慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	金属資源を考慮したクリーンエネルギー自動車のグローバルポートフォリオ最適化モデルと銅資源制約の評価
Sub Title	Optimization model for global portfolio of clean energy vehicles considering metal resources and evaluation for copper resource constraint
Author	加藤, 桂太(Kato, Keita) 中野, 冠(Nakano, Masaru)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2010
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	高まる環境・エネルギー制約の中, 新興国のモータリゼーションの進展を背景に乗用車部門における対策が重要になっており, EV（電気自動車）を始めとした様々なCEV（クリーンエネルギー自動車）の技術開発が世界中で進められている. 世界的にEV100%を掲げる国が多い一方, 電源構成の悪い中国やインドではEVは向かないなど, 国や研究者により様々な議論があり, 決定的な方向性は示されていない. しかしながら資金は限られており, その中で効率的なCEV導入とCO2排出量削減を実現するためには, 将来の最適車種構成やCO2削減効果を明らかにし, 意思決定者の技術戦略の指針となる結果を示す必要がある. 一方, CEVでは使用される金属の種類や量が変化するが, 一部の金属は可採年数や偏在による供給不安が指摘されており, 中でも銅の供給リスクが高い. したがって, 金属資源を考慮した車種構成の分析が必要であるが, 既往研究は経済合理的な車種構成の分析に留まる. また, CO2削減量とその削減に必要となる銅量の関係を明らかにしておくことが望ましい. 本研究は, はじめに, 各車種のコスト・CO2排出量原単位・金属資源量に基づき, 世界6地域の最適車種構成を線形計画法により導出する最適化モデルを構築し, シミュレータをExcel上に実装した. 次に, 事例研究として銅を対象に, 2005年排出量を基準とした各年次のCO2削減量を制約値とし, 総コスト（車両購入費用, 保有期間費用の世界総計）あるいは金属消費量最小化の2つのケースを目的関数として定義して最適化計算を行った. なお, これらの最適化問題は, 両ケースともに主問題と双対問題の関係であり, 目的関数と制約条件を入れ替えても同じ最適解が得られるが, 本研究では金属資源を考慮する場合としない場合の最適ポートフォリオの違いを比較することを1つの目的としていることから, その比較を可能とするために, 制約条件をCO2削減量に統一した上で, 異なる2つの目的関数を定義し, 両ケースの最適化問題を解いた. 結果, 総コスト最小化ケースでは, 主としてEVとPHEV（プラグインハイブリッド自動車）を導入することが最適となった. 他方で, 銅消費量最小化ケースでは, EVは同様に選択されたが, PHEVではなく銅使用量が少ないFCV（燃料電池車）, CDV（クリーンディーゼル車）を導入することが最適となり, ポートフォリオが大きく異なった. 銅の供給リスクが指摘されている現状では, 費用対CO2削減効果が高いPHEVだけでなく, FCVやCDVの導入も検討する必要があると言える. 最後に, CO2削減量とその実現に必要となる銅量の関係を対応付けることにより, 銅資源制約の評価指標を得た. 仮に, 2050年排出量目標値を2005年比15%削減とする場合, それを実現する上では, 2040年に2010年時点での需要の4倍以上となる約400万トンまで需要が増加し, 現状に基づき供給量を予測すると, 約170万トン（EV約3300万台分）近くの銅が不足する可能性がある. この結果は, 政府の銅確保戦略, 企業の代替技術開発戦略立案の指針として生かすことができると考えられる.
Notes	修士学位論文. 2010年度システムエンジニアリング学 第28号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002010-0021

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or

publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文　　2010 年度

金属資源を考慮したクリーンエネルギー自動車のグローバルポートフォリオ最適化モデルと銅資源制約の評価

加藤　桂太

（学籍番号:80933122）

指導教員　教授　中野　冠

2011 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

Master's Dissertation 2010

Optimization Model for Global Portfolio of Clean Energy Vehicles Considering Metal Resources and Evaluation for Copper Resource Constraint

Keita Kato

（Student ID Number：80933122）

Supervisor　Masaru Nakano

March 2011

Graduate School of System Design and Management,
Keio University
Major in System Design and Management

論　　文　　要　　旨

学籍番号	80933122	氏　名	加藤　桂太

論　文　題　目：

金属資源を考慮したクリーンエネルギー自動車の

グローバルポートフォリオ最適化モデルと銅資源制約の評価

（内容の要旨）

高まる環境・エネルギー制約の中，新興国のモータリゼーションの進展を背景に乗用車部門における対策が重要になっており，EV（電気自動車）を始めとした様々な CEV（クリーンエネルギー自動車）の技術開発が世界中で進められている．世界的に EV100%を掲げる国が多い一方，電源構成の悪い中国やインドでは EV は向かないなど，国や研究者により様々な議論があり，決定的な方向性は示されていない．しかしながら資金は限られており，その中で効率的な CEV 導入と CO2 排出量削減を実現するためには，将来の最適車種構成や CO2 削減効果を明らかにし，意思決定者の技術戦略の指針となる結果を示す必要がある．一方，CEV では使用される金属の種類や量が変化するが，一部の金属は可採年数や偏在による供給不安が指摘されており，中でも銅の供給リスクが高い．したがって，金属資源を考慮した車種構成の分析が必要であるが，既往研究は経済合理的な車種構成の分析に留まる．また，CO2 削減量とその削減に必要となる銅量の関係を明らかにしておくことが望ましい．

本研究は，はじめに，各車種のコスト・CO2 排出量原単位・金属資源量に基づき，世界 6 地域の最適車種構成を線形計画法により導出する最適化モデルを構築し，シミュレータを Excel 上に実装した．

次に，事例研究として銅を対象に，2005 年排出量を基準とした各年次の CO2 削減量を制約値とし，総コスト（車両購入費用，保有期間費用の世界総計）あるいは金属消費量最小化の 2 つのケースを目的関数として定義して最適化計算を行った．なお，これらの最適化問題は，両ケースともに主問題と双対問題の関係であり，目的関数と制約条件を入れ替えても同じ最適解が得られるが，本研究では金属資源を考慮する場合としない場合の最適ポートフォリオの違いを比較することを 1 つの目的としていることから，その比較を可能とするために，制約条件を CO2 削減量に統一した上で，異なる 2 つの目的関数を定義し，両ケースの最適化問題を解いた．

結果，総コスト最小化ケースでは，主として EV と PHEV（プラグインハイブリッド自動車）を導入することが最適となった．他方で，銅消費量最小化ケースでは，EV は同様に選択されたが，PHEV ではなく銅使用量が少ない FCV（燃料電池車），CDV（クリーンディーゼル車）を導入することが最適となり，ポートフォリオが大きく異なった．銅の供給リスクが指摘されている現状では，費用対 CO2 削減効果が高い PHEV だけでなく，FCV や CDV の導入も検討する必要があると言える．

最後に，CO2 削減量とその実現に必要となる銅量の関係を対応付けることにより，銅資源制約の評価指標を得た．仮に，2050 年排出量目標値を 2005 年比 15%削減とする場合，それを実現する上では，2040 年に 2010 年時点での需要の 4 倍以上となる約 400 万トンまで需要が増加し，現状に基づき供給量を予測すると，約 170 万トン（EV 約 3300 万台分）近くの銅が不足する可能性がある．この結果は，政府の銅確保戦略，企業の代替技術開発戦略立案の指針として生かすことができると考えられる．

キーワード：クリーンエネルギー自動車，車種構成，線形計画法，金属資源，銅

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	80933122	Name	Keita Kato

Title

Optimization Model for Global Portfolio of Clean Energy Vehicles Considering Metal Resources and Evaluation for Copper Resource Constraint

Abstract

Environmental measures in the automobile sector are needed because of car ownership trends especially in developing countries. Various types of Clean Energy Vehicles (CEV) have been developed to reduce CO2 emissions and move our economics away from petroleum in transportation. To make an innovation of these technologies and introduce them into the market effectively on a budget and resource, it is important to analyze cost effectiveness of each CEV, an optimal portfolio of CEV, CO2 reduction effects and total social cost in the future, for a guideline of a decision-making of governments and companies. Meanwhile, CEV contain some metals that have supply risks because of the reserves and political availability. Therefore, an introduction strategy of CEV under supply constraints of the metal resources is needed. However, previous researches have analyzed only cost-effective portfolio and not taken the metal resource problems into account.

In this paper, firstly, we developed the optimization model by linear programming for CEV portfolios by 6 regions of the world, considering metal resource usage of CEV.

Secondly, as a case study, under the definition that the objectives are minimizing total social cost or copper resource usage, and the constraint is CO2 emission reduction target, we clarified an optimal CEV portfolio of the world. In case of minimizing total social cost, mainly, EV (Electric Vehicle) and PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) were selected. On the other hand, in case of minimizing copper usage, not PHEV but FCV (Fuel Cell Vehicle) and CDV (Clean Diesel Vehicle) were selected and the optimal portfolio was different between both cases.

Thirdly, the relationship between CO2 emission target and copper usage to achieve it is clarified. For example, when achieving 15% emission reduction in 2050 compared to 2005, about 4 million ton of copper is going to be needed at least in 2040.

Finally, we evaluated copper resource constraint. When achieving 15% reduction, about 1.7 million ton of copper (equal to 33 million units of EV) might be in short supply. The governments need to acquire these amounts of copper for automobile sector and companies need to develop an alternative technology to achieve the reduction target.

Key words: Clean Energy Vehicle, Sustainable manufacturing, Portfolio, Optimization, Copper

第 1 章　INTRODUCTION 2

1-1 研究背景と目的 2

1-1-1 自動車部門における環境・エネルギー問題 2

1-1-2 各国政府の対応とクリーンエネルギー自動車 3

1-1-3 研究目的 5

1-2 既往研究と課題 6

1-2-1 既往研究のまとめ 6

1-2-2 既往研究の課題 9

1-3 研究目標 13

1-4 本論文の構成 14

第 2 章　MODEL DESCRIPTION 16

2-1 モデルの概要 16

2-2 Excel spread sheet model 18

2-3 モデルの検証 19

第 3 章 WHAT-IF ANALYSIS 21

3-1 目的関数と制約条件の定義 21

3-1-1 目的関数 23

3-1-2 制約条件 24

3-2 シミュレーションの概要 27

3-3 前提条件 28

3-3-1 対象車種 28

3-3-2 初期値の設定 28

3-3-3 販売台数需要 29

3-3-4 年間走行距離 29

3-3-5 ユーザーコスト 30
3-3-6 地域・車種別排出量原単位 31
3-3-7 市場シェア変化率・導入台数の上限値 34
3-3-8 重要金属の選定と CEV1 台あたり使用量の推計 35

3-4 CO2 排出量削減シナリオ 38
3-4-1 シナリオの設定方法 38
3-4-2 本研究で想定するシナリオ 38

3-5 シミュレーション結果(1)：最適ポートフォリオの例(15%削減シナリオ) 40
3-5-1 コスト最小化ケース 40
3-5-2 金属消費量最小化ケース 42

3-6 シミュレーション結果(2)：削減シナリオ別ポートフォリオ（世界総計） 44
3-6-1 コスト最小化ケース 44
3-6-2 金属消費量最小化ケース 45

3-7 シミュレーション結果(3)：1 台あたり保有期間総コストと銅消費量 46
3-7-1 1 台あたり保有期間総コスト 46
3-7-2 銅消費量 48

第 4 章 EVALUATION FOR COPPER RESOURCE CONSTRAINT 51

4-1 CO2 排出量と銅消費量の関係 51

4-2 銅資源制約の評価 52

第 5 章 CONCLUSION 56

5-1 研究成果 56

5-2 今後の課題 58

参考文献 60

謝辞 **62**

付録 1 **64**

付録 2 **66**

付録 3 **68**

第 1 章

Introduction

第 1 章　INTRODUCTION

1-1 研究背景と目的

1-1-1 自動車部門における環境・エネルギー問題

地球温暖化問題，化石燃料の価格高騰や資源問題など，環境･エネルギーに関するさまざまな課題が表面化しており，国際政治の舞台では，エネルギー源の多様化や温室効果ガス排出削減についての中長期目標に向けた議論が活発化している．2007 年に日本が提案した「Cool Earth 50」(2050 年までに地球全体の排出量の半減を目指す)は，途上国の合意は得られていないが，ベンチマークの 1 つとなっている．2009 年に行われた G8 ラクイラ･サミットでは，Cool Earth 50 に沿ったかたちで，2050 年までに温室効果ガス排出量を全世界で少なくとも半減し，先進国については 80%の削減を目指すことで合意した [1]．しかしながら，こうした提案や合意は，大枠の議論に留まっており，国別やセクター別の役割などに関してはいまだ十分な検討が行われていないのが実情である．特にその中でも，新興国の経済発展とそれに伴う個人所得の増加による急速なモータリゼーションの進展を背景に，石油需要および CO2 排出量が今後さらに増加すると見込まれている自動車部門についての議論は，ますます重要になっている．

石油需要の増大や原油価格の乱降下は，エネルギーセキュリティに関わる重要な問題である．原油価格はニューヨーク商品取引所(NYMEX)での原油先物価格(WTI 原油価格)で 2008 年 7 月に 147.27US ドル／バレルの史上最高値を記録した [2]．その後は調整局面が続いた後，同年 9 月の金融危機を契機に 12 月下旬には，30 ドル台前半まで急落したが，再び上昇に転じ，最近では 85～90 ドル程度の水準で推移している(2011 年 1 月時点)．近年のこうした原油価格の乱降下は，プレミアム要因による面もあるが，成長著しい新興国の需要増大のため，中長期的には価格が下落傾向になる可能性は低い．その中で，自動車部門の原油使用量は，全使用量の約 40%と，依存度は非常に大きく，使用量も増加し続けている [3]．

一方，世界の自動車からの well to wheel の CO2 排出量は，2006 年の世界の全排出量全体のうち約 15%程度を占めていた．だが，このままのペースで増加し続けると，自動車からの年間 CO2 排出量は 2030 年には 2006 年比 54%以上増加し，二酸化炭素換算(CO2e)で年間 4.7 ギガトン(Gt)にも達すると見込まれている [3]．これは，2000 年には世界中で約 7 億台であった自動車保有台数が，2030 年までに約 13 億台にまで増加するという予測に基づいている [3]．このような排出量の大幅な増加は，気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による，気温上昇を 2～2.4℃程度に抑えるためには，排出量を少なくとも半分の水準まで削減しなければならないという指摘 [4]とは対照的である．

1-1-2 各国政府の対応とクリーンエネルギー自動車

自動車部門における環境・エネルギー対策はいくつか考えられており，燃費改善，交通渋滞の解消やエコドライブ，炭素集約度の少ない燃料使用(燃料の多様化)，モーダルシフトやカーシェアリングなどがそれにあたる [5]．

中でも，燃費改善による対策が期待されており，燃費改善のポテンシャルとそれによる CO2 排出量・エネルギー使用量削減効果は，他の対策に比べ大きく見込まれている．例えば，CO2 排出量を 2006 年比で 40%削減するシナリオである IEA の BLUE MAP SCENARIO における，燃費改善による削減効果は，全体のうち 40%を占め，他に比べ大きい [6]．

実際に，近年，燃費規制は日米欧で相次いで強化されている [7]．米国では，2007 年 12 月に「エネルギー自給・安全保障法案」が成立し，2020 年の燃費基準(CAFE)は，従来の 11.7km/L から 14.9km/L まで引き上げられた．現オバマ政権は，この基準を強化，前倒しすることを提案している．また EU では，2015 年までに走行 1km あたりの CO2 排出量を現状の 160g 程度(EU 平均)から 130g まで抑える規制を導入している．各メーカーは，全販売車種の排出量平均値をこの規制水準まで抑える必要があり，これを超過した企業には制裁金等の罰則が科される予定となっている．また，更なる技術革新を前提に，EU は 2020 年には 95g/km という長期目標を掲げているが，これは 1995 年時点の 185g/km という実績水準からの半減を意味しており，非常に高いハードルである．日本でも，2015 年までに燃費を 137.5g/km まで低減する燃費基準が示されている [7]．

2012 年から部分的に始まる 130g/km という規制は既存エンジン技術の地道な改良により達成可能と見られるが，一方で，2020 年以降の 95g/km という厳しい規制に対応するためには，抜本的な技術革新が必要である．このような中，世界の自動車業界ではこうした規制に対応するためにハイブリッド車(HEV)，プラグインハイブリッド車(PHEV)，電気自動車(EV)の導入，販売拡大が不可欠という共通的な認識ができつつあり，アメリカ，EU，日本と世界各国で，実証実験や技術開発が進められている．

他方で，特に燃料多様化の観点から，軽油および軽油代替燃料(BDF，GTL，水素化バイオ軽油等)を受け入れることができるクリーンディーゼル車(CDV)や，LPG 自動車(LPG)，燃料電池車(FCV)の動向も見逃せない．もともと EU では，ディーゼル車(DV)のシェアは約 50%を占めるが [8]，排出ガス規制として 2005 年から EURO4 が実施されており，日本と同様に，今後，欧州においても排出ガス規制はより一層強化される方向にある [8]．排出ガス規制の動向によっては，今後のディーゼル乗用車の普及状況に影響を与えることも考えられるが，現在は，課題となっていた排出ガスを大きく低減させたクリーンディーゼル車の技術開発と市場投入が進められており，自動車の電動化とは異なるもう 1 つの答えとして，その普及が期待されている．また，韓国やブラジルでは LPG 自動車の普及が進んでおり，さらに，非常に高い車両コストやインフラ整備への高い投資コストのために，現状では普及の見込みは低いが，燃料電池車の開発も同時に進められている．

1-1-3 研究目的

前項で述べたように，世界各国においてクリーンエネルギー自動車(CEV)の技術開発と導入が積極的に進められている．しかし新たな技術開発やインフラ整備や導入等には莫大な投資と時間がかかる．したがって，限られた資源や資金の中で最大限効果的な CEV の技術開発および導入を推進するためには，中長期的な視点で，企業は性能・価格等の開発目標値を適切に把握し，政府は補助金や環境税といった政策により，その開発と導入を後押ししていかなければならない．

政策立案者や企業が戦略を構築し意思決定をする上において，つまり，政策立案者が税制・補助金の対象の選定や規模の検討を行う際や，企業が最適な導入計画を実現するための技術開発・設備投資を行う際には，その指針となる定量的な分析が必要である．

CEV は主に一般の消費者向け製品であり，消費者の購入によって普及が浸透するため，消費者の選好を分析し，今後どの程度普及が見込めるのかを把握する必要がある．さらに，その場合の CO2 排出量・石油使用量の削減ポテンシャルやその費用対効果(削減費用)はどの程度か，また，環境税や補助金等の政策的な施策や技術開発・社会状況の変化がそれらの普及にどのような影響を与えるのか，といったことを把握することも必要である．さらに別の視点として，種々の社会・経済的制約の中で CO2 の削減目標を実現するための最適な製品選択は何か，ポートフォリオ(車種構成)はどうあるべきかを議論する必要がある．CEV は 1 種類の車種(パワートレイン)だけでなく様々な技術開発が同時に進められているため，このような現状においては，予測だけでなく最適な技術選択について議論することも重要である．

本研究では，各車種の価格競争力および CO2 削減効果等の技術特性を基に，将来の自動車部門のポートフォリオについて分析することを目的とする．

次節以降では，関連研究とその課題について触れ，本研究の具体的な研究目標について述べる．

1-2 既往研究と課題

1-2-1 既往研究のまとめ

このような背景のもと，将来の車種構成（ポートフォリオ）分析は，これまでに数多く研究されてきた．既往研究をモデリング方法に基づき大別すると，CEV のコスト・技術競争力に着目し，種々の制約条件下で最適化計算を行う最適化型のモデルと，消費者選好に基づいた普及予測型のモデルに分けることができる．CO2・エネルギー使用量の削減においては，価格・技術競争力は必要条件，消費者選好は十分条件であり，互いに補完関係にあるが，分析の目標に応じて使い分けられている．さらにこれらの研究は，日本国内のみを分析対象とするようなミクロレベルの分析から，世界全域を対象としたマクロレベルの分析まで，様々である．ここで，既往研究の特徴について次項以降で述べる．また代表的な既往研究例を，モデリング方法と分析対象地域の 2 軸でマッピングして Fig.1.1 に示す．

(1)最適化型モデル

代表的な最適化モデルとしては，多目的線形計画法を用いて，種々の制約下でシステムコストとCO2排出量を最小化するエネルギーシステムモデル MARKAL [9]が知られている．このモデルは，技術特性を詳細に記述するモデルであり，システム全体の中での技術の相対比較が可能である．そのような中，北嶋ら [10]は MARKAL モデルを日本国内の輸送部門のみに適用し，補助金が与えられた場合の車種構成と CO2 排出目標を達成するために必要な車種構成をそれぞれ個別に求めている．この研究では CO2 排出目標の達成に必要な車種構成を実現する補助金の規模については検討されていないが，一戸ら [11]は MARKAL モデルに基づき分析を行うとともに，補助金の規模まで明らかにしている．また，遠藤ら [12]は，燃料電池自動車に着目し，将来の導入可能性，導入時期，導入規模を，特に CEV の競合技術，HEV や EV との競合を念頭に，特に炭素税との関連について分析している．

さらに，竹下は，MARKAL モデルと同様の分析が可能なモデル，Global Energy Model REDGEM 70 を独自に開発し，各車種の技術特性やエネルギー源（燃料）を詳細化した上で，車種構成の分析を行っている．他方で，山田ら [13]は，製品の寿命分布を考慮した製品最適導入計画モデルを提案し，事例研究としてこのモデルを日本の乗用車部門に適用している．MARKAL モデルと良く似たモデルであるが，製品の寿命分布を考慮し，ライフサイクルでの CO2 排出量を計算している点，目的関数として CO2 排出量を設定し，制約条件として予算制約を設定した点が，先の MARKAL モデルと異なる．

(2)普及予測型モデル

普及予測に基づく既往研究として，欧州の IIASA(国際応用システム研究所)が 1980 年代に新エネルギー技術の普及評価にロジスティック曲線モデルを適用した例がある [14]．しかし，IIASA の研究で用いられたロジスティック曲線モデルは，購買者の選好や価格変化の影響が込みになったモデルであるため，価格変化や性能向上の普及への影響を明示的に分析することが困難であった．

一方，国立環境研究所が開発した AIM End-use モデルは，購入者の意思決定をモデル中で定式化した．そのため初期価格やランニングコストの変化が与える影響の分析が可能である [15]．しかし，自動車購買の意思決定におけるルールとして経済合理性を仮定しているため，購入者が企業や政府である場合には妥当性があるものの，多様な選好を持つ一般消費者の意思決定を捉えることができたとは言い難い．

一般消費者の選好の調査やモデル化自体は数多くなされており，自動車について消費者のライフスタイルや移動量，性格，旅行嗜好性などと車種選択の関係を分析した研究も見られる．消費者選好モデルを CEV の普及分析に適用した例として，近久ら [16]，長谷川ら [17]は，自動車を対象にしたコンジョイント分析を行い，その結果に基づく多項ロジット型の消費者選好モデルを構成し，燃料電池車の普及予測を行っている．多項ロジットモデルとは，消費者選好や効用に着目して製品の選択確率を算出するモデルであるが，多項ロジット型の消費者選好モデルのみに基づく普及分析は，短期の予測では妥当性を持つものの，数年を越える長期の予測には適用が難しい．

最近では，松本ら [18]が，ロジスティック曲線モデルにコンジョイント分析ベースの消費者選好モデルを統合したモデルを構築し，HEV の普及予測を行っている．また，山本ら [19]は，普及予測モデルの精度よりも CO2 排出量の推計に重きを置いているものの，ロジスティック曲線モデルに基づき，日本および中国の運輸部門 CO2 排出量の推計を行っている．

以上のように，自動車部門の将来の車種構成に関して，様々の研究が行われてきたが，前述したようにモデリングのアプローチが異なるのは，当然，研究目標が異なっているからである．次項では，これまで紹介してきた既往研究では考慮されていなかった点，課題を挙げ，具体的な研究目標について述べる．

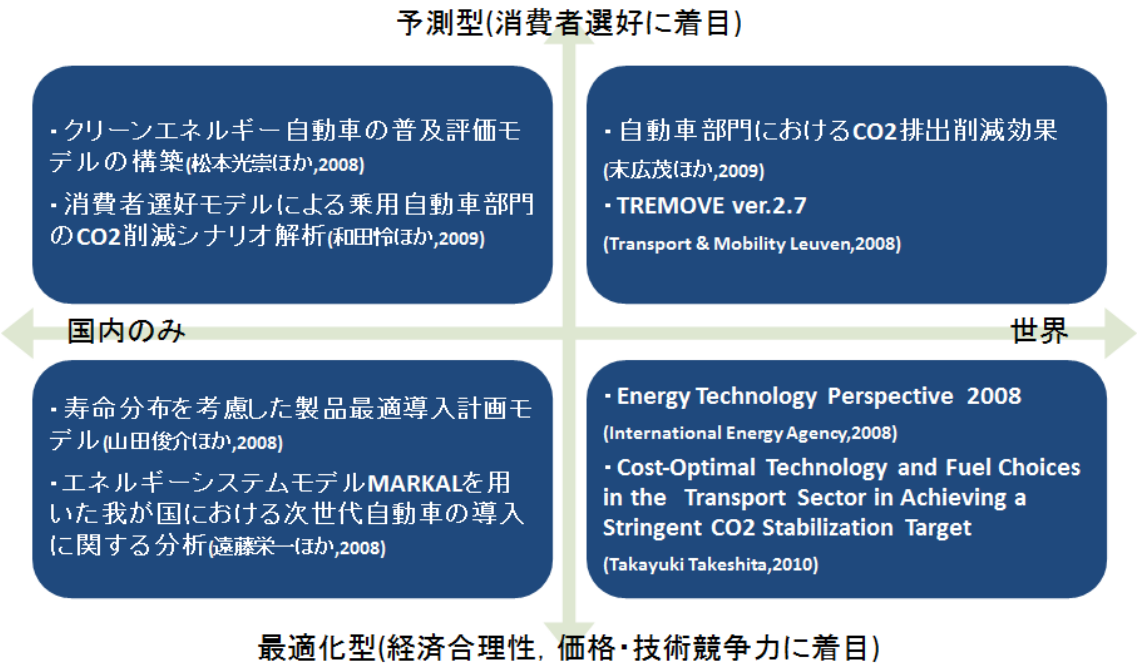


Fig.1.1 既往研究例の整理

1-2-2 既往研究の課題

(1)金属資源問題

本項では，乗用車部門における将来の車種構成分析に関する既往研究では考慮されていない，金属資源問題について述べる．

CEV は従来のガソリン車(GV)と比べ使用される金属の種類や量が変化する．例えば，HEV，PHEV，EV では，リチウムイオン電池やモータの搭載と電装化により，レアメタルとしては，リチウム，ネオジム・ジスプロシウムといったレアアース，ベースメタルとしては，銅，アルミニウムなどの金属の使用量が増える [20]．また，CDV や FCV では白金を大量に使用するという課題がある．このように，車種によって使用される金属が異なる．また，CEV の大幅な普及に伴い，このような自動車関連金属の需要増大が見込まれるが，これらは CEV を生産する上で阻害要因とならないだろうか．

