

# ハイブリッド手法を用いた 中国自動車製造業CO<sub>2</sub>排出量の推計

中道 久美子<sup>1</sup>・花岡 伸也<sup>2</sup>・関 建新<sup>3</sup>・谷 蘊<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京工業大学特定准教授 環境・社会理工学院（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）

E-mail: nakamichi.k.aa@m.titech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）

E-mail: hanaoka@ide.titech.ac.jp

<sup>3</sup>アクセント株式会社 <sup>4</sup>神戸大学

中国のCO<sub>2</sub>排出量は世界最大であり、全世界の20%以上を占める。自動車の販売台数は第1位にも関わらず保有台数は未だ少なく、今後ますますの増加が予想される。しかし、サプライチェーン上流のデータ不足等を補うCO<sub>2</sub>排出量の推計手法が確立されていない。本研究ではプロセス分析と産業連関分析を組み合わせたハイブリッド手法を用いて乗用車1台当たりの素材、生産、輸送、使用段階のCO<sub>2</sub>排出量を推計するとともに、産業構造の変化、技術進歩、工場移転を考慮したシナリオ分析を行う。その結果、使用段階の排出量が最も多く、今まで算定されていない素材段階の排出量も無視できないほど多いことが分かった。将来の技術進歩が排出量削減に最も効果的である一方、需要増加による全体の排出量は現状の2.6倍となることを示した。

**Key Words :** CO<sub>2</sub> emission, automobile industry, process based analysis, I-O table analysis, China

## 1. はじめに

### (1) 背景・目的

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書<sup>1)</sup>では、最近30年の世界平均地上気温は、1850年以降のどの10年間よりも高温で、気候変動の原因は人間活動によるものであり、世界のCO<sub>2</sub>排出量の中でも、人間の生産、生活にかかわる製造業及び運輸業が約35%の排出量を占め、最も大きな排出要因となっている。中国では、1978年に改革開放が始まって以来、計画経済から市場経済に移行するにつれ、人々の生活が大幅に豊かになり、GDP、支配可能な収入も増加している。従って、人々の消費が生活最低限の食品だけでなく、ほかの商品とサービスへの支出も大きくなり、温室効果ガスの排出も年々急速に増加している。Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR)<sup>2)</sup>によると、2005年には、中国のCO<sub>2</sub>排出量は米国を抜き世界一位の排出国となっており、2014年の排出量は約10.64億トンで、全世界の約29%を占めている。これには石炭への依存も要因として大きいと考えられる。これに対して、2015年の国連気候変動枠組条約締約国会議(COP21)が開催されたパリにて、気候変動抑制に関する多国間の国際的な協定（パリ協定）

を掲げ、産業革命前からの世界の平均気温上昇を「2度未満」に抑え、さらに、平均気温上昇「1.5度未満」を目指す国際的な目標を確認した。

中国でも2014年11月の中米気候連合声明では、2030年頃をピークにCO<sub>2</sub>排出量を減少に転じるという具体的な目標を示した<sup>3)</sup>。2015年の国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）では、CO<sub>2</sub>排出量を減少傾向へ転じ、ピーク達成時期を早めるよう、最善の取り組みを行うと宣言した<sup>4)</sup>。具体的には、パリ協定の約束草案により2020年にGDP当たりGHG排出量を2005（基準年）年比で40～45%削減し、2030年にGDP当たりGHG排出量を2005年（基準年）比で60%～65%削減する自主削減目標を掲げており、中国が今後どのような削減策に取り組むか注目される。特に、GDP全体の3割以上を占める産業部門<sup>5)</sup>からの排出量の削減が急務であり、技術、及び政策的な対策が求められる。

中国政府は、2008年から税金の割引、ガソリン価格の割引、自動車買い替えなど一連の政策<sup>6)</sup>を打ち出し、乗用車購買制限が緩和されている。さらに、2001年の世界貿易機関(WTO)の加入とともに輸入車の税金が段階的に引き下げられ、輸入車も手軽に買えるようになってきた。一方で、661の市レベル行政単位のうち2016年までに地

表-1 自動車製造段階とCO<sub>2</sub>排出量

段階	具体的な工程	CO <sub>2</sub> 排出形態	関連部門
素材段階	素材の生産	素材の製造	産業部門
	部品の生産	部品の製造	産業部門
	完成車の組立	部品の組立工場での完成車製造	産業部門
輸送段階	部品の輸送	部品の完成車工場への輸送	運輸部門
	完成車の輸送	完成車のディーラーへの輸送	運輸部門
使用段階	自動車使用	消費者による使用	運輸部門

下鉄が整備されている都市は29都市（香港も含む）で、バスの定刻運行が不十分である。このような現状を鑑みると、中国将来の自動車ニーズがさらに大きくなり、生産量や販売量も急速的に発展すると考えられる。自動車の生産から使用までの過程でのCO<sub>2</sub>排出量も多くなることが見込まれ、自動車産業のCO<sub>2</sub>排出量の定量化が必要不可欠である。また、中国政府が打ち出す施策を考慮し、将来の第3次産業発展とそれによる産業構造変化、技術の進歩、製造業拠点移転と需要側の市場ニーズの変化がどのようにCO<sub>2</sub>排出量へ影響するか定量的に分析することで、自動車産業ではどのような削減策を提案でき、どのような政策がパリ協定の約束草案の達成に有効であるか明らかにすることも重要である。

自動車産業は表-1のようにCO<sub>2</sub>排出量の中でも産業部門と運輸部門の双方と密接に関係している。温室効果ガスプロトコルイニシアチブ（GHGプロトコル）は、オープンで包括的なプロセスを通じて、国際的に認められたGHG排出量の算定と報告の基準を開発し（「GHGプロトコル事業者排出量算定報告基準」）、その広範な採用の促進を図ることを目的とした、世界規模の共同活動である<sup>7)</sup>。「GHGプロトコル事業者排出量算定基準」が2001年に発行されて以来、世界中の企業、NGO及び政府機関によって広く採用され、受け入れられてきた。CO<sub>2</sub>排出量をScope1（直接エネルギー）、Scope2（間接エネルギー）、Scope3（その他事業活動外での排出量）の3段階に分けて排出量の公表を求めている。特にScope3における排出量は、調達物流や輸送などのサプライチェーンを含んだものであり、その他にも使用段階や廃棄における排出量も含まれている。自動車産業のCO<sub>2</sub>排出量の評価手法としては、一つめにライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment : LCA)が最も広く使われている。この手法は国際基準のISO14000シリーズに従い作られた手法であり、本研究ではこれをプロセス分析と呼称する。二つめは、政府から公表された産業連関表を使い、トップダウン的に自動車産業全体のCO<sub>2</sub>排出量を求める手法である。産業連関分析は1930年代に、ハーバード大学のロシア経済学者ワシリー・レオンチェフによって最初に考え出された。当時の米国における経済構造の実態把握ばかりでなく環境問題の分析まで応用分野を広げ、世界中の多くの国で使用されている。

