

ICA-RUS REPORT 2015

地球規模の気候リスクに対する
人類の選択肢（第1版）



環境省環境研究総合推進費 戦略的研究プロジェクトS-10
地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究

2015年9月

はじめに

2015 年末に、国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) の第 21 回締約国会議 (COP21) がパリで開催され、2020 年以降の世界の気候変動対策の新しい枠組が合意される予定である。UNFCCC では、「工業化以前からの世界平均気温の上昇を 2℃以内に収める観点から温室効果ガス排出量の大幅削減の必要性を認識すること (2℃目標) が合意されている。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 5 次評価報告書によれば、高い可能性で「2℃目標」を目指すためには、今世紀末に向けて世界の CO₂ 排出量をほぼゼロまで削減する必要がある。これは明らかに容易な目標ではなく、世界がこのために必要な当面の削減ペースを実現する目途は立っていない。

こうした中で、「2℃」に拘るべきではないという議論も出てきている。一方で、COP21 を前にして「2℃目標」を揺るがすことには大きな政治的リスクがあることにも注意を要する。我々は、国際的な合意プロセスを経て掲げられている「2℃」という目標を尊重し、これを直ちに直視すべきという立場をとらない。

しかしながら、国際社会は常にこの目標を検討し続ける必要があると我々は考える。日本では、2011 年の東日本大震災に伴う福島第一原発の事故をきっかけに、それまで日本社会の大部分が共有していた原子力の「安全神話」が大きな問題となった。問題は、原子力が安全でなかったということでは必ずしもなく、「原子力が安全であるとはどういうことか」を考えるのをやめてしまっていた、ということであろう。同じ意味で、「2℃目標」を「神話」にしないために、我々は「2℃目標とはどういうことか」を考え続ける必要がある。

我々の研究プロジェクト ICA-RUS (Integrated Climate Assessment - Risks, Uncertainties and Society) は、環境省環境研究総合推進費 S-10「地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究」として、2012 年からの 5 年計画で始まった。本報告書は、プロジェクト 3 年目までの研究成果を統合して発表するものである。^{*} 地球規模かつ長期の視点で気候変動のリスクを捉え、これに対処するために人類に残された選択肢の整理を試みた。COP21 を控え、各国の約束草案等の各論が活発になるが、その中にあってこそ地球規模の視点の重要性を訴えていきたい。また、COP21 を超えて、人類がどの選択肢を選ぶべきかを社会に問いかけ、社会と共に考えていきたい。

ICA-RUS プロジェクトリーダー 江守 正多

※本報告書は、地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢第 1 版 (詳細版 (2015 年 3 月)) を要約したものである。研究成果の詳細については、詳細版を参照いただきたい。 <http://www.nies.go.jp/ica-rus/materials.html>

ICA-RUS REPORT 2015

地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢 (第 1 版)

Integrated Climate Assessment-Risks, Uncertainties and Society



CONTENTS

目次

■ エグゼクティブ・サマリー	1
■ 1 ICA-RUS の検討体制	3
1.1 ICA-RUS の検討枠組	3
1.2 ステークホルダーとの対話	3
■ 2 「戦略」評価方法	4
2.1 「戦略」の考え方	4
2.2 「戦略」検討にあたっての留意事項	5
2.3 「戦略」の評価手順と構成要素	6
2.4 分析ケース	7
■ 3 「戦略」評価結果	8
3.1 影響評価結果	8
3.2 対策評価結果	16
■ 4 気候変動問題に係るリスク認知・意思決定パターン	20
4.1 他のリスク事象と比較した上での、気候変動問題の特徴	20
4.2 リスク事象に対する人々の価値観の分類	20
4.3 気候変動の波及構造に関する国民のリスク認知	21

エグゼクティブ・サマリー

本報告書では、工業化以前からの世界平均気温の上昇を50%程度の確率で1.5℃、2.0℃、2.5℃以下に抑えるための排出経路を緩和目標として掲げることを、それぞれT15S30、T20S30、T25S30という3つの「戦略」として設定した（S30は排出経路を計算する際に気候感度を3.0℃と仮定したことを意味し、気温上昇抑制の目標達成確率が50%程度であることと対応する）。その上で、影響評価と対策評価の両面から、不確実性を考慮しつつ、地球規模における各「戦略」の帰結を比較することを試みた。

■ 影響評価

農業、生態系、水資源、洪水、健康、ティッピングエレメントの各項目について影響評価を行った結果、一般的傾向として、「戦略」間の差は、各「戦略」とBaU（気候変動対策無しの場合）との差に比べて小さく、かつ気候不確実性の幅と比べても小さいことが示された。このことから、地球規模リスクの観点からは、1.5℃、2.0℃、2.5℃のいずれを目指すかという選択よりもむしろ、大きな方向性としてそのいずれかに確実に向かっていくこと、および気候不確実性への対処を考えることが重要であるという示唆が得られた。

ただし、影響評価項目の包括性には限界がある（本報告書ではリスクインベントリを用いてそのことを明示した）上に、市場価値のような統合指標への換算ができておらず、項目間の比較や対策評価との比較にも限界があることに注意が必要である。また、特定地域における特定項目の影響では「戦略」間の差が小さいとはいえない可能性がある点にも注意が必要である。

さらに、ティッピングエレメントに注目すると、「戦略」間の差が重要な意味を持つ可能性がある。IPCC AR5 によれば、グリーンランド氷床が不安定化する閾値（ティッピングポイント）は、世界平均気温上昇が工業化以前から1℃～4℃の間とされており、しかも氷床形状変化の効果を考慮した最新の研究は低めの値を支持している。例えば、仮にこれが1.0℃であるとする、どの「戦略」をとっても閾値を超えることを避けられないが、仮に2.0℃であるとする、閾値を超える可能性に「戦略」間で大きな違いが生じる。この問題は、閾値の不確実性や閾値を超えることの意味をどう捉えるかを含めて、さらに深い議論を必要とする。

■ 対策評価

各「戦略」の緩和目標を達成するために必要な緩和策および経済コスト等を、複数の統合評価モデルを用いて見積もった結果、「戦略」間の差は顕著であった。特に、T15S30は、IPCC AR5 で評価された最も厳しいシナリオである RCP2.6 よりもさらに厳しいものであり、よほど楽観的な条件の下でないと実現しないか、モデルによっては解が得られなかった。

これらの「戦略」の緩和目標を達成するための技術オプションの選択は、モデルによって大きく異なり、原子力の大規模な導入により達成する方法も、再生可能エネルギーの大規模な導入により達成する方法もあることが示された。一方で、CO₂ 隔離貯留（CCS）はどのモデルに従ってもある程度大規模な導入が必須である。このうち、バイオマスエネルギーと組み合わせた CCS（BECCS）は、作物栽培収率や CCS 回収効率の悲観的な条件の下では、土地をめぐる食料生産と競合する場合があることが示唆された。

一般に、統合評価モデル分析では、世界全体での経済合理的な最適行動を前提としているため、コスト等を見積りが楽観的になる傾向がある。しかし一方で、技術体系や社会経済体系を大きく変えるような未知のイノベーションを表現することはできないため、現実より悲観的な面があるとも見ることのできる点に注意が必要である。さらに、モデルでは目標達成を前提として解を求めるが、現実には掲げた目標が達成できないリスクが常に存在する。これらの点を踏まえて対策評価の結果を解釈するには、さらなる議論が必要である。

なお、本報告書では、経済コストの問題および BECCS と食料生産の競合の問題を除いて、対策導入に伴う波及リスクや副次的便益の分析を示すことができなかったが、現実の意思決定においてそれらの観点は重要であるため、最終版報告書の発表に向けて整理を進めている。

■ リスク回避性向の影響

よりリスク回避的に80%程度の確率で工業化以前からの世界平均気温の上昇をそれぞれ1.5℃、2.0℃、2.5℃以下に抑える排出経路を緩和目標として掲げる「戦略」として、T15S45、T20S45、T25S45を設定し、評価した（S45は排

出経路を計算する際に気候感度を 4.5℃と仮定したことを意味する)。T20S45 は T15S30 と、T25S45 は T20S30 と概ね近い評価結果となった。T15S45 は、あと 10 年程度で世界の排出量を負にするような極端な排出削減を意味し、対策評価において解が得られなかった。

T20S45 に近い結果を与える T15S30 は、よほど楽観的な条件の下でないと実現しない厳しい目標であった。このことから、80% などの高い可能性で「2℃」以下を実現するような排出経路を目指すことは既に極めて難しいことが示唆される。

■「戦略」選択への含意

今回の検討の範囲内では、T20S30 から T25S30 への目標の緩和に対して、影響リスクの増加よりも対策コストの減少の方が、一般に敏感である傾向が見てとれた。すなわち、世界全体での経済合理性の観点から見た場合、T20S30 よりも T25S30 の方が経済損失が小さい可能性がある。ただし、実際にはこれは影響リスク、対策の波及リスク、便益等を包括的に経済価値換算して対策コストと比較しなければ明らかにならないことに注意が必要である。

また、前述したように、ティッピングエレメントに注目すると、より慎重な議論が必要となる。例えばグリーンランド氷床不安定化の閾値が仮に 2℃前後であるとした場合、T25S30 は T20S30 に比べて閾値を超える可能性が大きく増す。仮にグリーンランド氷床不安定化が開始することによる経済損失を含めることで影響被害が T25S30 と T20S30 の対策コストの差に匹敵するほど大きくなるならば、T25S30 を選択することは世界全体での経済合理性の観点からも正当化されない可能性がある。

また、現実には、目標を掲げることと、その目標を達成することとは別の問題であることに注意が必要である。T15S30、T20S30、T25S30 のどの「戦略」を掲げたとしても、それが実際には達成されない可能性を考えると、「戦略」の選択は一層難しい問題となる。

最後に、T15S30 や T20S30 のような厳しい目標を目指すことは、既存の体系を前提とした技術の導入や経済コストの問題ではなく、持続可能な方向に社会を大きく転換させること (Transformation towards Sustainability) だという見方 (例えば、WBGU, 2011¹) があることを指摘したい。

そのような見方をするならば、厳しい目標を掲げる「戦略」をむしろ積極的に受け入れ、新しい価値観のもとで技術や社会経済の既存の体系を大きく変えることにより、モデルで見積もられるような大きな経済コストを伴わずに目標が実現しうると考える立場もあるだろう。このような見方を好むかどうかは個人やグループの価値判断に依存すると想像され、今後、社会的な議論を深める価値があるテーマといえるだろう。

■ 今後の課題

ICA-RUS では、2 年後の最終版報告書の発表に向けて、さらにいくつかの課題に取り組む計画である。主な項目として以下があげられる。

- 各「戦略」の帰結に対応した適応努力および気候工学の可能性の検討。
- 「戦略」毎の影響評価項目の拡充、社会経済シナリオの拡充。
- 対策に伴う波及リスク、副次的便益の整理と検討への組み込み。
- 逐次的 (多段階) 意思決定、すなわち例えば 2050 年ごろに目標を選びなおすことを考慮に入れた場合の考察。
- 地球規模の気候リスクの特徴を踏まえた、社会的合理性の高い意思決定枠組の検討。

