The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 自動車の方式転換と共有化に向けた戦略的マネジメントのためのライフサイクルシミュレーションの研究 |
| Author(s) | 川口, 太郎 |
| Citation | 大阪大学, 2023, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/91926 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

# 自動車の方式転換と共有化に向けた
# 戦略的マネジメントのための
# ライフサイクルシミュレーションの研究

川口　太郎

2022 年 12 月

大阪大学大学院工学研究科

# 概要

現在，自動車産業に携わる企業は自動車ライフサイクルに起因する二酸化炭素排出量および資源消費量を削減させるマネジメントが求められている．これまで，企業は自社の競争優位性獲得による企業利益増加を目指して，周囲の複数のプレイヤーの状況を鑑みながら自社の戦略を決定する戦略的マネジメントが実施されてきた．しかし，パリ協定を始めとした脱炭素目標が設定され，企業は脱炭素目標という社会目標を考慮した戦略的マネジメントの実施が求められており，自動車企業も例外ではない．また，自動車産業では現在，CASE と呼ばれる 100 年に一度の技術変革を迎えている．CASE はコネクテッド化（C），自動運転化（A），シェアリング（S），電動化（E）の四つの大きな技術変革を指し，特に電動化，つまりはガソリン自動車から電気自動車への方式転換は脱炭素化に向けた重要な要素である．またシェアリングは電動化を促進する方策だとされているため，それら二つを同時に考慮することが重要とされている．このように自動車企業の戦略的マネジメントでは社会動向と自動車産業特有の技術動向を考慮することが求められている．従来，企業は不確実な未来に対して，複数のシナリオを用意し，その分析結果を戦略的マネジメントに活かしてきた．しかし，自動車産業に携わる企業の戦略的マネジメントでは技術動向および社会動向を考慮する必要があることからシナリオが複雑化および大規模化し，シナリオ分析が困難化するといえる．この課題に対して，技術動向および社会動向を考慮した自動車企業の戦略的マネジメントを，計算機を用いて支援する必要があると考えられる．

そこで本研究では，自動車の方式転換と共有化に向けた戦略的マネジメントのライフサイクルシミュレーション（LCS: Life cycle simulation）による企業意思決定者のシナリオ分析支援を目指す．LCS は単一製品ファミリを対象として製品および部品の状態変化をモデル化し，そのマテリアルフローを離散事象シミュレーション技術で動的にシミュレーションすることで，ライフサイクルプロセスごとに環境負荷とコストを算出するライフサイクル評価方法論であり，製品の生産計画や回収計画，ビジネスモデルなどのシナリオ分析に有効である．また戦略的マネジメントをモデル化するには複数のプレイヤーが存在する超システム環境をモデル化する必要があるが，超システムを対象とした LCS 方法論として LCS4SoS が提案されている．ここで，本研究で対象とする自動車の方式転換と共有化に向けた戦略的マネジメントをシミュレーションで支援するには，先行研究にて示されてきた LCS モデルおよび超システムのモデルを深化させる必要がある．具体的には，先行研究では自動車を対象とした LCS モデルとして電動化は考慮されているが，自動車シェアリングはモデル化されていない．また，超システムには要素システムの管理独立性，要素システムの運用独立性，要素システムの地理的分散性，進化的挙動，創発的挙動の五つの特徴があるが，先行研究では要素システムの独立性は陽にモデル化されていないため，周囲の状況を鑑み

ながら自社の意思決定をする戦略的マネジメントのモデル化は十分ではない．以上の課題に対して本研究では，先行研究にて提案されている LCS モデルの自動車シェアリングおよび社会目標を考慮した戦略的マネジメントの二方面への拡張を行うことを研究目的とし，アプローチとして自動車シェアリングおよび社会目標を考慮した戦略的マネジメントが製品生産量に与える影響に着目してそれぞれモデル化を行った．

(1) 自動車の電動化と製品共有を考慮したモデル化

自動車の電動化が考慮できる既存の LCS モデルをその使用形態間の需要代替，つまりは個人所有からシェアリングへの移行が考慮できるように拡張した．具体的には，使用形態間では製品の代替ではなく人々の移動需要の代替が行われていることに着目し，移動需要を起点として自動車の使用台数や生産量が計算される LCS モデルを構築した．また，電動化と自動車シェアリング普及の自動車生産量への影響を統合するための二段階分配メカニズムを LCS モデルに実装した．

(2) 社会目標を考慮した戦略的マネジメントのためのモデル化

超システムの特徴である要素システムの管理および運用の独立性を陽にモデル化することで社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化を図った．具体的には，企業の戦略的マネジメントにおける戦略評価のプロセスに着目した意思決定モデルを LCS4SoS に実装した．意思決定モデルでは社会目標への達成状況を評価し，その評価結果に基づいて社会目標と企業の個別目標で構成される意思決定ルールに沿った相互作用に関連するパラメータ値の修正が行われる．

以上二つのモデル化を適用することで，自動車の電動化と製品共有に向けた戦略的マネジメントのモデル化を行った．電気自動車を中心とした超システムを対象としたケーススタディを実施し，(1) によって電気自動車と自動車シェアリングの同時普及に伴う製品生産量変化がシミュレーションされ，また (2) によって社会目標を考慮した戦略的マネジメントによる製品生産量変化が意思決定ルールに沿ってシミュレーションされたことを示した．また，ケーススタディを通して様々な意思決定ルールを持つプレイヤーで構成される超システムをモデル化したことを示し，提案モデルを用いることで超システムにおける多様なシナリオを評価できることを示した．以上より，提案したモデルが自動車企業意思決定者にとって，自動車の方式転換と共有化に向けた戦略的マネジメントにおけるシナリオ分析を支援することに対して有効であることを示した．

# 目次

第 1 章 序論 ..... 1
1.1. 研究背景 ..... 2
1.2. 研究目的とアプローチ ..... 4
1.3. 本論文の構成 ..... 5
第 2 章 関連研究と本研究の着眼点 ..... 9
2.1. ライフサイクルデザイン ..... 10
2.1.1. ライフサイクルデザインの概要 ..... 10
2.1.2. ライフサイクル評価手法 ..... 12
2.2. 電気自動車の関連研究 ..... 23
2.3. 自動車シェアリングの関連研究 ..... 24
2.4. 戦略的マネジメントの関連研究 ..... 26
2.5. 本研究の着眼点と解決すべき課題 ..... 27
2.5.1. 自動車の電動化とシェアリングを考慮したモデル化とシミュレーション 27
2.5.2. 社会目標を考慮した戦略的マネジメントのためのモデル化とシミュレーション ..... 28
2.6. 結言 ..... 28
第 3 章 自動車の電動化と製品共有を考慮したモデル化とシミュレーション ..... 35
3.1. 緒言 ..... 36
3.2. 輸送能力とライドシェアリング時の走行距離のモデル化 ..... 37
3.2.1. 輸送能力モデル ..... 37
3.2.2. ライドシェアリング時の走行距離モデル ..... 38
3.3. 二段階分配メカニズム ..... 41
3.4. シミュレーション手順 ..... 44
3.5. ケーススタディ ..... 45
3.5.1. システムバウンダリの設定 ..... 45
3.5.2. ライフサイクルシミュレーションモデル構築 ..... 46
3.5.3. 二段階分配メカニズムを含めたライフサイクルプロセスモデル構築 ..... 48
3.5.4. シミュレーション実行 ..... 52
3.6. 考察 ..... 57
3.7. 結言 ..... 61
第 4 章 自動車の電動化に向けた社会目標を考慮した戦略的マネジメントのためのモデル化とシミュレーション ..... 65
4.1. 緒言 ..... 66

4.2. 社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化 ..... 66
4.3. シミュレーション手順 ..... 70
4.4. ケーススタディ ..... 73
4.4.1. 対象とする結合型ライフサイクルシステムズ ..... 73
4.4.2. 意思決定モデル ..... 77
4.4.3. シミュレーション実行 ..... 83
4.5. 考察 ..... 89
4.6. 結言 ..... 93
第 5 章 自動車の電動化と製品共有に向けた戦略的マネジメントのためのモデル化とシミュレーション ..... 95
5.1. 緒言 ..... 96
5.2. シミュレーション手順 ..... 96
5.3. ケーススタディ ..... 100
5.4. 考察 ..... 124
5.5. 結言 ..... 127
第 6 章 考察 ..... 131
6.1. 緒言 ..... 132
6.2. 自動車の電動化と製品共有のモデル化の有効性 ..... 132
6.3. 社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化の有効性 ..... 132
6.4. 提案モデルの限界と適用可能性 ..... 133
6.5. 提案モデルの活用場面について ..... 135
6.6. 結言 ..... 136
第 7 章 結論 ..... 139
7.1. 本研究の結論 ..... 140
7.2. 今後の展望 ..... 141
付録 A　シミュレーションモデルのパラメータリスト ..... 143
謝辞…… ..... 153
発表論文 ..... 155

# 第1章　序論

## 1.1. 研究背景

産業革命以降，先進国を中心として，人類は大量生産大量消費に基づく経済活動で豊かさを享受してきたが，大量生産大量消費体制は持続不可能な体制であると言わざるを得ない．このように言う要因の一つに世界人口の急激な増加が挙げられる．20 世紀は歴史上最も世界人口の急激な増加を示した時代であり，大量生産大量消費体制と合わさって資源消費量は急激に増加してきた．2022 年現在，既に人類が生み出した人工物の総量は地球に存在する生物資源量を超えたと試算されているが[1], 今後も世界人口の増加の傾向は続き，2100 年には世界人口は約 110 億人に到達すると見込まれる[2]. また発展途上国を始めとするより多くの地域で経済成長が見込まれることを考慮すると，これまで以上に多くの資源が消費され，温室効果ガスや有害物質が排出される恐れがある．

しかし，地球資源が有限であることは明確であり，人類の経済活動や社会活動によって発生する地球への負荷についても許容できる限界, つまりは惑星限界（Planetary boundary）が存在する[3]. 1980 年に国際自然保護連合がまとめた世界保全戦略にて言及されて以降,「持続可能な開発」の重要性は頻繁に叫ばれ，2015 年には持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable development goals）が採択されたが，その実現には人類の経済活動は地球の惑星限界下で行われることが前提となる．Fig. 1-1 は人類の経済活動における持続可能性の要素である経済性，環境性，社会性の関係性の変遷を示しており[4]，大量生産大量消費が行われた経済第一主義の時代，各要素を同等に扱うトリプルボトムラインの時代を経て，今後は惑星限界が強調されたネスト構造に基づく経済活動が必要だと示している．このネスト構造は社会基盤を超えた経済活動は実施できないこと，そして地球システムの限界を超えた経済・社会活動は実施できないことを端的に表している．

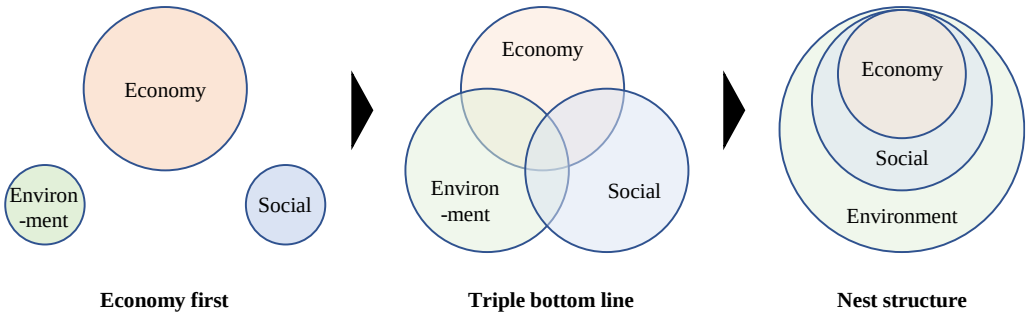



Fig. 1-1 Relation transition between elements of sustainability [3]

現在，惑星限界に準拠した経済活動を実現するにあたって，野心的な中長期目標の一つとしてパリ協定を中心とする世界的な脱炭素目標が設定されている．パリ協定は2015年の国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）で採択され，世界の平均気温上昇を産業革命以前と比較して2℃より十分低く保ち，1.5℃に抑える努力をすることが世界各国で求められることとなった[6]. この産業革命以前に対する平均気温上昇2℃未満の達成には，2070年頃から2100年までの間に人為起源の温室効果ガス排出量を正味ゼロ以下に，さらに1.5℃未満の達成には2050年頃に正味ゼロ以下にしなければならないとされている[7]．この達成のためには消費，生産，経済，社会などあらゆるシステムの大改革が必要であり，またその変革の評価にはライフサイクル思考に基づいて行っていくことが求められる．

脱炭素社会の実現にあたって注目されている産業として自動車産業が挙げられる．現在，世界全体の温室効果ガス排出量のうち自動車交通は約18%を占め[8]，また今後の世界人口の増加によって自動車台数は現在の約1.3億台から2050年には約2.1億台に増加するとされている[9]. このことから自動車産業は脱炭素社会の達成に大きな影響を及ぼすことが明白であり，自動車産業に携わる企業は自動車ライフサイクルに起因する二酸化炭素排出量（$CO_2$）排出量および資源消費量を削減するためのライフサイクルマネジメントが求められている．これは，これまで企業は自社の競争優位性を獲得による企業利益増加を目指して，周囲の複数のプレイヤーの状況を鑑みながら自社の戦略を決定する戦略的マネジメントが実施されてきたが，脱炭素目標という社会目標を考慮した戦略的マネジメントの実施が求められていることを意味する．また，それに加えて自動車産業ではCASEと呼ばれる100年に一度の大変革を迎えている．CASEはコネクテッド化（C），自動運転化（A），シェアリング（S），電動化（E）の四つの大きな技術変革を指す．この中でも，特に電動化，つまりは電気自動車の普及は脱炭素社会の実現における重要な鍵の一つとされる．これは電気自動車ライフサイクル全体の$CO_2$排出量が既存のガソリン自動車と比較して小さいためであり[10]，世界各国で電気自動車の導入目標が設定され，既存のガソリン自動車からの脱却が目指されている．自動車のシェアリングは電気自動車の高い導入コストを緩和するなど，電気自動車の普及促進のための重要な要因の一つとされ[11]，自動車の電動化と自動車シェアリング普及の影響を同時に考慮することが重要とされている．

このように自動車企業の戦略的マネジメントでは社会動向と自動車産業特有の技術動向を考慮することが求められている（Fig. 1-2）．従来，企業は不確実な未来に対して，複数のシナリオを用意し，その分析結果を戦略的マネジメントに活かしてきた．しかし，自動車産業に携わる企業の戦略的マネジメントでは技術動向および社会動向を考慮する必要があることからシナリオが複雑化および大規模化し，シナリオ分析が困難化するといえる．この課題に対して，技術動向および社会動向を考慮した自動車企業の戦略的マネジメントを，計算機を用いて支援する必要があると考えられる．

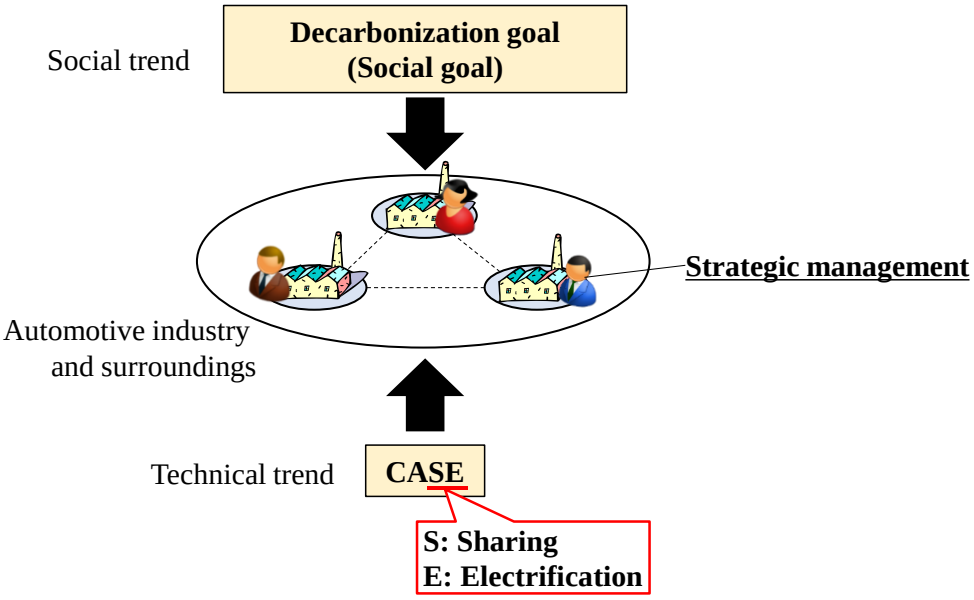



Fig. 1-2 Scope of this study

### 1.2. 研究目的とアプローチ

前節での研究背景を受けて，本研究では自動車企業意思決定者のシナリオ分析を支援することを目指し，自動車の電動化とシェアリング普及に向けた社会目標を考慮した戦略的マネジメントをライフサイクルアプローチに基づいてモデル化することを研究目的とした．具体的には，自動車の電動化とシェアリング普及，そして社会目標を考慮した戦略的マネジメントが製品生産量に与える影響に着目したライフサイクルシミュレーション（LCS: Life cycle simulation）モデルを構築する．ここで，先行研究にて自動車シェアリングを対象としたライフサイクル評価は不足しており，また社会目標を考慮した戦略的マネジメントの影響をライフサイクルアプローチから捉えた研究はほとんどない．本研究では自動車の電動化とシェアリング普及を考慮したモデル化と，社会目標を考慮した戦略的マネジメントのためのモデル化をそれぞれ行った後に構築したモデルを組み合わせることで研究目的の達成を目指す．それぞれのモデルは以下に示す着眼点に基づいてモデル化される．

(1) 自動車の電動化とシェアリングを考慮したモデル化

自動車シェアリングは日本でも普及している，サービス提供者が管理する自動車を複数のユーザに時間貸するカーシェアリングと現在北米を中心に普及している，自動車所有者がドライバーとして乗客を送迎するライドヘイリングを対象とし，それぞれの特徴を含めた LCS モデルを構築する．具体的には，カーシェア

リング車両とライドヘイリング車両は個人所有車と比較して輸送能力が高いことから，輸送能力モデルを LCS モデルに追加する．また，ライドヘイリングでは乗客の送迎の際に迂回路が発生し，全体の走行距離が増加するとされることから，ライドヘイリング時の走行距離モデルを追加する．そして最後に，電動化と自動車シェアリング普及の生産台数への影響を統合する二段階分配メカニズムを LCS モデルに導入する．

(2) 社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化

企業の戦略的マネジメントは周囲の状況を鑑みながら自社が設定した目標の達成に向けた意思決定を行う活動であるため，戦略的マネジメントをモデル化する際には超システム環境を想定したモデルになる．このことから，超システムを対象とした LCS 方法論である LCS4SoS で用いられるモデルをベースとする．ここで，既存の LCS4SoS 研究で用いられた超システムのモデルは，超システムの特徴である要素システムの管理および運用の独立性をシナリオの設定によって定義しており，陽にモデル化していない．しかし，本研究で対象とする社会目標を考慮した戦略的マネジメントは社会目標の達成状況を参照しつつ，その達成に向けて要素システムの振る舞いを変更させるため，そのモデル化の際には要素システムの管理および運用の独立性を陽にモデル化することが求められる．

そこで，本研究では企業の戦略的マネジメントにおける戦略評価のプロセスに着目した意思決定モデルを導入し，要素システムの管理および運用の独立性を陽にモデル化する．意思決定モデルでは社会目標への達成状況を評価し，その評価結果に基づいて社会目標と企業の個別目標で構成される意思決定ルールに沿った相互作用に関連するパラメータ値の修正が行われる．意思決定モデルは対象とする製品ライフサイクルシステムごとに設定され，また意思決定機会ごとに意思決定ルールに沿ったパラメータ値の修正が繰り返される．

### 1.3. 本論文の構成

Fig. 1-3 に示すように，本論文は 7 章からなる．

第 1 章では，本研究の背景について述べ，本研究の目的とアプローチを示した．

第 2 章では，本研究で対象とする電動化，自動車シェアリング，企業の戦略的マネジメント，そしてライフサイクル評価の関連研究を述べ，自動車の電動化とシェアリング普及に向けた社会目標を考慮した戦略的マネジメントをモデル化するにあたっての課題と着眼点について述べる．

第 3 章では，自動車の電動化とシェアリングを考慮したモデル化を行っていく．本研究では自動車シェアリングの特徴を考慮した LCS モデルの構築および電動化と自動車シェアリング普及による生産台数への影響を統合するための二段階分配メカニズムを提案する．

第 4 章では，自動車の電動化に向けた社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化を行う．社会目標を考慮した戦略的マネジメントを LCS に反映するために各相互作用に関連する妥協解選択の繰り返しプロセスのモデル化を行う．

第 5 章では，第 3 章および第 4 章にて提案した LCS 手法を適用することで自動車の電動化とシェアリング普及に向けた社会目標を考慮した戦略的マネジメントをモデル化し，その計算可能性を検証する．

第 6 章では，提案された LCS モデルの有効性と限界について述べ，また提案手法の活用場面について考察する．

第 7 章では，本研究の結論と展望を述べる．

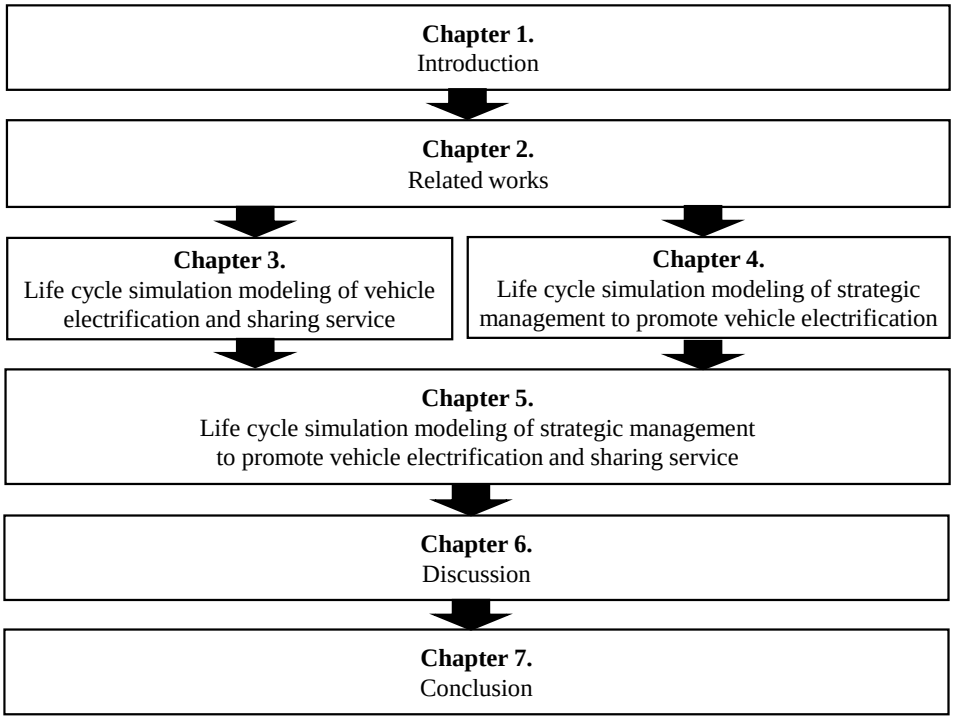



Fig. 1-3 Structure of this paper

## 参考文献


[1] E. Elhacham, L. Ben-Uri, J. Grozovski, Y.M. Bar-On and R. Milo, “Global human-made mass exceeds all living biomass,” Nature, Vol. 588, pp. 442–444, 2020.

[2] M. Roser, H. Ritchie, E. Ortiz-Ospina and L. Rodés-Guirao, "World Population Growth", 2013. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/world-population-growth'

[3] J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. Foley, “Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity,” Ecology and Society, Vol.14, No.2, Art.32, 2009.

[4] 小林英樹，“次世代エコデザインの論点，”設計工学 Vol. 56, No.4, pp. 180-184, 2021

[5] UN environmental programme, “Sustainable consumption and production policies,” 2010.

[6] United Nations, “Paris Agreement,” 2015.

[7] IPCC, “Global Warming of 1.5℃,” 2018

[8] IEA, “$CO_2$ emissions from fuel combustion highlights,” 2019.

[9] U.S Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2021,” 2021.

[10] F. Knobloch, S. V. Hanssen, A. Lam, H. Pollitt, P. Salas, U. Chewpreecha, M. A. Huijbregts, and J.F, Mercure, “Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time,” Nature Sustainability, Vol.3, pp. 437—447, 2020.

[11] M. Digk, R.J. Orsato, and R. Kemp, “The emergence of an electric mobility trajectory”, Energy Policy, Vol. 52, pp. 135-145, 2013.

# 第2章　関連研究と本研究の着眼点

## 2.1. ライフサイクルデザイン

### 2.1.1.ライフサイクルデザインの概要

ライフサイクルデザインは製品そのものだけでなくそのライフサイクル全体も対象とし，従来個別に設計が行われてきた複数のライフサイクルプロセスを有機的に繋げながら全体設計を行うことを意味しており[1][2]，ライフサイクル思考に基づいている．対象となるライフサイクルには，製品製造から使用に至る製品・部品・資源の順経路だけでなく，回収からリユースやリサイクル等の再利用プロセスを経て最終的に廃棄に至る循環フローが含まれる．つまり，ライフサイクルデザインでは製品や部品の設計を循環経路の設計とリンクさせることで資源効率性を向上させ，少ない資源投入量で市場の要求を満たすことが目的となる．

ライフサイクルデザインは Fig. 2-1 に示すようにライフサイクルプランニング，製品設計，プロセス設計，ライフサイクル評価から構成され，ライフサイクルデザインされた製品はライフサイクルマネジメントによって付加価値の創出が目指される[8]．ライフサイクルデザインの各プロセスについて説明する．

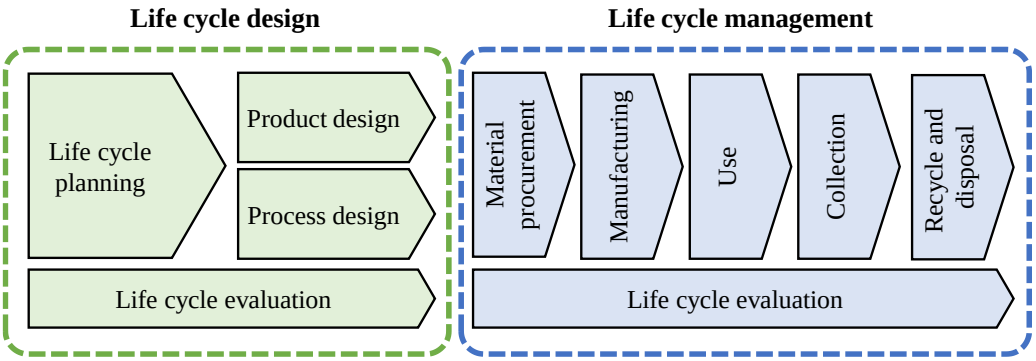



Fig. 2-1 Flowchart of life cycle design [3]

● ライフサイクルプランニング

ライフサイクルプランニングはライフサイクルデザインの最上流で，目標仕様と環境調和型設計コンセプトを構築するプロセスを指し[4]，製品特性を考慮したライフサイクルオプションを選定し，それらの最適な組み合わせを見出すことが求められる．ライフサイクルオプションはライフサイクルデザインの方策，選択肢を意味する．Fig. 2-2 にライフサイクルオプションの分類を示す．ライフサイクルオプションは大まかには，資源使用量や廃棄物発生量を予め低減する仕組みを施すリデュース，製品や部品に付随する機能を活かして再利用するリユース，回収した製品や部品の材料再利用を実施するリサイクル，そして適正処理や埋立処分などを含む廃棄処分に分類される[3]．

目標仕様は品質仕様と環境仕様で構成される．品質仕様の策定では品質機能展開を用いてユーザにとって魅力的な製品の開発が目指され，環境仕様の策定では製品の環境要求を整理し，それに対応する環境特性とその優先度が決定される．これら目標仕様を基に製品レベルおよび部品レベルコンセプトが複数作成される．部品レベルのコンセプトではライフサイクルオプション分析が行われ，ライフサイクルオプションの組み合わせ可能性が検討される．最終的には，複数のコンセプトに対して，品質，環境，コストの側面から総合的に評価して，バランスの取れたライフサイクルオプションのベストミックスが見いだされる．

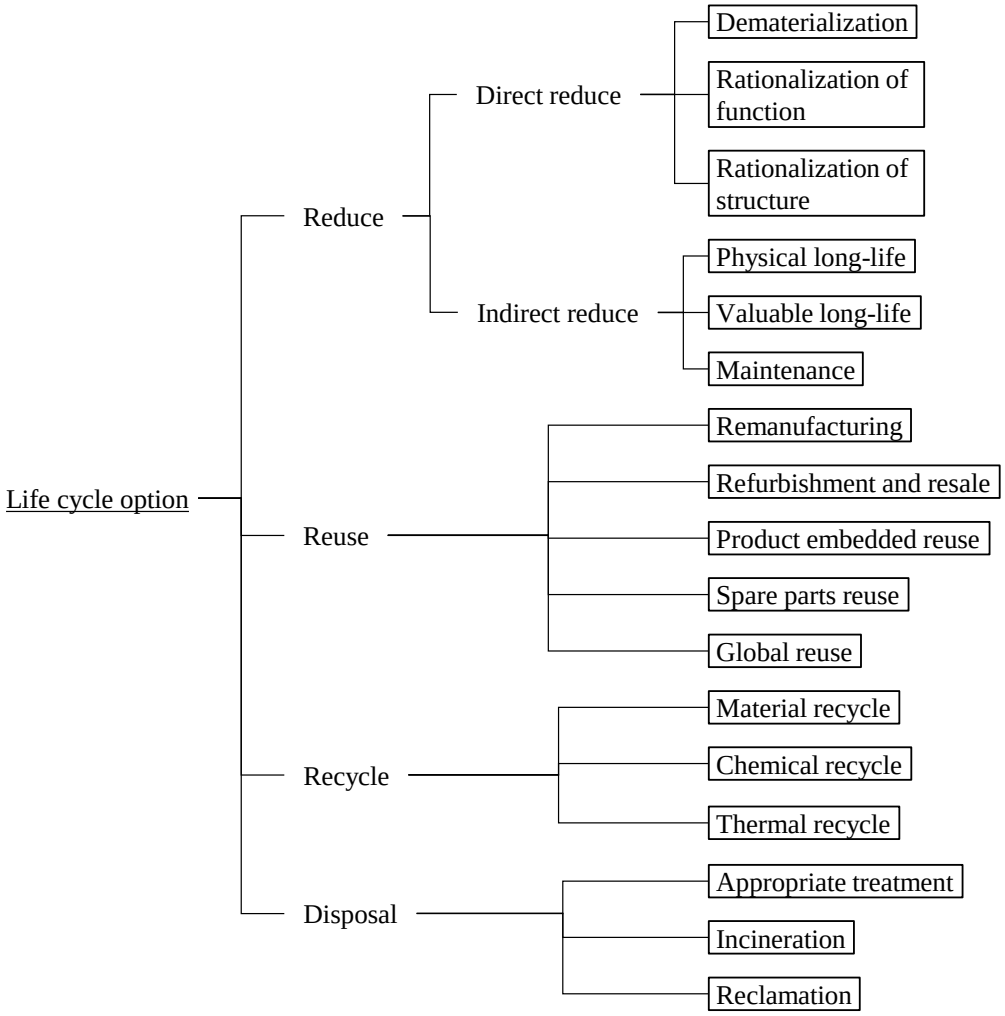



Fig. 2-2 Life cycle option [3]

● 製品設計

ライフサイクルプランニングにて策定された目標仕様とコンセプトを基に，製品設計およびプロセス設計が行われる．製品設計では製品の組立性や分解性，リサイクル性，リユース性，アップグレード性などを考慮しながら部品の配置や使用する素材が検討される．このとき，製品ライフサイクルにおける特定の視点から製品の改善を図る Design for X（DfX）手法と呼ばれる要素技術を用いることが有効である[5]．例えば，組立性設計手法（Design for Assembly）として組立性向上のためのガイドラインなどが提案されている[6][7]．また，比較的寿命が長い製品の設計の際には多世代機種を見据えることが重要とされ，多世代間の部品の共通化の検討は重要である[8].

● プロセス設計

製品設計と合わせて，ライフサイクル計画を実現するための製造やメンテナンス，回収，リユースなどのライフサイクルプロセスが設計される．プロセス設計には製品・部品・素材の順経路だけでなく，循環経路も設計の対象となる．順経路の設計では製品を効率よく市場に供給することが目的とされ，サプライチェーン全体の資源の需給バランスを最適化するサプライチェーンマネジメントなどの手法が用いられる．一方で，循環経路では製品の回収計画やその回収方法，製品の分解手順やリサイクル計画などが検討される．

● ライフサイクル評価

ライフサイクルプランニングで決定されたライフサイクル計画および設計された製品とライフサイクルフローが現状分析で設定した目標を達成しうるのか評価が行われる．評価項目としては $CO_2$ 排出量を始めとする環境負荷指標や製品製造にかかるコストなどの経済性指標，またリユース率などの循環性に関連する指標が含まれる．これら評価結果は現状分析で設定した目標を達成しているかの判断に用いられ，達成できていない場合は各プロセスに適宜戻り修正および再検討が行われることになる．

### 2.1.2.ライフサイクル評価手法

ライフサイクル評価の代表的な手法として，ライフサイクルアセスメント （LCA: Life Cycle Assessment），ライフサイクコスティング（LCC: Life Cycle Costing）が挙げられる．LCA は，対象とする製品やサービスを生み出す資源の採掘から廃棄に至るライフサイクル全体を考慮し，資源消費量や排出物量を計量すると共に，その環境への影響を評価する方法論である[9] [10]. LCA の実行手順は ISO 規格で定められており，Fig. 2-3 に示すように，Ⅰ．目的と評価範囲の設定，Ⅱ．インベントリ分析，Ⅲ．影響評価，Ⅳ．解釈の 4 プロセスからなる[11]．これらプロセスは一気通貫に行われるので

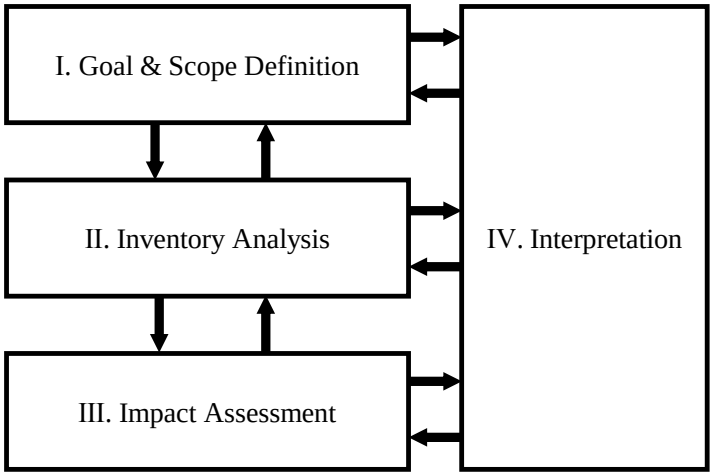


Fig. 2-3 Framework of LCA methodology [11]

はなく，反復的に行われる．LCA の各プロセスについて説明する．

I. 目的と評価範囲の設定

LCA を実施するにあたってまずは目的の設定が行われる. 具体的には, 誰が, 誰に依頼され，誰を報告対象として，何を対象に，何のために LCA を実施するのかが定められる．ここで設定される目的は評価範囲の設定に影響を与える．

評価範囲の設定では対象とする製品やサービスの選択，インベントリ分析にて用いる機能単位の選択，ライフサイクルプロセスの範囲，つまりはシステム境界の明確化が行われる．

II. インベントリ分析

インベントリ分析では I にて設定した評価範囲内のライフサイクルプロセスごとのインプット・アウトプットデータを整理し，製品ライフサイクルを通じて投入される物質，資源，エネルギーと，排出される製品，廃棄物，環境汚染物質が定量化される．一般的に，収集されるデータはメーカが直接管理している製品の材料構成や加工・組立に要するエネルギー量，水消費量などのフォアグラウンドデータと，資源採掘や素材製造，リサイクルなどの製品ライフサイクルのうちメーカが直接関与していないプロセスに属するバックグラウンドデータに大別される．インベントリ分析の手法は，積み上げ法と産業連関分析法に大別される．積み上げ法は，ライフサイクルプロセスごとのエネルギー収支，物質収支を計算し，システム全体としての環境負荷を積み上げていく方法である．産業連関分析法では，一国の産業を詳細な部門に分けて，部門間の金額ベースのやり取りから，エネルギーや環境負荷などの物量に関連する直接間接のやり取りを推定する方法である．

III. 影響評価

得られたインベントリ分析の結果を入力値として，地球温暖化や生態系，人間健康などへの潜在的な影響を定量化する．

IV. 解釈

入力変数の感度分析の実施や様々な不確実性を考慮したうえで，インベントリや環境影響の観点から支配的なライフサイクルプロセスを特定し，結論あるいは提言をまとめる．

LCC は LCA 同様に製品のライフサイクル全体を対象とするが，評価項目として各ライフサイクルプロセスで発生するコストなどの経済性を扱う[12]．LCA と LCC はライフサイクル評価にてしばしば同時に用いられ，設計対象製品の環境性と経済性の評価が行われる．これは環境性の向上と経済性の向上はトレードオフ関係になりえるためであり，設計者は環境性と経済性との間でバランスを取ることが求められる．LCA と LCC は静的かつ代表的な製品ライフサイクルを評価対象として扱う．そのため，リユースやリマニュファクチャリングなど，同機種の他製品や次世代機への製品・部品の循環プロセスに関連する環境負荷は代表的な配分値が与えられることになり，その影響を動的に評価することはできない．

この課題に対応するライフサイクル評価手法としてライフサイクルシミュレーション（LCS: Life Cycle Simulation）が提案されている[13][14][15]． LCS は物質，エネルギー，そして金銭フローの動的過程をライフサイクルプロセス間の依存関係を考慮しながらモデル化し，離散事象シミュレーション技術を用いてシミュレーション評価が行われる手法である．その特徴として，市場のシェアやストックなどの対象製品の物量およびその時間変化を取り扱うことができ，また製品や部品個体の状態変化を考慮可能である．この製品や部品の状態変化は物理的な劣化が主に想定され，それは製品の使用条件によって確率的に異なるが，LCS ではその使用状態のばらつきがモデル化され，また製品個体ごとに物理寿命および価値寿命を確率分布に基づいて付与可能である．このことから，LCS では物質フローの非定常性を考慮することが可能であるといえる．また LCS では製品個体の状態変化を考慮可能であることを活かし，製品および部品の状態に応じてライフサイクルプロセス内の処置判断，つまりはライフサイクルプロセス内の意思決定がモデル化される．そして最後に，LCS では外生変数の変化を時系列で考慮可能である．外生変数は製品を取り巻く事業環境に関連する変数を指し，製品の法定リサイクル率や電力構成変更に伴う系統電力原単位などが含まれる．

LCS は「条件の設定」,「LCS モデルの構築」,「シミュレーション実行」,「結果の出力」の順で実行される（Fig. 2-4）[13]．ここで，LCS モデルは製品モデル，プロセス

モデル，供給・回収計画の三要素で構成される．製品モデルは製品レベル，部品レベル，材料レベルの三レベルで定義され，それぞれ質量や寿命，環境負荷原単位，コスト原単位などが定義される．プロセスモデルはライフサイクルプロセスとマテリアルフローおよび情報フローから構成され，プロセス間の依存関係や各ライフサイクルプロセスで実行される挙動やその際発生する環境負荷やコストが定義付けられる．供給・回収計画では対象製品の市場投入量やリユース品の回収量などが設定されている．

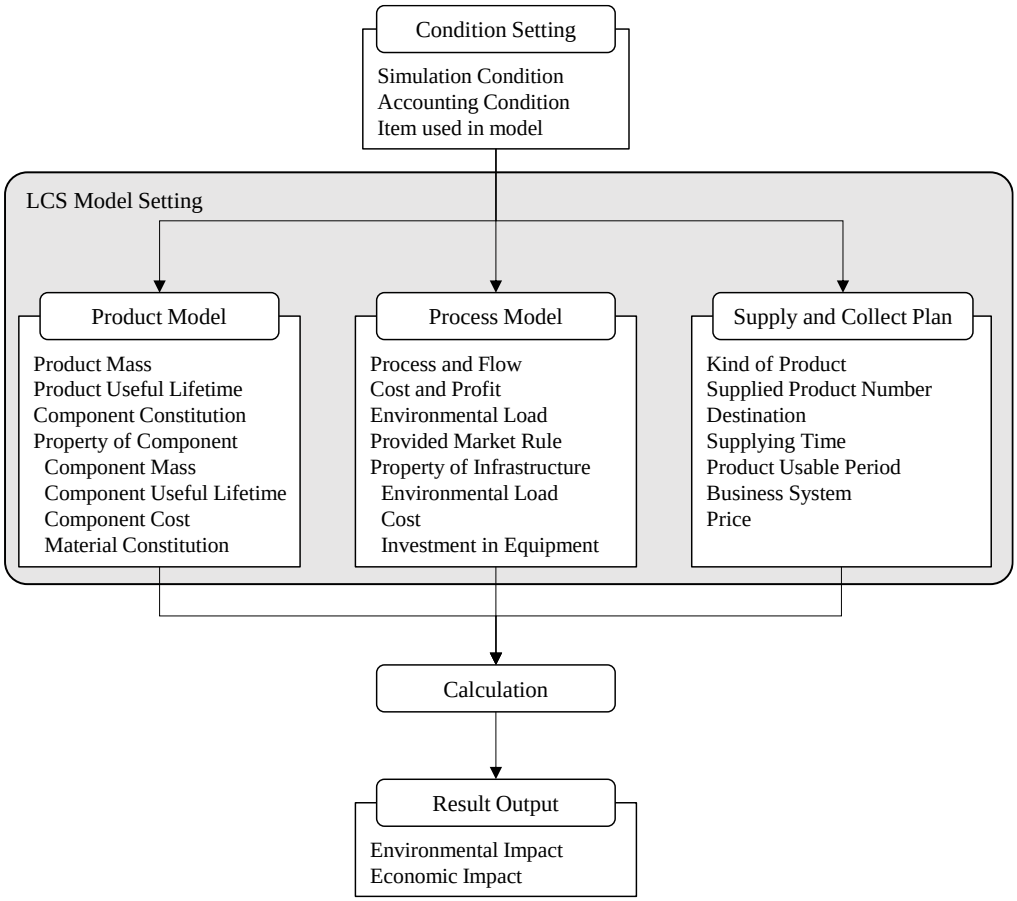



Fig. 2-4 Flowchart of life cycle simulation [13]

LCA と LCC と LCS との比較を Table. 2-1 に示す[13][16]．LCA や LCC と比較して LCS は時間経過に伴う動的な事象変化や循環経路の取り扱い可能など，評価可能な対象範囲が広く，モデリングの自由度が高いことが確認できる．実際，多くの産業事例の評価に LCS が用いられてきた．例えば，文献[17]では産業用ロボットの部品劣化状況に伴う機能低下を LCS でシミュレーションした．文献[18]ではセメント産業における環境性評価と経済性評価に LCS が用いられている．また，文献[19]ではエレベータの保守設計における LCS の有効性に用いられている．文献[13]ではノートパソコンの

Table. 2-1 Comparison of LCA, LCC, and LCS（based on [11][14]）

| | LCA | LCC | LCS |
|---|---|---|---|
| Evaluation target | One product | | Product business |
| Output | Environmental impact | Economic impact | Environmental and economic impact |
| Evaluation method | Static evaluation based on input-output model of life cycle processes | | Dynamic evaluation based on discrete event simulation |
| Evaluation period | One product life cycle | | Business period |

販売事業からリユース事業への移行に伴う環境影響とコストを，LCS を用いて評価した．文献[20]では PSS 設計支援を目的とした LCS 手法が提案された．提案されている LCS 手法では，製品と搭載されているソフトウェアの運用，保守，アップグレードのサービスを含めたビジネスモデルの環境負荷やコストを定量評価することが可能であり，Product-oriented PSS を対象としている．より多様な PSS を対象とする LCS として，文献[21]では従来の製品モデルにサービスモデルを追加し，統合することが提案されている．これら既存研究は，LCS は多くの循環フローの効果を評価可能であることを示しており，また PSS のビジネスモデルを取り扱うことが可能であることを示している．

以上のように，LCS はモデリングの柔軟性が高く，様々な事例を対象として用いられている．しかし，注意すべきなのは，得られたシミュレーション結果には不確実性が内包されている点である．これは LCS ではシミュレーション内の製品個体やライフサイクルプロセスに関連するパラメータ値として離散値だけでなく確率分布の情報を付与できることやそもそもライフサイクルモデル構築時に全てのパラメータに現実世界の正確な値を入力できることは稀であることに起因する．これら特徴から，LCS は精密な将来予測を行うためのツールとしてではなく，製品や部品に関連するパラメータ値の変更や対象とする中長期的なビジネスプランの環境性や経済性を比較するための What-if 分析ツールとして用いられる[3, 14]．LCS を実行する際には複数のシナリオが用意され，現実世界の真値はそれらシナリオのシミュレーション結果の範囲内に存在すると想定されることになる．このことから，LCS のシミュレーション結果の妥当性とは，現実世界の値に如何に近いかという結果の正確性ではなく，対象とする事象を適切にモデル化できているかという点で判断されることになる．

一方で，LCS モデルに含まれるパラメータ値をより現実世界に則したものにし，シミュレーション結果の正確性を向上させる LCS 手法としてデータ同化型 LCS（DA-LCS: Data-Assimilated LCS）が提案されている[22]．DA-LCS にはシミュレーション期間の現場観測データを用いて LCS モデル内の設定定数や関数の自動修正が行われるデータ同化メカニズムが含まれ，継続的な LCS モデルの改善が求められるライフサ

イクルマネジメントを支援するのに有効な LCS 手法とされる．

LCS は Table. 2-1 に示したように中長期的なビジネスプランを扱い，製品の世代の移り変わりを考慮することが可能であるが，基本的に単一製品のライフサイクル評価が行われる．しかし，昨今ではそれまでは関係がなかったシステム間に物質または情報を介した相互作用が生じて、超システム（SoS: System of Systems）と見なせる状態が形成されることがある．超システムとは，複数の独立なシステムが相互作用することで形成されるより大規模なシステムを捉えるための概念であり[23][24]，自立性，独立性，分散性，進化性，動的再構成，創発的挙動，相互依存性，相互運用性の八つの特徴が定義されている[23]．これら特徴から，超システムの挙動を予測することは困難であり，大きな不確実性をはらんでいる．

超システムは超システムとその構成システムの権限関係から Table. 2-2 に示す四つのタイプに分類できる [25]．DirectedSoS は超システムの目的達成が最も順守される形態であり，Ackonowledged SoS，Collaborative SoS，Virtual SoS の順に個別システムの目的達成が重要視されていく．Directed SoS は特定の目的を達成するために構築・管理される直接指揮型超システムであり，中央管理システムによって一元的に進化していく．構成システムは独立して運用・管理する能力はあるものの，基本的に中央管理システムの目的に従属する．Directed SoS の対極にあるのが Virtual SoS である．Virtual SoS では中央管理システムは存在せず，また超システム全体の目標も共有されない状態であり，要素システム間相互作用から結果的に超システムとしての振る舞いが創発されるシステムである．Collaborative SoS および Acknowledged SoS では超システム全体の目標が共有されている状態であるが，その拘束力が異なる．Collaborative SoS では中央管理システムは存在せず，要素システム自身が超システム全体の目標を達成するために自発的に相互作用を発生させる．一方で，Acknowledged SoS では中央管理システムからの要請に対して要素システムが承認する形で相互作用を発生させることから，協力と指示の中間に位置する超システムである．

Table. 2-2 Types of SoS [25]

| Type | Definition |
|---|---|
| Directed | Directed SoS are those in which the SoS is engineered and managed to fulfill specific purposes. It is centrally managed during long-term operation to continue to fulfill those purposes as well as any new ones the system owners might wish to address. The component systems maintain an ability to operate independency, but their normal operational mode is subordinated to the centrally managed purpose. |
| Acknowledged | Acknowledged SoS have recognized objectives, a designated manager, and resources for the SoS; however, the constituent systems retain their independent ownership, objectives, funding, development, and sustainment approaches. Changes in the systems are based on cooperative agreements between the SoS and the system |
| Collaborative | In collaborative SoS, the component systems interact more or less voluntarlly to fulfill agreed-upon ventral purposes. |
| Virtual | Virtual SoS lacks a central management authority and a ventrally agreed-upon purpose for the system of systems. Large-scale behavior emerges - and may be desirable- but this type of SoS relies upon relatively invisible, self-organizing mechanisms to maintain it. |

H.Kobayashi らは複数の異種製品ライフサイクルシステム，システム間の相互作用，そして時間経過を要素として構成される超システムを結合型ライフサイクルシステムズ（CoLSys: Connected life cycle systems）と定義し [26]，CoLSys を対象とした LCS 方法論である LCS4SoS を提案している[27]．CoLSys は産業共生と循環生産システムの概念を包含する概念である．Fig. 2-5 に CoLSys の概念図を示す [3].