中国の自動車産業を対象にサプライチェーンを含めたCO<sub>2</sub>排出量を推計する場合、プロセス分析は産業の段階を分解し、CO<sub>2</sub>排出量を積み上げる手法のため、細分化レベルが高く、段階ごとの排出量が明確である。しかし、データ収集及び計算の時間が長く、事前に推計範囲を設定する必要がある。また、各段階で必要なデータに対し、自動車産業だけでなく企業全体の透明性が低いため、自発的なGHG排出量開示のような環境活動は積極的に取り組まれおらず、サプライチェーンの上流側（素材側）ほど企業規模が小さい現状を考えると、一部データの入手可能性及び信頼性が極めて低い。従って、プロセス分析の場合も、一部求められない段階があり、不確実性が生じる。一方、産業連関分析は政府公開データという意味では信頼性及び入手可能性が高い。しかし、中国の国民経済計算体系(SNA)が公開を始めて30年であり、まだ部門数が少ない。例えば、日本の500部門及びアメリカの350部門の産業連関表と比べ、中国は139部門<sup>8)</sup>であり、部門の統合により大きな不確実性が生じる<sup>9)</sup>。また、産業連関分析を行うとき、入力変数は金銭的な価値である。自動車産業の場合、同じ部門の中、ブランドやサービスの違いにより、車の値段も大きく異なる。また、産業連関表を作成する年（基準年）は必ずしもCO<sub>2</sub>排出量を推計する年（目標年）と同じではない。このような基準年から目標年の間に、インフレーション又はデフレーションがもたらす購買力の変化も考慮できていないため、産業連関分析も不確実性が生じる。以上より、中国に適用にする上ではプロセス分析や産業連関分析にはそれぞれ限界があり、一つの手法で制度の高い推計は困難であるため、この二つの手法の限界を補う新たな推計手法が求められている。

これらの背景を踏まえ、本研究では、1) プロセス分析と産業連関分析の双方について、中国の自動車産業限界に適用するまでの限界を補完する形で統合したハイブリッド手法により現状の1台当たり及び自動車産業全体のCO<sub>2</sub>排出量の推計を行うこと、2) 将来の産業構造の変化、技術進歩、工場移転及び需要側の政策変化がCO<sub>2</sub>排出量に与える影響を定量的に明らかにすることを目的とする。

## (2) 既存研究のレビューと本研究の位置づけ

中国を対象とした製造業全体あるいは産業全体のCO<sub>2</sub>排出量推計では、工業製品を対象にプロセス分析における調査範囲の選定、環境影響の定量化、影響評価の手法を提案したYang (2013)<sup>10)</sup>、1997年、2002年、2007年の13産業部門を対象に産業連関分析によりCO<sub>2</sub>排出量を推計したLin et al. (2010)<sup>11)</sup>、2002年、2007年の8家計消費部門を対象に産業連関分析により誘発排出量を省市区別都市・農村別に推計し、間接排出原単位と世帯側の双方のシナリオ分析を行った中道ら (2016)<sup>12)</sup>がある。中国の自動車産

業を対象とした研究では、特定の自動車メーカーのガソリン自動車、ハイブリッド自動車、電気自動車のエネルギー使用量をプロセス分析により生産から使用段階まで推計したGao et al. (2013)<sup>13</sup>、北京のタクシーのCO<sub>2</sub>排出量を推計し持続可能な発展戦略を提案したCai et al. (2017)<sup>14</sup>がある。

中国以外の国を対象とするハイブリッド手法を用いた自動車産業の排出量推計では、例えばサプライチェーンの上流などのプロセス分析で求められない段階にも他の手法を組み合わせて環境負荷物質を定量化し、より精度の高いTire Hybridというハイブリッド手法を提案したBillardら(1978)<sup>15</sup>、実際にTire Hybridを適用して国際間産業連関表が未整備だった日本で輸出入に関する環境負荷の定量化にはプロセス分析を使い、産業連関表から求められない環境影響物の排出量を求めた本藤(1996)<sup>16</sup>、上流など産業連関表で表せない部分を分解し、新たに部門を細分化した産業連関表を作るIO Basedハイブリッド手法を提案して環境影響物質排出量を推計したJoshi (2000)<sup>17</sup>がある。また、将来の工場海外移転シナリオを考慮したタイを中心とする自動車産業のCO<sub>2</sub>排出量をプロセス分析により推計したNakamichi et al. (2016)<sup>18</sup>もある。

このように、中国を対象とする研究は、プロセス分析あるいは産業連関分析のどちらかを使用してエネルギー使用量やCO<sub>2</sub>排出量を推計する研究が多い一方、それ以外の国では産業連関分析またはプロセス分析だけではなく、ハイブリッド手法が使用されている。しかし、中国の自動車産業は上流データが不足しており、産業連関表の部門数が少ないため、単純に海外向けの手法をそのまま適用しても精度の高い推計結果が得られない。つまり、中国の自動車産業の現状をふさわしい手法はまだ開発されていない。これに対し、1) これまでデータ不足が原因で推計されていなかった素材段階も考慮したハイブリッド手法を使い、素材段階、生産段階、輸送段階、使用段階のすべてのCO<sub>2</sub>排出量を推計できること、2) 将来の政策を考慮したシナリオを作成し分析することで、中国の自動車産業のCO<sub>2</sub>排出量の削減に貢献する施策について示唆を得ることができることが本研究の特長である。

## 2. CO<sub>2</sub>排出量の推計手法

### (1) 使用データ

本研究の全体フローを図-1に示す。

中国では、上海自動車集団 (SAIC) の子会社である上海フォルクスワーゲン (上海VW) の乗用車販売量が2012年に126.99万台に達し、第1位となった。その中でも、2007年に開発され2008年に正式量産が開始された国産モデルLavidaは、わずか2年後には販売量第2位に、2012年

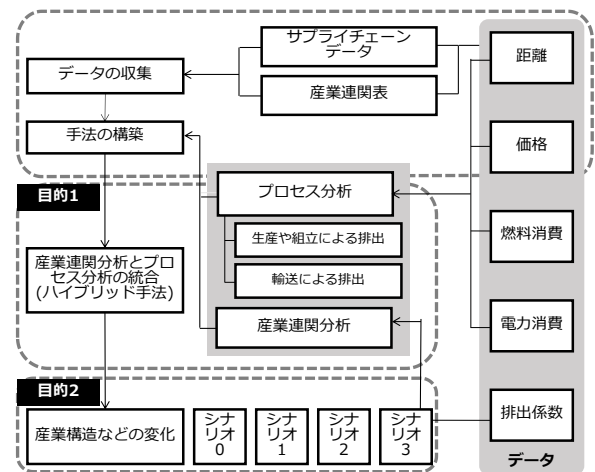


図-1 本研究のフロー

表-2 Lavidaの概要

モデル名	New Lavida
サイズ(mm)	4605*1765*1460
ホイールベース (mm)	2610
重量(kg)	1245
排気量(cc)	1598
ガソリン消費量 (理想) (L/100km)	4.90
ガソリン消費量 (実際) (L/100km)	7.96
使用年数(年)	無限(10年と仮定)
年間の走行距離(km)	25000
排出係数(kg-CO <sub>2</sub> /kg)	2.984751
ガソリン密度(kg/L)	0.72~0.76

