

# バイオマスを対象とした LCA のメタ分析

## Life cycle assessment for biomass using meta analysis

○八坂慶仁<sup>\*1)</sup>、正嶋宏一<sup>1)</sup>、伊坪徳宏<sup>2)</sup>

Yoshihito Yasaka, Koichi Shobatake, Norihiro Itsubo

1) TCO2 株式会社, 2) 東京都市大学

\* yasaka@tco2.com

### 1. 緒言

気候変動枠組み条約第 21 回締約国会議を通じて長期目標が採択された。1.5°C 目標まで言及したことで、今後世界はさらなる緩和策を推進することが求められる。また、LCA 研究は様々な分野で実施されており、現在その数は年間 3000 件に上る。それらの一部はデータベースに搭載されることがあるが、他の研究等に有効に活用されていないことが多い。LCA の実施では、データ収集等に多大な時間と労力がかかることが課題であるが、これまでの研究論文を有効に活用することで、短期間で代表性のある結果を得ることが期待される。本研究では、既に幅広く行われているプラスチックにおける LCA の研究成果に対してメタ分析（メタ分析は複数の研究結果を統計処理する等、統合して分析結果を得る手法で、特に医療分野で多く用いられている）を実施して、定量的な分析の実施可能性について検討する。

### 2. 評価対象

本調査ではプラスチック樹脂 1kg あたりの GHG 排出量を評価対象とした。対象としたプラスチックは、PE (polyethylene)、PET (polyethylene terephthalate)、PLA (polylactic acid) である。PE と PET では原料を石油由来とバイオマス由来でさらに細分化を行った。

### 3. 対象バウンダリー

評価対象は樹脂の製造段階と樹脂の廃棄段階（焼却シナリオを適用）である。対象バウンダリーを図 1 に示す。

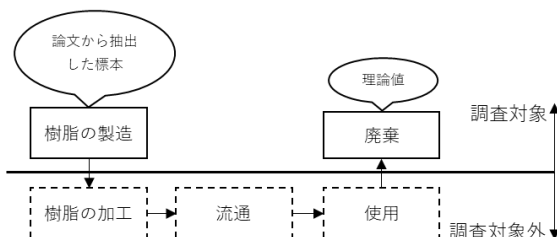


図 1 対象バウンダリー

樹脂の製造段階は論文や報告書から該当する段階の GHG 排出量を抽出した。廃棄段階は全量焼却さ

れるシナリオを適用し、焼却に伴う電力の代替効果やリサイクル処理は含めていない。

### 4. 調査方法

#### 4.1 対象の収集

調査対象となる論文の収集には Google 検索、Google Scholar、ScienceDirect を用いた。関連すると考えられる検索キーワードを作成し、完全一致で検索を行い、プラスチックを対象とした LCA 研究が行われている論文を収集した。また IDEA v2.1.3 データベースと SimaPro8.4.0 の ecoinvent v3.3 データベースに含まれる PE、PET、PLA それぞれのプロセスについて IPCC GWP 2007 100a で行った特性化結果を収集した。

#### 4.2 標本の整理

論文から抽出した GHG 排出量のうちプラスチック樹脂の製造段階までを標本として整理した。廃棄段階について、プラスチックは全量焼却されるシナリオを適用して、排出される CO<sub>2</sub> 排出量を分子式から算出し、理論値を足し合わせた。バイオマス由来の PE、PLA は全炭素がバイオマス、PET では 8 割が石油由来、2 割がバイオマス由来と仮定して算定を行った。表 1 にプラスチック別の CO<sub>2</sub> 吸収量および焼却処理時の CO<sub>2</sub> 排出量の理論値を記載する。

表 1 プラスチック別の CO<sub>2</sub> 吸収量と焼却時の排出量の理論値

樹脂種	原料	樹脂の製造		廃棄	
		バイオマス由来 CO <sub>2</sub> 吸収量	バイオマス由来 CO <sub>2</sub> 排出量	石油由来 CO <sub>2</sub> 排出量	石油由来 CO <sub>2</sub> 排出量
PE	石油	—	—	—	3.14E+00
	バイオマス	3.14E+00	3.14E+00	—	—
PET	石油	—	—	—	2.29E+00
	バイオマス (一部)	4.58E-01	4.58E-01	—	1.83E+00
PLA	バイオマス	4.83E+00	4.83E+00	—	—

(単位: kgCO<sub>2</sub>/kg-樹脂)

#### 4.3 データクリーニング

単位は論文の中で多く見られた kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂とした。標本によっては gCO<sub>2</sub>e/kg や kgCO<sub>2</sub>e/カップ等異なる単位が用いられており、これらを全て kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂へ単位換算を行った。単位を修正することができない標本、もしくは極端に小さい標本、大きい標本は対象外として扱った。

収集した論文数と標本数を表 2 に示す。

表 1 プラスチック別収集標本数及び論文数

	PE		PET		PLA
	石油由来	バイオマス由来	石油由来	バイオマス由来	バイオマス由来
論文数	14	5	19	5	19
標本数	102	9	86	83	98

標本数が最も多かったのは PE の石油由来、その次が PLA となった。論文数は対象となる標本が 1 つでも含まれている論文を数えた結果であり、PET の石油由来と PLA が同数で最も大きい結果となった。

## 1. 結果

プラスチック別の製造段階までの GHG 排出量を箱ヒゲ図として図 2 に示す。なお、ここにはバイオマス由来の CO<sub>2</sub> 吸収量や廃棄時の CO<sub>2</sub> 排出量は含まれておらず、異なる種類の樹脂を同じグラフに表示しているが、比較を目的としてはいない。

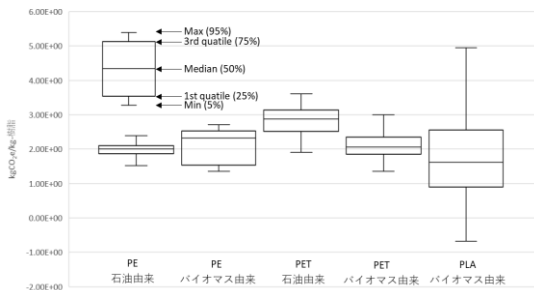


図 1 プラスチック別 GHG 排出量（樹脂の製造段階のみ）

中央値で見た場合、PE は石油由来で 2.00kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂、バイオマス由来で 2.32 kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂となりバイオマス由来の GHG 排出量が石油由来を上回った。PET は石油由来で 2.87kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂、バイオマス由来で 2.06kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂となりバイオマス由来の GHG 排出量が小さい結果となった。PLA の中央値は 1.62kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂であったが、分散も大きいことがわかった。次に廃棄段階の理論値を含んだ結果を図 3 に示す。

