

アジアにおける一般廃棄物埋立由来の CH₄排出量の将来推計

花岡 達也¹・金森 有子²・藤井 実³

¹正会員 主任研究員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2) E-mail:hanaoka@nies.go.jp

²正会員 主任研究員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター

³非会員 主任研究員 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター

経済成長が著しく、人口が増加するアジア諸国にとって、一般廃棄物由来のCH₄排出量は増加すると予想され、それに伴うCH₄排出緩和策が必要とされる。そこで、アジアにおける将来の一般廃棄物発生量の推計手法を検討し、一般廃棄物の埋立に伴うCH₄排出量を、共通社会経済シナリオを用いて推計した。将来の社会経済シナリオおよび一般廃棄物発生量の推計に用いる評価関数の設定次第で、CH₄排出量に大きな幅が生じ、2050年の一般廃棄物由来のCH₄排出量は中国において200～303MtCO₂eq、アジア全域では536～858 MtCO₂eqと大きな幅が見られた。アジア諸国では、固形廃棄物の大部分を埋立処理が占めているが、将来、現在の先進国レベルに焼却の割合が増えた場合は、大幅に埋立由来のCH₄排出量が削減される。

Key Words : *Municipal solid waste, MSW projections in Asia, CH₄ emission from landfill, Shared Socioeconomic Pathways*

1. はじめに

気候変動枠組条約下の国際交渉において、温室効果ガス排出削減目標に関する議論が注目され、2009年の第15回気候変動枠組条約締約国会議(COP15)において、世界の平均気温上昇を産業革命前に比べて2度以内に抑える国際的な目標の重要性が確認された²⁾。2°C目標の達成にむけて、世界全体で2050年までに温室効果ガス排出量を1990年比で半減程度の削減が必要とされているが、そのためにはエネルギー起源CO₂排出量だけではなく、非エネルギー起源のNonCO₂排出量も大幅に削減する必要がある¹⁾³⁾。また、近年、CH₄排出は短寿命気候因子(SLCP: Shortlived Climate Pollutants)として注目され⁴⁾、SLCP緩和策としても非エネルギー起源のCH₄排出量の削減が重要である。

NonCO₂排出量の発生源には農耕作、畜産、化石燃料採掘など様々なものがあるが、経済成長が著しく、人口が増加するアジアにとって、廃棄物・排水処理由来のCH₄・N₂O排出量は増加すると予想され、廃棄物・排水処理は生活の質の向上のために重要な社会問題であるとともに、それに伴うCH₄・N₂O緩和策も必要とされる。

一方で、アジアにおける廃棄物・排水処理由来のCH₄・N₂O排出量については、廃棄物・排水処理発生量

の推計方法やそれらに関連する統計データについて不確かさがあり、アジアの過去の傾向が十分に把握されていない。そこで、本研究では、1) 一般廃棄物および関連する社会経済データをアジア主要国および先進国主要国について収集し、2) アジア諸国の将来の一般廃棄物発生量の推計手法を検討し、3) 開発した推計手法を用いて、アジアにおける一般廃棄物の埋立に伴う将来のCH₄排出量を推計する。

2. 社会経済データの設定および相関分析

(1) 一般廃棄物および社会経済データベース

アジアを含む世界における非エネルギー起源のNonCO₂排出量の排出に関する主要な先行研究として、U.S.EPAが2030年までの排出量推計および緩和策の費用対効果について分析をしている^{5) 7)}。一般廃棄物由来のCH₄排出量に関する分析もあり、アジアは主要な排出地域の一つという結果が示されているが、アジアの将来の社会経済シナリオをどのように想定し、また、どのような説明変数および評価関数を用いて一般廃棄物の発生量推計を行ったのか、十分な議論がない。

そこで、本研究では、アジアにおける一般廃棄物発生量の推計方法を検討するために、まず、アジア主要国の

データの収集・整備だけではなく、日本および先進国主要国における一般廃棄物発生量に関連するデータおよび各種社会経済データを整備した。次に、一般廃棄物発生量と社会経済データの相関関係を分析することで一般廃棄物発生量の評価手法を検討した。

