

協調領域における CAE の在り方

1. まえがき

自動車産業が 100 年に一度と言われる大変革期に直面する中、電動化によるサプライチェーンの再編、ADAS におけるセンサー・AI・制御の高度な分業化など、解決すべき課題は単一組織で解決し得ず、これまで以上に、複数組織による協調の必要性が高まっている。さらに、コスト削減や開発の効率化、日本としてのグローバル競争力の強化を目的として、企業間の垣根を越えた協調の取組みも盛んになってきている。本稿では、競争の対義語としてではなく、異分野・異業種が連携して新しい価値を生み出すことを念頭において「協調領域」の語を用いる。

こうした領域では、複数企業、産官学、規制当局といった多様な主体間での合意形成が開発の成否を握る。これに伴い、CAE の役割も、従来の「計算精度の追求」から、異なる主体間を繋ぎ判断の根拠を提示する「翻訳装置」としての機能へと抜本的な変容を迫られている。現代の協調開発で問われるのは数値の妥当性以上に「なぜその判断でよいのか」という説明性であり、CAE の成果物は、数値から判断根拠へと重心を移しつつある。これは単なる技術論ではなく、開発制度の設計論である。この視座から、協調領域におけるシミュレーションの在り方を再考することが本稿の目的であり、その再設計こそが、協調領域における CAE の競争力を規定する。

協調領域における開発失敗の多くは、技術的誤りよりも「前提条件の非共有」に起因することが多い。全体最適化を阻む、専門と言語の断絶を解消するためには、全体を俯瞰する視点での概念共有（共通認識の形成）、かつ、各領域の専門言語への翻訳を可能とする「対話の場」が必要であり、前報で提示した「Virtual Testing」の理念が、その実現のために有用であると考えられる。さらに、概念共有、相互理解のためには、物理(Physics)だけでなく挙動(Behavior)や設計意図(Design)までを多階層で可視化する必要がある。本稿では、開発対象をこれら三層で捉え、それらを縦に貫く「Evidence bundle (合意形成の証拠体系)」の構築を提案する。この体系は、モデルの適用限界を明示する「Model Interface Card (MIC)」による信頼性の共有(Credibility)、文脈を記録する Data、責任分界を明文化する Governance から成り、計算精度以上に透明性の高い対話を実現する枠組みである。

本稿では、この枠組みを高速道路における合流支援システムの検討に適用した我々の研究事例についても詳述する。この取組みは、「ヒト・モビリティ・ソサエティに関わるシミュレーション技術の高度化コンソーシアム」におけるコア・ツールである複数台連携ドライビングシミュレータ(DS)を用いて、前報で触れた「Naturalistic Paradigm」を具現化する試みでもある。マルチエージェントシミュレーションによる仮想交通環境は、単なる開発のための検証ツールとして利用されるだけでなく、多くの組織が協調・連携しながら、人にとって受容性の高い次世代交通環境を設計するための「対話のプラットフォーム」ともなりうることを示したいと考えている。本稿は協調領域における CAE の一般理論を完成させることを目的とするのではなく、その設計原理を提示し、高速道路合流支援の検討事例を通じて適用可能性を例示するものである。

2. 協調領域における CAE の翻訳装置としての再設計

2.1 協調領域の台頭と CAE の役割変化

かつて自動車開発は、社内の暗黙知と垂直統合で回っていた。CAE もまた、社内での精度競争と適用拡大を主戦場としてきた。しかし今日、開発判断は複数企業・複数部門・産官学・規制当局といった協調領域で成立させる必要

がある。電動化によるサプライチェーン再編，ADAS でのセンサー・AI・制御の分業，カーボンニュートラルでの LCA 評価—これらすべてが，単一組織で完結しない開発を前提とする。このとき問われるのは，「計算が合っているか」ではなく「なぜその判断でよいのか」という説明である。

2.2 断絶の構造—異なる言語を話す主体

協調領域で頻発する失敗は，技術的誤りよりも，異なる主体間の「前提条件の非共有」に起因することが多い。1990 年代後半の ASV（先進安全自動車）開発において，筆者の一人は次のような事態を経験した。センサー部門は「50m 先の歩行者を検知可能」，制御部門は「濡れ路面でも 45m で停止可能」と報告していたが，統合システムは雨天時に機能しなかった。各部門の計算は正しかったが，センサーは晴天条件，制御は理想的タイヤ μ を前提としており，これらの前提条件を共有する仕組みがなかった。

この構造は，実は新しいものではない。1980 年代，エンジン騒音解析においても同様の断絶があった。計測部門は「騒音レベルが高い」と報告するが，設計部門が求める「どこを補強すべきか」には答えられなかった。音響インテンシティ法は，音をベクトル量として捉えることで，「どの面からどの方向にパワーが放射されているか」を可視化し，両部門の共通言語を作った。

