

A-0808 統合評価モデルを用いた気候変動統合シナリオの作成及び気候変動政策分析

(2) 排出シナリオの詳細化に関する分析

京都大学大学院工学研究科

松岡譲・倉田学児・河瀬玲奈

〈研究協力者〉

中国 能源研究所

Kejun Jiang

インド インド経営大学院アメーダバード校

P. R. Shukla

タイ アジア工科大学

Ram Shrestha

平成20～22年度累計予算額：23,408千円（うち、平成22年度予算額：7,802千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] アジア各国における温暖化対策を推進するためには、世界排出量シナリオをアジアの各国・都市を対象として詳細化したモデルの構築が必要である。また、途上国への実効性のある温室効果ガス排出削減の対策シナリオを検討する上では、温暖化対策の環境面・経済面への副次的効果を含めた評価を行う事が不可欠であるが、都市および地域スケールでの大気汚染対策は副次的効果が大きいと考えられる。本研究では、統合評価モデルに国・都市・地域スケールの大気汚染対策にかかわる副次的効果の評価を含めるための第一段階として、世界排出量シナリオのアジア諸国を対象としたダウンスケーリング手法を開発するとともに、温室効果ガスの排出量に加えて、都市・地域スケールでの大気汚染問題の原因となる硫黄酸化物・窒素酸化物・揮発性炭化水素・浮遊粒子状物質の詳細な排出量分布を推計するためのフレームを構築した。また、推計に必要な大規模排出源(LPS)のデータベースや地方行政区単位の各種統計データ、ベースとなるGISデータの収集、整備を行い、2000年、2005年を対象とした詳細な排出量メッシュデータを作成した。

また、得られた排出源分布図を用いて、地域規模および局地規模の大気輸送化学シミュレーションを行って濃度場を計算し、国や地域、性別、年齢などによって異なる行動・生活時間パターンを考慮した時間平均アプローチによる曝露モデルを作成し、アジア地域の人々の屋外屋内両方でのPM_{2.5}、SO₂、NO_x、CO曝露濃度の推計を行った。

さらに、排出量の将来推計を行う上での基本的な考え方として、将来の排出量の国別割り当て(Burden Sharing)についても検討を行った。

[キーワード] 地球温暖化、大気汚染、緩和策、グローバルシナリオ、国別割当

1. はじめに

近年、中国やインドを始めとしたアジア地域の経済は急激に成長し、エネルギー消費量も増加している。Asian Development Bank¹⁾によると、2000年における世界全体のGDP成長率が4.8%であったのに対し、アジア地域におけるGDP成長率は7.1%であった。また、Asian Development Bank²⁾によると、1980年から1998年までのエネルギー消費量の増加率は、世界全体が1.8%/年であったのに対し、アジア地域における増加率は5.9%/年であった。これに伴って、CO₂などの温室効果ガスに加えて、SO₂やNO_xなどの大気汚染物質の排出量も著しく増加しており、Akimoto³⁾は、アジアのNO_x

排出量は少なくとも今後20年も増加し続けると推測している。

大気汚染は人間の健康に対する主要な環境リスクであり、先進国、発展途上国両方の多くの都市で浮遊粒子状物質やオゾン、SO_x、NO_xによる深刻な健康被害が生じている。大気汚染物質の中でもPM、特に空気力学径が2.5μm以下のPM_{2.5}（微小粒子状物質）の健康影響が国際的に注目されている。PM_{2.5}は呼吸器系の奥深くまで入りやすく、粒子表面に様々な有害な成分が吸収・吸着しているので、呼吸器系疾患、循環器系疾患、肺がんなどの病気や死亡の原因となる。

これら大気汚染物質の主な排出源は産業・交通・家庭等における燃料使用時が大部分を占める。そのため、エネルギー効率の改善、自然エネルギーの導入など温室効果ガス排出削減策との関係は非常に大きく、特に途上国の大都市圏などのエネルギー使用量当たりの大気汚染被害がより深刻な地域においては、温室効果ガス排出削減対策に伴う大気汚染の影響緩和に対するコベネフィットを定量的に評価する事が重要であると考えられている。大気汚染物質の影響の計算にはCommunity Multiscale Air Quality (CMAQ) モデルやThe Weather Research & Forecasting (WRF) モデルなどの大気モデル、大気化学輸送モデルを用いる。このモデルの入力値として、各種大気汚染物質の発生源の位置、種類および排出量を可能な限り詳細に表した大気汚染物質排出量分布図が必要である。

また、2009年にイタリアのラクイラで行われたG8サミットでは、2050年までに全世界で現状から温室効果ガス排出量を少なくとも半減、中でも先進国については80%以上の削減が必要であることが確認された。COP15では、「コペンハーゲン合意」が留意され、これに基づき、先進国は2020年までに削減すべき目標、途上国は削減のための行動をそれぞれ決めて、2010年1月末までにpledgeを提出した。日本においては、鳩山首相は2020年における日本の温室効果ガス排出削減目標を1990年比25%減と明言した。長期目標についても、日本の2050年における温室効果ガス排出削減目標は2005年比80%削減と明記している⁴⁾。本研究の後半部においては、国別排出許容量の将来パスの推計についても検討を行う。

2. 研究目的

本研究の目的は3点ある。

まず一点目としては、統合評価モデルに国・都市・地域スケールの大気汚染対策にかかわる副次的効果の評価を含めるための第一段階として、アジア諸国を対象として世界排出量シナリオからのダウンスケーリング手法を開発するとともに、温室効果ガスの排出量に加えて、都市・地域スケールでの大気汚染問題の原因となる硫黄酸化物・窒素酸化物・揮発性炭化水素・浮遊粒子状物質の詳細な排出量分布を推計するためのフレームを構築した。本研究では2000年、2005年におけるアジア地域を対象とし、詳細な大気汚染物質排出量分布図を作成することを目的とした。まず、地域統計などを元に発電所や製鉄所といった大規模排出源（Large Point Source: LPS）と地方行政区といった面排出源（Area Source: AS）の地図、情報を整備し、これらを「排出活動を行う単位」、すなわち活動単位と定義し、活動単位情報とエネルギー統計、産業統計などを元に活動単位ごとの排出量を推計し、さらに人口などのメッシュ配分指標を用いて30秒×30秒の排出量分布図を作成した。最後に既往の研究との比較による精度検証を行った。

研究の二点目の目的として、コベネフィットの定量化に不可欠な要素として、大気汚染物質に対する曝露モデルの構築と、大気化学輸送シミュレーションと組み合わせて、アジア各国の地域、

年齢、性別、職の有無などによって分けたコホート毎の年平均曝露濃度を求めることを目指した。特に本研究では、個人の滞在環境である微環境に対する濃度推計モデルと、各コホートの行動・時間利用データを用いることで、コホート毎の年平均曝露濃度を推計した。曝露モデルには、微環境の曝露を経時的に評価する時系列アプローチと、微環境の24時間の平均濃度と各微環境の滞在時間から推定する時間平均アプローチがあるが、本研究では、時間平均アプローチによる曝露モデルを作成し、アジア地域の人々の屋外屋内両方での大気汚染物質曝露濃度の推計を行った。

研究の三点目の目的は、最新のGDPや人口の将来シナリオをベースとし、コペンハーゲン合意など2020年までの世界の削減目標を取り込んだ、世界の温室効果ガス排出量の1990年比半減を目標とする世界各国の排出許容量のパスを推計することである。なお、世界は230地域区分とし、温室効果ガス排出許容量の推計においては、2050年に①世界の一人当たりの温室効果ガス排出量が等しくなるとするContraction and Convergence (C&C)、②世界のGDPあたりの排出量を等しくするIntensity、の2つの方法にて検討を行った。さらに、この排出量制約を課した場合の、日本における施策の影響、特に経済的な影響の定量的な評価・分析を、CGEモデルを用いて行った。温室効果ガス排出量削減対策としては、原子力発電、排出許可証取引、CCS技術についてそれぞれ幾つかのシナリオを用意し、シナリオを組み合わせる様々なケースを想定した。

3. 研究方法

(1) 排出量インベントリとダウンスケーリング手法の開発

1) 研究方法

本研究の全体像を図1に示す。研究方法は大きく分けて3つの作業に分類される。

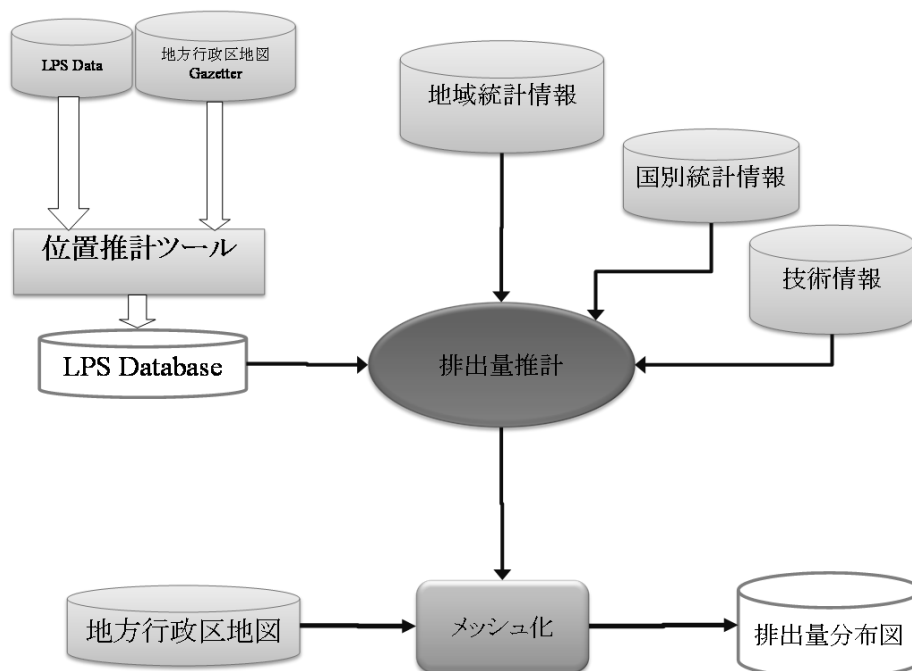


図1 研究の全体像

1つ目の作業は、面的排出源 (AS)、線的排出源 (LS)、大規模点源 (LPS) といった活動単位

の地図、情報の整備である。これには、プラントデータベース、地方行政区地図、地域統計、GISデータなどを用いた。

2つ目の作業は、活動単位ごとの排出量推計である。活動単位の情報と国別のエネルギー統計、産業統計などを用いて調整計算を行った。

3つ目の作業は、メッシュデータの作成である。活動単位の排出量を、人口などのメッシュ配分指標を用いて30秒×30秒（約1km×1km）のメッシュへと配分した。

2) 研究の対象

対象地域は表1に示すアジア24カ国・地域とした。対象物質は表2に示す8種類であり、エネルギー起源による排出のみを対象とした。ただし、CO₂についてはバイオマスおよび廃棄物の燃焼による排出は除いた。また、対象部門は表3に示す11部門とした。対象年は2000年および2005年とした。

表1 対象地域

地域	国
東アジア	日本、韓国、台湾、中国、モンゴル、北朝鮮
東南アジア	ブルネイ、インドネシア、カンボジア、ラオス、ミャンマー、マレーシア、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナム、パプアニューギニア
南アジア	バングラデシュ、ブータン、インド、スリランカ、ネパール、パキスタン、モルディブ

表2 対象物質

対象物質	略名	対象物質	略名
硫黄酸化物	SO ₂	微小粒子状物質(2.5μm)	PM _{2.5}
窒素酸化物	NO _x	非メタン炭化水素	NMVOC
微小粒子状物質(10μm)	PM ₁₀	一酸化炭素	CO
二酸化炭素	CO ₂	総浮遊粒子状物質	TSP

表3 対象部門

部門	副部門	備考
エネルギー転換	電力	
	石油	
産業	粗鋼	
	セメント	
	エチレン	
	紙・パルプ	
	その他産業	
家庭		
業務		
道路輸送	乗用車	
	バス	一部の国は道路輸送に集約
	トラック	
鉄道輸送	旅客	
	貨物	一部の国は鉄道輸送に集約

3) 活動単位の整備方法

本研究では、LPSとASの2種類の活動単位を設定した。各部門において対象となる活動単位を表4に示す。

表4 各部門の活動単位

部門	副部門	活動単位
エネルギー転換	電力	発電所(LPS)、地方行政区(AS)
	石油精製	石油精製工場(LPS)、地方行政区(AS)
産業	粗鋼	製鋼工場(LPS)、地方行政区(AS)
	セメント	セメント工場(LPS)、地方行政区(AS)
	エチレン	石油化学工場(LPS)、地方行政区(AS)
	紙・パルプ	紙・パルプ工場(LPS)、地方行政区(AS)
	その他産業	地方行政区(AS)
家庭		地方行政区(AS)
業務		地方行政区(AS)
道路輸送	乗用車	
	バス	地方行政区(AS)
	トラック	
鉄道輸送	旅客	地方行政区(AS)
	貨物	

a. AS活動単位の整備方法

i. 地図の整備

地図の整備にあたって、まず様々な機関から配信されているアジア地域の地図（GISデータ）を収集した。次に、各国ごとに地図を比較し、最も一致していると思われるものを選択した。表5に選択した地図を示す。

表5 選択した地図

国	採用地図	地域区分名	地域区分数	コード
バングラデシュ	Global Administrative Areas	District(zila)	64	AgroMap Code
ブルネイ	Global Administrative Areas	District(daerah)	4	修正AgroMap Code
ブータン	ACASIAN	Dzongkhag	20	DZ
中国	Historical Population in China	County(県級)	2875	GB
インドネシア	Global Administrative Areas	Kabupaten & Kota	395	修正AgroMap Code
インド	IIM	District	591	D2K
日本	国土数値情報	City(市区町村)	1931	JIS
カンボジア	Global Administrative Areas	Province(Khett)	24	修正AgroMap Code
韓国	Jung(2008)	Municipal level(si)	233	Jung氏のコード
ラオス	Global Administrative Areas	Province(Khoeng)	17	AgroMap Code
スリランカ	Global Administrative Areas	(admin 3rd)	25	修正AgroMap Code
モルディブ	Global Administrative Areas	Atholhu	21	修正AgroMap Code
ミャンマー	ACASIAN	Township	299	TOWNSHIP Code
モンゴル	Global Administrative Areas	Aimag	22	修正AgroMap Code
マレーシア	ACASIAN	(admin 3rd)	132	NEGDP
ネパール	Global Administrative Areas	Zone	14	AgroMap Code
パキスタン	ACASIAN	(4次領域)	129	ADM Code
フィリピン	Global Administrative Areas	Province	81	修正AgroMap Code
パプアニューギニア	Global Administrative Areas	State	20	修正AgroMap Code
北朝鮮	Jung(2008)	Provincial(道)	12	Jung氏のコード
シンガポール	Global Administrative Areas	(地域区分無し)	1	無し
タイ	Global Administrative Areas	Provinces(changwat)	76	修正AgroMap Code
台湾	ACASIAN	County	23	修正AgroMap Code
ベトナム	Global Administrative Areas	Province(tinh)	519	AgroMap Code

採用した地方行政区地図は複数の情報源から入手した地図のため、各データの境界でポリゴン間のずれがあったり、空白が生じたりするといった不整合がある。そこでGIS上で地方行政区地図の修正作業を行った。また、座標系が各地方行政区地図で異なっていたので、WGS1984座標系に統一した。地図の修正内容を表6に示す。

