

システム研究グループ



グループリーダー・
主席研究員

秋元 圭吾

【コアメンバー】

主席研究員	友田 利正	研究員	林 礼美
副主席研究員	永田 敬博	研究員	有野 洋輔
主任研究員	和田 謙一	研究員	ショアイ・テラニ・ビアンカ
主任研究員	長島美由紀	研究員	魏 啓為
主任研究員	本間 隆嗣	研究員	王 楠
主任研究員	佐野 史典		
主任研究員	小田潤一郎		
主任研究員	山川 浩延		
主任研究員	金星 春夫 (企画調査グループ兼務)		

システム研究グループの研究活動報告

システム研究グループは、システムの思考、システム的な分析を通して、地球温暖化やエネルギー対応に関する有用なる情報提供を国内外に行っている。最近の研究の中から3つのテーマを紹介する。1つ目は、GDPとCO₂排出量のデカップリングに関する分析、2つ目は、パリ協定国別貢献NDCsの排出削減努力の評価、3つ目は、温暖化適応策の経済性の評価である。国内外の政策動向を踏まえながら、気候変動に関する政策において重要と考えられるトピック等について、分析、評価を行うことで、より良い温暖化対策・政策立案に貢献してきている。

1. GDP成長とCO₂排出量増加のデカップリング

近年、先進国の一部では、GDPは上昇しているものの、CO₂排出量は減少している（GDP成長とCO₂排出量増加のデカップリング）。また、世界全体でもGDPは成長しているものの、CO₂排出量は近年ほぼ横ばいになっている。その要因について分析を行った。

1.1. 世界全体の動向

世界GDPとCO₂排出量の関係は基本的に強い正の相関が見られる。2013~15年にかけて排出量はほぼ横ばいだが、長期の傾向で見ると、むしろ2009~13年の間の排出の伸びが大きかったものが調整されてきているに過ぎないと見ることができる。長期の排出トレンドからすると、2014年および15年の排出量は、

その長期的トレンドに戻ってきたに過ぎないと考えるのが自然ではあるが、2000~15年の排出実績に限って線形回帰を行った結果を基準にとると、2015年の実績排出量は約11億トンCO₂少ない。この11億トンの削減の要因について分析、考察を行った。

RITEによる要因分析によれば、この内、鉄鉄とセメントの生産調整でそれぞれ約2.5億トンCO₂、約1.7億トンCO₂の削減効果分と推計され、これは主に中国の影響である。鉄やセメントのストック量等からして、中国では将来的にも再び大きく増大するようなことはない可能性が高い。しかし、インドなどの途上国においては、今後の増大が予想され、世界全体では生産増大のトレンドは続くと見られる。一方、米国のシェールガスの利用拡大による効果は約2.2億トンCO₂と推計される。シェールガスは、石炭等の他のエネルギーよりも安価なために急速に利用拡大したものであり、環境制約や環境政策によって利用拡大が起こり、CO₂