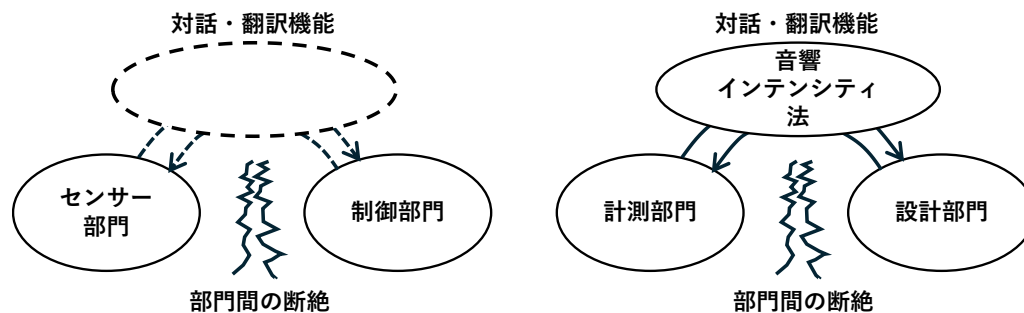


図 1. 部門間の断絶と翻訳装置による対話

ここで言う翻訳装置とは，異なる専門言語間で前提条件と責任範囲を可視化し，合意可能な証拠体系へ変換する機能である。音響インテンシティ法の価値は，計測精度の向上だけでなく，この翻訳装置を提供した点にある。かつては物理現象の可視化が共通言語として機能したが，現代の協調領域では，物理 (Physics) だけでなく挙動 (Behavior) や意図 (Design) まで含めた多階層での可視化が求められる。

2.3 三層構造と証拠体系

協調領域で CAE を翻訳装置として再設計するためには，図 2 に示す枠組みが有効である。開発対象を，Design layer（設計意図），Behavior layer（システム挙動），Physics layer（物理根拠）の三層で捉え，これらを貫く Evidence bundle（合意形成の証拠体系）を構築する。すなわち，Design-Behavior-Physics を縦に貫く証拠の束を構築することが，協調 CAE の本質である。

狭義の CAE (FEM/CFD 等) は Physics layer を，制御設計シミュレーション (Matlab/Simulink 等) は Behavior layer を主に扱う。協調領域での失敗は，これらの層を跨ぐ際に前提条件が共有されないことに起因する。ASV 事例では，センサー (Physics) ・制御 (Behavior) ・HMI (Design) の各部門が異なる前提で「検証済み」を主張していた。Evidence bundle は，信頼性 (Credibility) ・来歴 (Data) ・責任設計 (Governance) の三要素から構成され，三要素は以下の通りである。

Credibility (信頼性の共有) :

モデルが「誰に向けて、何を伝えられ、何を伝えられないか」を明示する。筆者はこれを Model Interface Card (MIC) と呼び、モデルの「名刺」として添付することを提案している。

Data (文脈の記録) :

モデルの版、パラメータ、境界条件、参照した試験データの来歴を追跡可能にする。

Governance (対話のルール) :

責任分界を事前に明文化する。ASV 開発後の議論で最も難航したのは「誰の責任か」という点であった。協調領域における CAE の成熟度は、解析精度よりも、責任分界の透明性に依存する。MIC にモデルの適用限界を明記することで、その範囲外で生じた問題に対する責任の切り分けが可能となる。

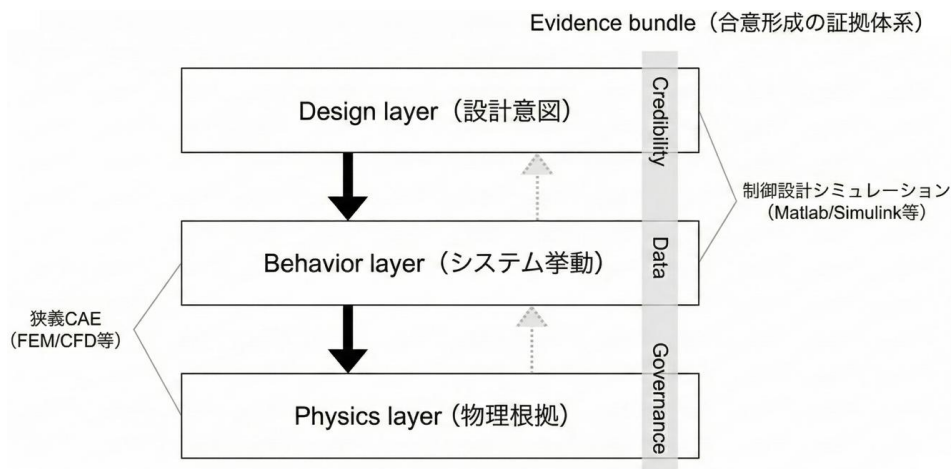


図 2. 対象システムの 3 層構造表現と合意形成の証拠体系

2.4 マルチエージェントシミュレーションへの展開

マルチエージェント交通シミュレーション、より厳密には、それが生成する仮想交通環境、そして、そこへ潜り込むためのインターフェースとして定義できる各種シミュレータの本質は「対話のツール・翻訳装置」にある、と捉えるべきである。次章において、具体的事例を紹介し、この詳細を説明したい。なお、以下に示す事例は、本枠組み全体の包括的検証ではなく、協調 CAE の考え方が実際の支援方策検討にどのように接続されるかを示すケーススタディとして位置づけるものである。