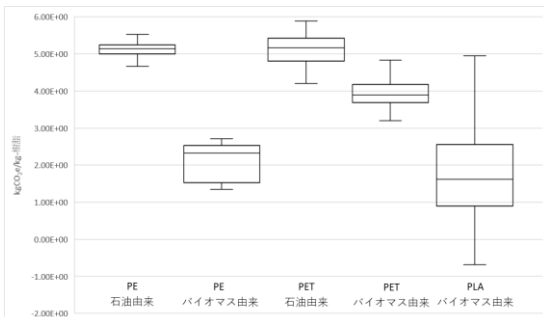


図 2 プラスチック別 GHG 排出量（樹脂の製造段階+廃棄段階の理論値）

中央値では、PET の石油由来が 5.16kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂となり最も GHG 排出量が大きくなった。バイオマス由来の PET は 3.89kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂と変化しなかった。ここから PET 製品では原料を石油由来からバ

イオマス由来に変更することによって GHG 排出量が約 25%削減される事が明らかとなった。

PE では、石油由来が 5.15kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂、バイオマス由来で 2.32kgCO<sub>2</sub>e/kg-樹脂となり PE 製品では原料を石油由来からバイオマス由来に変更することによって GHG 排出量が約 55%削減される事が明らかとなった。

## 2. 課題

今回のメタ分析を実施した際の課題の一部を以下に示す。

### (1) 各標本の GHG 排出量の取り扱い

各標本における GHG 排出量に含まれる温室効果ガスの種類や温暖化係数は統一されておらず、それらの補正は行っていない。

### (2) データ補正の妥当性の再検証

論文によって使用している二次データ、自然エネルギーによるクレジット、加工歩留まりを含む等の前提条件が異なる場合もあると考えられ、補正の詳細については更なる検討が必要である。

### (3) 焼却以外の廃棄シナリオの検討

廃棄段階について、当該プラスチックが使用される状況によっては、全量焼却以外の処理シナリオがあり得るが、そのような検討は行っていない。

### (4) GHG 以外の影響領域の調査

メタ分析を行う対象は GHG のみとしたが、取得した論文の中には、大気汚染やエネルギー消費について記載がある論文もあった。トレードオフ関係を明らかにするには、今後 GHG 以外の影響領域についても同様な分析が必要である。

## 3. まとめ

プラスチック分野において既に行われた GHG 排出量の調査を分類・整理した結果、GHG 排出量に明確な違いが見られた。一方で、元データとなる LCA 論文においては、その前提条件や結果の表記方法は統一されていなかった。今後は、標本数を更に増やすとともに、他の影響領域や焼却以外の廃棄シナリオについても同様の解析を行い、検討を進めたい。

## 4. 謝辞

本研究は、環境省の環境研究総合推進費（S-14）により実施された。

## 5. 参考文献

Norihiro I Koichi S, 環境情報科学 学術研究論文集 29, (2015), pp 177182

# 共通社会経済シナリオ SSP に基づいた CO<sub>2</sub> の健康被害係数の推計

## Estimating human health damage factors related to CO<sub>2</sub> emissions based on shared socioeconomic pathways

○古島康<sup>\*1)</sup>、湯龍龍<sup>2)</sup>、伊坪徳宏<sup>3)</sup>

Yasushi Furushima, Longlong Tang, Norihiro Itsubo

1) みずほ情報総研株式会社, 2) 農業・食品産業技術総合研究機構, 3) 東京都市大学

\* yasushi.furushima@mizuhoir.co.jp

### 1. はじめに

WHO (2004)<sup>1)</sup>は気候変動由来の健康影響を相対リスク (RR: relative risk)として算定しているが、対象とする将来社会像は一つのみである。WHO (2004)の更新版である WHO (2014)<sup>2)</sup>の特徴は、疾病ごとの評価モデルを更新しており、また将来社会像については経済発展の低中高に  
応じた3つのシナリオを対象としていることである。なお、WHO(2014)ではRRは算出されていないが、温暖化有と無の双方の結果を基に逆推計することが可能である。

LCAにおいては、Tangら<sup>3)</sup>がWHO(2004)のRRを使用して、4つの将来社会像を示すSRES (Special Report on Emission Scenarios)<sup>4)</sup>シナリオ別の健康被害係数を算定しているが、RRの知見が古い点が課題である。また、用いた将来社会像については、postSRESとして将来社会の緩和能力と適応の困難さを考慮したSSP (Shared Socio-economic Pathways)<sup>5)</sup>シナリオが新たに開発されている。SSPに応じた気候変動の影響評価研究<sup>6)</sup>も増えていることを踏まえ、SSP別に係数を算定することが望ましいと考えられる。本研究は、Tangらの方法を基にSSP別にCO<sub>2</sub>の健康被害係数を算定することを目的とした。

### 2. 方法

#### 2.1 CO<sub>2</sub>健康被害係数の算定方法

Tangらが提案する方法を基に、SSP別の健康被害係数を以下のように算定した。

CO<sub>2</sub>単位量排出による追加的世界平均気温上昇量の推計は、従来のMAGICC5.3簡易型気候モデルを用いた。

世界平均気温1°Cあたりの上昇に対する地域別疾病別のRRは、WHO(2014)の結果を基に将来社会シナリオ別に算出した(詳細は2.2節に参照されたい)。相対リスクはベース死亡率(温暖化無)に対する温暖化有の場合の死亡率の増加率とした。

SSP別のベース死亡率は次のように推計した。まずは、WHO(2014)が推計した2080年までの疾病別の死亡率と、その死亡率の推計に用いられるGDP/capデータを基に、GDP/capと死亡率の関係式を抽出した。次に、その関係式にSSP別のGDP/capを適用し、2100年までのSSP別のベース死亡率を推計した。

人口データと死亡一件あたりの損失余命 (DALY)は

IIASAとWHO統計データより得た。

以上の方法を踏まえて、計算式を以下に示す。

$$DF_{SSP} = \sum_d \sum_r \sum_t (\Delta TEMP_t \times R_{d,r,t,SSP} \times M_{d,r,t,SSP} \times P_{r,t,SSP} \times D_d) \quad \dots(1)$$

$DF_{SSP}$ : SSP別のCO<sub>2</sub>健康被害係数 (DALY/kg)

$\Delta TEMP_t$ : 時系列の世界平均気温増分 (°C)

$R$ : 気温上昇1°Cあたりのベース死亡率の増加率 (%/°C)

$M$ : ベース死亡率 (%)

$P$ : 人口 (person)

$D$ : 死亡一件あたりの損失余命 (DALY/death)

SSP: SSP1, SSP2, SSP3

$t$ : 20002100;  $r$ : 21地域;

