

# Vモデルに基づく航空および自動車のソフトウェア開発プロセスの総括的比較分析：自動運転への転用提案の導出

Yusuf Akkus ダイム

ラー・トラックAG (

ドイツ、シュトゥットガ

ルト)

Eメール: yusuf.akkus@daimlertruck.com

ビヨルン・アニホーファー

シュトゥットガルト大学 教授

航空機システム研究所 ドイツ、シュトゥッ

トガルト

メールアドレス: bjoern.annighoefer@ils.uni-stuttgart.de

自動運転システムにおけるソフトウェアの複雑性の急速な増大は、自動車開発における機能安全の確保に重大な課題をもたらしている。航空業界は、成熟した開発プロセス、体系化された保証手法、そして規制当局の強力な関与を通じて、歴史的に高い安全レベルを達成してきた。本論文は、Vモデルに沿った自動車と航空のソフトウェア開発手法の比較分析を行い、航空開発から自動車開発への具体的な転用可能性を特定することを目的としている。分析の結果、最も大きなメリットはシステムおよびプロセスのガバナンスレベル、特に早期かつ継続的な規制当局の関与と体系化されたシステム保証手法を通じて得られることが明らかになった。さらに、ソフトウェア要件工学、ツールの適格性評価、および開発計画においても転用可能な要素が特定された一方、コーディング標準に関しては、自動車開発の方がより規範的である唯一のライフサイクル段階であることが示された。これらの結果は、航空分野由来の実践を選択的に採用することで、自動運転システムの安全性に対する信頼性を強化できることを示唆している。全体として、本研究は、航空開発の原則を的を絞って転用することが、将来の自動車技術におけるより高い安全保証に向けた実行可能な道筋となることを実証している。

## 1 はじめに

自動車産業は、自動運転、電動化、コネクティビティといった破壊的トレンドにより、大きな変革を遂げてきた[1]。近年では、AI（人工知能）の統合も重要な焦点領域として浮上している。その結果、

E/E（電気・電子）デバイスの増加

[2] や、航空業界を上回る高度なソフトウェア（SW）コンポーネントの増加により、開発の複雑さは増大している。例えば、コード行数は1億行を超えている[3]。業界はソフトウェア中心の車両や先進的なアーキテクチャソリューションへと移行しており、多くの企業が独自のオペレーティングシステムを開発している[4]。こうした革新は、特にシステムの安全性と信頼性の維持において大きな課題をもたらしており[5]、これは依然として継続的な懸念事項となっている。これは主に、これらの技術に内在する複雑さに起因しており、体系的かつ構造化されたアプローチが必要とされている。対照的に、航空業界には、ファイ・バイ・ワイヤ技術や高度な自動化を含む複雑な電子システムの管理において、数十年にわたる経験がある[6]。開発面においては、規律と厳格な安全文化が、システムの信頼性に対する強い確信と、卓越した安全実績を育んできた。図1および図2は、航空の安全面での優位性を浮き彫りにしており、絶対数および移動距離当たりの死亡率、ならびに各種交通手段における総死亡者数を示している。AkkusとAnnighöferは、航空の安全実績は早期の標準化と厳格かつ体系的な開発アプローチによるものであると結論付けており[7]、航空分野の開発手法を自動車分野に導入することには潜在的なメリットがあることを強調している。

### 1.1 背景

[7]によると、当局の関与や共通原因分析など、転用可能な領域がいくつか特定された。これに基づき、詳細な分析

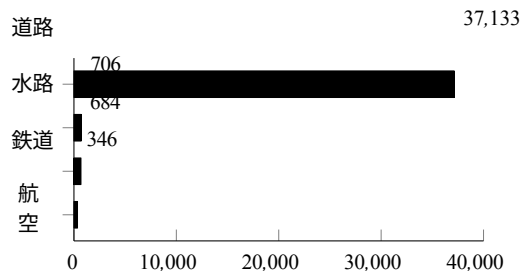


図1. 2021年の米国における交通手段別の死者数 [8]

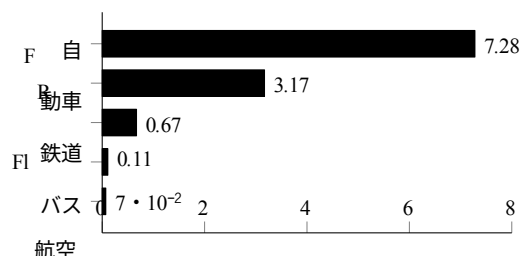


図2. 乗客10億マイルあたりの死亡者数、米国 2000-2009年 [9]

開発手法に関する研究が行われてきた。本研究の焦点は両分野の比較にあるが、技術移転の方向性は自動車分野のみを対象とする。また、確立された最先端の自動車開発ではなく、自動運転のような新たなトレンドにのみ付加価値をもたらすことを意図している。そのため、次の小節において以下の研究課題を定義する

## 1.2 研究課題

比較の根拠は明白であり、本節において大まかな方向性が定義されているため、研究課題 (RQ) を列挙する。

**RQ1:** 航空と自動車はどのように比較できるか？ **根拠** この問いは、システムとソフトウェアの両方を含意している。両分野の違いや、それらを比較する範囲が非常に広範であるという事実から、適切な焦点を定義する必要がある。

**RQ2:** 航空分野から自動車分野へ何を移転できるか？ **根拠** : どのトピック (プロセス、手法) が、特に新興技術の開発において、自動車分野への移転に有益か？

**RQ3:** 各移転提案の定量化されたメリットは何か？ **理由** : 採用の可否を正確に判断するため、各移転提案は、そのメリットを定量的に評価する必要がある。

## 2 関連研究

本節では、研究の課題と意義を明確にするために、関連研究を紹介する。

研究課題および既存の関連研究に基づき、以下の研究のギャップが特定された。[7]では、手法を転用するための初期の方向性が示されている

航空分野から自動車分野への転用について概説した。他の研究では、特定の側面が強調されている。例えば、ISO 26262はDO-178Bから恩恵を受け得ること[10]、自律技術にはより厳格な手法が必要であること[11]、ISO 26262がDO-254と同等の厳格さを適用すればCOTSハードウェアの開発工数を削減できること[12]、および開発成果物の厳格さのマッピングを確立できること[13]。しかし、これらの研究は依然として比較的なものに留まっており、具体的な転用提案を提供していない。Baekら[14]は、潜在的な利点について論じることで手法の転用を試みているが、その焦点は自動車から航空への実践の転用にあるため、自動運転技術には触れていない。これにより、明確なギャップが浮き彫りになる。すなわち、特に自動運転を対象とした、航空分野から自動車分野への具体的かつ定量的に裏付けられた移転提案を含む包括的な比較分析が、依然として欠如している。ソフトウェアアーキテクチャに関しては、Leiner [15] が主に分割戦略に焦点を当て、異なる領域にわたる統合的なアーキテクチャ的アプローチを調査している。Gaska [16] は、次世代の統合モジュラー・アビオニクス (IMA) コンセプトの課題を検討しており、その後の [17] では、航空 IMA 分野向けのモデルベース・エンジニアリング・アプローチを提案し、同様の技術が自動車 IMA 分野にも有益である可能性を示唆している。Bandur [18] は、主に自動車用 E/E アーキテクチャの集中化に焦点を当てているが、航空分野との比較も行っており、自動車分野における IMA 原則の採用は、技術移転の成功例であると指摘している。概要を表 1 に示す。