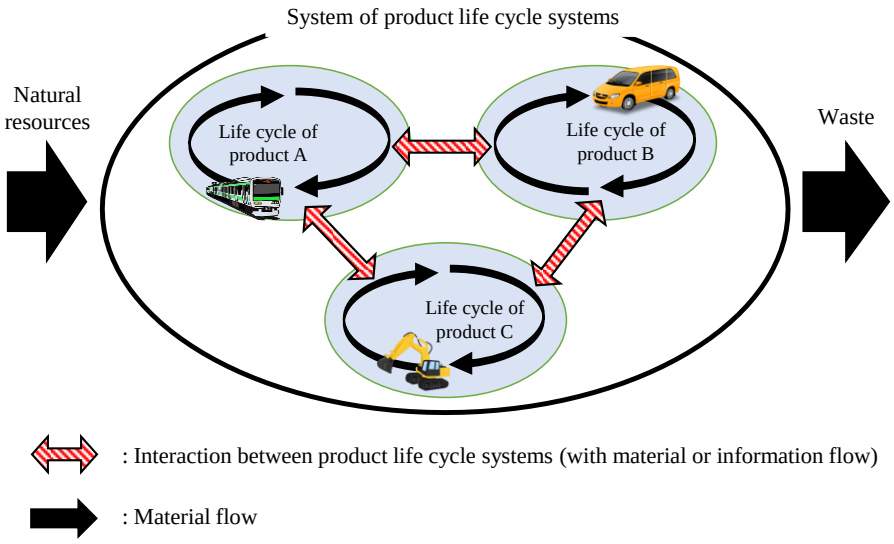



Fig. 2-5 Concept of connected life cycle systems [3]

本方法論は，異種製品ライフサイクルシステム間の相互作用をモデル化することによって，CoLSys の振る舞いを計算機上で表現およびその影響を評価することを意図している（Fig. 2-6, Table. 2-3）．LCS4SoS では以下に示す 5 分類 8 種類の相互作用が定義されている．

I. 需要代替

製品 B の生産が製品 A の生産量に影響を与えることで需要の代替が起こる．市場規模が限定されている，同一の機能を持ち，競合する製品間で発生する可能性がある．例えば，次世代自動車の生産によるガソリン自動車の生産量減少が考えられる．

II. 機能による需要代替

製品 B の副機能を使用することによって製品 A の生産量に影響を与える．例えば, スマートフォンは通話機能のほか, 音楽を聴く副機能を持つ. これにより, 携帯音楽プレーヤの生産が減少することが考えられる．

III. 使用強度変化

製品 B と製品 A の機能が類似している場合，製品 B の使用により製品 A の使用強度が変化する．例えば，スマートフォンに内蔵するカメラを用いることで，スマートフォンとカメラを両方所有しているユーザのカメラの使用強度が減少すると考えられる．

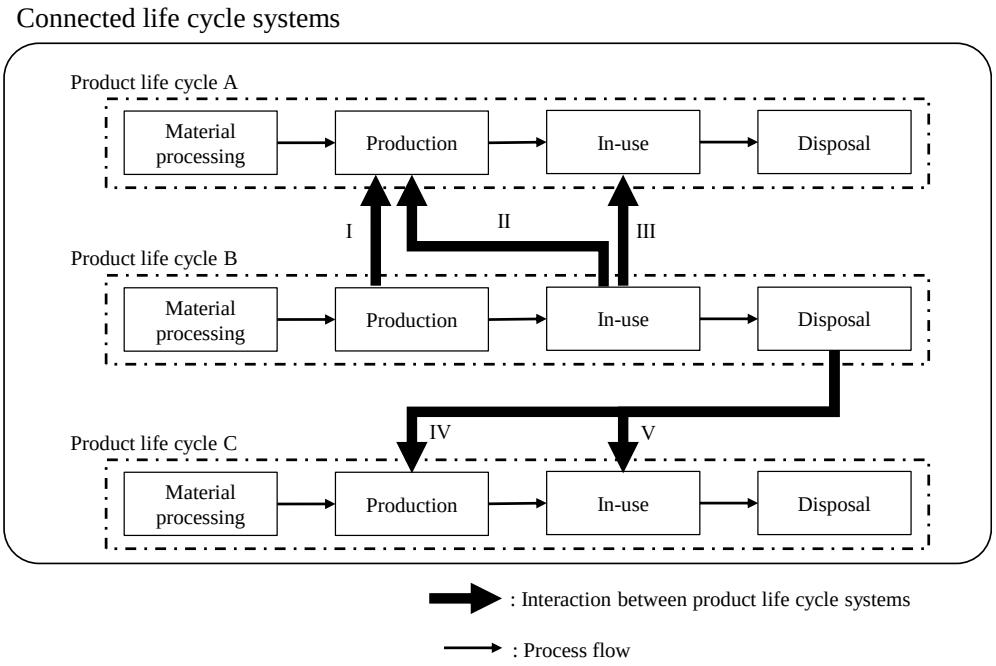



Fig. 2-6 Interactions among product life cycle systems in connected life cycle systems [26]

Table. 2-3 Eight types of interaction among product life cycle systems [27]

| Category | Type | Content |
|---|---|---|
| I | I-a | Demand substitution with an alternative product (information flow) |
| | I-b | Demand increase by diffusion of a related product (information flow) |
| | I-c | Reuse of factory waste as a resource for other product life cycle processes (material flow) |
| II | II-a | Demand substitution by sub-function (information flow) |
| | II-b | Demand increase by sub-function (information flow) |
| III | III-a | Substitution of usage intensity of in-use stock (information flow) |
| IV | IV-a | Global reuse of old products in different new or like-new products (material flow) |
| V | V-a | Global reuse for spare parts to prolong the lifetime of in-use stock (material flow) |

IV. グローバルリユース

廃棄および使用されなくなった製品 B の部品やモジュールを，製品 C の新規製造の際に用いる．これは廃棄される製品の構成部品には十分な寿命が残存している可能性があることから発生する．なお，グローバルリユースはで循環型経済で示されている循環経路の Repurpose に該当する[28].

V. メンテナンス用部品としてグローバルリユース

廃棄および使用されなくなった製品 B の部品やモジュールを, 市場にある製品 C のメンテナンス用部品として使用する．製品使用期間が長い製品の部品が生産中止になった場合に有効である．

LCS4SoS を用いたケーススタディとして, EV の使用済み電池を定置用蓄電池としてグローバルリユースした場合の環境影響が評価されている[29]. この先行研究では, 製品ライフサイクルシステム間の相互作用の発生と強度を静的ルールで制御する手法が提案され，グローバルリユースを対象としてその有効性の検証が行われた．その手法では，相互作用に関与する各製品ライフサイクルシステムの具体的なパラメータをシミュレーション中に決定し，それぞれの条件を満たすかどうかを判断している．設定されたパラメータは 5 種類あり，リユース可能性，リユース対象製品の残存物理・価値寿命，コスト，リユース対象製品の質,リユース量が設定された．

ここで，既存研究では CoLSys では対象とする製品ライフサイクルシステムごとに製品普及シナリオ等のシナリオが設定されていることから，個別に相互作用を含めたライフサイクルマネジメントが行われることが想定されているといえる．しかし，既存研究では CoLSys のモデル化の際には超システム全体の目標を考慮されていない．そのため，既存研究では CoLSys を Virtual 型の超システムとしてモデル化されているといえる．

LCS4SoS によって複数のライフサイクルシステム間の相互作用を考慮可能になったが，実際には，ライフサイクルシステムに関連するマテリアルフローは、相互作用だけでなく、社会技術的な側面やプロセス固有の側面にも影響されると考えられるが, 社会技術システムと固有プロセスの二つの側面を LCS4SoS では考慮されていない．

社会技術システムは人口や経済成長だけでなく，規制や技術進歩など，様々な要因で構成されている．これらは CoLSys におけるマテリアルフローに 10 年から 50 年に渡って影響を与える．一方で，CoLSys を形成する各製品の寿命は 2 年から 20 年程度である．そして，LCS で用いられている離散事象シミュレーション技術は社会技術システムをモデル化するのに適していない．したがって LCS4SoS のフレームワークでは社会技術システムをモデル化することはできない．また，CoLSys における製品需給は，ライフサイクルシステム内の特定プロセスの微細な挙動に影響される．また，生産工程や保守サービス工程における製品の詳細な挙動が，CoLSys に全面的に影響を与えることもある．このような微小な挙動は 1 日や 1 週間程度の周期で起こるが, ライフサイクルシステムレベルでの計算周期は長くなるため，これら挙動は LCS ではモデル化されない．

この課題に対して，文献[26]ではハイブリッドシミュレーションアーキテクチャが提案されている．Fig. 2-7 に示すように，ハイブリッドシミュレーションアーキテク

チャでは LCS モデルと時間分解能が異なる社会技術システムモデルと特定プロセスの詳細モデルを組み合わせることで LCS の拡張が行われる．このとき，社会技術システムはシステムダイナミクス[30]やエージェントベースドモデリング[31]を用いてモデル化可能である．特定プロセスの詳細モデルでは目的に応じて，離散事象シミュレーション技術，システムダイナミクス，エージェントベースドモデリングが選択される．一般に，生産・流通過程のモデル化は離散事象シミュレーションが適用され，消費者行動の分析にはエージェントベースドモデリングが適用される．

これら LCS で用いられる評価指標として，環境性指標ではライフサイクル全体の $CO_2$ 排出量や関与物質総量（TMR: Total Material Requirement），経済性指標ではライフサイクル全体のコストや利益が用いられる．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，そして隠れた物質フローの総和を表す指標であり，製品で用いられた資源量だけでなく，そこに至るまでに消費された採掘活動量を考慮することができる[32][33].

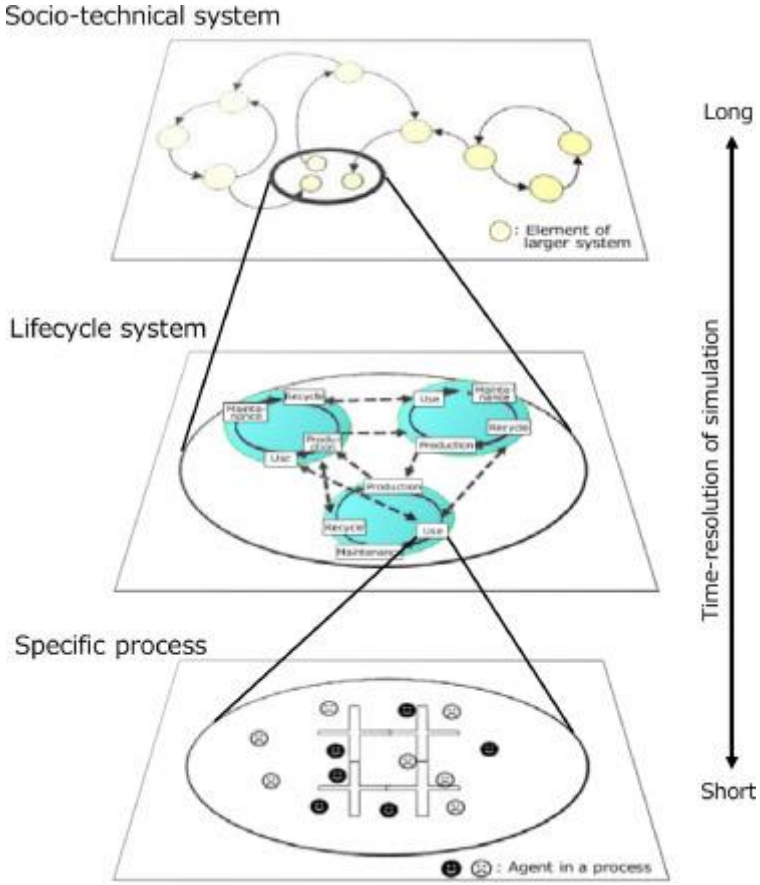



Fig. 2-7 Example of hybrid simulation architecture for CoLSys [26]

## 2.2. 電気自動車の関連研究

世界全体の自動車交通由来の $CO_2$ 排出量は全体の約 18%を占めており，その削減が求められているのは前述した通りであり，その削減のためには非再生可能なエネルギーである石油を動力源とするガソリン自動車からの脱却を図ることが有望な解決策であると言われている[34].ガソリン自動車を代替する車両として電気自動車が挙げられ，脱炭素社会の達成に向けた重要な要素の一つとされている．電気自動車は従来のガソリン自動車と比較して，自動車ライフサイクル全体の $CO_2$ 排出量が小さい[35]．また，電気自動車は電力を動力とするため，電気自動車の走行時 $CO_2$ 排出量は使用される地域の電力構成に依存する．そのため，電力の脱炭素化を同時に進めていくことが重要となるが，文献[36]にて現状の世界のほぼ全ての地域においてガソリン自動車から電気自動車への移行による一定の脱炭素効果が挙げられることが示されている．一方で，電気自動車に投入される資源やエネルギーはガソリン自動車と比較して大きくなり，電気自動車普及に伴う資源消費量やエネルギーの増加をバランスさせていく必要がある[37]．特に現在，多くの電気自動車に搭載されているリチウムイオン電池には多くの希少資源やエネルギーが投入されているため，その資源効率性を向上させることが求められている．今後，電気自動車の普及と共に使用済みのリチウムイオン電池も増加していき, 世界で 2020 年に 5 万個だった使用済みリチウムイオン電池は 2035 年には 1 億 5000 万個に増加すると推定されている[38]．この使用済みリチウムイオン電池をリユースすることは電気自動車の環境負荷を大きく削減させることに繋がるため，異種製品への再利用を含めてそのリユース経路が検討されている．文献[39]ではリユース先として充電スタンドや家庭用蓄電池などを候補としている．

電気自動車の特徴として，人々を移動させる手段だけでなく，蓄電池として用いられることが可能であることが挙げられる．その代表例として V2H（Vehicle to Home）が挙げられる. V2H とは電気自動車のバッテリーに蓄えられたエネルギーを住宅のエネルギー源として利用することを意味し[40]，例えば，家庭での電力消費量が少ない夜間に充電し，家庭での電力消費量が多いときに，電気自動車に蓄えたエネルギーを家庭で使用することが可能になる[41]．つまり，電気自動車は従来の家庭用蓄電池の役割を担うことが可能である[42].

世界各国で電気自動車の普及目標が設定され，今後はその目標達成に向けた取り組みが行われると予想される．文献[43]では電気自動車の普及要因として，充電インフラの整備，自動車の個人所有からの脱却，電気自動車市場が収益性の高い市場とすること，原油価格が大幅に上昇すること，気候変動政策が野心であること，電力系統のスマートグリッド化の六つが挙げられている．また，電気自動車の高い初期投資は導入を敬遠する主要因の一つであり，国や自治体から支給される補助金は重要な役割を担っていることから，政府の介入などは電気自動車普及において重要である[44]．そ

のため電気自動車の普及にはインフラ整備や補助金等の政策に強く依存していると考えられる．

電気自動車を対象としたライフサイクル評価研究では主にLCAが用いられており，電気自動車とガソリン自動車のLCA結果の比較が行われている[45-50]．これらLCA結果は数値的なばらつきはみられるが，電気自動車の$CO_2$排出量がガソリン自動車のものと比較して小さくなることが示されている．一方で，これら結果は製品単体を対象としており，製品総量や市場における製品普及の混合状態は考慮されていない．ガソリン自動車から電気自動車への移行状態を考慮したライフサイクル評価研究として，文献[27]ではガソリン自動車から電気自動車への需要代替を考慮したLCSモデルを構築している．具体的には，ガソリン自動車および電気自動車のLCSモデルを構築し，それぞれに需要代替を加味した普及シナリオを与えることでモデル化している．

### 2.3. 自動車シェアリングの関連研究

現在，世界中で様々な自動車シェアリングサービスが展開されている．文献[51]では現在普及している，自動車シェアリングサービスを含む，シェアモビリティの分類を行っているが，このうち，自動車シェアリングに該当するシェアリングサービスについて説明する．

- カーシェアリング

  カーシェアリングは複数のユーザが同じ車両を使用する共有輸送方式である[52]．ユーザはカーシェアリングを利用することで，車両を所有する責任と費用を考慮せずに，自動車による移動の利点を享受できる．類似しているシステムとしてレンタカーが挙げられるが，カーシェアリングはより短時間での利用を想定しており，利用時間に基づく支払いになっている[53].

  カーシェアリングの形式は，ステーションベースとフリーフローティングの二つに大別することができる．ステーションベース形式では，車両を使用した後に元の駐車場に返却する必要があるライドトリップと，サービス提供している企業が契約している駐車場であれば返却はどこでもよいワンウェイがある．フリーフローティングはサービス提供企業が指定するエリアであればどこでも返却可能な形式であり，必ずしも駐車場で返却する必要がない．場合によっては路上駐車を行う．

  カーシェアリングの特徴として，前述したように，自動車利用のコストが安価であることが挙げられる．自動車を所有する場合，移動にかかるガソリン代などがかかるだけでなく，自動車購入にかかる費用やメンテナンス費用などがかかるため，カーシェアリングを利用することで，自動車利用コストを抑えることができる．そして，このコスト差はより多くの人が自動車の所有からカーシェアリン

グへと移行する要因となりうる[54-56]．交通エコロジー・モビリティ財団が発表している資料によれば，カーシェアリング加入前後のユーザの自動車保有台数変化では 29.9%ものユーザが自動車を手放している[54]．このように，カーシェアリングは走行する自動車の台数を減少させる可能性がある．文献[57]は，ポルトガルのリスボンで行われた事例研究から，カーシェアリング車 1 台が自家用車 6 台を代替することを示した．これらの特徴から，カーシェアリングの普及により，使用される自動車台数を最小限に抑えることが期待されている．

- ライドシェアリング

ライドシェアリングは，類似または重複した経路および出発時間を持つユーザを同じ車両に乗せて移動する形式であり，相乗りとも呼ばれる[58]．現在，インターネットの普及によって多数のライドシェアリングプラットフォームが展開されており，ドライバーおよび乗客の双方の規模は拡大している[59]．ライドシェアリングはカープールとバンプールに大別される．カープールでは 7 名以下を 1 グループとして，バンプールは 7 名以上 15 名以下を 1 グループとして移動する．ライドシェアリングは目的地や経路が同じユーザによって利用されるため，学校や大学，職場に向かう際にライドシェアリングが発生する場合が多い．ライドシェアリングに期待される効果として，使用される自動車台数の減少が挙げられ，渋滞の緩和も期待されている．

ライドシェアリングの新しい在り方として，オンデマンドライドサービスの成長が著しい．オンデマンドライドサービスは，スマートフォンアプリを介した自動車配車サービスであり，新たなライドシェアリングの形態として注目されている．近年，そのドアツードアとしての高い利便性と費用対効果によって急速に普及している[60]．代表例として，Uber や Lyft が挙げられ，主に北米で普及している．

オンデマンドライドサービスにおいて最も普及している形態の一つとして，ライドヘイリングがある．ライドヘイリングはドライバーの余剰時間に自家用車で乗客を目的地まで運ぶ代わりに報酬を受け取る，タクシーに近い形態である．Uber や Lyft はその代表的なサービスプラットフォーム提供会社である．ライドヘイリングの大きな利点は，カーシェアリングと同様，移動コストの低さである[61]．ライドヘイリングを利用することで，自動車を購入し，運転し，維持するコストを節約することができる．また，利便性の高さでは，従来のタクシーと比較して予約が容易な点と平均待ち時間が少ないことが指摘されている．文献[62]は，従来のタクシーの平均コストが 14.63 ドル，平均待ち時間が 17 分 42 秒であるのに対して，Uber の平均コストは 6.40 ドル，平均待ち時間が 6 分 49 秒であることを示し，ライドヘリングがより少ない費用で良質なサービスを提供する可能

性があることを指摘している．ライドヘイリングの普及によって，特に若者の間で，自動車の購入が抑えられることが考えられる[63]．また，ライドヘイリングに相乗りを加えた形態として，ライドスプリッティングがある．ライドスプリッティングでは，類似または重複したルートを持つ乗客が運賃を分担して車両を利用する．このようなオンデマンドライドサービスが普及した結果，流通する自動車台数は減少し，渋滞や大気汚染の緩和が期待されている．一方で，オンデマンドライドサービスの普及によって，渋滞や大気汚染を悪化させる可能性を指摘する研究もある．文献[64]はサンフランシスコにて発生している渋滞の最大の原因はオンデマンドライドサービスを行っている車両だとしている．その要因の一つとして，乗客を乗車地点まで迎えに行く際などで発生する迂回路による総走行距離の増大が挙げられる．文献[65]はドライバーとの位置関係によってオンデマンドライドサービスを含むライドシェアリング時の車両の移動を四つのパターンに分類しており，迂回路が発生する可能性があることを示している．文献[66]はオンデマンドライドサービスによって乗客を乗せないで走行する距離が増大し，総走行距離を増加させる可能性を示している．

自動車シェアリングに限らず，製品共有を対象としたライフサイクル評価研究は不足しているが[67]，自動車シェアリングを対象としたライフサイクル評価として，文献[68]ではカーシェアリングの可用性に着目した LCA 手法を提案し，個人所有されるガソリン自動車と電気自動車で構成されるカーシェアリングの環境負荷を比較している．また，文献[67]ではライドシェアリングで用いられるライフサイクルプロセスモデルを構築し，個人所有する場合との LCA 結果を比較している．しかし，これら既存研究では輸送能力が大きい自動車シェアリング車両の普及による自動車全体の使用台数の減少，そしてそれが自動車生産量に与える影響を考慮することができていない．文献[13]ではパソコンのリース・レンタル事業を対象とした LCS モデルを構築することで，売り切り型事業からリース・レンタル事業への移行状態を評価可能としている．しかし，自動車シェアリングを対象とする場合，電気自動車の普及に影響することから，ガソリン自動車と電気自動車という複数の製品，そして個人所有と製品共有という複数の使用形態が混在している状態とその移行状態をモデル化していく必要がある．

### 2.4. 戦略的マネジメントの関連研究

戦略には様々な定義があるが，代表的な定義として，戦略とは企業の長期的な目標や目的の定義，行動の採用，目標の達成のために必要な資源の配分を指すとされている[69]．また文献[70]では戦略とは，企業がどのようなビジネスを行っているか，あるいは行おうとしているかを定義する目的，方針，目標，およびそれらを達成するため

の計画のモデルと定義されている．これら戦略の定義では戦略を企業の姿勢や計画として捉えているといえる．また近年ではこのような戦略的選択だけでなく，戦略的変化に焦点を当てられており，戦略とは様々な因果関係や相互作用によって複雑化し，不確実性が存在する環境に適応することだとされている[71]．これは変化や対立，相互依存が発生し，時系列でそれらが変化する現実世界の企業により即したアプローチであり，時系列で変化する企業のおかれた状況に応じて採用した戦略は修正される．これは超システム環境下における企業の振る舞いと合致している定義であり，本研究における戦略とは企業目標の達成に向けた計画でありつつ，周囲の状況に合わせて動的に修正されるものと捉える．

戦略的マネジメントとは戦略の管理を通して企業のパフォーマンスを維持・向上させるためのプロセスとして定義され[71]，主に戦略策定，戦略実行，戦略評価の三つのプロセスで構成される[72]．戦略策定には，ビジョンとミッションの策定，組織の外部機会と脅威の特定, 内部の強みと弱みの特定, 長期目標の設定, 代替戦略の生成, 追求すべき特定の戦略の選択が含まれる．戦略実行には策定した戦略を実行に移すための年次目標の設定，方針の策定，従業員の動機づけ，資源の配分が含まれる．最後に，戦略評価では基本的に現在の戦略の基礎となる外的・内的要因の見直し，戦略のパフォーマンスの測定，戦略の修正が行われる．戦略のパフォーマンス測定では基本的に企業の経済的利益に関する指標が用いられている．

## 2.5. 本研究の着眼点と解決すべき課題

本研究では自動車の電動化，製品共有，そして社会目標を考慮した戦略的マネジメントが製品生産量に与える影響に着目し，それらを LCS で評価可能とするためのモデル化を目指す．その際発生する解決すべき課題について整理する．

### 2.5.1.自動車の電動化とシェアリングを考慮したモデル化とシミュレーション

既存研究ではガソリン自動車から電気自動車への代替を考慮した LCS モデルの構築が行われている[27]．しかし，自動車の個人所有から自動車シェアリングへの使用形態間の需要代替を考慮した LCS モデルの構築は行われていない．自動車の個人所有から自動車シェアリングへの需要代替を扱う際には，自動車シェアリングの特徴である輸送能力の向上を考慮する必要がある．これはカーシェアリングおよびライドシェアリング共通の特徴であり，より少ない車両数でユーザの移動を賄うことに繋がる．また，現在普及しているライドシェアリングの形態としてライドヘイリングが挙げられるが，ライドヘイリング時では乗客がいる地点までの送迎などの迂回路を発生させ，走行距離の増大が発生するとされる．これは車両の寿命到達を早めて製品生産量の増大につながると考えられるため, モデル化すべき特徴である. また, これらシェアリング普及と電動化それぞれが製品生産量に与える影響を統合して製品生産量に

反映させる必要がある．まとめると，解決すべき課題は以下の通りになる．

- 輸送能力が異なるシェアリング車両と個人所有車間の需要代替による生産台数変化の反映
- ライドシェアリング時（特にライドヘイリング時）の走行距離増加の反映
- 電動化とシェアリング普及の影響を統合した生産台数変化の反映

### 2.5.2.社会目標を考慮した戦略的マネジメントのためのモデル化とシミュレーション

本研究における社会目標を考慮した戦略的マネジメントとは，超システム環境下において個別の要素システムが社会目標の達成状況を参照し，それをそれぞれの意思決定に反映させることを意味する．これは Collaborative SoS における要素システムの振る舞いに該当する．超システムを対象とした LCS 方法論である LCS4SoS は複数の製品ライフサイクルシステムと相互作用から構成される CoLSys をモデル化するが，既存研究では CoLSys を超システム全体の目標を考慮しない Virtual SoS としてモデル化している．つまり，社会目標を考慮した戦略的マネジメントを考慮するには，CoLSys を Collaborative SoS に拡張するようにモデル化することが課題となる．ここで，既存研究では CoLSys を構成する製品ライフサイクルシステムのライフサイクルマネジメントはシナリオによって定義されており，超システムの特徴である管理および運用の独立性を陽にモデル化されていない．しかし，Collaborative SoS では要素システムは全体目標を参照しつつ相互作用を変化させることから，Virtual SoS と比較して管理および運用の独立性が色濃く表れる超システムといえる．このことから，Collaborative SoS として CoLSys をモデル化する際には，管理および運用の独立性を陽にモデル化する必要があると考えられ，解決すべき課題は以下のようになる．

- 結合型ライフサイクルシステムズの要素システムの管理および運用の独立性を陽にモデル化しつつ，Collaborative SoS の特徴をモデルに反映

## 2.6. 結言

本章では対象とするライフサイクルデザイン，電気自動車，自動車シェアリング，戦略的マネジメントの関連研究をそれぞれ調査し，本研究目的の達成に向けた着眼点と解決すべき課題を示した．自動車の電動化とシェアリング普及では，輸送能力が異なるシェアリング車両と個人所有車間の需要代替による生産台数変化を反映すること，ライドシェアリング時の走行距離増加を反映すること，電動化とシェアリング普及の影響を統合した生産台数変化を反映することが解決すべき課題として挙げられた．また，社会目標を考慮した戦略的マネジメントでは，結合型ライフサイクルシステムズの要素システムの管理および運用の独立性を陽にモデル化しつつ，Collaborative SoS の特徴を結合型ライフサイクルシステムズのモデルに反映することが課題として挙げられた．

**参考文献**


[1] 木村文彦，梅田靖，高橋愼治，田中信寿，永田勝也，藤本淳，松橋隆治，三橋規宏，”インバースマニュファクチャリングハンドブック,” 丸善株式会社，2004 .

[2] Y. Umeda, S. Takata, F. Kimura, T. Tomiyama, JW Sutherland, S. Kara, C. Herrmann, and JR Duflou, “Toward integrated product and process life cycle planning- An environmental perspective,” CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 61, pp. 681–702, 2012.

[3] 小林英樹, “持続可能システムデザイン学,” 共立出版，2022.

[4] H. Kobayashi, A. Hongu, K. Haruki, and S. Doi, “A framework of eco-design support, In Proceedings of the First international conference on Environmentally conscious design and inverse manufacturing （ecodesign'99）. IEEE Computer Society, USA, pp. 680–684, 1999.

[5] Warwick Manufacturing Group, “Design for X,” University of Warwick, 2007.

[6] 山際康之, “組立性・分解性,” 精密工学会誌， Vol. 74, No. 8, pp.805-808, 2008

[7] G. Boothroyd, “Product design for manufacture and assembly,” Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 7, pp.505-520, 1993.

[8] M. Kwak and H.M. Kim, “Assessing product family design from an end-of-life perspective,” Engineering Optimization, Vol. 43, No. 3, pp.233-255, 2010.

[9] M.Z. Houschild, R.K. Rosenbaum, and S.L. Olsen, “Life Cycle Assessment Theory and Practice,” Springer, 2018.

[10] 伊坪徳宏，田原聖隆，成田暢彦, “LCA 概論,” 丸善出版事業部, 2007.

[11] ISO, “ISO 14040: 2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework,” 2006.

[12] G. Rebitzer and D. Hunkeler, “Life Cycle Costing in LCM: Ambitions, Opportunities, and Limitations,” International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.8, No.5, pp. 253-256, 2003.

[13] T. Kumazawa and H. Kobayashi, “A simulation system to support the establishment of circulated business,” Advanced Engineering Informatics, Vol. 20, Issue 2, pp. 127-136, 2006.

[14] Y. Umeda, A. Nonomura, and T. Tomiyama, “Study on life-cycle design for the post mass production paradigm,” Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM, Vol.14, Issue 2, pp. 149-161, 2000.

[15] S. Takata and T. Kimura, “Life Cycle Simulation System for Life Cycle Process Planning,” CIRP Annals, Vol.52, Issue 1, pp. 37-40, 2003.

[16] Y. Umeda, S. Takata, F. Kimura, T. Tomiyama, J.W. Sutherland, S. Kara, C. Herrmann,

J.R. Duflou, “Toward integrated product and process life cycle planning- An environmental perspective”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 61, No. 2, pp. 681–702, 2012.

[17] A. Yamada and S. Takata, “Life cycle management of industrial robots based on deterioration evaluation – facility layout and motion planning taking account of joint gear wear,” 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, IEEE Press, Tokyo, pp. 460–465, 2001.

[18] K. Gabel, P. Forsberg, and A.M. Tillman, “The design and building of a life cycle based process model for simulating environmental performance, product performance and cost in cement manufacturing”, Journal of Cleaner Production, Vol. 12, Issue 1, pp. 77– 93, 2004.

[19] F. Kimura and T. Hata, “Life cycle design and management based on simulation of service quality variation,” CIRP Seminar on Life Cycle Engineering, Copenhagen, Denmark, 2003.

[20] H. Komoto and T. Tomiyama, “Integration of a service CAD and a life cycle simulator,” CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 9-12, 2008.

[21] M. Garetti, P. Rosa, and S. Terzi, “Life Cycle Simulation for the design of Product–Service Systems”, Computers in Industry, Vol. 63, Issue 4, pp. 361-369, 2012.

[22] S. Fukushige, M. Nishioka, and H. Kobayashi, “Data-assimilated lifecycle simulation for adaptive product lifecycle management,” CIRP Annals, Vol. 66, Issue 1, pp. 37-40, 2017.

[23] B.C. Nielsen, P.G. Larsen, J. Fitzgerald, J. Peleska, “Systems of Systems Engineering: Basic Concepts, Model-Based Techniques, and Research Directions”, ACM Computing Surveys, Vol. 48, No.2 , 2015.

[24] M.W. Maier, “Architecting Principles for System-of-Systems”, Systems Engineering, Vol. 1, No.4, pp. 267-284, 1998.

[25] J. Dahmann, “Systems of Systems Characterization and Types,” NATO Science and Technology Organization, pp. 1- 14, 2015.

[26] H. Kobayashi, H. Murata, and S. Fukushige, “Connected lifecycle systems: A new perspective on industrial symbiosis,” Procedia CIRP, Vol.90, pp. 388-392, 2020.

[27] H. Kobayashi, T. Matsumoto, and S. Fukushige, “A simulation methodology for a system of product life cycle systems”, Advanced Engineering Informatics, Vol. 36, pp. 101-111, 2018.

[28] P. Morseletto, “Targets for a circular economy,” Resources, Conservation and Recycling, Vol. 153, 104553, 2020.

[29] H. Murata, N. Yokono, S. Fukushige, and H. Kobayashi, “A Lifecycle Simulation

Method for Global Reuse," International Journal of Automation Technology, Vol.12, No.6, pp. 813-821, 2018.

[30] G.P. Richirdson, "Reflections on the foundations of system dynamics," System Dynamics Review, Vol. 27, Issue 3, pp. 219–243, 2011.

[31] C. Macal and M. North, "Tutorial on agent-based modeling and simulation," Proceedings of the Winter Simulation Conference 2005, 2005.

[32] 片桐望，中島健一，原田幸明，"NIMS-EMC　材料環境情報データ　No.18 概説　資源端重量（Total Material Requirement; TMR）"，独立行政法人物質・材料研究機構元素戦略クラスター, 2009.

[33] T. Watari, B.C. McLellan, D. Giurco, E. Dominish, E. Yamasue, and K. Nansai, "Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity," Resources, Conservation and Recycling, Vol. 148, pp. 91-103, 2019.

[34] S.C. Davis, S.W. Diegel, and R.G. Boundy, "Transportation Energy Data Book," U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Vol. 31, 2012.

[35] T.R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, and A.H. Strømman, "Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles," Journal of Industrial Ecology, Vol. 17, pp. 53-64, 2013.

[36] F. Knobloch, S. V. Hanssen, A. Lam, H. Pollitt, P. Salas, U. Chewpreecha, M. A. Huijbregts, and J.F, Mercure, "Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time," Nature Sustainability, Vol.3, pp. 437—447, 2020.

[37] T. Watari, B.C. McLellan, D. Giurco, E. Dominish, E. Yamasue, and K. Nansai, "Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity," Resources, Conservation and Recycling, Vol. 148, pp. 91-103, 2019.

[38] Acatech—National Academy of Science and Engineering; Circular Economy Initiative Deutschland. Resource-Efficient Battery Life Cycles. Driving Electric Mobility with the Circular Economy; National Academy of Science and Engineering: Munich, Germany, 2020

[39] 矢野経済研究所, "2020 自動車メーカのスマートカー戦略と市場展望," 資料コード：C62111300, 2020.

[40] H. Liu, Y. Yang, J. Qi, J. Li, H. Wei, and P. Li, （2017）, Frequency droop control with scheduled charging of electric vehicles. IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 11, pp. 649-656, 2017.

[41] D. Orihara, S. Kimura, and H. Saitoh, "Frequency Regulation by Decentralized V2G Control with Consensus-Based SOC Synchronization," IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, pp. 604–609.

[42] T. Kobashi and M. Yarime, "Techno-economic assessment of the residential photovoltaic systems integrated with electric vehicles: a case study of Japanese households towards 2030," Energy Procedia, Vol.158, pp. 3802-3807, 2019.

[43] M. Digk, R.J. Orsato, and R. Kemp, "The emergence of an electric mobility trajectory", Energy Policy, Vol. 52, pp. 135-145, 2013.

[44] DJ. Fagnant and KM Kockelman, "The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios," Transportation Research Part C, Vol. 40, pp. 1-13, 2014.

[45] D. Burchart-Korol, S. Jursova, P. Folęga, J. Korol, P. Pustejovska, and A. Blaut, "Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic," Journal of Cleaner Production, Vol. 202, pp. 476-487, 2018.

[46] Y. Bicer and I. Dincer, "Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles," Resources, Conservation and Recycling, Vol. 132, pp. 141-157, 2018.

[47] F. Del Pero, M. Delogu, and M. Pierini, "Life Cycle Assessment in the automotive sector: A comparative case study of Internal Combustion Engine （ICE） and electric car," Procedia Structural Integrity, Vol. 12, pp. 521-537, 2018.

[48] A. Nordelöf, M. Messagie, A.M. Tillman, M. Ljunggren Söderman, and J. Van Mierlo, "Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment?," International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 19, No. 11, pp. 1866-1890, 2014.

[49] C. Bauer, J. Hofer, H.J. Althaus, A. Del Duce, and A. Simons, "The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework," Applied energy, Vol. 157, pp. 871-883, 2015.

[50] P. Girardi, A. Gargiulo, and P.C. Brambilla, "A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study," International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 20, No. 8, pp. 1127-1142, 2015.

[51] C. Machado, N. Marie, F. Berssaneti, and J. Quintanilha, "An Overview of Shared Mobility", Sustainability, Vol. 10, No. 12, 2018.

[52] S. Shaheen, N. Chan, A. Bansal, A. Cohen, "Shared Mobility: A Sustainability and Technologies Workshop—Definitions, Industry Developments, and Early Understanding", Transportation Sustainability Research Center, University of California, 2015.

[53] CENTER FOR AUTOMOTIVE RESEARCH, "The Impact of New Mobility Services

on the Automotive Industry”, （2016）.

[54] 公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団, “カーシェアリングによる環境負荷低減効果の検証報告書”, 公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団, 2013.

[55] J. Jung and Y. Koo, “Analyzing the Effects of Car Sharing Services on the Reduction of Greenhouss Gas （GHG） Emissions,” Sustainability, Vol. 10, No. 2, 539, 2018.

[56] R. Katzev, “Car Sharing: A New Approach to Urban Transportation Problems,” Analyses of Social Issues and Public Policy, Vol. 3, No. 1, pp. 65-86, 2003.

[57] P. Baptista, S. Melo, and C. Rolim, “Energy, Environmental and Mobility Impacts of Car-sharing Systems. Empirical Results from Lisbon,” Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 111, No. 5, pp. 28-37, 2014.

[58] D. Fagnant and K. Kockelman, “Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas”, Transportation, Vol. 45, No. 1, pp. 143-158, 2018.

[59] C. Machado, N. Marie, F. Berssaneti, and J. Quintanilha, “An Overview of Shared Mobility,” Sustainability, Vol. 10, No. 12, 2018.

[60] S. Gupta, A. Buriro, and B. Crispo, “DriverAuth: Behavioral biometric-based driver authentication mechanism for on-demand ride and ridesharing infrastructure,” ICT Express, Vol. 5, No. 1, pp. 16-20, 2019.

[61] V. Carranza, K. Chow, H. Pham, E. Rosewell, and P. Sun, “Life Cycle Analysis: Uber vs. Car Ownership”, 2016.

[62] R. Smart, B. Rowe, A. Hawken, M. Kleiman, N. Mladenovic, P. Gehred, and C. Manning, “Faster and Cheaper: How Ride-Sourcing Fills a Gap in Low-Income Los Angeles Neighborhoods”, BOTEC Analysis Corporation, 2015.

[63] F. Aimei, G. Circella, S. Handu, and P. Mokhtarian, “What influences travelers to use Uber? Exploring the factors affecting the adoption of on-demand ride services in California,” Travel Behaviour and Society, Vol. 13, pp. 88-104, 2018.

[64] G. Erhardt, S. Roy, D. Cooper, B. Sana, M. Chen, and J. Castiglione, “Do transportation network companies decrease or increase congestion?,” Science Advances, Vol. 5, No. 5, 2019.

[65] M. Furuhata, M. Dessouky, F. Ordonez, M.E. Brunet, X. Wang, and S. Koeing, “Ridesharing: The state-of-the-art and future directions,” Transportation Research Part B, Vol. 57, pp. 28-46, 2013.

[66] D. Fiedler, M. Cap, and M. Certicky, “Impact of Mobility-on-Demand on Traffic Congestion: Simulation-based Study”, 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2017.

[67] E. Amasawa, T. Shibata, H. Sugiyama, and M. Hirao, “Environmental potential of reusing, renting, and sharing consumer products: Systematic analysis approach,” Journal of Cleaner Production, Vol. 242, 118487, 2020.

[68] O. Guyon, “Methodology for the Life Cycle Assessment of a Car-sharing Service,” Master’s thesis performed at Groupe PSA and submitted at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm as part of an MSc. Course code: SD221X, 2017.

[69] A. D. Chandler, “Strategy and Structure: Chapters in the History of the American Industrial Enterprise,” Beard Books, New York, NY, USA, 1962.

[70] K. R. Andrews, “The Concept of Corporate Strategy,” Irwin, Homewood, IL, USA, 1971.

[71] M. Farjoun, “Towards an organic perspective on strategy,” Strategic Management Journal, Vol. 23, No. 7, pp. 561–594, 2002.

[72] F. R. David, “Strategic Management: Concepts and Cases,” Prentice-Hall, New Jersey, 1998.

# 第3章　自動車の電動化と製品共有を考慮したモデル化とシミュレーション

## 3.1. 緒言

本章では自動車の電動化と製品共有，つまりはシェアリングを考慮した LCS モデルを提案していく．Fig. 2-1 に示すように，既存の LCS 手法ではガソリン自動車と電気自動車の同時普及をモデル化することが可能であるが，本章ではさらにシェアリング普及を考慮できるように既存の LCS モデルの拡張を目指す．2.5.1 節にて指摘したように，拡張する際に発生する課題として以下の三点が挙げられる（Fig. 3-1）．

- 輸送能力が異なるシェアリング車と個人所有車間の需要代替による生産台数変化の反映
- ライドシェアリング時の走行距離増加の反映
- シェアリング普及と電動化による生産台数変化の反映

シェアリング車両および個人所有車の輸送能力を違いおよびライドシェアリング時の走行距離増加を反映するにあたって，本研究では自動車の個人所有からシェアリングへの代替を移動需要の代替として捉え，それを起点として輸送能力および走行距離のモデル化を行う．また，シェアリング普及と電動化の同時普及による生産台数変化に対しては，それぞれの影響を順番に生産台数に反映させる二段階分配メカニズムの導入によって LCS モデルに反映させる．

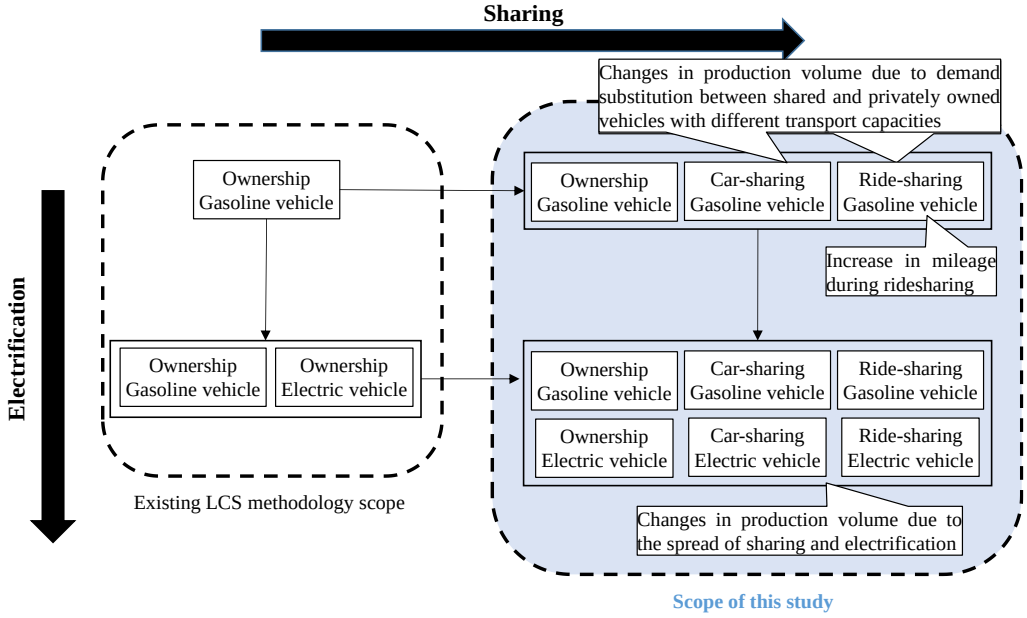



Fig. 3-1 Scope of this study

### 3.2. 輸送能力とライドシェアリング時の走行距離のモデル化

輸送能力とライドシェアリング時の走行距離のモデル化を行う前に，まず個人所有から製品共有への代替とは何を意味しているのか整理する．既存の LCS 研究では製品間の需要代替のモデル化が行われている．これは普及する製品の変化を表現しており，既存製品の普及量減少に合わせて新製品の普及量が増加する．このとき，製品全体の需要が一定の場合，既存製品の減少量と新製品の増加量は同じ大きさとなる．一方で，個人所有から製品共有への代替，つまりは使用形態間の需要代替では何が代替されているのか．製品共有はある一つの製品が複数のユーザによって共有されている状態を意味するが，ユーザはその製品が持つ機能を共有していると捉えることができる．自動車シェアリングの場合，自動車が持つ「人やモノを移動させる」という機能を共有していると言え，このことから自動車の個人所有から自動車シェアリングへの需要代替では人々の移動需要が代替されていると捉えることができる．

以上の考察から，本研究では移動需要を起点として自動車シェアリングの LCS モデルの構築を行っていく．ここで，移動需要は輸送人キロを単位とする人々の移動規模を表すとし，平均乗車人数に平均走行距離とその使用形態の車両台数を乗じて算出する．つまり，各使用形態の普及はこの移動需要の大きさの変化で表され，各使用形態で必要な自動車台数はそれぞれの平均乗車人数と平均走行距離から算出することができる．

#### 3.2.1.輸送能力モデル

ここで自動車シェアリングの輸送能力のモデル化を検討する．一般に，自動車シェアリングで用いられる車両は個人所有車と比較して稼働率が高く，より少ない車両数でユーザの移動需要を賄うことが可能だとされている．しかし，車両ごとの稼働率があまりにも高いと，利用したい時に利用できない状態が発生し，自動車シェアリングのサービス低下を招く．そのため，自動車シェアリング車両の稼働率には上限があり，それが自動車シェアリング車両の輸送能力を規定することに用いることができると考えられる．本研究では自動車シェアリング車両の輸送能力を個人所有車の平均走行距離，自動車シェアリング時の平均乗車人数，自動車シェアリング車両の最大稼働率を乗することで算出する（式（3-1, 2, 3））．ここで，自動車シェアリング車両の最大稼働率は自動車シェアリング車両 1 台が代替可能な個人所有車最大台数を意味する．この自動車シェアリング車両の輸送能力を LCS でモデル化することで，自動車シェアリングにて必要な車両台数を算出し，自動車シェアリング普及に伴う生産台数変化を反映させることが可能になる．

$$TC_{own} = P_{own} * M_{own} \tag{3-1}$$

$$TC_{car} = P_{car} * M_{own} * UR_{car_max} \tag{3-2}$$

$$TC_{ride} = P_{ride} * M_{own} * UR_{ride_max} \quad (3\text{-}3)$$

where

$P_{own}$: Average number of pasenger per ownership vehicle

$P_{Car}$: Average number of pasenger per car-sharing vehicle

$P_{ride}$: Average number of pasenger per ride-sharing vehicle

$M_{own}$: Monthly mileage per ownership vehicle

$UR_{car_max}$: maximum utilization rate of car-sharing vehicles

$UR_{ride_max}$: maximum utilization rate of ride-sharing vehicles

$TC_{own}$: Transport capacity of ownership vehicle

$TC_{car}$: Transport capacity of car-sharing vehicle

$TC_{ride}$: Transport capacity of ride-sharing vehicle

### 3.2.2.ライドシェアリング時の走行距離モデル

続いて，ライドシェアリング時の走行距離のモデル化であるが，本研究ではその走行距離は有効距離と無効距離の合計として捉える．ここで，有効距離とはドライバーもしくは乗客いずれかの移動需要を満たす移動距離であり，無効距離はどちらの移動需要も満たしていない移動距離を意味する．ライドシェアリングへの移行が進むごとにライドシェアリング時の輸送人キロが増加し，ライドシェアリング時の走行距離は増加していくと考えられる．また，平均乗車人数の増加によってより効率のいい輸送が可能になり，走行距離が減少すると考えられる．このような走行距離はドライバーもしくは乗客の移動需要を満たす有効距離である．一方で，ライドシェアリングを行う場合，乗客がいる場所まで迎えにいくための迂回路などの，ドライバーおよび乗客の移動要求を満たさない無効距離が発生する可能性がある．このことから，ライドシェアリング時の総走行距離は有効距離と無効距離の和であり，式（3-4, 5）に示すように，有効距離を総走行距離における有効距離の割合で除することによってライドシェアリング時の総走行距離を算出する．この有効距離割合が大きいほどより効率的な移動が行われていることを意味する．

$$EM_{ride_per} = \frac{TD_{ride}}{P_{ride} \cdot N_{ride}} \quad (3\text{-}4)$$

$$M_{ride_per} = \frac{EM_{ride_per}}{R_{eff}} \quad (3\text{-}5)$$

where

$TD_{ride}$: Travel demand for ride-sharing

$P_{ride}$: Average number of pasenger per ride-sharing vehicle

$N_{ride}$: Number of ride-sharing vehicles

$R_{eff}$: Rate of effective mileage during ride-sharing

$EM_{ride_per}$: Effective mileage per ride-sharing vehicle
$M_{ride_per}$: Monthly mileage per ride-sharing vehicle