には27.71万台で第1位となった<sup>19</sup>。中国における価格別の販売量は9~13万元が最も多い<sup>20</sup>。ボディタイプ別ではセダンの販売量が徐々に減少し、2015年にはSUVが前年比52.4%増と急速に販売量を伸ばしている。以上を踏まえ、本研究では9~13万元の価格帯のSUVで販売量の多いLavidaを対象として自動車1台当たりの素材段階から使用段階のCO<sub>2</sub>排出量を推計し、自動車部門の全体へ拡大する。本研究で使用する自動車の概要は表-2の通りである。中国における乗用車分類は、中国汽车工业协会による基本乗用車、MPV、SUVとCrossOver等の国家標準があるが、実際には市場のニーズが反映できず消費者に誤解を招くことが多く、また、同じ形状でサイズの異なる細かい分類がないため、企業、組織により異なる分類が用いられているのが現状である。本研究ではドイツで一般的な排気量、ホイールベース、車長、重量によるA00、A0、A、B、C、Dの分類を用いる。燃費について、VWのによる公表データは4.9 L/100kmであるが、これは最も理想的な平均時速が90KMである場合の値である。インターネットの使用者調査によると、2015年の1.6L、FF、ATモデルのLavidaは7.96 L/100kmであることから、この値を用いることとした。使用年数については、中国の自動車政策により、2013年までは10年の上限があり、それ以降撤廃されたが、10年以上使用すると6ヶ月ごとに車

検を行う必要があるため、10年と仮定した。

産業連関分析においては、産業連関表、エネルギー統計年鑑、素材価格を用いる。産業連関表は、1987年から5年ごとの基本表と、末尾が0または5の年の延長表がある。基本表は1992年、1997年、2002年、2007年、2012年のものがあり、延長表は1990年、1995年、2000年、2005年、2010年のものがある。産業連関表には輸入輸出競争型と非競争型産業連関表の2種類がある。競争型の産業連関表は輸入、輸出にかかわらずすべて中間投入の部分が含まれているのに対し、非競争型産業連関表の中間投入の中に輸入と輸出の部分があり、それぞれ計算されている。中国の産業連関表は競争型しか存在しないため、本研究では競争型を用いる。中国国家统计局から編集整理した2002年122部門、2007年135部門と2012年139部門の産業連関表を使用する。エネルギー統計年鑑については、直接及び間接排出原単位を求めるための各部門のエネルギー使用量を得るため、本研究では2003年と2008年のデータを使用した。経済産業部門を45部門分け、炭、コークス、原油、ガソリン、灯油、ディーゼル、燃料油、天然ガスの8種類のエネルギー源の使用量が収録されている。素材価格については、公式データが存在しないため、中国で最も規模が大きいECサイトアリババから価格が掲載している店舗の価格データを独自に整理した。

プロセス分析においては、まず、部品種類、部品生産による電力使用、完成車組み立てによる電力使用、部品重量については、中国ではLCAデータベースが整備されていないため、LCA日本フォーラムが公開しているJLCAデータベース(日本の車両データ)<sup>20</sup>を使用した。日本の乗用車メーカー8社による提供データを平均して作成されたもので、Lavidaともサイズや排気量が類似している。自動車部品に関するデータは111種類あり、そのうち投入エネルギーが記されている31種類を使用した。電力排出係数に関しては、中国国家発展改革委員会の中国地域電力排出因子<sup>21</sup>を使用した。これは国連の電力マージン排出係数計算方法を参考に、国家発展改革委員会と企業が共同で推計した排出係数で、多くの企業で使用されている。華北、東北、華東、華中、西北、南方地域電力に分けられている、サプライヤー数と輸送距離に関しては、SVWのウェブサイトの情報、公開資料や年鑑等<sup>23) 24) 25) 26)</sup>の情報を収集した上で、ヒアリング調査を実施した結果、上海VWと取引がある129社のサプライヤーのうち、Lavidaのサプライヤーは103社であることが判明した。サプライヤーや完成車組立工場所在地情報を地図上に独自にプロットし、道路ネットワークを考慮して算出した。ディーラーに関しては、上海VWのウェブサイト公開されている各省の販売店の数を収集し、同様に距離を算出した。輸送原単位に関しては、ヒアリングの結果、ドアツードア輸送ができる上に、コスト削減に

もつながるトラック輸送を主に利用していることが判明した。本研究では、18tのディーゼルトラックの排出原単位(116.85g-CO<sub>2</sub>/kWh)を利用した。載積率は車両8台分の重量を最大載積量で除した結果を利用した。

## (2) 産業連関分析の推計手法

本研究では、産業連関分析を使用し、素材段階の排出量を推計する。まず、直接排出原単位には、IPCCが公表した2006年改訂版温室効果ガス目録のためのIPCCガイドライン<sup>27)</sup>に記載されている推計方法を使用する。部門を分けず全体のエネルギー源の使用量により、各省市自治区の直接排出量を推計する。具体的には式(1)で表す。

$$D_n = \sum_k q_{nk} \cdot j_k \cdot c_k \cdot o \cdot 44 / 12 \quad (1)$$

$D_n$ : 市区町村  $n$  の直接排出量 (t-CO<sub>2</sub>/年)

$k$ : エネルギー源 (石炭, コークス, 原油, ガソリン, 灯油, ディーゼル, 燃料油, 天然ガス)

$q_{nk}$ : 市区町村  $n$  におけるエネルギー源  $k$  の使用量 (t/年)

$j_k$ : エネルギー源  $k$  の低位発熱量 (TJ/t)

$c_k$ : エネルギー源  $k$  の炭素排出係数 (t-C/TJ)

$o$ : 酸化率 (1.0と仮定)

この際、燃料 (エネルギー源) を工場で燃焼させるため、IPCCガイドラインに基づき低位発熱量を用いて推計する。なお、同様にIPCCガイドラインによると、灰や煤煙以外の通常のエネルギー源の場合の酸化率は1.0を使用することとなっている。実際に、中国の産業部門別GHG排出量推計ガイドライン<sup>28)</sup>を見ても、ほとんどが酸化率0.98か0.99となっていることが確認できた。また、チベット自治区ではエネルギー使用量 $q_{nk}$ の値が得られなかったため、推計対象から除外した。

次に、間接排出原単位を求める。部門  $j$  の部門  $i$  に対する生産額当たりの投入係数 $a_{ij}$ は、式(2)のように中間需要 $x_{ij}$ を総生産 $x_i$ で除することで求められる。

$$a_{ij} = x_{ij} / x_i \quad (2)$$

中間需要と投入係数の行列をそれぞれ $X$ と $A$ で表す。 $I$ は単位行列である。ある部門の最終需要 $f$ から他の部門への中間需要 $x$ は、以下の式で求められる。

$$X = (I - A)^{-1} \quad (3)$$

上記の式を変形し、直接原単位 $d'$ を用いることで、間接排出原単位 $e_k$ が求められる。

$$e_k = d' (I - A)^{-1} \quad (4)$$

以上の手法により原単位を求めた後、各素材のCO<sub>2</sub>排出量を式(5)により求められる。 $E_m$ は素材段階の排出量、 $e_{ki}$ は部門  $i$  の間接排出原単位であり、 $Price_i$ は部門  $i$  の素材の価格である。

$$E_m = \sum_i e_{k,i} \cdot Price_i \quad (5)$$

### (3) プロセス分析の推計手法

まず、輸送段階について、部品生産による排出量は以下の式により求める。

$$E_p = \sum_j \sum_n g_{n,j} \cdot EMF_j \quad (6)$$

$E_p$ : 自動車1台当たりの部品生産における排出量(t-CO<sub>2</sub>)