表6 地図修正内容

問題箇所	対象国	原因	修正内容
モンゴル東部	モンゴル・中国	精度不足	モンゴル側を修正
尖閣諸島	日本・台湾・中国	領土問題	中国、台湾の地図から尖閣諸島を削除
台湾島	台湾・中国	領土問題	中国の地図から台湾省を削除
中国本土	台湾・中国	領土問題	台湾の地図から中国本土を削除
中越国境	中国・ベトナム	精度不足	ベトナム側を修正
南沙諸島	数カ国	領土問題	実効支配域不明・データ入手も出来なかったため研究対象外とした
中印国境	インド・中国	領土問題	中国側を修正
カシミール	パキスタン・インド・中国	紛争地帯	Wikipedia, Google Mapを元に修正

ii. 関連情報の整備

活動単位の排出量を推計するにあたって、サービス供給量割合、エネルギー機器分担率のデータを整備する必要がある。以下に、整備方法を示す。

① サービス供給量割合

地域統計から、GDP、人口など、サービス供給量と関連性が高いと考えられる指標を選択し、サービス供給量割合とした。指標の選択基準を表7に示す。

表7 サービス供給量割合選択基準

サービス種	優先順位			
	1	2	3	4
電力	部門別GDP	発電容量	GDP	人口
石油製品、粗鋼、セメント、エチレン、紙・パルプ、その他産業人口	部門別GDP	総付加価値額	人口	-
業務部門付加価値額	人口	エネルギー消費量	GDP	-
道路旅客輸送・乗用車・バス、道路貨物輸送・トラック	部門別GDP	エネルギー消費量	GDP	人口
道路旅客輸送、鉄道旅客輸送	道路輸送量	自動車・バス・トラック車両台数、道路長	GDP	人口
鉄道旅客輸送、鉄道貨物輸送	鉄道車両台数、線路長	GDP	人口	-
道路輸送	自動車・バス・トラック車両台数	GDP	人口	-
鉄道輸送	鉄道車両台数、線路長	GDP	人口	-

② エネルギー機器分担率

AS活動単位のエネルギー機器の分担率は、Steel Statistic Yearbook 2006⁵⁾などを用いて各国ごとに設定し、活動単位間では一律とした。

b. LPS活動単位の整備方法

LPS活動単位の整備に使用したプラントデータベースを表8に示す。

表8 プラントデータベース一覧

対象部門	出典
発電	World Electric Power Plants Database (Platts, 2009a) ⁶⁾ International Electric Power Sourcebook (Platts, 2009b) ⁷⁾ IEA Clean Coal Center CoalPower5 database (IEA Clean Coal Center, 2010) ⁸⁾
鉄鋼	Developments in Steelmaking Capacity of Non-OECD Economies 2008 (OECD, 2009) ⁹⁾ WORLD CAPACITY AND PRODUCTION REPORT CRUDE STEEL (James F. King, 2007) ¹⁰⁾
セメント	World Cement Directory 2002 (CEMBUREAU, 2003) ¹¹⁾
石油化学、石油精製	東アジアの石油産業と石油化学工業2007年版 (東西貿易通信社, 2007a) ¹²⁾ 中国の石油産業と石油化学工業2007年版 (東西貿易通信社, 2007b) ¹³⁾
日本の発電、鉄鋼、セメント 石油化学、石油精製、 紙・パルプ	大気汚染物質排出量総合調査 (平成17年度実績) (環境省, 2008) ¹⁴⁾

i. 地図の整備

LPSの地図を作成するためには、LPSの緯度・経度が必要であるが、緯度・経度は環境省¹⁴⁾を除き記載されていない。ただし、プラントの所在地に関しては州、都市などといった情報が記載されている。そこで、これらの位置情報と各種地名辞典および地方行政区地図を比較することでLPSの緯度・経度を推計するツールを開発した。ただし、東西貿易通信社^{12), 13)}については半分以上のプラントのデータ（日本、韓国、中国のプラント）が漢字表記されているためにこの方法を用いることができず、Google Mapの地図及び衛星写真データを用いて目視による緯度・経度推計を行った。

ii. 関連情報の整備

AS活動単位と同様に、部門別にサービス供給量割合、エネルギー機器分担率のデータを整備した。以下に整備方法を示す。

① サービス供給量割合

プラントデータベースに記載されている設備容量あるいは設備エネルギー消費量の比をサービス供給量割合とした。

② エネルギー機器分担率

プラントデータベースに記載されている設備種を元に、エネルギー機器分担率を設定した。

4) 活動単位の排出量推計方法

整備した活動単位情報と、国別統計情報などを元に活動単位の排出量を推計する。活動単位の排出量は、以下の式を用いて推計した。

$$M_{i,m} = D_i \sum_l (rx_{i,l}) \sum_k (emf_{l,k,m} [e] x_{l,k}) \quad (1-1)$$

i : 活動単位

m : ガス種

l : 機器種

k : エネルギー種

$M_{i,m}$: 活動単位*i*におけるガス種*m*の排出量

D_i : 活動単位*i*におけるサービス供給量

$rx_{i,l}$: 活動単位*i*における機器種*l*のサービス供給量割合

$emf_{l,k,m}$: 機器種*l*がエネルギー種*k*を1単位消費する時のガス種*m*の排出量(排出係数)

$elx_{l,k}$: 機器種*l*がサービスを1単位供給する時のエネルギー種*k*の消費量

次に、各指標の整備方法を示す。

a. 活動単位*i*におけるサービス供給量 (D_i)

活動単位*i*におけるサービス供給量は、各種統計から得た国のサービス供給量を活動単位のサービス供給量割合を用いてダウンスケーリングすることで推計した。すなわち、

$$D_i = \sum_j (AD_j \cdot \sum_{kind} (rk_{kind,j} \cdot id_{j,i} \cdot \delta^k(i, kind))) \quad (1-2)$$

j : サービス種

$kind$: 排出源種 (LPS、AS)

AD_j : 集約化地域におけるサービス種*j*の供給量

$rk_{kind,j}$: 排出源種*kind*におけるサービス種*j*の供給量割合

$id_{j,i}$: 活動単位*i*における排出源種内でのサービス種*j*の供給量割合

$\delta^k(i, kind)$: i と*kind*の対応を表すフラグ

$rk_{kind,j}$ は、プラントデータベースに記載されている情報をもとに整備した。

b. 排出係数 ($emf_{l,k,m}$)

排出係数はEMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009 (European Environmental Agency (EEA), 2009)¹⁵⁾、庄司(2008)¹⁶⁾などを元に整備した。

c. 機器種*l*がサービスを1単位供給する時のエネルギー種*k*の消費量 ($elx_{l,k}$)

$elx_{l,k}$ は、総合エネルギー統計2005年度¹⁷⁾などを元に整備した。さらに、IEAのエネルギーバランス表^{18), 19)}などの各国エネルギー消費量データと整合を保つような $elx_{l,k}$ を調整計算により推計した。

5) 排出量メッシュデータの作成方法

次に、推計した活動単位の排出量をメッシュに配分し、排出量メッシュデータを作成する。なお、活動単位にはLPSとASが含まれるため、別々の手法で分布図を作成する。

LPSによるメッシュ排出量は、LPS活動単位の排出量をLPSがあるメッシュに配分することで求めた。すなわち、

$$\varepsilon_{c,m}^{LPS} = \sum_i (\delta_{c,i}^{LPS} \times M_{i,m}^{LPS}) \quad (1-3)$$

c : メッシュ

$\varepsilon_{c,m}^{LPS}$: メッシュ c における LPS によるガス種 m の排出量

$\delta_{c,i}^{LPS}$: メッシュ c に LPS 活動単位 i が含まれるかどうかを表すフラグ

$M_{i,m}^{LPS}$: LPS 活動単位 i によるガス種 m の排出量

AS によるメッシュ排出量は、AS 活動単位の排出量を、メッシュ配分指標を用いて該当メッシュに配分することで求めた。道路・鉄道部門以外のメッシュ配分指標には LandScan Global Population Database (Oak Ridge National Laboratory, 2005)²⁰⁾ の人口分布を用いた。道路・鉄道部門については道路、線路上のメッシュの排出量が多くなると考えられるので、人口分布に加えて Open Street Maps (Cloud Made, 2011)²¹⁾ の道路分布、VMAPO (National Geospatial Intelligence Agency, 1995)²²⁾ の鉄道分布などをそれぞれ用いた。

$$\varepsilon_{c,m}^{AS} = \sum_i \left(\delta_{c,i}^{AS} M_{i,m} \sum_n \frac{\zeta_n IN_{c,n}}{\sum_{c \in C(i)} IN_{c,n}} \right) \quad (1-4)$$

$$\sum_n \zeta_n = 1 \quad (1-5)$$

n : メッシュ配分指標

$\varepsilon_{c,m}^{AS}$: メッシュ c における AS によるガス種 m の排出量

$\delta_{c,i}^{AS}$: AS 活動単位 i にメッシュ c が含まれるかどうかを表すフラグ

$M_{i,m}^{AS}$: AS 活動単位 i によるガス種 m の排出量

$IN_{c,n}$: メッシュ c における配分指標 n

ζ_n : 配分指標 n への配分率

(2) 化学輸送シミュレーションと曝露モデルに関する研究

1) 研究方法

対象はアジア24カ国として、2001年におけるPM_{2.5}、SO₂、NO_x、COの一日平均曝露濃度を推計した。研究の全体像を図2に示す。本研究は、大気化学輸送シミュレーション（気象モデル、大気化学輸送モデル）と、曝露評価の2つに分けられる。

大気化学輸送シミュレーションでは、まず前項「排出インベントリとダウンスケーリング手法の開発」で作成した詳細なアジア地域の排出量マップを利用し、さらに月変動、日変動、時間変動を加えた入力データを作成する。次に、気象モデルを用いて、対象領域上の気象場を計算する。得られた排出量メッシュデータと気象データを入力データとして、大気化学輸送モデルで大気汚染物質の空間濃度分布を計算する。

曝露評価では各国の生活時間調査から作成した滞在時間、屋外の大気汚染物質濃度、燃料消費量、排出係数、住宅構造データ、換気回数、除去率、侵入率などを用いて、各国各コホートの大気汚染物質曝露濃度を計算した。

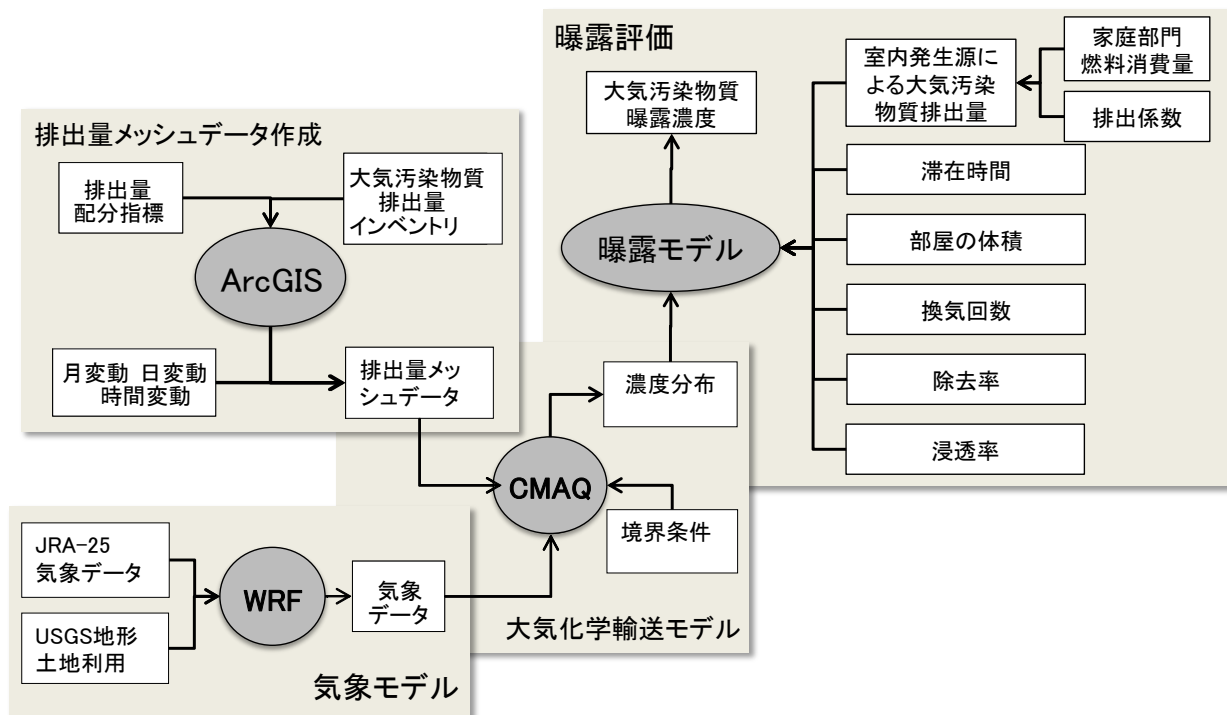


図2 本研究の全体像

2) 大気化学輸送シミュレーション

気象モデルと大気化学輸送モデルの設定領域を図3の中に示す。格子幅は80kmである。計算に用いた排出量の元データとして、人為起源の大気汚染物質排出量には主にZhang et al. (2009)²³⁾のデータを使用した。これは2006年を対象としたデータであるので、各国エネルギー消費量の2006年と2000年の比を乗じた値へと変換した。各国エネルギー消費量には、IEA^{18),19)}の値を用いた。この各国・各部門の大気汚染物質排出量を長山(2009)²⁴⁾の手法で30秒×30秒(約1km×1km)のメッシュデータへと変換した。

自然起源の排出量には、GEIA²⁵⁾が提供しているメッシュデータを使用した。三宅島からのSO₂放出量には、気象庁の発表している三宅島SO₂放出量日量測定値²⁶⁾より、月別に放出量を設定した。三宅島を除く火山からのSO₂放出量には、Streets et al. (2003)²⁷⁾のグリッドデータとともにアイオワ大学が提供する電力中央研究所とGEIAによる推計値を用いた。バイオマス燃焼による大気汚染物質排出量には、GICC biomass burning inventory²⁸⁾の2001年の月別メッシュデータを使用した。

気象モデルには、WRF (Weather Research and Forecasting Model) ver. 3.1.1を使用した。入力用気象データには気象庁と電力中央研究所によって実施されたJapanese Re-Analysis 25 years (JRA-25) プロジェクトの再解析データセット²⁹⁾を用いた。WRFのオプション設定を表9に示す。

大気化学輸送モデルには、米国EPAが開発した3次元オイラー型化学反応・輸送モデルのCMAQ ver. 4.7を使用した。境界における物質濃度には、MOZART ver. 2.1の標準実行の結果³⁰⁾を利用した。CMAQのオプション設定を表10に示す。

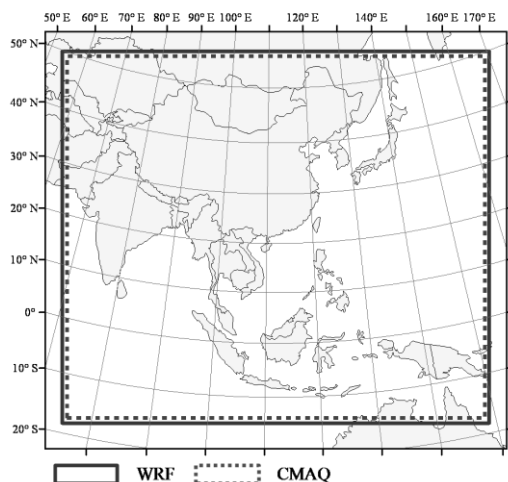


図3 気象モデルと大気化学輸送モデルの設定領域

表9 WRFのオプション設定

過程	使用モデル
雲物理	WSM 6-class graupel scheme
地表面	Noah land-surface model
境界層	YSU scheme
積雪	New Grell scheme(G3)
長波放射	RRTM
短波放射	Dudhia

表10 CMAQのオプション設定

過程	使用モデル
水平および鉛直移流	Global mass-conserving scheme
鉛直拡散	Asymmetric Convective Model version 2
雲混合	ACM
気相化学反応	CB05
エアロゾル	AERO5

3) 曝露評価

曝露モデルの国分類を表11示す。本研究のコホート設定は、性別、年齢（0歳、1～4歳、5～14歳、15～24歳、25～34歳、35～64歳、65歳以上）、就業状態によって22分類とした。また、本研究では、微環境を表12の通りに設定した。

表11 曝露モデルの国分類

バングラデシュ	インド	ラオス	フィリピン
ブータン	インドネシア	マレーシア	シンガポール
ブルネイ	日本	モルディブ	台湾
ミャンマー	カンボジア	モンゴル	タイ
スリランカ	北朝鮮	ネパール	ベトナム
中国	韓国	パキスタン	東ティモール

表12 微環境

微環境	場所	室内発生源	滞在時間の定義
A	住宅	調理	調理時間
B	住宅	給湯	調理時間
C	住宅	暖房	屋外気温が10℃以下のときの睡眠時間を除く住宅滞在時間
D	住宅	照明	睡眠時間を除く住宅滞在時間
E	屋内	なし	屋内滞在時間
F	屋外	-	屋外滞在時間

a. モデル式

微環境における大気汚染物質濃度の計算には、式(2-1)に示す定常状態下でのSingle-Compartment Mass Balance Modelを使用した。

$$C_m = \frac{1}{v + F_d} \left(F_p v C_o + \frac{Se}{V} \right) \quad (2-1)$$

C_m : 微環境 m における大気汚染物質濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_o : 屋外大気汚染物質濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

