



ICA-RUS REPORT 2013

リスク管理の視点による気候変動問題の再定義



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

2013年3月

はじめに

ギリシア神話のイカロスは、父のダイダロスとともに迷宮から脱出するため、ロウで固めた鳥の羽でできた翼で、海の上に飛び立った。よく知られていることだと思うが、イカロスは高く飛びすぎたため、太陽の熱でロウが融けて翼を失い、墜落してしまう。しかし、あまり知られていないかもしれないが、イカロスがもし低く飛びすぎた場合、翼が海のしぶきを吸って重くなり、やはり墜落するおそれがあったそうだ。つまり、イカロスは高く飛んでも低く飛んでも墜落するリスクがある、リスクトレードオフの状態にあったということができる。

気候変動に関して人類が置かれている状況はこれと似ている。気候変動の問題は、対処せずに放置しておけば悪影響のリスクが増大するが、急激に対処しようとしても社会経済的、技術的なリスクが発生するという意味で、リスクトレードオフの状態にあると考えられる。どちらのリスクをどの程度とって、気候変動にどう対処していくべきかは、自明な問題ではない。それは、第一にはどちらのリスクにも大きな不確実性があるためであり、第二にはどのリスクがどの程度受け入れ可能であるかは価値判断の入る問題だからだ。

我々は、不確実性やトレードオフを含めて気候変動問題におけるリスクの構造を描き出し、これを社会に提示してリスク選択の判断を問うことを目的として、2012年6月に環境省環境研究総合推進費の戦略的研究プロジェクトS-10として「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」をスタートした。国内15機関の44名の参画者と約40名の協力者が参加しており、予算規模は年間約3億円、研究期間は5年間である。英語の愛称を”Integrated Climate Assessment – Risks, Uncertainties and Society (ICA-RUS)”としたが、イカロスの神話のような悲劇的な結末を暗示する意図は無い。結論を予断することなく、現代社会が複雑なリスクトレードオフの中でどのように飛ぶべきかを自ら判断するための一助になりたいと考えている。

本レポートは、本研究の活動の成果の中から、ご関心のある皆さまにお伝えしたい内容を抽出して毎年1回発行するもので、今回が第1号である。2012年度は主として問題の枠組みの設定と問題構造の定性的な分析を行った結果をご覧頂きたい。

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長
江守 正多 (ICA-RUS プロジェクトリーダー)

ICA-RUS REPORT 2013

リスク管理の視点による気候変動問題の再定義

Integrated Climate Assessment-Risks, Uncertainties and Society



CONTENTS

目次

| | |
|-------------------------------|----|
| 1 ICA-RUS の全体像 | 1 |
| 2 ICA-RUS における検討の前提 | 5 |
| 3 気候変動リスクの網羅的な整理と論点の抽出 | 8 |
| 4 今後の研究の方向性・進め方 | 23 |
| 引用文献 | 24 |

1.1 ICA-RUS 立ち上げの背景と目的

国連気候変動枠組条約における国際交渉においては、「産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」ことが、2010年のCOP16で採択されたカンクン合意に盛り込まれた（以下ではこれを「2℃目標」とよぶ）。翌年のCOP17では、全ての国を対象とした法的枠組みに関して、2015年の採択、2020年からの実施を目指すことが合意されたが、同時に2013年～2015年に長期目標のレビューが実施されることが決まった。このレビューでは、小島嶼国等の主張に配慮し、気温上昇を2℃よりも厳しい1.5℃以内に収めるという目標も視野に入る。

しかしながら、2℃目標を達成するために必要な温室効果ガス排出削減量と各国の温室効果ガス排出削減目標との間には隔たりがあり、2℃目標の達成に向けた削減の見通しは立っていない。World Bank (2012)によれば、現状の各国の2020年の排出削減目標・削減行動が全て実現したとしても、2100年の気温は「およそ20%の確率で産業化以前から4℃以上の上昇」に達するとされている。

この確率的な表現からもわかるとおり、温室効果ガス排出量と気温上昇量の関係には科学的な不確実性があることに十分な注意が必要である。また、温暖化の影響評価や対策効果の評価にも同様に不確実性があるほか、温暖化の対策に伴う波及効果（例えば大規模なバイオマス燃料利用による食料との競合）もよく理解されているとはいえない。

さらに、そもそも2℃を超えてはいけなどうかは科学的にのみ決まる目標ではなく、どんな悪影響を受け入れられないかという社会の価値判断を含んでいるはずである。

このような状況の中、我々は現状の国際交渉において2℃目標を掲げること自体に異議を唱えるものではないが、気候変動の対策目標の問題を不確実性下の意思決定の問題として改めて捉えなおし、「リスク管理」の視点から深く再検討する必要性を認識する。

「リスク管理」の定義は「2.2 現状の検討枠組み」に後述するが、本研究においては、1) 不確実性の明示的な考慮、

2) 利用可能な最大限の科学的知見の利用、3) 将来の状況変化に対応した柔軟な見直し、といった特徴を重視するほか、2011年3月11日の東日本大震災と原発事故の教訓から、4) あらゆる可能性の考慮（「想定外」を安易に作らないこと）、およびリスク管理が本質的に5) 社会的な意思決定プロセスを含むことにも配慮する。なお、一般に「気候変動のリスク管理」といった場合、地域規模の適応の議論を指すことが多いが、ここでは地球規模の対策目標の議論を指していることに改めて注意されたい。

リスク管理的な視点から地球規模の気候変動対策目標を検討している例としては、「2℃を50%の確率で超えず、4℃を超える確率を可能な限り低くする」という目標を提示している英国のCommittee on Climate Change (2008)、「2℃以内を目標としつつ、3~4℃にも備え、さらに5~7℃に対する緊急時対応策を持つ」という戦略を提示しているMabey *et al.* (2011) といった例があるが、現状ではこのような検討は必ずしも多くない。

そこで本研究では、様々な気候変動影響のリスク、緩和・適応・気候工学¹⁾等の多様なリスク管理オプション、水・食料問題等との相互関係、および社会のリスク認知や価値判断を包括的に検討するとともに、これらを総合的に踏まえて地球規模の気候変動リスク管理戦略を検討する。これを社会に提示することにより、国際的な合意形成への寄与や国内の政策立案の支援を目指す。

なお、近年、持続可能性に関わる国際研究プログラムの改組が進んでおり、Future Earthとよばれる学際的なイニシアチブが立ち上がる。ここでは、人類が地球の持続可能な活動領域をいくつかの側面で超え始めたことが認識され、持続可能な未来の姿を科学と社会の協働により見出そうとしている。本研究はこのような動きとも呼応する面を持つ。

1) 気候工学については、「コラム4: 気候工学とはなにか (p. 13)」を参照

1.2 ICA-RUSの構成

地球規模の気候変動リスク管理戦略の検討を行うために、ICA-RUSは5つの研究テーマにより構成されている(表1)。

表1 各研究テーマの概要

| |
|--|
| <p>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 (リーダー：高橋 潔 国立環境研究所 主任研究員)</p> <p>●気候安定化目標を含む総合的な気候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。(気候安定化目標そのものの提案はしない。)</p> |
| <p>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 (リーダー：山形 与志樹 国立環境研究所 主席研究員)</p> <p>●気候変動の影響および対策と水、エネルギー、食料、生態系などとの相互作用を、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。</p> |
| <p>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 (リーダー：沖 大幹 東京大学 教授)</p> <p>●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。</p> |
| <p>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 (リーダー：森 俊介 東京理科大学 教授)</p> <p>●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。</p> |
| <p>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 (リーダー：藤垣 裕子 東京大学 教授)</p> <p>●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。</p> <p>●国民の気候変動リスク認知における社会的要素および科学・リスクコミュニケーション上の重要特性を分析する。</p> |

なお、各テーマのより詳細な内容や各テーマを構成するサブテーマ等については、ICA-RUSのウェブページ(<http://www.nies.go.jp/ica-rus/index.html>)を参照されたい。

また、ICA-RUSが目標とする包括的なリスク管理戦略の検討のためには、図1に示すようなテーマ間の情報・データ授受等の相互連携が不可欠である。このようなテーマ間連携とプロジェクト全体での総合的な議論のため、「ICA-RUS気候リスク管理戦略のための総合化会議」(総合化会議)を設置し、ICA-RUS参画者と協力者の一部による毎月1回の検討を行っている。

さらに、テーマ横断的かつ集中的な検討が必要と判断された特定のトピックに対しては、テーマ横断型のタスクグループ(TG)を設置している。2012年度は、1)ICA-RUSの検討における各種概念の定義や検討の枠組みを構築する「概念検討TG」、2)時間の経過とともに得られる情報に基づいて意思決定を逐次修正する手法を検討する「逐次意思決定TG」および3)ICA-RUSで用いる社会経済シナリオの検討を行う「シナリオ検討TG」の3つのTGを設置した。本レポートの「2 ICA-RUSにおける検討の前提」は、概念検討TGの検討結果に基づく。他のTGの検討結果についても、次年度以降のレポートに掲載したい。

1.3 ICA-RUSの原則

ICA-RUSでは、「中立性」、「包括性」、「透明性」の3つの原則を重視して研究を推進する。

「中立性」は、ICA-RUSができる限り特定の価値判断や政治的な立場に偏ることがないように努めることを意味する。ICA-RUSでは、リスク管理における科学の役割は判断の枠組みを構築して社会に提示することであり、判断自体は社会に開かれているという立場をとる。そのため、研究の各段階で特定の価値判断を暗黙の前提にすることが無いよう、総合化会議などの場で参画者が互いに点検し合うよう努める。なお、ICA-RUSは環境省の環境研究総合推進費により実施されているが、研究の内容や結論が環境省の行政的立場に影響を受けることは無いものと理解している。

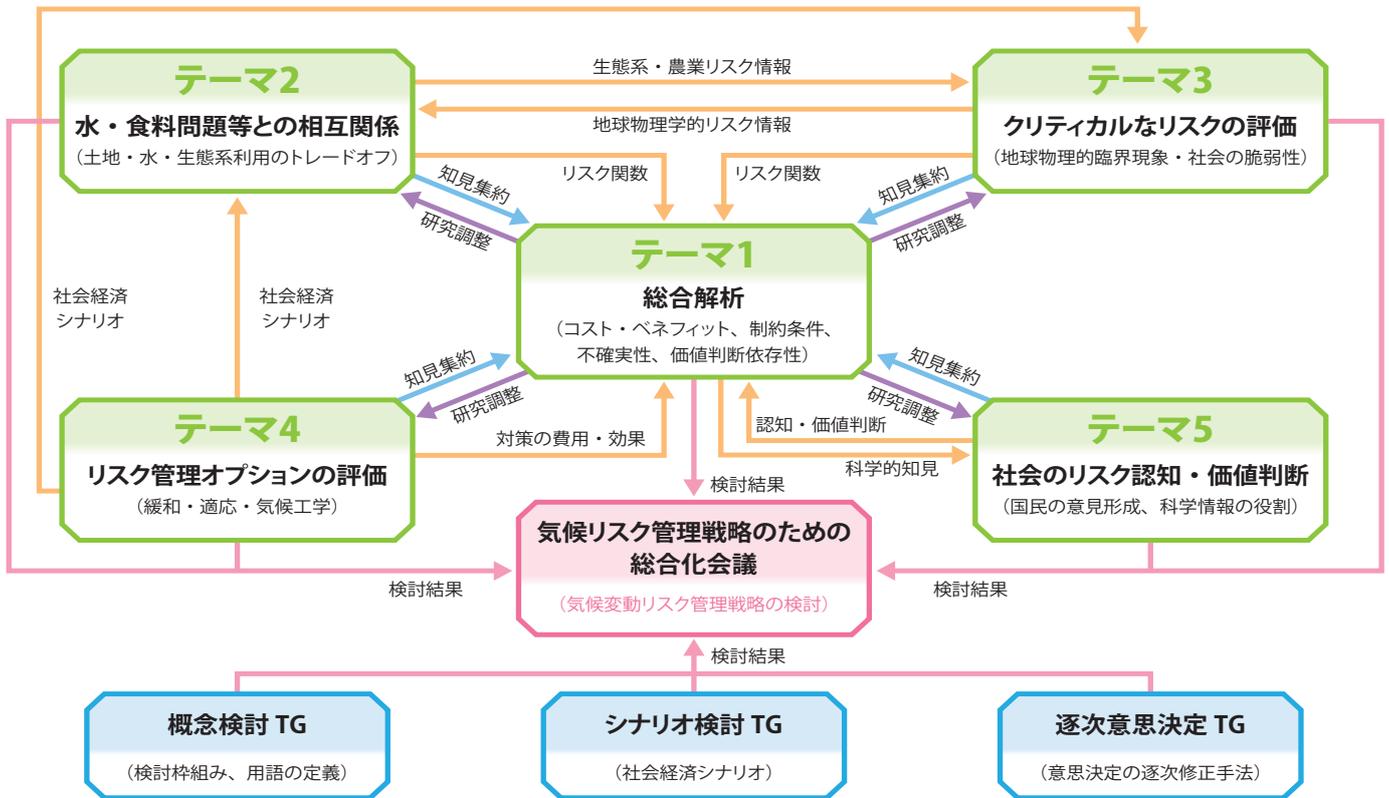


図1 テーマ間の情報連携

「包括性」は、リスク管理が利用可能な最大限の科学的知見に基づくという原則から、不可欠なことである。同時に、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、前項の「中立性」を脅かす原因ともなるため、避けるよう努める必要がある。このため、ICA-RUSでは、限られたトピック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担保に努めている。初年度である2012年度はサーベイに特に重点を置き、本レポートの「3 気候変動リスクの網羅的な整理と論点の抽出」に示す各種インベントリの作成と論点整理を行った。