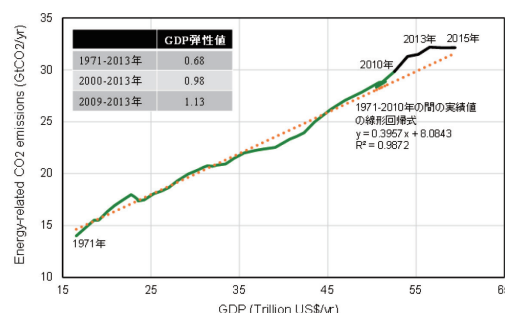


図1 世界のGDPとエネルギー起源CO₂排出量の関係

減少につながったものではない。これは明確なデカップリング効果である。再エネ拡大の効果もあるものの、これによる排出削減効果は1.6億トンCO₂程度と推計された。

1.2. 主要先進国の動向

英国等の欧州諸国では、GDPは上昇しているものの、CO₂排出量やエネルギー消費量は減少傾向にある。図2に英国における1995～2011年の間の生産ベースおよび消費ベースのCO₂排出量を示す。生産ベースCO₂排出量は当該国で燃焼し排出が行われた排出量であり、通常報告される当該国の排出量に相当する。一方、消費ベースCO₂排出量は、製品等を輸出入した場合、それらを製造した際の排出量を加算もしくは減算し、当該国のCO₂排出量を算定したものである。生産ベースのCO₂排出量は大きく減少しているが、消費ベースのCO₂排出量はほとんど減少していないことがわかる。すなわち、エネルギー多消費の製造業からサービス産業への産業構造変化が進みGDPは増えるものの、国内でのCO₂排出は減少しているが、製品の形で引き続き購入することで、世界の他の国で排出がなされ、世界全体では削減に寄与していないということである。なお、英国では白熱灯から蛍光灯、LEDなどへの転換や高効率ガス機器の普及によってエネルギー消費量の低減が進みデカップリングに寄与している部分は見られるが、全体の傾向を説明できるほど大きなものではない。また、別途の研究によれば、英国のGDP成長の一つの大きな要因は、高レベルスキルの移民労働者によるものとの研究がある。

なお、イタリアでは、英国と同様に電力消費量の減少が見られるが、GDPの減少も起こっており、カップリングしている状況にある。

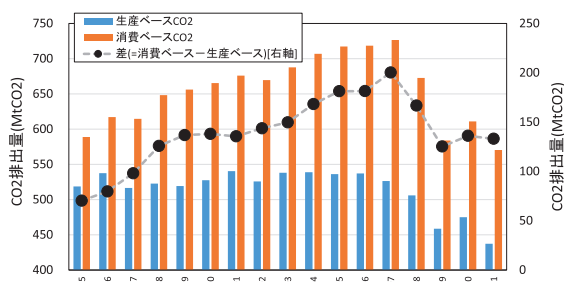


図2 英国の生産ベースCO₂、消費ベースCO₂排出量 (OECD (2015) より作成)

1.3. 日本の動向

日本はこれまで製造業を比較的大きな比率で維持してきた。その中で、経済成長率も大きくはないものの、CO₂排出量もほぼ横ばいとなっており、大きなデカップリングの傾向は見られていない。ただし、東日本大震災後の電力料金上昇の中で電力消費量の低下が見られる(図3)。行動変容による節電の進展、LED照明等の省エネ機器の普及等による部分もあるが、製造業の停滞の要因もあると考えられ、引き続き動向とその要因の分析を進めることが重要である。英国で見られたように、サービス産業への産業転換がEUの傘の下で実現したようなことが、日本で当てはまらないと考えられ、適切な対応をしていくことが必要である。

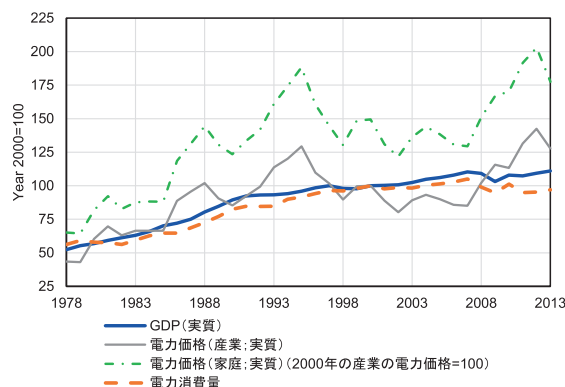


図3 日本におけるGDP、電力料金と電力消費量の推移

1.4. デカップリングのまとめ

持続的な温暖化対策のためには、GDPとCO₂排出量のデカップリングが重要である。シェールガス革命のように安価かつ低炭素なエネルギー供給を実現し、デカップリングに大きく寄与した事例もある。また、LED照明もコストが急激に低下し、コスト負担がほとんどなく省エネを実現し、デカップリングに寄与してきている。しかし、最近の世界のトレンドの最も大きな要因は、中国における素材産業の生産調整による考えられ、大きなトレンドとしてはGDPとCO₂排出量のカップリングは続いていると考える方が妥当である。また、一部の国に見られるデカップリングは、産業構造の変化によるところが大きく、消費構造の変化によるものではない。よって、世界の別の国にCO₂排出量が移転しているところが大きい。グローバルでの対策が重要であるし、GDPとCO₂排出量のデカップリングをもたらす技術の革新またそれによって誘発され得る社会の革新が必要である。