F_p : 浸透率 (-)

v : 換気回数 (1/hr)

F_d : 除去率 (1/hr)

S : 一時間あたり燃料消費量 (KJ/hr)

e : 排出係数 ($\mu\text{g}/\text{KJ}$)

V : 部屋の体積 (m^3)

i. 微環境A、微環境B、微環境C、微環境D

微環境A、微環境B、微環境C、微環境Dは室内発生源から発生する大気汚染物質によって空間が満たされる場合を想定するので、式(2-2)を用いて大気汚染物質濃度を計算した。

$$C_m = \frac{Se}{(v + F_d)V} \quad (2-2)$$

微環境A、微環境B、微環境Dにおける燃料消費量は季節による変化はないとした。微環境Cの燃料消費量はHeating degree-dayを用いて1日毎に変化させた。

ii. 微環境E

微環境Eは室内発生源がない場合の屋内を指す。微環境Eの大気汚染物質濃度は式(2-3)を用いて求めた。屋外大気汚染物質濃度にはCMAQのアウトプットを用いた。

$$C_m = \frac{F_p v}{v + F_d} C_o \quad (2-3)$$

iii. 微環境F

微環境Fの大気汚染物質濃度にはCMAQのアウトプットをそのまま用いた。

一日平均大気汚染物質曝露濃度は、式(2-1)で求めた各微環境の大気汚染物質濃度に滞在時間を乗じた値を足し合わせるにより求めた。これを式(2-4)に示す。

$$\overline{E^a} = \sum_m C_m \cdot T_m^a \quad (2-4)$$

$\overline{E^a}$: コホート a の一日の大気汚染物質曝露濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

T_m^a : コホート a の微環境 m の滞在時間 (hr)

a : コホートの属性

b. 使用データ

i. 燃料消費量

曝露モデルの対象とする室内大気汚染の原因となる燃料種は、バイオマス、石炭、灯油、LPG、天然ガスである。燃料種室内発生源別家庭部門燃料消費量には金森(2010)³¹⁾のデータを使用した。

ii. 排出係数

Zhang et al. (2000)³²⁾などのアジア地域で使用されている燃料、燃焼器具を用いて測定されたデータから各燃料種の排出係数を設定した。バイオマスの排出係数はバイオマスの種類によって大きく異なるので、各国の薪、木炭、作物残渣、動物の糞使用割合からその国のバイオマスの排出係数を設定した。

iii. 滞在時間

微環境滞在時間データには、島田(2010)³³⁾を使用した。これは各国の生活時間調査をベースにし、Cross Entropy法を用いて各コホートの微環境滞在時間を推計したデータである。

iv. 部屋の体積

部屋の面積は各国の一戸当たり延べ床面積を一戸当たり部屋数で割ることにより算出した。各国の一戸当たり延べ床面積と部屋数は主に2000 Britannica Book of the Year³⁴⁾のデータを使用した。部屋の高さは2 (m) と仮定した。

v. 換気回数

Heating degree-dayと室内における燃焼の有無から換気回数を設定した。Heating degree-dayが0以上の場合は暑い地域なので換気回数を多く、0以下の場合は換気回数を少なく設定した。また、室内で燃焼が行われている場合は燃焼がない場合に比べて換気回数が増えるように設定した。

vi. 除去率、浸透率

除去率と浸透率は既往の文献の値を参考に設定した。

(3) 世界各国の温室効果ガス排出量割当に関する分析

1) 世界各国の排出許容量の推計

世界の温室効果ガス排出量を1990年比で半減させることを目標とした場合の、世界230カ国の排出許容量のパスを推計する作業は、a. 基準年の温室効果ガス排出量の整備、b. 世界CGEモデルからの温室効果ガス排出量のダウンスケーリングの2つに大別される。

a. 基準年の温室効果ガス排出量の整備

基準年を2005年とし、Edgar ver4.1³⁵⁾のデータを用いて、温室効果ガス排出量をGg CO₂ equivalent にて整備する。温室効果ガスの対象は、CO₂、CH₄、N₂O、SF₆、HFC、PFCの6種とした。アンドラ (スペイン)、リヒテンシュタイン (スイス)、モナコ (フランス)、サンマリノ (イタリア)、バチカン市国 (イタリア)、ガザ地区 (イスラエル) については、EDGARのデータでは

() 内記載の地域と統合されており、人口比で分割を行った。また、チャンネル諸島とマン島については、Edgarの地域分類には存在しなかったため、補完を行った。

補完については、世界を35地域区分にした場合に当該国が含まれる地域において、一人当たりの温室効果ガス排出量を求め、式(3-1)にて補完を行った。

$$GAS_{t,r} = \frac{GAS_{t,R} \cdot POP_{t,r}}{POP_{t,R}} \quad \forall r \in R \quad (3-1)$$

GAS : 温室効果ガス排出量

POP : 人口

t : 年

r : EDGARにデータのない地域

R : r が含まれる世界35地域区分での地域

上記の方法にて整備された温室効果ガス排出量だが、一人当たり温室効果ガス排出量とGDPあたり温室効果ガス排出量を比較し、飛び値や各地域の経済状況から明らかに値がおかしいと判断される地域について、その国と排出状況が近いと思われる国の一人当たり温室効果ガスを用いて修正を行った。ここで、排出状況が近いと思われる国とは、一人当たりGDPと地理的近さから決定した。一人当たりとGDP当たりの温室効果ガス排出量を図4、図5にそれぞれ示す。一人当たり排出量が日本より大きいブルネイ (BRN)、モンゴル (MNG)、ミャンマー (MMR)、そしてGDPあたり排出量が突出しているラオス (LAO) について修正を行った。ブルネイにはインド、ミャンマーにはバングラデシュ、モンゴルには北朝鮮、ラオスにはカンボジアの一人当たり排出量を用い、それに各国の人口を乗じて温室効果ガス排出量とした。

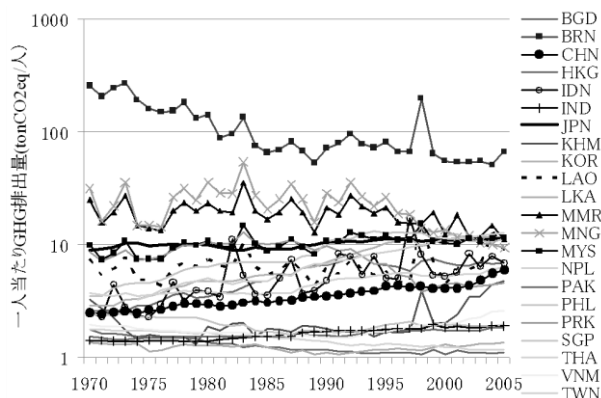


図4 一人あたり温室効果ガス排出量

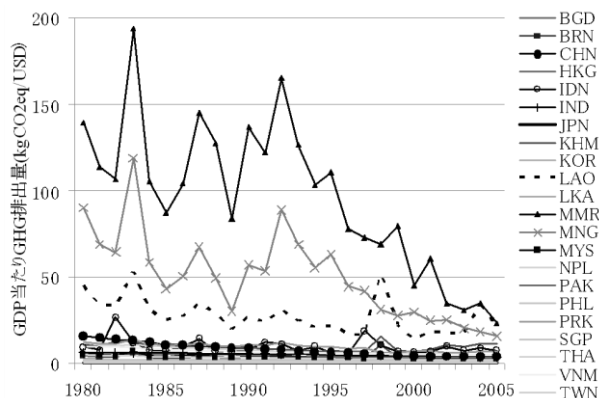


図5 GDPあたり温室効果ガス排出量

b. 世界CGEモデルからの温室効果ガス排出量のダウンスケーリング

i. 温室効果ガス排出量の推計方法

各国の温室効果ガス排出量は、2020年までは、Pledgeを持つ国についてはPledgeを通り、Pledgeを持たない国についてはBaUで排出を行う。その後、共にC&CもしくはIntensityによる2050年の目標値に向かう排出パスとなる。まず、世界35地域区分の世界CGEモデル (AIM/CGE BASIC) にてBaUケース、温室効果ガス排出制約有ケースの計算を行い、その結果を一人あたり排出量の強度比な

どを用いてダウンスケールして230カ国の温室効果ガス排出量を算出した。ここで、AIM/CGE BASICは35地域区分であるため、230地域区分の国のうち、世界35地域区分にて単独の国コードがある国のみpledgeをかけることが可能である。Pledgeを持ちながらも35地域区分では単独の国コードがない国に対しては別途、計算を行う必要がある。図6にバーデンシェアリングの概要を示す。

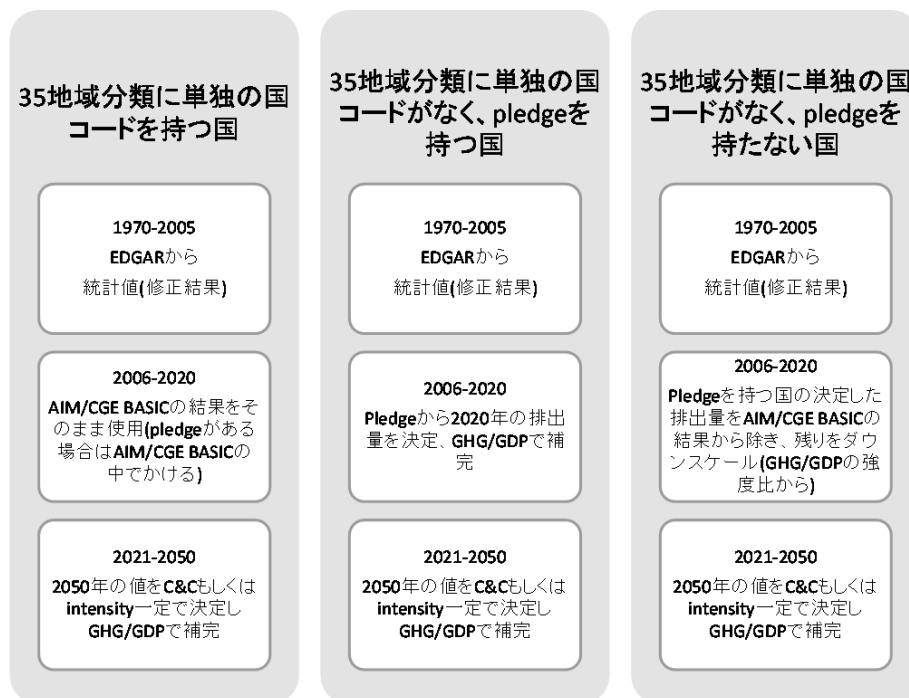


図6 Burden Sharingの概要図

ii. 2006～2020年のダウンスケーリング

- ・ 35地域区分で単独の国コードを持ち、かつ、pledgeを持つ国
AIM/CGE BASICにて温室効果ガス排出量に直接pledgeの制約をかける。
- ・ 35地域分類で単独の国コードを持つが、pledgeを持たない国
AIM/CGE BASICの結果をそのまま使用。
- ・ 35地域分類で単独の国コードを持たないが、pledgeを持つ国
2020年にpledgeを満たすように温室効果ガス排出量を決定し、GDPあたりの温室効果ガス排出量を用いて2006-2020年のパスを算出する。PledgeがBaUを用いて定められている場合はAIM/CGE BASICのBaUケースのダウンスケール結果から2020年の値を決定する。
- ・ 35地域分類で単独の国コードを持たず、またpledgeも持たない国
AIM/CGE BASICの結果から、pledgeがある国の温室効果ガス排出量を差し引いた残りをダウンスケールする。

iii. 2021～2050年のダウンスケーリング

目標年に世界で一人あたり排出量が等しくなる（C&C）、もしくはGDPあたり排出量が等しくなる（Intensity）と仮定して目標年の国別排出量を決定する。GDP当たりの温室効果ガス排出量を

用いてから2021～2050年のパスを補完する。

2) ダウンスケーリングの定式化

a. 2006～2020年

温室効果ガスとGDPのデータから2005年におけるGDPあたり温室効果ガスを求める。さらに、35地域区分ごとに、その地域区分に属する各国のGDPあたり温室効果ガス排出量の比が2005年の値の比と等しいとする。

$$\frac{GHG_{r1,2005}^{230} / GDP_{r1,2005}^{230}}{GHG_{r2,2005}^{230} / GDP_{r2,2005}^{230}} = \frac{GHG_{r1,t}^{230} / GDP_{r1,t}^{230}}{GHG_{r2,t}^{230} / GDP_{r2,t}^{35}} \quad \forall r1, r2 \in R \quad (3-2)$$

t : 年

$GHG_{r,t}^{230}$: EDGARの温室効果ガス排出データ (230地域)

$GDP_{r,t}^{230}$: GDPデータ (230地域)

式(3-2)を変形すると、地域Rに含まれる各国rについて、式(3-3)が成立する。

$$alfa_{R,t} = \frac{CGE_{r,t}^{230} / GDP_{r,t}^{230}}{GHG_{r,2005}^{230} / GDP_{r,2005}^{230}} \quad (3-3)$$

$alfa_{R,t}$: 年ごとの変化を表すためのパラメータ

$CGE_{r,t}^{230}$: CGEの温室効果ガス排出量のダウンスケール結果 (230地域)

式(3-3)と式(3-4)の連立方程式を解いて、35地域区分の温室効果ガス排出量をダウンスケールする。

$$CGE_{R,t}^{35} = \sum_r CGE_{r,t}^{230} \quad \forall r \in R \quad (3-4)$$

$CGE_{R,t}^{35}$: CGEの温室効果ガス排出量 (35地域分類)

b. 2021～2050年

GDPあたり温室効果ガス排出量を求め、それを式(3-5)によってパスを算出する。

$$GHG_t = \frac{GHG_{2020}}{GDP_{2020}} \times \left(\frac{GHG_{tgt_year}}{GDP_{tgt_year}} / \frac{GHG_{2020}}{GDP_{2020}} \right)^{\frac{t-2020}{tgt_year-2020}} \quad \forall 2020 < t < tgt_year \quad (3-5)$$

tgt_year : 目標年

GHG_t : t 年の温室効果ガス排出量

GDP_t : t 年のGDP

4. 結果・考察

(1) 排出量インベントリとダウンスケーリング手法の開発

1) 排出量推計結果

表13、表14に2005年のアジア地域におけるエネルギー消費起源の集約化地域別排出量推計結果を示す。2005年のアジア地域における各大気汚染物質の排出量はCO₂が7.6Pg/年、NO_xが24Tg/年、SO₂が45Tg/年、COが154Tg/年、PM₁₀が17Tg/年、PM_{2.5}が17Tg/年、TSPが18Tg/年、NMVOCが23Tg/年となった。

表13 2005年における排出量推計結果 (CO₂、SO₂、NO_x、TSP)