各種統計データを収集する対象国としては、日本をはじめとするアジア主要国（中国、インド、インドネシア、タイ、ベトナム等）および世界の先進国主要国（米国、ドイツ、デンマーク等）^{8)・25)}を中心に、OECD諸国やAnnex I諸国も対象とした。Annex I国はNational GHG Inventory Report, NonAnnex I国はNational Communicationsの作成において用いられている文献や学術論文・報告書も含め、以下の時系列データを収集した。

- a) 廃棄物発生量
- b) 廃棄物発生量の組成(有機物、庭木、紙、繊維など)
- c) 廃棄物処理量(埋立、焼却、コンポスト、その他)
- d) ごみ処理施設数、ごみ処理能力
- e) その他、2006IPCCインベントリガイドラインにおいてGHG排出量算定に関連するデータ

ただし、アジアにおいて、連続した時系列データの欠損やデータの信頼性など、一般的に下記の課題があった。

- a) 中央省庁等によって統計が整備されていない。
- b) 統計の把握対象や把握範囲が限定的である。
- c) 統計値の信頼性や精度に課題がある。
- d) 統計調査方法が不明、又は公開されていない。
- e) 統計値が定期的に更新されない。
- f) 調査方法が（支援国の都合等により）変わり、過去の統計値との比較ができない。

一方で、一般廃棄物発生量と相関があると考えられる社会経済データの候補の検討においては、将来の排出シナリオの際に用いることができる説明変数であるという

条件も考慮し、以下の統計データを整備した。

- a) 人口
- b) 都市化率および都市人口
- c) GDP、一人当たりGDP
- d) 一人当たり所得、一人当たり支出
- e) 一人当たりエネルギー消費

(2) 相関分析

一般廃棄物発生量と社会経済データの相関関係を分析する際に、対象とする国、出典やデータ項目によっては、単位の差異や異常値、外れ値などがある。例えば、IPCC2006ガイドラインに掲載されている先進国諸国の一人当たり廃棄物発生量のデフォルト値は、National GHG Inventory Reportに用いられているデータと大きく異なる場合も見られるた。そのような外れ値や異常値をデータベースから除き、日本、中国、タイ、米国、欧州27カ国のパネルデータを用いて、相関分析を実施し、データの傾向を見て、線形近似、指数近似、対数近似、多項式近似など適切に表現される関数形を検討した。その結果の概要を図-1に示す。

まず、一般廃棄物もエネルギー消費も、人々の生活活動に由来するため、一人当たりエネルギー消費量が増加するほど、一人当たり一般廃棄物発生量も増加すると考えられるが、相関分析の結果、十分な関係はみられなかった。また、一般廃棄物は都市部における発生量が多いため、都市化率、都市人口が高まるほど一般廃棄物発生量も増加するが、相関分析の結果、ここでも十分な相関関係はみられなかった。