上記の移動需要を起点とした自動車シェアリング車両の輸送能力モデルとライドシェアリング時の走行距離モデルを含めた LCS モデルを構築するにあたって関連するパラメータの因果関係図を構築した．因果関係図を Fig. 3-2 に示す．個人所有，カーシェアリング，そしてライドシェアリングの使用形態間で移動需要の代替が発生し，その移動需要に基づいて，使用中台数が算出され，廃棄台数，生産台数に影響を与える．使用中台数を算出するにあたって，各使用形態の車両の輸送能力が用いられる．また，輸送能力が高く，平均走行距離が長くなる自動車シェアリング車両はより早く寿命を迎えることになり，生産台数を増加させる．ライドシェアリング時の走行距離については有効走行距離割合を用いることで，迂回路の発生による総走行距離の増加を考慮する．

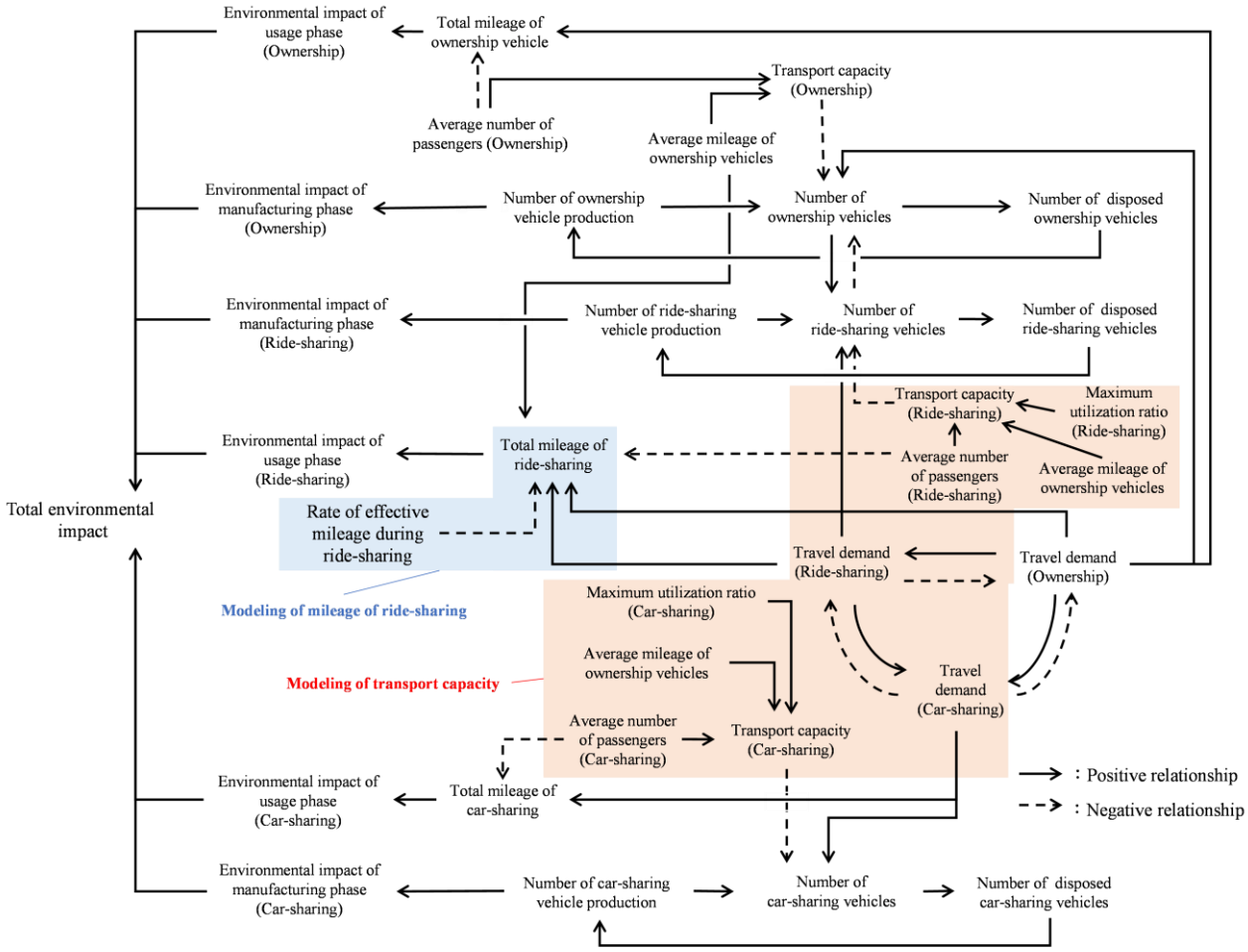



Fig. 3-2 Causal diagram of parameters related to proposed LCS model

### 3.3. 二段階分配メカニズム

シェアリングサービスの普及の効果として，製品の稼働率を向上させ，消費者の需要に対して必要な製品の全体量を減少させることが期待される．代替製品の普及の効果については，製品の全体量には影響を与えず，その内訳を変化させるにとどまると考えられる．これらの同時普及を LCS 上で評価するためにはサービス普及に伴う生産台数変化と代替製品の普及による生産台数変化の統合を図る必要がある．既存の LCS 手法では新製品への移行やシェアリングサービスへの需要の移り変わりを個別にモデル化し，それぞれに普及シナリオや移行シナリオを割り当てる必要がある．しかし，Fig. 3-3（a）に示すように，複数製品の普及状況と複数の使用形態を組み合わせることで考慮するべき需要の移り変わりは膨大になり，それぞれの生産台数への影響を矛盾なく統合することは困難である．

本研究では Fig. 3-3（b）に示すように複数製品と複数使用形態の需要と生産台数に関する情報を集約化し，自動車シェアリング普及の影響と電気自動車普及の影響を生産台数に二段階で反映する仕組みを導入する．本研究ではこの仕組みを二段階分配メカニズム（Two-stage allocation mechanism） と呼ぶ．シェアリングサービス普及は個人所有，カーシェアリングサービス，ライドシェアリングサービスの各移動需要を変動さ

せ，その結果として自動車全体の生産台数も変動させる．一方で，電気自動車普及は各サービスの移動需要には影響を与えず，電気自動車台数を増加させる．したがって，シェアリングサービス普及に基づく分配では，全体の移動需要が各サービスへ分配され，サービス別で需要を考慮しながら生産台数が算出される．また，電気自動車普及に基づく分配では全体生産台数の各車種への分配が行われる．

二段階分配メカニズムでは分配順序の違いから二つのパターンが考えられる．一つ

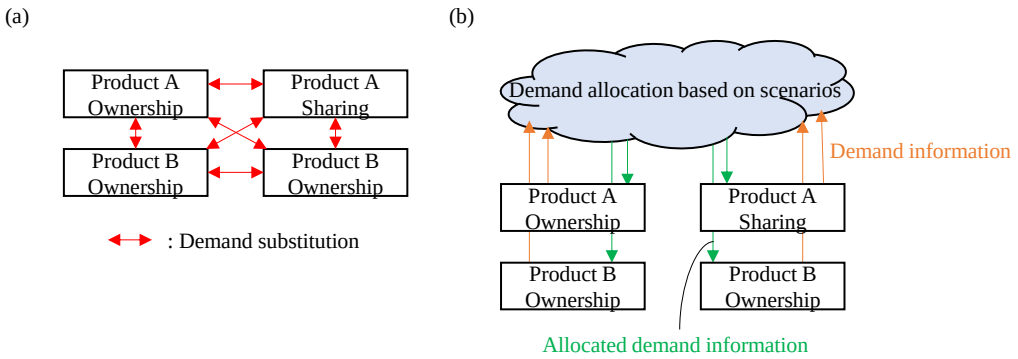
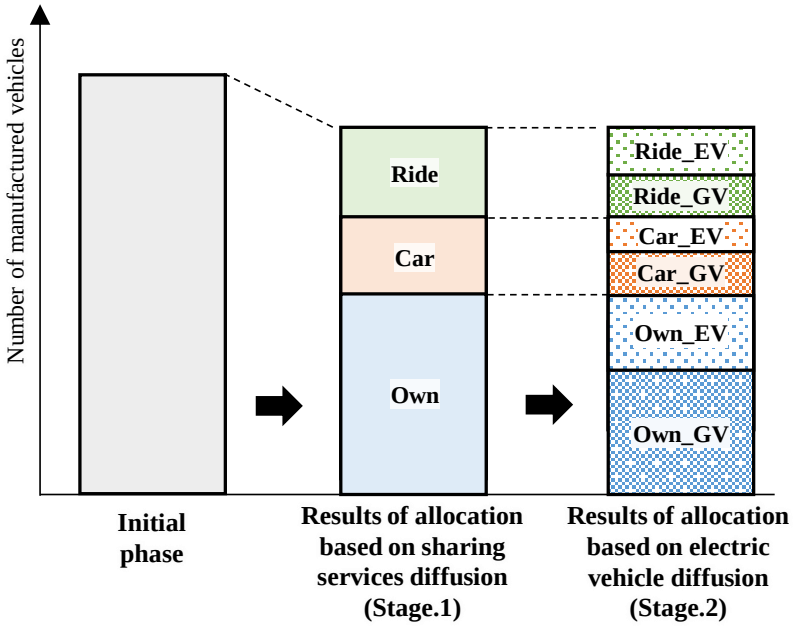


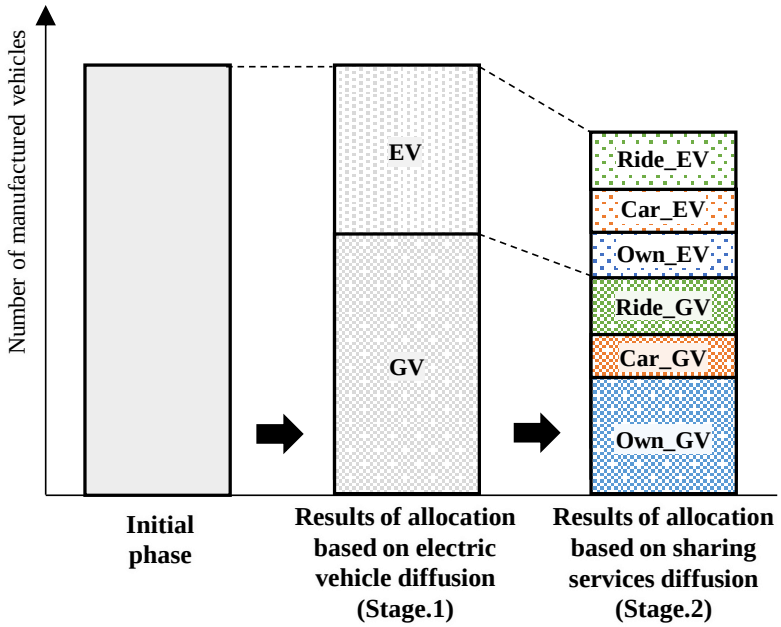

Fig. 3-3 How to allocate demand in LCS model;
（a） Previous LCS method, （b） Proposed LCS method

は最初にシェアリングサービス普及の影響を反映するパターンであり，もう一つは最初に電気自動車普及の影響を反映するパターンである．前者は自動車シェアリングサービス主導の分配であり，後者は製品普及主導の分配と言える．Fig. 3-4 は最初にシェアリングサービス普及の影響を反映する二段階分配メカニズムを示している．まず一段階目で個人所有，カーシェアリングサービス，ライドシェアリングサービスの移動需要を基にサービス別に生産台数が算出される．このとき全体の生産台数が変動する可能性がある．二段階目では製品を基に分配が行われ，各サービスで使用される車両がガソリン自動車と電気自動車に分配される．このとき，全体の生産台数は変化せずに電気自動車普及率に基づいて各車種に生産台数が分配される．Fig. 3-5 は電気自動車普及の影響を先に反映する二段階分配メカニズムを示しており，Fig. 3-4 と同様に，分配の流れと各分配での生産台数変化を示している．




Own: Ownership vehicle, Car: Car-sharing vehicle, Ride: Ride-sharing vehicle
GV: Gasoline vehicle, EV: Electric vehicle

Fig. 3-4 Two-stage allocation mechanism that allocation based on sharing services diffusion is primary




Own: Ownership vehicle, Car: Car-sharing vehicle, Ride: Ride-sharing vehicle
GV: Gasoline vehicle, EV: Electric vehicle

Fig. 3-5 Two-stage allocation mechanism that allocation based on electric vehicle diffusion is primary

この提案モデルを計算機上に実装した．システムの構成は Fig. 3-6 に示す通りである．本研究で追加したシステムについては赤線で示している．各システムについて説明する．

- Database editor

  LCS 実施に向けた基本データを作成するシステム．Product DB では製品の部品構成やその階層関係が格納され，Process DB では製造データや製品の使用状況など対象となる各ライフサイクルプロセスのデータが格納される．LCA DB には，電力や材料，工程ごとの環境負荷原単位データなどが格納される．

- Two-stage allocated mechanism editor

  提案手法を計算機上に実装するために追加したシステムであり，分析者が対象とする製品やサービスの情報やそれぞれがマテリアルフローに与える影響に関するデータを編集するシステム．それらは Two-stage allocated mechanism DB に格納され，Process DB への渡されることで製品とサービスの同時普及時の自動的な需要分配を可能にする．

- LCS model editor

  Product DB，Process DB，LCA DB にて格納されているデータを用いて単一製品または製品群の LCS モデルを構築するシステム．

- SoS model editor, LCS4SoS Model manager

  個別 LCS モデルを相互作用の設定を通して接続するシステム．SoS model editor で入力された情報は LCS4SoS Model manager 上に反映され，LCS モデル間の相互作用と CoLSys の境界が可視化される．

- Simulation engine

構築した LCS モデルを対象として LCS を実行するシステム．

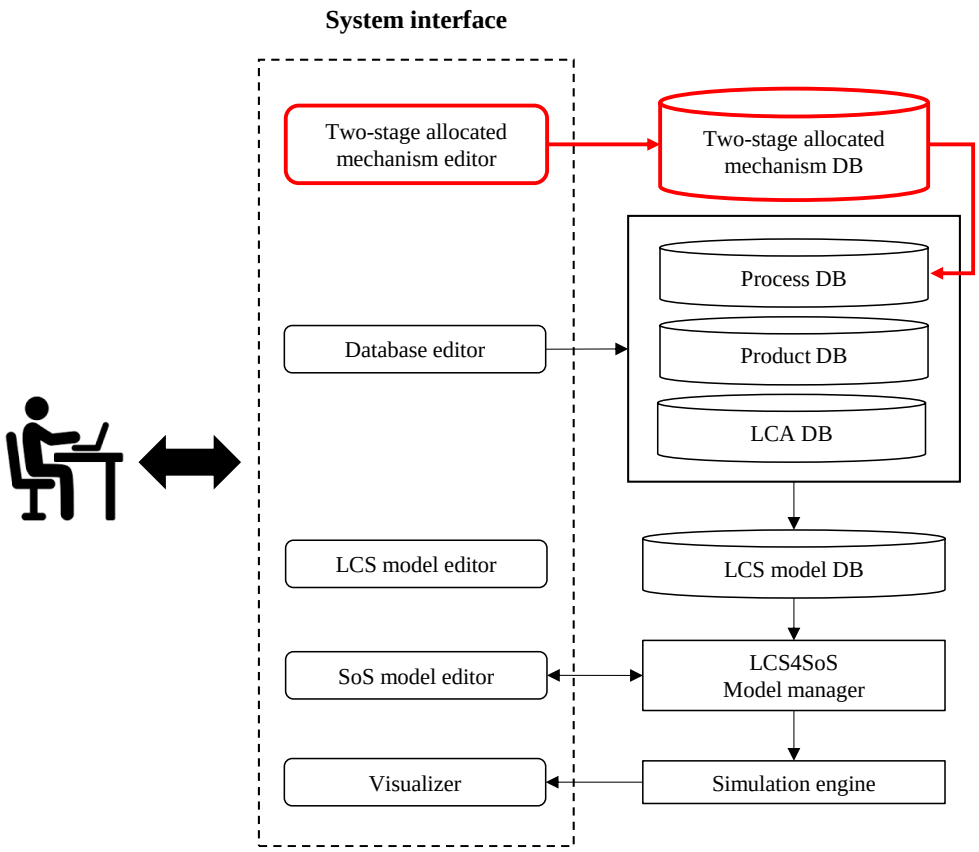



Fig. 3-6 System configuration

## 3.4. シミュレーション手順

Fig. 3-7 にシミュレーション手順を示す．太線で囲われた箇所が本提案手法で追加

した箇所である．Step.1 では，システムバウンダリが設定される．本研究では，対象製品として，ガソリン自動車と電気自動車を選択し，個人所有やカーシェアリングなどの使用形態を選択する．Step.2 では対象製品の構成部品や寿命などの製品由来のデータを収集し，製品モデルを構築する．Step.3 では，ライフサイクルプロセスモデルを構築する．まずは，従来の LCS モデルと同様，資源採掘から廃棄に至る，対象製品のライフサイクルプロセスモデルが構築される（3-1）．その後，後述する二段階分配メカニズムを構築し (3-2)，ライフサイクルプロセスモデルに組み込む. 最後に，Step.4 にて構築した製品モデルとライフサイクルプロセスモデルを組み合わせて LCS モデルを構築し，シミュレーションを実行する．

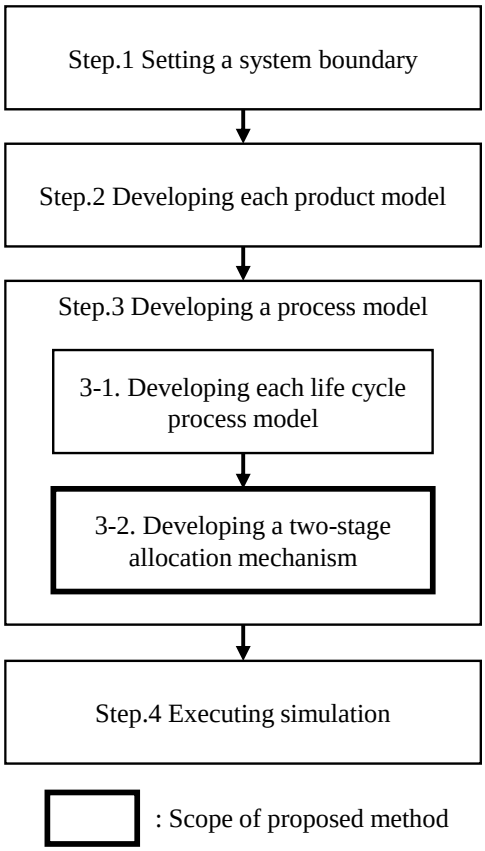



Fig. 3-7 Procedure of proposed LCS method

## 3.5. ケーススタディ

### 3.5.1.システムバウンダリの設定

提案したシミュレーション手法に沿ってケーススタディを実施した．まずはシステムバウンダリを設定した．本ケーススタディでは，対象製品として，電気自動車とガ

ソリン自動車を選択した（Table. 3-1）．電気自動車は日産リーフを想定する．ガソリン自動車は 1,300cc 相当の排気量を搭載しているコンパクトカークラスのものを想定する．Table. 3-2 にガソリン自動車と電気自動車の構成材料とその使用量を示す[1]．文献[1]ではガソリン自動車にセダンクラスの車両を想定しており，本研究では重量比に基づいてコンパクトカークラスの車両の構成材料を算出している．ガソリン自動車にはエンジン，パワートレイン，ドアや内装を含めたグライダーで構成されている．電気自動車には容量が 24kWh のリチウムイオン電池が搭載されている．電気自動車はモータ，リチウムイオン電池，グライダーで構成されている．それぞれの車両の構成材料およびその使用量については時間変化しないと仮定している．

Table. 3-1 Specification of target products [1][2]

| Product | Specification |
|---|---|
| Gasoline vehicles (GV) | 1300-cc internal combustion engine equivalent (Compact car) |
| Electric vehicles (EV) | Corresponsive as above. Energy density of battery: 24kWh. |

Table. 3-2 Raw material intensity of GV and EV [1]

| Material | GV kg / Unit | EV kg / Unit |
|---|---|---|
| Li | 0 | 6.74 |
| Mg | 0.2 | 0.2 |
| Al | 59.9 | 77.3 |
| Mn | 10.9 | 29.3 |
| Fe | 889 | 910 |
| Co | 0 | 18.4 |
| Ni | 0 | 18.4 |
| Cu | 20.8 | 86.4 |
| Zn | 100 | 0.1 |
| Nd | 0 | 0.497 |
| Pt | 0.00154 | 0 |
| Pb | 0.3 | 0.31 |

### 3.5.2.ライフサイクルシミュレーションモデル構築

選択した各対象製品の LCS モデルを構築した．3.5.1 節で示した対象製品情報を基に製品モデルを構築し，各製品のライフサイクルプロセスモデルを構築する．Fig. 3-8 の上部にガソリン自動車，下部に電気自動車のライフサイクルプロセスモデルを示す．ガソリン自動車と電気自動車のライフサイクルプロセスモデルは素材製造，部品生産，製品生産，使用，部品交換，廃棄のライフサイクルプロセスから構成される．

本研究では，使用プロセスにおいて（1）自動車が個人所有されていて個人利用のみされる個人所有車，（2）自動車が個人所有されていてライドシェアリングにも利用されるライドシェアリング車，（3）自動車がカーシェアリング会社に所有されていてカーシェアリングサービスに利用させるカーシェアリング車の三つの使用モードを想定する．（1）は従来の自動車の使用モードである．（2）は現在北米で展開されている Uber や Lift といったオンデマンドライド型のライドシェアリングを想定している．（3）は日本のタイムズカーシェアのように決められた駐車場に自動車を返却するステーション型のカーシェアリングを想定している．使用プロセスは 3.2 節にて示した因果関係図（Fig. 3-2）を基にモデル化を行っている．

部品交換プロセスでは経年劣化した部品を交換する．電気自動車モデルでは劣化した電池が交換される．廃棄プロセスでは廃棄判断された車両が回収され，分解・破砕された後リサイクルが行われる．リサイクルされる素材は鉄，銅，アルミニウムである．各素材のリサイクル率や部品ごとの破砕の有無は文献[2]を参考にした．

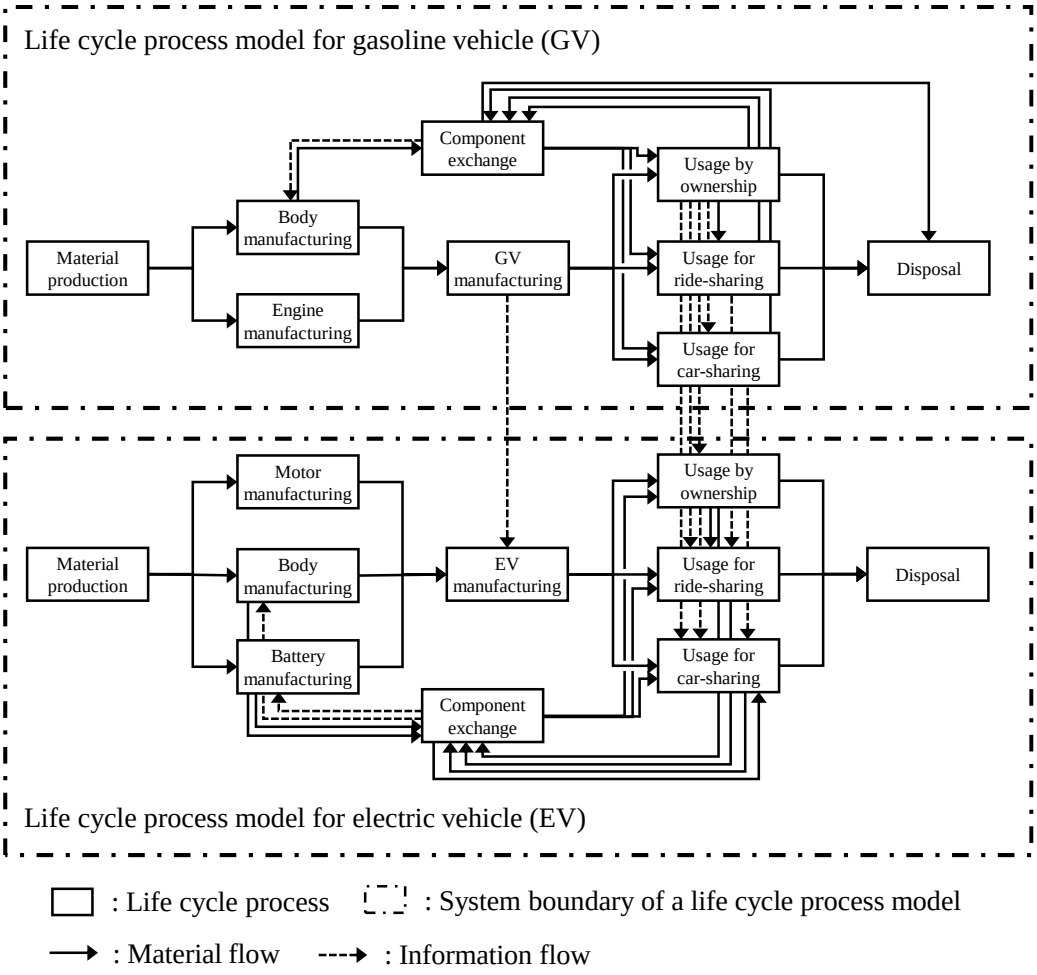



Fig. 3-8 Developed life cycle process models

Table. 3-3 Environmental load of GV and EV [2][4]

| | **$CO_2$ emissions kg-$CO_2$** | | **TMR t-TMR** | |
|---|---|---|---|---|
| | **GV** | **EV** | **GV** | **EV** |
| Material manufacturing | 2,101 | 3,798 | 18 | 70 |
| Components manufacturing | 358.8 | 2,815 | - | - |
| Products manufacturing | 514.8 | 609.3 | - | - |
| Usage per km | $1.381 \times 10^{-1}$ (in 2015) | $5.733 \times 10^{-2}$ (in 2015) | $1.0 \times 10^{-4}$ (in 2015) | $2.0 \times 10^{-4}$ (in 2015) |
| | $1.381 \times 10^{-1}$ (in 2030) | $4.111 \times 10^{-2}$ (in 2030) | $1.0 \times 10^{-4}$ (in 2030) | $1.6 \times 10^{-4}$ (in 2030) |
| Disposal | -752.6 | -1,294 | -9.1 | -33 |

各ライフサイクルプロセスの環境負荷を Table. 3-3 に示す．本研究では評価単位として $CO_2$ 排出量と関与物質総量（TMR：Total Material Requirement）を用いた．TMR とは，採鉱時の土砂等の隠れたフローと呼ばれる経済外のフローを含めた天然資源フロー量を指す[3]．電気自動車の使用時 $CO_2$ 排出量原単位と TMR 原単位は発電ミックスに依存し，時間経過と共に変化する．Table. 3-3 では 2015 年時点と 2030 年時点での走行時 $CO_2$ 排出量原単位と走行時 TMR 原単位を示している．発電ミックスの推移は文献[4]を基に設定した．

### 3.5.3.二段階分配メカニズムを含めたライフサイクルプロセスモデル構築

本研究では普及シナリオを設定し，二段階分配メカニズムによってその影響を順番に反映させる．ここで 2 パターンの二段階分配メカニズムを構築する．一つは最初にシェアリング普及の影響が反映され，その後に電気自動車普及の影響が反映されるパターン（Fig. 3-3）．もう一つは最初に電気自動車普及の影響が反映され，その後にシェアリングサービス普及の影響が反映されるパターンである （Fig. 3-4）．

前者は，自動車会社はユーザの需要変化に最優先で対応すると仮定し，全体の自動車需要に関連するシェアリングサービス普及の影響を優先的に生産台数に反映させている．これは以下に示す式によって計算機上で実装される．まず，各ライフサイクルプロセスモデルで計算された移動需要や生産台数，使用中台数が使用形態別にまとめられる．

$$D_{car}(t) = D_{car-gv}(t) + D_{car-ev}(t) \quad (3\text{-}6)$$

$$D_{ride}(t) = D_{ride-gv}(t) + D_{ride-ev}(t) \quad (3\text{-}7)$$

$$D_{own}(t) = D_{all}(t) - D_{car}(t) - D_{ride}(t) \quad (3\text{-}8)$$

$$M_{own}(t) = M_{own-gv}(t) + M_{own-ev}(t) \quad (3\text{-}9)$$

$$M_{car}(t) = M_{car-gv}(t) + M_{car-ev}(t) \quad (3\text{-}10)$$

$$M_{ride}(t) = M_{ride-gv}(t) + M_{ride-ev}(t) \quad (3\text{-}11)$$

$$A_{own}(t) = A_{own-gv}(t) + A_{own-ev}(t) \quad (3\text{-}12)$$

$$A_{car}(t) = A_{car-gv}(t) + A_{car-ev}(t) \quad (3\text{-}13)$$

$$A_{ride}(t) = A_{ride-gv}(t) + A_{ride-ev}(t) \quad (3\text{-}14)$$

where

$D_i(t)$: Travel demand of product i

$M_i(t)$: Production volume of product i

$A_i(t)$：Number of product i in usage phase

$own$: Ownership vehicle

$own - \mathrm{gv}$: Ownership gasoline vehicle

$own - ev$: Ownership electric vehicle

$car$: Carsharing vehicle

$car - \mathrm{gv}$: Carsharing gasoline vehicle

$car - ev$: Carsharing electric vehicle

$ride$: Ridesharing vehicle

$ride - \mathrm{gv}$: Ridesharing gasoline vehicle

$ride - ev$: Ridesharing electric vehicle

$all$: Whole of targeted products

まとめた後，シミュレーションシナリオとして設定される各使用形態の需要変化を基に生産台数の調整を行う．本研究では，主に個人利用からカーシェアリング，ライドシェアリングへの移動需要の移行を想定している．そのため，生産台数の減少調整は個人利用車で，生産台数の増加調整はカーシェアリングで行われる．カーシェアリングでは，1 台あたりの走行距離が基準以上に到達した場合，追加で新規車両が生産されるとした．一方で，ライドシェアリング車については，個人利用プロセスからの個人利用車の移行台数によって使用台数が調整される．ライドシェアリング車 1 台あたりの走行距離が基準以上に到達した場合，個人利用プロセスからライドシェアリングプロセスへの移行車両が発生する．

$$D_{own-change}(t) = D_{own-pre}(t) - D_{own}(t) \quad (3\text{-}15)$$

$$M_{own-change}(t) = \frac{D_{own-dif}(t)}{\overline{P_{own}} * \overline{T_{own}}} \quad (3\text{-}16)$$

$$M_{own-adj} = M_{own}(t) + M_{own-change}(t) \quad (3\text{-}17)$$

$$\overline{T_{car}(t)} = \frac{D_{car-pre}(t)}{\overline{P_{car}} * A_{car}(t)} \quad (3\text{-}18)$$

$$M_{car-adj} = \begin{cases} M_{car}(t) \quad if \ \ (T_{car}(t) < \underline{T_{car}}) \\ M_{car}(t) + M_{car-add} \quad if \ \ (T_{car}(t) \geq \underline{T_{car}}) \end{cases} \tag{3-19}$$

$$\overline{T_{ride}(t)} = \frac{D_{ride-pre}(t)}{\overline{P_{ride}} * A_{ride}(t)} \tag{3-20}$$

$$C_{ride}(t) = \begin{cases} 0 \ \ if \ \ (T_{ride}(t) < \underline{T_{ride}}) \\ \frac{D_{ride-pre}(t)}{\overline{P_{ride}} * \underline{T_{ride}}} - A_{ride}(t) \ \ if \ \ (T_{ride}(t) \geq \underline{T_{ride}}) \end{cases} \tag{3-21}$$

where

$D_{own-change}(t)$：Change in travel demand of ownership vehicle

$D_{own-pre}(t)$：Travel demand prediction value of ownership vehicle

$M_{own-change}(t)$：Change in production volume of ownership vehicle

$M_{own-adj}$：Adjusted production volume of ownership vehicle

$D_{car-pre}(t)$：Travel demand prediction value of carsharing vehicle

$\overline{T_{car}(t)}$：Average mileage of carsharing vehicles

$\underline{T_{car}}$：Limit mileage of carsharing vehicles

$M_{car-add}$：Additional production volume of carsharing vehicle

$M_{car-adj}$：Adjusted production volume of carsharing vehicle

$D_{ride-pre}(t)$：Travel demand prediction value of ridesharing vehicle

$\overline{T_{ride}(t)}$：Average mileage of ridesharing vehicles

$\underline{T_{ride}}$：Limit mileage of ridesharing vehicles

$C_{ride}(t)$：Number of vehicles transitioning from ownership vehicle to ridesharing vehicle

計算された生産台数および移行台数を各製品へと分配していく．本ケーススタディではガソリン自動車と電気自動車に分配される．生産台数については EV 販売割合を設定して分配していく．このとき，本ケーススタディでは電気自動車からガソリン自動車への移行は発生しないものとする．移行台数については，個人利用されているガソリン自動車と電気自動車の台数割合から分配を行う．この分配結果は各製品ライフサイクルの製造プロセスや使用プロセスへと送られる．

後者では自動車会社は燃費規制などの規制や政策への対応を最優先で対応した後に需要変化に対応する．式（3-6）から（3-13）までの情報の集約化がなされた後，まず車種別に生産台数が分配される．

$$M_{own-ev-dummy}(t) = M_{own}(t) * B(t) \tag{3-21}$$

$$M_{own-gv-dummy}(t) = M_{own}(t) - M_{own-ev}(t) \tag{3-22}$$

$$M_{car-ev-dummy}(t) = M_{car}(t) * B(t) \tag{3-23}$$

$$M_{car-gv-dummy}(t) = M_{car}(t) - M_{car-ev}(t) \tag{3-24}$$

$$M_{ride-ev-dummy}(t) = M_{ride}(t) * B(t) \tag{3-25}$$

$$M_{ride-gv-dummy}(t) = M_{ride}(t) - M_{car-ev}(t) \tag{3-26}$$

where

$i - j - dummy$：Dummy value related to usage type $j$ and product $i$

その後，各使用形態の需要変化を基に式（3-21）から（3-26）で算出した生産台数の調整が行われる．

$$D_{own-change}(t) = D_{own-pre}(t) - D_{own}(t) \tag{3-27}$$

$$M_{own-change}(t) = \frac{D_{own-dif}(t)}{\overline{P_{own}} * \overline{T_{own}}} \tag{3-28}$$

$$M_{own-gv} = M_{own-ev-dummy}(t) - M_{own-change}(t) * \frac{A_{own-gv}}{A_{own}} \tag{3-29}$$

$$M_{own-ev} = M_{own-ev-dummy}(t) - M_{own-change}(t) * \frac{A_{own-ev}}{A_{own}} \tag{3-30}$$

$$\overline{T_{car}(t)} = \frac{D_{car-pre}(t)}{\overline{P_{car}} * A_{car}(t)} \tag{3-31}$$

$$M_{car-gv} = \begin{cases} M_{car-gv-dummy}(t) & if \ \ (T_{car}(t) < \underline{T_{car}}) \\ M_{car-gv-dummy}(t) + M_{car-add} * \dfrac{A_{car-gv}}{A_{car}} & if \ \ (T_{car}(t) \geq \underline{T_{car}}) \end{cases} \tag{3-32}$$

$$M_{car-ev} = \begin{cases} M_{car-ev-dummy}(t) & if \ \ (T_{car}(t) < \underline{T_{car}}) \\ M_{car-ev-dummy}(t) + M_{car-add} * \dfrac{A_{car-ev}}{A_{car}} & if \ \ (T_{car}(t) \geq \underline{T_{car}}) \end{cases} \tag{3-33}$$

$$\overline{T_{ride}(t)} = \frac{D_{ride-pre}(t)}{\overline{P_{ride}} * A_{ride}(t)} \tag{3-34}$$

$$C_{ride}(t) = \begin{cases} 0 \ \ if \ \ (T_{ride}(t) < \underline{T_{ride}}) \\ \dfrac{D_{ride-pre}(t)}{\overline{P_{ride}} * \underline{T_{ride}}} - A_{ride}(t) \ \ if \ \ (T_{ride}(t) \geq \underline{T_{ride}}) \end{cases} \tag{3-35}$$

$$M_{ride-gv} = M_{ride-gv-dummy}(t) + C_{ride}(t) * \frac{A_{ride-gv}}{A_{ride}} \tag{3-36}$$

$$M_{ride-ev} = M_{ride-ev-dummy}(t) + C_{ride}(t) * \frac{A_{ride-ev}}{A_{ride}} \tag{3-37}$$

これら二段階分配メカニズムによって生産台数が分配されるライフサイクルプロセスモデルを構築した．本研究で設定したシナリオはシェアリングサービス普及および電気自動車普及の推移であり，各シナリオ設定は後述する．

### 3.5.4.シミュレーション実行

#### 3.5.4.1.　評価条件

対象地域として，人口 37 万人の日本の都市を想定する．このとき，初期段階にて使用されている自動車はガソリン自動車 20 万台であり，シェアリングサービスおよび電気自動車は普及していない．本研究では鉄道やバスなどの公共交通機関による移動を考慮せず，自動車の総移動需要は一定であると仮定する．評価期間は 2015 年から 2035 年の 20 年とし，シミュレーションの 1 ステップは 1 ヶ月に相当する．

Table. 3-4 にシミュレーションで用いる各種パラメータを示す．ガソリン自動車および電気自動車の平均寿命は 130,000km と設定した．これは日本における平均年間走行距離と自動車車両の平均使用年数から導出している[5, 6] ．自動車個人利用時の平均乗車人数は文献[12]の数値を用いている．カーシェアリング時の平均乗車人数は個人利用時と同じと仮定した．ライドシェアリングでは移動を共有することから平均乗車人数は増加すると仮定し，2 人と設定した．カーシェアリングおよびライドシェアリングサービスはより多くの個人所有車を代替すると仮定し，カーシェアリング車は個人所有車を 5 台，ライドシェアリング車は 4 台代替すると設定した．ライドシェアリング時の有効走行距離割合は 0.5 と仮定した．これは日本におけるタクシーの実車率を用いている[8]．Table. 3-4 で示しているパラメータ値は，シミュレーション期間中において一定とした．

Table. 3-4 Parameter values [9-11]

| Symbol | Parameter | Value |
|---|---|---|
| $P_{own}$ | Average number of people per privately owned vehicle | 1.3 |
| $M_{ave}$ | Average monthly mileage per privately owned vehicle | 833 km |
| $P_{car}$ | Average number of people per car-sharing vehicle | 1.3 |
| $U_{car}$ | Maximum utilization rate of car-sharing vehicles | 5 |
| $P_{ride}$ | Average number of people per ride-sharing vehicle | 2 |
| $U_{ride}$ | Maximum utilization rate of ride-sharing vehicles | 4 |
| $E_{ride}$ | Rate of effective mileage during ride-sharing | 0.5 |

#### 3.5.4.2.　評価シナリオ

本研究では，シェアリングサービス普及と電気自動車普及の二つの普及シナリオを組み合わせて，Ⅰ.GV_ow scenario，Ⅱ.（GV+EV）_ow scenario，Ⅲ.GV_（ow+sh） scenario,

IV.（GV+EV）_（ow+sh） scenario の四つの評価シナリオを設定した．Table. 3-5 にシナリオを示す．シナリオ Ⅰ はシェアリングサービスおよび電気自動車は普及せずガソリン自動車が個人利用のみされるシナリオである．シナリオ Ⅱ では電気自動車が，シナリオ Ⅲ ではシェアリングサービスが，シナリオ Ⅳ ではその両方が普及する．シェアリングサービスの普及については，2035 年にカーシェアリングおよびライドシェアリングが全体の 25% の移動需要を負担すると設定した．電気自動車の普及については，自動車の販売台数における電気自動車の割合を設定した．これは日本における電気自動車の普及予測を基に作成した[9]．また， 2015 年 1 月から 2019 年 3 月における電気自動車の販売割合については，電気自動車保有台数推移の統計データ[10] を用いて算出した．シナリオ Ⅳ では二段階分配メカニズムにおける分配パターンからさらに二つのシナリオに分けて実施した．シェアリングサービス普及の影響を優先的に反映させたものをシナリオ Ⅳ-Ⅰ とし，電気自動車普及の影響を優先的に反映させたものをシナリオ Ⅳ-Ⅱ とする．

Table. 3-5 Evaluation scenarios

| Scenario name | Product | | Service | |
|---|---|---|---|---|
| | GV | EV | Ownership | Sharing |
| I. GV_ow | ✔ | | ✔ | |
| II. (GV+EV) ow | ✔ | ✔ | ✔ | |
| III. GV (ow+sh) | ✔ | | ✔ | ✔ |
| IV. (GV+EV) (ow+sh) | ✔ | ✔ | ✔ | ✔ |

### 3.5.4.3. シミュレーション結果

Fig. 3-9 から Fig. 3-12 にシミュレーション結果を示す．シミュレーション結果は，5 回シミュレーションを実行した結果の平均を用いている． Fig. 3-9 は月毎 $CO_2$ 排出量を示しているが，シェアリングサービスおよび電動化による大きな $CO_2$ 排出量の変化を確認することができない．シェアリングサービスが普及するシナリオ Ⅲ，Ⅳ-

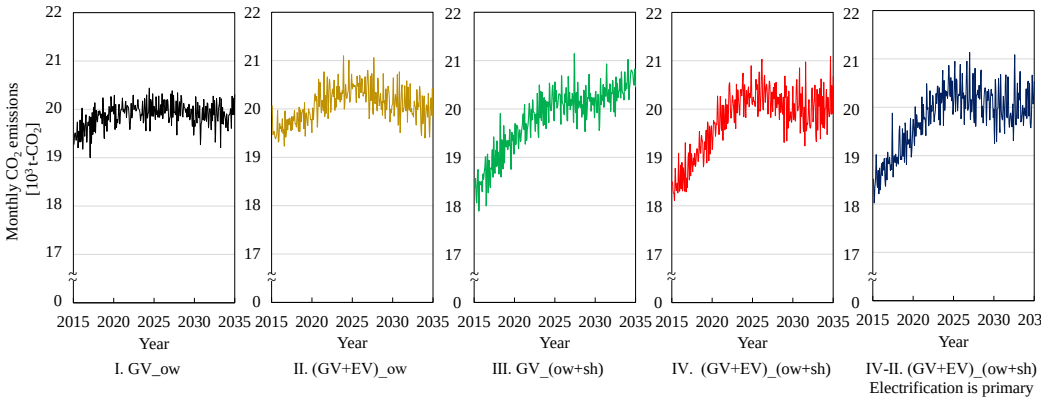



Fig. 3-9 Time evaluation of monthly $CO_2$ emissions

Ⅰ，Ⅳ-Ⅱでは，シミュレーション序盤で $CO_2$ 排出量の減少が確認できるが，これは自動車の個人所有からシェアリングへの移行による自動車生産台数減少が原因である．一方で，時間経過と共に $CO_2$ 排出量は増加しているが，これはシェアリングサービス普及によって車両 1 台の月当たりの走行距離が増加し，より早いサイクルで廃棄され，その結果車両の生産台数が増加したことが原因である．Fig. 3-9 では電気自動車普及による変化は確認できない．これは電気自動車普及による使用時 $CO_2$ 排出量減少と製造時 $CO_2$ 排出量増加が拮抗した結果だと考えられる．

Fig. 3-10 は累積 $CO_2$ 排出量を示しているが，ここでも大きな変化は確認できない．電気自動車が普及するシナリオⅡでは使用時の $CO_2$ 排出量は減少するが，製造時の $CO_2$ 排出量が増加し，その効果を相殺していることが分かる．一方，シェアリングサービスが普及するシナリオⅢでは製造時の $CO_2$ 排出量が減少するが，使用時の $CO_2$ 排出量が増加している．特にライドシェアリングの使用時 $CO_2$ 排出量がカーシェアリング使用時 $CO_2$ 排出量と比較して大きくなっており，これはライドシェアリングモデルに適用した走行距離モデルの有効距離割合の影響が表れており，ライドシェアリング時の走行距離変化を LCS でモデル化できていることを示している．電気自動車およびシェアリングサービス両方が普及するシナリオⅣ-Ⅰ，Ⅳ-Ⅱでは製造時 $CO_2$ 排出量が増加し，使用時 $CO_2$ 排出量が減少している．

Fig. 3-11 は月毎 TMR を示している．電気自動車が普及するシナリオ（Ⅱ，Ⅳ-Ⅰ，Ⅳ-Ⅱ）では TMR が増加している．Fig. 3-12 は累積 TMR を示している．電気自動車

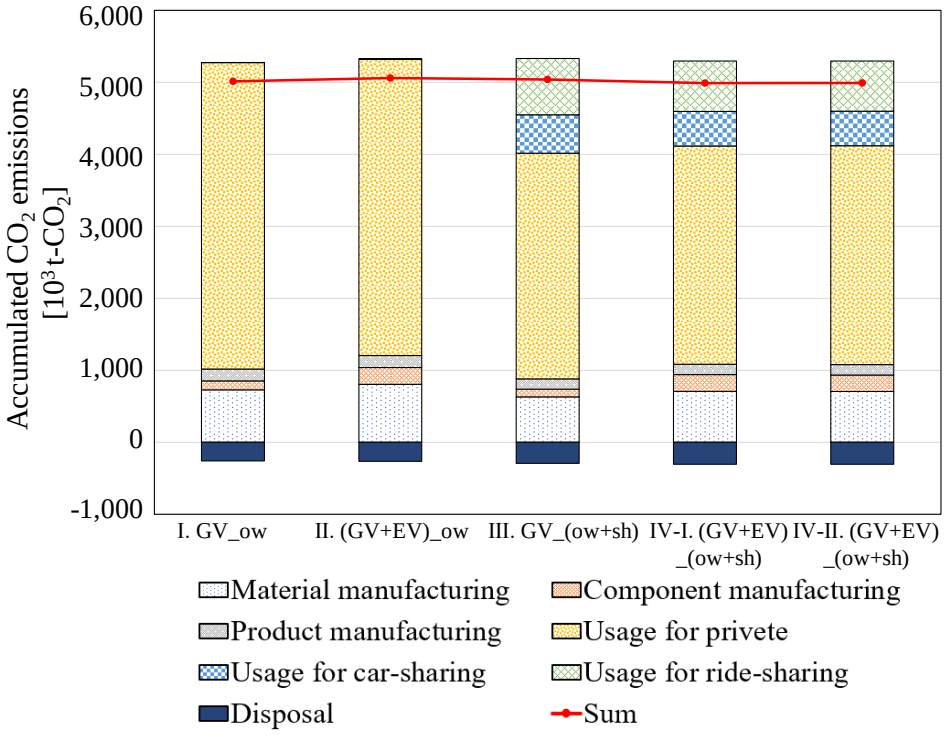



Fig. 3-10 Accumulated $CO_2$ emissions

普及によって累積 TMR は増加する一方で，シェアリングサービス普及によって累積 TMR は減少する．この結果から，シェアリングサービスの普及は電気自動車普及によるマテリアルフローの増加をバランスさせるのに貢献できると考えられる．