原田ら [21]は，BRICs 諸国と G6 を 2050 年までの累積金属使用量の予測を行っており，その結果，2050 年までに多くの種類の金属が現有埋蔵量ではまかないきれなくなり，中には埋蔵量の数倍の使用量が予想される金属もあることを指摘している．特に，銅，ニッケル，インジウム等は，埋蔵量ベースと呼ばれる技術的には採掘可能だが経済的理由などで採掘対象とされていない資源の量さえも超過すると予測されている(Fig.1.5)．金属資源の枯渇は考えにくいが，需給が切迫し，急激な資源価格高騰がもたらす高コスト化によって製品の普及に支障をきたすことは十分に考えられる．需要と供給の差の急激な拡大によって，一時的に生産が滞る危険も考えられる．つまり，鉱山の探索や開発技術が飛躍的に拡大されない限り，現有の材料技術を基礎とした資源利用の方法では地球規模の経済の発展をまかなうことが難しくなり，資源の国際的な分配の問題などにも転化しかねない．

また，米国 National research council は，金属資源の供給リスクとなる要因を指摘しており，その要因は，上で述べた「絶対的な埋蔵量」だけでなく，「偏在性」，「リサイクル可能性」，「代替可能性」など多岐にわたる [22]．現状では，レアアースは中国に偏在しており，中国による日本に対するレアアース輸出規制は記憶に新しい．また，モータにおけるレアアースや排気ガ

ス浄化装置における白金といったレアメタルの代替や使用量低減に向けた研究は多く見られ，注目が集まっているが，依然として高コストであり，実用化には至っていない．このように資源問題を乗り越える上での課題は多く，前述した複数の供給リスク要因のうち，どのような要因も生じる危険性はある．しかし，このまま環境製品の CO2 排出量の削減効果にばかり注目し，それに伴う金属需要の増大に目をつむると，いつか需給が切迫する時期が訪れる可能性がある．極論ではあるが，戦争でも起きたらどうするのか．それは果たして人類にとって本当に良いことであろうか．

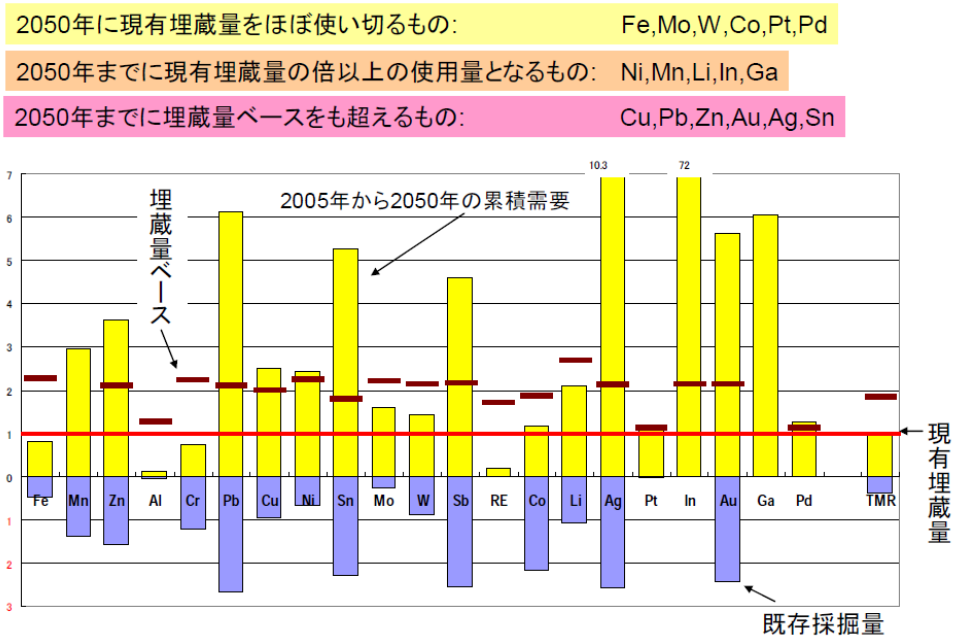


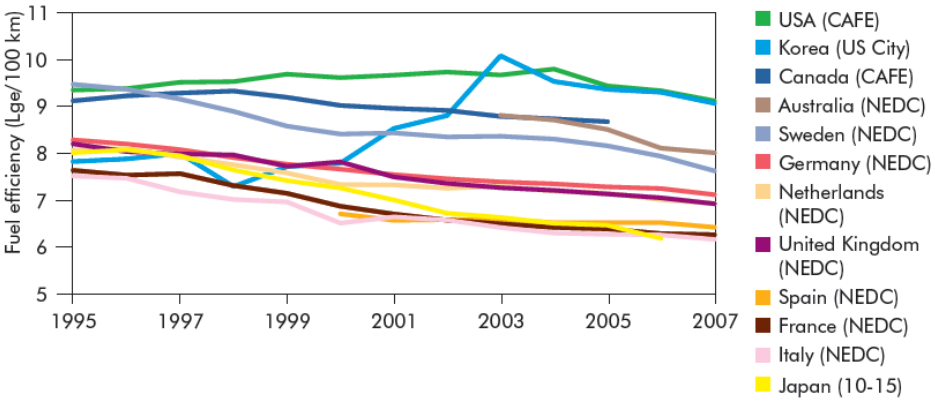
Fig.1.2 2050 年の金属消費量予測

以上のことより，新興国の発展に伴う金属資源の需要拡大が大幅に見込まれる現状においては，関連金属の供給リスクを考慮した上で CEV の導入を検討する必要がある.

しかし，既往研究の最適化モデルでは，金属資源は考慮されておらず，CO2 削減目標値を達成するための経済合理的な車種構成（コスト最小化問題）についての分析や，コスト規模の推計に留まっている. したがって，金属資源を考慮した最適化モデルの構築と，そのモデルに基づき，各車種の金属使用量および金属資源消費量（供給量）を考慮した場合の最適な車種構成や，CO2 排出量削減に必要となる金属消費量についても分析することが課題である.

(2)分析対象とする地域

CEV 導入による CO2 の削減効果を算定する際は，電源構成や燃費が地域ごとに異なる点を考慮する必要がある．例えば，中国やインドのように石炭から電気を作る割合の多い国では Well to Wheel を考えると，地球温暖化ガス排出量の低減に効果は少ない，現状ではむしろ逆効果になりうる [23]．また，地域や国によって人気のある車種(コンパクトカー，セダン，SUV など)が異なるため，平均燃費も異なる [6](Fig.1.3)．ロシアのような寒い国では，車内を暖めるのに暖房が使われるが，電力は熱効率が悪いため，EV や PHEV の実走行におけるエネルギー効率が，暖かい地域に比べ悪化することも考えられる．さらに，環境・エネルギー問題は一国に留まる課題ではなく，全世界共通の課題である．日本のみならず世界で見たときに，CEV 導入がその問題緩和に対してどのくらいのインパクトを与えるのか，どの地域が特に大きな導入効果を有しているのかといったように，世界全域を分析対象とした大きな視点で捉えることが重要である．しかしながら，そのような地域特性を考慮した上で世界の各地域を対象に，ポートフォリオの分析を試みた研究は少ない． したがって，世界各地域を分析対象とし，地域特性を考慮することは，研究として意味がある．



Notes: US City, CAFE, NEDC and 10-15 are acronyms refering to different test cycles that are not directly comparable.

Fig.1.3 地域別新車燃費の推移

1-3 研究目標

前節までに述べた背景・課題をうけ，本研究は，

- 金属資源量・CO2 排出量原単位・コストといった車種特性に基づき，CO2 排出目標を達成する最適な乗用車ポートフォリオ（車種構成）を導出する最適化モデルを構築する．さらに，Excel 上にシミュレータを実装する．
- 事例研究として銅を対象に What-If 分析を行い，銅を考慮した（各車種の銅使用量，総消費量・供給量などを最適化計算上で考慮する）最適ポートフォリオを明らかにし，考慮しない場合の結果と比較する．
- CO2 排出削減目標を実現する上で必要となる銅量を算出，つまり CO2 排出量と銅消費量の関係を明らかにし，銅資源制約を評価する．

以上のことを研究目標とする．なお，既往研究に対する本研究の位置付けを，Fig.1.4 に示す．最適車種構成に関する研究の中で，金属資源を考慮する点，世界各地域を対象とする点が本研究の新規性である．

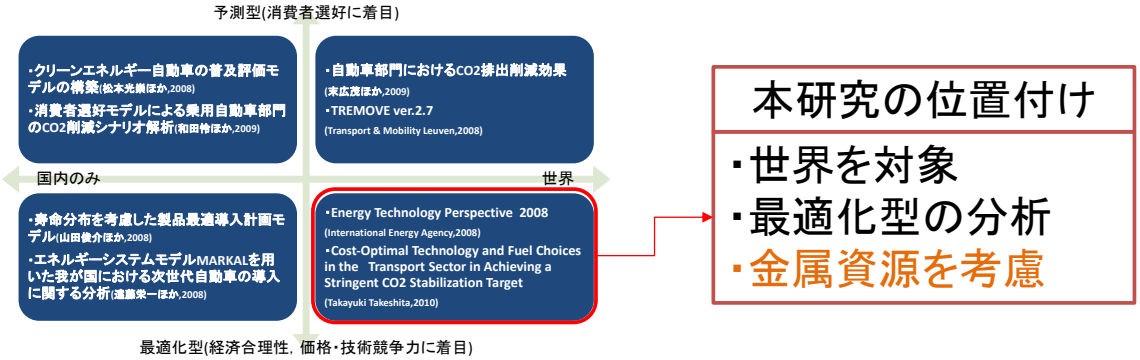


Fig.1.4 既往研究に対する本研究の位置付け

1-4 本論文の構成

本研究は，第 1 章から第 5 章で構成される．第 1 章が Introduction，第 2 章が Model description，第 3 章が What-If Analysis，第 4 章が Evaluation for Copper Constraint，第 5 章が Conclusion である．第 1 章では，研究の背景と目的，既往研究の特徴と本研究の位置づけを述べ，本研究の新規性を明らかにした．

以下，第2章では，本研究で新たに構築した最適化モデルを説明する．さらに，本モデルを Excel 上に反映させた最適化シミュレータが，正しく結果を出力するかを検証する．

第 3 章では，事例研究として銅を対象に What-If 分析を行い，銅を考慮する場合としない場合の最適ポートフォリオを比較する．具体的には，CO2 排出削減目標値を制約値として，総コスト最小化問題および銅消費量最小化問題をそれぞれ解くことにより，両ケースでの最適ポートフォリオを明らかにし，結果を比較する．はじめに，本シミュレーションの目的関数および制約条件の定義について述べる．次に，シミュレーションで想定する入力値や前提条件を説明し，対象とする重要金属の選定を行った結果，銅が対象となったこと，およびその理由を述べる．続いて，本シミュレーションで想定するCO2排出量の削減目標値（シナリオ）を説明する．最後に，各削減シナリオ，両ケースでの最適ポートフォリオ，1 台あたり保有期間総コスト，銅消費量を示す．

第 4 章では，まず，第 3 章の銅消費量最小化問題を解くことにより得られる，各 CO2 排出削減目標を実現する上で最低限必要となる銅量の算出結果に基づき，CO2 排出量と銅消費量の関係を明らかする．次に，現状に基づく銅供給量予測を行い，今後どの程度銅が不足する可能性があるか，銅資源制約を評価する．

最後に第 5 章で，本研究の成果および得られた知見をまとめ，今後の課題について述べる．

第 2 章

Model description

第 2 章　MODEL DESCRIPTION

2-1　モデルの概要

文献 [6] [12] [13]を参考に，対象地域をグローバルへ拡張し，さらに CEV の 1 台あたり金属資源量を技術特性の変数として考慮することにより，新たに構築した CEV グローバルポートフォリオ最適化モデルの概念図を Fig.2.1 に示す.

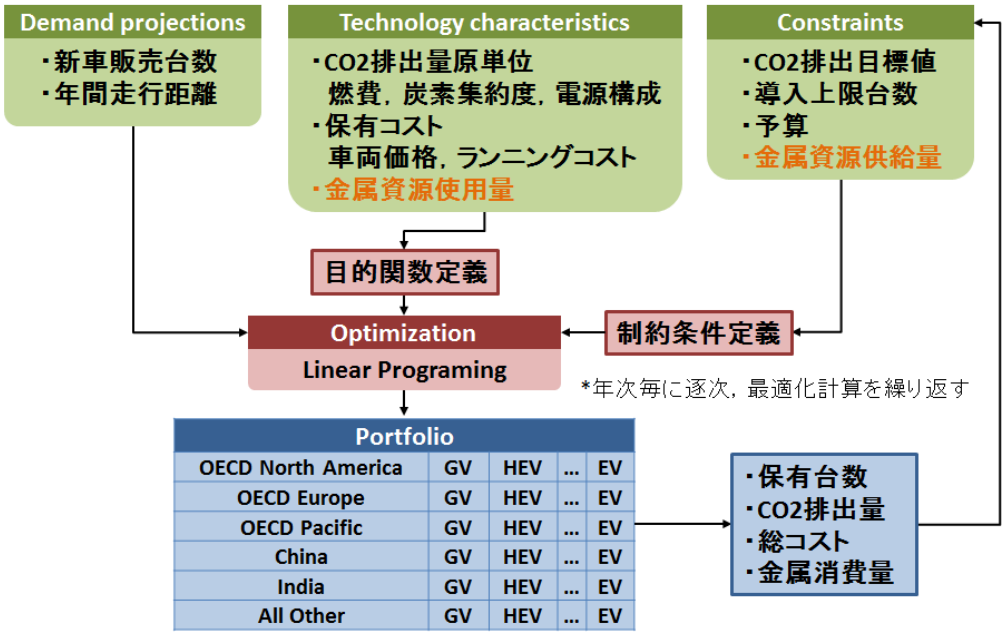


Fig.2.1 最適化モデルの概要

このモデルは，線形計画法による最適化計算を行い，CEV の最適ポートフォリオを年度，地域毎に算出するモデルである．入力値としては，新車販売台数や年間走行距離といった輸送需要に関する変数，CO2 排出量，コスト，金属資源量といった CEV の技術特性に関する変数がある．コストについては，消費者負担のイニシャルコスト（車両価格），ある年数使用を想定したランニングコスト（燃料価格，維持費用），およびインフラ設備コスト，企業の開発コスト等，様々な定義が可能であるため，シミュレーションの際に考慮するコスト範囲を設定する必要が

ある．CO2 排出量とは，保有・運用ベースでの乗用車(LDV)の CO2 排出量のことを指す．なお，分析対象とする地域は，OECD North America，OECD Europe，OECD Pacific，China，India，All Other の 6 地域としており，各地域での最適ポートフォリオが導出される．また，最適ポートフォリオを導出するにあたり，“最適”を定義する必要があるが，本モデルは，分析の目的に応じて，任意に目的関数と制約条件を定義し，最適化計算を行うことができるモデルとなっている．例えば，以下の 2 つのような定義が考えられる．

➢ CO2 排出削減目標を達成する経済合理的な車種構成

→ 目的関数:トータルコスト， 制約条件:CO2 排出削減量（目標値）

➢ 金属資源供給制約下で CO2 削減量を最大化する車種構成

→ 目的関数:CO2 排出削減量， 制約条件:金属資源供給量

また制約条件を定義する際には，おのずと変数に対する制約値（上限，下限値）を設定する必要がある．例えば，CO2 排出削減量に対する制約値として，各国政府が目標とする削減量の値を設定する必要がある．本節ではモデルの概要を説明することに留め，本研究で定義した目的関数と制約条件は，第 3 章で数式とともに説明する．CO2 排出量原単位，コスト，金属投入量といった各種変数の因果関係を明示し，そのモデル構造をより詳細に説明した場合のモデルを Fig.2.2 に示す．

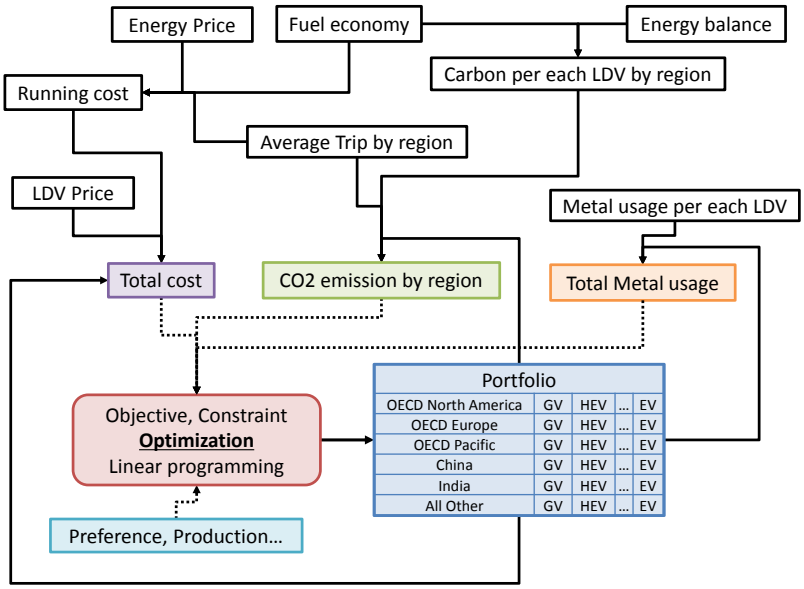
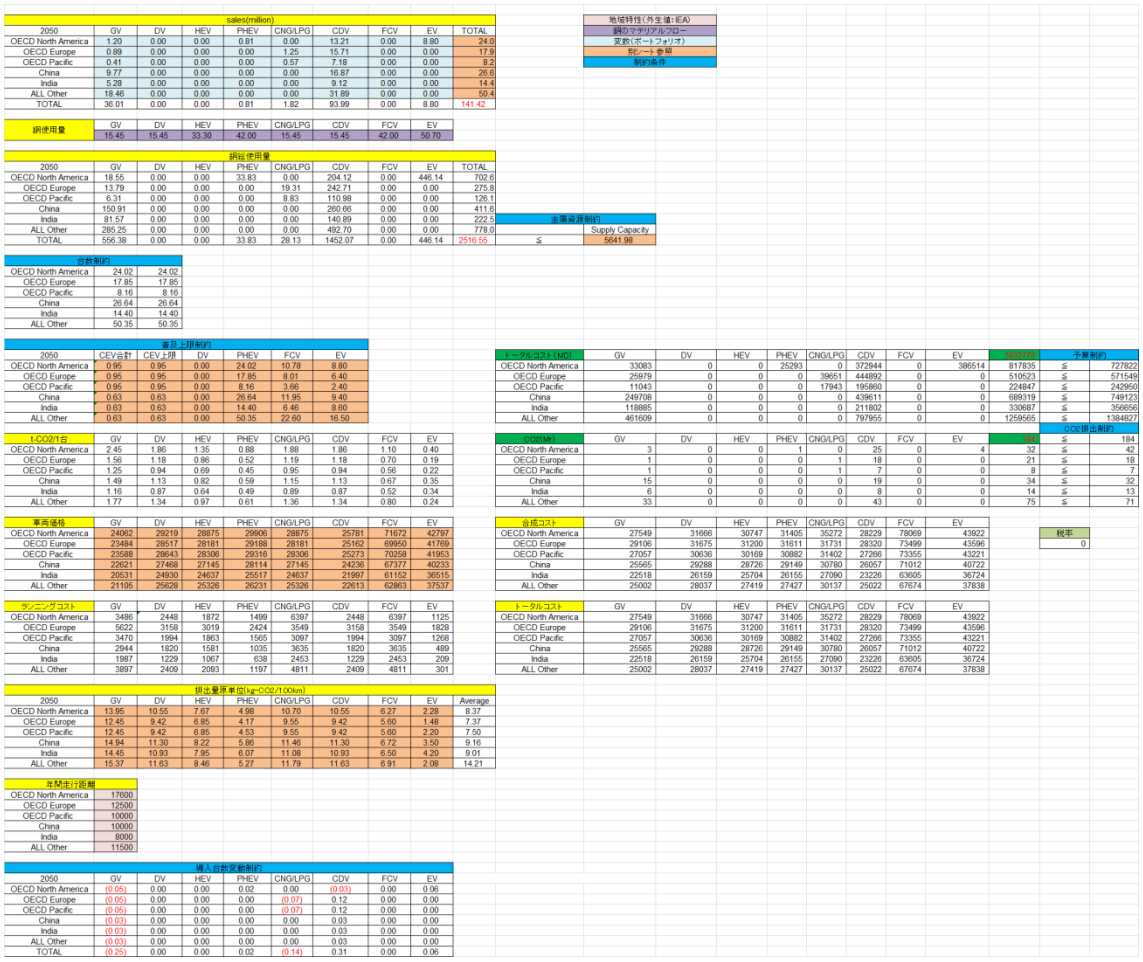


Fig.2.2 金属資源を考慮した CEV ポートフォリオ最適化モデル

2-2 EXCEL SPREAD SHEET MODEL

本研究では，前述した最適化モデルに基づく最適化シミュレータを，Excel Spread sheet 上に構築した．シミュレータの一部を一例として Fig.2.3 に示す．Excel には，アドインソフトとして線形計画法（シンプレックス法）を用いた最適化計算を行うことができる「ソルバー機能」があり，その機能を利用した．本研究で構築した最適化モデルは，金属資源量を変数として扱う点以外は，既存の最適化モデルを参考に構築したモデルであるため，既往研究で用いられているソフトウェアの利用も考えられたが，そのハンドリングとデータチューニングには非常に時間がかかると言われている．その中で，Excel という簡便なツールで，車種構成の最適化シミュレーションを行うことができるようにした点は，本研究の 1 つの新規性と言える．



sales(million)

2050	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV	TOTAL
OECD North America	1.20	0.00	0.00	0.81	0.00	13.21	0.00	8.80	24.0
OECD Europe	0.89	0.00	0.00	0.00	1.25	15.71	0.00	0.00	17.9
OECD Pacific	0.41	0.00	0.00	0.00	0.57	7.18	0.00	0.00	8.2
China	9.77	0.00	0.00	0.00	0.00	16.87	0.00	0.00	26.6
India	5.28	0.00	0.00	0.00	0.00	9.12	0.00	0.00	14.4
ALL Other	18.46	0.00	0.00	0.00	0.00	31.89	0.00	0.00	50.4
TOTAL	36.01	0.00	0.00	0.81	1.82	93.99	0.00	8.80	141.42

網使用量	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
	15.45	15.45	33.30	42.00	15.45	15.45	42.00	50.70

鋼使用量

2050	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV	TOTAL
OECD North America	18.55	0.00	0.00	33.83	0.00	204.12	0.00	446.14	702.6
OECD Europe	13.79	0.00	0.00	0.00	19.31	242.71	0.00	0.00	275.8
OECD Pacific	6.31	0.00	0.00	0.00	8.83	110.98	0.00	0.00	126.1
China	150.91	0.00	0.00	0.00	0.00	260.66	0.00	0.00	411.6
India	81.57	0.00	0.00	0.00	0.00	140.89	0.00	0.00	222.5
ALL Other	285.25	0.00	0.00	0.00	0.00	492.70	0.00	0.00	778.0
TOTAL	556.38	0.00	0.00	33.83	28.13	1452.07	0.00	446.14	2516.55

台数制約		
OECD North America	24.02	24.02
OECD Europe	17.85	17.85
OECD Pacific	8.16	8.16
China	26.64	26.64
India	14.40	14.40
ALL Other	50.35	50.35

普及率制約

2050	CEV合計	CEV上限	DV	PHEV	FCV	EV
OECD North America	0.95	0.95	0.00	24.02	10.78	8.80
OECD Europe	0.95	0.95	0.00	17.85	8.01	6.40
OECD Pacific	0.95	0.95	0.00	8.16	3.66	2.40
China	0.63	0.63	0.00	26.64	11.95	9.40
India	0.63	0.63	0.00	14.40	6.46	8.60
ALL Other	0.63	0.63	0.00	50.35	22.60	16.50

t-CO2/1台	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	2.45	1.86	1.35	0.88	1.88	1.86	1.10	0.40
OECD Europe	1.56	1.18	0.86	0.52	1.19	1.18	0.70	0.19
OECD Pacific	1.25	0.94	0.69	0.45	0.95	0.94	0.56	0.22
China	1.49	1.13	0.82	0.59	1.15	1.13	0.67	0.35
India	1.16	0.87	0.64	0.49	0.89	0.87	0.52	0.34
ALL Other	1.77	1.34	0.97	0.61	1.36	1.34	0.80	0.24