次に、一人当たりの所得が増加するほど、また、一人当たりGDPが増加するほど消費財の購入が増え、その結果、一人当たり廃棄物発生量が増加すると思われるが、

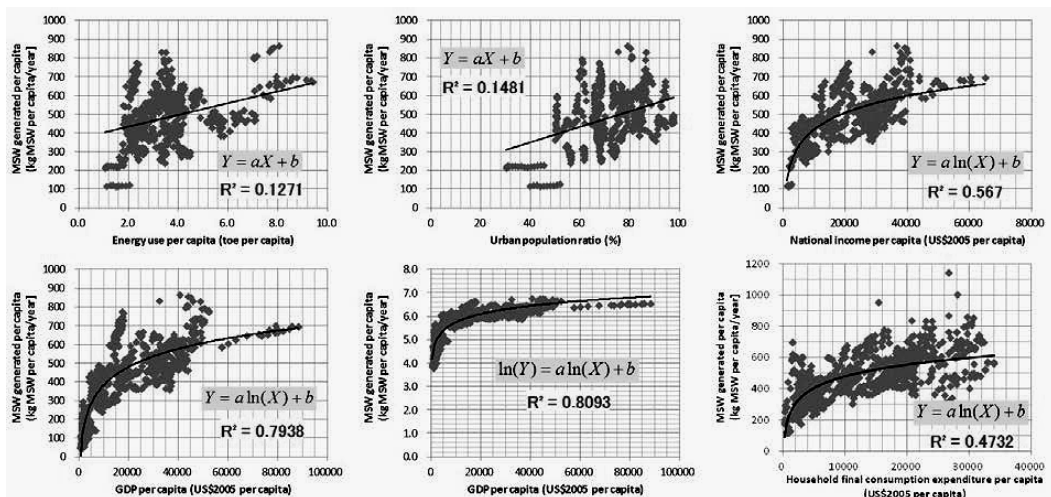


図-1 一人当たり廃棄物発生量と各種社会経済データとの相関関係

相関分析の結果、他の社会経済データよりも有意な説明変数であった。特に、一人当たりGDPは、一人当たり所得よりも多くの時系列データが入手可能であり、その結果、相関関係がより有意に表れた。一般廃棄物発生量は消費財との関係があるため、一人当たり家計支出との相関も分析したが、一人当たりGDPの方が説明変数として有意であった。また、対数近似が最も適しているため、片変数のみlog、両変数ともにlogを取るなど、複数の関数で相関関係を分析したが、大きな差異なく、本研究では結論として、一人当たりGDPを説明変数とし、対数関数を用いることとした。なお、複数の指標を組み合わせる相関分析を実施したが、いずれの分析においても、グラフの形状が上に凸となる、環境クズネツ曲線はみられなかった。

3. 一般廃棄物発生量の将来推計手法

(1) 一人当たり一般廃棄物発生量の推計手法

相関分析の結果より、本研究では、一人当たり一般廃棄物発生量の推計において、一人当たりGDPを説明変数とし、対数関数を用いて推計する。ただし、各国の時系列の傾向の詳細を分析すると、米国の傾向、日本の傾向、またEUの中でも一人当たりGDPの大きい国の傾向、小さい国の傾向など、それぞれ一人当たり廃棄物発生量の特徴が異なっていた。そこで、本研究では、EU諸国の傾向を表-1および表-2の区分に分類し、1990年代の一人当たりGDPが10000 US\$ per capおよび一人当たり廃棄物発生量が350 kg per capitaを境界に国を区分し、区分ごとの傾向を分析した。その結果を図-2に示す。西欧諸国は全てhigh incomeに区分されるが、東欧諸国はmiddle incomeとhigh incomeに区分され、それぞれ一般廃棄物発生量の傾向も異なっていた。

表-1 一人当たり GDP の区分

区分	GDP per capita (US\$ per capita)
Low income	< 1000
Lower middle income	1000 - 4000
Upper middle income	4000 - 10000
High income	> 10000

表-2 一人当たり一般廃棄物発生量

区分	MSW per capita (kg MSW per capita)
Low MSW generated	< 350
High MSW generated	> 350

それらの区分を用いて傾向を分析したところ、1) 米国のように一人当たりGDPの伸びに伴って一人当たり一般廃棄物発生量が増加する傾向、2) 日本のように一人当たりGDPの伸びに比べて一人当たり一般廃棄物発生量の伸びが小さい傾向、3) 先進国諸国の全データの

