

ICA-RUS REPORT 2014

-気候変動リスク管理戦略の作成に向けて-

詳細版



2014 年 6 月

目次

Ⅱ-1	リスクインベントリの改善	1
Ⅱ-2	洪水被害の予測（定量的なリスク評価の例）	16
Ⅱ-3	ネガティブ・エミッション	23
Ⅱ-4	土地・水・生態系等の相互作用	39
Ⅱ-5	気候変動に対する市民の考え方	準備中

※ 本詳細版は、ICA-RUS REPORT 2014 「第Ⅱ部 個別研究成果の紹介」における個々の個別研究成果をより詳細に紹介したレポートである。

「第Ⅰ部 ICA-RUS のアウトプット」については、ICA-RUS REPORT 2014 をご覧頂きたい。

Ⅱ-1 リスクインベントリの改善

執筆担当

リスクインベントリ作成チーム

独立行政法人国立環境研究所	横畠徳太
独立行政法人国立環境研究所	仁科一哉
東京大学 生産技術研究所	木口雅司
東京工業大学 大学院理工学研究科	井芹慶彦
大学共同利用機関法人 国立極地研究所	末吉哲雄
北海道大学 大学院地球環境科学研究所	吉森正和
東京大学 大気海洋研究所	山本彬友
筑波大学 体育系	本田靖
独立行政法人国立環境研究所	花崎直太
独立行政法人国立環境研究所	伊藤昭彦
独立行政法人国立環境研究所	眞崎良光
北海道大学 大学院地球環境科学研究所	重光雅仁
独立行政法人農業環境技術研究所	飯泉仁之直
独立行政法人農業環境技術研究所	櫻井玄
独立行政法人農業環境技術研究所	岡田将誌
株式会社野村総合研究所	岩瀬健太
独立行政法人国立環境研究所	高橋潔
独立行政法人国立環境研究所	江守正多
東京大学 生産技術研究所	沖大幹

Ⅱ-1- i リスクインベントリとは

気候変動が人間や生態系に及ぼす影響の性質は様々である。人間や生態系にとって好ましくない悪影響（被害）をもたらす一方で、時期や場所によっては、好影響（利益）をもたらすこともある。これまでも述べたとおり、IC-RUS では、利用可能なあらゆる科学的知見を利用することで、気候変動が引き起こすリスク（もたらされる被害や利益）を網羅的に明らかにし、地球規模の気候変動リスク管理の構築に貢献することが、重要なひとつの目標である。このための活動が「リスクインベントリ」の作成であり、プロジェクトの開始から改良を進めている。「インベントリ」とは、「目録」を意味し、例えば温室効果ガスの排出量のすべてを排出起源別にまとめた「温室効果ガスインベントリ」などが、これまでに作成されている（<http://www-gio.nies.go.jp/index-j.html>）。私たちは全球規模の気候変動によって地球上で生じるあらゆるリスクをリストアップし、データベースを作成することを目標とした活動を行ってきた。気候変動によって生じる影響は様々な部門にわたり、その時空間スケールも様々であるが、それらは互いに密接に関連している。このため、気候変動によって生じるリスクを、ある特定の地域においてだけでなく、全球規模で評価することが重要であると私たちは考えている。これまでの研究では、ある特定の国において生じる気候変動リスクについては、様々な形でまとめられてきた（例えば 英国気候変動リスク評価、UKCCRA 2012 など）。この一方で、気候変動によって生じると考えられるリスクについての最新の知見は、IPCC 第 5 次評価報告書にまとめられているが、基本的には部門ごとにまとめられており、様々な部門にわたるリスクの全体像や、部門の間のリスクの関係性が、必ずしも分かりやすくまとまっているとは言えない。

昨年までの活動では、まず、気候変動によって生じる全てのリスクを網羅するために、リスクの分類を行ったことである。社会にある様々な価値観を考慮して、社会が「被害を避けたい」と望む対象ごとに、気候変動影響の整理を行った。気候変動によって生じる被害を、人間の生活・生態系・地球システムの 3 つに分類し、それぞれにおいてさらに詳細に分類を行い、起こりえる全ての被害を網羅する形で、リストの作成を行った（概要版は ICA-RUS REPORT 2013、詳細版は

http://www.nies.go.jp/ica-rus/inventory/risk_inventory_20130319.pdf 参照）。これは、ICA-RUS に参画する幅広い分野の研究者が、最新の知見のサーベイなどを行うことにより、気候変動によって生じるリスクをリスト化したものである。これにより、気候変動によって影響を受ける部門と個別の被害に関する全体像を明らかにすることができた。その一方で、気候変動リスク管理に役立つための有用な情報にするために、様々な課題が浮かび上がってきた。大きな課題の一つが、複雑なリスクの因果関係が、ICA-RUS REPORT 2013 のリスクインベントリ表では、十分に表し切れないという点である。前述した通り、気候変動が引き起こす、ある部門でのリスクは、他の部門におけるリスクに様々な影響を与える。例えば他節（「Ⅱ-4 土地・水・生態系等の相互作用」など）でも解説してある通り、水・エネルギー・食料に関連する人間活動と自然環境は密接につながっており、気候変動によって大きな影響を受ける可能性がある。全球規模の気候変動リスク管理のためには、このようなリスクの「連鎖」まで含めたリスクの全体像を明らかにする必要がある。しかし昨年までの私たちの活動では、様々な現象の間の因果関係、また様々なリスクの間の関係に関しては、ごく一部しか表現することができなかった。また、昨年までの活動で浮かび上がったもう一つの大きな課題は、各々のリスクの特徴を評価する必要性である。これまで私たちが作成したリスクインベントリでは、影響の大きさ（影響を受ける主体の数や、影響を受ける期間や地域など）や生起可能性などが異なる様々なリスク項目が、並列で並べられている。どのようなリスクを受け入れ、また回避するかリスク判断・リスク管理を行うためには、各々のリスクの特徴を明らかにすることが非常に重要である。