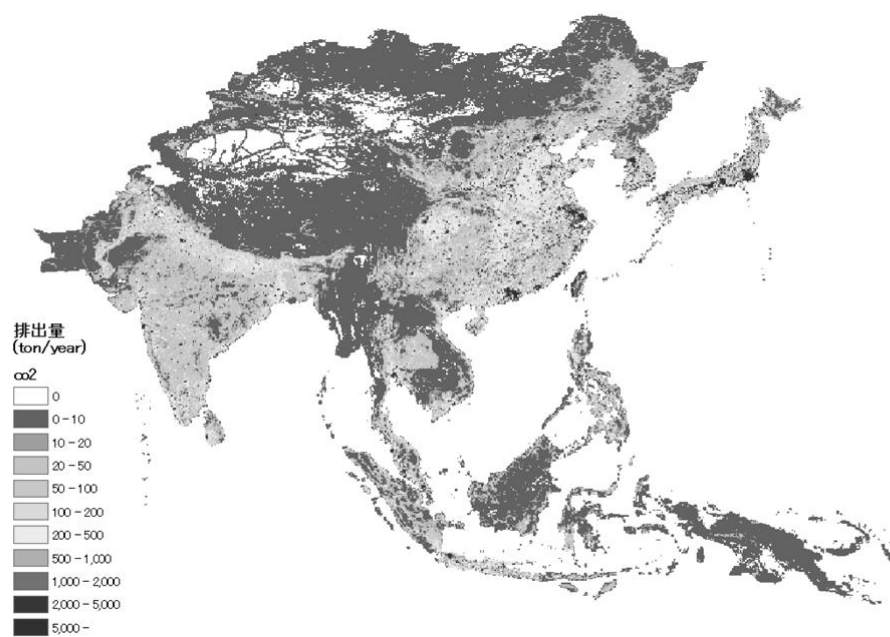
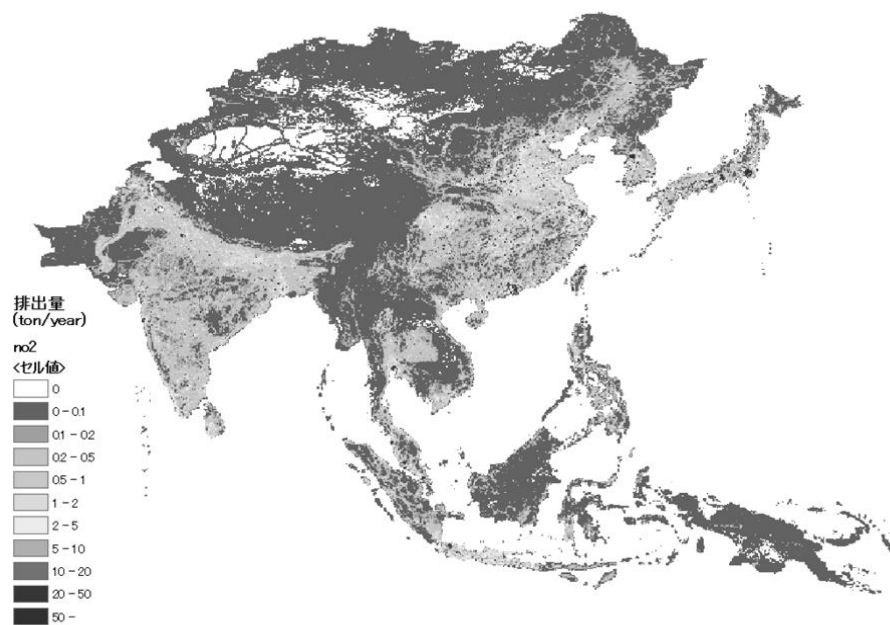
国名	CO ₂ (Gg-CO ₂ /year)	SO ₂ (Gg-SO ₂ /year)	NO _x (Gg-NO ₂ /year)	TSP (Gg/year)	
バングラデシュ	29575	208	117	266	
ブルネイ	3864	12	9	0.452	
ブータン	161	1	0.274	0.174	
中国	4011019	29298	12372	9073	
インドネシア	269924	1673	1314	1456	
インド	940541	5569	3692	4306	
日本	1003531	1427	2315	232	
カンボジア	2199	18	16	93	
韓国	441935	2030	1158	150	
ラオス	361	3	1	0.388	
スリランカ	13715	134	91	100	
モルディブ	135	3	0.396	0.046	
ミャンマー	5834	41	49	293	
モンゴル	5890	43	28	5	
マレーシア	137084	407	468	109	
ネパール	1942	28	22	168	
パキスタン	106708	950	506	772	
フィリピン	73234	566	266	166	
バブアニューギニア	2002	33	9	38	
北朝鮮	14606	92	56	8	
シンガポール	47484	229	139	19	
タイ	184469	1058	719	300	
台湾	216493	991	486	98	
ベトナム	59614	276	274	618	
アジア合計	7572320	45088	24108	18272	

表14 2005年における排出量推計結果 (PM₁₀、PM_{2.5}、NMVOC、CO)

国名	PM ₁₀ (Gg/year)	PM _{2.5} (Gg/year)	NMVOC (Gg/year)	CO (Gg/year)
バングラデシュ	252	252	334	1943
ブルネイ	0.407	0.373	3.004	29
ブータン	0.162	0.148	0.121	1
中国	8424	8109	10391	72455
インドネシア	1380	1371	1870	11270
インド	4055	3994	5231	31737
日本	189	151	955	9305
カンボジア	89	89	120	692
韓国	126	108	334	3290
ラオス	0.361	0.330	0.268	3
スリランカ	95	95	131	784
モルディブ	0.033	0.024	0.002	0.010
ミャンマー	279	279	375	2168
モンゴル	5	4	7	58
マレーシア	101	96	249	2118
ネパール	160	160	213	1226
パキスタン	733	729	991	5903
フィリピン	156	153	262	1873
パプアニューギニア	36	36	48	274
北朝鮮	7	6	6	58
シンガポール	16	14	20	190
タイ	282	275	413	3115
台湾	83	69	137	1431
ベトナム	587	584	771	4616
アジア合計	17056	16575	22861	154537

2) 排出量分布図

CO₂、NO_x、SO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、TSP、NMVOCの排出量分布図を図7から図14に示す。東アジアを見ると、日本、中国、韓国の大都市圏でCO₂の排出量が高い値を示しているのに対し、SO₂排出量やPM_{2.5}など粒子状物質の排出量は中国にくらべ、日本、韓国の排出量が小さいことが分かる。これは日本、韓国の各排出源に除去機器が導入されていることや、石炭中の硫黄含有量が少ないことなどが原因と考えられる。また、アジア全体で見ると、アジアの大都市でどの大気汚染物質の排出量も多いことが分かる。中国の各大都市に加え、例えばタイのバンコクやインドネシアのジャカルタ及びその周辺などで排出量が多い。

図7 CO₂の排出量分布図図8 NO_xの排出量分布図

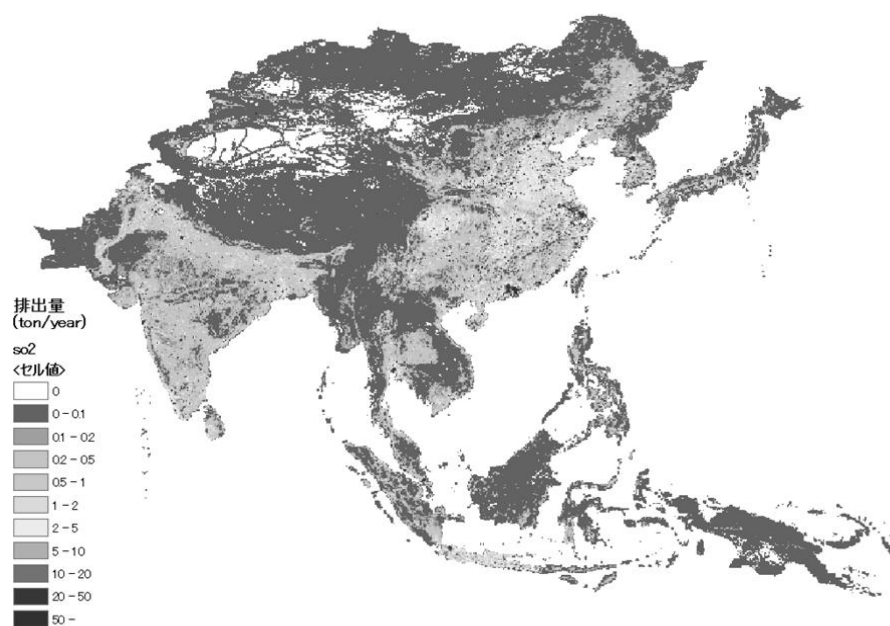
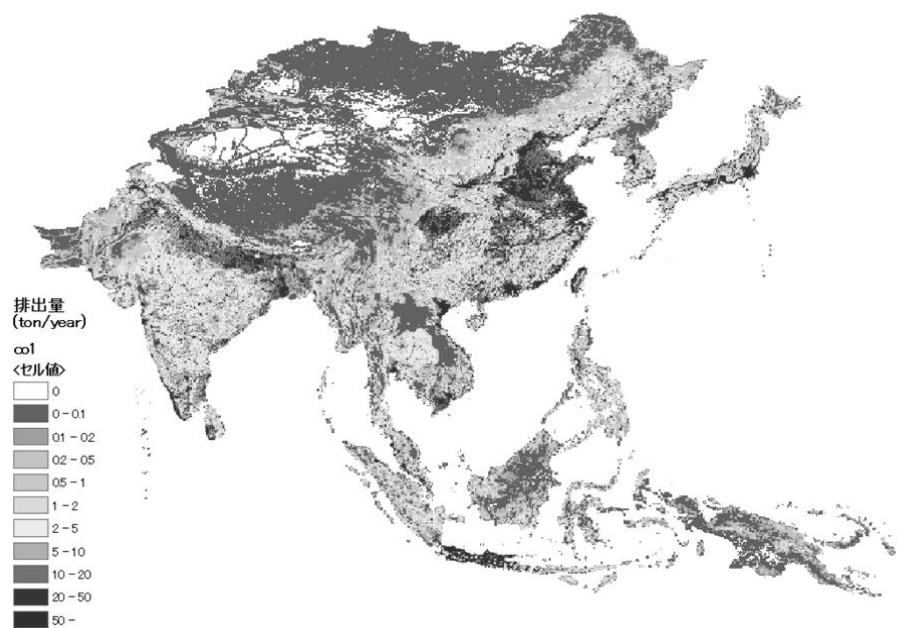
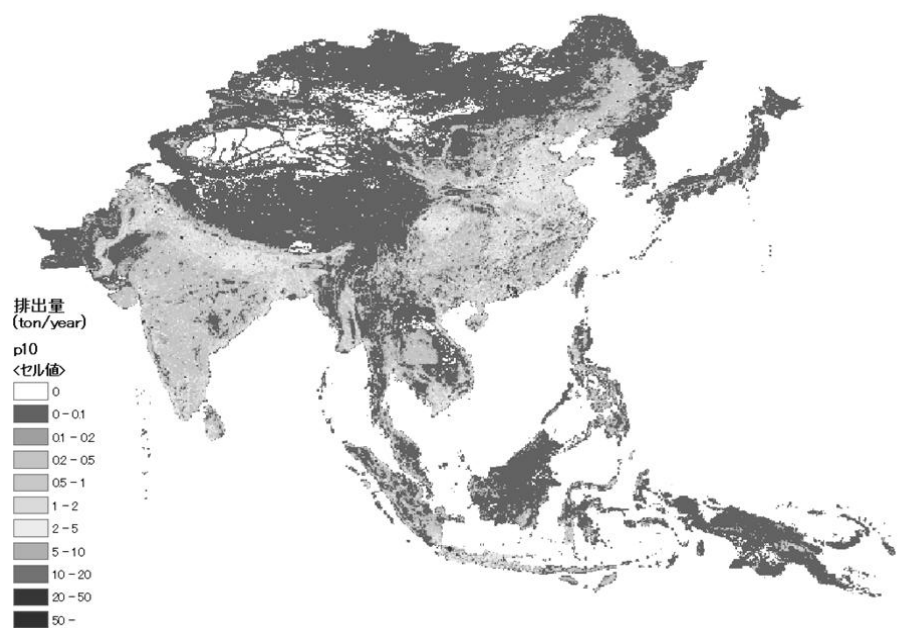
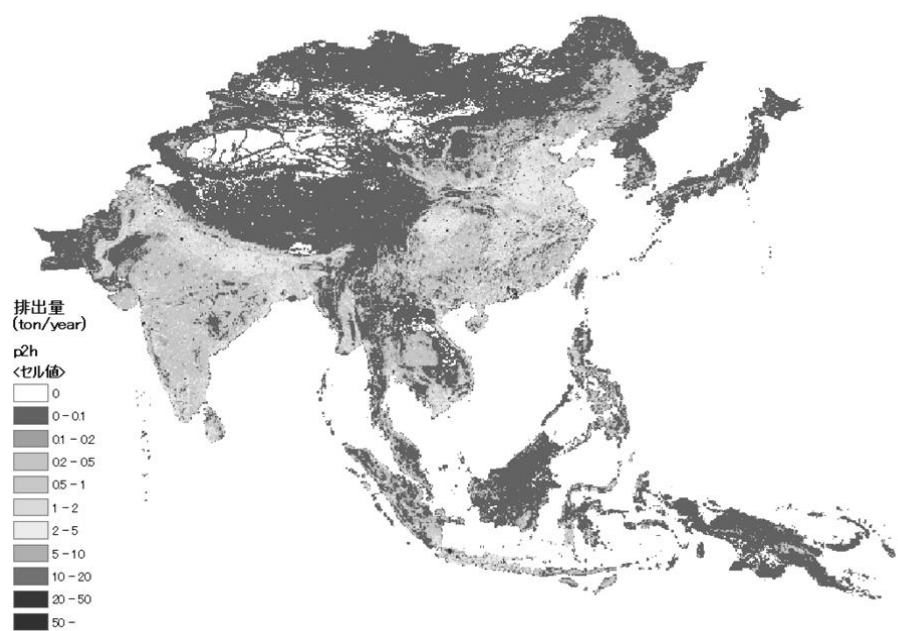
図9 SO₂の排出量分布図

図10 COの排出量分布図

図11 PM₁₀の排出量分布図図12 PM_{2.5}の排出量分布図

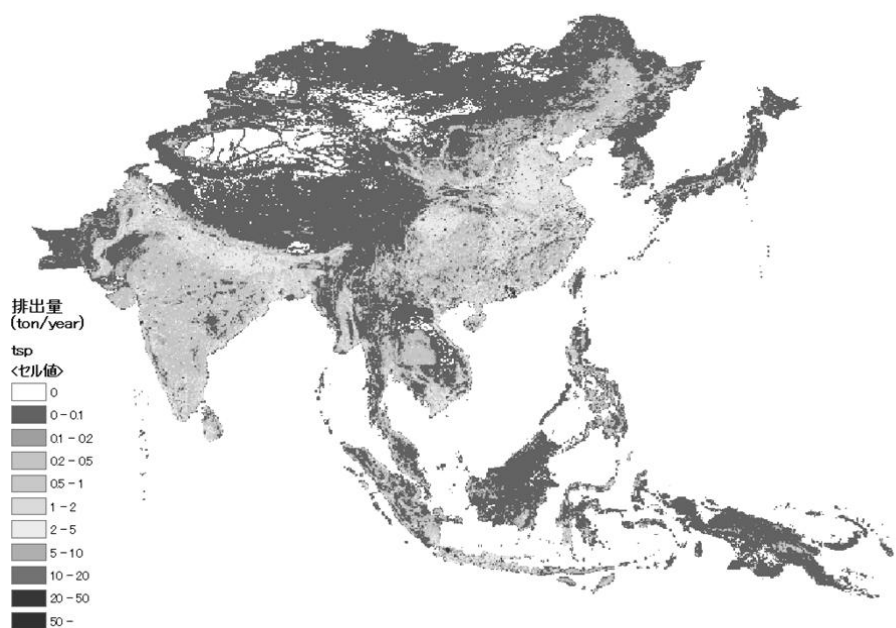


図13 TSPの排出量分布図

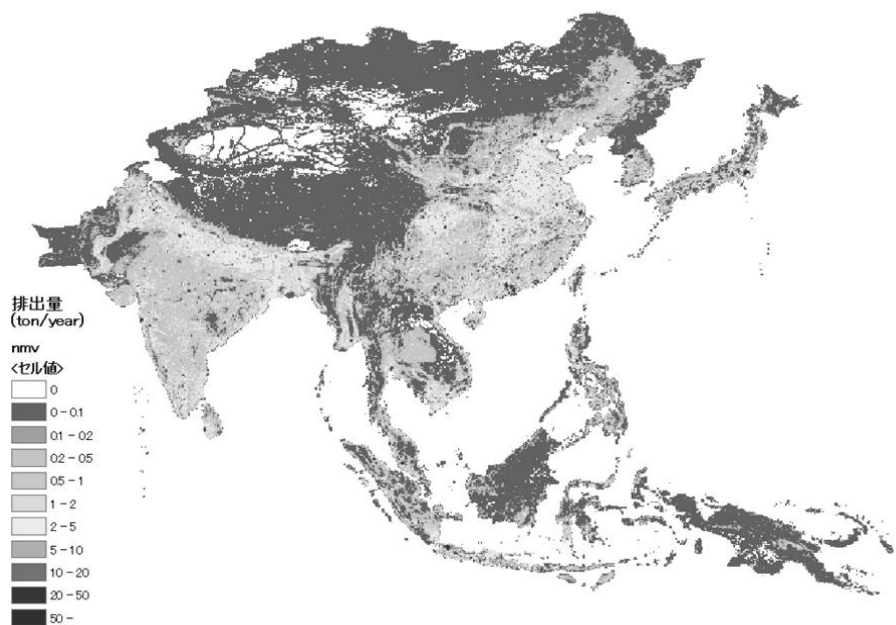


図14 NMVOCの排出量分布図

3) 排出量分布図の比較

前節で示したSO₂の排出量分布図をZhang *et al.* (2009)³⁶⁾ とOhara *et al.* (2007)³⁷⁾と比較した。Zhang *et al.* (2009)の排出量分布図は解像度が0.5度×0.5度となっているため、本研究の排出量分布図をその解像度に合わせて比較を行う。比較結果を図15～18に示す。