$d$ : 熱中症, 低栄養, デング, マラリア, 下痢, 海岸洪水

#### 2.2 RR/°Cの算出

WHO (2014)では、一つの気温上昇シナリオ (A1B) に対し、低栄養と下痢については経済成長の低中高3シナリオごとの温暖化由来の死亡者数を、2030年と2050年を対象に推計している。本研究では、上記結果(温暖化有)と温暖化無の場合の死亡者数を用いて2030年と2050年のRRを算出した上で、2030年と2050年における気温上昇量でそれぞれを除すことで、低栄養と下痢について2つの年次別、地域別、社会シナリオ別のRR/°Cを求めた。下痢は低中高3シナリオの違いが少ないため、そのままSSP3, SSP2, SSP1に該当させた。低栄養は低中高3シナリオ間の差が大きく、それぞれのベース死亡率の大きさに影響されるため、SSP別のベース死亡率に応じて補正した上で、RR/°CをSSP別に設定した。他の疾病については、WHO(2014)からは中成長のみのRR/°Cしか得られなかったため、全SSPシナリオに対し同じ値を設定した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 RR/°C

本研究を通して算出されたRR/°Cのうち低栄養、下痢、マラリア、海岸洪水について、TangらがWHO (2004)から得たRR/°Cとの比較を行った。その結果を図1に示す。健康被害の大きいアジア、アフリカ、中東地域において、WHO (2014)からは下痢に対して新たな知見が示されていないため、RR/°Cが同程度と算定された。他の疾病

は、WHO(2004) 以後に評価モデルが更新されたことにより、RR<sup>2</sup>Cが大きくなることが明らかになった。例えば低栄養の場合、食料モデルの更新、飢餓リスクから死者数への接続等の知見が新たに加えられている点である。

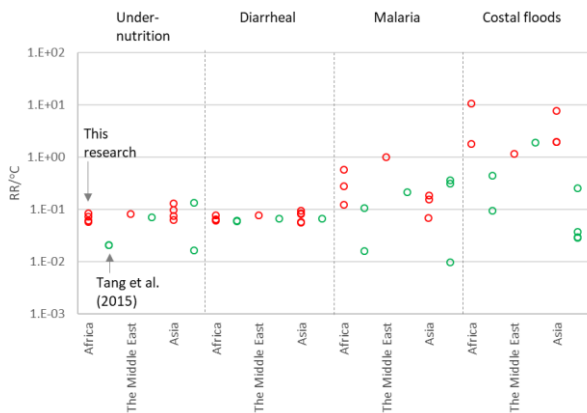


図1 RR<sup>2</sup>Cの比較

### 3.2 SSP別の健康被害係数

図2にSSP別の健康被害係数とその疾病別の内訳を示す。SSP1,2,3別の健康被害係数 (DALY/kg)はそれぞれ $1.3 \times 10^6$ ,  $1.5 \times 10^6$ ,  $2.0 \times 10^6$ であった。シナリオ間では、SSP3が最大で、次いでSSP2とSSP1の順となった。シナリオ間の違いに影響する要因については、低栄養の場合はRR、ベース死亡率と人口に影響される。低栄養以外の疾病の場合は、RRの乖離がシナリオ間で小さいため、ベース死亡率と人口成長の影響が大きい。なお、熱ストレス、海岸洪水についてはシナリオ間のベース死亡率の差が小さいため、人口の影響が最も大きい。

図3に本研究の結果をTangら、De Schryverら<sup>7)</sup>と比較した。Tangらと比較した結果、本研究の結果は3~5倍大きい。ベース死亡率の算定に使用されるGDPと人口は同程度なため、使用したRRによる影響が大きいと考えられる。RRは下痢では従来の結果と同程度だが、他の疾病では大きくなった。またシナリオ間の差については、本研究で小さい結果となった。これは低栄養と下痢ではSSP別のRRを適用したことによる。特に低栄養の場合、SSP3のベース死亡率に対して比較的小さいSSP3のRRを使用したためである。

De Schryverらでは、評価年数、DALY(割引率、重み)およびRRの不確実性を組み合わせて示しているため、直接本研究の結果と比較するのは困難である。しかしながら、本研究における時系列での被害と比較した場合、Individualistで使用される20年間の評価期間は影響の過小評価につながる事が明らかになった。また、Hierarchical(100年間)の結果が本研究より小さいことは、本研究におけるRRの更新に由来すると言うことができる。Egalitarianではより長い評価期間を考慮していることから、本研究においても特にSSP3の場合は影響全体を捉えるには100年では不十分と考えられ、より長い評

価期間を設定することの必要性が示唆された。

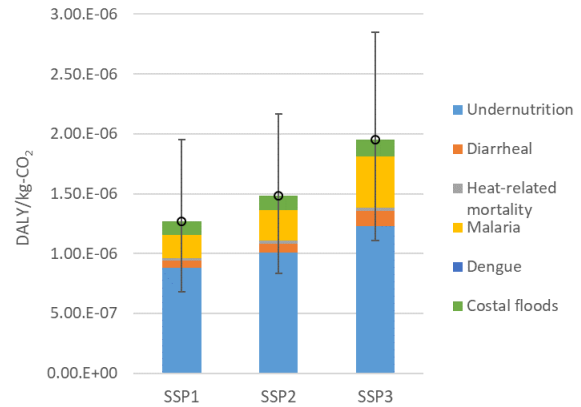


図2 SSP別健康被害係数 (DALY/kg-CO<sub>2</sub>)

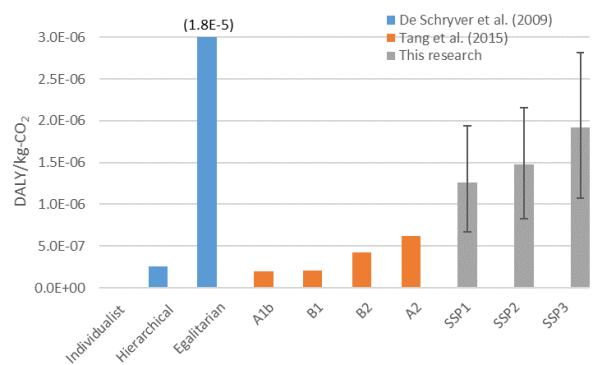


図3 係数の比較

### 1. おわりに

本研究では、将来の経済成長シナリオ別に気候変動による健康影響を評価したWHO(2014)からシナリオ別のRRを推計し、そのRRを用いてSSP別の健康係数を算定した。殆どの疾病において、climatehealth modeの更新によってより大きいRR<sup>2</sup>Cを得たため、既存の被害係数において被害が過小評価されていることが明らかになった。RRがシナリオ別に得られたのは低栄養と下痢に限られているが、特に低栄養の場合、低成長のRRが比較的低い傾向が見られたため、従来の単一のRRを使用した被害係数に比べて、係数間の差が縮まることが示唆された。

