

自動車のCASE戦略を評価する ライフサイクルシミュレーション技術*

Lifecycle Simulation Technology for Evaluating CASE Strategies of Automobile

小林 英樹¹⁾
Hideki Kobayashi

村田 秀則²⁾
Hidenori Murata

Automobile industry is in transition to the future, and its driving forces are what we call CASE (Connected, Autonomous, Shared & Service, Electric) strategies. On the other hand, for achieving environmental absolute sustainability, the carbon-dioxide emission through the whole automobile lifecycle must be reduced extremely. Thus, environmental evaluation of automobile lifecycle is important to develop clean technologies and business eco-systems. In this paper, lifecycle thinking in the evaluation is emphasized, and lifecycle simulation (LCS) technology based on discrete event modeling are introduced. Simulation examples evaluating diffusion of electric vehicle, ride-sharing service and battery reuse business are introduced.

KEY WORDS

Environment・Energy・Resources, Life Cycle Assessment, Greenhouse Gas, Reuse, Climate Change, Design/Production, Life Cycle Management / Life Cycle Simulation, System of Systems, Circular Economy [D2]

1 はじめに

国連の持続可能な開発目標 (SDGs : Sustainable Development Goals) が示しているように、持続可能性の実現は人類の最重要課題である。環境的な持続可能性を考えるうえで、その影響範囲の大きさと想定被害の深刻さから鑑みて、気候変動問題は世界の全地域で総力を挙げて取り組むべき課題である。具体的な対策は気候変動の緩和と適応に大別されるが、適応策で対処すべき問題の困難さを軽減するために、二酸化炭素 (CO₂) を主とする温室効果ガス排出量を究極まで抑制した脱炭素社会システムに移行する必要がある。気候変動に関する国際的な枠組 (パリ協定) が 2015 年に採択された後、こうした議論は加速しているが、これは近年世界各地で起きている熱波や大型台風などと無関係ではないだろう。

自動車交通に起因する CO₂ 排出量は世界全体の約 18% を占めており⁽¹⁾、脱炭素化は自動車産業にとって避けられない必須要求となっている。一方、現在進行している道路交通革命の戦略が CASE (Connected, Autonomous, Shared & Service, Electric) である。なかでも電動化とシェアリングサービスは CO₂ 排出削減の鍵であり、

その定量効果について研究がなされている。また、特定の自動運転レベルに関する自動運転車の CO₂ 排出量についても研究報告が開始された。

一方、地球環境負荷は脱炭素化の観点だけで評価できるものではない。欧州のサーキュラーエコノミーにみられるように、資源循環を経済システムに組み込む動きが本格化している⁽²⁾。蓄電池式電気自動車 (以下、電気自動車) について言及するならば、その普及に伴う金属資源消費の増大が指摘されている⁽³⁾。一般的に、自動車の CASE 戦略に伴い車載用電子機器は増加するため、金属資源問題や廃棄物問題を考慮する必要がある⁽⁴⁾。

これまでも自動車の環境負荷評価について多くの研究が発表されているが、それらの評価条件は必ずしも同一ではないため、結果の解釈において誤解を招いている場合が少なくない。そこで本稿では、自動車の環境負荷評価に関する基本的な考え方を整理した後、ライフサイクル評価の必要性を述べる。そして、著者らの研究を中心に自動車のライフサイクルシミュレーション事例について紹介し、今後の課題と展望を示す。

2 自動車の環境負荷評価

図 1 に自動車の環境負荷評価の範囲を示す。Well-to-Tank (WTT) の評価範囲はエネルギー資源の採掘からエネルギーキャリアの流通 (供給) までである。例えば、ガソリンエンジン自動車 (以下、ガソリン車) であれば原油採掘、ガソリン精製、

* 2020 年 12 月 23 日受付

1)・2) 大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻
(565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: kobayashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