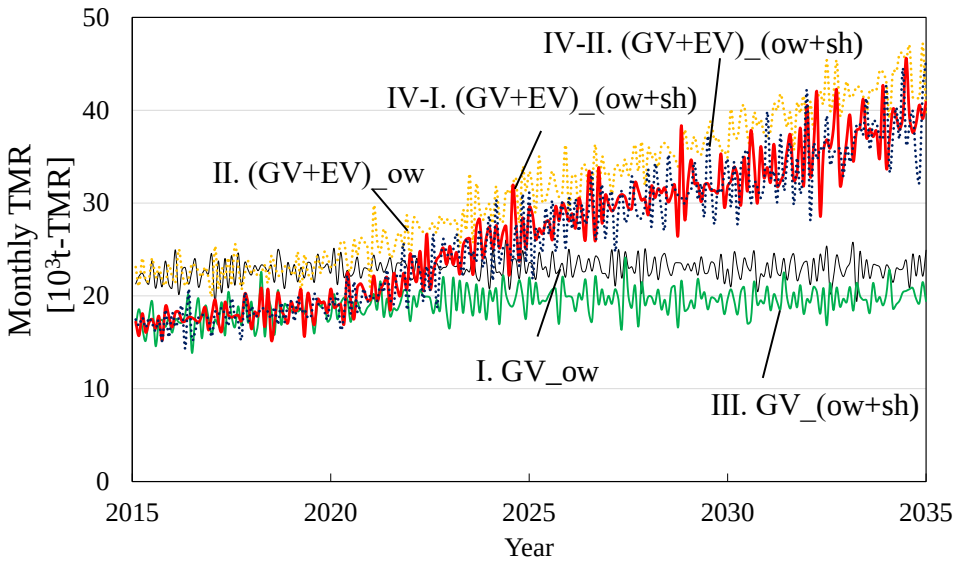



Fig. 3-11 Time evaluation of monthly TMR

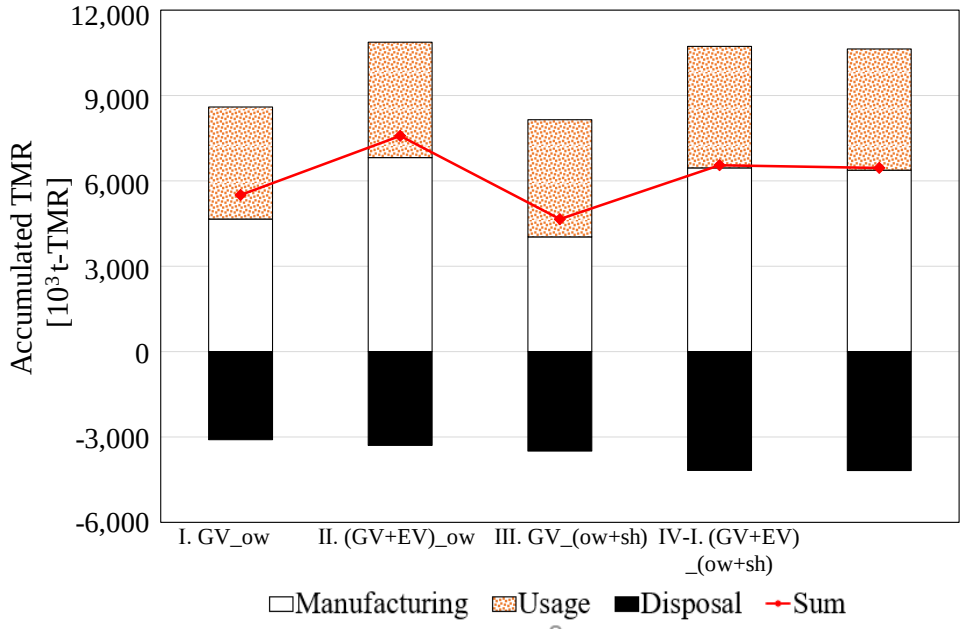



Fig. 3-12 Accumulated TMR

#### 3.5.4.4. 感度分析

構築した LCS モデルの感度分析を行った．Fig. 3-13, 14 にシナリオ IV-Ⅰ，IV-Ⅱを基に実施した感度分析結果を示す．各パラメータの値を 20% 変動させると最大で 5% 程度の出力の変動が確認できた．Fig. 3-13 によると，累積 $CO_2$ 排出量においては，ライドシェアリング時の有効走行距離割合が最も高い感度を持ち，次に平均乗車人数が高い感度も持つ. Fig. 3-14 によると, 累積 TMR においては, $CO_2$ 排出量同様, ライドシェアリング時の有効走行距離割合が最も高い．一方で，リチウムイオン電池の平期寿命も高い感度を示している．これらの結果から，感度の高いパラメータである有効総距離割合，平均乗車人数，リチウムイオン電池の平均寿命のパラメータ詳細化が必要である．リチウムイオン電池についてはリユースによる寿命延長が考えられる．リユース事業によって環境負荷は大きく減少していく可能性があり[11]，リユース事業を考慮できる LCS モデルを構築していく必要がある．

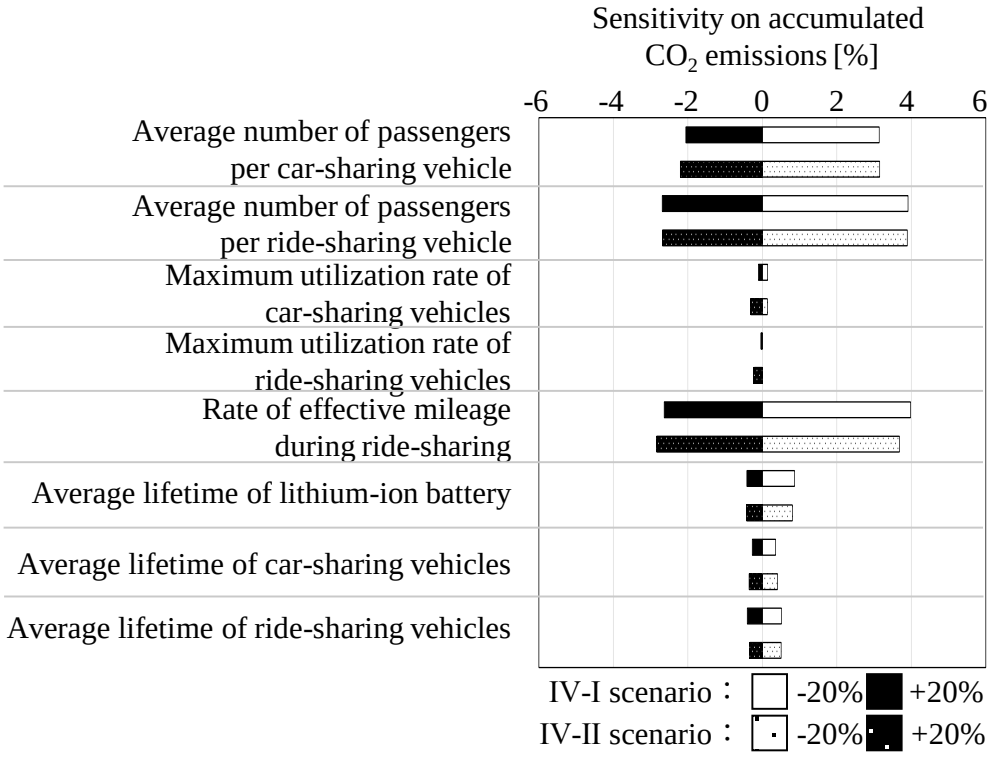



Fig. 3-13 Results of sensitivity analysis on $CO_2$ emissions

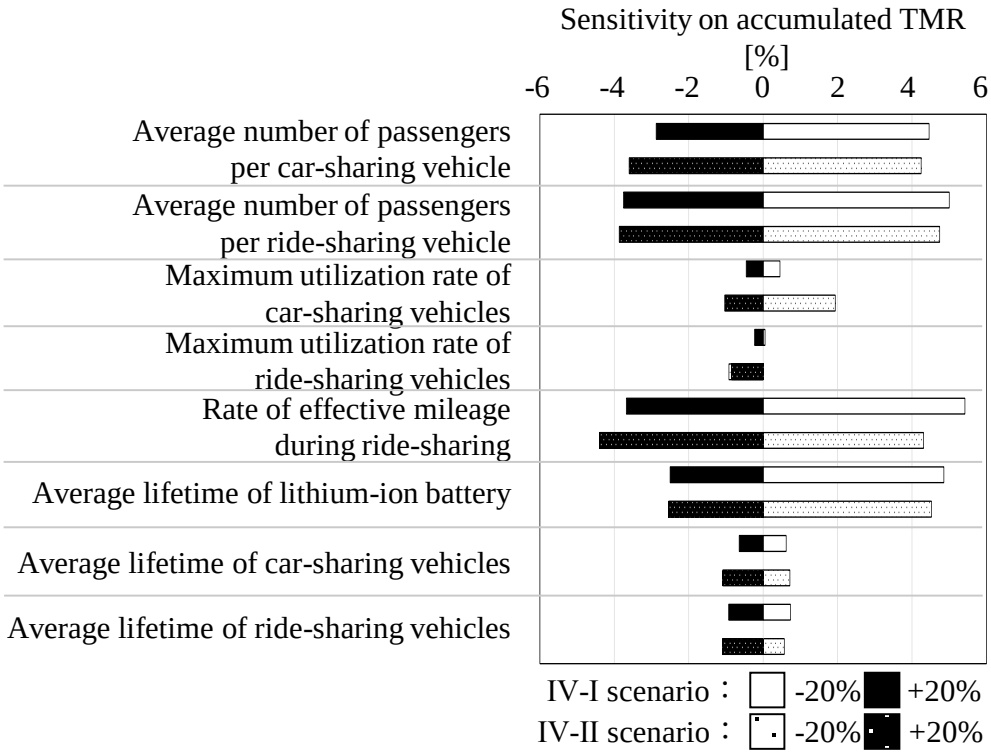



Fig. 3-14 Results of sensitivity analysis on TMR

### 3.6. 考察

構築したライフサイクルモデルの動作検証を実施した．本研究では，ストック（使用中台数）とフロー（新規製造台数）のバランスの観点から検証を行う．2015 年 1 月から 2020 年 3 月までの使用中台数に対する新規製造台数の割合をシナリオ I と II のシミュレーション結果と現実データとで比較した．

Fig. 3-15 に使用中台数に対する製造台数の割合を示す．現実データの製造台数の割合は普通乗用車の統計データを基に算出している[12]．シミュレーションで得た使用中台数に対する製造台数の割合は現実世界のデータ （Real world result） の平均値を出力できていることが確認できる．現実世界のデータにおける大きな振れ幅は季節変動やその時期の経済状況によるものであるが，本研究は考慮していないためそのような挙動は現れない．

本研究にて構築した輸送能力モデルの動作検証を行う．Fig. 3-16 にシナリオ II と III における使用中台数変化を示す．シナリオ II ではシェアリングサービスが普及しないため，全体の使用中台数は変化していないが，シナリオ III ではシェアリングサービス普及による全体の使用中台数の変化が確認できる．この結果から自動車シェアリング車両の輸送能力向上の影響を LCS モデルに反映できていることを示している．

また，Fig. 3-17 にシナリオ I と III の 2035 年時点の総走行距離を示す．シナリオ I

と比較してシナリオⅢでは総走行距離が増加しているが，これはライドシェアリング時の有効距離割合による走行距離増加分が反映された結果であり，本研究にて構築したライドシェアリング時の走行距離増加の影響を LCS モデルに反映できていることを示している．

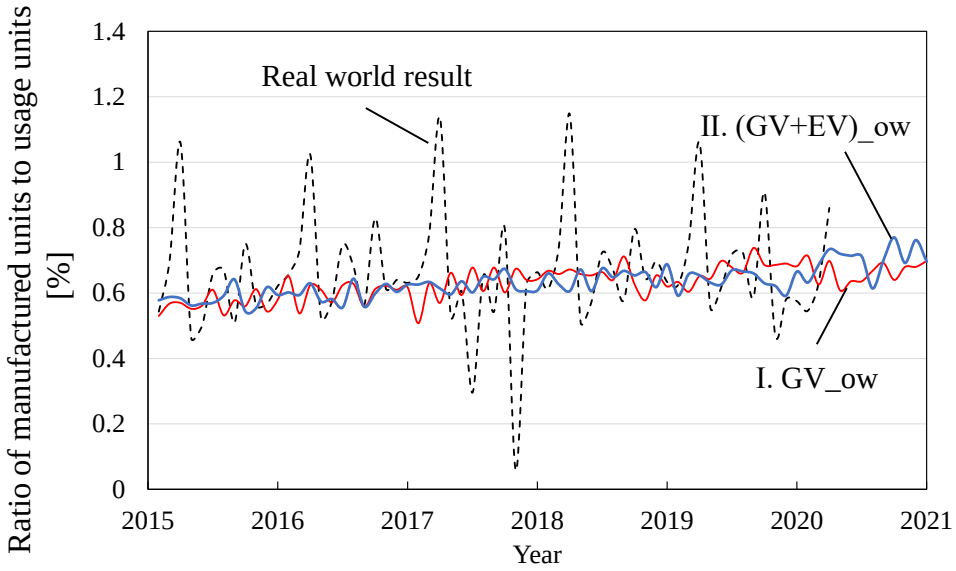



Fig. 3-15 Comparison of ratio of manufactured units to usage units between a real world and a simulation result

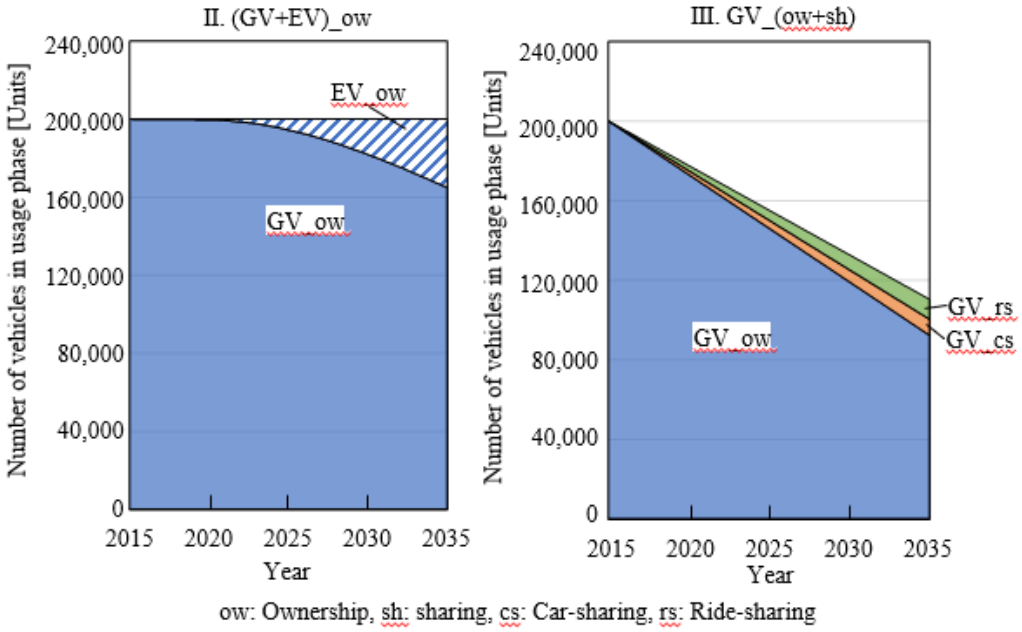
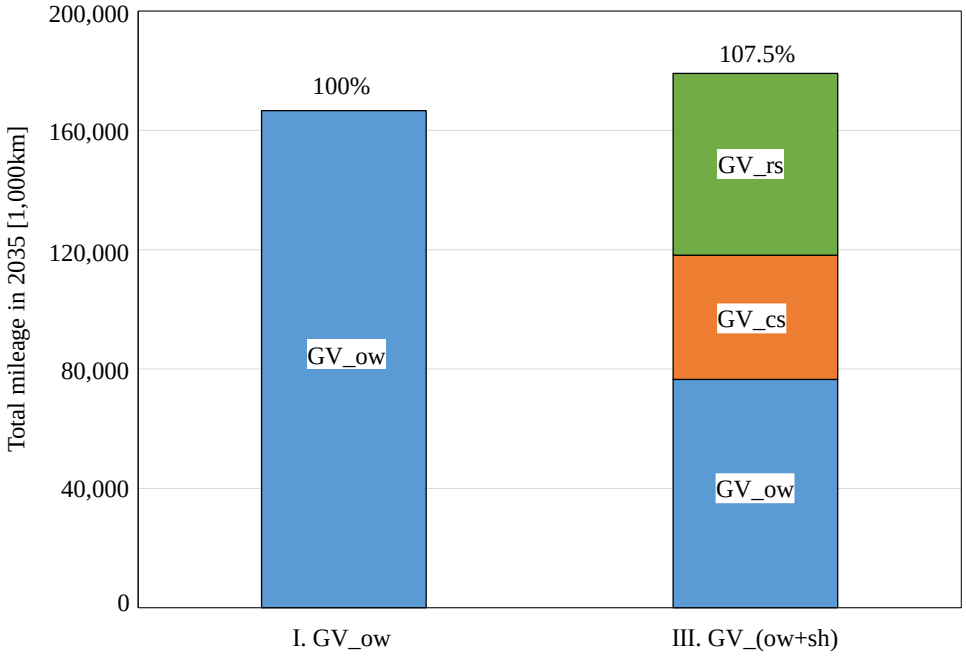



Fig. 3-16 Number of vehicles in usage phese of sceniro. II and scenario. III




ow: Ownership, sh: sharing, cs: Car-sharing, rs: Ride-sharing

Fig. 3-17 Total mileage of scenario . Ⅰ and scenario. Ⅲ in 2035

続いて二段階分配メカニズムの動作検証を行った．Fig. 3-18 に各シナリオにおける 2035 年時点の二段階分配メカニズムの分配前後の生産台数を示す．電気自動車普及およびシェアリングサービス普及については要求された挙動を達成していることが確認できた．具体的には，電気自動車が普及するシナリオ II では自動車の総生産台数は変化せずにその内訳が変化しており，シェアリングサービスが普及するシナリオⅢでは自動車の総生産台数が変化していることが Fig. 3-18 から確認できる．電気自動車とシェアリングサービス両方の普及が促進するシナリオⅣ- Ⅰ では総生産台数が変化しつつ，電気自動車の生産台数が増加していることから，二段階分配メカニズムを介して二つの普及の影響を考慮できていることが確認できた．シナリオⅣ- II でも同様の挙動が確認でき，これにより，本研究で提案した二段階分配メカニズムによってシェアリングサービス普及と電気自動車普及の影響が複合的にライフサイクルプロセスモデルに反映されていることが検証された．これは交通システムにおける需要変化による影響と政策による影響を統合できていることを示している．

本研究では分配順序の違いから，二段階分配メカニズムを二つのシナリオを設定している（シナリオⅣ- Ⅰ，Ⅳ- II）．Fig. 3-9 から Fig. 3-12 にかけてに示したようにシナリオⅣ- Ⅰ とシナリオⅣ- II のシミュレーション結果には大きな差分は確認できなかった．また，感度分析においても，この二つのシナリオでは同じような出力結果を得ることができた．これは LCS モデルにおいて，二段階分配メカニズム内の分配の順番

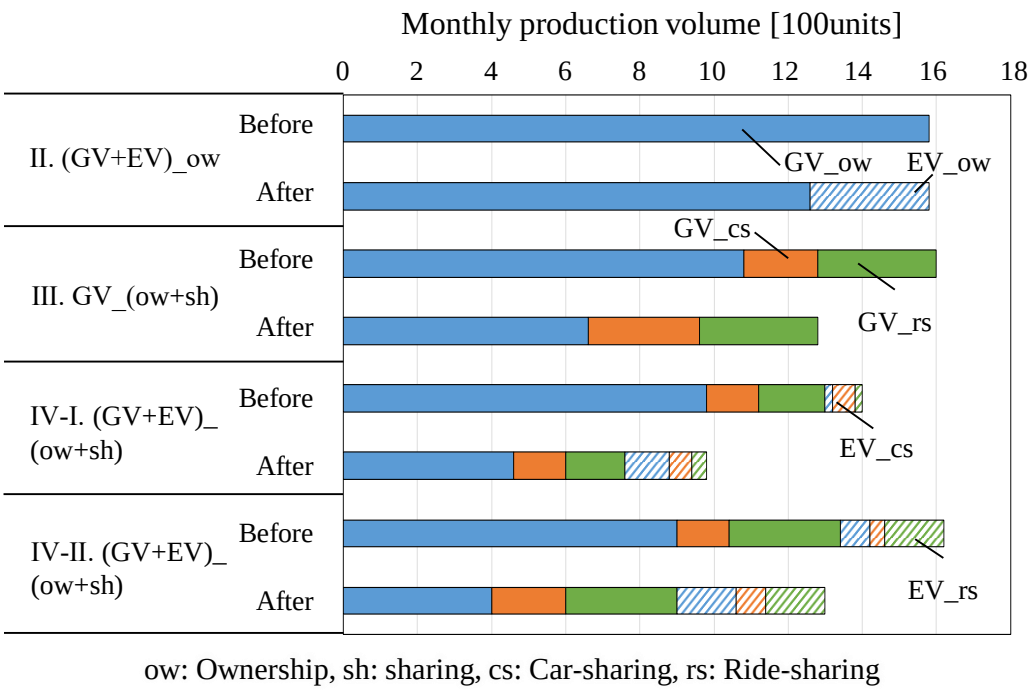



Fig. 3-18 Breakdown of production volume before and after the allocation mechanism in 2035

は関係なく，どの分配の順番でも同じようなシミュレーション結果を得ることができる可能性を示している．

本研究で構築した自動車シェアリングモデルの課題について考察する．本研究で提案した輸送能力モデルには自動車シェアリング車両の稼働率と平均乗車人数が，そして走行距離モデルには自動車シェアリング時の有効距離割合が用いられている．それぞれ自動車シェアリング，特にライドシェアリングにおける効率を表したパラメータであり，本研究ではそれぞれ独立していると仮定して扱っている．しかし，実際にはこれらパラメータはトレードオフの関係にあり，また現実世界の地理的状況に強く影響を受けるパラメータであるが，それを考慮できていない．また今後，自動車シェアリングの影響をより正確に評価にするためには現実世界で得られたデータを入力することが望まれるが，提案モデルを自動車シェアリングの現実世界への実装前に用いる場合はそれが困難になる．その場合には現実世界の地理的状況や都市空間等の情報を持つ交通シミュレーションモデルと連携し，前述したパラメータのトレードオフ関係を考慮したパラメータ値の入力が必要である．

### 3.7. 結言

本章ではガソリン自動車から電気自動車への需要代替，つまりは自動車の電動化が考慮できる既存の LCS モデルをその使用形態間の需要代替，つまりは個人所有からシェアリングへの移行が考慮できるようにその拡張を目指した．自動車シェアリングのモデル化の際には，使用形態間では人々の移動需要の代替が行われていることに着目し，移動需要を起点として自動車シェアリングの特徴である輸送能力モデルおよび走行距離モデルを構築し，自動車シェアリングの普及が自動車の生産量に与える影響をシミュレーション可能にした．また，電動化と自動車シェアリング普及の自動車生産量への影響を統合することができる二段階分配メカニズムを LCS モデルに実装することで，電気自動車と自動車シェアリングの同時普及の影響を LCS 上で評価可能とした．

提案した LCS 手法の有効性を示すために，カーシェアリングとライドシェアリングの普及および電気自動車普及のシナリオを設定してケーススタディを実施した．ケーススタディではシェアリングサービスと電気自動車の同時普及による環境負荷変化を定量的に示し，また，シェアリングサービスが電気自動車普及による資源消費量増加を抑制させることを示した．これらケーススタディのシミュレーション結果の検証を行い，二段階分配メカニズムが製品とサービスの二つの普及の影響を複合的に扱えていることを示した．

## 参考文献


[1] T. Fishman, R. J. Myers, O. Rios, and T. E. Graedel, “Implications of Emerging Vehicle Technologies on Rare Earth Supply and Demand in the United States,” Resources, Vol. 7, No. 9, 2018.

[2] みずほ情報総研株式会社, “平成 19 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 定置用燃料電池システム及び燃料電池自動車のライフサイクル評価に関する調査,” 報告書管理番号：100013353, プロジェクト番号：Q05016, 公開日：平成 20 年度 2 月 9 日.

[3] 片桐望, 中島謙一, 原田幸明, “NIMS-EMC 材料 環境情報データ No.18「概説資源端重量」,” 2009.

[4] 資源エネルギー庁, “2030 年エネルギーミックス実現へ向けた対応について～全体整理～,” 2018. https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/025/pdf/025_008.pdf .

[5] 国土交通省, “自動車燃費消費量統計年報 平成 28 年度分,” 2016.

[6] 一般財団法人自動車検査登録情報協会, “わが国の自動車保有動向 車種別の平均使用年数推移表,” 2020. https://www.airia.or.jp/publish/file/r5c6pv000000u7ao-att/r5c6pv000000u7b3.pdf accessed 2020. 10. 20.

[7] 国土交通省道路局, “全国道路・街路交通情勢調査自動車起終点調査（国土交通省道路局）,” 2015. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=dataset&toukei=00600580&bunya_l=10&stat_infid=000031927554

[8] 三井住友銀行, “タクシー業界の動向と今後の方向,” 2019.https://www.smbc.co.jp/hojin/report/investigationlecture/resources/pdf/3_00_CRSDReport087.pdf accessed 2020. 10. 20.

[9] 公益財産法人自然エネルギー財団, “EV 普及の動向と展望 気候変動対策の観点から,” 2018. https://www.renewable-ei.org/activities/reports/img/pdf/20180627/REI_EVreport_20180627.pdf accessed 2020. 10. 20.

[10] 一般財団法人自動車検査登録情報協会, “わが国の自動車保有動向 ハイブリッド車・電気自動車の保有台数推移表,” 2020. https://www.airia.or.jp/publish/file/r5c6pv000000u7b6-att/04_HV_EV.pdf

[11] H. Murata, N. Yokono, S. Fukushige, and H. Kobayashi, “A Lifecycle Simulation Method for Global Reuse,” International Journal of Automation Technology, Vol.12,

No.6, pp. 813-821, 2018
[12] 一般社団法人 日本自動車工業会, “統計月報 Vol. 52,” 2019. http://www.jama.or.jp/stats/m_report/index.html accessed 2020. 10. 20.

# 第4章　自動車の電動化に向けた社会目標を考慮した戦略的マネジメントのためのモデル化とシミュレーション

## 4.1. 緒言

本章では社会目標を考慮した戦略的マネジメントを扱える LCS モデルの構築に取り組む．具体的には，異種製品ライフサイクルシステムズと相互作用で構成される結合型ライフサイクルシステムズ（CoLSys: Connected life cycle systems）を Collaborative SoS の特徴を踏まえてモデル化を行っていく．ここで，Collaborative SoS の特徴とは，超システムの要素システムが超システムの全体目標を共有しており，その達成に向けて相互作用の発生やその強さを変化させることを指し，本研究ではその特徴を各製品ライフサイクルシステムが管理する相互作用に関連する妥協解選択の繰り返しプロセスとしてモデル化する．

提案モデルの妥当性を示すために，電気自動車を中心として構成される結合型ライフサイクルシステムズを対象にケーススタディを実施した．電気自動車は使用済み車載電池の異種製品への二次利用や既存のガソリン自動車との需要代替などの相互作用を発生させ，結合型ライフサイクルシステムズを形成する． ケーススタディでは社会目標を 2050 年に $CO_2$ 排出量ゼロ，企業の個別目標を年率 1%の利益増加と設定し，各企業は関連する相互作用の強度変更を意思決定する．例えば，ガソリン自動車では電気自動車への需要代替速度の変更が検討される．これら意思決定はネスト構造に基づいて実行され，短期的な経済的利益と環境負荷削減を通じた長期的な企業価値の向上のバランスが考慮される意思決定ルールに沿って行われる．

## 4.2. 社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化

2.5.2 節にて示したように, LCS4SoS を用いて社会目標を考慮した戦略的マネジメントを評価するには，CoLSys を Collaborative SoS としてモデル化することが求められる．要素システムが超システム全体の目標を参照し，その結果に基づいて相互作用の発生挙動が変化するという Collaborative SoS の特徴を捉えるために，意思決定モデルを含めた LCS4SoS を提案する．

意思決定モデルは企業が設定した目標への達成状況を評価した後に戦略の修正が行われる，つまり，戦略的マネジメントにおける戦略評価プロセスをモデル化したものである. Fig. 4-1 に示すように, 意思決定モデルには脱炭素目標と, シミュレーションで得られた CoLSys 全体の $CO_2$ 排出量および個別企業の利益が入力され，各目標の達成状況がまず評価される．この企業の個別目標だけでなく，社会目標も戦略評価の指標として用いられることが意思決定モデルの特徴である．各目標の達成企業ごとに設定された意思決定ルールに基づいて相互作用に関連するパラメータ値の変更が行われる．

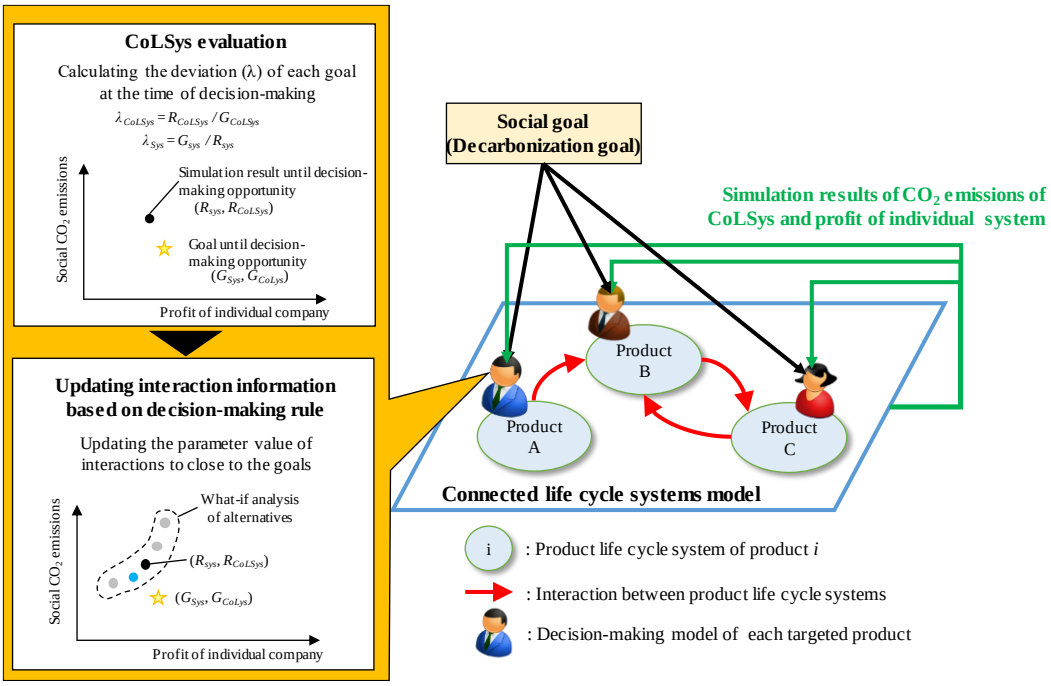



Fig. 4-1 Overview of proposed LCS model

意思決定ルールは Compromised programming 法をベースとし，社会目標と企業の個別目標，各目標の重要度，相互作用に関連するパラメータ値の変更選択肢を基に構築される．Compromised programming 法は，複数の選択肢の中から理想解に最も距離の近い選択肢を選択し，妥協解を得る方法である[1]．式（4-1）～（4-3）は，意思決定プロセスに適用される Compromised programming 法に関連する計算を示したものである．式（4-1）は，各対象製品に適用される Compromised programming 式であり，選択肢ごとに，理想解からの距離を加算重みで計算し，$D_i$が最小となる選択肢を製品ごとに選択する．式（4-1）にはどちらかの目標から大きく乖離した意思決定をしないように，偏差と呼ぶ目標の乖離の度合いが含められている．各ゴールにおける偏差は式（4-2）と式（4-3）で決定される．各目標における偏差（$\lambda_{CoLSys}$，$\lambda_{Sys}$）は，シナリオで設定された社会目標と個々の製品ライフサイクルシステムの目標に対して，シミュレーション結果を比較することで算出される．$\lambda_{CoLSys}$と$\lambda_{Sys}$が 1 より大きい場合は，それぞれの目標が達成されていないことを示し，逆に$\lambda_{CoLSys}$と$\lambda_{Sys}$が 1 より小さい場合は，目標が達成されたことを示す．これらの式により設定した目標が達成されないと偏差が大きくなるため，未達成の目標の達成を重視した意思決定が可能となる．例えば，社会的目標の達成に遅れが生じると，社会的目標の偏差値が大きくなる．つまり，式（4-1）において，個々のライフサイクルシステムの目標の重要度は相対的に低下する．ここで，Fig. 4-1 における$\lambda_{CoLSys}$が式（4-2）の逆数となっているのは，Fig. 4-1 で扱っている社会目標が $CO_2$ 排出量削減に関するものであり，削減する方向が是となるため

$$D_i = \left\{ {I_{CoLSys}}^2 \cdot {\lambda_{CoLSys}}^2 \left( \frac{PC_{max} - PC_i}{PC_{max} - PC_{min}} \right)^2 + {I_{Sys}}^2 \cdot {\lambda_{Sys}}^2 \left( \frac{PS_{max} - PS_i}{PS_{max} - PS_{min}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{4-1}$$

$$\lambda_{CoLSys} = \frac{G_{CoLSys}}{R_{CoLSys}} \tag{4-2}$$

$$\lambda_{Sys} = \frac{G_{Sys}}{R_{Sys}} \tag{4-3}$$

where

$i$: Number of alternatives

$D_i$: Distance to ideal solution in option $i$

$I_{CoLSys}$: Importance of the CoLSys goal

$I_{Sys}$: Importance of the individual life cycle system goal

$\lambda_{ColSys}$: Deviation in CoLSys

$\lambda_{Sys}$: Deviation in individual life cycle system

$G_{ColSys}$: Target values of CoLSys

$R_{ColSys}$: Simulation result of CoLSys

$PC_i$: Predicted value of CoLSys for option $i$

$PC_{min}$: Minimum value of CoLSys among possible alternatives

$PC_{max}$: Maximum value of CoLSys among possible alternatives

$G_{Sys}$: Target values of an individual life cycle system

$R_{Sys}$: Simulation result of an individual life cycle system

$PS_i$: Predicted value of an individual life cycle system for option $i$

$PS_{min}$: Minimum value of individual life cycle system among possible alternatives

$PS_{max}$: Minimum value of individual life cycle system among possible alternatives

である．一方で，個別ライフサイクルシステムの目標は企業の利益に関するものであり，増大する方向が是となる．式（4-1）から（4-3）に示した Compromised programming 式は指標値の増大を是とした式を示している．

この Compromised programming 法を適用した意思決定ルールを含む意思決定モデルによって，社会目標との企業個別目標を考慮した妥協解選択がシミュレーション可能となる．そのプロセスを本研究で対象とする社会目標の指標が $CO_2$ 排出量で個別企業目標の指標が経済的利益の場合で説明する．意思決定モデルはシミュレーション内の時間が設定された意思決定機会に到達した際に，その意思決定機会までの社会目標 $CO_2$ 排出量および CoLSyS 全体の $CO_2$ 排出量と自社利益のシミュレーション結果が入力され，それぞれの目標の達成状況が評価される．本研究ではそれは前述した偏差の

算出を意味する．各目標の達成状況が評価された後，設定された相互作用に関連するパラメータ値の変更選択肢ごとに CoLSys 全体の $CO_2$ 排出量および自社の利益がどのように推移するのかシミュレーションし，理想とする目標に最も近づくパラメータ値が選択される．Fig. 4-1 では理想とする目標に最も近づく青色の代替案が選択されることになる．

これは意思決定プロセス内にて相互作用に関するパラメータ値の変更選択肢を用いた What-if 分析が行われることを意味し，それを設定された意思決定頻度に沿って実行されることで，社会目標を考慮した相互作用の状態が繰り返し更新されることになる．つまり，Collaborative SoS の特徴である，超システム全体の目標の達成に向けた要素システムによる相互作用の更新をシミュレーションしているといえる．また，意思決定ルールは構築される意思決定モデルごとに設定されるため，異なる方針を持つ企業で構成されるより複雑な超システムをシミュレーションすることが可能である．これは超システムにおける要素システムの管理および運用の独立性を陽にモデル化しているといえる．

### 4.3. シミュレーション手順

本章では，社会目標を考慮した戦略的マネジメントをモデル化した意思決定モデルを含む LCS 手順を提案する．Fig. 4-2 は LCS を含めた本研究で想定している戦略的マネジメントのフローチャートを示している．各ステップについて述べる．

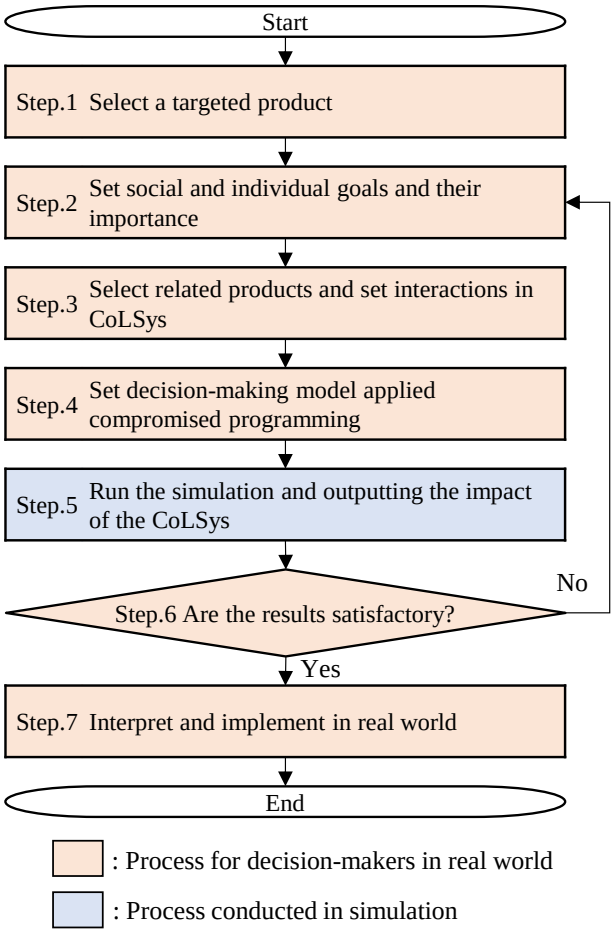



Fig. 4-2 Flowchart of strategic management in the proposed method

Step.1　企業の意思決定者が自社のどの製品を評価対象とするのか選択する．

Step.2　選択した製品のマテリアルフローを通じて達成すべき社会目標と個別目標 を設定し，各目標の重要度を検討する．各目標の重要度は式（4-1）における$I_{CoLSys}$と$I_{Sys}$を指す. 式(4-1)は意思決定モデルで適用される式である．本研究では，社会目標と個別目標の重要度が等しい，つまり両目標を達成するための努力が等しく行われると仮定している．したがって．$I_{CoLSys}$と$I_{Sys}$は本研究では等しいとしている．

Step.3　意思決定者は自社製品ともに CoLSys を形成しうる関連異種製品を選択し，対象製品ごとに LCS モデルを構築する．LCS モデル構築後，CoLSys 内で発生する相互作用を設定する．

Step.4　続いて意思決定モデルの設定に移る．意思決定者は意思決定モデルに対して，社会目標と個別目標，各目標の指標，そして意思決定頻度を基に意思決定ルールを設定する．意思決定モデルは CoLSys を評価し，意思決定ルールに沿って相互作用に関連するパラメータ値の修正を実行する．その意思決定ルールは対象とする製品ごとに設定される．

Step.5　LCS を実行し，選択されたシミュレーション条件の効果を出力する．シミュレーション期間中の社会目標と個別目標の達成状況を自動的に評価し，アルゴリズムに基づいて定義的に相互作用の状態を更新する．

Step.6　意思決定者はシミュレーション結果の評価を行う．その結果が不満足なものであるならば，再度，目標設定や企業方針から検討し直す．

Step.7　シミュレーション結果が満足いくものであれば，シミュレーションで行われた意思決定の内容を解釈し，現実の世界での活動に活かすことになる．

以上の提案手法を計算機上に実装するために，Fig. 4-3 に示すシステムで構成される LCS を構築した．本研究で追加したシステムについては赤線で示している．各システムについて説明する．

- Database editor

  LCS 実施に向けた基本データを作成するシステム．Product DB では製品の部品構成やその階層関係が格納され，Process DB では製造データや製品の使用状況など対象となる各ライフサイクルプロセスのデータが格納される．LCA DB には，電力や材料，工程ごとの環境負荷原単位データなどが格納される．

- LCS model editor

  Product DB，Process DB，LCA DB にて格納されているデータを用いて単一製品または製品群の LCS モデルを構築するシステム．

- Decision-making model editor

  対象とする各製品ライフサイクルシステムの意思決定を記述するためのシス

テムであり，意思決定モデルを LCS に導入するために追加した．意思決定の対象となる相互作用，相互作用に関連するパラメータ，その値の変動割合，意思決定間隔が記述され，Decision-making model DB に格納される．この DB はシミュレーションの間，LCS model DB との相互参照が行われる．

- SoS model editor, LCS4SoS Model manager

  個別 LCS モデルを相互作用の設定を通して接続するシステム．SoS model editor で入力された情報は LCS4SoS Model manager 上に反映され，LCS モデル間の相互作用と CoLSys の境界が可視化される．また，Decision-making model DB のデータが渡されることで，意思決定に基づく相互作用の動的な変化を考慮可能としている．

- Simulation engine

  構築した LCS モデルを対象として LCS を実行するシステム．

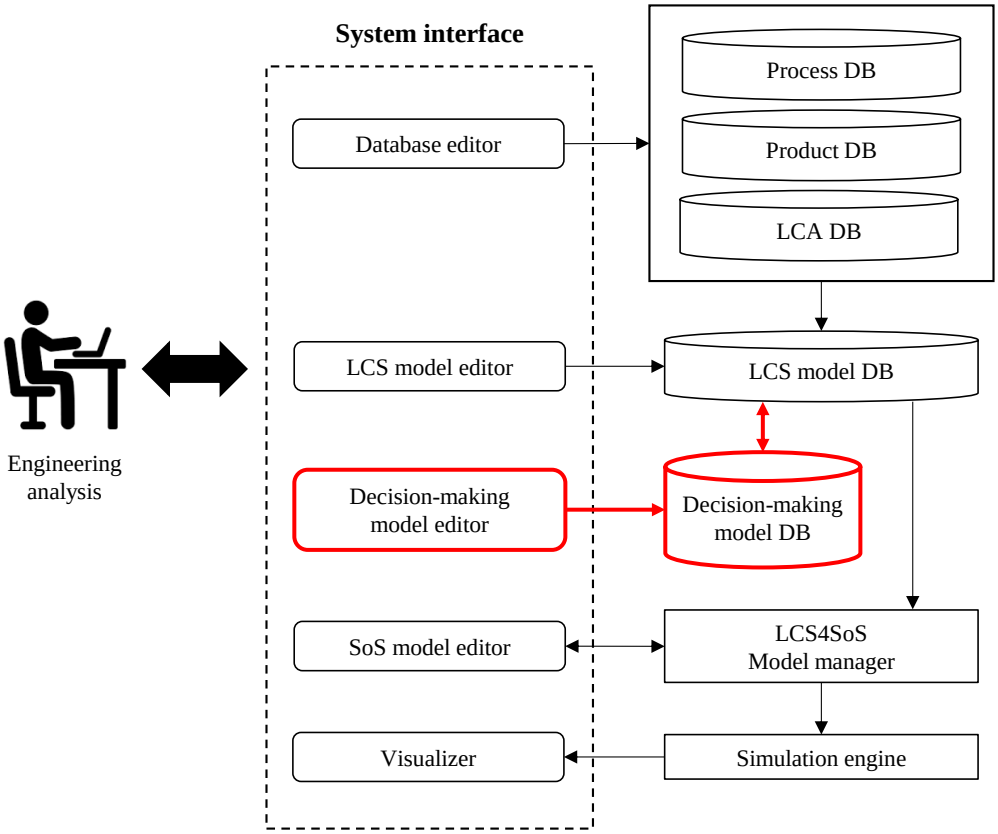



Fig. 4-3 System configuration

## 4.4. ケーススタディ

### 4.4.1.対象とする結合型ライフサイクルシステムズ

提案モデルの有効性を検証するためにケーススタディを実施した．このケーススタディでは、電気自動車（EV）を製造する企業の意思決定者が提案手法を用いた戦略的マネジメントを想定した．以下，シミュレーション手順の各ステップに沿って対象とする結合型ライフサイクルシステムズについて述べる．

Step.1　まず，意思決定者は自社製品を一つ選択する．今回は，コンパクトカー程度の大きさで，33.7kWh のリチウムイオン電池（LIB）を搭載した EV を選択した．

Step.2　次に，社会目標と個別目標を設定し，その重要度を検討した．後述するが，社会目標は 2050 年までに $CO_2$ 排出量をゼロにすること，企業目標は年率 1%の利益増収である．社会的目標と個別企業の目標の重要度は等しいと考えた．

Step.3　次に，意思決定者は EV を中心とした CoLSys を形成する関連製品を選択し，ガソリン車（GV），ハイブリッド車（HV），家庭用蓄電池（HB），充電スタンド（BCS），太陽光発電システム（PV）の 5 製品を選択した．GV はエンジン排気量 1,300cc 相当のコンパクトカーを想定している．HV は 0.86kWh の LIB を搭載したコンパクトカーを想定している．材料構成を含む車両情報は既報の通りである[2]．また，BCS には 12kWh の LIB を，HB には 6kWh の LIB を搭載するものとする．PV の出力は 3.9kW とした．

対象とする製品が選定された後，意思決定者は製品のライフサイクルシステム間の相互作用を設定した．今回の事例では，車種間の需要代替，HV や EV の使用済み LIB を HB や BCS としてグローバルリユース，EV の蓄電池としての利用による HB の需要代替（副機能による需要代替），PV の利用増加による HB の需要増加，BCS の増加による EV の需要増加の 5 種類の相互作用を設定した．以下，これらの相互作用について説明する．

- 車種間の需要代替：EV は，従来の GV や HV と比較して，自動車のライフサイクル全体における $CO_2$ 排出量が少ないため，普及が進むと予想される[3]．この場合，既存の GV や HV のカニバリゼーションにつながるため，需要代替が発生する．この市場シェアの変化による普及

台数の変化率が，CoLSys の環境負荷に大きく影響することが予想される．

- HV，EV の使用済み LIB の HB，BCS へのグローバルリユース：EV の普及が予想されるが，自動車メーカには使用済み電池の管理が求められる．EV の普及を積極的に進めている欧州では，2030 年までに 600 万個以上の電池パック（年間蓄電量 275GWh 以上）が廃棄物として発生する可能性が指摘されている[4]．この問題に対処するため，自動車各社は，LIB の長寿命化や資源としてのリサイクルだけでなく[5]，異種製品にも使用可能な電池の開発を進め，異種製品へのグローバルリユースも検討されている[6]．このように，EV の普及は，異種製品のマテリアルフローに影響を与える．

- EV を蓄電池として活用することによる HB の需要代替：EV はエネルギー貯蔵システムとして捉えることができ，家庭用バックアップ電源としての機能が注目されている[7]．これは，EV の副機能によって HB の需要を満たせる可能性を示している．

- BCS の増加による EV の需要増[8]

- PV の普及による HB 需要の増加[9]

以上の相互作用に基づき、CoLSys のライフサイクルプロセスモデルを構築した。Fig. 4-4 に対象となる CoLSys のライフサイクルプロセ スモデルの概要を示す．GV，EV，HV のライフサイクルプロセスモデルは、部品製造、組立、使用、回収、交換、リサイクル、廃棄というライフサイクルプロセスで構成されている．使用プロセスでは、各車両の寿命が決定され，EV と HV では車両全体の寿命と LIB の寿命が決定される．EV や HV では，車両全体の寿命と LIB の寿命は分けて判断される．寿命と判断された車両は，回収プロセスに送られる．回収プロセスに送られた後、部品ごとに分解され，グローバルリユース可能な部品はグローバルリユースされ，そうではない部品は廃棄プロセスに送られる．LIB のみが寿命を迎えたと判断された場合は，交換プロセスに送られ、新しい電池と交換される．EV や HV ではリユースによる LIB の内部循環は考慮されていない．HB，BCS，PV はそれぞれ、製品製造，使用，廃棄の三プロセスがあり、それぞれ需要代替と

グローバルリユース電池の流入によって製造台数が左右される．これらのライフサイクルプロセスごとに $CO_2$ 排出量を算出し，各製品のライフサイクルプロセスを合計したものが，各製品のライフサイクルシステムにおける $CO_2$ 排出量となる．製品普及によって得られる企業利益は、各製品の販売価格から製品コストを差し引いたものとし，ガソリン代などユーザが負担するコストは考慮しない．