「透明性」は、ICA-RUSの検討結果が社会の信頼を獲得するための必要条件である。そのため、総合化会議の議事録をはじめとして、検討の過程や材料などを可能な限りウェブページ上で公開するように努める。また、「中立性」や「包括性」とも関連して、各種ステークホルダーと対話の機会を持ち、ICA-RUSの検討内容に重要な抜けや偏りが無いかなどのご意見を伺いながら検討を進めていく。

1.4 ICA-RUSの守備範囲と独自性

国連気候変動枠組条約における2015年までの新しい枠組みの合意に向けて、国連の交渉の場の内外で、様々な主体から様々な枠組みが提案されることが予想される。しかしながら、ICA-RUSは、そのような国際枠組みを具体的に提案することを目標としない。その理由は、国際枠組みの提案にあたっては各国の利害や合意可能性等の国際政治的な現実性を検討する必要があり、そのような検討はICA-RUSの守備範囲外と考えるためである。また、2013年～2015年の長期目標のレビューにおいても様々な議論があり得るが、ICA-RUSは特定の長期目標も提案しない。それは、特定の長期目標を選択するためには社会の価値判断が必要と考えるためである。

ICA-RUSの守備範囲内にあるのは、今後様々な主体から提案される国際枠組みや長期目標、あるいは誰からも提案されない別の可能性に対して、それぞれがリスク管理の視点で見た場合にどのような意思決定を合意するの

かを明らかにし、その科学的および社会的な合理性を診断することである。ここで「科学的合理性」とは、意思決定の根拠や論理的推論が科学的に妥当であることを指し、「社会的合理性」とは、社会の構成員にとって妥当な意思決定プロセスを踏んでいることによって、社会の価値判断を妥当に反映していると思なされることを指す。

ICA-RUSでは、意思決定の科学的合理性を検討するにあたり、既往の研究でもよく検討されている気候変動の悪影響リスクと対策コストに加え、各種対策が波及効果としてもたらすリスクや機会等も包括的に捉えたいうえで、リスクのトレードオフ構造を描き出すことに独自性がある。

さらに、このリスクトレードオフをよく理解した場合に市民が示すリスク認知、価値判断についての知見を得ることで、意思決定の社会的合理性の検討に資する材料を提供する。この点も極めて独自性が高い。また、検討の枠組みや考慮すべきリスク・機会の包括性について、各種ステークホルダーからのフィードバックを得て中立性と透明性を確保することも、ICA-RUSの特色である。

国際政治的現実性についての包括的な分析は国内外の他の研究あるいは実践主体に委ねることとし、そこにICA-RUSの成果を提供することによって、現実に関渉等の場で行われる意思決定に寄与できると考えている。

コラム1 気候変動のトレードオフを巡る価値判断

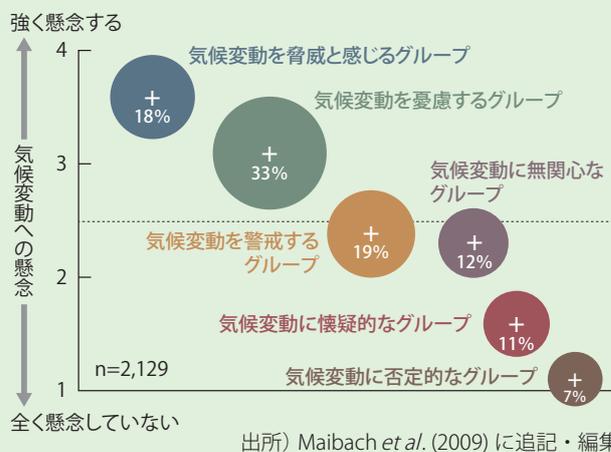
気候変動とその対策には様々なトレードオフが内在する。例えば200年後の気候変動を抑制するために、現在の社会が緩和コストをどの程度負担すべきかという論点には、現代の利益と将来世代の利益に関するトレードオフが含まれており、客観的に唯一の解を求めることは本質的にできない。このように人が気候変動にどのような姿勢で臨むのかは、価値判断に依存する。意思決定者にとって重要なトレードオフ関係を明らかにすることは、気候変動の科学がどの不確実性やトレードオフを解明し描写すべきなのかという主題に対する実践的な回答の一つになる。

空間的・時間的・社会的な広がりを持つ地球環境問題に関し、人と社会がどのようなトレードオフを抱えているのかについては、Vlek & Keren (1992) が人間社会の「存続のジレンマ (survival dilemma)」として挙げた、現在と未来、損失見込みと利益見込み、当該地域と他地域そして個人と集団に関する4つを中核的なジレンマと考えることができる。これらが社会内のジレンマであることを考慮すると、社会と社会外(例えば自然生態系)とのジレンマについても、追加検討の余地があるだろう。

上記のジレンマに係る意思決定では客観的な最適解が存在しないため、人は価値判断を迫られる。では人の価値判断、特に不確実性が大きくリスクのトレードオフとなる課題の判断に対し、どのような体系を仮定することが適当だろうか。Douglasらは、人のリスク認知には個人の意思の外で社会的に構成される部分があり、社会観(階層主義、平等主義、個人主義または運命論)によって異なると主張した(Douglas, 1970, 1978; Douglas & Wildavsky, 1982)。この主張への異論は多いものの、気候変動に関してはこれを裏付ける研究結果があらわれ始めている。例えば Malka *et al.* (2009)

は米国で1,000人規模の社会調査を実施し、政治姿勢が気候変動問題への取り組み姿勢と関連していることを明らかにした。同様に2007年以降毎年1,000人規模の市民を対象に実施されている調査“Six Americas”では、気候変動問題への市民の姿勢は6類型に分類され、それぞれの類型が支持政党およびDouglasらの分類と関係していることを明らかにした(Maibach *et al.*, 2009, 2011)。

以上のように気候変動のリスクトレードオフに対する意思決定は、基本的な社会観—そもそも社会はどのように目標を共有し、社会の成員はどのような義務を負っているのか—に少なからず依存すると考えられる。今後はこれら主要な社会観を基礎として、重要な不確実性の所在とその適切な提示方法を明らかにしていくことが重要になるといえる。



コラム1図1 米国における気候変動に対する姿勢の6類型

2.1 前提検討の必要性・意義

ICA-RUS の検討・提示する気候変動リスク管理戦略が国際的な合意形成や国内の政策立案といった現実の意思決定に寄与しうるためには、そのリスク管理戦略の検討枠組み自体について議論を重ねたうえで明示し、また状況（例えば、利用可能な知見や対策）の変化に応じてその見直しを繰り返す必要がある。ここで検討枠組みとは、分析対象とするリスクや対策の種類・範囲（と選び方）、リスク評価手法の選択、管理戦略検討の手順、ステークホルダーや政策決定主体のニーズ反映の仕組みなど、検討の前提条件のことを広く指す。また関連して、用語整理も検討枠組みのうちに含める。

もし検討枠組みに関する議論や合意が無いままに研究を実施しリスク管理戦略を示した場合、意思決定主体はその提示された管理戦略の前提条件を適切に評価できず、結果的に示された管理戦略を決断の根拠として活用しないかもしれない。あるいは、より望ましくない状況としては、意思決定主体が検討の前提条件（特に、その中立性や包括性）に無関心なまま提示された管理戦略を無批判に採用してしまい、結果としてリスク管理に失敗することも起こりうる。

理想的には、最初に検討枠組みの議論を集中して行い、その後に研究を実施して管理戦略を提示し、再び検討枠組みの見直しを行うことを繰り返すべきであるが、5年という限られた研究期間で一定の成果を得ることを優先し、検討枠組みの議論と個別研究を並行して進める。検討枠組みの議論については、まず2012年度は、用語整理と既存の汎用的な枠組みの応用可能性の検討を行った。以下では両作業の概要を示す。

2.2 現状の検討枠組み

重要用語の定義

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第4次評価報告書ではその統合報告書の政策決定者向け要約に「気候変動への対応には、気候変動の被害、共同便益、持続可能性、衡平性、リスクに対する姿勢を考慮し、適応と緩和を含めた反復型のリスク管理プロセスが含まれる」とのメッセージが明記された (IPCC, 2007a)。しかし、気候変動問題をリスク管理の問題として扱う試みはまだ広くは普及しておらず、その用語についても様々な定義で扱われている。ICA-RUS 内外の円滑なコミュニケーションに向け、重要用語について ICA-RUS での定義を文章化し共有することとした。ただし、ICA-RUS として新定義を開発する意図はないため、基本方針として、リスク管理周辺の用語については International Risk Governance Council (IRGC) の定義 (IRGC, 2005) を、気候変動関連の用語については IPCC の最新報告書である「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書 (IPCC-SREX)」 (IPCC, 2012a) の定義を採用することとした。以下にその一部を記す。(本レポートでは紙幅の都合上、リスク管理周辺用語のみ示した。気候変動関連の用語については環境省による IPCC-SREX の概要資料 <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14453> を参照されたい。)

■ リスク (Risk)

人間が価値を置く事物に関して、ある事象・活動が引き起こす不確実な結果。その結果は人々がその事物に関連付ける価値に依存して、正にも負にもなりえる。

■ リスク評価 (Risk Appraisal)

リスクの特徴づけ、判断、管理に必要なあらゆる知識要素を結集させるプロセス。リスクアセスメントの(科学的な)結果だけではなく、リスク認知や、リスクの結果の経済的・社会的含意に関する情報も含まれる。

■ リスクアセスメント (Risk Assessment)

あるリスクに関わる（通常は望ましくない）結果の種類、強度、確率について、できれば定量的な形で、同定・

調査する課題。リスクアセスメントは、ハザード同定・推計、曝露・脆弱性アセスメント、およびリスク推定からなる。

■ リスクの特徴づけ (Risk Characterisation)

リスクの受忍性・受容性の判断に必要な証拠に基づく要素を決定するプロセス。

■ リスクの判断 (Risk Evaluation)

リスク判断に関わる、価値観に基づく要素を決定するプロセス。リスクー便益バランスや QOL (生活の質) に関する含意の組み込みを含み、また、社会的動員のポテンシャルのようなものや、技術選択やリスクを誘起する特定の活動への社会的ニーズといったリスクの前提として存在する問題について考慮することも含まれ得る。

■ リスクガバナンス (Risk Governance)

リスクガバナンスは、関連するリスク情報をどのように収集・分析・交換するか、管理に係る決定をどのように行うかということに関わる、主体、規則、慣習、プロセス、メカニズムの全体を含むものである。リスクガバナンスは、政府並びに個人主体によるリスクに関連した決定・行動の組み合わせを包括し、強制力のあるリスク管理を決定する単一の権者が存在せず、リスクの性質が異なる様々な利害関係の間の協力・協調を必要とするものである場合に特に、しかしそのような場合に限定されることなく、重要である。リスクガバナンスは、多面的で多くの主体に関わるリスクプロセスを含むが、それだけではなく、制度的な仕立て (例えば、主体の関係、役割、責任を決定する規制や法的枠組み、ならびに市場、インセンティブ、自主規範といった調整メカニズム) や異なるリスク認知を含む政治風土といった背景因子の考慮を必要とするものである。

■ リスク管理 (Risk Management)

人間社会の便益を増加させ人間および人間が価値を置く事物への危害を回避することを目的とした、人間活動あるいは (天然・人工の) 構造を開始・変化するためのオプションの創造・判断。加えて、選択されたオプションの実装とその効果のモニタリング。