2. パリ協定NDCsの排出削減費用の評価

2.1. はじめに

2015年12月にパリで開催された国連気候変動枠組条約（UNFCCC）第21回締約国会議（COP21）において、2020年以降の気候変動対策の新たな国際枠組となるパリ協定が合意され、2016年11月に発効した。パリ協定は、各国が自主的に目標を宣誓し、それを国際的にレビューする枠組となっており、日本を含め各国は、約束草案として自国の排出削減目標をCOP21に前後して宣誓・提出した（パリ協定合意後はNationally Determined Contributions（NDCs）とされている）。

今後、2℃目標等の長期目標との整合性を確認しつつ（グローバルストックテイク）、NDCsの実効性を高めるために、各国の排出削減目標の「排出削減努力」を適切に評価して各国にフィードバックすることを通し、その努力の差異が是正されるような枠組を構築することが重要であると考えられる。ここでは、排出削減費用をその努力の指標の1つとして取り上げ、システム研究グループが開発してきている世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+を用い、各国のNDCsの排出削減費用について評価を行った。

2.2. 世界主要国のNDCsの排出削減費用

図4に世界主要国のNDCsのCO₂限界削減費用の推計結果を示す。スイス、日本、EU28は200\$/tCO₂を超える水準にあると評価されている一方、中国やインド等では0\$/tCO₂と評価されており、NDCsのCO₂限界削減費用は国によって大きな差異があると推計されている。この時の世界全体の排出削減費用はGDP比で0.38%程度と見込まれている。一方、各国のNDCsによって得られると見込まれる世界全体の排出削減量を、世界全体で最も費用効率的に達成した場合（各国のCO₂限界削減費用が均等化する排出削減分担となる）、CO₂限界削減費用は6\$/tCO₂、GDP比排出削減費用は0.06%と推計された。

このように、各国がNDCsを達成した場合の世界全体の排出削減費用0.38%は、世界全体で最も費用効率的となる排出削減分担の下での0.06%に対して6.5倍程度と相当大きな費用になると推計されている。これは、NDCsにおいては、エネルギー効率の高い技術の導入が進んでいる日本等の先進国を中心により大きな排出削減を進め、安価な排出削減対策が豊富に存在する新興国や途上国での排出削減は相対的に小さく

なっていることに起因する。

図4のようにCO₂限界削減費用が国によって大きく異なる状況は、いわゆる炭素リーケージを引き起こす要因となり、世界全体での排出削減の実効性が低下する危険性が懸念される。ただし、現実には世界全体でCO₂限界削減費用が均等化するような排出削減分担とすることは非常に困難であるし、例えばGDP比排出削減費用（各国の経済力に応じた負担）といった指標を考慮すれば、CO₂限界削減費用の均等化が必ずしも公平・衡平であるわけでもない。今後取り得る対応として、CO₂限界削減費用が低いとみられるNDCsを提出している国には、更なる排出削減の深堀を促していくことが重要と考えられる。