車両価格	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	24062	29219	28875	29906	28875	25781	71672	42797
OECD Europe	23484	28517	28181	29188	28181	25162	69950	41769
OECD Pacific	23588	28643	28306	29316	28306	25273	70258	41953
China	22621	27468	27145	28114	27145	24236	67377	40233
India	20531	24930	24637	25517	24637	21967	61152	36515
ALL Other	21105	25628	25326	26231	25326	22613	62863	37537

ランニングコスト	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	3486	2448	1872	1499	6397	2448	6397	1125
OECD Europe	5622	3158	3019	2424	3549	3158	3549	1828
OECD Pacific	3470	1994	1863	1565	3097	1994	3097	1268
China	2944	1820	1581	1035	3635	1820	3635	489
India	1987	1229	1067	638	2453	1229	2453	209
ALL Other	3897	2409	2093	1197	4811	2409	4811	301

排出量原単位(kg-CO2/100km)

2050	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV	Average
OECD North America	13.95	10.55	7.67	4.98	10.70	10.55	6.27	2.28	8.37
OECD Europe	12.45	9.42	6.85	4.17	9.55	9.42	5.60	1.48	7.37
OECD Pacific	12.45	9.42	6.85	4.53	9.55	9.42	5.60	2.20	7.50
China	14.94	11.30	8.22	5.86	11.46	11.30	6.72	3.50	9.16
India	14.45	10.93	7.95	6.07	11.08	10.93	6.50	4.20	9.01
ALL Other	15.37	11.63	8.46	5.27	11.79	11.63	6.91	2.08	14.21

年間走行距離	
OECD North America	17600
OECD Europe	12500
OECD Pacific	10000
China	10000
India	8000
ALL Other	11500

導入台数変動制約

2050	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	(0.05)	0.00	0.00	0.02	0.00	(0.03)	0.00	0.06
OECD Europe	(0.05)	0.00	0.00	0.00	(0.07)	0.12	0.00	0.00
OECD Pacific	(0.05)	0.00	0.00	0.00	(0.07)	0.12	0.00	0.00
China	(0.03)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
India	(0.03)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
ALL Other	(0.03)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
TOTAL	(0.25)	0.00	0.00	0.02	(0.14)	0.31	0.00	0.06

地域特性（外生値：IEA）
鋼のマテリアルフロー
変数（ポートフォリオ）
別シート参照
制約条件

金属資源制約	
	Supply Capacity
≦	5641.98

トータルコスト(1台)	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV	総合計	予算制約	
OECD North America	33083	0	0	25293	0	372944	0	386514	817835	≦	727822
OECD Europe	25979	0	0	0	39651	444892	0	0	510523	≦	571549
OECD Pacific	11043	0	0	0	17943	195860	0	0	224847	≦	242950
China	249708	0	0	0	0	439611	0	0	689319	≦	749123
India	118885	0	0	0	0	211802	0	0	330687	≦	356656
ALL Other	461609	0	0	0	0	797955	0	0	1259565	≦	1384827

CO2排出(1台)	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV	合計	CO2排出制約	
OECD North America	3	0	0	1	0	25	0	4	32	≦	184
OECD Europe	1	0	0	0	1	18	0	0	21	≦	42
OECD Pacific	1	0	0	0	1	7	0	0	8	≦	18
China	15	0	0	0	0	19	0	0	34	≦	7
India	6	0	0	0	0	8	0	0	14	≦	32
ALL Other	33	0	0	0	0	43	0	0	75	≦	13
											71

税率
0

合成コスト	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	27549	31666	30747	31405	35272	28229	78069	43922
OECD Europe	29106	31675	31200	31611	31731	28320	73499	43596
OECD Pacific	27057	30636	30169	30882	31402	27266	73355	43221
China	25565	29288	28726	29149	30780	26057	71012	40722
India	22518	26159	25704	26155	27090	23226	63605	36724
ALL Other	25002	28037	27419	27427	30137	25022	67674	37838

トータルコスト	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	27549	31666	30747	31405	35272	28229	78069	43922
OECD Europe	29106	31675	31200	31611	31731	28320	73499	43596
OECD Pacific	27057	30636	30169	30882	31402	27266	73355	43221
China	25565	29288	28726	29149	30780	26057	71012	40722
India	22518	26159	25704	26155	27090	23226	63605	36724
ALL Other	25002	28037	27419	27427	30137	25022	67674	37838

Fig.2.3 Excel 上に構築したシミュレータの概要

2-3 モデルの検証

本節では，Excel 上に構築したシミュレータが，正しい結果を出力しているかを検証する（Validation ではなく Verification）．なお，Excel のソルバー機能を用いて行われる線形計画法による最適化計算（シンプレックス法）そのものは，Microsoft 社による検証が済まされ，その妥当性は確保されているものとして考える．

検証の方法は，「最適化計算をしなくても想定できる結果を正しく出力するかを確認すること」である．具体的には，①CO2 排出制約を外して，コスト最小化問題を計算したとき，全て GV が選択されるか，②制約条件を設けず，CO2 排出量を目的関数として定義したときに，各年次において最も CO2 削減効果が高い車種が選択されるか，の 2 ケースでの出力結果を確認した．結果，想定通りの結果が得られた．

また第 1 章で述べたように，既往研究の中には，MARKAL モデルというエネルギーシステム最適化モデルを用いた研究があり，これらの研究は，IEA のエネルギーシステム分析グループ ETSAP が開発し，MARKAL モデルに基づく TIMES というソフトウェア（シミュレータ）を利用している．さらに，このソフトウェアは実際に販売されていることから，その妥当性は確保されているものと考えられる．そこで，既往研究と同一のデータおよび条件でシミュレーションを行い，その出力結果を比較することで，より詳細な検証を行うことができると考えられる．今後の課題としたい．

第 3 章

What-If Analysis

第 3 章 WHAT-IF ANALYSIS

本章は，各車種のコスト，CO2 排出量原単位，金属資源量に基づき，CO2 排出目標を達成する最適ポートフォリオを明らかにすることを目的とする．

3-1 目的関数と制約条件の定義

総コスト，CO2 排出量，金属消費量といった 3 つの観点から最適化シミュレーションを行うにあたり，目的関数と制約条件を定義する必要がある．本研究では，金属資源を考慮する場合としない場合のポートフォリオの違いを比較することが 1 つの大きな目的であった．そこで，まず以下の定義での最適化問題について考える．

- 目的関数：CO2 排出削減量の最大化
  制約条件：コスト（予算）制約，金属供給制約

この定義の下で，制約条件を予算制約のみとする場合と，予算制約および金属供給制約とする場合（販売台数需要を満たす，といったその他の制約条件は，いずれの場合も同一の条件を設定する）で最適化計算を行うことにより，結果を比較することが可能となる．しかし，金属消費量（供給量）と総コスト（予算）の 2 つを制約値として設定すると，最適化問題が複雑になり，うまく最適解が得られない．また，いずれか一方に妥当性のある予測が可能であるならば，いずれかの制約値を固定したシミュレーションが可能であるが，それも困難である．各地域の 1 人あたり GDP の予測値に基づき，個人の支払い意志額（購買力）を算出し，予算（総コストの制約値）の推計を試みたが，車両価格を地域別に設定する必要やデータもさらに必要となり，難しい．また，金属供給量（金属消費量の制約値）の推計を，鉱山の発見や開発状況に基づく鉱石生産量の予測や，リサイクル量の予測に基づき試みたが，金属資源は乗用車部門だけでなく全産業で使用されていることが普通であるため，推計が難しい．

そこでコスト制約と金属供給制約を分離した次の 2 つの問題を考える．

- 目的関数：CO2 排出削減量の最大化
  制約条件：コスト（予算）制約
- 目的関数：CO2 排出削減量の最大化
  制約条件：金属供給制約

しかし，制約値が異なっており，最適化結果の比較が難しく，また，コスト制約と金属供給制約を合理的に与えることが難しい．ところが，この最適化問題は主問題と双対問題の関係となっている．つまり，目的関数と制約条件を入れ替えても同じ解が得られるため，次の 2 つの問題を考える．

- 目的関数：総コスト最小化
  制約条件：CO2 排出削減量（目標値）
- 目的関数：金属消費量最小化
  制約条件：CO2 排出削減量（目標値）

この定義のもと，両ケースでの最適化問題を解くことにより，CO2 排出削減目標を，「コスト最小で実現するポートフォリオ」と「金属消費量最小で実現するポートフォリオ」がそれぞれ明らかになる．つまり，コストの観点で最適なポートフォリオと金属消費量の観点で最適なポートフォリオで，どの程度結果が異なっているかを比較することが可能となる．もし，ポートフォリオに大きな差がなければ，金属資源を考慮する必要はないことになる．次項では，本シミュレーションの目的関数と制約条件の定義の詳細を，その他の制約条件も含め，数式を用いて説明する．

3-1-1 目的関数

(1)CASE1：コスト最小化問題

Case1 では，目的関数を，世界各地域の消費者負担コストの総額と定義する．消費者負担コストとは，初期費用（車両価格）と運用費用（エネルギー購入価格）とする（維持費用やリサイクル費用等は含めない）．ここで，k 年における世界各地域の消費者負担コスト TC_k [USD]は，地域 i の車種 j の k 年における初期コスト（車両価格）VC_{ijk}，運用費用 $RC_{ijk,}$，新車導入台数 X_{ijk} により，式 1 で表される．

$$Min: TC_k(X_{ijk}) = \sum_i \sum_j (VC_{ijk} + RC_{ijk}) \times X_{ijk} \tag{1}$$

なお，地域 i の車種 j の運用費用 RC_{ijk} は，T_{ijk} を保有期間，EP_{ijk} をエネルギー価格[USD]，A_{ik}[km]を年間走行距離，NF_{ijk}[l/km]を新車燃費として，式 2 で表される．

$$RC_{ijk} = T_{ijk} \times EP_{ijk} \times A_{ik} \times NF_{ijk} \tag{2}$$

(2)CASE2：金属消費量最小化問題

Case2 では，目的関数を金属消費量と定義する． k 年におけるグローバルでの資源 l の総投入量 TM_{kl} [kg]は，車種 j の k 年における金属資源 l の 1 台あたり使用量 M_{jkl} [kg]と新車導入台数 X_{ijk} により，式 3 で表される．

$$Min: TM_{kl}(X_{ijk}) = \sum_i \sum_j X_{ijk} \times M_{jkl} \tag{3}$$

3-1-2 制約条件

線形計画法の適用にあたり考慮する制約条件を，販売台数需要制約，導入台数変動制約，導入台数上限制約，CO2 排出量制約とする．

(1)販売台数需要制約

世界各地域における乗用車の新車販売台数需要 D_{ik} を満たすことを条件とする(式 4)．販売台数需要は，保有台数と廃棄台数の予測値から導出することができる．保有・廃棄台数ともに，先行研究で予測されている．保有台数予測の主な方法は，1 人当たりGDP と保有率の統計値より関係式を導出し，その関係式と将来の 1 人当たり GDP 予測値，人口予測値から予測する方法である [24]．廃棄台数は，過去の乗用車廃棄率，廃棄分布に基づき，予測することができる [25]．

$$D_{ik} = \sum_{j} X_{ijk} \tag{4}$$

(2)導入台数変動制約

生産者が新車種の生産体制を整えるまでにはある程度の期間を要するため，CEV の生産量を拡大するには上限がある．例えば，EV や FCV 普及には燃料供給インフラの新たな整備が必要であり，その敷設に時間を有す．また，新車種を市場導入する際，その需要や販売台数を急激に増大することは現実的には不可能であり，製品の普及は，その普及スピードこそ製品により差があるものの，S 字カーブに沿って普及していくことが良く知られている [18]．そこで，本研究では，導入変動台数に上限値を設定する．上限値は過去の製品の導入実績値や，マーケットシェアの推移を参考に設定する．マーケットシェア変化率の上限値を a_{ij} として，式 5 のように表す．

$$\left| \frac{X_{ijk}}{D_{ik}} - \frac{X_{ij,k-5}}{D_{i,k-5}} \right| \leq a_{ij} \tag{5}$$

(3)導入台数上限制約

また，CEV のように消費者の購入により普及していく製品では，消費者の選好を考慮する必要がある．CEV 車種選択の際の消費者選好は，ユーザーコスト，イメージ，乗り心地，利便性，車種ラインナップ数など，多岐にわたる．また例えば，EV は航続距離が短いことから，使用者の利用実態に応じて棲み分けが生じる可能性があり，急速充電装置の開発や配置が進展しない限り，EV の市場シェアが 100%になることは難しい．先に述べたように消費者選好の把握によるポートフォリオ予測は多くの研究に見られるが，本研究は，マクロなレベルでの最適ポートフォリオについての分析を目的としているため，消費者選好は詳細には扱わない．しかし，少なくとも大枠として消費者選好を制約として考慮する必要がある．そこで，各車種の導入上限台数を制約値として設定する．シミュレーションの際には，政府の導入目標値などを基に個別に制約値を設定し，これらの車種の普及を制約する．地域 i の車種 j の k 年における導入台数の上限値を IC_{ijk} として，条件式を式 6 のように設定する．

$$X_{ijk} \leq IC_{ijk} \tag{6}$$

ただし，予算制約といった消費者に関係する制約を正確にモデル化することができれば，そもそもこのような普及上限値を設定する必要はなく，あくまでモデル化できていない箇所のための補完的な制約であることに留意されたい．

(4)CO2 排出削減量制約

CO2 排出削減量制約を目標値として設定する. まず, 地域 i の k 年における CO2 削減量 ER_{ik} は, 2005 年における地域 i の CO2 排出量 $CO2_{i,2005}$, 地域 i の車種 j の k 年における保有台数 Y_{ijk}, 年間走行距離 A_{ik}[km], 車種 j 使用の燃料単位当たりの well to wheel での CO2 排出原単位[g-CO2/MJ], 保有平均燃費 SF_{ijk}[MJ/km]から算出することができる. 廃棄分布に基づく, 保有台数 Y_{ijk}, 保有平均燃費 SF_{ijk} の推計は, 文献 [3]の方法を参考に推計する. ここで, 目標値を設定する際には, Case A:各地域それぞれに対して設定する Case B:世界全体の総計に対して設定する, の 2 通りの設定が可能である. Case A の場合は, CO2 排出削減量制約の条件式は, 地域 i の k 年における CO2 排出削減量の目標値を RT_{ik} として, 次の式 7 で表わされる.

$$ER_{ik} = CO2_{i,2005} - \sum_{j}(A_{jk}) \times (Y_{ijk}) \times (I_{ijk}) \times (SF_{ijk}) \geq RT_{ik} \qquad (7)$$

また, Case B の場合は, k 年における世界総計としての CO2 排出削減量の目標値を RT_k として, 式 8 で表される.

$$ER_k = CO2_{2005} - \sum_{i}\sum_{j}(A_{jk}) \times (Y_{ijk}) \times (I_{ijk}) \times (SF_{ijk}) \geq RT_k \qquad (8)$$

3-2 シミュレーションの概要

前節で述べた定義のもとでは，以下の 4 つのケースの最適化問題を分析することができる．

まず先に述べたように，目的関数をトータルコスト，金属消費量とした場合の 2 ケースのシミュレーションがある．さらに CO2 排出量目標値も，世界総計に対して設定するか，あるいは各地域それぞれに対して任意に目標値を設定するかの 2 ケースがある．本研究では考慮していないエネルギーセキュリティを考えると，世界各国で CO2 排出量削減に向けた取り組みが加速していくものと予想されるため，各地域に CO2 排出削減シナリオを目標値として設定するほうが，より妥当な解が得られると考えられる．ただし，世界全体の総計に対して設定した場合には，どの地域が特に CO2 排出量削減に寄与しうるのかを明らかにすることができる．

本研究では，各地域に CO2 排出削減シナリオを設定した場合のシミュレーションを行った．以降の文中で混乱を避けるため，シミュレーションの概要をまとめ，Fig.3.1 に示す．

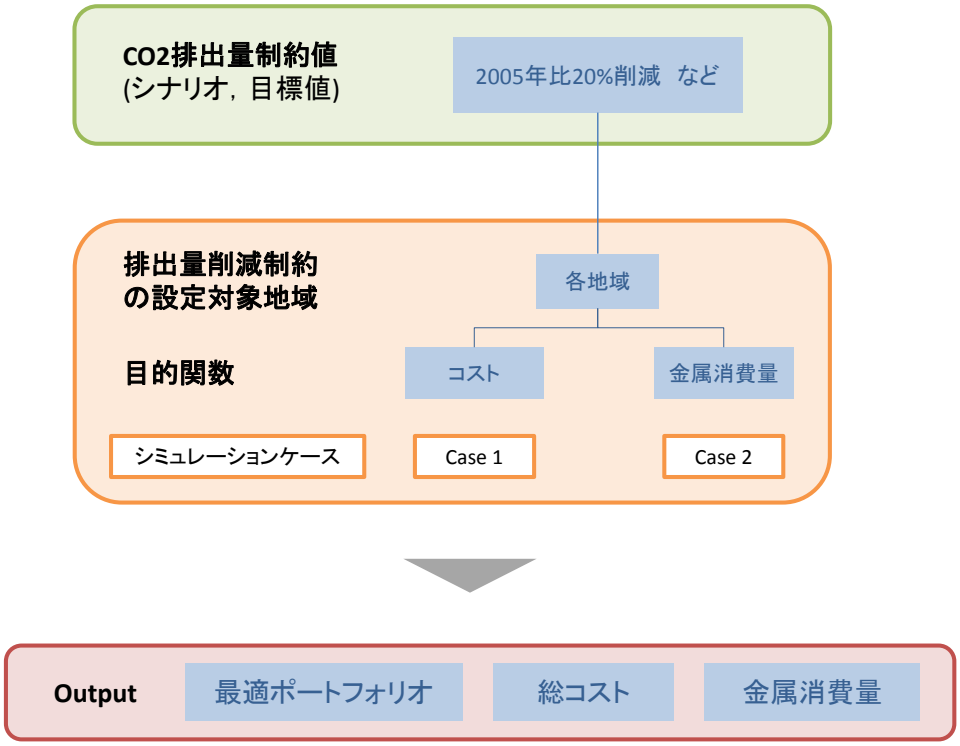


Fig.3.1　シミュレーションの概要

3-3 前提条件

3-3-1 対象車種

対象車種は，ガソリン自動車(GV)，ディーゼル自動車(DV，現在世界で販売されているディーゼル車)，クリーンディーゼル自動車(CDV，先進国の排気ガス規制をクリアーしているDV)，ハイブリッド自動車(HEV)，プラグインハイブリッド自動車(PHEV)，電気自動車(EV)，LPG 自動車(LPG)，水素燃料電池自動車(FCV)の 9 種類とする.

なお，本研究におけるCEVはCDV, HEV, PEHV, EV, LPG, FCVを指す．また，DVについては，世界各国で進む NOx の排出規制により 2025 年以後の市場導入はないと仮定する.

3-3-2 初期値の設定

2010 年の新車販売車種構成（各車種の新車販売台数）については最適化計算を行わず，文献 [3] [8]をもとに初期値として設定した（Table.3.1）．また，2010 年の保有車種構成（各車種の保有台数）は文献 [3]の値を参考にした.

Table.3.1 2010 年の新車販売車種構成

(million vehicles)	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV	TOTAL
OECD North America	16.84	0.42	0.32	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	17.6
OECD Europe	8.31	8.84	0.27	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	17.7
OECD Pacific	6.12	0.53	0.15	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	7.3
China	3.17	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.4
India	1.46	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.6
ALL Other	12.31	0.81	0.01	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	13.3
TOTAL	48.21	10.99	0.75	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	60.91

3-3-3 販売台数需要

先に説明したように，販売台数は保有・廃棄台数の予測値より予測することができるが，本研究では販売台数の予測・検証は行わず，外生値として先行研究の値を用いる．乗用車の保有・販売台数は多くの先行研究で予測されているが [3] [6] [24] [25]，本研究では 2015 年から 2050 年での 5 年おき，地域ごとの販売台数予測値を必要とするため，その条件を満たしている文献 [3]の予測値を用いた(Fig.3.2).

OECD North America，Europe，Pacific といった先進国では，販売台数はほぼ飽和状態に達し，横ばいの予測となっている．他方で China，India といった途上国では，その経済発展に伴い，2050 年時点に比べてそれぞれ約 8 倍(338 万台→2664 万台)，約 9 倍(164 万台→1440 万台)と，爆発的に増加すると予測されている．世界全体での販売台数は，2010 年の約 6000 万台から，2050 年には約 1 億 4000 万台にまで増加する．

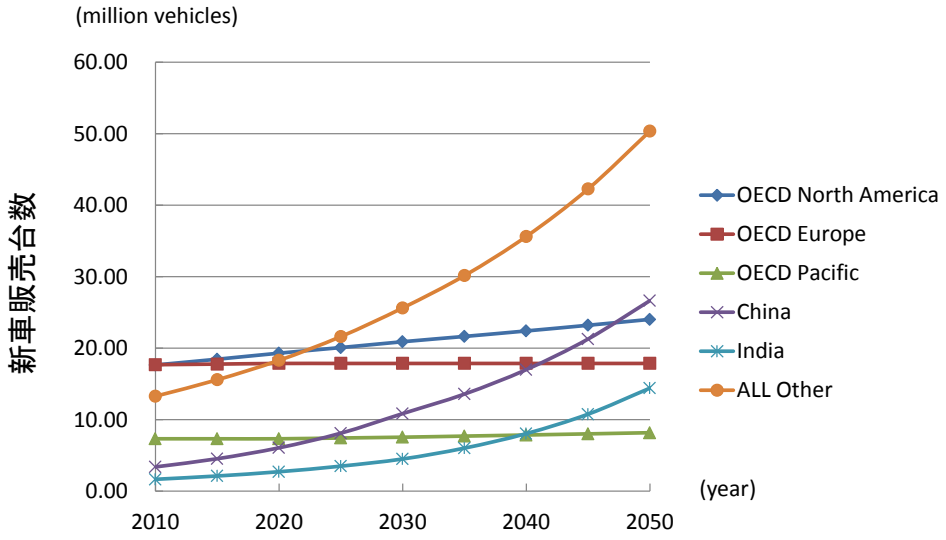


Fig.3.2 新車販売台数の予測値

3-3-4 年間走行距離

世界のどの地域において CEV 導入による CO2 削減ポテンシャルがより大きいかを議論する際，削減ポテンシャルは乗用車の使用状況により異なるため，各地域それぞれの年間走行距離を考慮する必要がある．本シミュレーションでは文献 [3]の値を参考に，Table.3.2 のように設定した．OECD North America ではその広大な土地故に，年間走行距離も長い．他方で，

India や China では，それに比べて少ない走行距離であることがわかる．本研究では，モーダルシフト等による年間走行距離の変化は考慮していない．

Table.3.2 地域別年間走行距離

年間走行距離 (km)	
OECD North America	17,600
OECD Europe	12,500
OECD Pacific	10,000
China	10,000
India	8,000
ALL Other	11500

3-3-5 ユーザーコスト

(1)車両価格

各車種の車両価格の推移を，文献 [7]を参考に Table.3.3 のように想定した．CEV は，現在は GV に比べ高価格であるが，技術進歩や普及拡大に伴う量産効果によって車両価格の低下を見込んでいる．なお，HEV の車両価格は，文献 [7]のガソリン HEV とディーゼル HEV の中間値を用いており，CDV は，文献 [8]を参考に価格設定をした．また，GV，DV，CDV は燃費改善技術の導入のために，価格がわずかに高くなる．

Table.3.3 車両価格

車両価格(USD)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GV	13644	13689	13733	13778	13822	13867	13911	13956	14000
DV	16644	16689	16733	16778	16822	16867	16911	16956	17000
HEV	18400	18200	18000	17800	17600	17400	17200	17000	16800
PHEV	34822	32644	30467	28289	26111	23933	21756	19578	17400
LPG	16444	16489	16533	16578	16622	16667	16711	16756	16800
EV	41878	39756	37633	35511	33389	31267	29144	27022	24900
FCV	141789	129278	116767	104256	91744	79233	66722	54211	41700
CDV	18400	18200	18000	17800	17600	17400	17200	17000	16800

(2)エネルギー価格

文献 [26]の値を参考に，地域別エネルギー価格を Tabel.3.4 のように設定した．なお，実際にはエネルギー価格は将来にわたり変動すると考えられるが，本研究では価格変動については考慮していない．

Table.3.4 地域別エネルギー価格

	USD/L			USD/kwh
	gasoline	diesel	LPG	Electricity
OECD North America	0.619	0.651	0.815	0.115
OECD Europe	1.799	1.514	0.815	0.263
OECD Pacific	1.285	1.106	0.823	0.228
China	0.92	0.852	0.815	0.088
India	0.92	0.852	0.815	0.047
ALL Other	0.92	0.852	0.815	0.047

3-3-6 地域・車種別排出量原単位

(1)設定方法

同じ車種であっても，地域によってニーズの高い車両サイズや燃費の規制状況が異なるため，新車平均燃費とそれに伴う CO2 排出量原単位(g-CO2/km)も異なる．これを考慮するため，先行研究に基づき地域別の GV 新車平均燃費を設定し，この値とガソリンの炭素集約度を掛け合わせることで，GV の地域別 CO2 排出量原単位を設定する．