■ ステークホルダー (Stakeholder)

リスクの起源となる事象や活動、ならびに／あるいは、そのリスクに対処するために取られるリスク管理オプ

ションにより、影響を受けているあるいは受けることが予想される社会的に組織化されたグループ。

リスク管理に関わる用語は英語圏でも研究コミュニティや適用分野により用法・定義がまちまちであり、それを和訳して用いる場合にはさらに混乱が生じやすい。ICA-RUSでは、気候変動問題におけるリスク管理戦略の検討枠組みの構築に対応させて、用語の用法・定義についても参画者間で随時検討し、特に注意して用いるべき用語の確認とその認識共有に努めている。例えば我々は、検討枠組みの手順の中で価値判断を排した知識整理のプロセスと価値判断が加わるプロセスを意識して区別することが重要と考えており、採用した定義のうち例えば「リスクアセスメント」は前者のプロセスの一つとして、「リスクの判断」は後者のプロセスの一つとして位置付けられる。

■ 検討の枠組み・進め方

ICA-RUS は、緩和・適応といった気候変動問題における対策やそのモニタリングの実施を活動のスコープに含めておらず、その意味でリスク管理プロセス全体の実践を目的とはしていない。一方で、外部から与えられたリスク管理の枠組みの中で、その一部としてリスク評価のみを実施担当する課題でもない。ICA-RUS では、地球規模の気候変動リスク管理についてはまだその枠組みに決定的な提案がなされていないとの状況理解に立ち、その枠組みのあり方自体を検討・提案するとともに、その提案する枠組みでリスク管理を行うとした場合のリスク評価を実践する。

地球規模を対象とした気候変動リスク管理を論じた例は極めて限られているが、一方で、リスク管理の概念自体は、従来から化学物質、災害、生態系、ビジネスなどで広く適用され、汎用的な枠組みの提案も存在している。そこで 2012 年度は、既存の汎用的なリスク管理の枠組みについて、ICA-RUS が取り組む地球規模のリスク管理への適用可能性を検討した。

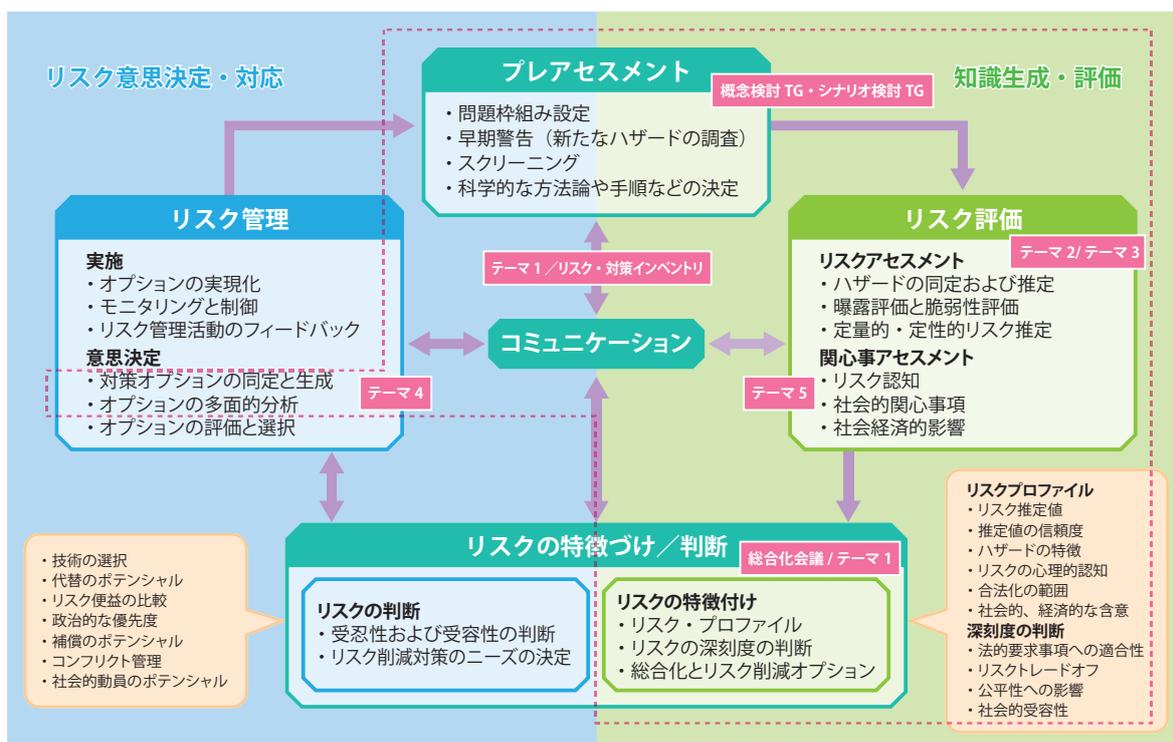
はじめに、既存文献において適応策の評価・実施での有用性が指摘されている ISO31000 のリスク管理枠組みについて検討した。しかし検討の過程において、企業等の小さな組織や、単一の強い組織長とその委任を受けたリスク管理担当者の存在を想定している ISO31000 の枠組みは、ICA-RUS への適用に問題があるのではないかと

との指摘がなされた。適応策実施による地域的な気候変動リスク管理であれば、単一的意思決定主体たる組織長等を特定したリスク管理枠組みが適用される。一方で、ICA-RUSが対象とする地球規模の気候変動リスク管理の場合、意思決定主体は自明ではなく、異なる価値を有する複数の意思決定主体を想定せざるをえない。複数の意思決定主体が関与する地球規模気候変動リスク管理は、互いの利害を調整し、合意・管理方策の実施を可能にするようなガバナンスとして考えるのがより適切である。

そこで、ガバナンスを明示的に扱ったフレームとしてIRGCによるリスクガバナンス枠組みの適用を検討し、それを採用することとした。それに伴い、前述のように用語についてもIRGCでの定義を基本的に活用することとした。図2はIRGCの枠組みにICA-RUSの構成モジュール（テーマやタスクグループ）を配置したものである。一連の手順のうち、赤枠の中がICA-RUSが取り組む範囲である。前述のようにICA-RUSはそれ自身がリスク管理に係る意思決定を行ったり対策を実施したりはしないため、概ね図の右側の知識生成・評価領域を担うことになる。ただし、テーマ4が主担当する対策オプションの同定や多面的分析については、IRGCの枠組みの中では図左

側の意思決定・対応領域に位置付けられているが、ICA-RUSではこれをむしろ拡張されたリスク評価の一部として、リスクアセスメント・懸案事項アセスメントと並行して行うものと位置づける。

どの手順においてもステークホルダーとのコミュニケーションを行うことで、ステークホルダーのリスク認知や価値をリスク管理と対になるリスク評価に反映させることが期待でき、またその手順を踏んで示されるリスク管理戦略は結果的にリスク管理の現場での活用しに耐えうるものとなることが期待できる。例えば、「3 気候変動リスクの網羅的な整理と論点の抽出」で示すリスク・対策インベントリの作成や論点抽出はプレアセスメントにおけるスクリーニングの予備作業に位置付けることが可能だが、スクリーニングの実践(ICA-RUSでの定量的・定性的なリスク推定の要否の判断)にあたってはステークホルダーとのコミュニケーションを反映させることとなる。ICA-RUSでは、ICA-RUSレポートならびに総合化会議議事録等の資料公開、テーマ1がICA-RUSレポート配布と併せて実施するアンケート調査およびステークホルダーとの対話会合、テーマ5で実施するリスク認知研究を活用し、コミュニケーション・協議に取り組むこととしている。



出所) 谷口武俊氏講演資料(2012年6月9日・伊藤謝恩ホール)、IRGC(2005)に追記・編集

図2 IRGCの枠組みとICA-RUS構成モジュールの関係

3.1 既存文献のサーベイを通じた インベントリの作成と論点の整理

ICA-RUS では、「1 ICA-RUS の全体像」で述べた通り、利用可能な最大限の科学的知見を利用した包括性のある研究を行うことを特徴の1つとしている。そのため、特に初年度は各種の文献サーベイによる科学的知見の収集・整理に注力し、その成果として、リスクインベントリ、対策インベントリおよび各テーマの研究に関連する論点の整理を行った。

リスクインベントリは、気候変動リスクを網羅的に整理したインベントリであり、2012年度は気候変動による個別被害を整理している。また、対策インベントリは、緩和策、社会経済対策、適応および気候工学という4つの視点により対策の内容を網羅的に整理した上で、対策に付随するリスクあるいは機会を整理している。このリスクインベントリおよび対策インベントリは、気候変動リスク管理戦略検討にあたって包括性担保の確認に用いるとともに、テーマ間の情報連携のためのツールとしても利用する。さらに、ICA-RUS内での検討に用いるだけでなく、例えば本レポートの読者など、外部の方からリスクの抜け漏れなどに関する意見を得るためのコミュニケーションツールとしても活用したいと考えている。

他方、論点は2012年度に実施したサーベイ内容を踏まえて、ICA-RUSが注目している点をテーマごとに抽出・整理したものである。論点の内容も、リスクインベントリおよび対策インベントリと同様の活用を想定しているが、インベントリに比べてより各テーマの視点や意識が反映された情報であると言える。

本レポートに掲載しているリスクインベントリ、対策インベントリおよび論点整理は、いずれもICA-RUSの研究進捗などに応じて、今後随時バージョンアップを行う。なお、リスクインベントリおよび対策インベントリは今後ICA-RUSのウェブページ (<http://www.nies.go.jp/ica-rus/inventory.html>) に随時最新版を掲載する予定であり、これらの資料に対する外部の方からの意見・コメントを得ながら、ICA-RUS内外を問わず

有用な資料に改善していきたいと考えている。

今後、各インベントリの改善を進めながら、必要に応じてリスクインベントリと対策インベントリの対比や関連付け、あるいは論点の内容とリスクインベントリ、対策インベントリとの関連性の整理等を実施し、単に網羅性の確認のみではなく、リスク間のトレードオフやリスクと対策の関係の整理等にも活用し、気候変動リスク管理戦略の検討を進める。

3.2 リスクインベントリの作成

気候変動は人間の生活や生態系・生物多様性に様々な影響を与える。2012年度は文献サーベイを通して、この気候変動リスクを網羅的に整理したリスクインベントリを作成した。この整理は、対象ごとの被害の大きさおよびの被害への対策の効果などの検討を行いやすくするという目的で行った。

リスクインベントリの作成方法としては、社会にある様々な価値判断に照らして「被害を避けるべき」と考えられる対象ごとに影響を整理することとし、まず、大きく「人間の生活」と「生態系・生物多様性」および「地球システム」の3項目を大分類として整理した。その上で、中分類として、「人間の生活」については、エネルギー、安全、健康、経済・サービス、食料および淡水資源という6つの項目で整理し、さらに各々の項目について、必要に応じて、項目の細分化（小分類の追加）を行った。同様に「生態系・生物多様性」については、北方林、温帯林、熱帯林、草原・砂漠、低地・海浜域、高地、陸水、海洋、動物、昆虫および微生物という11項目で整理した。

なお、これらの分類の整理においては、LIME2（日本版被害算定型ライフサイクル環境影響評価手法 第二版）（伊坪・稲葉，2010）の保護対象の考え方を参考にしている。

また、可能な限り多様な価値判断を踏まえて検討を行っているが、整理された個々の項目においては、「この被害を避けるべき」という価値判断が含まれていることに留意が必要である。つまり、「生態系・生物多様性」や「地球システム」については、それらへの影響の結

コラム 2 ティッピングエレメント

ティッピングエレメント (tipping element) とは、気候変動が進行してある臨界点を過ぎた時点で、不連続といってもよいような急激な変化が生じて、結果として大惨事を引き起こす可能性があるような気候変動の要素を指す。Lenton *et al.* (2008) でティッピングエレメントとして取り上げられているのは、

- **A** 北極海の夏の海氷 (の喪失) → 温暖化の促進、生態系への影響
- **B** グリーンランドの氷床 (の融解) → 海面水位の上昇
- **C** 西南極氷床 (の不安定化、融解) → 海面水位の上昇
- **D** 大西洋熱塩循環 (の減速) → 地域的な寒冷化、海面水位変動、熱帯収束帯の移動
- **E** エルニーニョ・南方振動 (の振幅増大) → 東南アジア等における干ばつ
- **F** 夏のインドモンスーン (循環の弱体化) → 降水量減少、乾燥化、干ばつ
- **G** サヘル・西アフリカモンスーン地域 (の植生割合増大) → 湿润化
- **H** アマゾンの熱帯林 (の植生割合の減少) → 生物多様性の喪失、降水量の減少
- **I** 北方林 (の植生割合の減少) → 植物群落の入れ替わり