## 3 比較方法

これまでの研究では、自動運転における共通原因分析、規制当局の関与強化、厳格なソフトウェア開発プロセスによる複雑性管理、およびツールの適格性評価など、転用可能性の高いトピックがいくつか特定されている。これらの知見は、定評のある開発フレームワークであるVモデルと整合しているため、注目に値する。これは、Vモデルに沿って構造化された両領域にわたる開発手法およびプロセスの体系的な比較を行うことで、各転用提案に関連する領域が一貫して特定されることを意味する。したがって、比較の枠組みとしてVモデルを選択することは、

表1。研究状況の比較

研究	内容	結論
[7]	航空と自動車の比較分析	比較の根拠および 転用可能な開発手法
[10]	安全規格のマッピング	ISO 26262は、マッピングされた厳格度レベルを通じて DO-178Bの恩恵を受けることができる
[11]	ソフトウェア開発安全規格の比較 した方法論の重視	自律システムに適した方法論の重視自律システムに適
[12]	ハードウェア開発規格の比較 きる可能性がある	DO-254 の厳格性が適用されれば、設計保証の負担を軽減で 254の厳格さが適用されれば、設計保証の労力は軽減される 可能性がある
[13]	設計保証レベルの比較	開発成果物に基づく業界横断的な厳格さのマッピング 開発成果物に基づく
[14]	自動車と航空機のソフトウェア開発の比較	自動車用パワートレイン開発からの パワートレイン開発からの手法転用可能性
[15]	統合システムの分割	オペレーティングシステムと オペレーティングシステム間の成熟度のギャップ
[16]	アーキテクチャの集中化アプローチ の必要性	明確なデータおよびアーキテクチャ・インフラストラクチャ が特定された
[17]	モデルベースエンジニアリングの比較	航空分野の成熟度が、自動車開発における 開発におけるギャップを浮き彫りに
[18]	自動車用E/Eアーキテクチャ	自動車向けに提案された集中型航空機アーキテクチャ 自動車

開発の本質的な側面を捉えており、規範的な標準自体もこのモデルを中心に構成されている [19]。さらに、航空分野の厳格に規制された開発環境 [14]、[10] では、V モデルへの厳格な順守が求められ、すべての主要な規格も V モデルを基準としている。したがって、航空開発と自動車開発の方法論的な比較は、おおむねあらかじめ定義されている。すなわち、V モデルに従い、対応する規範的ガイダンスを検討する。具体的には、比較手法はVモデルで定義された開発段階の順序に従って進められる。分析は、システムの安全性を考慮したシステムレベルから始まり、続いてソフトウェア要件およびソフトウェアアーキテクチャの段階へと進む。その後、ソフトウェアのコーディングと実装が検討され、比較は検証で締めくくられる。各段階において、最初のステップは、関連する規範的ガイダンス（主にISO 26262とDO-178C（ARP-4754およびARP-4761を含む））の直接比較である。我々はそれらの相違点を評価し、安全実績への影

響を分析する。ある手法が有益である可能性が見出された場合、それを自動車分野へ転用する可能性についてさらに分析を行う

ドメインにおいて、すべての産業上の境界条件を考慮し、そのような移転が可能かどうか、またどのように可能かを明示的に検討する。自動車開発の制約に適応させた後、具体的な移転案が策定される。各段階における第2ステップでは、業界のベストプラクティスの比較を行う。これには、規範的ガイダンスの範囲外の側面を検討し、共通の課題と、これらがいずれのドメインでもどのように対処されているかに焦点を当てる。学術文献では、規範的な標準だけでは、安全クリティカルなシステムが実際にどのように開発されているかを完全に特徴づけるには不十分であると強調されている。なぜなら、標準は必要なプロセスを規定するものの、産業環境におけるエンジニアリング業務の実際の遂行状況を反映していないからである。安全工学の研究では、規定された慣行と観察された慣行を区別し、有意義な分析には、規範への準拠だけでなく、実際の産業における行動の実証的観察を取り入れる必要があると主張している [20]。同様に、[21]は経験に基づく開発の重要性を強調している。さらに、安全クリティカルなソフトウェア開発に関する産業界の調査では、検証、妥当性確認、およびテスト活動が、

、実際のプロジェクトで適用されるベストプラクティスを理解することの重要性を示している[22]。実証研究は、組織文化や産業慣行が規格の解釈や適用方法に影響を与えることを裏付けており、Vモデルなどのライフサイクルモデルを用いて航空と自動車を比較する際には、規格に基づく分析を実践からの証拠で補完する必要性を強調している[23]。その沿革を図3に示す。

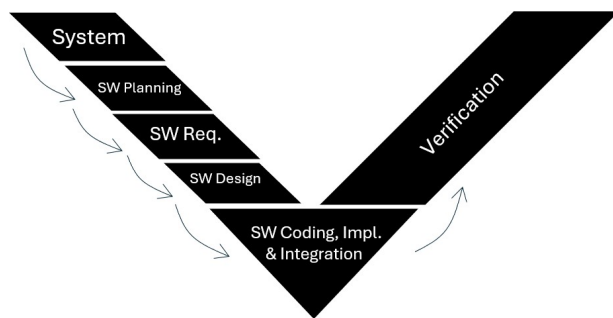


図3. Vモデルに沿った年代比較

## 4 比較

本章で提示する比較は、自動運転システムがもたらす課題に焦点を当てたものである。従来の運転支援機能と比較して、自動運転システムは機能の複雑性が著しく高まり、知覚、意思決定、および作動の各層間の相互依存性が強まり、安全要件もより厳格になっている。これらの特性により、将来的な自動車アプリケーションへの既存手法の適用性を評価する際、開発プロセスの堅牢性、トレーサビリティ、および検証可能性が極めて重要な要素となる。主要な知見の概観と比較分析を提示し、特定のプロセスや手法が航空分野から新興の自動車技術へ、どの程度転用可能であるかを検証する。各サブチャプターの構成は、DO-178C [24] および ISO 26262 [25] の規範的ガイダンスに沿って、Vモデルに従っている。議論は、ソフトウェア開発の基礎となるシステムレベルから始まり [26]、その後、図3に示す順序に従って進められる。

### 4.1 システムレベル

システムレベルの開発は、航空分野における強力な規範的・規制のガイダンスを体現している。この

レベルにおいて、比較調査の結果、当局（米国のFAAや欧州のEASA）の積極的な関与が、信頼性の高い開発プロセスとより安全な製品の創出に寄与していることが示された。すべての必須関与段階（SOI）および認証ステップを含め、航空企業はプロジェクト期間中に少なくとも5回、当局と協議を行う[27]。対照的に、自動車業界では、型式認定の際に一度だけそのようなやり取りが行われるに過ぎない。米国では、型式認定プロセスでさえ当局の関与を必要としない[28]。このアプローチは従来の自動車システムには十分であったが、自動運転のような複雑な技術には、より厳格な当局の関与が必要であることは明らかである[7]。そこで我々は、当局の関連ノウハウを考慮しつつ、自動運転においてどのように当局の関与を強化できるかを分析した。最終的に、2つの提案が導き出された。1つは当局との会議回数の増加を推奨する「ソフトな選択肢」、もう1つはシステムおよびソフトウェアの計画直後に少なくとも1つの必須ステップを要求する、より厳格な選択肢である。後者は図4に示す航空分野のSOI 1に相当する。