$g_{n,j}$ : 部品 $n$ の地域 $j$ での生産における使用電力量(mWh)

$EMF_j$ : 地域 $j$ 排出係数(t-CO<sub>2</sub>/mWh);

$n$ : 部品番号  $n=1\sim 31$

完成車組み立てによる排出量は式(7)により求める。

$$E_a = g \cdot EMF \quad (7)$$

$g$ : 完成車組み立ての使用電力量(mWh);

$EMF$ : 排出係数(t-CO<sub>2</sub>/mWh)

輸送による排出量について、経済産業省、国土交通省が発表したロジスティクス分野におけるCO<sub>2</sub>排出量算定方法共同ガイドライン<sup>29)</sup>では、精度と作業負荷を考慮し、燃費法を標準手法とし、優先順位の高い順に代替手法として燃費法、改良トンキロ法、輸送区間別貨物重量法、従来トンキロ法、料金法が挙げられている。燃料法では燃料使用量を、燃費法では輸送車両の燃費を使用するため、本研究では扱わず、改良トンキロ法を採用した。しかし、この改良トンキロ法はトラックにのみ適用できるものであるため、完成車輸送における鉄道輸送・水運は、従来トンキロ法を採用した。改良トンキロ法と従来トンキロ法の式に、部品種毎または車両数毎に按分する式を作成し、これによってCO<sub>2</sub>排出量を算出した。

改良トンキロ法による、部品輸送（トラック）におけるCO<sub>2</sub>排出量算定式は以下の通りである。

$$E_i = \frac{W_i \times d_{ij} \times C \times H \times F \times 44 / 12}{u} \quad (8)$$

完成車組立工場からディーラーまで完成車輸送によるCO<sub>2</sub>排出量のうち、トラック輸送に関しては、上流輸送と同様の改良トンキロ法を使用した以下の式で算定した。

$$E_c = \frac{W_c \times d_{kl} \times C \times H \times F \times 44 / 12}{q} \quad (9)$$

また、完成車組立工場所在自動車駅からディーラー所在自動車駅まで完成車輸送によるCO<sub>2</sub>排出量のうち、鉄道輸送による排出量の算定は、従来トンキロ法で算定した。式は以下の通りである。

$$E_R = \frac{W \times d_{rm} \times F_R}{q} \quad (10)$$

完成車組立工場の最寄港からディーラーの最寄港まで完成車輸送によるCO<sub>2</sub>排出量のうち、水運による排出量の算定式は

$$E_M = \frac{W \times d_{lm} \times F_M}{q} \quad (11)$$

完成車組立工場からディーラーまでの完成車輸送によるCO<sub>2</sub>排出量は、各省へ輸送される台数の代替指標とし

てディーラー数が把握できているため、各省のディーラー数の重みづけ平均によって算出する。

$$E_D = \sum_s \frac{n_s}{876} \{E_M \delta_{sM} + E_R \delta_{sR} + E_c\} \quad (12)$$

$$\sum_s n_s = 876 \quad (13)$$

以上の式から導き出された各段階の排出量を以下の式で合計する。

$$E_T = \sum_i E_i + \sum_c E_c + E_D \quad (14)$$

$E_T$ : 自動車1台当たりの輸送段階の排出量 (t-CO<sub>2</sub>) ;

$E_i$ : 自動車1台当たりの部品輸送の排出量 (t-CO<sub>2</sub>) ;

$E_c$ : 自動車1台当たりの完成車陸上輸送の排出量 (t-CO<sub>2</sub>) ;

$E_R$ : 自動車1台当たりの完成車鉄道輸送の排出量 (t-CO<sub>2</sub>) ;

$E_M$ : 自動車1台当たりの完成車水運輸送の排出量 (t-CO<sub>2</sub>) ;

$E_D$ : 自動車1台当たり完成車輸送の排出量(t-CO<sub>2</sub>) ;

$n_s$ :  $s$ 省にあるディーラーの数 ;

$\delta_{sM}$ : 完成車組立工場から  $s$  省への輸送に水運を使用している場合は1, それ以外は0 ;

$\delta_{sR}$ : 組立工場から  $s$  省への輸送に鉄道輸送を使用している場合は1, それ以外は0 ;

$W_i$ : 部品ユニットの総重量 (t) ;

$d_{ij}$ : 輸送距離 (km) ;

$c$ : 改良トンキロ法燃料使用原単位 (ℓ/tkm) ;

$H$ : 単位発熱量 (GJ/ℓ) ;

$F$ : 排出係数 (t-C/GJ) ;

$i, j$ : サプライヤー番号  $i=1\sim 97$  ;

$u$ : ユニット数 ;

$q$ : 完成車数

$W$ : 全車両重量 (t) ;

$d_{kl}$ : 完成車組立工場とディーラーの間の道路距離 (km) ;

$d_{rm}$ : 完成車組立工場とディーラーの鉄道駅間距離(km) ;

$d_{lm}$ : 完成車組立工場とディーラーの港間距離(km) ;

次に、使用段階について、ユーザーの使用頻度と走行距離を仮定し、2万km, 1万km, 3千kmの3パターンを仮定し、以下の式でCO<sub>2</sub>排出量を算定した。

$$E_u = \frac{d \cdot y}{e} \cdot den \cdot f \quad (15)$$

$y$ : 自動車一台当たり使用年(10年と設定) ;

$e$ : 自動車の燃費(km/L) ;

$f'$ : ガソリンの排出係数 (kg-CO<sub>2</sub>/kg) ;

$den$ : ガソリン密度(kg/L)

### (4) ハイブリッド手法の構築

図-2のように、プロセス分析で使用段階、輸送段階、部品生産、完成車組み立て段階のCO<sub>2</sub>排出量を求める。サプライチェーンの上流になると、プロセス分析のデータが入手できず、分析ができなくなる。つまりプロセス分析の境界に至る。境界に至ると、プロセス分析で欠けている素材段階を産業連関分析を使ってCO<sub>2</sub>排出量を求める。

以上より、産業連関分析とプロセス分析を足し合わせる。

$$E_h = E_m + E_p + E_a + E_T + E_U \quad (16)$$

## (5) シナリオ設定

### a) シナリオ0 : BAU

中国の産業構造が変化なく、現状のままで発展するシナリオである。このシナリオで、将来の産業連関表予測を行い、現状の成り行きを分析する。分析手法としては、RAS<sup>30)</sup>法を用いる。これは、基準年の投入係数を  $A(0)$  とし、目標年（予測しようとする年）の産業連関表の投入係数を予測する手法である。投入係数を予測するために、 $R$  と  $S$ （修正係数）が必要となる。修正係数の予測手法は、総生産、付加価値、中間投入、中間需要から予測できる。