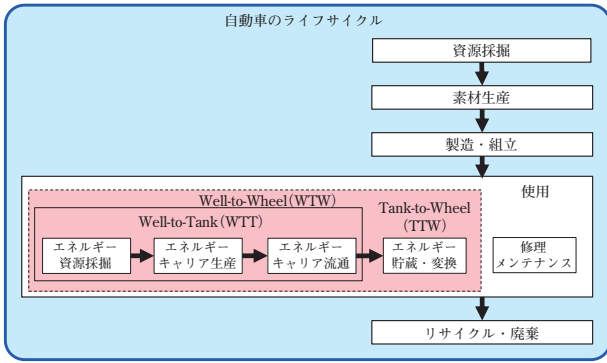


図1 自動車の環境負荷評価の範囲

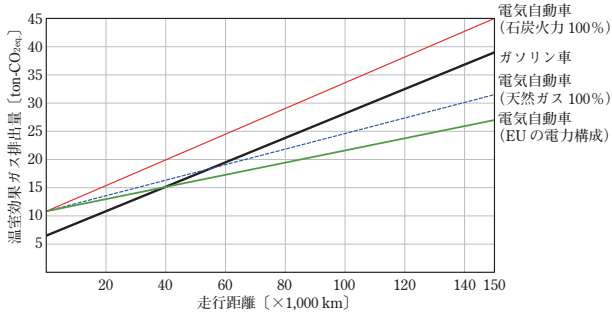


図2 走行距離に応じた温室効果ガス排出量(文献(5)から抜粋して著者作成)

ガソリンスタンドまでのサプライチェーンが含まれる。電気自動車であれば、発電種別に応じたエネルギー資源(天然ガスや石炭)の採掘から発電、送電、配電が含まれる。Tank-to-Wheel (TTW) の評価範囲は、供給された燃料あるいは電力を貯蔵したりそれを運動エネルギーに変換したりするプロセスを対象とする。ガソリン車であればエンジンの効率だけでなく、車両効率、すなわち駆動系の動力伝達までが評価範囲に含まれる。同じく電気自動車であれば、モータ効率と駆動系の動力伝達が含まれる。WTTとTTWの評価を合わせてWell-to-Wheel (WTW) の評価と呼ぶ(図1の横の流れ)。図1からわかるように、WTWの評価は車両に関する資源採掘、素材生産、製造・組立、修理・メンテナンス、リサイクル・廃棄に関わる環境負荷を無視していることに注意を要する。

これに対して、製品のフルライフサイクルを通じた天然資源投入、環境汚染物質排出とそれらに伴う環境影響を評価する方法論がライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)⁽⁵⁾である。LCAは製品使用だけでなく、資源採掘から廃棄処理に沿った影響まで考える、いわゆる

ライフサイクル思考に基づく方法論であり、図1の全範囲を評価範囲とする。LCAの手順はISO 14040, ISO 14044として国際標準規格化されている。自動車のLCA研究は数多く報告されており、近年はCASE戦略に関連した評価事例が増えている。

例として、電気自動車を評価する際は、どのような電源構成を想定するかということが重要である。石炭火力の発電量割合が高い系統電力と、水力や風力など再生可能エネルギーのそれが高い電力とでは評価結果に大きな違いが生じる。図2は電源構成の違いを考慮したLCA評価結果である⁽⁵⁾。電気自動車に搭載するリチウムイオン電池の正極材として三元系(NCM)を想定した結果を抜粋した。石炭火力発電のみで構成された電力を使用した場合は、ガソリン車のほうが温室効果ガスの生涯排出量は小さい。一方、それ以外の電力構成の場合は、適当な走行距離を経過後に電気自動車の排出量のほうが小さくなる。例えば、EU平均の電力構成を想定した場合、走行40,000 km以降では電気自動車のほうがガソリン車より温室効果ガス排出が少ない。

全世界56地域の電源構成と移動需要を反映したLCA評価では、現時点でも53地域で電気自動車のほうが走行距離あたりの温室効果ガス排出量は少ない⁽⁶⁾。今後、世界中で電源構成の脱炭素化が進展していくことを想像するならば、自動車の電動化が正当な脱炭素ソリューションであることは明らかである。