### 参考文献

- 1) WHO (2004) Comparative quantification of health risks and regional burden of diseases attributable to selected major risk factors, Geneva
- 2) WHO (2014) Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s, Geneva
- 3) Tang et al. (2015) J Life Cycle Assess DOI 10.1007/s11367-015-0965-9
- 4) Nakicenovic et al. (2000) Special report on emissions scenarios special report of Working Group III of the IPCC, Cambridge University Press
- 5) Van Vuuren et al. (2014) Climatic Change 22 (2):373-386
- 6) Hanasaki et al. (2013) Water use Hydrol. Earth Syst. Sci 373-91
- 7) De Schryver et al. (2009) ST Vol. 43, No. 6, 1689-695

# 世界の植物を対象とした CO<sub>2</sub> の種絶滅リスク係数の推計

## Estimating extinction risk factors related to CO<sub>2</sub> emissions focusing on global plant species

○湯龍龍\*<sup>1)</sup>、大橋春香<sup>2)</sup>、松井哲哉<sup>2)</sup>、田中信行<sup>3)</sup>、伊坪徳宏<sup>4)</sup>

Longlong TANG Haruka OHASHI, Tetsuya MATSUI Nobuyuki TANAKA Norihiro ITSUBO

1) 農業・食品産業技術総合研究機構、2) 森林総合研究所、3) 東京農業大学、4) 東京都市大学

\*tanglonglong@affrc.go.jp

### 1. はじめに

気候変動は生物多様性損失の主因の一つとして、ミレニアム生態系評価で挙げられている。Urban (2015)<sup>1)</sup>が近年の気候変動による生物種絶滅リスクの評価研究を対象に実施したメタ分析によれば、世界平均気温1~4℃上昇に伴い、平均で7.8%絶滅割合が上昇すると推計している。気温と絶滅割合の関係については、固有種(大陸レベル)と非固有種間で約2倍、分類群間では、最も低い鳥類と最も高い両生類に大きな差が確認されている。

ReCiPe(2016)<sup>2)</sup>では、Urban (2015)<sup>1)</sup>の結果を基に算定した絶滅割合(3.7%/℃)を採用している。しかし、これは異なる分類群や地域間の平均的な値であり、地域間、分類群間で大きな違いが係数算定に反映することができない。Tang et al. (2017)<sup>3)</sup>は種分布モデル(MaxEn)<sup>4)</sup>を用いて、種ごとに種の分布変化に由来する絶滅リスク(潜在的絶滅種数)の評価方法を提案している。なお、この研究は方法の提案にとどまり、係数の算定に至っていない。

種ごとに評価する方法は分類群間の違いを示すことができるため、被害係数の精度向上に寄与する。なお、Tang et al. (2017)<sup>3)</sup>方法を用いる場合は、全球スケールでの種分布変化を予測する必要があり、データに対する要求が高い。これに対して、近年は種分布予測に必要な種の分布データと気候データは整備されつつある。例えば、種分布データはGBIF<sup>5)</sup>より、過去に観測される全球スケールにおける種の分布データが公開されている。過去の気温と降雨量を含む気候データも整備されている。上記データを活用して、全球レベルでの種絶滅リスクを考慮したCO<sub>2</sub>絶滅リスク係数の算定が可能である。

本研究は潜在的絶滅種数を指標とし、世界の植物を対象としたCO<sub>2</sub>の種絶滅リスク係数の算定を目的とする。

### 2. 算定方法

CO<sub>2</sub>の種絶滅リスク係数(extinction species/tonCO<sub>2</sub>)は、1トンCO<sub>2</sub>の排出に伴って生じる潜在的絶滅種数と定義した。係数は、種の分布変化の予測(移動能力の設定、将来気温と降雨量の予測)に強く影響されるため、移動能力の設定(完全に移動可能と不能の両極限値)と、5つの気候モデル別に算定する。維管束植物(裸子、被子、シダ)を対象とし、GCM別、移動能力別の絶滅リスク係数の計算方法は以下に示す。

CO<sub>2</sub>単位量あたりの累積気温上昇量[ΔT, (°C・year/ton)]の計算: 1 ton-CO<sub>2</sub>の追加排出による100年間での累積気温上昇量を算定する。

種ごとの絶滅リスク [ $1/Y_{n,G,M,RCP}^{taxon}$ , (extinction species/year)]の推計: まずは、種ごと(n)の100年間(1970-2070)における面積減少率を算出する。将来の面積減少率の算出はGCM(G)、移動能力(M)、RCPを考慮した。次に、その減少率が将来にわたって、不変と仮定した場合の絶滅までの年数(Y)を算出する。最後に、その余命の逆数を1年あたりの潜在的絶滅種数とする。絶滅閾値は本研究での1セル面積(約10 km<sup>2</sup>)の1/10に相当する1 km<sup>2</sup>とする(式4)。

絶滅割合の推計 [ $E_{G,M,RCP}^{taxon}$ , (%/year)] 分類群別(裸子、被子、シダ)に絶滅種数を集計し、評価した対象種数を割って、絶滅割合を出す。上記計算はRCP、移動能力(M)、GCM別に行う。

気温1℃あたりの種絶滅割合 [ $EP_{G,M}^{taxon}$ , (%/°C/year)]の推計: 二つRCPにおける種絶滅割合の差分を気温上昇量の差分で除して分類群別の値を得る。

被害係数 [ $DF_{G,M}$ , (extinction species/ton)]算定: 追加的気温上昇量に分類群別の絶滅割合と世界の存在種数を乗じて、合計すると1 tonCO<sub>2</sub>あたりの潜在的絶滅種数を算出する。分類群別の存在種数は、IUCNより裸子、被子、シダがそれぞれ1,052、268,000、12,000種とした。

よって、計算式は以下のように定義した。

$$DF_{G,M} = \sum_{taxon} (\Delta T \times EP_{G,M}^{taxon} \times N_{taxon}) \quad (1)$$

$$EP_{G,M}^{taxon} = \frac{(E_{G,M,RCP9.5}^{taxon} - E_{G,M,RCP2.6}^{taxon})}{(TEMP_{G,RCP9.5} - TEMP_{G,RCP2.6})} \quad (2)$$

$$E_{G,M,RCP}^{taxon} = (1/n) \times \sum_n (1/Y_{n,G,M,RCP}^{taxon}) \quad (3)$$

$$1 = A_n \times (a_{n,G,M,RCP} / A_n)^{Y_{n,G,M,RCP}/100} \quad (4)$$

$DF_{G,M}$ : extinction risk factor by GCM, migration capacity (extinction species/ton)