などであり、このうち **A** と **B** とは 21 世紀のうちに臨界点に到達する可能性が高く、**C** ~ **G** についても臨界点に近づいて急激な現象が観察される可能性があると考えられる。ただし、急激といっても、10 年程度で遷移する可能性のある **A** や **F**、**G** などあれば、**B** や **C** のように 300 年程度かけて変化すると想定されるものもあり、地球物理学的時間スケールでみて「急激」、ということになる。

ティッピングエレメントが取り沙汰されるようになったのは、自然科学的な気候変動研究では数学的な bifurcation (非

線形方程式の解の「分岐」) のアナロジーで、ある定常状態から別の定常状態へと比較的短時間のうちに気候システムが遷移する可能性もある、と考えられるのに、気候変動の損益を算出するような統合評価モデル等では排出量と気候変動の進展と想定被害とが比較的連続的に滑らかに変化するように取り扱われていることに対する違和感からのようである。また、ティッピングエレメントという場合には、一旦別の安定状態に変化してしまったら、温暖化レベルを多少減らしても元には戻らない、不可逆である、という意味を含んでいることが多いようである。ただし、ティッピングエレメントが必ずしも不可逆であるとは限らない。

ティッピングエレメントは、一旦生じてしまったらこの世の終わりを迎えてしまうようなこれまでに経験したことの無い大惨事をもたらす、という印象もあり、critical な事象、と呼ばれることもある。しかし、上記の箇条書きの **→** の右に書いたような影響だとすると、海面水位上昇の速度や極端な干ばつの頻度が従来想定されているよりもさらに増大するという点は問題だが、人類 1 万年の歴史で経験したことがまったくない影響というわけでもない。

ティッピングエレメントは文句なしに怖い、というのではなく、ティッピングエレメントが生じてしまったら、どのような気候の変化がどういう地域にどの程度生じ、どういう影響をもたらすと想定されるのかを推計しようというのが ICA-RUS テーマ 3 の研究目標である。防災教育が「脅し→知識→姿勢」と変遷しつつあるのになぞらえれば、まさにティッピングエレメント研究も知識の段階を迎えようとしているといえよう。

ところで、ICA-RUS では、「ティッピング」の概念を和訳しようと試みた。「転覆的变化」や「急激な変化」、「不可逆 / 不連続な変化」などいくつかの案を検討した結果、最終的には「地球物理学的な臨界現象」としたが、「臨界現象」は固有の物理学的意味を持つこともあり、適切な訳は難しい。

果引き起こされる人間の生活への悪影響を避けられればよいという価値判断がある一方で、それらへの影響自体を避けるべきという価値判断もあることを考慮して、「人間の生活」と並列に配置している。なお、ICA-RUSではこのどちらかの価値判断を自明に優先することは避ける。

次に、個々の気候変動リスクの抽出を行った。気候変動リスクには多くの捉え方があり得るが、今回のリスクインベントリにおいては、将来起こり得る被害や危険などについて、社会にある様々な価値判断を幅広く想定して、大分類、中分類あるいは小分類を損ね得る個別具体的な被害（個別被害）を整理することとし、個別被害を引き起こし得る自然、あるいは人間活動起源の物理事象は除外している。

この点について例を挙げて説明する。表2に今回作成したリスクインベントリの概要を示すが、例えば、生態系・生物多様性（大分類）の北方林（小分類）の項目に、「凍土融解による土壌有機物減少と炭素放出」という個別被害を挙げている。これに関して、生態系・生物多様性を損なう直接的な原因となる個別被害は「土壌有機物減少」と「炭素放出」であり、「凍土融解」はそのような個別被害を引き起こす物理事象と整理し、リスクインベントリにおける個別被害として単独では取り上げていない。なお、この例のように、分かりやすさのために因果関係まで明示している個別被害もある。なお、表2では、分類ごとに個別被害を最大3項目抽出して掲載しており、詳細版ではより多くの個別被害を掲載している。また、上記の通り、リスクインベントリは個別被害を整理したものであるが、「地球シ

ステム（ティッピングエレメント²⁾）」の項目には、気候変動が進行してある臨界点を過ぎた時点で、不連続といってよいような変化が生じて、結果として大惨事を引き起こす可能性があるような気候変動の要素であるティッピングエレメントに限定して抽出・整理を行った。なお、2012年度は地球システムの分類にティッピングエレメントを整理したが、地球システムに影響する個別被害がティッピングエレメントのみであると考えているわけではなく、次年度以降にティッピングエレメント以外の個別被害を追加する可能性もある。

気候変動リスク管理戦略の検討にあたっては、このリスクインベントリを利用しながら、どの影響はどのレベルまで受容可能か、あるいは何℃の気温上昇が生じた際に、どの影響がどの程度の確率・規模で生じるのか、等の点をその不確実性を踏まえて考えていく必要がある。また、今後は因果関係の明確化や、被害のみでなく機会（opportunity）の追加等の改善を行うことを検討している。

なお、このリスクインベントリにおいては、全ての個別被害を並列に列挙しているが、被害の発生確率、被害規模、発生時期あるいはそれらの予測の不確実性等は個々の個別被害により大きく異なるという点に注意が必要であり、ICA-RUSでは、これらの個別被害について、その特徴等を分析・評価し、それらの情報をもとに、リスク管理戦略の検討を進める。

2) ティッピングエレメントについては、「コラム2：ティッピングエレメント (p.9)」を参照

表2 リスクインベントリの概要

| 大分類 | 中分類 | 小分類 | 個別被害の例 |
|------------------------------|---------------------------|---|----------------------------------|
| 人間の生活 | エネルギー | | 河川流量減少による発電所冷却水不足 |
| | | | 洪水に伴う水力発電所被害による電力不足 |
| | | | 循環場の変化による風力発電の不安定化 |
| | 安全 | | 高潮氾濫による溺死 |
| | | | 洪水による溺死 |
| | | | 土砂災害に伴う家屋倒壊による圧死 |
| | 健康 | | 食料不足による栄養不足 |
| | | | 気温上昇による腸管感染症 |
| | | | 気温上昇による熱関連死亡 |
| | 経済・サービス | | 洪水に伴う建築物浸水被害 |
| | | | 高潮に伴う家屋の倒壊・流出による居住場所損失 |
| | | | 積雪に伴う交通・社会機能麻痺 |
| | | 林業 | 森林生産性の変化と適応コストの上昇 |
| | | | 火災による人工林への被害増加 |
| | | 害虫や病害の増加による人工林への被害 | |
| | 食料 | 食用作物 穀物（イネ・コムギ・ダイズ・トウモロコシ・その他） 飼料・野菜・果菜・果樹類・花卉類葉・茎根菜類 | 気温上昇や干ばつ、洪水などによる穀物の収量や生産量、品質の低下 |
| | | | 気温上昇や降水パターンの変化などによる栽培適地や栽培期間の変化 |
| | | 牧草地・家畜生産 | 気温上昇や干ばつ、洪水などによる牧草生産量の低下と家畜生産の低下 |
| | | | 病虫害の増加による家畜生産効率の低下 |
| | | 捕獲漁業・養殖業 | 海洋魚類生息地の変化による海洋魚類収量の変化 |
| 低地沿岸地域における海面上昇等による貝類産業への負の影響 | | | |
| 食料生産全般 | 極端現象による漁場インフラ設備への被害 | | |
| 淡水資源 | 地表水・地下水 | 気候変化に伴う異常気象の頻発による食料生産の不安定化 | |
| | | 河川流量や取水量の変化による水ストレス人口の変化 | |
| | | 雪氷融解による夏季水資源の減少 | |
| | | 乾燥・半乾燥地の灌漑地の地下水枯渇 | |
| | 水質 | 河川水質の変化 | |
| 海面水位上昇による沿岸塩水化 | | | |
| 河川・湖沼・貯水池における藻類等の繁茂による水質悪化 | | | |
| 生態系・生物多様性 | 北方林 | 凍土融解による土壌有機物減少と炭素放出 | |
| | | 北方林森林限界の北上によるツンドラ生態系の減少・衰退 | |
| | | 乾燥化による森林火災の増加・激化 | |
| | 温帯林 | 冬季の温度上昇による害虫大発生への増加 | |
| | | 熱波による動植物相への被害 | |
| | | 伝染病（ツボカビなど）の増加による多様性喪失 | |
| | 熱帯林 | 乾燥化による森林の衰退・枯死 | |
| | | 低気圧の強大化による風倒や落葉の激化 | |
| | 草原・砂漠 | 大気 CO2 増加による草原への低木の侵入と生物多様性の低下 | |
| | | 乾燥化による火災頻度・強度の増加 | |
| | 低地・海浜域 | 乾燥化に伴う植被減少による風食の増加 | |
| | | 海面上昇による低地湿原・マングローブ林の水没 | |
| | 高地 | 冬季の積雪量減少による動植物の越冬への悪影響 | |
| | | 河川流量や取水量の変化による生態系への影響 | |
| | 陸水 | 湖沼の水温上昇や酸性化による生態系への影響 | |
| 酸素溶解度の低下による貧酸素水塊の容積増加 | | | |
| 海洋 | 海洋酸性化による炭酸カルシウム生産と溶解の変化 | | |
| | 水温上昇による海洋生物地理の変化 | | |
| 動物 | 湿原減少による渡り鳥の営巣地の減少 | | |
| | 気温上昇による動物の熱中症増加 | | |
| 昆虫 | 温度上昇による害虫の生息域拡大 | | |
| | 温度上昇による害虫の大発生頻度の増加 | | |
| 微生物 | 温度上昇による益虫の減少 | | |
| | 環境変動による土壌微生物相の変化と物質循環への影響 | | |
| 地球システム（ティッピングエレメント） | | グリーンランド氷床の縮小 | |
| | | 西南極氷床の崩壊 | |
| | | アマゾン熱帯雨林枯死 | |

※詳細版では、より多くの個別被害を掲載している。

コラム 3 気候変動による健康への影響の評価

気候変動の影響は、よく貨幣価値で表される。そうすると、台風で破壊された家屋でも、干ばつでとれなくなった小麦でも、何でも合計して総合的な影響が計算できるので、CO₂を減らすシナリオを考える際に、これだけ費用がかかるが、これだけ気候変動の影響を小さくできて結局正味の費用はこれだけ、と計算できる。実際に影響を網羅的に見積もることに困難が伴うが、理論的には総合的な評価が可能となる。

上記のように、経済学的手法は非常に有効ではあるが、大きな問題点も抱えている。経済学的には途上国の人命の価値は先進国のそれよりも低く設定されてしまう。確かに、影響が無かった場合の期待所得を賠償する場合を想定すればこの考え方にも一理はあるが、気候変動の影響評価をこの考え方で進めてよいのかどうかは議論の余地がある。別の評価方法として、影響を健康に集約するという方法が考えられる。台風で、溺死した人が何人、不衛生な水を飲んでコレラで死亡した人が何人、と数えていくのである。死亡しないまでも病

気になったり不健康になったりする人もいる。だから、気候変動によって干ばつが進んだ場合に、そのことで低栄養のために死亡する人、農業経営に行き詰まって自殺する人に加えて、低栄養で身長が伸びなかった人や耕作地を放棄して難民になった人（やはり低栄養の問題や精神的な問題をかかえることになる）も数え上げていくことで、影響の大きさを評価するのである。

死亡は、どのような原因であっても足し合わせることができ、死亡しない場合の病気の評価にはいくつかの方法が考えられている。Disability adjusted life years (= DALYs)はその1つで、不健康の程度に応じて何割か生存を損したと考えて、理想的な寿命から不健康と早死にどれほど損をしたかを評価する。

様々な価値判断が存在する中で、気候変動への対応をどうするかということを考えるためには、経済評価のみならず、このような健康を指標とした影響評価も重要である。

3.3 対策インベントリの作成

気候変動対策にはさまざまなものがあるが、大きくは温室効果ガスの排出を削減する緩和策と、発生した気候変動影響に対策を行う適応策に分類できる。ここでは、(1) 主に温室効果ガス排出源に対する緩和策、(2) 温室効果ガス排出削減を促進するための社会経済対策、(3) 気候変動影響の被害軽減に注目する適応策、および(4) 温室効果ガス排出削減だけでなく気候変動に直接働きかける気候工学（ジオエンジニアリング）、の4つの視点により、できるだけ現在知られている対策を網羅的に包括するインベントリを作成し、対策オプションおよびそれと付随的に発生するリスクを一望できるようにする。