これらに基づき、地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢の考察をさらに深め、それを材料に社会的な議論を促していきたい。

¹ WBGU (2011), The Transformation towards Sustainability, Fact sheet No.4.
http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/factsheets/fs2011-fs4/wbgu_fs4_2011_en.pdf

1.1 ICA-RUS の検討枠組

2012 年から開始された研究プロジェクト「ICA-RUS」の検討枠組は以下の 3 点の特徴を有している。

1 つ目は、大気中温室効果ガスの増加による地球規模の気候変動への人類の対処を「リスク管理」と捉える点である。「リスク管理」という言葉には、1) 不確実性下の意思決定である、2) 科学的情報に基づく意思決定である、3) あらゆる状況や選択肢をできる限り考慮に入れる、4) 状況の変化に応じて柔軟に見直す、5) 社会的な価値判断を伴う、といった意味を込めている。

2 つ目は、地球規模かつ長期（100 年スケール）の視点でこの問題を扱うという点である。現実には、気候変動問題に対する意思決定は、個々の主体により、様々な時点で作られるものである。しかし、そのような意思決定も多くの場合「世界全体としてはどうするのが望ましいか」という前提を基礎とするであろうし、実際に国連の気候変動枠組条約においては世界全体の目標等の議論が行われている。そこで、ICA-RUS では地球規模かつ長期の視点で、この問題に対する人類レベルの選択肢を検討する。

3 つ目は、選択肢としていくつかの「戦略」を設定するという点である。気候変動問題への対応オプションは主に緩和策と適応策であるが、加えて気候工学も可能性として存在するとともに一定のリスクを受容することもオプションの一つと考えられる。ICA-RUS ではこれらのオプションを様々な組み合わせた気候変動リスクへの対処をリスク管理の「戦略」と呼び、様々な「戦略」が人類の選択肢となると位置づけ検討を進めている（詳細は後述）。

このような 3 つの特徴を有する枠組みでの検討を実現するため、ICA-RUS は 5 つのテーマにより構成され、それぞれのテーマに国内の複数の大学、研究機関から専門家が参加している（表 1）。

1.2 ステークホルダーとの対話

ICA-RUS では、地球規模かつ長期の気候変動リスクの問題に興味や意見を持つ主体を幅広くステークホルダーとして捉え、ステークホルダーとの対話にも重点を置いて検討を進めている。ステークホルダーには政府組織、産業 / ビジネス、NGO、メディア、研究者といったグループが含まれる。

ステークホルダーと対話を行うことで、彼らのリスク認知や優先順位を把握し、ICA-RUS の検討範囲の拡張に反映させることに努めている。また、ステークホルダー間の対話を促すことにより、そこで浮かび上がる論点や合意の有無を把握し、ICA-RUS における検討の参考にしている。

表 1 各研究テーマの概要

テーマ 1 地球規模の気候変動リスク管理戦略の総合解析に関する研究	●気候安定化目標を含む総合的な気候変動対策の道筋を合理的に決定するリスク管理戦略を提案する。
テーマ 2 気候変動リスク管理に向けた土地・水・生態系の最適利用戦略	●気候変動の影響および対策と水、エネルギー、食料、生態系などの相互作用を、不確実性を含めて定量的に評価したシミュレーション結果を提示し、その結果に基づいて、コベネフィットやトレードオフ等を分析する。
テーマ 3 クリティカルな気候変動リスクの分析に関する研究	●人類が回避すべきと考えられる気候変動影響の候補について、それが発現する気温上昇レベル、悪影響の規模や性質などを不確実性を含めて網羅的に評価し、気候変動レベル毎のリスクを分析する。
テーマ 4 技術・社会・経済の不確実性の下での気候変動リスク管理オプションの評価	●緩和、適応、気候工学を含む広範囲の気候変動対策オプションについて、そのポテンシャルやコストなどを不確実性を念頭に置いて総合的に評価し、その達成難易度や対策オプションの合理的な組合せ方を分析する。
テーマ 5 気候変動リスク管理における科学的合理性と社会的合理性の相互作用に関する研究	●気候安定化目標等の決定に影響を及ぼす種々の価値判断に関する、国民の意見分布を分析する。 ●国民の気候変動リスク認知における社会的要素及び科学・リスクコミュニケーション上の重要特性を分析する。

2.1 「戦略」の考え方

ICA-RUS では、緩和目標ごとに以下の **Step 1 ～ 3** までの検討を行った結果導かれる、緩和目標とその帰結の幅、適応（＋気候工学）の検討までのセットの一つ一つを「戦略」とよび、社会が採りうるリスク管理の選択肢として扱う（図 1）。

ただし、今回の報告では、現時点において研究の取り組みが不足している **Step 3** については報告内容に含めていない。

Step 1: 緩和目標の設定

緩和目標として、長期（2100 年もしくは 2200 年まで）の世界の温室効果ガス排出量の経路（時系列）を設定し、現実の排出量がこれに沿うことを目指すものとする。緩和目標は a. 「目標温度レベル」、b. 「リスク回避性向」、c. 「経路に関する仮定」の 3 つの選択によって特徴づけられる。

「目標温度レベル」は、工業化以前からの世界平均気温上昇量のピークを何℃以内に抑えるべきかについての選択である。

「リスク回避性向」は、科学的な不確実性の下で、どの程度高い可能性で目標温度レベルを超えないようにしたいかという選択である。

「経路に関する仮定」では、将来に世界全体でゼロ排出もしくはマイナス排出が実現して、大気中温室効果ガス濃度を減少（濃度が一度増加した後に減少する「オーバーシュート」）させることができるという見通しを採用するか否かの選択が重要となる。

Step 2: 不確実性の下での緩和目標ごとの帰結の幅の導出

気候（＋影響）不確実性、緩和行動の不確実性、社会経済不確実性などさまざまな不確実性があることを考慮して、緩和目標の帰結に幅を持たせる。

気候不確実性は、地球の気温の上がりやすさに関係する「気候感度」や「気候－炭素循環フィードバック」などの科学的な見積りに不確実性があるために生じる。

緩和行動の不確実性は、目標達成に必要と認識された緩和行動が実際には部分的にしか実行されない可能性や、実行したが想定していたほど効果が無い可能性などにより生じ、気温上昇が当初見込みよりも大きくなるリスクをもたらすと考えられる。

社会経済不確実性（気候政策を除いた部分）は、世界の人口、経済発展、社会格差などの将来の見通しに不確実性があるために生じる。

Step 3: 必要な適応強度の検討（＋気候工学の必要性の検討）

緩和目標ごとに必要となる適応策の強度を検討し、可能であればそのコストを見積もる。

この際、各種の不確実性により緩和目標ごとの帰結には幅があり、特に気温上昇が目標を超えてしまうリスクがあるため、それを考慮に入れながら適応策の検討を行うことが重要となる。さらに、大きな気温上昇の可能性が排除できない場合には、気候工学、特に太陽放射管理の発動、あるいはその準備の必要性について検討する。

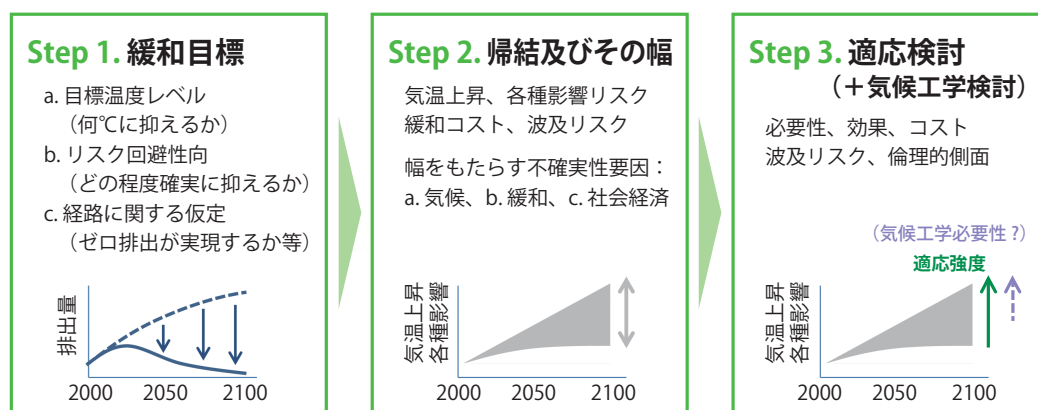


図 1 ICA-RUS における「戦略」の考え方

2.2 「戦略」検討にあたっての留意事項

ICA-RUS が示す「戦略」の検討にあたっては、下記の包括性、不確実性、価値判断について留意すべきである。

包括性

気候変動のリスク、対策オプション、および対策に伴う波及リスクは様々な分野に及ぶため、その包括的な把握は容易でない。しかし、検討範囲が包括性を欠くことは検討結果に偏りを生じさせ、検討の中立性を脅かす原因となるため、注意が必要である。このため、ICA-RUS では、気候変動のリスク、対策オプション、および対策に伴う波及リスクを一覧表（リスクインベントリ・対策インベントリ）の形で整理したうえで、これを用いて ICA-RUS での検討における包括性の限界を明示することを試みている。また、限られたリスク項目における独自の分析と並行して、既存知見のサーベイに注力することで包括性の向上に努めている。

不確実性

不確実性にいかに対処するかはリスク管理の根幹である。ICA-RUS が扱う地球規模の気候リスク管理に関連した不確実性は多様であり、あらゆる不確実性を十分に考慮することは容易でない。本報告書では、不確実性をできる限り明示的に扱っているが、その扱いの方法、および考慮できていない不確実性について留意する必要がある。

例えば、本報告書では異なる 5 つの気候モデルを用いることによって気候の不確実性を表現している。5 つのモデルは CMIP5 気候モデルアンサンブルの世界平均気温、降水量予測の幅の上限、下限を概ねカバーするものの、予測の地理的な分布などについては様々であるため、あくまで例示と見るべきであろう。

緩和行動の不確実性についていえば、たとえ緩和目標を国際的に掲げたとしても、各国の政治経済的判断等、なんらかの理由によってその削減経路が実現できないことも起こりうる。そのような緩和策の不履行等が「戦略」選択の帰結に及ぼす効果については、モデル実験で対応する非最適な条件を想定することで分析対象として扱い得る。

他に、ICA-RUS で明示的に扱うことができていない主要な不確実性として、影響評価手法自体の不確実性を挙げる必要がある。例えば「イネの生産性」への気候変化の影響

を推定する場合、そのために用いる作物モデルの種類が違えばと推定結果に大きな差が生ずる。ICA-RUS では各影響評価指標について一つずつの影響評価手法でしか推定を行っておらず、影響評価手法の選択に伴う不確実性幅については扱っていない。