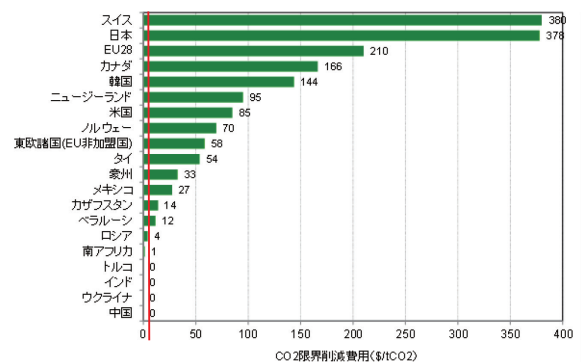


図4 世界主要国のNDCsのCO₂限界削減費用

2.3. 日米欧における政策や国情を踏まえたNDCsの排出削減費用

現実には、各種政策を用いてNDCsの達成が図られることとなるが、気候変動緩和に関して費用効率的な対策ばかりがとられるとは限らず、非効率な対策もあり得る。また、気候変動緩和のみを考慮して意思決定がなされることはなく、政治的、社会的な制約を鑑みたと上で排出削減を行うこととなる。本節では、日米欧について、政策や国情を踏まえたケース(表1)を想定し、その想定が排出削減費用に及ぼす影響の分析を行った。

米国については、費用最小化の下でNDCを達成するケースと、行政、立法等のシステム上、連邦レベルで新規の温暖化対策の法律制定が困難なことを鑑み、発電部門での排出削減はCPP規制で見込まれる以上に進まず、その他の部門で排出削減を進めてNDCを達成するケースの分析を行った。図5に示すように、費用最小化のケースでは、CO₂限界削減費用は76~94\$/tCO₂程度と推計されるが、このケースでは発電部門での対策（石炭火力からガス火力への転換や風力発電の拡大等）が大幅に取られており、発電部門での

表1 想定した分析ケース

		想定
米国	I-a	費用最小化の下で2005年比▲26%
	I-b	費用最小化の下で2005年比▲28%
	I-c	発電部門での排出削減はEPAによるCPPの評価に留まるとした上で2005年比▲26%
	I-d	発電部門での排出削減はEPAによるCPPの評価に留まるとした上で2005年比▲28%
EU28	II-a	費用最小化の下で1990年比▲40%
	II-b	英国は1990年比▲40%、英国以外の27か国も1990年比▲40%
	II-c	ETS対象部門と非ETS対象部門を区別して1990年比▲40%
日本	III-a	費用最小化の下で2013年比▲26%。但し、原子力発電の比率は最大20%
	III-b	費用最小化の下で2013年比▲26%。但し、原子力発電の比率は最大15%
	III-c	電源構成をNDCにあわせた(原子力20%等)上で2013年比▲26%
	III-d	原子力発電を15%、再エネを29%とし、残りの火力の比率をNDCにあわせた上で2013年比▲26%

対策がCPP規制以上に進まないとしたケースでは、費用最小化のケース以上に発電以外の部門での排出削減が必要となり、CO₂限界削減費用は333~421\$/tCO₂と大幅に上昇すると推計された。

EU28については、費用最小化の下でNDCを達成するケースと、ブレグジットを考慮したケース(英国以外の27か国で1990年比40%を達成するケース)、ETS対象部門と非ETS対象部門を区別したケースの分析を行った。費用最小化のケースではCO₂限界削減費用は210\$/tCO₂と評価される一方、ブレグジットを考慮したケースにおいては英国以外の27か国のCO₂限界削減費用は230\$/tCO₂程度に上昇する(この時、英国のCO₂限界削減費用は40\$/tCO₂程度)と評価された。これは、英国を含めてEU28全体で40%削減を図る場合は、英国で40%以上の削減を進めることが費用効率的であるが、英国が40%の削減に留まると、英国以外の国の費用が上昇することを意味する。ETS対象と非対象を区別したケースは、ETS対象部門では提示されている排出割り当て以上の削減が進まない想定したケースであるが、ETS対象部門のCO₂限界削減費用は70\$/tCO₂と評価される一方、ETS非対象部門のCO₂限界削減費用は480\$/tCO₂と推計された。なお、ETS非対象部門のCO₂限界削減費用は均等化すると想定したが、実際には各国の政策に依る所となるため、費用は更に増大する可能性がある。分析からは、EU全体で40%削減を費用効率的に進めるという視点では、ETS対象部門の排出枠は過剰であると言える。