	Ideation / Legal frame	LO I	System/SW Planning (SOI 1)	SW HLR/LLR. (SOI 2)	SW VV	System VV (SOI 3)	Certfn/Homologtn
Aviation	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Auto. L2/L4	◆	-	◆	◆	◆	◆	◆
Auto. L4 Proposal 1	◆◆*	-	◆	◆	◆	◆	◆
Auto. L4 Proposal 2	◆◆*	-	◆	◆	◆	◆	◆

\*ダイヤモンドの数は、当局との会議回数を表すものではない。色は、会議が行われるか（赤、オレンジ）、行われないか（緑、「-」）を示す。同一のセル内に2つのダイヤモンドがある場合、具体的な回数は指定しないものの、本提案によれば相互作用が増加することを意味する。

図4. 当局の関与強化に関する提案

航空分野では、強力な規範的ガイダンスと当局の関与によってプロセスの保証が確保されているが、自動運転においても同様に、追加的なプロセス監視が有益となる可能性がある。ASPICE（Automotive Software Process Improvement and Capability Determination）は、広く利用されているプロセス監査ツールである[29]。OEMは通常、サプライヤーのプロセス準備状況を評価するために、プロジェクト期間中（主に初期段階）に1回この監査を実施する。この監査メカニズムは、自動運転車プロジェクトにおけるプロセス保証を強化するために活用できる。当局とは異なり

機関とは異なり、ASPICEの評価者は深い技術的専門知識を有していることが求められる[30]ため、システム設計およびソフトウェアレベルにおける当局の監督を補完する貴重な存在となる。ここでも、評価回数の増加を推奨する「柔軟な選択肢」と、システム設計フェーズ中に少なくとも1回の必須評価を要求する「厳格な選択肢」の2つの提案が導き出された(図5参照)。

Today	Kick Off	Sys Reqs	Sys Design	SW Req	SW Design	Impl.	SW V&V	Sys V&V	Pre-Hom.
Today	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Proposal 1)	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Proposal 2)	●	●	●	●	●	●	●	●	●

\* 色は、評価が型式認定に関連する(赤)、推奨される(オレンジ)、または行わない(緑)を示しています。

図5. ASPICE 強化提案

システムレベルの安全性比較において、航空分野における共通原因解析への強い重視が、自動運転システムにとっても潜在的な利点であることが確認された[7]。フェイルオペレーショナルなアーキテクチャと冗長性概念により、共通原因解析手法は長らく航空分野における最先端技術であった。これらはARP4754[31]で言及され、ARP4761[32]で詳細に記述されている。自動運転において、自動車業界はブレーキやステアリングシステムなど、安全上重要なシステムに初めて冗長性を導入することになる[33]。[33]では、分析の焦点を絞るために、複数の故障シナリオが影響度に応じて分類・カテゴリ分けされた。次の段階として、航空分野の共通原因アプローチを用いて、依存故障を特定する手法が開発された。潜在的な依存故障のリストが、質問票と共に作成された(図6)。その結果は、サプライヤー側で並行して行われた分析と完全に一致しており、この共通原因特定手法をシステムレベルの安全解析に適用するという提案を裏付けるものである。

#### 4.2 ソフトウェア計画

ソフトウェア計画段階の分析からは、航空分野において非常に厳格な文書化の取り組みが行われていることが示されている。例えば、PSAC(認証におけるソフトウェア面の計画)、SDP(ソフトウェア開発計画)、および類似の文書がこの段階の成果物である。自動車分野においても、

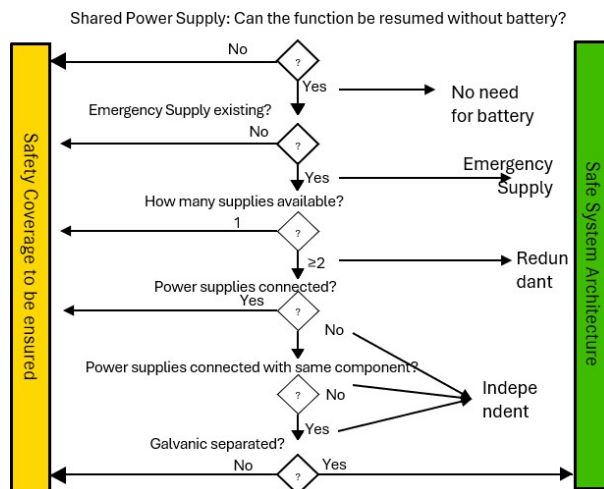


図6. 識別モデルの計画段階における質問票の例( )

計画段階においては、航空分野ほど厳格な要件は課されていない。PSACに相当するものは存在しない。航空分野でPSACが求められる理由は、計画段階の直後に、当局との最初の必須のやり取りとしてSOI 1が続くためである。自動車分野ではこの段階においてそのような当局とのやり取りが存在しないため、PSACに類似した文書はこれまで確立されていない。我々は、自律システムにおける計画成果物の厳格性を高めることの重要性を認識している[7]。計画成果物はSOI 1の段階で評価されるため、この段階では、まさにこのギャップに対処する「当局の関与強化」に関する我々の提案を参照する。

#### 4.3 ソフトウェア要件

分析によれば、高レベル要件(HLR)と低レベル要件(LLR)を厳格に分離することで、より優れたトレーサビリティと設計に依存しない仕様を確立できることが示されている[26]。対照的に、自動車分野ではISO 26262パート6にこの2段階の階層構造が欠如しているが、追加の要件階層が暗黙的に統合されている[34]、[35]。さらに、ASPICEはソフトウェア工学モジュールを3つのカテゴリに分解し[36]、ソフトウェア要件と設計を明確に区別している。我々は、2階層の要件階層を必須とすることを提案する。加えて、自動車業界では現在、システム工学的手法への取り組みが活発化しており、要件と設計の明確な分離が求められていることが確認されている[37]、[38]、[39]。さらなる規範的な指針は、FAA(連邦航空局)の要件ハンドブック[40]に示されており、そこでは要件の根拠の文書化を徹底しなければならないと明示され、その実施方法についてさらに説明が加えられている。

我々はこれを自動車業界の文脈で分析し、商用エンジニアリングライフサイクルプラットフォーム（ツールベース）上で強制概念を開発した。これにより、デフォルトの整合状態からの逸脱が記録されるたびに、根拠の文書化が強制される（図7の例を参照）。アーティファクトを残すには、少なくとも20文字のエントリを入力する必要があり、これにより「OK」ボタンが有効になる。同じプラットフォーム上

