

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	交絡項の帰属・配分を修正した要因分析法による自動車CO[2]排出量分析に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	三科善則
Author(English)	Yoshinori Mishina
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4086号, 授与年月日:2013年3月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:室町 泰徳
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4086号, Conferred date:2013/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

交絡項の帰属・配分を修正した要因分析法による
自動車 CO₂ 排出量分析に関する研究

三 科 善 則

論文要旨

本研究は、複数変動要因の同時変化分を示す交絡項の変動要因への帰属と配分方法に関する既往要因分析法における課題を明確にし、交絡項を要因の変動量に応じて関連要因に帰属させ、配分させる修正完全要因分析法を構築している。そのうえで、構築した要因分析法を用いて、自動車交通から排出される二酸化炭素（CO₂）排出量の変動に関する時系列要因分析、国/地域間要因分析、および、将来 CO₂ 排出量の推計をおこなっている。

自動車交通から排出される CO₂ の削減は、温室効果ガス排出量の削減にとって非常に重要である。CO₂ 排出量を削減するためには、CO₂ 排出量の削減に効果的な対策の立案が必要である。そのためには、CO₂ 排出量の過去および将来における動向、ならびに、それらの動向に関連する変動要因の特定と各要因の変動が変動全体に与える影響を定量的に分析することが不可欠である。

要因分析法は、そのための手法として、CO₂ 排出量やエネルギー消費量などの変動要因のマクロレベルの分析に数多く用いられている。なぜなら、要因分析法は、CO₂ 排出量やエネルギー消費量などの変動量を関連変動要因に分解し、各要因の変動が変動全体に与える影響を定量的に明らかにし、主な変動要因を特定できるからである。

これまでに数多くの要因分析法が提唱されている。しかしながら、既往要因分析法には、交絡項に関連する変動要因へ帰属させ、配分する方法に関して、いくつかの課題がある。そして、これらの課題に適切に対応した要因分析法はこれまでのところ確立されるに至っていない状況にある。

さらに、既往研究における要因分析は、ほとんど、国や地域単位の過去の CO₂ 排出量やエネルギー消費量の変動に関する時系列要因分析に限られている。要因分析法は、時系列分析に加えて国/地域間分析や将来 CO₂ 排出量などの推計にも適用できる。しかしながら、国/地域間分析は、国/地域全体としての CO₂ 排出量の変動に関する分析に数例みられるだけである。また、要因分析法を用いた将来 CO₂ 排出量などの推計に関する既往研究は、国全体としてのエネルギー需要予測に関する分析が一例あるのみである。また、これらの既往研究における要因分析の中で、自動車交通の CO₂ 排出量やエネルギー消費量の変動に関する要因分析は、時系列分析に限られている。

以上を踏まえ、本研究では、既往要因分析法の課題を整理し、既往要因分析法の主な課題である交絡項の変動要因への帰属と配分方法に関して検討をおこなっている。その結果として、既往要因分析法の交絡項の変動要因への帰属と配分方法を修正した要因分析法（Modified Laspeyres Index Method: MLI 法）を構築している。そして、構築した MLI 法が、要因分析法としての完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、優れた要因分析法であることを明らかにしている。

そのうえで、MLI 法を用いて、自動車交通の CO₂ 排出量変動に関する要因分析をおこなっている。具体的には、時系列分析、国/地域間分析、将来 CO₂ 排出量の推計をおこなっている。各要因分析においては、CO₂ 排出量変動の主な要因を定量的に示している。さらに、MLI 法と既往要因分析法による分析結果を比較し、MLI 法の理論的特徴と既往要因分析法による要因分析結果との差を検討している。また、将来 CO₂ 排出量の推計においては、MLI 法を応用した新しい推計手法を構築している。

構築した MLI 法は、既往要因分析法と異なり、交絡項を関連する変動要因だけに帰属させ、変動要因の対称変化率の大きさに比例して関連要因に配分する。MLI 法についての考察と MLI 法を用いた要因分析結果は、特に、同じ交絡項の中に同時変化する増加要因と減少要因が混在し、交絡項が大きい場合、MLI 法が優れた要因分析法であることを示している。同時変化する増加変動要因と減少変動要因が同じ交絡項の中に混在する場合、MLI 法と既往要因分析法による要因分析結果の間には無視できないほどの差が生じる。今後、CO₂ 排出量などの削減が進展する中で、増加変動要因と減少変動要因が混在する事例が数多く発生すると予想される。その場合、MLI 法と既往要因分析法による要因分析結果の違いが、CO₂ 排出量などの削減効果の評価や重点施策の対象とすべき変動要因の選択などに影響をおよぼす可能性がある。

本研究で構築した MLI 法は、今後検討すべき課題はあるものの、自動車交通の CO₂ 排出量の変動要因分析に限らず、経済、エネルギー需給、産業廃棄物、および、食糧需給部門に係わる変動要因分析においても活用でき、諸問題解決のための対策立案に寄与できる汎用性のある要因分析法であると考ええる。

以下、各章について、本研究の内容と成果を要約する。

第 1 章では、本研究の背景、目的、および、本論文の構成について詳述している。

第 2 章では、要因分析法に関する既往研究を概観し、要因分析法の位置付けと体系、および、要因分析法の適用分野について整理している。

要因分析法は経済指数理論から派生し、数多く提唱されている。要因分析法は、交絡項を分解しないで各要因項と別に計上する簡易要因分析法と交絡項を関連要因に帰属、配分させる完全要因分析法に大別できる。代表的な簡易要因分析法は、ラスパイレス要因分析法 (Laspeyres Index Method : LI 法) である。一方、代表的な完全要因分析法は、リファインドラスパイレス要因分析法 (Refined Laspeyres Index Method : RLI 法) と対数平均ディビジア要因分析法 (Logarithmic Mean Divisia Index Method : LMDI 法) である。これらの要因分析法は、エネルギー、環境関連部門における CO₂ 排出量やエネルギー需給量変動の時系列要因分析に数多く用いられている。

第 3 章では、既往研究における既往要因分析法を概観している。そのうえで、LI 法、RLI 法、および、LMDI 法について説明し、これらの手法の課題を詳述している。

既往研究で提唱された要因分析法には、交絡項を関連する変動要因へ帰属させ、配分する方法に関して、いくつかの課題がある。そして、これらの課題に適切に対応した要因分析法はこれまでのところ確立されるに至っていない状況にある。簡易要因分析法である LI 法は、交絡項を関連変動要因に帰属、配分させないで別途計上する。そのため、交絡項の値が大きくなると、各変動要因の分析結果に無視できない影響を与える。一方、完全要因分析法である RLI 法は、交絡項を各変動要因の変動量に関係なく、すべての同時変化する変動要因に均等に配分させる。そのため、解析結果の正確性に疑問が生じる。また、LMDI 法は、対数平均値を各要因の重み付けにした線形積分関数の離散近似式を用いている。そのため、LMDI 法は、複数変動要因の同時変化による変動量を示す交絡項を、微小で分析結果におよぼす影響はないものとして考慮していない。運輸部門の要因分析のように変動量の大きなデータを使用する場合、交絡項が大きくなるため、要因分析結果に、無視できないほどの影響を与える。

第 4 章では、前章の議論を踏まえ、既往要因分析法の課題である、交絡項の変動要因への帰属

と配分方法を修正した完全要因分析法（Modified Laspeyres Index Method : MLI 法）を構築している。

MLI 法は、交絡項を関連する変動要因にだけに帰属させ対称変化率（検討期間における変動要因の変動量をその要因の平均値で除した値）の大きさに比例して関連要因に配分する。また、同じ交絡項の中に交絡する増加要因と減少要因が混在する場合、前者にのみ交絡項を帰属させる。さらに、MLI 法と既往完全要因法を用いて例示的な要因分析をおこない、要因分析法の違いが分析結果に与える影響を定量的に明らかにしている。以上の結果を踏まえ、完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、MLI 法と既往要因分析法の総括的評価をおこない、MLI 法が優れた要因分析法であることを明らかにしている。

第 5 章から第 7 章では、第 4 章で構築した MLI 法を、自動車交通の CO₂ 排出量変動に関する時系列分析、国/地域間分析、および、将来予測に適用した結果を示している。各章の要因分析では、MLI 法による分析結果を既往要因分析法による分析結果と比較している。

第 5 章では、1990 年から 2008 年の日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の時系列変動要因分析をおこない、全国および地域別の CO₂ 排出量変動の主要要因を定量的に示している。軽乗用車の普及による CO₂ 排出量の削減効果も試算している。その結果、自家用乗用車の CO₂ 排出量が 1990 年から 2001 年に増加した主要要因は、各地域ともに、人口一人あたりの保有台数の増加と平均保有車両重量の増加であった。また、2001 年から 2008 年に CO₂ 排出量が減少した主要要因は、保有台数あたりの走行距離の減少と平均車両重量あたりの実走行燃費の改善であった。一方、貨物自動車の CO₂ 排出量が 1990 年から 1996 年に増加した主要要因は、北海道を除き、保有台数あたりの輸送トンキロの増加であった。また、1996 年から 2008 年に CO₂ 排出量が減少した主要要因は、各地域ともに、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の減少と保有台数の減少であった。また、普通・小型乗用車保有に代わる軽乗用車の増加は、CO₂ 排出量削減に大きな効果があったと認められた。

第 6 章では、MLI 法を用いて、2000 年と 2006 年における、日本、米国、英国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の主要要因を定量的に示している。また、2000 年から 2006 年にかけての各国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の変動についても検討している。分析の結果、2000 年および 2006 年ともに、米国の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量が日本および英国に比べて多い主要要因は、米国の一台当たりの長い走行距離であった。米英間の比較では、米国の実走行燃費の悪さも寄与している。また、英国は日本に比べて実走行燃費の改善は進展しているが、一台あたりの長い走行距離に起因する人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量が多いという点が明らかとなった。

第 7 章では、要因分析法を用いて 2020 年までの日本の自家用乗用車 CO₂ 排出量の推計と主要変動要因を定量的に示している。CO₂ 排出量の推計にあたっては、MLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計方法（Modified Laspeyres Index for Projection : PMLI 法）を構築している。また、PMLI 法による要因分析結果と、RLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計方法による要因分析結果とを比較し、PMLI 法の理論的な特徴と RLI 法を応用した推計方法による要因分析結果との差に関して考察している。その結果、各変動要因が 2001 年から 2005 年の年平均変動率で将来も変動した場合、CO₂ 排出量は 2020 年において 1990 年レベルまで減少する。減少に寄与する主要要因は一台あたりの走行距離の減少と実走行燃費の改善であることが示された。

第 5 章、第 6 章における MLI 法、および、第 7 章における PMLI 法による分析結果を既往要因分析法による分析結果と比較すると、同時変化する増加要因と減少要因が同じ交絡項の中に混在する場合、MLI 法と既往要因分析法の間には、無視できないほどの差が生じることが明らかになった。この主な原因として、同時変化する増加要因と減少要因が同じ交絡項の中に混在する場合、MLI 法では、既往要因分析法と異なり、交絡項を増加要因側だけに帰属させ、減少要因側に帰属させないことが挙げられた。

第 8 章では、本研究で得られた知見を研究成果として総括し、今後の課題について整理している。

謝辞

本論文は、筆者が東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻博士後期課程に在学中の1年半、そして同課程中途退学後2年間、合わせて3年半にわたる研究成果をまとめたものである。研究においては、多くの方にご指導、ご支援をいただいた。みなさまに深く感謝の意を表したい。

本論文の主査である東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻准教授 室町泰徳先生には、筆者が同博士後期課程在学中の指導教官として、研究内容、研究方法、論文執筆、論文発表などについて数多くのご指導をいただいた。さらに、博士後期課程中途退学後も、在学中と変わらずご指導、ご支援をいただいた。40年におよぶサラリーマン生活から研究に没頭する生活に転じ、いろいろ戸惑いなどあった。しかしながら、研究を継続することができ、ここに本論文をまとめ上げることができたのも、ひとえに、室町泰徳先生の温かいご指導、ご支援のおかげである。ここに深く感謝するとともに、これからの研究においても、ご指導をお願い申し上げる次第である。

東京工業大学監事、環境省中央環境審議会会長、東京大学名誉教授、放送大学客員教授 鈴木基之先生には、筆者が放送大学大学院修士課程に社会人入学して以来、温かいご支援をいただいている。同修士課程において筆者の指導教官であられた鈴木基之先生のご指導は、筆者が社会人を卒業し博士後期課程における研究への道に進む動機付けとなった。さらに、博士後期課程およびその後の研究においても、大局的見地から、研究に取り組む姿勢や考え方をはじめ、示唆に富むご指摘やご助言を数多くいただいた。ここに、あらためて感謝の意を表したい。今後ともご指導とご鞭撻をお願い申し上げる次第である。

東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻教授、大野隆造先生、屋井鉄雄先生、理工学研究科土木工学専攻教授 朝倉康夫先生、同准教授 福田大輔先生には、本論文の副査をしていただいた。各先生方からは、本論文の充実のために多くの有益なご指摘とご指導をいただいた。ここに深く感謝する次第である。

さらに、屋井鉄雄先生、福田大輔先生、理工学研究科国際開発工学専攻准教授 花岡伸也先生、愛知大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻准教授 羽鳥剛史先生には、博士後期課程在学中にドクターゼミをはじめとする多くの機会において、それぞれのご専門の視点から有意義なご指摘とご指導をいただいた。また、屋井鉄雄先生には、中途退学後も、研究の継続と本論文の完成について温かい激励の言葉をいただいた。深く感謝する次第である。

東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻室町研究室の先輩、後輩諸氏にも多大なご支援をいただいた。特に、先輩である鉄道総合技術研究所 鈴木崇正博士には、博士論文の執筆やとりまとめ方などについて丁重にご教示していただいた。また、トロント大学教授 Moinul Hossain 博士には、本研究に関連する英語論文の精査をしていただいた。ここに本論文を完成できたのも、室町研究室の先輩や後輩諸氏のご協力のおかげである。感謝の意を表したい。

本論文は、自動車交通の二酸化炭素排出量の変動に関して、既往要因分析法の課題に対応した要因分析法の構築を試みたものである。本研究において構築した要因分析法が、持続可能な社会の実現にむけて、諸問題解決のための対策立案に寄与できる汎用性のある要因分析法となるよう

に、今後、さらなる研究を続ける所存である。

最後に、筆者を心身ともに支えてくれた妻 わか子に対して、心から感謝の意を表したい。

三科 善則

(元・東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻)

2013 年 3 月

略語一覽

APEC	: Asia Pacific Economic Cooperation
EISD	: Energy Indicator for Sustainable Development
EU	: European Union
FHWA	: Federal Highway Administration, U.S.
IAEA	: International Atomic Energy Agency
IEA	: International Energy Agency
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
LI	: Laspeyres Index
LMDI	: Logarithmic Mean Divisia Index
MLI	: Modified Laspeyres Index
OECD	: Organization for Economic Cooperation and Development
PMLI	: Modified Laspeyres Index for Projection
RLI	: Refined Laspeyres Index
SDA	: Structural Decomposition Analysis

目次

1. 序論	1
1.1. 背景	2
1.2. 研究目的	3
1.3. 論文構成	3
2. 要因分析法の体系	6
2.1. 緒言	7
2.2. 要因分析法の位置付け	7
2.3. 要因分析法の体系	8
2.3.1. 経済指数理論	8
2.3.1.1. ラスパイレス型指数	9
2.3.1.2. ディビシア型指数	11
2.3.2. 既往要因分析法	12
2.3.3. 要因分析	14
2.4. 要因分析法の適用分野	16
2.5. 結語	17
3. 既往要因分析法の課題	18
3.1. 緒言	19
3.2. 要因分析法に係わる課題の整理	19
3.3. ラスパイレス型簡易要因分析法（LI 法）	20
3.3.1. LI 法を用いた既往要因分析の概観	20
3.3.2. Laspeyres Index（LI 法）	20
3.3.3. LI 法の課題	21
3.4. ラスパイレス型完全要因分析法（RLI 法）	22
3.4.1. RLI 法を用いた既往要因分析の概観	22
3.4.2. Refined Laspeyres Index（RLI）法	23
3.4.3. RLI 法の課題	24
3.5. ディビシア型完全要因分析法（LMDI 法）	27
3.5.1. LMDI 法を用いた既往要因分析の概観	27
3.5.2. Logarithmic Mean Divisia Index（LMDI）法	28
3.5.3. LMDI 法の課題	29
3.6. 結語	30
4. 交絡項の帰属・配分を修正した要因分析法の構築	32
4.1. 緒言	33

4.2.	交絡項の帰属・配分を修正した要因分析法（MLI 法）の構築	33
4.3.	既往要因分析法との比較.....	35
4.3.1.	算定式の比較	35
4.3.2.	例示的な要因分析結果.....	37
4.4.	要因分析法の総括的評価.....	39
4.5.	結語	40
5.	日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO ₂ 排出量の変動要因分析	42
5.1.	緒言	43
5.2.	背景	43
5.3.	運輸部門における既往研究の概観.....	44
5.4.	要因分析の対象と範囲	45
5.5.	変動要因の特定	46
5.5.1.	自家用乗用車の変動要因	46
5.5.2.	貨物自動車の変動要因.....	48
5.6.	分析データ	48
5.7.	CO ₂ 排出量と変動要因の推移	50
5.7.1.	自家用乗用車	50
5.7.2.	貨物自動車.....	52
5.8.	要因分析方法.....	54
5.9.	要因分析結果.....	55
5.9.1.	自家用乗用車	55
5.9.1.1.	1990 年から 1995 年の要因分析結果	56
5.9.1.2.	1995 年から 2001 年の要因分析結果	56
5.9.1.3.	2001 年から 2008 年の要因分析結果	56
5.9.2.	貨物自動車.....	62
5.9.2.1.	1990 年から 1996 年の要因分析結果	62
5.9.2.2.	1996 年から 2002 年の要因分析結果	62
5.9.2.3.	2002 年から 2008 年の要因分析結果	62
5.9.3.	自家用軽乗用車普及による CO ₂ 排出量削減効果の試算	67
5.10.	既往要因分析法による分析結果との比較	69
5.11.	結語	72
6.	日米英間の乗用車 CO ₂ 排出量の変動要因分析.....	73
6.1.	緒言	74
6.2.	背景	74
6.3.	既往研究の概観	75
6.4.	国/地域間要因分析の特質.....	76
6.5.	国/地域間要因分析方法	77

6.5.1.	国/地域間要因分析法の特定	77
6.5.2.	国/地域間要因分析方法.....	77
6.6.	要因分析の対象と範囲	78
6.7.	変動要因の特定	78
6.8.	分析データ	79
6.9.	変動要因の推移	81
6.10.	要因分析結果.....	83
6.10.1.	米国 - 日本	83
6.10.1.1.	2000 年および 2006 年における乗用車 CO ₂ 排出量の差の主な要因	83
6.10.1.2.	2000 年から 2006 年にかけての乗用車 CO ₂ 排出量の差の変動	83
6.10.2.	米国 - 英国	84
6.10.2.1.	2000 年および 2006 年における乗用車 CO ₂ 排出量の差の主な要因	84
6.10.2.2.	2000 年から 2006 年にかけての乗用車 CO ₂ 排出量の差の変動	84
6.10.3.	英国 - 日本	84
6.10.3.1.	2000 年および 2006 年における乗用車 CO ₂ 排出量の差の主な要因	84
6.10.3.2.	2000 年から 2006 年にかけての乗用車 CO ₂ 排出量の差の変動	85
6.11.	MLI 法と既往要因分析法による分析結果の比較	89
6.12.	結語	90
7.	2020 年までの日本の自家用乗用車 CO ₂ 排出量の推計	91
7.1.	緒言	92
7.2.	背景	92
7.3.	既往研究の概観	93
7.4.	将来推計手法の構築	94
7.5.	分析対象と範囲	97
7.6.	変動要因	97
7.7.	分析データ	98
7.8.	変動要因の推移	98
7.9.	変動要因の年平均変動率.....	99
7.10.	CO ₂ 排出量推計結果.....	100
7.10.1.	Trend 2001-2009 ケース	101
7.10.2.	Trend 2001-2005 ケース	101
7.10.3.	Trend 2005-2009 ケース	101
7.10.4.	Optimistic Trend ケース	102
7.11.	既往要因分析法を応用した推計手法による要因分析結果との比較.....	105
7.11.1.	RLI 法を応用した推計手法	105
7.11.2.	要因分析結果の比較.....	105
7.12.	結語	106

8. 結論と今後の課題	108
8.1. 緒言	109
8.2. 本研究の成果.....	109
8.2.1. 要因分析法の位置付けと既往要因分析法の体系的整理	109
8.2.2. 既往要因分析法の課題の整理.....	110
8.2.3. 修正完全要因分析法（MLI 法）の構築	110
8.2.4. MLI 法を用いた自動車交通の CO2 排出量変動分析	110
8.3. 今後の課題	112
8.3.1. 要因分析結果が変動要因の特性によってミスリードされる可能性	112
8.3.2. 高次の交絡項の変動要因への配分	113
8.3.3. 変動要因相互の関連性.....	115
8.3.4. 分析データの入手可能性とその精度.....	116
8.3.5. 社会経済要因の要因分析	117
8.3.6. 直接法と間接法による要因分析結果の比較.....	117
8.3.7. 構造分解分析法との比較.....	117
8.4. おわりに	118
参考文献	119

目次

図 1-1. 論文構成.....	5
図 2-1. 財 i （ガソリン）の需要曲線	8
図 2-2. 要因分析の体系.....	15
図 3-1. LI 法の概念図	21
図 3-2. RLI 法の概念図	23
図 3-3. 交絡項の帰属	26
図 3-4. 交絡項の配分	27
図 4-1. MLI 法の概念図.....	34
図 4-2. MLI 法と他の要因分析法による要因分析結果の比較	39
図 5-1. 自家用乗用車の CO ₂ 排出量変動要因関連図	47
図 5-2. 貨物自動車の CO ₂ 排出量変動要因関連図.....	48
図 5-3. 自家用乗用車の CO ₂ 排出量と変動要因の推移	51
図 5-4. 貨物自動車の CO ₂ 排出量と変動要因の推移	54
図 5-5. 自家用乗用車全体の要因分析結果.....	61
図 5-6. 貨物自動車の要因分析結果.....	66
図 5-7. 自家用普通・小型乗用車と軽乗用車保有台数の推移	68
図 5-8. 軽乗用車普及による CO ₂ 排出量削減効果.....	68
図 5-9. MLI 法、RLI 法、LMDI 法による要因分析結果の比較	71
図 6-1. 人口一人あたりの乗用車 CO ₂ 排出量の変動要因関連図.....	79
図 6-2. 乗用車の CO ₂ 排出量と変動要因の推移	82
図 6-3. 要因分析結果：要因別乗用車 CO ₂ 排出量/人口の差	88
図 6-4. MLI 法と既往要因分析法による要因分析結果の比較	89
図 7-1. PMLI 法の概念図	96
図 7-2. 自家用乗用車の CO ₂ 排出量と変動要因の推移	99
図 7-3. 各検討ケースにおける CO ₂ 排出量の推移.....	102
図 7-4. 各変動要因の CO ₂ 排出量変動推計結果	104
図 8-1. 乗用車走行距離の変動.....	113

表目次

表 2-1. 既往要因分析法.....	15
表 4-1. 要因分析法の違いによる算定式の比較	36
表 4-2. 要因分析データ	38
表 4-3. MLI 法と他の要因分析法による要因分析結果の比較	38
表 4-4. 要因分析法の総括的評価	40
表 5-1. CO ₂ 排出量変動要因に関連するデータの出典	49
表 5-2. 関連データの調査方法	49
表 5-3. MLI 法、RLI 法、LMDI 法による要因分析結果の比較	70
表 6-1. 乗用車の CO ₂ 排出量変動要因関連データの出典.....	80
表 6-2. 変動要因関連データ	80
表 7-1. 変動要因の年平均変動率	100
表 7-2. 各検討ケースの 2020 年における CO ₂ 排出量の推計結果	102
表 7-3. PMLI 法と RLI 法を応用した手法による CO ₂ 排出量推計結果.....	106
表 8-1. 乗用車走行距離の変動要因分析	113
表 8-2. 交絡項の変動量が変動量全体に占める割合	115

1. 序論

1.1. 背景

原油供給のひっ迫と原油価格高騰によって世界同時不況をもたらした 1973 年の石油危機は、エネルギー消費量の削減とその効率的利用の重要性を世界各国に認識させた。その後、1997 年の気候変動枠組条約締約国会議で採択された京都議定書をめぐる議論は、地球温暖化防止対策として、温室効果ガスの削減、特に二酸化炭素（CO₂）排出量削減の重要性を認識させた。さらに、2011 年の東日本大震災を端緒として発生した原子力発電所の事故は、原子力発電の存続に対する世界的議論を活発にし、エネルギー需給政策に大きな影響を与えた。日本においても 2020 年の温室効果ガス削減目標の達成を危ういものに行っている。

世界の CO₂ 排出量の中で、運輸部門から発生する CO₂ 排出量は、2009 年において全部門の 23% を占めている（IEA（2011））。その中で、道路輸送の CO₂ 排出量は、運輸部門全体の CO₂ 排出量の大部分を占めている。現在、道路輸送における CO₂ 排出量は、日本を含むいくつかの OECD 諸国において減少傾向にある。しかしながら、IEA（2010）は、2035 年における世界の運輸部門の燃料需要を、現在より約 40% 増加すると予測している。道路輸送、特に乗用車による CO₂ 排出量の削減は、世界の CO₂ 排出量の削減にとって、依然として重要である。

CO₂ 排出量を削減するためには、CO₂ 排出量の削減に効果的な対策の立案が必要である。そのためには、CO₂ 排出量の過去および将来における動向、ならびに、それらの動向に関連する変動要因の特定と各変動要因の変動が変動全体に与える影響を定量的に分析することが不可欠である。

要因分析法は、CO₂ 排出量やエネルギー消費量などの変動要因の特定と、変動要因の変動が変動全体に与える影響を定量的に分析できる手法のひとつである。たとえば、日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量は、運輸部門の CO₂ 排出量増加のほとんどを占め、2010 年（以下、日本に関する暦年は年度を示す）に 1990 年比 37.7% 増加している。しかしながら、日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量は、2001 年をピークに（1990 年比 53.7% 増加）、それ以降減少に転じ、2010 年には 2001 年比 10.4% 減少している（日本国温室効果ガスインベントリ報告書（2012））。要因分析法を用いて時系列要因分析をおこない、過去および将来の CO₂ 排出量の増加および減少の推移とそれらの変動要因を定量的に把握することは、運輸部門の CO₂ 排出量の削減に効果的な施策の立案に大きく貢献すると考えられる。

要因分析法は、経済指数理論から派生しており、CO₂ 排出量やエネルギー需給量などの変動に関するマクロレベルの分析を対象にしている。その分析の前提となる式は、乗算型の恒等式で表わされる。要因分析法は、1980 年代に、主に産業部門のエネルギー需要の分析に用いられ、1990 年以降、運輸、住宅部門のエネルギー需要の分析、および、発電部門のエネルギー供給の分析に用いられてきた。CO₂ 排出量に関する要因分析は、地球温暖化問題が世界的に注目されるようになった 1990 年以降急激に増加している。

これまでに数多くの要因分析法が提唱されている。しかしながら、既往要因分析法には、複数変動要因の同時変化を示す交絡項に関連する変動要因へ帰属させ、配分する方法に関して、いくつかの課題がある。そして、これらの課題に適切に対応した要因分析法はこれまでのところ確立されるに至っていない状況にある。

さらに、既往研究における事例要因分析は、ほとんど国や地域単位の CO₂ 排出量やエネルギー

消費量の過去の変動に関する時系列分析に限られている。要因分析法は、時系列分析に加えて国/地域間分析や将来 CO₂ 排出量などの推計にも適用できる。しかしながら、国/地域間分析は、国/地域全体としての CO₂ 排出量に関する既往研究が数例みられるだけである。また、要因分析法を用いた将来 CO₂ 排出量などの推計に関する既往研究は、国全体としてのエネルギー需要予測に関する分析が一例あるのみである。また、これらの既往研究における要因分析の中で、自動車交通の CO₂ 排出量やエネルギー消費量の変動に関する要因分析は、時系列分析に限られている。

1.2. 研究目的

以上の背景をもとに、本研究では、まず、既往要因分析法の課題を整理する。そして、既往要因分析法の主な課題である交絡項の変動要因への帰属と配分方法を修正した完全要因分析法を構築する。構築した要因分析法については、要因分析法としての完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から総括的評価をおこなう。そのうえで、構築した修正完全要因分析法を用いて、自動車交通の CO₂ 排出量変動に関する時系列分析、国/地域間分析、および、将来 CO₂ 排出量の推計をおこなう。各要因分析においては、CO₂ 排出量変動の主な要因を定量的に示す。さらに、MLI 法と既往要因分析法による分析結果を比較し、MLI 法の理論的特徴と既往要因分析法による要因分析結果との差を検討する。

構築した要因分析法を用いた分析では、①日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の時系列変動分析、②日本、米国、英国間の乗用車 CO₂ 排出量の国/地域間変動分析、③日本の自家用乗用車の将来 CO₂ 排出量の推計、を対象とする。

なお、本研究の対象とする既往要因分析法は、現在数多くの要因分析に用いられている代表的な要因分析法である、ラスパイレス型簡易要因分析法の Laspeyres Index (LI) 法、ラスパイレス型完全要因分析法の Refined Laspeyres Index (RLI) 法、ディビシア型完全要因分析法の Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) 法とする。また、LMDI 法は加算型 LMDI 法を主な対象とする。

1.3. 論文構成

本研究の論文構成は、下記のとおりである（図 1-1 に全体の構成を示す）。

第 1 章では、本研究の背景、研究目的、および、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、要因分析法に関する既往研究を概観し、要因分析法の位置付けと体系について述べている。そのうえで、要因分析法の適用分野と要因分析法をめぐるこれまでの議論と課題について整理している。

第 3 章では、既往研究における既往要因分析法を概観している。そのうえで、LI 法、RLI 法、および LMDI 法について説明し、これらの手法の課題を詳述している。

第 4 章では、既往要因分析法の主な課題である交絡項の変動要因への帰属と配分方法を修正した完全要因分析法 (Modified Laspeyres Index Method : MLI 法) を構築している。そのうえで、構築した要因分析法と既往要因分析法を例示的な問題に適用し、要因分析法の違いが分析結果に与える影響を定量的に明らかにしている。以上の結果を踏まえ、完全性、時点逆転性、ゼロ値対

応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、MLI 法と既往要因分析法の総括的評価をおこなっている。

第 5 章から第 7 章では、第 4 章で構築した MLI 法を用いて、自動車交通の CO₂ 排出量変動に関する時系列分析、国/地域間分析、および、将来 CO₂ 排出量の推計をおこなっている。さらに、各要因分析において、MLI 法による分析結果を既往要因分析法による分析結果と比較している。

まず、第 5 章では、1990 年から 2008 年の日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の時系列変動要因分析をおこない、全国および地域別の CO₂ 排出量変動の主要因を定量的に示している。また、軽乗用車の普及による CO₂ 排出量削減効果を試算している。さらに、同じデータを用いて、MLI 法による分析結果と RLI 法と LMDI 法による分析結果を比較し、分析手法の違いが分析結果に与える影響を定量的に明らかにしている。

第 6 章では、国/地域間分析をおこなっている。2000 年と 2006 年における日本、米国、英国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の変動要因分析をおこない、日本、米国、英国間の乗用車 CO₂ 排出量の差の主要因を定量的に示している。また、2000 年から 2006 年にかけての各国間の乗用車 CO₂ 排出量の差の変動についても検討している。さらに、MLI 法と LI 法、RLI 法、および、LMDI 法による要因分析をおこない、MLI 法と既往要因分析法による分析結果の違いを検討している。

第 7 章では、要因分析法を用いて 2020 年までの日本の自家用乗用車 CO₂ 排出量の推計と主要変動要因を定量的に示している。CO₂ 排出量の推計にあたっては、MLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計方法 (Modified Laspeyres Index for Projection : PMLI 法) を構築している。また、PMLI 法による要因分析結果と、RLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計方法による要因分析結果とを比較し、PMLI 法の理論的な特徴と RLI 法を応用した推計方法による要因分析結果との差に関して考察している。

最後に、第 8 章では、本研究で得られた知見を研究成果として総括し、今後の研究の課題について論じている。

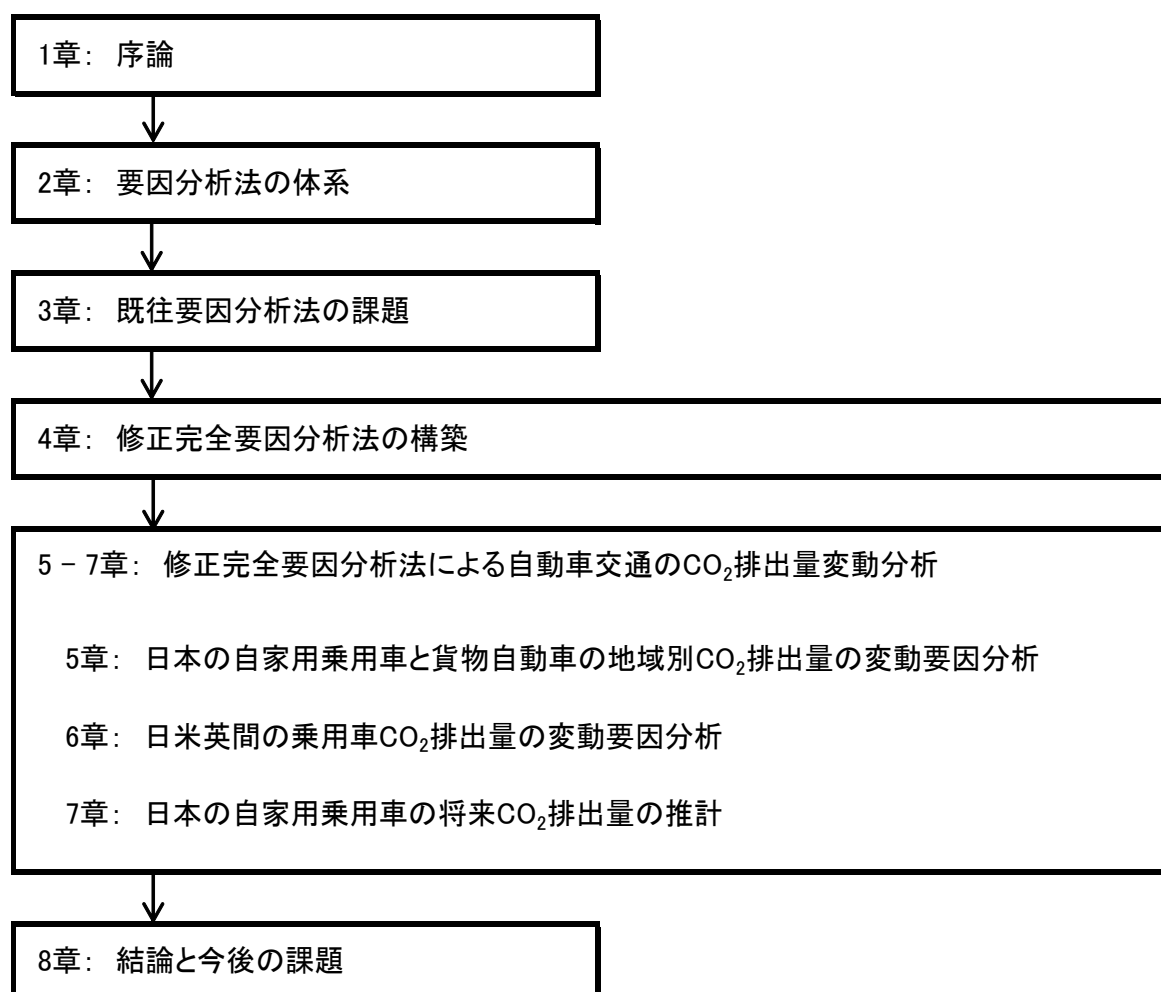


図 1-1. 論文構成

2. 要因分析法の体系

2.1. 緒言

本章では、要因分析法に関する既往研究を概観し、要因分析法の位置付けと体系について述べる。さらに、要因分析法の適用分野について述べる。

要因分析法は、経済指数理論から派生している。これまで数多くの要因分析法が提唱されている。その中で代表的な要因分析法は、LI 法、RLI 法、LMDI 法である。要因分析法は、エネルギー、環境関連部門における CO₂ 排出量やエネルギー需給量などの変動要因分析に数多く用いられている。

2.2. 要因分析法の位置付け

要因分析法は、CO₂ 排出量やエネルギー需給量などの過去および将来の変動量に関連する変動要因の変動量に分解し、各変動要因が変動全体に与える影響を定量的に明らかにし、主な変動要因を特定する手法である。たとえば、乗用車の CO₂ 排出量変動の時系列要因分析は、まず乗用車 CO₂ 排出量に関連する変動要因（たとえば、走行距離、実走行燃費）を選択する。次に、選択した各変動要因の基準年から比較年への変動量を算定する。そして、算定した各変動要因の変動量を用いて要因分析式により、各変動要因の変動が乗用車 CO₂ 排出量の変動全体に与える影響を捉える。要因分析をおこない、過去および将来の CO₂ 排出量変動の推移と各変動要因が CO₂ 排出量変動全体に与える影響を定量的に捉え、主な変動要因を特定することは、運輸部門などの CO₂ 排出量を削減するための効果的な施策の立案に大いに貢献できるものと考えられる。

なお、要因分析法は、マクロレベルの分析を対象にしており、その分析の前提となる式は乗算型の恒等式で表わされる。たとえば、CO₂ 排出量(CO₂)が2変動要因(x, y)によって決定される場合を考える。この場合、CO₂ 排出量は式(2-1)のように示される。

$$CO_2 = x \cdot y \quad (2-1)$$

式(2-1)において、 x 要因が x_1, x_2 要因に分解できる場合($x = x_1 \cdot x_2$)に限り、 x_1, x_2, y の3要因から構成されるCO₂排出量は式(2-2)のように示され、変動要因の数が増えても y 要因の効果は影響を受けない。

$$CO_2 = (x_1 \cdot x_2) \cdot y \quad (2-2)$$

2.3. 要因分析法の体系

2.3.1. 経済指数理論

要因分析法は経済指数理論から派生している。以下では、桜本（1999）などに従い経済指数理論を概観する。

経済指数とは、2 つ以上の経済活動の水準あるいは格差について、特定の状況を基準として比較可能な定量表示をおこなうものである。比較の対象には、異なった時点（時間的指数）、異なった場所（場所的指数）、異なった人的属性（属性的指数）がある。

消費者行動を例に時間的経済指数を説明する。世帯所得は価格と購入数量に分解できる（簡素化のため貯蓄を無視する）。たとえば、財 i の価格（たとえばガソリン価格(p)）が上昇した場合、消費者は、財 i の購入数量(q)を減少させるように行動する（この場合、世帯所得は短期的に一定としている）。この関係は、財 i （ガソリン）の需要曲線として示される（図 2-1）。この個別価格の変動を整合的に集計する指数が価格指数であり、個別購入数量の変動を整合的に集計する指数が数量指数である。

世帯所得の基準年から比較年への変化は、価格指数と数量指数を掛け合わせた金額指数によって示すことができる。経済指数の本質的課題は、基準年から比較年への金額指数の変化を、価格指数と数量指数に分解できる整合的な指数算式を選択することである。

これまで数多くの指数算式が提唱されている。そのなかで代表的な指数算式は、ラスパイレス（Laspeyres）型とディビシア（Divisia）型である。桜本（1999）によれば、最も広く使われている経済指数はラスパイレス型である。ラスパイレス型指数は、消費者物価指数、卸売物価指数、鉱工業生産・出荷・在庫指数などの算定に用いられている。

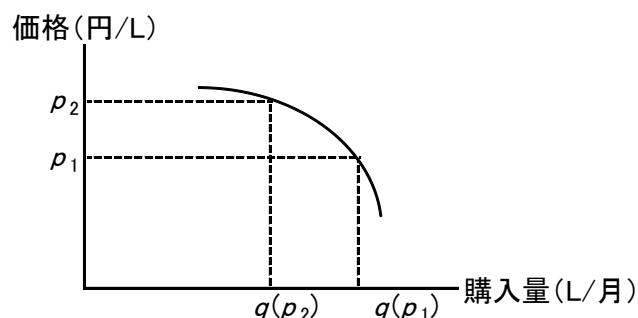


図 2-1. 財 i （ガソリン）の需要曲線

2.3.1.1. ラスパイレス型指数

主なラスパイレス型指数には、ラスパイレス（Laspeyres）指数、パーシェ（Paasche）指数、マーシャル・エッジワース（Marshall Edgeworth）指数、ウォルシュ（Walsh）指数、ドロビシュ（Drobish）指数、フィシャー（Fisher）指数がある。