DV, HEV, FCV については，GV の地域別 CO2 排出量原単位に，各車種の GV との CO2 排出量原単位の差を比率として掛け合わせ，それにより得られた値を用いる．本研究では，文献 [27]の車種別排出量原単位を参考に設定する(Fig.3.3)．また，各エネルギー源の炭素集約度は一定とする [3]．なお，HEV はガソリンとディーゼルエンジンの HEV があるが，CO2 排出量原単位は，それらの中間値を用いる．EV については，各地域の発電に伴う CO2 排出量と EV の電費から CO2 排出量原単位を算出する．最後に，PHEV については，CO2 排出原単位は走行パターンに依存し，推計が困難なことから，本研究では EV と HEV の中間値を用いる．

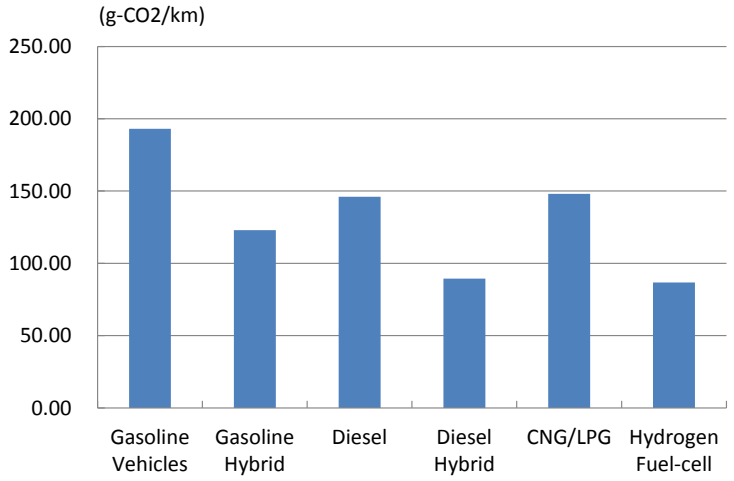


Fig.3.3 車種別 CO2 排出量原単位

(2)燃費改善と電源低炭素化の将来シナリオ

乗用車は，車体軽量化やエンジン性能など，燃費改善による排出量原単位の低下が見込まれる．さらに EV や PHEV は，再生可能エネルギーの利用など，発電時の排出量原単位の低下により，間接的に原単位の低下が見込まれる．本研究では，これらの将来シナリオを考慮する．まず燃費改善に関しては，文献 [6] [7] [28]の地域別新車平均燃費のシナリオと先進国の燃費規制状況 [2]に基づき設定した．GV の地域別新車平均燃費の推移を Fig.3.4 に示す．

次に電源低炭素化に関しては，文献 [6]を基に，発電時の CO2 排出量が，2030 年には 2006 年比 30%，2050 年には 60%まで削減されると想定した．2006 年における各地域の需要端での 1kwh 発電あたりの CO2 排出量 [23]を Fig3.5 に示す．All Other 地域の EV の CO2 排出量原単位に関しては，その他地域の平均値を用いた．なお，電費(電気エネルギー効率)は 0.40MJ/km として一定とし [27]，その改善については，データ収集と予測が困難であったことから，本研究では考慮しないこととする．以上の想定に基づき算出した，地域・車種別 CO2 排出量原単位の推移については，付録 1 を参照されたい．

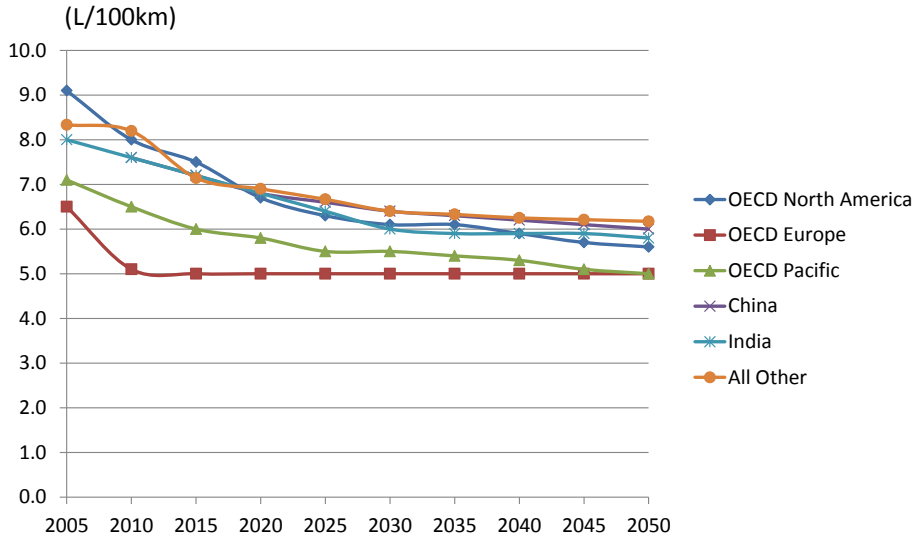


Fig.3.4 GV の平均燃費

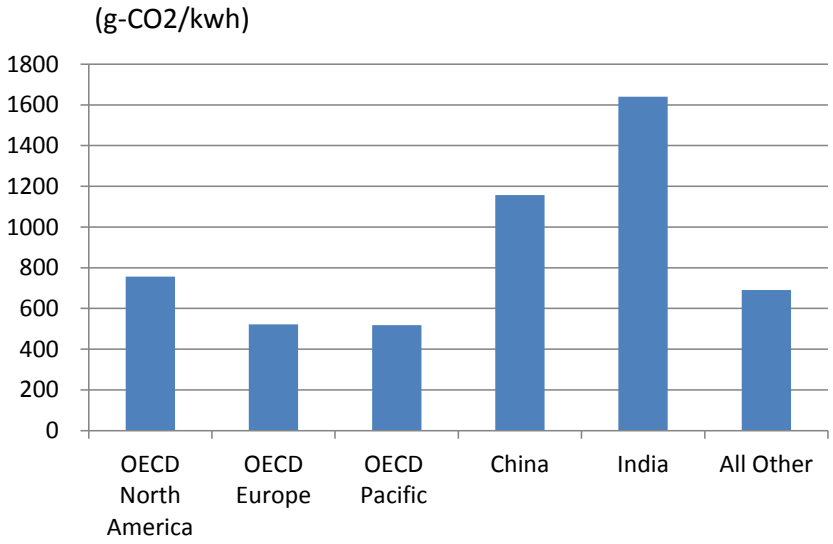


Fig.3.5 1kwh 発電あたりの CO2 排出量

3-3-7 市場シェア変化率・導入台数の上限値

過去の新車種販売台数データを基に，市場シェア変化率の上限値を設定した．国内自動車販売に占める HEV の販売シェアは，2005 年に 1.3%であったが，2009 年には 8%にまで達している [18]．他方で，EU における DV 販売シェアは，1990 年において 15%程度であったが，1994 年には 22.3%まで，2007 年には約 53%まで増加している [8]．5 年おきのシェア平均変化率は，約 12%である．以上のことから本研究では，HEV ではなく DV 販売シェアの過去の伸びを参考に，いずれの車種も 5 年間で 12%のシェア変化が起き得るものと仮定し，その値をシェア変化率の上限値とした．

次に，導入台数の上限値を設定する（Fig.3.6）．まず，IEA BLUE MAP Scenario [6]に基づき，CEV 各車種の導入台数の合計に上限値を設ける．この場合，CEV 導入台数の合計が，2030 年には乗用車の総新車販売台数の 60%，2050 年には 99%に達する．しかし，この上下値を 1 人あたり GDP や所得が依然として低い途上国へ適用するのは現実的ではない．したがって，OECD 諸国には，この上限値を適用し，その他の地域には，5 年遅れるものとして上限値を設定した．各地域の消費者選好や政府の意向等，より正確な根拠に基づく上限値の設定は今後の課題としたい．また，EV，PHEV，FCV の 3 車種に関しては，まだ市場導入が始まったばかりであるため，HEV 等に比べると，遅れて普及が始まると考えられる．そこで，この 3 車種の導入台数の合計を，同様に IEA BLUE MAP Scenario に基づき設定する．さらに，FCV は，高額な車両コストが課題として残っており，またインフラ整備も併せて必要とされる，といった理由から個別に上限値を設定する．同様に，IEA の BLUE MAP Scenario における FCV の導入台数を上限値とする．LPG，CDV，HEV，PHEV については，新たなインフラ整備の必要性がなく，また，購入・運用コスト以外に消費者選好に大きく効く要素が少ないことから，理論的には 100%導入のポテンシャルを有しているため，個別に上限値は設定しない．

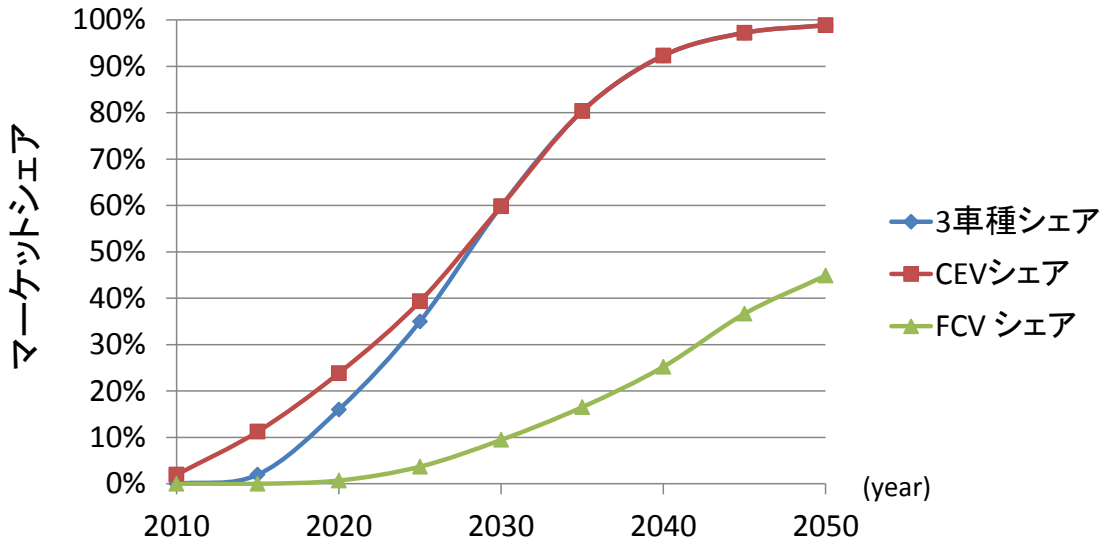


Fig.3.6 CEV の導入台数（マーケットシェア）上限値

3-3-8 重要金属の選定と CEV1 台あたり使用量の推計

(1)重要金属の選定

HEV や PHEV は従来の GV との共通部品に加え，新たにモータや Li-ion 電池等が搭載される [20]. それに伴い，新たに必要となる，あるいは使用量が増加すると考えられる金属資源として，銅,アルミニウム,リチウム，レアアースがある．また，CDV や FCV は，触媒として白金を多く使用する． National Research Council は鉱物資源の重要度を，供給リスクと供給制限の影響によって評価しており，資源の供給リスクとして様々な要因を指摘している [22]. そのうち「絶対的な資源存在量」に着目し，文献 [29]に基づき自動車用金属 [30]の可採年数を算出すると，可採年数が少ない金属として，銀，亜鉛，銅などがあげられた（Fig.3.7）.

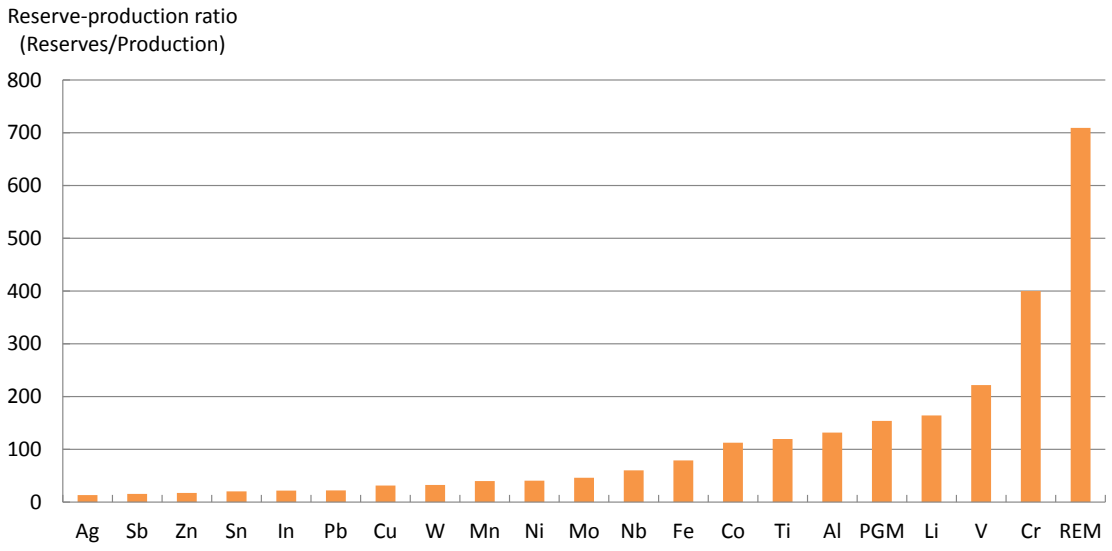


Fig.3.7 自動車に使用される金属の可採年数

使用量増加・可採年数の2点から考えると，自動車用金属のうち，「銅」は，HEVやEVで大幅に使用量が増加するにもかかわらず，比較的に可採年数が少ない．さらに，優れた導電性や熱伝導性からその他の環境・省エネ対策商品においても多くの銅が使用されている点や，代替性の低い金属である点を考慮すると，今後需要はますます伸びると考えられる．そこで本研究では，CEVの生産，普及において問題となり得る金属として「銅」に着目した（Table.3.5）．

Table.3.5 重要金属の選定

使用量増加	REM, Li, PGM, Al, Cu
埋蔵量	Ag, Sn, Au, Zn, Pb, Cu
代替可能性	PGM, Cu, Li

(2)各車種の 1 台あたり銅使用量

本項では，それぞれの車種の銅使用量を設定する．現状の HEV は，ハーネスの増加，二次電池およびモータの搭載により，GV の約 2 倍の銅を使用する．PHEV，EV には，Li-ion 電池の搭載重量差に伴って銅量が増加すると想定し，先に求めた HEV の銅量に，Li-ion 電池に含まれる銅量の差分を加えることにより，PHEV，EV に含まれる銅量を推計する(Fig.3.8).

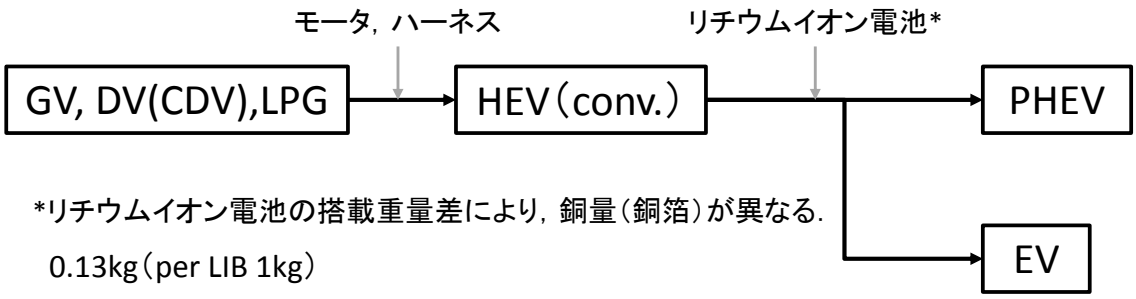


Fig.3.8 各車種の 1 台あたり銅使用量の推計方法

まず，文献 [20]を基に，Li-ion 電池 1kg あたりに使用される銅量を 0.13kg と想定した．Li-ion 電池の搭載重量を，HEV では 18kg，PHEV では 36kg，EV では 160kg と想定し，PHEV，EV に含まれる銅量を推計した．また， FCV の銅量は HEV と同量とし，DV，CDV，LPG の銅量は，GV と同量であると想定した [20]．推計結果を Table.3.6 に示す．なお，代替技術による使用量の変化は，本研究では考慮していない．

Table.3.6 各車種 1 台あたり銅使用量

	GV	DV	HEV	PHEV	LPG	CDV	FCV	EV
Copper usage(kg)	15.45	15.45	33.30	42.00	15.45	15.45	33.30	50.70

3-4 CO2 排出量削減シナリオ

3-4-1 シナリオの設定方法

CO2 排出量削減シナリオの設定方法について説明する．先に述べた前提条件のもと（燃費改善や電源の低炭素化は進む），将来の車種構成（市場シェア）が，2010 年の車種構成と変わらず一定とした場合における CO2 排出量の推移を「ベースラインシナリオ」とする．次に，目的関数を CO2 排出量として定義し，その排出量を最小化する最適化シミュレーションを行ったときの（同様に，新車販売台数や燃費改善などの前提条件はベースラインシナリオと同一）CO2 排出量の推移を「最大削減シナリオ」とする．このシナリオは，コストや金属資源に関係する制約がない状況下での最適化結果であるため，CO2 排出量が最も少なくなるように CEV が導入された場合のシナリオであることを意味する．

ベースラインシナリオと最大削減シナリオには言うまでもなく CO2 排出量に差があり，その差は年次の経過とともに開いていく．本研究では，各年次におけるこれら両ケースの差分を算出した上で，ある年次における最大削減ケースを基準に，+0%（最大削減ケース）から+100%（ベースラインケース）の間で，目標値とする CO2 排出量を設定する．この方法で得られた各年次の CO2 排出量目標値を 2005 年時点の排出量から差し引くことにより，各地域の CO2 排出量削減シナリオ（排出削減量の目標値であり，シミュレーションの制約値）を設定する．

3-4-2 本研究で想定するシナリオ

第 1 章で述べたように，ラクイラサミットでは，世界全体で 2050 年に少なくとも 50%削減の目標を掲げているが，途上国での目標値は定まっておらず，また，乗用車部門での具体的な削減目標は現状では議論されていないのが実情である．

前述したように，最大削減シナリオが達成された場合でも削減率が約 28%程度となり，全部門での 50%削減には大きく寄与できない．その中で，IEA の BLUE MAP は，運輸部門で 30%削減を目標値として設定している [6]．ただし，これは鉄道や航空等のその他の輸送手段での削減や，乗用車部門でのモーダルシフトや年間走行距離の減少等も勘案しており，本研究のように，いくつかの前提条件を固定する場合には，実現できないシナリオである．そこで本シミュレーションでは，25%削減を最も実現困難な目標値とする．また，削減シナリオを変化させ

た感度解析を行うことにより，各シナリオでの車種構成やコスト，銅消費量の変化を分析することができ，さらに，各シナリオでの車種構成の実現可能性を検討することで，現状定まっていない乗用車部門での目標値をどう設定すべきかの判断にもなる.

以上より，本シミュレーションでは，CO2 削減目標値として，2050 年における排出量を 2005 年排出量比で±0%，-5%，-10%，-15%，-20%，-25%削減となる 7 つの削減シナリオを制約値として設定し，シミュレーションを行うことした.

各削減シナリオの CO2 排出量（世界総計）および，2005 年を基準とした CO2 削減量（世界総計）の推移を Table.3.7 に示す．各削減シナリオにおける各地域の CO2 排出量の推移は付録 2 を参照されたい（本シミュレーションでは，2005 年の排出量から，ある年次の排出量を差し引くことで得られる CO2 排出削減量を制約値として設定している．ただし，削減量と排出量のどちらを制約値としても結果は変わらない）.

Table.3.7 CO2 排出量削減シナリオ（世界総計）

CO2排出量(mega ton)	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ベースラインシナリオ	2415	2580	2732	2849	2891	2992	3148	3376	3675	4050
0%削減シナリオ	2415	2580	2727	2818	2792	2753	2675	2573	2474	2415
5%削減シナリオ	2415	2580	2726	2816	2785	2736	2640	2513	2386	2295
10%削減シナリオ	2415	2580	2726	2814	2777	2718	2605	2454	2297	2174
15%削減シナリオ	2415	2580	2726	2811	2770	2700	2570	2395	2208	2053
20%削減シナリオ	2415	2580	2725	2809	2763	2683	2535	2335	2120	1932
25%削減シナリオ	2415	2580	2725	2807	2755	2665	2500	2276	2031	1812
最大削減シナリオ	2415	2580	2725	2805	2750	2652	2474	2232	1965	1722
CO2削減量(mega ton)	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ベースラインシナリオ	0	-165	-317	-434	-476	-577	-733	-960	-1260	-1635
0%削減シナリオ	0	-165	-311	-403	-377	-338	-260	-157	-59	0
5%削減シナリオ	0	-165	-311	-401	-369	-320	-225	-98	30	121
10%削減シナリオ	0	-165	-311	-398	-362	-303	-190	-38	118	242
15%削減シナリオ	0	-165	-310	-396	-355	-285	-155	21	207	362
20%削減シナリオ	0	-165	-310	-394	-347	-267	-120	80	296	483
25%削減シナリオ	0	-165	-309	-391	-340	-250	-85	139	384	604
最大削減シナリオ	0	-165	-309	-390	-335	-237	-59	184	450	694

3-5 シミュレーション結果(1)：最適ポートフォリオの例(15%削減シナリオ)

本シミュレーションでは，削減シナリオ，地域，年次，ケース毎に非常に多くの結果が得られる．本節では，一例として 15%削減シナリオを実現する最適ポートフォリオの結果をケース毎に示すこととする．はじめに，世界全体（総計）でのポートフォリオの推移を示し，次に，2030，2050 年における地域別ポートフォリオを示す．その他の削減シナリオにおけるポートフォリオは，付録 3 を参照されたい．なお，次節では，シミュレーションのまとめとして，2030，2050 年におけるポートフォリオを世界総計として積み上げ，削減シナリオ毎にまとめた結果を示す．

3-5-1 コスト最小化ケース

15%削減シナリオをコスト最小で実現する，世界全体のポートフォリオ（各地域のポートフォリオを積み上げたもの）の推移を Fig.3.9 に示す．

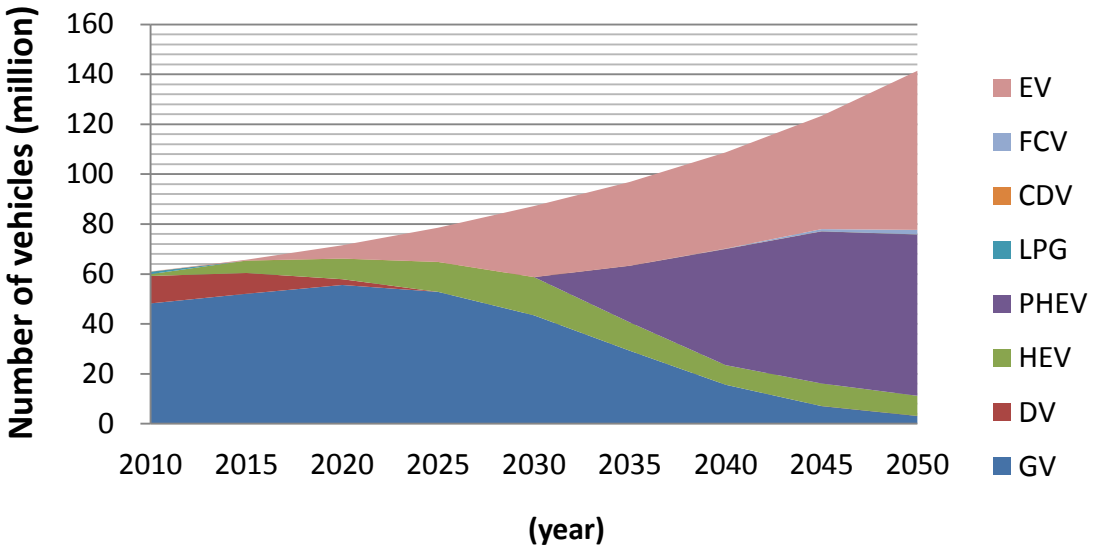


Fig.3.9 最適ポートフォリオ（15%削減，コスト最小化，世界）

15%削減シナリオをコスト最小で実現するためには，はじめに HEV を中心に EV を導入し，2030 年には，HEV をマーケットシェアの 15%，EV を 30%近く導入する必要がある．2030 年以降は，PHEV の価格低下と費用対削減効果の向上に伴い，PHEV が選

択され始め，結果的に 2050 年には，HEV をマーケットシェアの約 5%，EV を約 40%，PHEV を約 50%導入することが最適な結果となった．

次に，15%削減シナリオをコスト最小で実現する 2030 年，2050 年での地域別最適ポートフォリオを Fig.3.10 に示す．

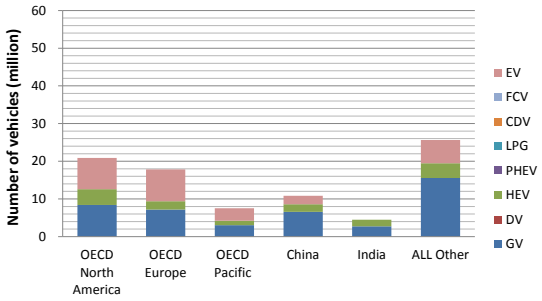


Fig.3.10-a 2030 年

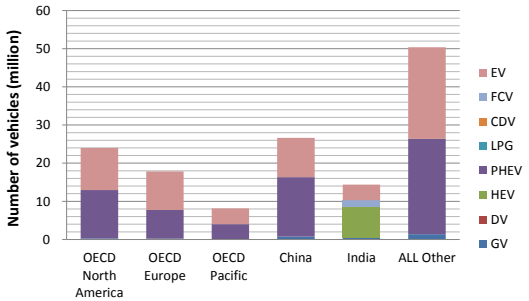


Fig.3.10-b 2050 年

Fig.3.10 最適ポートフォリオ（10%削減，コスト最小化，地域別）

2030 年では, India 以外の地域には HEV と EV を導入することが最適な結果となった．OECD Europe では，現在市場導入されている GV や DV の燃費が良いため，他地域よりも大幅に EV を導入しなければ目標値を実現できない．ただし，本シミュレーションでは，各地域の削減ポテンシャルの如何に問わず，削減目標値を各地域に均等に割り当てていることに留意されたい．一方 India では，CEV は HEV のみの導入となった．これは，India では発電電力 1kwh あたりの CO2 排出量が多く，また送電時のエネルギーロスが大きいことから，EV よりも HEV の方が，CO2 削減効果が大きくなっていることが理由である．

2050 年では，India 以外の地域には EV と PHEV を導入することが最適な結果となった．一方 India では，前述したことと同じ理由から，依然として HEV の優位性が高い．本シミュレーションで想定したように電源の低炭素化が進むと，2050 年には India においても EV の CO2 削減効果が最も大きくなるため，EV を導入することが最適となる．また，削減目標を実現するためには，依然として車両価格は高いが，FCV の導入も必要となる．

3-5-2 金属消費量最小化ケース

15%削減シナリオを銅消費量最小で実現する，世界全体のポートフォリオ（各地域のポートフォリオを積み上げたもの）の推移を Fig.3.11 に示す.