平均的傾向、の3つの区分に分類でき、それぞれ式(1)～式(3)で表され、その決定係数も $R^2 = 0.7$ 以上と十分な相関関係がみられた。

$$\text{米国型傾向} \quad Y = 184.4 \ln(X) - 1243.3 \quad (1)$$

$$\text{先進国平均的傾向} \quad Y = 139.7 \ln(X) - 904.65 \quad (2)$$

$$\text{日本型傾向} \quad Y = 100.94 \ln(X) - 617.02 \quad (3)$$

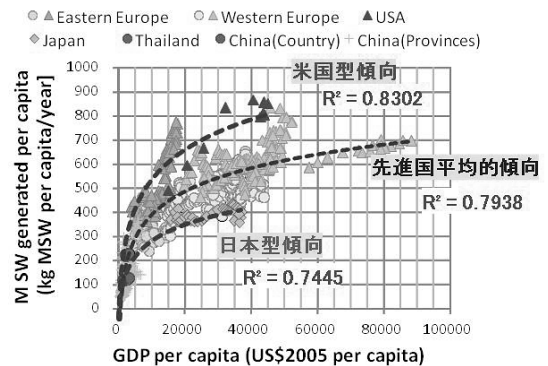


図-2 一人当たり廃棄物発生量と一人当たりGDPの相関

(2) アジアにおける将来シナリオ

アジア諸国の一人当たりGDPは10000 US\$ per capita以下のmiddle incomeまたはlow incomeに区分され、図-2の左下段に位置する。たとえば、人口および経済の規模が大きい中国において、将来の一人当たり一般廃棄物の発生量が、米国のような傾向で遷移するのか、日本のような傾向で遷移するのか、その将来の設定次第で、一般廃棄物の総発生量の推計結果に大きな影響を与える。

そこで、将来シナリオとして、共通社会経済シナリオ(SSPs: Shared Socioeconomic Pathways)²⁶⁾ ²⁷⁾の定性的な情報およびそれに基づく人口、GDPの定量的なデータを用いて、アジアにおける将来の一般廃棄物発生量を推計した。SSPシナリオの概要を図-3に、定量的な情報の概要を図-4に示す。