日本については、原子力発電に上限を想定しつつ費用最小化の下でNDCを達成するケースと、NDCにおける電源構成に準拠するケース(原子力発電の上限を

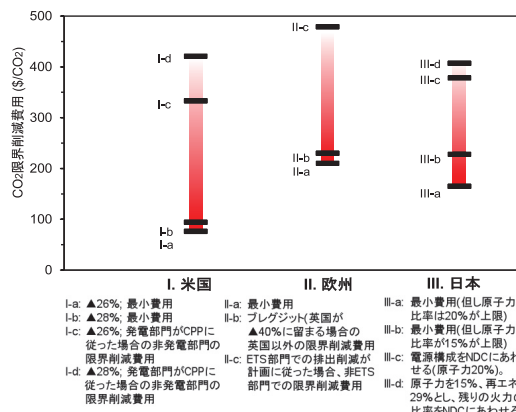


図5 日米欧のNDCsのCO₂限界削減費用

15%とするIII-dケースでは、非化石電源で44%の比率を想定)について分析を行った。原子力発電の上限を20%とした上での費用最小化の場合、CO₂限界削減費用は165\$/tCO₂と推計された。原子力発電の再稼働が順調に進展せず、NDCにおける電源構成(原子力発電の比率は20~22%)の水準とすることは容易ではないと想定したIII-bケース(原子力発電の上限を15%と想定)では、CO₂限界削減費用は230\$/tCO₂程度にまで上昇する。原子力発電の再稼働の進展によって、NDC達成のための排出削減費用は大きく影響を受けると言える。S+3Eの観点から決定されたNDCにおける電源構成比率にあわせた上で排出削減を行う場合、CO₂限界削減費用は380\$/tCO₂を超える水準になると推計された。現実の世界はCO₂排出削減のみを考えて動いているわけではなく、多目的性がある中でバランスがとれた対応をとることが重要である。こうした状況を踏まえると、CO₂排出削減のみを単一目的とした費用最小化の下での排出削減費用に比べ、その費用は高いものとなり得る。

2.4. NDCs評価のまとめ

世界主要国のNDCsの排出削減費用の比較を行うと共に、日米欧について、関連する政策や国情が排出削減費用に及ぼす影響の分析を行った。CO₂排出削減以外にも様々な目的を有する現実社会では、費用最小化の下での排出削減費用に比べてより高い費用が必要となり得る。高い排出削減費用により経済を悪化させ、様々なリスクが大きくなる可能性も懸念される。国際的に調和した実効性のある排出削減対策を取りながら、こうしたリスクを十分に理解した上で、排出削減費用の大幅な増大を避けた、柔軟且つ持続的な対応をとることが重要である。

3. 温暖化適応策の経済影響・経済効果の評価

3.1. はじめに

温暖化対応のリスク管理として、気候変動緩和費用と適応費用、気候変動残余影響について定量的かつ総合的な把握が重要である。本研究では、これまで十分に評価されていなかった、温暖化適応策の経済影響・経済効果に関する分析を実施した。主に、適応策の経済影響（温暖化による影響被害を軽減させる効果の他に、適応策投資による経済効果）について評価することが目的である。適応策の効果は局所的かつ短期的であるため、(何も対策をとらない場合に)温暖化被害が確実に増加することが認知されていれば、被害軽減のための適応策投資は効用を高めると期待され、合理的な経済活動とみなされる。

本研究では、2100年までの期間の影響被害・適応策評価が可能な動的モデルを新たに開発し分析した。分析の第一段階として、海岸部門の適応策に焦点を当てた。海岸部門の適応策による温暖化影響被害の軽減に加え、適応策として資本ストックへの投資による波及効果についても、産業間の定量的関係を明示的に表示した産業連関構造を考慮し、適応策に関する定量的な評価を行い、気候変動戦略における適応策の有効性について分析した。また、気候感度に関する感度分析として、気候感度が高いシナリオについて、影響・適応費用の分析を行った。最後に、リスク管理の観点から、緩和評価と本研究から得られた影響・適応評価を合わせた対応戦略について考察した。