$\Delta T$ : additional temperature increment per tonCO<sub>2</sub> emission during 100 years (°C・year/ton)

$EP_{G,M}^{taxon}$ : extinction ratio per °C by GCM, migration capacity (%/°C/year)

$N$ : number of species (species)

$E_{G,M,RCP}^{Taxon}$ : extinction ratio in 100 years by GCM, migration capacity and taxon 絶滅リスク係数( $DF_{G,M}$ )

RCP (%/year)

$TEMP_{G,RCP}$ : temperature rise in 100 years by GCM and RCP (°C)

$Y_n$ : time to extinction of species from the year 1970 (year)

$a_n$ : distribution area of species in the year 2070 (km<sup>2</sup>)

$A_n$ : distribution area of species in the year 1970 (km<sup>2</sup>)

G: 5 GCMs

M: Full migration, No migration

RCP: RCP2.6, RCP8.5

Taxon: Pteridophyta, Gymnospermae, Angiospermae

## 1. 結果と考察

### 3.1 気温の増分( $\Delta T$ )

1 ton CO<sub>2</sub>の追加排出による100年の累積気温上昇量は、気候感度 1.5°C、3°C、4.5°C別にそれぞれ  $2.3 \times 10^{11}$  (°C·year/ton)、 $3.8 \times 10^{11}$  (°C·year/ton)、 $5.0 \times 10^{11}$  (°C·year/ton)と算定された。ReCiPe(2016)が算定した100年間で  $4.1 \times 10^{11}$  (°C·year/ton) 上昇は本研究(気候感度 3°C)の値と同程度であった。

### 3.2 1°Cあたりの種絶滅割合( $E_{G,M}^{Taxon}$ )

被子、裸子、シダの絶滅割合(%/°C/year)は図1に示す。GCMと移動能力の違いを考慮して、100年を考えた場合、1°Cあたりの絶滅割合は最小の約 0.8%/°Cから最大の4.5%/°Cであった。ReCiPe (2016)が採用する値(3.7%/°C)と同程度である。

移動能力の違いは、GCM間の違いと同程度で、最大約2倍の差が確認された。分類群間の関係について、移動可能の場合は、裸子が大きい、被子が小さく、シダは両者の間に位置した。裸子が高い要因は、面積減少率はほぼ同程度(裸子がやや高い)だが、現在の分布面積は裸子が半分以上小さいためである。一方、シダは、サンプル数が少ないものの、現在分布面積が裸子と被子より大きいことが結果に影響した。

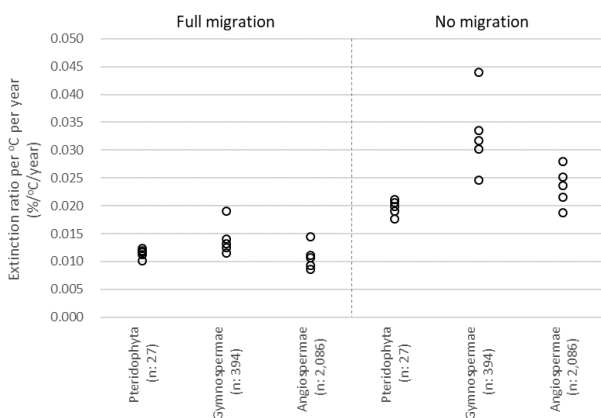


図1 種絶滅割合(%/°C/year)

GCM別、移動能力別の絶滅リスク係数を(図2)に示す。移動可能の係数では、 $0.9-1.5 \times 10^9$  (extinction species/ton) 移動不能は、 $2.0-3.0 \times 10^9$  (extinction species/ton) 算定され移動可能の約2倍大きかった。GCM間の差は次いで大きく、最大約1.5倍の差が算定された。種の分布変化に降雨量も影響するため、からならずとも平均気温の高いGCMほど係数が高くにはならなかった。被子植物は面積減少率が相対的に小さいものの、存在種数が10-100倍多いため、植物係数において支配的な影響であった。シダは次いで大きく、裸子が最も小さかった。

本研究の被害係数に100年間のCO<sub>2</sub>排出量(RCP2.6:  $1.36 \times 10^{12}$  t, RCP8.5:  $6.63 \times 10^{12}$  t)を乗じて、得られた潜在的絶滅種数を植物の総種数(30万種)で割って、100年間の絶滅速度を0.5%-11%と試算した。Pereira et al. (2010)は気候変動による植物への影響を評価する文献2件を基に、気候変動による植物の絶滅速度を0.2%-50%と推計している。本研究の被害係数から得た値と概ね整合する。

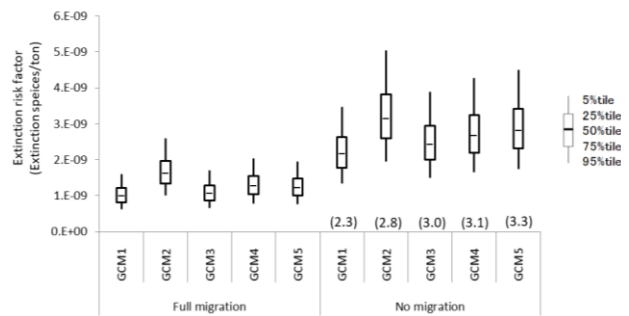


図2 CO<sub>2</sub>の種絶滅リスク係数

## 2. まとめ

本研究は、気候変動に伴う種の分布変化に由来する絶滅リスクを種ごとに推計する方法を用いて、植物を対象にCO<sub>2</sub>の絶滅リスク係数を初めて算定した。既存研究と比較して、絶滅割合と係数の双方において、妥当な結果が得られた。さらに、種ごとに評価するため、分類群間の絶滅リスクの違いが確認できた。今後は本手法を基に、植物以外の分類群を対象にした生物多様性被害係数の算定を行う予定である。

## 参考文献

- 1) Urban (2015) Science 348 (6234): 571-573
- 2) ReCiPe (2016) A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. RIVM Report.
- 3) Tang et al. (2017) IJLCA. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1319-6>
- 4) GBIF (2014) GBIF Science Committee HP
- 5) Pereira et al. (2010) Scenarios for global biodiversity in the 21st Century, Science, 330: 1496-1501

# アジアのメガシティの人間健康に関する緩和策・適応策の評価

## Evaluation of Mitigations and Adaptations for Human Health in Asian Mega Cities

○井原智彦<sup>\*1)</sup>、桑山忠弘<sup>1)</sup>、劉宇<sup>1)</sup>、亀卦川幸浩<sup>2)</sup>、岡田和樹<sup>2)</sup>、山口和貴<sup>3)</sup>、高根雄也<sup>4)</sup>