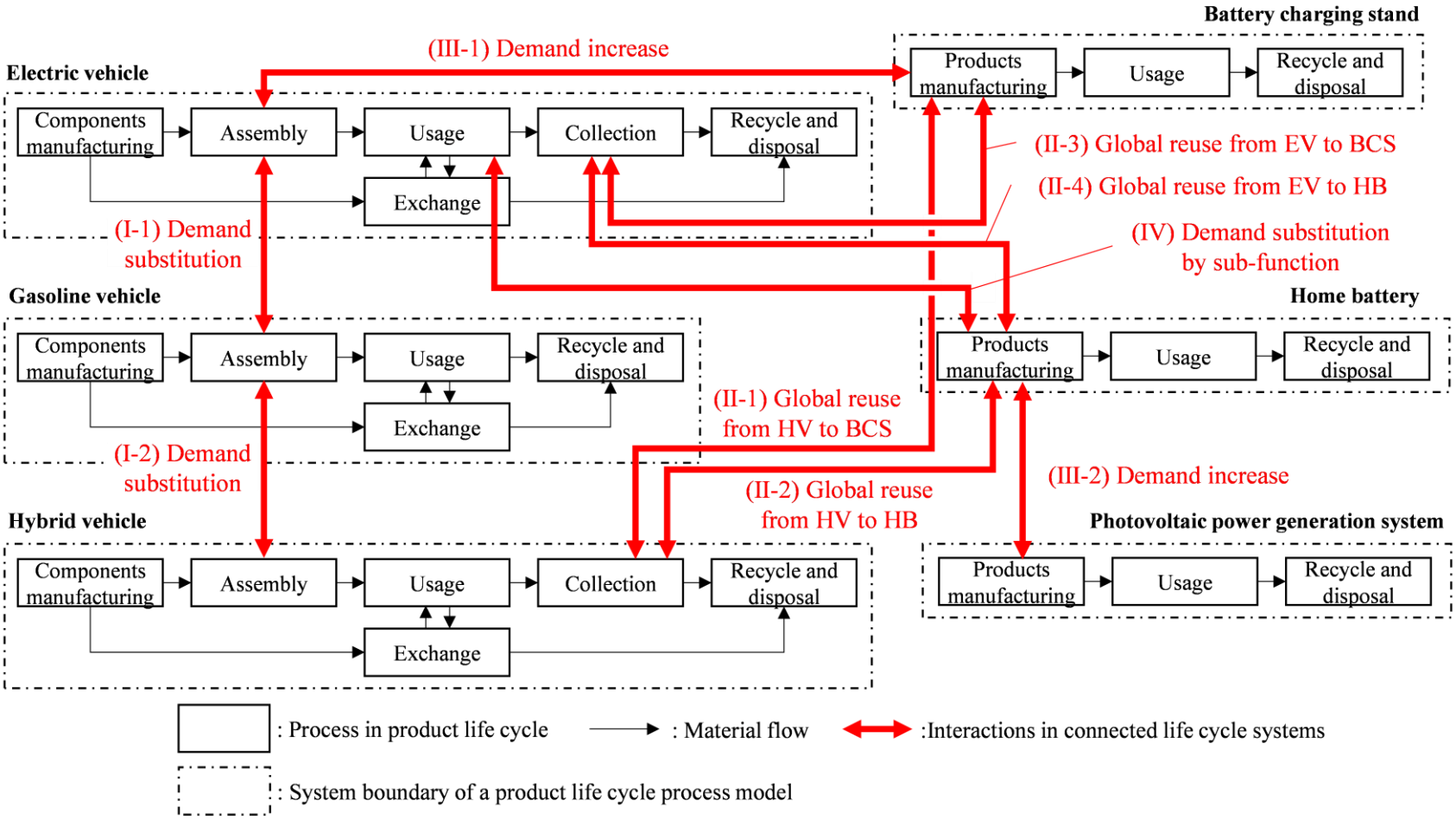



Fig. 4-4 Life cycle process model of the CoLSys focused on electric vehicles

### 4.4.2.意思決定モデル

本節はシミュレーション手順の Step. 4 に該当する．まず，結合型ライフサイクルシステムズ全体の社会目標と対象製品を製造する企業の個別目標がそれぞれ設定される．本ケーススタディでは Step.2 にて設定したように，社会目標を「2050 年に $CO_2$ 排出量ゼロ」を設定し，各企業の個別目標を「年率 1%の企業利益の増加」とした．また，相互作用に関わるパラメータ値の更新，すなわち戦略の評価・更新は 6 ヶ月に 1 回行うことを想定している．

設定した社会目標および個別企業目標を基に，意思決定ルールが設定される．4.3 節にて示した式（4-1）から（4-3）に当てはめると以下のように表すことができる．

$$D_i = \left\{ {I_{CoLSys}}^2 \cdot {\lambda_{CoLSys}}^2 \left( \frac{\frac{1}{CO_{2_{min}}} - \frac{1}{CO_{2_i}}}{\frac{1}{CO_{2_{min}}} - \frac{1}{CO_{2_{max}}}} \right)^2 + {I_{Sys}}^2 \cdot {\lambda_{Sys}}^2 \left( \frac{Profit_{max} - Profit_i}{Profit_{max} - Profit_{min}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{4-4}$$

$$\lambda_{CoLSys} = \frac{CO_{2_{CoLSys_result}}}{CO_{2_{CoLSys_target}}} \tag{4-5}$$

$$\lambda_{Sys} = \frac{Profit_{Sys_target}}{Profit_{Sys_result}} \tag{4-6}$$

Where

$i$: Number of alternatives

$D_i$: Distance to ideal solution in option $i$

$I_{CoLSys}$: Importance of the CoLSys goal

$I_{Sys}$: Importance of the individual life cycle system goal

$\lambda_{ColSys}$: Deviation in CoLSys

$\lambda_{Sys}$: Deviation in individual life cycle system

$CO_{2ColSys_target}$: Target values of $CO_2$ emissions in CoLSys

$CO_{2ColSys_result}$: Simulation result of $CO_2$ emissions in CoLSys

$CO_{2i}$: Predicted value of $CO_2$ emissions in CoLSys for option $i$

$CO_{2min}$: Minimum value of $CO_2$ emissions in CoLSys among possible alternatives

$CO_{2max}$: Maximum value of $CO_2$ emissions in CoLSys among possible alternatives

$Profit_{Sys_target}$: Target values of profit in an individual life cycle system

$Profit_{Sys_result}$: Simulation result of profit in an individual life cycle system
$Profit_i$: Predicted value of profit in an individual life cycle system for option $i$
$Profit_{min}$: Minimum value of profit in individual life cycle system among possible alternatives
$Profit_{max}$: Minimum value of profit in individual life cycle system among possible alternatives

設定した社会目標と個別目標に基づいて，社会目標に関わるパラメータは $CO_2$ 排出量に関するものになり，個別目標に関わるパラメータは個別紀要の利益のものになっている．ここで，$CO_2$ 排出量に関係するパラメータが逆数をとっていることが確認できるが，これは $CO_2$ 排出量については削減する方向が是とされるものであるためである．また，本ケーススタディでは Step. 2 にて社会的目標と個別企業の目標の重要度は等しいと設定しているため，$I_{CoLSys} : I_{Sys} = 1:1$ となる．

これら式は各製品に適用されるが，その際には製品ごとに「意思決定の対象となるパラメータ」と「パラメータ値の変更幅」が設定され，意思決定ルールとして構築されていく．以下，各製品で設定される意思決定モデルの意思決定の対象となるパラメータとその値の変更幅を Table. 4-1 に示す．ここで，本ケーススタディで扱う各企業の意思決定は第 1 章にて示したネスト構造を意識したものが行われるとし，目先の利益ではなく，環境負荷削減を通した企業価値の向上を目指すと仮定した．

Table. 4-1 Adjustable parameters for each product life cycle system

| Product name | Adjustable parameters | Value range | Related interactions |
|---|---|---|---|
| Gasoline vehicle | Decrease rate in the sales ratio of gasoline vehicles in new vehicle sales | 0.6-1 (Initial value: 1) | (I-1) Demand substitution. (I-2) Demand substitution |
| Hybrid vehicle | Discount rate for selling price of used batteries of HV | 3-20 (Initial value: 3) | (II-1) Global reuse from HV to BCS (II-2) Global reuse from HV to HB |
| Electric vehicle | Discount rate for selling price of used batteries of EV | 3-20 (Initial value: 3) | (II-3) Global reuse from EV to BCS (II-4) Global reuse from EV to HB |
| Battery charging stand | Increase rate of the amount of BCS production without getting profit | 1-1.1 (Initial value: 1) | (III-1) Demand increase |
| Photovoltaic system | Increase rate of the amount of PV production without getting profit | 1-1.1 (Initial value: 1) | (III-2) Demand increase |
| Household storage battery | Decrease rate of the amount of HB production | 0.7-1 (Initial value: 1) | (IV) Demand substitution by sub-function |

一例として，GV の製品ライフサイクルシステムに適用した意思決定モデルについて説明する． GV の調整パラメータは，「新車販売台数に占める GV の販売割合の減少率」とした．GV の販売比率は，EV や HV の技術発展に伴い減少するものの EV や HV の技術開発により GV の販売比率は低下するが，GV では，環境負荷低減のために GV の販売比率をより低下させる代替案が用意されるとした．削減割合は，削減しない（1）から 40%削減する（0.6）の間で調整可能とし，販売比率を下げた場合の $CO_2$ 排出量と利益を計算し，Compromised programming 法を適用することで，理想的な解

に最も近い選択肢を選択することが可能になる．その他の製品についても，製品のライフサイクルシステムごとにパラメータと選択範囲を調整し，意思決定モデルが作成された．現実世界では，これらのパラメータは意思決定者によって設定され，本ケーススタディでは EV の意思決定者によって設定される．

ここで, 各製品ライフサイクルシステムの意思決定モデルで用いられる $CO_2$ 排出量と利益の計算方法を以下に示す.

- EV

  EV の意思決定モデルでは「リユース LIB 価格割合」の変更が検討される．リユース LIB 価格割合は使用済み LIB をリユース先にいくらで提供するのかを決定するパラメータである. 意思決定者は使用済み LIB の価格を引き下げることでより多くのリユース先を検討することが可能になり，使用済み LIB のリユース量増大につながる．この意思決定は Fig. 4-4 の（Ⅱ-3，4）の相互作用に影響を及ぼす．リユース LIB 価格割合を $R_{ev}$とおき，選択できる数値の範囲を $R_{ev\text{-}min} \leq R_{ev} \leq R_{ev\text{-}max}$とおく．本ケーススタディでは $R_{ev\text{-}min}$= 3，$R_{ev\text{-}max}$= 20．これら変数とリユース先が要求する価格が満たしている場合，リユースが成立することになる．また，リユース時に発生するコスト（$C_{reuse}$）については新規製造された LIB の価格の 1/5 かかると仮定した．$CO_{2\,ev}$ と $Profit_{ev}$ は以下の計算式で表される．

If （$P_{lib\text{-}ev} / R_{ev} \leq C_j$ ）（リユースが行われるとき）

$$CO_{2\ ev-i} = CO_{2\ CoLSys} - \sum_i \left(n_j * CO_{2\ j-production}\right) \tag{4-7}$$

$$Profit_{ev-i} = Profit_{ev-sales} + \sum_i \left(n_j * \left(\frac{P_{lib-ev}}{R_{ev}} - C_{reuse}\right)\right) + \left(n_{ev} - n_j\right) * Profit_{recycle} \tag{4-8}$$

else （リユースが行われない場合）

$$CO_{2\ ev-i} = CO_{2\ CoLSys} \tag{4-9}$$

$$Profit_{ev-i} = Profit_{ev-sales} + n_{ev} * Profit_{recycle} \tag{4-10}$$

where

$j$: Reuse destination product

$n_j$: Number of reused LIBs to product j

$n_{ev}$: Number of reusable LIBs of EV

$CO_{2\ CoLSys}$: $CO_2$ emissions of CoLSys

$CO_{2\ j-production}$: $CO_2$ emissions intensity of LIB production for product j

$Profit_{ev-sales}$: Profit of EV sales

$P_{lib-ev}$: Price per LIB of EV

$C_{reuse}$: Reuse cost per LIB

$Profit_{recycle}$: Recycle profit per LIB

- GV

GV の意思決定モデルでは前述の通り,「新車販売台数に占める GV の販売割合の減少率」の変更が検討される．GV の意思決定者は GV の販売割合を低下させる選択を行うことで，利益は減少するが，EV の普及が促進されることで $CO_2$ 排出量の削減につなげることができる．この意思決定は Fig. 4-4 の（Ⅰ-1）の相互作用に影響を及ぼす．GV の減少割合を $R_{gv}$とおき，選択できる数値の範囲を $R_{gv-min} \leq R_{gv} \leq R_{gv-max}$と設定した．本ケーススタディでは $R_{gv-min}=0$, $R_{gv-max}=0.3$ とした. GV における意思決定に伴う $CO_{2\,gv-i}$ と $Profit_{gv-i}$ は以下の計算式で表される．

$$V_{gv_production} = V_{gv_production_pre} * (1 - R_{gv}) \tag{4-11}$$

$$N_{gv_use} = N_{gv_use_pre} - V_{gv_production_pre} * R_{gv} \tag{4-12}$$

$$V_{ev_production} = V_{ev_production_pre} + V_{gv_production_pre} * R_{gv} \tag{4-13}$$

$$N_{ev_use} = N_{ev_use_pre} + V_{gv_production_pre} * R_{gv} \tag{4-14}$$

$$\begin{aligned} CO_{2\ gv-i} = {} & CO_{2\ CoLSys} + \left(V_{gv_production} * CO_{2\ gv_production}\right) \\ & + \left(N_{gv_use} * CO_{2\ gv_use}\right) + \left(V_{ev_production} * CO_{2\ ev_production}\right) \\ & + \left(N_{ev_use} * CO_{2\ ev_use}\right) \end{aligned} \tag{4-15}$$

$$Profit_{gv-i} = V_{gv-production} * Profit_{pergv} \tag{4-16}$$

where

$V_{gv_production_pre}$: Predicted production volume of GV

$V_{gv_production}$: Production volume of GV after decision-making

$N_{gv_use_pre}$ : Predicted number of using GV

$N_{gv_use}$: Number of using GV after decision-making

$V_{ev_production_pre}$: Predicted production volume of EV

$V_{ev_production}$: Production volume of EV after decision-making

$N_{ev_use_pre}$ : Predicted number of using EV

$N_{ev_use}$: Number of using EV after decision-making

$CO_{2\ pergv_production}$: $CO_2$ emissions per GV production

$CO_{2\ pergv_use}$: $CO_2$ emissions per GV usage

$CO_{2\ perev_production}$: $CO_2$ emissions per EV production

$CO_{2\ ev_use}$: $CO_2$ emissions per EV usage

$Profit_{pergv}$: Selling profit of GV per unit

- HV

HV の意思決定モデルでは EV と同様に,「リユース LIB 価格割合」の変更が検討される．この意思決定は Fig. 4-4 の（Ⅱ-1，2）の相互作用に影響を及ぼす．リユース LIB 価格割合を $R_{hv}$とおき，選択できる数値の範囲を $R_{hv-min} \leq R_{hv} \leq R_{hv-max}$とおく．本ケーススタディでは $R_{hv-min} = 3$, $R_{hv-max} = 20$. これら変数とリユース先が要求する価格が満たしている場合，リユースが成立することになる．また，リユース時に発生するコスト（$C_{reuse}$）については新規製造された LIB の価格の 1/5 かかると仮定した． $CO_{2\ hv}$ と $Profit_{hv}$ は以下の計算式で表される．

If （$P_{lib-hv} / R_{hv} \leq C_j$ ）（リユースが行われるとき）

$$CO_{2\ hv-i} = CO_{2\ CoLSys} - \sum_i \left(n_j * CO_{2\ j-production}\right) \tag{4-17}$$

$$Profit_{hv-i} = Profit_{hv-sales} + \sum_i \left(n_j * \left(\frac{P_{lib-hv}}{R_{hv}} - C_{reuse}\right)\right) + \left(n_{hv} - n_j\right) * Profit_{recycle} \tag{4-18}$$

else （リユースが行われない場合）

$$CO_{2\ hv-i} = CO_{2\ CoLSys} \tag{4-19}$$

$$Profit_{hv-i} = Profit_{hv-sales} + n_{hv} * Profit_{recycle} \tag{4-20}$$

where

$j$: Reuse destination product

$n_j$: Number of reused LIBs to product j

$n_{ev}$: Number of reusable LIBs of HV

$CO_{2\ CoLSys}$: $CO_2$ emissions of CoLSys

$CO_{2\ j-production}$: $CO_2$ emissions intensity of LIB production for product j

$Profit_{ev-sales}$: Profit of HV sales

$P_{lib-ev}$: Price per LIB of HV

$C_{reuse}$: Reuse cost per LIB

$Profit_{recycle}$: Recycle profit per LIB

- BCS

BCS の意思決定モデルでは「BCS 数増加割合」の変動を検討する. ここで, BCS 数増加割合とは, 見込まれる要求 BCS 数に対しての増産比を表す. BCS

の増産は BCS の利益を増加させつつ，EV の普及を促進させて $CO_2$ 排出量を減少させる選択である．本ケーススタディでは増産分の BCS の販売価格を 0 として計算し，製造費の増加が BCS の利益を低下させるものとして設定した．この意思決定は Fig. 4-4 の（Ⅲ-1）の相互作用に影響を及ぼす．BCS 数増加割合をとおき $R_{bcs}$，選択できる数値の範囲を $R_{bcs_min} \leq R_{bcs} \leq R_{bcs-max}$ と設定した．本ケーススタディでは，$R_{bcs_min} = 1$，$R_{bcs_max} = 1.1$ と設定した．BCS における意思決定で用いられる $CO_{2\ bcs_i}$ と $Profit_{\ bcs_i}$ は以下の計算式で表される．

$$CO_{2\ bcs-i} = CO_{2\ CoLSys} + V_{bcs_production_pre} * (R_{bcs} - 1) * \{CO_{2\ perbcs} - Rate_{bcs} * (LCA_{gv} - LCA_{ev})\} \tag{4-21}$$

$$Profit_{bcs-i} = V_{gv-production_pre} * (P_{bcs_sale} - R_{bcs} * C_{bcs}) \tag{4-22}$$

where

$V_{bcs_production_pre}$: Predicted production volume of BCS

$CO_{2\ perbcs}$: $CO_2$ emissions per BCS production

$Rate_{bcs}$: Number of required BCS per EV

$LCA_{gv}$，$LCA_{ev}$: LCA value of vehicle types

$P_{bcs_sale}$: Selling price per BCS

$C_{bcs}$: Production cost per BCS

- HB

HB の意思決定モデルでは「EV による代替率」の変動が検討される．これは EV が蓄電池化されることで HB の需要が代替される割合を表す．代替率を上げることで，HB の販売で得られる利益は減少するが，$CO_2$ 排出量の減少につながる．HB の見込み製造台数に掛けることで意思決定後の製造台数が算出される．この意思決定は Fig. 4-4 の (Ⅳ) の相互作用に影響を及ぼす．EV による代替率を $R_{hb}$ とおき，選択できる数値の範囲を $R_{hb_min} \leq R_{hb} \leq R_{hb-max}$ と設定した．本ケーススタディでは，$R_{hb_min} = 0$，$R_{hb_max} = 0.1$ と設定した．HB における意思決定で用いられる $CO_{2\ hb_i}$ と $Profit_{\ hb_i}$ は以下の計算式で表される．

$$CO_{2\ hb-i} = CO_{2\ CoLSys} + V_{hb_production_pre} * (1 - R_{hb}) * CO_{2\ hb_production} \tag{4-23}$$

$$Profit_{bcs-i} = V_{gv-production_pre} * (1 - R_{hb}) * Profit_{perbcs} \tag{4-24}$$

where

$V_{hb_production_pre}$: Predicted production volume of HB

$CO_{2\ hb_production}$: $CO_2$ emissions per HB production

$Profit_{perbcs}$: Selling profit per HB

- PV

  PV の意思決定モデルでは「PV 増産割合」の変動が検討される．これは，BCS と同様に，見込まれる PV 製造数に対しての増産割合を表す．PV の増産はその利益を増加させつつ，家庭で使用される電力をグリーン化させることで $CO_2$ 排出量を削減させる．本ケーススタディでは増産分の PV の販売価格を 0 として計算し，製造費の増加が BCS の利益を低下させるものとして設定した．この意思決定は Fig. 4-4 の（Ⅲ-2）の相互作用に影響を及ぼす．PV の増産割合を $R_{pv}$ とおき，選択できる数値の範囲を $R_{pv_min} \leq R_{pv} \leq R_{pv-max}$ とする．本ケーススタディでは，$R_{pv_min} = 1$，$R_{pv_max} = 1.1$ と設定した．PV における意思決定で用いられる $CO_{2\ pv_i}$ と $Profit_{pv_i}$ は以下の計算式で表される．

$$CO_{2\ pv-i} = CO_{2\ CoLSys} + V_{pv_production_pre} * \left(R_{pv} - 1\right) * LCA_{pv} \tag{4-25}$$

$$Profit_{pv-i} = V_{pv-production_pre} * (P_{hb} - R_{hb} * C_{hb}) \tag{4-26}$$

where

$V_{pv_production_pre}$: Predicted production volume of PV

$LCA_{pv}$: LCA value of PV

$P_{pv_sale}$: Selling profit per PV

$C_{pv}$: Production cost per PV

### 4.4.3.シミュレーション実行

#### 4.4.3.1. 評価条件

シミュレーションの条件は、人口 37 万人の日本の都市を想定し 2021 年から 2050 年までの 30 年間をシミュレーション期間とした。本研究では、$CO_2$ 排出量を評価指標として使用した。EV の使用段階における $CO_2$ 排出原単位は、社会的な電源構成に依存し、時間経過とともに変化するように設定した。社会的な電源構成による $CO_2$ 排出原単位は、直線的に減少し、2050 年にはゼロとなるように設定した。また、本研究では、社会的電源構成による脱炭素効果は、製品の使用段階のみに適用される。各製品に搭載される LIB の容量は、シミュレーション期間を通じて一定であると仮定した．

#### 4.4.3.2. 評価シナリオ

本研究では，意思決定モデルを含む LCS モデルの有効性を明らかにするために，三

Table. 4-2 Evaluation scenario

| | Applied conditions | | |
|---|---|---|---|
| | Goals | | Interactions |
| | Individual goal | Social goal | |
| Scenario1 (S1) | ✓ | | |
| Scenario2 (S2) | ✓ | | ✓ |
| Scenario3 (S3) | ✓ | ✓ | ✓ |

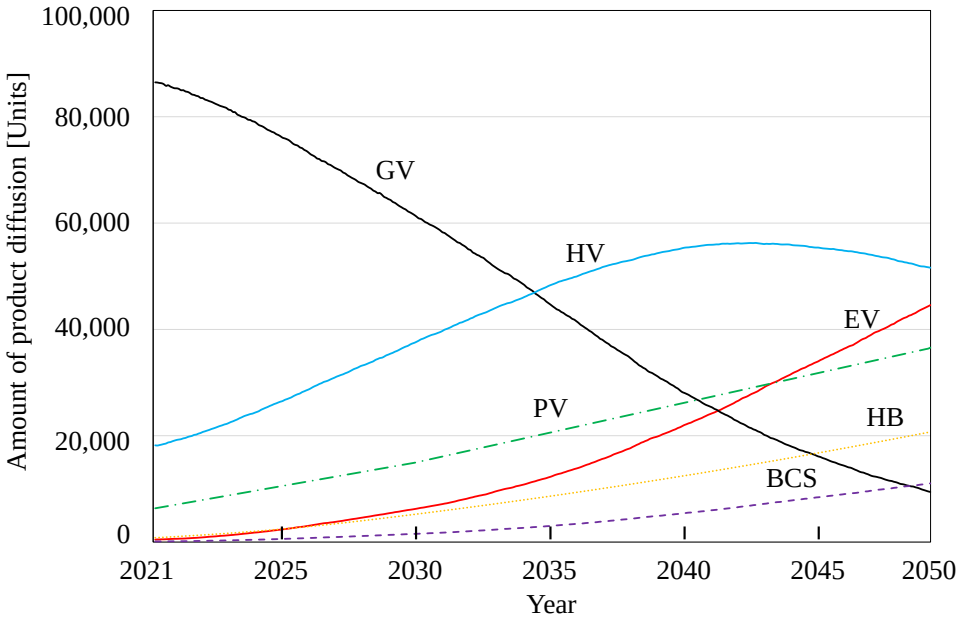



Fig. 4-5 Amount of product diffusion

つの評価シナリオを使用した．Table. 4-2 に各シナリオで適用される項目を示す．シナリオ 1（S1）では，個々のライフサイクルシステムの目標のみが考慮され，システム間 の相互作用は考慮されていない．つまり，CoLSys は形成されず，単一システムの集合体としての結果が出力される．シナリオ 2（S2）は，従来の LCS4SoS と同様に CoLSys を形成するが，個々のライフ サイクルシステムの目標のみを考慮したものである．つまり，既存研究と同じシミュレーションを行い，意思決定モデルを使用しない．シナリオ 3（S3）では，意思決定モデルにおいて，CoLSys の $CO_2$ 排出量削減目標と，個々の製品ライフサイクルシステムの利益という経済効果目標の二つの目標に基づいて，戦略的意思決定が行われました．したがって，本研究で提案した意思決定モデルは S3 でのみ使用され，S3 の結果を S1，S2 の結果と比較することで，意思決定モデルの有効性を実証することができる．Fig. 4-5 に各シナリオに与えられる製品普及シナリオを示し，各製品の普及推移の設定について説明する．まず，シミュレーション期間中の使用車両の総量は全てのシナリオで一定とし，廃棄される車両の数だけ次のシミュレーション時間に新たな車両が製造されるものとする．各車両の平均車

齢は 13 年とし，新規製造台数の合計に各車種の製造比率を乗じることで各車種の新規製造台数を求める．HB と PV は，既存の普及予測に基づき設定した．BCS の値は EV の 1/4 とした．S3 では，相互作用の影響を受けて製品普及推移が変化する．

#### 4.4.3.3. シミュレーション結果

シミュレーション結果を Fig. 4-6 から Fig. 4-11 にかけて示す．Fig. 4-6 はシナリオごとの月毎の製品生産量変化を示している．S1 と S2 の間では大きな変化は確認できないが，S3 では EV および BCS の製品生産量に大きな変化が発生していることが確認できる．これは製品生産量に関連する戦略的マネジメントが意思決定モデル導入によって LCS 上に反映されていることを示す結果である．S1 と S2 は Fig. 4-5 にて示した各シナリオに与えられる製品普及量に沿って製品生産量が決定されるため，シナリオ間で大きな変化は確認できないが，S3 では個別目標と全体目標を参照した戦略的マネジメントによって製品生産量が大きく変化した．Fig. 4-7 に S3 における製品普及量を示すが，Fig. 4-5 に示した予め与えられた製品普及量とは大きく変化したことが確認できる．

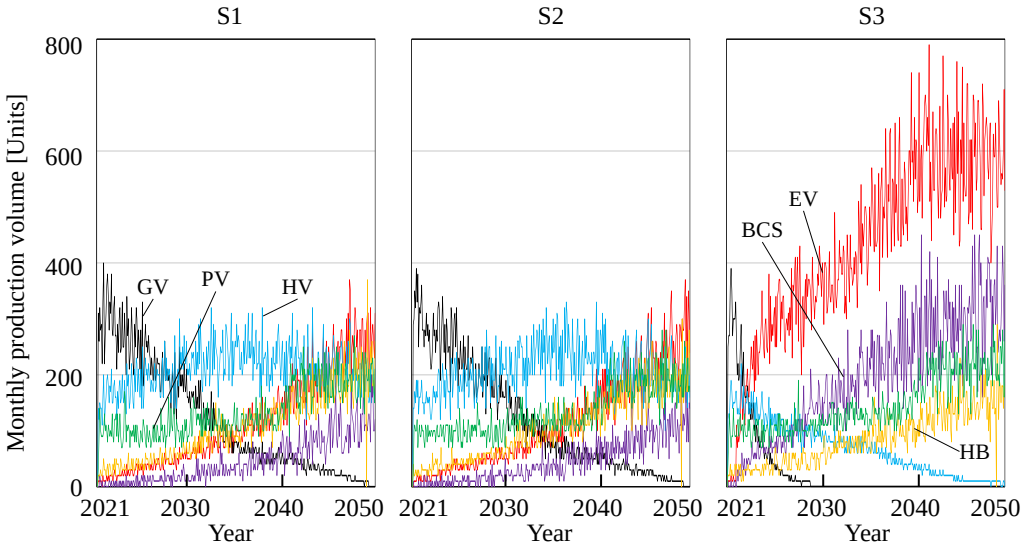



Fig. 4-6 Monthly production volume

Fig. 4-8 から Fig. 4-10 は，各シナリオの製品別 $CO_2$ 排出量の月毎推移を示したものである．Fig. 4-8 は Fig. 4-5 に示した各製品の普及率に合わせた S1 の製品別 $CO_2$ 排出量の月毎推移である．Fig. 4-9 は，S2 の製品別 $CO_2$ 排出量の月毎推移であり，Fig. 4-8 と比較すると，S1 の結果と S2 の結果には大きな違いは見られないことが確認でき，これは Fig. 4-6 で示したように製品生産量に大きな違いが発生していないためであり，S2 ではグローバルリユースなどの相互作用が発生しているが，その影響は小さいこ

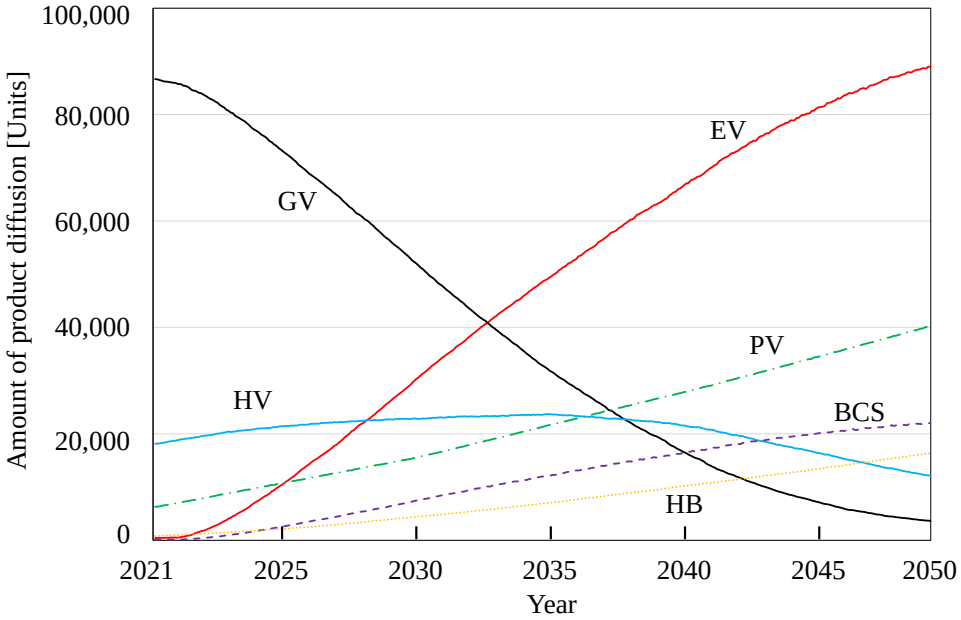



Fig. 4-7 Simulation results of amount of product diffusion in S3

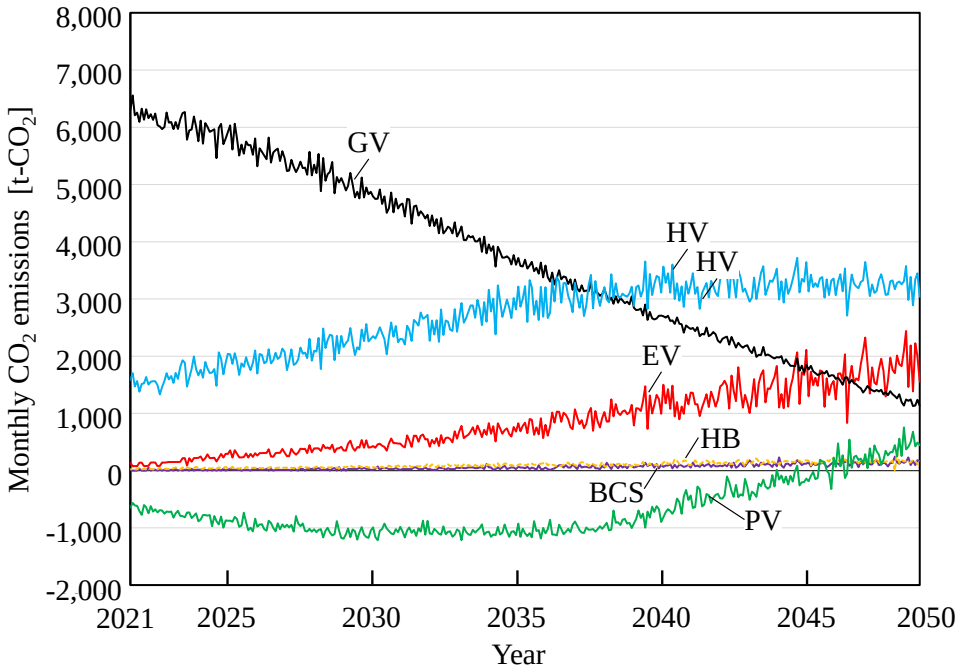



Fig. 4-8 Monthly $CO_2$ emissions of each product in S1

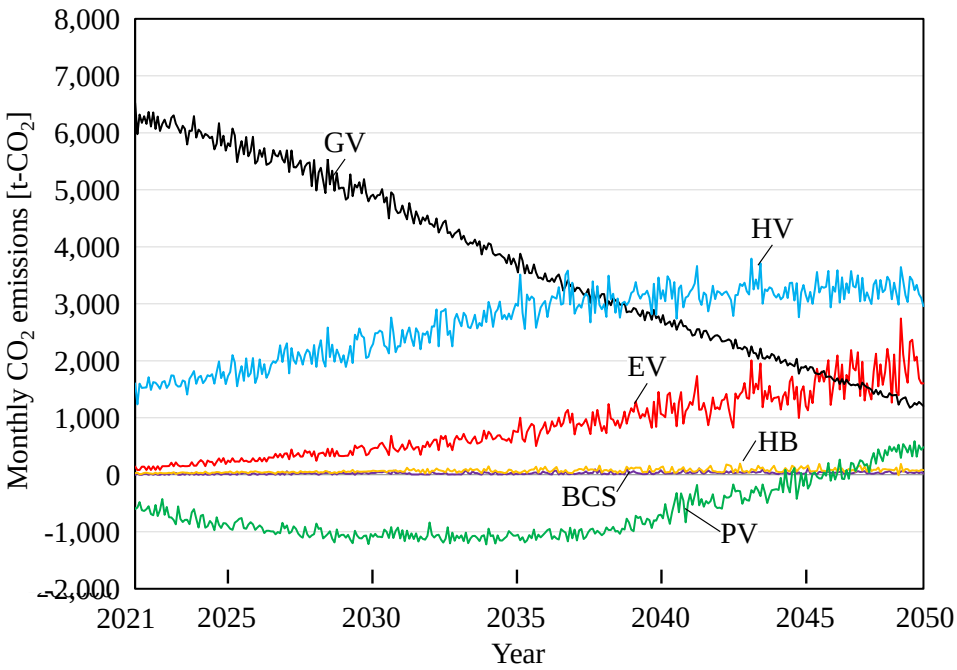



Fig. 4-9 Monthly $CO_2$ emissions of each product in S2

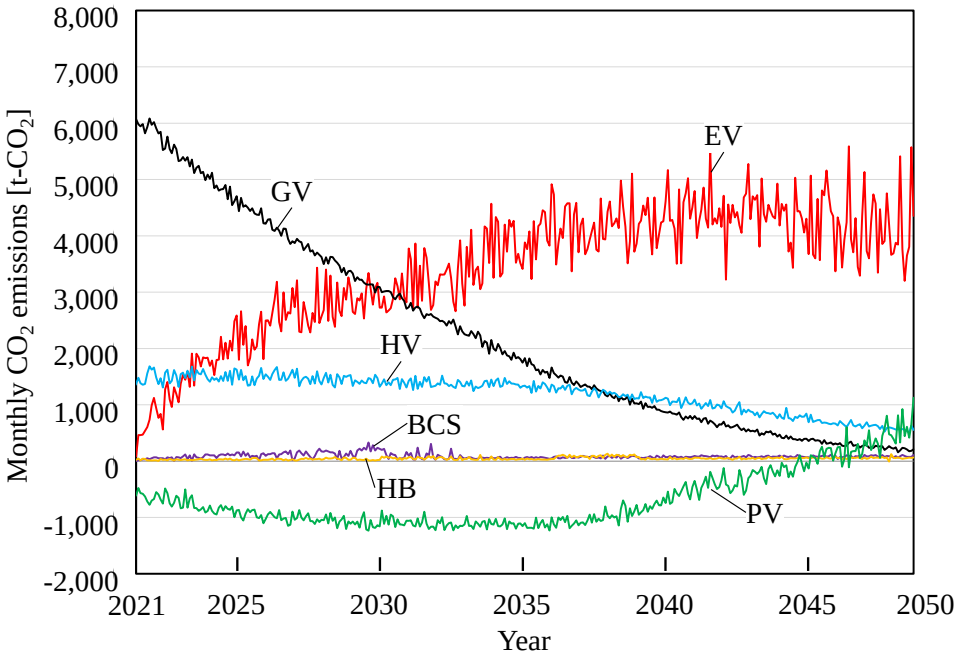



Fig. 4-10 Monthly $CO_2$ emissions of each product in S3

とを示している．Fig. 4-10 は，S3 における製品別 $CO_2$ 排出量の月毎推移であり，EV の $CO_2$ 排出量の増加率や増加量が，他のシナリオに比べて速いことが確認できる．また，GV の $CO_2$ 排出量の減少速度も速く，HV の $CO_2$ 排出量の増加量も小さくなっている．これは，車種間の需要代替の強さが変化していることを示している．BCS の $CO_2$ 排出量は他のシナリオと比較して増加しており，これは EV の需要増に伴う BCS の需要増に起因する．全てのシナリオにおいて，2040 年以降に PV の $CO_2$ 排出量が増加する．これは，社会的な発電ミックスの脱炭素化が進み，PV の利用段階での脱炭素化効果が小さくなったためである．

Fig. 4-11 は月毎の CoLSys 全体の $CO_2$ 排出量を示しており，本研究で提案したシミュレーション手法を用いた S3 では，$CO_2$ 排出量が大きく削減されていることが確認できる．2050 年において，S3 での $CO_2$ 排出量は S1 よりも約 22%，S2 よりも約 20% 減少した．S1 と S2 では大きな変化は見られない．S1 は相互作用が発生しないシナリオで，S2 は EV や HV から HB や BCS として電池がグローバルリユースされるシナリオである．両シナリオに大きな差がないのは，HB や BCS に搭載される電池の容量が小さく，$CO_2$ 排出量削減効果が小さいためと考えられる．HB や BCS の普及は EV の普及に比べると遅く，グローバルリユースの規模は小さい．S1，S2 の 2035 年頃の $CO_2$ 排出量の増加は，EV 化の進展に伴い製造時の $CO_2$ 排出量が増加するためと考えられる．S3 は，2021 年から 2030 年にかけて，S1，S2 に比べて $CO_2$ 排出量が多くな

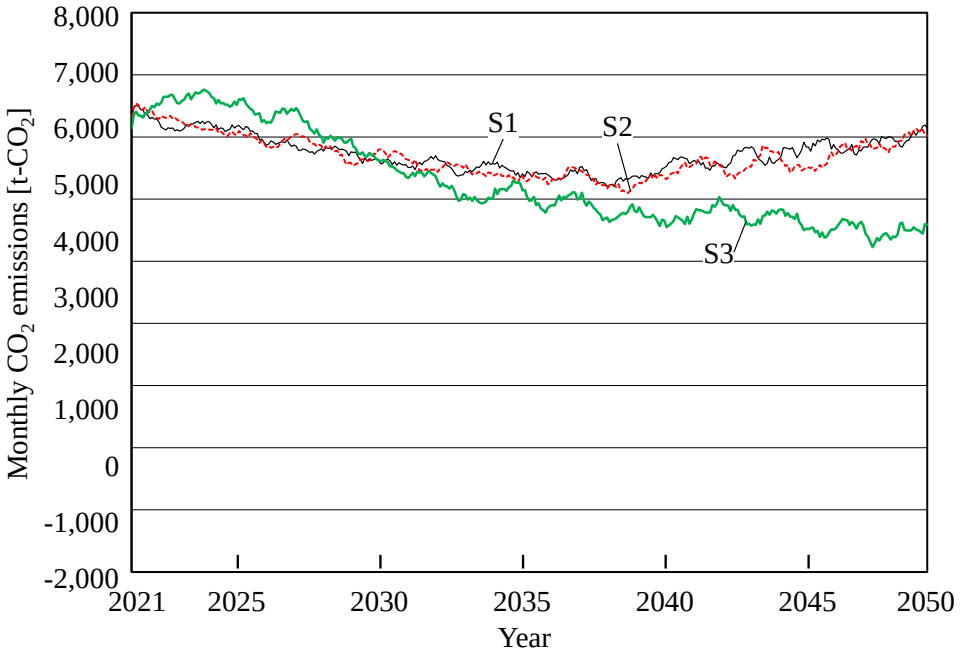



Fig. 4-11 Monthly $CO_2$ emissions of CoLSys

るが，これはこの時期に EV が多く製造されるためである．その後，一貫して減少傾向を示している．これは，電力ミックスが EV の利用を大幅に増加させたことにより，$CO_2$ 排出量が減少したためである．

このケーススタディでは，EV の意思決定者は，これら結果を用いて，設定した相互作用の運用を評価する．その結果，満足できるものであれば，その相互作用を実世界で実現するための取り組みに移る．満足できない場合は，Fig. 4-1 のフローチャートに示すように，自社の方針を見直すことになる．この事例では，結果が社会的目標から大きく乖離していたため，Fig. 4-1 の Step. 2 に戻ることになる．

### 4.5. 考察

まず，各目標の偏差（$\lambda_{CoLSys}$と$\lambda_{Sys}$）に着目して，意思決定モデルの検証を行った．Fig. 4-12 は，S3 における CoLSys の偏差（$\lambda_{CoLSys}$），GV の経済効果目標の偏差（$\lambda_{Sys}$），EV の経済効果目標の偏差 （$\lambda_{Sys}$）の移り変わりを示している．Fig. 4-12 から 2035 年までいずれの値も大きく変化していないが，2035 年以降では CoLSys の偏差値は大きく上昇したことが確認できる．これは，Fig. 4-11 に示すように，2035 年以降に設定された $CO_2$ 排出量削減目標に追いつけず，結果的に CoLSys の偏差が大きくなるためと考えられる．これらの結果は，入力された社会目標や個別の企業目標に対して想定された挙動を意思決定モデルが示していることを意味している．

続いて，各シナリオにおける LIB のグローバルリユースの挙動について説明する．Fig. 4-13（a）は HB としてグローバルリユースされた電池の数，Fig. 4-13（b）は BCS

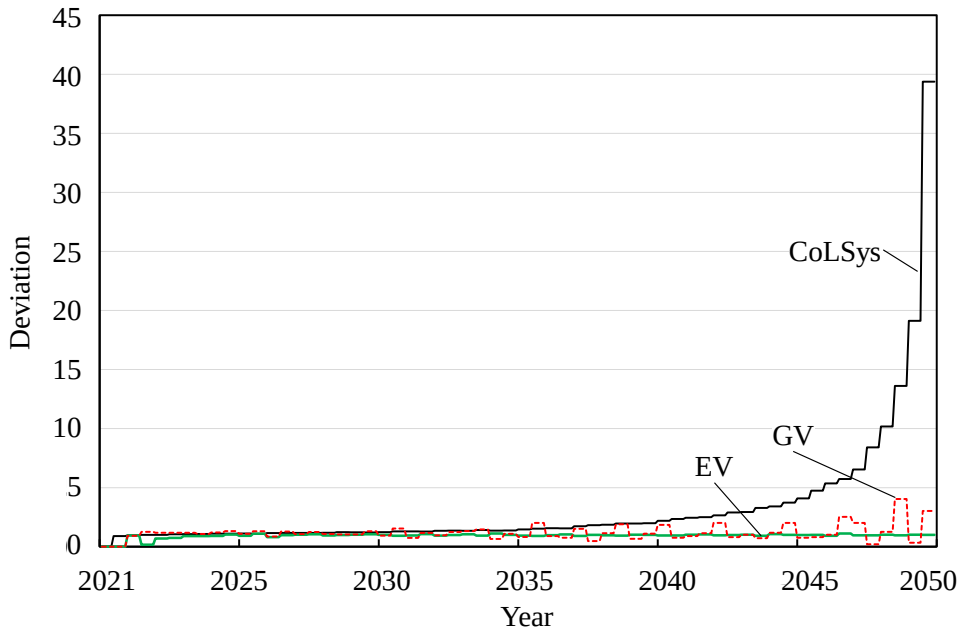
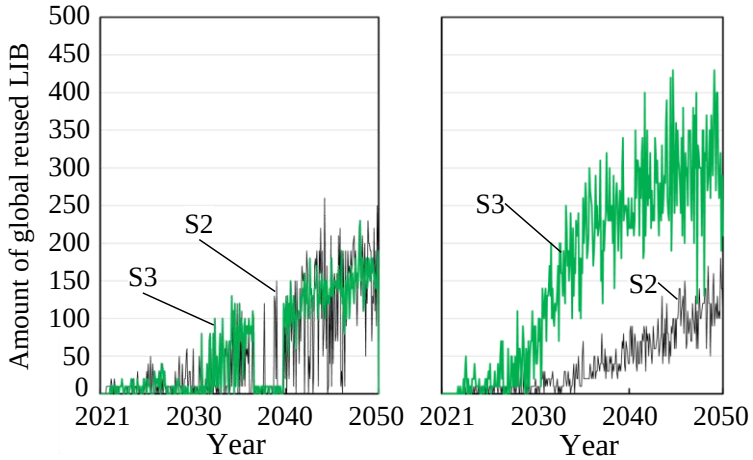



Fig. 4-12 Trends of deviation in S3

としてグローバルリユースされた電池の数である．HB としてグローバルリユースされる電池の数は，S2 と S3 で大きな差はないが，BCS としてグローバルリユースされる LIB の数は，S3 が S2 を大きく上回っている．これは，EV の需要に伴い BCS の需要が増加し，より多くの使用済み LIB がそのシステムに組み込まれた結果であると考えられる．また，Fig. 4-13（a）および（b）の S3 の結果からわかるように，2037 年頃から 2040 年にかけて，HB としてグローバルリユースされる LIB 数が減少し，同時期に BCS にグローバルリユースされる LIB 数が増加することが分かる．これらの結果から，各企業の意思決定によってグローバルリユースの増加が促された一方で，その内訳は EV の需要増加などの影響を受けることが確認された．このことは，意思決定モデルによって相互作用の強さが適切に調整されていることを示唆している．




(a) House storage battery　(b) Battery charging stand

Fig. 4-13 Amount of global reused batteries

個々の製品のライフサイクルシステムの意思決定によって，それぞれの利益推移が変化した．Fig. 4-14 は，GV，HV，EV のシナリオ別利益推移を示したものである．脱炭素化が進む S3 では，GV と HV は大きく利益を落とすが，EV は急激に利益を伸ばしている．これは，ライフサイクル複合システムの全体目標を達成するために，GV や HV から EV への需要代替を加速させるという意思決定の結果である．これは，CoLSys 全体としての $CO_2$ 排出量と，個々のシステムの経済的利益を両立させるための判断がなされていることを示している．さらに，Fig. 4-15 は，BCS，HB，PV の利益推移を示したものである．BCS の利益は S3 で大きく増加しており，これは EV の普及が早まったことに起因している．一方，HB と PV の利益は S3 において減少している．これは，2050 年の $CO_2$ 排出量ゼロという全体目標を達成するために，自らの利益を度外視して普及を加速させた結果であり，CoLSys 全体としての環境効果と個々のシス

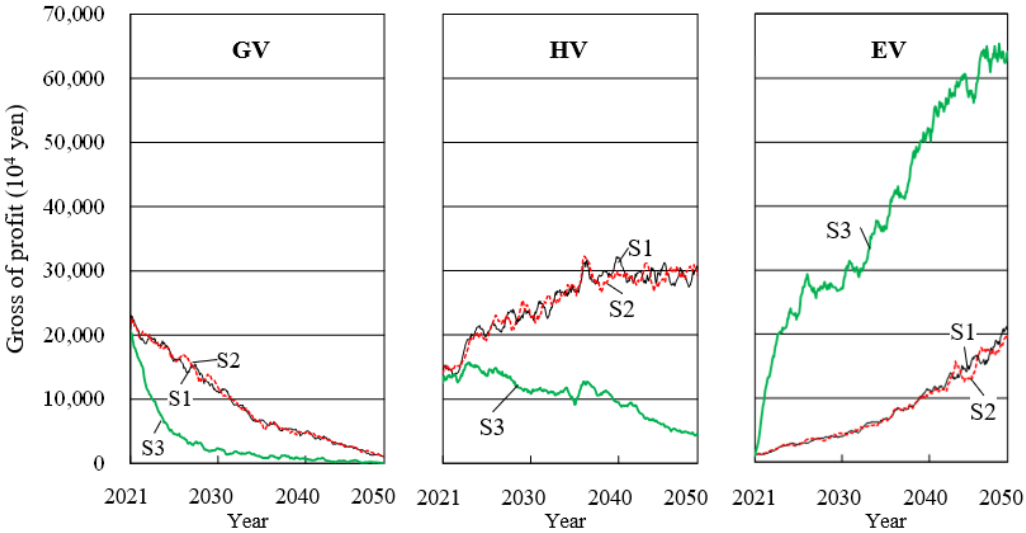



Fig. 4-14 Profit trends of each vehicle type

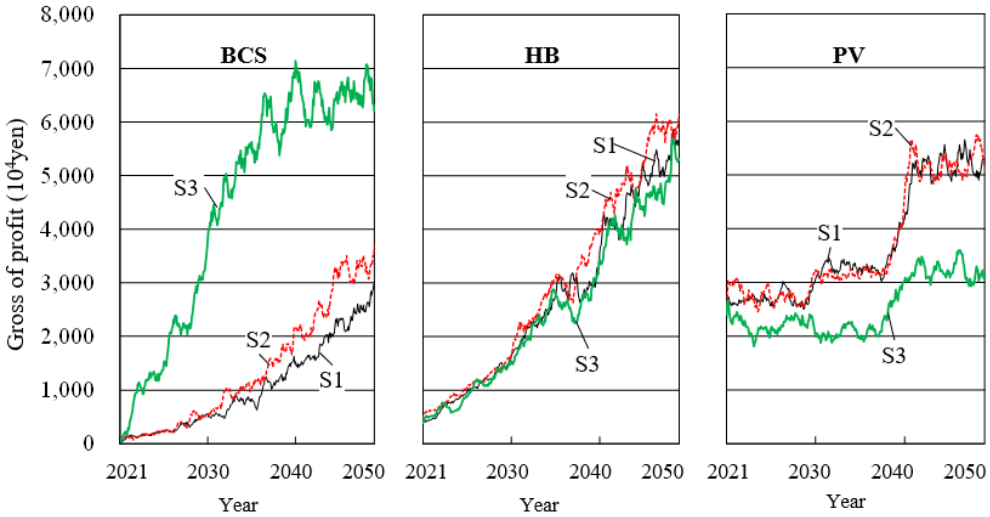



Fig. 4-15 Profit trends for BCS, HB, and PV system

テムの経済効果が釣り合っていることが確認できる．これらの $CO_2$ 排出量と利益の推移のシミュレーション結果は，意思決定モデルが，相互作用の強さを調整しながら，CoLSys 全体の環境的利益と個別システムの経済的利益をバランスよく実現できていることを示唆している．他のシミュレーション結果も含めると，本事例では，社会目標および個別目標達成のために相互作用の状態が定期的に変化しており，意思決定モデルによる社会目標と個別目標のバランスを考慮した意思決定ルールに沿って相互作用に関連するパラメータ値の修正が実現できていることが確認できる．これは他社の動向および社会目標の達成を見据えて自社の方針を意思決定するという Collaborative SoS における各企業の戦略的マネジメントを LCS に反映できていること

を示しており，構築した意思決定モデルが妥当であることを示すものだと考えられる．

しかし，社会的目標である「2050 年までに $CO_2$ 排出量ゼロ」は，S3 では達成されなかった．これは，各システムが $CO_2$ 排出量を削減するために利用できる製品決定の選択肢が少ないことと，その決定の結果，ある相互作用による $CO_2$ 排出量は削減されるが，その影響により別の相互作用による $CO_2$ 排出量は増加するためである．例えば，S3 では，GV による $CO_2$ 排出量の削減が EV による $CO_2$ 排出量の増加で相殺されていることがわかり，シミュレーションモデルや相互作用の影響によっては，$CO_2$ 排出量が増加する可能性がある．そのため，EV からの $CO_2$ 排出量はできるだけ少なくする必要がある．そのためには，EV に搭載される LIB の寿命を延ばすことが有効な手段の一つであり，この寿命延長の効果を評価することが必要である．また，製造時の $CO_2$ 排出量を削減する技術も，今後のシミュレーションモデリングに含める必要がある．また，$CO_2$ 排出量の削減を検討する上でビジネスモデルを含め，個々の目標を適切に設定することも必要だと考えられる．今回の事例では，企業の個別目標として利益の増加を設定したが，これは所有志向のビジネスモデルを考えた場合にのみ，多くの製品を生産・販売することにつながる．シェアリングサービスのような資源効率の良いサービスを組み込むことは環境負荷削減に有効な場合があり，検証が必要である．

提案モデルの課題として，マテリアルフローに関する相互作用のみを対象としていることが挙げられる．実際の戦略的経営においては，モノの流れだけでなく，人的資源の変化，競合他社の存在，規制や政策などの社会技術的なシステムの変化なども考慮する必要がある．これらの相互作用を適切に考慮するためには，システムダイナミクスやエージェントベースシミュレーションなど，他のシミュレーションツールを取り入れる必要があると考えられる[10].