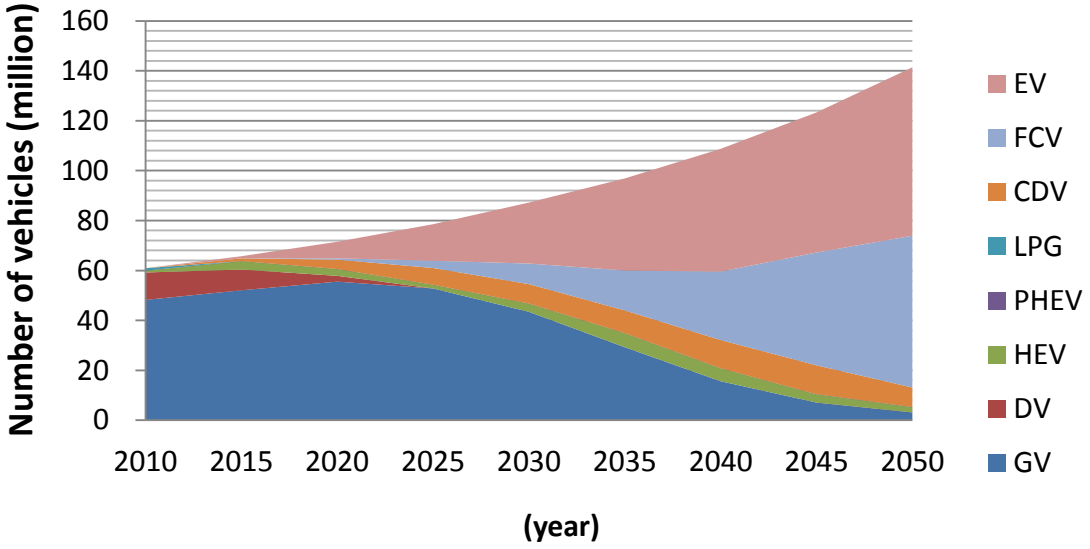


Fig.3.11 最適ポートフォリオ（15%削減，銅消費量最小化，世界）

銅消費量最小化ケースでは，コスト最小化ケースと最適ポートフォリオが大きく異なった．PHEV ではなく，それなりに CO2 削減効果が高く（EV や PHEV には劣る），銅使用量が少ない CDV と FCV を導入することが最適な結果となった．2050 年には，EV をマーケットシェアの約 45%，FCV も同様に約 45%近く導入することにより，銅消費量を最小限に抑えつつ，15%削減シナリオを実現できる.

次に，15%削減シナリオを銅消費量最小で実現する 2030 年，2050 年での地域別最適ポートフォリオを Fig.3.12 に示す.

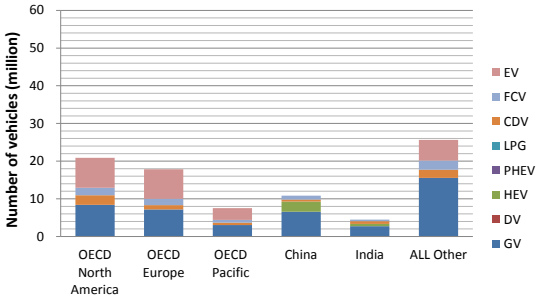


Fig.3.12-a 2030 年

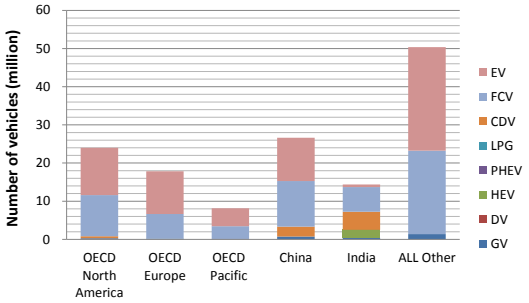


Fig.3.12-b 2050 年

Fig.3.12 最適ポートフォリオ（15%削減，銅消費量最小化，地域別）

2030 年では，OECD North America，OECD Europe，OECD Pacific，ALL Other には，EV を中心に FCV と CDV を導入することが最適な結果となった．China では，CEV は主として HEV が選択された．これは，これは前述したことと同じ理由で，電源構成が悪く，HEV の CO2 削減効果が大きくなっていることが理由である．India では，CDV が主として選択された.

2050 年では，OECD North America，OECD Europe，OECD Pacific，ALL Other には EV と FCV を導入することが最適な結果となり，FCV を約 50%近く導入することで銅消費量を抑えることができる．India では，FCV の導入台数が最も多く，次いで CDV，HEV の導入が最適となる．EV はわずかしか導入されない．China においても同様に，依然として CDV が選択された．India，China においては，他の地域よりも，CDV の導入効果が他車種に比べて大きいことがわかった.

3-6 シミュレーション結果(2)：削減シナリオ別ポートフォリオ（世界総計）

本節では，各削減シナリオをコスト最小および銅消費量最小で実現する，各地域の最適ポートフォリオを世界全体で積み上げ，2030，2050 年における結果を取り出し，削減シナリオ毎にまとめた結果を示す.

3-6-1 コスト最小化ケース

コスト最小化ケースでの 2030，2050 年における最適ポートフォリオ（世界総計）を，削減シナリオ別に Fig.3.13 に示す.

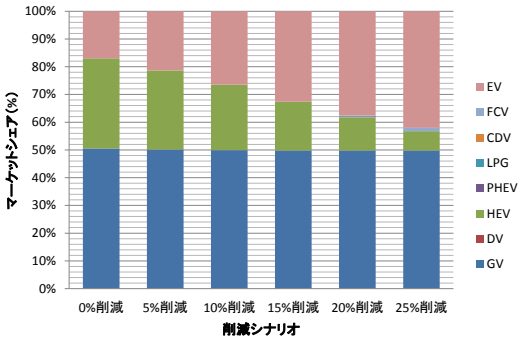


Fig.3.13-a 2030 年

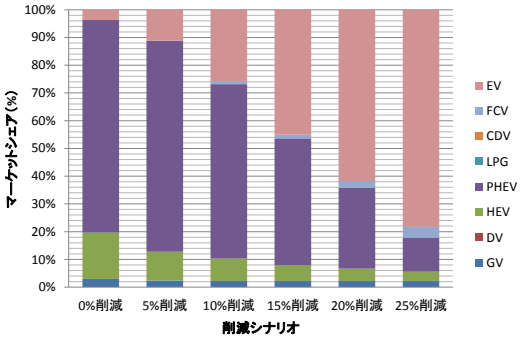


Fig.3.13-b 2050 年

Fig.3.13 最適ポートフォリオ（コスト最小化，削減シナリオ別）

削減目標値が厳しくなるにつれ, EV の導入を増やす必要があることがわかる. また，FCV の導入もわずかながら必要となり，これは China および India で選択された結果である．現状では，削減目標値は具体的に決められていない状況であるが，将来，どの程度の普及が見込めるのか，普及予測型の研究結果と本結果を照らし合わせ，具体的な目標値の検討が必要である．仮に 0%削減（2005 年排出レベルを維持）を目標値とするならば，2050 年には，PHEV の導入が，費用対削減効果の観点では最適な車種となる．また，仮に 25%削減を目標値とするならば，2050 年には EV を 80%近く導入する必要がある.

3-6-2 金属消費量最小化ケース

金属消費量最小化ケースでの 2030, 2050 年における最適ポートフォリオ（世界総計）を，削減シナリオ別に Fig.3.14 に示す.

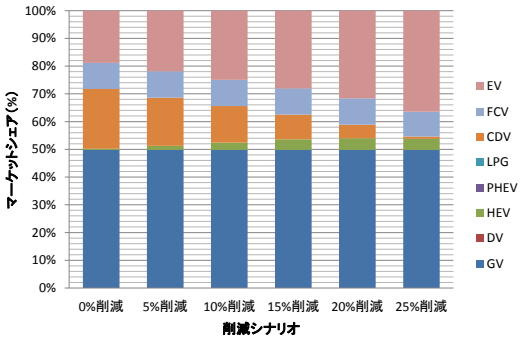


Fig.3.14-a 2030 年

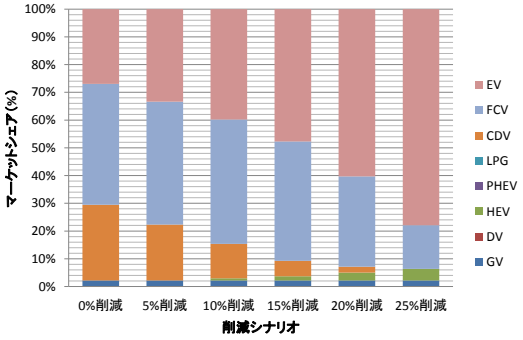


Fig.3.14-b 2050 年

Fig.3.14 最適ポートフォリオ（銅消費量最小化，削減シナリオ別）

削減目標値が緩ければ緩いほど CDV や FCV の優位性が増すが，厳しくなるにつれ EV の導入台数を増やす必要がある．CDV や FCV は銅消費量を抑制することができるが，CO2 削減効果が乏しいために，CO2 排出を大幅に削減する上では結果的に EV の導入台数を増やす必要がある.

3-7 シミュレーション結果(3)：1 台あたり保有期間総コストと銅消費量

本節では，各削減シナリオ，ケースでの 1 台あたり保有期間総コストと銅消費量を示し，結果を比較する．

3-7-1 1 台あたり保有期間総コスト

各削減シナリオ，ケースでの 1 台あたり保有期間総コスト（平均値）を Fig.3.15 に示す．

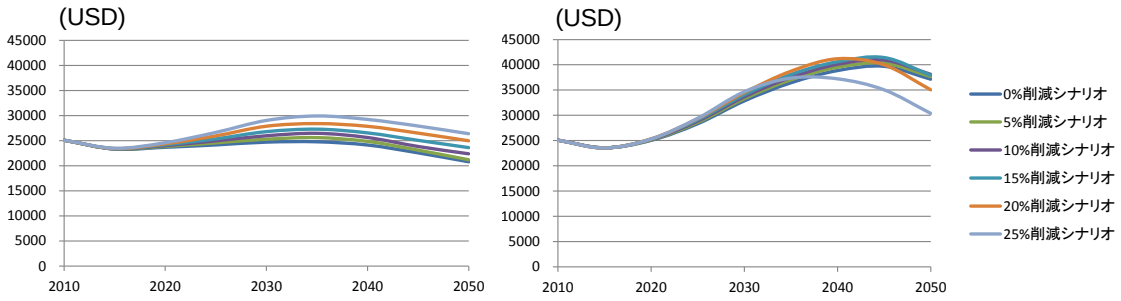


Fig.3.15-a コスト最小化ケース　　Fig.3.15-b 銅消費量最小化ケース

Fig.3.15 1 台あたり保有期間総コスト

先に示したように，コスト最小化ケースでは HEV，PHEV，EV の導入が最適となったが，車両価格が GV と比べて高いため，コスト最小化ケースでもコスト負担の増加は免れない．仮に 25%削減シナリオを実現する上では，2010 年に 25000USD であった平均保有期間総コストが，2050 年時点には最大約 30000USD まで増加してしまう．本シミュレーションでは 11 年の保有期間を想定しており，1 年間あたりに換算すると，約 450USD の増加となる．各 CEV の価格低下を見込んでいるが，その見込みの下で CO2 排出削減を実現するには，使用者の負担が増加することになってしまう．しかしそれでは，コストが CEV 普及の足かせとなり，CO2 排出削減も実現できなくなる恐れがあるため，コスト負担増加分を補助金で補うことが必要となってくる．ただし，補助金は，元来消費者の税金から支出されていることを考えると，結局は社会コストが

増加してしまうことには変わりない．技術開発投資や大量生産による，企業の更なる価格低下への取り組みに期待したい．

一方，銅消費量最小化ケースでは，さらにコストが増加する．これは車両価格の高額な FCV の導入台数が，コスト最小化ケースよりも増加するためである．FCV を導入し，銅消費量を抑えて，CO2 排出削減を実現しようとすると，今度はコストが増大してしまうこととなる．

次に，両ケースの 1 台あたり保有期間総コストを比較するため，2030，2050 年における両ケース，各削減シナリオの 1 台あたり保有期間総コストを Fig.3.16 に示す．

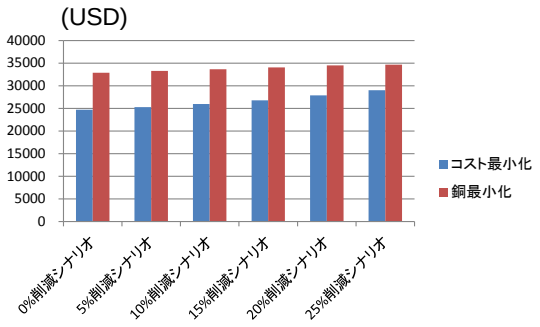


Fig.3.16-a 2030 年

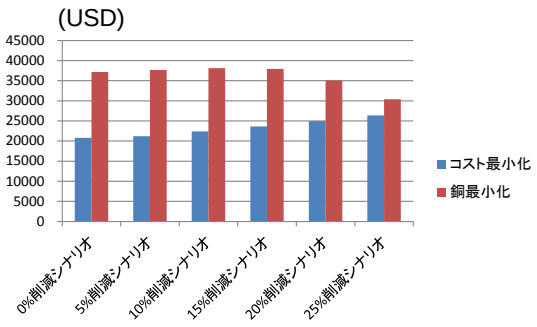


Fig.3.16-b 2050 年

Fig.3.16 1 台あたり保有期間総コスト（各削減シナリオ，ケースの比較）

両ケースのコストを比較すると，先に述べたように銅消費量最小化ケースでは FCV が導入されるため，EV，PHEV が主として選択されたコスト最小化ケースに比べると，コストが増大する．削減目標が厳しくなるにつれ，いずれのケースにおいても，CO2 削減効果が高い EV の導入台数が増加し（銅使用量は最も多いが，導入せざるを得なくなってくる），ポートフォリオに差異がなくなるため，コストに差は無くなってくる．しかし，削減目標が緩い場合には，例えば 0%削減シナリオでは，15000USD もの差が生じる．1 年間あたりに換算すると約 1350USD となり，その差は非常に大きくなる．

3-7-2 銅消費量

各削減シナリオ，ケースでの銅消費量の推移を Fig.3.17 に示す.

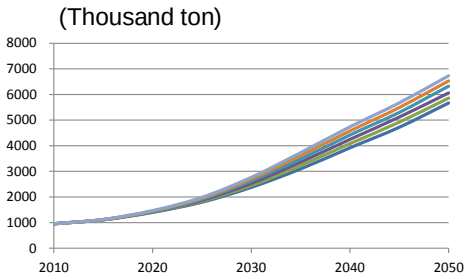


Fig.3.17-a コスト最小化ケース

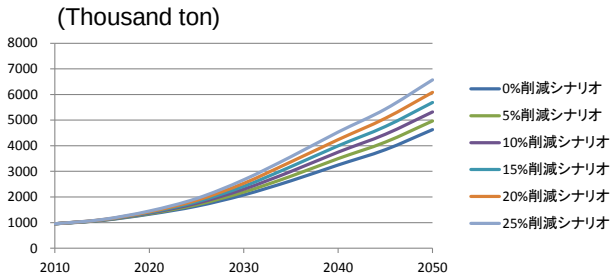


Fig.3.17-b 銅消費量最小化ケース

Fig.3.17 1 台あたり保有期間総コスト

自動車販売台数の増加と銅使用量が増える CEV の導入に伴い，銅消費量が指数関数的に増加する．銅消費量最小化ケースにおける銅消費量の推移は，各削減シナリオを実現する上で最低限必要となる銅量を意味する．銅消費量は削減シナリオに依るが，0%削減シナリオのように削減目標値が緩い場合でも，2030 年には少なくとも約 200 万トン，2050 年には約 450 万トンもの銅が必要となる．25%削減シナリオではさらに多くの銅が必要となり，2030 年には約 250 万トン，2050 年には約 650 万トンもの銅が必要となる．次に，両ケースの銅消費量を比較するため，2030，2050 年における両ケース，各削減シナリオの銅消費量を Fig.3.18 に示す.

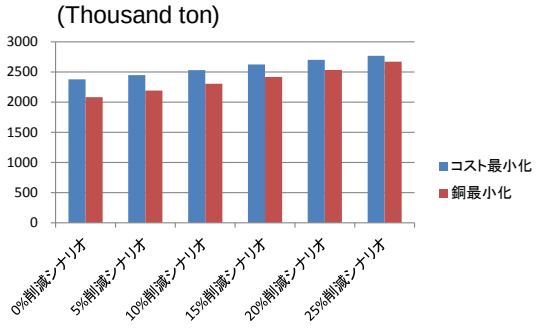


Fig.3.18-a 2030 年

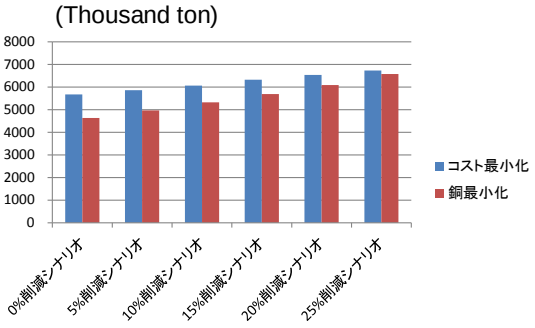


Fig.3.18-b 2050 年

Fig.3.18 1 台あたり保有期間総コスト（各削減シナリオ，ケースの比較）

両ケースの銅消費量を比較すると，削減目標値が厳しくなるに連れ，ポートフォリオに差異が無くなるために銅消費量にも差が無くなってくるが，削減目標値が緩い場合には，例えば 0%削減シナリオの場合には，2050 年に両ケースに約 100 万トンの差が生じる．2010 年の自動車部門の銅需要が約 90 万トンである点を踏まえると，両ケースの銅量の差約 100 万は，自動車部門が 1 つ分増加することに相当し，非常に大きい差である．以上のように，どの程度の排出目標を掲げるかにより，必要な銅量が大きく変わる．したがって，自動車部品に使用される銅の代替可能性が低い現状の中，今後銅の供給制約により CEV の普及が制約されないようにするためには，CEV の導入推進と排出量削減に目を向けるだけでなく，排出目標値の明確な目標設定と，目標の達成に必要な銅量を早期の段階から確保していく必要があると言える．

以上をまとめると，両ケースの 1 台あたり保有期間総コストと銅消費量はトレードオフの関係となっている．本研究では，コストおよび銅消費量の最適化問題を，ケースとして分けて解いたが，実際に最適となるポートフォリオは，コストあるいは銅消費量のうち，いずれか一方を制約値として設定する，つまり，両要素がどれだけ許容できるか，による．したがって現段階では，削減目標を実現しつつ，コストを最小化するポートフォリオと，銅消費量を最小化するポートフォリオのどちらがより望ましいかを結論づけることはできない．ただし，経済合理性と省資源のいずれの観点から考えても，大幅に削減目標を達成するためには，結局 EV の導入は必要不可欠である．その他の車種は削減目標をどのレベルに設定するか，コストおよび銅消費量がどの程度許容できるかに依存し，また，コストと銅消費量以外の観点からも評価する必要がある．

また本シミュレーションにより，CO2 排出量とその実現に必要となるコストと銅消費量の関係が明らかになった．削減目標値を実現する上で最低限必要となるコストや銅消費量が，許容できる負担コスト（予算）や銅消費量（供給量）のレベルを超えているならば，その目標値は実現できないこととなる．したがって，今後は，コストあるいは銅消費量が今後どの程度許容できるか，を把握し，具体的な目標値をどうすれば良いかを議論していく必要がある．さらに，それらを把握できれば，いずれか一方を制約値として設定することができ，CO2 排出量・コスト・銅消費量の 3 つの複合的な観点で，最適なポートフォリオを明らかにすることができる．

第 4 章

Evaluation for Copper Resource Constraint

第 4 章 EVALUATION FOR COPPER RESOURCE CONSTRAINT

4-1 CO2 排出量と銅消費量の関係

本節では，先ほどの CO2 排出制約下における銅消費量最小化問題の最適化結果を基に，CO2 排出量とその目標達成に必要となる銅量の関係を明らかにする．

2030，2040，2050 年における CO2 排出量とその目標達成に必要となる銅量の関係を以下の Fig.4.1 に示す．この図は，CO2 排出量を低く抑えるためには（より多く削減するためには），より多くの銅が必要となることを意味している．横軸には，CO2 排出量を取り，縦軸には銅消費量をとっている．

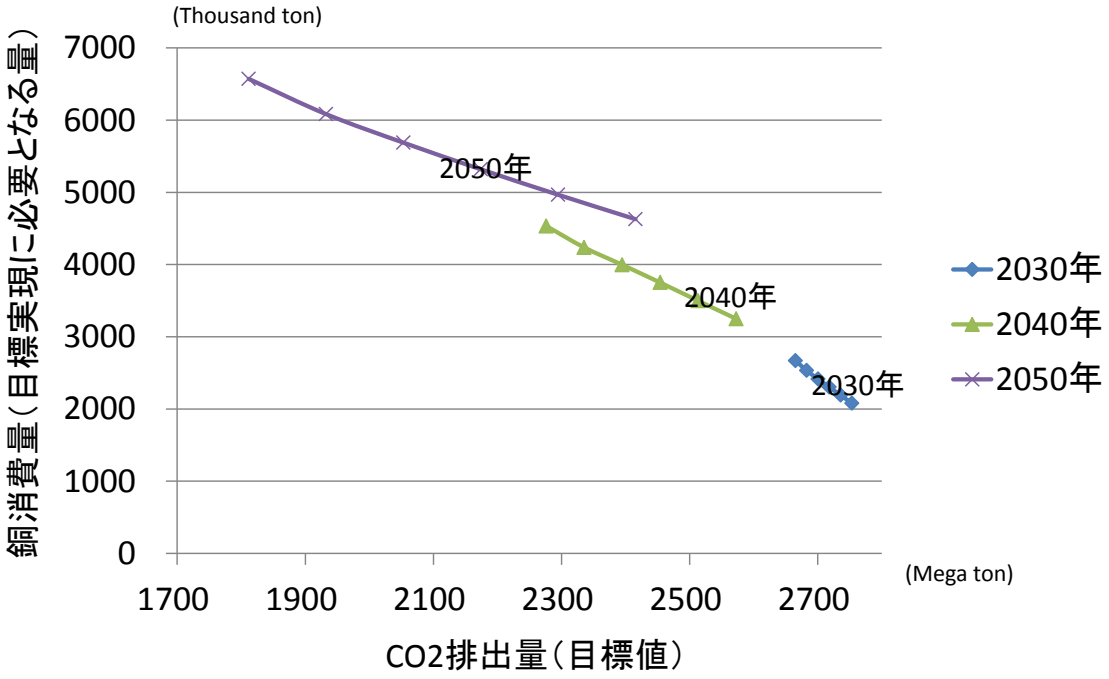


Fig.4.1 CO2 排出量と銅消費量の関係(2030，2040，2050 年)

例えば，2050 年に 2005 年排出量比 15%の削減を実現するためには，2030 年の排出量を約 2700 メガトン，2040 年の排出量を約 2400 メガトン，2050 年の排出量を約 2050 メガトンに抑える必要があり，その場合に，少なくとも 2030 年には約 240 万トン，2040 年には約 400 万トン，2050 年には約 570 万トンの銅が必要となる．

4-2 銅資源制約の評価

本節では，過去の銅供給のデータをもとに，今後も過去と同様のペースでしか供給できない場合，どの程度銅が足りなくなってしまうか，どの程度の量を代替技術によって補完する必要があるか，を考察する．事例研究として，15%削減シナリオを実現する上での銅資源制約を評価する．