まず、ラスパイレス型指数のなかで代表的なラスパイレス指数について説明する。価格指数で考えると、比較年におけるラスパイレス価格指数は、個別財の比較年の価格と基準年の購入数量を掛け合わせた数値（金額）を基準年の価格と購入数量を掛け合わせた数値で除した値を求め、それを全ての財にわたり集計したものである。つまり、ラスパイレス価格指数は、基準年と比較年の個別財の価格変化率に、基準年における全ての財に対する個別財の金額ウェイトを固定し、全ての財にわたり集計した指数で、加重算術平均（Weighted Arithmetic Mean）式を意味する。

財の種類を n とし、財 i の価格を p_i 、取引数量を q_i とすると、比較年 (t) における所得 ($y(t)$) は、貯蓄を無視すると、式(2-3)となる。

$$y(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) \cdot q_i(t) \quad (2-3)$$

基準年 (0) から比較年 (t) における、ラスパイレス物価指数 (P^L) と数量指数 (Q^L) は、それぞれ式(2-4)および式(2-5)のようにあたえられる。

$$P^L(0,t) = \frac{\sum p_i(t)q_i(0)}{\sum p_i(0)q_i(0)} = \sum \frac{p_i(t)}{p_i(0)} \cdot \frac{p_i(0)q_i(0)}{\sum p_i(0)q_i(0)} = \sum \frac{p_i(t)}{p_i(0)} \cdot w_i(0) \quad (2-4)$$

$$Q^L(0,t) = \frac{\sum p_i(0)q_i(t)}{\sum p_i(0)q_i(0)} = \sum \frac{q_i(t)}{q_i(0)} \cdot \frac{p_i(0)q_i(0)}{\sum p_i(0)q_i(0)} = \sum \frac{q_i(t)}{q_i(0)} \cdot w_i(0) \quad (2-5)$$

ここで、 $w_i(0) = \frac{p_i(0)q_i(0)}{\sum p_i(0)q_i(0)}$ とし、基準年における個別財の金額ウェイトを示す。

次に、パーシェ（Paasche）指数について説明する。ラスパイレス指数が基準年をベースにした指数であるのに対して、パーシェ指数は比較年をベースにし、比較年における個別財の金額ウェイトを分母においている（式(2-6)、式(2-7)）。つまり、ラスパイレス指数が、式(2-5)および式(2-6)で示すように、基準年における全ての財の金額をベースとしているのに対して、パーシェ指数における価格指数は、比較年における全ての財の金額を分子に置き、個別財の基準年の価格と比較年の購入数量を掛け合わせた数値を全ての財について集計したものを分母に置いた、加重調和平均（Weighted Harmonic Mean）式である。

$$P^p(0,t) = \frac{\sum p_i(t)q_i(t)}{\sum p_i(0)q_i(t)} = \frac{\sum p_i(t)q_i(t)}{\sum \frac{p_i(0)}{p_i(t)} \cdot p_i(t)q_i(t)} = \frac{1}{\sum \frac{p_i(0)}{p_i(t)} w_i(t)} \quad (2-6)$$

$$Q^p(0,t) = \frac{\sum p_i(t)q_i(t)}{\sum p_i(t)q_i(0)} = \frac{\sum p_i(t)q_i(t)}{\sum \frac{q_i(0)}{q_i(t)} \cdot p_i(t)q_i(t)} = \frac{1}{\sum \frac{q_i(0)}{q_i(t)} w_i(t)} \quad (2-7)$$

ここで、 $w_i(t) = \frac{p_i(t)q_i(t)}{\sum p_i(t)q_i(t)}$ とし、比較年における個別財の金額ウェイトを示す。

マーシャル・エッジワース (Marshall Edgeworth) 指数は、基準年と比較年における価格と数量のそれぞれの算術平均値を金額ウェイトとしている (式(2-8)、式(2-9))。

$$P^{ME}(0,t) = \frac{\sum p_i(t) \frac{q_i(0) + q_i(t)}{2}}{\sum p_i(0) \frac{q_i(0) + q_i(t)}{2}} \quad (2-8)$$

$$Q^{ME}(0,t) = \frac{\sum q_i(t) \frac{p_i(0) + p_i(t)}{2}}{\sum q_i(0) \frac{p_i(0) + p_i(t)}{2}} \quad (2-9)$$

また、ウォルシュ (Walsh) 指数は、基準年と比較年における価格と数量のそれぞれの幾何平均値を金額ウェイトとしている (式(2-10)、式(2-11))。

$$P^w(0,t) = \frac{\sum p_i(t) \sqrt{q_i(0) \cdot q_i(t)}}{\sum p_i(0) \sqrt{q_i(0) \cdot q_i(t)}} \quad (2-10)$$

$$Q^w(0,t) = \frac{\sum q_i(t) \sqrt{p_i(0) \cdot p_i(t)}}{\sum q_i(0) \sqrt{p_i(0) \cdot p_i(t)}} \quad (2-11)$$

一方、ドロビシュ (Drobish) 指数は、ラスパレス (Laspeyres) 指数とパーシェ (Paasche) 指数の算術平均をとっている (式(2-12)、式(2-13))。

$$P^D(0,t) = \frac{P^L(0,t) + P^P(0,t)}{2} \quad (2-12)$$

$$Q^D(0,t) = \frac{Q^L(0,t) + Q^P(0,t)}{2} \quad (2-13)$$

また、フィシャー（Fisher）指数は、ラスパレス（Laspeyres）指数とパーシェ（Paasche）指数の幾何平均をとっている（式(2-14)、式(2-15））。

$$P^F(0,t) = \sqrt{P^L(0,t) \cdot P^P(0,t)} \quad (2-14)$$

$$Q^F(0,t) = \sqrt{Q^L(0,t) \cdot Q^P(0,t)} \quad (2-15)$$

2.3.1.2. デイビシア型指数

デイビシア型の価格指数は、ある時点の個別財の価格変化率と金額ウェイトを掛け合わせた数値を基準年から比較年まで線積分した指数である。デイビシア型の価格指数は、価格と購入数量が時間に関して連続でなければ測定できない。しかしながら、現実の経済データは離散型でしか得られない。そのため、実際のデイビシア型指数の算定にあたっては、離散近似という形で対応している。

デイビシア物価指数（ P^D ）と数量指数（ Q^D ）は、それぞれ式(2-21)および式(2-22)のようにあたえられる。

まず、式(2-3)を時間に関して微分すると式(2-16)のようになる。

$$\frac{dy(t)}{dt} = \sum p_i(t) \cdot \frac{dq_i(t)}{dt} + \sum q_i(t) \cdot \frac{dp_i(t)}{dt} \quad (2-16)$$

式(2-16)の両辺を $y(t)$ で割ると式(2-17)のようになる。

$$\frac{1}{y(t)} \frac{dy(t)}{dt} = \sum \frac{p_i(t) \cdot q_i(t) \cdot dq_i(t)}{\sum p_i(t) \cdot q_i(t) \cdot q_i(t) \cdot dt} + \sum \frac{p_i(t) \cdot q_i(t) \cdot dp_i(t)}{\sum p_i(t) \cdot q_i(t) \cdot p_i(t) \cdot dt} = \sum w_i(t) \cdot \frac{d \ln q_i(t)}{dt} + \sum w_i(t) \cdot \frac{d \ln p_i(t)}{dt} \quad (2-17)$$

$$\text{ただし、} w_i(t) = \frac{p_i(t) q_i(t)}{\sum p_i(t) q_i(t)}$$

式(2-17)の右辺第一項は数量変化の所得におよぼす効果、第二項は物価変化の所得におよぼす効果に関係している。

ここで、比較年(t)の物価を $P(t)$ 、取引数量を $Q(t)$ とすると、所得($y(t)$)は、式(2-3)と同様に式(2-18)のようになる。

$$y(t) = P(t)Q(t) \quad (2-18)$$

式(2-18)を時間に関して微分すると式(2-19)のようになる。

$$\frac{dy(t)}{dt} = P(t) \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) \frac{dP(t)}{dt} \quad (2-19)$$

比較年の物価 $P(t)$ と数量 $Q(t)$ を $y(t)$ で割ると式(2-20)のようになる。

$$\frac{1}{y(t)} \frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} = \frac{d \ln Q(t)}{dt} + \frac{d \ln P(t)}{dt} \quad (2-20)$$

式(2-17)および式(2-20)を時間に関して積分し結合する。その結果、ディビジア物価指数(P^D)と数量指数(Q^D)は、それぞれ式(2-21)および式(2-22)のようにあたえられる。

$$P^D = \exp \left(\int \sum w_i(t) \cdot \frac{d \ln p_i(t)}{dt} \right) \quad (2-21)$$

$$Q^D = \exp \left(\int \sum w_i(t) \cdot \frac{d \ln q_i(t)}{dt} \right) \quad (2-22)$$

$$\text{ただし、} w_i(t) = \frac{p_i(t)q_i(t)}{\sum p_i(t)q_i(t)}$$

2.3.2. 既往要因分析法

エネルギーや環境関連部門において、数多くの要因分析法が提唱されている（表 2-1）。

Ang and Zhang (2000) によれば、1980 年代半ば以前の要因分析法は、簡素で直観的なものであった。当初、目標年における部門別産業生産量の変動（Structural Change）は、基準年における全産業部門に対する各部門のエネルギー強度（GDP あたりのエネルギー消費量）の割合が変化しないものとして算出された。1980 年代後半になると、ディビジア型指数算式とラスパイレステ型指数算式を使った方法論的な要因分析法が提唱された。さらに、1990 年代になると、産業部門のエネルギー需要の分析を目的とする、一般化された要因分析法を探索する研究がなされた。そ

の結果、これまでに数多くの要因分析法が提唱されている。

まず、要因分析法は、前節で説明した経済指数であるラスパイレズ型とディビシア型に大別できる。さらに、両要因分析法は、簡易要因分析法と完全要因分析法に分類できる。簡易要因分析法は、複数変動要因の同時変化による変動量を示す交絡項を変動要因に帰属、配分しないで残留項として各変動要因とは別途に計上する。一方、完全要因分析法は、交絡項を変動要因と別途に計上することなく、各変動要因に帰属、配分させる。この交絡項の帰属と配分方法に関する考え方の違いによって、数多くの要因分析法が提唱されている。

さらに、要因分析法は、加算型 (Additive) と乗算型 (Multiplicative) に分類できる。基準年 (0) から比較年 (t) において、CO₂ 排出量 (CO₂) が CO₂⁰ から CO₂^t に変動したとする。この場合、加算型による CO₂ 排出量の変動は式(2-23)のように示され、乗算型は式(2-24)のように示される。

$$\Delta CO_2 = CO_2^t - CO_2^0 \quad (2-23)$$

$$D = \frac{CO_2^t}{CO_2^0} \quad (2-24)$$

Ang et al. (2003) は、「加算型による要因分析結果は絶対変化量を示す。したがって、加算型要因分析法は、分析結果の理解と解釈を容易にする。一方、乗算型による要因分析結果は相対比率を示す。したがって、乗算型要因分析法は簡潔な手法である。どちらの手法を用いるかについては、分析で要求されている指標（絶対変化量なのか相対比率なのか）による」と指摘している。

現在、運輸部門を含むエネルギー、環境関連部門で広く採用されている要因分析法は、ラスパイレズ型簡易要因分析法の Laspeyres Index Method (LI 法)、ラスパイレズ型完全要因分析法の Refined Laspeyres Index Method (RLI 法) とディビシア型完全要因分析法の Logarithmic Mean Divisia Index I Method (LMDI 法) である。

Sun (1998) は、“jointly created and equally distributed” principle という考えをもとに RLI 法を提唱した。RLI 法では、交絡項のなかで同時変化するすべての要因項に、交絡項を均等配分する。一方、Ang et al. (1998) と Ang and Liu (2001) は、対数平均値を各要因の重み付けにした、線形積分関数の離散近似式を用いた加算型 LMDI 法と乗算型 LMDI 法をそれぞれ提唱した。

LI 法は、RLI 法および LMDI 法ほど多くはないが、エネルギー需給量や CO₂ 排出量の変動要因分析に採用されている（たとえば、IEA (2004) ; IAEA (2005) ; 環境省 (2007)）。一方、RLI 法と LMDI 法は、エネルギー需給量や CO₂ 排出量の変動を分析する多くの既往研究で採用されている（たとえば、RLI 法については、Sun (2000) ; Lise (2006) ; Ebohon and Ikeme (2006) ; Steenhof (2007)）；LMDI 法については、Ang (2005) ; Wang et al. (2005) ; Lee and Oh (2006) ; Hatzigeorgiou et al. (2008)）。さらに、RLI 法と LMDI 法は、運輸部門における CO₂ 排出量の削減施策の立案に役立つ手法として採用されている（たとえば、環境省 (2001) ; 経済産業省 (2004) ; Papagiannaki and Diakoulaki (2009)）。

2.3.3. 要因分析

要因分析法を用いたCO₂排出量やエネルギー需給量などの変動の要因分析には、いくつかの方法がある（図 2-2）。それらの方法は、時系列分析（Chronological Decomposition）、国/地域間分析（Cross-Country/Regional Decomposition）、および、将来CO₂排出量などの推計である。

時系列分析は、特定の国や地域において、特定の期間におけるCO₂排出量などの変動要因の影響を定量的に把握する。一方、国/地域間分析は、特定の年における、国や地域間のCO₂排出量などの差の原因となる変動要因の影響を定量的に把握する。さらに、要因分析は、過去のCO₂排出量などの変動要因分析だけでなく、将来のCO₂排出量などの推計とその主な変動要因を定量的に示すことができる。

時系列分析には、直接法（Period-Wise Decomposition）と間接法（Time-Series Decomposition）がある。直接法は基準年と比較年の2時点のデータを用いて要因分析をおこなう。一方、間接法は基準年から比較年にわたる各年の要因の変動を積み上げる。沈（2001）、日本エネルギー経済研究所（2001）によれば、直接法と間接法で求めた結果はそれぞれ違う意味を持っている。直接法は、基準年と比較年の2時点間を対象に変化要因を求めている。一方、各年の要因の変動を積み上げる間接法は、検討期間内の経過を対象にしている。

表 2-1. 既往要因分析法

ラスパイレス型要因分析法	ディビジア型要因分析法	その他の要因分析法
Laspeyres Index ^{(a)(m)} (Laspeyres (1871))	Arithmetic Mean Divisia Index (a)(m)	Stuvel Index ^{(a)(m)} (Stuvel (1989))
Refined Laspeyres Index ^(a) (Sun (1998))	(Boyd et al. (1988))	Mean Rate of Change Index ^(a) (Chung and Rhee (2001))
Paasche Index ^{(a)(m)} (Paasche (1874))	Logarithmic Mean Divisia Index I (a)(m)	
Marshall Edgeworth Index (Ang (2004))	(Additive: Ang et al. (1998)) (Multiplicative: Ang and Liu (2001))	
Walsh Index ^{(a)(m)} (Walsh (1921))	Logarithmic Mean Divisia Index II ^{(a)(m)}	
Fisher Index ^(m) (Ang et al. (2002))	(Sato (1976), Varia (1976))	
Fisher Modified Index ^(m) (Ang et al. (2002))		
Drobish Index ^(m) (Drobish (1871))		

(a) : 加算型要因分析法

(m) : 乗算型要因分析法

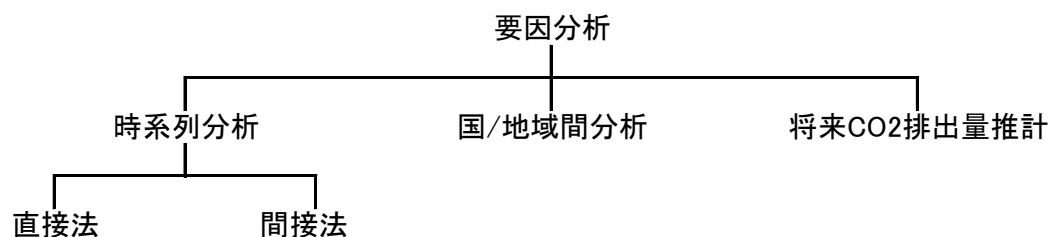


図 2-2. 要因分析の体系

2.4. 要因分析法の適用分野

要因分析法は、CO₂ 排出量やエネルギー消費量の変動、ならびに、各変動要因が変動全体に与える影響を定量的に明らかにし、CO₂ 排出量やエネルギー消費量変動の主な変動要因を示すことができる。そのため、エネルギーや環境関連分野などのマクロレベルの要因分析において広く用いられている。さらに、要因分析法は、CO₂ 排出量やエネルギー需給量などの将来変動の推計に用いることができる。

Ang (2004) は、要因分析法に関する約 200 の既往研究をレビューし、「これまでの研究は、要因分析法を 5 分野に適用している」と指摘している。すなわち、エネルギー需給、温室効果ガス排出量、物流、エネルギー効率、および、国/地域間比較である。

Ang (2004) によれば、5 分野への適用の概要は次のとおりである。

エネルギー需給に関する要因分析は、1980 年代の産業部門のエネルギー需要に関する分析から始まった。1990 年以降は、運輸部門や住宅部門のエネルギー需要の分析、および、発電部門における使用燃料分担などのエネルギー供給の分析に用いられている。これらの分析は、産業構造およびエネルギー強度（GDP あたりのエネルギー消費量）に関連する変動要因の寄与度を定量的に捉えようとした。

温室効果ガス排出量に関する要因分析は、地球温暖化問題が世界的に注目されるようになった 1990 年以降急激に増加している。分析は主にエネルギー関連 CO₂ 排出量に関するものである。この分野ではエネルギー消費量が燃料消費量であたえられるため、データにゼロ値が含まれる場合がある。そのため、分析に使用する要因分析法の選択に注意が必要である。

物流に関する要因分析は、金属、非金属資源に限らず、石油、石炭、天然ガスも含め、広い範囲に適用されている。要因分析では、エネルギー強度に代わり、経済生産高（Economic Output）あたりの資源消費量（Resource Consumption）を主に使用している。

エネルギー効率に関する要因分析は、エネルギー消費量からエネルギー強度の変動の影響を特定するために用いられている。米国、カナダ、ニュージーランド、欧州を含む多くの先進国は、それぞれの国におけるエネルギー効率の達成目標を定め、要因分析法を用いて達成目標に対する進捗度を確認している。同時に、エネルギー効率変動の要因を特定している。

国/地域間比較に関する要因分析は、2 国間あるいは 2 地域間における CO₂ 排出量やエネルギー需給量などの差の原因となる要因を定量的に把握するために用いられている。しかしながら、国/地域間要因分析は、国/地域全体としての CO₂ 排出量に関する既往研究が数例みられるだけである（Sun (2000) ; Ang and Zhang (1999) ; Zhang and Ang (2001) ; Lee and Oh (2006)）。

以上の 5 分野への要因分析法の適用に加えて、要因分析法は CO₂ 排出量やエネルギー需給量などの将来変動の推計に用いることができる。しかしながら、既往研究は、ほとんど過去のエネルギー需給や CO₂ 排出量などの変動要因分析に限られている。要因分析法を用いた将来 CO₂ 排出量などの推計に関する既往研究は、国全体としてのエネルギー需要予測に関する分析が一例あるのみである（Sun (2001)）。さらに、運輸部門の CO₂ 排出量やエネルギー消費量の変動に関する要因分析は、時系列分析に限定されている。

2.5. 結語

本章では、要因分析法に関する既往研究を概観し、要因分析法の位置付けと体系、および、要因分析法の適用分野について整理した。

要因分析法は、経済指数理論から派生しており、CO₂ 排出量やエネルギー需給量などの変動に対するマクロレベルの分析を対象にしている。その分析の前提となる式は、乗算型の恒等式で表わされる。これまで、要因分析法は数多く提唱され、その大多数はラスパイレス型とディビシア型要因分析法に大別できる。さらに、これらの分析法は、交絡項を分解しないで各変動要因と別途に計上する簡易要因分析法と交絡項を関連要因に帰属、配分させる完全要因分析法に分類できる。代表的な簡易要因分析法は、ラスパイレス要因分析法 (Laspeyres Index Method : LI 法) である。一方、代表的な完全要因分析法は、リファインドラスパイレス要因分析法 (Refined Laspeyres Index Method : RLI 法) と対数平均ディビシア要因分析法 (Logarithmic Mean Divisia Index Method : LMDI 法) である。

要因分析には、時系列分析、国/地域間分析、将来 CO₂ 排出量などの推計がある。時系列分析は、さらに直接法と間接法に分類できる。要因分析法は、エネルギー需給、温室効果ガス排出量、物流、エネルギー効率、および、国/地域間の変動分析に用いられている。しかしながら、既往研究における要因分析は、ほとんど過去のエネルギー需給や CO₂ 排出量などの時系列分析に限られている。

3. 既往要因分析法の課題

3.1. 緒言

本章では、既往研究における既往要因分析法の課題を整理する。LI 法、RLI 法、および、LMDI 法の概要を説明し、既往研究において指摘されている課題を整理する。そのうえで、本研究で明らかになった課題を詳述する。

要因分析法は、現在、エネルギー、環境関連部門の CO₂ 排出量やエネルギー消費量の要因分析に広く採用されている。しかしながら、既往要因分析法には、交絡項を関連する変動要因へ帰属させ、配分する方法に関して、いくつかの課題がある。そして、これらの課題に適切に対応した要因分析法はこれまでのところ確立されるに至っていない状況にある。

なお、各要因分析法の説明においては、CO₂ 排出量(CO₂)が 2 変動要因(x, y)によって決定される場合を例としてとりあげる。たとえば、乗用車の CO₂ 排出量 (ton-CO₂) が、走行距離 (km) と実走行燃費の逆数 (L/km) によって決定される場合である。なお、CO₂ 排出量の算定にあたり、CO₂ 排出係数 (ton-CO₂/L) は一定としている。

3.2. 要因分析法に係わる課題の整理

本節では、既往研究における既往要因分析法に係わる課題の整理をおこなう。なお、LI 法、RLI 法、および、LMDI 法の既往研究において指摘されている課題の詳細は、次節以降で述べる。

前章で述べたとおり、要因分析法は、エネルギー、環境関連部門における CO₂ 排出量やエネルギー需給量の過去の変動に関する要因分析に広く採用されている。しかしながら、既往研究で提唱された要因分析法には、交絡項の変動要因への帰属と配分方法に関していくつかの課題がある。

さらに、既往研究は、分析に採用した要因分析法についての検討を十分におこなっていない。Ang (2004) は、主要要因分析法をレビューした結果、「各要因分析法には一長一短がある。しかしながら、要因分析をおこなっている多くの既往研究は、採用した要因分析法を唯一の要因分析法と考えている。つまり、他の要因分析法が適用できるか十分な検討をおこなわず、採用した要因分析法の選択根拠について十分な説明をしていない」と指摘している。

LI 法に代表される簡易要因分析法は、交絡項を関連変動要因に帰属、配分しないで別途計上する。そのため、変動要因が大きく変動する場合、別途計上される交絡項が大きくなる。その結果、各要因の分析結果に無視できない影響を与える。多くの既往研究が、簡易要因分析法の分析結果の信頼性、正確性に関して、疑問を投げかけている（たとえば、沈 (2001) ; 日本エネルギー経済研究所 (2001) ; Ang and Zhang (2000)）。

この簡易要因分析法の交絡項の問題を解決するために、Sun (1998) は、ラスパイレス型完全要因分析法である RLI 法を提唱した。一方、Ang et al. (1998) と Ang and Liu (2001) は、ディビシア型完全要因分析法である加算型 LMDI 法と乗算型 LMDI 法をそれぞれ提唱した。多くの既往研究は、既往要因分析法の中で RLI 法と LMDI 法を理論的根拠、分析の簡便さ、信頼性などの観点から、推奨できる要因分析法であると評価している。

しかしながら、RLI 法と LMDI 法についても、研究者や政策立案者などの間で、分析の簡便さや分析結果に対する解釈の容易さなどについて多くの議論がある。Ang (2004) は、理論的根拠、

分析の簡便さ、分析結果に対する解釈の容易さから LMDI 法を推奨している。また、Papagiannaki and Diakoulaki (2009) は、LMDI 法を理論的根拠のある要因分析法であると評価し、これを用いて乗用車の CO₂ 排出量の要因分析をおこなっている。一方、Ang (2004) は、統計データに負の数値が含まれている場合、RLI 法を推奨している。なぜなら、対数線形積分関数である LMDI 法は、負の数値に対して対応できないためである。同時に、RLI 法に対しては、変動要因の数が 3 以上の場合、分析が複雑になることも指摘している。Steenhof (2007) は、分析結果に対する解釈の容易さ、分析の簡便さなどの理由で、ディビシア型よりラスパイレス型要因分析法を推奨し、中国の電力部門の CO₂ 排出量の時系列分析にラスパイレス型要因分析法を採用している。また、Ebohon and Ikeme (2006) は、アフリカ諸国の CO₂ 排出強度 (CO₂ Emission Intensity : GDP あたりの CO₂ 排出量) の時系列要因分析にあたり、統計データにゼロの数値が含まれている理由から、RLI 法を採用している。

3.3. ラスパイレス型簡易要因分析法 (LI 法)

3.3.1. LI 法を用いた既往要因分析の概観

ラスパイレス型簡易要因分析法である LI 法は、RLI 法および LMDI 法ほど多くはないが、CO₂ 排出量やエネルギー需給量の変動要因分析に用いられている。

IEA (2004) は、LI 法をベースにした要因分析モデルを用いて、1973 年から 2003 年における OECD 諸国のエネルギー効率、経済構造、所得、および、ライフスタイルの変動がエネルギー消費量や CO₂ 排出量の変動に与えた影響を時系列的に分析している。

IAEA (2005) は、エネルギー消費の持続可能性と将来予測のために、部門別に Energy Indicators for Sustainable Development (EISD) を示し、EISD を変動要因とし LI 法をベースにした IEA (2004) 要因分析モデルによるエネルギー強度の変動要因分析方法を例示している。しかしながら、変動要因と別途に計上する交絡項は相対的に微小であるとして、交絡項の大きさや交絡項が分析結果に与える影響については検討していない。

また、環境省 (2007) は、「地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン」の中で、エネルギー起源 CO₂ 排出量の変動を対象とした LI 法による要因分析手法を例示している。このガイドラインは、LI 法について、各変動要因の変動が CO₂ 排出量全体の変動に与える影響を定量的に評価できる分析方法であると解説している。しかしながら、変動要因と別途に計上する交絡項は相対的に微小であるとして、IAEA (2005) と同様に、交絡項の大きさや交絡項が分析結果に与える影響については検討していない。

3.3.2. Laspeyres Index (LI 法)

LI 法の特徴は、複数変動要因の同時変化による変動量を示す交絡項を関連変動要因に帰属、配分しないで残し、各変動要因と別途に計上することである。

2 変動要因 (x, y) の場合、CO₂ 排出量 (CO_2) は以下の式で示される。

$$CO_2 = xy \quad (3-1)$$

基準年(0)から比較年(t)の期間に変動する CO₂ 排出量の変動量(ΔCO_2)は、次式で示される。

$$\begin{aligned} \Delta CO_2 &= CO_2^t - CO_2^0 = x^t y^t - x^0 y^0 = (x^t - x^0) y^0 + x^0 (y^t - y^0) + (x^t - x^0)(y^t - y^0) \\ &= \Delta xy^0 + x^0 \Delta y + \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (3-2)$$

式(3-2)で、 Δxy^0 と $x^0 \Delta y$ は、それぞれ x と y 要因の CO₂ 排出量の変動分($\Delta CO_{2x}, \Delta CO_{2y}$)を示し(式(3-3)、式(3-4))、 $\Delta x \Delta y$ は、 x 要因と y 要因の同時変化による変動分である交絡項を示している(図 3-1)。

$$\Delta CO_{2x} = \Delta xy^0 \quad (3-3)$$

$$\Delta CO_{2y} = x^0 \Delta y \quad (3-4)$$

3.3.3. LI 法の課題

簡易要因分析法である LI 法は、交絡項を関連変動要因に帰属、配分しないで残留項として各変動要因と別途に計上し、交絡項の各変動要因に与える影響を考慮しない。LI 法の課題は、交絡項を残留項として変動要因と別途に計上することによって、分析結果に無視できない影響を与えることである。

要因分析では、変動要因が大きく変動する場合、別途計上される交絡項が大きくなる。したがって、交絡項を変動要因に帰属、配分せず別途に計上して考慮しないことは、各変動要因の分析

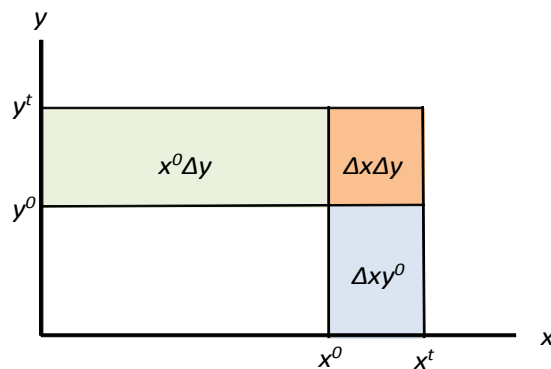


図 3-1. LI 法の概念図

結果に無視できない影響を与え、分析結果の正確な解釈を困難なものにする。この問題は、特に国/地域間の要因分析で顕著となる。なぜなら、国/地域間における GDP、人口、乗用車保有台数などの変動要因の差が大きい場合が多い。そのため、別計上される交絡項は、非常に大きくなるからである。

多くの既往研究が、LI 法による要因分析結果に疑問を投げかけている。

Ang and Liu (2007) は、LI 法をベースにした IEA (2004) の要因分析モデルを用いて、米国の製造業におけるエネルギー消費量の変動要因分析をおこなっている。その中で、彼らは、「LI 法による要因分析では、変動要因と別途に計上される交絡項が大きくなり、分析結果に重大な影響をおよぼしている」と指摘している。さらに、「LI 法による要因分析は分析結果の解釈に疑問が残るため、LI 法は、はたして適切な要因分析法であるのか」という疑問を投げかけている。

Ang (2004) は、要因分析法の体系を整理し、LI 法、RLI 法、および、LMDI 法を含め代表的な要因分析法をレビューし、例示的な要因分析をおこなうことによって、各要因分析法による分析結果の違いを定量的に示している。その結果、Ang (2004) は、「LI 法は大きな交絡項を残留項として残すため、要因分析法として推奨することは難しい」と評価している。

さらに、沈 (2001) は、1973 年から 1998 年の日本のエネルギー消費量の変動を、LI 法と完全要因分析法の RLI 法により要因分析をおこない、分析結果を比較している。その結果、沈 (2001) は、「簡易要因分析法は計算上の簡便さが高いため頻繁に利用されている。しかしながら、簡易要因分析法は交絡項が残るため、交絡項が大きい場合、計算結果の信頼性に問題が残る」と指摘している。

3.4. ラスパイレス型完全要因分析法 (RLI 法)

3.4.1. RLI 法を用いた既往要因分析の概観

ラスパイレス型完全要因分析法である RLI 法は、LMDI 法と同じように、エネルギー、環境関連部門の CO₂ 排出量やエネルギー消費量の変動要因分析に数多く採用されている。

環境省 (2001) は、RLI 法を用いて、1990 年から 1998 年のエネルギー転換部門、産業部門、運輸部門、および、民生部門の CO₂ 排出量の変動に関する要因分析をおこなっている。変動要因は、CO₂ 排出原単位 (炭素強度: たとえば、燃料種の転換)、エネルギー消費原単位 (エネルギー強度: たとえば、運輸部門における実走行燃費の変動)、産業構造 (たとえば、輸送分担率の変動)、活動量 (たとえば、総輸送量の変動) である。分析では、2 要因の同時変化分までの交絡項を分解し、それ以上の交絡項を残留項として変動要因と別途に計上している。環境省 (2001) は、その理由として、「3 要因以上の要因分析において、同時変化分を示す交絡項を完全に分解するには、多大な労力を必要とする」と述べている。要因分析の結果、運輸 (旅客) 部門の CO₂ 排出量増加の主な要因は、エネルギー消費原単位の悪化であり、輸送手段別にみると自家用乗用車であると述べている。

Lise (2006) は、RLI 法を用いて、1980 年から 2003 年のトルコの人口あたりの CO₂ 排出量の変動要因分析をおこなっている。変動要因は、経済規模 (人口当たりの GDP)、炭素強度 (エネルギー消費量あたりの CO₂ 排出量)、エネルギー強度 (GDP 当たりのエネルギー消費量)、および、

部門別のGDP構成比である。Lise (2006) は、「要因分析の結果、CO₂排出量増加の主要因は経済規模の拡大であることが示された。炭素強度や産業構造要因はCO₂排出量増加に寄与しているが、それらの影響は小さい。一方、エネルギー強度は、CO₂排出量の減少要因となっているが、その影響も小さい」と述べている。そのうえで、「トルコにおいてCO₂排出量と経済発展のデカップリングがみられない」と論じている。

Ebohon and Ikeme (2006) は、RLI法を用いて、1971年から1998年のアフリカ諸国のGDPあたりのCO₂排出量の変動について要因分析をおこなっている。変動要因は、エネルギー強度（GDPあたりのエネルギー消費量）、炭素強度（エネルギー消費量あたりのCO₂排出量）、GDP比率（地域全体のGDPに対する当該国のGDPの割合）である。「要因分析の結果、GDPあたりのCO₂排出量の変動に影響を与える主要因は、1971年から1981年では炭素強度、1981年から1991年ではエネルギー強度とGDP比率、1991年から1998年では産油国において炭素強度、非産油国においてGDP比率（非産油国）である」と述べている。

3.4.2. Refined Laspeyres Index (RLI) 法

RLI 法の特徴は、交絡項をすべての同時変化する変動要因に均等に配分することである。

2 変動要因 (x, y) の場合、CO₂排出量 (CO₂) および基準年 (0) から比較年 (t) の期間に変動する CO₂ 排出量 (ΔCO_2) は、LI 法の場合と同様に、式(3-1)および式(3-2)で示される。簡易要因分析法である LI 法では、式(3-2)の交絡項 ($\Delta x \Delta y$) を残留項として変動要因と別途に計上しているが、Sun (1998) は、”jointly created and equally distributed” principle という考え方をもとに、この交絡項を同時変化するすべての変動要因に均等に配分させる RLI 法を提唱した (図 3-2)。RLI 法は、2 変動要因が同時変化する場合、交絡項を 1/2 ずつ同時変化する変動要因に均等配分し、3 要因が同時変化する場合、交絡項を 1/3 ずつ同時変化する変動要因に均等配分する。

2 変動要因 (x, y) の場合、基準年 (0) から比較年 (t) の期間に変動する各変動要因 (x, y) の変動量 ($\Delta CO_{2x}, \Delta CO_{2y}$) は、式(3-5)および式(3-6)で示される。

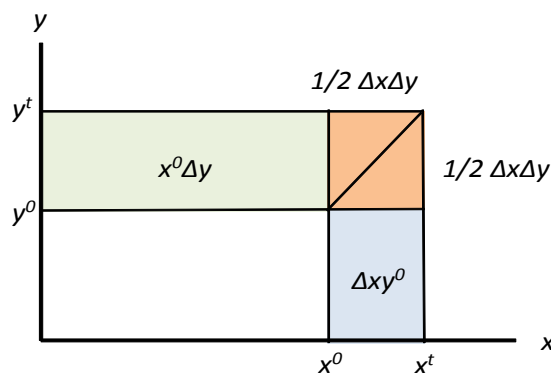


図 3-2. RLI 法の概念図

$$\Delta CO_{2x} = \Delta xy^0 + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \quad (3-5)$$

$$\Delta CO_{2y} = x^0 \Delta y + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \quad (3-6)$$

4 変動要因 (x_1, x_2, x_3, x_4) の場合、たとえば、 x_1 要因の変動量 (ΔCO_{2x_1}) は、以下のように示される。

$$\begin{aligned} \Delta CO_{2x_1} = \Delta x_1 & \left(x_2^0 x_3^0 x_4^0 + \frac{1}{2} \Delta x_2 x_3^0 x_4^0 + \frac{1}{2} x_2^0 \Delta x_3 x_4^0 + \frac{1}{2} x_2^0 x_3^0 \Delta x_4 + \frac{1}{3} \Delta x_2 \Delta x_3 x_4^0 + \frac{1}{3} \Delta x_2 x_3^0 \Delta x_4 \right. \\ & \left. + \frac{1}{3} x_2^0 \Delta x_3 \Delta x_4 + \frac{1}{4} \Delta x_2 \Delta x_3 \Delta x_4 \right) \end{aligned} \quad (3-7)$$

3.4.3. RLI 法の課題

既往研究において、RLI 法の課題に関する議論は少ない。既往研究で指摘されている主な課題は、変動要因の数が 3 以上の場合、交絡項を同時変化する変動要因に配分するための計算が複雑になることである (Ang (2004) ; Ang et al. (2003) ; 環境省 (2001))。

しかしながら、RLI 法には、既往研究で指摘されていない二つの課題がある。それらの課題は、Sun (1998) が提唱した交絡項を同時変化する各変動要因に均等に配分させる、”jointly created and equally distributed” principle に関連している。これらの課題は、要因分析の分析結果に無視できない影響をおよぼす場合があると考えられる。

第一の課題は、交絡項を同時変化する変動要因に帰属させる方法である。基準年 (0) から比較年 (t) の期間に、2 変動要因 (x, y) が共に増加あるいは減少する場合、交絡項 ($\Delta x \Delta y$) は、各要素に帰属させることができる (図 3-3(a),(b))。しかしながら、一方の要因 (x) が増加し、他要因 (y) が減少する場合、図 3-3(c) に示すように、交絡項 ($\Delta x \Delta y$) は、増加要因側 (x) だけに関連して、減少要因側 (y) には関連しない。

一方の要因 (x) が増加し、他要因 (y) が減少する場合、図 3-3(c) において、変動量全体 (ΔCO_2) は、式(3-8)で示される。

$$\Delta CO_2 = x^t y^t - x^0 y^0 = \Delta x y^t + x^0 \Delta y \quad (3-8)$$

ただし、 $\Delta x = x^t - x^0, \Delta y = y^t - y^0$

一方、ラスパイレス型要因分析法において、基準年 (0) から比較年 (t) の期間の x 要因の変動に起因する CO_2 排出変動量 (ΔCO_{2x}^L) は、 x 要因の変動量 (Δx) に、基準年 (0) における y 要因の値 (y^0) を掛けあわせた式(3-9)のように示される (Sun (1998))。また、 y 要因の変動に起因する CO_2 排出変動量 (ΔCO_{2y}^L) は、 y 要因の変動量 (Δy) に、基準年 (0) における x 要因の値 (x^0) を掛けあわせた式

(3-10)のように示される。

$$\Delta CO_{2x}^L = \Delta xy^0 \quad (3-9)$$

$$\Delta CO_{2y}^L = x^0 \Delta y \quad (3-10)$$

式(3-9)、式(3-10)より、ラスパイレス型要因分析法による変動量全体(ΔCO_2^L)は、式(3-11)で示される。

$$\Delta CO_2^L = \Delta CO_{2x}^L + \Delta CO_{2y}^L = \Delta xy^0 + x^0 \Delta y = \Delta x(y^t - \Delta y) + x^0 \Delta y \quad (3-11)$$

したがって、式(3-8)に示す変動量全体(ΔCO_2)は、式(3-11)のラスパイレス型要因分析法による変動量全体(ΔCO_2^L)に交絡項($\Delta x \Delta y$)分を x 要因側（増加要因側）に帰属させた値となり、各要因の変動量は式(3-12)、式(3-13)のように示される。

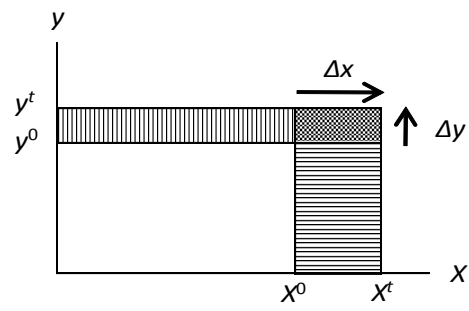
$$\Delta CO_{2x} = \Delta CO_{2x}^L + \Delta x \Delta y = \Delta xy^0 + \Delta x \Delta y \quad (3-12)$$

$$\Delta CO_{2y} = x^0 \Delta y \quad (3-13)$$

なお、3 要因以上の場合も同様に、交絡項の同時変化する増加要因と減少要因が混在する場合は、交絡項を同時変化する増加要因側だけに帰属させる必要がある。

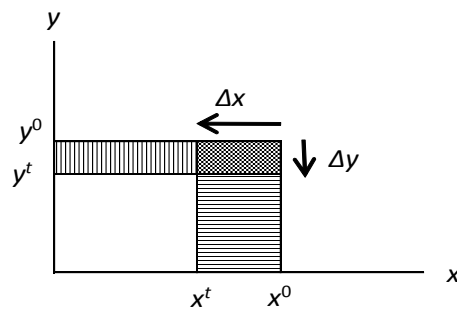
第二の課題は、交絡項の関連要因への配分方法である。複数要因の同時変化分を示す交絡項は、各関連要因の変動量の大きさに応じて、同時変化する各関連要因へ配分されるべきである。同じ交絡項の中で同時変化する変動要因間の変動差が小さい場合は、RLI 法のように交絡項を同時変化する各変動要因に均等に配分しても、要因分析結果に与える影響は小さい（図 3-4(a)）。しかしながら、変動要因間の変動差が大きい場合、RLI 法のように各変動要因の変動の大きさに関係なく交絡項を同時変化する各変動要因に均等に配分することは、分析結果に無視できない影響を与える：変動の小さい要因に対して、本来配分されるべきものより過大に交絡項を配分し、反対に、変動の大きな要因に対して、過小に交絡項を配分する結果となる（図 3-4(b)）。