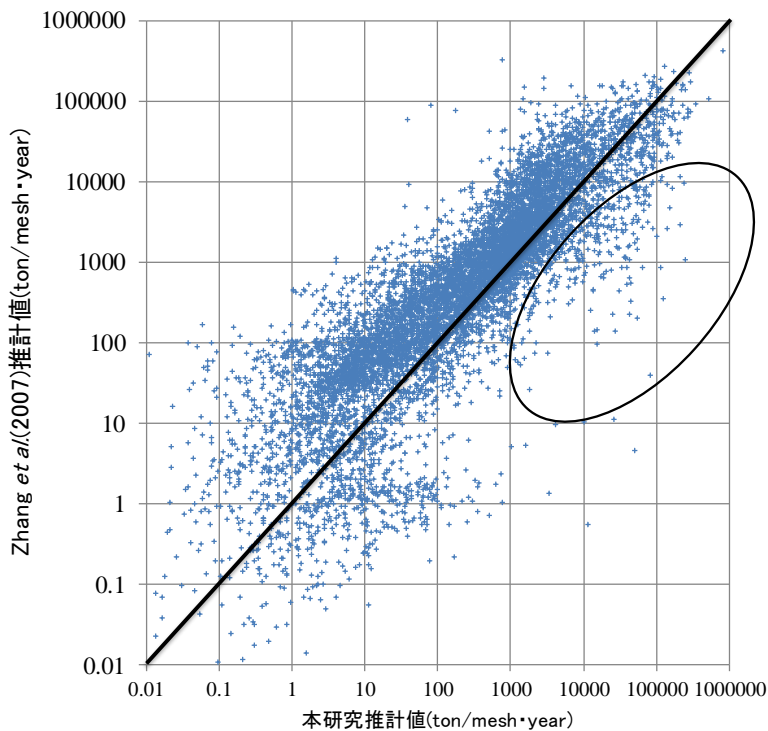


図 15 本研究と Zhang *et al.* (2009) との散布図比較

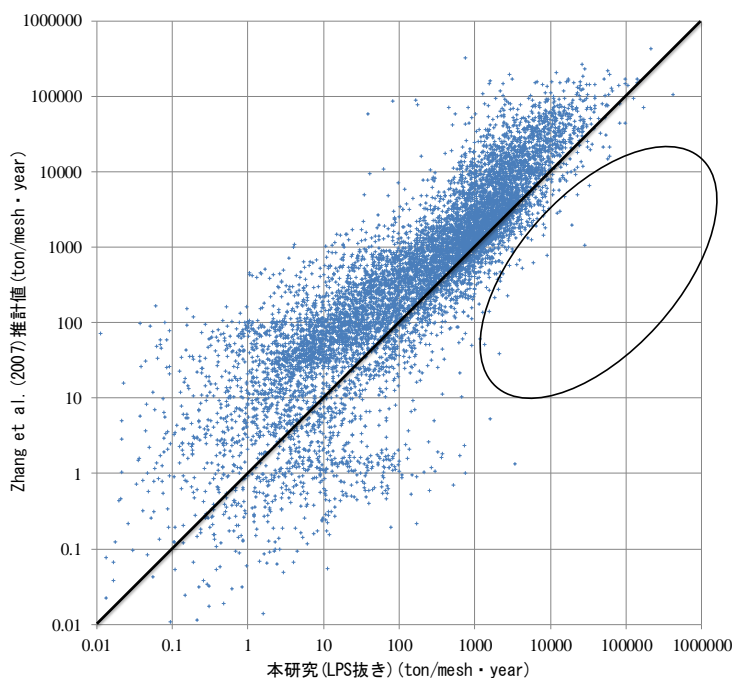


図 16 本研究と Zhang *et al.* (2009) との散布図比較 (LPS を除いたもの)

図の楕円で囲った箇所は Zhang *et al.* (2009) と比較して本研究の方が大きい結果を出しているメッシュである。ここで、本研究から LPS による排出量を排除して分布図を作成すると、図 16 のようになり、楕円で示した内側の点が消滅した。これは本研究では考慮しているが Zhang *et al.* (2009) では考慮していない LPS による排出が影響していると考えられる。LPS 以外の排出量に関

してはZhang *et al.* (2009)の推計値とほぼ一致していることが分かる。

次にOhara *et al.* (2007)の排出量分布図と比較した。Ohara *et al.* (2007)の排出量分布図も0.5度×0.5度のため、解像度を合わせて比較を行った。また、本研究からLPSを除いたものも同様に比較対象とする。比較結果を図17と図18に示す。

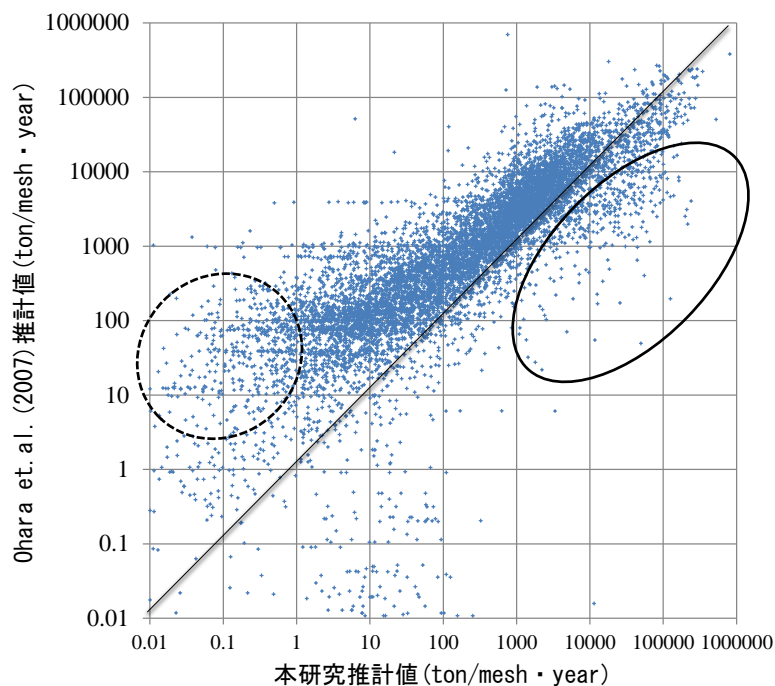


図17 本研究と Ohara *et al.* (2007)との散布図比較

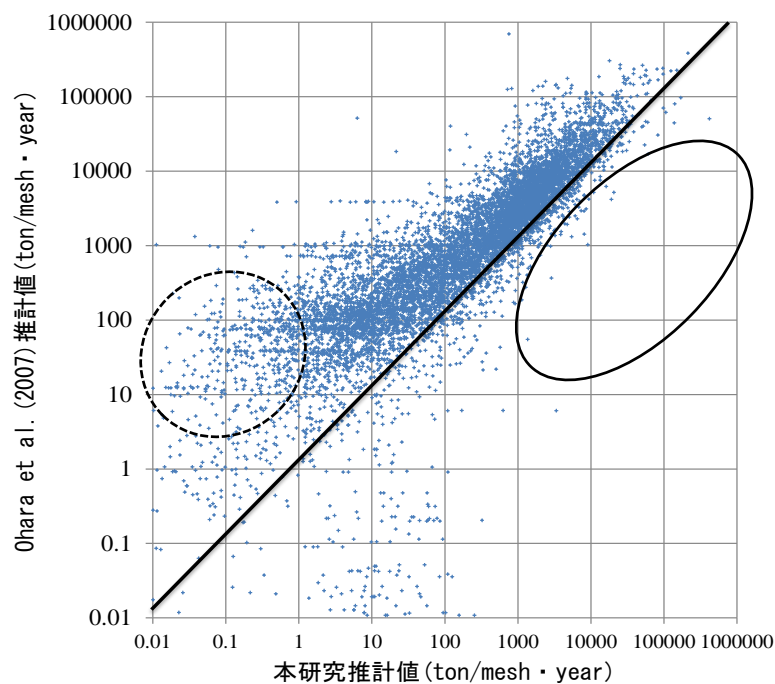


図18 本研究と Ohara *et al.* (2007)との散布図比較 (LPSを除いたもの)

Ohara *et al.* (2007)との比較についても同様に、実線楕円の内側の点はLPSによるものと考えられる。一方、破線楕円の内側はLPSによるものではなく、本研究で考慮していない航路、空路によるものと考えられる。

(2) 化学輸送シミュレーションと曝露モデルに関する研究

1) 大気化学輸送シミュレーションの結果

CMAQの計算結果をEANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia: 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク) の観測値と比較した。

図19に利尻と隠岐におけるPM_{2.5}の1日毎のCMAQ計算値とEANET観測値を示す。計算値と観測値のレンジは大体一致している。利尻と隠岐を比較すると、利尻よりも隠岐のほうが観測値と計算値が良く一致している。利尻では3月から5月にかけて観測値が高い値を示しているが、計算値はその傾向をとらえられていない。この点を除けば、季節的なトレンドと一致している。隠岐では計算値は観測値とよく一致している。1月から3月にかけて観測値は非常に短い周期で変化しており、計算値はその動きを正確には捉えられていない。4月以降は観測値の日変化が緩やかになり、計算値と観測値はよく一致している。

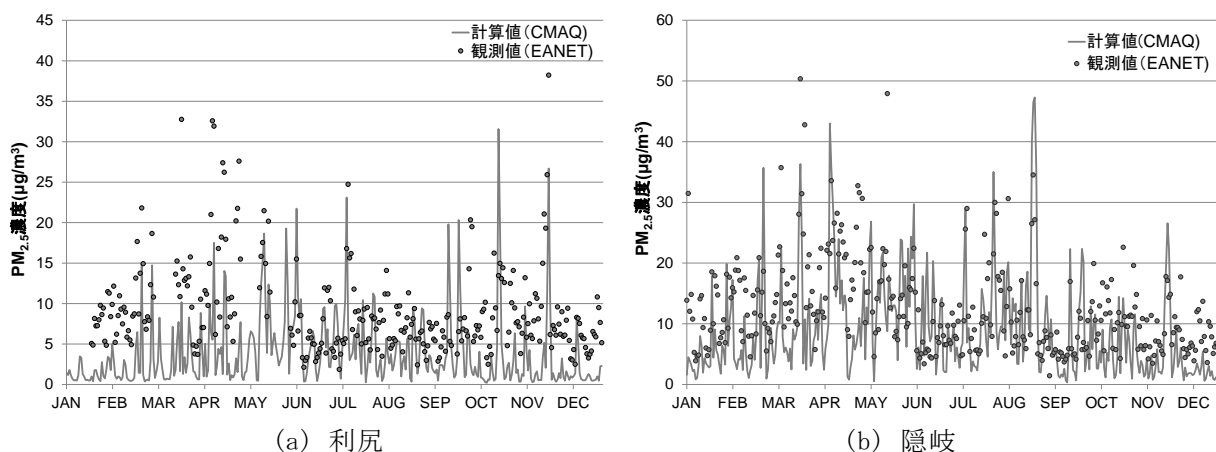
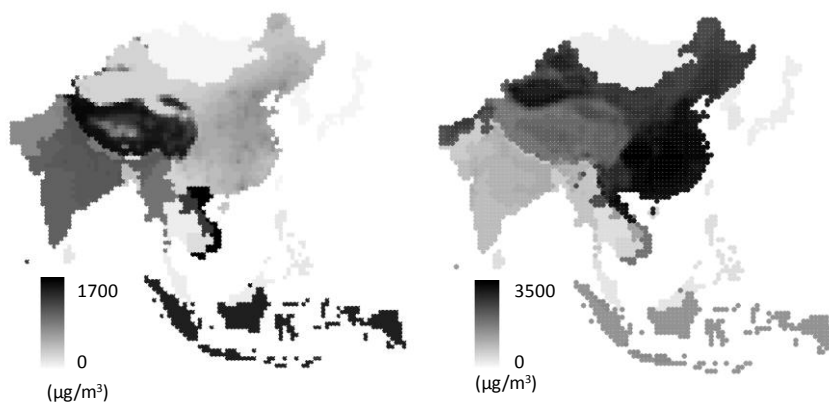


図19 PM_{2.5}のEANET観測値とCMAQ計算値の日平均 (µg/m³)

2) 曝露モデルの結果

図20(a)(b)に夏(6~8月)と冬(12~2月)における35~64歳の無職女性のPM_{2.5}の一日平均曝露濃度を示す。夏よりも冬のほうが曝露濃度が全体的に高いことがわかった。夏と冬で調理や給湯による曝露濃度には大きな違いはないが、暖房の寄与は大きくことなる。冬に曝露濃度が大きくなるのは、主に暖房の寄与が大きい。国別で大きな地域においては、バイオマス燃料の影響が大きいことが分かった。燃焼の制御が難しく粒子状物質の発生量が大きいためである。年齢・性別ごとの比較では、30歳台~40歳代の女性の曝露濃度が大きかった。これは調理時の曝露が大きいためである。



(a) 夏季 (b) 冬季
 図20 女・35～64歳・無職のPM_{2.5}一日平均曝露濃度 (µg/m³)

(3) 世界各国の温室効果ガス排出量割当に関する分析

C&C、およびIntensityの方法での世界35地域の温室効果ガス排出パスを図21、図22にそれぞれ示す。また、アジア諸国について、2030年、2050年での温室効果ガス排出量の目標年を2050、2075年とした場合について表15、および表16に示す。