まず，銅のマテリアルフロー [31]を Fig.4.2 に示す．

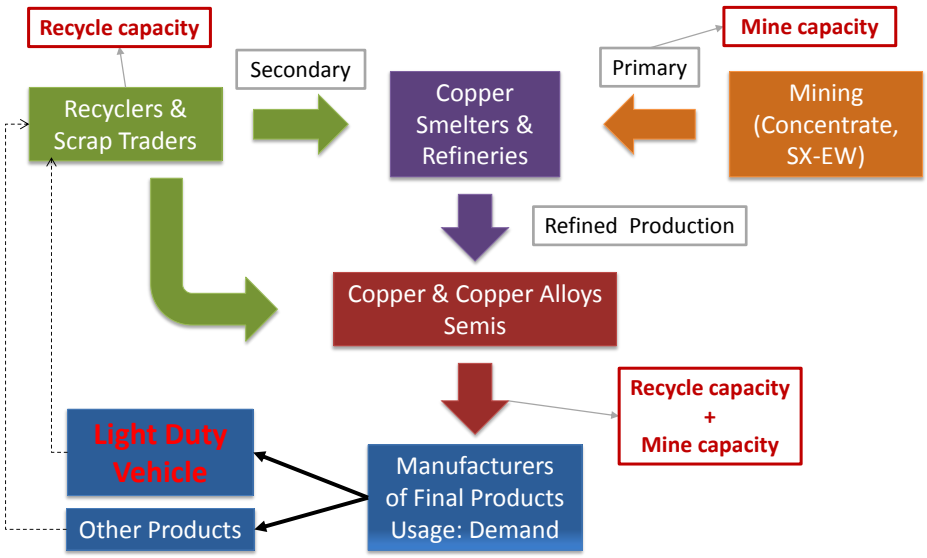


Fig.4.2 銅のマテリアルフロー

この図に示すように，銅の供給は，鉱石生産による1次供給とリサイクルによる2次供給に分けて考えることができる．鉱石生産量は，1960 年から2007 年にかけて，平均年率約 2.7%で増加しており，またリサイクルによる 2 次供給は，2001 年から 2007 年にかけて，平均年率約 3%で増加している．ただし，このペースで鉱石生産が続いた場合，2045 年頃には，確認埋蔵量(Reserve base，現状地球上で発見されている絶対的な量を表し，経済性が低いもの含む)さえも掘り尽くしてしまうペースである．そこで，2009 年の実績値を基準に，2010 年以降，鉱石生産量が年率 2.7%，リサイクル量が年率 3%で増加するものと想定する．

また，全供給のうち乗用車部門への銅供給が占める割合は，2008 年では約 4%であった[31]が，途上国の発展に伴い，他産業における銅需要がますます高まっていくことを考えると，乗用車部門への供給を大幅に増加させることは難しいと考えられる．そこで，乗用車部門への

銅投入比率が仮に 4%とした場合を想定する．以上の想定に基づき，銅の供給可能量を推計すると，2030 年には約 170 万トン，2040 年には約 230 万トン，2050 年には約 300 万トンの供給が可能となる．

以上の推計に基づき，銅の資源制約を評価する（Fig.4.3）．

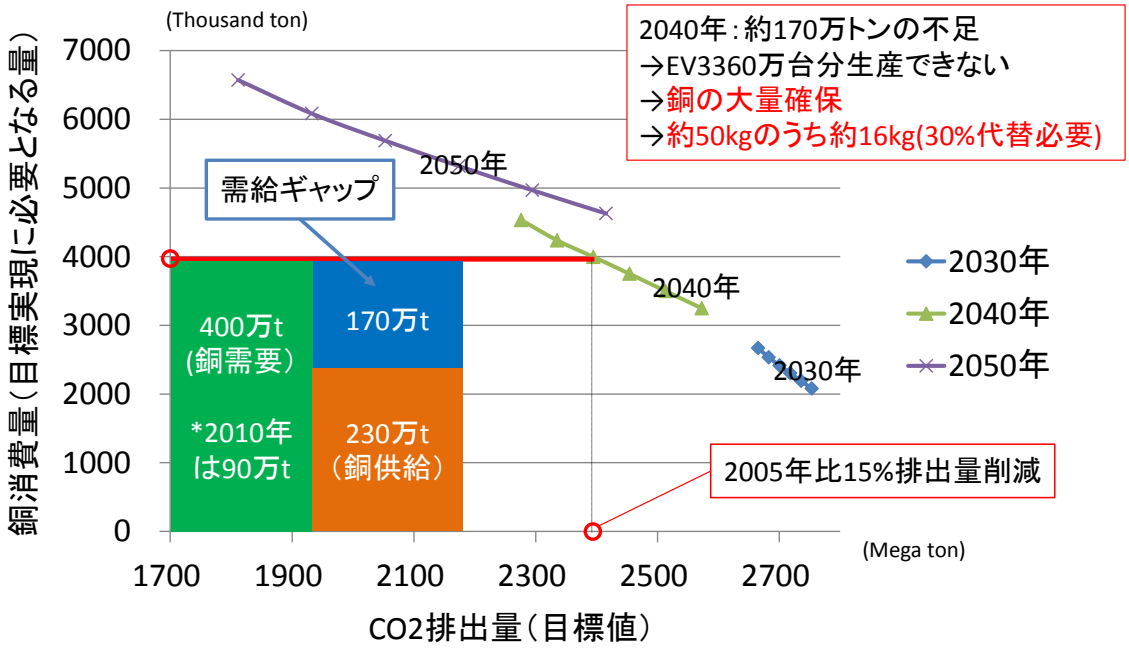


Fig.4.3 銅資源制約の評価

本評価で推計した供給量では，15%削減シナリオを実現する上では，例えば 2040 年には，約 170 万トンもの銅が不足することとなる．これは EV 約 3360 万台分が生産できなくなることに等しい．前述したように，銅の枯渇可能性が非常に高いことと，新興国の発展により乗用車部門以外でも需要増大が見込まれることを考えると，銅が資源制約として CEV の普及を制約してしまう可能性がある．したがって，その不足分はアルミニウム等への代替により，まかなう必要がある．15%削減シナリオを実現する上では，平均して 16kg の代替が必要となる．

最後に本分析の意義について述べる．Fig.4.1 に示したように CO2 排出量と銅消費量との関係を示したことにより，削減目標の実現に最低限必要となる銅量を明らかにした．ここで明らかとなった関係は，銅資源制約を評価する指標となると考えられる．つまり，政府の立場では，ある削減目標を達成するために，少なくともどの程度の銅量を確保する必要があるか，企業の立場で言えば，いつ頃どの程度まで代替技術を開発する必要があるか，といった意思決定の指

針とすることができる．ただし，本評価では，銅供給可能量の精度の高い予測は行っておらず，想定した乗用車部門への銅供給量は，あくまで過去の実績に基づいた簡易的な予測であった．今後，銅資源に関する研究がさらに進み，銅の供給量予測が可能となれば，より信頼性の高い提案にすることができるため，将来どの程度の銅供給が可能なのか，鉱山の開発状況はどうなのか，といった類の研究が進展することを期待したい．

第 5 章

Conclusion

第 5 章 CONCLUSION

5-1 研究成果

本研究の成果と得られた知見を以下にまとめる.

- ✓ CEV をはじめとした各種自動車の金属資源量・CO2 排出量原単位・コストといった車種特性に基づいて, CO2 排出目標を達成するうえで最適な自動車部門のポートフォリオ（車種構成）を導出する最適化モデルを構築した. これにより, CO2 排出目標を達成する経済合理的なポートフォリオだけでなく, 資源消費量を抑えるポートフォリオも導出できるようになり, 経済合理性と省資源の両ケースでのポートフォリオを比較することを可能にした.

- ✓ 最適化シミュレータを Excel Spread sheet 上に実装した. Excel のアドインソフトであるソルバー機能を利用し, Excel という簡便なツールでの最適化シミュレーションを可能にした.

- ✓ 銅を対象に What-If 分析を行い, 2050 年に 2005 排出量比 0%～25%削減を実現するポートフォリオについて, コスト最小化および銅消費量最小化の両ケースでシミュレーションを行った. コスト最小化ケースでは, EV, PHEV, HEV が主として選択された. 一方, 銅消費量最小化ケースでは, EV, FCV, CDV が選択され, コストあるいは銅消費量のどちらを目的関数とするかにより, ポートフォリオが大きく異なることがわかった. 銅の供給リスクが指摘されている現状では, 費用対効果が高い EV や PHEV だけでなく, 銅使用量が少ない FCV や CDV の導入を検討する必要がある.

- ✓ 両ケースの 1 台あたり保有期間コストおよび銅消費量を比較した. 結果, 両ケースの銅消費量およびコストはトレードオフの関係となっていることが分かった. また, 最適削減目標が厳しくなるにつれ, その差は無くなり, 削減目標が緩くなるにつれ, その差が開くことが分かった. したがって, 両ケースで得られた最適ポートフォリオのうち, どちらがより望ましいかを結論づけるためには, コスト, 銅消費量, CO2 排出量のうち, どの要素がより許容できるか, 3 つの複合的な観点で最適ポートフォリオを分析する必要がある.

- ✓ CO2 排出量とその実現に必要となる銅量の関係を明らかにした．例えば，2050 年に 2005 年排出量比 15%の削減を実現するためには，少なくとも 2030 年には約 240 万トン，2050 年には約 570 万トンの銅が必要となることがわかった．このような関係を明らかにしたことにより，乗用車部門における CO2 削減目標に対する銅資源制約の評価指標を得た．これにより，CO2 排出量削減に向けた将来の銅需給ギャップを把握することが可能となり，仮に銅が不足する可能性があるならば，政府は，いつ頃，どの程度の銅確保が必要か，企業は，いつ頃，いつまでに，どの程度の代替技術開発を進めておく必要があるか，といった意思決定の指針として，この結果を活かすことができる．

5-2 今後の課題

今後の課題を以下にまとめる.

✓ モデルの改良

本研究では，コスト最小化および金属（銅）消費量最小化の両ケースで，それぞれ最適化シミュレーションを行った．今後はコストおよび金属（銅）消費量の両要素を統合して評価できるようにモデルを改良する必要があり，コスト，CO2 排出量，金属消費量の 3 つの複合的な観点から最適ポートフォリオを分析することが課題である.

✓ モデルの詳細な検証

本研究では，入力に対して出力が想定できる場合（エクストリームケース）をシミュレーションすることにより，簡単な検証（Verification）を行った．検証の結果，最適化モデルは正しく動いていると考えられるが，より詳細な検証方法として，既往研究と入力値を同一にした場合の結果を比較することが必要である.

✓ モデル化の範囲

より精度の高いモデリングをするためには，地域区分をさらに詳細化する必要がある．特に ALL Other とした地域の詳細化が必要である.

✓ 銅以外の金属を対象にした分析，銅の代替可能性

車種によって使用量が異なり，また供給リスクが高いと考えられる，その他の金属資源（白金やレアアース等）についても分析する必要がある．また代替による使用量低減は検討しておらず，シミュレーションにおいても動的に扱っていない．銅の代替可能性について調べること，使用量低減の影響を把握することが課題である.

✓ エネルギーセキュリティ

本研究では CO2 排出目標値を制約値として設定したが，各地域のエネルギーセキュリティへの取り組みを考慮すると，燃料多様化の度合いやガソリン等のエネルギー使用量も目標値として検討する必要がある.

✓　コストの定義

FCV や EV では新たなインフラ整備にコストがかかるため，インフラコストをコスト計算の際に考慮する必要がある．さらに，本研究では銅の資源問題を消費量や供給量など「量」として考慮したが，実際には銅の価格高騰による車両価格への影響もあるため，銅資源問題を価格の面から捉える必要がある．

✓　入力データの検証

最適ポートフォリオの計算結果をより信頼性の高い提案へと繋げるために，入力データの妥当性を検証する必要がある．

参考文献

1. G8 Summit 2009 official website. http://www.g8italia2009.it/. accessed in November 2009.

2. 次世代自動車戦略研究会. 次世代自動車戦略 2010. 2010.

3. L. Fulton, IEA / G.Eads, CRA. IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection. 2004.

4. IPCC official web site. http://www.ipcc.ch/. accessed in December 2010.

5. 日本自動車工業会. 世界の道路交通セクターにおける CO2 削減取り組みの提言. 2008.

6. International Energy Agency. Transport, Energy and CO2. 2009.

7. 末広茂ほか. 自動車部門における CO2 排出削減効果. IEEJ レポート. 2009.

8. 経済産業省. クリーンディーゼル普及推進方策. 平成 20 年 7 月.

9. IEA ETSAP. IEA ETSAP MARKAL Homepage. http://www.etsap.org/Tools/MARKAL.htm.

10. 北嶋敏憲ほか. 炭素税導入によるクリーンエネルギー自動車普及効果. 第 20 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集. 2004.

11. 一戸誠之, 遠藤栄一. わが国の乗用車部門における二酸化炭素排出削減のための MARKAL モデルを用いた車種構成分析. エネルギー・資源 Vol.26 (2). 127-133. 2005

12. 遠藤栄一ほか. エネルギーシステムモデル MARKAL を用いたわが国における次世代自動車の導入に関する分析. 第 25 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集. 2009.

13. 山田俊介, 本藤祐樹. 寿命分布を考慮した製品最適導入計画モデル-二酸化炭素の排出削減に向けたグリーンカーの導入分析-. エネルギー・資源,Vol.30 (1). 9-15. 2008

14. W.Halfele eds. Energy in a Finite World. Ballinger. 1981.

15. M. KainumaMatuoka and T. Morita eds.Y. Climate Policy Assessment: Asia-Pacific Integrated Modeling. Spronger-Verlag. 2003.

16. 近久武美ほか. 消費者の車両選好特性モデルに基づく将来型自動車の普及分析. 日本機械学会論文集（B 編）,69-677. 221-228. 2003.

17. 長谷川貴彦ほか. 消費者の選好を考慮した燃料電池車の普及可能性評価. エネルギー・資源, 27-2. 46-52. 2006.

18. 松本光崇ほか. クリーンエネルギー自動車の普及評価モデルの構築. エネルギー・資源, Vol 29. No.3. 2008.

19. 山本充洋ほか. 将来の車両･エネルギー技術進歩が運輸部門 CO2 排出量に与える影響の評価.

20. みずほ情報総研株式会社. 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. 2008.

21. 原田幸明ほか. 2050 年の金属消費量予測. 日本金属資源学会誌, Vol.71（10）.831-839. 2007.

22. National research council. MINERALS, CRITICAL MINERALS AND THE US ECONOMY. 2007.

23. 永富悠ほか. 自動車燃料としての電気エネルギーの優位性と課題に関する考察. 第 26 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集. 2010.

24. Dargay.J. Vehicle ownership and income growth, worldwide 1960-2030. 2007.

25. 金成修一ほか. 将来自動車技術導入による CO2 排出削減効果と費用分析. エネルギー資源, Vol.31（4）. 2009.

26. IEA. Energy prices and Taxes Quarterly statistics 2008. 2008.

27. 日本自動車研究所. JHFC 総合効率検討結果. 2006.

28. Joint Transport Research Center. Transport Outlook 2008 Discussion paper No.2008-13. 2008.

29. UCGS. Mineral Commodity Summaries 2009. 2009.

30. 日本メタル経済研究所. 自動車に使用される金属とその消費割合. 2008.

31. ICSG, The World Copper Factbook, (2009).

謝辞

本研究を行うにあたり，たくさんの方々から温かく厚いご指導をいただきました．心からの感謝の意を込めて皆様への御礼を述べたいと思います．

指導教員の中野冠教授は，未熟な私にいつも丁寧で熱心なご指導をくださいました．エネルギー・資源問題について何も知らなかった私が，本研究を推し進めることができたのは，先生の熱心なご指導のおかげです．本研究は世界を分析対象とした研究であったため，データ収集等の難しさから幾度も諦めかけました．しかし，先生が常日頃からおっしゃっていた「グローバルな舞台で活躍できる人材へと成長しなければならない」という問題意識が心に強く残り，少しでも研究を通して成長したいという想いから，諦めることなく研究を推し進めてきました．Delft University of Technology への交換留学のチャンスを与えてくださり，この経験は何事にも変え難いものになりました．未熟な私に，そのような挑戦の機会をたくさん与えてくださり，心より感謝しております．今後は，研究を通して先生より教えて頂いたことを社会の中で生かし，日本を背負うグローバル人材へと成長できるよう精進して参りたいと思います．

副査の春山真一郎教授，手嶋龍一教授には，有意義な助言を頂き，修論審査会での発表に向け，研究内容をどのように伝えれば良いかを明確にすることができました．心より感謝致します．

定期的に参加させて頂いた IMS アイディアファクトリーでは，会議の中で大変貴重なご指導を頂きました．法政大学　木村文彦教授には，研究・分析の方向性についてのご指導や専門的なご指摘を頂きました．先生がリーダーを勤められる IFF へ参加させて頂いたからこそ，貴重なご指導に触れ本研究を進めることができました．トヨタ自動車株式会社　川瀬昌男氏には，自動車会社の深い知見とご経験から数えきれないほどの貴重なご指導を頂きました．財団法人製造科学技術センター　八木淳一氏は，未熟な発表に対していつも丁寧にご指導を頂き，また，研究に取り組む姿勢，研究の価値とは何か，を熱心にご指導して頂きました．独立法人産業技術総合研究所　手塚明氏，清水建設株式会社　山崎雄介氏にもたくさんの貴重なご指導を頂きました．企業や研究所の第一線でご活躍されている皆様からのコメントひとつひとつがとても有難く，大変勉強になりました．

湊宣明助教には，ゼミにおける研究指導だけでなく，グローバルな人材へと成長するための貴重なご指導をたくさん頂きました. 先生がくださったアドバイスの数々は私の宝です．いつか，企業の経営戦略について先生と熱い議論を交わすことができるよう，努力していきたいと思います.

神武直彦准教授には，大きなビジョンを描き，高い志を持って研究に取り組む姿勢の大切さを教えて頂きました. 研究を始めた当初,「その研究は面白いか, 意味があるか」ということを指摘され，それ以来，どうすれば価値のある研究成果を残せるかを常に意識してきました．また，先生の物事へ取り組む姿勢から，多くの気づきを得ることができました．今後ともよろしくお願い致します.

嶋津恵子准教授には，インスパイアゼミの中で，多くの貴重なご助言を頂きました．研究領域が全く異なるにも関わらず，私の研究を熱心に聞いて頂き，いつも厳しく丁寧なアドバイスをくださいました．先生と交わした議論のすべてが，研究の糧となりました．先生から認められる人材となれるよう，今後も努力していきたいと思います.

博士課程の野中朋美氏には，誰よりもお世話になりました．いつどんな時でも研究相談に乗って頂き，数え切れないほどのアドバイスと気付きを頂きました．研究を進めることができたのは，野中さんの手厚いサポートがあったからです．野中さんの研究に取り組む姿勢から，多くを学ばせて頂きました．今後は，ご助言を頂くだけでなく，私からも有益な助言ができるよう努力して参りますので, 卒業後もよろしくお願い致します.

中野研究室の同期であり，同じ新卒の仲間として，高橋哲郎氏，沼田玲人氏，加瀬友也氏，渡辺安晋氏には，大変お世話になりました．共に切磋琢磨する中で，多くの刺激を頂きました．社会人の先輩として，柄井匡氏，藤堂寧子氏，服部隆尚氏には多くのアドバイスを頂きました．これからもよろしくお願いいたします.

インスパイアゼミに共に参加していた，小野江綾氏，小川晃平氏，三木卓典氏，修士1年の頃に03教室で毎日刺激を受けながら研究を共にした, 辻英美子氏, 瀬戸寿之氏, 松尾康弘氏，そしてSDMの全ての皆様との出会いのおかげで，学生生活が大変充実したものとなり，研究にも積極的に取り組むことができました．心より感謝致します.

そして最後に, 日々支えてもらっている家族にも心からの感謝の意を述べたいと思います.

付録 1

各車種の新車平均燃費を，年次・地域別に，次の Table.A.1~Table.A.9 に示す.

Table.A.1 各車種の CO2 排出量原単位（2010 年）

排出量原単位(2010年) (Kg-CO2/100km)	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	24.3	18.4	13.4	11.5	18.6	18.4	10.9	9.6
OECD Europe	15.0	11.3	8.2	7.3	11.5	11.3	6.7	6.4
OECD Pacific	19.1	14.5	10.5	8.4	14.6	14.5	8.6	6.4
China	23.7	17.9	13.0	14.1	18.1	17.9	10.6	15.1
India	23.7	17.9	13.0	17.2	18.1	17.9	10.6	21.4
All other	25.5	19.3	14.0	11.5	19.6	19.3	11.5	9.0

Table.A.2 各車種の CO2 排出量原単位（2015 年）

排出量原単位(2015年) (Kg-CO2/100km)	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	22.8	17.2	12.5	10.8	17.5	17.2	10.2	9.0
OECD Europe	14.7	11.1	8.1	7.1	11.3	11.1	6.6	6.0
OECD Pacific	17.6	13.3	9.7	7.8	13.5	13.3	7.9	6.0
China	22.4	17.0	12.3	13.2	17.2	17.0	10.1	14.1
India	22.4	17.0	12.3	16.2	17.2	17.0	10.1	20.0
All other	22.2	16.8	12.2	10.3	17.1	16.8	10.0	8.4

Table.A.3 各車種の CO2 排出量原単位（2020 年）

排出量原単位(2020年) (Kg-CO2/100km)	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	20.4	15.4	11.2	9.8	15.6	15.4	9.2	8.4
OECD Europe	14.7	11.1	8.1	6.8	11.3	11.1	6.6	5.6
OECD Pacific	17.0	12.9	9.4	7.5	13.1	12.9	7.7	5.6
China	21.2	16.0	11.6	12.4	16.2	16.0	9.5	13.2
India	21.2	16.0	11.6	15.2	16.2	16.0	9.5	18.7
All other	21.9	16.6	12.1	10.0	16.8	16.6	9.9	7.9

Table.A.4 各車種の CO2 排出量原単位（2025 年）

排出量原単位(2025年) (Kg-CO2/100km)	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	19.1	14.5	10.5	9.2	14.7	14.5	8.6	7.8
OECD Europe	14.7	11.1	8.1	6.6	11.3	11.1	6.6	5.2
OECD Pacific	16.2	12.2	8.9	7.0	12.4	12.2	7.3	5.2
China	20.5	15.5	11.3	11.8	15.8	15.5	9.2	12.2
India	19.9	15.1	11.0	14.1	15.3	15.1	9.0	17.3
All other	20.8	15.7	11.4	9.4	15.9	15.7	9.3	7.3

Table.A.5 各車種の CO2 排出量原単位（2030 年）

排出量原単位（2030年）（Kg-CO2/100km）	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	18.5	14.0	10.2	8.7	14.2	14.0	8.3	7.2
OECD Europe	14.7	11.1	8.1	6.4	11.3	11.1	6.6	4.8
OECD Pacific	16.2	12.2	8.9	6.8	12.4	12.2	7.3	4.8
China	19.9	15.1	11.0	11.1	15.3	15.1	9.0	11.2
India	18.7	14.1	10.3	13.1	14.3	14.1	8.4	15.9
All other	19.9	15.1	11.0	8.8	15.3	15.1	9.0	6.7

Table.A.6 各車種の CO2 排出量原単位（2035 年）

排出量原単位（2035年）（Kg-CO2/100km）	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	17.9	13.6	9.9	8.1	13.7	13.6	8.1	6.4
OECD Europe	14.7	11.1	8.1	6.2	11.3	11.1	6.6	4.3
OECD Pacific	15.9	12.0	8.7	6.5	12.2	12.0	7.1	4.2
China	19.6	14.8	10.8	10.4	15.0	14.8	8.8	10.0
India	18.4	13.9	10.1	12.2	14.1	13.9	8.3	14.2
All other	19.7	14.9	10.8	8.4	15.1	14.9	8.9	6.0

Table.A.7 各車種の CO2 排出量原単位（2040 年）

排出量原単位（2040年）（Kg-CO2/100km）	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	17.6	13.3	9.7	7.7	13.5	13.3	7.9	5.6
OECD Europe	14.7	11.1	8.1	5.9	11.3	11.1	6.6	3.8
OECD Pacific	15.6	11.8	8.6	6.2	11.9	11.8	7.0	3.7
China	19.3	14.6	10.6	9.7	14.8	14.6	8.7	8.8
India	18.4	13.9	10.1	11.3	14.1	13.9	8.3	12.5
All other	19.5	14.7	10.7	8.0	14.9	14.7	8.8	5.3

Table.A.8 各車種の CO2 排出量原単位（2045 年）

排出量原単位（2045年）（Kg-CO2/100km）	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	17.3	13.1	9.5	7.2	13.3	13.1	7.8	4.9
OECD Europe	14.7	11.1	8.1	5.7	11.3	11.1	6.6	3.3
OECD Pacific	15.0	11.3	8.2	5.7	11.5	11.3	6.7	3.2
China	19.0	14.4	10.4	9.0	14.6	14.4	8.5	7.6
India	18.4	13.9	10.1	10.5	14.1	13.9	8.3	10.8
All other	19.3	14.6	10.6	7.6	14.8	14.6	8.7	4.6

Table.A.9 各車種の CO2 排出量原単位（2050 年）

排出量原単位（2050年）（Kg-CO2/100km）	GV	DV	HEV	PHEV	CNG/LPG	CDV	FCV	EV
OECD North America	17.0	12.9	9.4	6.7	13.0	12.9	7.7	4.1
OECD Europe	14.7	11.1	8.1	5.4	11.3	11.1	6.6	2.7
OECD Pacific	14.7	11.1	8.1	5.4	11.3	11.1	6.6	2.7
China	18.7	14.1	10.3	8.5	14.3	14.1	8.4	6.4
India	18.1	13.7	9.9	9.5	13.8	13.7	8.1	9.1
All other	19.2	14.5	10.6	7.2	14.7	14.5	8.6	3.8

付録 2

各削減シナリオの CO2 排出量の推移を次の Table.B.1~Table.B.6 に示す.