以上の二つの課題の内、同じ交絡項の中に増加変動要因と減少変動要因が混在する場合、交絡項を変動要因に帰属させる方法の違いが要因分析結果にあたえる影響は大きなものとなると考える。しかしながら、既往研究における要因分析法の検討や要因分析のほとんどは、CO₂ 排出量やエネルギー需給量、および、それらに関連する変動要因が増加傾向にある場合に限られている。そのため、RLI 法を用いた分析の課題についての議論は、これまであまりなかったものと考えられる。しかしながら、今後、CO₂ 排出量やエネルギー消費量の削減対策の進捗にともない、変動要因の内減少に転じる要因が多くなることが予想される。たとえば、日本の自家用乗用車の CO₂



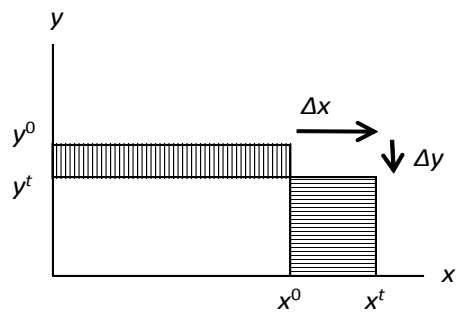
[x : 増加、 y : 増加]
交絡項: x, y 要因に帰属

(a)



[x : 減少、 y : 減少]
交絡項: x, y 要因に帰属

(b)

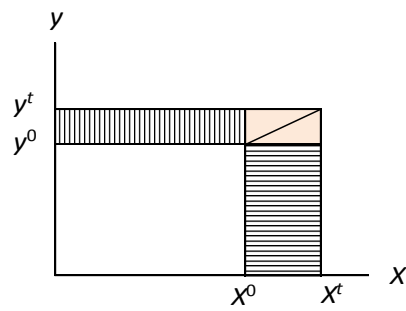


[x : 増加、 y : 減少]
交絡項: x 要因だけに帰属

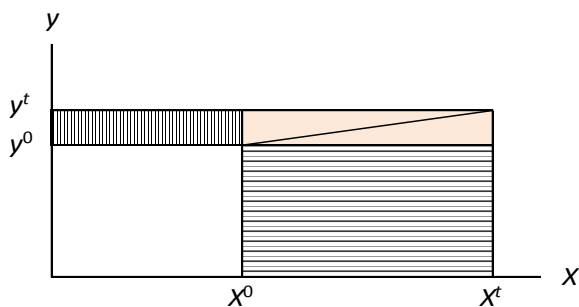
(c)

図 3-3. 交絡項の帰属

: (a) 2 要因共に増加する場合 ; (b) 2 要因共に減少する場合 ; (c) 要因の増減が混在する場合



(a)



(b)

図 3-4. 交絡項の配分

: (a) x 要因と y 要因の変動差が小さい場合 ; (b) x 要因と y 要因の変動差が大きい場合

排出量は、2001 年をピークにそれまでの増加傾向から減少に転じている。その中で、自家用乗用車の保有台数は増加傾向にあるが走行距離は減少傾向にある。この場合、増加要因と減少要因が同じ交絡項の中に混在することになる。

3.5. ディビシヤ型完全要因分析法（LMDI 法）

3.5.1. LMDI 法を用いた既往要因分析の概観

ディビシヤ型完全要因分析法である LMDI 法は、RLI 法と同じように、運輸部門を含めたエネルギー、環境関連部門の CO₂ 排出量やエネルギー需給量の変動要因分析に数多く採用されている。

Lee and Oh (2006) は、LMDI 法を用いて、APEC (Asia Pacific Economic Cooperation) 諸国の CO₂ 排出量の 1980 年から 1998 年の時系列および 1996 年の地域間分析をおこなっている。地域間分析は、国民収入のレベルの違いにより、3 地域に分けておこなっている。変動要因は、CO₂ 排出係数（エネルギー消費量あたりの CO₂ 排出量）、燃料構成（エネルギー消費量全体に占める化石燃料消費量の割合）、エネルギー強度（GDP あたりのエネルギー消費量）、人口一人あ

たりの GDP、人口である。Lee and Oh (2006) は、「時系列分析の結果、CO₂ 排出量増加の主な要因は各国ともに GDP の増加である。エネルギー強度は、先進国において CO₂ 排出量の減少要因となっているが、中国を除く発展途上国において CO₂ 排出量の増加要因となっている。また、燃料構成の変動は、CO₂ 排出量の減少要因となっており、先進国の方が減少に寄与している。一方、地域間分析の結果、地域間の CO₂ 排出量の差の主な要因は、人口一人あたりの GDP である」と述べている。

Hatzigeorgiou et al. (2008) は、LMDI法を用いて、1990年から2002年のギリシャのCO₂排出量の変動要因分析をおこなっている。変動要因は、人口一人あたりのGDP、エネルギー強度（GDPあたりのエネルギー消費量）、燃料構成、人口である。「要因分析の結果、CO₂排出量増加の主な要因は、人口一人あたりのGDPの増加である。エネルギー強度はCO₂排出量の減少要因となっているが、人口はCO₂排出量の増加要因となっている。また、燃料構成の変動による影響は非常に小さい」と述べている。

Wang et al. (2005) は、LMDI法を用いて、1957年から2000年の中国のCO₂排出量の変動要因分析をおこなっている。変動要因は、化石燃料のCO₂排出係数、燃料構成、エネルギー強度、人口一人あたりのGDP、人口である。「要因分析の結果、CO₂排出量増加の主な要因は、人口一人あたりのGDPの増加と人口増加である。エネルギー強度要因は、CO₂排出量の減少に寄与している」と述べている。

3.5.2. Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) 法

LMDI 法の特徴は、対数平均値を各要因の重み付けにした、線形積分関数の離散近似式を用いていることである。

各変動要因を連続関数と仮定し、2 変動要因(x, y)の場合、式(3-1)の CO₂ 排出量(CO_2)を時間に関して微分すると式(3-14)となる。

$$\dot{CO}_2(t) = \dot{x}(t)y(t) + x(t)\dot{y}(t) \quad (3-14)$$

加算型 LMDI 法の場合、 $dx = x \cdot d \ln x$ 、 $dy = y \cdot d \ln y$ より、式(3-10)は、対数線形化によって式(3-15)のようになる。

$$dCO_2 = xy(d \ln x + d \ln y) \quad (3-15)$$

式(3-15)を基準年(0)から比較年(t)にわたり積分すると、基準年(0)から比較年(t)における CO₂ 排出変動量(ΔCO_2)は式(3-16)で示される。

$$\Delta CO_2 = CO_2^t - CO_2^0 = \int_0^t xy \cdot d \ln x + \int_0^t xy \cdot d \ln y \quad (3-16)$$

ディビシヤ指数は、式(3-16)のように線形積分関数のかたちで与えられる。また、線形積分関数

では、基準年(0)から比較年(t)における経路も重要となる。一方、要因分析に使用されるのは、連続データでない。したがって、要因分析をおこなうにあたり、離散近似が必要となる。離散近似をおこなうと、式(3-16)は式(3-17)のように示される。

$$\Delta CO_2 = CO_2^t - CO_2^0 = w(t) \cdot \ln \frac{x^t}{x^0} + w(t) \cdot \ln \frac{y^t}{y^0} \quad (3-17)$$

ここで、 $w(t)$ は、各要因の重み付けを示し、LMDI 法では、基準年(0)から比較年(t)における CO_2 排出変動量(ΔCO_2)の対数平均値($L(CO_2^t, CO_2^0)$)を用いる。その結果、 CO_2 排出量の変動量(ΔCO_2)は式(3-18)のように示される。

$$\Delta CO_2 = CO_2^t - CO_2^0 = L(CO_2^t, CO_2^0) \left(\ln \frac{x^t}{x^0} + \ln \frac{y^t}{y^0} \right) \quad (3-18)$$

ただし、

$$CO_2^t \neq CO_2^0 \text{ の時、 } L(CO_2^t, CO_2^0) = \frac{CO_2^t - CO_2^0}{\ln(CO_2^t / CO_2^0)} \quad (3-19)$$

$$CO_2^t = CO_2^0 \text{ の時、 } L(CO_2^t, CO_2^0) = CO_2^t \quad (3-20)$$

ここで、式(3-19)の $L(CO_2^t, CO_2^0)$ は、基準年(0)と比較年(t)の CO_2 排出量の対数平均値である。また、基準年(0)から比較年(t)において、 CO_2 排出量の変動がない場合、対数平均値の分母の対数はゼロとなるため、対数平均値は式(3-20)のように CO_2^t として与えられる。

こうした考えから、基準年(0)から比較年(t)における、各変動要因(x, y)の CO_2 排出変動量($\Delta CO_{2x}, \Delta CO_{2y}$)は、式(3-21)および式(3-22)のように与えられる。

$$\Delta CO_{2x} = L(CO_2^t, CO_2^0) \ln \frac{x^t}{x^0} \quad (3-21)$$

$$\Delta CO_{2y} = L(CO_2^t, CO_2^0) \ln \frac{y^t}{y^0} \quad (3-22)$$

3.5.3. LMDI 法の課題

Ang (2004) は、理論的根拠、分析の簡便さ、および、分析結果に対する解釈の容易さから LMDI 法の使用を推奨している。さらに、Ang (2005) は、LMDI 法を用いて要因分析するためのガイドダンスをまとめている。しかしながら、既往研究において、LMDI 法に関するいくつかの課題がある。

これらの課題は、LMDI 法が対数関数であることに起因している。LMDI 法は、対数関数であるため、負数、あるいは、ゼロ値のデータが含まれている場合、計算できない (Ang and Zhang (1998))。Ang and Choi (1997) は、LMDI 法を用いた要因分析に使用するデータの中にゼロ値のデータが含まれている場合、そのデータをゼロ値以外のデータ中の最も小さな値よりも 2 桁以上小さな数値に置き換えて計算することを推奨している。なぜなら、ゼロ値のデータを非常に小さな数値に置き換えることによって、対数関数の計算ができるようになり、この置換が分析結果に与える影響を最小限にとどめることができるからである。

しかしながら、Wood and Lenzen (2006) によれば、ゼロ値あるいは非常に小さな数値のデータが多い場合、LMDI 法による要因分析は、分析結果に大きな誤差を発生させる。さらに、Chug and Rhee (2001) によれば、LMDI 法は、ある部門の検討期間にわたる最終需要の割合が増加しても、その部門の排出量が減少を示す場合がある。なぜなら、「LMDI 法は、ゼロに近い小さな値のデータがある場合、大きな負数となる対数関数だからである」と説明している (Chug and Rhee (2001))。

以上の既往研究における課題に加えて、既往研究で指摘されていない課題がある。その課題とは、LI 法およびRLI法の論点と同じく、交絡項の帰属と配分に関するものである。LMDI法は、連続関数であるディビシア指数をもとに対数平均値を各要因の重み付けにした線形積分関数の離散近似式である。Lakshmanan and Han (1997) によれば、ディビシア指数は、微小な変動に対する正確な分析と短期間の離散変動に対して適切な近似をおこなう。したがって、LMDI法においては、複数変動要因の同時変化による変動量を示す交絡項を、微小であり分析結果に与える影響も小さいものとして、考慮していない。しかしながら、直接法による時系列分析では変動の大きな長期的なデータを使う場合がある。さらに、国/地域間分析では、国/地域間の要因の差が大きい場合が多い。したがって、交絡項は無視できないほどの大きさになる場合が多い。

3.6. 結語

本章では、既往要因分析法に関する既往研究を概観し、既往要因分析法の概要を述べた。そのうえで、既往要因分析法における課題について整理した。対象とした要因分析法は、ラスパイレス型簡易要因分析法の LI 法、ラスパイレス型完全要因分析法の RLI 法、および、ディビシア型完全要因分析法の LMDI 法である。

これらの既往要因分析法には、交絡項の変動要因への帰属と配分方法に関していくつかの課題があり、改善すべき点が残されている。

LI 法は、複数変動要因の同時変化による変動量を示す交絡項を分解しないで変動要因とは別途に計上する。LI 法の主な課題は、交絡項を変動要因と別途計上することによって、分析結果に無視できない影響を与えることである。交絡項が大きくなる場合、分析結果に与える影響は大きなものとなる。

一方、RLI 法は、交絡項を交絡項の中で同時変化するすべての変動要因に均等に配分する。RLI 法の主な課題は、増加変動要因と減少変動要因が同じ交絡項の中に混在する場合の交絡項の変動要因への帰属と配分に関するものである。同時変化する増加変動要因と減少変動要因が同じ交絡項の中に混在する場合、交絡項は、減少変動要因に帰属させることなく、増加変動要因だけに帰

属させる必要がある。また、交絡項は、同時変化する変動要因の変動の大きさに応じて、その変動要因へ配分されるべきである。

LMDI法は、対数平均値を各要因の重み付けにした、線形積分関数の離散近似式を用いている。そのため、LMDI法は、複数変動要因の同時変化による変動量を示す交絡項を、微小であり分析結果に与える影響はないものとして考慮していない。しかしながら、要因分析においては、長期的なデータを使う場合や国/地域間分析をおこなう場合、交絡項は無視できないほどの大きさになる場合が多い。

4. 交絡項の帰属・配分を修正した要因分析法の構築

4.1. 緒言

本章では、前章で論じた既往要因分析法の課題を踏まえ、交絡項の帰属と配分方法を修正した要因分析法を構築する。

前章において既往要因分析法を概観して整理した結果、既往研究で提唱された要因分析法には、交絡項の変動要因への帰属と配分方法に関していくつかの課題があることが明らかになった。そこで、本章では、既往要因分析法の課題に適切に対応した完全要因分析法を構築する（4.2 節）。構築する要因分析法は、交絡項を変動要因の変動量に応じて、関連する変動要因に帰属、配分する。そのうえで、構築した要因分析法と既往要因分析法（LI 法、RLI 法、LMDI 法）の算定式を比較し、例示的な要因分析をおこなう（4.3 節）。要因分析結果を比較し、構築した要因分析法と既往要因分析法の理論的特徴、および、要因分析法の違いによる分析結果の差について確認する（4.3 節）。以上の結果を踏まえて、要因分析法の総括的評価をおこなう（4.4 節）。

なお、要因分析法の説明と例示的な要因分析にあたっては、前章と同様に、CO₂ 排出量(CO₂) が 2 変動要因(x, y)によって決定される場合をとりあげる。

4.2. 交絡項の帰属・配分を修正した要因分析法（MLI 法）の構築

構築する要因分析法は、交絡項を変動要因の変動量に応じて、関連する変動要因に帰属、配分する。この修正完全要因分析法は、3.4.3 節の RLI 法における議論をもとに、既往要因分析法の課題に適切に対応した分析法と考えられる。構築した要因分析法の名称を Modified Laspeyres Index Method (MLI 法) とする。

MLI 法は、交絡項を同時変化する変動要因に次のとおり帰属、配分する。

- 同じ交絡項に同時変化する増加変動要因と減少変動要因が混在しない場合（同じ交絡項の中で同時変化する変動要因がすべて増加、あるいは、すべて減少する場合）、交絡項を同時変化する変動要因に帰属させる。
- 同じ交絡項に同時変化する増加変動要因と減少変動要因が混在する場合、交絡項を同時変化する増加変動要因側だけに帰属させ、減少変動要因側に帰属させない。
- 交絡項を同時変化する変動要因に配分する場合、各関連要因の対称変化率（二点間の変動量を期間の初めと終わりの平均値で除した数値）の大きさに比例して配分する。

MLI 法において、基準年(0)から比較年(t)の期間に変動する 2 変動要因の CO₂ 排出変動量($\Delta CO_{2x}, \Delta CO_{2y}$)は、式(4-1)と式(4-2)で示される。ここで、 a, b は、各要因の対称変化率を示す。

$$\Delta CO_{2x} = \Delta x y^0 + \frac{a}{a+b} \Delta x \Delta y \quad (4-1)$$

$$\Delta CO_{2y} = x^0 \Delta y + \frac{b}{a+b} \Delta x \Delta y \quad (4-2)$$

$$a = \frac{\Delta x}{\left(\frac{x^0 + x^t}{2} \right)}, b = \frac{\Delta y}{\left(\frac{y^0 + y^t}{2} \right)} \quad (4-3)$$

ただし、

$\Delta x > 0, \Delta y < 0$ の時、 $b = 0$ 、

$\Delta x < 0, \Delta y > 0$ の時、 $a = 0$ 、

$\Delta x < 0, \Delta y < 0$ の時、 $\frac{a}{a+b}$ を $1 - \frac{a}{a+b}$ 、 $\frac{b}{a+b}$ を $1 - \frac{b}{a+b}$ で置換する。

4変動要因(x_1, x_2, x_3, x_4)の場合、たとえば、 x_1 要因の変動量は、以下のように示される。

$$\begin{aligned} \Delta CO_{2x_1} = \Delta x_1 & \left(x_2^0 x_3^0 x_4^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_2} \Delta x_2 x_3^0 x_4^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_3} x_2^0 \Delta x_3 x_4^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_4} x_2^0 x_3^0 \Delta x_4 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3} \Delta x_2 \Delta x_3 x_4^0 \right. \\ & \left. + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_4} \Delta x_2 x_3^0 \Delta x_4 + \frac{a_1}{a_1 + a_3 + a_4} x_2^0 \Delta x_3 \Delta x_4 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4} \Delta x_2 \Delta x_3 \Delta x_4 \right) \end{aligned} \quad (4-4)$$

ただし、

$$a_i = \frac{\Delta x_i}{\left(\frac{x_i^0 + x_i^t}{2} \right)} \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

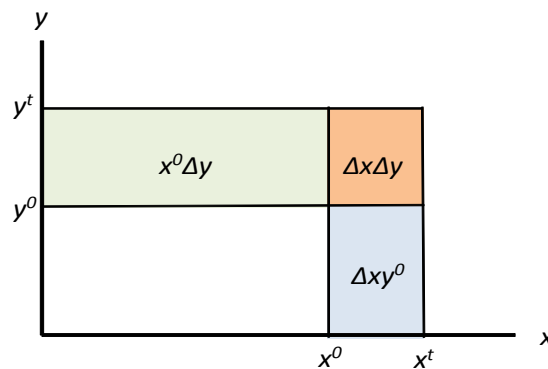


図 4-1. MLI 法の概念図

4.3. 既往要因分析法との比較

本節では、まず、前節で構築した MLI 法の算定式を既往要因分析法（LI 法、RLI 法、LMDI 法）の算定式と比較する。つぎに、各要因分析法を用いて例示的な要因分析をおこなう。各要因分析法による分析結果を比較することによって、MLI 法と既往要因分析法の理論的特徴、および、要因分析法の違いによる分析結果の差について確認する。

4.3.1. 算定式の比較

表 4-1 は、第 3 章で概観した既往要因分析法である LI 法、RLI 法、および、LMDI 法の算定式と、構築した MLI 法の算定式をまとめたものである。

表 4-1 に示すように、MLI 法、LI 法、および、RLI 法は、いずれも離散型分析式であるが、右辺第 2 項の交絡項の変動要因への帰属と配分方法に違いがあることがわかる。LI 法は、交絡項を残留項として別途に計上する。RLI 法は、交絡項を同時変化するすべての変動要因に均等に配分する。LMDI 法は、LI 法、RLI 法と異なり、対数平均値で重み付けをした各要因の対数変化率によって、各変動要因の変動量を算定する。一方、MLI 法は、増加要因と減少要因が同じ交絡項の中に混在する場合、交絡項を増加要因側だけに帰属させる。また、交絡項の同時変化する変動要因の対称変化率の大きさに比例して、交絡項を関連変動要因に配分する。

表 4-1. 要因分析法の違いによる算定式の比較

要因分析法	算定式	条件
LI 法	$\Delta CO_{2x} = \Delta x y^0$ $\Delta CO_{2y} = x^0 \Delta y$	$\Delta x \Delta y$ （交絡項）は、残留項として別途計上し、変動要因に配分しない。
RLI 法	$\Delta CO_{2x} = \Delta x y^0 + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y$ $\Delta CO_{2y} = x^0 \Delta y + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y$	交絡項を同時変化するすべての変動要因に均等に配分する。
LMDI 法	$\Delta CO_{2x} = L(CO_2^t, CO_2^0) \ln \frac{x^t}{x^0}$ $\Delta CO_{2y} = L(CO_2^t, CO_2^0) \ln \frac{y^t}{y^0}$	$CO_2^t \neq CO_2^0$ の時、 $L(CO_2^t, CO_2^0) = \frac{CO_2^t - CO_2^0}{\ln(CO_2^t / CO_2^0)}$ $CO_2^t = CO_2^0$ の時、 $L(CO_2^t, CO_2^0) = CO_2^t$
MLI 法	$\Delta CO_{2x} = \Delta x y^0 + \frac{a}{a+b} \Delta x \Delta y$ $\Delta CO_{2y} = x^0 \Delta y + \frac{b}{a+b} \Delta x \Delta y$	$a = \frac{\Delta x}{\left(\frac{x^0 + x^t}{2}\right)}, b = \frac{\Delta y}{\left(\frac{y^0 + y^t}{2}\right)}$ $\Delta x > 0, \Delta y < 0$ の時、 $b = 0$ 、 $\Delta x < 0, \Delta y > 0$ の時、 $a = 0$ 、 $\Delta x < 0, \Delta y < 0$ の時、 $\frac{a}{a+b}$ を $1 - \frac{a}{a+b}$ 、 $\frac{b}{a+b}$ を $1 - \frac{b}{a+b}$ で置換する。

4.3.2. 例示的な要因分析結果

MLI 法、LI 法、RLI 法、および、LMDI 法を用いて、例示的な要因分析をおこなった結果を表 4-3 および図 4-2 に示す。同じ交絡項に同時変化する増加変動要因と減少変動要因が混在する場合、MLI 法と既往要因分析法による要因分析結果の差は大きなものになる。

表 4-2 は要因分析に使用するデータを示す。本例題の場合、CO₂排出量は、2 変動要因(x, y)から構成される。要因分析は、① x, y 要因共に増加、② x, y 要因共に減少、③ x 要因が増加し y 要因が減少する場合の 3 ケースについておこなっている。なお、各データ間の変動量は、要因分析法による分析結果の違いが明確になるように、大きなものとしている。また、 x, y 要因共に増加ケースと x, y 要因共に減少するケースでは、基準年(0)と比較年(t)における 2 変動要因(x, y)の値を逆にしている。その理由は、時間を反転させても、要因分析結果として、各変動要因の変動量の絶対値が変わらないこと(時点逆転性: Time Reversal)を確認するためである。

各要因分析法による分析結果の比較は、各要因分析法の理論的特徴を明示している。

詳細は次のとおりである。

第一に、 x 要因が増加し y 要因が減少する場合、交絡項を変動要因へ帰属させる要因分析方法による違いが、分析結果に大きな影響を与えている。MLI 法による x, y 要因の変動量の絶対値は、RLI 法および LMDI 法による変動量に比べて非常に小さな値となっている(x 要因: RLI 法比 67%、LMDI 法比 74%; y 要因: RLI 法比 50%、LMDI 法比 59%)。また、MLI 法による y 要因の変動量は、LI 法による変動量と同じ数値となっている。なぜなら、MLI 法は、他の要因分析法と異なり、同じ交絡項の中に同時変化する増加変動要因と減少変動要因が混在する場合、交絡項を同時変化する増加変動要因側だけに帰属させ、減少変動要因側に帰属させないからである。

第二に、交絡項の変動要因への配分方法の違いが、分析結果に影響を与えている。しかしながら、その影響は、上述の交絡項の変動要因への帰属方法の違いに比べて小さい。 x, y 要因が共に増加する場合、あるいは、 x, y 要因が共に減少する場合、MLI 法による x 要因の変動量の絶対値は、RLI 法および LMDI 法による変動量に比べて大きな値となっている(RLI 法比 107%、LMDI 法比 104%)。反対に、 y 要因の変動量の絶対値は、RLI 法および LMDI 法による変動量の絶対値に比べて小さな値となっている(RLI 法比 90%、LMDI 法比 93%)。なぜなら、RLI 法は交絡項を交絡する x, y 要因に均等に配分するが、MLI 法は、 x, y 要因の対称変化率の大きさに比例して、交絡項を x, y 要因に配分するからである。したがって、交絡項は、対称変化率の小さい y 要因側より対称変化率の大きい x 要因側に多く配分されることになる。その結果、 x, y 要因が共に増加、あるいは、 x, y 要因が共に減少する場合、MLI 法による x 要因の変動量の絶対値は、RLI 法による変動量より大きくなり、 y 要因の変動量は、RLI 法より小さくなる。

第三に、LMDI 法による変動量は、各検討ケースともに、MLI 法と RLI 法の変動量の間に位置している。その原因のひとつとして、LMDI 法は対数変化率をもとにしていることが挙げられる。

第四に、MLI 法、RLI 法、LMDI 法は、時間を反転させても各変動要因の変動量の絶対値が変わらない、時間逆転性(Time Reversal)を満足している。一方、LI 法は、時間逆転性を満足していない。

第五に、LI 法の残留項は非常に大きな値となっている。さらに、LI 法は、交絡項としての残留

4. 交絡項の帰属・配分を修正した要因分析法の構築

項を変動要因に配分しないで別途に計上するため、 x, y 要因が共に増加する場合、LI 法による x, y 要因の変動量は、他の完全要因分析法による変動量に比べて小さな値となっている。一方、 x, y 要因が共に減少する場合、LI 法による x, y 要因の変動量の絶対値は、他の完全要因分析法による変動量の絶対値に比べて大きな値となっている。さらに、 x 要因は増加するが y 要因は減少する場合、増加要因である x 要因の変動量は、他の完全要因分析法による変動量に比べて大きな値となる。一方、 y 要因の変動量の絶対値は、他の完全要因分析法による変動量の絶対値に比べて小さな値となっている。

表 4-2. 要因分析データ

Year	x : 増加、 y : 増加			x : 減少、 y : 減少			x : 増加、 y : 減少		
	x	y	CO ₂	x	y	CO ₂	x	y	CO ₂
0	10	10	100	30	20	600	10	20	200
t	30	20	600	10	10	100	30	10	300
$\Delta (t-0)$	20	10	500	-20	-10	-500	20	-10	100

表 4-3. MLI 法と他の要因分析法による要因分析結果の比較
: x, y 要因の CO₂ 排出変動量

要因分析法	x : 増加、 y : 増加				x : 減少、 y : 減少				x : 増加、 y : 減少			
	x 要因	y 要因	残留項	CO ₂ 合計	x 要因	y 要因	残留項	CO ₂ 合計	x 要因	y 要因	残留項	CO ₂ 合計
LI	200	100	200	500	-400	-300	200	-500	400	-100	-200	100
RLI	300	200	0	500	-300	-200	0	-500	300	-200	0	100
LMDI	307	193	0	500	-307	-193	0	-500	271	-171	0	100
MLI	320	180	0	500	-320	-180	0	-500	200	-100	0	100
MLI/LI	160.0%	180.0%		100.0%	80.0%	60.0%		100.0%	50.0%	100.0%		100.0%
MLI/RLI	106.7%	90.0%		100.0%	106.7%	90.0%		100.0%	66.7%	50.0%		100.0%
MLI/LMDI	104.4%	93.1%		100.0%	104.4%	93.1%		100.0%	73.8%	58.5%		100.0%

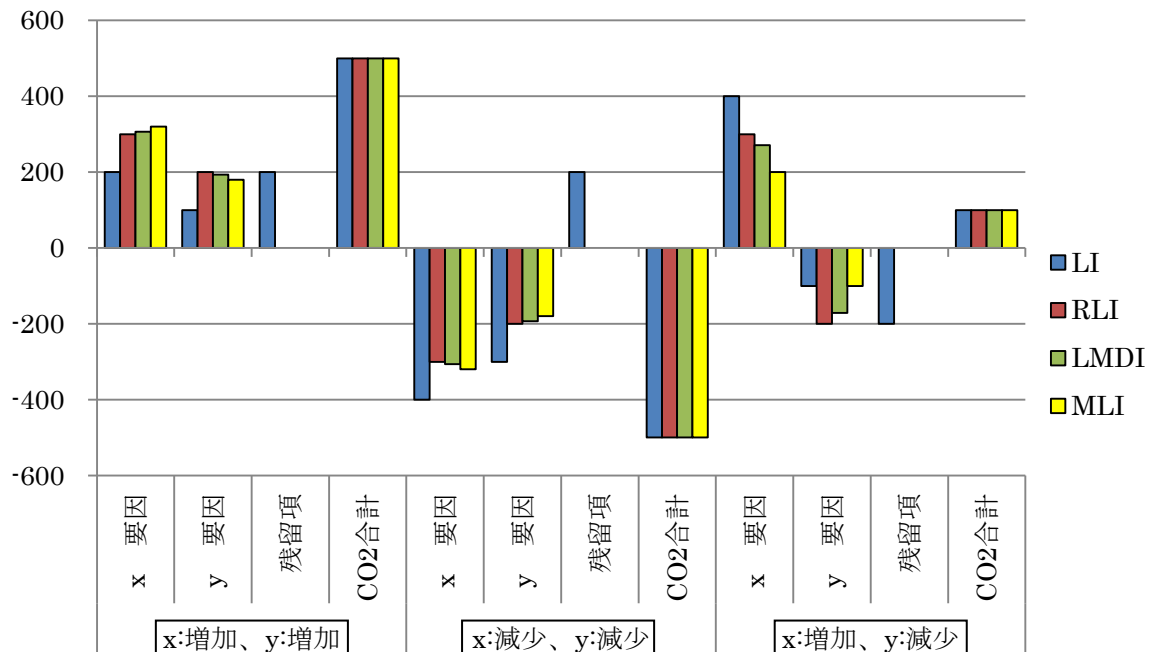


図 4-2. MLI 法と他の要因分析法による要因分析結果の比較

: x, y 要因の CO₂ 排出変動量

4.4. 要因分析法の総括的評価

第3章の既往要因分析法に係わる課題、および、本章で構築した MLI 法と既往要因分析法 (LI 法、RLI 法、LMDI 法) を比較した結果を踏まえて、MLI 法と既往要因分析法に関して総括的評価をおこなった。MLI 法は、完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、優れた要因分析法であると考えられる。

Ang and Zhang (2000) および Hoekstra et al. (2003) は、要因分析法を評価するにあたり、3つの指標を提示している。すなわち、完全性 (Completeness)、時点逆転性 (Time Reversal)、ゼロ値対応性 (Zero Value Robustness) である。完全性 (Completeness) とは、算定式の中で交絡項が別途に計上されていないこと、つまり、交絡項が変動要因の中に含まれて残留項がないことである。時点逆転性 (Time Reversal) とは、基準点と比較年を逆にしても算定値の符号 (プラス、マイナス) が反転するだけで絶対値は同じになることである。また、ゼロ値対応性 (Zero Value Robustness) とは、ゼロ値のデータが含まれている場合にも要因分析をするうえで問題が生じないことである。

Ang and Zhang (2000) および Hoekstra et al. (2003) は、以上の3指標によって、既往要因分析法の妥当性を評価している。その結果、彼らは、「RLI 法と LMDI 法はすべての指標を満足する望ましい要因分析法である」と評価している。

表 4-4. 要因分析法の総括的評価

要因分析法	完全性 (Completeness)	時点逆転性 (Time Reversal)	ゼロ値対応性 (Zero Value Robustness)	交絡項の帰属・配分方法
LI法	×	×	○	—
RLI法	○	○	○	△
LMDI法	○	○	△	△
MLI法	○	○	○	○

○: 満足している。
△: 課題がある。
×: 満足していない。

しかしながら、RLI法とLMDI法に関しては、3.4.3節および3.5.3節で論じたとおり、交絡項の関連変動要因への帰属と配分方法既往要因分析法に関していくつかの課題がある。さらに、LMDI法に関しては、3.5.3節で論じたとおり、ゼロ値問題に関して課題がある。Ang and Zhang (2000)を含めたいくつかの既往研究は、ゼロ値以外のデータの中の最も小さな値よりも二桁以上小さな数値に置き換えることで対応できるとしている。しかしながら、この対応にも課題がある。

本研究では、要因分析法の評価指標として、Ang and Zhang (2000)およびHoekstra and Bergh (2003)の3つの指標に、「交絡項の帰属・配分方法」を加えた。そのうえで、これまでの議論を踏まえて、LI法、LMDI法、および、MLI法について評価した（表 4-4）。その結果、MLI法だけがすべての指標を満足している。要因分析法の評価指標として、分析の簡便さや分析結果に対する解釈の容易さなども考えられる。しかしながら、いずれも評価にあたり具体性に欠けるため、本研究では評価指標として挙げていない。

なお、要因分析法はマクロレベルの分析を対象としている。そのため、MLI法を含め、要因分析法による要因分析結果が、変動要因の特性によってミスリードされる可能性がある。要因分析結果を解釈するにあたり注意が必要である。この点に関しては、第 8.3 節「今後の課題」において議論する。

4.5. 結語

本章では、前章で整理した既往要因分析法の課題を踏まえ、交絡項の帰属・配分を修正した完全要因分析法（MLI法）を構築した。そのうえで、MLI法と既往要因分析法（LI法、RLI法、LMDI法）を用いて例示的な要因分析をおこなった。そして、要因分析結果をもとに、MLI法と既往要因分析法の理論的特徴、および、要因分析法の違いによる分析結果の差について論じた。

構築したMLI法は、完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、優れた要因分析法であると考えられる。

要因分析方法の違いによる分析結果の違いは、各要因分析法の理論的特徴を明示している。特

に、同じ交絡項の中に同時変化する増加変動要因と減少変動要因が混在する場合、交絡項を同時変化する変動要因へ帰属させる要因分析法による違いが、分析結果に大きな影響を与えている。一方、交絡項の配分方法の違いによる影響は、交絡項の帰属方法の違いによる影響に比べて小さい。

次章（第 5 章）から第 7 章においては、構築した MLI 法を用いて、自動車交通の CO₂ 排出量変動に関する要因分析をおこなう。なお、要因分析においては、MLI 法による要因分析結果を既往要因分析法による要因分析結果と比較する。まず、第 5 章では、日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の時系列分析をおこなう。

5. 日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の変動要因分析

5.1. 緒言

本章では、前章で構築した MLI 法を用いて、日本の自家用乗用車と貨物自動車別の全国と地域別 CO₂ 排出量の時系列変動要因分析をおこなう。要因分析においては、各検討期間における全国と地域別の CO₂ 排出量の主な変動要因を定量的に示す。さらに、自家用軽乗用車の普及による CO₂ 排出量の削減効果を試算する。また、MLI 法による要因分析結果について、既往要因分析法（RLI 法、LMDI 法）による分析結果と比較する。

検討期間は 1990 年から 2008 年とし、自家用乗用車については、自家用乗用車の CO₂ 排出量が増加傾向にあった 1990 年から 1995 年、1995 年から CO₂ 排出量がピークであった 2001 年、その後の CO₂ 排出量が減少傾向にあった 2001 年から 2008 年までの 3 期間としている。一方、貨物自動車の検討期間は、貨物自動車の CO₂ 排出量が増加傾向にあった 1990 年からピークの 1996 年、減少傾向にあった 1996 年から 2002 年、減少傾向の強い 2002 年から 2008 年までの 3 期間としている。

本章では、まず、本研究の背景を述べ（5.2 節）、運輸部門における既往研究を概観する（5.3 節）。つぎに、要因分析の対象と範囲を明確にし（5.4 節）、自家用乗用車と貨物自動車別に変動要因を特定する（5.5 節）。つぎに、分析データの出典とその信頼性を確認し（5.6 節）、変動要因の推移を確認する（5.7 節）。そのうえで、要因分析方法について述べ（5.8 節）、要因分析をおこない、全国と地域別の CO₂ 排出量の主な変動要因を定量的に示す（5.9 節）。さらに、自家用軽乗用車の普及による CO₂ 排出量の削減効果を試算する（5.9 節）。また、MLI 法による要因分析結果を、LI 法、RLI 法、LMDI 法による要因分析結果と比較し、各要因分析法の理論的特徴と要因分析法の違いによる分析結果の違いを検討する（5.10 節）。

5.2. 背景

日本国温室効果ガスインベントリ報告書（2012）によれば、日本の2010年の運輸部門のCO₂排出量は、全部門の19.5%を占めている。運輸部門の中で自家用乗用車の2010年のCO₂排出量は、1990年比37.7%増加し、運輸部門のCO₂排出量増加のほとんどを占めている。日本の自家用乗用車のCO₂排出量は、2001年には1990年比53.7%増加したが、それ以降減少に転じ、2010年には2001年比10.4%減少している。一方、日本の貨物自動車の2010年のCO₂排出量は、1990年比16.1%減少している。貨物自動車のCO₂排出量は、1996年には1990年比10.4%増加したが、それ以降減少に転じ、2010年には1996年比24.0%減少している。しかしながら、自家用乗用車と貨物自動車を合計した2010年のCO₂排出量は運輸部門全体の84.6%を占め、自家用乗用車と貨物自動車は、日本のCO₂排出量削減にとって、依然として重要な部門である。また、自家用乗用車と貨物自動車のCO₂排出量が増加から減少傾向に転換した例は、海外でも稀である。

したがって、自家用乗用車と貨物自動車のCO₂排出量が増加から減少傾向に転換した時期を含め、自家用乗用車と貨物自動車のCO₂排出量の変動要因の推移を分析し、CO₂排出量の変動の主な要因を定量的に特定することは、CO₂排出量削減に有効な施策の立案にとって非常に重要である。さらに、CO₂排出量の変動を全国のみならず地域別に分析することにより、地域特性の影響

を明らかにできる可能性がある。しかしながら、地方自治体による個別地域を対象とした要因分析はみられるものの、全国および地域別に分析した既往研究は数少ない。さらに、自家用乗用車の中で、普通・小型乗用車と軽乗用車とでは、保有台数やCO₂排出量の推移に大きな違いがある。しかし、主として軽乗用車保有台数の増加がCO₂排出量に与える影響を分析した既往研究は少ない。

5.3. 運輸部門における既往研究の概観

要因分析法は、運輸部門における CO₂ 排出量やエネルギー消費量の変動に関する時系列要因分析に広く採用されている。既往研究において、RLI 法と LMDI 法が数多く使われている。しかしながら、RLI 法や LMDI 法には、3 章および 4 章で論じたとおり、複数要因の同時変化分を計上する交絡項に関連する変動要因に帰属、配分させる方法に関して改善すべき点が残されている。

運輸部門における CO₂ 排出量やエネルギー消費量の時系列要因分析に LI 法を用いた既往研究には次のものがある。

Kiang and Schipper (1996) は、1965年から1993年の日本の旅客輸送部門のエネルギー消費量の変動分析をおこなっている。変動要因は、走行距離、輸送分担率、燃費である。「分析の結果、エネルギー消費量増加の主な要因は、走行距離の増加と自動車の輸送分担率の上昇である。国民所得の増加によるライフスタイルの変化が自動車の輸送分担率を上昇させ、乗用車による旅客移動が増加した」と指摘している。

Scholl et al. (1996) は、1970年から1992年の米国、日本、フランス、UKを含めた、OECD 9 カ国の旅客輸送部門の CO₂ 排出量の変動分析をおこなっている。変動要因は、走行距離、輸送分担率、CO₂ 排出強度、燃料分担率、燃費である。「分析の結果、CO₂ 排出量増加の主な要因は各国ともに走行距離の増加である」と述べている。なお、別途計上している交絡項については、分析結果に影響をおよぼさない程度に小さいとしている。

RLI 法を用いた運輸部門における既往研究は次のとおりである。

環境省 (2001) は、1990年から1998年の旅客部門と貨物部門の CO₂ 排出量の増減要因を要因分析している。旅客部門と貨物部門の変動要因は、CO₂ 排出原単位 (エネルギー消費量あたりの CO₂ 排出量)、エネルギー消費原単位 (燃費)、輸送分担率、輸送量である。また、自家用乗用車の変動要因は、CO₂ 排出原単位、実走行燃費、一台あたりの走行距離、一世帯あたりの保有台数、世帯数である。「要因分析の結果、旅客部門の CO₂ 排出量増加の主な要因は、自家用乗用車に起因するエネルギー消費原単位の悪化である。また、自家用乗用車の CO₂ 排出量増加の主な要因は、世帯数の増加と一世帯あたりの保有台数増加に起因する走行距離の増加である」と述べている。一方、貨物部門については、貨物車の輸送量の増加による CO₂ 排出量の増加が著しいことを指摘している。

経済産業省 (2004) は、1990 年から 2001 年の全国の自家用乗用車と貨物車のエネルギー消費増加要因を要因分析している。自家用乗用車の変動要因は、一台あたりの走行距離、一世帯あたりの保有台数、世帯数、燃費、保有車両重量、実走行条件である。一方、貨物自動車の変動要因は、輸送量、走行距離あたりのエネルギー消費量、積載率、一台あたりの積載能力である。「要因分析の結果、乗用車については、一世帯あたりの保有台数の増加による走行距離の増加、保有車