技術的緩和策は主にエネルギー関連であるがエネルギー採掘から転換、輸送、消費段階でも産業の各部門、運輸、空調や給湯など業務・家庭の用途ごとに個別対策があるため、その内容はきわめて多岐にわたる。また、障壁や導入リスクもそれぞれの対策で異なる。緩和策インベントリは本レポートでは中分類までを示しているが、詳細版では小分類まで整理している。適応策オプションも技術的緩和策と同様であり、健康や農業など温暖化の影響を受ける対象ごとに適応策が提案されている。なお、表5に示した適応

策インベントリの概要版は、紙面の都合上、個々の適応策に対するリスクを明示していないが、詳細版ではこれらも明示したものとなるように整理を行っている。

これに対し、社会経済的緩和策は金銭的インセンティブや制度設計により、技術的緩和策や、場合によっては適応策も含む数ある対策行動オプションの中から需要者が自分の意志で最も効率的な選択を行うことが目されている。そのため、インベントリも技術的緩和策とは異なる視点から作られており、対象となる主体の範囲、効果の正負や範囲などが主な論点となるため、これらの情報を整理している。本レポートでは、対策導入時と導入後に分けて機会とリスクをまとめているが、詳細版ではさらに影響を受ける主体ごとに記載している。

気候工学は、以上とややアプローチが異なり放射強制力または温室効果ガス吸収という気候変動のメカニズムに直接作用することを目的としており、対策オプションは限られるとともに、いずれも理論あるいは実験段階にある。このため気候工学インベントリでは、表側に具体的な技術開発の研究課題が挙げられ、主に効果の不確実性と副作用が論点となる。

このように対策インベントリは分野ごとに対策の特徴を反映したものとなっている。

コラム 4 気候工学とはなにか

CO₂などの温室効果ガスの排出量は伸び続けている一方で、気候システムの不確実性はあるものの、専門家の間では国際的な緩和策や適応策が十分でない場合、気候変動影響が危険な水準に達するリスクについての認識が深まっている。例えば南極やグリーンランドの氷床が解ければ、数百年という時間がかかるものの5-7mの海面が上昇する可能性があるなどの研究成果も報告されるようになった。こうした状況のもとで一部の科学者はコラム4図1に示すような、人為的気候介入である気候工学（ジオエンジニアリング）と呼ばれる対策を検討している。

気候工学の概念自体は古いが、緩和策への動機が減少するのではないかと懸念から、積極的議論が行われてこなかった。しかし、2000年代以降、英国のRoyal Societyが2009年に気候工学に関する総合的な報告書を出版するなど、議論が再燃している。2011年開催のIPCC気候工学専門家会合の報告書（IPCC, 2012b）では、気候工学は「気候変動の影響を軽減するために気候システムを意図的に改変することを目的とした手法や技術の総称」と定義され、IPCC第5次評価報告書でもレビュー対象となった。

気候工学は大きく次の二つに分けられる。一つめは、気候システムのエネルギー収支に介入して気温上昇を打ち消そうとする方法であり、そのほとんどの提案は、直接的または間接的に太陽放射の反射を増やす方法で、SRM（solar radiation management）と呼ばれる。二つめは、大気中から温室効果物質を減らす方法であり、そのほとんどは、大気中からCO₂を直接的または間接的に除去する方法で、CDR（carbon dioxide removal）と呼ばれる。

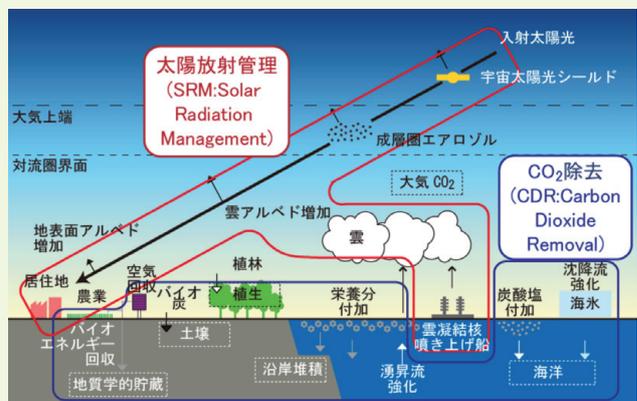
SRMとCDRの特徴は大きく異なる。一般的にSRMは即効性があり、安価であるが副作用がある。これに対してCDRは効果が現れるのに時間がかかり、高価であるが副作用が少ないとされる。ただし、当然ながら、具体的手法や実施条件によってこれらの特徴は大きく異なってくる。

CDRの概念は旧来の緩和策と重なりがあり、定義の際には実施規模や副作用などで線引きを行う必要がある。通常、化

石燃料からのCO₂回収貯留（CCS）は緩和策とされる。CDRの中でも、空気中CO₂直接回収とバイオマスCCS³⁾は特にポテンシャルが大きいとされる。産業革命以前を基準として気温上昇を2℃までに抑えるようないわゆる超低排出シナリオでは、21世紀後半にバイオマスCCSが大規模導入され、CO₂の排出が世界全体でマイナスになっている場合がある。

現時点では、地球環境研究を行っているコミュニティの中でも、気候工学オプションの実施を積極的に行うべきであるという意見の一致は見られない。IPCC気候工学専門家会合の報告書をみても、評価の視点として、科学的側面からの環境リスク、社会的側面からの倫理的問題、国際枠組におけるガバナンス、研究開発に対するガバナンスや社会的受容可能性の問題が指摘されており、実施を慎重に検討すべき研究領域であることが認識されている。

気候工学への関心が高まっているのは、気候変動影響リスクに対する対策オプション研究の広がりにとらえるべきで、そのこと自身が気候変動リスクおよびその対策リスクに対して、総合的に深く再考する必要性を示唆している。



出所) 杉山 (2011)、(c) Lenton and Vaughan (2009) に追記・編集

コラム4図1 気候工学 対策の種類

3) バイオマスCCSについては、「コラム5:炭素回収貯留を伴うバイオマス燃料利用（バイオマスCCS）(p.18)」を参照

○緩和策

温室効果ガスの発生源に着目して排出を削減する緩和策は、気候変動対策として具体的かつ自然なアプローチである。具体的な緩和策として、例えば、火力発電の燃料の石炭から天然ガスへの変更や、太陽光発電の導入がすぐに思い浮かぶ人は多く、また、低燃費車への切り替えや建物への断熱材の導入などさまざまな省エネルギー技術の導入、さらにリサイクルを上げる人もいるだろう。しかしながら、ここで二つの注意点が必要である。まず、一つで万能かつ万全といえる対策は無いこと、次にむや

みな対策導入の拡大は効果の相殺や新たなリスクの発生を引き起こし得るということである。

そこで、ここでは IPCC 第 4 次評価報告書 WG3 (IPCC, 2007b) をもとに、緩和策を網羅的に抽出し、さらに導入の拡大時に予想されるリスクをまとめ、緩和策インベントリを作成した。表 3 にこの緩和策インベントリの概要を示す。このように、緩和策オプションの導入に際しては、経済的・制度的インフラの整備に加え、導入に当たっての機会と導入リスクの想定、障壁などを総合的に考える必要があるということが見て取れる。

表 3 緩和策インベントリの概要

| 技術的緩和策 | | | 経済的緩和策 | 規制制度的緩和策 | 導入機会 | 持続可能な開発とのコベネフィット | 対策リスク | 導入拡大の制約要因 | 障壁リスク | リスクを受ける主体 | | | |
|-----------|---------------|----------------|----------------|---------------|------------------|------------------|----------------------|--------------|--------------------|-----------------------------------|--|--|----------|
| 大分類 | 中分類 | 小分類 | | | | | | | | | | | |
| エネルギー供給部門 | 燃料転換と発電効率 | (具体的オプション) | オンライン電力価格 | 再生可能エネルギー源義務化 | 新技術市場の設立 | 大気汚染など環境の改善 | 非在来型燃料利用による GHG 排出増大 | 高投資リスク | 価格変動リスク | 国際的, 国家, 地域(郡県), 小地域(市町村), 建物, 個人 | | | |
| | エネルギー効率的供給 | | 化石燃料への補助金減少 | 環境規制緩和 | | | エネルギーセキュリティ | 土地利用制約 | 既得権益との競合 | | | | |
| | CCS の早期利用 | | 初期デモ機への補助 | | | | 食料供給との競合 | | | | | | |
| 運輸・交通部門 | 交通モード(道路、鉄道他) | | 補助金、税制 | 燃費規制 | 化石燃料供給の不安定性 | 社会インフラの改善 | 収入増加による効果の減少 | 地理的条件 | 料金設定リスク | | | | |
| | 土地使用と交通運輸計画 | | インフラ整備 | | | | | | | | | | |
| 建築部門 | 照明 | | ESCO, 税制 | 標準化 | 政府部門調達 | 健康影響の改善 | 補助金へのただ乗り | 居住者行為との関係 | 財政、貧困、信頼できる情報の高コスト | | | | |
| | 熱機器 | | | 需要管理施策 | | | | | | | | | |
| 工業部門 | エネルギー多消費産業 | | 取引許可証などインセンティブ | 標準化 | 技術移転/知識獲得 | 大気汚染の減少 | 経済成長による効果低減 | 既存の低効率設備 | 財務と技術資源の制約 | | | | |
| | 食品 | | | | | | | | | | | | |
| 農業部門 | 土壌 | | 管理奨励財政策 | 規制制度 | 持続可能な開発とのコベネフィット | 生産環境の改善 | 水資源や窒素汚染などとの競合 | バイオエネルギーとの競合 | マクロ経済政策との摩擦 | | | | |
| | 畜産 | 単一作物栽培による病害リスク | | | | | | | | | | | |
| 林業/森林 | 造林 | | | | | | | | | | | | |
| | 管理 | | | | | | | | | | | | |
| 廃棄物 | 廃棄物処分 | | | | | | | | | | | | 技術の持続可能性 |
| | 廃棄物再利用拡大 | | | | | | | | | | | | |

※詳細版では、中分類・小分類をさらに詳しく整理した上で表中の各項目により詳細な情報を掲載している。

○社会経済対策

社会経済対策は、経済的な手法や情報の提供を通じて経済主体に対して温室効果ガス排出削減を促進するインセンティブを与えるもの（経済的措置、社会的措置）と、温室効果ガスの排出削減に直接働きかけるもの（規制的措置）の二つに大きく分類される。

表4は、IPCC第4次評価報告書(IPCC, 2007b)とStern(2007)を参考にしてこれらの社会経済対策をまとめたものであるが、この表が示す通り、どの対策にも個々の対策に付随する機会とリスクがある。個々の温室効果ガス排出削減対策を策定する上では、少ない対策費用の下でリスクを最小化することが求められるが、温室効果ガスの排出が我々の経済活動に起因するため、対策導入には経済的な損失(GDPの低下など)が伴うことが多い。そ

のため、温室効果ガス排出を削減しつつ、この経済的損失を回避ないし軽減するという視点が特に重要である。

さらに、気候変動の緩和の実現には地球規模での対応が必要なことから、一国が適切な温室効果ガス排出削減策を策定・施行してもその効果はどうしても限られてしまう上に、非削減国によるフリーライダー問題も生じかねず、また、温室効果ガス排出対策の費用は国や地域によって異なるという点にも注意が必要である。IPCC(2007b)によれば、国際的な政策協調においては、温室効果ガス排出削減効果、政策協調の費用対効果、費用負担の公平性、実行可能性が考慮されるべき要素である。これらの要素を満たすような政策協調の合意も今後の温室効果ガス排出削減にとって重要な社会経済対策の一つである。