表15、表16ともに、()内は2005年からの削減率を、Conv@2050、conv@2075はそれぞれ目標年を2050年、2075年にした場合を意味する。

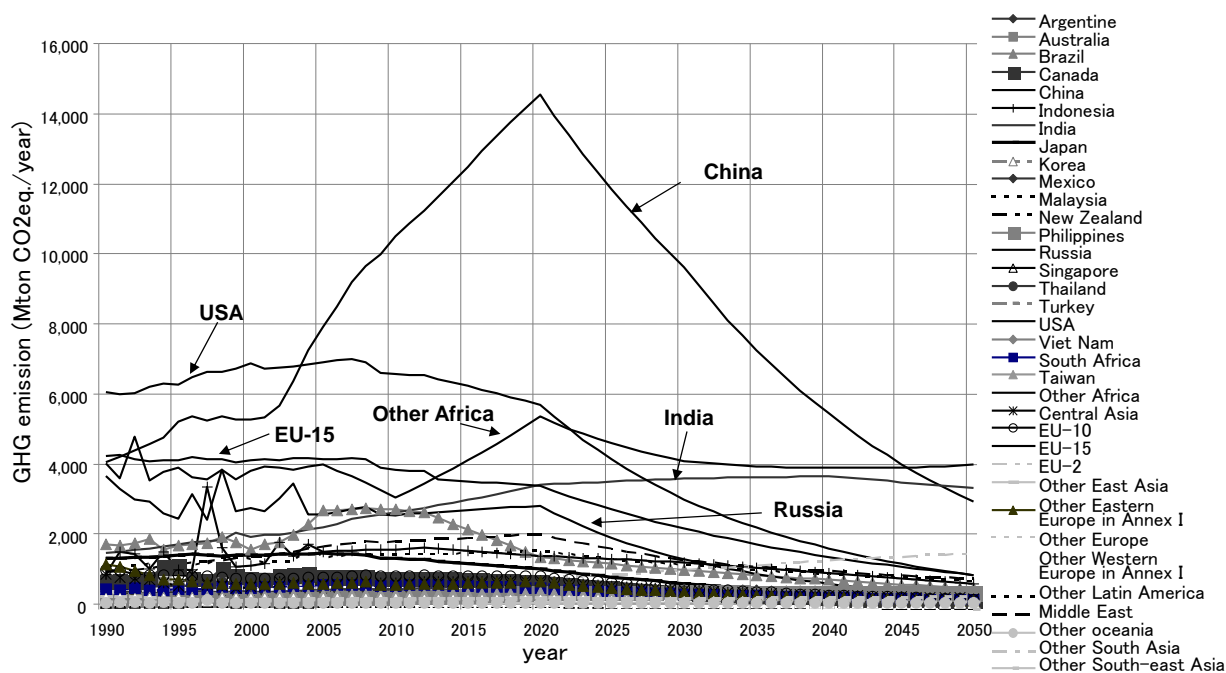


図21 C&Cにおける温室効果ガス排出パス

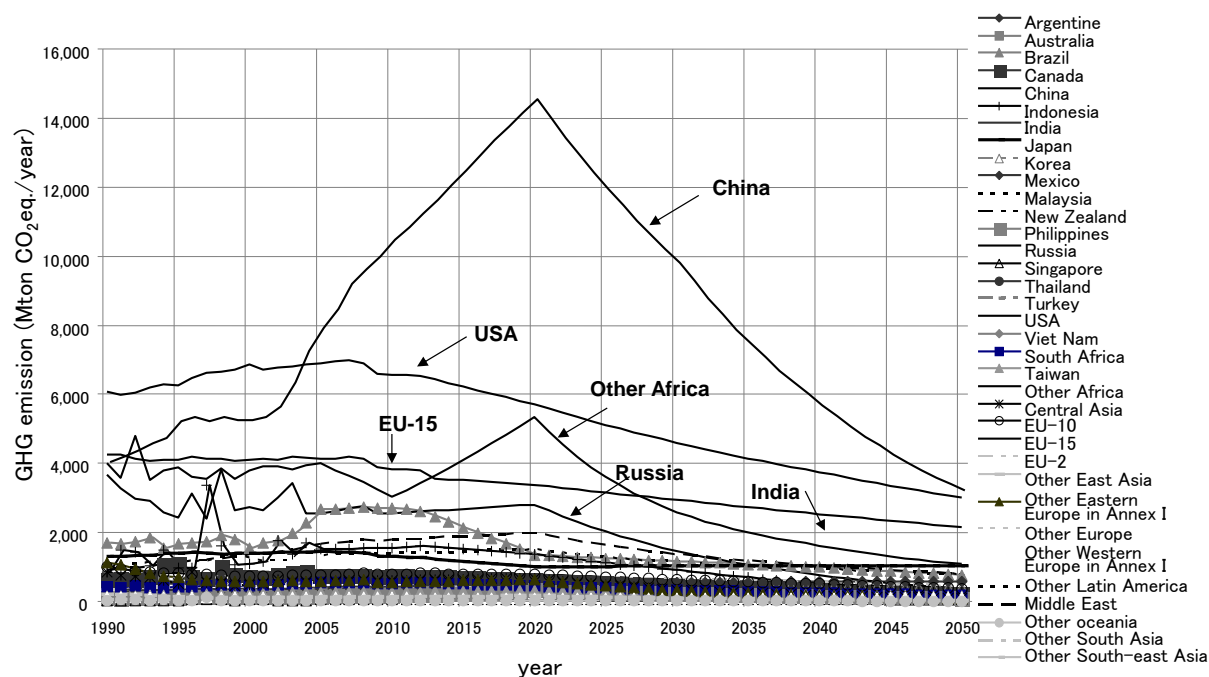


図22 Intensityにおける温室効果ガス排出パス

表15 C&Cにおける主要なアジア諸国の温室効果ガス排出量

	1990	2005	2020	2030		2050	
				Conv @2050	Conv @2075	Conv @2050	Conv @2075
	(GtCO2eq)	(GtCO2eq)	(GtCO2eq)	(GtCO2eq)	(GtCO2eq)	(GtCO2eq)	(GtCO2eq)
China	4.01	7.87	14.48	9.57 (-21.68)	13.00 (-65.20)	2.91 (62.99)	7.29 (7.39)
India	1.45	2.18	3.41	3.59 (-64.97)	4.12 (-89.37)	3.32 (-52.43)	5.02 (-130.59)
Japan	1.31	1.45	1.01	0.59 (59.22)	0.77 (46.99)	0.20 (86.51)	0.43 (70.36)
Indonesia	0.85	1.50	1.38	1.19 (20.58)	1.47 (2.05)	0.59 (60.65)	1.11 (26.18)
Korea, Rep.	0.30	0.55	0.46	0.29 (47.66)	0.38 (30.85)	0.09 (83.39)	0.21 (61.69)
Thailand	0.27	0.40	0.56	0.39 (3.07)	0.50 (-24.36)	0.15 (62.60)	0.32 (21.02)
Pakistan	0.18	0.31	0.39	0.50 (-61.38)	0.54 (-74.45)	0.69 (-124.56)	0.87 (-183.63)
Taiwan	0.14	0.29	0.32	0.17 (40.40)	0.23 (20.86)	0.04 (84.68)	0.10 (64.13)
Malaysia	0.20	0.30	0.33	0.22 (25.26)	0.29 (2.04)	0.08 (72.71)	0.18 (38.57)
Viet Nam	0.10	0.22	0.34	0.34 (-53.43)	0.40 (-79.64)	0.23 (-4.19)	0.37 (-67.22)
Bangladesh	0.14	0.17	0.24	0.32 (-91.60)	0.34 (-100.58)	0.46 (-170.39)	0.52 (-210.22)
Philippines	0.11	0.17	0.33	0.36 (-113.33)	0.39 (-134.06)	0.30 (-79.91)	0.40 (-137.60)
Myanmar	0.05	0.05	0.04	0.06 (-21.16)	0.06 (-9.13)	0.13 (-143.92)	0.10 (-78.27)
Korea, DPR	0.20	0.11	0.16	0.12 (-14.45)	0.16 (-46.55)	0.05 (53.52)	0.11 (2.43)
Singapore	0.03	0.05	0.05	0.03 (34.68)	0.04 (15.30)	0.01 (77.58)	0.02 (51.13)
Hong Kong	0.04	0.05	0.05	0.04 (18.22)	0.05 (-0.25)	0.02 (62.08)	0.03 (30.15)
Cambodia	0.02	0.07	0.06	0.06 (5.31)	0.07 (-7.79)	0.05 (26.36)	0.07 (-8.62)
Nepal	0.03	0.03	0.04	0.05 (-70.56)	0.05 (-71.62)	0.10 (-215.77)	0.10 (-221.68)
Sri Lanka	0.02	0.03	0.03	0.04 (-57.27)	0.05 (-71.35)	0.04 (-66.58)	0.06 (-115.45)
Mongolia	0.02	0.01	0.02	0.01 (-27.40)	0.02 (-58.94)	0.01 (39.83)	0.01 (-16.86)
Laos	0.01	0.03	0.03	0.03 (4.28)	0.03 (-7.17)	0.02 (21.59)	0.03 (-10.07)
Brunei	0.00	0.00	0.00	0.00 (46.70)	0.00 (44.64)	0.00 (46.80)	0.00 (40.40)

表16 Intensityにおける主要なアジア諸国の温室効果ガス排出量

	1990	2005	2020	2030				2050			
				Conv @2050		Conv @2075		Conv @2050		Conv @2075	
				(GtCO2eq)	(GtCO2eq)	(GtCO2eq)	%	(GtCO2eq)	%	(GtCO2eq)	%
China	4.01	7.87	14.48	9.72 (-23.54)	13.42 (-70.54)	3.05 (61.27)	8.02 (-1.88)				
India	1.45	2.18	3.41	2.77 (-27.33)	3.74 (-72.07)	1.52 (29.91)	3.76 (-72.98)				
Japan	1.31	1.45	1.01	1.03 (29.22)	0.96 (33.75)	1.02 (29.47)	0.84 (42.14)				
Indonesia	0.85	1.50	1.38	0.91 (39.44)	1.26 (16.06)	0.26 (82.55)	0.70 (53.54)				
Korea, Rep.	0.30	0.55	0.46	0.46 (14.95)	0.49 (10.66)	0.39 (28.72)	0.45 (17.36)				
Thailand	0.27	0.40	0.56	0.34 (14.55)	0.46 (-14.58)	0.10 (74.38)	0.25 (38.23)				
Pakistan	0.18	0.31	0.39	0.34 (-12.05)	0.46 (-49.58)	0.23 (24.85)	0.55 (-78.81)				
Taiwan	0.14	0.29	0.32	0.26 (10.09)	0.29 (-0.82)	0.15 (47.41)	0.21 (25.83)				
Malaysia	0.20	0.30	0.33	0.22 (25.28)	0.29 (3.76)	0.08 (72.74)	0.17 (41.74)				
Viet Nam	0.10	0.22	0.34	0.24 (-11.12)	0.34 (-54.48)	0.09 (60.42)	0.23 (-6.33)				
Bangladesh	0.14	0.17	0.24	0.22 (-30.67)	0.29 (-70.14)	0.15 (14.22)	0.32 (-89.34)				
Philippines	0.11	0.17	0.33	0.25 (-49.12)	0.32 (-89.91)	0.10 (38.56)	0.21 (-26.92)				
Myanmar	0.05	0.05	0.04	0.04 (32.70)	0.04 (22.44)	0.02 (58.19)	0.03 (36.01)				
Korea, DPR	0.20	0.11	0.16	0.09 (18.29)	0.13 (-23.69)	0.02 (83.09)	0.06 (41.34)				
Singapore	0.03	0.05	0.05	0.06 (-21.06)	0.06 (-18.00)	0.07 (-42.70)	0.06 (-32.15)				
Hong Kong	0.04	0.05	0.05	0.08 (-66.36)	0.07 (-47.69)	0.15 (-219.18)	0.10 (-123.34)				
Cambodia	0.02	0.07	0.06	0.04 (41.43)	0.06 (14.05)	0.01 (82.58)	0.04 (44.93)				
Nepal	0.03	0.03	0.04	0.03 (11.04)	0.04 (-26.51)	0.01 (55.20)	0.04 (-28.85)				
Sri Lanka	0.02	0.03	0.03	0.04 (-48.18)	0.05 (-73.16)	0.04 (-39.35)	0.06 (-122.34)				
Mongolia	0.02	0.01	0.02	0.01 (15.65)	0.02 (-29.75)	0.00 (82.53)	0.01 (36.43)				
Laos	0.01	0.03	0.03	0.02 (44.38)	0.02 (17.70)	0.00 (84.62)	0.01 (50.15)				
Brunei	0.00	0.00	0.00	0.00 (25.37)	0.00 (34.48)	0.00 (-46.01)	0.00 (1.20)				

(4) 排出量制約を課した場合の日本への影響の分析

1) 目的

本研究では、エネルギーを物量単位で扱い、かつ温室効果ガス排出量制約に対応した逐次動学型CGEモデルを日本に適用し、シミュレーションを行った。温室効果ガスとしてCO₂、CH₄、N₂Oを考慮し、対象期間は2005年を基準年として2050年までとした。また、温室効果ガス排出量削減対策として重要と考えられている原子力発電、排出許可証取引、CCS技術についてそれぞれ幾つかのシナリオを用意し、シナリオを組み合わせる様々なケースを想定した。それぞれのケースについてCGEモデルを用いてシミュレーションを行い、想定した施策の影響、特に経済的な影響の定量的な評価・分析を行った。

2) 方法

本研究で用いるCGEモデルは藤森ら³⁸⁾によるものであり、36の産業部門と23の財を持つ逐次動学型モデルである。モデルの概要を図23に示す。モデル中では生産活動によって中間投入や付加価値、エネルギー財から生産財が産出される。各部門における生産関数に関してはCES型関数、または完全非代替のレオンチェフ型生産関数を用いる。生産された財はCES型関数で集約され総国内産出となり、それがCET型関数で輸出と国内供給に分配される。一方付加価値から発生した収入は企業、家計、政府にレオンチェフ型関数で分配される。政府はこの収入のほかに税も収入とする。分配された収入は支出または投資となり、これは中間投入と合わせて国内総需要となる。最後に国内総需要と国内総供給が一致する（ワルラスの法則）。

モデルに必要なデータとしては基準年の社会会計表、エネルギーバランス表、さらに主要なパラメータの将来予測（シナリオ）がある。このうち、社会会計表とエネルギーバランス表は、国民経済計算、産業統計、エネルギー統計等様々な統計をもとに、それらのデータ間に存在する不

整合を調整して作成した。この調整には、変数間の関係を表す諸制約条件と最適化関数を持つ数理計画法によって調整をするデータ調整システム³⁹⁾を用いた。

本研究では温室効果ガス排出量削減のための具体的な対策として、CCS技術の導入、追加的な技術進歩によるエネルギー効率改善、物質投入の効率改善、非エネルギー起源温室効果ガスの削減、そして排出許可証取引を考慮する。モデル中では温室効果ガスの排出量1単位に対して税をかけることで温室効果ガス排出を伴うエネルギーの価格が上がり、温室効果ガス排出量削減策の導入が進み、排出量削減が達成される。この温室効果ガス排出にかかる費用を以下温室効果ガス排出価格、もしくは排出価格と呼ぶ。追加的な技術進歩によるエネルギー効率改善は温室効果ガス排出価格が発生するとエネルギー効率を改善するように技術進歩がより進むという考え方に基づく。モデル中では排出価格に対してエネルギー効率が改善する関数によって表現される。

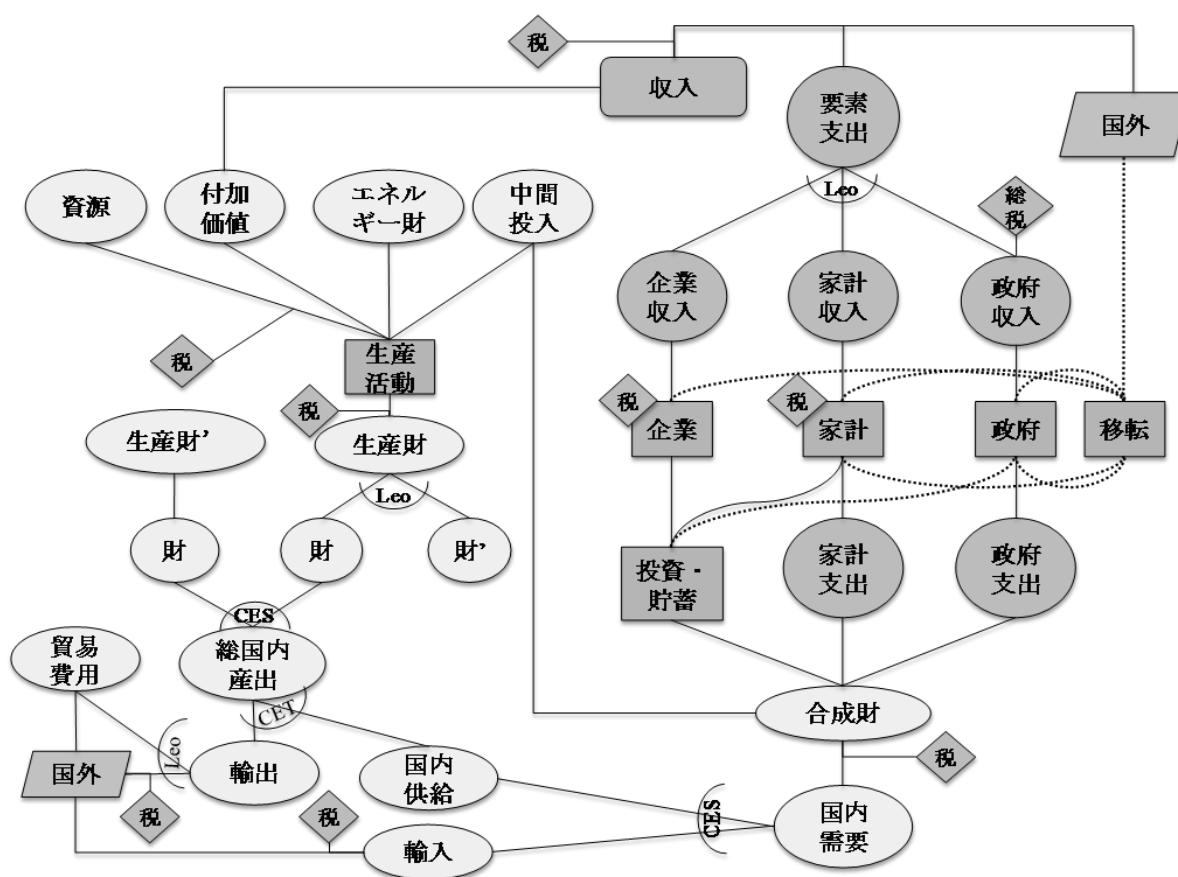


図23 概要図（非エネルギー転換部門）

3) 将来推計におけるシナリオの設定

a. 全ケースに共通したシナリオの設定

GDPの将来変化についてはWorld Ban⁴⁰⁾、IMF⁴¹⁾、IIASA⁴²⁾などを参考に想定し、人口についてはUN⁴³⁾を用いた。本研究では日本のみを対象とする一カ国CGEモデルを用いたため、国外と貿易する財の国際価格を外生的に決定した。本研究ではその国際価格としてAIM/CGE BASICの結果を用いた。エネルギー需給のうち、水力発電の発電量は長期エネルギー需給見通し⁴⁴⁾に従うように固定した。