3. 高速道路合流に対する支援方策の検討への適用

高速道路における合流は運転者に心理的負担を与える代表的な場面であり、その円滑化に向けて多様な支援策が提案されてきた。しかし、以下に述べる 2 つの観点について、十分に議論されているとは言い難いとの認識を持っている。1 つは、ドライバの運転行動についての理解である。ドライバが何に不安や負担を感じているのかを十分に理解しないままに支援システムを構築しても、それが有効な支援となる保証はない。システム設計意図のベースとなる Evidence の不足とも表現できる。もう 1 つは、様々に提案されている支援策についての「協調」である。道路構造や制御など、それぞれの領域に限定した議論が行われているのみで、ヒューマンファクタや交通工学などの領域

を含めた分野横断的な協調領域としての議論が行われていない、すなわち、個別最適が行われているだけで、全体最適が図られないのではないか、という問題意識である。これらの課題に対する我々の取組みを以下に述べる。

3.1 合流運転行動の理解

合流走行は、限られた時間・空間の中で合流車と本線車が相互に干渉しながら速度調整や車間探索を行うタスクであり、その構造を捉えるには相互作用を含むデータ収集が不可欠である。従来の単独 DS では運転者間の相互作用を再現できないため、我々の研究では図3に示す10台のDSを連携させ、本線上にシナリオ車両と HDV (Human Driven Vehicle) を混在させた交通流を構築し、合流路上に HDV を配置して合流運転を再現する仮想走行環境を整備した。これにより、被験者間の折衝などの相互干渉を直接観察することができる。

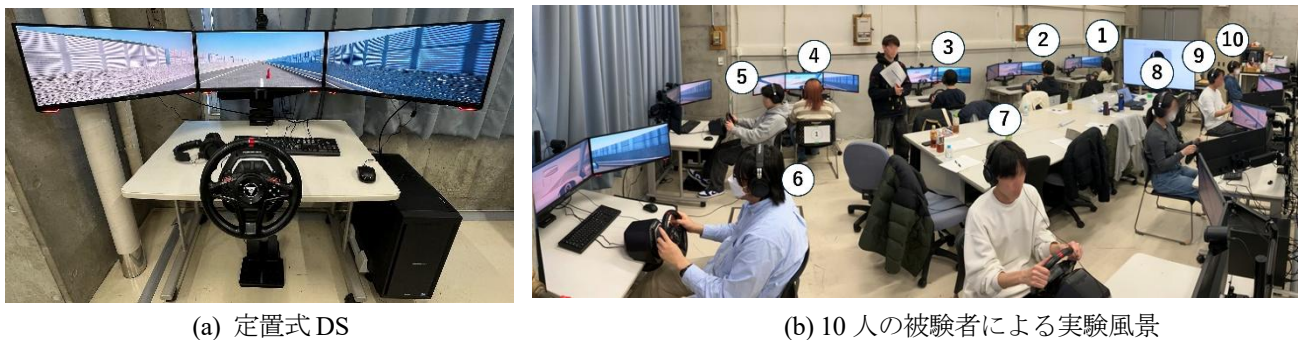


図3. 複数台連携ドライビングシミュレータ

図4に合流実験の車両配置を示す。合流路上に3台のHDV (A・B・C)を配置し、本線第1車線には各7台のシナリオ車両と HDV を混在させた。本線先頭のシナリオ車両には60~120 km/hで定速走行させて合流状況にばらつきを持たせた。また相互干渉を明確に観察するため、第1・第2車線間にパイロンを設置し、本線車の車線変更を禁止した。

被験者には、合流実験であることを説明した上で、譲る・譲らないの判断を含め通常通り運転するよう指示した。3台のHDVが合流した後、合流車には危険感と合流しにくさを7段階SD法で評価させた。さらに、合流車が合流区間へ進入した時点での先行車・後続車(図中D・E)がHDVの場合には、それぞれが感じた危険感を取得した。被験者は21~24歳の男性7名、女性3名であり、実験はマツダ株式会社研究倫理委員会の承認を得て実施した。