両の重量化、および、実走行条件の悪化が、エネルギー消費増大の主な要因である。一方、貨物車については、自家用貨物車の輸送量の増加により、エネルギー消費が 1990 年から 2001 年にかけて 1 割程度増加している。しかしながら、1998 年以降、エネルギー消費量の増加は止まっている」と述べている。

LMDI 法を用いた運輸部門における既往研究は次のとおりである。

Kwon (2005) は、1970 年から 2000 年の英国における乗用車の CO₂ 排出量の変動要因分析をおこなっている。変動要因は、人口、人口一人あたりの走行距離、燃費である。「要因分析の結果、CO₂ 排出量の増加は、主に人口一人あたりの走行距離の増加によるものである」と指摘している。

Papagiannaki and Diakoulaki (2009) は、1990 年から 2005 年のギリシャとデンマークの乗用車の CO₂ 排出量の変動要因分析をおこなっている。変動要因は、人口、人口一人あたりの車両台数、走行距離、エンジンサイズ、技術、燃料構成である。「要因分析の結果、ギリシャの CO₂ 排出量増加の主な要因は保有台数の増加であり、デンマークの CO₂ 排出量増加の主な要因は車両の大型化である」と指摘している。

その他の関連する研究として、岡田 (2008 a) は、茅の式を応用して、1991 年から 2006 年の日本全国の自家用乗用車の CO₂ 排出量の増減要因を全微分により分解している。変動要因は、CO₂ 強度（エネルギーあたりの CO₂ 排出量）、GDP あたりのエネルギー消費量、人口一人あたりの GDP、人口である。「要因分析の結果、2001 年までの CO₂ 排出量増加の主な要因は、車両の大型化に伴う燃費の悪化とモータリゼーションによる保有台数の増加である。また、2002 年以降の CO₂ 排出量減少の主な要因は、燃費の改善、一台あたりの走行距離の減少である。CO₂ 排出量の増減要因は、燃料価格の動向によって説明できる部分が多い」と述べている。

岡田 (2008b) は、乗用車の場合と同様に茅の式を応用して、1991 年から 2005 年の貨物交通起因の CO₂ 排出量の変動要因を分析している。変動要因は岡田 (2008a) と同様である。「要因分析の結果、エネルギー効率の改善が CO₂ 排出量削減に寄与している」と指摘している。

日本トラック協会 (2008) は、1996 年から 2003 年のトラック輸送部門における CO₂ 排出量の変動要因を分析している。自家用トラックから営業用トラックへの転換（自営転換）と営業用トラックの燃費向上が、CO₂ 排出量削減に大きく寄与していることを指摘している。しかしながら、用いられている要因分析方法の詳細は明らかでない。

5.4. 要因分析の対象と範囲

本分析では、分析の対象とする自家用乗用車の車種を、道路運送車両法による分類に従い、旅客自家用普通・小型乗用車、および、旅客自家用軽乗用車（以下、軽乗用車）としている。なお、営業用乗用車は、乗用車全体の CO₂ 排出量に占める割合も 3.4%（2008 年）と小さく、自家用乗用車全体の CO₂ 排出量の変動に与える影響も相対的に小さい。したがって、本分析では、自家用乗用車に対象を絞り、営業用乗用車は検討の対象としていない。また、貨物自動車については、営業用、自家用、軽貨物車としている。パトカー、消防車、クレーン車などの特殊用途車は検討の対象としていない。

検討期間は、自家用乗用車、貨物自動車ともに 1990 年から 2008 年としている。検討期間の区分は、自家用乗用車と貨物自動車別に、CO₂ 排出量の増減が同じ動向にある期間ごとに設定して

いる。要因分析は、各検討期間に対して直接法でおこなう。

自家用乗用車の要因分析は、次の 3 期間に分けておこなう。

1. 1990 年から 1995 年：自家用乗用車の CO₂ 排出量が増加傾向にある期間
2. 1995 年から 2001 年：自家用乗用車の CO₂ 排出量が増加からピークになる期間
3. 2001 年から 2008 年：自家用乗用車の CO₂ 排出量が減少傾向にある期間

また、貨物自動車の要因分析は、次の 3 期間に分けておこなう。

1. 1990 年から 1996 年：貨物自動車の CO₂ 排出量が増加傾向からピークになる期間
2. 1996 年から 2002 年：貨物自動車の CO₂ 排出量が減少傾向にある期間
3. 2002 年から 2008 年：貨物自動車の CO₂ 排出量の減少傾向が大きい期間

地域区分は地方運輸局の分類に従う。地方運輸局の再編に伴い、地方運輸局の区分が 2002 年 7 月より変更されている。再編前の新潟局と中部局に帰属した県が、再編により東北局、北陸信越局、中部局に分散帰属された。本要因分析における地域区分では、再編前の新潟局と中部局に帰属した県と、再編後の東北局、北陸信越局、中部局に帰属した県を一つの地域（以下、東北中部地域）とし、その他の地域は、現在の地方運輸局と同じとし、全国を 7 地域に分けている。なお、本要因分析では、地域間の人口移動の影響を考慮するが、たとえば、自動車から鉄道利用への転換など、各地域における交通機関の利用可能性が CO₂ 排出量に与える影響までは、要因分析法の限界から考慮していない。

CO₂ 排出係数は一定とし、温室効果ガスインベントリオフィス（2012）の炭素排出係数と発熱量から算出し、ガソリンについては 2.32 ton-CO₂/kL、軽油については 2.59 ton-CO₂/kL を用いている。

5.5. 変動要因の特定

5.5.1. 自家用乗用車の変動要因

本要因分析では、既往研究などを参考とし、自家用乗用車の CO₂ 排出量の変動要因は図 5-1 のように関連付けることができると仮定し、要因分析における変動要因を次の 5 要因とした。

1. 保有台数あたりの走行距離（ D/N : km/台）
2. 人口一人あたりの保有台数（ N/P : 台/人口）
3. 人口（ P ）
4. 平均保有車両重量（ W : ton）
5. 平均保有車両重量あたりの実走行燃費の逆数（ $(L/D)/W$: L/km/トン）

CO₂ 排出量（CO₂ : ton-CO₂）は、式(5-1)のように示される。

$$CO_2 = C \times \frac{D}{N} \times \frac{N}{P} \times P \times W \times \frac{L/D}{W} \quad (5-1)$$

ここで、 C は、CO₂ 排出係数（ton-CO₂/L）である。

5. 日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の変動要因分析

なお、ガソリン価格やグリーン税制などの減税措置は、CO₂ 排出量の直接的変動要因の内、自家用乗用車全体の所有（保有台数）、車種選択（車両重量、燃費）、利用（走行距離）に影響を与え、その結果として CO₂ 排出量の動向に影響を与えていると考えられる。したがって、本要因分析では、ガソリン価格と税制措置は、これらの直接変動要因に影響を与える間接的変動要因と捉え、ガソリン価格と税制措置を変動要因としていない。また、CO₂ 排出量の削減に寄与する電気自動車やハイブリッド車などの低環境負荷車両の普及の影響については、低環境負荷車両単独の各変動要因に関する統計資料がないため、単独の変動要因としていない。

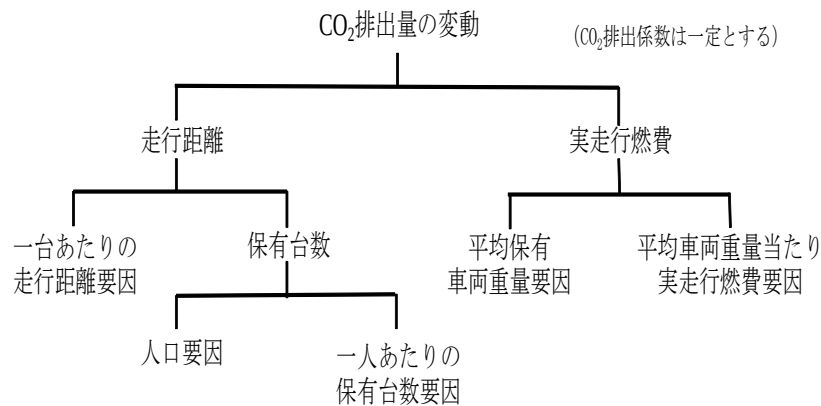


図 5-1. 自家用乗用車の CO₂ 排出量変動要因関連図

5.5.2. 貨物自動車の変動要因

貨物自動車のCO₂排出量の変動要因は、図 5-2 のように関連付けることができるものと仮定し、要因分析における変動要因を次の3要因とした。

1. 輸送量あたり CO₂ 排出量原単位 (CO₂/D : ton-CO₂/ton-km)
2. 一台あたりの輸送トンキロ (D/N : 輸送 ton-km/保有台数)
3. 保有台数 (N : 台)

なお、ガソリン価格、グリーン税制などの減税措置、低環境負荷車両単独の影響については、自家用乗用車の場合と同じ理由により、検討の対象としていない。

CO₂ 排出量 (CO₂ : ton-CO₂) は、式(5-2)のように示される。

$$CO_2 = \frac{CO_2}{D} \times \frac{D}{N} \times N \quad (5-2)$$

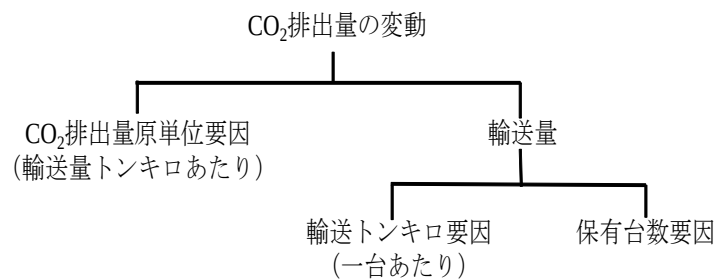


図 5-2. 貨物自動車の CO₂ 排出量変動要因関連図

5.6. 分析データ

表 5-1 は CO₂ 排出量の変動要因に関連するデータの出典をまとめたものである。なお、乗用車の一台あたりの平均車両重量は、自動車検査登録協力会「自動車保有車両数」の車両重量別自動車保有車両数の各重量クラスの間値とその保有台数を乗じ、保有車両数で除した平均値として与えた。軽乗用車については、重量別の資料がないため、軽乗用車メーカーのカタログなど個別資料をもとに、一台あたりの平均重量を 850 kg と仮定している。

表 5-2 に関連機関による各データの調査方法を示す。まず、保有車両台数と車両重量は全数調査をおこなっている。また、人口統計は、総務省「社会生活統計指標」によれば、国勢調査による人口を基礎として、その後の出生児、死亡者、出入国者などを加減し、毎年（国勢調査実施年を除く）10 月 1 日の人口を算出している。したがって、保有車両台数、車両重量、および、人口は、統計誤差を含まないため信頼性が高い。一方、自動車輸送統計年報による走行距離と燃料消費量については、国土交通省による登録地ベースのサンプル調査結果をもとにしている。国土交

5. 日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO2 排出量の変動要因分析

通省「自動車輸送統計年報 平成 20 年度分」によれば、調査は、約 7,500 万台の自動車を調査対象とし、2 月、6 月、10 月については、約 33,000 台の自動車についての詳細調査を、他の 9 カ月については約 10,000 台の自動車について簡易調査を実施している。

表 5-1. CO₂ 排出量変動要因に関連するデータの出典

データ	出典
地方運輸局別走行距離	自動車輸送統計年報（日本自動車会議所）
乗用車、貨物自動車（軽を除く） 都道府県別保有台数	自動車保有車両数（自動車検査登録協会）
軽乗用車、軽貨物車 都道府県別保有台数	市町村別軽自動車車両数（全国軽自動車連合会）
地域別保有車両重量	自動車保有車両数（自動車検査登録協会）
地方運輸局別燃料消費量	自動車輸送統計年報（日本自動車会議所）
都道府県別人口	都道府県・男女別人口（総務省統計局）

表 5-2. 関連データの調査方法

データ	調査方法
走行距離	サンプル調査（登録地ベース）
保有台数	全数調査
車両重量	全数調査
燃料消費量	サンプル調査（登録地ベース）
人口	全数調査

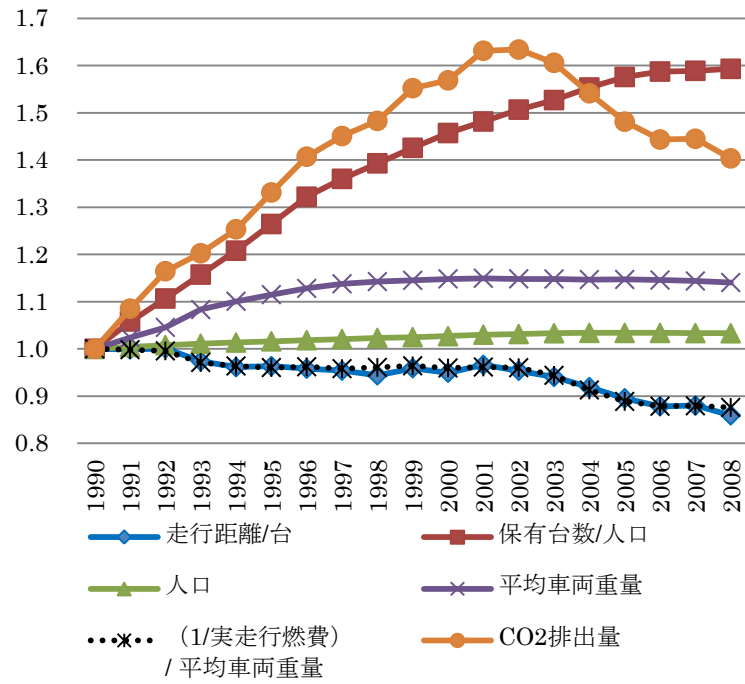
5.7. CO₂ 排出量と変動要因の推移

5.7.1. 自家用乗用車

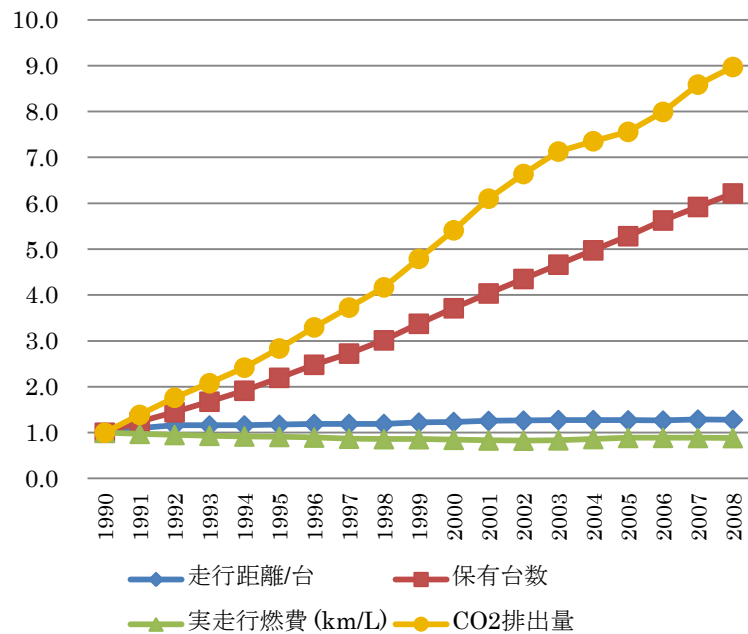
1990年から2008年の日本全国の自家用乗用車全体と軽乗用車のCO₂排出量と変動要因の推移を図5-3(a),(b)に示す。いずれの要因の値も1990年を基準としている。

自家用乗用車全体のCO₂排出量は増加傾向にあったが、2001年をピークに減少に転じている。また、増加傾向にあった自家用乗用車全体の走行距離は、2003年をピークにその後減少に転じている。しかしながら、保有台数の増加率が走行距離の増減率より大きいため、一台あたりの走行距離は減少傾向が続いている(2001年において1990年比97%、2008年において1990年比86%)。一方、増加傾向にあった実走行燃費の逆数(L/km)は、2002年近辺をピークにその後減少に転じている。しかしながら、より大きな増加傾向にあった平均保有車両重量が2000年近辺からほぼ一定の値となっているため、平均保有車両重量あたりの実走行燃費の逆数は減少傾向が続いている(2001年において1990年比96%、2008年において1990年比88%)。したがって、一台あたりの走行距離と平均保有車両重量あたりの実走行燃費の逆数の推移は類似している。人口一人あたりの保有台数は、2006年以降頭打ち傾向にあるが、依然として増加傾向が続いている。人口は、横ばい傾向が続いている。

乗用車全体のCO₂排出量、一台あたりの走行距離、人口一人あたりの保有台数、および、実走行燃費(km/L)の推移の背景には、図5-3(b)に示すように、特に普通・小型乗用車に代わる軽乗用車の保有台数増加による影響が大きい。



(a)



(b)

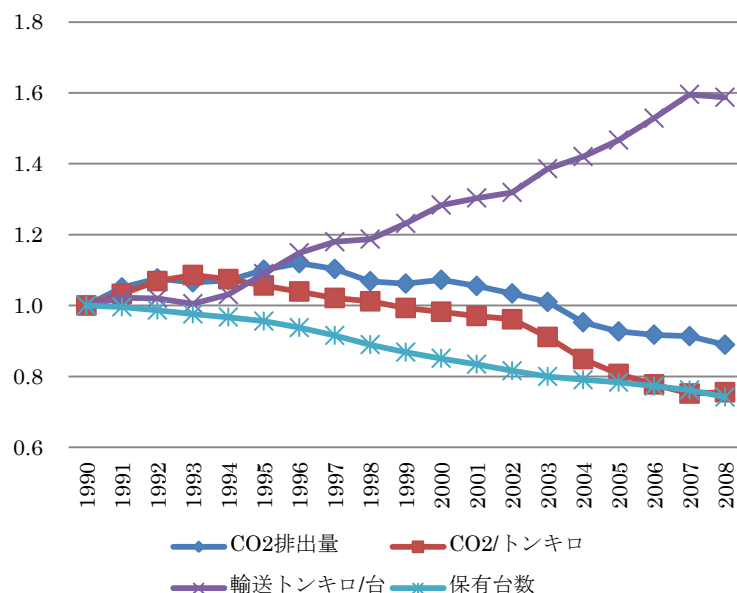
図 5-3. 自家用乗用車の CO₂ 排出量と変動要因の推移
: (a)自家用乗用車全体、(b)軽乗用車

5.7.2. 貨物自動車

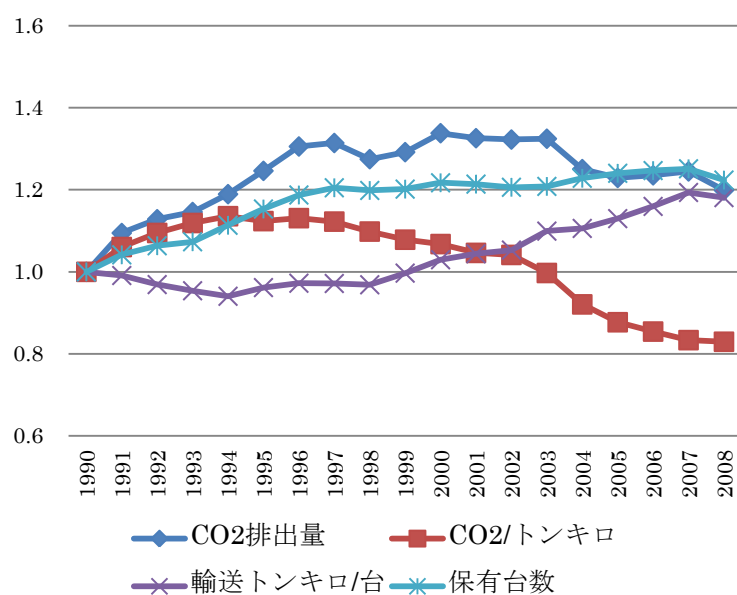
1990 年から 2008 年の日本全国の貨物自動車全体、営業用、自家用および軽貨物車の CO₂ 排出量と変動要因の推移をそれぞれ図 5-4(a)-(d)に示す。いずれの要因の値も 1990 年を基準としている。

貨物自動車全体の CO₂ 排出量は、1996 年をピークに減少に転じ、2002 年以降さらなる減少傾向を示している。また、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量は、それまでの増加傾向から 1993 年をピークに減少に転じて、2002 年以降、さらなる減少傾向を示している。しかしながら、一台あたりの輸送トンキロは、増加傾向が続いている。輸送トンキロが増加しているにもかかわらず、CO₂ 排出量が減少していることは、特に営業用貨物車の輸送トンキロ当たりの CO₂ 排出量の改善効果が大きいことを示している。

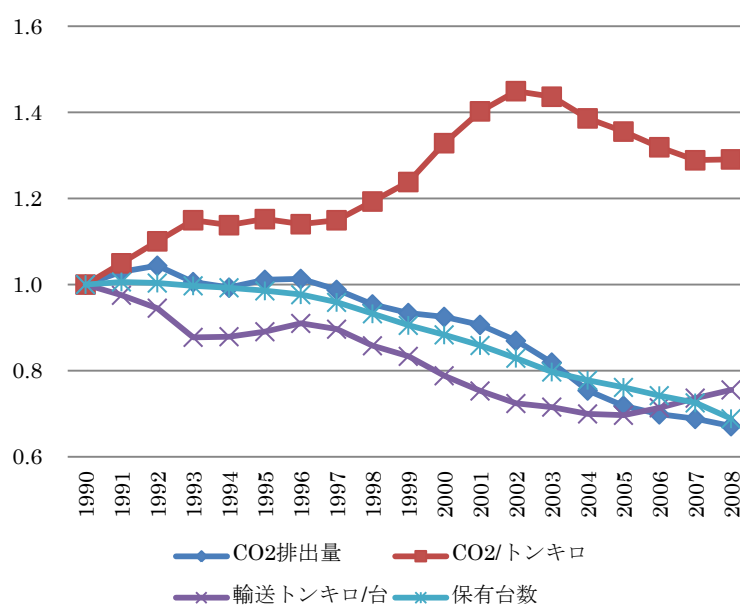
さらに、営業用、自家用、および、軽貨物車の変動要因の推移には、大きな違いがみられる。営業用貨物車の CO₂ 排出量は、2000 年をピークに減少に転じ、輸送トンキロ当たりの CO₂ 排出量は 1994 年をピークに減少傾向にある。一方、自家用および軽貨物車の CO₂ 排出量は減少傾向にあり、自家用貨物車の輸送トンキロ当たりの CO₂ 排出量は、2002 年にピークを迎えている。営業用貨物車の保有台数と一台あたりの輸送トンキロは増加傾向にあり、自家用貨物車の保有台数と一台あたりの輸送トンキロは減少傾向にあることから、自家用貨物車から営業用貨物車への転換（自営転換）が進展し、CO₂ 排出量の減少に寄与しているものと考えられる。



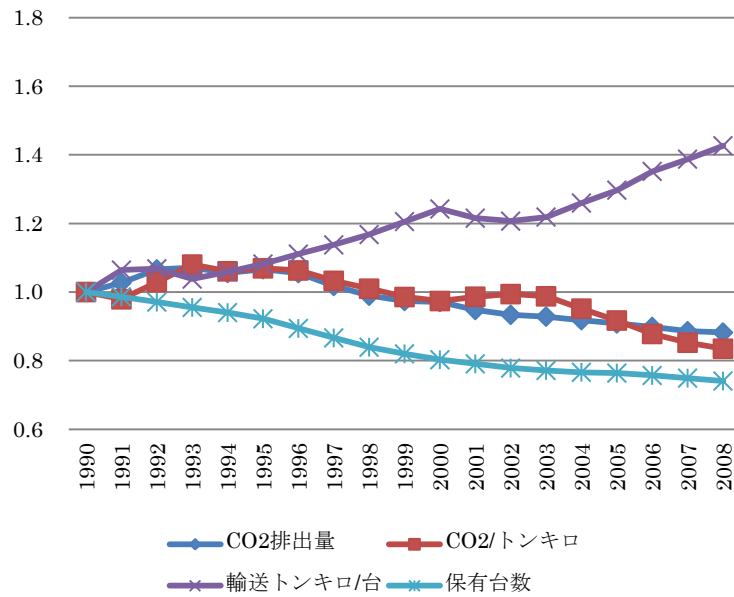
(a)



(b)



(c)



(d)

図 5-4. 貨物自動車の CO₂ 排出量と変動要因の推移

: (a)貨物自動車全体、(b)営業用貨物車、(c)自家用貨物車、(d)軽貨物車

5.8. 要因分析方法

第 4 章で構築した MLI 法を用いて自家用乗用車および貨物自動車の全国と地域別の CO₂ 排出量の変動要因分析をおこなう。要因分析は、CO₂ 排出量と各要因の変動が同じ傾向にある 5.4 節で示した 3 期間別に直接法でおこなう。自家用乗用車と貨物自動車の変動要因は、5.5 節で仮定したとおり、それぞれ 5 要因と 3 要因とする。

自家用乗用車の場合、基準年(0)から比較年(t)の期間に変動する 5 変動要因(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)の変動量の内、たとえば、 x_1 要因の変動量(ΔCO_{2x1})は、式(4-1)および式(4-2)から、次のように示される。

$$\begin{aligned}
 \Delta CO_{2x1} = \Delta x_1 & \left(x_2^0 x_3^0 x_4^0 x_5^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_2} \Delta x_2 x_3^0 x_4^0 x_5^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_3} x_2^0 \Delta x_3 x_4^0 x_5^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_4} x_2^0 x_3^0 \Delta x_4 x_5^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_5} x_2^0 x_3^0 x_4^0 \Delta x_5 \right. \\
 & + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3} \Delta x_2 \Delta x_3 x_4^0 x_5^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_4} \Delta x_2 x_3^0 \Delta x_4 x_5^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_5} \Delta x_2 x_3^0 x_4^0 \Delta x_5 + \frac{a_1}{a_1 + a_3 + a_4} x_2^0 \Delta x_3 \Delta x_4 x_5^0 \\
 & + \frac{a_1}{a_1 + a_3 + a_5} x_2^0 \Delta x_3 x_4^0 \Delta x_5 + \frac{a_1}{a_1 + a_4 + a_5} x_2^0 x_3^0 \Delta x_4 \Delta x_5 + \frac{a_1}{a_1 + a_3 + a_4 + a_5} x_2^0 \Delta x_3 \Delta x_4 \Delta x_5 \\
 & + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_4 + a_5} \Delta x_2 x_3^0 \Delta x_4 \Delta x_5 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + a_5} \Delta x_2 \Delta x_3 x_4^0 \Delta x_5 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4} \Delta x_2 \Delta x_3 \Delta x_4 x_5^0 \\
 & \left. + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5} \Delta x_2 \Delta x_3 \Delta x_4 \Delta x_5 \right)
 \end{aligned} \tag{5-3}$$

ただし、

$$a_i = \frac{\Delta x_i}{\left(\frac{x_i^0 + x_i^t}{2} \right)} \quad (i=1,2,3,4,5)$$

一方、貨物自動車の場合、基準年(0)から比較年(t)の期間に変動する 3 変動要因(x_1, x_2, x_3)の変動量の内、たとえば、 x_1 要因の変動量(ΔCO_{2x1})は、式(4-1)および式(4-2)から、次のように示される。

$$\Delta CO_{2x1} = \Delta x_1 \left(x_2^0 x_3^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_2} \Delta x_2 x_3^0 + \frac{a_1}{a_1 + a_3} x_2^0 \Delta x_3 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3} \Delta x_2 \Delta x_3 \right) \tag{5-4}$$

ただし、

$$a_i = \frac{\Delta x_i}{\left(\frac{x_i^0 + x_i^t}{2} \right)} \quad (i=1,2,3)$$

5.9. 要因分析結果

5.9.1. 自家用乗用車

自家用乗用車の全国と各地域別の各検討期間における CO₂ 排出量の変動要因分析結果を図 5-5(a)-(h)に示す。

5.9.1.1. 1990 年から 1995 年の要因分析結果

1990 年から 1995 年の自家用車全体の CO₂ 排出量は増加傾向にある。増加の主な要因は、各地域ともに、人口一人あたりの保有台数の増加と平均保有車両重量の増加である。特に人口一人あたりの保有台数の増加が大きな影響を与えている。

一方、各地域ともに、平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善、および、北海道と関東を除く地域における一台あたりの走行距離の減少が、CO₂ 排出量の減少に寄与している。

1990 年から 1995 年はガソリン価格の低下時期と重なる。したがって、各地域の CO₂ 排出量増加の主な要因である人口一人あたりの保有台数と平均保有車両重量の増加は、ガソリン価格低下の影響を受けていると考えられる。

5.9.1.2. 1995 年から 2001 年の要因分析結果

1995 年から 2001 年の自家用車全体の CO₂ 排出量は、1990 年から 2001 年の動向と同様に増加傾向にある。増加の主な要因は、各地域ともに、人口一人あたりの保有台数の増加である。平均保有車両重量の増加も CO₂ 排出量増加に寄与しているが、1990 年から 1995 年の CO₂ 排出量増加におよぼす影響に比べて小さい。

地域別では、東北中部、中国、四国の人口一人あたりの保有台数の増加が、CO₂ 排出量増加に特に大きな影響を与えている。また、北海道、東北中部、近畿、中国の平均保有車両重量あたりの実走行燃費の悪化、および、東北中部、関東、近畿、九州の人口増加が、当該地域の CO₂ 排出量の増加に寄与している。関東の平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善は、全国の CO₂ 排出量減少に寄与している。

1995 年から 2001 年は、1990 年から 1995 年と同じように、ガソリン価格の低下時期と重なる。したがって、各地域の CO₂ 排出量増加の主な要因である人口一人あたりの保有台数の増加は、ガソリン価格低下の影響を受けていると考えられる。

5.9.1.3. 2001 年から 2008 年の要因分析結果

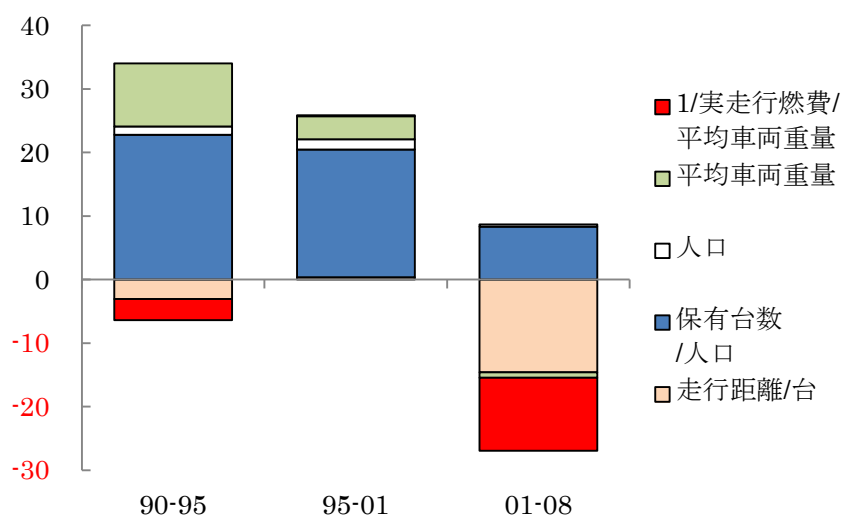
2001 年から 2008 年の自家用車全体の CO₂ 排出量は、四国を除いて、各地域ともにそれまでの増加傾向から減少傾向に転じている。減少の主な要因は、各地域ともに、一台あたりの走行距離の減少と平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善である。人口一人あたりの保有台数の増加が、CO₂ 排出量の増加要因になっているが、一台あたりの走行距離の減少と平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善による削減効果が、それを上回っている。平均保有車両重量による影響もほとんど見られなくなっている。なお、四国では、わずかながら CO₂ 排出量が増加している。四国における CO₂ 排出量の増加要因は、1995 年から 2001 年の増加要因と同じように、人口一人あたりの保有台数の増加である。

特に、東北中部、九州の一台あたりの走行距離の減少、および中国、四国の平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善が、当該地域の CO₂ 排出量の減少に大きく寄与している。また、関東

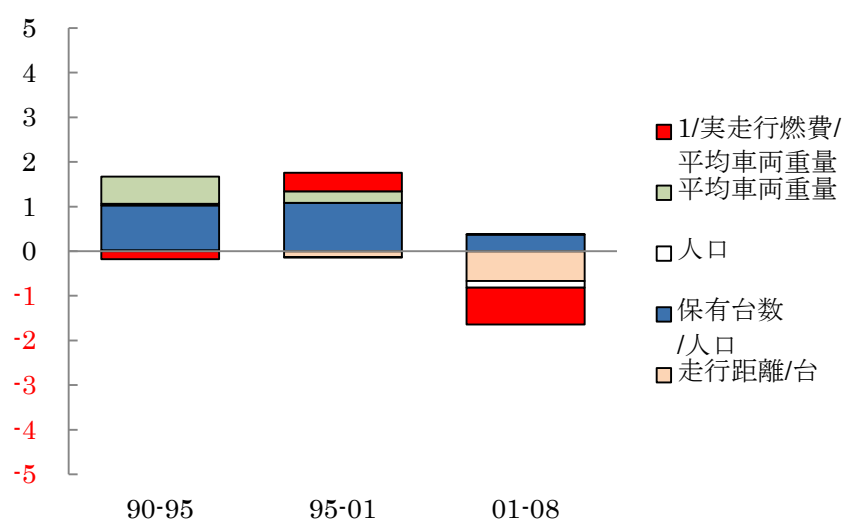
を除く地域の人口減少が、各地域の CO₂ 排出量の減少に寄与しており、中国、四国でその影響が大きい。反対に、関東の人口増加が CO₂ 排出量の増加に影響を与えている。

2001 年から 2008 年は、それ以前の検討期間と異なり、ガソリン価格の上昇時期と重なる。したがって、CO₂ 排出量減少の主要因のひとつである一台あたりの走行距離の減少は、ガソリン価格上昇の影響を受けていると考えられる。また、もうひとつの減少主要因である平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善は、ガソリン価格の上昇に加えて、グリーン税制などの減税措置によるハイブリッド車などの低環境負荷車両と軽乗用車への転換の影響を受けていると考えられる。

5. 日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO2 排出量の変動要因分析

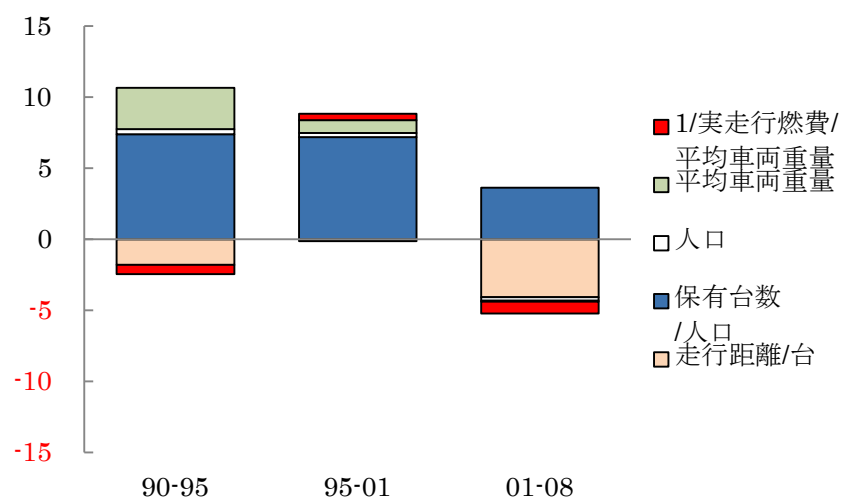


(a)

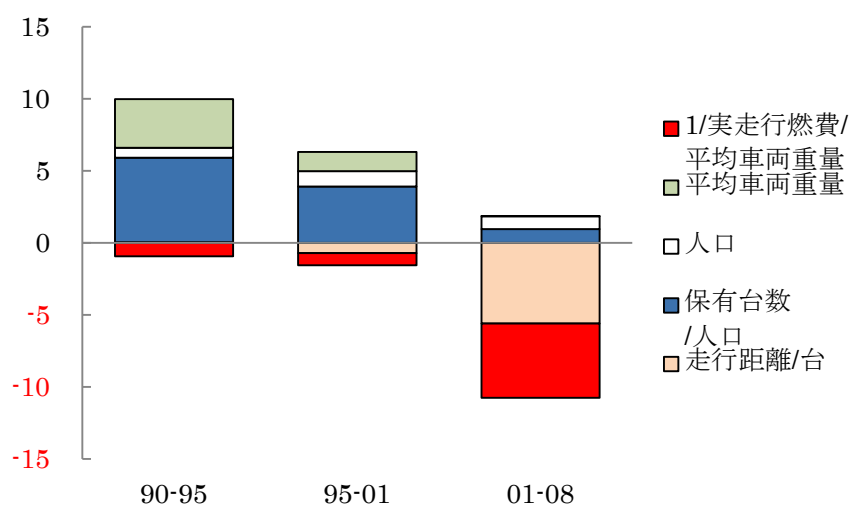


(b)

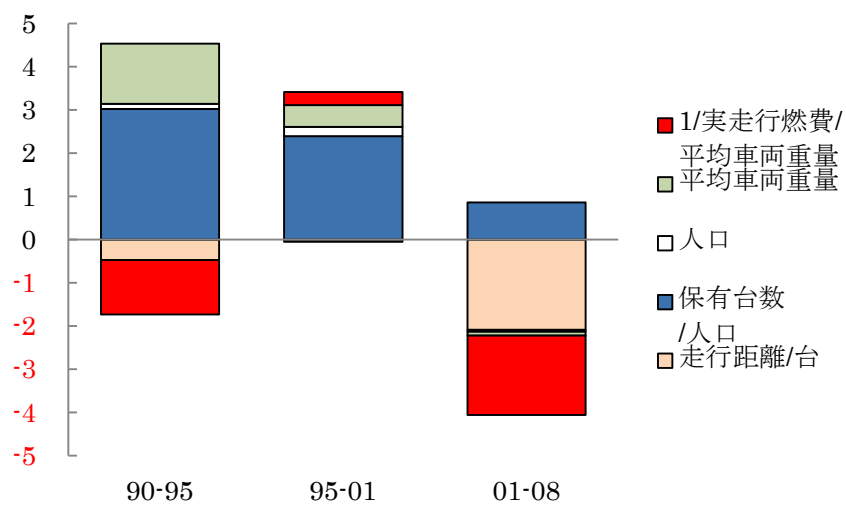
5. 日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO2 排出量の変動要因分析



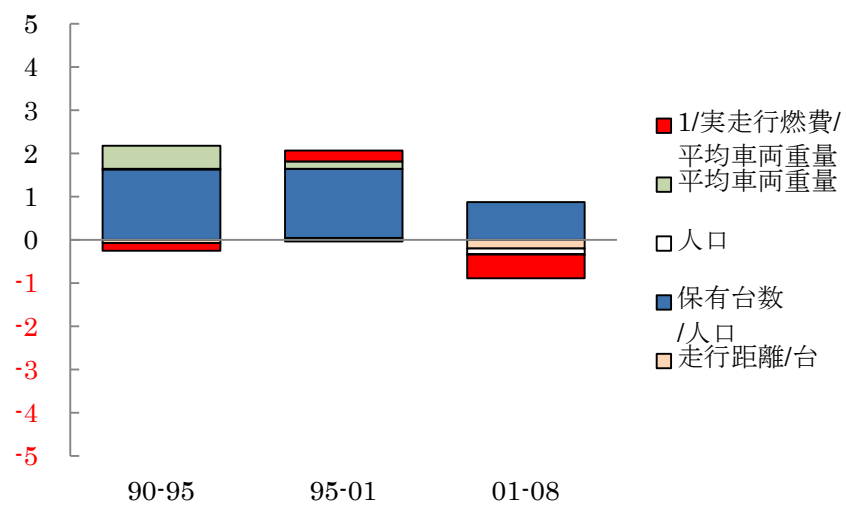
(c)



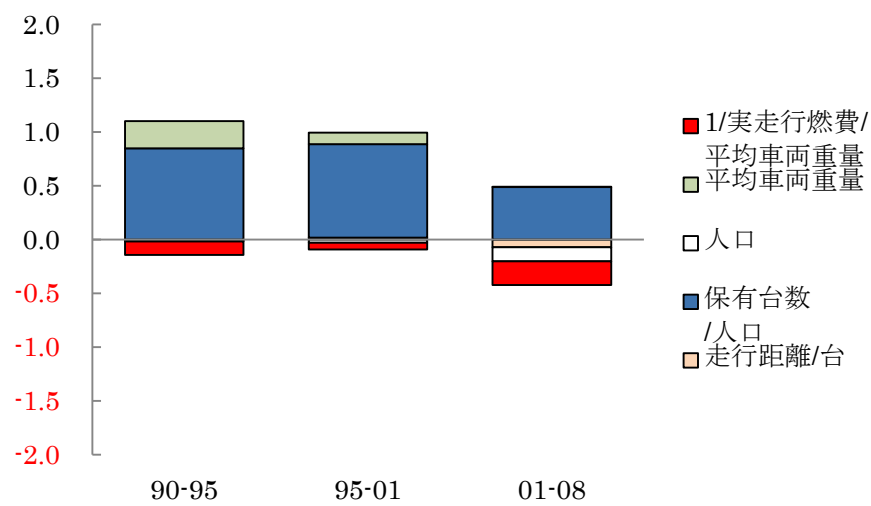
(d)