Tomohiko Ihara, Tadahiro Kuwayama, Yu Liu, Yukihiko Kikegawa, Kazuki Okada, Kazuki Yamaguchi, Yuya Takane

1) 東京大学, 2) 明星大学, 3) 東京電力ホールディングス, 4) 産業技術総合研究所

\*[ihara-t@k.u-tokyo.ac.jp](mailto:ihara-t@k.u-tokyo.ac.jp)

### 1. はじめに

気候変動に伴い、既にさまざまな健康被害が発生している<sup>1)</sup>。気候変動は、人体の暑熱暴露を通じて熱中症や睡眠障害などの直接影響を引き起こすほか、媒介動物の生息域の変化を通じてマラリアやデング熱など動物媒介性感染症を拡大させたり、水や食物を介する伝染性媒体の拡大を通じて下痢や他の感染症を増大させたり、間接影響も引き起こしている<sup>2)</sup>。さまざまな健康被害の中で、現在は低栄養やマラリアといった間接影響が大きいとされるが、これらは経済成長によって軽減されると見られ、今後は熱中症を始めとした直接影響が大きなウェイトを占めていくと予測されている<sup>3)</sup>。

健康被害は人々の集まる地域でより大きな問題となる。都市人口率は増加の一途を辿っており、21世紀に入ると世界の人口の過半は都市に居住するようになった<sup>3)</sup>。現在人口が増加しているのは発展途上国の都市であり、具体的にはデリー、北京、ジャカルタといったアジアのメガシティである<sup>3)</sup>。アジアのメガシティは気候変動のみならず人口増・都市化に伴うヒートアイランド現象によっても気温が上昇すると考えられ、人間健康面で効果的な適応策の導入が待ち望まれる。

そこで、環境省・環境研究総合推進費 S-14-4(3)を構成する著者らは、アジアのメガシティを対象に、人間健康に関するさまざまな緩和策・適応策の費用便益分析を実施し、最終的には、より効果的な緩和策・適応策を設計することを目標に、研究を実施している。本稿では、著者らが実施している研究の手法、および、これまでに得られた結果と今後の方針について概説する。

### 2. 研究手法

メリットのみならずデメリットをも考慮して、対策の有効性を評価するには、環境面も考慮した費用便益分析を実施する必要がある。そのためには、環境影響評価値の経済換算結果とコストを合算する必要がある。評価フローは次の通りである。

#### (1) 評価対象地域のデータベースの整備

都市気候・ビルエネルギーシミュレーションに必要な以下のデータを作成する。

- 都市の幾何形状 (街区内の建物幅、間隔、高度分布)
- 建物の熱物性 (壁体構成、窓面積率など)

- 建物の使用形態 (エネルギー機器スケジュール)
- 交通排熱

都市の幾何形状データは、東京工業大学神田研究室(推進費 S-14-4(1)) が作成したデータを使用する。一方、建物データおよび交通排熱は、現地調査やコンサルタント会社からの聞き取りによって作成している。

#### (2) 都市気候・ビルエネルギーシミュレーション

全球気候の計算結果を上端境界、(1)のデータを下端境界として、ビルエネルギーモデルを内包した気候シミュレーションモデル WRF-CM-BEM<sup>4)</sup>を動かす。都市の気象要素とビルのエネルギー消費量を特別に計算する。ただし WRF-CM-BEM は計算コストが大きいので、緩和策や適応策が導入された多数のシナリオを計算する際には、WRF 計算結果を上端境界として、CM-BEM<sup>5)</sup>を動かす。

#### (3) 人間健康の影響評価

疫学調査を実施する。調査結果を、気象観測データと合わせて解析することにより、気象要素を変数とする直接暑熱影響の被害関数を作成する。

(2)により計算された気象要素を被害関数に代入することで、シナリオ別の直接暑熱影響を評価する。

#### (4) 緩和策・適応策のインベントリ分析・影響評価

緩和策・適応策の製造・廃棄段階や、(2)より算出される使用段階の消費エネルギーのインベントリ分析、ひいては影響評価を実施することにより、緩和策・適応策の各保護対象の環境影響を算出する。影響評価手法には LIME3<sup>6)</sup>を使用する。

#### (5) 統合評価

(3)による健康影響、(4)による環境影響を、対象地域住民の価値観で重み付け<sup>7)</sup>することで、各シナリオの統合化された環境影響を算出する。また、私的あるいは社会的コストと合算することにより、費用便益分析<sup>8)</sup>を実施し、各緩和策・適応策の有効性を評価する。

### 3. 評価対象

アジアのメガシティのうち、低緯度に位置し、かつ都市圏人口が東京-横浜に次ぐ第2位ともいわれるインドネシア・ジャカルタ (都市圏人口 31,760 千人)<sup>9)</sup>を評価対象地域とする。

適応策としては、ヒートアイランド対策としても位置づけられる緑化・高反射率塗料、さらに省エネルギー効

果が見込める電気自動車・ヒートポンプ給湯機、また直接暑熱影響を直接改善できるエアコンなどを評価する予定である。緩和策は全球に影響を及ぼすため、代表的濃度経路(RCP)を変化させて分析するが、都市特有の緩和策として上述の電気自動車・ヒートポンプ給湯機やエアコンの効率化も評価することを検討している。

健康影響としては、睡眠困難と疲労を対象とする。

#### 4. 結果<sup>10,11)</sup>

疫学調査を実施、結果を解析し、エアコンあり・なし別の睡眠困難と疲労の被害関数を作成した<sup>12)</sup>。睡眠困難は22時気温、疲労は日最高気温を変数とした。

エアコン使用率向上（住宅の最大使用率15%→90%）の効果は大きく、排熱によって気温を最大0.7℃上昇させるが、睡眠困難の障害調整生存年(DALY)を1か月あたり10,000年軽減させ、電力消費増に伴う地球温暖化・大気汚染の環境影響増を考慮しても、20百万米ドルの純便益が存在することがわかった。エアコンの高効率化を実施すれば、便益を維持しつつ費用を減らせるため、純便益はさらに大きくなる。