3.2. 分析の枠組み

温暖化影響被害とその影響を低減する適応策の導入による経済影響を評価するために、トップダウン型経済モデルを新たに開発した(図6)。モデルは、世界全体の割引後消費効用を最大化する、動的非線形最適化モデルとして定式化した(割引率は年3%想定)。モデルの評価対象期間は、基準年を2011年とし、代表時点を2030、2050、2075、2100年として最適化計算を行う。世界全体を12地域(日本、北米、EU、中国、インド、サブサハラアフリカなど)に分割し、また産業を10産業(農業、素材産業、社会サービス産業など)に分類して評価した。モデルでは、全球平均気温・全球平均海面上昇に対して、温暖化被害・適応策の経済影響が分析可能である。現バージョンでは、緩和策の影響を考慮していない。

ここでは、温暖化影響被害を、海岸部門とその他部

門に分類した。その他部門の温暖化影響被害については、フローであるGDPへの被害を、全球平均気温の二次関数を想定し定式化した。その他部門における適応策は現段階では考慮していない。

海岸部門の影響被害と適応策は文献¹⁾に基づき想定した。影響被害に関して、沿岸域の氾濫による資本ストックへの被害を想定した。適応策として、沿岸域の氾濫に対して防護する沿岸堤防を想定した。沿岸堤防は、ストック(金額ベース)として明示的に扱い、その投資費用は、導入量の二次関数を想定した。なお、温暖化影響がないと想定した場合においても、経済発展によりある程度の堤防建設が増強されると想定した。

このようなモデル化により、地域別・産業部門別に、フローの投資の効果や資本ストックへの影響などを明示的に考慮し、温暖化影響によりストックが棄損した場合には、単年ではなく複数年にわたって影響が及び効果等を含めて精緻に分析することが可能である。

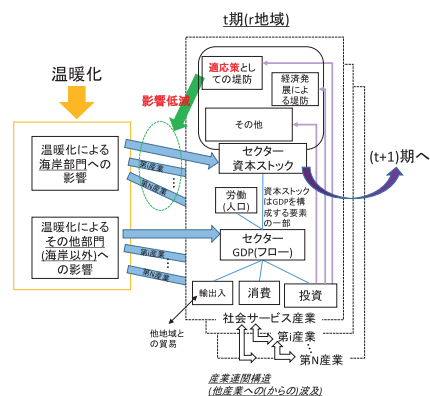


図6 温暖化被害・適応策と開発した経済モデルの関係

3.3. 分析結果

2100年・平衡気候感度(C.S.) 3.0°C・RCP²⁾ 8.5(2100年の全球平均気温上昇は約4.2°Cを想定)において、適応策が無い場合には世界全体でGDPロス5.6%(気候変動無ケース比)であるが、適応策によって3.1%まで低減されると推計された(図7)。この時、適応策として沿岸堤防に必要な追加的建設投資額は2100年でGDP比約0.02%と推計された。沿岸堤防の投資増加およびその波及効果による経済効果はGDPに占める割合が小さいが、沿岸堤防建設による温暖化被害の低減の効果が非常に大きいことが示された。

温暖化被害影響・適応策の費用だけではなく、緩和費用も含めて対応戦略を議論するために、図8には、

適応の有無および気候感度の差異による、世界全体の影響・適応費用および緩和費用を示した。本研究では緩和策については分析していないので、緩和費用としてIPCC-AR5-WGIIIのデータ（複数のモデル分析結果の中央値）を用いた。ただし、この緩和費用推計は基本的に世界全体での費用最小化（限界削減費用を世界で均等化した理想的な状況）を前提に推計されたものである点に留意が必要である。

気候感度3.0℃の場合、影響・適応策の費用について、精度の課題やティッピングエレメントの未考慮などいくつかの不確実性があるが、本分析では、適応有の場合は、RCP8.5が最も費用が小さく、また、適応無の場合にはRCP4.5（2100年に全球平均気温上昇が約2.3℃）が最も小さいと推計された。本研究の範囲では、緩和および影響・適応の費用を含め総合的に考慮すると、最も厳しい緩和策シナリオであるRCP2.6（2100年に約1.6℃上昇）は、必ずしも費用効率的とは言えないことが示唆された。