表4 社会経済対策インベントリの概要

| 社会経済対策 | | | 機会 | | リスク | |
|--------|-----------------------|--|-----------------------------|---|--|--|
| 大分類 | 中分類 | 小分類 | 対策導入前 | 対策導入後 | 対策導入前 | 対策導入後 |
| 経済的措置 | 税・課金 | ・炭素税 など | ・低い対策コスト | ・エネルギー安全保障の改善 ・イノベーションの促進 | ・エネルギー需要の非価格弾力性 ・課税ポイントの設定 ・導入の政治的難しさ ・化石燃料補助金との整合性 | ・不明確な GHG 排出削減量 ・効果が逆なイノベーションとの整合性 ・税金・課金収入の使途 ・逆進性 ・競争力の損失とリーケージ ・生産量の低下 ・モニタリング制度設計と費用 |
| | 排出権 | ・排出権取引 | ・確実な GHG 排出削減 | ・排出権売却収入(オークション) ・公平性の確保(オークション) ・エネルギー安全保障の改善 ・イノベーションの促進 | ・初期配分の方法 ・排出権適用の範囲 ・排出権適用のポイント | ・排出権価格の変動 ・排出権売却収入の使途 ・企業の価格支配の可能性 ・逆進性 ・競争力の損失とリーケージ ・生産量の低下 ・モニタリング制度設計と費用 |
| | 補助金 その他 インセンティブ | ・研究開発補助 ・投資税額控除 ・価格支援(例:固定 価格買い取り制度) など | ・補助金費用負担の公平性 ・政治的な導入しやすさ | ・イノベーションの促進 ・低炭素技術の普及 ・競争力向上 ・国際技術開発協力の促進 | ・財政コスト ・化石燃料補助金との整合性 | ・困難な撤廃 ・技術のスピルオーバー (知的財産権の保護) ・モニタリング制度設計と費用 |
| 規制的措置 | 規制・基準 | | ・個々の事例への 対応可能性 | ・比較的確実な GHG 排出削減 | ・GHG 排出削減コストと技術の 情報入手コスト | ・規制対策コストの負担 ・イノベーションへのつながりにくさ ・時代に応じた規制・基準の更新 ・モニタリング制度設計と費用 |
| | 自主規制 | ・企業 ・社会 | ・固有の文化への なじみやすさ | ・イメージアップ ・社会への貢献 ・低い対策コスト ・対策未導入企業への 対策導入 | | ・規制対策コストの負担 ・不明瞭な効果 ・中央政府の政策との連携可能性 ・モニタリング制度設計と費用 |
| 社会的措置 | 情報政策 | ・情報公開制度 ・教育 など | | ・より良い情報に基づく消費者 選択の促進 ・企業の環境意識保持 ・他の対策とのシナジー効果 | | ・不明瞭な費用対効果 ・情報公開にかかるコスト ・モニタリング制度設計と費用 |

※詳細版では、世界、国家・政府、企業、個人・家計に区分し、それぞれについて機会およびリスクを整理している。

○適応策

適応策は、気候変動のリスクを軽減するために導入される対策である。しかし、逆に、適応策を導入することによって生じ得るリスクもある。ここでは、そうした付随するリスクの概要を含めて適応策について多面的に検討した（気候変動のリスクそのものについては、リスクインベントリ（表2）を参照されたい。なお、現時点では、適応策インベントリとリスクインベントリは対応しておらず、この点は今後の検討課題の一つである）。

なお、適応策インベントリの作成にあたっては、環境省の地球温暖化影響・適応研究委員会報告書（環境省、2012）における適応策導入の分野を中心に、世界銀行等の報告書（World Bank, 2010）も参考にしながら作業を進めた。

適応策によるリスクは、実施される個々の適応策の内容によって異なるが、(1) 経済活動も含めた人間社会へのリスク、(2) 自然生態系の改変に伴うリスク、に大別できる。また、適応策の導入にあたっては、想定される気候

変動予測の過大・過小評価に伴うリスクも考慮する必要がある。すなわち、気候変動を過剰に見積もると費用負担等が大きくなり、過小に見積もると、実際の気候変動影響が実施した適応策のキャパシティを超えてしまう、といったリスクが存在する。

適応策導入の制約および障壁は、①物理・生態学面、②技術面、③経済・財政面、④社会・文化面、⑤制度面、⑥情報・認知面、⑦人材育成面があり、特に①と②については、適応策の限界に関連する。また、適応策導入に必要な費用をどのように拠出するかといった費用負担の問題だけでなく、④～⑥に示す社会、文化、伝統などに起因する課題もあり、克服すべき課題が数多く存在する。なお、適応策の実施にあたって必要な費用の推計については、World Bank (2010) などで見積もられている例も見られるが、十分であるとは言えず、今後更なる検討が必要と考えられる。

表5 適応策インベントリの概要

| 大分類 | 中分類 | 小分類 | 適応策 | 制約・障壁 | 人間社会へのリスク | 生態系へのリスク |
|----------------|------------|-------------|-------------------|--|--|---------------------------------------|
| 食料分野 | 農業 | 穀類・果樹 | 高温耐性の向上・高温回避 | 物理・生態学面 技術面 経済・財政面 社会・文化面 制度面 情報・認知面 人材育成面 | ・費用負担（導入費用、開発費用）に伴うリスク ・産業としての発展性 ・土地利用変更に伴うリスク ・生活基盤の変更に伴うリスク ・エネルギー需要の増加に伴うリスク | ・品種改良、樹種変更等による生態系への影響 ・生態系改変に伴うリスク |
| | 牧畜 | 畜産・飼料作物 | 高温回避・適地移動 | | | |
| | 水産業 | 回遊魚・沿岸魚・養殖 | 生態系変化への適合・適地移動 | | | |
| 水環境・水資源分野 | 水供給 | | 貯留池の確保・地下水利用 | | | |
| | 水需要対策 | | 効率改善 | | | |
| | 水環境管理 | | 富栄養化・塩水対策 | | | |
| | 治水対策 | | | | | |
| 自然生態系（植生・土地）分野 | 森林生態系 | 自然林・人工林・里山 | 保護地域の見直し | | | |
| | 沿岸生態系 | 海洋・淡水・干潟 | 環境負荷削減・河畔林保全 | | | |
| 防災・沿岸分野 | 土地利用変更 | 土地利用・建築様式変更 | 緩衝地や堤防の整備・建物様式の変更 | | | |
| | 防災体制強化 | 情報提供・支援 | 避難路の整備・防災訓練 | | | |
| | モニタリング | | 観測 | | | |
| 健康分野 | 暑熱 | | 保健指導 | | | |
| | 感染症 | | ワクチン接種・衛生改善 | | | |
| 国民生活・都市生活分野 | 安全な暮らし | 家屋・居住地域 | 建物強化・移転 | | | |
| | 健康な暮らし | 暑さ・水環境 | 熱中症対策・体調管理 | | | |
| | 経済的に豊かなくらし | 暑さ・食生活 | 天候デリバティブ活用・新産業育成 | | | |
| | 快適なくらし | 暑さ | リフォーム・病害虫駆除 | | | |
| | 文化 | 生態系 | 緑化・保護対策 | | | |

※詳細版では、個々の適応策に対するリスクを明示している。

○気候工学（ジオエンジニアリング）

気候工学として考えられる対策の網羅性を重視し、幅広い対策オプションをカバーする文献 (Royal Society (2009)、Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2012)) をベースに対策オプションおよび考えられるリスク要因を総括した。対策オプションは、表 6 に示すように、CO₂ 除去 CDR と太陽放射管理 SRM にまず大分類し、中分類以降は、具体的な技術オプションで展開し、対応するリスクを整理した。

CDR の間接的除去には複数の方法があり、「土地利用管理」では、森林、バイオマス（バイオ炭、バイオマス CCS）などで対策が可能である他に、非常に長い時間スケールで地球が大気中の CO₂ を吸収する「化学風化」の促進、鉄、リン、窒素散布による光合成促進を図る「海洋肥沃化」がある。一方、直接的除去としては、アルカリ物質などを用いて空気中 CO₂ を回収し、地中に貯留する「空気中 CO₂ 直接回収」がある。これらの CDR オプションを大規模に進めると、程度の差はあるものの、土地利用競合、生物多様性や海洋などの生態系影響、CO₂ 貯留リスクが顕在化する可能性がある。

SRM のリスクは、SRM 全般にかかわる事項と具体的な技術にかかわる事項に大分類した。前者には、海洋酸性化の解決につながらないこと、気温上昇を世界平均で打

ち消しても地域別には打ち消されず特に地域的な降水の変化が懸念されること、CO₂ 濃度が高いまま SRM を突然停止すると急激な気温上昇が生じる危険性があることが指摘されている。具体的な技術はほとんどが地球のアルベド（太陽光反射率）を増加させるものであるが、都市、住宅、草地、農耕地、砂漠などの「地表面」、海塩発生等により自然に存在する低層雲の反射率を高める「雲」、大規模火山噴火後に地球が冷却する原理を真似た「成層圏エアロゾル注入」、太陽光を反射・散乱する物質を宇宙に設置する「宇宙太陽光シールド」などに細分類した。これらのうちでも温度減少の効果がありコスト的にも効率的と思われるのが成層圏エアロゾル注入と雲の反射率増加であるが、副作用として、居住域、農業、生態系、気候影響（水循環、オゾン層破壊、酸性雨、大気循環）への潜在影響が指摘されている。

また、上記の整理においては、倫理性、国際的取り組みが必須である SRM 本格実施に伴う国際枠組み、社会合意に関する実施上のリスクを含む、実施上の社会的なリスクについての考察は行っていない。これらについては、今後論点として整理していく予定である。

表 6 気候工学に関する対策とリスクの例

| 対策技術 気候工学（ジオエンジニアリング） | | | 主要なリスク（潜在的なものを含む） |
|-----------------------|----------------------------|---------------|----------------------------------|
| 大分類 | 中分類 | 小分類 | |
| CDR | 土地利用管理 | 植林、再植林、森林減少対策 | 土地利用競合、気候変動、生物多様性への影響 |
| | | バイオ炭貯留 | 追加エネルギー消費、土壌への影響 |
| | | バイオマス CCS | CCS のリスク（リーケージ、地震の誘発、海洋生態系への影響） |
| | 風化促進 | 陸域、海洋 | 採掘、輸送による環境破壊、海洋生態系への影響 |
| | 空気からの CO ₂ 直接回収 | | CCS のリスク（リーケージ、地震の誘発、海洋生態系への影響） |
| | 海洋肥沃化 | | CO ₂ 吸収量の不確実性、生態系への影響 |
| SRM | 全般 | | 全球・地域的な気候の変化、終了問題 |
| | アルベド増加 | 地表面 | 農作物、地域の人々、生態系への影響 |
| | | 雲 | 海流等の変化、半球間の循環の変化 |
| | | 成層圏エアロゾル | 地球規模水循環の変化、オゾン層破壊、酸性雨 |
| | | 宇宙太陽光シールド | 南北温度傾度の減少と大気循環の変化 |

※詳細版では、リスクをより詳細に記載している。

コラム 5 炭素回収貯留を伴うバイオマス燃料利用（バイオマス CCS）

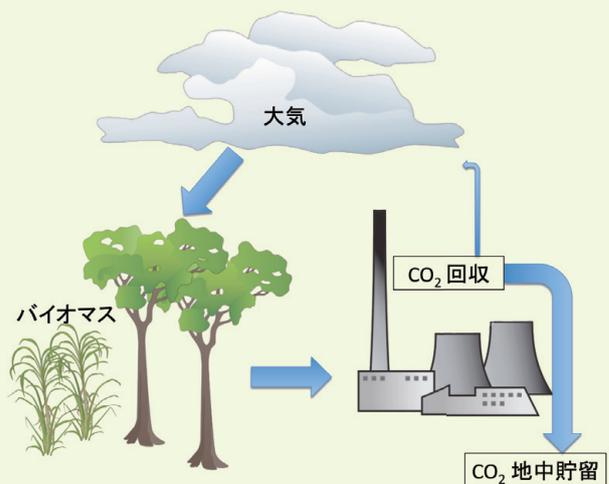
産業化以前からの気温上昇を2℃などの低いレベルに抑えるためには、21世紀の終わりまでに化石燃料利用によるCO₂排出を正味で負にする必要性が以前より指摘されている (Obersteiner *et al.*, 2001)。最新の地球システムモデルによる気候変動予測実験においても、モデル間で大きなばらつきを示すものの、半数以上のモデルが世界平均気温上昇を2℃以下に抑えるためには、2080年以降に化石燃料起源のCO₂排出を負にする、すなわち大気中のCO₂を何らかの技術等で取り除く必要性を示している (Jones *et al.*, 2013)。

負の排出を達成するための有力な方法として、炭素回収貯留を伴うバイオマス燃料利用 (Bioenergy with Carbon Capture and Storage; BECCS, 以下ではバイオマス CCS) が考えられている (van Vuuren *et al.*, 2007; Azar *et al.*, 2010)。コラム5図1に示したように、バイオマス CCS は、植物が光合成によって生産した炭水化物を元にしたバイオマス燃料を利用しつつ、利用時に発生するCO₂を回収・貯留することによって、結果的にCO₂収支を負とするエネルギー利用技術である。一例を挙げると、木質バイオマス燃料を利用したバイオマス CCS による年間の炭素吸収量として、2100年において8.8 Pg C yr⁻¹の見積りもなされている (Fuss *et al.*, 2013)。