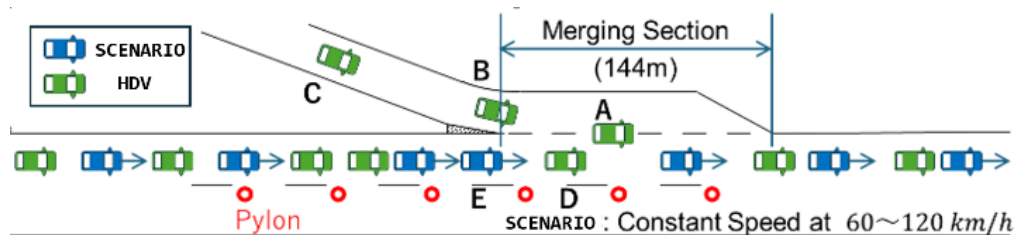


図4. 合流実験における合流路と本線上の車両配置の例

図5に、合流走行時に取得されるデータの例として、時間・距離・速度を統合した3次元プロットを示す。橙色の隔壁は合流区間の開始・終了位置を示し、薄青色および淡紅色の立壁はそれぞれCACC車とHDVの速度分布を表す。本シナリオではHDV7(黄色太線)・HDV3(青緑色太線)・HDV1(濃青色太線)が合流車であり、各車の合流位置と時刻を太線上の●で示す。これにより、合流前後の追い越し挙動や車間距離・速度調整の様子を一望できる。

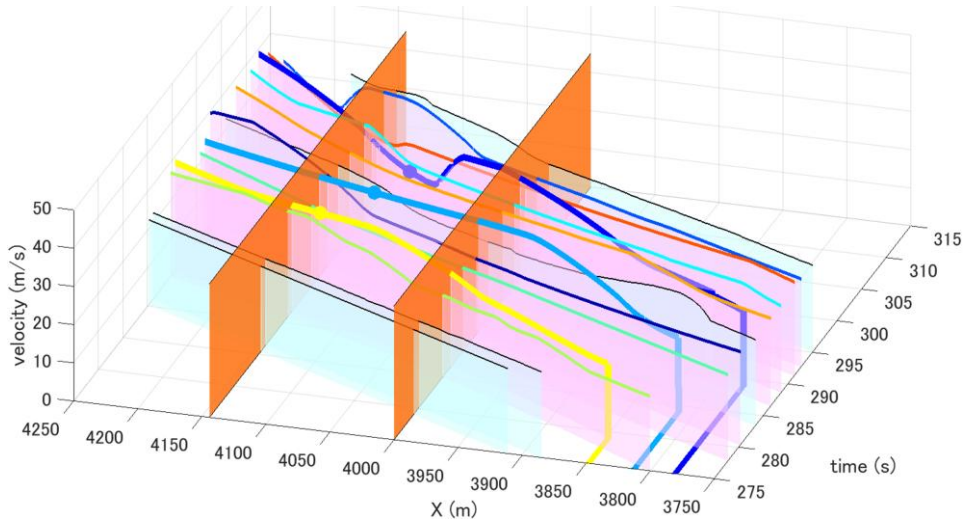


図 5. 合流データの例 (時間・距離・速度の 3D 図)

図 6 は、3 台目の合流車 HDV1 の時系列データであり、(a) HDV1, 先行車 HDV4 および後続車 HDV9 の速度, (b) HDV1 の HDV4・HDV9 との車間距離, ならびに, (c)-(e) HDV4/1/9 の操舵・アクセル・ブレーキ操作量を示す. 黒縦実線は合流区間への進入・離脱時刻, 黒縦破線は合流時刻を表す. これらのデータから, HDV1 が進入直後に先行車へ接近して急減速を行う場面 (図中 A 枠), 合流開始に合わせて先行車が加速して受容行動を示す場面 (同 B 枠), さらに後続車が合流車の低速進入に応じて減速・再加速する場面 (同 C 枠) など, 車両間の相互応答を高時間分解能で把握できる.