ただし、エネルギー需給見通しは2030年までであるため、2031年以降モデル中では、2030年において、外生的に与えられた発電量を達成するために導入された補助金などが継続するとし、2030年までのトレンドを維持するようにした。さらに、太陽光発電についてはPV2030+⁴⁵⁾を参照し、太陽光発電のコストが2050年において2005年比で三分の一になるように想定した。

また、日本における温室効果ガス排出目標は2020年に1990年比25%減、2050年に2005年比80%減とした。また、2012年には京都議定書に定められた1990年比6%減の目標を達成するとした。この制約が日本に認められた排出量であり、排出許可証取引をしない場合には、日本からの排出量は排出量制約に従うこととなる。

b. ケースにより選択するシナリオ（比較条件）

将来推計について、原子力発電の導入のように複数のオプションが考えられる場合がある。本研究では温室効果ガス排出量削減に対して重要かつ有効であり、今後複数の対応が考えられる対策として、原子力発電、排出許可証取引、CCS技術を取り上げ、それぞれの対策に導入量や導入スピードを変えた複数のシナリオを設定し、比較対象とした。

温室効果ガス排出許可証取引については3つのシナリオを用意した。1つ目は、排出許可証取引を認めない取引無シナリオである。このシナリオでは日本と他国との間での取引を一切認めず、日本は温室効果ガス排出量制約を国内での排出量削減のみで満たすこととなる。2つ目は、取引を2010年から徐々に認める取引高シナリオである。2010年に2005年の排出量と2010年に認められた排出量の差の3%までの取引を認める。その後2020年まで一年ごとにその割合を3%ずつ増やし、2020年には2005年の排出量と2020年に認められた排出量の差の33%まで取引出来るとする。2020年以降は2005年の排出量とその年の認められた排出量の差の半分まで取引出来るとする。ただし、全期間に渡って前年より排出量を増やすことはできないとする。3つ目の取引低シナリオは、2つ目のシナリオ同様に2010年から取引を許し、徐々に取引の上限を緩める。しかし、2020年以降の取引の上限を取引高シナリオより厳しくし、2005年の排出量とその年の認められた排出量の差の四分の一まで取引可能とした。

シナリオのまとめを表17に示す。これらのシナリオのうち、温室効果ガス排出量制約をかけず、原子力発電については原子力増加シナリオを、CCS技術についてはCCS高シナリオを用いたケースをBaU(Business as Usual)ケースとする。さらにBaUケースに温室効果ガス排出量制約をかけ、温室効果ガス排出許可証取引について取引高シナリオを用いたケースをCounter Measure (CM) ケースとし、この2つのケースを基準ケースとする。CMケースに対して、1つシナリオを変えたケース、例えばCMケースに対して原子力発電のシナリオを原子力増加シナリオから原子力撤廃シナリオに変えたものなどを比較ケースとする。本研究で対象とするケースは基準ケース2ケース、比較ケース4ケースの全6ケースとなる（表18）。

表17 シナリオのまとめ

対策	シナリオ名	シナリオの内容
原子力発電	原子力増加	2011年に33%減、その後長期エネルギー需給見通しに従う
	原子力撤廃	2011年に33%減、その後2050年に撤廃を目指す
GHG排出許可証取引	取引無	取引無
	取引高	2010年取引開始、2020年以降取引の上限が緩い
	取引低	2010年取引開始、2020年以降取引の上限が厳しい
CCS技術	CCS高	2020年CCS技術導入開始、導入速度が高位
	CCS低	2020年CCS技術導入開始、導入速度は低位

表18 ケース一覧表

ケース分類	ケース名	GHG排出量制約	原子力		GHG排出許可証取引			CCS技術	
			原子力増加	原子力撤廃	取引無	取引高	取引低	CCS高	CCS低
基準ケース	BaU		○					○	
	CM	○	○			○		○	
比較ケース	原子力撤廃	○		○		○		○	
	取引無	○	○		○			○	
	取引低	○	○				○	○	
	CCS低	○	○				○		○

4) 結果と考察

a. 基準ケースの温室効果ガス排出量と温室効果ガス排出価格

BaUケースとCMケースの温室効果ガス排出量、さらにCMケースの排出許可証取引量は図24のようになった。BaUケースでは緩やかな排出量の減少が見られる。CMケースでは2010年から排出許可証取引が始まり、排出許可証取引で日本が購入する量は2024年に最大となり、260MtCO₂eq/年となる。その後購入量は減少し、2039年から再び緩やかに増加する。全期間において購入量が設定した日本の購入できる最大量に一致することはなく、日本は国際価格よりも排出価格が安い部分のみ日本国内で削減し、それ以外については取引によって排出量制約を満たす。

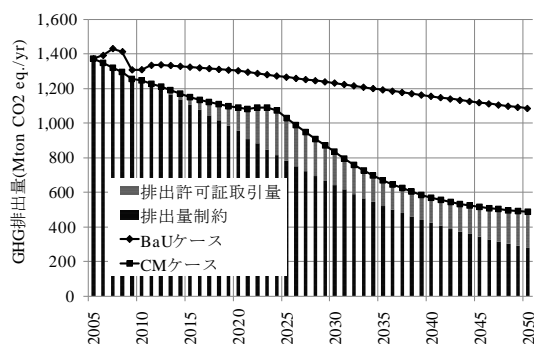


図24 基準ケースの温室効果ガス排出量

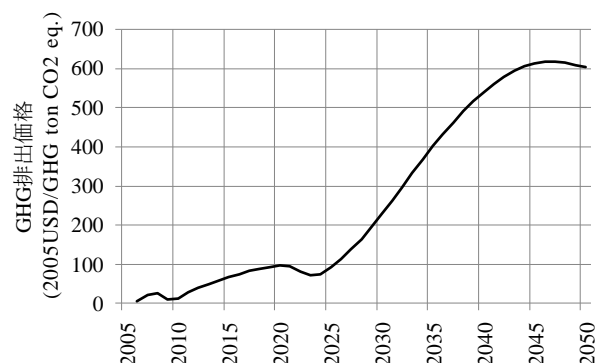


図25 CMケースの温室効果ガス排出価格

CMケースにおける温室効果ガス排出価格を図25に示した。2010年の取引開始から温室効果ガス

のCO₂換算1トン当たり温室効果ガス排出価格は上昇し、2020年に97USD（2005年価格）となる。2020年に取引の上限が引き上げられると排出価格の減少が始まり、2023年に72USD（2005年価格）となる。その後は国際価格に沿うように動く。排出価格は2047年に617USD（2005年価格）で最高値となった後減少し、2050年には602USD（2005年価格）となる。

b. 基準ケースの電源構成

BaUケースとCMケースにおける発電量とその内訳を図26と図27に示す。2020年よりCCS技術の導入が可能となるが、温室効果ガス排出量制約のないBaUケースではCCS技術は導入されず、2005年から2050年までほぼ電源構成の変化は見られない。一方CMケースではCCS技術が積極的に導入される。2050年にはCCS技術無の火力発電所は2005年比28%まで減少し、CCS技術有の火力発電所が急激に増加する。また、バイオマス発電の導入が進み、2050年には発電量全体の5.5%を担うこととなる。地熱、風力、太陽光の自然エネルギーからの発電量もBaUケースより多く、発電量全体の2.8%を担うこととなる。

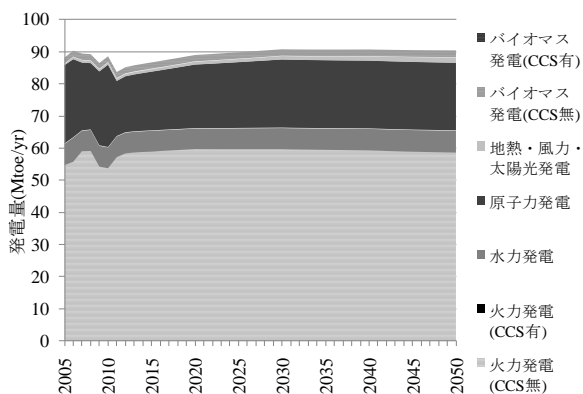


図 26 BaU ケースの電源別発電量

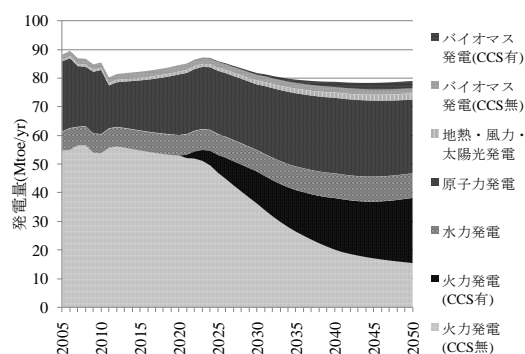


図 27 CM ケースの電源別発電量

c. 比較ケースの温室効果ガス排出量と温室効果ガス排出許可証取引量

全6ケースの温室効果ガス排出量を図28に示す。最も排出量が少ないのは取引無ケースであり、このケースでは排出許可証取引を一切認めていないため、排出量は排出量制約と一致する。残りの5ケースのうちBaUケースを除く4ケースはほぼ同じ動きをするが、その中でも取引の上限を厳しく設定した取引低ケースは2020年から2030年にかけて排出量が他のケースより小さい。また、原子力撤廃ケース、CCS低ケースはCMケースとほぼ同じであるが、CMケースより排出量は微少なながらも大きい。温室効果ガス排出許可証取引における取引量の結果を取引の上限とともに図29に示す。対象とした6ケースのうち、BaUケースと取引無ケースでは取引を認めていないため、残り4ケースの取引量のみ示す。

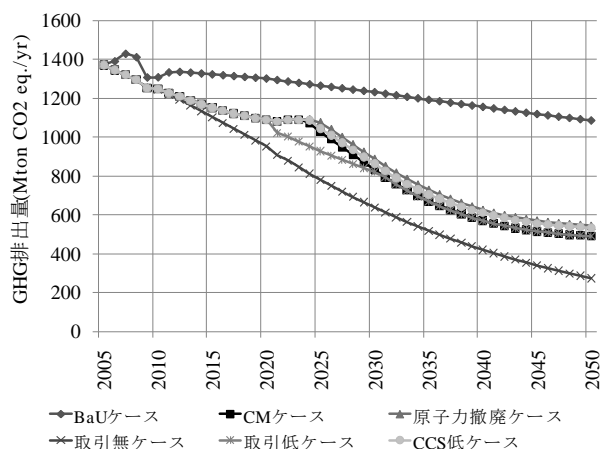


図 28 温室効果ガス排出量

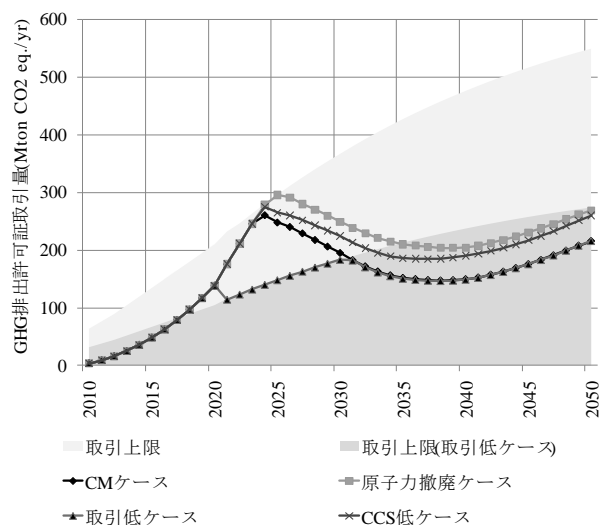


図 29 温室効果ガス排出許可証取引量

原子力撤廃ケースは2025年以降排出取引量が最大となる。原子力撤廃ケースの次に取引量が多いのはCCS低ケースである。この2ケースについては2024年において取引量が上限に達する。取引低ケースは取引の上限が他のケースより厳しくなる2021年からは取引量が上限に達するため、取引量は上限に従い低くなるが、2030年以降はCMケースとほぼ一致する。また、すべてのケースについて2030年以降はほぼ同じトレンドに従って変化する。

d. 比較ケースの温室効果ガス排出価格

温室効果ガス排出価格の結果を図30に示す。対象とした6ケースのうち、BaUケースでは排出量規制がかかっていないため、残り5ケースの温室効果ガス排出価格を示す。

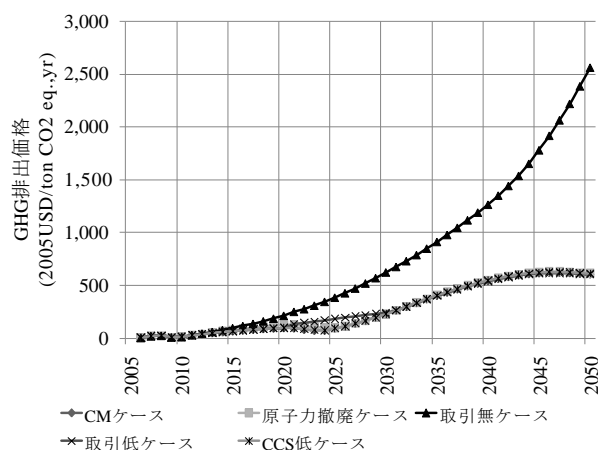


図30 温室効果ガス排出価格

取引無ケースの排出価格が突出して高価であることが分かる。その排出価格は2030年に624USD（2005年価格）、2050年に2560USD（2005年価格）となり、それぞれCMケースの2.7倍、4.22倍と

なる。取引低ケースの排出価格は2024年にCMケースより97USD（2005年価格）高くなり、CMケースの2、3倍となるが、その後差は減少し2030年以降差は1USD（2005年価格）以下となる。CCS低ケースについては、全期間に渡ってCMケースより高価となり、その差は最大で2050年に8.1USD（2005年価格）となるが、これは温室効果ガス排出価格の1.3%にすぎない。原子力撤廃ケースの排出価格も全期間に渡ってCMケースより高価であるが、その差は最大で2.2USD（2005年価格）であり、ほぼCMケースに一致するといえる。

5) まとめ

基準ケースの結果から、温室効果ガス排出量制約をかけないBaUケースであっても、自発的なエネルギー効率改善の効果により温室効果ガス排出量は緩やかに減少する。しかしながら、本研究で日本に課した温室効果ガス排出量制約の目標には遠く及ばず、温室効果ガス排出量制約下では様々な対策により温室効果ガス排出量削減が必要となる。CMケースでは最終用途効率の改善、CCS技術の導入、排出許可証取引による排出量の削減が大きな割合を占める。最終用途効率の改善は温室効果ガス排出価格が発生することにより、追加的なエネルギー技術進歩が進み、エネルギー効率がBaUケースよりも改善することに起因し、また、CCS技術の導入や排出許可証取引は、排出価格がCCS技術導入や排出許可証取引のコストに見合うほど上昇することから進む。

本研究で明らかとなった点は、次の4点である。

- (1) 日本が削減目標を2020年に1990年比25%減、2050年に2005年比80%減としたとき、温室効果ガス排出価格は2050年に602USD(2005年価格)となり、GDPは2.0%減少する。
- (2) 日本が削減目標達成を目指す際に最も重要となるのは、排出許可証取引をやるかどうかであり、しない場合には排出価格は2050年に2560USD（2005年価格）まで上昇し、GDPは2050年に取引をする場合よりも3.8%減少する。
- (3) 原子力発電撤廃を目指す場合には排出許可証取引とCCS技術を有効活用することで経済的な影響をほぼなくすることが可能である。
- (4) CCS技術の導入スピードは遅い方が排出量は増加するが、その増加分は排出許可証取引で補うことが可能である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