屋上緑化は、都心ほど効果があり最大0.22℃の低下が見込め、空調エネルギー消費は都市全体で1.1%減となった。ただし導入効果は、蒸発効率や土壌層の厚さ（図1参

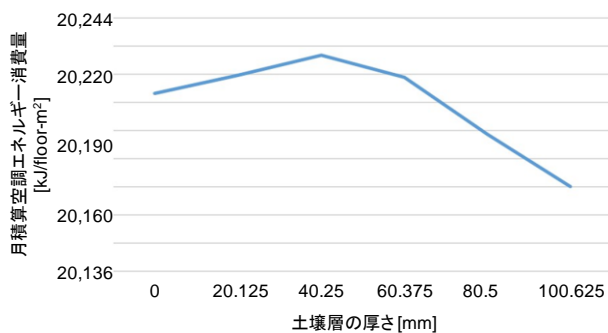


図1 ある業務街区の土壌層と空調エネルギー消費量の関係

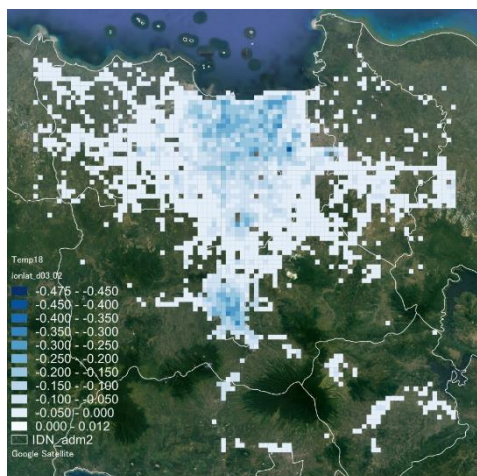


図2 電気自動車による気温低減効果マップ（18時）

照)によるため、適切な緑化形態を探索する必要がある。

電気自動車は、都心を中心に朝夕に効果があり最大0.43℃とかなりの気温低減効果が見込め（図2参照）、省エネルギーも期待できた。

#### 5. おわりに

アジアのメガシティにおける人間健康に関する緩和策・適応策の評価を実施した。対策の導入効果を正しく見積もるため、エアコンの部分負荷特性や緑化モデルを改良するほか、費用便益分析に向けて、対策そのもののLCAや枠組みの整理も進めていく予定である。

また、ジャカルタ以外の都市への展開に当たってネットワークとなる建物データや直接暑熱の被害関数の汎用化についても検討していきたい。

#### 謝辞

本研究の一部は、環境省環境研究総合推進費 S-14「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」（研究代表者：沖大幹・東京大学教授）の一環として実施したものである。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) World Health Organization: Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s, (2014)
- 2) 井原智彦: 日本ヒートアイランド学会誌, 10, (2015), pp.36-37.
- 3) United Nations: World Urbanization Prospects, the 2014 revision, (2014) <https://esa.un.org/unpd/wup/CD-ROM/>
- 4) Kikegawa Y *et al.*: Theoretical and Applied Climatology, 177 (1-2), (2014), pp.175-193.
- 5) Ihara T *et al.*: Applied Energy, 85 (1), (2008), pp.12-25.
- 6) 伊坪徳宏ほか: 第9回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, (2014), pp.262-263.
- 7) Murakami K *et al.*: International Journal of Life Cycle Assessment, (2017), pp.1-16.
- 8) 井原智彦: 第11回日本ヒートアイランド学会全国大会予稿集, (2016), pp.114-115.
- 9) Demographia: World Urban Areas 13th Annual Edition, (2017) <http://demographia.com/db-worldua.pdf>
- 10) 桑山忠弘ほか: 第13回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, (2018), (in press)
- 11) Liu Y *et al.*: Proceedings of the 10th International Conference on Urban Climate, (2018), (in press)
- 12) Ihara T and Kusama R: Proceedings of the 21st International Congress of Bimeteorology, (2017), (USB memory)

# 気候変動適応策としての堤防を対象としたLCAを考慮した費用便益分析

A preliminary study of life cycle based cost benefit analysis for dikes  
as an adaptation of climate change

○小関康雄<sup>\*1)</sup>、熊野直子<sup>2)</sup>、田村誠<sup>2)</sup>、伊坪徳宏<sup>1)</sup>

Yasuo Koseki, Naoko Kumano, Makoto Tamura, Norihiro Itsubo

1) 東京都市大学、2) 茨城大学

\* ykoseki@tcu.ac.jp

## 1. はじめに

気候変動問題は、「緩和策」と「適応策」の両面からの検討が国際的に議論されている。

その緩和策や適応策の実現には多くの費用と時間が必要で、その優先順位の決定が非常に重要である<sup>1)</sup>。

筆者らは、それらの選択評価手法として、LCCとLCAの両面から「限界削減費用分析(MAC)」や「費用便益分析(CBA)」を用いて、緩和策となる「省エネ電気製品」<sup>2)</sup>の導入効果、適応策となる「浄水器」<sup>3)</sup>と「海水淡水化プラント」<sup>4)</sup>の導入効果を検証してきた。

一方、海面上昇等の浸水リスクに対する適応策の一つに堤防の設置、嵩上げが挙げられる。本研究は、LCCとLCAの観点から全球規模で堤防を導入した際の費用便益分析(CBA)の検証結果を報告する。

本研究は、環境省の環境研究総合推進費(S-14)の研究の一環で実施している。

## 2. 研究方法

### 2.1 LCCとLCAを考慮した「費用便益分析」

図1に、堤防を対象とした評価手法を示す。目的により複数の定義法があるが、本研究では「費用:C」として、堤防の新設または嵩上げ工事のライフサイクルコスト:LCC(内部コストと呼称)とライフサイクル全体での環境影響コスト:LCA(外部コストと呼称)の合計で定義した。一方、「便益:B」は堤防導入により削減できる浸水被害額と定義した。

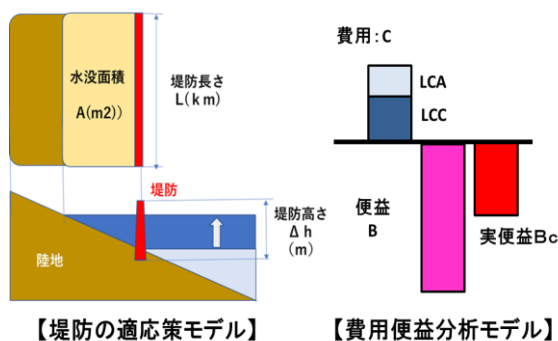


図1 LCC、LCAを考慮した費用便益分析

浸水被害額と便益(堤防により削減される浸水被害額)は、2010年を基準に2100年の海面上昇 $\Delta h$ (cm)、浸水沿岸長さL(km)、浸水面積A(km<sup>2</sup>)から計算した。一方、海面上昇 $\Delta h$ と浸水沿岸長さLから堤防導入の費用(C=LCC+LCA)を計算した。

そして、図1のように便益(B)から費用(C)を差し引いた有効な実便益(Bc)と、両者の比率(B/C)を用いて評価した。

### 2.2 費用:Cの推計

図2に、堤防モデル、LCC(内部コスト)、LCA(外部コスト)の計算のためのシステム境界を示す。堤防には地形や予算により各種の形式があるが、今回対象とした堤防モデルは、捨石部、ケーソン部、嵩上げ部より構成され、それぞれ2m、8m、2mの合計12mの高さを仮定した。LCC、LCAともに堤防の新設又は嵩上げ工事に伴う材料製造・輸送と建設からなる製造段階のみを対象とし、使用段階と廃棄段階は微小なのでカットオフした。なお、外部コストはLCAで算定した統合化値(LIME2値)で定義した。