一方で、対策分析については、構成の異なる複数の統合評価モデル（MARIA、EMEDA、GRAPE、AIM）を用いて同じ想定条件で対策分析を実施することで、例示的ではあるが、対策分析に用いる評価手法の不確実性を明示的に示す努力をしている。² 一方で、技術体系や社会経済体系を大きく変えるような未知のイノベーションをモデルで表現することはできず、取り扱われるのは現在知られている技術の改良と普及に限定される。

価値判断

戦略の各ステップにおいては価値判断が暗に陽に関係する。ICA-RUS の基本スタンスとしては、どこに価値判断が関係するのかを自覚したうえで、研究者の価値判断は極力含めずに「戦略」を偏りのない選択肢として作成・提示し、その「戦略」をなんらかの価値判断に照らして選択することについては社会的な議論に委ねることを意図している。すなわち、緩和のためにどの程度まで経済損失・消費ロスが生じてもよいと考えるか、どの程度までの影響リスクは残ることを受け入れるか、といった判断については社会に委ねるというスタンスである。しかし、定量的な分析を実施するうえで、モデル選択やパラメータの仮定などの中に、除去できず暗に含まれてしまう価値判断に相当する要素もある。

² 例えば、MARIA と GRAPE は動学的最適化によるボトムアップ型エネルギー経済モデルに土地利用や気候変動ブロックをもち、EMEDA と AIM は多部門経済活動をトップダウンで表現する応用一般均衡モデルをベースとする。詳しくは地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢第 1 版（詳細版（2015 年 3 月））参照。

2.3 「戦略」の評価手順と構成要素

本レポートでは、6つの異なる選択（緩和目標）について、対策分析・影響分析を実施し、表2に示すセクタ・観点について分析結果をとりまとめ、「戦略」として示した。

表2 評価対象の影響部門や指標

影響評価	対策評価
a.農業被害	a.GHG 排出・削減経路
b.陸域生態系被害	b.GDP および消費の損失
c.水文水資源被害	c.エネルギー需給
d.洪水被害	d.技術オプション
e.健康被害	e.土地利用と食料需給
f.海洋・海洋生態系	f.産業部門・地域別影響
g.大規模事象	

なお、各影響モデルを用いた分析は「分析ケース」（2.4で説明）についてのみ影響分析を実施し、その結果と、AD-DICE³により評価した「戦略」ごとの世界平均気温上昇を統合的に用いることで、簡略に「戦略」に対応した影響評価を実施することとした。具体的な手順は以下の通りである。

1. AD-DICE 内の簡易気候モデル式を用いて、4つの RCP シナリオ⁴（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5）での世界平均気温経路を計算する。
2. 4つの RCP シナリオでの世界平均気温上昇のうち、「戦略」に対応して AD-DICE が示した世界平均気温上昇に最も近いもの2つを選び、「戦略」に対応した気温上昇量との距離に応じて両 RCP の重みづけ係数を計算する。
3. 分析ケースごとに推計された影響量のうち、手順2で選ばれた2つの RCP シナリオを前提としたものを用いて、同じく手順2で計算された重みづけ係数を用いた内挿補間により「戦略」に対応した影響量を算定する。

一方、対策分析については、分析ケース別の評価を実施するとともに、「戦略」別にも同様に統合評価モデルを用いた評価を実施した。

本レポートでは、表3にその諸元を整理した6つの「戦略」を評価の対象とする。なお、この6つの「戦略」では、「目標温度レベル」と「リスク回避性向」のみを扱い、「経路に関する仮定」の考慮については今後の検討課題である。

表3 評価対象とした6つの「戦略」

「戦略」名	目標温度水準 (工業化前比)	AD-DICE の排出経路分析での 気候感度想定 [リスク回避性向]	AD-DICE での気温変化推計時の 簡易気候モデルの 気候感度の設定	気候不確実性を考慮した際に 想定される目標の達成可能値
T15S30	1.5℃	3.0℃	3.0℃	およそ 50%
T15S45	1.5℃	4.5℃	3.0℃	およそ 80%
T20S30	2.0℃	3.0℃	3.0℃	およそ 50%
T20S45	2.0℃	4.5℃	3.0℃	およそ 80%
T25S30	2.5℃	3.0℃	3.0℃	およそ 50%
T25S45	2.5℃	4.5℃	3.0℃	およそ 80%

※ベースライン（対策無しを想定）の社会経済シナリオとしては SSP2 シナリオを想定

³ DICE (Dynamic Integrated model of Climate and Economy) とはエール大学で開発された地球規模での温暖化影響と対策（緩和）費用を統合的に評価する経済モデルであり、さらに適応への投資による影響軽減を同時評価すべく拡張したものが AD-DICE である。

⁴ RCP (Representative Concentration Pathways: 代表的濃度経路) とは、気候モデルを用いた将来予測シミュレーションに活用する、温室効果ガスの排出量・濃度シナリオである。

2.4 分析ケース

ICA-RUS では「戦略」を評価するための材料として、複数の「分析ケース」を設定し、表 4 に示す影響評価・対策評価を行った。

表 4 ICA-RUS における分析ケース別の評価項目
(※印：本報告では含まず、報告書最終版までに取り組む課題)

気候変動影響の評価	包括的な影響の大きさ (被害金額等) ※
	個々の影響の発生時期、 範囲および被害規模
対策の評価	緩和目標の達成に必要な対策
	対策の内容およびそのコスト
	対策実施により生ずる波及 リスク※
水・食料・エネルギー と影響・対策等の 相互作用	リスクトレードオフ・フィード バック等※

各分析ケースは、温室効果ガス排出シナリオ（排出量の時系列データ、加えて温室効果ガス濃度や放射強制力を含む場合もある）、気候モデル（気温や降水等の将来予測シミュレーションに用いられる）、社会経済シナリオ（人口・経済・土地利用等の時系列データ）の組み合わせによって定義され、影響評価・対策評価の共通の前提条件として用いられる。

気候変動に係るシナリオ開発に関しては、「新シナリオプロセス」と呼ばれる国際協調プロセスが実施されている。ICA-RUS では、この国際協調プロセスに整合的な形で、分析ケースを設定する。

ここで新シナリオプロセスへの整合とは、(i) 影響評価のための気候シナリオとして RCP シナリオ（※※）前提の CMIP5 気候モデル出力を活用、(ii) 影響評価のための社会経済シナリオとして SSP シナリオ（※※）を活用、(iii) 対策評価（緩和政策評価）のベースライン（対策無し想定）の社会経済シナリオとして SSP シナリオを活用、(iv) 対策評価での緩和政策目標（緩和の水準）として RCP シナリオが想定する放射強制力水準への安定化について分析することを指す。

（※※）RCP シナリオ、SSP シナリオの詳細については ICA-RUS REPORT 2014⁵ を参照

影響評価での気候シナリオ選択については、気候シナリオに大きな差が表れるため、複数気候モデルによる気候シナリオを活用した予測幅の把握が重要になる。ICA-RUS では、研究資源の制約を考慮して、影響評価を担当する全研究チームが実施する分析ケースとしては、国際的な活用実績をふまえて選定した 5 気候モデル（GFDL-ESM2M・HadGEM2-ES・IPSL-CM5A-LR・MIROC-ESM-CHEM・NorESM1-M）による 4 排出シナリオ（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5）想定での気候シナリオを利用することとした。

また、社会経済シナリオについても、その不確実性幅をおさえるために 3 種の社会経済シナリオ（SSP1・SSP2・SSP3）を利用した。

一方、対策評価においても、ベースラインの社会経済シナリオとして SSP2 と SSP3 の 2 つを、緩和水準として 4 排出シナリオ（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5）が想定する放射強制力水準への安定化を、分析ケースとして扱った。

なお、本レポートでは「戦略」別の影響評価・対策評価結果のみを報告し、分析ケース別の影響評価・対策評価の結果については報告書詳細版⁶ 第 3 章で図表を用いて詳しく報告している。

⁵ <http://www.nies.go.jp/ica-rus/materials.html>

⁶ 地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢第 1 版（詳細版（2015 年 3 月））URL については注 5 と同様

3.1 影響評価結果

全体的傾向

本報告書で評価対象とした6つの「戦略」のうち、リスク回避性向が高い「戦略」(T15S45、T20S45、T25S45)と中程度の「戦略」(T15S30、T20S30、T25S30)の間には、影響評価の結果においてT20S45がT15S30に近く、T25S45がT20S30に近いという関係がみられた。そのため以下では、リスク回避性向が中程度の「戦略」に焦点を絞り比較を行う。図2(10頁)は、「戦略」を比較できるように、列方向に3つの「戦略」および参考情報として1つのBaU(Business as Usual: 気候変動対策無しの場合、社会経済シナリオはSSP2)を配置し、行方向に各「戦略」での気候変化(気温変化・降水量変化率)ならびに各部門影響指標を配置し、評価結果を示したものである。なお全ての「戦略」について、その背景となる社会経済シナリオとして、SSP2(中庸)に相当するシナリオが仮定されている。気候変化ならびに各部門影響指標に関して、各グラフは現状(1981～2000年)と比較した今世紀中ごろ(2050年代)および今世紀末期(2080年代)までの変化(差分あるいは比率)を、世界を5つに区分した地域別平均(A:アジア、L:ラテンアメリカ、M:中東・アフリカ、O:OECD、R:東欧・旧ソ連)と全世界平均(W)で示している(ただし海洋を対象とした貧酸素水塊体積と輸出生産(海洋表層で生産され水深100mを通過する有機炭素のフラックス)については、図2中に水域区分を記載した)。また、グラフ中の縦方向の線幅は5つの異なる気候シナリオ想定予測幅を示しており、またその線上に配置された赤い点は5つの変化予測の平均値を示している。ここでは各「戦略」での影響リスクの全体的傾向について整理する。

図2ならびに報告書詳細版に記した結果から、以下のことが示された。

1. 概ね全ての影響指標について、3つの「戦略」(T15S30、T20S30、T25S30)の間の差異に比べ、それらとBaU(気候変動対策無しの場合)との差異の方が大きい(図2)。これは、基本的には、RCP2.6～RCP8.5の気候変化幅に比べて3戦略の間の気候変化幅が小さいことによる。なお、水ストレス人口については、BaUと3つの「戦略」の間の差が明確にみられないが、これは、水ストレス人口が社会経済因子(人口)の変化に対して感度が高く、気候変化への感度が相対的に小さいことによる。
2. 気候変化が大きくなるにつれ、BaUも含めた今回の分析の範囲内では、食料安全保障や炭素管理の観点からの好影響が単調増加する指標がある。それらの指標には、イネ生産性、春コムギ生産性、純一次生産、植生バイオマス量が含まれる。ただし、広域集計された指標で好影響が示される場合でも、地域間・地域内の差まで見てみると、一概に単調な好影響の増加とみせない場合もある。また、気候変化に対して単調増加する指標に共通の特徴は、大気中CO₂濃度による施肥効果が作用することである。
3. 「戦略」間で比較した場合に、気候変化の大きさに従い、悪影響が急増する影響指標もある。バイオマス火災、洪水暴露人口、洪水暴露GDP、熱ストレス超過死亡数が典型的な例である。このうち洪水暴露人口と洪水暴露GDPは、気候変化に応じて強い雨の頻度が増し、結果的に洪水の発生確率が高まることから、その増加傾向の主たる因子である。極端現象ならびにその影響については、緩和策の強度に対する非線形な応答に注意が必要であることを示唆している。一方、バイオマス火災、熱ストレス超過死亡数については、他の影響指標に比べ、気候関連因子のうち気温上昇が直接に寄与しやすい影響指標であることが、その単調増加傾向の背景にある。これらの影響指標で示されるリスクは、緩和策の効果が直接に表れるリスクといえる。
4. 気候変化が大きい「戦略」であるほど気候モデルの違いによる不確実性幅が大きくなる傾向がある(図2)。このことは気候変化に応じて好影響が生ずる影響指標にも悪影響が生ずる影響指標にも当てはまる。この不確実性幅の違いの対策検討への含意は影響の性質や影響を受ける側のリスク認知・価値観によって異なる