Table.B.1 CO2 排出量の推移（0%削減シナリオ）

0%削減シナリオ（Mt）	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
OECD North America	1224	1274	1320	1345	1320	1231	1121	1002	886	786	705
OECD Europe	480	502	503	485	444	418	396	357	308	262	228
OECD Pacific	188	192	196	198	190	175	156	136	117	100	88
China	61	74	95	124	165	204	252	304	353	396	435
India	15	23	33	46	62	74	87	102	121	146	178
All Other	291	351	433	529	638	691	740	773	788	785	782
World total	2261	2415	2580	2727	2818	2792	2753	2675	2573	2474	2415

Table.B.2 CO2 排出量の推移（5%削減シナリオ）

5%削減シナリオ（Mt）	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
OECD North America	1224	1274	1320	1344	1318	1226	1112	986	862	753	666
OECD Europe	480	502	503	485	444	417	394	352	299	249	213
OECD Pacific	188	192	196	198	190	174	154	133	112	94	81
China	61	74	95	124	165	204	252	302	348	387	420
India	15	23	33	46	62	74	87	102	120	143	174
All Other	291	351	433	529	637	690	737	765	773	758	741
World total	2261	2415	2580	2726	2816	2785	2736	2640	2513	2386	2295

Table.B.3 CO2 排出量の推移（10%削減シナリオ）

10%削減シナリオ（Mt）	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
OECD North America	1224	1274	1320	1344	1317	1222	1102	970	838	721	626
OECD Europe	480	502	503	485	443	416	391	347	290	237	198
OECD Pacific	188	192	196	198	189	173	153	130	108	89	75
China	61	74	95	124	165	203	251	299	343	378	405
India	15	23	33	46	62	74	87	101	118	141	170
All Other	291	351	433	529	637	689	734	757	757	732	700
World total	2261	2415	2580	2726	2814	2777	2718	2605	2454	2297	2174

Table.B.4 CO2 排出量の推移（15%削減シナリオ）

15%削減シナリオ（Mt）	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
OECD North America	1224	1274	1320	1344	1315	1217	1093	954	814	689	587
OECD Europe	480	502	503	485	443	415	389	342	281	225	183
OECD Pacific	188	192	196	198	189	173	151	127	104	83	68
China	61	74	95	124	165	203	250	297	338	368	390
India	15	23	33	46	62	73	87	100	117	138	166
All Other	291	351	433	529	637	688	731	750	741	705	659
World total	2261	2415	2580	2726	2811	2770	2700	2570	2395	2208	2053

Table.B.5 CO2 排出量の推移（20%削減シナリオ）

20%削減シナリオ（Mt）	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
OECD North America	1224	1274	1320	1343	1313	1213	1084	937	789	656	547
OECD Europe	480	502	503	485	443	415	387	337	272	213	169
OECD Pacific	188	192	196	198	189	172	150	125	99	78	62
China	61	74	95	124	165	203	249	295	332	359	375
India	15	23	33	46	62	73	86	100	116	136	162
All Other	291	351	433	529	637	687	727	742	726	678	618
World total	2261	2415	2580	2725	2809	2763	2683	2535	2335	2120	1932

Table.B.6 CO2 排出量の推移（25%削減シナリオ）

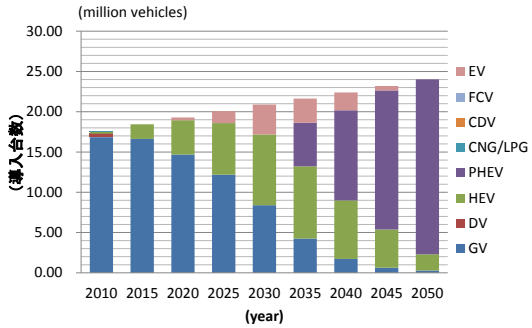
25%削減シナリオ（Mt）	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
OECD North America	1224	1274	1320	1343	1312	1208	1074	921	765	624	508
OECD Europe	480	502	503	485	443	414	385	332	264	200	154
OECD Pacific	188	192	196	198	189	171	148	122	95	72	56
China	61	74	95	124	165	202	248	292	327	350	359
India	15	23	33	46	62	73	86	99	114	133	157
All Other	291	351	433	529	637	686	724	734	710	651	578
World total	2261	2415	2580	2725	2807	2755	2665	2500	2276	2031	1812

付録 3

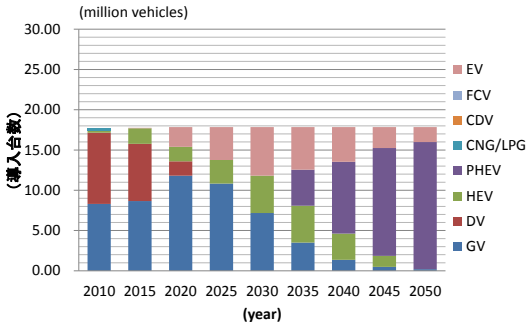
➢ コスト最小化ケースの最適ポートフォリオ（地域別）

各削減シナリオにおける，コスト最小化ケースでの最適ポートフォリオを次の Fig.C.1~Fig.C.6 に示す.

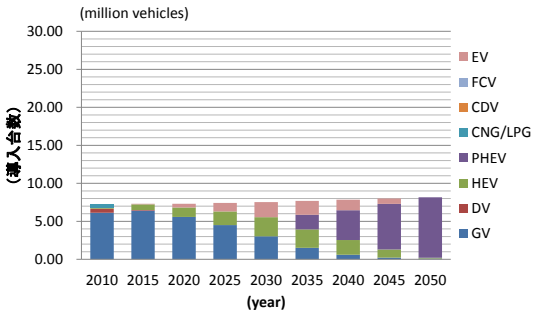
✓ 0%削減シナリオ（コスト最小化）



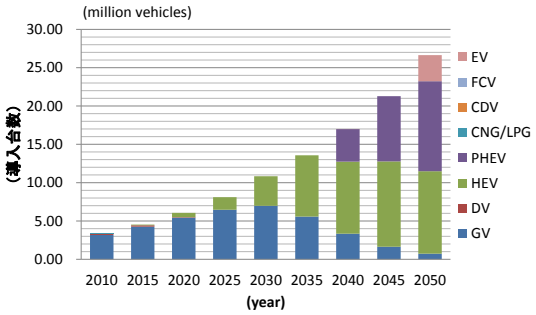
(a) OECD North America



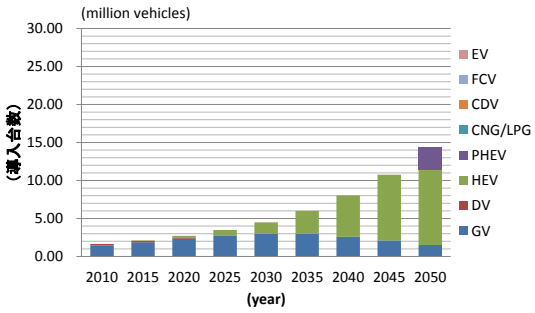
(b) OECD Europe



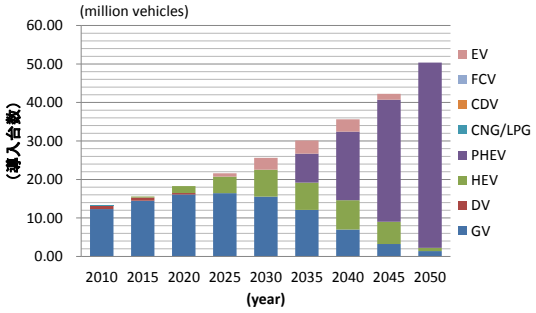
(c) OECD Pacific



(d) China



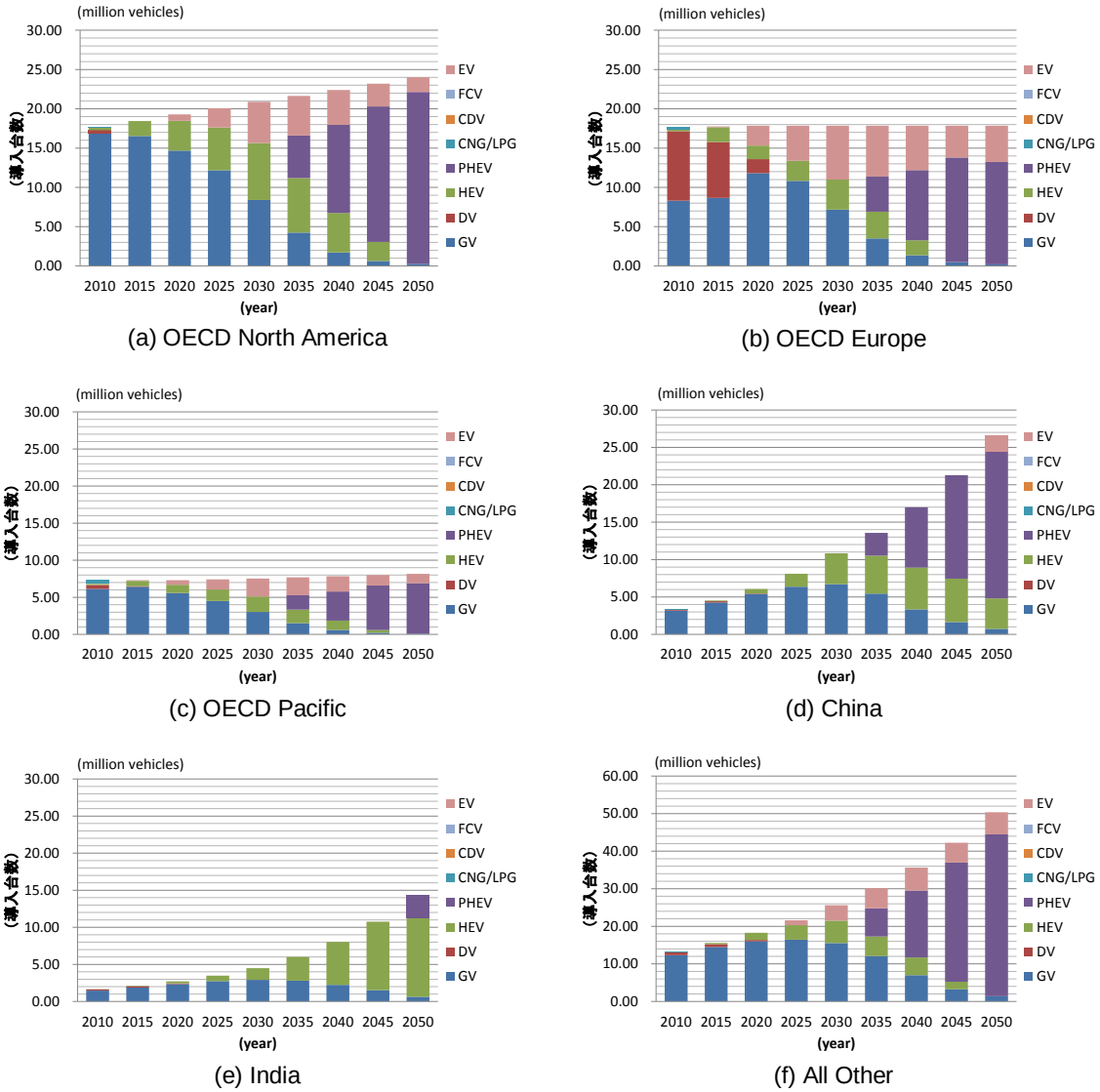
(e) India



(f) All Other

Fig.C.1 最適ポートフォリオ（地域別，0%削減シナリオ，コスト最小化）

✓　5%削減シナリオ（コスト最小化）



(a) OECD North America

(b) OECD Europe

(c) OECD Pacific

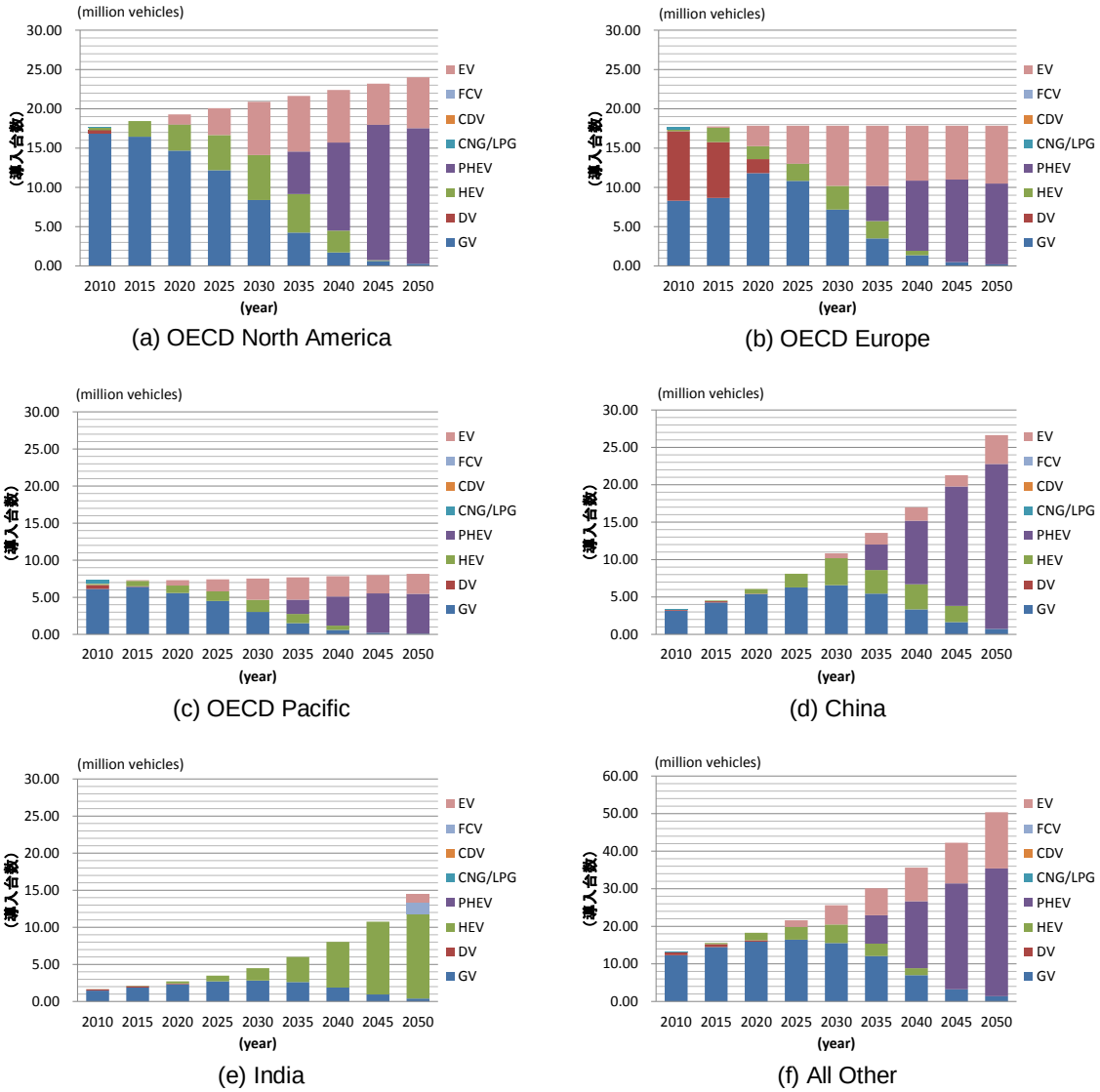
(d) China

(e) India

(f) All Other

Fig.C.2 最適ポートフォリオ（地域別，5%削減シナリオ，コスト最小化）

✓　10%削減シナリオ（コスト最小化）



(a) OECD North America

(b) OECD Europe

(c) OECD Pacific

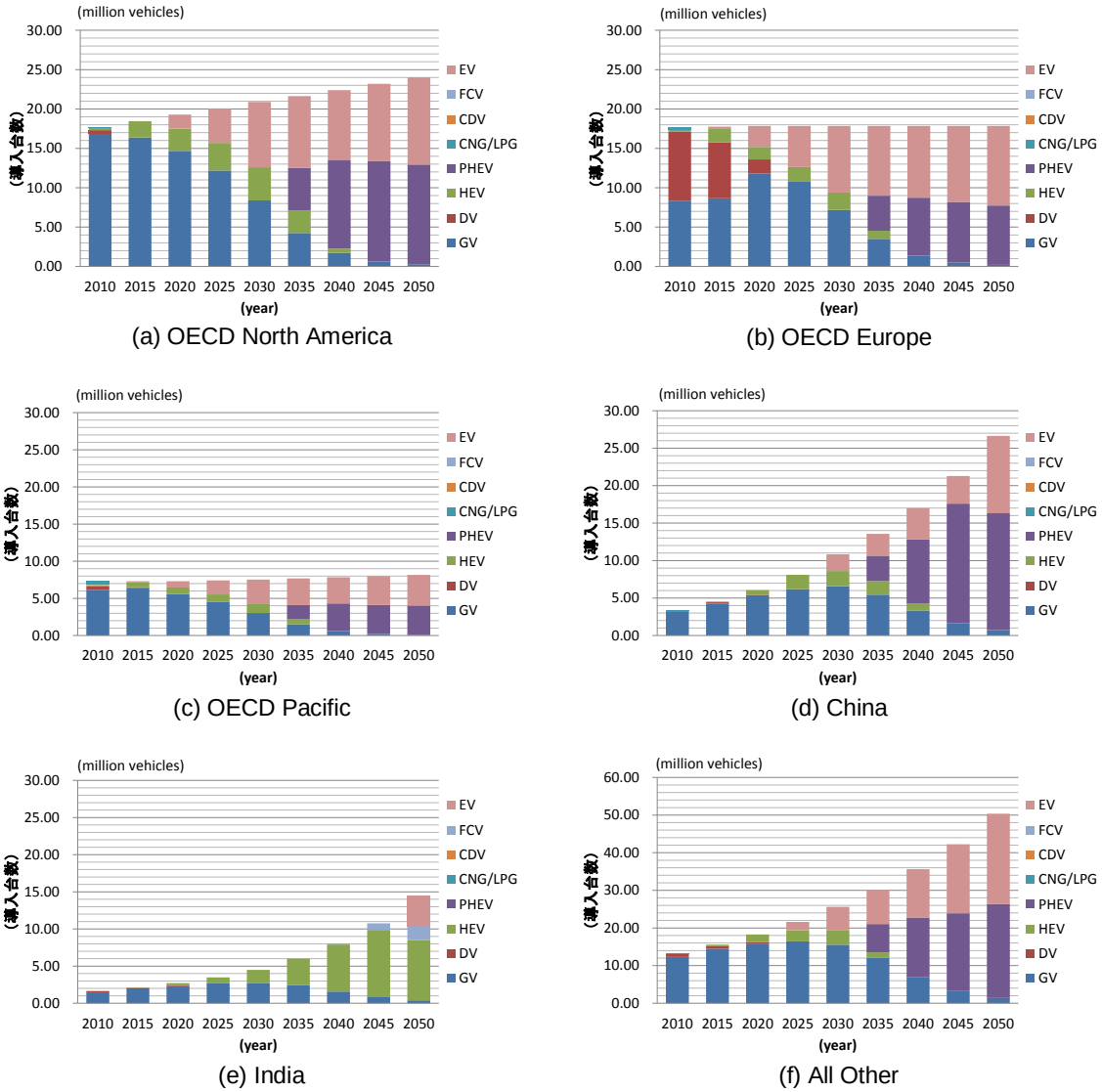
(d) China

(e) India

(f) All Other

Fig.C.3 最適ポートフォリオ（地域別，10%削減シナリオ，コスト最小化）

✓　15%削減シナリオ（コスト最小化）



(a) OECD North America

(b) OECD Europe

(c) OECD Pacific

(d) China

(e) India

(f) All Other

Fig.C.4 最適ポートフォリオ（地域別，15%削減シナリオ，コスト最小化）

✓　20%削減シナリオ（コスト最小化）

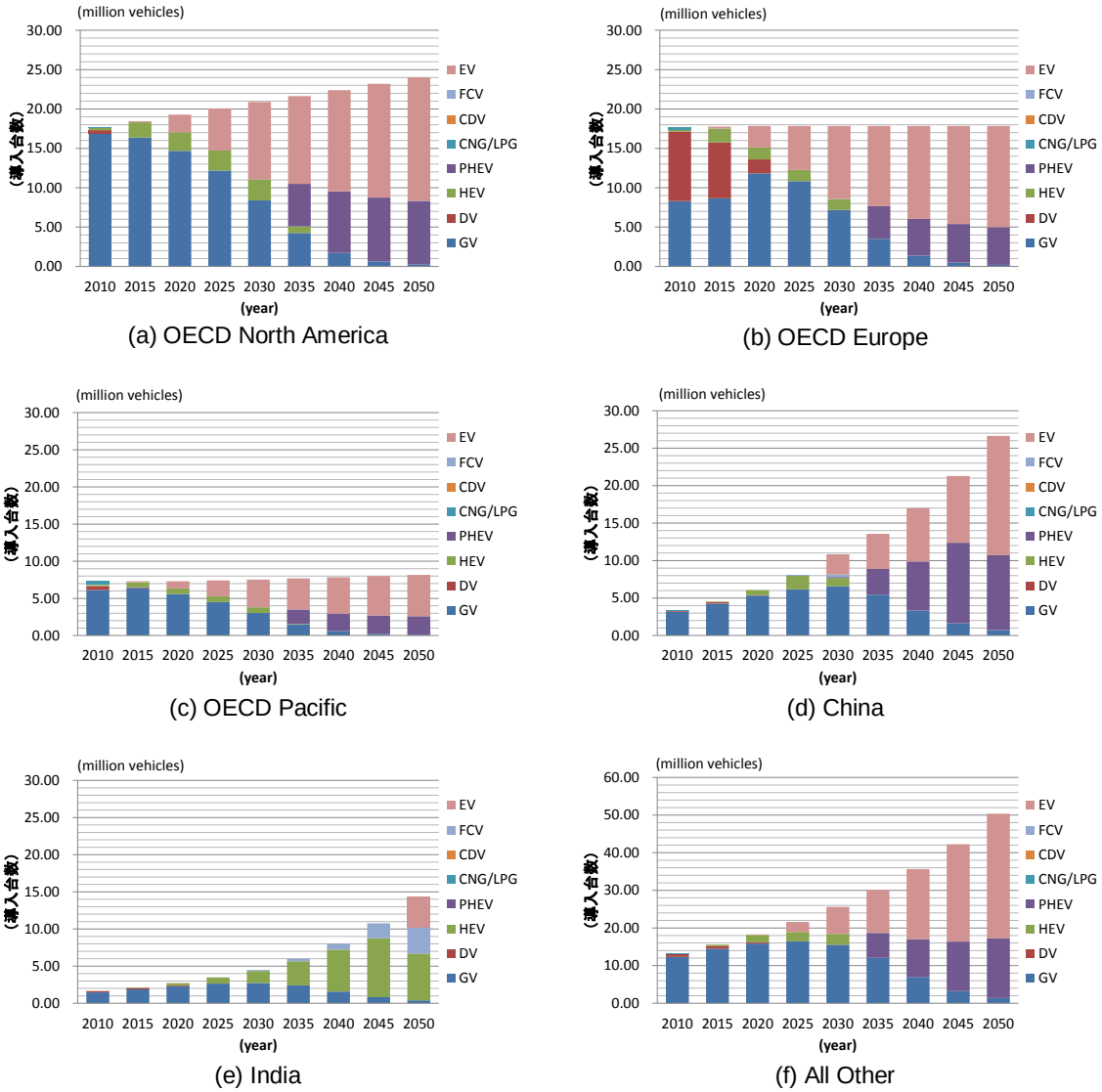
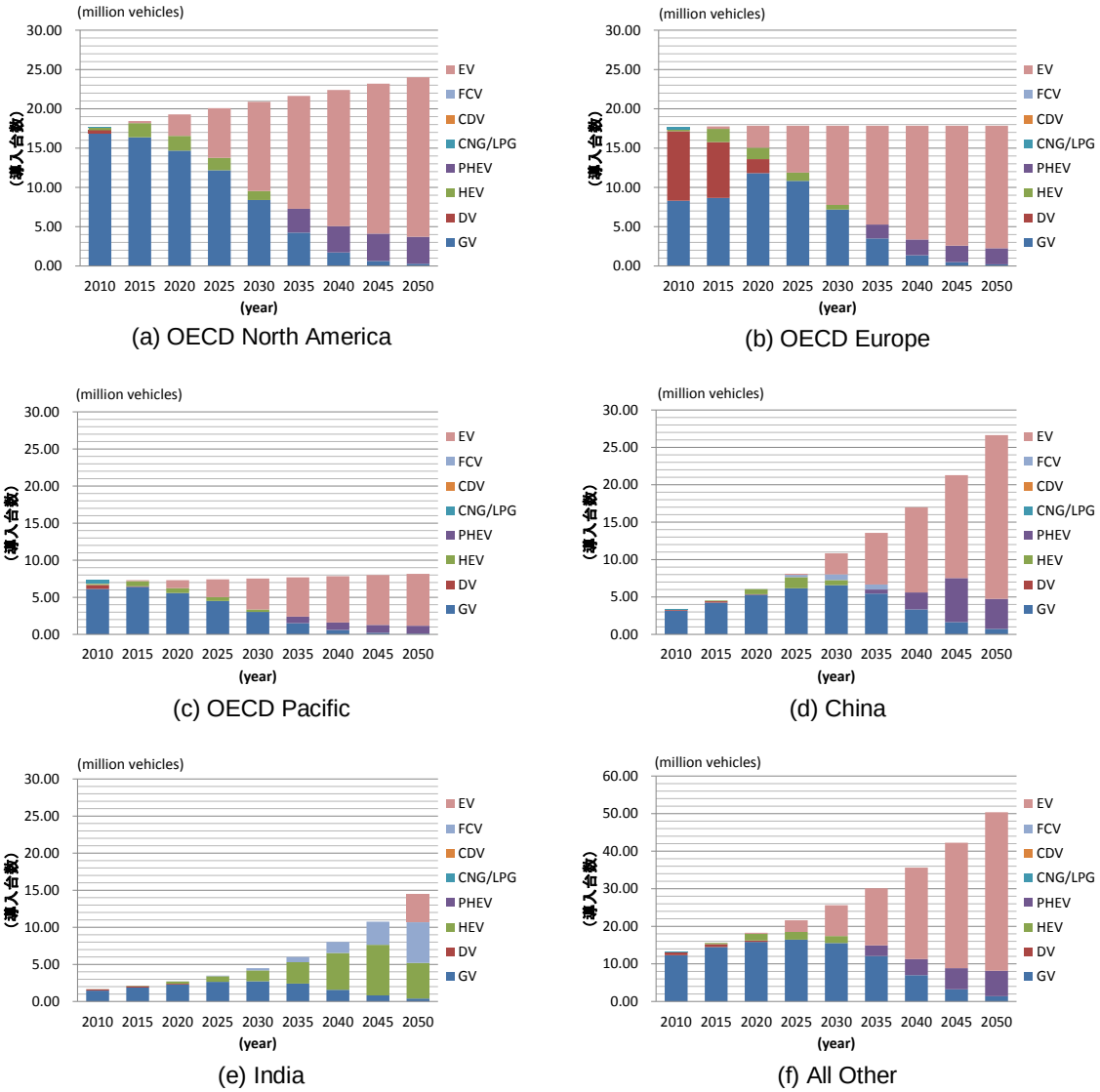


Fig.C.5 最適ポートフォリオ（地域別，20%削減シナリオ，コスト最小化）

✓　25%削減シナリオ（コスト最小化）



(a) OECD North America

(b) OECD Europe

(c) OECD Pacific

(d) China

(e) India

(f) All Other

Fig.C.6 最適ポートフォリオ（地域別，25%削減シナリオ，コスト最小化）

➢ 銅消費量最小化ケースの最適ポートフォリオ（地域別）

各削減シナリオにおける，銅消費量最小化ケースでの最適ポートフォリオを次の Fig.C.7~Fig.C.12 に示す.