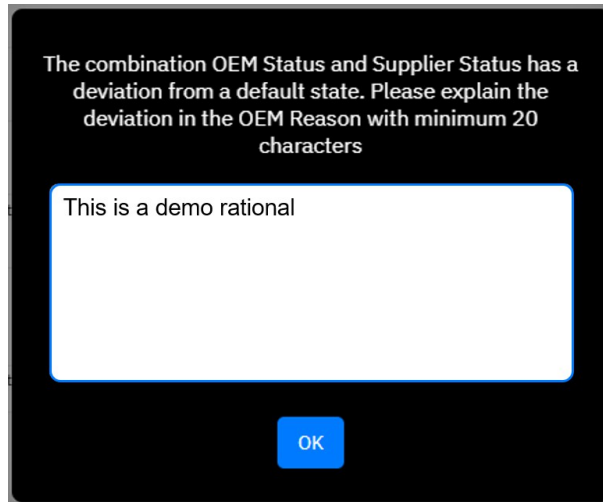


図7. 整合ステータスが異なる要件の、ツールに基づく根拠文書化

形式として、別の概念である「コンディショニング」が提案されている。このアプローチは、人的ミスを減らすために、特定の要件属性を事前定義された状態に自動的に設定するものである。例えば、変更された要件の状態は自動的にリセットされ、各変更に対するレビューが漏れることがないようにする。要件工学に関する我々の最終的な提案は、業界のベストプラクティスに由来する。[26]では、航空分野における要件工学へのプロトタイプの活用が推奨されている。航空分野では、モデルベースエンジニアリングを通じて早期検証が一般的である[41]、[42]。自動車業界も同様に早期検証の重要性を認識しており、いわゆるシフトレフトアプローチを適用して、初期段階で製品を検証している[43]、[44]、[45]。我々の具体的な提案は、早期検証を強化することである。

我々は、自動運転システムにおいて、こうしたソフトウェア要件の実践手法の重要性がますます高まっていることを強調する。自動運転機能は、複雑なソフトウェアアーキテクチャと安全上重要なコンポーネント間の広範な相互作用に依存しており、それにより、正確な要件の分解、双方向のトレーサビリティ、および厳格なレビュー手順の必要性が高まっている。したがって、従来航空分野で適用されてきた、より形式化された要件階層と検証文化は、

自動運転車開発に伴うシステムの複雑性の高まりや安全保証の要求に対応するためのメカニズムを提供する。

#### 4.4 ソフトウェア設計

ソフトウェア設計レベルにおいて、両業界の規範的ガイダンスに大きな相違は見られない[24]、[25]。両分野とも強い凝集性と緩やかな結合が強調されているものの、規範的ガイダンスの側面において実質的な違いは確認されなかった。したがって、我々の分析は業界のベストプラクティスに焦点を当てた結果、主な傾向は、AI（人工知能）[46]、[47]、[48]などのデータ集約型アプリケーションによって牽引される、高性能コンピューティングへの需要の高まりであると結論付けた。ソフトウェア定義車両（SDV）は、このようなデータ集約型アプリケーションの自動車分野における顕著な例である。この傾向は、増大する計算需要への対応として、例えば集中化アプローチへの移行といったアーキテクチャの進化を促進している[49]。航空分野でも、スペース、電力、重量の制約から集中化の概念が採用されており、いわゆるIMA（Integrated Modular Avionics：統合モジュラー航空電子機器）プラットフォームを用いて多数の機能をホストしている[50]。データ集約型アプリケーションは、航空分野においても新たなトレンドとなっている。

#### 4.5 ソフトウェアのコーディング、実装、および統合

コーディングのレベルでは、興味深い観察結果が浮かび上がってくる。Vモデルの他のどの段階とも異なり、自動車分野における規範的ガイダンスの規定性は、航空分野のそれを上回っている。DO-178Cの目的は特定のコーディング標準を義務付けていないが、ISO 26262はMISRA Cを明示的かつ強く推奨している

[51]は、ISOの要件を満たすコーディング標準として位置づけられている。これは、サプライヤー主導の複雑な環境においてソフトウェアのリスクを軽減するために必要な、予防的かつツールに基づく対策を反映したものである。確立されたガイドラインは、開発の初期段階で安全でない言語構文を排除するために不可欠である。言語の選択に関しては、規範的なルール、レガシーの制約、およびコンプライアンスの目標により、どちらの領域においても選択肢は限られている [52]、[53]。その結果、ここでは手法の転用は提案されていない。ソフトウェアのコーディング、実装、および統合の過程では、ツール自体に特に注意が払われる。ツールの認定プロセスを比較すると、顕著な違いが浮かび上がる。DO-178Cは、その統合プロセスの中でツールの認定を扱っているが、詳細かつ厳格な認定手順は、DO-178Cの構造と密接に並行する別個の文書であるDO-330 [54]に規定されている。対照的に、ISO 26262パート8はこのトピック

『Journal of Autonomous Vehicles and Systems』。2026年2月7日受付、2026年5月8日受理

原稿公開。doi:10.1115/1.4071897

Copyright © 2026 by ASME. 再利用ライセンス CC BY 4.0  
にわすか数ページを割くにとどまり、特定のアプローチを  
規定することなく、最小限の目標を概説している

を概説しているに留まり、具体的なアプローチは規定していない。また、DO-178C（および暗黙的にDO-330）などの他の規格に準拠したツール開発も許容されると認めている。自動車分野では、ソフトウェアコンポーネントや要件の増加に伴い、ツール認定の重要性がますます高まっていることが認識されている[55]、[56]。我々は、自動運転およびSDV（スマート・ドライブ・ビークル）において、開発ツールと検証ツールの双方に対し、DO-330形式のツール認定を適用することを提案する。これは、DO-330の開発構造に従い、その目的を満たすことを意味する。図8を参照のこと。

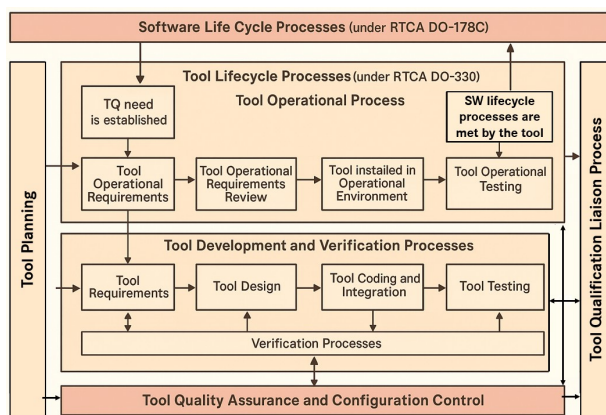


図8. DO-330準拠のツール認定プロセス [57]

#### 4.6 ソフトウェア検証

航空および自動車分野における検証の標準は、規範性および柔軟性において顕著な違いを示している。航空分野は厳格な指針を伴う目的ベースの検証哲学を採用しているのに対し、自動車の標準は規範的枠組みの中でより大きな柔軟性を認めている。いずれの分野も静的解析を義務付けてはいないが、航空分野は要件のカバレッジとトレーサビリティを強く重視しているのに対し、自動車分野は主にトレーサビリティを要求している。カバレッジ基準も大きく異なる。航空分野では、より高いDAL（信頼性レベル）に対して修正条件/決定カバレッジ（MC/DC）を義務付けているのに対し、自動車分野ではMC/DCを推奨しているものの、完全な準拠が達成できない場合には、その根拠を示すことで許容している。実用的な実装において、特に検証技術や手法の指標に基づく評価に関して、最も大きな相違が生じると予想される。Vモデル内の検証パスは広範な範囲を網羅しており、開発側とは大きく異なる。Vモデルの左側は航空機と自動車の両方で同様に始まるが、