LCAでは各プロセスの代表値を用いて製品ライフサイクルを静的に評価する。これに対して、ライフサイクルプロセス間の依存関係を考慮して物質、エネルギー、さらに金銭フローの動的過程をモデル化して評価する方法論がライフサイクルシミュレーション(LCS: Life Cycle Simulation)である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。一製品のライフサイクルよりも十分に長い評価期間を設定することで、リユースやリサイクルのような資源循環の効果を精密に定量化することができる。実世界では、製品使用中に製品や構成部品の状態が個別に変化し、状態に応じて次の処理内容を判断する。例えば、機械部品が摩耗した際、修理するか新品と交換するかの判断がこれに相当する。LCSでは製品や部品の個体の状態変化を確率モデル等で表したうえ

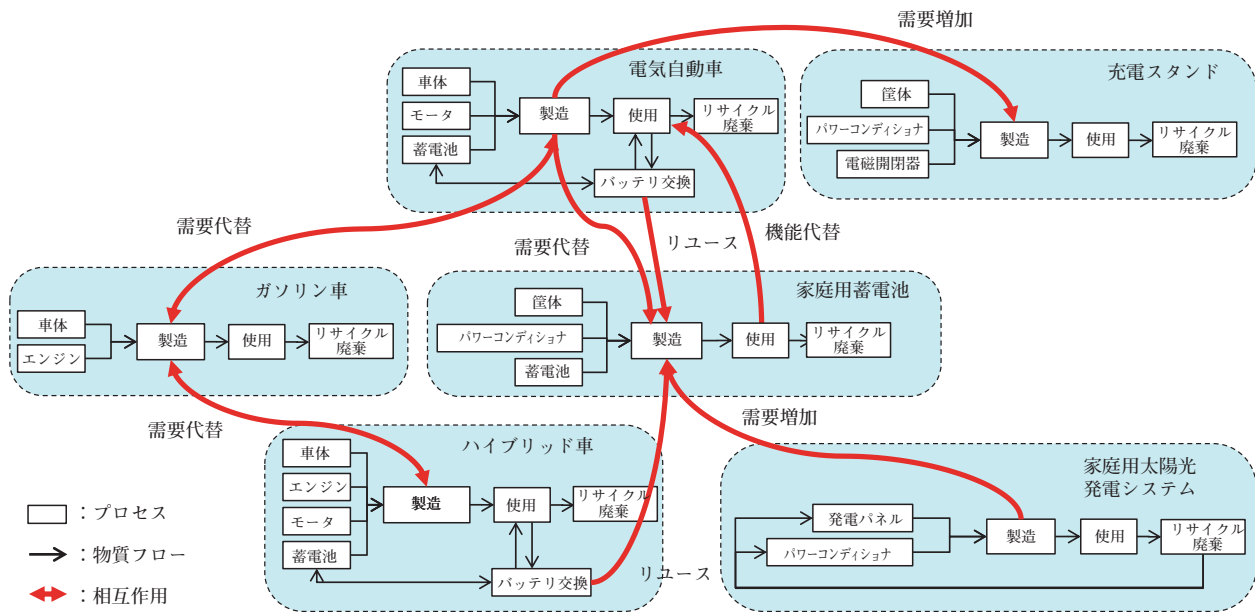


図3 超システムのライフサイクルプロセスモデル例⁽¹⁰⁾

で、プロセス内で個体の状態あるいは状態変化に応じた処理を施し、次のプロセスに個体を移動させる。以上の動きを離散事象としてモデル化しシミュレーションを実行する。製品や部品の移動を物質フローとみなして各プロセスに投入される天然資源（化石燃料、鉱物資源）、排出された環境汚染物質（CO₂、NO_xなど）を積算する。

自動車に適用されるCASE関連の技術は多様化、複雑化している。開発当初は考えていなかった異分野の工業製品と自動車それぞれのライフサイクルプロセス間に物質または情報を介した相互作用が生じて、いわゆる超システム（SoS：System of Systems）⁽⁹⁾が形成されることがある。例えば、車載用蓄電池の技術革新によって、交通システムのみならずエネルギーシステム、通信システムも巻き込んだビジネスのエコシステムが形成されつつある。こうした複雑システムは固定化されず、部分は流動的に変化しており、あるとき超システム全体の様相が大きく変わる、すなわち創発的な挙動を生み出すことがある。環境側面からは化石燃料や金属資源の消費が気付きであるが、それはライフサイクル思考に基づいて評価されなければならない。そこで著者らは製品ライフサイクルシステムが結合した超システムを結合型ライフサイクルシステムズ（Connected Lifecycle Systems）と名づけ、この超システムに付随する物質フローを動的に評価するLCS方