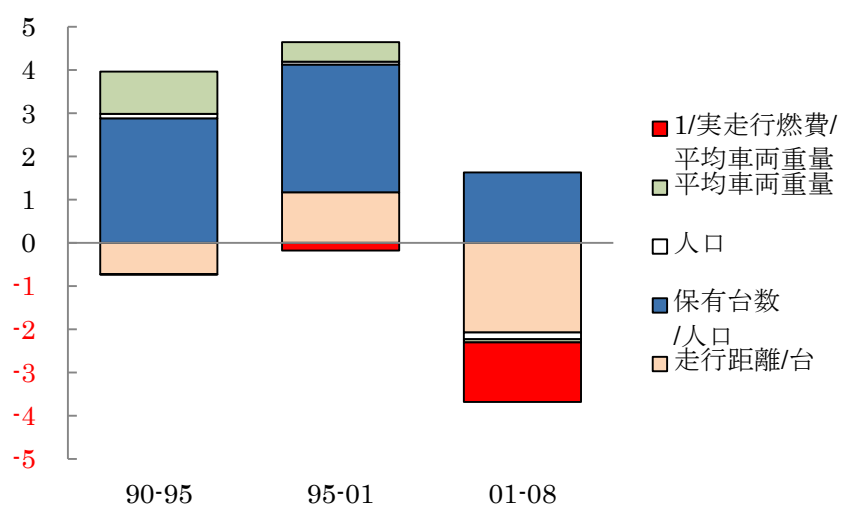
(e)



(f)



(g)



(h)

図 5-5. 自家用乗用車全体の要因分析結果：各検討期間における要因別 CO₂ 排出量の変動
：(a)全国、(b)北海道、(c)東北中部、(d)関東、(e)近畿、(f)中国、(g)四国、(h)九州
(百万トン CO₂)

5.9.2. 貨物自動車

貨物自動車の全国と各地域別の各検討期間における CO₂ 排出量の変動要因分析結果を図 5-6(a)-(h)に示す。

5.9.2.1. 1990 年から 1996 年の要因分析結果

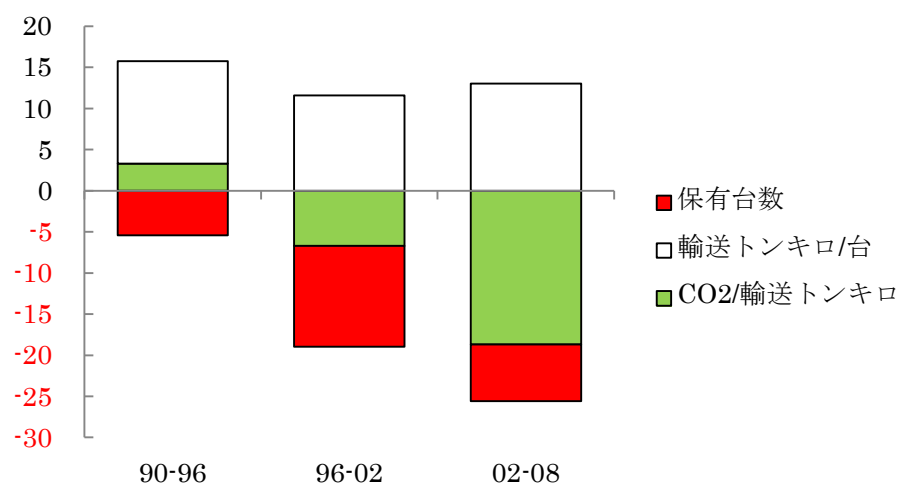
1990 年から 1996 年の貨物自動車の CO₂ 排出量は増加傾向にある。増加の主な要因は、北海道を除き、各地域ともに、保有台数あたりの輸送トンキロの増加である。また、北海道を除き、各地域ともに、貨物自動車全体の保有台数の減少が、CO₂ 排出量減少に寄与している。一方、中国、四国以外の地域において、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の増加が CO₂ 排出量の増加要因となっている。

5.9.2.2. 1996 年から 2002 年の要因分析結果

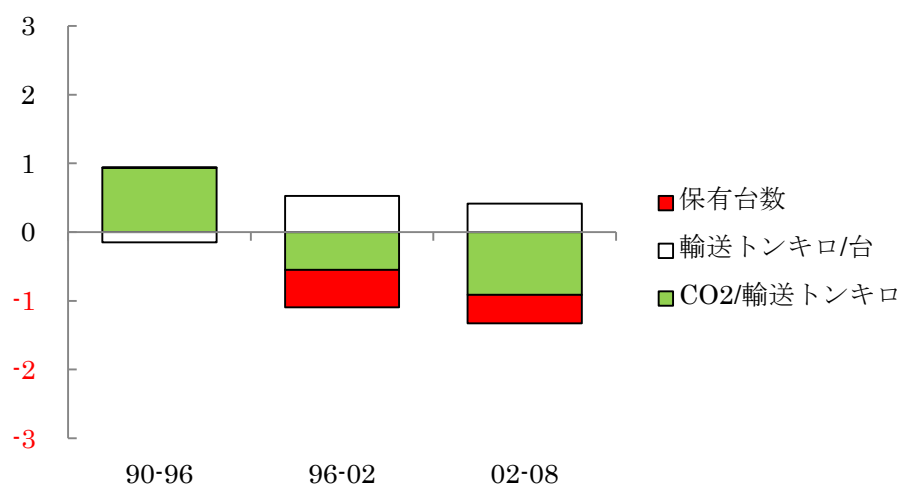
1996 年から 2002 年の貨物自動車全体の CO₂ 排出量は、それまでの増加から減少に転じている。1996 年から 2002 年の CO₂ 排出量減少の要因は、各地域ともに、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の減少と保有台数の減少である。一台あたりの輸送トンキロの増加が CO₂ 排出量の増加要因となっている。しかしながら、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の減少と保有台数の減少による CO₂ 排出量削減効果が、一台あたりの輸送トンキロの増加による CO₂ 排出量の増加分を上回っている。これらの変動は、主に自家用貨物車から営業貨物車への転換（自営転換）によるものと考えられる。

5.9.2.3. 2002 年から 2008 年の要因分析結果

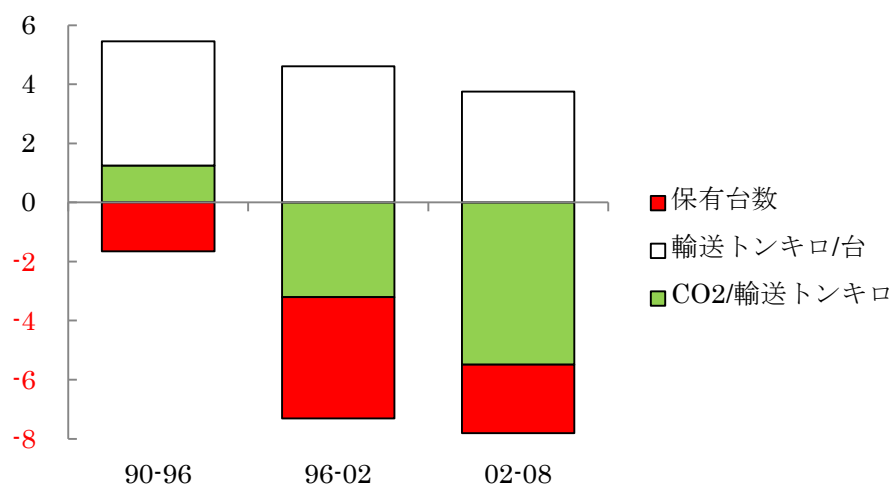
2002 年から 2008 年の貨物自動車全体の CO₂ 排出量は、1996 年から 2002 年の CO₂ 排出量に比べて、減少傾向が大きくなっている。この減少の要因は、各地域ともに、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の減少である。保有台数の減少も CO₂ 排出量の減少要因となっている。しかしながら、その影響は、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の減少による影響に比べて小さい。これらの背景には、自営転換の進展の影響が考えられる。また、一台あたりの輸送トンキロの増加が、依然として CO₂ 排出量の増加要因となっている。しかしながら、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の減少と保有台数の減少による CO₂ 排出量の削減効果が、一台あたりの輸送トンキロの増加による CO₂ 排出量の増加分を上回っている。



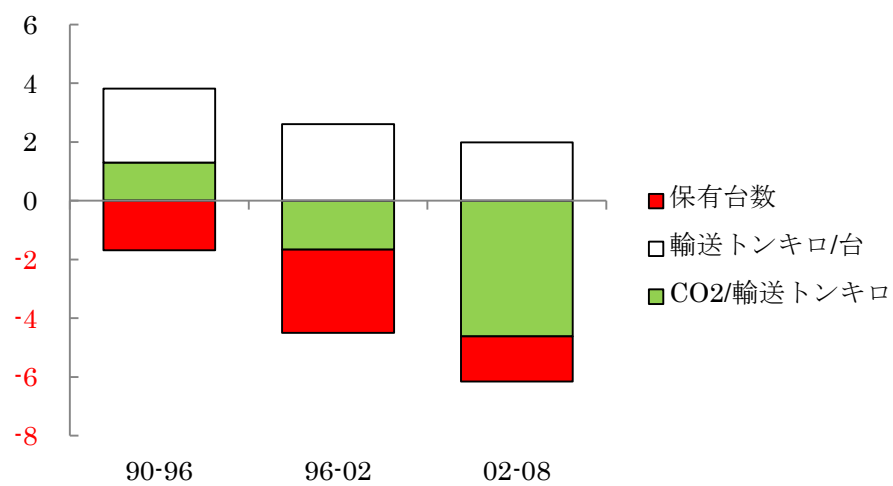
(a)



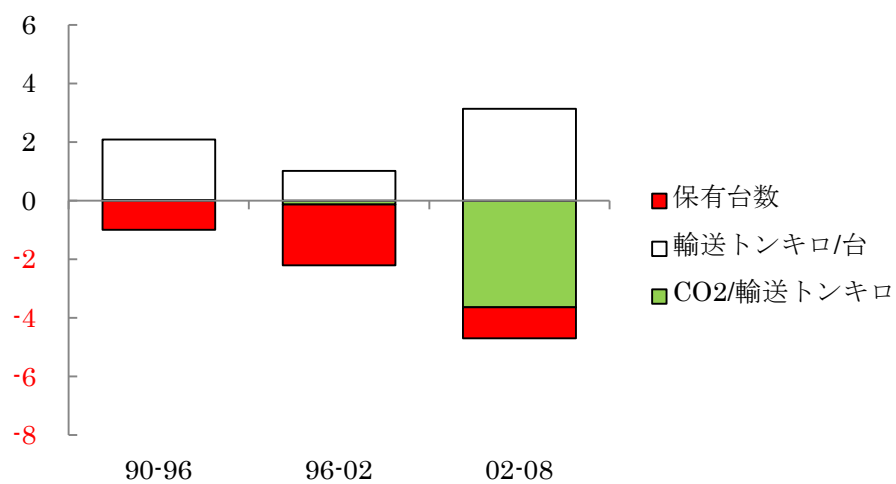
(b)



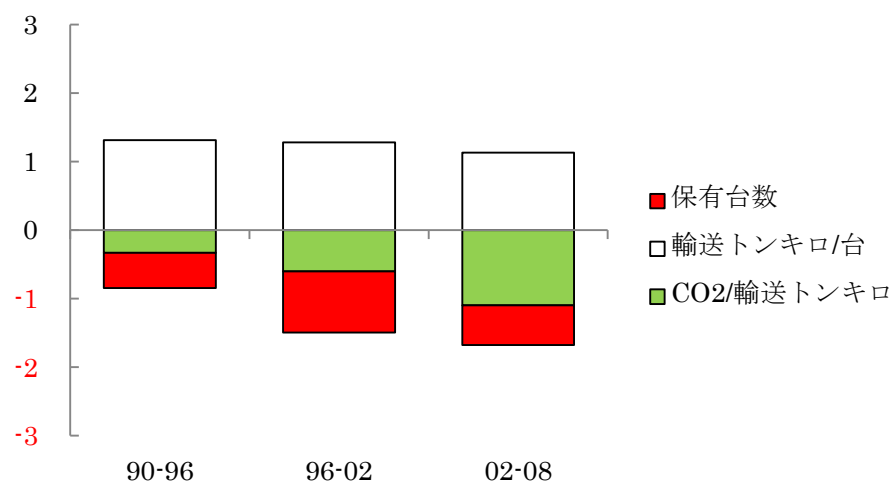
(c)



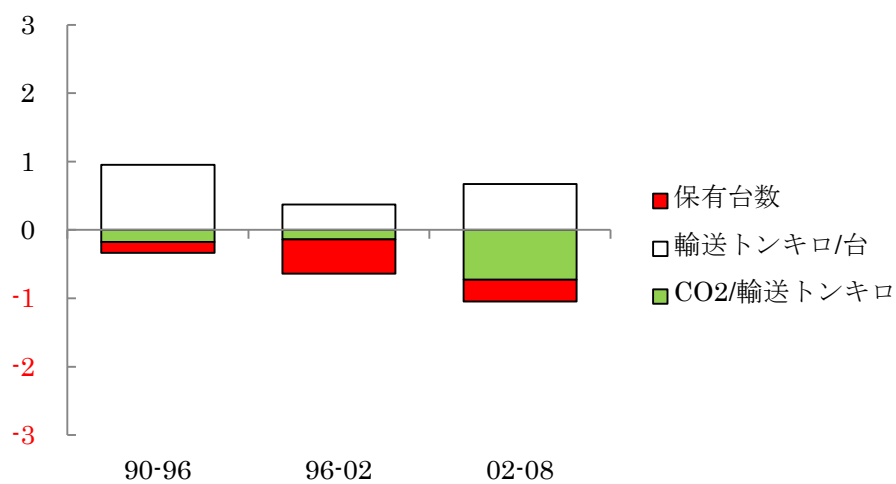
(d)



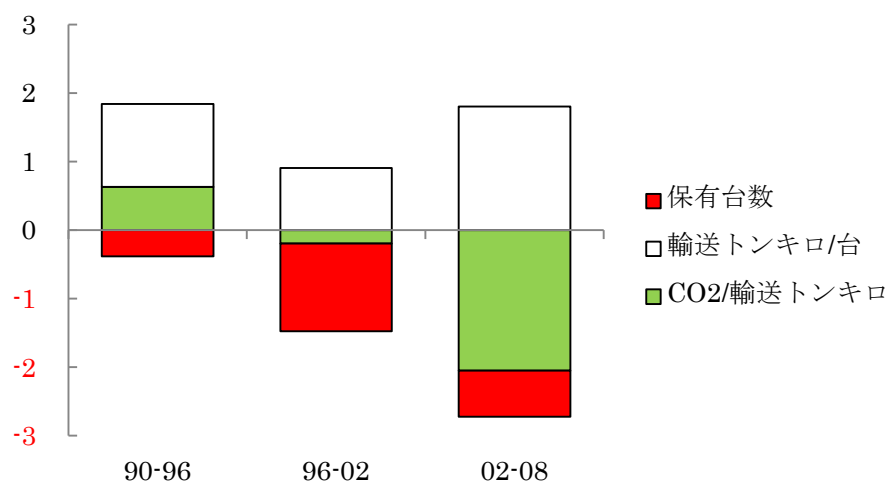
(e)



(f)



(g)



(h)

図 5-6. 貨物自動車の要因分析結果：各検討期間における要因別 CO₂ 排出量の変動

：(a)全国、(b)北海道、(c)東北中部、(d)関東、(e)近畿、(f)中国、(g)四国、(h)九州
(百万トン CO₂)

5.9.3. 自家用軽乗用車普及による CO₂ 排出量削減効果の試算

本節では、2001 年および 2008 年における日本全国の自家用軽乗用車普及による CO₂ 排出量削減効果を、1990 年の CO₂ 排出量をベースに試算した。試算の結果、普通・小型乗用車保有に代わる軽乗用車保有の増加は、自家用乗用車全体として実走行燃費の改善をもたらし、CO₂ 排出量削減に大きな効果があったと認められた。また、軽乗用車普及の進展にともなう 2008 年の CO₂ 排出量削減効果は、2001 年より増大している。

5.9.1.3 節の要因分析結果から、2001 から 2008 年に自家用乗用車全体の CO₂ 排出量が減少傾向に転じた主な要因は、一台あたりの走行距離の減少と平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善であることが明らかになった。そして、平均保有車両重量あたりの実走行燃費が改善された原因のひとつは、普通・小型乗用車から軽乗用車への転換であると論じた。

一方、要因分析の結果は、人口一人あたりの保有台数の増加が、CO₂ 排出量の増加要因になっていることも示している。全国の自家用乗用車全体の保有台数の増加には、軽乗用車保有台数の増加による影響がある（図 5-7）。全国の自家用乗用車全体の保有台数の中で軽乗用車の占める割合は 1990 年において 7.8%であった。しかしながら、その割合は、2001 年および 2008 年には、それぞれ 20.6%と 29.4%まで増加している。この軽乗用車保有台数の増加は、普通・小型乗用車保有に代わって、軽乗用車を保有する結果生じたものとして捉えることができる。増加傾向にあった自家用乗用車全体の平均保有車両重量も、普通・小型乗用車保有台数増加の頭打ちと軽乗用車保有台数の増加により、2000 年近辺から横ばいの傾向にある（図 5-3(a)）。この普通・小型乗用車保有に代わる軽乗用車保有の増加は、軽乗用車の実走行燃費（km/L）が自家用乗用車に比べて良いことから（軽乗用車の実走行燃費は、乗用車に比べて、1990 年で 36%、2001 年で 28%、2008 年で 25%良い）、自家用乗用車全体の CO₂ 排出量に対して削減効果があると考えられる。

こうした考えから、1990 年における軽乗用車の保有台数の乗用車全体に占める割合（7.8%）が 2001 年および 2008 年においても変化しないものと仮定し、両年における普通・小型乗用車と軽乗用車の一台あたりの走行距離と実走行燃費の実績値をもとに両車種の CO₂ 排出量を算出した。そのうえで、両車種の CO₂ 排出量の 2001 年および 2008 年における実績値との違いを算出し、その合計した値を両年における 1990 年をベースにした軽乗用車普及による削減効果とした。

その結果、自家用乗用車全体で、2001 年において 307 万トン CO₂、2008 年において 463 万トン CO₂ の CO₂ 排出量削減効果があったと試算された（図 5-8）。

本検討は、2001 年および 2008 年における軽乗用車普及による CO₂ 排出量削減効果を試算している。そのため、複数年の検討期間における自家用乗用車全体の変動要因の CO₂ 排出変動量を算定した本章の要因分析結果との単純比較は難しい。しかしながら、5.9.1.3 節の MLI 法による 2001 から 2008 年の要因分析結果は、平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善を CO₂ 排出量削減の主要因のひとつとして特定している。平均保有車両重量あたりの実走行燃費の逆数（(L/km)/トン）は、それまでの減少傾向を 2002 年近辺から一層増大させている（図 5-3(a)）。一方、平均保有車両重量は 2000 年近辺からはほぼ一定である（図 5-3(a)）。こうしたことから、実走行燃費の逆数（L/km）の減少傾向の継続が CO₂ 排出量削減の主要因のひとつとして考えられる。したがって、5.9.1.3 節の時系列要因分析結果からも、本節の試算結果のように、2008 年の実走行燃費

改善による CO₂ 排出量削減効果が、2001 年より増大していると推測できる。

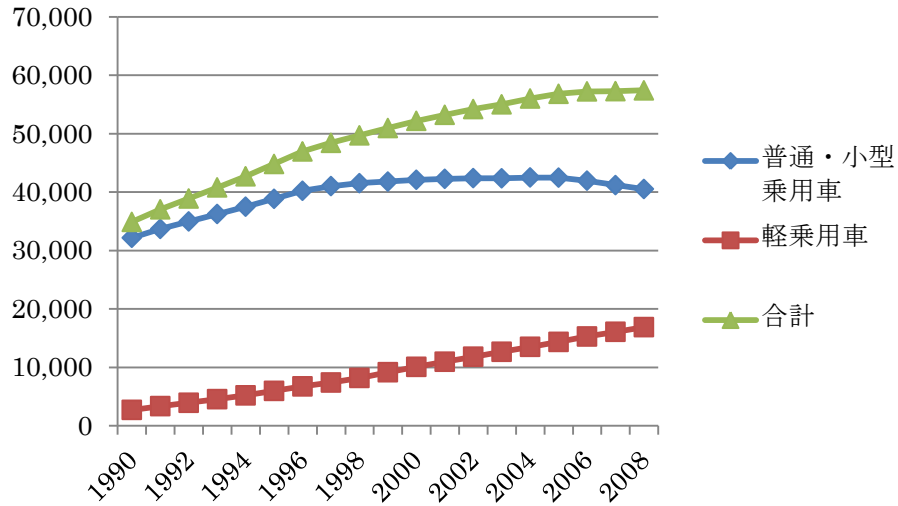


図 5-7. 自家用普通・小型乗用車と軽乗用車保有台数の推移（全国）（千台）

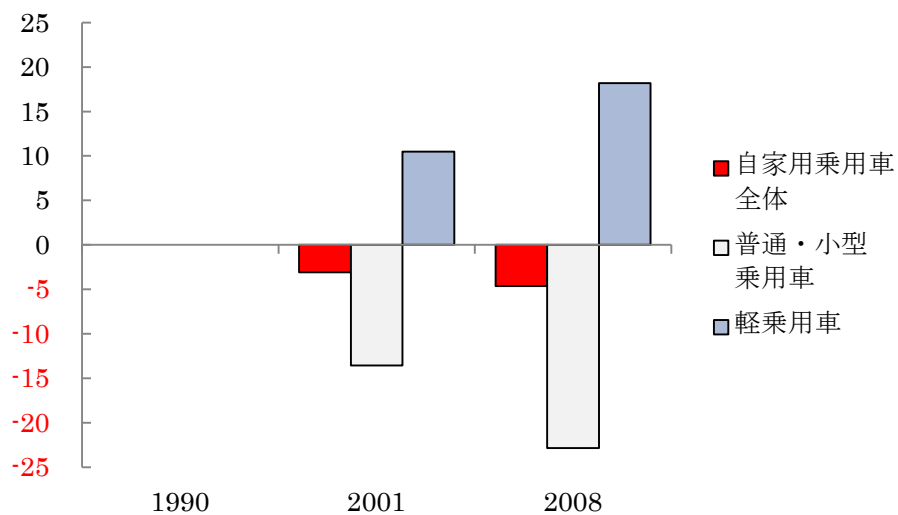


図 5-8. 軽乗用車普及による CO₂ 排出量削減効果（1990 年ベース）

（1990 年における軽乗用車の占める割合（7.8%）が、2001 年および 2008 年においても変化しないと仮定して試算した CO₂ 排出量（a）と実績値（b）との差異（b-a）（百万トン CO₂））

5.10. 既往要因分析法による分析結果との比較

MLI 法を用いた分析結果を RLI 法および LMDI 法を用いた要因分析結果と比較した(表 5-3、図 5-9)。比較対象は、全国の自家用乗用車と貨物自動車の CO₂ 排出量の変動とした。

その結果、各検討期間における自家用乗用車と貨物自動車の CO₂ 排出量変動の主な要因、および、各変動要因の CO₂ 排出量の変動は、MLI 法、RLI 法、LMDI 法ともに同じ動向を示した。

しかしながら、MLI 法による各変動要因の CO₂ 排出増減量は、自家用乗用車、貨物自動車ともに、RLI 法と LMDI 法による変動量に比べて少ない傾向がある。この理由として、同時変化する増加変動要因と減少変動要因が同じ交絡項に混在する場合、RLI 法では交絡項をすべての変動要因に均等分配するが、MLI 法では、交絡項を増加変動要因側だけに帰属させ、減少変動要因側に帰属させないことが考えられる。また、LMDI 法による各変動要因の変動量は、RLI 法による変動量より多少少ない。さらに、その変動量は、MLI 法より RLI 法による変動量に近い値となっている。以上の要因分析結果の要因分析法による差は、4.3.2 節の例示的な要因分析結果(表 4-3 および図 4-2)と同じ傾向を示している。

今後、増加要因と減少要因が混在する事例が数多くあると予想される。この場合、増加要因と減少要因の各変動量が大きくなると交絡項も大きな値となる。その結果、MLI 法と RLI 法および LMDI 法による要因分析結果の差は大きなものとなる。したがって、CO₂ 排出量削減政策の検討において、変動要因の CO₂ 排出量削減効果の評価や重点施策の対象とすべき変動要因の選択などに影響をおよぼす可能性がある。

自家用乗用車に関して MLI 法と RLI 法による要因分析結果の最も大きな差(比率)は、1990 年から 1995 年にかけての一台あたりの走行距離、人口、および、平均保有車両重量あたりの実走行燃費要因の CO₂ 排出増減量である。MLI 法による増減量は RLI 法比 83%になっている。一方、貨物自動車全体に関して最も大きな差(比率)は、2002 から 2008 年にかけての保有台数あたりの輸送トンキロ要因の CO₂ 排出増加量である。この場合、MLI 法による増加量は RLI 法比 84%になっている。

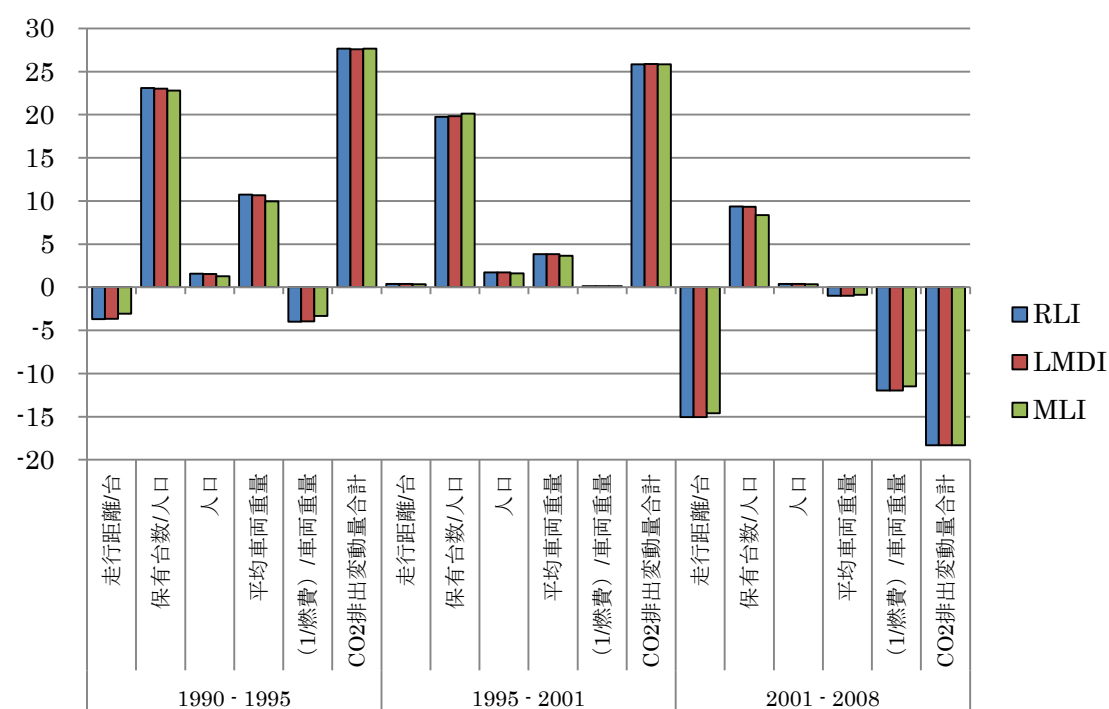
また、自家用乗用車に関して MLI 法と RLI 法による変動量の最も大きな差は、2001 年から 2008 年にかけての人口一人あたりの保有台数要因の CO₂ 排出増加量である。MLI 法による増加量は、RLI 法による分析結果より 99 万トン CO₂ 少なく、この差は当該期間の CO₂ 排出変動量合計の 5.4%に相当する。また、貨物自動車に関して最も大きな差は、2002 年から 2008 年にかけての保有台数あたりの輸送トンキロ要因の CO₂ 排出増加量である。MLI 法による増加量は、RLI 法による分析結果より 2.55 百万トン CO₂ 少なく、この差は当該期間の CO₂ 排出変動量合計の 20.3%に相当する。一方、日本国温室効果ガスインベントリ報告書(2012)では、各年度の全部門 CO₂ 排出量について 10 万トン、部門別の CO₂ 排出量について千トンの位まで有効数値で示している。また、東京都(2012)と横浜市(2012)は、各年度の部門別 CO₂ 排出量についてそれぞれ 1 万トンおよび千トンの位まで有効数値で示している。以上のことから、MLI 法と RLI 法による要因分析結果の差は、国全体や大都市レベルで求められている CO₂ 排出量からして、無視できない影響を与える場合があると考えられる。

5. 日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO2 排出量の変動要因分析

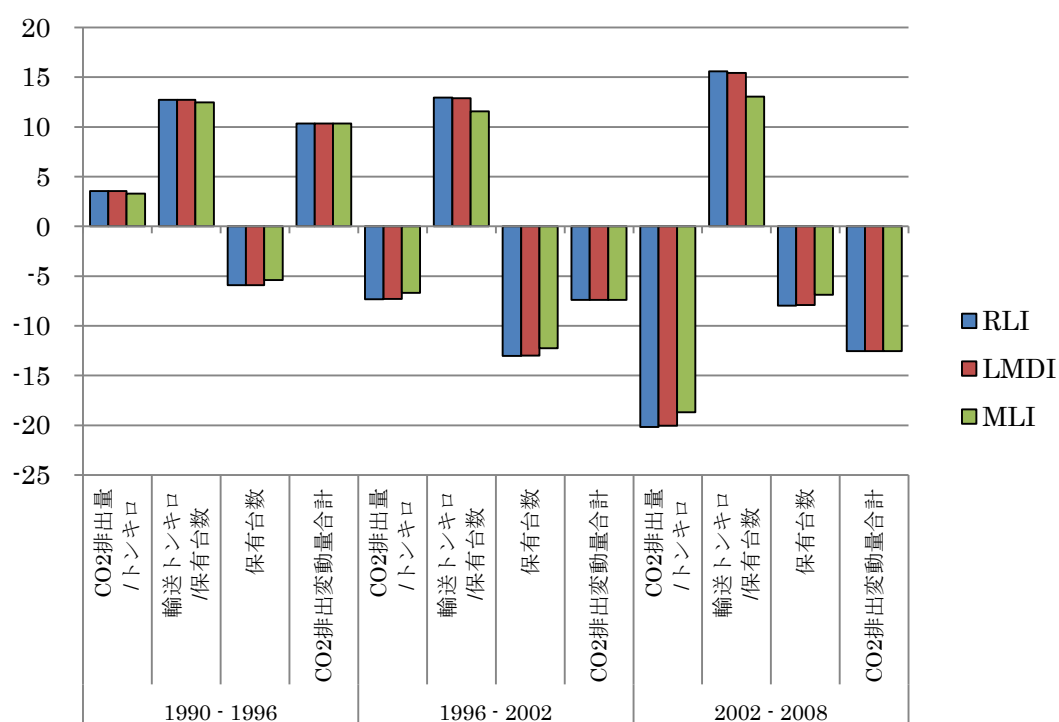
表 5-3. MLI 法、RLI 法、LMDI 法による要因分析結果の比較

自家用乗用車(全国)							(百万トンCO ₂)
期間	手法	走行距離/台	保有台数/人口	人口	平均車両重量	(1/実走行燃費) /平均車両重量	CO ₂ 排出変動量 合計
90-95	RLI	-3.70	23.08	1.56	10.72	-4.01	27.65
	LMDI	-3.67	23.02	1.54	10.66	-3.98	27.58
	MLI	-3.06	22.80	1.29	9.94	-3.32	27.65
	MLI/RLI	0.83	0.99	0.83	0.93	0.83	1.00
95-01	RLI	0.37	19.77	1.73	3.83	0.14	25.84
	LMDI	0.37	19.81	1.73	3.83	0.14	25.89
	MLI	0.34	20.13	1.61	3.64	0.13	25.84
	MLI/RLI	0.91	1.02	0.93	0.95	0.90	1.00
01-08	RLI	-15.05	9.36	0.38	-1.01	-11.98	-18.30
	LMDI	-15.05	9.34	0.38	-1.01	-11.98	-18.32
	MLI	-14.62	8.37	0.33	-0.89	-11.50	-18.31
	MLI/RLI	0.97	0.89	0.86	0.88	0.96	1.00
貨物自動車(全国)							(百万トンCO ₂)
期間	手法	CO ₂ 排出量 /トンキロ	輸送トンキロ /保有台数	保有台数	CO ₂ 排出変動量 合計		
90-96	RLI	3.55	12.73	-5.93	10.35		
	LMDI	3.54	12.72	-5.91	10.35		
	MLI	3.30	12.46	-5.41	10.35		
	MLI/RLI	0.93	0.98	0.91	1.00		
96-02	RLI	-7.33	12.95	-13.03	-7.41		
	LMDI	-7.31	12.89	-12.99	-7.41		
	MLI	-6.70	11.57	-12.27	-7.41		
	MLI/RLI	0.91	0.89	0.94	1.00		
02-08	RLI	-20.16	15.59	-7.96	-12.54		
	LMDI	-20.05	15.42	-7.91	-12.54		
	MLI	-18.70	13.04	-6.88	-12.54		
	MLI/RLI	0.93	0.84	0.86	1.00		

5. 日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の変動要因分析



(a)



(b)

図 5-9. MLI 法、RLI 法、LMDI 法による要因分析結果の比較：CO₂ 排出変動量
(百万トン CO₂)：(a)自家用乗用車（全国）、(b)貨物自動車（全国）

5.11. 結語

本章では、第4章で構築したMLI法を用いて、1990年から2008年の日本全国と地域別の自家用乗用車と貨物自動車のCO₂排出量の変動について要因分析をおこなった。さらに、MLI法を用いた要因分析結果については、RLI法、LMDI法による要因分析結果と比較した。

自家用乗用車のCO₂排出量の変動要因分析結果は次のとおりである。

1990 から 2001 年の CO₂ 排出量増加の主な要因は、各地域ともに、人口一人あたりの保有台数の増加と平均保有車両重量の増加であった。一方、自家用乗用車の CO₂ 排出量が 2001 年をピークに減少傾向にある主な要因は、四国以外の各地域において、一台あたりの走行距離の減少と平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善であった。特に、東北中部、九州において一台あたりの走行距離の減少、中国および四国において平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善が CO₂ 排出量減少に大きく寄与している。実走行燃費改善の背景にある要因のひとつとして、普通・小型乗用車に代わる軽乗用車の保有台数の増加が示唆された。この軽乗用車保有台数の増加は、CO₂ 排出量削減に大きく寄与していると推計された。また、関東を除く地域の人口減少が、関東を除く地域の CO₂ 排出量の減少に寄与している。

一方、貨物自動車の CO₂ 排出量の変動要因分析結果は、次のとおりである。

1990 から 1996 年の CO₂ 排出量増加の主な要因は、北海道を除き、保有台数あたりの輸送トンキロの増加であった。また、貨物自動車の CO₂ 排出量が 1996 年をピークに減少傾向にある主な要因は、各地域ともに、輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の減少と保有台数の減少であった。これらの輸送トンキロあたりの CO₂ 排出量の減少と保有台数の減少の背景にある要因として、自家用貨物車から営業用貨物車への転換（自営転換）が示唆された。

MLI 法による全国の自家用乗用車と貨物自動車の要因分析結果を、RLI 法と LMDI 法による要因分析結果と比較した。その結果、各検討期間における自家用乗用車と貨物自動車の CO₂ 排出量変動の主な要因、および、各変動要因の CO₂ 排出量の変動動向については、要因分析法による違いはなかった。しかしながら、MLI 法による各変動要因の CO₂ 排出増減量は、自家用乗用車、貨物自動車ともに、RLI 法と LMDI 法による変動量に比べて少ない傾向がある。この原因として、同時変化する増加変動要因と減少変動要因が同じ交絡項に混在する場合、MLI 法では、RLI 法および LMDI 法と異なり、交絡項を増加変動要因側だけに帰属させ、減少変動要因側に帰属させないことが示唆された。

6. 日米英間の乗用車 CO₂ 排出量の変動要因分析

6.1. 緒言

本章では、第4章で構築した MLI 法を用いて、日本、米国、英国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の変動要因分析をおこなう。

国/地域間の変動要因分析に関する既往研究は、時系列要因分析に関する既往研究比べて非常に少ない。エネルギー、環境関連分野において数例の既往研究がみられるものの、運輸部門における既往研究はみられない。また、国/地域間要因分析には、時系列要因分析とは違った留意すべき点がある。また、国や地域において統計データが十分整備されていないことが多い。国/地域間要因分析に適切な要因分析法を検討し、その要因分析法を用いて、国/地域間の乗用車 CO₂ 排出量の差の主要因を定量的に把握することは、運輸部門の CO₂ 排出量削減対策の立案にとって有用であると考えられる。

本要因分析では、MLI 法を用いて、2000 年と 2006 年における日本、米国、英国間の乗用車 CO₂ 排出量の差の主要因を定量的に示す。また、2000 年から 2006 年にかけての各国間の乗用車 CO₂ 排出量の差の変動についても検討する。MLI 法による要因分析結果については、LI 法、RLI 法、および、LMDI 法による要因分析結果と比較し、各要因分析法の理論的特徴と MLI 法との差を検討する。

本章では、まず、本研究の背景を述べ (6.2 節)、国/地域間要因分析の既往研究を概観する (6.3 節)。つぎに、国/地域間要因分析の特質を論じ (6.4 節)、要因分析法について述べる (6.5 節)。そして、要因分析の対象と範囲を明確にし (6.6 節)、変動要因を特定する (6.7 節)。分析データの出典とその信頼性を確認し (6.8 節)、変動要因の推移を確認する (6.9 節)。そのうえで、MLI 法による要因分析をおこない、その結果を整理する (6.10 節)。さらに、MLI 法による要因分析結果を LI 法、RLI 法、LMDI 法による要因分析結果と比較する (6.11 節)。

6.2. 背景

世界の運輸部門における2009年のCO₂排出量は、全部門の23 %を占める (IEA 2011)。その中で、道路輸送におけるCO₂排出量は、運輸部門全体のCO₂排出量の大部分を占めている。現在、道路輸送のCO₂排出量は、日本、英国、ドイツを含むいくつかのOECD諸国において減少傾向にある。しかしながら、IEA (2010) は、2035年における世界の運輸部門の燃料需要を、現在より約40%増加すると予測している。道路輸送、特に乗用車のCO₂排出量の削減は、世界のCO₂排出量削減にとって、依然として重要である。

乗用車の CO₂ 排出量削減に効果的な施策の立案にとって、国/地域間の乗用車 CO₂ 排出量の差の主要因を定量的に特定することは重要である。要因分析法は、それらの要因を定量的に特定できる分析手法のひとつである。要因分析法による分析の中で国/地域間分析は、特定の年における2国間や2地域間のCO₂排出量やエネルギー消費量などの差の原因となっている変動要因を定量的に把握する。しかしながら、既往研究における要因分析は、ほとんど時系列分析である。さらに、エネルギー、環境関連分野における国/地域間要因分析に関しては、数例の既往研究がみられるものの (Sun (2000) ; Ang and Zhang (1999) ; Zhang and Ang (2001) ; Lee and Oh (2006))、

運輸部門における既往研究はみられない。また、国/地域間要因分析は、交絡項の値が大きくなるという時系列要因分析にはない特徴があり、要因分析において留意すべき点がある。しかしながら、要因分析法を用いて国/地域間要因分析をおこなう際の留意点に関しては、必ずしもこれまで十分に議論されてきたとは言えない状況にある。

6.3. 既往研究の概観

前節で述べたとおり、国/地域間要因分析に関する既往研究は、エネルギー、環境関連分野で数例みられる。これらの要因分析には、RLI 法と LMDI 法が使われている。しかしながら、運輸部門における国/地域間要因分析に関する既往研究はみられない。

Ang and Zhang (1999) および Zhang and Ang (2001) は、国/地域間要因分析に LI 法などの簡易要因分析法を用いることによる問題点を指摘している。その問題点とは次のとおりである。多くの場合、国や地域間のデータの差は、同じ国や地域における時系列データに比べて大きい。その結果、交絡項は大きなものとなる。しかしながら、簡易要因分析法はその交絡項を関連変動要因に帰属、配分しないで別途に計上する。そのため、変動要因に対する要因分析結果の解釈に関して疑問が残る。

Sun (2000) は、1995年におけるフィンランドのCO₂ 排出強度（GDP当たりのCO₂排出量）がスウェーデンより高い原因を、RLI法による要因分析によって明らかにしている。変動要因は、エネルギー別のCO₂排出係数、エネルギー構成（エネルギー別の消費率）、エネルギー強度（GDPあたりのエネルギー消費量）である。要因分析の結果、フィンランドのCO₂ 排出強度がスウェーデンより高い原因を、化石燃料消費の占める割合がスウェーデンより多いことにありと指摘している。