が、不確実な事象への対処であるリスク管理の観点からは注視が必要である。

5. 「戦略」間の影響量の差に比べて、同一「戦略」の中での気候予測の違いによる不確実性幅の方が大きい場合が多い。このことは、気候変化とその影響に備えた適応策を検討するうえで、長期目標として 1.5℃、2.0℃、2.5℃のどれを目指すかということよりも、どの目標を定めたとしても依然として残る気候予測の不確実性に対してどう対峙するのかの方が、重要度がより大きい可能性を示している。
6. ティッピングポイントを持つ大規模事象の生起に関する「戦略」の比較評価について、グリーンランド氷床融解と北極海夏季海水消失の閾値温度の超過を評価することで、その複雑さがあらためて示された。グリーンランド氷床融解に関しては、閾値温度が仮に工業化前比の世界平均気温上昇が 2℃であるとした場合、T15S30 では気候モデルの不確実性を考慮しても 21 世紀中にその閾値温度に達することは無さそうである。一方で、T25S30

だと、気候モデルによっては 2030 年代中頃に閾値を超え、5 つの気候モデルの平均でみた場合でも 2060 年代中頃に閾値を超えることが見込まれる。T20S30 の場合、個々の気候モデルでは T25S30 とあまり変わらず 2030 年代に閾値を超えてしまうものがあるが、5 つの気候モデルの平均で見た場合には 21 世紀中に閾値を超えない。より厳しい目標の緩和水準を取ることで閾値を超える時期を遅らせることができるが、閾値を超えた場合でも実際の問題（大きな海面上昇とその被害）が生ずるのは数百年～数千年先になるため、この閾値を超える時期を遅らせる効果の意義をどう解釈するかは議論が残る。なお、閾値温度が仮に工業化前比の世界平均気温上昇 1℃であるとした場合、全ての「戦略」ですぐに閾値を超える（気候シナリオ上では、既に超過している）ことにも注意が必要である。同様に北極海夏季海水消失については、その閾値が不確実性幅の中間値（工業化前比の世界平均気温上昇 2.45℃）であった場合、T15S30 あるいは T20S30 であれば、21 世紀中の閾値を超えることは回避できそうだが、T25S30 の場合には気候予測の不確実性幅のうち高い方が現実化した場合、2060 年ごろに閾値を超えてしまう。



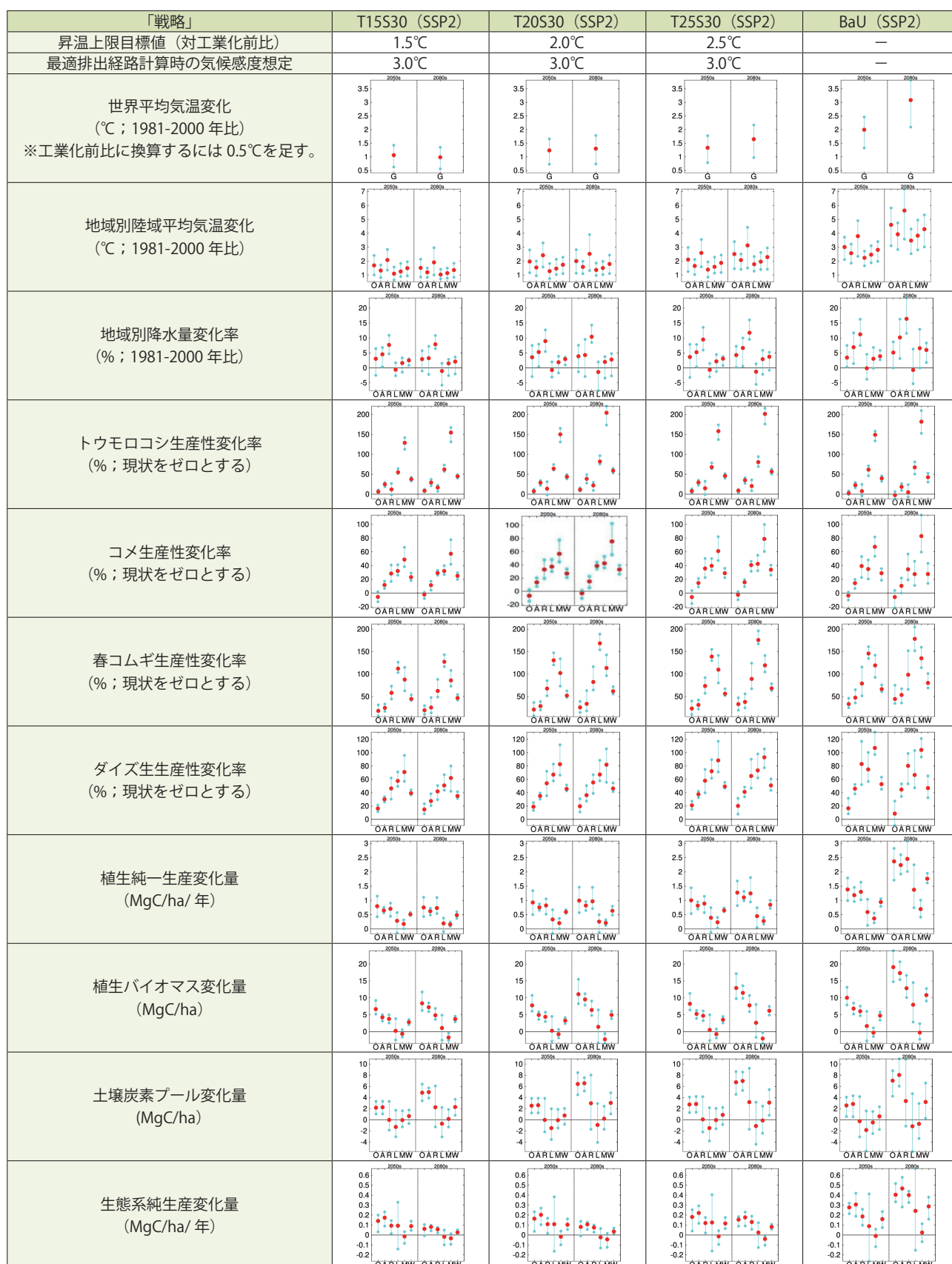
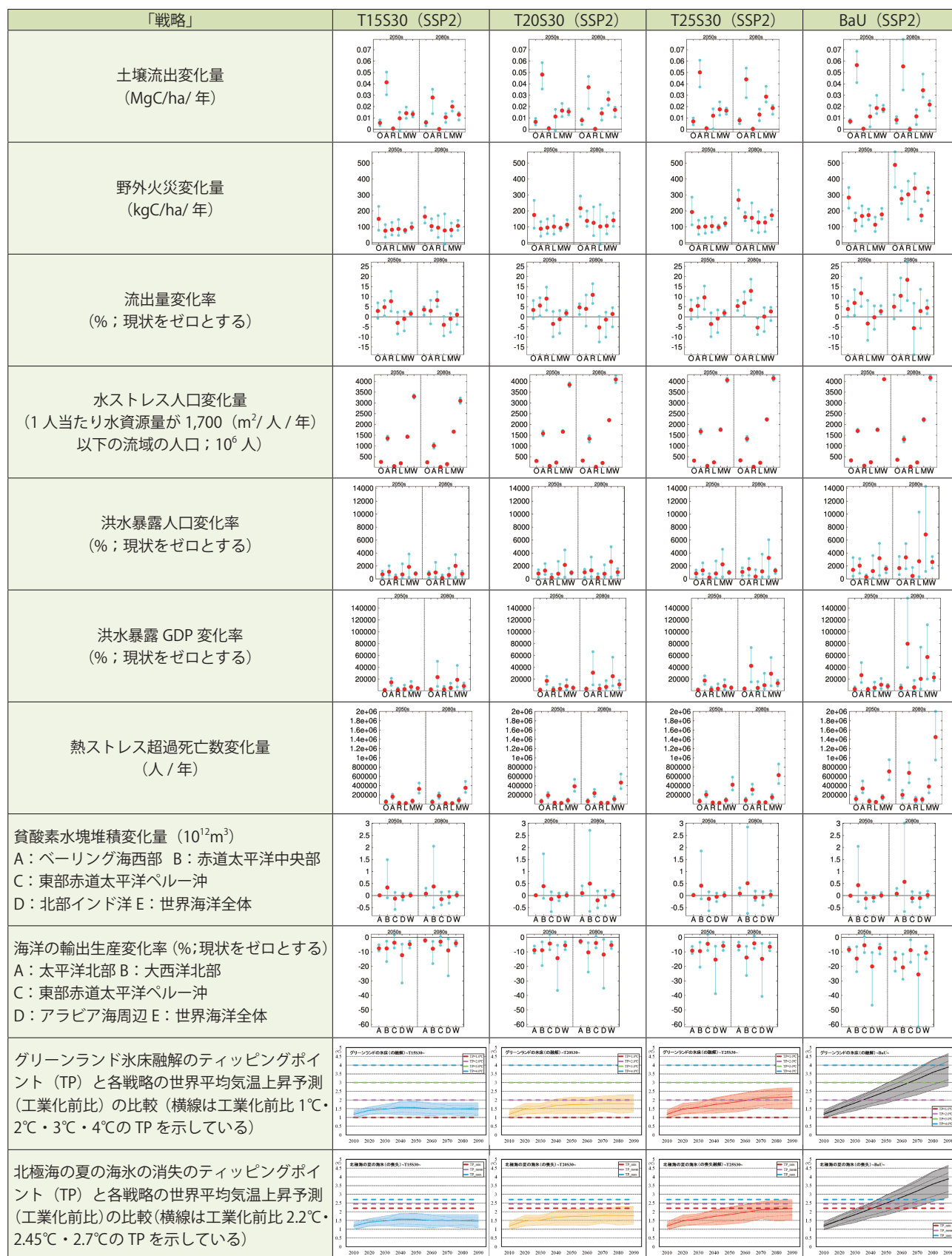