### b) シナリオ1 : 第3次産業発展

中国は長らく世界の工場と呼ばれ、製造業が重要な役割を果たしている。一方、国土が広く、農業も重要な産業である。しかし、日本、米国などすでに発展している国を参考にすると、経済増長とともに、産業の中心が第3次産業へ移行することが考えられるものの、産業保護政策により以降は緩やかであると考えられる。以上を踏まえ、表-3の通りシナリオを設定した。

### c) シナリオ3.1 : 技術進歩（発電改良）<sup>12)</sup>

まず、石炭発電効率向上については、石炭火力発電のCO<sub>2</sub>排出係数は2004年の1.112 kg-CO<sub>2</sub>/kWhから年々減少し、2009年には0.934 kg-CO<sub>2</sub>/kWhになったことがわかった。そこで、今後も積極的に海外の石炭発電技術を導入し、2030年に0.75 kg-CO<sub>2</sub>/kWh、2050年に0.57 kg-CO<sub>2</sub>/kWhになると仮定する。この値は、日本での2030年頃には石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)で0.60 kg-CO<sub>2</sub>/kWh、2040年頃には革新的な石炭ガス化複合発電(IGCC)及びIGFCで0.53 kg-CO<sub>2</sub>/kWhという見込みから設定した。

発電方法別割合の変化に関しては、中国政府は原子力発電、風力発電と太陽光発電に力を入れ、非化石燃料の占める割合を30%にしている。原子力発電は2020年には発電量の4%、2030年からは10%を維持するのが望ましいとされていることから、本研究では2030年には6%、2050年には10%になると仮定する。風力発電については、2020年から補助金がなくなることを考慮し、その発電割合は2030年には5%、2050年には6%になると仮定する。太陽光発電については、補助金により今後発展し、その割合は2030年には1%、2050年には2%になると仮定する。全発電量に占める水力発電の割合はこれ以上増加させるのは難しいとみられているため、現状の17%を維持すると仮定する。これらの仮定を部品生産、完成車組み立ての生産段階の排出量の推計に適用する。

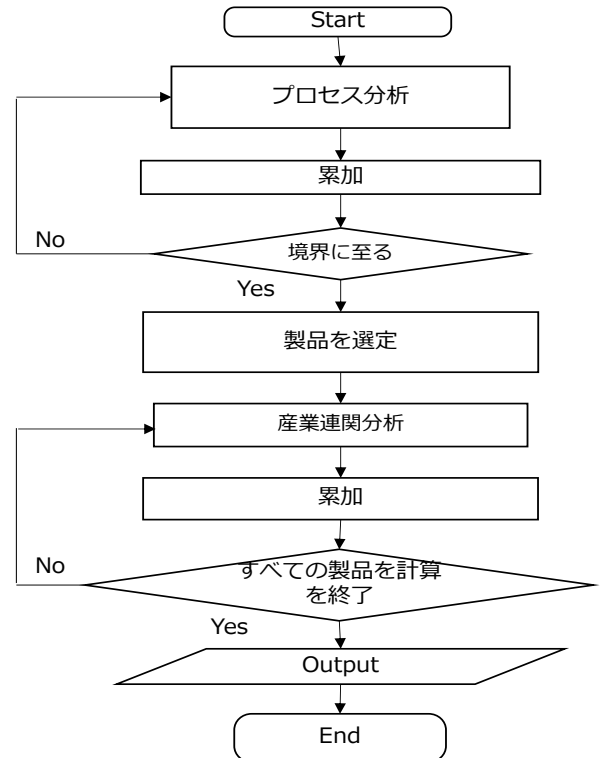


図-2 ハイブリッド手法の計算フロー

表-3 産業割合の設定

	第1次産業	第2次産業	第3次産業
BAU	2.4%	66.5%	31.1%
2030年	5.6%	46.4%	47.9%
2050年	1.0%	35.0%	64.0%

### d) シナリオ3.2 : 技術進歩（燃費向上）

Lavidaの公式燃費は0.49L/100kmであり、実際に使用しているオーナーによるインターネット公表では燃費0.96L/100kmである。将来の技術進歩を考え、燃費向上を定量化するため、本研究ではモデル車を選定にあたり、長期間販売されてきたガソリン車で燃費の向上変化が観測できるモデル車としてVWのGolfを選定した。この長期的変化を考慮し、Lavidaの燃費が2030年に5.18L/100km、2050年に2.79L/100kmになると仮定する。

### e) シナリオ4.1 : 工場移転（国内）

海外企業が中国進出するため合併会社を作る必要がある。その合併会社の設立により、高額な関税（2016年は25%）も避けられる。その一方、国内、特に完成車組み立て工場の人件費高騰により、より人件費の低い地区へ移転する必要がある。しかし、海外移転する場合は高額な関税が課税されるため、国内の人件費が低い省へ移転するシナリオが考えられる。省・市・自治区の中で最も収入が低いこと、鉄道ネットワーク構築により鉄道での完成車運輸が可能であること、西部開発及びアジアインフラ投資銀行の政策により経済発展が見込まれ自動車の

販売量増加が予想されることから、甘肅省に完成車組み立て工場が移転すると仮定する。本シナリオでは、輸送段階の排出量がトラック（トレーラー）と鉄道の両方を推計する。ただし、鉄道の場合は省間の輸送のみで、駅からディーラーまで、サプライヤーから駅まではトラックとする。

#### f) シナリオ4.2：工場移転（海外）

中国国内の人件費増加に伴い、工場が人件費の少ない東南アジアへ移転する可能性がある。しかし、組立工場が移転すると、輸入関税が発生してしまう。そこで、輸入関税が10～21%と少ない部品工場がミャンマーへ移転すると仮定する。理由としては、人件費とともに電力や水道の料金が低いこと、電力排出係数が0.206(t-CO<sub>2</sub>/MWh)<sup>29</sup>と小さいこと、地理的にも中国内陸と接しているため、船、又はトラックで輸送でき東南アジアの自動車市場に成長を考えると有利であることが挙げられる。ただし、中国政府の政策により、完成車機能とみなせる部品（エンジン、車台、ブレーキ、トランスミッション）も完成車輸入関税が課税されるため、それ以外の部品工場が海外へ移転するシナリオとする。輸送手段はトラックと船を仮定する。

#### g) 需要の予測

中国の自動車保有量はまだまだ少なく、Han らの研究<sup>30)</sup>によると2050年の乗用車千人当たりの保有量は585.4台になると予想されている。本研究では、2050年の省別の自動車生産量を予測する。各省の人口が2050年まで約80%の都市化率になり、人口も2040年にピークになると示されている中道らの研究<sup>12)</sup>の結果を用いて、各省の人口を予測する。次に、2050年の一人当たりの保有量が千人585.4台と設定し、各省の自動車保有量を求める。最後に、中国国家統計局のデータにより現在の自動車保有量と自動車生産量の関係を推計したところ、1998年から2015年の自動車生産量は保有量の15%から23%の間に収まることがわかった。そこで、1998年から2015年の平均を取り、2050年は自動車生産量が保有量の17%と仮定する。