既存の製品がない初期状態から始まるが、右側ではドメイン固有の差異が生じる。この段階では、検証はすでに開発された製品に焦点を当てるため、プロセスは本質的にドメイン要件に依存する。その結果、検証は全体的な工数と予算に多大な影響を及ぼすため、比較戦略はコストと効率を中心に据えることになる。両ドメインとも総コストの約30~40%を検証に割り当てており、支出に大きな違いはないことが示されている。次に検討するのは検証効率であり、これは信頼性や安全性を評価するために一般的に用いられるメトリクス[58]を通じて定量化できる[59]。こうしたメトリクスに基づいて両ドメインを比較することは、航空分野における効果的な手法が自動車分野のアプリケーションに転用可能かどうかを判断することを目的としている。この目的のために、欠陥検出効率、欠陥除去効率、テストケースの有効性といったメトリクスが選定された。

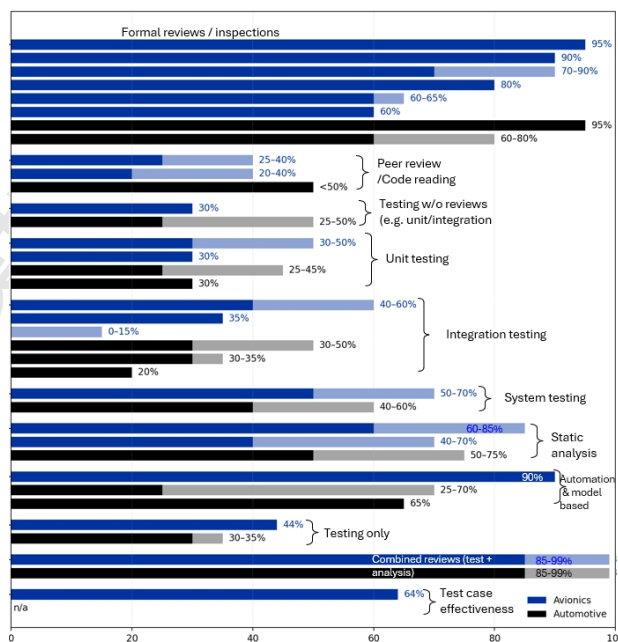


図9. ソフトウェアメトリクス比較の概要 ( )

図9は、各サブメトリクスの値を示している。これらの値は、両分野のソフトウェア開発を比較するために、前述のメトリクスに関する比較可能なデータを得るべく、文献調査を通じて収集されたものである。各サブメトリクスにおいて、両分野の値は互いに類似していることが確認された。調査の結果、転用提案の根拠となり得るような有意な差異は認められなかった。

検証段階に関するさらなる分析では、IV&V（独立性・検証・妥当性確認）と呼ばれる概念である「独立性」に焦点を当て、

検証および妥当性確認)と呼ばれる概念であり、航空分野で強く重視されている[26]。両分野における規範的ガイダンスに顕著な相違は見られず、業界の実務も概ねこれらのガイドラインに従っている。主な相違点は、航空分野における認証機関の強力な関与にあり、これにより独立性の層が追加されている。この構造的な相違が、前述のセクションで論じた「認証機関の関与強化」に関する転用提案の基礎を成している。このアプローチは自動車分野でも採用可能である。しかし、冗長な提案を追加で生成する代わりに、我々は前述の提案を...

権限の関与は、追加的な独立性の必要性もカバーしている。これが、ここで我々がシステムにおいて提案されている当局の関与の強化レベル。

#### 4.7 提案の概要

表 2 は、航空分野から自動車分野への技術移転の提案の概要を示している。

表 2. 技術移転提案の概要

V モデル段階	提案
システム	推奨される当局の関与の強化
システム	当局の関与の強化が必須
システム	推奨されるASPICEの拡張
システム	必須のASPICE強化
システム	依存性故障解析
SW 要件	2階層構造
SW 要件	Rationalによるドキュメント作成の強制
SW 要件	
SW 要件	要件属性の条件付け
SWコーディング、実装	プロトタイピング
	ツールの適格性評価

#### 5 定量化された実現可能性

各提案の実現可能性を評価するため、定量化手法が開発された[60]。この手法は、自動車プロジェクトの意思決定において一般的に用いられるプロジェクト管理のトライアングルに基づいている[61]。各提案の全体的な推定実現可能性スコア (Estimated) は、以下の2つの主要なパラメータを用いて算出される: 1) コスト、品質、および納期という制約に対する影響; 2) 従業員調査から導出された各制約条件の重み付け

$$\text{スコア}_{推定値} = \frac{\sum_i \text{重み付け} \cdot \text{影響度}_i}{\sum_i \text{重み}_i} \quad (1)$$

式 1 において、指数  $i$  は制約条件 (コスト、品質、時間) の数を表し、 $i=3$  となります。

#### 5.1 影響評価

$\text{Impact}_i$  は、関連分野での経験に基づく専門家による評価を通じて決定される。影響評価には相当な分野の専門知識が必要であり、適格な評価者の数が限られるため、専門家へのインタビューが最も適している。Hove らによる厳密な実証的インタビューの指針 [62] に従う。各影響度は0から10の尺度で評価される。すべての提案について、少なくとも3名の分野専門家に相談した。評価プロセスは以下の3つのステップから構成された: 1) 提案内容の説明; 2) 評価方法の説明; 3) 評価の実施。

#### 5.2 重み付けの算出

重み付けは、ダイムラー・トラック社内で行われた社内従業員調査[63] (参加者126名) に基づいて導出された。重み付け係数を決定するには、自動車開発におけるより広範な傾向を反映するために、より代表的なサンプルが必要となる。影響評価とは異なり、Rune-sonら[64]が指摘しているように、この段階ではより大きなサンプルサイズが必要となる。実証的ソフトウェア工学において、アンケート調査はこの目的に適している。Lim[65]は自動車業界におけるその重要性を強調しており、Mollerらは質の高いアンケート調査を実施するための詳細なチェックリストを提供している[66]。彼らの指針に従い、本研究では、調査計画、対象集団の特定、調査設計と妥当性確認、参加者の募集、回答管理、およびデータ分析を含む構造化されたプロセスを実施した。調査では、2つの質問グループを取り上げた: 1) 提案内容に応じて特定の専門分野からの回答に焦点を当てられるよう、人口統計に関する質問、2) 参加者がコスト、

品質、時間の制約を相互にどのように優先順位付けしているかを評価する。この区別により、各提案がVモデルのどの段階に関連するか、あるいはどのような転用（プロセス/手法またはツール）が意図されているかに応じて、各提案を分類することが可能となる。

### 5.3 定量化実現可能性手法の検証

依存性故障解析に関する提案は、開発段階の安全工学にすでに適用されており、検証の機会が得られている。その結果、14%の推定精度が達成され、この手法は基礎数学 [67] によれば「良好」、プロジェクトマネジメントハンドブック [68] によれば「誤差が小さい」と分類される。