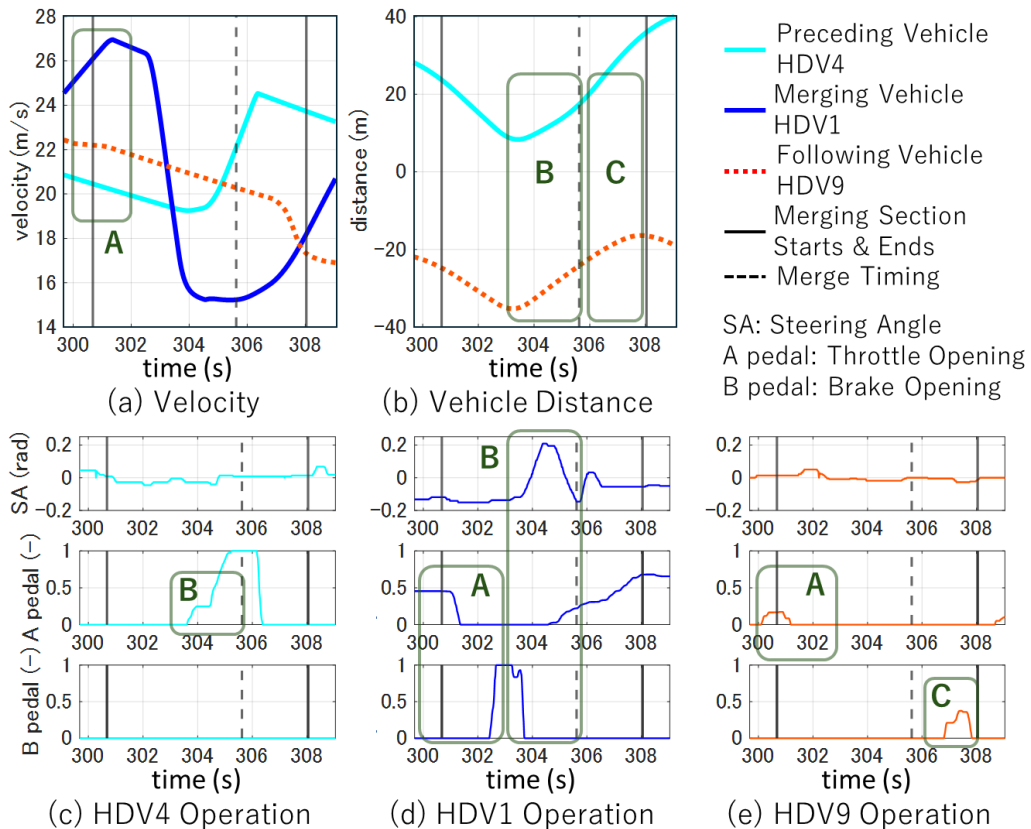


図 6. 合流車両と本線走行車両とのインタラクション

合流走行を 35 回実施し、延べ 105 件の合流データと主観評価を取得した。図 7 に合流車による危険感および合流しにくさの評価分布を示す。危険感 (a) に比べ、合流しにくさ (b) は高評価側に分布が偏っており、危険と感じない状況でも合流しにくさが生起していることが分かる。この差異は、両指標が異なる心理的構成要素に基づく可能性を示している。

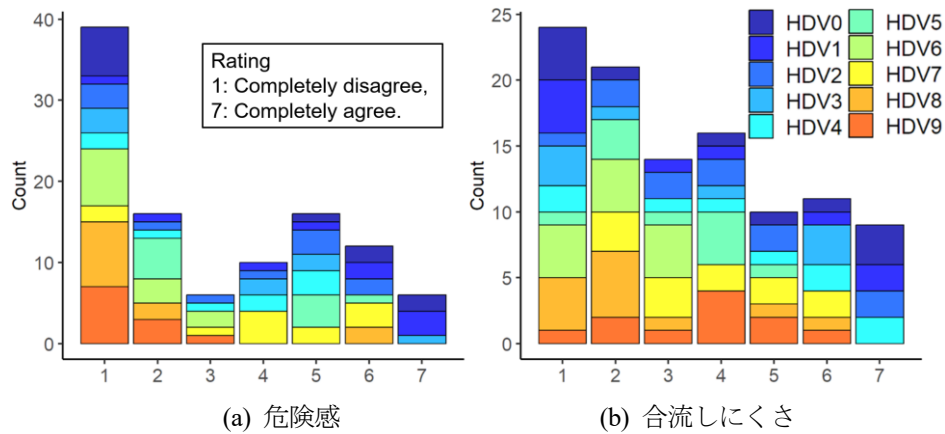


図 7. 合流車両のドライバの主観評価結果

図 8 に、合流しにくさ (A2) を目的変数とした SEM モデルを示す。観測変数は、合流車の合流区間進入時点における先行車との距離 (P_RD), 最近接車との距離および相対速度 (RD, RV), 先行車・後続車間の距離および相対速度 (PF_RD, PF_RV), 最大臨界相対加速度 (LACC: 衝突回避に必要な減速度の最大値), とした。潜在変数 ENV は周辺車両配置の把握能力, CAP は交通環境の動的変化への対処能力として構成し、それぞれ距離関連・相対速度関連の観測変数を配置した。モデル適合度は Scaled $\chi^2(13)=17.5$ ($p=0.18$), CFI=0.96, TLI=0.91, RMSEA=0.07, SRMR=0.06 と、いずれも推奨基準を満たす。