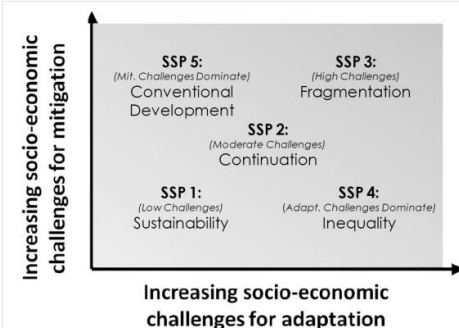


図-3 共通社会経済シナリオ(SSP)の概要²⁷⁾

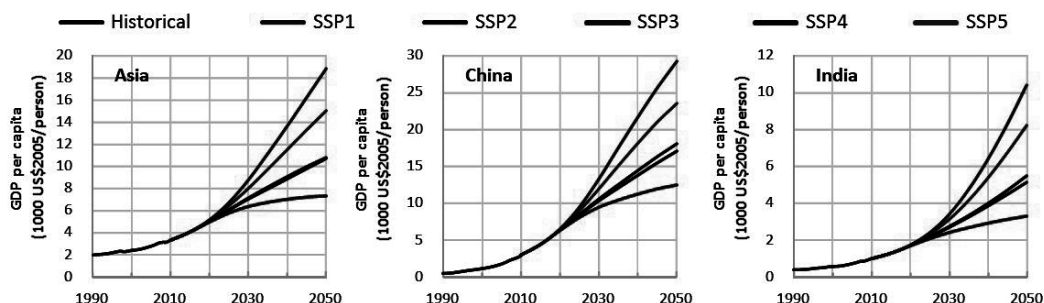


図-4 共通社会経済シナリオ(SSPs)におけるアジア地域の GDP per capita の遷移

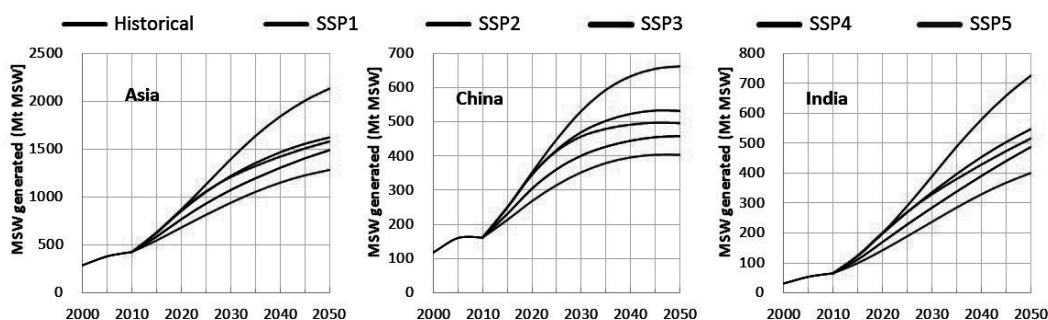


図-5 アジアにおける一般廃棄物発生量の遷移

本研究では、定性的シナリオの情報を参考にし、SSP1には一人当たり一般廃棄物の発生量が最も少ない日本型傾向の関数（式1）、SSP2には先進国諸国平均的傾向の関数（式2）、SSP3には一人当たり一般廃棄物の発生量が最も多い米国型傾向の関数（式3）を用い、またSSP4およびSSP5については、各国の一人当たりGDPのレベルが表-1のどの区分に分類されるかによって式(1)から式(3)のいずれを用いるかを設定した。本研究で用いた一人当たりGDPの定量的データの例を図-4に示す。

4. 結果および考察

(1) アジアの一般廃棄物の将来発生量の推計

まず、アジア諸国における一人当たり一般廃棄物発生量をSSPシナリオを用いて推計し、そして各SSPシナリオにおける人口データを用いて、アジア諸国における一般廃棄物発生量を推計した。その結果を図-5に示す。このように、将来のアジア途上国が、米国型傾向、日本型傾向、または先進国平均的な傾向のどの評価関数を用いるか次第で（どのような生活スタイルを想定するか次第で）、また将来の人口やGDPの伸び率をどのように想定するか次第で、将来の廃棄物発生量に大きな幅が生じ、CH₄排出量推計に影響を与えることが言える。

(2) アジアにおける一般廃棄物由来のCH₄排出量の推計

一般廃棄物由来の埋立に伴う CH₄ 排出量の推計につ

いては、IPCC2006 ガイドライン²⁸⁾に従った。また、廃棄物発生量の組成や、廃棄物処理方法の比率については、アジアの情報は不足しているため、IPCC2006 ガイドラインのデフォルト値または Annex I 国は National GHG Inventory Report¹⁹⁾の先進国諸国のインベントリ報告データを参考にして設定した。アジア諸国では、固形廃棄物の処理に伴う GHG 排出の大部分を埋立が占めており、将来、焼却の割合が増える可能性があるものの、当面は現時点の傾向が続くと考えられるため、埋立処分比率を現状ベースとして SSP シナリオを用いて推計した。

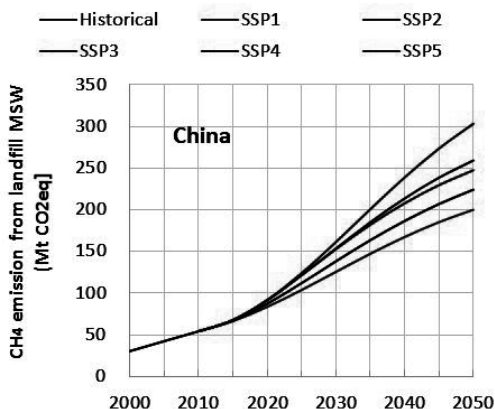


図-6 中国の一般廃棄物由来のCH₄排出量
(対策：現状ベース、GWP：21)

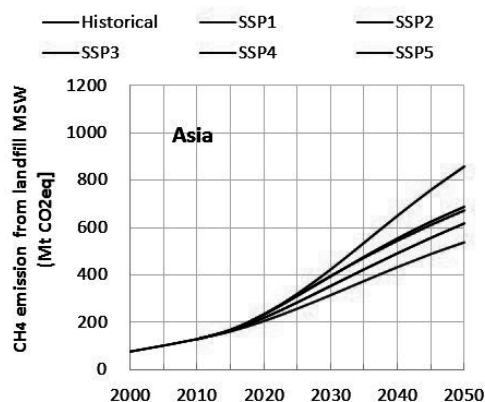


図-7 アジアの一般廃棄物由来のCH₄排出量
(対策：現状ベース、GWP：21)