### 5.4 提案の定量的実現可能性の結果

表3は、各提案に対する影響評価および重み付け計算の結果、ならびに全体的な実現可能性スコアをまとめたものである。

表3は、制約条件であるコスト、品質、時間の順に、重み付け値と影響度値を示している。重み付け係数は、タグ付けを行った従業員調査に基づいており、影響値は2025年および2026年に実施された専門家評価に基づいています。右端の列には、総合的な（予測）実現可能性スコアが表示されています。このスコアは0から10までの範囲で、0が最も実現可能性が低く、10が最も高いことを示します。スコア5は、中立的な長期的な実現可能性レベルを表します。

図10は、技術移転の提案事項を概観したものです。これによると、Vモデルの左側の方が潜在的な可能性が高く、ツールの認定が最高スコアを獲得しており、提案された要件工学手法も同様です。また、システムレベルの開発および安全手法においても、技術移転の可能性が高いことが示されています。規範性の観点では、コーディング標準（自動車分野がMISRA Cの使用を明示的に推奨している点を除き）を除き、航空分野が自動車分野を明らかに上回っている。

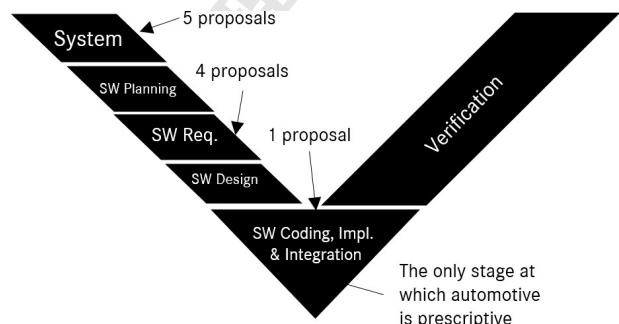


図10. Vモデル全体における転用可能性

表3. 転用提案に関する全体的な実現可能性計算の概要

提案	重み付け	影響度	全体的な実現可能性スコア
推奨 権限強化 関与		2.59, 5.66, 6, 3.76, 5.66, 3.364	5.79
必須 強化 関与	en- 権限	2.59, 3.66, 6, 3.76, 3.66, 3.364	4.54
推奨 ASPICE エンハンス ment		2.59, 6, 7.5, 3.76, 5.5, 3.364	6.38
必須 PICE強化	AS-	2.59, 5, 8, 3.76, 5.5, 3.364	6.31
被験物の故障解析		-* -*	5.83
2階層 階層	階層-	2.57, 5.66, 6, 3.74, 8, 3.68	6.15
合理的な文書- 合理的な立証の強制		2.59, 5.33, 3.76, 7.66, 3.364, 6.66	6.69
要件 属性 イ- 条件	コンデ	2.59, 5.33, 3.76, 6.66, 3.364, 6.66	6.32
プロトタイプ ピング		2.57, 4.66, 3.74, 7.33, 6, 3.68	6.65
工具認定		2.59, 9.66, 3.76, 10, 3.364, 8.66	9.42

\*この手法はすでに適用されているため、従属的な故障解析の値は算出されていない。全体値は予測ではなく、実際の実現可能性を表す

提示された定量的スコアは実証的な入力データから導出されたものである。これらの数値は、自動車業界全体を統計的に代表するものではなく、文脈に依存した指標として解釈されるべきである。このため、これらの結果は、

2つの経験的構成要素、すなわち重み付け ( $W_i$ ) と影響度 ( $I_i$ ) から成るモデルに由来することを改めて強調する。重み付けは単一のOEM内での調査結果を反映しているのに対し、影響度は専門家による判断ラウンドから得られている。本スコアリングモデルの目的は、普遍的に有効な絶対的な指標を提供することではなく、技術移転提案の体系的な比較と優先順位付けを支援することにある。式(1)を用い、[69]を考慮すると、総合スコア  $\sigma_{Score推定値}$  の誤差計算式は次のように導かれる：

$$\sigma_{Score推定値} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{I_i^2 \cdot \sigma_{W_i}^2}{10} + \frac{W_i^2 \cdot \sigma_{I_i}^2}{10}} \quad (2)$$

[70]に基づき、 $\sigma_{W_i}$ を7~10%とする。 $\sigma_{I_i}$ は専門家の判断における誤差範囲であり、容易に定量化できない。専門家の誤りがどの程度かを示す、科学的に妥当な普遍的な割合は存在しない。唯一の指標は、個々の制約条件に対する専門家の合意/乖離のレベルである。そのため、我々の結果は経験的に導かれた指標として扱い、これに基づいて定性的な記述を行うことは可能であるが、定量的な扱いは慎重に行うことを推奨する。

## 6 結論

本稿では、自動運転システムとその機能安全に焦点を当て、Vモデルに沿った航空および自動車の開発手法の比較分析を行った。その目的は、ソフトウェア集約型の新たな自動車技術における安全保証をさらに強化し得る、航空分野から転用可能な手法を特定することにあった。分析の結果、両分野は類似したライフサイクルモデルに従っているものの、プロセスの目的、規制当局の関与、保証の哲学において大きく異なるため、体系的な比較は実行可能かつ有意義であることが確認された。航空分野は、開発の初期段階からの継続的な規制当局の関与、規律あるシステムレベルの保証、および開発全体にわたる厳格なガバナンスを通じて、歴史的に高い運用安全性を実現してきた。最も大きな転用可能性はシステムレベルで確認された。ここでは、規制当局の関与の強化、共通原因分析のための構造化された保証手法（例：ARP4761スタイルのアプローチ）の採用、およびASPICE評価の強化が、システム安全に対する信頼を大幅に高めることが判明した。この影響は当然ながらソフトウェア計画にも及び、追加の孤立したプロセス対策の必要性を低減する。ソフトウェア要件定義フェーズでは、2階層の要件階層、要件の明示的な条件付けおよび強制といった航空分野の実践

属性および早期プロトタイプは、自動運転機能の複雑性を管理する上で極めて重要であると特定された。第IV節で論じたように、航空分野で一般的に用いられる厳格な要件構造化、トレーサビリティメカニズム、およびレビュー慣行は、自動運転機能によってもたらされるシステムの複雑性の増大と安全検証の課題に直接対処するものである。アーキテクチャおよび設計レベルにおいて、両分野とも、データ集約型およびAIベースのアプリケーションによって牽引される高性能コンピューティングへの需要の高まりに直面しており、これが将来的な集中化コンセプトの比較を促進する要因となっている。

コーディング段階は、異なる安全哲学を反映したMISRAなどのコーディング標準に対する明確な推奨事項があるため、自動車開発において唯一、より規範的なライフサイクル段階である。ソフトウェアに関しては、

実装および統合、特に航空業界式のDO-330原則に従った厳格なツール認定といった航空業界の実践が、影響力の大きい移転候補として特定された。検証と独立した妥当性確認を直接比較することは困難であることが判明したが、プロセスレベルの分析により同等の効率性が明らかになった。一方、航空業界における実務上の高い独立性は、システムレベルですでに検討されている当局の関与を通じて、大部分が達成されている。全体として、この結果は、航空機開発の実践（特にシステム、ガバナンス、要件、およびツール認定のレベル）を選択的に移転することが、自動運転システムの安全性をさらに高めるための実行可能かつ効果的な道筋となることを示している。

**RQ1** 航空と自動車をどのように比較できるか？ **回答** 規範的ガイダンス（ISO26262 対 DO-178C）およびVモデルの対応する段階における実務的な開発を、規範性、厳格性、専門家の判断、安全実績の観点から体系的に比較することによって。