表-4 現状の1台当たりCO<sub>2</sub>排出量の推計結果

CO <sub>2</sub> 排出量 (t-CO <sub>2</sub> )			
素材段階			0.429
生産段階	部品の生産	0.777	0.271
	完成車の組立		0.506
輸送段階	部品の輸送	0.218	0.008
	完成車の輸送		0.210
使用段階			6.6~44.2

### 3. 推計結果と考察

#### (1) 現状の結果

##### a) 1台当たりの排出量

表-4の推計結果を見ると、走行段階が排出量が6.6トンから44.2トンと最も多い割合を占める。次に多いのは生産段階で、本研究で用いたモデル自動車は中国仕様車であり、生産、組立もすべて排出係数が高い中国国内で行うことが要因である。素材段階の排出量が3番目に多く、既存研究では素材段階の排出量をほぼ無視してしまうが、本研究で提案した手法で実際に計算してみると、非常に大きな排出責任がある段階といえる。ただし、中国で素材の公式な価格データがないためECサイトの価格で求めているため、価格変化により影響を受ける。排出量が最も少ないのは輸送段階である。その理由は本研究で選定した上海VWは、サプライヤー及びディーラーが東南海岸部へ集中しており、国土が広い中国にかかわらず、運輸距離が短いからである。

##### b) 自動車産業全体の排出量

乗用車分類の種類別に1台当たりの自動車排出量が推計し、中国自動車販売量の内訳で按分して各種類の車の販売量から、自動車産業全体の排出量を推計した結果が図-3である。セダンが最も排出量が多く、それぞれのAレベルの車が最も大きな排出量が占めることもわかった。非セダンは販売量があまり大きくないわりに、同じサイズで最も重くなるため、より多くのCO<sub>2</sub>を排出する。

#### (2) シナリオ分析の結果

##### a) 1台当たりの排出量

各シナリオにおける2050年の完成車1台当たりの排出量の推計結果を表-5及び図-4に示す。これを見ると、使用段階の燃費向上が排出量削減への影響が最も大きい、自動車走行パターンにより幅があることもわかる。ライフサイクルの観点からは、最も削減策が重要な段階だといえる。使用段階以外では、技術進歩が排出量削減に最も大きな影響を与えることもわかった。その次に、シナリオ1及びシナリオ2.1のように、技術進歩及び第3次産業発展も、それぞれ21%と34%もの削減率に貢献することができる。

最後に、自動車企業の費用面で考えた工場移転のシナリオ3.1と3.2を見ると、移転先の排出係数変化により排出量全体的に削減できるが、工場立地により、輸送段階の排出量が大幅に増加することも注意しなければならない。特に輸送手段がトラック（トレーラー）のままであれば、拠点移転により大幅に排出量が増加する。

##### b) 自動車産業全体の排出量

シナリオ3を除き、削減量が多いシナリオを組み合わせると、表-6のようになり、使用段階以外で合計1.424ト

ンの排出量が0.841トンと、約40%減少する。一方で、使用段階も6.6～44.2から1.8～12.3になり、大幅に削減できる。

これに対し、将来の自動車使用を考慮し自動車産業全体の排出量を推計すると、省別では図-5、自動車種類別では図-6のようになる。省別では、すべての省で排出量

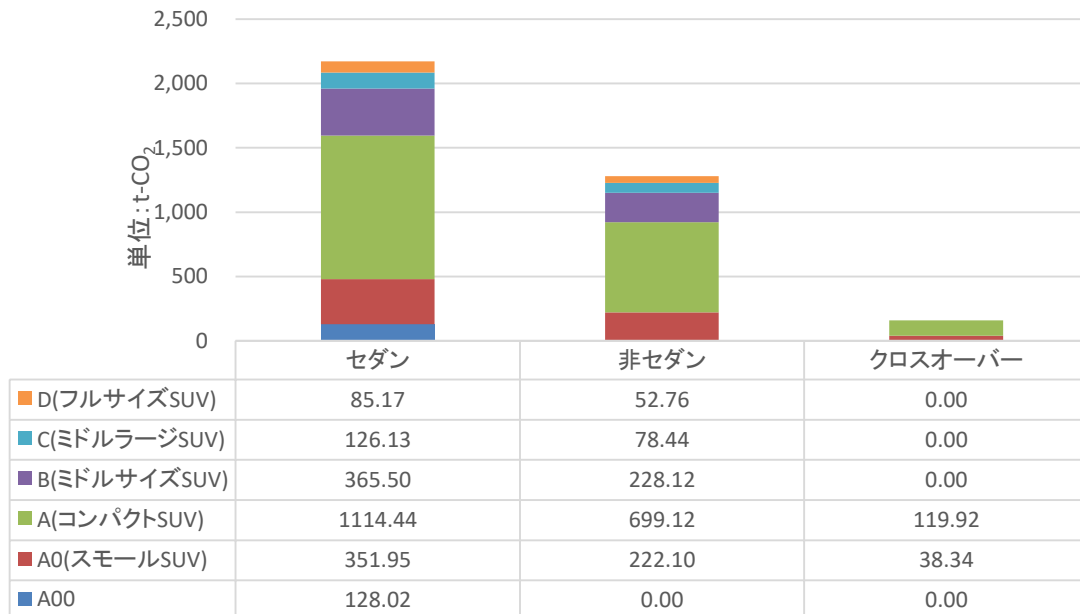


図-3 現状の自動車産業全体CO<sub>2</sub>排出量の推計結果

表-5 シナリオ分析による1台当たりCO<sub>2</sub>排出量の推計結果 (t-CO<sub>2</sub>)

	現状	シナリオ0	シナリオ1	シナリオ2.1	シナリオ2.2	シナリオ3.1 (トレーラー)	シナリオ3.1 (鉄道)	シナリオ3.2 (トラック)	シナリオ3.2 (船)
素材段階	0.429	0.175	0.123	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.17
部品生産	0.271	0.271	0.271	0.196	0.271	0.271	0.271	0.19	0.1
完成車組立	0.506	0.506	0.506	0.354	0.506	0.476	0.476	0.506	0.50
部品運輸	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.052	0.036	0.16	0.0
完成車運輸	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.398	0.160	0.21	0.2
合計	1.424	1.17	1.118	0.943	1.170	1.118	1.372	1.241	1.15
使用段階	6.6-44.2	6.6-44.2	6.6-44.2	6.6-44.2	1.8-12.3	6.6-44.2	6.6-44.2	6.6-44.2	6.6-44.2