また、気候感度が0.5℃高い3.5℃想定とした場合でも、適応策によってかなりの影響被害を抑制できる可能性があることが示された。RCPシナリオ間の結果の傾向は、気候感度が3.0℃の場合と同じ傾向を示した。

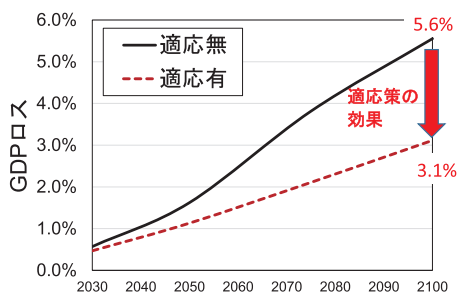


図7 世界GDPロスの変化

注：気候感度3.0℃のRCP8.5シナリオの場合であり、2100年の全球平均気温上昇は約4.2℃を想定した。

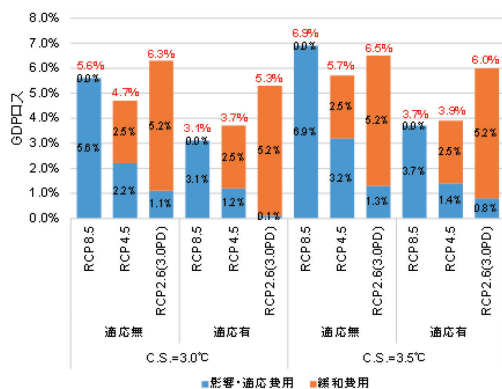


図8 世界全体の温暖化影響被害・適応費用および緩和費用 (適応の有無および気候感度の差異)

注：PD: Peak and Decline

3.4. おわりに

本研究では、温暖化影響・適応策に関する評価モデルを開発し、気候感度とRCPシナリオに対する温暖化影響被害および適応策の費用を分析し、適応策の有効性を示した。また、緩和策との費用との比較や、気候感度が高い場合の適応策の有効性を評価した。

同じ気候感度レベルの中で全球平均気温上昇が最も高位に推移するRCP8.5では、適応策が導入されない場合には、影響被害は時点とともに拡大する。しかし、このケースにおいて海岸部門に最適な適応策が導入された場合には、適応策として追加的に必要な費用はGDPに対して非常に小さく、いずれの地域でも適応策の導入が進み、被害額は大きく低減される。このように、温暖化適応策は温暖化影響被害を低減する可能性は大きいと示唆される。温暖化影響被害・適応費用の推計には精度の問題などいくつかの課題はあるものの、本研究のように適応策の導入により温暖化被害をかなり抑制できるならば、2℃目標のような大きな緩和策費用を要する厳しい排出削減ケースが影響被害を含めた総費用を最小化するかは議論の余地がある。ただし、本研究は2100年までの評価であり、2100年以降も海面上昇は時間遅れをもって上昇する可能性が高く、その影響については考慮していないことには留意が必要である。

また、温暖化適応策は、0.5℃程度の気候感度が高い場合に対しても有効な対応として期待できることが示唆された。気候感度が高い場合には影響被害はやや増加するが、気候感度が3.0℃の場合と比べ、RCPシナリオ間の経済影響の傾向は基本的には変わらない。少なくとも0.5℃程度の気温目標水準や気候感度の違いなどであれば、温暖化リスクを大きく低減できる可能性がある。そのため、気候感度の不確実性の問題がある中で、厳格に2℃目標などを目指すような戦略よりむしろ、温暖化対策に要する費用や被害額を考慮しながら、おおよそとしての気温目標水準を意識した緩和策をとり、その上で適切な適応策を組み合わせることで、気候変動のリスク管理として重要であると考えられる。

参考文献

1) J. Hinkel et al.; Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise, PNAS Vol.111, No.9, pp.3292-3297 (2014)

注1) RCP: Representative Concentration Pathways