Ang and Zhang (1999) は、1993年におけるOECD諸国を3地域に分けた場合と世界をOECD諸国、旧ソビエト連邦と中央・東ヨーロッパ、その他諸国の3地域に分けた場合の地域別CO₂排出量の違いを、LMDI法を用いて要因分析している。変動要因は、燃料の種類別の燃料消費割合、燃料の種類別のCO₂排出係数、エネルギー強度（GDPあたりのエネルギー消費量）、国民所得レベル（人口一人あたりのGDP）、人口である。また、人口一人あたりの地域別CO₂排出量の違いについても要因分析をおこなっている。Ang and Zhang (1999) は、「要因分析の結果、地域間のCO₂排出量の差は、国民所得レベルと人口要因によるものである。また、人口一人あたりのCO₂排出量の差は、国民所得レベル要因によるものである」と指摘している。さらに、彼らは、LI法による要因分析もおこない、「LI法を用いた国/地域間要因分析では、交絡項が大きくなるため、その分析結果の解釈に疑問が残る」と指摘している。

Zhang and Ang (2001) は、時系列要因分析ではあまり問題とならない国/地域間要因分析の特質を指摘している。すなわち、国/地域間で変動要因の差が大きいことである。そのため、「簡易要因分析法は、大きな交絡項を各変動要因とは別に計上するため、分析結果の正確な解釈を困難にする。したがって、LI法のような従来の簡易要因分析法は国/地域間要因分析には適さない」と論じている。そのうえで、かれらは、Ang and Zhang (1999) のデータを使って、1993年におけるOECD諸国、旧ソビエト連邦と中央・東ヨーロッパ、その他諸国の3地域の地域別CO₂排出量の違いを、LI法、RLI法、LMDI法により要因分析し、各要因分析法の違いによる分析結果の違いに

について論じている。変動要因は、Ang and Zhang (1999) と同様、燃料の種類別の燃料消費割合、燃料の種類別のCO₂排出係数、エネルギー強度（GDPあたりのエネルギー消費量）、国民所得レベル（人口一人あたりのGDP）、人口である。「要因分析の結果、いずれの要因分析法においても、地域間のCO₂排出量の違いは、主に国民所得レベルと人口要因によるものである」と指摘している。さらに、かれらは、LMDI法は対数項があるため、RLI法にくらべて安定性のある分析結果（Stable Decomposition Results）が得られることを論じている。

Lee and Oh (2006) は、1996年における、APEC諸国を国民所得レベルにより3地域に分け、地域別CO₂排出量、および、人口一人あたりのCO₂排出量の違いを、LMDI法による要因分析を用いて検討している。変動要因は、Ang and Zhang (1999) と同様、燃料の種類別の燃料消費割合、燃料の種類別のCO₂排出係数、エネルギー強度、国民所得レベル、人口である。「要因分析の結果、地域別CO₂排出量、および、人口一人あたりのCO₂排出量の違いは、主に国民所得レベル要因によるものである」と指摘している。

6.4. 国/地域間要因分析の特質

国/地域間要因分析には、時系列要因分析と異なる特質があり、要因分析において留意すべき点がある。

第一に、国/地域間要因分析で使用する国/地域間データの差は、時系列要因分析で使用するデータの差に比べて大きい（Ang (2004)）。分析データに大きな差があると交絡項は大きくなる。その結果、国/地域間要因分析では、同時変化する変動要因への交絡項の帰属と配分方法の違いによって、分析結果に大きな差が生じる。米国と日本の一台あたりの走行距離を例にとれば、国/地域間要因分析で使用する両国の一台あたりの走行距離には2006年において2.2倍の差がある。一方、両国の国別の時系列要因分析で使用する一台あたりの走行距離にはそれほど大きな差はみられない。

第二に、検討対象とする国や地域データの分類方法、集計方法に違いがある。したがって、要因分析にあたっては、検討の範囲、データの分類方法、集計方法を確認し、要因分析の目的に照らし合わせて、支障がないことを確認する必要がある。乗用車を例にとれば、日本では乗用車を排気量と車体のサイズにより分類している。一方、米国では、前輪軸と後輪軸との距離を示すホイールベースを基準に分類している。また、欧州では、全長、価格、装備、ボディースタイルなどの複数要件を考慮したセグメントという概念で分類している。

Millard-Ball and Schipper (2011) は、工業先進8カ国の運輸部門におけるエネルギー消費量と温室効果ガス排出量の推計に用いる各国のデータに関して、「各国のデータは多種多様で複雑である。特に、交通量とエネルギーのデータが別の機関から発表され、それらは必ずしも整合性を持っていない。さらに、データの集計範囲と方法が異なる」と述べている。また、そもそも国や地域によっては、要因分析に使用すべき統計データが整備されていない場合や入手が困難な場合がある。特に、先進国と開発途上国間の変動量の差を要因分析する場合など、データの入手可能性とその精度などについて注意が必要である。

6.5. 国/地域間要因分析方法

6.5.1. 国/地域間要因分析法の特定

本研究における国/地域間要因分析には MLI 法を用いる。なぜなら、第 4 章で論じたように、MLI 法は、交絡項の変動要因への帰属と配分方法に関して優れた要因分析法と考えられるからである。前節で論じたように、国/地域間要因分析では、多くの場合、国/地域間データの差が大きい。そのため、交絡項が大きなものとなり、同時変化する変動要因への交絡項の帰属と配分方法の違いによって、分析結果に大きな差が生じる場合が多い。

簡易要因分析法である LI 法は、Ang and Zhang (1999) および Zhang and Ang (2001) も指摘しているとおり、交絡項を要因項と別途計上する。したがって、分析結果の解釈に関して正確性に疑問が残る。RLI 法は、交絡項を交絡する要因項に均等分配することに課題が残る。特に、同じ交絡項に増加要因と減少要因が混在する場合、MLI 法との差異は大きなものとなる。LMDI 法は、対数線形連続積分関数のため、理論的にデータの変動は連続関数でなければならない。Lakshmanan (1997) も指摘しているとおり、LMDI 法は、微小な差の離散型データであれば分析結果に与える影響は小さい。しかしながら、国/地域間要因分析のように、大きな差がある離散データを使って要因分析をする場合に課題がある。

一方、MLI 法は、第 4 章で議論したように、完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、優れた要因分析法であると考えられる。

6.5.2. 国/地域間要因分析方法

国/地域間要因分析に用いる MLI 法の算出式は次のようにして得られる。算出式は、第 4 章の時系列要因分析の式(4-1)および式(4-2)における基準年(0)から比較年(t)の各変動要因(x, y)の CO₂ 排出変動量($\Delta CO_{2x}, \Delta CO_{2y}$)を、2 国間(A, B)の各変動要因の差(B 国をベース)に置き換えることによって得られる(式(6-1)、式(6-2))。ここで、 a, b は、各変動要因の対称変化率である(式(6-3))。

$$\Delta CO_{2x} = \Delta x y^B + \frac{a}{a+b} \Delta x \Delta y \quad (6-1)$$

$$\Delta CO_{2y} = x^B \Delta y + \frac{b}{a+b} \Delta x \Delta y \quad (6-2)$$

$$a = \frac{\Delta x}{\left(\frac{x^A + x^B}{2} \right)}, b = \frac{\Delta y}{\left(\frac{y^A + y^B}{2} \right)} \quad (6-3)$$

ただし、

$\Delta x > 0, \Delta y < 0$ の時、 $b = 0$ 、

$\Delta x < 0, \Delta y > 0$ の時、 $a = 0$ 、

$\Delta x < 0, \Delta y < 0$ の時、 $\frac{a}{a+b}$ を $1 - \frac{a}{a+b}$ 、 $\frac{b}{a+b}$ を $1 - \frac{b}{a+b}$ で置換する。

4変動要因 (x_1, x_2, x_3, x_4) の場合、たとえば、 x_1 要因の変動量は、以下のように示される。

$$\begin{aligned} \Delta CO_{2x_1} = \Delta x_1 & \left(x_2^B x_3^B x_4^B + \frac{a_1}{a_1 + a_2} \Delta x_2 x_3^B x_4^B + \frac{a_1}{a_1 + a_3} x_2^B \Delta x_3 x_4^B + \frac{a_1}{a_1 + a_4} x_2^B x_3^B \Delta x_4 \right. \\ & \left. + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3} \Delta x_2 \Delta x_3 x_4^B + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_4} \Delta x_2 x_3^B \Delta x_4 + \frac{a_1}{a_1 + a_3 + a_4} x_2^B \Delta x_3 \Delta x_4 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4} \Delta x_2 \Delta x_3 \Delta x_4 \right) \end{aligned} \quad (6-4)$$

ただし、

$$a_i = \frac{\Delta x_i}{\left(\frac{x_i^A + x_i^B}{2} \right)} \quad (i=1,2,3,4)$$

6.6. 要因分析の対象と範囲

本研究では、要因分析の対象を、日本、米国、英国における人口一人あたりの乗用車の CO₂ 排出量としている。日本は比較的公共交通が発達し、乗用車の CO₂ 排出量は 2001 年をピークに減少傾向に転じている。一方、米国は世界の自動車大国として、乗用車の CO₂ 排出量は依然として増加傾向にある。また、EU 諸国の中で、英国の乗用車の CO₂ 排出量は近年減少傾向にある。

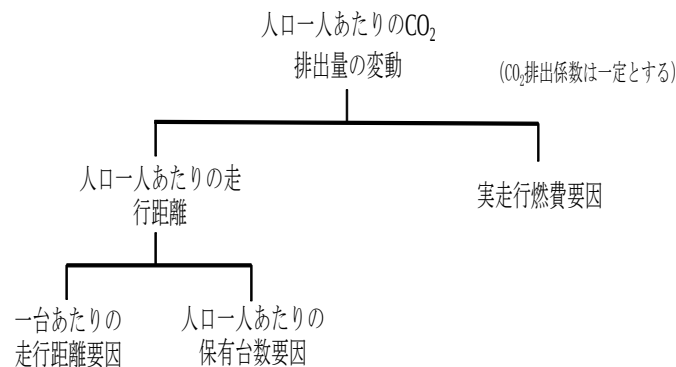
検討年は 2000 年と 2006 年とする。また、要因分析に必要とする各変動要因に関連するデータは、各国の政府および関連公共機関などから公表された統計データから抽出する。

なお、要因分析は特定の年における 2 国間の分析となることから、ここでは米国 - 日本、米国 - 英国、および、英国 - 日本についておこなう。

6.7. 変動要因の特定

本研究では、データの入手可能性や既往研究などを参考とし、人口一人あたりの乗用車の CO₂ 排出量の変動要因は、図 6-1 のように関連付けることができるものと仮定し、変動要因を次の 3 要因とした。

1. 保有台数あたりの走行距離 (D/N : km/台)
2. 人口一人あたりの保有台数 (N/P : 台/人口)
3. 実走行燃費 (D/L : km/L)

図 6-1. 人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の変動要因関連図

人口一人あたりの CO₂ 排出量 (CO₂/P: ton-CO₂) は、以下のように示される。

$$\frac{CO_2}{P} = C \times \frac{D}{N} \times \frac{N}{P} \times \frac{1}{D/L} \quad (6-5)$$

ここで、C は、CO₂ 排出係数(ton-CO₂/L)を示し、一定としている。CO₂ 排出係数は、2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories の炭素排出係数と発熱量から算出し、ガソリンについては 2.26 ton-CO₂/kL、ディーゼルについては 2.67 ton-CO₂/kL を用いている。

なお、第 5 章の時系列要因分析と同様に、要因の特定にあたり、ガソリン価格や減税措置は、CO₂ 排出量の直接変動要因の内、乗用車の利用（走行距離）、所有（保有台数）、車種選択（燃費）に影響を与え、その結果として CO₂ 排出量の動向に影響を与える高次の要因と捉え、本要因分析における変動要因としていない。さらに、CO₂ 排出量の削減に寄与する電気自動車やハイブリッド車などの低環境負荷車両の普及については、低環境負荷車両単独の各変動要因に関する統計資料がないため、単独の変動要因としていない。

6.8. 分析データ

表 6-1は、人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の変動要因に関連する日本、米国、および、英国のデータの出典をまとめたものである。表 6-2は、2000年と2006年における日本、米国、および、英国の変動要因に関連するデータと人口一人あたりのCO₂排出量を示している。各統計データの内、保有台数と人口は全数調査、走行距離と燃料消費量はサンプル調査がおこなわれている。各データは、相互に比較できるデータと考える。なお、米国におけるディーゼル乗用車新車登録台数の乗用車全体の新規登録台数に占める割合は、2000年に0.26%、2004年に0.40%、2006年に

6. 日米英間の乗用車 CO₂ 排出量の変動要因分析

0.82%と非常に小さい（日本自動車工業会 2004、2008）。したがって、米国の燃料消費はすべてガソリンとしている。

表 6-1. 乗用車の CO₂ 排出量変動要因関連データの出典

データ		出典
日本	走行距離	自動車輸送統計年報（国土交通省）
	保有台数	自動車保有車両数（自動車検査登録協会） 軽自動車保有台数（全国軽自動車協会連合会）
	燃料消費量	自動車輸送統計年報（国土交通省）
	人口	人口統計（総務省）
米国	走行距離	} Highway Statistics (FHWA) (Short Wheelbase Light-Duty Vehicles)
	保有台数	
	燃料消費量	
	人口	United States Census (Department of Commerce)
英国	走行距離	IRF World Road Statistics
	保有台数	世界自動車統計年報（日本自動車工業会 2012）
	燃料消費量	Energy and Environmental Statistics (UK Department of Transport Statistics)
	人口	Population Census (Office for National Statistics, UK)

表 6-2. 変動要因関連データ

日本					
年	走行距離 (10 ⁶ km)	保有台数 (10 ³)	燃料消費量 (10 ³ kL)	人口 (10 ⁶)	CO ₂ 排出量/人口 (ton CO ₂ /人口)
2000	508,258	52,449	56,731	126.93	1.03
2006	514,109	57,510	52,639	127.77	0.94
米国					
年	走行距離 (10 ⁶ km)	保有台数 (10 ³)	燃料消費量 (10 ³ kL)	人口 (10 ⁶)	CO ₂ 排出量/人口 (ton CO ₂ /人口)
2000	2,575,412	133,621	276,582	282.17	2.22
2006	2,720,651	135,400	283,940	298.59	2.15
英国					
年	走行距離 (10 ⁶ km)	保有台数 (10 ³)	燃料消費量 (10 ³ kL)	人口 (10 ⁶)	CO ₂ 排出量/人口 (ton CO ₂ /人口)
2000	376,798	28,000	32,332	58.89	1.28
2006	402,177	30,995	31,365	60.58	1.22

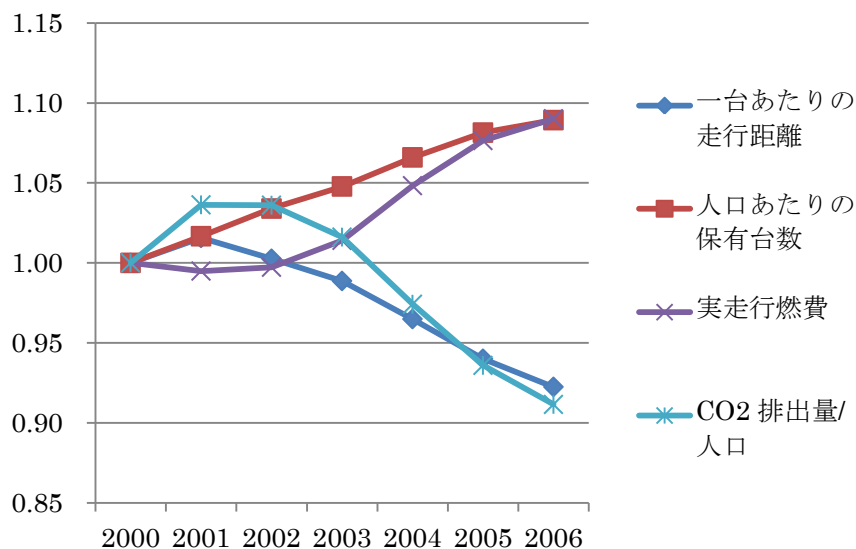
6.9. 変動要因の推移

図 6-2(a)(b)(c)は、日本、米国、および、英国の各変動要因の推移を人口一人あたりのCO₂排出量の推移とともに示している。いずれの要因も2000年値を基準としている。

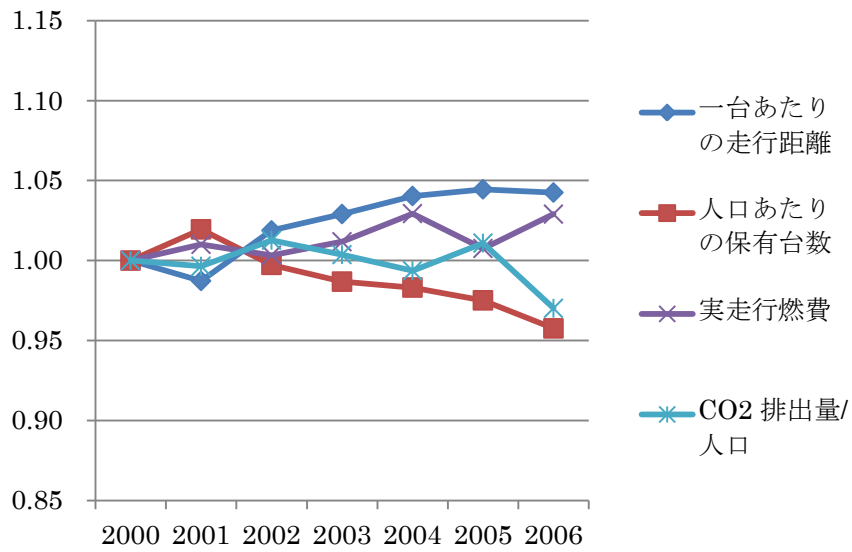
日本の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量は、2001年をピークにして、それまでの増加傾向から減少傾向に転じている（2006年：2001年比8.8%減）。また、増加傾向にあった走行距離も2003年をピークにその後減少に転じ、保有台数の増加率が走行距離の増加率より大きいいため、一台あたりの走行距離は減少傾向を維持している（2006年：2000年比7.8%減）。人口一人あたりの保有台数は増加傾向が続いている（2006年：2000年比8.9%増）。一方、実走行燃費は2002年以降改善に転じている（2006年：2000年比9%改善）。

米国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の変動は日本および英国の変動に比べて小さい。また、走行距離の増加が保有台数の増加より大きいいため、一台あたりの走行距離は増加傾向にある（2006年：2000年比4.3%増加）。人口一人あたりの保有台数は減少傾向にある（2006年：2000年比4.2%減）。実走行燃費は、改善傾向にあり、2006年に2000年比2.9%改善された。

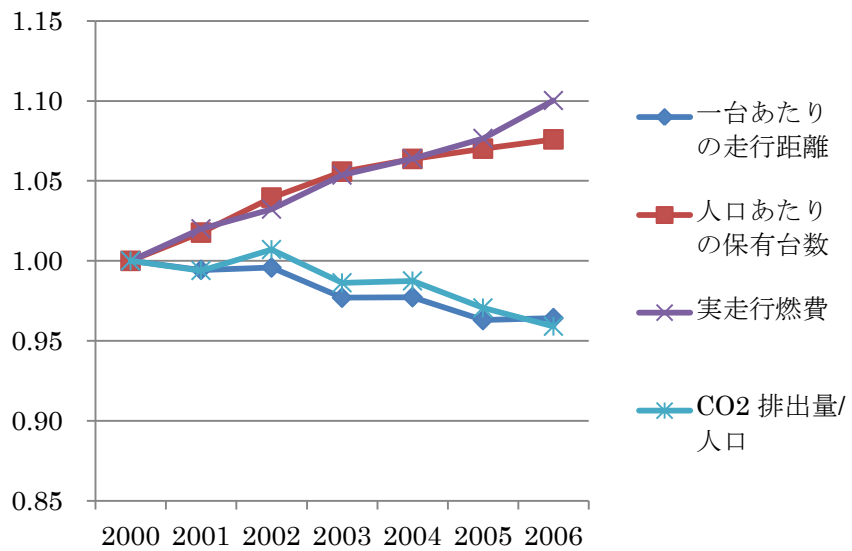
英国の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量は減少傾向にある（2006 年：2000 年比 4.1%減）。また、一台あたりの走行距離も減少傾向にある（2006 年：2000 年比 3.6%減）。人口一人あたりの保有台数は増加傾向にある（2006 年：2000 年比 7.6%増）。一方、実走行燃費は日本より良く、2006 年に 2000 年比 10%改善されている。



(a)



(b)



(c)

図 6-2. 乗用車の CO₂ 排出量と変動要因の推移
: (a)日本、(b)米国、(c)英国

6.10. 要因分析結果

図 6-3(a)(b)(c)は、2000 年および 2006 年における、人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の要因分析結果を示している。

本節では、MLI 法を用いた要因分析結果をもとに、2000 年および 2006 年における日本、米国、および、英国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の主な要因を定量的に示す。さらに、2000 年から 2006 年にかけての各国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の変動について検討する。

6.10.1. 米国 - 日本（図 6-3(a)）

6.10.1.1. 2000 年および 2006 年における人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の主な要因

2000年および2006年における米国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量は、日本の2.14倍および2.29倍であった（表 6-2）。両国間の差の主な要因は、両年ともに一台あたりの走行距離である。特に、2006年における一台あたりの走行距離要因は、人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の両国間の差全体の98%を占めている。2000年における人口一人あたりの保有台数要因も米国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量が多いことに寄与している。しかしながら、人口一人あたりの保有台数要因の影響は、一台あたりの走行距離要因の影響に比べて非常に小さい。一方、2006年における人口一人あたりの保有台数要因による影響はみられない。また、実走行燃費要因の影響は、2000年、2006年ともに小さい。

6.10.1.2. 2000 年から 2006 年にかけての人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の変動

2006年における米国と日本の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差（1.21トンCO₂ / 人口）は、2000年の差（1.18トンCO₂ / 人口）より大きくなっている。その主な要因は、一台あたりの走行距離である。米国の一台あたりの走行距離は増加傾向にあるが、日本は減少傾向にある（図 6-2(a)(b)）。そのため、2006年における両国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差は、2000年における差に比べて大きくなっている（0.125トンCO₂ / 人口）。一方、米国の人口一人あたりの保有台数は減少傾向にあるが、日本は増加傾向にある（図 6-2(a)(b)）。そのため、2006年における人口一人あたりの保有台数に起因する両国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差は、2000年の差に比べて小さい（0.156トンCO₂ / 人口）。しかしながら、一台あたりの走行距離と実走行燃費に起因する両国間のCO₂排出量の差の合計が、人口一人あたりの保有台数に起因する両国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差を上回っている（0.025トンCO₂ / 人口）。

以上の点から、米国は、日本に比べて、人口一人あたりの保有台数の減少は進展したが、一台あたりの走行距離の増加に起因する乗用車依存度の高い状況が進展したと推測される。

6.10.2. 米国 - 英国 (図 6-3(b))

6.10.2.1. 2000 年および 2006 年における人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の主な要因

2000年および2006年における米国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量は、英国の1.74倍および1.76倍であった(表 6-2)。両国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差の主な要因は、両年ともに一台あたりの走行距離と実走行燃費である。一台あたりの走行距離の影響は、実走行燃費要因の影響に比べて大きい。また、人口一人あたりの保有台数要因の影響は、2000年、2006年ともに小さい。

6.10.2.2. 2000 年から 2006 年にかけての人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の変動

2006年における米国と英国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差(0.94トンCO₂/人口)は、2000年の差(0.93トンCO₂/人口)とほぼ同じ値となっている。米国の一台あたりの走行距離は増加傾向にあるが、英国は減少傾向にある(図 6-2(b)(c))。そのため、2006年における一台あたりの走行距離に起因する両国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差は、2000年における差に比べて大きくなっている(0.022トンCO₂/人口)。また、実走行燃費に起因する両国間のCO₂排出量の差も2000年における差に比べて大きくなっている(0.023トンCO₂/人口)。一方、米国の人口一人あたりの保有台数は減少傾向にあるが、英国は増加傾向にある(図 6-2(b)(c))。そのため、2006年における人口一人あたりの保有台数に起因する両国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差の絶対値は、2000年の差の絶対値に比べて大きい(0.059トンCO₂/人口)。

以上の点から、米国は、英国に比べて、人口一人あたりの保有台数の減少は進展したが、一台あたりの走行距離が増加し実走行燃費の改善が進展していない状況にあったと推測される。

6.10.3. 英国 - 日本 (図 6-3(c))

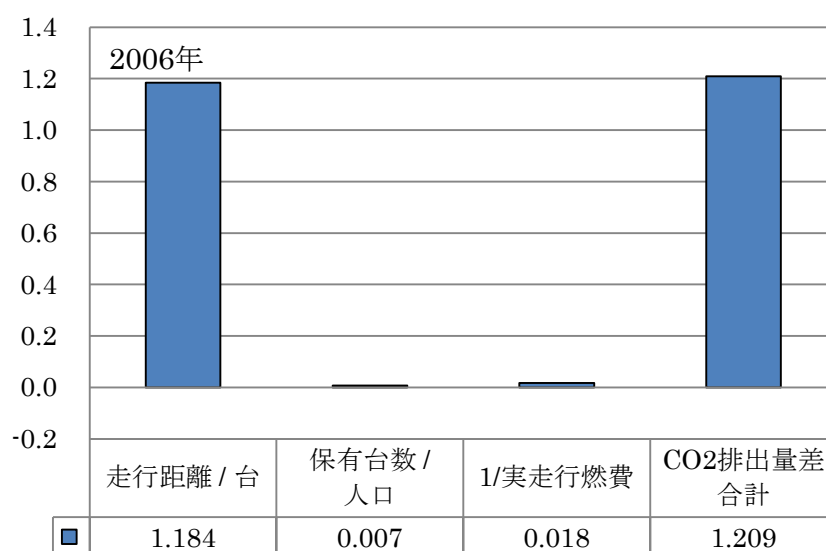
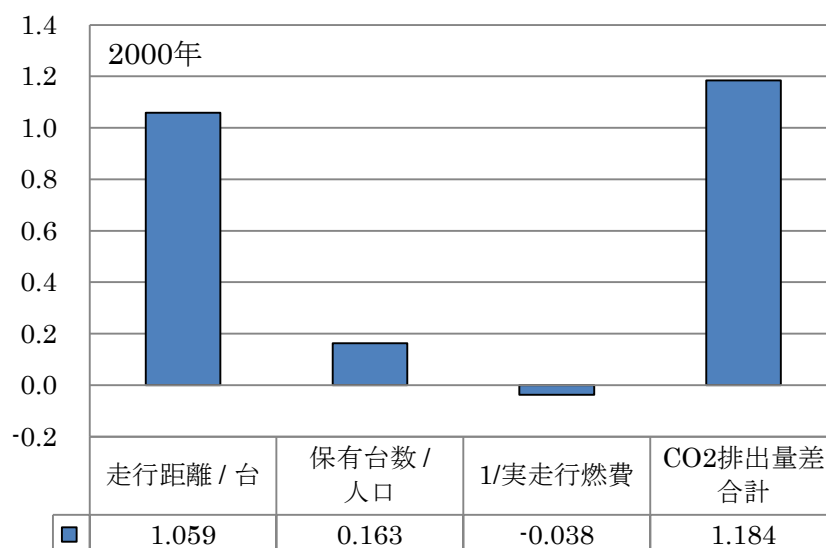
6.10.3.1. 2000 年および 2006 年における人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の主な要因

2000年および2006年における英国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量は、日本の1.24倍および1.30倍であった(表 6-2)。両国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差は、日米間および米英間の差に比べて小さい。この両国間の差の主な要因は、両年ともに一台あたりの走行距離である。また、人口一人あたりの保有台数要因も英国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量が日本に比べて多いことに寄与している。一方、実走行燃費要因は英国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量が日本に比べて少ないことに寄与している。しかしながら、実走行燃費要因の影響は、一台あたりの走行距離要因の影響に比べて小さい。

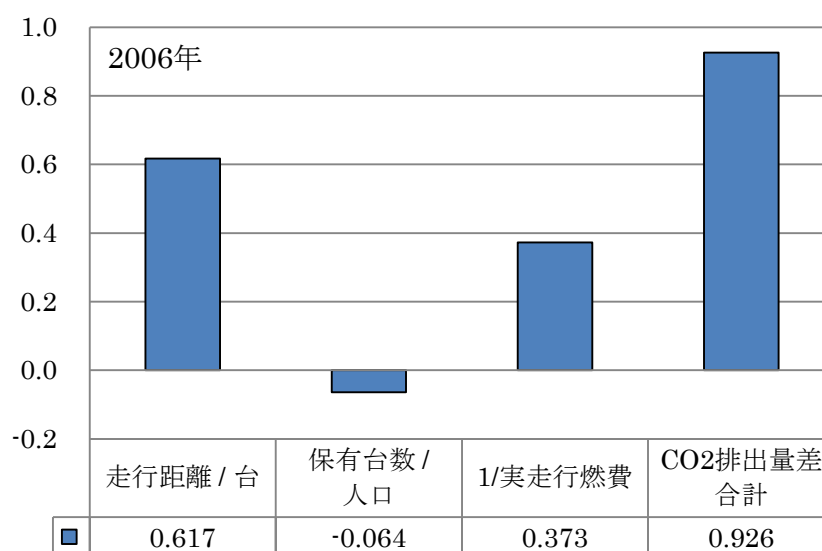
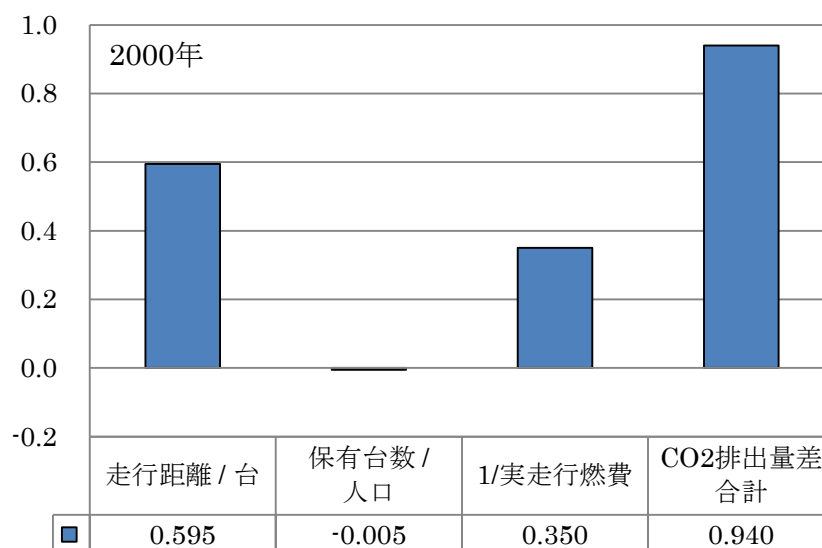
6.10.3.2. 2000 年から 2006 年にかけての人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の変動

2006年における英国と日本の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差（0.28トンCO₂/人口）は、2000年の差（0.24トンCO₂/人口）より大きくなっている。その要因は、一台あたりの走行距離である。両国ともに、一台あたりの走行距離は減少傾向にあり、人口一人あたりの保有台数は増加傾向にあり、実走行燃費は改善傾向にある（図 6-2(b)(c)）。しかしながら、英国の一台あたりの走行距離の減少傾向は、日本の減少傾向に比べて小さい。一方、英国の人口一人あたりの保有台数の増加傾向は日本に比べて小さく、実走行燃費の改善は日本に比べて進展している。

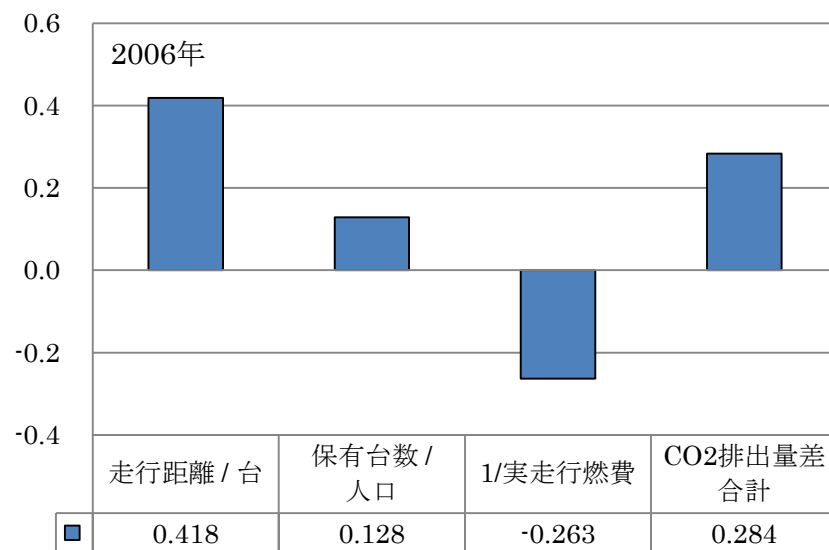
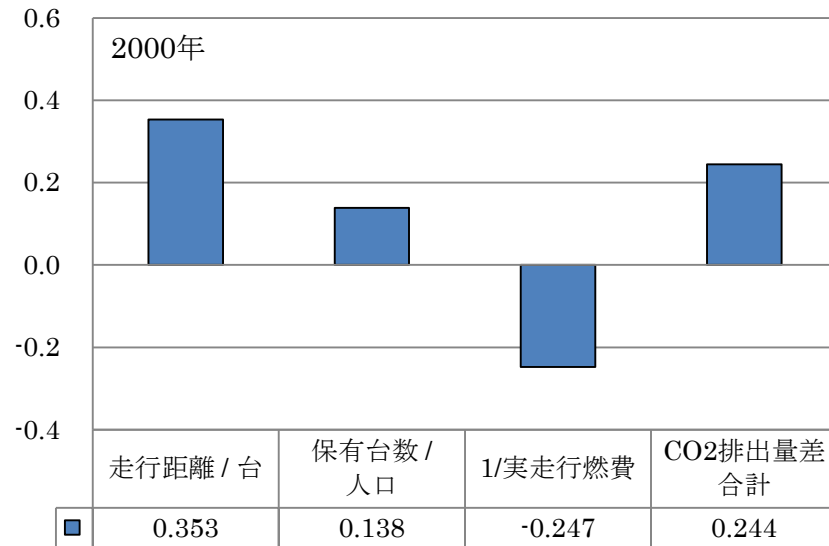
以上の点から、英国は、日本に比べて、実走行燃費は改善されたが、一台あたりの走行距離に起因する乗用車依存度が高い状況が進展したものと推測される。



(a)



(b)



(c)

図 6-3. 要因分析結果：要因別乗用車 CO₂ 排出量/人口の差（トン CO₂ / 人口）

：(a) 米国 - 日本（日本ベース）、(b) 米国 - 英国（英国ベース）、(c) 英国 - 日本（日本ベース）

6.11. MLI 法と既往要因分析法による分析結果の比較

本節では、2006 年における英国と日本の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差について、MLI 法と既往要因分析法（RLI 法、LMDI 法、LI 法）による分析結果を比較し（図 6-4）、国/地域間要因分析と各要因分析法の理論的特徴、および、要因分析法の違いによる分析結果の差について確認する。

各要因分析法による分析結果を比較した結果は、つぎのとおりである。

第一に、国/地域間要因分析の場合、交絡項は大きくなる。交絡項の合計は、LI 法の残留項に相当し、本分析の場合、絶対値で全体（0.284 トン CO₂/人口）の 36.3%を占めている。

第二に、この大きな交絡項を要因項へ帰属、配分させる各要因分析法による違いが、各要因分析法の分析結果に無視できない影響を与えている。本分析の場合、要因分析法の違いによる分析結果の差の大きい要因は、人口一人あたりの保有台数（MLI 法による分析結果：RLI 法比 79%）と実走行燃費（MLI 法による分析結果：RLI 法比 76%）である。

第三に、MLI 法による各変動要因の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出増減量は、他の要因分析法に比べて少ない傾向がある。この主な理由として、同じ交絡項の中に同時変化する増加要因と減少要因が混在する場合、MLI 法は、他の要因分析法と異なり、交絡項を同時変化する増加要因側だけに帰属させ、減少要因側に帰属させないことが挙げられる。

CO₂ 排出量やエネルギー消費量に対する削減対策効果の進捗に伴い、今後、増加要因と減少要因が混在する事例が数多く発生すると予想される。その場合、MLI 法と他の要因分析法による分析結果の違いは大きなものとなる。さらに、国/地域間の要因分析のように各要因の変動量が大きい場合、交絡項は大きな値となる。したがって、分析結果の違いはさらに大きなものとなる。

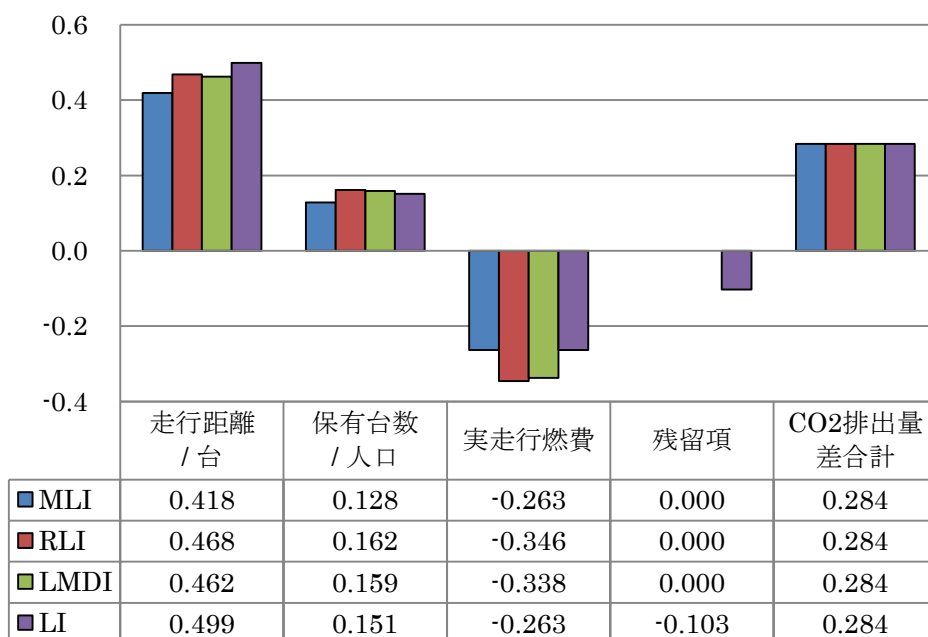


図 6-4. MLI 法と既往要因分析法による要因分析結果の比較（トン CO₂/人口）

：2006 年における英国と日本の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差異（日本ベース）

6.12. 結語

本章では、MLI 法を用いて、2000 年と 2006 年における日本、米国、および、英国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差について、要因分析をおこなった。まず、国/地域間要因分析の特質について論じ、国/地域間要因分析に適した要因分析法を特定した。そのうえで、要因分析をおこない、2000 年と 2006 年における日本、米国、および、英国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の要因を定量的に検討し、2000 年から 2006 年にかけての各国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の変動について検討した。さらに、MLI 法と他の要因分析法による分析結果を比較し、国/地域間要因分析と各要因分析法の理論的特徴と要因分析法の違いによる分析結果の差を確認した。

MLI 法は、特に、同じ交絡項の中に同時変化する増加要因と減少要因が混在し、交絡項が大きい（要因の変動が大きい）場合、優れた要因分析法であることから、国/地域間の要因分析においても、他の要因分析法より正確性のある分析結果を提供するものと考えられる。

要因分析の結果、2000 年と 2006 年において、米国の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量が日本および英国に比べて多い主な要因は、米国の一台あたりの走行距離が長いことであった。また、米英間の比較において、米国の実走行燃費の悪さも、米国の人口一人あたりの CO₂ 排出量が多い要因であることが示唆された。また、英国の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量が日本に比べて多い要因は、英国の一台あたりの走行距離が長いことであった。英国の実走行燃費の良さが、日本と英国間の人口一人あたりの CO₂ 排出量の差を小さくすることに寄与している。しかしながら、その影響は一台あたりの走行距離の影響に比べて小さい。

また、2000 年から 2006 年にかけての各国間の人口一人あたりの乗用車 CO₂ 排出量の差の変動について検討した結果、米国と英国は、日本と比較して、一台あたりの走行距離が長いことに起因する乗用車依存度の高い状況が進展したと推測された。さらに、米国は、英国に比べて、人口一人あたりの保有台数の減少は進展しているが、一台あたりの走行距離は増加し実走行燃費の改善が進展していない状況であったと推測された。また、英国は、日本に比べて、実走行燃費は改善されたが、一台あたりの走行距離に起因する乗用車依存度が高い状況が進展したと推測された。

さらに、MLI 法と他の要因分析法による分析結果を比較した結果、国/地域間分析では交絡項が大きくなり、この大きな交絡項を要因項へ帰属、配分させる各要因分析法による違いが、時系列分析以上に各要因分析法の分析結果に無視できない影響を与えることを示した。