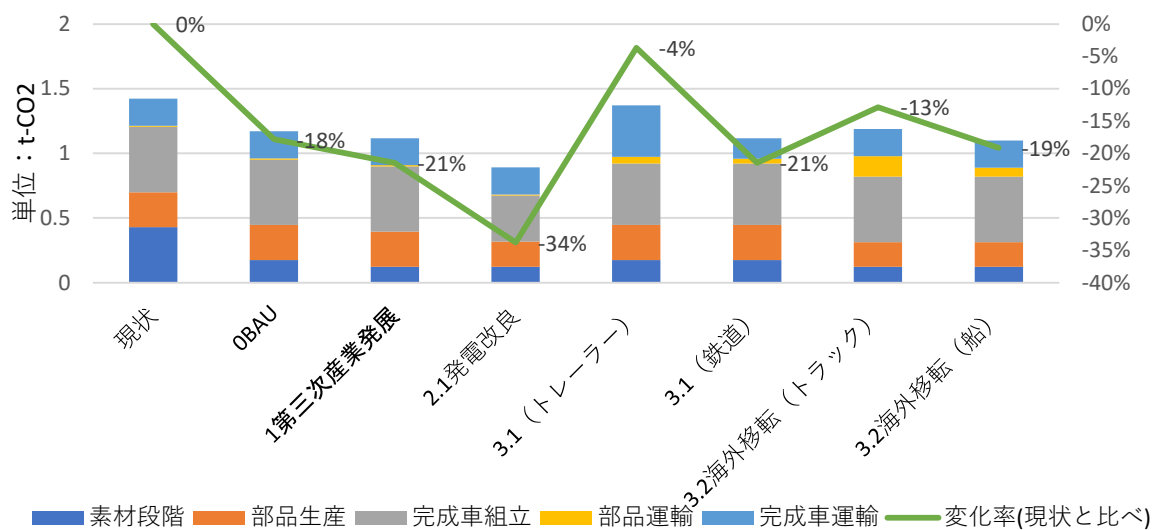


図-4 シナリオ分析による1台当たりCO<sub>2</sub>排出量の推計結果と削減率

が増加することがわかる。自動車種類別では、将来もセダンの人気が高く販売量が多いことを反映している。1台当たりで見れば、2050年までに排出量を0.841トンまで削減できるが、中国の自動車市場の拡大とともに、自動車産業全体の排出量が3,610万トンから11,748万トンへ増加する結果となった。また、U.S. Energy Information Administration (EIA)の統計<sup>32)</sup>によると、アメリカの交通設備生産・製造によるCO<sub>2</sub>排出量は2,857.53万トンであることを鑑みると、中国がすでに2015年時点ですでに3,600万トンを超えており、非常に深刻であるといえる。

以上より、1台当たりの排出量削減対策だけでなく、需要側の大幅な増大を抑制するために、公共交通インフラの整備、自動車税金、駐車制限などの政策も重要であ

表-6 シナリオの組み合わせ結果 (1台当たりCO<sub>2</sub>排出量)  
(t-CO<sub>2</sub>)

	現状	結合シナリオ
素材段階	0.429	0.123
部品生産	0.271	0.196
完成車組立	0.506	0.354
部品運輸	0.008	0.007
完成車運輸	0.21	0.16
合計	1.424	0.841
使用段階	6.6-44.2	1.8-12.3

る。例えば、2016年に中国政府は自転車シェアリングや低排気量車へ税金の削減などの政策を打ち出している。

最後に、GDP総量あたりの排出量を表-7に示す。GDPについてはHSBCの増加率を用いて、2050年までのGDPを推計した。単純に自動車部門のGDP総量あたりの排出量結果だけを見れば、結合シナリオのレベルで削減策を実現すれば、パリ協定への達成可能性が高いといえる。

## 4. 結論

本研究では、中国の自動車産業に着目し、自動車1台当たり、及び自動車産業全体のCO<sub>2</sub>排出量推計を行った。また、将来の産業構造の変化、技術進歩、工場移転及び需要側の変化を考慮したシナリオを作成し、CO<sub>2</sub>排出量を推計した。

その結果、使用段階における排出量が最も多く、今ま

表-7 GDP当たり排出量の比較

	2015年	2030年	2050年
GDPあたり排出量 (t-CO <sub>2</sub> /G-RMB)	5.24	6.59	2.59
排出係数	100%	126%	49%

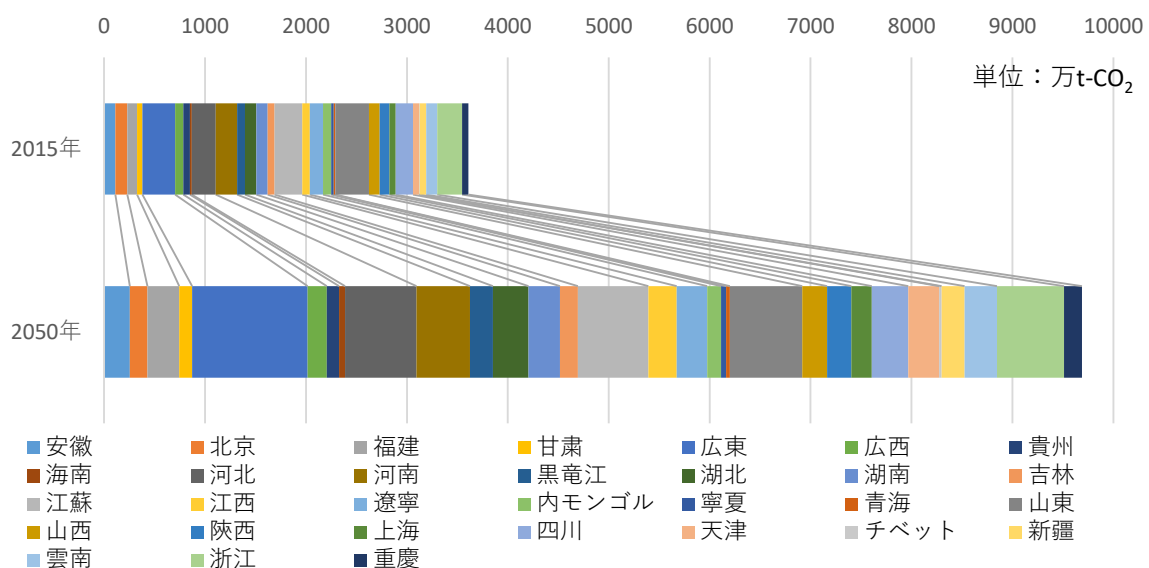


図-5 結合シナリオにおける省別CO<sub>2</sub>排出量の推計結果

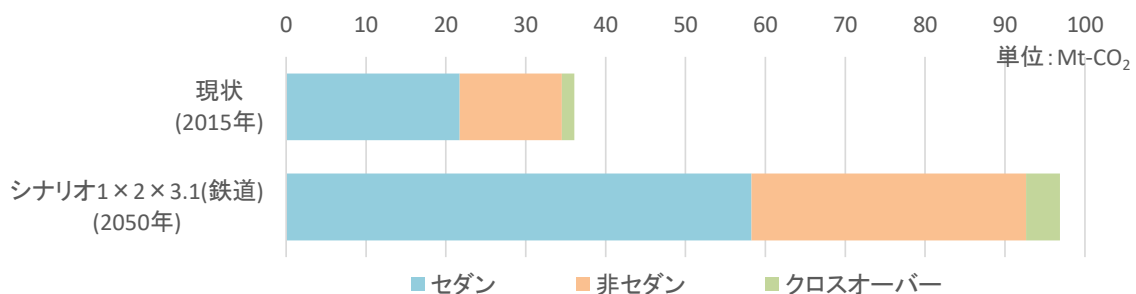


図-6 結合シナリオにおける自動車種類別CO<sub>2</sub>排出量の推計結果

で算定されていない素材段階の排出量も無視できないほど1台当たりの排出量へ影響を及ぼすことが分かった。シナリオ分析により、技術進歩が最も効果的な施策であることが明らかになった。ただし、工場立地変化により、全体的に排出量が減少するが、輸送段階における排出量が大幅に増加することに注意しなければならない。また、産業構造の変化、技術進歩、工場移転及び需要側の予測を行い反映した結果、たとえ1台当たりの排出量が減少しても、中国全体では急速に増加する自動車への需要に対して影響が小さいことも分かった。COP21にて宣言した削減目標を達成するためには、エネルギー源の技術進歩が最も根本的な改善策といえる。一方で、人口規模の大きい中国全体で排出量を削減するためには、技術進歩だけでは限界があり、積極的に地下鉄やバスなどの公共交通インフラを開発し、それらの手段の利用を促すことで自動車依存から脱却する政策も重要である。