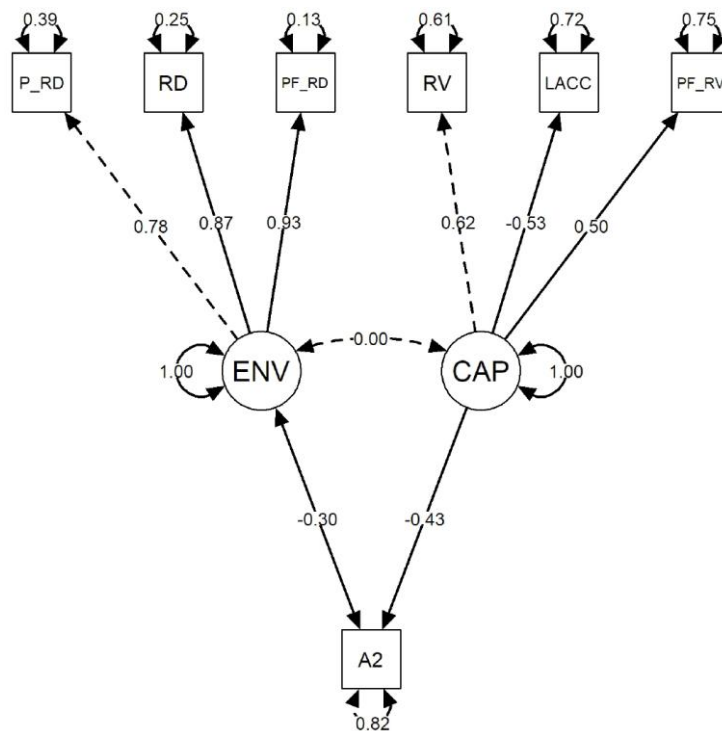


図 8. 構造方程式モデリングによる”合流しにくさ”のパス図

結果として、相対速度に関わる観測変数はCAPを介してA2に有意な回帰的影響を与えた(例:RV→A2=-0.27)。一方、距離に関わる観測変数はENVを介した相関関係に留まり(例:RD↔A2=-0.26)、直接的な影響は確認されなかった。以上より、合流しにくさの主要因は車間距離ではなく周辺車両との相対速度調整にあり、相対速度を抑制する交通流管理が有効な支援方策となることが示唆される。

このように、高速道路合流におけるドライバ支援方策の設計意図の明確化を目的として、運転者の合流時の主観評価をモデル化し、合流しにくさの主要な影響因子が相対速度であることが示された。この知見は、合流支援システムの信頼性向上に向けた基盤的要素となる。本研究成果の価値は、既存のモデルでは再現が困難であった人間同士の「瞬時の判断と譲り合い」といったインタラクションをデータ化・可視化した点にあり、複数台連携DSとNaturalisticな行動モデル構築アプローチの有効性を示すものである。

これらの解析結果は、第2章で提案したEvidence bundleの具体化の一例である。合流しにくさの主要因が車間距離ではなく相対速度にあるという知見は、支援システムの設計意図を裏付けるCredibility(信頼性の共有)の核となる。また、複数台連携DSによって取得された高精度な車両間相互作用データは、その判断根拠の正当性を示すData(文脈の記録)として機能する。さらに、これらの知見をMIC(Model Interface Card)に反映し、「どのような交通状況において運転者がシステムを許容しうるか」という適用限界を明示することは、将来の自動運転支援における人間とシステムの責任分界を明確化するGovernance(対話のルール)の構築に直結する。このように、シミュレーション結果を単なる数値として扱うのではなく、Evidence bundleとして三層構造(Design-Behavior-Physics)に組み込むことで、協調領域における開発の透明性を確保することが可能となる。

3.2 支援方策の協調を図るためのプラットフォームとしてのマルチエージェント交通シミュレーション

高速道路の合流支援というテーマ自体は目新しいものではなく、衝突リスクを物理的に低減する合流順序・位置の最適化や、自動運転機能やCACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)による交通流管理に基づき、運転者へ加減速指示を与えるなど、これまでに様々な支援方策が提案されている。しかし、研究者の発想を試してみた、というレベルに留まっており、実際に研究成果に基づいて高速道路の合流支援が行われているかと言えば、その状況に至っていない。様々な支援方策を組み合わせ(協調させて)、費用対効果を考慮しつつ、現実的な支援策を検討し、その実現に向けて利害関係者間での対話を促進することが必要と考えられ、まさに協調領域の課題である。マルチエージェント交通シミュレーションは、このような対話を促進するプラットフォームであり、翻訳装置となり得る、という我々の主張を裏付けるための研究を現在推進している。具体的には、同じ複数台連携DSを用いて、異なる支援策(車両側で実装されるCACCによる速度制御支援¹⁾と、道路側で実装される視覚誘導型合流支援²⁾の評価を行い、その協調を考えていこう、というものである。以下に、それぞれの支援策とその効果の概要を記す。

CACCによる速度制御支援については、本線を走行する車両に対してCACCによる速度制御を行うもので、シミュレーションによる検討が行われた。その結果、合流よりも手前の定点位置にて、CACC車両に対して速度抑制指示を出す方針が決定された。このような検討も、Evidence bundleとして可視化することになる。本支援方策では、CACC車両の混合率が本線走行車両の平均車速を支配することは容易に想像することができる。そこで、複数台連携DSを用いて、CACC車両の混合率による本線走行車両の平均車速を把握する実験を行っている。図9にその結果を示す。ドライバの運転行動はバラつきが大きく、これを考慮した評価・検討(Evidence bundleにおけるData)が必須である。