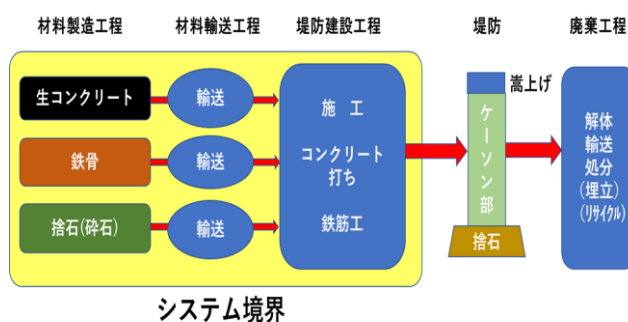


図2 堤防のLCC、LCAのシステム境界

### 2.3 便益:Bの推計

「便益:B」の算定に利用した四栗ら<sup>5)</sup>の浸水被害額の推計方法を示す。浸水被害額は、将来の海面上昇等に関する代表的濃度パス(RCP)と人口やGDPに関する社会経済シナリオ(SSP)に影響される。まず、RCP、SSPシナリオから2010~2100年の海面上昇に伴う潜在的浸水域を特定し、浸水面積A、浸水沿岸長さLを計

算した。次に、世界 171 カ国の水害被害額(1980～2013年)、被害国の人口 (POP) と一人当たり国内総生産 (GDP) との関係式を重回帰分析から求めた。

浸水する国の POP と GDP のシナリオ値から、前述の関係式を用いて 2010～2100 年の浸水被害額が計算される。こうして四栗ら<sup>5)</sup>は、2100 年の海面上昇に伴う浸水被害額が RCP8.5-SSP1 (持続可能社会シナリオ) で約 45 兆円、RCP4.5-SSP3 (分断社会シナリオ) で約 15 兆円になると推計した。


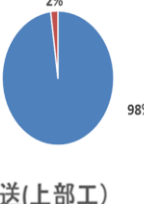
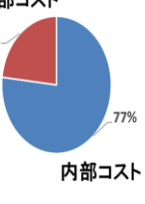
これら RCP/SSP シナリオの組み合わせた被害額等から、堤防を導入した場合に軽減される浸水被害額を便益として求めた。

### 3. 研究結果と検討

#### 3.1 LCC と LCA の結果

表 1 に、堤防 1km 当たりの嵩上げ(2m) 工事の場合の LCC と LCA の原単位の計算結果 (億円/km) を示す。

表 1 堤防嵩上げの LCC と LCA 結果 (億円/km)

	LCC(内部)原単位	LCA(外部)原単位	コスト原単位
嵩上げ工事	1.91億円/km 	0.58億円/km 	2.49億円/km 

その結果、堤防の嵩上げ (2m) では、堤防 1 km 当たりの内部コスト (LCC) は 1.91 億円/km、外部コスト (LCA) は 0.58 億円/km で、合計のコスト原単位は 2.49 億円/km である。原単位の内訳は、上部工の工事に比べ輸送の影響は少なく (2～14%)、外部コスト (LCA) に比べ内部コスト (LCC) が支配的 (77%) である。このコスト原単位 (嵩上げ 2m) を用いて、海面上昇  $\Delta h$  (cm) と浸水沿岸長さ  $L$  (km) の値から、費用 ( $C=LCC+LCA$ : 億円) が計算できる。

#### 3.2 堤防の費用便益分析 (CBA)

図 3 に堤防の費用便益分析 (CBA) の評価結果を示す。ここでは、2010 年を基準に 2100 年の予測値に対して、ケース 1 (RCP4.5 と SSP3) とケース 2 (RCP8.5 と SSP1) の 2 つの評価結果を示した。

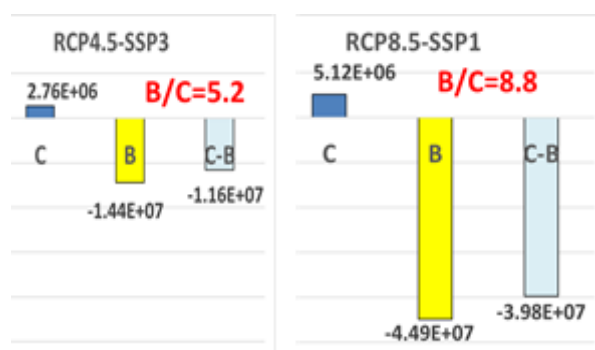


図 3 費用便益分析 (全球レベル)

両方のケース共に、LCC と LCA を考慮した費用 (C) を差し引いても浸水被害の低減額 (実便益:  $B_c$ ) が大きくなり、全球規模で評価した場合に堤防の導入は浸水被害に対して経済合理的なことが明らかになった。さらに、便益/費用 (B/C) 比の評価でも、両者共に 1 以上となり、その効果が大きいと評価された。その効果 (B/C) は、被害を大きく見積もるケース 2 がケース 1 より大きい ( $8.8 > 5.2$ )。

### 4. まとめ

気候変動適応策として、LCC と LCA を考慮した費用便益分析 (CBA) に基づき、海面上昇による浸水被害を防ぐための堤防の導入効果を全球レベルで検討した。

その結果、有効な実便益 ( $B_c = \text{便益} - \text{費用}$ ) と便益/費用 (B/C) 比の指標から、堤防による浸水被害抑制策には経済合理性があることが示唆された。

今後は、本評価手法を用いて、地域性を考慮した国ごとの堤防の適応効果を試算するとともに、LCC、LCA と被害額の推定精度を向上させ、本評価法の代表性と妥当性を検討する予定である。

### 5. 引用文献

- 1) 環境省：気候変動の影響への適応計画, 2015. 11. 27 閣議決定
- 2) 小関ら：LCA を活用した気候変動緩和策の限界削減費用分析評価の一試行, 第 11 回日本 LCA 学会研究発表会, (B3-06) 2016. 3
- 3) 小関ら：気候変動適応策としての浄水器を対象とした費用便益分析, 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会, (B1-20) 2017. 3
- 4) 小関ら：「気候変動適応策」としての海水淡水化プラントの環境影響評価, 第 51 回日本水環境学会年会, (1-E-11-1) 2017. 3
- 5) 四栗ら (2017)：RCP/SSP シナリオに基づく全球沿岸域での海面上昇による浸水影響評価, 土木学会論文集 G (環境), 73 (5), 369-376