7. 2020 年までの日本の自家用乗用車 CO₂ 排出量の推計

7.1. 緒言

本章では、要因分析法を用いて 2020 年までの日本の自家用乗用車 CO₂ 排出量の将来推計（プロジェクト）と主な変動要因を定量的に把握する。CO₂ 排出量の推計にあたっては、第 4 章で構築した MLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計方法（Modified Laspeyres Index for Projection : PMLI 法）を構築する。また、PMLI 法による要因分析結果について RLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量推計方法による要因分析結果と比較する。そして、PMLI 法の理論的な特徴と RLI 法を応用した推計方法による要因分析結果との差を検討する。

乗用車の CO₂ 排出量を削減することは、日本を含め多くの国における温室効果ガス削減目標の達成にとって、非常に重要である。そのためには、CO₂ 排出量削減を目的としたフォアキャスティングシナリオやバックキャスティングシナリオを策定し、CO₂ 排出量削減に向けて有効な施策の立案を必要とする。フォアキャスティングシナリオ、および、バックキャスティングシナリオを作成するためには、まず、将来の CO₂ 排出量などの変動を推計する必要がある。さらに、その結果をもとに CO₂ 排出量の主な変動要因を定量的に捉えることが求められる。要因分析法はそのための有用な手法である。

本章では、まず、本研究の背景を述べ（7.2 節）、既往研究を概観する（7.3 節）。つぎに、MLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計方法（PMLI 法）を構築する（7.4 節）。そして、推計をおこなう対象と分析の範囲を明確にし（7.5 節）、変動要因を特定し（7.6 節）、分析データの出典を述べ（7.7 節）、変動要因の推移を確認する（7.8 節）。そのうえで、各変動要因のこれまでの年平均変動率を算定し（7.9 節）、PMLI 法による要因分析をおこない、将来 CO₂ 排出量の推計と変動要因を定量的に把握する（7.10 節）。さらに、PMLI 法による要因分析結果について、RLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計方法による要因分析結果と比較する（7.11 節）。

7.2. 背景

自家用乗用車の CO₂ 排出量を削減することは、日本を含め多くの国における温室効果ガス削減目標の達成にとって、非常に重要である。しかしながら、CO₂ 排出量の削減を含めた運輸部門の問題は持続可能性に係わる問題であり、対策の立案や実行にあたって長い期間を要する困難なものである（Barella and Amekudzi (2011)）。運輸部門の諸問題の対策の立案には不確実性が伴う。さらに、将来の交通状況の予測を必要とする。そのためには、CO₂ 排出量の将来推計をおこない、その結果をもとにした CO₂ 排出量削減のためのシナリオの策定が不可欠である。

シナリオは、CO₂ 排出量削減などの対策の立案において戦略的選択をおこなうために有用なものである（Zegras et al. (2004)）。シナリオは、たとえば運輸部門のような複雑なシステムの将来像を描く。しかしながら、複雑なシステムは、現状を把握するのが難しいうえに将来予測も難しく、高い科学的な不確実性を伴う（Nakicenovic (2000)）。

Geures and Wee (2004) によると、シナリオには二種類ある。ひとつは Projective Scenario であり、他は Prospective Scenario である。Projective Scenario の策定はフォアキャスティング（Forecasting）と呼ばれる。フォアキャスティングは、現状を出発点とし、過去のデータや実績

に基づいて将来像を描く。一方、Prospective Scenario の策定はバックキャスティング (Backcasting) と呼ばれる。バックキャスティングは、将来のあるべき状況を想定し、その時点を出発点とし、将来のあるべき状況を実現するための方策を検討する。フォアキャスティングとバックキャスティングにとって、過去および将来の CO₂ 排出量やエネルギー消費量などの推計、ならびに、それらの変動に影響を与える要因を定量的に特定した分析結果は不可欠なものである。

要因分析法は、CO₂ 排出量やエネルギー消費量などの過去および将来の変動をもとに主な変動要因を定量的に特定する。Agnolucci et al. (2009) は、「要因分析法は、定量的なシナリオ策定に非常に有用である」と指摘している。また、Steenhof et al. (2006) は、「要因分析法は、主要な変動要因への対応の論拠を与える」と述べている。さらに、Steenhof et al. (2006) は、「要因分析法は、計算および分析結果の解釈が容易であることから、将来 CO₂ 排出量を推計するためのベースラインの構築にとって有用である」と論じている。

しかしながら、これまでの要因分析は、ほとんど過去の変動に関する分析に限られている。要因分析法を応用した手法を用いて、CO₂ 排出量やエネルギー消費量などの将来推計をおこない、その変動の主要因を定量的に捉える研究は、ほとんどおこなわれていない。Ang and Zhang (2000) は、「要因分析法を用いたこれまでの研究の大多数は、過去の推移に対する分析であった。しかしながら、主要因が将来にわたり一定、あるいは、これまでの変動動向に従うと仮定した場合、要因分析法は、将来のエネルギー需要や CO₂ 排出量の予測においても有用である」と論じている。

したがって、要因分析法を応用した推計手法を構築し、将来の CO₂ 排出量などを推計し、その主な変動要因を定量的に把握することができれば、フォアキャスティングやバックキャスティングによる CO₂ 排出量などの削減シナリオの立案にとって有用である。

7.3. 既往研究の概観

将来推計 (プロジェクション) とシナリオ策定に関して多くの議論がある。

プロジェクションに対しては、その信頼性に関して懐疑的な見方がある。Myers and Kitsuse (2000) は、「プロジェクションとは、仮定条件を、その信憑性を評価することなく定量化手法の中に入れ込み、現在あるいは過去の動向が将来におよぼす影響を説明しただけのものである」と評している。また、Kwon (2005) は、「CO₂ 排出量に対する将来動向の正確な推計は困難である。なぜなら、人の交通利用行動の変化や技術の進歩には大きな不確実性があるからだ」と論じている。Linderoth (2002) は、「IEA Energy Policy 年報のプロジェクションは正確性に欠ける。その原因は、特に産業部門における成長率の不正確な予測である。また、運輸部門におけるエネルギー需要の予想以上の高い伸びは、温室効果ガス排出量削減のコミットメントに深刻な問題を投げかけている」と指摘している。

一方で、プロジェクションに対して、その有効性も指摘されている。Agnolucci et al. (2009) は、「過去の動向は将来推計にとって必ずしも良い指標とはならない場合もある。しかしながら、少なくとも CO₂ 排出量に関して、これまでの動向を精査することは、将来の変動に影響を与える要因の特定に役に立ち、将来変動に対応した対策の有効性を検討するのに役立つ」と論じている。

シナリオの策定に関して Borjeson (2006) は、「特定の近未来における展開を予測するには、フォアキャスティングが適している。一方、特定の目標を達成するには、バックキャスティング

が適している」と述べている。Barella and Amekudzi (2011) は、「遠い将来を対象とした検討には、バックキャストリングが適している。過去のデータや実績に基づいて将来像を予測するフォアキャストリングでは、不確実性が高くなる」と指摘している。

運輸部門における既往研究はフォアキャストリングである。これらの研究は、現在の社会経済状況の継続を前提として、現在および将来の交通行動に起因する問題を取り扱っている。バックキャストリングは、運輸部門の研究において、ほとんどおこなわれていない (Geures and Wee (2004))。

要因分析法は、シナリオ策定にあたり、過去の変動量の要因分析に用いられている。しかしながら、将来 CO₂ 排出量などの推計にほとんど用いられていない。シナリオ策定にあたり、要因分析法を過去の変動量の分析に用いた既往研究には、次のものがある。

Steenhof (2006) は、2012 年におけるカナダの貨物輸送部門の温室効果ガス排出量を推計し、Projective Scenario を策定している。そのシナリオのベースは、1990 年から 2003 年の温室効果ガス排出量の変動に関する要因分析結果である。彼は、その要因分析結果をもととして、2003 年以降の各要因の変動を予想している。また、Steenhof (2007) は、2020 年における中国の電力部門の CO₂ 排出量の Projective Scenario を策定している。彼は、シナリオ策定にあたり、1980 年から 2002 年の CO₂ 排出量の変動について、RLI 法を用いて要因分析をおこなっている。2002 年以降については、中国政府機関による推計や文献レビューの結果をもとに、各要因の変動を予想している。Hatzigeorgiou et al. (2010) は、1995 年から 2020 年におけるギリシャと EU-25 諸国のエネルギー関連 CO₂ 排出量の変動を分析している。彼らは、その中で 1990 年から 2000 年のエネルギー変動について LMDI 法を用いて要因分析をおこなっている。2000 年以降については、彼らが開発したシミュレーションモデルを用いて Projective Scenario を策定している。Kwon (2005) は、2000 年から 2030 年の英国における自動車移動による CO₂ 排出量の推計を、過去の要因分析結果から予想している。しかしながら、将来 CO₂ 排出量の推計には要因分析法を用いていない。

一方、要因分析法を将来 CO₂ 排出量などの推計に用いた既往研究として、唯一つ、Sun (2001) が、RLI 法を応用した手法を提唱し、1998 年から 2010 年の EU-15 諸国におけるエネルギー需要の推計をおこなっている。しかしながら、3.4.3 節で論じたとおり、RLI 法には交絡項を関連変動要因に帰属、配分する方法に関して改善すべき点が残されている。

7.4. 将来推計手法の構築

本節では、MLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計手法 (PMLI 法) を構築する。PMLI 法は、CO₂ 排出量の各変動要因のこれまでの動向が将来においても変わらずに推移するものと仮定して、各変動要因の将来変動量を推計し、変動の主要因を定量的に把握する。

4.2 節で MLI 法を構築した場合と同様に、2 変動要因 (x, y) の場合を考える (図 7-1)。基準年 (0) から将来の比較年 (t) までの期間に変動する各変動要因の CO₂ 排出量の変動量 ($\Delta CO_{2x}, \Delta CO_{2y}$) は、MLI 法の式 (4-1)、(4-2)、および、(4-3) と同様に以下のように示される。ここでは、基準年 (0) における CO₂ 排出量を CO_2^0 、将来の比較年 (t) における CO₂ 排出量を CO_2^t 、 a, b を各変動要因の対称変化率としている。

$$CO_2^0 = x^0 y^0 \quad (7-1)$$

$$CO_2^t = x^t y^t = CO_2^0 + (\Delta CO_{2x} + \Delta CO_{2y}) \quad (7-2)$$

$$\Delta CO_{2x} = \Delta x y^0 + \frac{a}{a+b} \Delta x \Delta y \quad (7-3)$$

$$\Delta CO_{2y} = x^0 \Delta y + \frac{b}{a+b} \Delta x \Delta y \quad (7-4)$$

$$a = \frac{\Delta x}{\left(\frac{x^0 + x^t}{2} \right)}, b = \frac{\Delta y}{\left(\frac{y^0 + y^t}{2} \right)} \quad (7-5)$$

ただし、

$\Delta x > 0, \Delta y < 0$ の時、 $b = 0$ 、

$\Delta x < 0, \Delta y > 0$ の時、 $a = 0$ 、

$\Delta x < 0, \Delta y < 0$ の時、 $\frac{a}{a+b}$ を $1 - \frac{a}{a+b}$ 、 $\frac{b}{a+b}$ を $1 - \frac{b}{a+b}$ で置換する。

ここで、基準年(0)における各要因の値(x^0, y^0)を分母にした、各変動要因の過去の変動量の年平均変動率(α, β)を考える。

α, β は、式(7-6)および式(7-7)で示される。

$$\alpha = (\text{変動要因 } x \text{ の過去の年平均変動量}) / x^0 \quad (7-6)$$

$$\beta = (\text{変動要因 } y \text{ の過去の年平均変動量}) / y^0 \quad (7-7)$$

基準年(0)から将来の比較年(t)までの期間(T年)に変動する各変動要因の変動量($\Delta x, \Delta y$)は、式(7-6)と式(7-7)から式(7-8)と式(7-9)のように示される。

$$\Delta x = \alpha T x^0 \quad (7-8)$$

$$\Delta y = \beta T y^0 \quad (7-9)$$

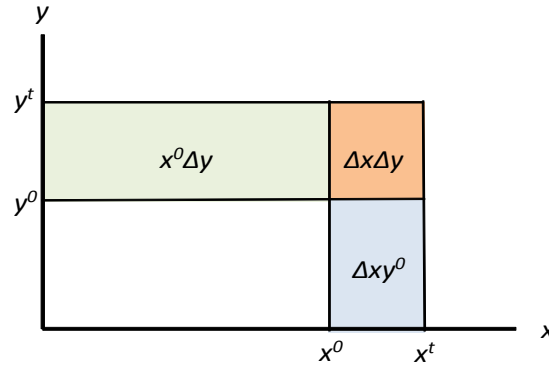


図 7-1. PMLI 法の概念図

したがって、式(7-3)と式(7-4)の基準年(0)から将来の比較年(t)の期間(T年)に変動する各変動要因の CO₂ 排出量の変動量(ΔCO_{2x} , ΔCO_{2y})は、式(7-10)と式(7-11)のように示される。

$$\Delta CO_{2x} = \alpha T CO_2^0 \left(1 + \frac{a}{a+b} \beta T \right) \quad (7-10)$$

$$\Delta CO_{2y} = \beta T CO_2^0 \left(1 + \frac{b}{a+b} \alpha T \right) \quad (7-11)$$

$$a = \frac{\Delta x}{\left(\frac{x^0 + x^t}{2} \right)} = \frac{\alpha T}{\left(1 + \frac{\alpha T}{2} \right)} \quad (7-12)$$

$$b = \frac{\Delta y}{\left(\frac{y^0 + y^t}{2} \right)} = \frac{\beta T}{\left(1 + \frac{\beta T}{2} \right)} \quad (7-13)$$

ここで、 a, b は、各要因の対称変化率である。

ただし、

$\Delta x > 0, \Delta y < 0$ の時、 $b = 0$ 、

$\Delta x < 0, \Delta y > 0$ の時、 $a = 0$ 、

$\Delta x < 0, \Delta y < 0$ の時、 $\frac{a}{a+b}$ を $1 - \frac{a}{a+b}$ 、 $\frac{b}{a+b}$ を $1 - \frac{b}{a+b}$ で置換する。

4変動要因(x_1, x_2, x_3, x_4)の場合、たとえば、PMLI法による x_1 要因の変動量は、以下のように示される。

$$\begin{aligned}
\Delta CO_{2x_1} = & \left(\alpha_1 T CO_2^0 \right) \left[1 + \left(\frac{a_1}{a_1 + a_2} \alpha_2 + \frac{a_1}{a_1 + a_3} \alpha_3 + \frac{a_1}{a_1 + a_4} \alpha_4 \right) T \right. \\
& + \left(\frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3} \alpha_2 \alpha_3 + \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_4} \alpha_2 \alpha_4 + \frac{a_1}{a_1 + a_3 + a_4} \alpha_3 \alpha_4 \right) T^2 \\
& \left. + \left(\frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4} \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \right) T^3 \right] \quad (7-14)
\end{aligned}$$

$$\text{ただし、} \quad a_i = \frac{\alpha_i T}{1 + \frac{\alpha_i T}{2}} \quad (i=1,2,3,4)$$

7.5. 分析対象と範囲

本節では、PMLI法を用いて2010年から2020年の日本の自家用乗用車のCO₂排出量の推計(プロジェクション)と変動の主要因の定量的特定をおこなう。なお、2009年を基準年とする。

要因分析は次の4ケースについておこなう。

1. Trend 2001-2009 : 各変動要因の将来変動が、2001年から2009年の動向と同様とした場合 : 日本の自家用乗用車のCO₂排出量が、2001年をピークにして、それ以降減少傾向にある期間
2. Trend 2001-2005 : 各変動要因の将来変動が、2001年から2005年の動向と同様とした場合 : 日本の自家用乗用車のCO₂排出量の減少傾向が強い期間
3. Trend 2005-2009 : 各変動要因の将来変動が、2005年から2009年の動向と同様とした場合 : 日本の自家用乗用車のCO₂排出量の減少傾向が弱い期間
4. Optimistic Trend : 2020年のCO₂排出量が最大限減少される場合 : 上記3ケースにおける各変動要因の年平均変動率の最大減少値あるいは最小増加値を選択

7.6. 変動要因

本要因分析では、自家用乗用車のCO₂排出量の変動要因を、5.5.1節の図5-1のように関連付けることができると仮定し、要因分析における変動要因を次の5要因とした。

1. 保有台数あたりの走行距離 (D/N : km/台)
2. 人口一人あたりの保有台数 (N/P : 台/人口)
3. 人口 (P : 人)
4. 平均保有車両重量 (W : ton)
5. 平均保有車両重量あたりの実走行燃費の逆数 ($(L/D)/W$: L/km/トン)

CO₂ 排出量（CO₂ : ton-CO₂）は、式(5-1)と同様に式(7-15)のように示される。

$$CO_2 = C \times \frac{D}{N} \times \frac{N}{P} \times P \times W \times \frac{L/D}{W} \quad (7-15)$$

ここで、 C は、CO₂ 排出係数（ton-CO₂ / L）である。CO₂ 排出係数は、5.4 節と同様に、温室効果ガスインベントリオフィス（2012）の炭素排出係数と発熱量から算出し、ガソリンについては 2.32 ton-CO₂/kL、軽油については 2.59 ton-CO₂/kL を用いている。

7.7. 分析データ

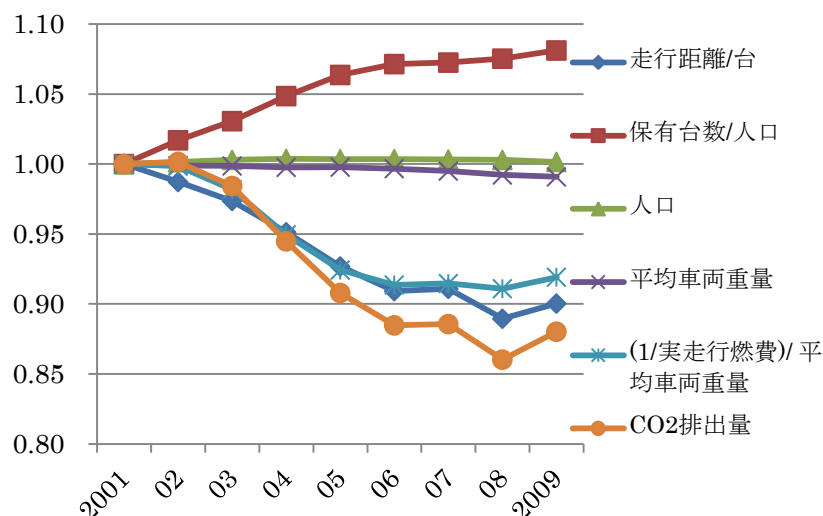
CO₂ 排出量の変動要因に関連するデータの出典は表 5-1 と同様である。乗用車の一台あたりの車両重量の算定も、5.6 節と同様に、自動車検査登録協会「自動車保有車両数」の車両重量別自動車保有車両数の各重量クラスの間値とその保有台数を乗じ、保有車両数で除した平均値として与えた。軽乗用車については、重量別の資料がないため、軽乗用車メーカーのカタログなど個別資料をもとに、一台あたりの平均重量を 850 kg と仮定している。

7.8. 変動要因の推移

2001 年から 2009 年の自家用乗用車の CO₂ 排出量と変動要因の推移を図 7-2 に示す。いずれの要因の値も 2001 年を基準としている。

自家用乗用車の CO₂ 排出量は、増加傾向にあったものが、2001 年をピークに減少に転じている。その中で、2001 年から 2005 年の CO₂ 排出量の減少傾向は強く、2005 年から 2009 年の減少傾向は弱くなっている。また、それまで増加傾向にあった自家用乗用車の走行距離は、2003 年をピークにその後減少に転じている。しかしながら、保有台数の増加率が走行距離の増減率より大きいいため、一台あたりの走行距離は減少傾向が続いている。この減少傾向は、2005 年近辺から弱くなっている。車両重量あたりの実走行燃費の逆数は、一台あたりの走行距離と同じような変動を示している。一方、人口一人あたりの保有台数は、増加傾向が続いていたが、2005 年近辺から頭打ちの状況になっている。平均車両重量および人口は、ほぼ横ばい傾向であったものが、2005 年近辺から、わずかに減少傾向に転じている。

5.9.1.3 節で、MLI 法を用いて、2001 年から 2008 年の自家用乗用車の CO₂ 排出量減少の要因分析をおこなっている。要因分析の結果、CO₂ 排出量の減少に寄与する主な要因は、一台あたりの走行距離の減少と平均車両重量あたりの実走行燃費の改善であった。一方、人口一人あたりの保有台数は、CO₂ 排出量の増加要因であった。しかしながら、一台あたりの走行距離の減少と平均車両重量あたりの実走行燃費の改善による CO₂ 排出量削減効果が、人口一人あたりの保有台数の変動による増加分を上回っている。5.9.1.3 節で論じたとおり、2001 から 2008 年はガソリン価格の上昇時期と重なる。したがって、CO₂ 排出量減少の要因のひとつである一台あたりの走行距離の減少は、ガソリン価格上昇の影響を受けていると考えられる。しかも、2001 年から 2005 年

図 7-2. 自家用乗用車の CO₂ 排出量と変動要因の推移

のガソリン価格の上昇率は、2005 年から 2008 年の上昇率に比べて非常に高い（2001 年から 2005 年のガソリン価格上昇率：27%；2005 年から 2008 年のガソリン価格上昇率：14%）。また、平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善は、ガソリン価格の上昇に加えて、グリーン減税などの減税措置によるハイブリッド車などの低環境負荷車両と軽乗用車への転換の影響を受けていると考えられる。一方、2005 年以降、平均車両重量が多少の減少傾向にある主な要因は、普通・小型乗用車に代わり、軽乗用車の増加によるものと考えられる。

7.9. 変動要因の年平均変動率

表 7-1 に、7.5 節で述べた各検討ケースにおける、5 変動要因の年平均変動率を示す。年平均変動率は、7.4 節の式(7-6)と式(7-7)から算出されている。また、2020 年の CO₂ 排出量が最大限減少される場合を想定した Optimistic Trend ケースの年平均変動率は、7.5 節で述べたとおり、他の検討ケースにおける各変動要因の年平均変動率の最大減少値あるいは最小増加値を選択している。2001 年から 2005 年の各変動要因の年平均変動率の絶対値は、平均車両重量を除いて、2001 年から 2009 年、および、2005 年から 2009 年の年平均変動率の絶対値より大きい。

表 7-1. 変動要因の年平均変動率

検討ケース	走行距離/台	保有台数/人口	平均車両重量	(1/実走行燃費)/ 平均車両重量	人口
Trend 2001-2009	-0.01384	0.00938	-0.00116	-0.01099	0.00019
Trend 2001-2005	-0.02033	0.01472	-0.00056	-0.02061	0.00089
Trend 2005-2009	-0.00735	0.00404	-0.00176	-0.00138	-0.00051
Optimistic Trend	-0.02033	0.00404	-0.00176	-0.02061	-0.00051

7.10. CO₂ 排出量推計結果

表 7-2 に、PMLI 法を用いた、2020 年における、日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量の推計（プロジェクション）結果を示す。また、各検討ケースにおける 2020 年までの CO₂ 排出量と各変動要因の変動の推移を図 7-3 および図 7-4(a),(b),(c),(d)に示す。

PMLI 法を用いた CO₂ 排出量と各変動要因の変動の推計結果から、次のことが示唆された。

第一に、2001 年をピークに減少傾向に転じた日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量は、すべての検討ケースにおいて 2010 年以降も減少傾向にある（図 7-3）。

第二に、CO₂ 排出量減少の主な要因は、各検討ケースともに、一台あたりの走行距離の減少と平均車両重量あたりの実走行燃費の改善である（図 7-4(a),(b),(c),(d)）。

第三に、CO₂ 排出量の各変動要因の将来変動を 2001 年から 2005 年の動向と同様とした場合（Trend 2001-2005 ケース）、2020 年における日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量は、1990 年レベルまで減少する（表 7-2、図 7-3）。なお、2001 年から 2005 年は、ガソリン価格の高騰が激しい期間であった（2001 年から 2005 年のガソリン価格上昇率：27%）。

第四に、2020 年の CO₂ 排出量が最大限減少される場合（Optimistic Trend ケース）、2020 年における日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量は、1990 年比 12%減少する（表 7-2、図 7-3）。しかしながら、この Optimistic Trend ケースの実現は、非常に難しいと考えられる。なぜなら、Optimistic Trend ケースは、他の検討ケースにおける各変動要因の年平均変動率の最大減少値あるいは最小増加値を選択しているためである。つまり、表 7-1 からわかるように、Optimistic Trend ケースの CO₂ 排出量削減を実現させるためには、2010 年以降、一台あたりの走行距離の減少傾向を加速させ、人口一人あたりの乗用車保有台数の増加を抑え、普通・小型乗用車から軽乗用車への転換を促進させる必要がある。さらに、実走行燃費の改善も、2001 年から 2005 年の実走行燃費の改善のように促進させなければならない。

PMLI 法は、自家用乗用車の CO₂ 排出量と各変動要因に起因する CO₂ 排出量変動の推計をおこない、CO₂ 排出量変動の主要因を把握することができる。したがって、PMLI 法を用いた要因分析結果は、自動車部門の CO₂ 排出量削減シナリオのベースとなると考えられる。なお、PMLI 法は、過去の変動要因の動向をもとにした CO₂ 排出量の変動推計手法である。そのため、自家用乗用車の CO₂ 排出量削減シナリオの策定にあたっては、PMLI 法による要因分析結果に加えて、CO₂

排出量削減に寄与するハイブリッド車や電気自動車などの低環境負荷車両の将来普及などの変動要因の影響を加味する必要がある。

各検討ケースに対する要因分析結果の詳細は、次のとおりである。

7.10.1. Trend 2001-2009 ケース

2020 年における自家用乗用車の CO₂ 排出量は、2009 年レベルから 22.7 百万トン CO₂ 減少し、99.0 百万トン CO₂ になると推計された。この CO₂ 排出量は、1990 年比 16.8%増加、2009 年比 18.7%減少に相当する（表 7-2、図 7-3）。CO₂ 排出量減少の主な要因は、一台あたりの走行距離の減少、および、平均車両重量あたりの実走行燃費の改善である。この 2 要因に起因する CO₂ 排出減少量は、2020 年において、それぞれ 17.5 および 13.5 百万トン CO₂ と推計された（図 7-4(a)）。人口一人あたりの保有台数の増加が CO₂ 排出量の増加要因となっているが、上述の減少要因に起因する CO₂ 排出減少量が、人口一人あたりの保有台数の増加による CO₂ 排出増加量を上回っている。一方、平均車両重量要因と人口要因の変動による影響は小さい。

7.10.2. Trend 2001-2005 ケース

本検討ケースにおける各変動要因の変動傾向は、Trend 2001-2009 ケースと同様と推計された。2020 年における自家用乗用車の CO₂ 排出量は、2009 年レベルから 36.6 百万トン CO₂ 減少し、85.2 百万トン CO₂ になると推計された。この CO₂ 排出量は、1990 年と同レベル、2009 年比 30.0%減少に相当する（表 7-2、図 7-3）。CO₂ 排出量減少の主な要因は、一台あたりの走行距離の減少、および、平均車両重量あたりの実走行燃費の改善である。この 2 要因に起因する CO₂ 排出減少量は、2020 年において、それぞれ 24.1 および 24.5 百万トン CO₂ と推計された（図 7-4(b)）。人口一人あたりの保有台数の増加が CO₂ 排出量の増加要因となっているが、上述の減少要因に起因する CO₂ 排出減少量が、人口一人あたりの保有台数の増加による CO₂ 排出増加量を上回っている。一方、平均車両重量要因と人口要因の変動による影響は小さい。

7.10.3. Trend 2005-2009 ケース

本検討ケースにおける各変動要因の変動傾向は、Trend 2001-2009 ケース、および、Trend 2001-2005 ケースと異なっている。2020 年における自家用乗用車の CO₂ 排出量は、2009 年レベルから 9.5 百万トン CO₂ 減少し、112.3 百万トン CO₂ になると推計された。この CO₂ 排出量は、1990 年比 32.4%増加、2009 年比 7.8%減少に相当し、検討ケースの中で CO₂ 排出量の減少が最も少ない（表 7-2、図 7-3）。CO₂ 排出量減少の主な要因は一台あたりの走行距離の減少である。CO₂ 排出減少量は、2020 年において、9.78 百万トン CO₂ と推計された（図 7-4(c)）。本検討ケースの場合、他の検討ケースと異なり、平均車両重量あたりの実走行燃費の改善による CO₂ 排出量削減効果はほとんどみられない。人口一人あたりの保有台数の増加が CO₂ 排出量の増加要因となっているが、その影響は小さい。また、他の検討ケースと同様に、平均車両重量要因と人口要因の変動による影響は小さい。

7.10.4. Optimistic Trend ケース

本検討ケースは、他の検討ケースにおける各変動要因の年平均変動率の最大減少値あるいは最小増加値を選択している。したがって、2020 年における自家用乗用車の CO₂ 排出量の減少は最大に推計される。2020 年における自家用乗用車の CO₂ 排出量は、2009 年レベルから 47.3 百万トン CO₂ 減少し、74.5 百万トン CO₂ になると推計された。この CO₂ 排出量は、1990 年比 12.2% 減少、2009 年比 38.8% 減少に相当する（表 7-2、図 7-3）。CO₂ 排出量減少の主要因は、Trend 2001-2009 ケースおよび Trend 2001-2005 ケースと同様に、一台あたりの走行距離の減少、および、平均車両重量あたりの実走行燃費の改善である。この 2 要因に起因する CO₂ 排出減少量は、2020 年において、それぞれ 24.1 および 24.5 百万トン CO₂ と推計された（図 7-4(d)）。人口あたりの保有台数の増加による CO₂ 排出量増加の影響は小さい。

表 7-2. 各検討ケースの 2020 年における CO₂ 排出量の推計結果
(百万トン CO₂)

検討ケース	2020年における CO ₂ 排出量	2009年からのCO2排 出量の変動	CO ₂ 排出量の比較	
			2020/1990	2020/2009
Trend 2001-2009	99.0	-22.7	1.168	0.813
Trend 2001-2005	85.2	-36.6	1.005	0.700
Trend 2005-2009	112.3	-9.5	1.324	0.922
Optimistic Trend	74.5	-47.3	0.878	0.612

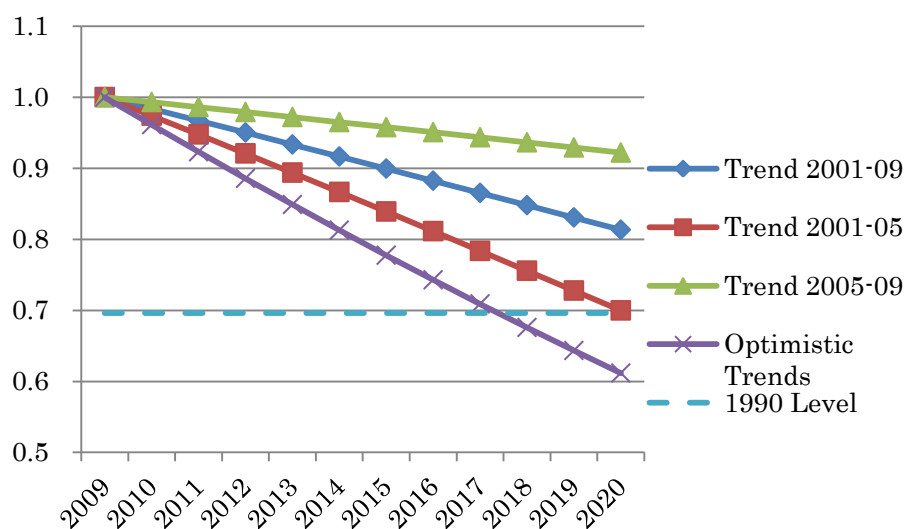
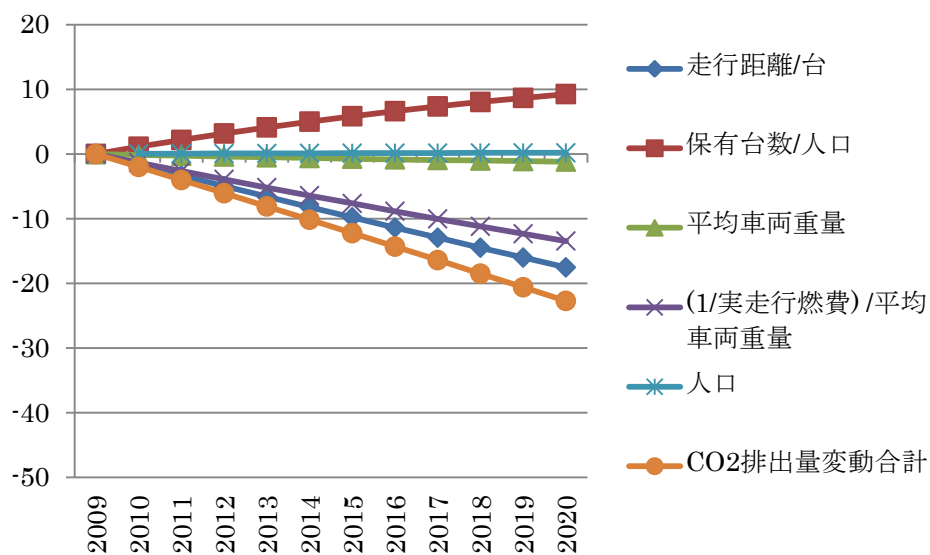
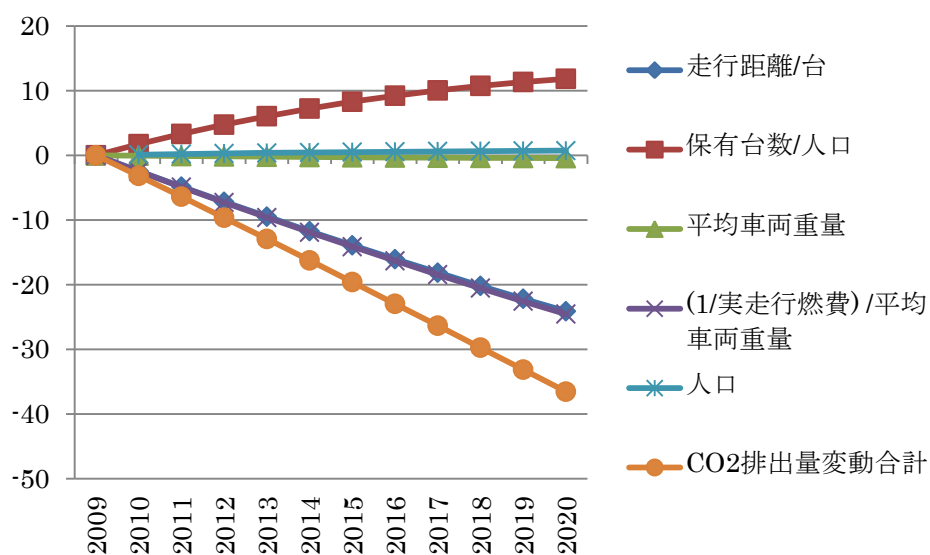


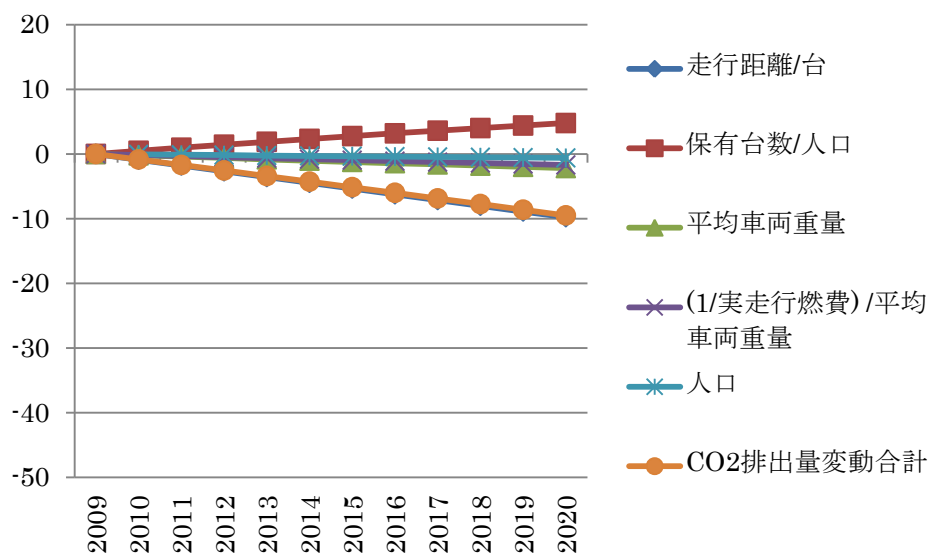
図 7-3. 各検討ケースにおける CO₂ 排出量の推移



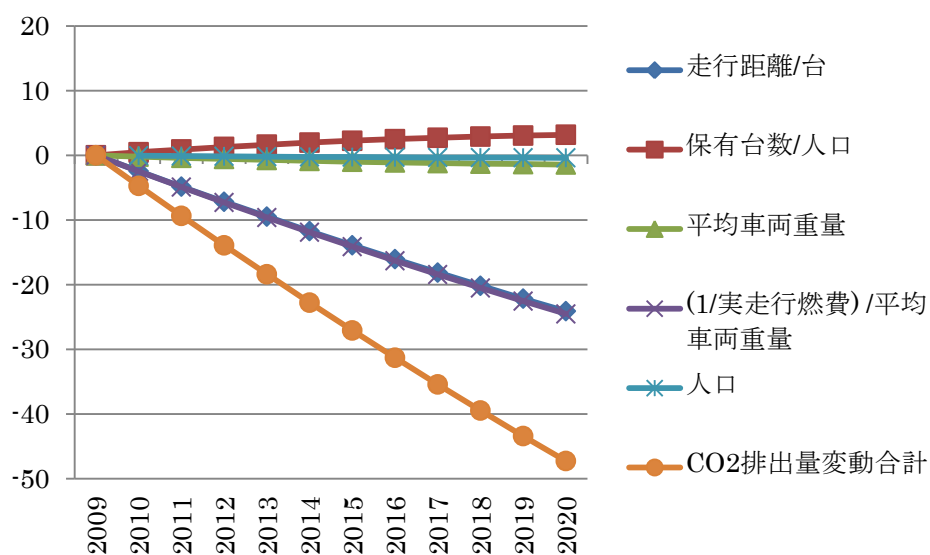
(a)



(b)



(c)



(d)

図 7-4. 各変動要因の CO₂ 排出量変動推計結果
: (a)Trend 2001-2009、(b)Trend 2001-2005、(c)Trend 2005-2009、
(d)Optimistic Trend (百万トン CO₂)

7.11. 既往要因分析法を応用した推計手法による要因分析結果との比較

PMLI 法による将来 CO₂ 排出量の要因分析結果を、既往要因分析法を応用した推計手法による要因分析結果と比較した。検討対象とする既往要因分析法は RLI 法とした。

7.11.1. RLI 法を応用した推計手法

RLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計手法は、7.4 節の PMLI 法の考え方をもとに導くことができる。RLI 法は、3.4.2 節で説明したとおり、交絡項の中で同時変化するすべての変動要因を均等に配分する。したがって、2 変動要因(x, y)の場合、基準年(0)から将来の比較年(t)までの期間(T 年)に変動する各変動要因の CO₂ 排出量の変動量($\Delta CO_{2x}, \Delta CO_{2y}$)は、PMLI 法における式(7-10)と式(7-11)をもとに、式(7-16)と式(7-17)のように示される。

$$\Delta CO_{2x} = \alpha T CO_2^0 \left(1 + \frac{1}{2} \beta T \right) \quad (7-16)$$

$$\Delta CO_{2y} = \beta T CO_2^0 \left(1 + \frac{1}{2} \alpha T \right) \quad (7-17)$$

7.11.2. 要因分析結果の比較

PMLI 法による要因分析結果を、RLI 法を応用した推計手法による要因分析結果と比較した結果を表 7-3 に示す。表 7-3 は、Trend 2001-2009 ケースの 2015 年と 2020 年における各変動要因の 2009 年からの CO₂ 排出量の変動を示している。

両手法による要因分析結果を比較した結果は次のとおりである。

まず、PMLI 法と RLI 法を応用した手法による CO₂ 排出量の変動合計に差はみられない。しかしながら、すべての変動要因において、PMLI 法による推計値の絶対値が、RLI 法を応用した手法による推計値の絶対値より小さな値となっている。両手法による差は、2020 年における平均車両重量と人口要因でみられるように、最大で約 20%発生している。この差が生じる主な原因は、両手法における交絡項の変動要因への帰属と配分方法の違いにあると考えられる。なぜなら、4.3.2 節で論じたとおり、MLI 法は、他の要因分析法と異なり、同じ交絡項の中に同時変化する増加要因と減少要因が混在する場合、交絡項を同時変化する増加要因側だけに帰属させ、減少要因側に帰属させないからである。一方、RLI 法は、交絡項の中で同時変化するすべての変動要因に交絡項を均等に分配する。