しかし、将来のバイオマス CCS 利用に関しては、大規模化が可能かどうか、どのようなバイオマス燃料が利用されるのか、利用場所や貯蔵場所の設備コストなど、現時点では不確実性が多く存在する (IPCC, 2005)。また大規模バイオマス CCS によるバイオマス燃料利用の増加がどのような帰結をもたらすかについては、土地利用、生物多様性、炭素排出、水資源利用、食料生産との競合など、多様な相互作用を考慮した解析が必要となる。

現在 ICA-RUS テーマ2では、大規模バイオマス CCS 利用シナリオが仮定している土地利用の範囲内で、どれだけのバイオ

マス燃料が現実的に生産可能なのか、そのバイオマス燃料作物を生産するために必要な肥料・灌漑面積はどれくらいなのか、またバイオマス燃料作物生産に必要な土地を拡大することによる森林伐採での炭素排出量はいくらになるのか、ということも、生物過程を記述した地球規模陸域生態系・作物生産モデルを利用して推定しているところである。この解析の中で、現実的なバイオマス燃料を考えた場合に、世界平均気温上昇を2℃以下に抑えるためのシナリオで、想定している以上のバイオマス燃料作物に利用する土地が必要である可能性、また、そのために更なる森林の伐採、あるいは食料作物生産に利用する農地との競合が起こる可能性などについて検討を行なっている。ICA-RUS テーマ2で進めている陸域の生態系、水資源、作物、土地利用モデルの統合化は、このような相互作用の帰結を解析する上で重要な取り組みである。



コラム5図1 バイオマス CCS における炭素の流れ

3.4 気候変動リスク管理に係る論点の整理

インベントリの作成と併せて、各テーマで実施した文献サーベイの内容を踏まえ、テーマごとに論点を整理した。この論点は換言すれば、ICA-RUSでの気候変動リスク管理戦略の検討において各テーマで実施する研究の着眼点とも言える。ICA-RUSでは、論点としてここに挙げるような点に注目しながら、各テーマが研究を進め、その研究成果を踏まえて気候変動リスク管理戦略を検討す

る。ここでは、各テーマで挙げられた論点の概要をテーマごとに整理する。

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

ICA-RUSにおけるテーマ1の役割は、総合的な気候変動対策の道筋を合理的に決定する気候変動リスク管理戦略の提案である。その任を果たすべく、具体的には、各テーマが示す定量的知見を取り込んだ統合評価ツールの開発と同ツールを用いた気候変動リスク管理戦略の定量的分

析、その分析結果ならびに各テーマが別途示すリスクや対策に関する科学的知見を活用した地球規模の気候変動リスク管理戦略検討、不確実性下の意思決定に関わる研究知見のそこへの反映、対話型会合を通じた ICA-RUS リスク管理戦略の枠組みへのステークホルダーの意見の反映を、テーマ1の各サブテーマが担当する。以下では、統合評価ツール開発とリスク管理戦略のそれぞれについて、論点を整理した。

＜統合評価ツール開発＞

統合評価ツール開発に関しては、統合評価モデル (Integrated Assessment Model) の標準的な構成要素である簡易気候モデルについて開発・応用の現況を調査し、気候感度・海洋熱吸収・エアロゾル・炭素循環といった世界平均気温に強く作用する因子の不確実性の考慮、観測データを用いたモデル不確実性の制約、陸上炭素循環モジュールの高度化が、リスク管理戦略の分析結果に強く影響する論点であることを示した。また、この統合評価ツールへの反映を検討している不確実性下の意思決定に関しては、期待効用論と割引率の統合評価モデルでの扱いの改善、オプション理論等を活かした不可逆的な投資意思決定のモデル化が課題として挙げられた。

＜気候変動リスク管理戦略検討＞

気候変動リスク管理戦略検討については、その既存事例の調査を通じて、地域的・局所的な影響と全球規模の安定化目標の関係づけ、気候変動影響の不可逆性・非線形性の考慮、緩和策実施による極端現象の生起確率変化の評価、リスク管理方策自体の成否や波及リスクへの配慮、評価対象とするリスクの範囲の決定が、主要論点として挙げられた。また、気候変動リスク管理戦略へのステークホルダーの意見反映については、国内外における気候変動問題に関する対話型会合の実例を調査し、主として自治体が主催する委員会形式での地域的な対策方針・計画への意見聴取、あるいは、主として研究機関が主催する政府等への提言作成を目的とした研究・実験などが過去に行われていることを把握したが、ICA-RUS では地球規模での気候変動リスク管理を扱う点で、従来からの対話型会合の実例とは異なるものであり、独自の配慮・工夫が求められることが確認された。

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

テーマ2では、陸域統合モデル、生態系モデル、水資源モデル、土地利用モデルおよび農業モデルを開発し、分析を行う。それぞれのモデルについて論点を整理した。

＜陸域統合モデル＞

気候変動緩和に向けた低炭素シナリオにおいて、バイオマス CCS を利用するシナリオが多く採用されている。こういったバイオマス燃料を利用するのか、こういった土地を使い生産するのか、またライフサイクル全体を通じた温室効果ガスの評価はどうか、といった論点が重要となる。

＜生態系モデル＞

温度上昇に伴って生物のフェノロジー（生物季節）に変化が生じるが、それが種間で同調しない場合は生物間のバランスが崩れ、多様性の低下につながる。また、生育環境が悪化することで生産力が低下し、害虫や火災による被害の深刻化が進む可能性や土壌起源の CO₂ や亜酸化窒素、凍土融解によるメタン放出が増加して温暖化を加速する恐れがある。

＜水資源モデル＞

気候変動は地球の降水・蒸発・流出といった水循環を変化させ、基本的な水資源である河川流量を変化させるほか、年々変動や季節変動も増大させると考えられている。いくつかの帯水層では既に取水量が涵養量を上回っていることなどから、利用の持続可能性が懸念されている。大気中 CO₂ 濃度の増加が植生活動を通じて水循環にどのような影響を及ぼすかも十分に理解されていない。

＜土地利用モデル＞

利用可能な土地がどのくらいあるのか、利用する土地への肥料や水、労働力などの投入量がどのくらいか、利用した土地からの産出物の価格がどの程度か等の論点がある。各々が密接に関連するとともに、国際化が進んだ現在では全世界で関連し、空間的分布の理解も重要である。

コラム 6 割引の考え方

温室効果ガスの排出削減量や削減時期に関する議論では「割引」あるいは「割引率」という考え方がよく用いられ、またその値に削減量や削減時期の分析結果が左右される場合も多い。以下では、「割引」の考え方について、その要点を説明する。

経済活動の基本的な構図は、人々（「経済主体」と呼ぶ）が財の消費を行い、それによって幸せを感じる（「効用」を得る）というものである。ここで一口に財と言っても、千差万別、多種多様である。そこで、考えつく限りの財を詰め込んだバスケットを考えることにする。フルーツバスケットのようなイメージである。また、効用（幸せ）と言っても、漠然としている。そこで、一人の経済主体について、その主体が一生に渡る消費を通して感じる幸せを想定する。すなわち、人が一生に渡って消費するフルーツバスケットを抱えて幸せを感じている——これが、経済活動の基本的構図といえる。

バスケットに入っている様々なフルーツ（財）としては、いまの時点で利用可能な（食べられる）もののみならず、明日、明後日、一年後、10年後等、将来に渡って利用可能なものを考える。財の種類を $j = 1 \sim N$ 、時点を $t = 0 \sim T$ で表すとすれば、この世には $N \times (T + 1)$ 個の財があることになる。ここで、 $t = 0$ は現時点を表す。それぞれの消費量を $X_{j,t}$ と書くこととすると、人の生涯にわたる効用は、次のような関数の形でかけることとなる。

$$U(X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{N,0}, X_{1,1}, X_{2,1}, \dots, X_{N,1}, \dots, X_{1,T}, X_{2,T}, \dots, X_{N,T})$$

現実の経済社会では、現時点のみならず、それ以降の時点でも財の消費について組み換えを行うことができる。そこで、効用を時間ごとに分離して、次のように書きなおしてもよいだろう。

$$u_0(X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{N,0}) + u_1(X_{1,1}, X_{2,1}, \dots, X_{N,1}) + \dots + u_t(X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{N,t}) + \dots + u_T(X_{1,T}, X_{2,T}, \dots, X_{N,T})$$

見やすくするために、一時点の消費バスケットはまとめてしまっ、単に C_t と書くことにすると、次のようになる。

$$u_0(C_0) + u_1(C_1) + \dots + u_t(C_t) + \dots + u_T(C_T)$$

これを経済学では「時間分離型の効用関数」と呼ぶ。時点毎に瞬時効用を考え、それを足し算するというものである。ここでさらに、時点毎の消費の取捨選択において、その主体の選好は不変であると仮定しよう。上記の効用は次のように書けることになる。

$$D_0 \times u(C_0) + D_1 \times u(C_1) + \dots + D_t \times u(C_t) + \dots + D_T \times u(C_T) \dots \textcircled{1}$$

これは、各時点で不変の瞬時効用関数を基本として、それに重み付けをして足し算するものである。その重み付けは D_t と表され、「割引係数」と呼ばれる。

気候変動問題を扱う経済分析では、 $\textcircled{1}$ の形の効用関数で議論を始めることがほぼ世界共通のお作法になっている。一方で、

D_t として具体的にどのようなものを想定するか、必ずしも十分な合意があるわけではない。もともと仮定の上に仮定を重ねた形であるから、いかようにでも設定できてしまうのである。ある程度の合意になっているものは、なんらかの正の定数 ρ を使って D_t を $(1 + \rho)^{-t}$ のような形にするものである。これを指数割引という。 ρ を正の定数としているので、 t が大きくなるにしたがって D_t が小さくなる。これは現在の消費から得られる瞬時効用よりも、将来の同じだけの消費から得られる瞬時効用のほうが、生涯に渡る効用全体の中での価値が相対的に低いということを表している。逆に言うと、同じだけの消費をするなら、将来にするよりも現在にしたほうがよいと経済主体は考える、ということである。これによって、将来の消費の価値は現在のそれに比して「割り引かれた」ものとなる。そして遠い将来になるほど、その割引の度合は大きくなる。

ρ が定数となっていることによって、現在 ($t = 0$) から見た一期先 ($t = 1$) の割引が $1 / (1 + \rho)$ 、そこ ($t = 1$) から更に一期先 ($t = 2$) を見た場合の割引が同じく $1 / (1 + \rho)$ 、以下同様にして、ある時点 ($t = s$) から見た一期先 ($t = s + 1$) の割引は常に $1 / (1 + \rho)$ となっている。時間がどれだけ進もうとも、経済主体の将来に対する考え方は不変であると仮定していることになる。これが「指数割引」の根本的な考え方であり、上記のようにある程度の合意となっているのはまさにこの点であるといってよい。それでも、 ρ の値を具体的にいくつにするかまでは、合意の難しい大問題である。指数割引の考え方に合意しないとすれば、 D_t を $(1 + t)^{-\alpha}$ のような形にすることもできる。これを双曲割引という。この場合も定数 α をいくつにするかは大問題である。

容易に想像できるように、こうした設定次第で分析結果や政策提言は大きく異なってくる。気候変動問題の場合は、上記のような個人々の一生の効用を積み重ねて社会全体の効用とする。それゆえ、 T は少なくとも100年、場合によっては、1000年というオーダーに設定される。例えば、指数割引の形で、 $T = 100$ 年と考えて、 $\rho = 0.01$ の場合には $(1 + \rho)^{-T} = 0.37$ である。これは、100年後の瞬時効用は現在価値換算で約4割掛けという価値の低さであると認識していることを意味する。逆にいうと、100年後に現在と同等の瞬時効用を得たければ、現在の $1/0.37$ 倍 (= 2.7倍) の瞬時効用が必要ということになる。 $\rho = 0.05$ であれば $(1 + \rho)^{-T} = 7.6 \times 10^{-3}$ 、 $\rho = 0.1$ であれば $(1 + \rho)^{-T} = 7.3 \times 10^{-5}$ である。 $\rho = 0.1$ の場合に至っては、100年後に現在と同等の瞬時効用を得るには、現在の $1/7.3 \times 10^5$ 倍 (約1.4万倍) の瞬時効用が必要となる。

気候変動問題を扱う経済分析は、客観的な科学的議論であるように見えて、実は根本的な部分で大きな論点を残しているのである。

＜農業モデル＞

食料供給を規定する作物収量については、近年の収量増加率の抑制要因（気温、降水）の特定、CO₂濃度上昇に対する施肥効果、環境要因との複合作用応答、到達可能収量、極端現象に対する応答などの把握が必要である。また食料需要の将来見通しには、市場構造の変化や都市貧困層の増加が食料アクセスに及ぼす影響の見積りなどが論点となっている。