図2 各「戦略」での気候変化ならびに各部门影響指標（注記の無い場合は現状（1981～2000年）からの変化量・変化率；図中の縦棒はGCMのO：OECD、A：アジア、R：東欧・旧ソ連、L：ラテンアメリカ、M：中東・アフリカ、W：全世界平均



不確実性を示している。

評価指標別の戦略比較

以下では、各セクタの指標別に影響の戦略間差を見る。

●トウモロコシ生産性

世界集計では今世紀末に、T20S30 でトウモロコシ生産性の増加割合が最も大きく、次いで T25S30、やや離れて T15S30、BaU の順に生産性の増加割合が小さくなる。この傾向はほぼ全ての地域で共通だが、OECD と東欧・旧ソ連で気候モデル (GCM) により生産性が減少する場合もある。

経済発展の将来見通し (SSP) の違いによるトウモロコシ生産性への影響の不確実性幅は、影響の戦略間差よりやや小さい。

●コメ生産性

世界集計では今世紀末に、T20S30 と T25S30 でコメ生産性の増加割合が最も大きく、次いで T15S30、BaU の順に生産性の増加割合が小さくなる。この傾向はほぼ全ての地域で共通だが、OECD では生産性の減少が予測され、戦略間の差は小さい。

SSP の違いによるコメ生産性への影響の不確実性幅は、影響の戦略間差とほぼ同じかやや大きい。

●春コムギ生産性

世界集計では今世紀末に、BaU で春コムギ生産性の増加割合が最も大きく、次いで T20S30 と T25S30、やや離れて T15S30 の順に生産性の増加割合が小さくなる。この傾向はほぼ全ての地域で共通する。

SSP の違いによる春コムギ生産性への影響の不確実性幅は、影響の戦略間差より小さい。

●ダイズ生産性

世界集計では今世紀末に、T20S30 と T25S30 でダイズ生産性の増加割合が最も大きく、次いで BaU、T15S30 の順に生産性の増加割合が小さくなるが、この傾向は地域間で必ずしも一致していない。

SSP の違いによるダイズ生産性への影響の不確実性幅は、影響の戦略間差とほぼ同じ。

●生産力 (植生の純一次生産)

T15S30 では昇温の抑制により、3 戦略間で植生の生産

力変化が最も小さくなる。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では、21 世紀中の昇温に伴い (大気 CO₂ 濃度の上昇による効果も含む) 植生の生産力は全体的に増加していた。世界平均を含め多くの地域で BaU の GCM 幅の下端以下に抑えられるが、一部地域ではその下端程度の影響が見られる場合もある。

植生の生産力は、昇温に伴う成育期間延長の効果と大気 CO₂ 濃度上昇の効果 (光合成への施肥効果) によって概ね増加していた。ラテンアメリカでは小幅な低下傾向を示す場合もあったが、他の大部分の地域では増加していた。

SSP 間では土地利用変化の違いを通じて植生の生産力に影響を与えるが、その差は戦略間差に比べて非常に小さかった。

●植生バイオマス

T15S30 では昇温の抑制により、3 戦略間では植生バイオマス変化が最も小さくなる。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では 21 世紀中の昇温に伴い (大気 CO₂ 濃度の上昇による効果も含む) 植生のバイオマスは全体的に増加していた。

中東・アフリカでは土地利用転換の影響で BaU でもほとんど増加しないが、T15S30・T20S30・T25S30 では環境変化要因が小さくなることで、バイオマスは減少する傾向が見られた。ラテンアメリカでも GCM によつては減少傾向を示す場合もあった。

地域によっては SSP 間の差があるが、全体としては SSP1 から SSP3 の間での差は戦略間差に比して小さかった。

●土壌炭素プール

T15S30 では昇温の抑制により、3 戦略間では土壌炭素変化が最も小さくなる。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では 21 世紀中の昇温に伴い土壌炭素は全体的に増加していく。概ねどの地域においても BaU と同等程度の変化が生じている。

植生からの枯死物による炭素供給と土壌における分解促進のバランスの結果、土壌炭素は 2040 年代以降に概ね増加する地域が多いことが示された。ただし、ラテンアメリカおよび中東・アフリカの両地域では不確実性が大きい減少する可能性もある。

SSP 間の土地利用の差は植生から土壌への有機物供給

や流出に影響を与えるが、全体としてはそれらが土壌炭素に与える影響は戦略間差よりも小さかった。

●生態系純生産（正味 CO₂ 収支）

T15S30 では昇温の抑制により、3 戦略間では生態系純生産の変化が最も小さくなる。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では 21 世紀中の昇温に伴い生態系純生産は、まず増加し 2070 年代ころから低下する傾向が見られた。

植生生産力の増加と土壌炭素分解促進のバランスとして、陸域生態系は正味の CO₂ 吸収源となる場合が多いことが推定されたが、21 世紀後半には吸収速度の低下傾向が生じていた。地域差も大きく、ラテンアメリカや中東・アフリカでは大きな将来変化はないが、アジアや OECD では概ね吸収速度が増加していた。

生態系の正味 CO₂ 収支に対する SSP の影響は、戦略間差に比して小さかった。ただし、土地利用の影響に植林やバイオ燃料栽培の要因を加味することで結果が変わる可能性はある。

●土壌流出

T15S30 では昇温の抑制により、3 戦略間では土壌流出の変化が最も小さくなる。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では 21 世紀中の昇温（降水量変化の影響も含む）に伴い土壌流出は次第に増加していった。概ねどの地域においても BaU に近い規模の土壌流出が生じていた。

降水量の増加や耕作地の増加に伴って、土壌流出は増加する傾向が見られた。アジアでは 21 世紀後半に頭打ちとなっていたが、土地利用が進む中東・アフリカでは直線的に増加するなどの地域間差も見られた。戦略間差は、他の生態系変数に比べると小さかった。

SSP 間での土地利用の進み方の違いは土壌流出に大きな影響を与えるため、温度上昇抑制に関する戦略間差よりも SSP は顕著な影響を与えていた。耕作地化が進む SSP3 で比較的大きな増加幅が示された。

●野外火災

T15S30 では昇温の抑制により、3 戦略間では野外火災の変化が最も小さくなる。T20S30 では T15S30 と T25S30

の中間的な予測結果となる。T25S30 では 21 世紀中の昇温（降水量変化の影響も含む）に伴い野外火災は次第に増加していった。概ねどの地域においても BaU の 5～7 割程度の規模が見込まれた。

野外火災は可燃物の量と燃焼性に影響を受け、それは植生バイオマスの増加、降水減少、温度上昇に伴う蒸発散の増加の影響を受けるため、全体的な野外火災の増加が示された。BaU では 21 世紀後半に顕著な増加を示すが、戦略ケースではその半分強のレベルに収まる場合が多かった。

SSP には防火活動や都市・道路・耕作地による延焼防止効果は含まれていないため、SSP 間での野外火災の変化程度には大差は見られなかった。

●流出量

T15S30 では主に降水量変化の抑制により、3 戦略間では流出量変化が最も小さくなる。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では 21 世紀中の降水量の変化に伴い、次第に流出量変化が顕在化していく。2080 年代には T15S30 の 1.5～2 倍程度の流出量変化率が見込まれる。また、地域によっては 5 つの GCM の平均が、BaU の平均と同程度になる。

流出量の現在期間（1981-2000）からの変化を、世界集計でみた場合、21 世紀中の昇温と降水量変化に伴い、BaU（SSP2）では 2080 年代までに 5GCM 平均で約 5%（GCM 幅は約 1%～8%）の流出量増加が予測される。一方、例えば T20S30 の下では、5GCM 平均で約 1.5% までその増加は軽減される。5GCM 平均で見た場合には戦略間の違いはあまり大きくないが、GCM 幅は T25S30 で最も大きく、その結果、昇温が最大となる HadGEM2-ES では 4.5% の増加が起ころう。地域別集計を見た場合も、戦略間の相対的な大小は概ね世界集計と変わらない。ただし、増減の大きさやそのパターンには著しい地域差が見られる。例えば、世界的には降水量の増加に伴い、流出量は増加する傾向を見せるが、ラテンアメリカだけは減少を示す。

●Falkenmark 指標（一人当たり水資源量）に基づく 水ストレス人口

T15S30 では主に降水量変化の抑制により、3 戦略間では水ストレス人口が最も小さくなる。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では 21 世

紀中の乾燥地での流出量の減少に伴い、水ストレス人口が増大する。なお、結果は人口シナリオ依存性が高く、人口増加の大きいシナリオほど、水ストレス人口の増加もまた大きくなることに注意が必要である。

人口の将来見通しの違いによる不確実性幅は、戦略間差と比べると大きい。SSP1・SSP2・SSP3の間での違いを比較すると、例えば T20S30 戦略の世界集計で見た場合、人口増加が最も小さな SSP1 では 2050 年代までに 5GCM 平均で約 30 億人の水ストレス人口の増加が見込まれ、一方で人口増加が最も大きな SSP3 では約 50 億人の増加と予測されている。水ストレス人口の挙動の違いは T20S30・T25S30・BaU 間で小さく SSP1・SSP2・SSP3 間で顕著であった。なお、GCM 間の違いはアジアでやや大きい。この原因はこれらの地域で降水量のばらつきがやや大きいことが主な原因と考えられる。

●洪水暴露人口

戦略 T15S30 は、3 戦略間では洪水暴露人口の増加率が最も小さくなる。戦略 T20S30 は T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。戦略 T25S30 は 3 戦略間では洪水暴露人口の増加率が最も大きく、2080 年代にはアジア地域において洪水暴露人口の増加が比較的明瞭に見られる。

また、どの戦略も BaU と比べて 21 世紀後半の洪水暴露人口はかなり小さい。洪水暴露人口の現在期間からの変化を世界集計でみた場合、BaU (SSP2) では 21 世紀末までに 15 ～ 30 倍程度の洪水暴露人口の増加が予測される。一方、例えば T15S30 では、21 世紀末頃の洪水暴露人口は 10 倍前後と予測されている。地域別に見た場合、T15S30 と比べて T25S30 は 21 世紀末の洪水暴露人口は大きい傾向があり、T25S30 戦略の場合はアジアや中東・アフリカにおいて、21 世紀末に向けて洪水暴露人口が増加し続ける傾向が見受けられる。

人口の将来見通しの違いによる不確実性幅は、戦略間差より大きい。SSP1・SSP2・SSP3の間での違いを比較すると、例えば T20S30 の世界集計で見た場合、人口増加が最も小さな SSP1 では 2080 年代までに洪水暴露人口が 5 ～ 13 倍前後の増加、一方で人口増加が最も大きい SSP3 では 7 ～ 25 倍前後の増加の予測となっており、人口の将来見通しの違いによる不確実性幅は T15S30 と T25S30 の戦略間差より大きい傾向にある。

●洪水暴露 GDP

戦略 T15S30 は、3 戦略間では洪水暴露 GDP の増加率が最も小さくなる。戦略 T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。また、戦略 T25S30 は 3 戦略間では洪水暴露 GDP の増加率が最も大きく 2080 年代には特にアジア地域で洪水暴露 GDP の大きな増加が見込まれる。