視覚誘導型合流支援(Visual Guidance System: VGS)は、高速道路のサグ部などで渋滞緩和を目的に設置されている速度回復誘導灯技術に着想を得たもので、ドライバは、流れるカーペットエリアに沿って速度を調整するだけで、複雑な状況判断を行わずに安全かつ円滑な合流を行うことが可能となる。図10に運転席からのVGSの視認状況を示す。複数台連携DSによるVGSの評価試験を行い、取得したデータをBayesian Network分析したところ、以下の図11に示す有向非巡回グラフ(Directed Acyclic Graph: DAG)が得られた(紙面の都合上、VGSにより支援ありの条件

の結果のみ示す)。「合流のしやすさ(Merging Ease)」という主観評価項目に着目した場合、支援なしの条件では、先行車両との相対速度に強く影響を受けていた。このことは、前節に述べた分析結果と整合している。一方、支援ありの条件では、本線後続車両との車間距離(Following Vehicle Distance)のみに影響を受けており、合流しにくさの主要な影響因子である相対速度が排除されたことが明らかとなった。VGSにより先行車両とのインタラクションによる認知的負担(判断要因の多さ)が軽減されたことが確認されている。

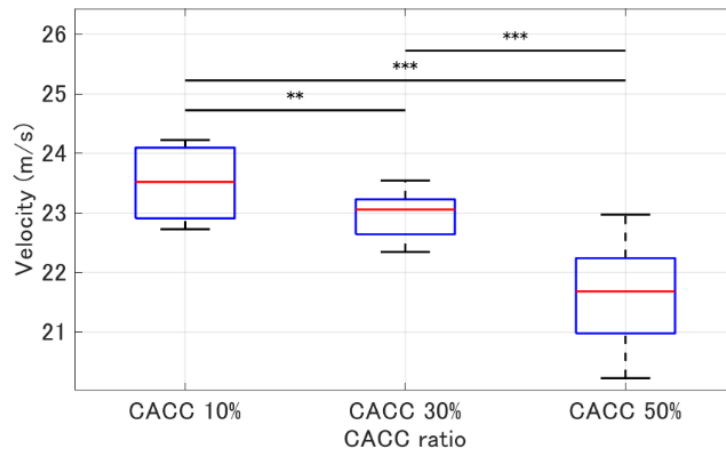


図9. CACC 普及率による平均走行速度



(a) Front view from the mainline vehicle.



(b) Front view from the merging vehicle.

図10. 運転席からの速度誘導LEDユニットの見え方

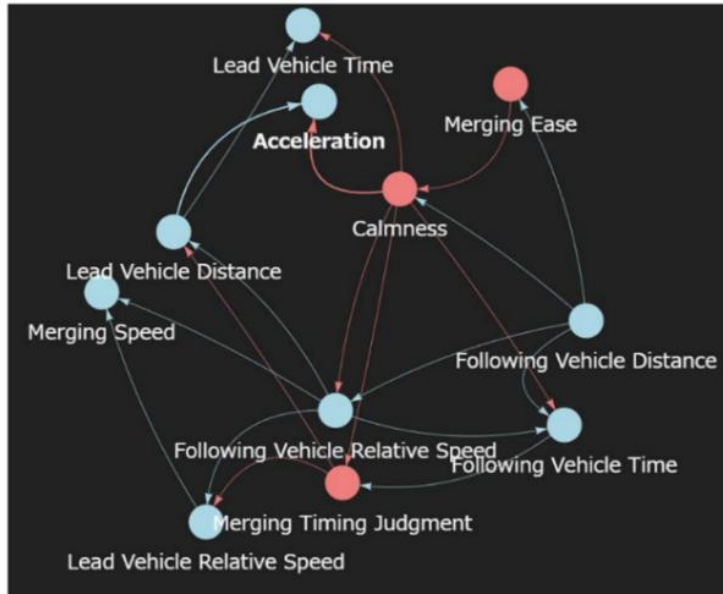


図 11. VGS ありの場合の有向非巡回グラフ

現状では、同じ評価環境（複数台連携 DS で同じ走行シーン）を用いて、異なる支援策の評価を行い、それぞれの有効性を把握するところまでに留まっているが、今後、複数支援策の「協調」により、実現性が高く、効果の高い支援を提案したいと考えている。共通の評価環境(対話のプラットフォーム)があるからこそ、異なる技術間の Evidence bundle を突き合わせた対話 (=全体最適) が可能になる。これを図示したものが図 12 である。「対話」とは、トップレベルのシステムとサブシステム間の Evidence bundle 間の改善サイクルを回すことと言い換えることができる。