意思決定モデルに関する課題として，評価対象となる目標にどのような評価単位を含めるかを適切に検討する必要がある．今回は，結合型ライフサイクルシステムズ全体の評価指標として $CO_2$ 排出量を用いたが，今後，対象となる評価指標が増える可能性がある．例えば，資源消費量は考慮されるべき指標だが，EV を含む製品の電動化に伴い，より多くの資源が消費される可能性があるため，より複雑な評価指標となる．そのため，対象指標ごとに適切なアルゴリズムを意思決定モデルに適用する必要がある．また，本研究では一つの意思決定モデルで戦略的マネジメントをシミュレーションできるのは一つの相互作用のみであり，複数の相互作用を対象とする戦略的マネジメントのシミュレーションはできない．複数の相互作用を対象とする戦略的マネジメントでは相互作用間の関係性が重要になると思われる．つまり，相互作用間で正の関係を持つ場合は同時に展開することが可能であると捉えることが可能であるが，相互作用間で負の関係を持つ場合はどちらの相互作用を優先するか判断する必要がある．このことから，複数の相互作用を対象とする戦略的マネジメントのモデル化では相互作用間の関係性を陽にモデル化することが求められると考えられ，今後の課題

である．

社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化において，本研究では製品ごとに異なる企業が存在しているという仮定をおいてケーススタディモデルの構築を行った．例えば本研究ではガソリン自動車と電気自動車はそれぞれ異なる企業が製造していると想定し，単一企業が複数の車種を製造していることを想定していない．これは意思決定モデルが設定された意思決定ルールに沿って相互作用に関連するパラメータ値を修正できているかについて検証する際には有効なシミュレーションモデルであるが，現実世界では企業は複数の製品を同時に展開し，その中でどの製品をどのくらい提供するのかというマネジメントを行うため，単一の企業による複数製品ライフサイクルシステムのマネジメントを考慮したモデル化が必要になると考えられる．

### 4.6. 結言

本章では，社会目標を考慮した戦略的マネジメントが Collaborative SoS における企業の振る舞いであることに着目し，既存モデルではほとんど考慮されていなかった超システムの特徴である管理および運用の独立性を陽にモデル化するために意思決定モデルが含まれる LCS モデルを開発した．意思決定モデルには社会目標と企業の個別目標の達成状況が考慮された意思決定ルールが含まれ，設定された意思決定ルールにそって相互作用に関連するパラメータ値の修正がシミュレーション期間で繰り返し行われる．

提案モデルの有効性を示すため，電気自動車を中心とした CoLSys に適用し，2050 年の $CO_2$ 排出量ゼロという社会目標を設定したシミュレーションを実施した．その結果，個別目標のみを考慮したシナリオと比較してガソリン自動車から電気自動車への移行がより早くより大規模に発生し，2050 年時点で約 20%の $CO_2$ 排出量削減が確認され，社会目標を考慮した意思決定が LCS 中に行われたことを確認した．また，利益推移のシミュレーション結果についても考察し，需要代替による利益の減少を確認した．その結果から，意思決定モデルは，CoLSys 全体の $CO_2$ 排出量と個々のライフサイクルシステムの経済的利益を，相互作用の強さを調整しながらバランスさせていることを確認し，想定した Collaborative SoS における企業の振る舞いをモデル化できていることを確認した．

今後の課題としては，相互作用の種類を増やすこと，より複雑な指標間のトレードオフを考慮できる意思決定モデルの開発，マテリアルフロー以外の相互作用への適用，などが挙げられる．

## 参考文献


[1] M. Zelany, “A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal,” Computers and Operations Research, Vol.1, Issue 3-4, pp. 479-496, 1974.

[2] S. Kosai, K. Matsui, K. Matsubae, E. Yamasue, and T. Nagasaka, “Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles considering land disturbances,” Resources Conservation and Recycling, Vol.166, 105256, 2021.

[3] F. Knobloch, S. V. Hanssen, A. Lam, H. Pollitt, P. Salas, U. Chewpreecha, M. A. Huijbregts, and J.F, Mercure, “Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time,” Nature Sustainability, Vol.3, pp. 437—447, 2020.

[4] N. Jiao, “Second-life electric vehicle batteries 2020-2030.” IDTechEx, 2019.

[5] L. Albertsen, J. L. Richter, P. Peck, C. Dalhammar, and A. Plepys, “Circular business models for electric vehicle lithium-ion batteries: An analysis of current practices of vehicle manufacturers and policies in the EU,” Resources, Conservation and Recycling, Vol.172, 105658, 2021.

[6] Yano Research Institute, “Lithium-ion Battery Reusing and Recycling 2021,” 2021.

[7] T. Kobashi and M. Yarime, “Techno-economic assessment of the residential photovoltaic systems integrated with electric vehicles: a case study of Japanese households towards 2030,” Energy Procedia, Vol.158, pp. 3802-3807, 2019.

[8] K. Springel, “Network Externality and Subsidy Structure in Two-Sided Markets: Evidence from Electric Vehicle Incentives,” American Economic Journal: Economic Policy, Vol.13, No.4, pp. 393-432, 2021.

[9] J. Hoppmann, J. Volland, T. S. Schmidt, V. H. Hoffmann, “The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.39, pp. 1101-1118, 2014.

[10] H. Kobayashi, H. Murata, and S. Fukushige, “Connected lifecycle systems: A new perspective on industrial symbiosis,” Procedia CIRP, Vol.90, pp. 388-392, 2020.

# 第5章　自動車の電動化と製品共有に向けた戦略的マネジメントのためのモデル化とシミュレーション

## 5.1. 緒言

本章では第 3 章で提案した自動車の電動化と製品共有を考慮した LCS モデルと第 4 章で提案した社会目標を考慮した戦略的マネジメントを反映した LCS モデルを併用して自動車の電動化と製品共有に向けた戦略的マネジメントをモデル化する．ケーススタディとして，軽電気自動車（S-EV），軽ガソリン自動車（S-GV），普通車サイズの電気自動車（M-EV）とガソリン自動車（M-GV），家庭用蓄電池（HB），充電スタンド（BCS），太陽光発電システム（PV）の 7 製品からなる結合型ライフサイクルシステムズを対象とし，また S-EV，M-EV，M-GV の三車種はカーシェアリングサービスに用いられるとした．

## 5.2. シミュレーション手順

Fig. 5-1 に提案するシミュレーション手順を示す．これは第 3 章と第 4 章で示した LCS 手順を組み合わせたものである．それぞれのステップについて述べる．

Step.1　システムバウンダリの設定

最初のステップとして，評価するシステムの範囲を決定していく．これは対象とする結合型ライフサイクルシステムズの範囲を決定することと同じである．まず, 評価の中心とする製品を選択する (1-1). 本手法およびシミュレーションツールは製造企業の意思決定者および技術者が用いることを想定しており，ここでは主に自社製品が選択されることになる．続いて，選択された自社製品に関連する異種製品が選択される（1-2）．ここでは文献[1]が提案している結合型ライフサイクルシステムズにおける相互作用の一覧を参考にしながら製品の選択が行われる. そして選択された各製品のビジネスモデルが選択される (1-3). ここで主に，その製品が従来の売り切り型でビジネスを展開するのか，それともシェアリングサービスを含めた製品ライフサイクルシステムに組み込まれるのかが検討される．

Step.2　製品モデルの構築

既存の LCS 手法と同様に，Step.1 にて選択された製品の構成部品やそれらの寿命，構成材料などの製品由来データを収集し，製品モデルを構築していく．

Step.3　プロセスモデルの構築

製品モデル構築の後，プロセスモデルの構築を行う．まず，各製品ライフサイクルプロセスモデルが構築される（3-1）．ここで，Step.1 にて検討されたビジネスモデルが参照されることになる．具体的には，売り切り型と製品サービスシス

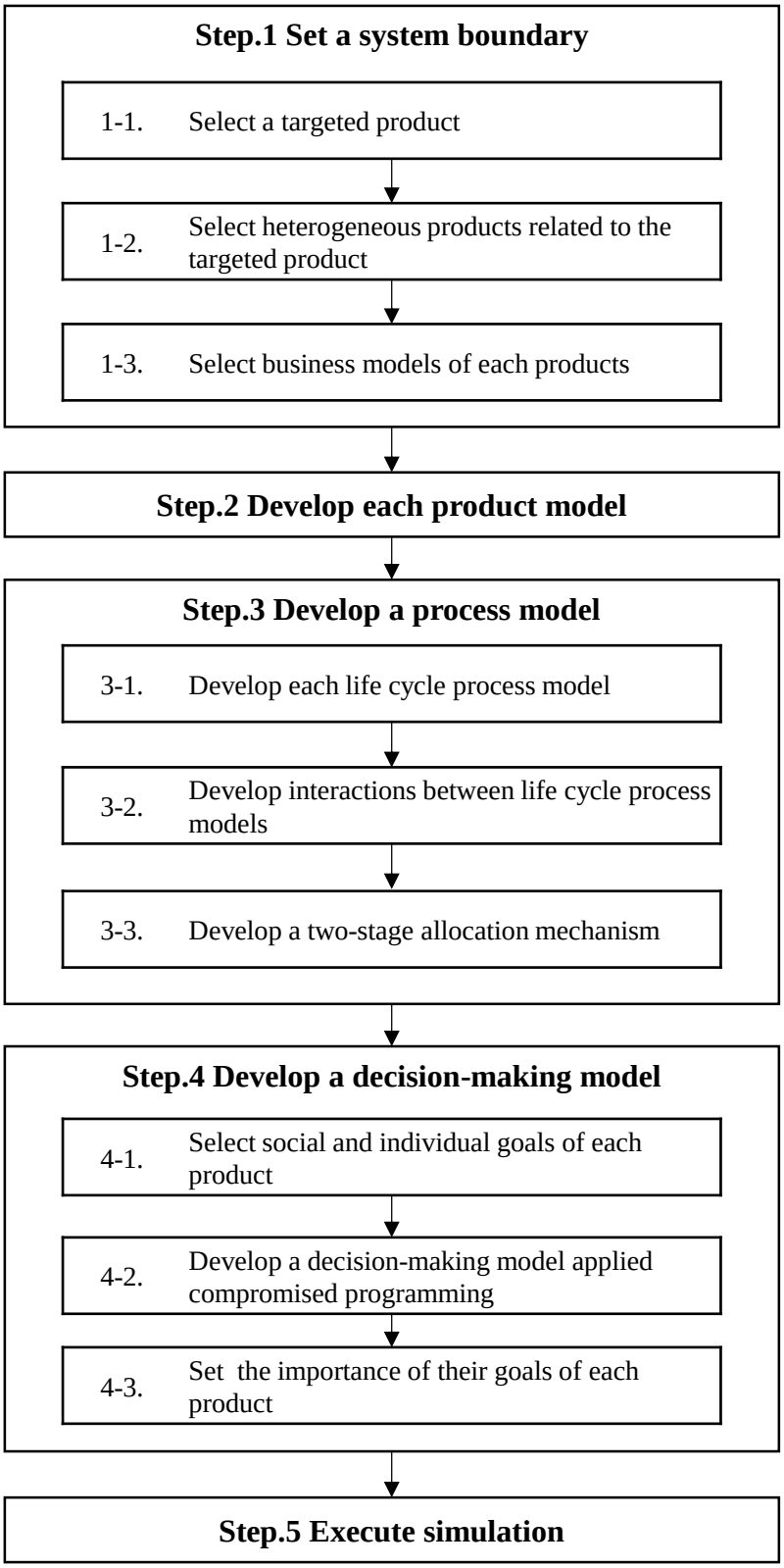



Fig. 5-1 Flowchart to life cycle simulation including proposed models

テム型が同時に展開されることを想定するとした場合，異なる使用プロセスが製品ライフサイクルプロセスモデルに組み込まれることになる．各製品の製品ライフサイクルプロセスモデルを構築後，製品ライフサイクルプロセス間を接続する相互作用をモデル化する（3-2）．このステップにより，結合型ライフサイクルシステムズのモデルが構築されることになる．そして，異種製品間で展開されるシェアリングサービスを扱うために，二段階分配メカニズムが構築される（3-3）．

Step.4　意思決定モデルの構築

第 4 章で述べたように，意思決定モデルは結合型ライフサイクルシステムズにおける相互作用発生制御に関係する．本手法では環境，社会，経済が織りなすネスト構造という概念に従って，社会全体の環境性と個別企業の経済性のバランスを考慮して相互作用の発生を意思決定するという意思決定ルールが適用されたモデルを構築する．まず，各製品ライフサイクルの社会目標と個別目標が設定される（4-1）．ここで基本的に，社会目標では $CO_2$ 排出量などの環境性指標，個別目標では企業利益など経済性指標が設定される．これら目標を設定した後，Compromised programming 法が適用された意思決定ルールを設定する（4-2）．そして Compromised programming 法にて設定する必要がある，各目標の重要度が設定される（4-3）．

Step.5　シミュレーションの実行

シミュレーション条件を設定し，シミュレーションを実行する．

また提案した二つの手法を計算機上に実装した．システムの構成は Fig. 5-2 に示す通りである．本研究で追加したシステムについては赤線で示している．各システムについて説明する．

- Database editor

LCS 実施に向けた基本データを作成するシステム．Product DB では製品の部品構成やその階層関係が格納され，Process DB では製造データや製品の使用状況など対象となる各ライフサイクルプロセスのデータが格納される．LCA DB には，電力や材料，工程ごとの環境負荷原単位データなどが格納される．

- Two-stage allocated mechanism editor

分析者が対象とする製品やサービスの情報やそれぞれがマテリアルフローに与える影響に関するデータを編集するシステム．それらは Two-stage allocated mechanism DB に格納され，Process DB への渡されることで製品とサービスの同

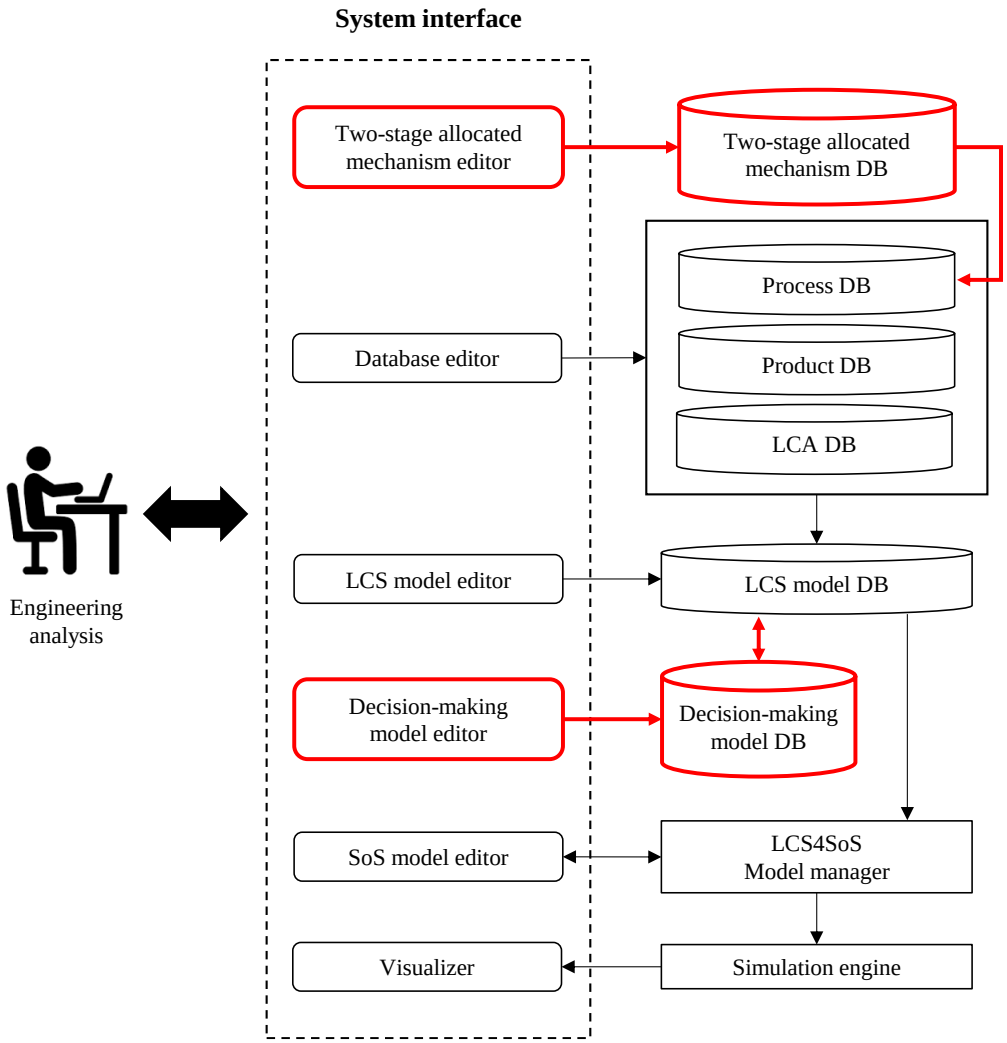



Fig. 5-2 System configuration

時普及時の生産台数への影響を矛盾なく反映させることが可能になる．

- LCS model editor

  Product DB，Process DB，LCA DB にて格納されているデータを用いて単一製品または製品群の LCS モデルを構築するシステム．

- Decision-making model editor

  対象とする各製品ライフサイクルシステムの意思決定を記述するためのシステムであり，意思決定モデルを LCS に導入するために追加した．意思決定の対象となる相互作用，相互作用に関連するパラメータ，その値の変動割合，意思決定間隔が記述され，Decision-making model DB に格納される．この DB はシミュレーションの間，LCS model DB との相互参照が行われる．

- SoS model editor, LCS4SoS Model manager

  個別 LCS モデルを相互作用の設定を通して接続するシステム．SoS model editor で入力された情報は LCS4SoS Model manager 上に反映され，LCS モデル間の相互作用と CoLSys の境界が可視化される．また，Decision-making model DB のデータが渡されることで，意思決定に基づく相互作用の動的な変化を考慮可能としている．

- Simulation engine

  構築した LCS モデルを対象として LCS を実行するシステム．

### 5.3. ケーススタディ

二つの提案モデルを基に構築した，自動車の電動化と製品共有に向けた戦略的マネジメントモデルの妥当性を検証するために，ケーススタディを実施する．本ケーススタディでは，軽電気自動車を製造する企業の意思決定者が本提案手法を用いることを想定する．現在，世界中の各自動車メーカからコンパクトカーサイズやより大型の電気自動車が発表されている．日本でも同様の傾向があるが，それに加えて軽自動車の電動化も進められている．本研究では軽自動車サイズの電動車両を S-EV と呼ぶ．S-EV は日産リーフ等の電気自動車と比較して搭載している電池容量は小さく，環境性や購入費用等の消費者の経済性の面で優位性がある．一方で，依然として電気自動車を所有することはハードルが高く，シェアリングサービスを通した利用も想定される．特に，今後主要な消費者となる 1990 年代中盤から 2010 年代序盤に生まれた「Z 世代」の人々はシェアリングエコノミーへの抵抗が少なく，その傾向は今後の世代でも続いていくと予想される[2]．また SEV は，車載電池が異種製品にグローバルリユースされる可能性があり，そしてその際にはコンパクトカーサイズの電気自動車と競合する可能性がある．これら要素から，SEV の意思決定者はシェアリングサービス普及の影響と他会社の電気自動車のマテリアルフローに関する意思決定の影響を評価することが重要だと考えられる．

以下，提案した検証手順に基づいてケーススタディを実行する．

Step.1　システムバウンダリの設定

前述したように，本ケーススタディでは S-EV を対象製品として選択する（1-1）．続いて，S-EV と相互作用を発生させ，結合型ライフサイクルシステムズを形成しうる製品を選択していく（1-2）．本ケーススタディでは，S-GV，M-EV，M-GV，HB，BCS，PV を選択した．現在普及している S-GV は今後，S-EV にその需要は代替されると考えられる．M-EV と S-EV との間では車載 LIB のリユースが発生すると考えられ，HB や BCS に対しては車載 LIB のグローバルリユースを

競合していくと考えられる．そのため，M-GV から M-EV への移行速度は S-EV にとって重要である．また，M-EV および S-EV と HB との間では副機能による需要代替が発生する可能性があり, HB の需要変化は PV の普及に影響を及ぼす.

結合型ライフサイクルシステムズに含まれる製品を選択した後，各製品のビジネスモデルを選択する（1-3）．本ケーススタディでは，S-EV，M-EV，M-GV の 4 製品については，個人所有とカーシェアリングサービスの 2 種類の使用形態が普及すると想定し，HB と PV については売り切り型の個人所有，そして BCS はガソリンスタンドのような形式で共有されるものと設定した．カーシェアリングサービスは日本のタイムズカーシェアのように決められた駐車場に自動車を返却するステーション型のカーシェアリングを想定している．

Step.2　製品モデルの構築

システムバウンダリを設定した後，製品モデルの構築を行っていく．以下，対象とする製品を説明する．

- 電気自動車（M-EV）

  本ケーススタディでは日産リーフ相当のコンパクトカーサイズの電気自動車を対象とする．搭載している車載電池は 33.7kWh としている．M-EV は車体，タイヤ，リチウムイオン電池（LIB），モータから構成されるとし，構成材料は文献[3]に基づいている．電気自動車の平均寿命は 85,000km と仮定し，85,000km を最頻値とする三角分布（0～200,000km）を設定した．この平均寿命は日本の平均車両廃棄年数[4]と平均年間走行距離[5]から算出している．また，LIB は残存容量が 70%に到達した時点で交換・廃棄されると仮定し，平均寿命は 107,840km と設定している[6]．一方で，カーシェアリングサービスで用いられる車両の場合，LIB の残存容量が 50%に到達した時点で交換・廃棄されると仮定し，平均寿命は 177,400km と設定している．また，製造にかかるコストや販売の際に得られる利益については文献[7]を基に計算している．以下に示す M-GV，S-EV，S-GV についても同様である．

- ガソリン自動車（M-GV）

  本ケーススタディではコンパクトカーサイズのガソリン自動車を対象としており，1,300cc のエンジンが搭載している車両を想定する．また車両全体の重量は約 1077kg である．M-GV は車体，タイヤ，エンジン，軽バッテリーから構成されるとし，材料構成は文献[3]に基づいている．M-GV の平均寿命は M-EV のものと同様に計算され，85,000km と仮定している．

- 軽電気自動車（S-EV）

  本ケーススタディでは日産サクラ相当の軽サイズの電気自動車を対象とする．搭載している車載電池は 20kWh としている．S-EV は車体，タイヤ，LIB，モータから構成されるとし，各部品の材料構成は M-EV のものを基に車両重量比や電池容量比で換算している[3]．S-EV の寿命は電気自動車と同じと仮定し，LIB の寿命については電池容量で換算を行っている．

- 軽ガソリン自動車（S-GV）

  本ケーススタディではホンダ NBox 相当の軽サイズの電気自動車を対象とする. 搭載しているエンジンの排気量は 700cc とし, 車両全体の重量は 890kg である．S-GV は車体，タイヤ，エンジン，軽バッテリーから構成されるとし，各部品の材料構成は M-GV の数値を，車両重量比を基に換算したものである[3]．寿命は M-GV と同じと仮定している．

- 充電スタンド（BCS）

  普通充電器で，充電の際の補助として 12kWh の LIB が併設されているものを想定する．充電器そのものの構成材料は文献[8]に基づき，併設している LIB については M-EV のデータを電池容量で換算したものを使用している．BCS の寿命は 6 年を最頻値とする三角分布と設定した [8].

- 家庭用蓄電池（HB）

  HB は 6kWh の LIB が搭載されているものを対象とし，LIB とインバータ等のその他部品で構成される．LIB の構成材料は M-EV のデータを電池容量で換算したものを使用し, その他部品の構成材料は文献[9]の数値を採用している．HB の寿命は 10 年を最頻値とする三角分布と仮定した．

- 太陽光発電システム（PV）

  本ケーススタディでは多結晶 Si 太陽電池モジュールと周辺機器で構成される住宅用の PV を対象とする．システム出力は 4kW のものを想定し，構成材料は以下の通りである[10]．PV の寿命は使用年数によって設定され，20 年を最頻値とする三角分布と設定した[10].

Step.3　プロセスモデルの構築

製品モデルの構築後，対象製品のライフサイクルプロセスモデルを構築する．以下，各製品のライフサイクルプロセスモデルを説明する．

- M-EV と S-EV

M-EV および S-EV のライフサイクルプロセスモデルを Fig. 5-3 に示す．M-EV と S-EV は部品製造プロセス，組立プロセス，使用プロセス，回収プロセス，修理プロセス，廃棄プロセスで構成される．本ケーススタディでは構成部品を車体，モータ，LIB，タイヤの四つに分類し，車体にはモータ，LIB，タイヤ以外の部品が含まれるように各部品製造プロセスをモデル化した．

部品製造プロセスで製造された部品は主に組立プロセスへと送られるが，事故によって車体が破損した車両および LIB 交換が必要な車両向けの修理部品が修理プロセスへと送られる．

組立プロセスでは部品製造プロセスから送られてきた部品を組み立て，完成品を製造する．製造した電気自動車は各使用プロセスへと送られる．

使用プロセスでは月間走行距離など，シミュレーション時間あたりの製品使用状況が記述され，それらを基に環境負荷が算出される．また，使用プロセスでは寿命判定および修理判定が行われる．寿命判定では車両そのものの寿命が検討され，寿命を迎えた車両は回収プロセスへ送られる．一方で，修

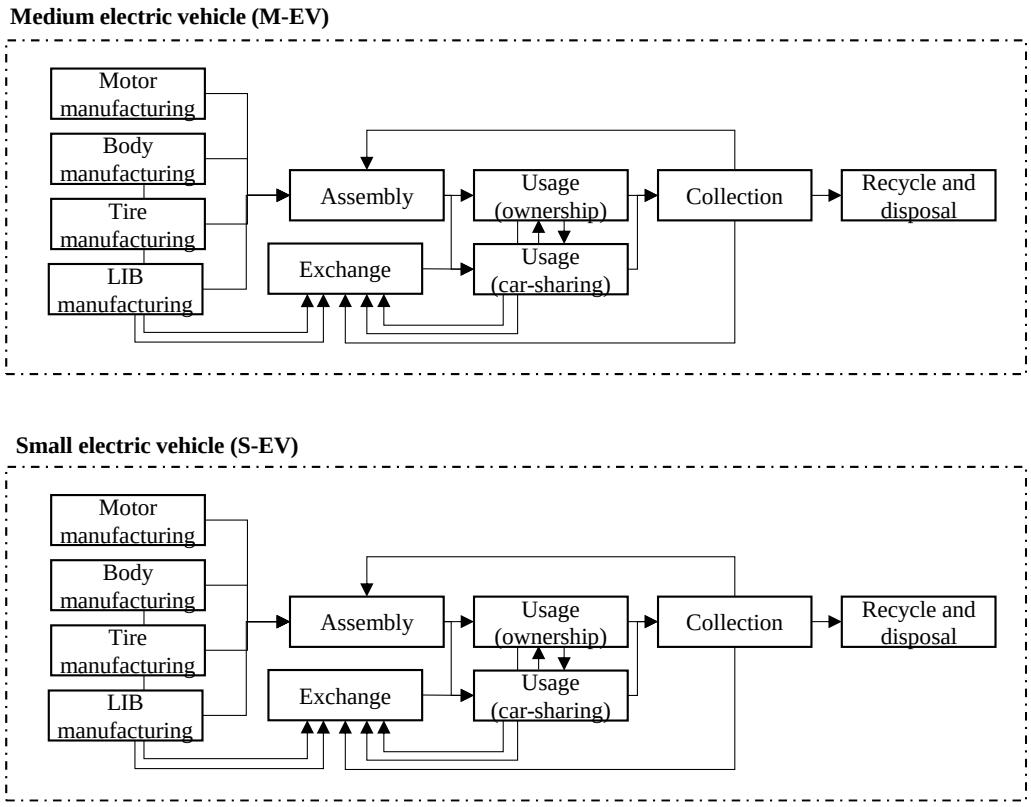



Fig. 5-3 Life cycle process model of EV and SEV

理判定では車体と LIB の部品の寿命を基に判定が行われ, 修理が必要と判定された車両は修理プロセスへと送られる. 本ケーススタディでは個人所有とカーシェアリングの 2 種類の使用形態を考慮するため, それぞれの使用プロセスを構築している. 使用プロセス間では移動需要の代替が発生しており, 移動需要の移り変わりを基に各使用プロセスで使用される車両数が決定される. また, 個人利用車の LIB は残存容量が 70%に到達した際に交換が必要と仮定し, カーシェアリング車の LIB は残存容量が 50%に到達した際に交換が行われると仮定した.

修理プロセスでは各使用プロセスにて車体修理もしくは LIB 交換が必要と判定された車両が送られてくる. 修理が済んだ車両は再び元の使用プロセスへと戻される.

回収プロセスでは寿命を迎えた車両が使用プロセスから送られ, 車両の分解が行われる. このとき, 個人利用車の LIB についてはシェアリング車両へのリユースが検討される.リユースが行われなかった個人利用車の LIB およびシェアリング車両の LIB は後述する異種製品へのグローバルリユースが行われるか, 廃棄プロセスへと送られることになる.

廃棄プロセスでは送られてきた電気自動車や修理時に交換された車体や LIB のリサイクル処理が行われ, リサイクルされない材料については埋立処理される. 各部品のリサイクルされる材料やリサイクル率については文献[9, 11]を参考にした.

- M-GV と S-EV

M-GV および S-GV のライフサイクルプロセスモデルを Fig. 5-4 に示す. M-GV と S-GV は部品製造プロセス, 組立プロセス, 使用プロセス, 修理プロセス, 廃棄プロセスで構成される. 本ケーススタディでは構成部品を車体, エンジン, 軽バッテリー, タイヤの四つに分類し, 車体にはモータ, LIB タイヤ以外の部品が含まれるように各部品製造プロセスをモデル化した. 部品製造プロセスで各部品が製造された後に組立プロセスへと送られる. 組立プロセスで製造された完成品は個人利用車, カーシェアリング車それぞれの使用プロセスへと送られ, 使用状況に応じた環境負荷計算, 寿命判定, 修理判定が行われる. ここで, 本ケーススタディではカーシェアリングサービスに用いられるのは M-GV であり, S-GV は用いられないとする. 前述の通り, 寿命設定などは M-EV や S-EV と同じである. 修理プロセスでは車体の修理が行われる. 一方で, M-EV や S-EV とは異なり, 新規製造製品への部品のリユースは考慮されない. 使用プロセスにて寿命判定が行われた車両は廃棄プロセスへと送られ, リサイクルおよび埋立処理が行われる. 各部品のリサ

イクル率については文献[9]の数値を用いている．

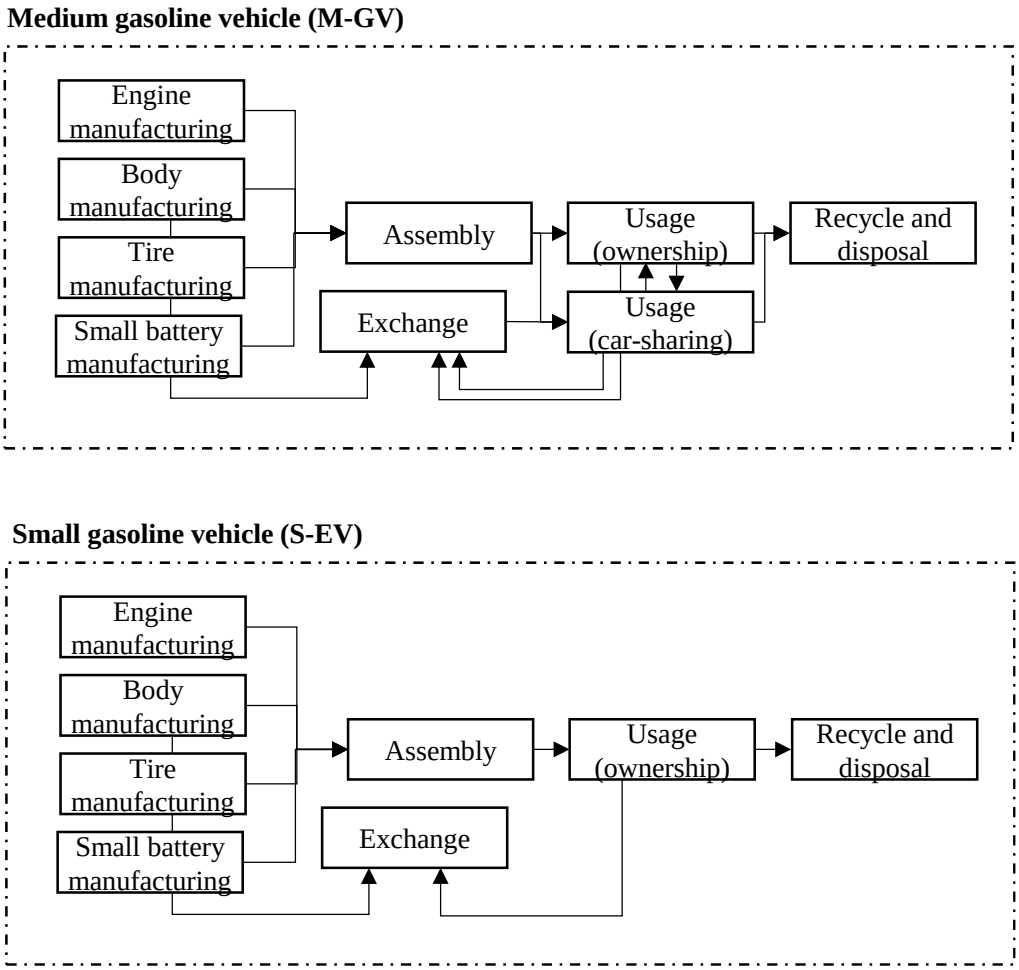



Fig. 5-4 Life cycle process model of GV and SGV

- BCS

BCS のライフサイクルプロセスモデルは Fig. 5-5 に示すように，製造プロセス，使用プロセス，廃棄プロセスで構成されている．LIB が構成部品として含まれており，M-EV や S-EV からの使用済み LIB のグローバルリユースが考慮できるようにモデル化がされている．また，充電スタンドの普及台数

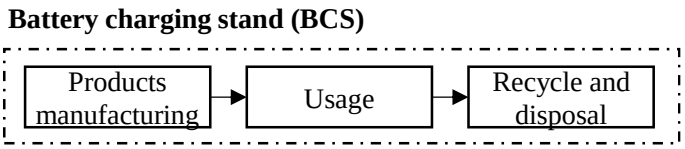



Fig. 5-5 Life cycle process model of BCS

は普及している M-EV と S-EV の合計台数を基に計算され，電気自動車 4 台につき 1 基製造される[8]. 廃棄プロセスでは部品ごとに分解された後にリサイクルを行い，リサイクルできなかった素材は埋め立て処理される．リサイクルされる素材のリサイクル率は電気自動車の LIB およびガソリン自動車の車体の数値と同じものを使用している．使用済み部品のリユースは行われないとした．

- HB

HB のライフサイクルプロセスモデルは Fig. 5-6 に示すように，製造プロセス，使用プロセス，廃棄プロセスで構成されている．BCS と同様，LIB が構成部品として含まれており，M-EV や S-EV からの使用済み LIB のグローバルリユースが考慮できるようにモデル化がされている．廃棄プロセスでは部品ごとに分解された後にリサイクルを行い，リサイクルできなかった素材は埋め立て処理される．リサイクルされる素材のリサイクル率はガソリン自動車と同じ数値を設定している．使用済み部品のリユースは行われない．

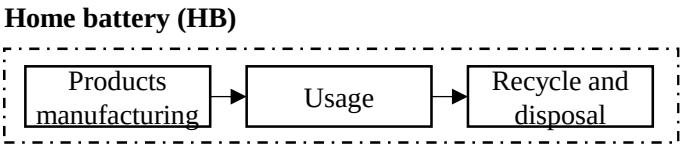



Fig. 5-6 Life cycle process model of HB

- PV

PV のライフサイクルプロセスモデルは Fig. 5-7 に示すように，製造プロセス，使用プロセス，廃棄プロセスで構成されている．住宅用 PV の普及は火力発電所等から供給される電力を代替すると考えられ，発生するはずだった環境負荷を減らすことができると考えられる．そのため，使用プロセスでは時間経過ごとに変化する発電ミックスを参照しながら，削減できる環境負荷が計算されていく．廃棄プロセスでは他製品と同様にリサイクルが行われ，リサイクルされない素材については埋立処理がなされる．使用済み部品のリユースは行われない．

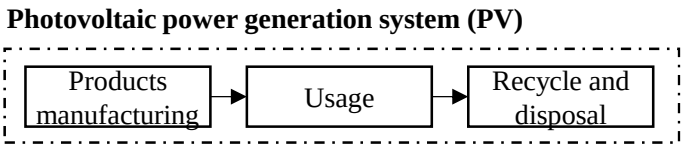



Fig. 5-7 Life cycle process model of PV

上記に示した各製品のライフサイクルプロセスモデルを構築した後，ライフサイクルプロセス間で発生する相互作用を設定し，結合型ライフサイクルシステムズモデルを構築する（3-2）．本ケーススタディでは Table. 5-1 に示す相互作用を設定し，Fig. 5-8 に示す結合型ライフサイクルシステムズモデルを構築した．

Table. 5-1 Interactions of CoLSys

| Interaction name | | Related products | Details |
|---|---|---|---|
| (I-1) | Demand substitution | M-EV, M-GV | Demand substitution of travel demand between M-EV and M-GV |
| (I-2) | Demand substitution | S-EV, S-GV | Demand substitution of travel demand between S-EV and S-GV |
| (II-1) | Battery reuse from M-EV to S-EV | M-EV, S-EV | Reuse of used LIB of M-EV to S-EV |
| (II-2) | Global reuse from M-EV to BCS | M-EV, BCS | Global reuse of used LIB of M-EV to BCS |
| (II-3) | Global reuse from M-EV to HB | M-EV, HB | Global reuse of used LIB of M-EV to HB |
| (II-4) | Global reuse from S-EV to BCS | S-EV, BCS | Global reuse of used LIB of S-EV to BCS |
| (II-5) | Global reuse from S-EV to HB | S-EV, HB | Global reuse of used LIB of S-EV to HB |
| (III-1) | Demand increase | M-EV, S-EV, BCS | Increased demand for BCS due to the diffusion of M-EV and S-EV, vice versa |
| (III-2) | Demand increase | HB, PV | Increased demand for PV due to the diffusion of HB, vice versa |
| (IV) | Demand substitution by sub-function | M-EV, S-EV, HB | Demand substitution of HB by converting M-EV and S-EV into household storage batteries |

相互作用が設定された後，二段階分配メカニズムを構築する．本ケーススタディではガソリン自動車と電気自動車，軽ガソリン自動車と電気自動車の間で発生する移動需要の代替を対象として，使用形態間の移動需要および生産台数の分配が行われた後，車種間の分配が行われる．二段階分配メカニズムについては第 3 章を参照していただきたい．

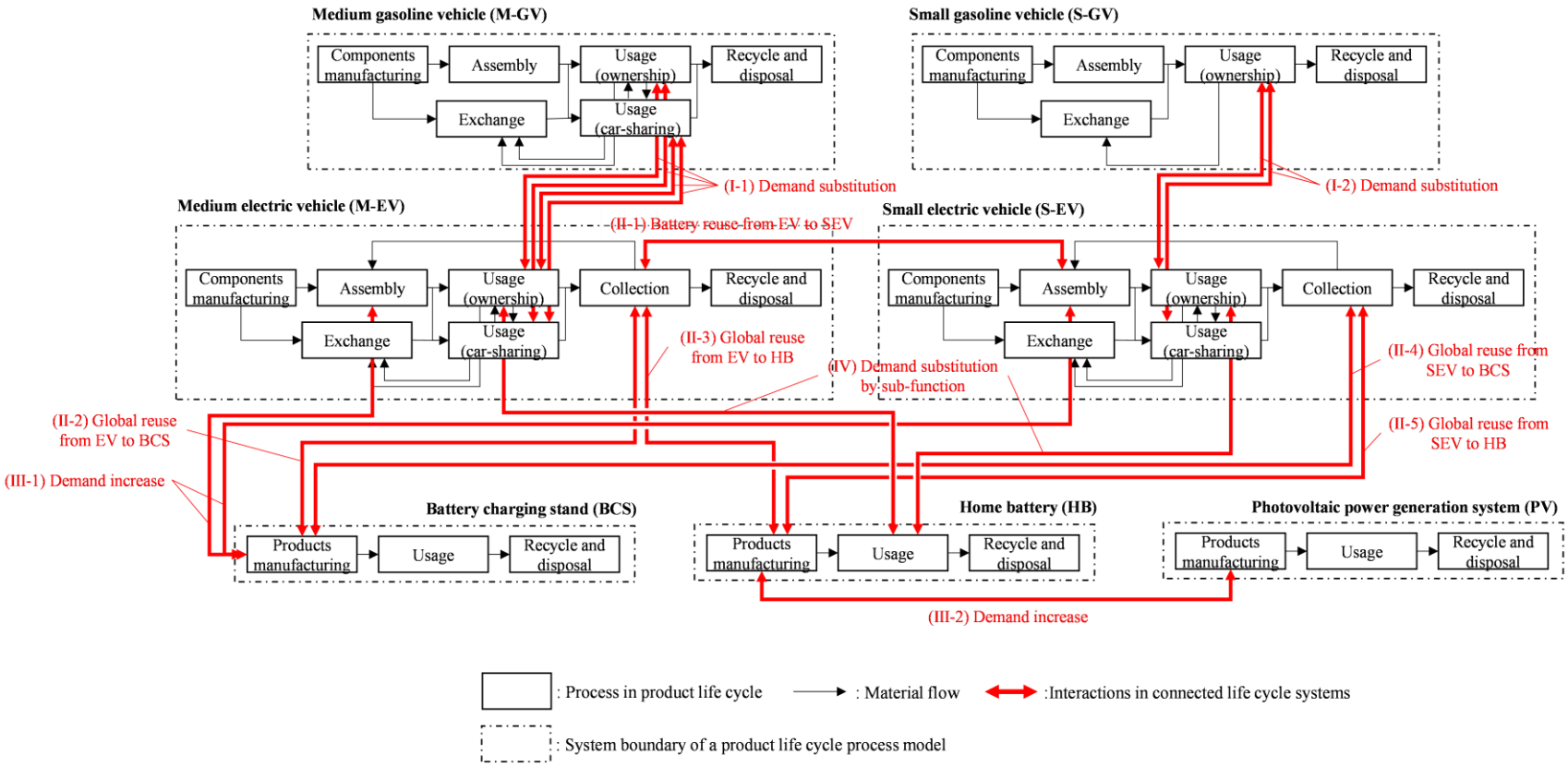



Fig. 5-8 Life cycle process model of the CoLSys focused on electric vehicles

Step.4　意思決定モデルの構築

まず結合型ライフサイクルシステムズ全体の社会目標と対象製品を製造する企業の個別目標をそれぞれ設定する（4-1）．本ケーススタディでは社会目標を「2050 年に $CO_2$ 排出量ゼロ」を設定し，各企業の個別目標を「年率 1%の企業利益の増加」とした．

設定した社会目標および個別企業目標を基に，意思決定モデルが構築される（4-2）．意思決定モデルを構築する式は第 4 章にて示した式（4-4）から式（4-6）と同じであり，各企業はネスト構造に基づく意思決定が行われるとした．以下，各製品で設定される意思決定モデルの対象となるパラメータ，パラメータ値の変更幅，式（4-4）における $CO_{2\,i}$ と $Profit_i$ の算出方法を示す．

- M-EV

M-EV の意思決定モデルでは「リユース LIB 価格割合」と「供給リユース LIB の下限量」の変更が検討される．これは文献[12]にて提案されたグローバルリユースが発生するための条件に含まれるパラメータである．リユース LIB 価格割合は使用済み LIB をリユース先（グローバルリユースも含める）にいくらで提供するのかを決定するパラメータである．意思決定者は使用済み LIB の価格を引き下げることでより多くのリユース先を検討することが可能になり，使用済み LIB のリユース量増大につながる．また，供給リユースの下限量は取引できる使用済み LIB のリユース可能量の最低値を意味しており，下限量を変動させることで取引先を幅広くすることが可能になる．この意思決定は Table. 5-1 の（Ⅱ-1，2，3）の相互作用に影響を及ぼす．

M-EV の場合，リユース LIB 価格割合を $R_{ev}$，供給リユース LIB の下限量を $V_{ev}$，とおき，選択できる数値の範囲を $R_{ev\text{-}min} \leq R_{ev} \leq R_{ev\text{-}max}$, $V_{ev\text{-}min} \leq V_{ev} \leq V_{ev\text{-}max}$ とおく．本ケーススタディでは $R_{ev\text{-}min} = 3$，$R_{ev\text{-}max} = 20$，$V_{ev\text{-}min} = 200$，$V_{ev\text{-}max} = 1000$ と設定した．これら変数とリユース先が要求する価格とリユース可能量が満たしている場合，リユースが成立することになる．また，リユース時に発生するコスト（$C_{reuse}$）については新規製造された LIB の価格の 1/5 かかると仮定した．$CO_{2\,ev}$ と $Profit_{ev}$ は以下の計算式で表される．

If （$P_{lib\text{-}ev} / R_{ev} \leq C_j$ && $V_{ev} \leq V_j$ ）（リユースが行われるとき）

$$CO_{2\ ev-i} = CO_{2\ CoLSys} - \sum_i \left(n_j * CO_{2\ j-production}\right) \tag{5-1}$$

$$Profit_{ev-i} = Profit_{ev-sales} + \sum_{i}\left(n_j * (\frac{P_{lib-ev}}{R_{ev}} - C_{reuse})\right) + \left(n_{ev} - n_j\right) * Profit_{recycle} \quad (5\text{-}2)$$

else （リユースが行われない場合）

$$CO_{2\ ev-i} = CO_{2\ CoLSys} \quad (5\text{-}3)$$

$$Profit_{ev-i} = Profit_{ev-sales} + n_{ev} * Profit_{recycle} \quad (5\text{-}4)$$

where

$j$: Reuse destination product

$n_j$: Number of reused LIBs to product j

$n_{ev}$: Number of reusable LIBs of EV

$CO_{2\ CoLSys}$: $CO_2$ emissions of CoLSys

$CO_{2\ j-production}$: $CO_2$ emissions intensity of LIB production for product j

$Profit_{ev-sales}$: Profit of EV sales

$P_{lib-ev}$: Price per LIB of EV

$C_{reuse}$: Reuse cost per LIB

$Profit_{recycle}$: Recycle profit per LIB

- S-EV

  S-EV の意思決定モデルは M-EV のものと同じとし，式（5-1）から式（5-4）が意思決定モデル内で定式化されている．この意思決定は Table. 5-1 の（II -4，5）の相互作用に影響を及ぼす．S-EV を対象とする場合，リユース LIB 価格割合を $R_{sev}$，供給リユース LIB の下限量を $V_{sev}$ とし，$R_{sev-min}$ = 3, $R_{sev-max}$= 20, $V_{sev-min}$= 30, $V_{sev-max}$= 300 と設定して上記の式に適用される．また，リユース時に発生するコスト（$C_{reuse}$）については電気自動車と同様，新規製造された LIB の価格の 1/5 がかかると仮定した．

- M-GV

  M-GV の意思決定モデルでは「M-GV の減少割合」の変更が検討される．M-GV の意思決定者は M-GV の販売割合を低下させる選択を行うことで，利益は減少するが，M-EV の普及が促進されることで $CO_2$ 排出量の削減につなげることができる．この意思決定は Table. 5-1 の（Ⅰ-1）の相互作用に影響を及ぼす．M-GV の減少割合を $R_{gv}$とおき，選択できる数値の範囲を $R_{gv-min} \leq R_{gv} \leq R_{gv-max}$と設定した．本ケーススタディでは $R_{gv-min}$= 0，$R_{gv-max}$= 0.3 とした．M-GV における意思決定に伴う $CO_{2\ gv-i}$ と $Profit_{gv-i}$ は以下の計算式で表される．

$$V_{gv_production} = V_{gv_production_pre} * (1 - R_{gv}) \quad (5\text{-}5)$$

$$N_{gv_use} = N_{gv_use_pre} - V_{gv_production_pre} * R_{gv} \quad (5\text{-}6)$$

$$V_{ev_production} = V_{ev_production_pre} + V_{gv_production_pre} * R_{gv} \quad (5\text{-}7)$$

$$N_{ev_use} = N_{ev_use_pre} + V_{gv_production_pre} * R_{gv} \quad (5\text{-}8)$$

$$\begin{aligned} CO_{2\ gv-i} = CO_{2\ CoLSys} &+ \left(V_{gv_production} * CO_{2\ gv_production}\right) \\ &+ \left(N_{gv_use} * CO_{2\ gv_use}\right) + \left(V_{ev_production} * CO_{2\ ev_production}\right) \\ &+ \left(N_{ev_use} * CO_{2\ ev_use}\right) \end{aligned} \quad (5\text{-}9)$$

$$Profit_{gv-i} = V_{gv-production} * Profit_{pergv} \quad (5\text{-}10)$$

where

$V_{gv_production_pre}$: Predicted production volume of GV

$V_{gv_production}$: Production volume of GV after decision-making

$N_{gv_use_pre}$ : Predicted number of using GV

$N_{gv_use}$: Number of using GV after decision-making

$V_{ev_production_pre}$: Predicted production volume of EV

$V_{ev_production}$: Production volume of EV after decision-making

$N_{ev_use_pre}$ : Predicted number of using EV

$N_{ev_use}$: Number of using EV after decision-making

$CO_{2\ pergv_production}$: $CO_2$ emissions per GV production

$CO_{2\ pergv_use}$: $CO_2$ emissions per GV usage

$CO_{2\ perev_production}$: $CO_2$ emissions per EV production

$CO_{2\ ev_use}$: $CO_2$ emissions per EV usage

$Profit_{pergv}$: Selling profit of GV per unit

- S-GV

  S-GV の意思決定モデルは M-GV のものと同じとし，式（5-5）から式（5-10）が意思決定モデル内で定式化されている．また，パラメータ値の変更幅も M-GV のものと同じに設定した．この意思決定は Table. 5-1 の（Ⅰ-2）の相互作用に影響を及ぼす.