✓ 0%削減シナリオ（銅消費量最小化）

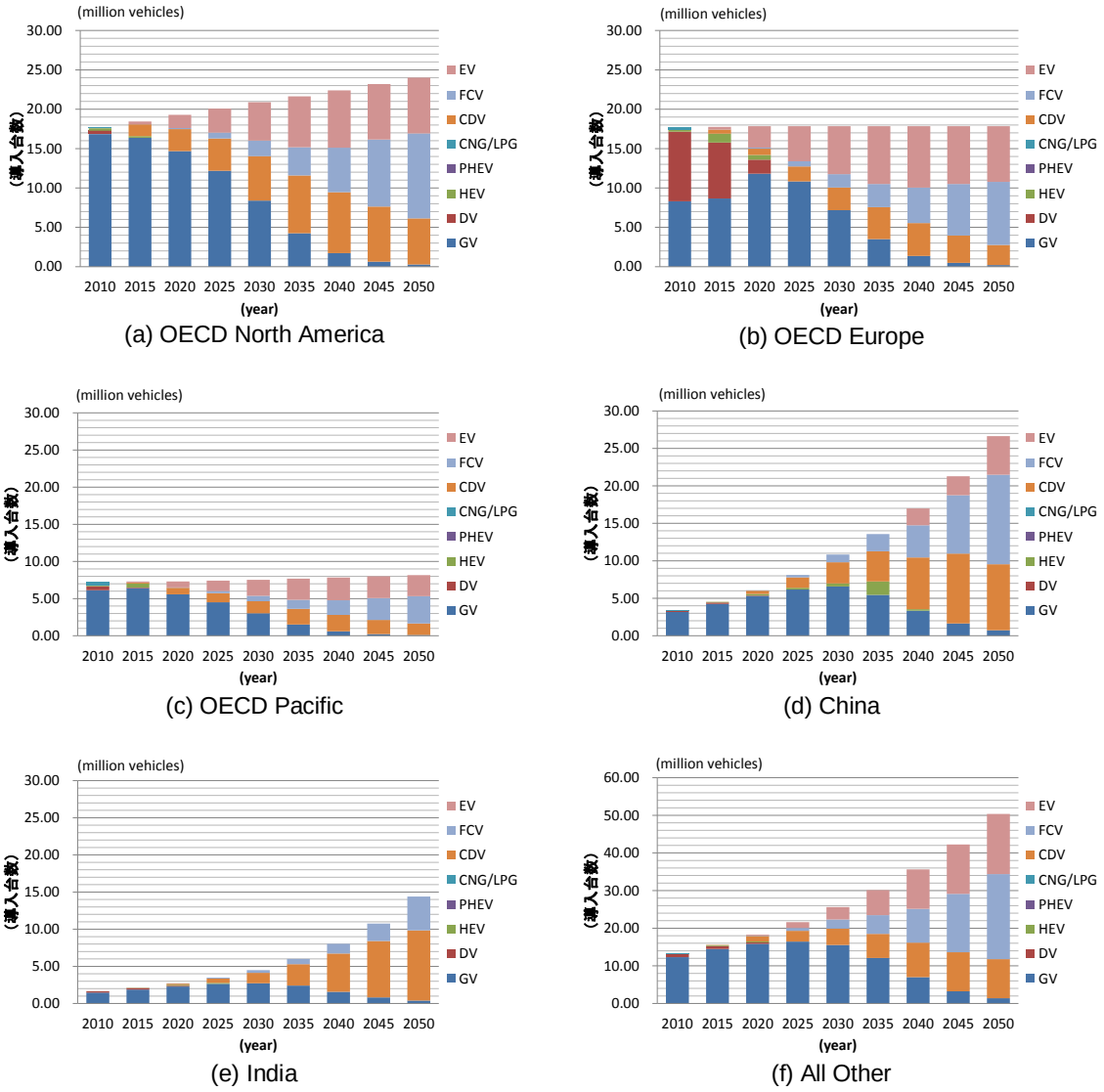


Fig.C.7 最適ポートフォリオ（地域別，0%削減シナリオ，銅消費量最小化）

✓　5%削減シナリオ（銅消費量最小化）

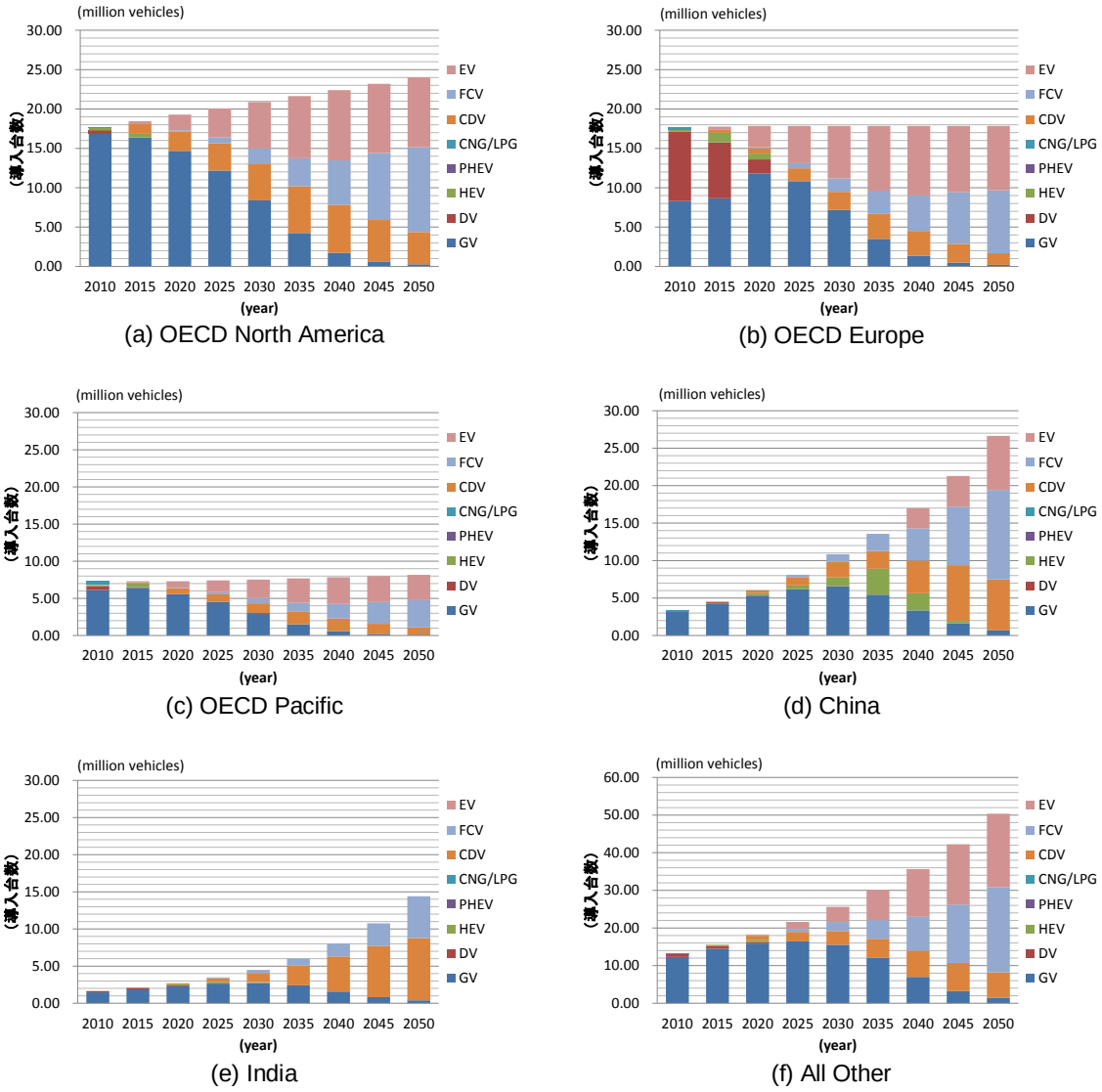


Fig.C.8 最適ポートフォリオ（地域別，5%削減シナリオ，銅消費量最小化）

✓　10%削減シナリオ（銅消費量最小化）

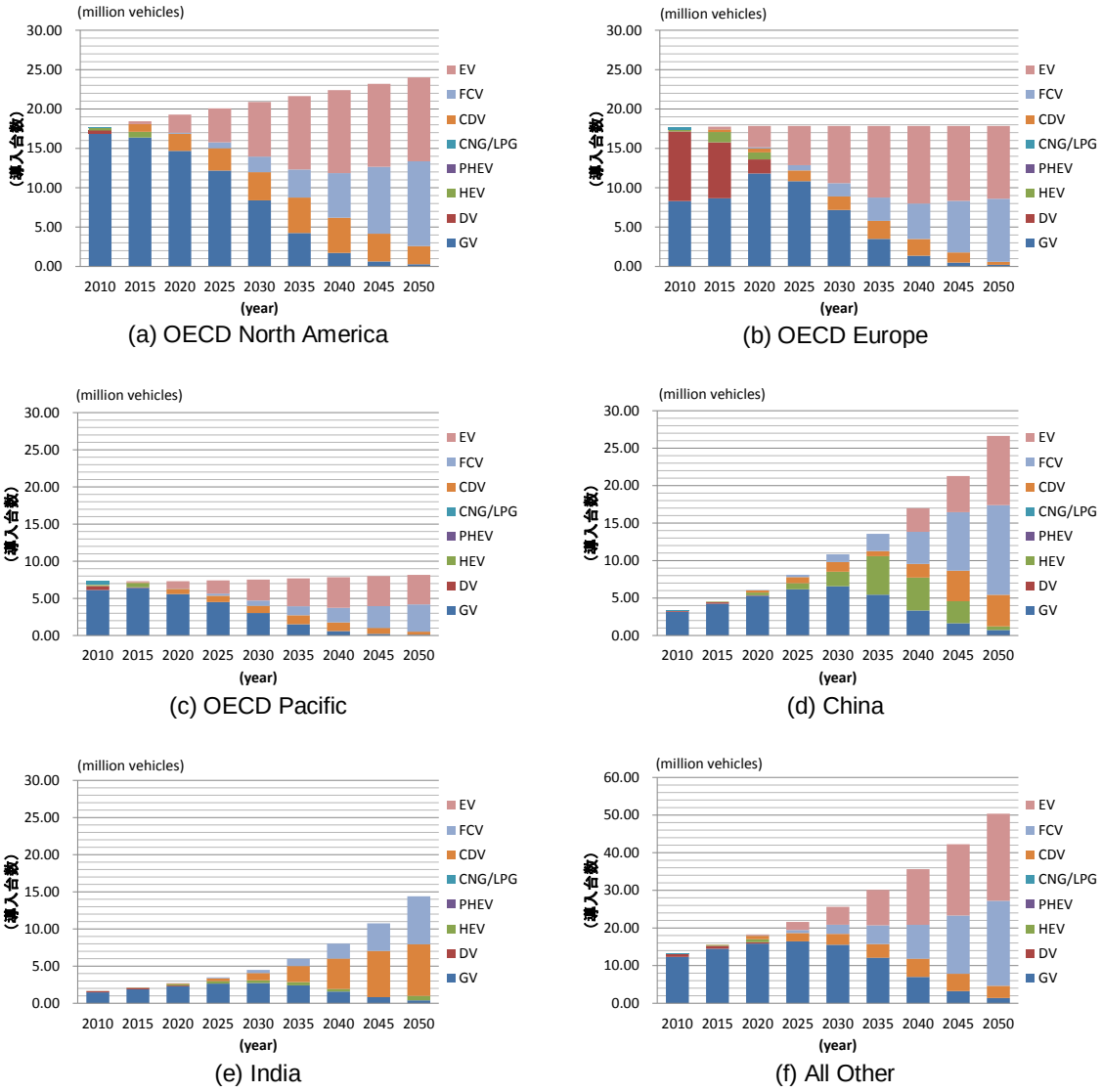


Fig.C.9 最適ポートフォリオ（地域別，10%削減シナリオ，銅消費量最小化）

✓　15%削減シナリオ（銅消費量最小化）

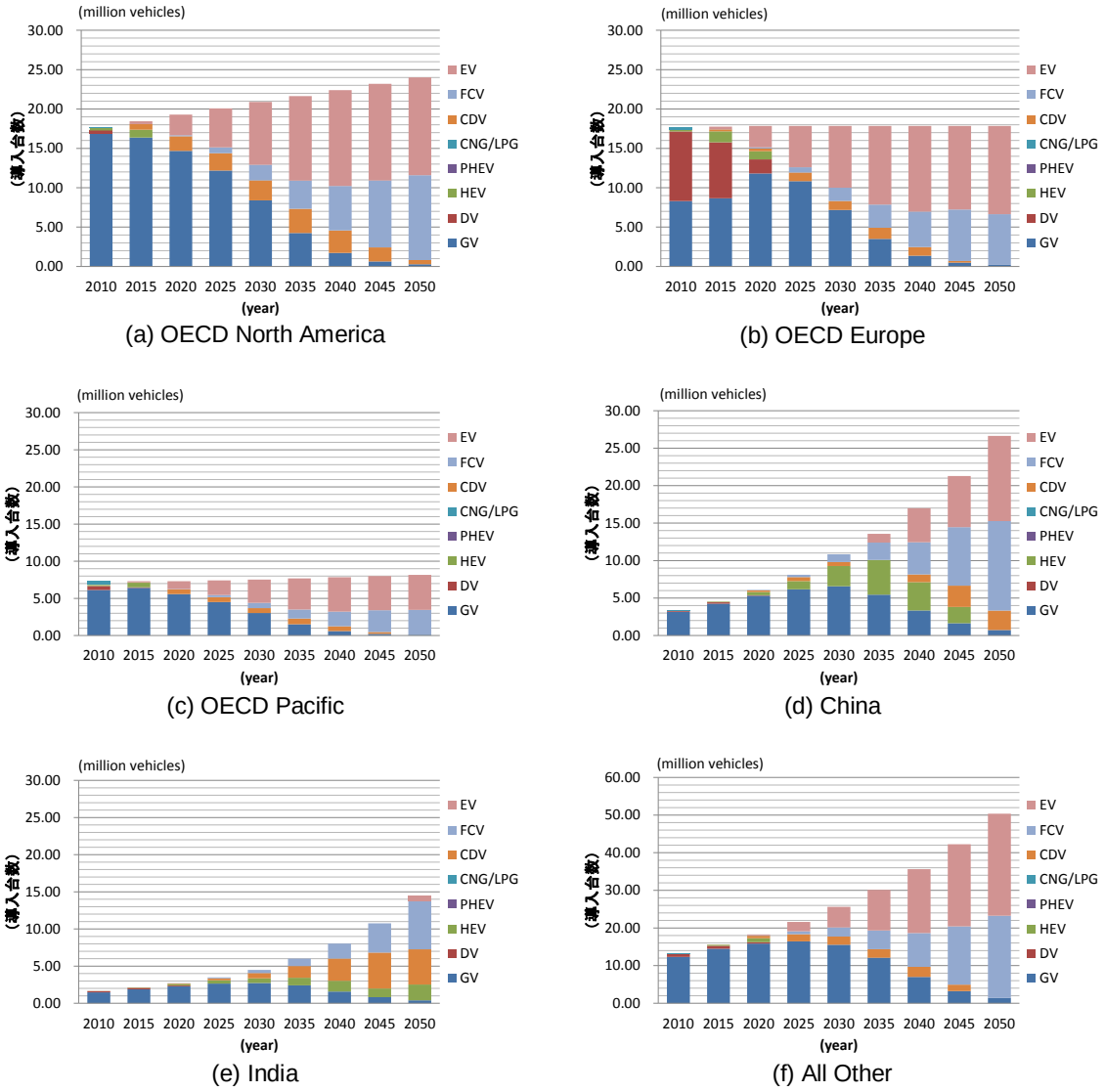


Fig.C.10 最適ポートフォリオ（地域別，15%削減シナリオ，銅消費量最小化）

✓　20%削減シナリオ（銅消費量最小化）

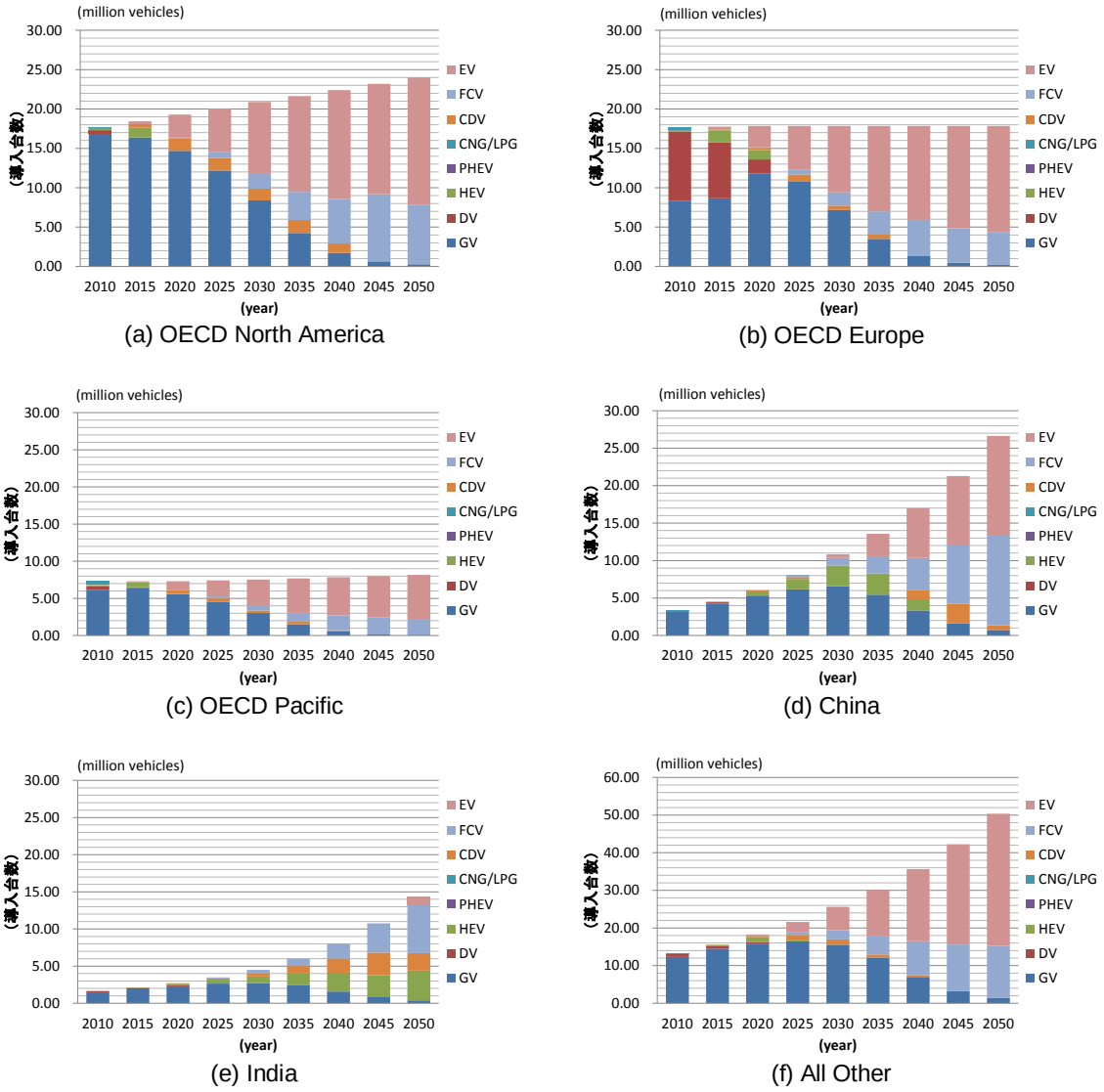


Fig.C.11 最適ポートフォリオ（地域別，20%削減シナリオ，銅消費量最小化）

✓　25%削減シナリオ（銅消費量最小化）

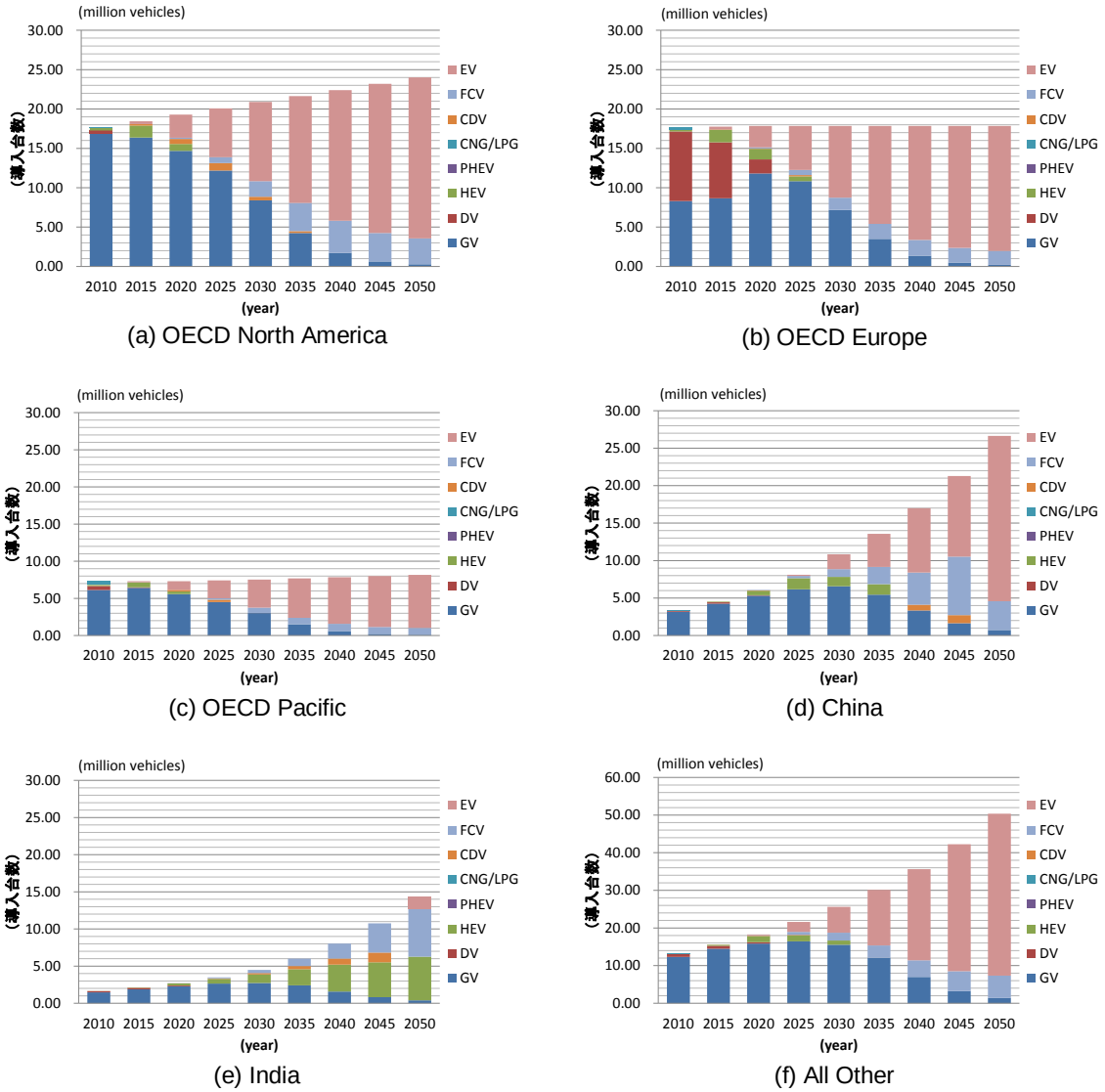


Fig.C.12 最適ポートフォリオ（地域別，25%削減シナリオ，銅消費量最小化）