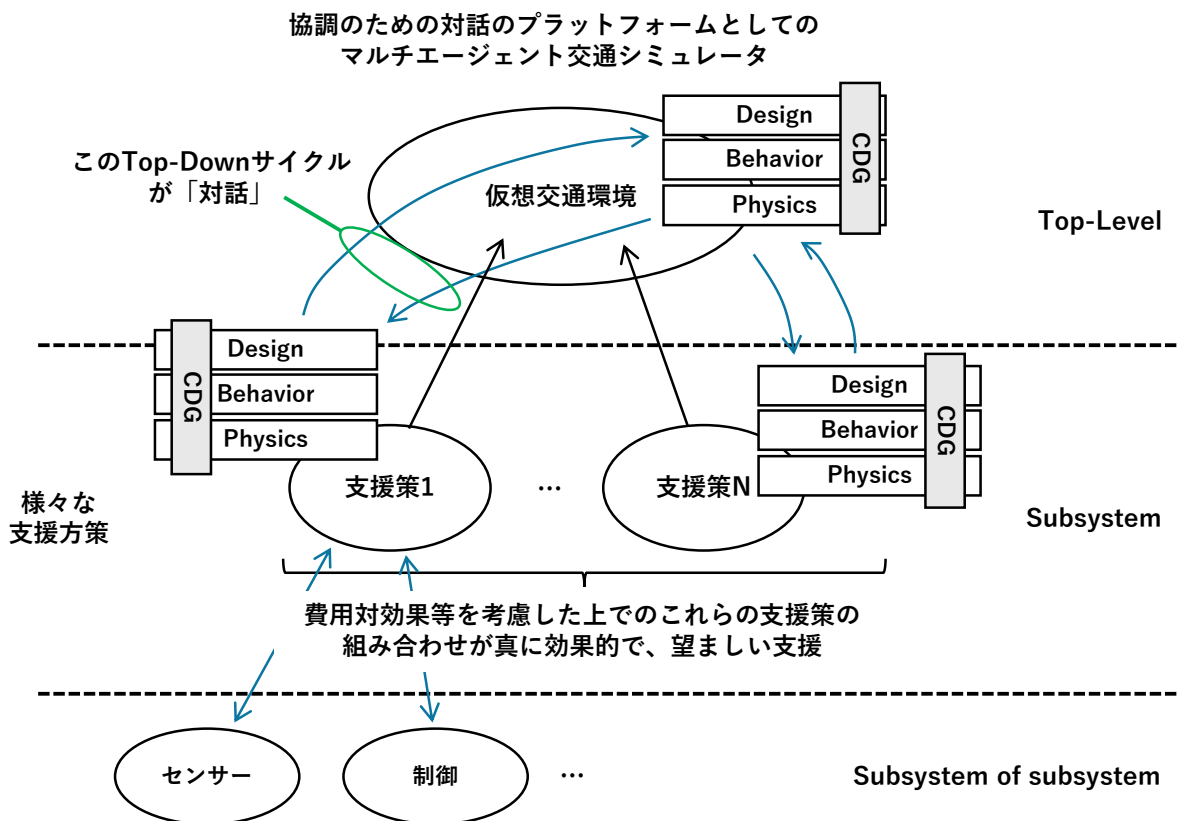


図 12. 複数の支援策の協調のための対話プラットフォーム

4. おわりに

従来の組織内開発とは異なり、現代の複雑なシステム開発では部門間の前提条件の不一致による機能不全のリスクが高まっている。この課題に対し、設計意図 (Design) , システム挙動 (Behavior) , 物理根拠 (Physics) の三層を、信頼性・来歴・ガバナンスから成る「Evidence bundle (合意形成の証拠体系)」で貫く新しいCAEフレームワークを提案した。本フレームワークは、数値精度以上にモデルの適用限界 (MIC) や判断の根拠を可視化し、主体間の透明性の高い対話を実現することを目的とする。また、この枠組みを高速道路合流に対する支援方策の検討への適用を試みる取組みについて紹介した。

CAE を単なる検証ツールから、社会受容性の高い次世代交通環境を設計するための協調領域における「対話のプラットフォーム」へと展開させるための取組みは、まだ緒に就いたばかりであり、首尾一貫性や整合性に欠ける点はあるかも知れない。「ヒト・モビリティ・ソサエティに関わるシミュレーション技術の高度化コンソーシアム」では、エンジニアリングは机上の空論ではなく、新しい価値創造に向けた実践的な取組みであることを忘れず、活発な議論を交わし、自動車交通システム開発のための新たな、そして有用な方法論を開発していきたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 吉岡 透ほか：マルチエージェント交通シミュレーションと複数台 DS 連携による高速道路合流に対する支援方策の有効性検証, 自動車技術会学術講演会予稿集(春), 文献番号 20255390, p. 1-6 (2025)
- (2) 清水 颯汰ほか：視覚誘導型合流支援システムに対するドライバーの受容性の評価と検証, 第 34 回 交通・物流部門大会(TRANSLOG2025), No. 25-5(2025)