法論（LCS4SoS）を提案した⁽¹⁰⁾。図3は自動車を中心とした超システムのライフサイクルプロセスモデル例である。

3 ライフサイクルシミュレーションの例

3.1 自動運転車

自動運転車の国内市場を想定して2035年までのLCSを実施した⁽¹¹⁾。まず、SAEが定義した自動運転レベルに応じて追加装備される電子機器と材料構成を推定した後、自動運転車のライフサイクルモデルを開発した。その際、自動運転によるエコドライブ効果と事故率の減少も考慮している。自動運転レベルごとの車両普及シナリオとして、国内見通しに基づく成り行き（BAU：Business as Usual）シナリオ、何らかの理由で自動運転車の普及が行き詰まる停滞シナリオ、2030年に政策介入によりレベル5の自動運転車への買換えまたはアップグレードを義務づける強制シナリオ、を設定した。評価の結果、停滞シナリオでは2030年以降BAU比で自動車起因CO₂排出量は約10%減少することがわかった。一方、強制シナリオではBAU比で約20%増加する。この主要因の一つはレベル5における三次元高精度地図データ送受信による通信量増大である。なお、本評価はあくまでガソリン車の自動運転化を対象としており、電気自動車やシェアリングサービスの普及は考慮していない。

3.2 電気自動車とシェアリングサービス

自動車シェアリングサービスはカーシェアリングサービスとライドシェアリングサービスの2種類に大別される。前者では複数の運転者が車両を共有し、後者では複数の利用者が移動を共有する。特にUberのような相乗りシステムはライドヘイリングと呼ばれ、その環境負荷削減効果が注目されている。

著者らは電気自動車とシェアリングサービスの双方が普及する過程を扱うライフサイクルモデルを開発し、LCSで評価した⁽¹²⁾。人口40万人の国内市街地を想定し、初期値として個人所有のガソリン車20万台を設定した。「個人所有シナリオ」は、ガソリン車の寿命時に再び同種の自動車に買い替える基準シナリオである。これに対して、個人所有からシェアリングサービスに徐々に移行して、2035年に完全に置き換わる「ライドシェアシナリオ」を設定した。移行の際に、個人所有車とライドシェア車の平均乗車人数の差に応じて新車生産台数を減らす処理を行った。また、2035年時点で走行車両台数の25%が電気自動車であるように普及率を定め、電気自動車のすべてはライドシェアリングサービスで使用されると仮定した。実際には、一定規模の個人所有車が残り想像されるが、本シナリオではこうした最終形は考慮していない。

図4にCO₂排出量の時間推移を示す。基準シナリオにおける排出量は一定水準で推移するが、ライドシェアシナリオの排出量は2035年時点で基準シナリオと比べて約34%削減されている。これは、ライドシェアにおいて発生する迂回路(例えば顧客を目的地に運ばない迎車)からのCO₂排出量増大と、新規車両生産台数および市中走行台数の減少によるCO₂排出量削減を総合した結果である。

図5に銅資源の使用量推移を示す。シェアリングサービス普及に伴う新規生産台数減少により銅使用量は減少していくが、ある時点から電気自動車普及の影響が大きくなり、銅使用量は増加傾向に転じている。これには電気自動車の車両あたりの銅使用量がガソリン車のそれと比べて約6倍であることが関係している。