- BCS

  BCS の意思決定モデルでは「BCS 数増加割合」の変動を検討する. ここで，BCS 数増加割合とは，見込まれる要求 BCS 数に対しての増産比を表す. BCS の増産は BCS の利益を増加させつつ，M-EV や S-EV の普及を促進させて $CO_2$ 排出量を減少させる選択である. 本ケーススタディでは増産分の BCS の販売価格を 0 として計算し，製造費の増加が BCS の利益を低下させるものとして設定した．この意思決定は Table. 5-1 の（Ⅲ-1）の相互作用に影響を及

ぼす．BCS 数増加割合をとおき $R_{bcs}$，選択できる数値の範囲を $R_{bcs_min} \leq R_{bcs} \leq R_{bcs_max}$ と設定した．本ケーススタディでは，$R_{bcs_min} = 1$，$R_{bcs_max} = 1.1$ と設定した．BCS における意思決定で用いられる $CO_{2\ bcs_i}$ と $Profit_{\ bcs_i}$ は以下の計算式で表される．

$$CO_{2\ bcs-i} = CO_{2\ CoLSys} + V_{bcs_production_pre} * (R_{bcs} - 1) * \{CO_{2\ perbcs} - Rate_{bcs} * (LCA_{gv} - LCA_{ev})\} \quad (5\text{-}11)$$

$$Profit_{bcs-i} = V_{gv-production_pre} * (P_{bcs_sale} - R_{bcs} * C_{bcs}) \quad (5\text{-}12)$$

where

$V_{bcs_production_pre}$: Predicted production volume of BCS

$CO_{2\ perbcs}$: $CO_2$ emissions per BCS production

$Rate_{bcs}$: Number of required BCS per EV

$LCA_{gv}$，$LCA_{ev}$: LCA value of vehicle types

$P_{bcs_sale}$: Selling price per BCS

$C_{bcs}$: Production cost per BCS

- HB

HB の意思決定モデルでは「電気自動車による代替率」の変動が検討される．これは M-EV および S-EV が蓄電池化されることで HB の需要が代替される割合を表す．代替率を上げることで，HB の販売で得られる利益は減少するが，$CO_2$ 排出量の減少につながる．HB の見込み製造台数に掛けることで意思決定後の製造台数が算出される．この意思決定は Table. 5-1 の（IV）の相互作用に影響を及ぼす．電気自動車による代替率を $R_{hb}$ とおき，選択できる数値の範囲を $R_{hb_min} \leq R_{hb} \leq R_{hb_max}$ と設定した．本ケーススタディでは，$R_{hb_min} = 0$，$R_{hb_max} = 0.1$ と設定した．HB における意思決定で用いられる $CO_{2\ hb_i}$ と $Profit_{\ hb_i}$ は以下の計算式で表される．

$$CO_{2\ hb-i} = CO_{2\ CoLSys} + V_{hb_production_pre} * (1 - R_{hb}) * CO_{2\ hb_production} \quad (5\text{-}13)$$

$$Profit_{bcs-i} = V_{gv-production_pre} * (1 - R_{hb}) * Profit_{perbcs} \quad (5\text{-}14)$$

where

$V_{hb_production_pre}$: Predicted production volume of HB

$CO_{2\ hb_production}$: $CO_2$ emissions per HB production

$Profit_{\ perbcs}$: Selling profit per HB

- PV

PV の意思決定モデルでは「PV 増産割合」の変動が検討される．これは，

BCS と同様に，見込まれる PV 製造数に対しての増産割合を表す．PV の増産はその利益を増加させつつ，家庭で使用される電力をグリーン化させることで $CO_2$ 排出量を削減させる．本ケーススタディでは増産分の PV の販売価格を 0 として計算し，製造費の増加が BCS の利益を低下させるものとして設定した．この意思決定は Table. 5-1 の（Ⅲ-2）の相互作用に影響を及ぼす．

PV の増産割合を $R_{pv}$ とおき，選択できる数値の範囲を $R_{pv_min} \leq R_{pv} \leq R_{pv-max}$ とする．本ケーススタディでは，$R_{pv_min} = 1$，$R_{pv_max} = 1.1$ と設定した．PV における意思決定で用いられる $CO_{2\ pv_i}$ と $Profit_{\ pv_i}$ は以下の計算式で表される．

$$CO_{2\ pv-i} = CO_{2\ CoLSys} + V_{pv_production_pre} * \left(R_{pv} - 1\right) * LCA_{\ pv} \tag{5-15}$$

$$Profit_{pv-i} = V_{pv-production_pre} * \left(P_{hb} - R_{hb} * C_{hb}\ \right) \tag{5-16}$$

where

$V_{pv_production_pre}$: Predicted production volume of PV

$LCA_{pv}$: LCA value of PV

$P_{\ pv_sale}$: Selling profit per PV

$C_{pv}$: Production cost per PV

以上のように各対象製品の意思決定モデルを構築した後，各目標の重要度（$I_{CoLSys}$，$I_{Sys}$）を設定していく（4-3）．本ケーススタディでは各製品の意思決定者は基本的に経済性と環境性の重要度を等しく考えていると仮定し，$I_{CoLSys} : I_{Sys} = 1:1$ と設定する．後述するが，この重要度についてはシミュレーションシナリオの要素として扱われる．

Step.5　シミュレーション実行

- 評価条件

対象地域として，人口 370,000 人の日本の都市を想定し，2021 年から 2050 年までの 30 年間をシミュレーション期間とする．シミュレーション期間を通して自動車および軽自動車が賄う移動需要は一定であるとし，カーシェアリングサービスが普及しない場合は使用される自動車の総台数は一定となる．ここでシミュレーション初期状態の M-GV と M-EV の保有台数は文献[4]を基に設定した．また，シミュレーション初期状態では S-EV は普及しておらず，全て S-GV よって移動需要が賄われていると仮定した．S-GV の保

有台数は文献[4][13]を参考にした．

また，M-GV と M-EV の新車販売割合推移は Fig. 5-9 に示すように設定した[14]．S-GV と S-EV の新車販売割合推移は Fig. 5-10 に示すように設定した．

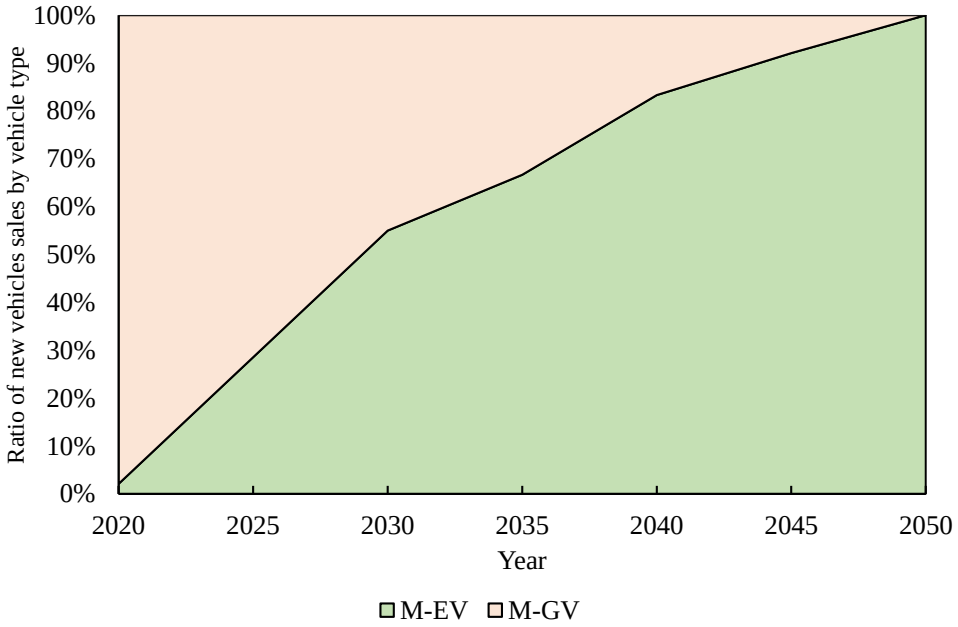



Fig. 5-9 Ratio of new vehicle sales by vehicle types （EV and GV）

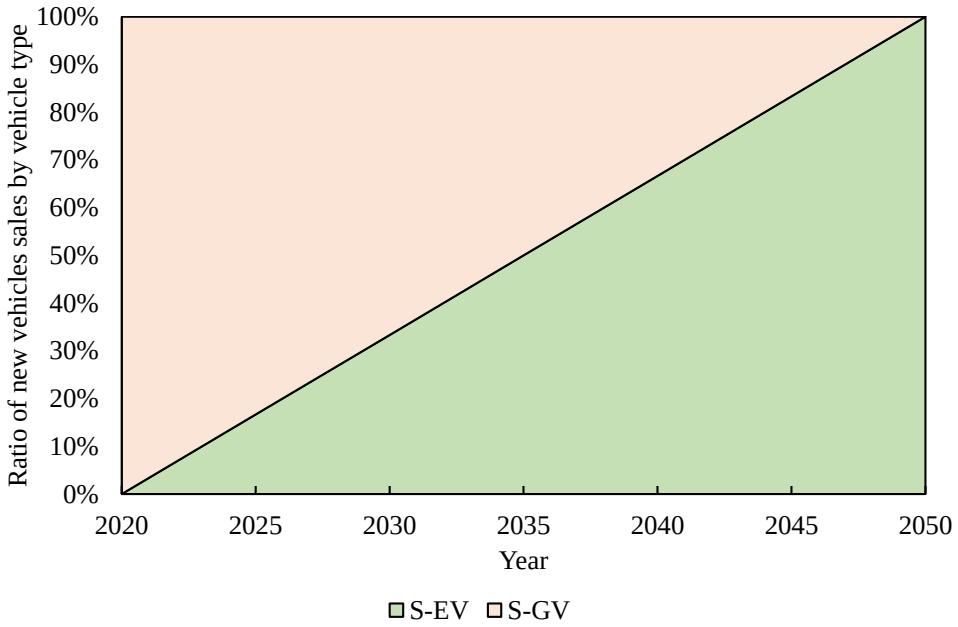



Fig. 5-10 Ratio of new vehicle sales by vehicle types （SEV and SGV）

自動車の各使用形態に関連するパラメータ値を述べる．個人利用時の平均乗車人数は国土交通省開示の車種別平均輸送人数の数値である 1.3 人に設定し，カーシェアリング時の平均乗車人数を個人利用時と同じ数値だと仮定した．個人所有車の平均年間走行距離を 6,500km とする[5]．カーシェアリング車が代替する個人所有車を 5 台と仮定する．この設定により，カーシェアリング車は年間最大 32,500km を走行することになり，これ以上の走行距離が発生した場合は，カーシェアリング車の総台数を増加させ，1 台あたりの負担を軽減させる．このとき，カーシェアリング車の台数は駐車場ごとに増加していくと考えられ，追加生産される台数は 5 台ずつ生産されると仮定する．

本ケーススタディでは電気自動車および軽電気自動車の使用段階における $CO_2$ 排出量原単位は社会全体の発電ミックスに依存し，時間経過と共に変化するものとしている．発電ミックスの変化は文献[15]を基に構築し，各発電方式の発電時 $CO_2$ 排出量原単位は文献[16]を，TMR 原単位は文献[17]を用いている．Fig. 5-11 に発電ミックスの推移を示す．

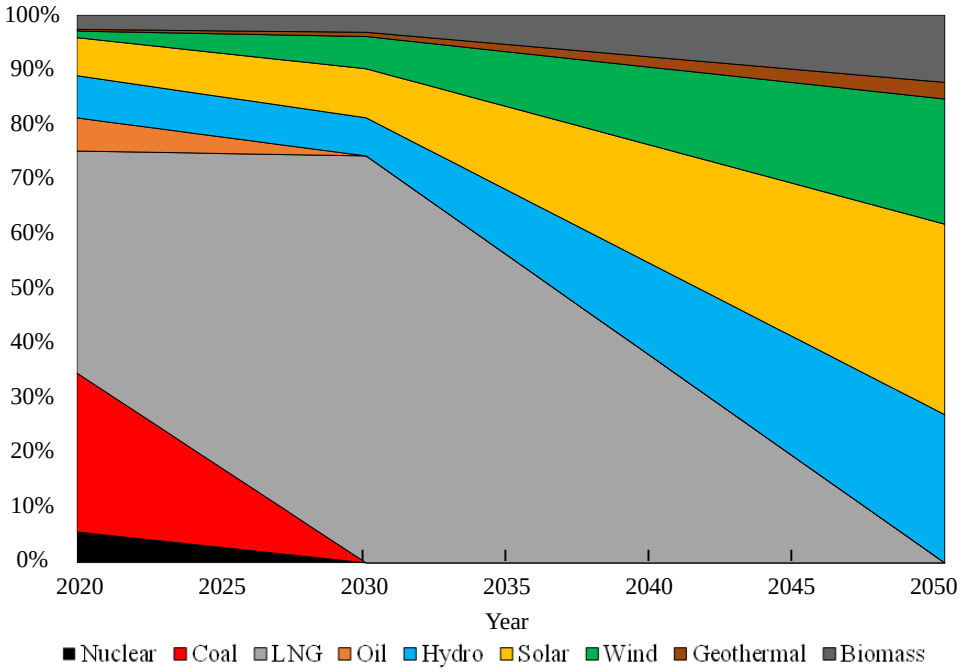



Fig. 5-11 Trends of electricity generation mix [15]

充電スタンドは前述した通り，電気自動車および軽電気自動車の普及状況に影響を受ける．本ケーススタディでは，電気自動車・軽電気自動車 4 台につき，1 台の充電スタンドが配備されているのを想定する[8]．家庭用蓄電池および太陽光発電システムの普及については文献[18]の普及予測を用いてい

る．

各製品ライフサイクルの意思決定モデルでは6か月に1度の頻度で意思決定が行われ，関連するパラメータ値の修正が行われるとする．

- 評価シナリオ

評価シナリオをカーシェアリングサービスの普及，社会目標と個別目標のバランス，企業の意思決定基準の 3 項目を基に，Table. 5-2 に示すように設定した．企業の意思決定基準については S-EV と需要代替や使用済み LIB のグローバルリユースで接続されている M-EV と S-GV の意思決定基準を変更している（S5,6）．本章では CoLSys 全体の $CO_2$ 排出量，S-EV の利益推移，使用済み LIB のグローバルリユース状況を各シナリオの出力とし，シナリオごとに比較することで，シェアリングサービスと電動化に向けた社会目標を考慮した戦略的マネジメントがマテリアルフローに与える影響を示す．また，個別目標および社会目標の重要度が異なるシナリオを含めることで，多様なプレイヤーが存在する超システム環境を対象とした評価が可能であることを示す．

Table. 5-2 Evaluation secenarios

| | Car-sharing | Goals for decision-making | | Importance of goals of each product (*Social benefit* : *Company profit*) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Individual goal** | **Social goal** | **M-EV** | **S-EV** | **M-GV** | **S-GV** | **BCS** | **HB** | **PV** |
| S1. BAU | | ✓ | | 0:1 | 0:1 | 0:1 | 0:1 | 0:1 | 0:1 | 0:1 |
| S2. Combined scenario | ✓ | ✓ | ✓ | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 |
| S3. Ownership scenario | | ✓ | ✓ | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 |
| S4. Social goal focused scenario | ✓ | | ✓ | 1:0 | 1:0 | 1:0 | 1:0 | 1:0 | 1:0 | 1:0 |
| S5. M-EV focusing on individual goal scenario | ✓ | ✓ | ✓ | 0:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 |
| S6. S-GV focusing on individual goal scenario | ✓ | ✓ | ✓ | 1:1 | 1:1 | 1:1 | 0:1 | 1:1 | 1:1 | 1:1 |

● シミュレーション結果

まず，S1 と S2 の月毎の製品生産量を Fig. 5-12 に示す．S1 は BAU シナリオであり，予め与えられた製品普及のシナリオに沿って製品生産量が算出された結果が算出された一方で，製品普及量について戦略的マネジメントが行われた S2 では S1 と比較して，M-EV および S-EV の普及が早まり，自動車車両の電動化が加速したことが確認できる．一方で，BCS の製品生産量は減少しており，これはシェアリングサービス普及によって M-EV および S-EV の普及総台数が S1 と比較して減少したためである．Fig. 5-13 に S1 と S2 での自動車普及量の推移を示すが, S1 では全体の自動車普及量は変化せずその内訳が変化しているのに対して，S2 では全体の自動車普及量が変化しつつ，またその内訳の変化量も S1 と比較して大きいことが確認できる．これら製品生産量と自動車普及量の変化から，本ケーススタディでは戦略的マネジメントおよび自動車シェアリング普及両方の製品生産量への影響を考慮した LCS モデルが構築できたといえる．

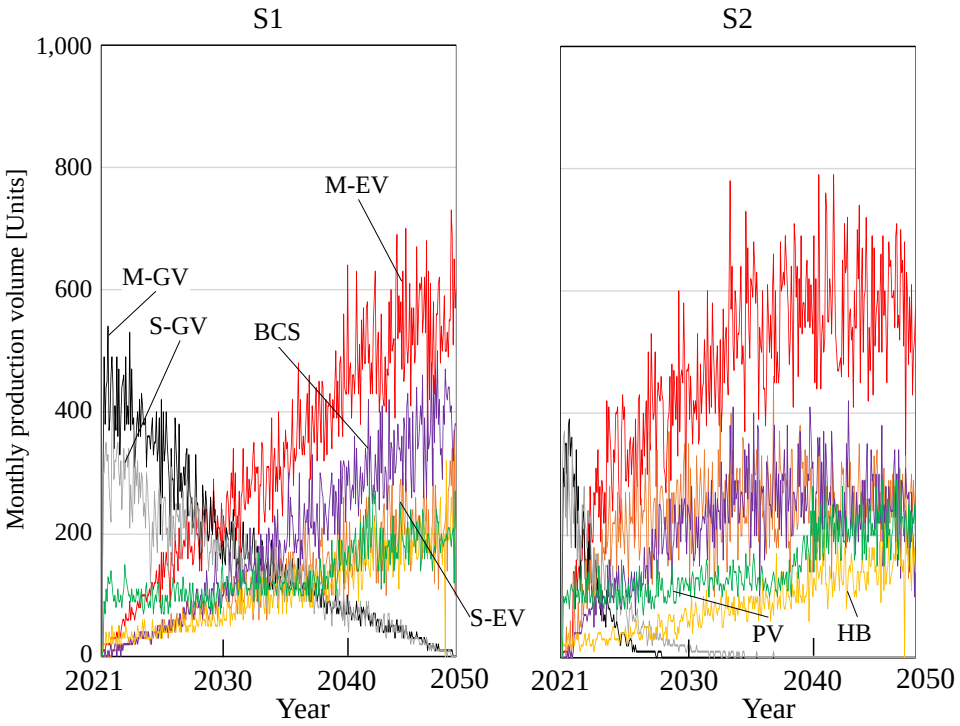



Fig. 5-12 Monthly production volume in S1 and S2

続いて，S1 から S4 における CoLSys 全体の $CO_2$ 排出量推移を Fig. 5-14 に示す．Fig. 5-12 に示すように，シェアリングサービスが普及している S2 シナリオは S3 シナリオと比較してより多くの $CO_2$ 排出量を削減していることが確認できる．これは社会目標を考慮した意思決定の $CO_2$ 排出量削減効果が

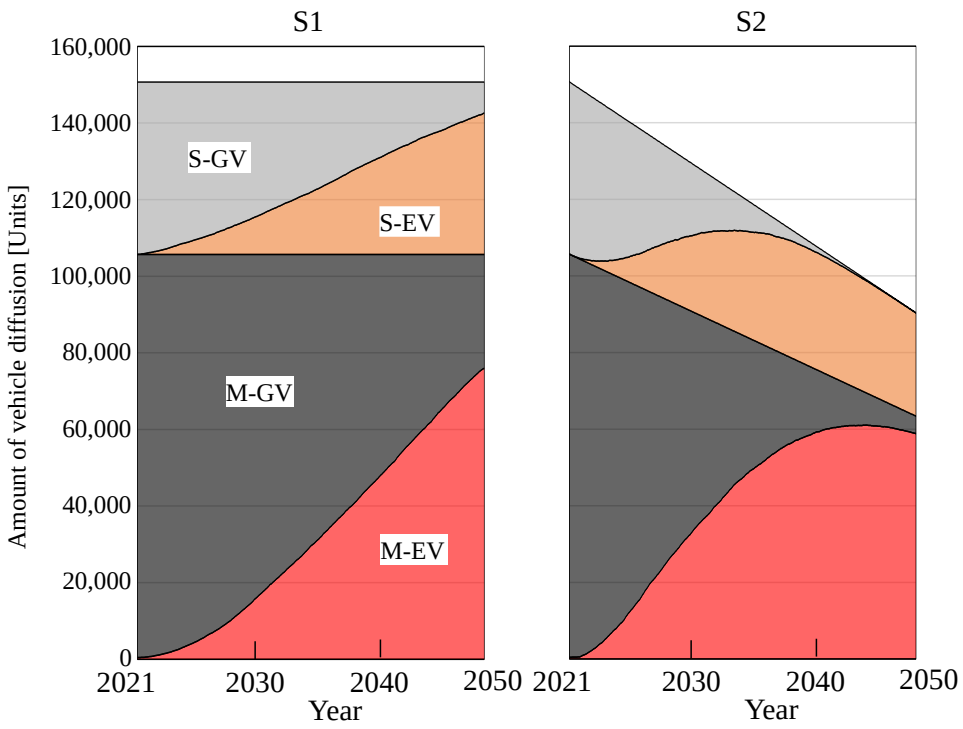



Fig. 5-13 Amount of product

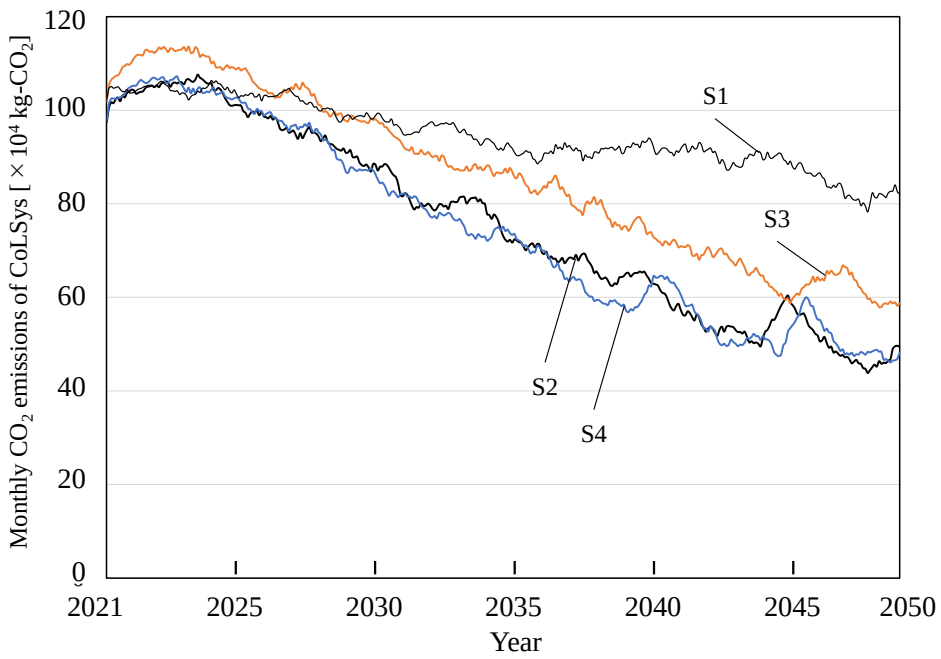



Fig. 5-14 Monthly $CO_2$ emissions

シェアリングサービス普及の $CO_2$ 排出量削減効果を上回っていることを示しており，これは第 3 章および第 4 章で示されたシミュレーション結果と比

較しても妥当だと考えられる．意思決定基準に社会目標のみ考慮される S4 は S2 と比較してより多くの $CO_2$ 排出量が削減できており，これも第 3 章で示したシミュレーション結果に沿うものである．

S1,2,5,6 における軽電気自動車の利益推移を Fig. 5-15 に示す．Fig. 5-15 に示すように，2050 年に至るまで S6 の利益が S2 および S5 と比較して小さくなっている．S5 では電気自動車が個別目標のみ考慮して意思決定を行い，S6 では軽ガソリン自動車が個別目標のみ考慮して意思決定を行うシナリオである．このシミュレーション結果は，軽電気自動車は軽ガソリン自動車の意思決定の影響を大きく受けることを示しており，軽電気自動車の意思決定者は軽ガソリン自動車今後の動向を注視する必要があることを示している．

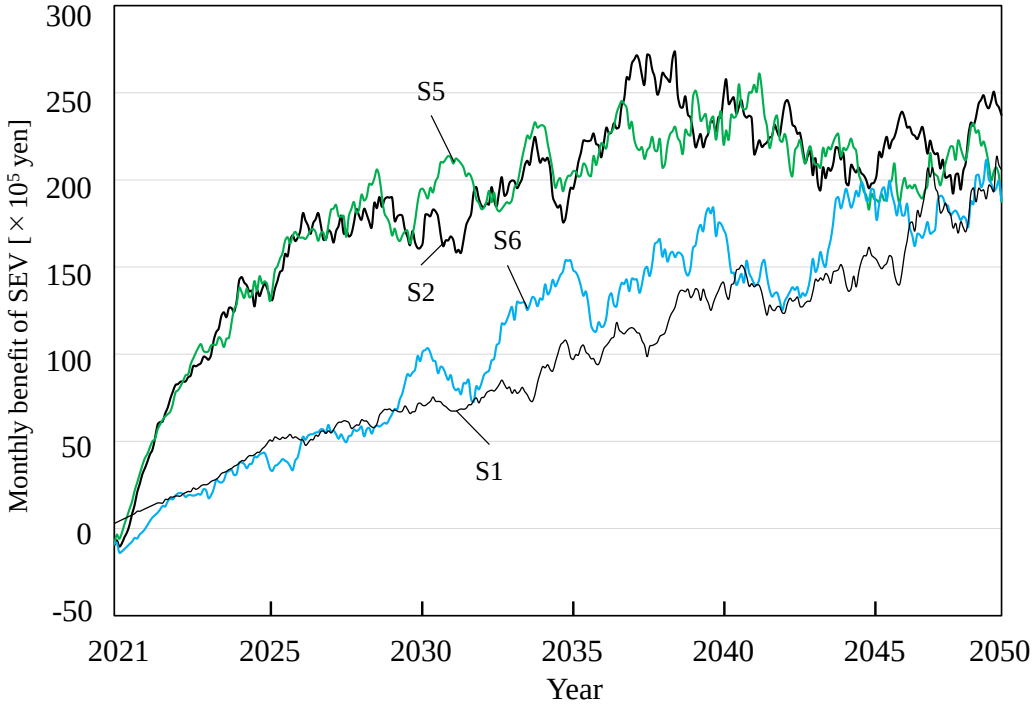



Fig. 5-15 Monthly profit of S-EV

Fig. 5-16 から Fig. 5-21 にかけて各シナリオの使用済み LIB のグローバルリユース状況を示す．Fig. 5-16 と Fig. 5-18 で示すように，シェアリングサービスが普及せず企業意思決定が個別目標のみを考慮される S1 ではグローバルリユースが発生するのが遅い一方で，企業意思決定に社会目標が含まれる S3 ではより早く，そしてより多様なグローバルリユースが発生していることが確認できる．これは社会全体の環境負荷を下げるための相互作用をより早く発生させるように各企業が相互作用に関連するパラメータ値を自動的

に変更したためであり，意思決定基準に社会目標を含めた効果である．Fig. 5-17 に示す S2 の結果では，S3 と比較してグローバルリユース量が小さいことが確認できる．これは本ケーススタディではシェアリングサービスに個人利用車の使用済み LIB が用いられることが想定されており，その結果としてシェアリングサービスが普及する S2 では異種製品群への供給量が小さくなっていることが原因である．また，シェアリングサービスは道路上で必要となる自動車台数を減少させることもリユース供給量の減少につながる．同様の現象が S4 にて発生しているが，より多くの軽電気自動車発の使用済み LIB がグローバルリユースされていることが確認できる（Fig. 5-19）．S5 と S6 は Fig. 5-20 と Fig. 5-21 に示すように，全体のグローバルリユース量が減少するが，特に軽ガソリン自動車が個別目標のみで意思決定される S6 の減少幅は大きい．これは軽ガソリン自動車から軽電気自動車への移行が他シナリオと比較して遅れ，軽電気自動車向けのグローバルリユースが発生しなくなるためであり，使用済み LIB の供給側の状況だけでなく，使用済み LIB が供給される側の状況に応じて相互作用の発生が制御されていることを示している．これらシミュレーション結果は周囲の状況および社会目標を参照しながら自社の意思決定を行う Collaborative SoS の特徴を反映できていることを示しており，また様々な方針を持つプレイヤーが混在する超システム環境をモデル化できていることを示していると考えられる．

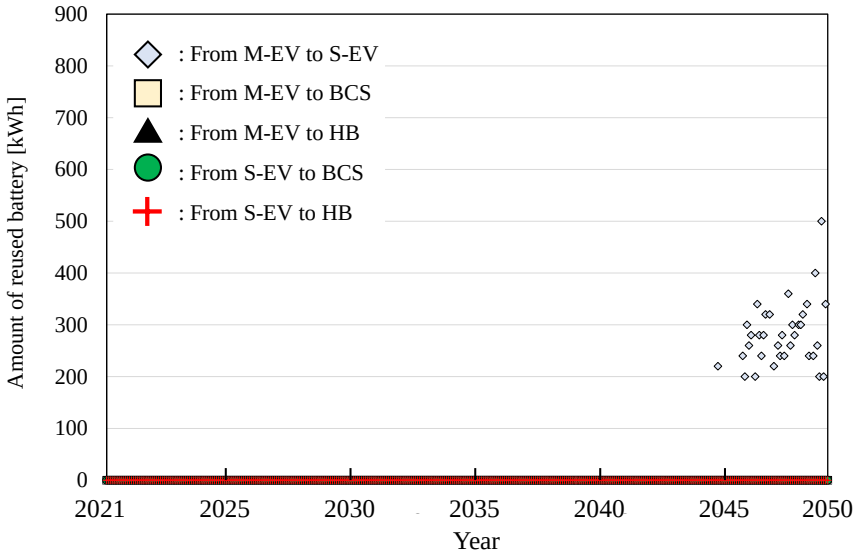



Fig. 5-16 Amount of monthly reused battery in S1

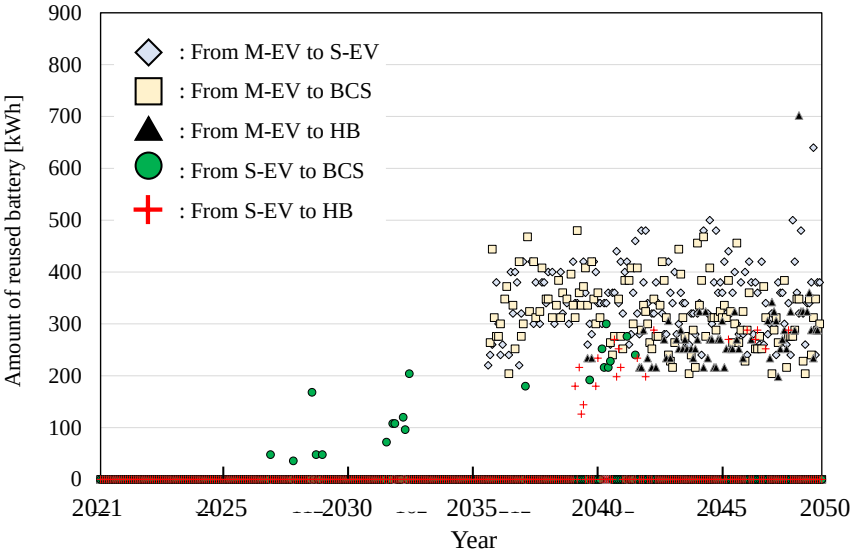



Fig. 5-17 Amount of monthly reused battery in S2

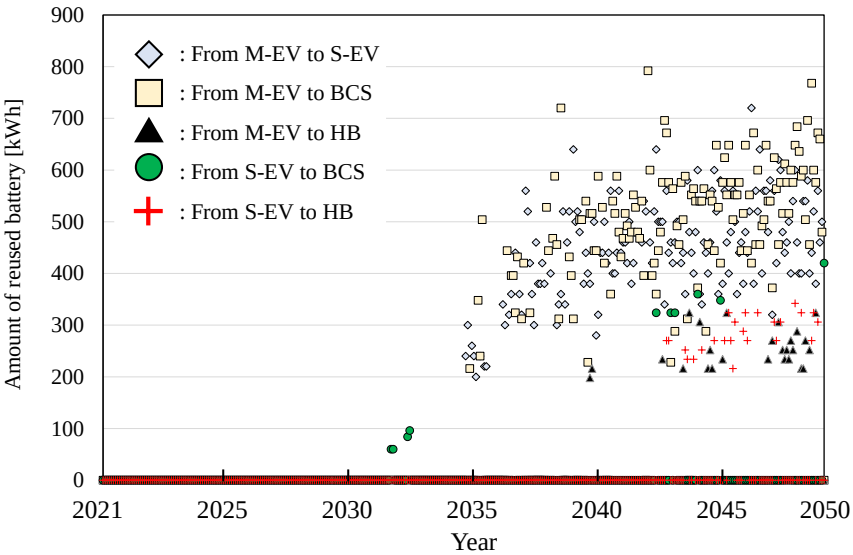



Fig. 5-18 Amount of monthly reused battery in S3

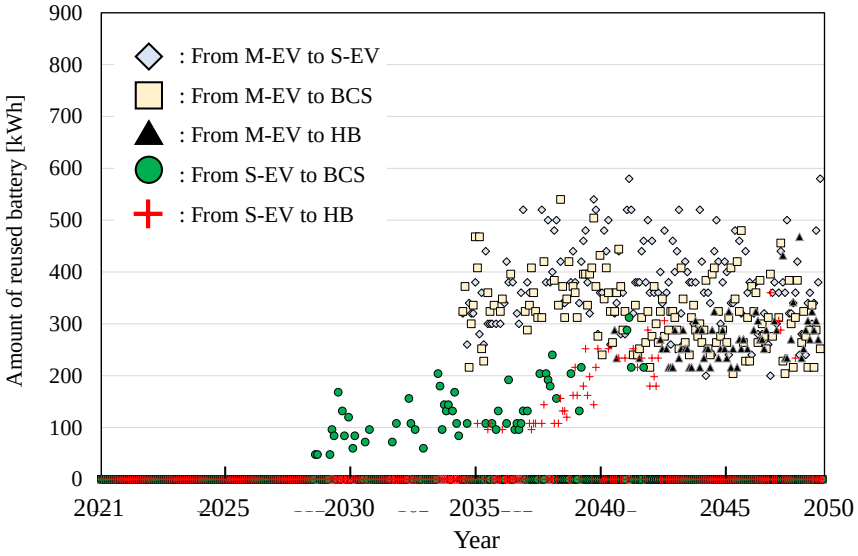



Fig. 5-19 Amount of monthly reused battery in S4

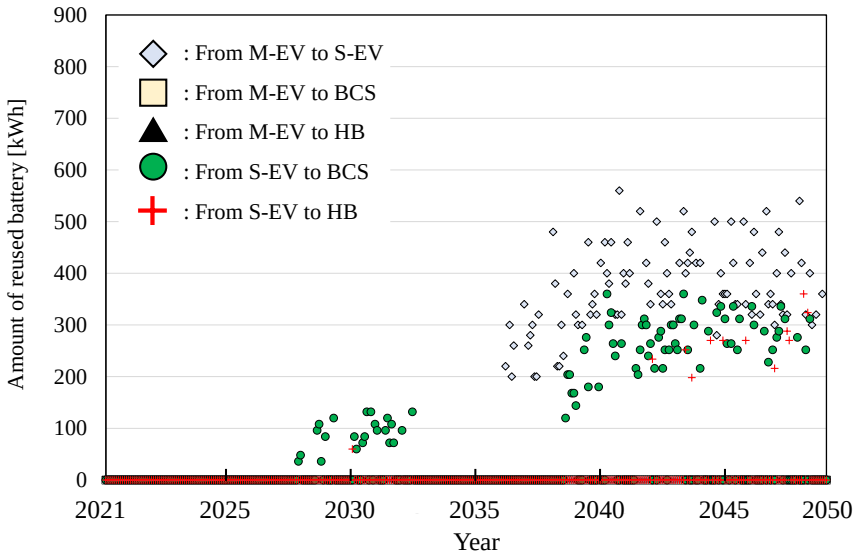



Fig. 5-20 Amount of monthly reused battery in S5

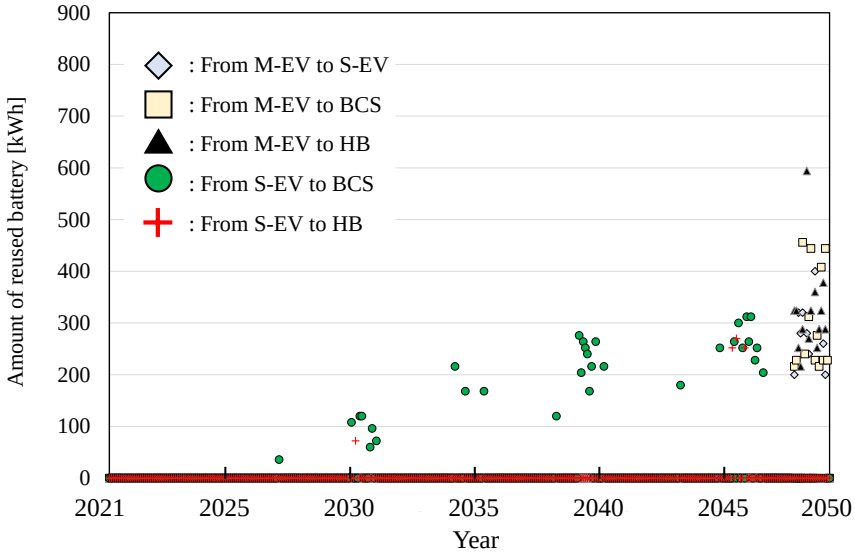



Fig. 5-21 Amount of monthly reused battery in S6

## 5.4. 考察

電動化と製品共有に向けた戦略的マネジメントモデルのシミュレーション結果について考察する．Fig. 5-22 に各シナリオの累積リユース量を示す．最もグローバルリユースが発生したのは S3 であり，シェアリングサービスは普及せず，意思決定基準として個別目標と社会目標が用いられたシナリオである．これは Fig. 5-19 に示したよ

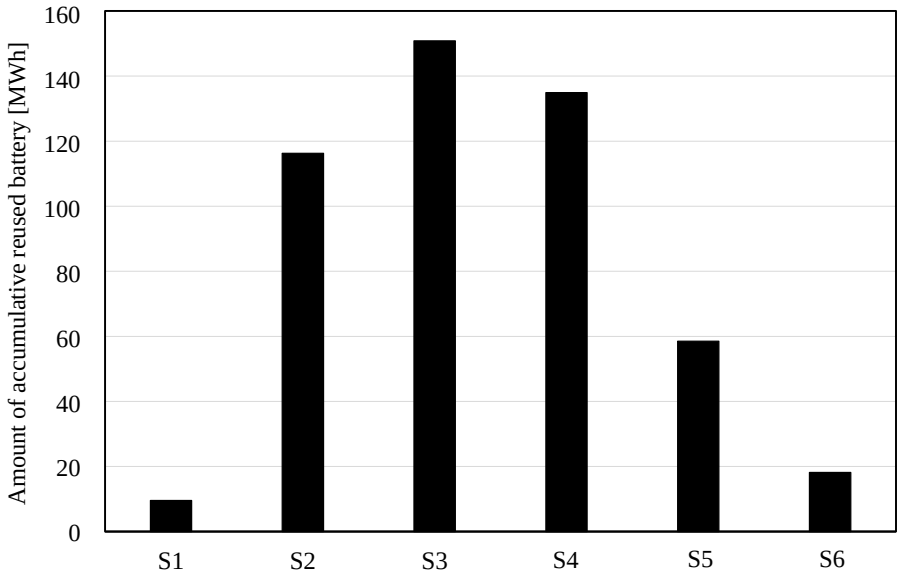



Fig. 5-22 Amount of accumulative reused battery

うに，他のシナリオと比較して使用済み LIB がより残存量が大きい状態でグローバルリユース経路に送られるためである．最もグローバルリユースが発生しないのは S1 であるが，S6 も他シナリオと比較して十分小さいことが確認できる．S6 では S-EV の普及が遅れることで M-EV 発の使用済み LIB のグローバルリユースが発生しなくなり，最終的に全体のリユース量が少なくなった．

Fig. 5-23 に累積リユース量の増加状況を時系列で表したものを示す．ここで，最も早くグローバルリユースが発生したのは S4 であり，Fig. 5-19 に示すように S-EV から BCS へのグローバルリユースが発生している．しかし，2045 年付近にて S3 に累積リユース量が追い抜かれている．S3 は S2 と同じように累積リユース量を増加させていたが，2040 年付近で増加が加速している．Fig. 5-17 と Fig. 5-18 を比較してみると，S3 では 2040 年以降の BCS へのグローバルリユース量が大きいことが確認できる．これは BCS の普及状況は M-EV と S-EV の普及台数に応じて変化し，S3 は他シナリオと比較して最も M-EV と S-EV が普及するシナリオであるため，BCS へのリユース量が増加したと考えられる．一方で，Fig. 5-14 に示すように，CoLSys 全体の $CO_2$ 排出量では S3 は S2,4 と比較して大きくなっている．これはグローバルリユースの効果よりも，製品普及量を減少させることが脱炭素化に向けては有効であることを示しており，社会の脱炭素化に向けてシェアリングサービスのビジネスモデルとしての重要性を示すものである．

これらシミュレーション結果から，シェアリングサービスの普及は電気自動車の総台数減少とそれに伴う異種製品の普及鈍化によって累積のリユース量を減少させ，社

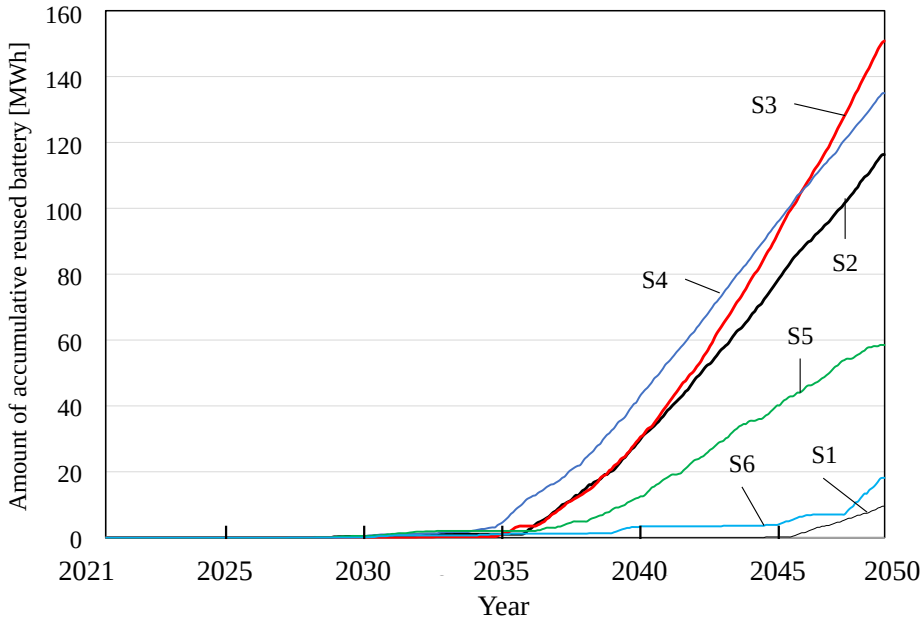



Fig. 5-23 Trend of amount of accumulative reused battery

会目標を考慮した意思決定は社会目標達成の困難化に反応してリユースの発生時期を早期化させていることを示している．これらのシミュレーション結果はシェアリングサービスと社会目標を考慮した戦略的マネジメントが結合型ライフサイクルシステムズのマテリアルフローへ与える効果をそれぞれ表現できており，統合されたモデルは計算機上で適切に機能していることを示すものだと考えられる．

それを踏まえて Fig. 5-24 に S1 から S4 の結合型ライフサイクル全体の月毎 TMR 推移を示す．S1 ではシミュレーション期間にわたって TMR が増加している．その一方で，社会目標を考慮した意思決定とシェアリングサービスが導入された S2 では 2030 年までは増加傾向が見られるものの，その後は緩やかに減少に転じ，2050 年時点では S1 と比較して大きく TMR が削減されていることが確認できる．シェアリングサービスが普及しない S3 でも同様に TMR の増加傾向が見られた後に減少に転じているが，その効果は限定的であり，シェアリングサービスによる製品普及量削減の効果が資源消費量削減には重要であることを示している．S4 は企業の戦略的マネジメントにおいて社会目標のみを考慮したシナリオであるが，S2 と比較して TMR は大きくなっている．これは本ケーススタディでは社会目標を「2050 年 $CO_2$ 排出量ゼロ」と設定したためであり，$CO_2$ 排出量削減における鍵である電気自動車の普及のトレードオフが生じたと考えられる．

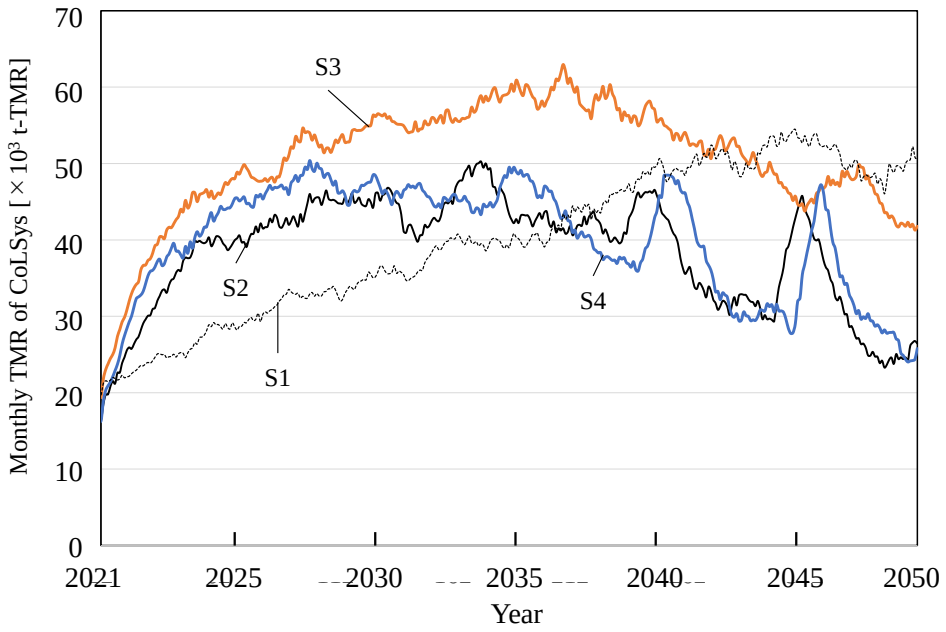



Fig. 5-24 Monthly TMR of CoLSys

これらシミュレーション結果は電動化と自動車シェアリング普及は $CO_2$ 排出量と TMR の削減に貢献するが，その削減効果をより大きなものにするには適切な戦略的マネジメントを実施することが重要であることを示している．本研究の課題として，自動車シェアリングの普及速度がシナリオで与えられ，戦略的マネジメントの対象に含まれていない点が挙げられる．これは自動車シェアリングの普及は消費者の意識変化によって引き起こされるものであり，自動車シェアリングの普及速度の変化をモデル化するには消費者と企業との間で発生する相互作用を考慮する必要があると考えられるためである．LCS 上では消費者の挙動をモデル化することは困難であり，その実現には異なるシミュレーションモデルとの連携が必要になるため，今後の課題である．また，その際には売り切り型ビジネスからシェアリングビジネスへの移行状態における企業の経済性を考慮できる経済モデルを構築する必要がある．

### 5.5. 結言

本章では第 3 章で提案した電動化と製品共有が製品生産量に与える影響に着目した LCS モデルと第 4 章で提案した社会目標を考慮した戦略マネジメントを反映した LCS モデルを併用して，自動車の電動化と製品共有に向けた戦略的マネジメントのための LCS モデルを構築し，そのモデルの妥当性について検証を行った．意思決定モデルおよび二段階分配メカニズムを含めた検証手順を示し，軽電気自動車を中心とした結合型ライフサイクルシステムズを対象としたケーススタディを実施した．ケーススタディを通して電動化と製品共有の両方の特徴を捉えたシミュレーションモデルを構築できたことを示し，提案した二つの手法は計算機上で併用可能であることを示した．また，企業の個別目標をより重視するのか，それとも社会目標を重視するのか，掲げる方針が異なるプレイヤーが混在するシナリオを設定してシミュレーションを実施し，シェアリングサービスの普及は電気自動車の総台数減少とそれに伴う異種製品の普及鈍化によって累積のリユース量を減少させ，社会目標を考慮した意思決定は社会目標達成の困難化に反応して LIB のグローバルリユースの発生時期を早期化させていることを示した．これら結果は本研究で提案したシミュレーションモデルを用いることで超システムにおける多様なシナリオを評価できることを示しており，自動車企業意思決定者にとって，自動車の方式転換と共有化に向けた戦略的マネジメントにおけるシナリオ分析を支援することに対して有効であることを示したといえる．

## 参考文献


[1] H. Kobayashi, H. Murata, and S. Fukushige, “Connected lifecycle systems: A new perspective on industrial symbiosis,” Procedia CIRP, Vol.90, pp. 388-392, 2020.