**RQ2** 航空分野から自動車分野へ何を移転できるか？ **回答** システムレベルでの関与アプローチ、計画の厳密性、要件工学手法、ツール認定の厳格性、独立検証が、移転の有望な候補として特定された。

**RQ3** 各移転提案の定量化されたメリットは何か？ **回答** 定量化は経験的手法に基づいており、本文で述べた制約や誤差の範囲内で現実を反映していることを改めて強調しておく。我々の結果によると、当局の関与を義務付ける提案を除き、提案されたすべての措置は5以上のスコアを達成しており、したがって推奨される。DO-330スタイルのツール認定は9.42というスコアで最高評価を得た。要件工学の実践は

6.15～6.69の範囲に収まっているのに対し、システムレベルの提案は4.54から6.38のスコアを示している。詳細な結果は表3に示す。

最後に、実現可能性の定量化に使用された実証的な重み付け係数は、単一のOEM内で収集されたアンケート回答に基づいている点に留意されたい。回答者数は有意義な初期データセットを提供しているものの、その結果として導き出された重み付けは、依然として特定の優先事項や組織的背景を反映している。したがって、数値的な結果は、自動車業界全体を代表するものではなく、あくまで参考値として解釈されるべきである。複数の組織やサプライチェーンの各レベルを巻き込んだ今後の研究により、これらの重み付け係数の検証と精緻化が進められることが期待される。

#### 参考文献

- [1] Adler, M. W., Peer, S., and Sinozic, T., 2019, “Autonomous, connected, electric shared vehicles (ACES) and public finance: An explorative analysis,” *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*.
- [2] Hegde, R., Mishra, G., and Gurumurthy, K. S., 2011, “An insight into the hardware and software complexity of ECUs in vehicles,” In *Advances in Computing and Information Technology*, D. C. Wyld, M. Wozniak, N. Chaki, N. Meghanathan, and D. Nagamalai 編、『*Communications in Computer and Information Science*』第198巻、Springer。
- [3] Kochanthara, S., Dajsuren, Y., et al., 2022, 「GitHubにおける自動車用ソフトウェアの全体像」, 『第19回IEEE/ACM国際ソフトウェアリポジトリマイニング会議 (MSR) 論文集』, ACM.
- [4] Szalavetz, A., 2024, “In-house software development for software-defined vehicles: Major changes ahead in automotive value chains?,” *International Journal of Automotive Technology and Management*, **24**(5), pp. 22–39.
- [5] Uzzaman, A. 他, 2025, 「自動運転車の安全性と持続可能性に関するレビュー：課題と今後の方向性」, 『*Control Systems and Optimization Letters*』, **3**(1).
- [6] Chialastri, A., 2012, 「航空における自動化」, In *Automation*. InTech.
- [7] Akkus, Y., and Annighofer, B., 2022, “Comparison of aviation and automotive standards and methods in terms of safety and cybersecurity,” In *Software Engineering 2022 Workshops*, Gesellschaft für Informatik.
- [8] Majidi, M., 2023, 「2021年の米国における交通死亡者数（交通手段別）」, <https://www.statista.com/statistics/860124/us-transportation-fatalities-by-mode/> アクセス日：2025年10月28日。
- [9] Savage, I., 2013, 「米国における交通手段別および経時的な死亡リスクの比較」, *The Economics of Transportation Safety*, **43**(1), pp. 9–22.
- [10] Gerlach, M., Weibleder, S., and Hilbrich, R., 2011, Can cars fly? from avionics to automotive: Comparability of domain specific safety standards.
- [11] Crots, K., Skentos, P., et al., 2014, A comparative analysis of aviation and ground vehicle software development standards.
- [12] Schwierz, A., および Forsberg, H., 2018, 「安全上重要な航空電子機器用マイクロコントローラ的设计保証評価」, IEEE/AIAA デジタル航空電子システム会議 (DASC) にて。
- [13] Ledinet, E., Astruc, J.-M., et al., 2012, ソフトウェア開発保証標準の分野横断的比較 HAL プレプリント。
- [14] Baek, J. 他, 2023, 「ソフトウェア開発標準の比較分析を通じた、自動車用ソフトウェア技術の航空分野への採用」, 第42回 IEEE/AIAA デジタルアビオニクス・システム会議 (DASC) 論文集, pp. 1–4。
- [15] Leiner, B., 2007, 「統合システム向けオペレーティングシステムの分割に関する比較」 <https://www.cs.unc.edu/~anderson/teach/comp790/papers/comparison.pdf>.
- [16] Gaska, T., 2015, 「統合モジュラー・アビオニクス — 過去、現在、そして未来」, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, **30**(9), pp. 12–23.
- [17] Gaska, T., 2017, “Model-based engineering for advanced integrated modular avionics: Focus and challenges,” In *Vertical Flight Society 73rd Annual Forum and Technology Display*.
- [18] Bandur, V., 2021, 「集中型自動車E/Eアーキテクチャの提唱」, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **70**(2), pp. 1230–1245.
- [19] Arcanjo, R. R. 他, 2023, 「自動車分野における組み込みソフトウェアの検証と妥当性確認：系統的文献レビュー」, *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*.
- [20] Osborne, R. J., Hawkins, R. D., and McDermid, J., 2024, “Understanding safety engineering practice: Comparing safety as desired, required and observed,” *Safety Science*, **172**.
- [21] Darwesh, D. N., 2023, 「統合モジュラー航空電子機器のための安全クリティカルなミドルウェアの体系的な検証と評価」, 博士論文, シュトゥットガルト大学.
- [22] Kassab, M., 2018, “Testing practices of software in