3.3 電気自動車の蓄電池リユース

電気自動車の普及に伴い、車載用蓄電池の廃棄

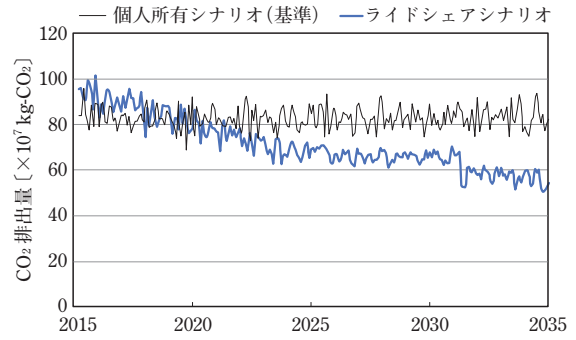


図4 CO₂排出量の時間推移⁽¹²⁾

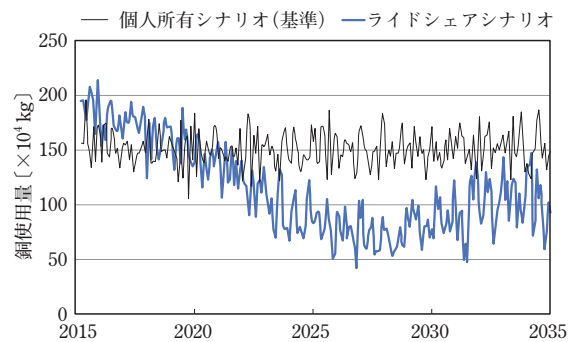


図5 銅資源の使用量推移⁽¹²⁾

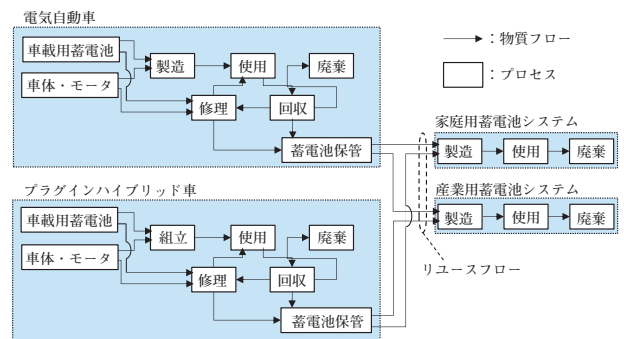


図6 ライフサイクルプロセスモデル⁽¹³⁾

処理が問題になりつつある。一方で、車載用蓄電池の製造時環境負荷は電気自動車全体の約40%を占めている⁽⁶⁾。以上から、廃車後の蓄電池リユースが期待されている。著者らは車載用蓄電池パックのリユースに注目し、電気自動車とプラグインハイブリッド車、家庭用蓄電池、産業用蓄電池からなるLCSモデルを開発した⁽¹³⁾。

図6は実装したライフサイクルプロセスモデルの概略を示している。電気自動車とプラグインハイブリッド車から家庭用蓄電池システム、産業用蓄電池システムへの不確実なりユースフローを定義している。本モデルは図3で示した超システムの一部をより詳細にモデル化したものである。

各リユースフローにおいて回収蓄電池の残存寿命、性能、価格、取引間隔の値を都度参照し、あらかじめ定めたルールに従ってリユース可否を自動判定する。本評価では、残存寿命としてサイクル寿命、性能として満充電容量の値を用いた。また、回収した蓄電池パックの分解利用は不可とした。

以下では、技術ロードマップに従った車載用蓄電池の性能向上トレンドを反映し、かつリユース蓄電池価格を新品の3分の1と設定したリユースシナリオの評価結果を紹介する。リユースシナリオにおいては、リユース受入側（産業用蓄電池、家庭用蓄電池）の要求性能は変わらないと仮定した。図7に2015～2045年の期間中の関与物質総量（TMR：Total Material Requirement）⁽¹⁴⁾を示す。TMRとは、ある直接的に必要な物質を得るために必要な直接投入物質、間接投入物質、および隠れた物質フローの総和を意味する指標である。貴金属、レアメタルなど鉱石品位の低い金属を含む製品に対してはTMRによる資源評価が有用である。図7は、産業用蓄電池システムに投入されるTMRがリユースによって大きく削減されることを示している。

産業用蓄電池システムへのリユース量推移を図8に示す。プラグインハイブリッド車に搭載する蓄電池性能は電気自動車のそれよりも低いことから、当初十数年は性能不足のためにリユースされず、電気自動車からのリユースのみ実施される。後半になると電気自動車からの回収蓄電池の性能が高くなりすぎてリユース困難となり、逆にプラグインハイブリッド車からの回収蓄電池の性能が受入要求に適合してそのリユース量が急激に増えている。回収蓄電池の性能が変化したとしてもリユースを全体として促進するには、例えば、蓄電池パックにリユース性設計を施した後に蓄電池パックを分解するプロセスを追加する、あるいは回収した高性能蓄電池パックの新たな用途を開発する、等が考えられる。