2050年の中国において200～303MtCO₂eq、アジア全域では536～858 MtCO₂eqと、社会経済シナリオおよび分析に用いる評価関数の設定次第で、将来のCH₄排出量推計に大きな幅が生じること分かる。

(3) 一般廃棄物由来のCH₄排出量の推計の不確実性

将来推計に用いる社会経済シナリオや評価関数の設定によって、CH₄排出量の結果に大きな幅があることが分かったが、その他の主要なパラメータとして、廃棄物処理方法における埋立比率や CH₄ 排出量の回収率の設定も結果に大きな影響を与える。そこで、Annex I 国の National GHG Inventory Report¹⁹⁾の報告データより、先進国諸国の過去から現在までの傾向を参考に、先進国の平均的な傾向を分析し、中国が今後、先進国の傾向に従って焼却の比率を高め、また CH₄ 排出量を回収する対策を取ると仮定した対策シナリオを分析した結果を図-8に示す。このように、2050年の中国のCH₄排出量は71～105MtCO₂eqとなり、現状ベースの将来推計の結果よりも3分の1程度となり、埋立比率やCH₄排出回収の設定が、結果に大きな影響を与えることが分かる。

その他の不確実性として、NonCO₂排出については地球温暖化係数(GWP: Global Warming Potential)の設定がある。京都議定書の第一約束期間(2008年～2012年)に使用するGWP値は、京都議定書5条3で「COP3で決められたもの」と定められ、COP3では「IPCC第2次評価報告書(1995)に記載されているGWP値を使用する」と決められている。したがって、現在までのインベントリ報告書ではCH₄のGWP値はGWP=21が使用されてきたが、最新のIPCC第5次評価報告書ではGWP=28である。そこで、GWP値を最新情報にしたときのアジアにおける一般廃棄物由来のCH₄排出量を図-9に示す。アジア全域では2050年の一般廃棄物由来の

埋立に伴うCH₄排出量は717～1144 MtCO₂eqとなり、GWP=21と比較し、各SSPシナリオで約200MtCO₂eq程度の差異が生じる。よって、GWP値を更新することによる結果への影響も十分に大きく、無視できない。

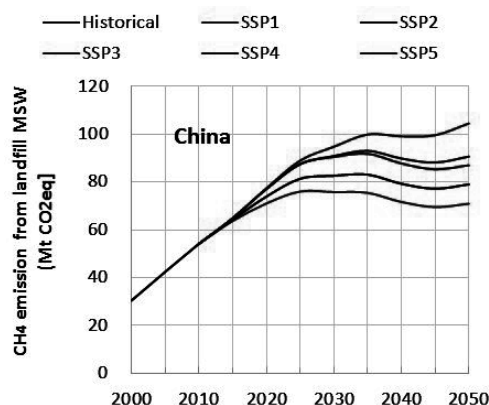


図-8 中国の一般廃棄物由来のCH₄排出量
(対策：先進国並み、GWP：21)

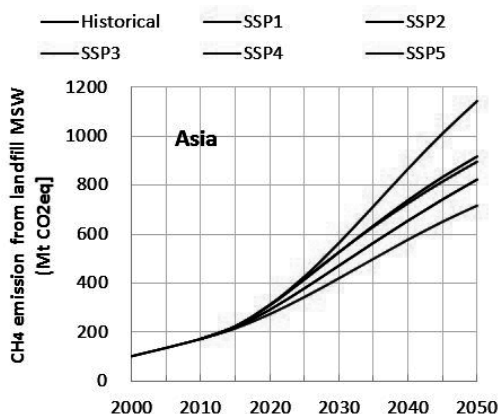


図-9 アジアの一般廃棄物由来のCH₄排出量
(対策：現状ベース、GWP：28)

3. おわりに

本研究では、アジアにおける将来の一般廃棄物発生量の推計手法を検討し、一般廃棄物の埋立に伴うCH₄排出量をSSPシナリオを用いて推計した。将来の社会経済シナリオおよび一般廃棄物発生量の推計に用いる評価関数の設定次第で、CH₄排出量に大きな幅が生じるが、特に、アジア各国では、ごみ発生原単位や組成が日本・先進国と大きく違う可能性があり、アジアと日本・先進国との相違や消費支出内訳等との相関分析を深めたり、焼却処理やリサイクルが導入される社会的・経済的条件の分析を深めていくことで、アジアにおける将来の一般廃棄物対策に活かせるようにする必要がある。