- 安全クリティカルなシステムにおけるソフトウェアのテスト実践：産業界調査」、『第13回航空宇宙ソフトウェア技術国際会議 (ICSOF) 論文集』、SciTePress。
- [23] Franch, X., Seyff, N., Fricker, S., and Palomares, C., 2021, 産業界における要件工学標準の知識と利用に関する研究 arXiv プレプリント。
- [24] RTCA, 2011年、Do-178c：航空機搭載システムおよび機器の認証におけるソフトウェアに関する考慮事項、12月。
- [25] ISO, 2018年、ISO 26262：道路車両 – 機能安全。
- [26] Rierson, L., 2013, 『Developing Safety-Critical Software: A Practical Guide for Aviation Software and DO-178C Compliance』 CRC Press.
- [27] Rapita Systems, 2025年、「DO-178C ライフサイクルを通じた効率的な検証」ドキュメント ID：MC-WP-011 DO-178C 検証 v7。
- [28] Bhaskaran, B., 2025, 進化する米国の自動車市場における型式認定の重要性 PDF ホワイトペーパー、2025年11月24日アクセス。
- [29] VDA QMC ワーキンググループ 13 / Automotive SIG, 2017年、「Automotive SPICE プロセス評価 / 参照モデル」アクセス日：2025年11月24日。
- [30] Automotive SPICE Certification, 2025, Automotive SPICE 認証、2025年、Automotive
- [31] SAE International, 2010年、Arp4754a：民間航空機およびシステムの開発に関するガイドライン、12月。
- [32] SAE International, 1996年、Arp4761：民間航空機システムおよび機器における安全評価プロセス実施のためのガイドラインおよび方法、12月。
- [33] Akkus, Y. 他、2025年、「航空分野のベストプラクティスをういた自動車用フェイルオペレーショナル・メカトロニクスシステムの依存故障解析」、2025 IEEE 第 25 回計算知能・情報学国際シンポジウム (CINTI) 掲載。
- [34] Azianti, I., 2014, 「Iso 26262 自動車機能安全：課題と課題」、*International Journal of Reliability and Applications*, **15**(2), pp. 151–161.
- [35] ZVEI – 電気・デジタル産業協会、2024年、「安全関連自動車システム用ソフトウェア」。
- [36] Automotive SPICE, 2026, プロセス次元。
- [37] Krog, J. 他、2022年、「車両コンセプトのアーキテクチャ開発のためのシステムエンジニアリング手法に向けて」、NordDesign 2022 議事録。
- [38] Granrath, R. 他、2021年、「分解とは独立した適切な抽象化レベルの必要性を強調する新しいシステムエンジニアリングアプローチ」、*Systems Engineering*。
- [39] Krog, J., Akbas, C., Nolte, B., および Vietor, T., 2025, 「自動車工学における機能的および論理的な参照システムアーキテクチャの開発」、*Systems*, **13**(3), p. 141.
- [40] 連邦航空局, 2009, 『要件工学管理ハンドブック』 DOT/FAA/AR-08/32.
- [41] Chrysalidis, P., Hoerber, H., and Thielecke, F., 2023, 「飛行制御プラットフォームの要件に基づく早期検証のための半自動化アプローチ」、*CEAS Aeronautical Journal*, **14**, pp. 271–280.
- [42] Lo'bl, D., 2018, 「安全上重要な機能の開発のための総合能力アプローチ」、博士論文, ミュンヘン工科大学。
- [43] Rana, R., 2014, 「フォールトインJECTIONとミュレーションテストの組み合わせによる ISO 26262 に基づく早期検証および妥当性確認」、*Communications in Computer and Information Science*, **457**.
- [44] Abboush, M., Knieke, C., and Rausch, A., 2025, “継続的インテグレーションとインテリジェントな故障解析による自動車ソフトウェアシステムのリアルタイム妥当性確認の進展,” *Scientific Reports*, **15**, p. 32936.
- [45] Wiecher, C., Mandel, C., Gu'nther, M., Fischbach, J., Greenyer, J., Greinert, M., Wolff, C., Dumitrescu, R., Mendez, D., and Abel, A., 2023, Model-based analysis and specification of functional re-requirements and tests for complex automotive systems arXiv preprint.
- [46] Janßen, M., Pfandzelter, T., Wang, M., and Bernbach, D., 2023, 「エッジコンピューティングによる UAV の支援：機会と課題のレビュー」技術報告書 MCC.2023.3, ベルリン工科大学 (TU Berlin), ECDF, モバイルクラウドコンピューティング研究グループ。
- [47] Han, P., Hu, W., Zhai, Z., and Huang, M., 2024, “A model-based optimization method of arinc 653 multicore partition scheduling,” *Aerospace*, **11**(11), p. 915.
- [48] Rehm, F. 他, 2021, 「予測可能な自動車用高性能プラットフォームへの道」、DATE 2021 にて発表。
- [49] Mauser, L., Zimmermann, E., Nedve'dicky', P., Eisenreich, T., Wa'schle, M., and Wagner, S., 2025, Towards mixed-criticality software architectures for centralized hpc platforms in software-defined vehicles: A systematic literature review arXiv preprint.
- [50] Lukic, B., Ahlbrecht, A., Friedrich, S., および Durak, U., 2023, 「統合モジュラーアビオニクスに関する最先端技術と今後の展望」、第 42 回 IEEE/AIAA デジタルアビオニクスシステム会議 (DASC), pp. 1–10.
- [51] MISRA, 2013, Misra C:2012 – クリティカルシステムにおけるC言語の使用に関するガイドライン。

- [52] Ashmore, R., Howe, A., Chilton, R., および Faily, S., 2022, 「航空分野における安全上重要なソフトウェアのためのプログラミング言語評価基準」, IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (IS-SREW) 論文集, pp. 230–237.
- [53] Bagnara, R., Bagnara, A., and Hill, P. M., 2018, The misra c coding standard and its role in the development and analysis of safety- and security-critical embedded software arXiv preprint.
- [54] RTCA, 2011, Do-330 – ソフトウェアツールの認定に関する考慮事項。
- [55] Conrad, M., Munier, P., および Rauch, F., 2011, ISO 26262 に基づくソフトウェアツールの認定。
- [56] Slotosch, O., Wildmoser, M., Philipps, J., および Jeschull, R., 2012, ISO 26262 – ツールチェーン分析。
- [57] Ibrahim, M., Durak, U., 2021, 航空電子機器ソフトウェア工学におけるシミュレーションの認定に関する考察 講演、クラウスタール工科大学。
- [58] Vogel, M. 他, 2020, 「自動車ソフトウェア開発におけるメトリクス：系統的な文献レビュー」, *Journal of Software: Evolution and Process*, **32**(11).
- [59] Souza, M., および de Carvalho, T., 2005年, 「航空宇宙および自動車システムの信頼性を高めるための障害回避およびフォールトトレランスアプローチ」、技術報告書 SAE Technical Paper 2005-01-4157, SAE International.
- [60] Akkus, Y., and Annighofer, B., 2026, 経験的定量化による、航空分野から自動車分野へのプロセス、手法、およびツールの移転の実現可能性の予測 技術論文、刊行中。
- [61] De Marco, A., Mangano, G., and De Magistris, P., 2021, “Evaluation of project management practices in the automotive original equipment manufacturers,” *Procedia Computer Science*, **181**, pp. 310–324.
- [62] Hove, S. E., および Anda, B., 2005, 「実証的ソフトウェア工学研究における半構造化インタビューの実施経験」、第11回IEEE国際ソフトウェアメトリクスシンポジウム (METRICS’05) 論文集, pp. 1–23.
- [63] Akkus, Y., 2024, 「開発手法の領域間移転、自動車開発者の選好を対象とした従業員調査」 調査期間：2024年10月7日 – 2024年11月25日。
- [64] Runeson, P., Host, M., Rainer, A., and Regnell, B., 2009, “Guidelines for conducting and reporting case study research in software engineering,” *Empirical Software Engineering*, **14**, pp. 131–164.
- [65] Lim, J., 2024, 『より強力なチームの構築：2024年の自動車業界における調査の影響』 アクセス日：2025年1月6日。
- [66] Molle’ri, J. S., Petersen, K., and Mendes, E., 2020, “An empirically evaluated checklist for surveys in software engineering,” *Information and Software Technology*.
- [67] Proceffa, 2023, Mape: 平均絶対誤差率 (MAPE) ガイド アクセス日：2025年1月15日。
- [68] Project Management Institute, 2013, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PM-BOK® Guide) – Fifth Edition* Project Management Institute アクセス日：2025年10月28日。
- [69] Taylor, 2001, 誤差の伝播 — 基本ルール アクセス日：2025年10月31日。
- [70] Hunter, P., 2024, 「誤差範囲と信頼水準：顧客調査を最大限に活用する」 アクセス日：2025年6月13日。