4 課題と展望

これまで紹介したように、LCSはCASE戦略に関連する将来シナリオの評価に有用である。一方、残された課題としては以下がある。

第一に、超システムの特徴をうまく反映するライフサイクルモデリング手法の確立が求められる。

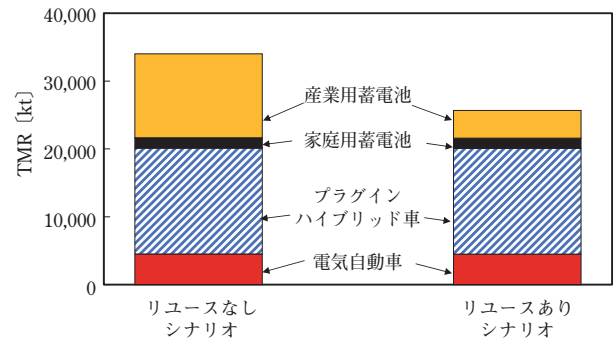


図7 TMRの比較⁽¹³⁾

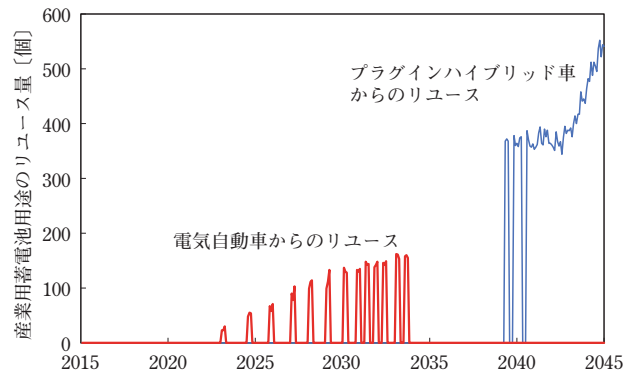


図8 産業用蓄電池システムへのリユース量推移⁽¹³⁾

異種製品ライフサイクルシステムから構成される超システムのシミュレーション方法論⁽¹⁰⁾は提案されているが、実装レベルでは創発性など一部の特徴のモデル化が十分に検証されていない。

第二は、モデル化の対象範囲やシナリオ設定に関する課題である。電気自動車など脱炭素オプションの普及ペースは世界的に加速する方向にあるが、この背景にはエネルギーインフラの脱炭素化、強い政治介入、市民全体の意識醸成（世の中の空気）などが絡んでいる。ライドヘイリングについても世界各地で利用者が大幅に伸びつつあったが、COVID-19流行後はその需要増加に陰りが出ている。また、本来ライドシェアリングの影響は、公共交通機関や自動二輪車、自転車なども組み合わせられたマルチモーダル系、あるいは、その使い勝手まで考慮した交通MaaS (Mobility as a Service) の中で考える必要がある。

著者らは、こうした問題を解く鍵は社会技術システムや任意のライフサイクルプロセスに特有の非線形現象にあると考え、これらの非線形現象の挙動をLCSに反映するハイブリッドシミュレーションアーキテクチャを提案している⁽¹⁵⁾（図9）。物質フローや環境負荷を正確に見積もるために、

