙する一つの方法がシステムズ・エンジニアリングであり、モデルを用いて MBSE を導入し、モデルベース開発で早期に機能検証を行う事が有効である事を示した。

トレードオフで決定された、アーキテクチャ開発の例として、多数の ECU を持つ E/E にフレキシブルにマッピングが必要な事を示した。また使用するデータは共通開発プラットフォームによりシームレスに管理することが必要で、ダッソー・システムズの 3D EXPERENCE プラットフォームはこの様な開発に最適である。

7. 参考文献

Daimler(2018) - Daimler Q2 2018 Corporate Presentation, https://www.daimler.com/dokumente/investoren/praesentationen/daimler-ir-corporatepresentation-q2-2018.pdf

Estifan(2008) - Estefan, Jeff “A. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) methodology”, INCOSE MBSE Initiative, May 23, 2008

Friedenthal(2009) - Frienthal, Sanford, et.al.,西村秀和監訳「システムズモデリング言語 SysML」, 東京電機大学出版会

Klauda(2015) – Klauda, Matthias, et al. ”Position of Points 2020 Paradigm Shift in E/E Architectures”, ATZ elekronik 2015/02 Vol 10 p.4-10

KPMG(2019) – KPMG "Global Automotive Executive Survey 2019", https://automotive-institute.kpmg.de/

Krob(2015) - Krob, Daniel 「システムズ・エンジニアリングと自動車業界」ダッソー・システムズシステムズ・エンジニアリングセミナー資料 2015 年 12 月 15 日

岡部(2016) - 岡部英幸「システムズエンジニアリングとフランス産業界の動向」, 『日本機械学会誌』日本機械学会 2016 年 12 月 Vol.119, p. 650-653

兼平(2009) - 兼平靖夫「AUTOSAR の目的とアーキテクチャ ― 自動車業界に見る組み込みソフト開発効率化の取り組み（1)」, 組込みネット CQ 出版社, 2009 年 1 月 6 日

兼平(2013) - 兼平靖夫 「ISO 26262 管理インフラでの必要要件」、『品質』日本品質管理学会 2013 年 43 巻 3 号 p. 312-317

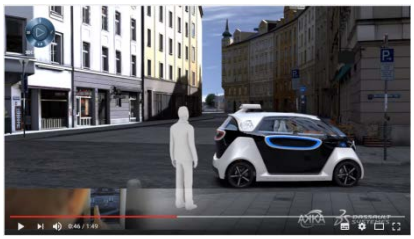
経産省(2018) 「自動車新時代戦略会議（第一回資料)」, 経済産業省 2018 年 4 月 18 日

田中(2018) - 田中紘一「Open innovation と Digitalization フィンランドが MaaS を進めるその背景」フィンランド大使館商務部、立命館大学 FutureMobility 研究会資料,2018 年 1 月 26 日

西村(2019) - 西村秀和「システムズエンジニアリングハンドブック第 4 版」慶応義塾大学出版会、2019 年 4 月 25 日

藤本(2014) - 藤本隆宏「いわゆる「自動車のモジュール化」に関する一考察」自動車技術, Vol.68, No.6, 2014 p.27-33

お手持ちのスマートフォンで、YouTube ビデオを！



仏レンヌ市の MaaS 運転実験
https://www.youtube.com/watch?v=cS2zsPp9eSA

機能モックアップと MBD 連携
https://www.youtube.com/watch?v=Yl0nv8g12zo

お問い合わせは

ダッソー・システムズ株式会社　マーケティング
〒141-6020 東京都品川区大崎 2-1-1 ThinkParkTower
TEL: 03-4321-3506 E-mail: Japan.Marketing@3ds.com

各社製品名は各社の登録商標です