[2] J.A. Martínez-González, E.P. López, and A.B Báez, “Young Consumers’ Intention to Participate in the Sharing Economy: An Integrated Model,” Sustainability, Vol. 13, 430, 2021.

[3] S. Kosai, K. Matsui, K. Matsubae, E. Yamasue, and T. Nagasaka, "Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell behicles consiidering land disturbances," Resources, Conservation and Recycling, （2020）.

[4] 一般財団法人 自動車検査登録情報協会, “我が国の自動車保有動向,” 2022. https://www.airia.or.jp/publish/statistics/trend.html

[5] 国土交通省総合政策局, “自動車燃料消費量調査,” 2019.

[6] T.R. Tanim, M.G. Shirk, R.L. Bewley, E.J. Dufek, and B.Y. Liaw, “Fast charge implications: Pack and cell analysis and comparison,” Journal of Power Sources, Vol. 381, No. 31, pp. 56-65, 2018.

[7] J. Compostella, L.M. Fulton, R.D. Kleine, H.C. Kim, and T.J. Wallington, “Near-（2020） and long-term （2030–2035） costs of automated, electrified, and shared mobility in the United States,” Transport Policy, Vol. 85, pp. 53-66, 2020.

[8] A. Lucas, C. A. Silva, and R. C. Neto, "Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicle", Energy Policy, Vol.41, pp.537-547, 2012.

[9] みずほ情報総研株式会社, “平成 19 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構 委託業務成果報告書 定置用燃料電池システム及び燃料電池自動車のライフサイクル評価に関する調査,” 報告書管理番号：100013353, プロジェクト番号：Q05016, 公開日：平成 20 年度 2 月 9 日.

[10] みずほ情報総研株式会社, “平成 19 年度～平成 20 年度成果報告書 太陽光発電システム共通基盤技術研究開発 太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する調査研究, ” 報告書番号：20090000000073, プロジェクト番号：P07015, 公開日：2009 年 8 月 26 日.

[11] K.Richa, C.W. Babbitt, and G. Gaustad, "Eco-Efficiency Analysis of a Lithium-Ion Battery Waste Hierarchy Inspired by Circular Economy", Journal of Industrial Ecology, Vol. 21, No. 3, pp 715-730, 2021.

[12] H. Murata, N. Yokono, S. Fukushige, and H. Kobayashi, “A Lifecycle Simulation Method for Global Reuse,” International Journal of Automation Technology, Vol.12, No.6, pp. 813-821, 2018.

[13] 一般社団法人次世代自動車振興センター, “EV 等保有台数統計,” 2020.

http://www.cev-pc.or.jp/tokei/hanbai.html.
[14] 矢野経済研究所, “2020 自動車メーカのスマートカー戦略と市場展望,” 資料コード：C62111300, 2020.
[15] 歌川学, 堀尾正靱, ” 90%以上の CO2 削減を 2050 年までに確実に行うための日本のエネルギー・ミックスと消費構造移行シナリオの設計,” 化学工学論文集, Vol. 46, No. 4, pp. 91-107, 2020.
[16] 電力中央研究所, “日本における発電技術のライフサイクル $CO_2$ 排出量総合評価 総合報告：Y06,” 平成 28 年 7 月.
[17] 片桐望, 中島健一, 原田幸明, “NIMS-EMC　材料環境情報データ　No.18 概説　資源端重量（Total Material Requirement; TMR）”, 独立行政法人物質・材料研究機構元素戦略クラスター, 2009.
[18] 一般社団法人 日本電機工業会, “JEMA 蓄電システムビジョン（Ver.6）,” 2021.

# 第6章　考察

## 6.1. 緒言

本章では第 3 章から第 5 章にかけて提案した LCS モデルの有効性と限界，そして提案手法の適用可能性について考察する．

## 6.2. 自動車の電動化と製品共有のモデル化の有効性

本研究では自動車の電動化が考慮できる既存の LCS モデルをその使用形態間の需要代替，つまりは個人所有からシェアリングへの移行が考慮できるようにモデル化を行った．具体的にはまず，自動車シェアリングをモデル化するために，自動車シェアリングの特徴を表している輸送能力モデルと走行距離モデルを LCS モデルに追加した．この輸送能力モデルと走行距離モデルは移動需要を起点にして構築されたモデルであり, この移動需要を含めて LCS モデルを構築した点も本研究の新規性といえる．この移動需要を含めて LCS モデルを構築した有効性として，今後の拡張性が挙げられる．移動需要を考慮することで，本研究で対象とした自動車の使用形態間の需要代替だけでなく，公共交通機関などの他の交通手段からの移動需要の流入もしくは流出を考慮した評価が可能になるため，より広範囲の交通システムを対象としたライフサイクル評価につながる，

続いて，本提案モデルでは製品とシェアリングサービスの同時普及を LCS 上で取り扱うために二段階分配メカニズムを導入した．これは製品普及およびサービス普及が製品の生産台数に与える影響を二段階に分けてそれぞれ反映させる仕組みであり，電動化シナリオと自動車シェアリング普及シナリオを設定することで電気自動車と自動車シェアリングの同時普及を LCS 上で評価することが可能になる．ここで，製品普及シナリオでは従来手法と同じく製品別の需要推移が設定され，サービス普及シナリオでは使用形態別の需要推移に加えて，各使用形態における製品の使用状況の設定が含まれる．ここで，本研究で提案した二段階分配メカニズムでは対象とする製品および使用形態の数については，基本的に制限は無いと考えられる．本手法で提案した二段階分配メカニズムでは製品普及とサービス普及の影響はそれぞれ独立な状態で扱われた後，生産台数に順番に反映される．そのため，取り扱う製品およびサービス数が増加しても製品とサービスそれぞれでモデル化すべき要素が増加するのに留まり，二段階分配メカニズム全体の構造が変化することはない．

## 6.3. 社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化の有効性

本研究で提案した社会目標を考慮した戦略的マネジメントを反映した LCS モデルは従来 Virtual SoS としてモデル化されていた結合型ライフサイクルシステムズを Collaborative SoS としてモデル化したものである．Collaborative SoS としてモデル化するために要素システムの管理および運用の独立性を陽にモデル化することに着目し，

対象とする製品ライフサイクルシステムごとに意思決定モデルを新たに割り当てた．各意思決定モデルでは社会目標の達成に向けて相互作用に関連するパラメータ値を修正する意思決定ルールが設定され, 本研究では, 意思決定ルールとしてCompromised programming 法が適用される．これにより，企業ごとに社会目標と企業の個別目標をすり合わせた意思決定をシミュレーションすることができ，管理および運用の独立性を陽にモデル化している．

このような意思決定モデルを含むように LCS4SoS を拡張することで，各企業が社会目標への達成状況を把握し，他社の動向を伺いながら意思決定するという Collaborative SoS の特徴を示す挙動を実現しており，そのシミュレーション結果は現実世界におけるライフサイクルマネジメントの意思決定支援に有効だと考えられる．特にそれぞれの意思決定モデルに適用される意思決定ルールは対象とする製品ごとに設定可能であることは非常に重要であり，これによって，ある製品ライフサイクルシステムでは社会目標への達成を重視したパラメータ修正を行う一方で，別の製品ライフサイクルシステムでは企業利益の確保を重視したパラメータ修正を行うなど，多様な企業方針を持つ要素システムで形成される超システム環境をモデル化することができ，超システムを対象とした様々なシナリオ評価を可能にしている．

### 6.4. 提案モデルの限界と適用可能性

6.2.節および 6.3.節にて本研究で提案したモデルの有効性を示してきたが，提案モデルの限界として以下の四つが挙げられる．

- 因果関係の認識による限界

  本研究では自動車シェアリングを対象としたモデル化において，自動車シェアリングが自動車生産量に与える影響に着目して構築した因果関係図を基に LCS モデルを構築した．具体的には，自動車シェアリング車両の輸送能力が個人所有車両よりも大きいことは人々の移動需要を賄うのに必要な車両数を減少させ，その結果自動車生産量を変化させるというモデルを構築した．これら因果関係は先行研究にて言及されている自動車シェアリングの特徴を基に構築したものであるが，それらの組み合わせは分析者によって異なると考えられる．このように，分析者の認識によって異なる因果関係が想定される可能性があり，それが自動車シェアリングモデルに影響することは提案モデルの限界である．

- 二段階分配という仮定による限界

  本研究では電気自動車と自動車シェアリングが同時普及する際のそれぞれの製品生産量への影響を LCS で考慮するために，各影響を段階的に製品生産量に反映させる二段階分配メカニズムを構築した．このとき，本研究ではそれぞれの

影響を独立にモデル化しているが，電気自動車普及と自動車シェアリング普及には相互発展性がある可能性がある[1]．つまり，シェアリングサービス普及は特定製品の普及促進に作用するなどのように製品普及に影響を与え，その逆もあり得ると考えられるが，その相互発展性を本研究で仮定した二段階分配では考慮できない．この課題を解決するには，企業が提供する製品およびサービスの変化が国や地域，そして消費者に与える影響を特定し，それらの振る舞いの更新を扱う必要がある．しかし，これら一連の変化を LCS 上で完結して取り扱うのは不可能であり，他のシミュレーションツールやモデルとの連携が必要である．その際には文献[2]にて提案されているハイブリッドシミュレーションアーキテクチャの採用が有効だと考えられる[2]．ハイブリッドシミュレーションアーキテクチャでは LCS モデルと時間分解能が異なる社会技術システムモデルと特定プロセスの詳細モデルを組み合わせることで LCS の拡張が行われる．製品とサービスの相互発展を対象とする際には，社会技術システムモデルでは国や地域の振る舞いを，詳細プロセスモデルでは消費者意識の変化が記述され，LCS モデルと連携させることで電気自動車と自動車シェアリングの相互発展を取り扱えると考えられる．

- サービスの記述による限界

社会目標を考慮した戦略的マネジメントのモデル化における限界として，結合型ライフサイクルシステムズにおける相互作用を対象とした戦略的マネジメントのみをモデル化していることが挙げられ，その他の LCS モデルのパラメータ値の修正を意思決定モデルでは扱うことができない．また，戦略的マネジメントの対象とする相互作用についても先行研究[2]にて提案されている相互作用に限定されており，そこにはシェアリングを含むサービスに関連する相互作用は含まれていない．これは，LCS モデルはマテリアルフローに基づいてモデル化されるためであり，サービスの記述による限界が存在し，本提案モデルでは自動車シェアリングを対象とした戦略的マネジメントは扱うことはできない．

- 意思決定モデルによる限界

提案した意思決定モデルでは意思決定ルールに用いられる社会目標と個別目標として，それぞれ結合型ライフサイクルシステム全体の $CO_2$ 排出量と企業の利益を指標として設定した．しかし，今後は意思決定する際に考慮されるべき指標が変更，または増加する可能性がある．その際に Compromised programming 法が適用された意思決定モデルでは対応しきれない可能性がある．今後は考慮すべき指標の増加の際にはどのようなアルゴリズムにすべきか，検討していく必要がある．Compromised programming 法をそのまま適用させる場合，少なくとも指標の優先順位を計算式に明確に反映させることは重要だと考えられるが，検証が必要

である．

### 6.5. 提案モデルの活用場面について

本研究の提案モデルは自動車企業の経営企画部などの企業の戦略策定や意思決定に携わる部署の意思決定者に対して，超システム環境下におけるマネジメントを支援することを目的として提案した．提案モデルの有効性として，超システムという複雑な環境を対象としながらもシミュレーションによって脱炭素社会への貢献に向けてシナリオ分析が実施できることが挙げられ，自動車企業の脱炭素社会に向けたより良い意思決定を支援することに貢献する．一方で，提案した LCS モデルは従来の LCS モデルと同様に，製造企業における生産部や開発部に所属する技術者が構築することが想定される．特に本研究は自動車産業を対象としているので，自動車産業に属する企業の生産部や開発部で用いられることになる．これは LCS を実行するには，製品モデルを構築するための構成材料データや部品データが必要であり開発部は比較的入手可能であること，部品製造や製品組立で発生する $CO_2$ 排出量などのライフサイクルプロセスに関連するデータが生産部は比較的入手可能であること，ある程度のプログラミング技術が必要などの要因があるためである．また，提案モデルではビジネスモデルが売り切り型だけでなくシェアリングサービスも対象となるため，営業部やマーケティング部などのビジネスモデルを検討する部署にも関連する．

このことから，本提案モデルは Fig. 6-1 に示すように，企業の戦略的マネジメントを行う経営企画部の意思決定者，製品のビジネスモデルを検討するマーケター，そして生産部の技術者との連携を通じて活用されることが推奨される．提案モデルに基づく LCS は Fig. 6-2 に示すように定期的，もしくは事業計画および事業全体の戦略の更新のたび実行され，対象期間まで繰り返されることになる．これら一連の連携と継続的に LCS を実行することで，提案モデルは超システム環境におけるライフサイクルマネジメントを戦略的に支援するのに活用できると考えられる．

一方で，これら一連の連携を実現させ，継続的なライフサイクルマネジメントを実現するためには多大な人的資源が必要になると考えられる．特に，意思決定支援をより正確でより効果的なものにするには，現実世界の情報を逐次取り入れて継続的な LCS モデルの更新を図ることが重要である．例えば，製品流通量や廃棄量等のシミュレーションの結果は現実世界でのデータと乖離していき，時間経過と共に信頼性は失われていく．そのため，LCS モデルの更新は重要な工程であるが，どのプロセスのどのパラメータを修正するべきかを探索することは非常に困難である．これまで LCS をライフサイクルマネジメントで有効活用するためのデータ同化型 LCS（DA-LCS）が提案されている[3]．これは現場計測データを用いて LCS モデル内の定数や関数を自動修正可能な LCS 手法であるが，既存研究では売り切り型ビジネスを想定したライフ

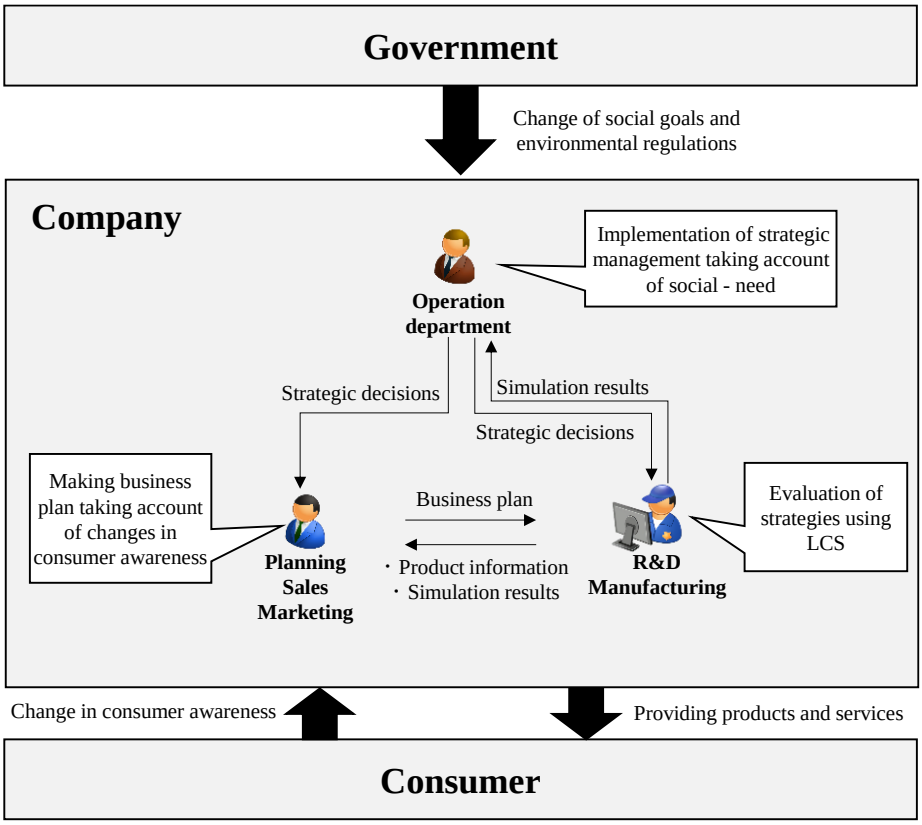



Fig. 6-1 Overview of use situation of proposed LCS method

サイクルシステム単体を対象としており，今後の展望としてシェアリングサービスや超システムモデルにも対応可能な DA-LCS 手法の開発が期待される．また，異なる部署間の連携を高めるためには，シミュレーション結果の共有の際のコミュニケーションも重要である．例えば，シミュレーション結果が技術者のみにわかる形で共有されても，他の部署ではどう扱っていいかわからず，結局その情報は用いられないことになる．そのような課題に対して，シミュレーション結果を表示するダッシュボードの有効性が指摘されている[4]．このことから部署間の円滑なコミュニケーションのためのダッシュボードを開発して企業内で共有することは，本提案モデルをより有効なものにするという観点から検討すべきだと考えられる．

### 6.6. 結言

本章では第 3 章から第 5 章にかけて提案したシミュレーションのモデルの有効性およびその限界を考察した．シミュレーションモデルの限界として，因果関係の認識による限界，二段階分配という仮定による限界，サービスの記述による限界，意思決定モデルによる限界の四つを挙げ，今後の研究課題を示した．また提案モデルの活用シーンについても考察し，提案モデルがより有効に用いられるためには企業の戦略的

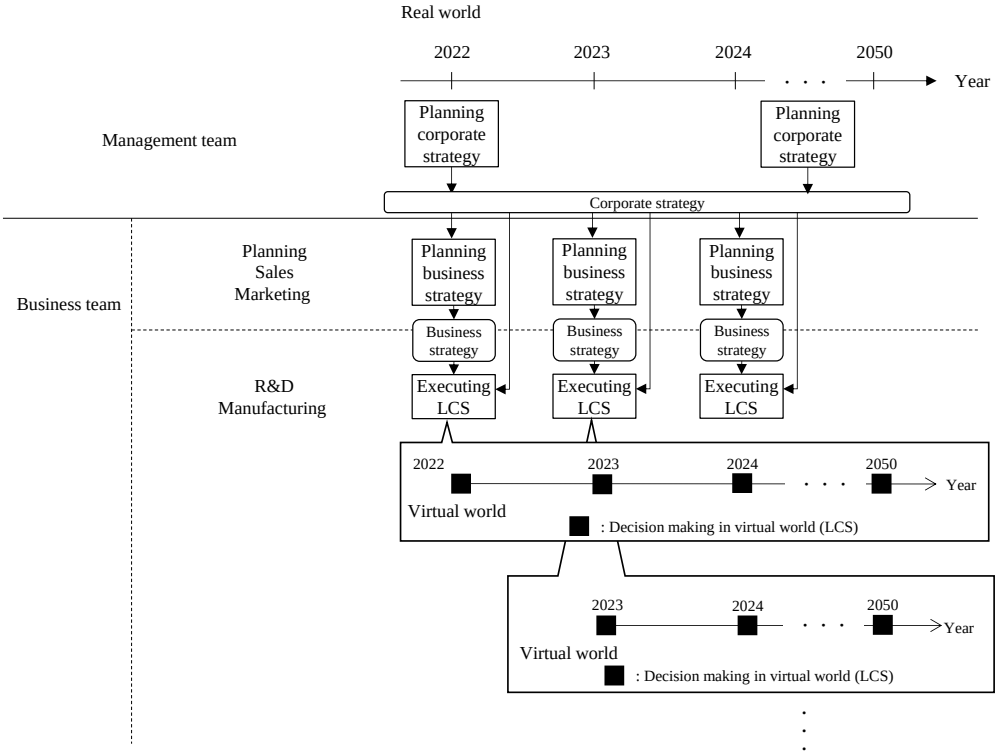



Fig. 6-2 How to use the proposed method in life cycle management

マネジメントを行う経営企画部の意思決定者，製品のビジネスモデルを検討するマーケター，そして生産部の技術者との連携を深める取り組みや継続的なシミュレーションモデルの更新の必要性を指摘した．

## 参考文献


[1] M. Digk, R.J. Orsato, and R. Kemp, “The emergence of an electric mobility trajectory”, Energy Policy, Vol. 52, pp. 135-145, 2013.

[2] H. Kobayashi, H. Murata, and S. Fukushige, “Connected lifecycle systems: A new perspective on industrial symbiosis,” Procedia CIRP, Vol.90, pp. 388-392, 2020.

[3] K. Fujimoto, S. Fukushige, and H. Kobayashi, “Data Assimilation Mechanism for Lifecycle Simulation Focusing on Process Behaviors,” International Journal of Automation Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 882-889, 2020.

[4] D. Camana, A. Manzardo, A. Fedele, and S. Toniolo, “Chapter 9 - Life cycle sustainability dashboard and communication strategies of scientific data for sustainable development,” Methods in Sustainability Science Assessment, Prioritization, Improvement, Design and Optimization, Elsevier, pp. 135-152, 2021.

# 第7章　結論

## 7.1. 本研究の結論

本研究の目的は自動車の電動化とシェアリング普及に向けた社会目標を考慮した戦略的マネジメントのライフサイクルアプローチに基づいたモデル化であり，電動化および個別企業目標を意識した超システムを対象とした既存 LCS モデルを自動車シェアリングと脱炭素目標を意識した超システムの二方面に拡張した．

まず，前者の電動化と自動車シェアリングを考慮したモデル化では，使用形態間では人々の移動需要の代替が行われていることに着目し，移動需要を起点として自動車シェアリングの特徴である輸送能力モデルおよび走行距離モデルを構築することで自動車シェアリングの普及が自動車の生産量に与える影響をシミュレーション可能にした．また，電動化と自動車シェアリング普及の自動車生産量への影響を統合することができる二段階分配メカニズムを LCS モデルに実装することで，電気自動車と自動車シェアリングの同時普及の影響を LCS 上で評価可能とした．

続いて脱炭素目標が共有された超システムにおける企業の戦略的マネジメントを反映した LCS モデルとして，意思決定モデルが含まれる LCS モデルを開発した．意思決定モデルには社会目標と企業の個別目標の達成状況が考慮された意思決定ルールに沿って相互作用に関連するパラメータ値の修正が行われる．この意思決定モデルの実装により，既存モデルではほとんど考慮されていなかった超システムの特徴である管理および運用の独立性を陽にモデル化した．

これらモデルを併用し，自動車の電動化と製品共有に向けた戦略的マネジメントのための LCS モデルを構築し，そのモデルの妥当性について検証を行った．ケーススタディでは軽電気自動車，軽ガソリン自動車，電気自動車，ガソリン自動車，家庭用蓄電池，充電スタンド，太陽光発電システムの 7 製品を対象とし，電気自動車，軽電気自動車，ガソリン自動車を用いたカーシェアリングサービスが普及するとした．その結果，シェアリングサービスの普及は電気自動車の総台数減少とそれに伴う異種製品の普及鈍化によって累積のリユース量を減少させ，社会目標を考慮した戦略的マネジメントは社会目標達成の困難化に反応してリユースの発生時期を早期化させていることを示し，併用されたそれぞれのモデルは計算機上で適切に機能していることを示した．これにより，自動車ライフサイクルに起因する $CO_2$ 排出や資源消費を社会全体で削減するための社会動向および技術動向が製品生産量に与える影響をモデル化し，超システム環境における多様なシナリオを分析可能としたといえる．以上から，提案したモデルが自動車企業意思決定者にとって，自動車の方式転換と共有化に向けた戦略的マネジメントにおけるシナリオ分析を支援するのに有効であると考えられる．

### 7.2. 今後の展望

本研究では自動車業界が受けている社会動向と技術動向を考慮した戦略的マネジメントをライフサイクル思考に基づいてモデル化を行ったが，他業界でも個人所有から製品共有への使用形態変化と社会目標を考慮した戦略的マネジメントへの変化は発生していると考えられる．今後の展望として，本研究では自動車業界を対象として提案した二段階分配メカニズムや社会目標を考慮した戦略的マネジメントのためのモデルが他業界でも適用できるかの検証を行い，またそのモデルを他業界用に改良していくことで適用範囲を広げることが挙げられる．これにより，より大規模な産業システムを対象として，カーボンニュートラルに向けた各方策を包括的に評価可能となると考えられる．またその過程で，カーボンニュートラルの達成に向けて切り離すことができない製品の循環生産のモデルを充実させることで，カーボンニュートラルと循環経済の同時達成を支援するライフサイクルモデルに発展することが期待される．

## 付録 A　シミュレーションモデルのパラメータリスト

各章で用いたシミュレーションモデルの主要な入力パラメータを示す．ここで，章ごとで同じ製品でもパラメータ値が異なっているが，これはそれぞれの研究で参考にしていた資料が異なっているためである．

- 第 3 章

Table. A-1 Raw material intensity of GV and EV [kg/Unit]

| | Gasoline vehicle (GV) [kg/Unit] | Electric vehicle (EV) [kg/Unit] |
|---|---|---|
| Li | 0 | 6.74 |
| Mg | 0.2 | 0.2 |
| Al | 59.9 | 77.3 |
| Mn | 10.9 | 29.3 |
| Fe | 889 | 910 |
| Co | 0 | 18.4 |
| Ni | 0 | 18.4 |
| Cu | 20.8 | 86.4 |
| Zn | 100 | 0.1 |
| Nd | 0 | 0.497 |
| Pt | 0.00154 | 0 |
| Pb | 0.3 | 0.31 |

Table. A-2 Environmental load of GV and EV

| | $CO_2$ emissions [kg-$CO_2$] | | TMR [t-TMR] | |
|---|---|---|---|---|
| | GV | EV | GV | EV |
| Material manufacturing | 2,101 | 3,598 | 18 | 70 |
| Components manufacturing | 358.8 | 2,815 | - | - |
| Products manunfacturing | 514.8 | 609.3 | - | - |
| Usage per km | $1.381\times10^{-1}$ (in 2015) | $5.733\times10^{-2}$ (in 2015) | $1.0\times10^{-4}$ (in 2015) | $2.0\times10^{-4}$ (in 2015) |
| | $1.381\times10^{-1}$ (in 2030) | $4.111\times10^{-2}$ (in 2030) | $1.0\times10^{-4}$ (in 2030) | $1.6\times10^{-4}$ (in 2030) |
| Disposal | -752.6 | -1,294 | -9 | -33 |

Table. A-3 Lifetime setting of GV and EV

| | GV | EV(Body) | EV(LIB) |
|---|---|---|---|
| Type of probability destribution | Triangular distribution | | |
| Minimum value [km] | 0 | 0 | 80,000 |
| Mode value [km] | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| Maximum value [km] | 200,000 | 200,000 | 120,000 |

Table. A-4 Parameters and their values of car- and ride-sharing model

| Parameter | Value |
|---|---|
| Average number of people per privately owned vehicle | 1.3 |
| Average monthly mileage per privately owned vehicle [km] | 833 |
| Average number of people per car-sharing vehicle | 1.3 |
| Maximum utilization rate of car-sharing vehicles | 5 |
| Average number of people per ride-sharing vehicle | 2 |
| Maximum utilization rate of ride-sharing vehicles | 4 |
| Rate of effective mileage during ride-sharing | 0.5 |

- 第 4，5 章

Table. A-5 Raw material intensity of GV [kg/Unit]

| | Body | Tyre | Engine | Small battery |
|---|---|---|---|---|
| B | 0.0108 | - | - | - |
| C | 0.799 | - | - | - |
| Mg | 3.23 | - | - | - |
| Al | 1.5 | - | 142 | - |
| Si | 1 | - | - | - |
| P | 0.276 | - | - | - |
| S | 0.546 | - | - | - |
| Ti | 0.659 | - | - | - |
| V | - | - | 0.193 | - |
| Cr | 19.4 | - | 9.19 | - |
| Mn | 4.63 | - | 7.54 | - |
| Fe | 623 | - | - | - |
| Co | - | - | 0.0016 | - |
| Ni | 0.58 | - | 3.55 | - |
| Cu | 12.4 | - | 0.6 | - |
| Zn | 0.058 | - | - | - |
| Sr | 0.0147 | - | - | - |
| Y | 0.0013 | - | - | - |
| Zr | 0.0367 | - | - | - |
| Nb | 0.165 | - | - | - |
| Mo | - | - | 0.731 | - |
| Rh | 0.0004 | - | - | - |
| Pd | 0.0015 | - | - | - |
| Sn | 0.0214 | - | - | - |
| W | - | - | 0.128 | - |
| Ir | 0.00002 | - | - | - |
| Pt | 0.0011 | - | - | - |
| Pb | 0.2 | - | 0.1 | 6.6 |
| La | 0.0032 | - | - | - |
| Resin | 84.1 | 68.5 | 7.2 | 1.8 |
| Other | 76.4 | - | - | - |

Table. A-6 Raw material intensity of S-GV [kg/Unit]

| | Body | Tyre | Engine | Small battery |
|---|---|---|---|---|
| B | 0.00898 | - | - | - |
| C | 0.665 | - | - | - |
| Mg | 2.69 | - | - | - |
| Al | 1.25 | - | 118 | - |
| Si | 0.833 | - | - | - |
| P | 0.229 | - | - | - |
| S | 0.454 | - | - | - |
| Ti | 0.548 | - | - | - |
| V | - | - | 0.16 | - |
| Cr | 16.2 | - | 7.64 | - |
| Mn | 3.85 | - | 6.27 | - |
| Fe | 519 | - | - | - |
| Co | - | - | 0.00133 | - |
| Ni | 0.482 | - | 2.95 | - |
| Cu | 10.3 | - | 0.499 | - |
| Zn | 0.0482 | - | - | - |
| Sr | 0.0122 | - | - | - |
| Y | 0.00108 | - | - | - |
| Zr | 0.0305 | - | - | - |
| Nb | 0.137 | - | - | - |
| Mo | - | - | 0.608 | - |
| Rh | 0.000333 | - | - | - |
| Pd | 0.00125 | - | - | - |
| Sn | 0.0178 | - | - | - |
| W | - | - | 0.106 | - |
| Ir | 0.0000166 | - | - | - |
| Pt | 0.000915 | - | - | - |
| Pb | 0.166 | - | 0.0832 | 6.6 |
| La | 0.00266 | - | - | - |
| Resin | 70 | 68.5 | 5.99 | 1.8 |
| Other | 63.6 | - | - | - |

Table. A-7 Raw material intensity of EV [kg/Unit]

| | Body | Tyre | LIB | Motor |
|---|---|---|---|---|
| Li | - | - | 6.29 | - |
| B | - | - | - | 0.143 |
| C | 0.799 | - | - | - |
| O | - | - | 28.5 | - |
| F | - | - | 1.88 | - |
| Mg | 0.0153 | - | - | - |
| Al | 11.5 | - | 33.1 | 21.4 |
| Si | 1 | - | - | - |
| P | 0.276 | - | 0.51 | - |
| S | 0.227 | - | - | - |
| Cr | 19.4 | - | - | - |
| Mn | 4.63 | - | 0.104 | - |
| Fe | 631 | - | 4.9 | 85.2 |
| Co | - | - | 0.834 | - |
| Ni | 0.58 | - | 53.4 | - |
| Cu | 28 | - | 30.6 | 31.1 |
| Zn | 0.058 | - | - | - |
| Ga | - | - | - | 0.0017 |
| Mo | 0.083 | - | - | - |
| Sn | 0.0214 | - | - | - |
| Nd | - | - | - | 0.334 |
| Dy | - | - | - | 0.0783 |
| Resin | 84.3 | 68.5 | 116 | 4.26 |
| Other | 76.4 | - | 15.9 | - |

Table. A-8 Raw material intensity of S-EV [kg/Unit]

| | Body | Tyre | LIB | Motor |
|---|---|---|---|---|
| Li | - | - | 3.73 | - |
| B | - | - | - | 0.105 |
| C | 0.588 | - | - | - |
| O | - | - | 16.9 | - |
| F | - | - | 1.11 | - |
| Mg | 0.0113 | - | - | - |
| Al | 8.46 | - | 19.6 | 15.8 |
| Si | 0.736 | - | - | - |
| P | 0.203 | - | 0.302 | - |
| S | 0.167 | - | - | - |
| Cr | 14.3 | - | - | - |
| Mn | 3.41 | - | 0.0617 | - |
| Fe | 464 | - | 2.91 | 62.6 |
| Co | - | - | 0.495 | - |
| Ni | 0.426 | - | 31.7 | - |
| Cu | 20.6 | - | 18.2 | 22.9 |
| Zn | 0.0426 | - | - | - |
| Ga | - | - | - | 0.00125 |
| Mo | 0.061 | - | - | - |
| Sn | 0.0157 | - | - | - |
| Nd | - | - | - | 0.246 |
| Dy | - | - | - | 0.0576 |
| Resin | 62 | 68.5 | 68.7 | 3.13 |
| Other | 56.2 | - | 9.45 | - |

Table. A-9 Raw material intensity of HV [kg/Unit]

| | Body | Tyre | Engine | Small battery | LIB | Motor |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Li | - | - | - | - | 3.93 | - |
| B | - | - | - | - | - | 0.0143 |
| C | 0.799 | - | - | - | - | - |
| O | - | - | - | - | 17.8 | - |
| F | - | - | - | - | 1.17 | - |
| Mg | 0.0153 | - | - | - | - | - |
| Al | 1.5 | - | 142 | - | 23.1 | 13.4 |
| Si | 1 | - | - | - | - | - |
| P | 0.276 | - | - | - | 0.319 | - |
| Si | 0.227 | - | - | - | - | - |
| V | - | - | 0.193 | - | - | - |
| Cr | 19.4 | - | 9.19 | - | - | - |
| Mn | 4.63 | - | 7.54 | - | 0.104 | - |
| Fe | 608 | - | | - | 3.06 | 53.3 |
| Co | - | - | 0.0016 | - | 0.834 | - |
| Ni | 0.58 | - | 3.55 | - | 33.4 | - |
| Cu | 12.4 | - | 0.6 | - | 19.1 | 19.4 |
| Zn | 0.058 | - | - | - | - | - |
| Ga | - | - | - | - | - | 0.0017 |
| Mo | - | - | 0.731 | - | - | - |
| Rh | - | - | - | - | - | - |
| Pd | 0.0214 | - | - | - | - | - |
| Sn | - | - | 0.128 | - | - | - |
| Ir | - | - | 0.1 | 6.6 | - | - |
| Pt | - | - | - | - | - | 0.334 |
| Pb | - | - | - | - | - | 0.0783 |
| La | 82.1 | 68.5 | 7.2 | 1.8 | 62.3 | 2.66 |
| Other | 76.4 | - | - | - | 9.45 | - |

Table. A-10 Raw material intensity of HB [kg/Unit]

| | LIB | Other components |
|---|---|---|
| Li | 1.12 | - |
| O | 5.07 | - |
| F | 0.334 | - |
| Al | 5.89 | 0.9 |
| P | 0.091 | - |
| Mn | 0.019 | - |
| Fe | 0.872 | 89.9 |
| Co | 0.148 | - |
| Ni | 9.51 | - |
| Cu | 5.45 | - |
| Resin | 20.6 | - |
| Other | 2.83 | - |

Table. A-11 Raw material intensity of BCS [kg/Unit]

| | LIB | Other components |
|---|---|---|
| Li | 1.12 | - |
| O | 5.07 | - |
| F | 0.334 | - |
| Al | 5.89 | 0.9 |
| P | 0.091 | - |
| Mn | 0.019 | - |
| Fe | 0.872 | 89.9 |
| Co | 0.148 | - |
| Ni | 9.51 | - |
| Cu | 5.45 | - |
| Resin | 20.6 | - |
| Other | 2.83 | - |

Table. A-12 Raw material intensity of PV [kg/Unit]

| | Panels | Other components |
|---|---|---|
| Al | - | 50.5 |
| Mn | - | 1.03 |
| Fe | - | 161 |
| Cu | - | 3.65 |
| Sn | 0.52 | - |
| Si | 302 | - |

Table. A-13 $CO_2$ emissions of targeted products [kg$CO_2$/Unit]

| | GV | HV | EV | BCS | HB | PV | S-GV | S-EV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Material manufacturing | 3,405 | 3,851 | 6,005 | | | | 2,955 | 4,146 |
| Components manufacturing | 531.4 | 987.8 | 2395 | 686.0 | 615.9 | 4444 | 468.1 | 1581.9 |
| Products manufacturing | 594.0 | 654.0 | 655.0 | | | | 494.1 | 481.6 |
| Usage per km in 2020 | 0.1138 | 0.07898 | 0.06065 | - | - | - | 0.1138 | 0.06065 |
| Disposal | -660.2 | -822.3 | -1428 | -54.97 | -72.00 | -575.0 | -548.7 | -916.4 |

Table. A-14 TMR of targeted products [t-TMR/Unit]

| | GV | HV | EV | BCS | HB | PV | S-GV | S-EV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Material manufacturing | 27.1 | 42.7 | 104 | 13.8 | 7.4224 | 15.3 | 15.3 | 67.6 |
| Usage per km in 2020 | 8.89 | 6.17 | 20.9 | - | - | - | 8.89 | 20.9 |
| Disposal | -10.1 | -19.8 | -48.3 | -3.91 | -2.56 | -2.22 | -8.40 | -31.2 |

Table. A-15 Lifetime setting of targeted vehicles and average monthly mileage per privately owned vehicle

| | GV | HV | EV(Body) | EV(LIB) |
|---|---|---|---|---|
| Type of probability destribution | Triangular distribution | | | |
| Minimum value [km] | 0 | 0 | 0 | 80,000 |
| Mode value [km] | 85,000 | 85,000 | 85,000 | 100,000 |
| Maximum value [km] | 200,000 | 200,000 | 200,000 | 120,000 |
| Average monthly mileage per privately owned vehicle [km / month] | 541.5 (Constant value) | | | |

Table. A-16 Lifetime setting of BCS, HB, and PV

| | BCS | HB | PV |
|---|---|---|---|
| Type of probability destribution | Triangular distribution | | |
| Minimum value [year] | 4 | 6 | 16 |
| Mode value [year] | 6 | 10 | 20 |
| Maximum value [year] | 8 | 14 | 24 |

Table. A-17 Parameters and their values related to profit calculation

| | GV | HV | EV | BCS | HB | PV | S-GV | S-EV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Total manufacturing cost [$10^3$ yen] | 1,177 | 1,983 | 3,044 | 920 | 500 | 1,100 | 1,049 | 2,036 |
| Sales price [$10^3$ yen] | 1,765 | 2,975 | 4,567 | 1,150 | 625 | 1,374 | 1,572 | 3,054 |
| Car-sharing fee [$10^3$ yen / km] | 0.02 | - | 0.02 | - | - | - | - | 0.02 |

## 謝辞

本論文は数多くの方々の協力をいただいたことで，完成に至ることができました．

指導教員であり，本論文の主査を務めてくださった小林英樹教授には，学部 4 年生の時から，修士課程での 2 年間，博士課程での 3 年間という計 6 年間にわたって，研究の方向性をご指導していただき，シミュレーションモデルや得られた結果などについて数多くの助言をいただきました．また，研究の進め方，論文の書き方，発表資料の作成方法といった基礎技術から，研究に対する姿勢や研究の核となる考え方など多くの事柄について，決して優秀ではなかった私に対し，的確なご指導をしていただきました．ご多忙の中，多くの力添えをいただいたことに深く感謝申し上げます．

村田秀則助教には，研究を進めるにあたり，シミュレーションモデルの構築や課題設定など，多くの研究課題について相談させていただき，その都度的確なご指導をしていただきました．また，博士学位論文執筆に向けたスケジュールや心構えなどご相談させていただき，ご多忙の中，多くの力添えをいただきました．深く感謝申し上げます．

早稲田大学の福重真一教授には，大阪大学に在籍されていた 3 年間ご指導をしていただきました．投稿論文の執筆内容や掲載するべきシミュレーション結果など，学位取得に向けた過程で多くの的確なご指導をしていただいたことに深く感謝申し上げます．

本論文の査読を担当していただいた，藤田喜久雄教授（機械工学専攻），榎本俊之教授（機械工学専攻），下田吉之教授（環境・エネルギー工学専攻）には，本論文でどの部分が足りていないのか，どのように修正すべきなのか多くの有益なコメントをしていただきました．いただいたコメントを基に論文修正を行っていく過程でより深く自身の研究を理解することができました．ご多忙の中，ご指導していただき，深く感謝申し上げます．

また，研究のみならず，研究室生活における様々な事柄においてご協力，ご助言をいただきましたサステナブルシステムデザイン学領域（小林研究室）の各位に感謝いたします．皆様のおかげで長きにわたる研究室生活を楽しく過ごすことができました．

大阪大学博士課程リーディングプログラムである超域イノベーション博士課程プログラムの 7 期生各位には，学位取得を目指す同志として多くの刺激をもらい，博士

後期課程における自身のモチベーションを維持することができました．特に大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻設計工学領域研究室の戸井誠人氏には，多くのご助言，激励をいただきました．深く感謝申し上げます．

最後に，研究生活を応援してくれた家族，そして私生活を支えてくれ，研究への活力を与えてくれた妻の奈津子に，感謝の意を表したいと思います．

なお，本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2138 の支援を受けたものです。

## 発表論文

（注） 本学位論文と関連のある発表論文に*印を付した.

### 原著論文（査読付）

1. ***T. Kawaguchi**, S. Suzuki, H. Murata, and H. Kobayashi, “Life cycle simulation method to support strategic management that considers social goals,” Internal Journal of Automation Technology, Vol.16, No. 6 pp. 715-726, 2022
2. *川口 太郎, 村田 秀則, 福重 真一, 小林 英樹, "自動車のシェアリングサービスと電気自動車の普及を対象としたライフサイクルシミュレーション手法の提案, " 精密工学会誌, Vol.87, No.7, pp. 632-639, 2021.

### 国際学会講演論文 （査読あり） （口頭発表）

1. ***T. Kawaguchi**, H. Murata, S. Fukushige, and H. Kobayashi, “Scenario Analysis of Car- and Ride-Sharing Services Based on Life Cycle Simulation,” Procedia CIRP, Vol. 80, pp. 328-333, 2019.

### 国際学会講演論文 （採択審査のみ） （口頭発表）

2. ***T. Kawaguchi**, S. Suzuki, H. Murata, and H. Kobayashi, “A study of life cycle simulation applying compromised decision-making mechanism,” Proceedings of the 12th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2021.
3. ***T. Kawaguchi**, H. Murata, S. Fukushige, and H. Kobayashi, “A life cycle simulation method focusing on vehicle electrification and sharing,” Proceedings of the Electronics Goes Green 2020, pp. 197-203.

### 国内学会講演論文 （採択審査のみ） （口頭発表）

1. 前田嵩典, 川口太郎, 村田秀則, 小林英樹, “交通不便地を対象とした地域指向サービスブループリントの提案,” 2022 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2022.
2. 北川隆将, 新田紘己, 川口太郎, 村田秀則, 小林英樹, “ライフサイクルシミュレーションを用いた自家用車の脱炭素シナリオ分析,” 2022 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2022.
3. 山本竜行, 川口太郎, 村田秀則, 小林英樹, “交通需要モデルを用いたモーダルシフトのライフサイクルシミュレーション,” 第 31 回設計工学・システム部門講演会論文集, 2021.

4. *鈴木周平, 川口太郎, 村田秀則, 小林英樹, “意思決定モデルを用いた結合型ライフサイクルシステムズのシミュレーション手法,” 2021 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2021.
5. 新田紘己, 川口太郎, 村田秀則, 福重真一, 小林英樹, “自動車と公共交通機関から成る交通システムのライフサイクルシミュレーションモデルの開発,” 第 30 回設計工学・システム部門講演会論文集, 2020.
6. *川口太郎, 村田秀則, 福重真一, 小林英樹, “ライフサイクルシミュレーションを用いた自動車のシェアリングサービスのシナリオ分析,” 日本機械学会第 28 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 2018.
7. *村田秀則, 川口太郎, 福重真一, 小林英樹, “ライフサイクルシミュレーションによる自動車のシェアリングの環境負荷評価,” 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 791-792., 2018.