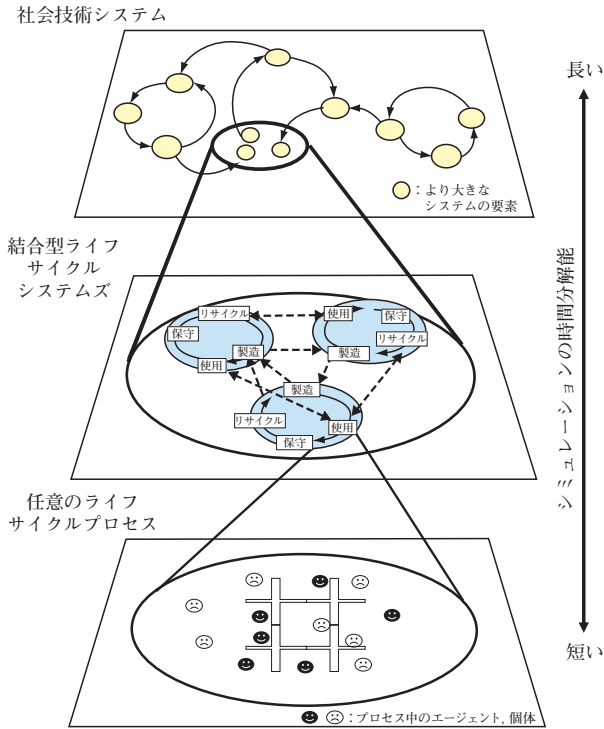


図9 ハイブリッドシミュレーションアーキテクチャの例⁽¹⁵⁾

あくまでライフサイクルモデルを中核に位置づける点が重要である。現在、本アーキテクチャに基づいて、エージェントベーストシミュレーションで計算したライドシェア車の挙動をLCSに反映する研究等を展開している⁽¹⁶⁾。

5 おわりに

LCSの背景および基本的な考え方と、CASE戦略に関連するLCS適用例を紹介した。また、今後の展望として、時間発展していく交通システムを評価するためのシミュレーションアーキテクチャを示した。LCS技術が持続可能な交通システムの実現の一助になるならば幸いである。

謝辞

本研究の一部は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S-16)により実施された。

参考文献

- (1) International Energy Agency, CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2018 Highlights (2018)
- (2) Ellen MacArthur Foundation, Towards the Circular Economy (2012), www.ellenmacarthurfoundation.org/business/reports/ce2012 (Accessed December 2020)
- (3) T. Watari, et al.: Total Material Requirement for the Global Energy Transition to 2050: A Focus on Transport and Electricity, Resources, Conservation & Recycling, Vol. 148, p. 91-103 (2019)
- (4) 岡部徹: 自動車に不可欠なレアアース資源の現状と課題, 自動車技術, Vol. 74, No. 9, p. 82-88 (2020)
- (5) M. Hauschild, et al. (eds.): Life Cycle Assessment, Springer (2018)
- (6) F. Knobloch, et al.: Net Emission Reductions from Electric cars and heat pumps in 59 World Regions Over Time, Nature Sustainability, Vol. 3, June, p. 437-447 (2020)
- (7) Y. Umeda, et al.: Study on Life-cycle Design for the Post Mass Production Paradigm, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol. 14, p. 149-161 (2000)
- (8) T. Kumazawa, H. Kobayashi: A Simulation System to Support the Establishment of Circulated Business, Advanced Engineering Informatics, Vol. 20, p. 127-136 (2006)
- (9) INCOSE, Systems Engineering Handbook, Wiley (2015)
- (10) H. Kobayashi, et al.: A Simulation Methodology for a System of Product Life Cycle Systems, Advanced Engineering Informatics, Vol. 36, p. 101-111 (2018)
- (11) 井川雅貴ほか: 自動運転普及シナリオのライフサイクルシミュレーション, 2019年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 119
- (12) T. Kawaguchi, et al.: Scenario Analysis of Car- and Ride-Sharing Services Based on Life Cycle Simulation, Procedia CIRP, Vol. 80, p. 328-333 (2019)
- (13) H. Murata, et al.: A Life Cycle Simulation Method for Global Reuse, IJAT, Vol. 12, No. 6, p. 814-821 (2018)
- (14) 原田幸明ほか: 金属の関与物質総量の概算, 日本金属学会誌, Vol. 65, No. 7, p. 564-570 (2007)
- (15) H. Kobayashi, et al.: Connected Lifecycle Systems: A New Perspective on Industrial Symbiosis, Procedia CIRP, Vol. 90, p. 388-392 (2020)
- (16) 白樫良尚ほか: エージェントベースドモデルとライフサイクルモデルのハイブリッド化によるライドシェアリングの環境負荷評価, 2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p. 331-332 (2020)

フェイス



小林英樹



村田秀則