以上の結果は、第 5 章と第 6 章において、MLI 法と既往要因分析法による要因分析結果を比較した結果と同じ傾向を示している。

表 7-3. PMLI 法と RLI 法を応用した手法による CO₂ 排出量推計結果
 : 各変動要因の 2009 年からの CO₂ 排出量変動 (百万トン CO₂) : Trend 2001-2009 ケース

	分析法	走行距離/台	保有台数/人口	平均車両重量	(1/実走行燃費)/ 平均車両重量	人口	CO ₂ 排出量 変動合計
2015年	PMLI	-9.81	5.84	-0.73	-7.65	0.12	-12.25
	RLI Base	-10.02	6.34	-0.81	-7.89	0.13	-12.24
	PMLI/RLI	0.98	0.92	0.91	0.97	0.90	1.00
2020年	PMLI	-17.54	9.26	-1.18	-13.46	0.19	-22.72
	RLI Base	-18.20	10.87	-1.42	-14.21	0.23	-22.72
	PMLI/RLI	0.96	0.85	0.83	0.95	0.81	1.00

7.12. 結語

本章では、要因分析法を用いて 2020 年までの日本の自家用乗用車 CO₂ 排出量の推計（プロジェクション）をおこない、主な変動要因を定量的に把握した。CO₂ 排出量の推計にあたっては、第 4 章で構築した MLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量の推計手法（PMLI 法）を構築した。また、PMLI 法による要因分析結果について、RLI 法を応用した将来 CO₂ 排出量推計方法による要因分析結果と比較した。そして、PMLI 法の理論的な特徴と RLI 法を応用した推計方法による要因分析結果との差を検討した。

PMLI 法は、CO₂ 排出量などの変動要因がこれまでの動向と変わらずに推移するものと仮定して将来の CO₂ 排出量の変動を推計し、CO₂ 排出変動の主な変動要因を定量的に捉えることができる。PMLI 法を用いた要因分析結果は、運輸部門の CO₂ 排出量の削減シナリオのベースとなり、CO₂ 排出量削減施策の検討に寄与できると考えられる。なお、PMLI 法は、過去の変動要因の動向をもとにした CO₂ 排出量の変動推計手法である。そのため、自家用乗用車の CO₂ 排出量削減シナリオの策定にあたっては、PMLI 法による分析結果に加えて、CO₂ 排出量削減に寄与するハイブリッド車や電気自動車などの低環境負荷車両の将来普及などの変動要因の影響を加味する必要がある。

PMLI 法による要因分析の結果、2020 年までの日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量は減少傾向が継続するものと推計された。また、CO₂ 排出量減少の主な要因は、一台あたりの走行距離の減少と平均車両重量あたりの実走行燃費の改善であることが示唆された。

各変動要因の将来変動が、日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量の減少傾向が強い期間であった 2001 年から 2005 年の動向と同様とした場合、2020 年における日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量は、1990 年レベルまで減少するものと推計された。一方、各変動要因が年平均変動率の最大減少値あるいは最小増加値で推移した場合、2020 年における日本の自家用乗用車の CO₂ 排出量は、1990 年比 12%減少するものと推計された。しかしながら、この検討ケースの実現は非常に難しいと考えられる。

PMLI 法による要因分析結果を、RLI 法を応用した手法による要因分析結果と比較した結果、平均車両重量と人口要因において、PMLI 法による推計値の絶対値は RLI 法を応用した推計手法による推計値の絶対値に比べて約 20% 小さな値となった。この差が生じる主な原因は、両手法における交絡項の変動要因への帰属と配分方法の違いにある。この結果は、第 5 章と第 6 章の要因分析において、MLI 法と他の既往要因分析法による要因分析結果を比較した結果と同じ傾向を示した。

8. 結論と今後の課題

8.1. 緒言

本研究の結論として、本研究で得られた成果をまとめ（8.2 節）、今後の課題を整理する（8.3 節）。

8.2. 本研究の成果

本研究では、既往要因分析法の課題を整理し、既往要因分析法の主な課題である交絡項の変動要因への帰属と配分方法に関して検討をおこなった。その結果として、既往要因分析法の交絡項の変動要因への帰属と配分方法を修正した要因分析法（Modified Laspeyres Index Method: MLI 法）を構築した。

構築した MLI 法は、要因分析法としての完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、優れた要因分析法であることを明らかにした。

そのうえで、MLI 法を用いて、自動車の CO₂ 排出量変動に関する要因分析をおこなった。具体的には、時系列分析、国/地域間分析、将来 CO₂ 排出量の推計をおこなった。各要因分析においては、CO₂ 排出量変動の主な要因を定量的に示した。さらに、MLI 法と既往要因分析法による分析結果を比較し、MLI 法の理論的特徴と既往要因分析法による要因分析結果との差を検討した。また、将来 CO₂ 排出量の推計においては、MLI 法を応用した新しい推計手法を構築した。

構築した MLI 法は、既往要因分析法と異なり、交絡項に関連する変動要因だけに帰属させ変動要因の対称変化率の大きさに比例して関連要因に配分する。MLI 法についての考察および MLI 法を用いた要因分析結果は、特に、同じ交絡項の中に同時変化する増加要因と減少要因が混在し、交絡項が大きい（要因の変動が大きい）場合、MLI 法と既往要因分析法による分析結果の間には、無視できないほどの差を生じる。今後、CO₂ 排出量などの削減が進展する中で、増加変動要因と減少変動要因が混在する事例が数多く発生すると予想される。その場合、MLI 法と既往要因分析法による要因分析結果の違いが、CO₂ 排出量などの削減効果の評価や重点施策の対象とすべき変動要因の選択などに影響をおよぼす可能性がある。

本研究で構築した MLI 法は、今後検討すべき課題はあるものの、自動車交通の CO₂ 排出量の変動要因分析に限らず、経済、エネルギー需給、産業廃棄物、および、食糧需給部門に係わる変動要因分析においても活用でき、諸問題解決のための対策立案に寄与できる汎用性のある要因分析法であると考えられる。

具体的な研究成果は次のとおりである。

8.2.1. 要因分析法の位置付けと既往要因分析法の体系的整理（第 2 章）

要因分析法は経済指数理論から派生している。これまで、要因分析法は数多く提唱され、その大多数はラスパイレス型とディビシア型要因分析法に大別できる。代表的な簡易要因分析法は、LI 法である。一方、代表的な完全要因分析法は、RLI 法と LMDI 法である。これらの要因分析法

は、エネルギー、環境関連部門における CO₂ 排出量やエネルギー需給量の変動要因分析に数多く用いられている。さらに、要因分析としては、時系列分析、国/地域間分析、および、将来 CO₂ 排出量などの推計がある。要因分析法は、エネルギー需給、温室効果ガス排出量、物流、エネルギー効率、および、国/地域間の変動分析に用いられている。

8.2.2. 既往要因分析法の課題の整理（第 3 章）

既往研究で提唱された要因分析法には、交絡項を関連する変動要因へ帰属させ、配分する方法に関して、いくつかの課題がある。そして、これらの課題に適切に対応した要因分析法はこれまでのところ確立されるに至っていない状況にある。簡易要因分析法である LI 法は、交絡項を関連変動要因に帰属、配分させないで別に計上する。そのため、交絡項の値が大きくなると、各変動要因の分析結果に無視できない影響を与える。一方、完全要因分析法である RLI 法は、交絡項を各変動要因の変動量に関係なく、すべての同時変化する変動要因に均等に配分させる。そのため、解析結果の正確性に疑問が生じる。また、LMDI 法は、対数平均値を各要因の重み付けにした線形積分関数の離散近似式を用いている。そのため、LMDI 法は、複数変動要因の同時変化による変動量を示す交絡項を、微小で分析結果におよぼす影響はないものとして考慮していない。運輸部門の要因分析のように変動量の大きなデータを使用する場合、交絡項が大きくなるため、要因分析結果に、無視できないほどの影響を与える。

8.2.3. 修正完全要因分析法（MLI 法）の構築（第 4 章）

交絡項を変動要因の変動量に応じて要因項に帰属させ配分する、修正完全要因分析法（MLI）法を構築した。MLI 法は、交絡項を関連する変動要因にだけに帰属させ対称変化率の大きさに比例して関連要因に配分する。また、同じ交絡項の中に交絡する増加要因と減少要因が混在する場合、前者にのみ交絡項を帰属させる。さらに、MLI 法と既往完全要因法を用いて例示的な要因分析をおこない、要因分析法の違いが分析結果に与える影響を定量的に明らかにした。以上の結果を踏まえ、MLI 法と既往要因分析法の総括的評価をおこない、要因分析法としての完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、MLI 法が優れた要因分析法であることを明らかにした。

8.2.4. MLI 法を用いた自動車交通の CO₂ 排出量変動分析（第 5 章、第 6 章、第 7 章）

MLI 法を用いて自動車交通の CO₂ 排出量変動に関する時系列分析、国/地域間分析、および、将来 CO₂ 排出量推計をおこなった。さらに、各要因分析においては、MLI 法による分析結果を既往要因分析法による分析結果と比較した。なお、第 7 章の将来 CO₂ 排出量の推計にあたっては、将来 CO₂ 排出量の推計と主な変動要因を定量的に特定できる MLI 法を応用した要因分析法（PMLI 法）を構築した。

8.2.4.1. 日本の自家用乗用車と貨物自動車の地域別 CO₂ 排出量の時系列要因分析（第 5 章）

1990年から2008年における、日本全国と地域別の自家用乗用車と貨物自動車のCO₂排出量の変動について要因分析をおこなった。

その結果、自家用乗用車の1990から2001年におけるCO₂排出量増加の主な要因は、人口あたりの保有台数の増加と平均保有車両重量の増加であった。また、CO₂排出量が2001年をピークに減少傾向にある主な要因は、四国以外の各地域において、一台あたりの走行距離の減少と平均保有車両重量あたりの実走行燃費の改善であった。これらの背景にある要因のひとつとして、乗用車に代わる軽乗用車の保有台数の増加が示唆された。

一方、貨物自動車の1990から1996年におけるCO₂排出量増加の主な要因は、北海道を除き、保有台数あたりの輸送トンキロの増加であった。また、1996年をピークに減少傾向にある主な要因は、各地域ともに、輸送トンキロあたりのCO₂排出量の減少と保有台数の減少であった。前者からは、自営転換が進展し、CO₂排出量の減少に寄与していることが示唆された。

8.2.4.2. 乗用車の CO₂ 排出量の国/地域間変動要因分析（第 6 章）

2000年と2006年における、日本、米国、および、英国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差の主要因を定量的に示した。また、2000年から2006年にかけての各国間の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量の差の変動についても検討した。分析の結果、2000年および2006年ともに、米国の人口一人あたりの乗用車CO₂排出量が日本および英国に比べて多い主な要因は、米国の一台当たりの長い走行距離であった。米英間の比較では、米国の実走行燃費の悪さも寄与している。また、英国は日本に比べて実走行燃費の改善は進展しているが、一台あたりの長い走行距離に起因する人口一人あたりの乗用車CO₂排出量が多いことが示唆された。

8.2.4.3. 2020 年までの日本の自家用乗用車 CO₂ 排出量の推計（第 7 章）

2020年までの日本の自家用乗用車CO₂排出量の推計と主な変動要因を定量的に示した。CO₂排出量の推計にあたっては、MLI法を応用した将来CO₂排出量の推計方法（PMLI法）を構築した。また、PMLI法による要因分析結果と、RLI法を応用した将来CO₂排出量の推計方法による要因分析結果とを比較し、PMLI法の理論的な特徴とRLI法を応用した推計方法による要因分析結果との差に関して考察した。その結果、各変動要因が2001年から2005年の年平均変動率で将来も変動した場合、CO₂排出量は2020年において1990年レベルまで減少し、減少に寄与する主な要因は一台あたりの走行距離の減少と実走行燃費の改善であることが示唆された。

8.2.4.4. MLI 法と既往要因分析法による分析結果の比較（第 5 章、第 6 章、および、第 7 章）

第5章、第6章におけるMLI法、および、第7章におけるPMLI法による分析結果を既往要因分析法による分析結果と比較した。その結果、同時変化する増加要因と減少要因が同じ交絡項

の中に混在する場合、MLI 法と既往要因分析法の間には、無視できないほどの差が生じることが明らかになった。この主な原因として、同時変化する増加要因と減少要因が同じ交絡項の中に混在する場合、MLI 法では、既往要因分析法と異なり、交絡項を増加要因側だけに帰属させ、減少要因側に帰属させないことが挙げられた。

8.3. 今後の課題

本節では、第4章で構築したMLI法を用いた第5章から第7章における要因分析結果を踏まえ、MLI 法に係わる課題を整理する。

MLI 法は、これまで論じたとおり、要因分析法としての完全性、時点逆転性、ゼロ値対応性、および、交絡項の帰属と配分方法の観点から、優れた要因分析法であると考えられる。しかしながら、MLI 法、および、既往要因分析法については、さらに検討、議論すべきいくつかの課題が残されている。すなわち、要因分析結果が変動要因の特性によってミスリードされる可能性、高次の交絡項の変動要因への配分、変動要因相互の関連性、分析データの入手可能性とその精度、社会経済（Socio-Economics）要因の要因分析、直接法と間接法による時系列分析結果の比較、および、構造分解分析（Structural Decomposition Analysis（SDA））法との比較である。

8.3.1. 要因分析結果が変動要因の特性によってミスリードされる可能性

第4.4節で述べたとおり、要因分析法はマクロレベルの分析を対象としている。そのため、MLI 法を含め要因分析法による分析結果が、変動要因の特性によってミスリードされる可能性がある。要因分析結果を解釈するにあたり注意が必要である。

たとえば、乗用車の走行距離（ D : km）が保有台数（ x : 台数）と保有台数あたりの走行距離（ y : km/台数）の2変動要因によって決定される場合を考える。基準年(0)から比較年(t)の期間に保有台数が100%増加し、保有台数あたりの走行距離が20%増加した場合のMLI法による要因分析の結果を図8-1および表8-1に示す：走行距離増加(140km)の内、保有台数の増加に起因する走行距離増加分が多くを占め(115.7km)、保有台数あたりの走行距離の増加に起因する走行距離増加分は少ない(24.3km)。しかしながら、基準年(0)から比較年(t)の期間に増加した乗用車における保有台数あたりの走行距離が検討期間以前の保有台数あたりの走行距離に比べて短い場合、検討期間の保有台数あたりの走行距離に起因する走行距離の増加は、検討期間に増加した乗用車によるものではなく、検討期間以前の乗用車によるものとなる。

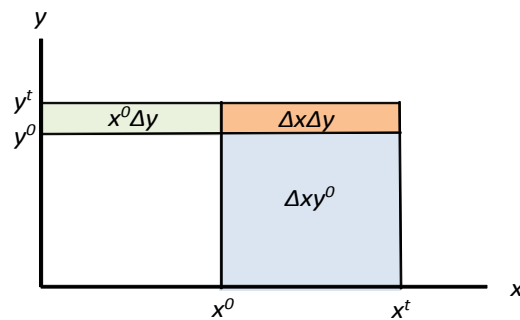


図 8-1. 乗用車走行距離の変動
(x : 保有台数、 y : 走行距離/保有台数)

表 8-1. 乗用車走行距離の変動要因分析

	x 要因	y 要因	走行距離
	保有台数	走行距離 /保有台数	
	(台)	(km/台)	(km)
0年	10	10	100
t年	20	12	240
変動量	10	2	140
要因分析結果			
変動量(km): ΔD	ΔD_x	ΔD_y	$\Delta D = \Delta D_x + \Delta D_y$
	115.7	24.3	140

8.3.2. 高次の交絡項の変動要因への配分

要因分析において、何次の交絡項まで関連要因へ帰属、配分すれば、要因分析結果に影響をおよぼさないのだろうか。

この議論は交絡項の数と交絡項の大きさに深く関連している。

MLI法を含めたラスパイレス型完全要因分析法において、変動要因の数が増えると交絡項の数が多くなり、計算項の数は指数関数的に増加する。一方、高次の交絡項の大きさをみると、ほとんどの場合、主変動項(交絡項を含まない計算項:たとえば、式(4-1)および式(4-2)における $\Delta x \cdot y^0$ 、 $x^0 \cdot \Delta y$)の値に比べて小さい。これらのことから、高次の交絡項については、計算をおこなわず、関連する変動要因に配分しないという考え方がある。なぜなら、高次の交絡項を関連要因へ配分しなくても、要因分析結果の精度上の問題は発生しないと考えるからである。

環境省(2001)は、RLI法を用いて1990年から1998年のエネルギー転換部門、産業部門、運輸部門、民生部門のCO₂排出量の変動要因分析をおこなっている。その中で、交絡項については、2要因の同時変化分までを交絡項の中で同時変化する変動要因に均等配分している。しかし

ながら、3 要因以上の交絡項については分解していない。その理由として、環境省（2001）は、「3 要因以上の要因分析のケースが多いため、完全に交絡項を分解するには、多大な労力を必要とする」と説明している。また、「算定した各部門別の交絡項は、運輸(貨物)を除き、ほぼゼロに近く、算定結果の精度については問題がない」としている。なお、この要因分析の中では、各部門の変動要因の数を、運輸旅客部門および運輸貨物部門で 4、自家用乗用車部門で 5、業務部門で 3、家庭部門で 3 としている。

変動要因の数が n 個の場合、各変動要因の変動量を算定するための計算項の数 (N') と、要因分析全体の計算項の数 (N) は、それぞれ式(8-1)と式(8-2)のように示される。

$$N' = 2^{(n-1)} \quad (8-1)$$

$$N = n \cdot 2^{(n-1)} \quad (8-2)$$

たとえば、変動要因数が 4 の場合、式(4-4)のように計算項の数は各変動要因で 8、要因分析全体で 32 となる。第 5 章における要因分析のように変動要因数が 5 の場合、式(5-3)のように計算項の数は各変動要因で 16、要因分析全体で 80 となる。本研究で要因分析をおこなった乗用車部門の CO₂ 排出量変動に関連する要因は多い。したがって、乗用車部門の CO₂ 排出量の変動に関連する要因分析をおこなう場合、変動要因の数は多くなる傾向にある。その結果、式(5-3)のように高次の交絡項の数が多くなり、計算項の数は多くなる。

表 8-2 は、第 5 章から第 7 章の MLI 法による要因分析結果の中で、交絡項が変動量全体に占める割合の例を示したものである（なお、第 5 章から第 7 章における要因分析では、すべての交絡項に対して関連する変動要因へ帰属と配分をおこなっている）。表 8-2 をみると、交絡項が変動要因の変動量全体に占める割合および各次の交絡項の大きさは、変動要因数、分析データの増減および変動幅などによりかなり幅がある。たとえば、ケース 1 のように同じ交絡項の中で同時変化する増加変動要因と減少変動要因が混在する場合、かつ増加要因の場合は、ケース 2 のように同時変化する変動要因が共に増加する場合に比べて、交絡項の占める割合が大きく、高次の交絡項も大きくなる傾向がある。また、ケース 3 のように、交絡項の影響がほとんどみられない場合もある。さらに、ケース 4、ケース 5 のように、変動量が大きく、変動要因の数が少なく、同じ交絡項の中で同時変化する増加変動要因と減少変動要因が混在する場合、交絡項の占める割合が大きく、高次の交絡項も大きくなる傾向がある。一方、ケース 6 のように変動要因の数が多く、変動量が比較的大きく、同じ交絡項の中で同時変化する増加変動要因と減少変動要因が混在する場合、かつ増加要因の場合、交絡項の占める割合が多い場合もある。

要因分析結果に求められる精度は要因分析の目的により異なる。また、要因分析結果の精度は変動要因数、使用する分析データ、および、分析データの変動幅にも影響を受ける。本研究における検討からは、交絡項が変動要因の変動量全体に大きな割合を占めている国/地域間分析結果を踏まえても、3 変動要因が同時変化する交絡項までを検討すべきであろう。

表 8-2. 交絡項の変動量が変動量全体に占める割合 (MLI 法)

検討 ケース	要因分析	変動 要因数	変動量の構成						総合計
			主変動項	交絡項					
				2要因	3要因	4要因	5要因	合計	
1	時系列	5	124.046%	-25.382%	1.342%	-0.006%	0.000%	-24.046%	100.000%
2	時系列	5	95.842%	4.110%	0.048%	0.000%	0.000%	4.158%	100.000%
3	時系列	5	99.073%	0.911%	0.016%	0.000%	0.000%	0.927%	100.000%
4	時系列	3	139.943%	-42.660%	2.717%	-	-	-39.943%	100.000%
5	国/地位間	3	196.814%	-89.473%	-7.341%	-	-	-96.814%	100.000%
6	CO ₂ 排出量推計	5	166.622%	-74.525%	7.875%	0.029%	0.000%	-66.621%	100.000%

検討ケース

- 1 自家用乗用車、2001-2008年、全国、「保有台数/人口」要因 (第5章)
- 2 自家用乗用車、1990-2001年、全国、「保有台数/人口」要因 (第5章)
- 3 自家用乗用車、1995-2001年、全国、「走行距離/保有台数」要因 (第5章)
- 4 貨物自動車、2002-2008年、全国、「輸送トンキロ/保有台数」要因 (第5章)
- 5 米国 - 英国間、2006年、「保有台数/人口」要因 (第6章)
- 6 2020年 CO₂排出量、Trend 2001-2005、「保有台数/人口要因」 (第7章)

8.3.3. 変動要因相互の関連性

要因分析において各変動要因は相互に関連性があるてはならないのか、関連性があっても問題ないのだろうか。

この議論は、MLI 法を含めた要因分析法の特質、および、第 5 章から第 7 章の要因分析における CO₂ 排出量と各変動要因、および、変動要因相互の関係について考えてみる必要がある。

要因分析法において、たとえば CO₂ 排出量変動の場合、変動要因は、変動に関連があり各変動要因の要素の分母と分子を約分すると最終的に CO₂ 排出量になれば、要因項として導入することができる。

環境省 (2001) は、RLI 法を用いた部門別の CO₂ 排出量の変動要因分析をおこなう中で、「要因分析法は、要因項として説明可能で算定式の中で分母と分子の約分ができれば、さらに複数の要因に分解できる手法である」と述べている。また、既往研究においては、CO₂ 排出量などの変動と関連があり、各変動要因の要素の分母と分子の約分をすると CO₂ 排出量となる変動要因を要因分析の目的に合わせて選択している。しかしながら、変動要因相互の関連性については、環境省 (2001) も含め既往研究において議論されていない。

ここで、CO₂ 排出量が式(8-3)で与えられる場合を考える。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = (\text{実走行燃費の逆数 : L/km}) \times \left(\frac{\text{走行距離}}{\text{保有台数}} \right) \times \left(\frac{\text{保有台数}}{\text{人口}} \right) \times (\text{人口}) \times (\text{CO}_2 \text{ 排出係数}) \quad (8-3)$$

式(8-3)の右辺のCO₂排出係数(一定)を除く各変動要因は、いずれも左辺のCO₂排出量と関連があり、各変動要因の要素の分母と分子を約分すると最終的にCO₂排出量になる。また、CO₂排出量と各変動要因には因果関係がある。つまり、両者の変動の間に相関があり、時間的前後関係があるという因果関係が存在する条件(樋口ら 2006)を満たしている。たとえば、一台あたり走行距離が増加すると、その結果としてCO₂排出量も増加する。第5章から第7章における要因分析において、CO₂排出量の変動と各変動要因の変動との間には因果関係があると考えられる(たとえば、式(5-1)、式(5-2))。

ところが、変動要因間の関連を考えると、たとえば、式(8-3)右辺第3項と第4項の関係を考えた場合、人口一人あたりの保有台数が変動したからといって、人口は変動しない。また、右辺第1項と第2項の関係を考えた場合、実走行燃費が改善されると一台あたりの走行距離は増加する可能性はあるが、反対に一台あたりの走行距離が増加すると実走行燃費が改善される可能性はかなり小さいであろう。

要因分析法は、マクロレベルの分析を対象にしており、その分析式は乗算型の恒等式で表わされる。要因分析法は、たとえば乗用車保有とその利用との相互関係などのミクロレベルの分析を対象としていない。また、変動要因間に相互関係がある場合、その相互作用が既に加味されたデータ(たとえば、走行距離、保有台数の統計データ)を使用して分析をおこなう。要因分析式は変動要因間の相互関係を表わすモデルではないと考えられる。

8.3.4. 分析データの入手可能性とその精度

統計資料の整備、低環境負荷車両などの新しい統計資料の充実、および、統計資料の誤差の改善が今後望まれる。また、分析データの精度については、その評価方法を検討する必要がある。

要因分析に使用する分析データの入手は、要因分析にとって重要である。そのためには、使用するデータの入手可能性、調査方法、集計方法などについて十分に調査し、要因分析の目的に照らし合わせて、要因分析に使用して支障がないことを確認する必要がある。また、データの入手が困難な場合、補完するために仮定した値の妥当性についての検討が必要である。特に、先進国と開発途上国間や開発途上国内の要因分析をおこなう場合、統計データの入手可能性とその精度の問題によって、要因分析に支障が生じる可能性がある。

環境省(2001)は、各部門のCO₂排出量の変動要因分析をおこなう中で、温室効果ガスの排出において、自動車関係の使用燃料量については「総合エネルギー統計」から引用し、一方、鉄道、海運及び航空については「運輸関係エネルギー要覧」のデータを用いている。つまり、温室効果ガスの排出では2つの統計を用いて輸送機関、燃料種ごとの燃料消費量を設定している。このため、環境省(2001)は、「分析に用いた各種指標の対象が必ずしも同一といえないため、分析の精度については若干の疑問が残る」と述べている。

本研究においても、国/地域間要因分析において、検討対象とする国や地域におけるデータの分類、集計方法に違いがある：たとえば、日本、米国、および、英国の乗用車分類方法の違い(6.4節)。また、同一国内の要因分析であっても、分析に必要なデータが入手できない場合がある。たとえば、日本の軽乗用車の平均車両重量は、車両重量別の資料がないため軽乗用車メーカーのカタログなど個別資料をもとに、一台あたりの平均重量を仮定している(5.6節)。さらに、CO₂排出

量の削減に寄与する電気自動車やハイブリッド車などの低環境負荷車両の普及の影響については、低環境負荷車両単独の各変動要因に関する統計資料が公表されていない。したがって、低環境負荷車両の普及が CO₂ 排出量の変動に与える影響については検討していない（5.5 節）。

8.3.5. 社会経済要因の要因分析

本研究における要因分析は、第 5 章の時系列分析における人口要因を除き、いずれも走行距離、保有台数、実走行燃費など、自動車利用に直接関連する変動要因を選択している。一方、これらの要因の変動は、ガソリン価格や国民所得のような社会経済要因（Socio-Economics）と深く関連している。社会経済要因を含めた要因分析をおこなうことは、CO₂ 排出量削減などの対策の立案にとって、さらに有用と考える。

8.3.6. 直接法と間接法による要因分析結果の比較

直接法と間接法による要因分析結果の比較検討をおこない、両手法の違いが要因分析結果に与える影響を確認する必要がある。

2.3.3 節で述べたとおり、時系列分析には、直接法と間接法がある。直接法と間接法で求めた結果はそれぞれ違う意味を持っている。また、直接法の利点は、基準点と比較年の分析データがあれば、要因分析をおこなうことができる。しかしながら、検討期間内の変動の経緯は考慮されない。一方、間接法は、各年のデータから年毎の分析をおこなう。しかしながら、各年の変動に対する分析結果を集計し複数年の期間変動としてみる場合、要因分析手法に係わる各年の分析誤差が蓄積される。また、各年のデータが必要になる。

8.3.7. 構造分解分析法との比較

構造分解分析（Structural Decomposition Analysis（SDA））法を精査し、統計データによる MLI 法と SDA 法による要因分析をおこない、分析結果を比較し、両手法の違いが分析結果に与える影響を確認する必要がある。

SDA 法は、一定期間の財、サービスの産業間取引を示す産業連関表を用いて、経済、CO₂ 排出量、エネルギー消費量などの歴史的変動の主要因を解明しようとする分析法である。要因分析法と SDA 法は個別に発展した手法である。しかしながら、要因分析法と SDA 法の分析目的は共通している部分が多い。既往要因分析法と SDA 法を比較した既往研究は、Hoekstra et al.（2003）にみられるだけである。Hoekstra et al.（2003）は、要因分析法と SDA 法手法を用いて、例示的な分析結果を比較している。

8.4. おわりに

現在、持続可能な社会の実現に向けて、CO₂排出量の削減、エネルギー需給の効率化、資源の有効利用などが世界的に求められている。これらの課題の解決のためには、各課題に関連する要因の過去および将来における変動の推移を分析し、変動に大きな影響を与える要因を定量的に示すことが重要である。なぜなら、それらの分析結果は、課題の解決に有効な対策の立案に寄与できるからである。そのための手法のひとつとして、要因分析法のはたす役割は大きなものがある。

MLI 法に係わるこれまで論じてきた課題が解決されると、MLI 法は、汎用性のある要因分析法として、本研究で論じた自動車交通の CO₂ 排出量の変動要因分析に限らず、経済、エネルギー需給、産業廃棄物、および、食糧需給部門に係わる変動要因分析においても有効に活用できる要因分析法になると考えられる。そのために、MLI 法に関してさらなる研究が必要である。

参考文献

-
- Agnolucci, P., Ekins, P., Iacopini, G., Anderson, K., Bows, A., Mander, S., and Shackley, S.: Difference Scenarios for Achieving Radical Reduction in Carbon Emissions: A Decomposition Analysis, *Ecological Economics*, Vol.68, 1652-1666, 2009.
- Ang, B. W. and Choi, K. H.: Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method, *Energy Journal*, Vol. 18, 59-73, 1997.
- Ang, B. W., Liu, F. L., and Chew, E. P.: Perfect Decomposition Techniques in Energy and Environmental Analysis, *Energy Policy*, Vol.31, 1561-1566, 2003.
- Ang, B. W., Liu, F. L., and Chung H.S.: Index Number and Fisher Ideal Index Approach in Energy Decomposition Analysis, *Research Report No 38/2002*, Department of Industrial and Systems Engineering, National University of Singapore, 2002.
- Ang, B. W., Zhang, F. Q., and Choi, KI-Hong: Factorizing Changes in Energy and Environmental Indicators through Decomposition, *Energy*, Vol.23, No.6, 489-495, 1998.
- Ang, B. W., and Liu, F. L.: A New Energy Decomposition Method: Perfect in Decomposition and Consistent in Aggregation, *Energy*, Vol.26, 537-548, 2001.
- Ang, B. W., and Liu, Na.: Energy Decomposition Analysis: IEA Model Versus Other Methods, *Energy Policy*, Vol.35, 1426-1432, 2007.
- Ang, B. W., and Zhang, F. Q.: A Survey of Index Decomposition Analysis in Energy and Environmental Studies, *Energy*, Vol.25, 1149-1176, 2000.
- Ang, B. W., and Zhang, F. Q.: Inter – Regional Comparisons of Energy – Related CO₂ Emissions Using the Decomposition Technique, *Energy*, Vol.24, 297-305, 1999.
- Ang, B. W.: Decomposition Analysis for Policymaking in Energy – Which Is the Preferred Method? *Energy Policy*, Vol.32, 1131-1139, 2004.
- Ang, B. W.: The LMDI Approach to Decomposition Analysis – a Practice Guide, *Energy Policy*, Vol.33, 867-871, 2005.
- Barrella, E., and Amekudzi, A. A.: Backcasting for Sustainable Transportation Planning, *Transportation Research Record*, No.2242, 29-36, 2011.
-

-
- Borjeson, L., Hojer, M., Dreborg, K., Ekvall, T., and Finnveden, G.: Scenario Types and Techniques: Towards a User's Guide, *Future*, Vol.38, 723-739, 2006.
- Boyd, G. A., Hanson, D. A., and Sterner, T.: Decomposition of Changes in Energy Intensity – A Comparison of the Divisia Index and Other Methods, *Energy Economics*, Vol.10, No.4, 309-312, 1988.
- Chung, H. S., and Rhee, H. C.: A Residual-Free Decomposition of the Sources of Carbon Dioxide Emissions: A Case of the Korean Industries, *Energy*, Vol.26, 15-30, 2001.
- Drobisch, M. W.: Ueber Einige Einwurfe Gegen Die in Diesen Jahrbuchern Veroffentlichte Neue Methode, Die Veranderungen der Waarenpreise und des Geldwerths zu Berechnen, *Jahrbucher fur Nationalokonomie und Statistik*, Vol.26, No.1, 15-30, 2002.
- Ebohon, O. J., and Ikeme, A. J.: Decomposition Analysis of CO₂ Emission Intensity between Oil-Producing and Non-Oil-Producing Sub-Saharan African Countries, *Energy Policy*, Vol.34, 3599-3611, 2006.
- Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation: *Highway Statistics*, 2001 – 2010.
- Geurs, K., and Wee, B.: Backcasting as a Tool for Sustainable Transport Policy Making: the Environmentally Sustainable Transport Study in the Netherlands, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol.4, No.1, 47-69, 2004.
- Hatzigeorgiou, E., Polatidis, H., and Haralambopoulos, D.: CO₂ Emissions in Greece for 1990-2002: A Decomposition Analysis and Comparison of Results Using the Arithmetic Mean Divisia Index and Logarithmic Mean Divisia Index Techniques, *Energy*, Vol.33, 492-499, 2008.
- Hatzigeorgiou, E., Polatidis, H., and Haralambopoulos, D.: Energy CO₂ Emissions for 1990-2020, *Energy Sources, Part A*, Vol.32, 1908-1917, 2010.
- Hoekstra, R., Jeroen J.C.J.M. van der Bergha.: Comparing Structural and Index Decomposition Analysis, *Energy Economics*, Vol.25, 39-64, 2003.
-

-
- International Atomic Energy Agency (IAEA): *Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodology*, 2005.
- International Energy Agency (IEA): *IEA Statistics, CO₂ Emissions from Fuel Combustion*, 2011.
- International Energy Agency (IEA): *Oil Crisis & Challenge – 30 Years of Energy Use in IEA Countries*, 2004.
- International Energy Agency (IEA): *World Energy Outlook 2010*, 2010.
- International Panel on Climate Change (IPCC): *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006.
- International Road Federation (IRF): *IRF World Road Statistics*, 2007, 2008.
- Kiang, N., and Schipper, L.: Energy Trends in Japanese Transportation Sector, *Transport Policy*, Vol.3, No.1/2, 21-35, 1996.
- Kwon, T. H.: Decomposition of Factors Determining the Trend of CO₂ Emissions from Car Travel in Great Britain (1970-2000), *Ecological Economics*, Vol.53, 261-275, 2005.
- Kwon, T.: A Scenario Analysis of CO₂ Emission Trends from Car Travel: Great Britain 2000-2030, *Transportation Policy*, Vol.12, 175-184, 2005.
- Lakshmanan, T. R., and Han, X.: Factors Underlying Transportation CO₂ Emissions in the U.S.A. – A Decomposition Analysis, *Transportation Research Part D*, Vol.2. No.1, 1-15, 1997.
- Laspeyres, E.: Die Berechnung Einer Mittleren Waarenpreissteigerung, *Jahrbucher fur Nationalokonomie und Statistik*, Vol.16, 296-314, 1871.
- Lee, K., and Oh, W.: Analysis of CO₂ Emissions in APEC Countries: A Time-Series and a Cross-Sectional Decomposition Using the Log Mean Divisia Method, *Energy Policy*, Vol.34, 2779-2787, 2006.
- Linderoth, H.: Forecast Errors in IEA-Countries' Energy Consumption, *Energy Policy*, Vol.30, 53-61, 2002.
-

-
- Lise, W.: Decomposition of CO₂ emissions over 1980-2003 in Turkey, *Energy Policy*, Vol.34, 1841-1852, 2006.
- Millard-Ball, A., and Schipper, L.: Are We Reaching Peak Travel? Trends in Passenger Transport in Eight Industrialized Countries, *Transportation Reviews*, Vol.31, No.3, 357-378, 2011.
- Myers, D. and Kitsuse, A.: Constructing the Future in Planning: A Survey of Theories and Tools, *Journal of Planning Education and Research*, Vol.29, 221-231, 2000.
- Nakicenovic, N.: Greenhouse Gas Emissions Scenarios, *Technical Forecasting and Social Change*, Vol.65, 149-166, 2000.
- Office for National Statistics, *UK: Population Census*, 2011.
- Paasche, H.: Über die Preisentwicklung der Letzten Jahre Nach den Hamburger Borsennotirungen, *Jahrbucher für Nationalökonomie und Statistik*, Vol.23, 168-178, 1874.
- Papagiannaki, K., and Diakoulaki, D.: Decomposition Analysis of CO₂ Emissions from Passenger Cars – The Case of Greece and Denmark, *Energy Policy*, Vol.37, 3259-3267, 2009.
- Sato, K.: The Ideal Log-Change Index Number, *Review of Economics and Statistics*, Vol.58, No.2, 223-228, 1976.
- Scholl, L., Schipper, L., and Kiang, N.: CO₂ Emissions from Passenger Transport: A Comparison of International Trends from 1973 to 1992, *Energy Policy*, Vol.24, No.1, 17-30, 1996.
- Steenhof, P, Woudsma, C., and Sparling, E.: Greenhouse Gas Emissions and the Surface Transport of Freight in Canada, *Transportation Research Part D*, Vol.11, 369-376, 2006.
- Steenhof, P. A.: Decomposition for Emission Baseline Setting in China's Electricity Sector, *Energy Policy*, Vol.35, 280-294, 2007.
- Stuvel, G.: *The Index Number Problem and its Solution*, MacMillan, Basingstoke, U.K., 1989.
-

-
- Sun, J. W.: An Analysis of the difference in CO₂ Emission Intensity between Finland and Sweden, *Energy*, Vol. 25, 1139-1146, 2000.
- Sun, J. W.: Changes in Energy Consumption and Energy Intensity – A Complete Decomposition Model, *Energy Economics*, Vol.20, 85-100, 1998.
- Sun, J. W.: Energy Demand in the Fifteen European Union Countries by 2010 – A Forecasting Model based on the Decomposition Approach, *Energy*, Vol.26, 549-560, 2001.
- UK Department of Transport Statistics: *Energy and Environmental Statistics*, 2011.
- Varita, Y. O.: Ideal Log-Change Index Numbers, *Scandinavian Journal of Statistics*, Vol.3, 121-126, 1976.
- Walsh, C. M.: The Problem of Estimation, *London: P.S. King & Son*, 1921.
- Wang, C., Chen, J., and Zou, J.: Decomposition of Energy – Related CO₂ Emissions in China, *Energy*, Vol.30, 73-83, 2005.
- Wood, R., and Lenzen, M.: Zero-Value Problems of the Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition Method, *Energy*, Vol.34, 1326-1331, 2006.
- Zegras, C., Sussman, J., and Conklin, C.: Scenario Planning for Strategic Regional Transportation Planning, *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.130, No.1, 2-13, 2004.
- Zhang, F. Q., and Ang, B. W.: Methodological Issues in Cross – Country / Region Decomposition of Energy and Environment Indicators, *Energy Economics*, Vol.23, 179-190, 2001.
- 横浜市環境創造局：平成 24 年版 横浜の環境（横浜市環境管理計画年次報告書）資料編，2012.
- 岡田啓：日本における貨物交通起因の CO₂ 排出の要因分析，武蔵工業大学環境情報部紀要，第 9 号，17-23，2008b.
- 岡田啓：日本における自家用車起因の CO₂ 排出の要因分析：茅の式を応用した一考察，運輸と経済，第 68 巻，第 11 号，50-59，2008a.
-

環境省：地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン（第3版），2007.

環境省：平成12年度 温室効果ガス削減技術シナリオ策定検討会，温室効果ガス排出量分析評価
ワーキンググループ報告書，2001.

経済産業省：運輸部門のエネルギー消費動向，2004.

国土交通省：自動車輸送統計年報，1991 - 2010.

桜本光：望ましい経済指数とその性質，三田商学研究，第42巻，第5号，91-110, 1999.

自動車検査登録協会：自動車保有車両数，1991-2010.

全国軽自動車協会連合会：軽自動車車両数，1991 - 2010.

総務省：社会生活統計指標. 総務省統計局ホームページ. <http://www.stat.go.jp/data/ssds/5.htm>.

総務省：統計局人口統計，2012.

地球環境研究センター・(独) 国立環境研究所、温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）編：
日本国温室効果ガスインベントリ報告書，2012.

沈中元：エネルギー需要の変動要因分析法 - 完全要因分析法と簡易法，第17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，1-5，2001.

東京都環境局：東京都環境白書 2012，2012.

日本エネルギー経済研究所：図解エネルギー・経済データの読み方入門，307-312，(財) 省エネ
ルギーセンター，2001.

日本トラック協会：トラック運送事業における地球温暖化対策とその評価に関する調査報告書，
2008.

日本自動車工業会：世界自動車統計年報 第11集，2012.

日本自動車工業会：世界自動車統計年報 第3集，2004.

日本自動車工業会：世界自動車統計年報 第7集，2008.

樋口美雄、太田清、新保一成：入門 パネルデータによる経済分析，日本評論社，2006.