また、どの戦略も BaU と比べて 21 世紀後半の洪水暴露 GDP はかなり小さい。洪水暴露 GDP の現在期間からの変化を、世界集計でみた場合、BaU (SSP1、SSP2) では 21 世紀末までに 200 ～ 400 倍近くの洪水暴露 GDP の増加が予測される。更に、3 つの戦略の内、洪水暴露 GDP の増加が最も大きい T25S30 を見ると、洪水暴露 GDP は 21 世紀末で 200 倍弱程度 (SSP1、SSP2) ある。また、将来変化を地域別に見ると、アジアと中東・アフリカにおいて、年代を追って洪水暴露 GDP が増加する傾向がどの戦略にも比較的明瞭に現れている。

社会経済シナリオの違いによる不確実性幅は、戦略間差より大きい傾向がある。SSP1・SSP2・SSP3の間での違いを比較すると、BaU で見た場合、21 世紀末の洪水暴露 GDP は、SSP1・SSP2 では 200 ～ 400 倍の増加との予測となっている一方で、SSP3 では 100 ～ 200 倍程度の増加との予測となっている。それに対し、例えば SSP2 に着目すると、T25S30 戦略では 21 世紀末の洪水暴露 GDP は 100 ～ 200 倍の増加との予測であり、T15S30 戦略では 60 ～ 100 倍程度の増加となっている。

●熱ストレスによる超過死亡数

T15S30 では、昇温の抑制により、3 戦略間では超過死亡増加が最も小さくなる。また、21 世紀中の時間的な変化も小さい。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では、21 世紀中の昇温に伴い、次第に超過死亡が増加していく。2080 年代には T15S30 の 1.5 ～ 2 倍程度の超過死亡増加が見込まれる。また、GCM 幅の上端は、BaU の GCM 幅の下端程度の超過死亡増加に達する。

熱ストレスによる超過死亡数の現在期間からの変化を世界集計でみた場合、21 世紀中の昇温に伴い、BaU (SSP2) では 2080 年代までに 5GCM 平均で 150 万人 (GCM 幅は約 100 万～200 万) の熱ストレスによる超過死亡数増加が

予測される。一方、例えば T20S30 戦略の下では、5GCM 平均で 50 万人までその増加は軽減される。T25S30・T15S30 ではそれぞれ 60 万人、40 万人（ともに 5GCM 平均）である。

地域別集計を見た場合も、戦略間の相対的な大小は概ね世界集計と変わらない。ただし、東欧・旧ソ連においては戦略間の差が見出しにくく、また年代を追っての増加がやや緩やかである。

人口の将来見通しの違いによる不確実性幅は、戦略間差と同程度あるいはやや小さい。SSP1・SSP2・SSP3 の間での違いを比較すると、例えば T20S30 の世界集計で見た場合、人口増加が最も小さな SSP1 では 2080 年代までに 5GCM 平均で約 45 万人の超過死亡数の増加が見込まれ、一方で人口増加が最も大きな SSP3 では約 55 万人の増加と予測されている。人口の将来見通しの違いによる不確実性幅は、T15S30 と T25S30 の戦略間差と同程度あるいはやや小さいことが示された。

●貧酸素水塊体積

T15S30 では昇温の抑制により、3 戦略間では貧酸素水塊体積の変化が最も小さくなり、GCM 幅が最も小さい。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では昇温に伴い、貧酸素水塊への酸素の輸送量や当該水塊内とその近傍における有機物分解による酸素の消費量が増加あるいは減少し、それらのバランスに従って貧酸素水塊体積が次第に変化（水域・GCM により増加あるいは減少）していく。2090 年代には T15S30 の 1.5 倍程度の貧酸素水塊体積の変化が見込まれる。また、GCM 幅の上端及び下端は、BaU の GCM 幅とそれほど変わらない。

貧酸素水塊体積の現在期間からの変化を、世界全域で見た場合、21 世紀中の昇温に伴い、BaU (SSP2) では 2090 年代までに GCM 幅の上端で約 $0.2 (10^{12} \text{m}^3)$ 増え、下端で約 $0.1 (10^{12} \text{m}^3)$ 減少する。これは T25S30 及び T20S30 においてもそれほど変わらない。一方、昇温の抑制が大きい T15S30 では、BaU、T25S30 及び T20S30 の場合より、GCM 幅の上端・下端ともに変化量が小さくなり、その結果 GCM 幅が減少する。

●海洋の輸出生産（海洋表層で生産され水深 100m を通過する有機炭素のフラックス）

T15S30 では昇温の抑制により、3 戦略間では輸出生産の減少が最も小さくなり、GCM 幅が最も小さい。T20S30 では T15S30 と T25S30 の中間的な予測結果となる。T25S30 では昇温に伴って次第に輸出生産は減少していく。2090 年代には T15S30 の 1.5 倍程度の輸出生産の減少が見込まれる。また、GCM 幅の下端は、BaU の平均値程度に達する。

世界全域でみると輸出生産はいずれの戦略でも減少するが、減少率は戦略により異なる。輸出生産の現在期間からの変化を、世界全域で見た場合、21 世紀中の昇温に伴い、BaU では 2090 年代までに GCM 幅の上端で約 5% 減少し、下端で約 15% 減少する。一方、T25S30 から T15S30 にかけて昇温の抑制が大きくなるにつれ、BaU の場合より、GCM 幅の上端・下端ともに減少率が小さくなるとともに、GCM 幅が減少していく。



3.2 対策評価結果

全体的傾向

対策評価関連指標について、詳細版第4章（「戦略」別評価結果）から読み取れる全体的傾向をここにまとめる。さらにその後、統合評価モデル出力の一部指標について評価結果の概要をまとめる。なお、まとめの記述はリスク回避性向が中程度の「戦略」（T15S30、T20S30、T25S30）に焦点を絞ったが、図中にはリスク回避性向が高い「戦略」（T15S45、T20S45、T25S45）についても結果を示している。影響評価の場合と同様に、T20S45はT15S30と、T25S45はT20S30と近い結果を与える。

1. どの評価指標についても、3つの「戦略」（T15S30、T20S30、T25S30）の間で評価結果に明確な違いが見られた（例：図3・図4）。T15S30ではT20S30あるいはT25S30に比べ、2020年代にほぼゼロ排出とすることを含め、早い時期から世紀末まで通して大きな排出削減が求められ、その結果、極めて大きなGDPロス・消費ロスを覚悟しなければ達成がなしえないとの見通しが示された。あるいはモデルによっては、現実的な範囲を超えた排出削減であると見なされ、解を示すことができなかった。また、モデル間で評価結果に幅はあるが、T20S30とT25S30の間でも、排出削減強度ならびにその実現のために受け入れが必要なGDPロス・消費ロスに、明確な差異が示された。T25S30では21世紀前半に達成すべき排出削減量はT20S30に比して半分以上で済むものと見込まれる。
2. 「戦略」の実現のために必要な排出削減量・GDPロス・消費ロスについて、世界を5地域に括ったかなり粗い地域区分で見た場合であっても、地域差が大きいことが示された（例：図4）。例えばGDPロス・消費ロスについては、BaUで化石燃料依存度の低い地域（OECD）で損失が低く、化石燃料依存度の高い地域（ラテンアメリカ・東欧・旧ソ連）では損失が拡大する傾向が共通してみられた。しかしながら、本報告書での「戦略」の分析は、あくまで世界全体で見て経済効率的に最適行動をとった場合に緩和目標を達成しうる排出削減量・経済ロスを示したものであり、地域間の削減責任の分

配の公平性についてはこれまで検討をしておらず、可能な国家間の富の移転政策等を別途検討する必要があることには、留意が必要である。

3. 最終消費エネルギーのBaUから各「戦略」への変化は、モデル間で差異が明確である。これは、エネルギー消費の柔軟性に関する仮定、すなわちエネルギー需要の他要素との代替可能性に関する仮定の、モデル間差が影響している（例：図5）。この仮定の差は、T15S30やT20S30のような強い緩和目標の評価に際して特に重要になる。
4. 一次エネルギー供給構成については、原子力依存度、再生可能エネルギー重視の程度などでモデル間の差が大きいことが示された（例：図7・図8）。単一の「戦略」についての一次エネルギー供給構成のモデル間差異は、単一モデルによる3つの「戦略」間の差異よりも大きい。この差はモデル不確実性と捉えることもできるが、見方を変えれば、厳しい緩和目標に向かうにあたって、我々人類が採用しうるエネルギー供給構成には選択の自由度が残ることを示していると捉えることもできる。
5. 野心的な緩和目標達成のためにはバイオマスエネルギー利用と食料需給の間で土地利用の大きな競合が生ずることが一般的に心配されているが、ICA-RUSでの複数の統合評価モデルを用いた分析によれば、モデルごとにみた場合には（エネルギー利用や経済活動に比べると）耕地面積推移に「戦略」間で大きな差が生じておらず、BaUからの変化も限定的であるとの見通しが示されている。ただし、作物生産性に悲観的な仮定が設定された場合には結果も変化すると予想されるため、さらに多様な条件での追加分析が必要である。なお詳細版第3章で、プロセスモデルによる空間詳細な評価に基づき論じたように、統合評価モデル分析におけるBECCS（バイオマスエネルギー組み合わせCO₂隔離貯留）の効率・実現可能量の想定はより悲観的なものとなる可能性も考慮されるべきである。仮に統合評価モデルでのBECCSの効率・実現可能量の想定を下方修正した場合には、同規模のBECCSの導入を実現するために、より多くの耕地をバイオエネルギー作物の栽

培に割かねばならないことが予想できる。

6. 産業部門影響における付加価値ロスについてみても、世界全体の GDP ロスと同様、各産業部門について T20S30 と T25S30 に明確な差異がみられ、T20S30 の場合は早い段階で付加価値ロスがピークとなる一方で、T25S30 では今世紀末まで徐々にロスが拡大している。これは、T20S30 の方がより早期に大きな排出削減が必要となるためと考えられる。また、産業部門間では大きな差異がみられないが、理由としては、排出削減コストが相対的に大きい製造業部門のロスが経済活動を通じて緩和される一方で、その反動で他部門の付加価値ロスが増加してしまうからと考えられる。

評価指標別の戦略比較

以下では、複数の統合評価モデル (MARIA、EMEDA、GRAPE、AIM) のうち出力を提供した評価指標について、各戦略についてその概要を示す。

● GHG 排出・削減経路 (図 3)

同じ「戦略」に対し、CO₂ 排出の経路を直接与えるモデルと累積排出量を制約とするモデルが存在する。このため、結果のパターンには広がりが生じる。厳しい排出制約を意味する T15S30 と T20S45 は一つのモデル (AIM) のみが結果を与えている。