第一点目の排出量推計およびダウンスケーリング手法の開発においては、LPS、ASの地図、関連情報を詳細に整備し、各種統計を最大限に活用した調整計算を行うことで、既往の研究より詳細かつ信頼性が高いと考えられる排出量メッシュデータを得た。メッシュの解像度は30秒×30秒であり、大気化学輸送モデルなどへのインプットデータとして、解像度・質ともに高いデータが提供可能となった。

第二点目の化学輸送シミュレーション及び曝露量評価については、気候変動統合シナリオにより世界各国の温室効果ガス排出削減対策の政策分析において、大気汚染緩和への副次的効果を定量的に評価するためのモデル化の第一段階として、曝露モデルの構築を行った。エネルギー使用に伴う大気汚染物質の排出シナリオおよび大気化学輸送シミュレーションと組み合わせることによってアジア各国における地域、性別、年齢別の大気汚染物質に対する年平均曝露濃度を推計し

た。大気汚染物質の曝露濃度についてアジア各国のコホート別の比較を行った研究は、本研究が初めてであり、科学的意義の大きな成果が得られている。

第三点目の温室効果ガス排出量許容量の推計と、その日本への影響については、世界における最新の合意事項や将来シナリオを反映して、世界230地域区分での温室効果ガス排出量許容量を推計した。また、この制約を課した場合の日本におけるGDP、エネルギー構成などについて、定量的な評価・分析を行った。これにより、国際社会において定量的な議論を行うための情報を提供した。

(2) 環境政策への貢献

今後、健康影響評価モデルと組み合わせるとともに、曝露濃度推計の精度を一層向上させることで、副次的効果の定量的な推計に貢献することができる。また、研究成果を学術論文や国際会議において公表することで、地球環境政策に貢献できるように努める。

6. 引用文献

- 1) Asian Development Bank, Asian development outlook 2001, Asian Development Bank, 2001.
- 2) Asian Development Bank, Asian environment outlook 2001, Asian Development Bank, 2001.
- 3) Akimoto, H., Global air quality and pollution, Science, 302(5651), 1716-1719, 2003.
- 4) 斎藤鉄夫, 温室効果ガス 2050年80%削減のためのビジョン, 2009.
- 5) International Iron and Steel Institute (IISI), Steel statistic yearbook 2006, 2006.
- 6) Platts, World electric power plants database, 2009.
- 7) Platts, International electric power sourcebook, 2010.
- 8) IEA Clean Coal Center, IEA clean coal center coal power database, 2010.
- 9) Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Developments in steelmaking capacity of non-OECD economies 2008, 2009.
- 10) King, J.F., World capacity and production report crude steel, 2007.
- 11) CEMBUREAU, World cement directory 2002, 2003.
- 12) 東西貿易通信社, 東アジアの石油産業と石油化学工業 2007年版, 2007.
- 13) 東西貿易通信社, 中国の石油産業と石油化学工業 2007年版, 2007.
- 14) 環境省, 大気汚染物質排出量総合調査(平成17年度実績), 2008.
- 15) European Environmental Agency, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009, 2009.
- 16) 庄司諭史, エネルギーエンドユースモデルによるアジア地域の大气汚染対策の分析に関する研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 2008.
- 17) 経済産業省, 総合エネルギー統計 2005年度, 2005.
- 18) IEA, Energy balances of OECD countries, IEA, 2009.
- 19) IEA, Energy balances of non-OECD countries, IEA, 2009.
- 20) Oak Ridge National Laboratory, Landscan global population database, 2005.
- 21) Cloud Made, Open street maps, 2011.
- 22) National Geospatial Intelligence Agency, VMAP0, 1995.

- 23) Zhang, Q., Streets, D. et al., Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 5131-5153, 2009.
- 24) 長山友祐, アジア地域の気象環境負荷物質排出量推計に関する研究, 京都大学工学研究科修士論文, 2009.
- 25) GEIA ホームページ, <http://www.geiacenter.org/>
- 26) 気象庁, 三宅島の二酸化硫黄放出量, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/320_Miyakejima/320_So2emission.htm.
- 27) Streets, D.G., Yarber, K.F., Woo, J.H., Carmichael, G.R., Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), 1099, 2003.
- 28) Mieville, A., Granier, C., Lioussé, C., Guillaume, B., Mouillot, F., Lamarque, J.F., Gregoire, J.M., Biomass burning emissions of gases and particles during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction, in preparation, 2009.
- 29) Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Mannoji, N., Taira, R., The JRA-25 reanalysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85(3), 369-432, 2007.
- 30) Horowitz, L.W., Walters, S., Mauzerall, D.L., Emmons, L.K., Walters, S., Emmons, L.K., Rasch, P.J., Granier, C., Tie, X., Lamarque, J.F., Schultz, M.G., Tyndall, G.S., Orlando, J.J., Brasseur, G.P., A Global simulation of tropospheric ozone and related tracers: Description and Evaluation of MOZART, version 2, *Journal of Geophysical Research*, 108(D24), 4784, 2003.
- 31) 金森有子, エネルギーサービスの需給バランスを考慮した家庭部門のエネルギー消費量推計について, *地球環境研究論文集*, 18, 131-142, 2010.
- 32) Zhang, J., Smith, K., et al., Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors, *Atmospheric Environment*, 34(26), 4537-4549, 2000.
- 33) 島田洋子, 柳千絵, 松岡譲, アジア各国の生活時間情報を用いた室内空気汚染暴露評価ーPM2.5についてー, *環境システム研究論文集*, 38, 93-100, 2010.
- 34) 2000 Britannica book of the year, *Encyclopedia Britannica, Inc*, 2010.
- 35) EDGAR version4.1, <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/index.php>.
- 36) Zhang, Q., Streets, D. G., Carmichael, G. R., He, K. B., Huo, H., Kannari, A., Klimont, Z., Park, I. S., Reddy, S., Fu, J. S., Chen, DL. Duan, L., Lei, Y., Wang, L. T., Yao, Z. L., Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5131-5153, 2009.
- 37) Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Yan, X., Hayasaka, T., An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(16), 4419-4444, 2007.
- 38) 藤森真一郎, 松岡譲, 全世界の産業部門におけるエネルギー消費量の推計手法の開発と適用, *環境システム研究論文集*, 37, 403-413, 2009.

- 39) Fujimori, S., Matsuoka, Y., Development of method for estimation of world industrial energy consumption and its application, Energy Economics, article in press, 2011.
- 40) World Bank (WB), World development indicators 2008. 2008.
- 41) International Monetary Fund (IMF), World economic outlook database, 2009.
- 42) International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), The GGI scenario database (version 2.0), 2010.
- 43) United Nations Population Division, World population prospects 2008, 2008.
- 44) 資源エネルギー庁, 長期エネルギー需給見通し(再計算), 2009.
- 45) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 太陽光発電ロードマップ(PV2030+), 2009.

7. 国際共同研究等の状況

本研究は、モデル開発時において、各国研究機関と共同で作業を行っている。

- 1) 中国：中国能源研究所、中国科学院地理科学天然資源研究所
- 2) インド：インド経営大学院アーメダバード校、インド経営大学院ラックナウ校、マウラナ・アザド国立工科大学
- 3) 韓国：ソウル大学・韓国環境研究所
- 4) タイ：アジア工科大学

また、本研究で得られた成果は以下の国際共同研究に貢献している。

- 1) EMF（エネルギー・モデリング・フォーラム）：John Weyant教授（米国スタンフォード大学）を中心としたモデル比較研究に参加し、AIMモデルの試算結果を提供している。また、トランジション・シナリオの検討にも参加し、今後も研究成果を提供する予定である。
- 2) IPCC（気候変動に関する政府間パネル）：第四次評価報告書の作成及び第五次評価報告書に向けたシナリオ開発に関する報告書作成に貢献した。
- 3) UNEP/GE04（国連環境計画／世界の環境の見通し4）：シナリオ作成に使用するモデルの開発を本研究で実施してきた。

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 花岡達也, 明石修, 日比野剛, 長谷川知子, 藤野純一, 松岡譲, 甲斐沼美紀子, 世界地域別の温室効果ガス排出削減量と削減費用の評価, エネルギー・資源, 29(4), 36-42, 2008.
- 2) Fujino, J., Hibino, G., Ehara, T., Matsuoka, Y., Masui, T., Kainuma, M., Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050, Climate Policy, 8 Supplement, 108-124, 2008.
- 3) 増富祐司, 高橋潔, 原沢英夫, 松岡譲, 気候予測の不確実性を考慮した近未来の気候変化がアジア域の水稻生産量に及ぼす影響及びその適応策の評価, 地球環境研究論文集, 16, 121-130, 2008.
- 4) 長谷川知子, 松岡譲, 将来の食糧生産に由来するCH₄とN₂Oの排出量に関する研究, 地球環境研究論文集, 16, 155-164, 2008.

- 5) 明石修, 我部山彰則, 松岡譲, 生産量および技術の変化を考慮した鉄鋼生産にともなうCO₂排出量の長期的推計, 地球環境研究論文集, 16, 165-174, 2008.
- 6) 五味馨, 仲座方伯, 松岡譲, 地域経済の開放性を考慮した低炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用, 環境システム研究論文集, 36, 1-9, 2008.
- 7) 藤森真一郎, 松岡譲, エネルギー統計・経済統計の統合とそれを用いた世界全域における化石燃料起源のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の推計に関する研究, 環境システム研究論文集, 36, 37-48, 2008.
- 8) 長谷川知子, 松岡譲, 農畜産業由来のCH₄とN₂Oの排出量とその削減ポテンシャルの将来推計, 環境システム研究論文集, 36, 49-58, 2008.
- 9) Weng, Y., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Municipal solid waste management and short-term projection of the waste discard in Taiwan, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 11(2), 110-122, 2009, DOI: 10.1007/s10163-008-0233-1.
- 10) Hasegawa, T., Matsuoka, Y., Global methane and nitrous oxide emissions and reduction potentials in agriculture, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 7, 245-256, 2010.
- 11) 柳千絵, 島田洋子, 倉田学児, 松岡譲, アジア地域の人々を対象としたPM2.5曝露濃度の推定, 地球環境研究論文集, 18, 19-27, 2010.
- 12) 島田洋子, 柳千絵, 松岡譲, アジア各国の生活時間情報を用いた室内空気汚染暴露評価ーPM2.5についてー, 環境システム研究論文集, 38, 93-100, 2010.

<その他の紙上発表(査読なし)>

- 1) Hasegawa, T., Matsuoka, Y., A study on methane and nitrous oxide emissions and agriculture, *Proceedings of the 15th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment*, 1-16, 2008.
- 2) Matsuoka, Y., A design action roadmaps toward Japan's low-carbon societies, *Proceedings of the 15th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment*, 17-26, 2008.
- 3) Kurata, G., Yanagi, C., Matsuoka, Y., Verification and calibration of the emission inventory for East Asia, *Proceedings of the 15th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment*, 239-245, 2008.
- 4) Yang, J., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Wang, W., Study on comparison of municipal waste emission by composition among Chinese metropolitan cities, *Proceedings of the 15th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment*, 399-412, 2008.
- 5) 松岡譲, グローバルCOEプログラム「アジア・メガシティの人間安全保障工学拠点」について, 環境衛生工学研究, 22(3), 8-9, 2008.
- 6) Weng, Y., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Projecting municipal solid waste emission in Taiwan based on consumer's behavior and policy effects, 環境衛生工学研究, 22(3), 160-163, 2008.
- 7) Yang, J., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Wang, W., Estimation and comparison of municipal solid waste emission based on consumption structure and governmental countermeasures

- in Chinese metropolitan cities, 環境衛生工学研究, 22(3), 164-167, 2008.
- 8) 柳千絵, 倉田学児, 松岡譲, 大気化学輸送モデルを用いた東アジア排出量インベントリの検証とキャリブレーション法の開発, 環境衛生工学研究, 22(3), 168-171, 2008.
 - 9) 山本雅也, 長谷川知子, 松岡譲, 世界を対象とした農林畜産業による土地利用変化にともなうCO₂排出量の将来推計, 環境衛生工学研究, 22(3), 172-175, 2008.
 - 10) 木下一毅, 藤森真一郎, 松岡譲, 世界経済における化石燃料起源の二酸化炭素排出量の要因分析に関する研究, 環境衛生工学研究, 22(3), 176-179, 2008.
 - 11) 西岡秀三編著, 明石修, 芦名秀一, 甘利朋矢, 甲斐沼美紀子, 蟹江憲史, 河瀬玲奈, 松岡譲 (他 22 名), 日本低炭素の社会シナリオ—二酸化炭素 70%削減への道筋, 日刊工業新聞社, 82-84, 2008 (共著) .
 - 12) 柳千絵, 倉田学児, 松岡譲, 大気化学輸送モデルを用いた排出量イベントリのキャリブレーション法の開発, 第16回地球環境シンポジウム講演集, 79-83, 2008
 - 13) 柳千絵, 倉田学児, 松岡譲, 東アジアにおける排出量イベントリのキャリブレーション法の改良, 第49回大気環境学会年会講演要旨集, 331, 2008.
 - 14) 倉田学児, 柳千絵, 松岡譲, 光化学オキシダント汚染への東アジアからの越境輸送とローカル排出源の影響の解析, 環境システム計測制御学会誌「EICA」, 13(3/4), 241-244, 2008.
 - 15) 由良僚章, 五味馨, 島田幸司, 松岡譲, 地域特性を考慮した低炭素社会の構築手法に関する研究, 第36回環境システム研究論文発表会講演集, 37-44, 2008.
 - 16) 河瀬玲奈, 松岡譲, 計量経済学手法を用いた中国の鉄のフロー・ストック推計, 第36回環境システム研究論文発表会講演集, 161-166, 2008.
 - 17) Yang, J., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Study on forecast of regional industrial solid waste generation: framework of systematic approach, 第19回廃棄物学会研究発表会講演文集, 4-6, 2008.
 - 18) Weng, Y., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Forecasting the remaining capacity of municipal solid waste treatment and disposal system: an empirical Taiwan case study, 第19回廃棄物学会研究発表会講演文集, 13-15, 2008.
 - 19) Matsuoka, Y., Kurata, G., Fujiwara, T., Shimada, K., Gomi, K., Yoshimoto, K., Simson, J., Ho, C.S., Ahmad, S., Hussein, M., Chau, L.W., Low carbon region 2025 Iskandar Malaysia, 2009.
 - 20) 倉田学児, 持続可能社会のための大気汚染削減のビジョン, 学会誌EiCA, 14(4), 51-55, 2010.
 - 21) 安福一樹, 倉田学児, 松岡譲, アジア地域における大気汚染物質の大規模排出源の位置推計に関する研究, 地球環境シンポジウム講演集, 95-100, 2010.

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) Yang, J., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Wang, W., Household waste emission estimation based on consumption “a case study of Shanghai”, Paper Summaries Book, ISWA/WMRAS World Congress 2008 East meets Waste, 2008.
- 2) Weng, Y., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Estimating municipal solid waste emission in Taiwan based on consumption expenditure and policy interventions: an econometric modeling approach, Paper Summaries Book, ISWA/WMRAS World Congress 2008 East meets Waste, 2008.

- 3) Weng, Y., Fujiwara, T., Matsuoka, Y., Long-term forecasting of municipal solid waste emission in Taiwan based on consumer's behavior and policy effects, The 8th International Conference on EcoBalance, 2008.
- 4) Hasegawa, T., Fujimori, S., Matsuoka, Y., A Study on a world food and environment accounting system, The 8th International Conference on EcoBalance, 2008.
- 5) Kawase, R., Matsuoka, Y., Estimation of steel stock in China, The 8th International Conference on EcoBalance, 2008.
- 6) Fujimori, S., Matsuoka, Y., A study on the method to estimate energy flow accounts considering economic information, The 8th International Conference on EcoBalance, 2008.
- 7) Yang, J., Fujiwara, T., and Matsuoka, Y., A systematic approach of projecting industrial solid waste generation: a case study of Shanghai, The 8th International Conference on EcoBalance, 2008.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。