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

ティッピングエレメントの概要はコラム2(p.9)で紹介されているが、気候変動リスク管理に関連して重要な論点は、「生起する確率は高くないが一旦生じると広範囲に甚大な負の影響を及ぼす」と想定されている点である。

ある程度以下の頻度でしか生じないような稀な現象に対しては、想定影響（被害額）に生起確率を掛け合わせた平均的な期待値で机上の論理としては議論することができても、実際には人間社会がせいぜい10年先を見据えて損得勘定をしている限り、それは空論となる。例えば、とある稀な現象が完全にランダムに独立に生起するとした場合、T年に一度の現象がT年間に1度も生じない確率もちょうど1度だけ生じる確率も（Tが十分大きい場合）、約37%であり、2度以上生じる確率が残りの26%もある。統計的な期待値が1回であっても、期間内に一度も生じなかったら無駄な対策だったと感ずるだろうし、2度以上生じたら見込みが甘かったと感ずることだろう。ちょうど期待値くらいの生起回数になるためには平均再現期間Tの何倍もの期間が必要なので、例えば温暖化に伴って生起する確率が1%の現象に関しては何千年もの時間スケールで考えないと期待値通りの回数にはならず、保険で考えるような費用便益計算が有効とは限らない。

一方、ティッピングエレメントとして懸念されている現象がもし映画などで誇張されて喧伝されているようにカタストロフィックな被害を伴うとしたら、果たして適応可能なのだろうか、管理できるリスクなのだろうか、という論点もある。ただし、テーマ3では、視野に入っているティッピングエレメントがすべて全地球表層に甚大な被害を及ぼすわけではないのではないか、という仮説にたって研究調査を進めている。そうすると、今度は、

地域間の利害調整が問題となってくる可能性もある。また、現在議論の俎上に上っているティッピングエレメント以外に、指摘されていないティッピングエレメントと呼ぶにふさわしい気候変動に伴う事象があるかどうか、もテーマ3の重要課題である。

さらに、テーマ3では、気候変動の影響評価に関して、単に豪雨や洪水、渇水や高温など気候ハザードの頻度や強度の変化に留まらず、水害や干ばつ、食料不足や疫病などを経て、最終的には健康や経済費用をエンドポイントとする影響評価を目指す。

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

緩和策、適応策および気候工学という対策オプションごとに、論点を整理した。

＜緩和策＞

緩和策の詳細は緩和策インベントリ（表3）に示されるとおり数多くあるが、これらはいずれも、気候変動の影響被害の緩和に対して間接的に寄与するものである。共通した論点として、(A)効果と費用の不確実性、(B)他オプションとの相互作用、(C)派生リスクの見積もり、(D)副次的便益の見積もり、をあげることができる。

さらに、これら进行评估する主体が地域・時点により多様である点が合意に向けた大きな障壁となる。例えば、緩和策を実行する主体と、気候変動抑制により便益を受ける主体が同一ではなく、世代を超えることもある。また気候変動影響が地域・時点・分野により異なる被害（時に便益）を得る局面が存在する。このことは、対策をとった時の主体間の利益相反のため、費用便益分析からのマクロに見た最適行動が各主体にとっては好ましいものにならない可能性が残ることになる。

このように、利害の空間的、時間的な対立の中で参加主体が妥協点を探らねばならなくなることから、自然科学的な不確実性が解消されたとしても、その中で選択される行動は必ずしも全体的な効率性をもたらすとは限らず、むしろ公平性の視点が選好されることとなる。しかし効率性に比べると、公平性は価値判断がより前面に出る概念であるだけに科学的な議論で答えを出すことが難しくなる。

<適応策>

適応策にも緩和策と同様の論点が存在する。ただし、適応策は個別の地域的な温暖化影響への対応策であるだけに範囲が限定的になり、費用便益的な議論が立てやすくなる。一方で、適応策の実施は局所的対応であるだけに、全体的な効率性との相克や、社会的、文化的な障壁、対策に必要な資金的な問題などがより顕在化しやすくなる。

<気候工学>

気候工学（ジオエンジニアリング）では、まだ提案から実験の段階にあるため、実施効果や副作用など、それ自体にも多くの科学技術的不確実性が残っている。しかも、地球システムに対して直接関与するだけに、社会的な論点も複数ある。例えば、倫理的にみて気候工学は許されるのか、有効な国際的な枠組みを作れるのか、グローバルベネフィットに対してどう協調できるか、今後の研究開発をどのように進めればいいのかなどが論点として指摘されている。それでも、議論は始まったばかりで、「国際枠組みは気候工学を扱うのには不十分である」という現状の合意を除いて、ほとんど合意は見られない段階にある。

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

ICA-RUSにおいて、テーマ5では、リスクの構造を社会に提示することの意味、およびその方法に焦点をあてている。これについて、問題対象ごとの分類、個人の特性ごとの分類、手法ごとの分類に着目して、論点を整理した。

<問題対象ごとの分類>

不確実性をふくむ課題は、気候変動問題以外にも複数存在するが、それら他の課題と比較して、気候変動問題の特徴とは何なのであろうか。これに関する論点として、以下が挙げられている。

- 1) 不確実性をはらむリスク事象6つ（遺伝子組み換え技術（遺伝子組み換え食品と遺伝子組み換え作物）、遺伝子検査、携帯電話、携帯電話の電波塔、放射性廃棄物、気候変動）のうち、携帯電話、遺伝子検査、遺伝子組

み換え食品についてはリスク管理の責任は個人に帰属すると考えられているのに対し、気候変動、携帯電話の電波塔、放射性廃棄物、遺伝子組み換え作物については、個人の行為はほとんど役にたらず、政府が責任をもつべきと考えられている傾向が示唆されている。

- 2) 気候変動問題のコミュニケーションに特有の課題として、(1) 原因がみえないこと、(2) 原因と影響が、時間的にも地理的にも離れていること、(3) 都市部の人間が環境の変化から遮断されていること、(4) 行動をとっても効果が実感できないこと、(5) 人間が環境に影響を与えていることを感覚的に信じるのが難しいこと、などが挙げられている。

<個人の特性ごとの分類>

社会にリスク選択を提示して判断を問う場合の個人特性を大きく分類することを考えた場合、以下の論点がある。

- 1) 主要なトレードオフの軸としては、(1) リスクとベネフィット、(2) 現在と将来、(3) 局所と全体、(4) 個人と集団、(5) 社会と自然で過不足ないか。
- 2) 古典的な世界観として階層主義者、平等主義者、個人主義者、運命論者による1)のトレードオフ軸に対する姿勢の違いを見るが、更なる精査が必要ではないか。

<手法ごとの分類>

リスク選択について議論する市民参加の手法と課題とのマッチングを分析する。この点に関する論点として以下がある。

- 1) 「生物多様性」という課題は、市民参加、特にWWViews市民会議の実施方法にフィットした。理由として、(1) 市民からの問題が見えやすい（例：種の絶滅など）、(2) 対策、効果とも見えやすい（珊瑚礁保護など）、という点が挙げられる。
- 2) 上記より、気候変動のリスク認知のしにくさとして、(1) 眼の前の問題にひっぱられやすいこと、(2) 市民との接点となる話題のつくりにくさ、が挙げられる。

研究初年度である2012年度は、ICA-RUS全体としては主に既存知見のサーベイに基づく問題の枠組みの検討に集中し、本レポートでもその結果を中心にお示しした。一方、各テーマではそれと並行して、独自の分析を行うためのモデルの構築などの準備が進んでいる。来年度からは、独自の分析を含む定量的なリスク管理戦略の検討を本格的に開始し、2014年度中に第一版のまとまった結果（ICA-RUS 地球規模気候変動リスク管理戦略 ver.1）を提示することを目指す。

この際に鍵となるのが将来の社会経済シナリオである。ICA-RUSでは、国際的な研究コミュニティにおけるシナリオ開発の動きに歩調を合わせながら、ICA-RUS全体として共通して用いるシナリオ群を確定する。これを来年

度中に定量化するとともに、気候変動影響、気候変動対策シナリオ、対策の波及効果等の研究、ならびに市民の価値判断を問う社会調査において整合的に順次活用する。

なお、ICA-RUSで独自に分析できるトピックは限られるため、定量化においても引き続きサーベイを通じて既存知見を活用することにより、検討の包括性の確保を図る。リスクインベントリ、対策インベントリおよび論点整理については次年度以降も引き続き取り組み、内容の拡充と整理を図る。

また、本レポートの発行をはじめ、ウェブページ、国内外の学会発表、各種ステークホルダーとの対話等を通じて、来年度は成果の発信にも一層注力していきたい。

フィードバックのお願い

ICA-RUS レポートをご覧頂き有難うございました。ICA-RUS では、本レポートについてのあらゆるフィードバックを歓迎します。次年度以降のレポートへの要望や2012年度のレポートに対する感想あるいはご批判等、短いものでも結構ですので、是非以下のアドレスまで e-mail でお送りください。

s10-info@nies.go.jp

次年度以降のレポートも是非ご覧ください。

引用文献

- Azar *et al.*, 2010, The feasibility of low CO₂ concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS), *Climatic Change*, **100**, 195-202.
- Committee on Climate Change, 2008, Building a Low-Carbon Economy – the UK’s Contribution to Tackling Climate Change.
- Douglas, 1970, Natural symbols: Explorations in cosmology, Barrie & Rockliff, London
- Douglas, 1978, Cultural Bias, Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland, Occasional Paper, no.35
- Douglas and Wildavsky, 1982, Risk and Culture: An essay on the selection of technical and environmental dangers, University of California Press, Berkeley
- Fuss *et al.*, 2013, Optimal mitigation strategies with negative emission technologies and carbon sinks under uncertainty, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-012-0676-1
- IPCC, 2005, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC, 2007a, Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva
- IPCC, 2007b, Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York
- IPCC, 2012a, Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York
- IPCC, 2012b, Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Geoengineering, IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam
- IRGC, 2005, White Paper on Risk Governance: Towards an Integrative Approach, International Risk Governance Council, Geneva
- Jones *et al.*, 2013, 21st Century compatible CO₂ emissions and airborne fraction simulated by CMIP5 Earth System models under 4 Representative Concentration Pathways, *Journal of Climate*, doi:10.1175/JCLI-D-12-00554.1
- Lenton *et al.*, 2008, Tipping elements in the Earth’s climate system, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, 1786-1793
- Lenton and Vaughan, 2009, The radiative forcing potential of different climate geoengineering options, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 5539-5561
- Mabey *et al.*, 2011, Degrees of Risk -Defining a Risk Management Framework for Climate Security, E3G, London, Washington and Belgium
- Maibach *et al.*, 2009, Global Warming’s Six Americas 2009: An audience Segmentation Analysis.
- Maibach *et al.*, 2011, Identifying like-minded audiences for global warming public engagement campaigns: An audience segmentation analysis and tool development, *PLoS ONE*, **6(3)**, e17571, doi:10.1371/journal.pone.0017571

Malka *et al.*, 2009, The association of knowledge with concern about global warming: Trusted information sources shape public thinking. *Risk Analysis*, **29(5)**, 633-647

Obersteiner *et al.*, 2001, Managing Climate Risk, *Science*, **294**, 786-787

Royal Society, 2009, Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty, The Royal Society, London

Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2012, Geoengineering in Relation to the Convention on Biological Diversity: Technical and Regulatory Matters, Montreal, Technical Series No. 66, 152 pages.

Stern, 2007, The Economics of Climate Change: The Stern Review, Cambridge University Press, Cambridge

UNFCCC, 2011, Assessing the Costs and Benefits of Adaptation Option, UNFCCC, Bonn

van Vuuren *et al.*, 2007, Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs, *Climatic Change*, **81**, 119-159

Vlek and Keren, 1992, Behavioral decision theory and environmental risk management: Assessment and resolution of four 'survival' dilemmas, *Acta Psychologica*, **80**, 249-278

World Bank, 2010, Economics of Adaptation to Climate Change: Synthesis report, The World Bank, Washington DC

World Bank, 2012, Turn Down the Heat. Why a 4 °C Must Be Avoided, The World Bank, Washington DC

伊坪徳宏, 稲葉敦, 2010, LIME2 – 意思決定を支援する環境評価影響評価手法 (LCA シリーズ), 産業環境管理協会

環境省, 2008, 地球温暖化影響・適応研究委員会報告書, 地球温暖化影響適応研究委員会

杉山昌広, 2011, 気候工学入門, 日刊工業新聞社



<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

この報告書は再生紙を使用しています。

2013. 3