## 参考文献

- Intergovernmental Panel on Climate Change: Fifth Assessment Report (AR5), 2014, <http://www.ipcc.ch/>
- European Commission: CO<sub>2</sub> time series 1990-2013 per region/country, Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=CO2ts1990-2013>.
- The White House: Fact Sheet: U.S.-China joint announcement on climate change and clean energy cooperation, 2014, <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/11/11/fact-sheet-us-china-joint-announcement-climate-change-and-clean-energy-c>
- JCCCA: COP21 各国の約束草案, 2015, [http://www.jccca.org/trend\\_world/conference\\_report/cop21/2-1204.html](http://www.jccca.org/trend_world/conference_report/cop21/2-1204.html)
- 小村智宏: 工業大国の行方, 三井物産戦略研究所経済調査室, 2012, [http://mitsui.mgssi.com/issues/report/r1209x\\_omura.pdf](http://mitsui.mgssi.com/issues/report/r1209x_omura.pdf)
- 中华人民共和国国务院: 中华人民共和国车辆购置税暂行条例, 中华人民共和国国务院令 第 294 号, 2001, [http://www.gov.cn/gongbao/content/2001/content\\_60852.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2001/content_60852.htm) (中国語)
- 環境省: 温室効果ガス (GHG) プロトコル事業者の排出量算定及び報告に関する標準, <http://www.env.go.jp/council/06earth/y061-11/ref04.pdf>
- 国家统计局: 中国投入产出表, 中国统计出版社 (中国語)
- Suh, S.: System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches, *Environmental Science & Technology*, Vol.38, No.3, pp.657-664, 2004.
- Yang J.X.: Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products, *Acta Scientiae Circumstantiae*, Vol.33, No.5, pp.1504-1512, 2013.
- Lin, N., Liang R.L., Shimazaki Y., Soma T.: 産業連関表を用いた中国における経済発展と二酸化炭素排出に関する研究, *Journal of life cycle assessment, Japan*, Vol.6 No.4, pp.327-337, 2010.
- 中道久美子, 花岡伸也, 関建新: 中国における家計消費に基づく省市別 CO<sub>2</sub> 排出量の推計と削減策の検討, 土木学会論文集 G(環境), Vol.72, No.6 (環境システム研究論文集, 第 44 巻), pp.II\_95-II\_106, 2016.
- Gao B.Y., Mao X.Q., Yang S.Q., Wu L., Dong G.: Analysis and assessment of the energy conservation and emission reduction effects of new energy cars based on LCA, *Acta Scientiae Circumstantiae*, Vol.33, No. 5, pp.1504-1512, 2013.
- Cai Y.P., Scott A., Yue W.C., Cai J.Y., Liu G.Y., Li C.H.: A hybrid life cycle and multi-criteria decision analysis approach for identifying sustainable development strategies of Beijing's taxi fleet, *Energy Policy*, Vol.100, pp.314-325, 2017.
- Billard C. W.: Net Energy Analysis, *Handbook of Combining process and Input-Output Analysis, Resources and Energy*, Vol.1, pp.267-313, 1978.
- 本藤 祐樹: 産業連関分析による財・サービス生産時のエネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 排出量, 電力中央研究所, 研究報告, 1996.
- Joshi S.: Product Environmental Life-Cycle Assessment using Input-Output Techniques, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.3, No.2&3, pp.95-120, 2000.
- Nakamichi, K., Hanaoka, S. and Kawahara, Y.: Estimation of cost and CO<sub>2</sub> emissions with a sustainable cross-border supply chain in the automobile industry: A case study of Thailand and neighboring countries, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.43, pp.158-168, 2016.
- 中国汽车工业协会 (2013): 中国汽车工业协会统计信息网, 2012 年前十位轿车品牌销量排名, <http://www.auto-stats.org.cn/ReadArticle.asp?NewsID=7823> (中国語)
- 搜狐汽车: 汽车销量, 2016, <http://db.auto.sohu.com/cxdata/> (中国語)
- LCA 日本フォーラム: JLCA データベース, インベントリ分析用データ, 日本自動車工業会, 日本自動車部品工業会, 2016.
- 中国国家発展改革委員会, 中国地域電力排放因子, China Climate Change Info-Net <http://www.ccchina.gov.cn/archiver/cdmcn/UpFile/Files/Default/20150204155537627092.pdf> (中国語)
- 上海大众汽车: 公司介绍, <http://www.csvw.com/csvw2011/qyjk/qyjj/gsjj/index.shtml>
- FOURIN: 中国自動車部品産業 2012, FOURIN, 2012.
- 中国汽车工业协会, 中汽华轮公司: 中国汽车工业企业单位信息大全 2012 版, 人民交通出版社, 2012.
- 中国汽车技术研究中心, 中国汽车工业协会: 中国汽车工业年鉴, 2012 年版, 年鉴编辑部出版, 2012. (中国語)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- China Climate Change Info-Net (CEInet): Guidelines for Accounting and Reporting Greenhouse Gas Emissions, China Economic Information Network (CEInet), Department of Climate Change, National Development and Reform Commission, 2016, <http://en.ccchina.gov.cn/Detail.aspx?newsId=59210&Tid=107>
- 経済産業省, 国土交通省: ロジスティクス分野における CO<sub>2</sub> 排出量算定共同ガイドライン Ver.3.0, 2007.
- 丸山佐和子: ノンサーベイ・アプローチによる投入係数の推計と検証, 産開研論集, Vol.21, 2009.
- Han H., Wang H., Yi R.: Hybrid modeling of China's vehicle ownership and projection through 2050, *Energy*, Vol.36, pp.1351-1361, 2011.
- EIA: Fuel Consumption, 2010, [https://www.eia.gov/consumption/manufacturing/data/2010/pdf/Table3\\_1.pdf](https://www.eia.gov/consumption/manufacturing/data/2010/pdf/Table3_1.pdf) (2018.7.31 受付)

## ESTIMATION OF CO<sub>2</sub> EMISSION FROM CHINESE AUTOMOBILE MANUFACTURING INDUSTRY USING HYBRID METHOD

Kumiko NAKAMICHI, Shinya HANAOKA, Jianxin GUAN and GU Yun