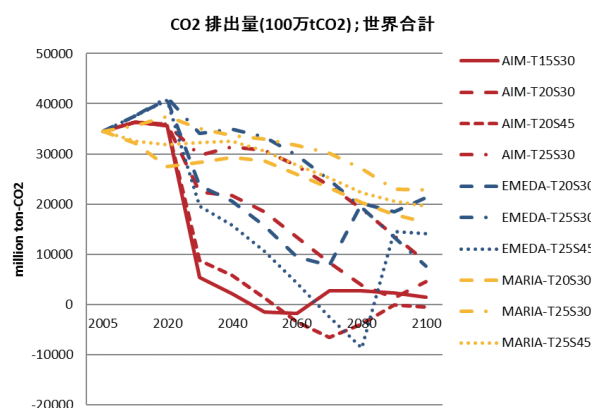


図 3 CO₂ 排出量
(100 万 t CO₂; BaU は SSP2 を想定; AIM・EMEDA・MARIA)

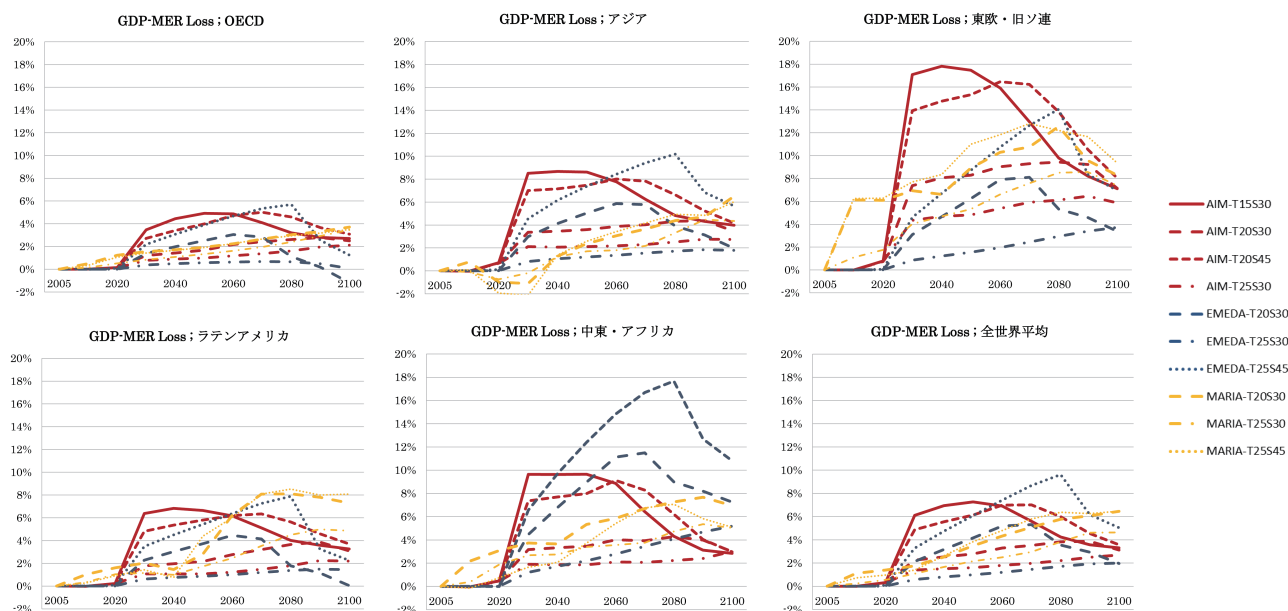


図 4 GDP (MER) 変化率 (地域別; 対 BaU (SSP2) 比 %; AIM・EMEDA・MARIA)

● GDP および消費の損失 (図 4)

世界マクロ GDP は T25S30 でいずれのモデルも 2% 程度の損失であり、T20S30 では 21 世紀末でほぼ 7% 程度の損失となる。戦略の制約が厳しくなるにつれ、地域差・モ

デル差とも拡大する。しかし BaU で化石燃料依存度の低い地域 (OECD) で損失が低く、逆の地域 (ラテンアメリカ・東欧・旧ソ連) では損失が拡大する傾向が共通して見られる。

●最終エネルギー消費の推移 (図 5)

最終消費エネルギーの BaU から各「戦略」への変化は、モデル間で差異が明確である。これはエネルギー消費の柔軟性に関する仮定が悲観的か楽観的かの差と見られる。

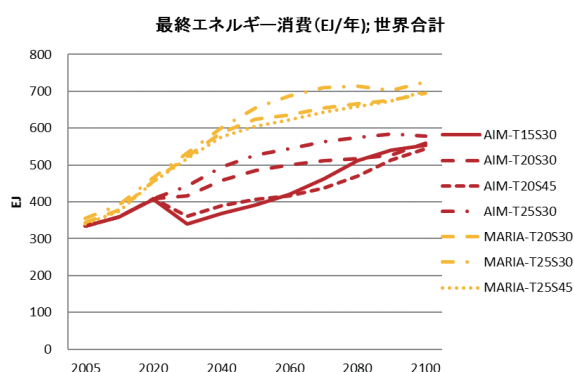


図 5 最終エネルギー消費
(EJ; BaU は SSP2 を想定; AIM・MARIA)

●一次エネルギー供給の推移 (図 6)

戦略ケースでは、原子力主導か再生可能エネルギー主導かに社会の選択の余地が大きい。他方、一次エネルギー供給の数値の広がり、省エネルギーの進展に加え、原子力や再生可能エネルギーにおける変換効率の定義の差も含むため具体的な意味はより詳細なデータに基づいた議論が必要である。

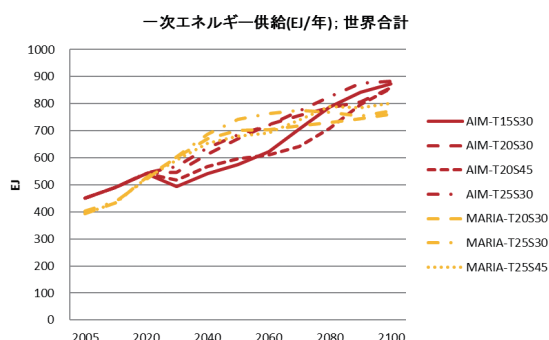


図 6 一次エネルギー供給
(EJ; BaU は SSP2 を想定; AIM・MARIA)

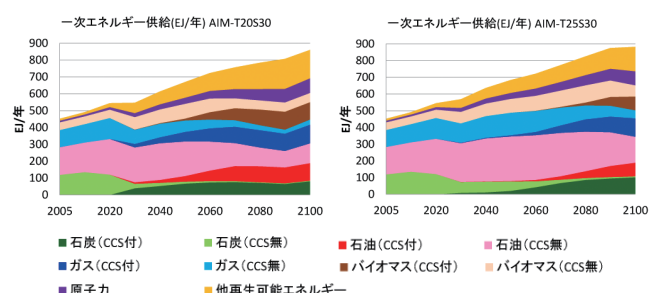


図 7 一次エネルギー供給構成
(EJ/年; BaU は SSP2 を想定; AIM)

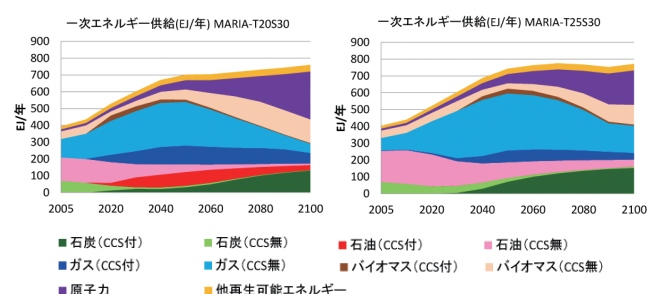


図 8 一次エネルギー供給構成
(EJ/年; BaU は SSP2 を想定; MARIA)

●エネルギー技術 (図 7・図 8・図 9)

エネルギー技術の分析は AIM 及び MARIA でのみ行われた。T15S30 の場合には、エネルギー技術の構成を提供した AIM、MARIA の両モデルとも 2030 年段階から厳しい対策、すなわち、CCS (CO₂ 隔離貯留) の大規模導入、電源の非化石化 (原子力、再生可能)、各部門の電化が開始されている (図 7・図 8)。AIM ではさらに BECCS (バイオマスエネルギーと組み合わせた CCS) についても 2030 年から大規模に導入されている。これらは、数値解として得られているものの、現実的にはかなり厳しい条件であるといえる。

主要な削減技術として、MARIA が原子力、AIM は太陽光・風力と BECCS といったようにモデル間の差異が大きくなっている。これは逆にいえば多様な選択肢を持つということであり、技術の進展度や社会の選好に応じて、幅の広い「技術戦略」があるということを示唆している。

なお、BECCS の導入は不可欠という結果である。しかし導入可能量と導入タイミングは自由度がある。CO₂ 制約を厳しくすると、導入時期が前倒しになる。図 9 に AIM 及び MARIA の BECCS 導入量を示す。AIM の T15S30 では、

2030 年から BECCS が急増している。目標温度が高くなるにつれて、BECCS が導入される時期が遅れていく。MARIA については、AIM ほど極端な導入は想定していないが、T15S30 では、2050 年ころから着実に導入が進められている。

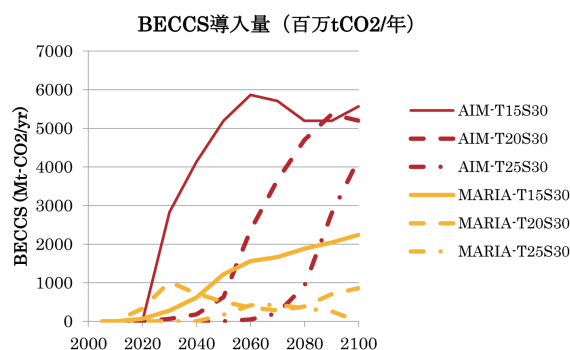


図9 BECCS 導入量
(100 万 t CO₂/ 年; BaU は SSP2 を想定; AIM・MARIA)

●土地利用と食糧需給

各モデルが対象とする農作物の範囲に差があるものの、どの戦略ケースにおいても耕地面積、生産量、収率とも

BaU から大きな差は発生せず、バイオマス利用と食糧供給の競合は深刻でないことが示唆されている。ただし、これは収率の仮定に依存する。

●産業部門・地域別影響 (図10・図11)

世界各地域の経済が複数の産業部門によって構成され、産業部門別分析が提供可能なモデルである EMEDA の結果によれば、T20S30 では、各産業部門の付加価値が大きく減少したが、今世紀末ではその減少幅が小さくなった(図10)。各産業部門とも2070年位まで付加価値ロスが増加し、農業と製造業で最大6%、サービス業で5%となった。21世紀末には2~3%まで減少した。T25S30では、各産業部門とも徐々に付加価値ロスが増加し、21世紀末に最大となり、農業で3%、製造業で2.5%、サービス業で2%となった。なお、T15S30については想定したモデルパラメータの範囲では解を得ることができなかった。

経済成長率の視点で T20S30 の地域別の影響を見たのが図11である。全体としての特徴は、アジアにおける高成長から低成長への急激な移行、アフリカにおける高成長の持続、先進国の低い成長率への収束が見られた。