謝辞

本研究は、環境省の地球環境研究総合推進費（S12-2-2）により実施された。

参考文献

- 1) IPCC, Climate change 2007: Mitigation on Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007
- 2) UNFCCC, Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen., 2010 <http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf>
- 3) Rogelj J., et al. Emission pathways consistent with a 2 degrees global temperature limit, Nature Climate Change 1(8):413-418. 2011
- 4) IPCC, Climate change 2015: Mitigation on Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2015
- 5) UNEP, Near-term Climate Protection and Clean Air Benefits: Actions for Controlling Short-Lived Climate Forcers, 2011
- 6) U.S. EPA, Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020, 2006
- 7) U.S. EPA, Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2030, 2012
- 8) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部、廃棄物の広域移動対策検討調査および廃棄物等循環利用量実態調査報告書
- 9) 環境省廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課、日本の廃棄物処理
- 10) 環境省廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課、一般廃棄物処理実態調査
- 11) 日本環境衛生センター、廃棄物基本データ集、2000
- 12) 中国統計年鑑
- 13) Huang, Q., et al., The current situation of solid waste management in China, J Mater Cycles Waste Manag, 8:63-69, 2006
- 14) National Institute of Urban Affairs, Solid Waste Management 1999, 2005
- 15) Columbia University, Sustainable Solid Waste Management in India, 2012
- 16) Central Pollution Control Board in India, Status report on municipal solid waste management
- 17) Ministries of Natural Resources and Environment, Pollution control department, in Thailand URL: http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_wastethai.htm
- 18) UNFCCC, Non-Annex I national communications, URL: http://unfccc.int/national_reports/non-annex_i_natcom/items/2979.php
- 19) UNFCCC, Greenhouse Gas Inventory, URL: <http://unfccc.int/di/DetailedByParty/Setup.do>
- 20) USEPA, Municipal Solid Waste In the United States, URL: <http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/>
- 21) European Commission, Eurostat, URL: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/main_tables
- 22) European Environmental Agency, Municipal waste generation per capita,
- 23) Denmark Ministry of Environment, Waste statistics 2005/ Waste statistics 2009 and future of waste management 2011-2050
- 24) European Environment Agency, Municipal waste management in Germany
- 25) OECD Environmental Data Compendium
- 26) Shared Socioeconomic Pathways (version 0.93) URL: <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>
- 27) O'Neill, B., et al, Workshop on the Nature and Use of New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research, 2012, URL: <https://www2.cgd.ucar.edu/sites/default/files/iconics/Boulder-Workshop-Report.pdf>
- 28) IPCC, The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006

(2015. 7. 16 受付)

Estimation of future CH₄ emission from municipal solid waste landfill in ASIA

Tatsuya HANAOKA, Yuko KANAMORI and Minoru FUJII

The objective of this study is to develop the methodology how to estimate future municipal solid waste (MSW) in Asia and to assess CH₄ emissions from MSW landfill. This study develops MSW database such as MSW generation, waste composition, fraction of MSW disposed, incinerated and composed, and determines appropriate explanatory variables and parameters for estimating the future MSW generations in Asia. This study evaluated future CH₄ emission projections from MSW landfill by considering Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) scenarios. It was found that there are a wide range of CH₄ emissions from MSW landfill in 2050 which will be 200~303MtCO₂eq and 536~858 MtCO₂eq in China and the whole Asia respectively. Thus, it is necessary to carefully discuss the ranges of CH₄ emissions, due to the differences of methodology how to estimate MSW generation and how to set future socio-economic scenarios. If China will take measures to reduce amounts of MSW landfill and shift to incineration at the similar level in current developed countries and also recover CH₄ emissions from MSW landfill, then China can reduce CH₄ emissions from MSW landfill largely around one-third compared to the baseline scenario in 2050.