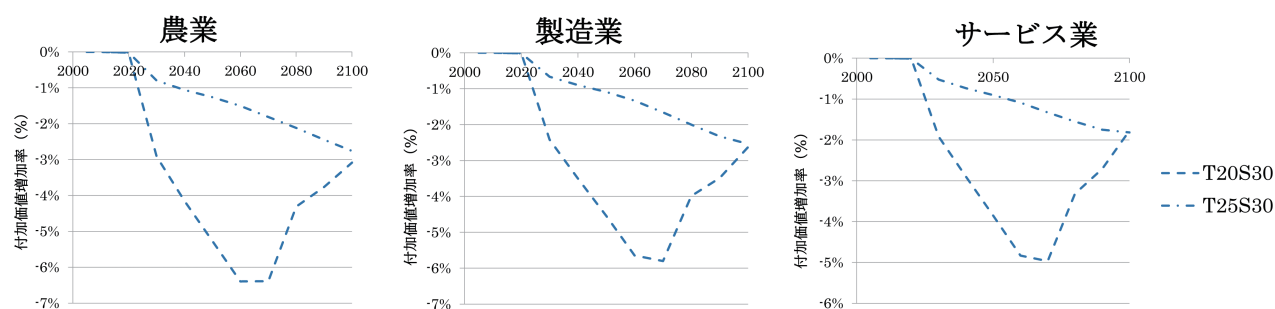


図10 付加価値増加率 (世界・産業別; 対 BaU (SSP2) 比%; EMEDA)

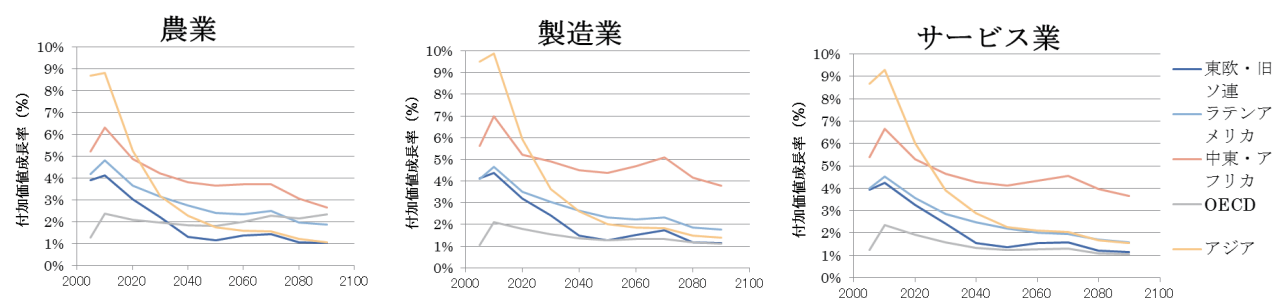


図11 地域別付加価値成長率 (地域別・T20S30; 対 BaU (SSP2) 比%; EMEDA)

4.1 他のリスク事象と比較した上での、気候変動問題の特徴

気候変動リスクの特性：リスク認知研究から

気候変動によるリスクは、大半の被験者にとって、遠い将来に、自分から遠い地域に、あるいは他の動植物に影響を及ぼす脅威と感じられており、自分自身に関わる喫緊の課題とは感じていないことが報告されている。

また、気候変動リスクの特性を、リスク認知を形成する要因から分析すると、第一に、原因が見えないこと、第二に、原因と影響が時間的にも空間的にも離れていること、第三に、人間が気候に影響を与えていることは感覚的に理解することが難しく、対処の方法についても同様に感覚的に理解することが難しいこと、第四に、社会的にも対処する仕組みが整えられておらず、また、個人の利益や多くの社会勢力が現状維持を望んでいることから喫緊の課題と考えにくいこと、が挙げられる。

個人の特性と気候変動リスク認知

既往研究からは、価値観や世界観、政治的な党派心などが気候変動リスクに関する情報を理解する上で作用していることが報告されている（4.2 参照）。

知識と関与のギャップ

気候変動を含む環境問題は、知識が行動につながりにくいことが知られている。個人の行動は、個人の考えや意図だけでなく、社会的なインセンティブやフィードバックによって導かれるため、個人の貢献が、自分から見ても他人から見てもごくわずかだと感じられる場合、あるいは個人の犠牲が他人の過剰消費によって相殺される場合、意図に反した行動に導かれる。

意思決定の分岐：精緻化見込みモデル

精緻化見込みモデルは、人が説得的なコミュニケーションを受けた際に、どれほどそのことについて考える（精緻化する）見込みがあるかによって、中心的態度変化が生じる場合と、周辺の態度変化が生じる場合があることを説明する。気候変動リスクは、多くの一般市民にとって精緻化する見込みが低く態度変容を生じにくい事象であると考え得る。

社会的合理性についての再考

地球規模の気候変動リスク管理という課題は、国際的な政策課題とされて久しいが、依然として、多くの市民にとって積極的に意思決定に関与したいと考える動機が生じにくい点において、萌芽的な科学技術と同様に、市民から意見を問うことに難しさが伴う。社会に何を問い、そこから何を求めることを期待するのかを精査する必要がある。

4.2 リスク事象に対する人々の価値観の分類

社会集団は日頃の営みの中で、独自の世界観（世界に向き合う際の社会的、文化的、政治的姿勢であり、複雑な状況に直面した際に個人の行動の指針となるもの）と社会管理様式を集合表象として形成する。世界観は無意識のうちに個人の意識に取り込まれ、個人にいやおうなく影響を及ぼす。このような世界観を Grid（個人の行動を規定する社会規範の強さ）と Group（個人の意思決定において、集団の構成員であることを意識させられる圧力の強さ）で類型化し、市民の気候変動のリスク認識との関係を分析した研究が、近年多数発表されている。本プロジェクトでは、日米の市民を対象とした調査を実施し、Grid-group スコアやその他の社会人口関連変数と、気候変動に関する目標の位置づけ、目標水準、各種緩和策の実施の是非等との関連について調査した。その結果、日本は総じて高 Grid 側に偏在しているのに対し、米国では低 Group 側に偏在していることが明らかとなった。このような両国の文化的相違は、温暖化防止目標の位置づけの相違（日本では法制化支持が 58.3%、米国では反対が 69.1%）（図 12）、懸念すべき影響に関する相違（日本では途上国での被害を強く懸念する傾向があるのに対し、米国では途上国と先進国との間に差が見られない）（表 5）、緩和策を実施すべきエリアに関する相違（日本はエネルギー転換、省エネ、農林水産分野での取り組み、廃棄物関連の取り組みの全てにおいて、先進国での緩和策が強く支持されているのに対し、米国では全ての対策分野について、先進国と途上国の間に差が見られない）などとして表れている。そして許容する総削減量を目的変数とする多変量回帰分析からは、両国とも Group スコアが高い程削減に積極的となり、Grid スコアが高い程消極的になる、という傾向が確認された。

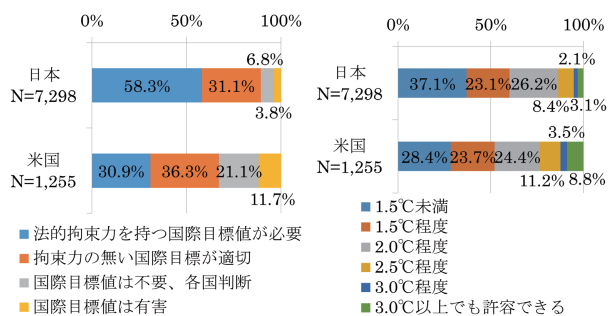


図 12 目標の位置づけと水準

表 5 被害に対する懸念

		水	生態系	食糧
日本	途上国被害を懸念	46.4%	44.0%	50.8%
	先進国被害を懸念	40.7%	40.0%	44.2%
米国	途上国被害を懸念	49.0%	43.3%	47.8%
	先進国被害を懸念	47.7%	42.2%	44.2%

注：赤字は有意差が確認された項目

4.3 気候変動の波及構造に関する国民のリスク認知

(1) 国民参加の必要性

国民の社会的意思決定過程への関与の背景となる規範は民主主義である。現行の気候変動リスク管理における意思決定の方法は、民主主義の規範に照らして不十分だという見方がある。実際に、一般国民対象のインタビューにおいて、予算の枠を超えた解決策や、日常生活における比喩が提示されるなど、国民の意志決定過程への参加が、現行の方法を補う可能性が示された。そうであれば、国民参加の機会が限られている現状において、国民参加を低コストで実施するための方策や、国民参加が特に有効に機能すると予想される議題を検討することが必要となる。

(2) 国民から見た心理的障壁

気候変動リスクは、国民から見て喫緊に対応可能な課題ではなく、関心や優先順位も低い傾向があるため、議論に参加するコストが大きいと予想される(4.1 参照)。

一方、2009 年に開催された気候変動問題に関する世界市民会議 (World Wide Views: 以下、WWViews) では、

事後質問紙調査において、多くの参加者が類似イベントへの今後の参加意欲を示した。本プロジェクトでは、参加コスト低減に向けた方策を検討するため、WWViews の経験がもたらした心理的参加障壁の緩和効果を分析した。

- 前熟慮段階**：「関心が持てない」という障壁に関して、参加決定後や参加後に、温暖化政策に関連する情報に対する感度が上がった。
- 熟慮段階**：イベント自体以外の別の明確なベネフィット(例：旅行等)を示し、参加コストが低いことを強調することが有効であった。
- 準備行動段階**：「初対面の他者とでも議論ができる」という自信が鍵である。参加者は、議論を支援する環境や工夫により議論ができることを体験する。
- 維持段階**：周囲の人からの肯定的な反応が、活動を維持し、周囲に働きかける動機づけとなる。

(3) 国民の参加が期待される論点

一般国民に対するインタビュー調査から、国民から見た論点の所在を検討した。

その結果、気温上昇の数値目標や費用分担を問うた場合でも、国民は他リスクと比べた際の優先順位、対策の実施判断における自身の持つ譲れない価値や原則などを議論した。ここからは、具体的な数値以上に「これだけは避けたい」と考える価値の議論の方が国民にとっては重要なのだと考えられる。そのため、こうした議論を補助する、他リスクと比較できる形での情報提供などが期待される。また質問の仕方やデータを提供する組織や人への信頼も議論に影響を与えていた。

(4) 国民の意見を反映するシステム

国民が十分に理解し、考えることと、意見を把握する方法の実施コストや統計的代表性には、一般にトレードオフがある。そのため議題ごとに、質問紙調査、簡易シミュレータ調査、討論型調査の組み合わせを検討する必要がある。また討論型調査を、選挙制度を補完し、少数派の権利の擁護をより実現する仕組みとして検討した。その仕組みでは、ステークを持たない市民だからこそ、多様な主張を媒介できる可能性がある。



<http://www.nies.go.jp/ica-rus/index.html>

本研究プロジェクトに関する問い合わせ先

独立行政法人 **国立環境研究所**
地球環境研究センター 気候変動リスク評価研究室
Email : s10-info@nies.go.jp

2015.9