このため今年度は、リスク連鎖の評価を行うことで、リスクインベントリを大幅に改良した。具体的には、気候変動によって生じる様々な現象の間の因果関係を整理することで、異なるリスクのつながりについて調べた。さらに、これまでに作成したようなリストの形式だけでなく、リスクの「ネットワーク図」（図 Ⅱ-1-1 から図 Ⅱ-1-8）を作成することで、これまでにない分かりやすい形で、気候変動リスクの連鎖を表現することができた（ii 節）。そして、来年度以降の課題について検討し、リスク管理を行う上で必要だと考えられる、リスク項目を様々な要素によって特徴づける方法について議論を行った（Ⅱ-1- iii 節）。

Ⅱ-1- ii リスク連鎖の評価

(1) 取り扱うリスクの範囲

私たちがリスクインベントリで取り扱う範囲としては、基本的には、将来の気候変動に対して社会が特別な対策を行わず、現在の温室効果ガス排出や社会経済の傾向がこのまま続いた場合のリスクを考えることとした。今後、気候変動リスク管理のためにどのような気候対策をとるかを評価する上で、このような「対策なし」の場合に生じるリスク評価を行うことは非常に重要である。一般に気候変動対策としては、温室効果ガスの排出を削減する「緩和策」と、発生した気候変動の様々な影響に対策を行う「適応策」があり、そのどちらを行う場合にも、何らかのリスクが発生する可能性がある。ICA-RUS では別途、気候変動対策オプションの包括的なリスト、また対策によって生じるリスクをまとめた「対策インベントリ」の作成を行っているため、ここでは気候変動対策を行わなかった場合に生じるリスクのみを考慮する。

また、昨年までの活動では、気候変動によって生じる可能性のある被害や利益を「リスク」と定義し（ICA-RUS REPORT 2013）、このうち特に「被害」にあたる現象だけを抽出したが、今回は「利益」も項目に含めることにした。これにより、リスクの全体像をより包括的に表現することが可能になった。

さらに、ここでは人為起源の気候変動に関わる現象の因果関係を取り扱い、人為起源の気候変動としては、人間による温室効果ガスの排出によって生じる気候システムの変化を考える。このため、様々な被害と利益を引き起こす原因としての、気候システムの様々な変化についても、幅広く考慮することとした。

(2) リスクのカテゴリ分け

リスクのカテゴリ分けに関しては、昨年までの分類を少し整理して、1：健康、2：災害、3：水資源、4：エネルギー、5：食料、6：産業、7：社会、8：生態系、9：地球科学的臨界現象。1：「健康」では人間の健康に関わる現象を取り扱い、2：「災害」では災害に関わる現象や人間の生死に関わる現象を扱う。3：「水資源」4：「エネルギー」5：「食料」では、人間にとって不可欠である水・エネルギー・食料の入手可能性や供給に関わる現象を扱う。本来「水資源」「エネルギー」「食料」は6：「産業」の中の一部門でもあるが、気候変動がもたらす影響として重要であるため（Ⅱ-3 土地・水・生態系等の相互作用）、「産業」の中から分離した。このため6：「産業」では、水・エネルギー・食料以外の産業への影響を取り扱う。7：「社会」では、気候安全保障や文化に与える影響を取り扱う。8：「生態系」では、陸域および海洋の生態系において生じる気候変動の影響を取り扱う。海洋における現象はすべて「海洋～」と表示した。上記1～8までのカテゴリでは、基本的に気候変動問題で取り扱う時間スケール、100年程度の時間で生じる被害と利益を扱う。この一方で、9：「地球科学的臨界現象」では、気候変動が進行してある「臨界点」を超えてしまった後の状態、地球システムに急激な変化が引き起こされてしまった後の状態を取り扱う。結果として大惨事を引き起こす可能性があるよう気候変動の要素（ティッピングエレメント、ICA-RUS REPORT 2013 参照）に相当する。

(3) リスク項目の抽出

前年に引き続き、ICA-RUS に参画する健康・水資源・作物・経済・生態系・気候・地球システムに関する分野の専門家によって、出版された論文、IPCC 第4次・第5次評価報告書をもとに、まずはリスク項目の抽出を行った。私たちが抽出した気候変動リスクの項目を、表Ⅱ-1-1に示す。ここでは、気候変動によって引き起こされる被害や利益についての因果関係を記述するために、気候システムの様々な変化を「気候」というカテゴリにまとめてある（気候システムの変化そのものをリスクと見なししているわけではなく、因果関係をまとめるための必要性から、表Ⅱ-1-1へ載せた）。すべての項目は、温室効果ガス濃度の増加や気候変動に伴って起こる「現象の変化」を表す形で統一されている。変化の仕方が明らかな場合には、「増加」「減少」「悪化」「向上」などの形で、変化の方向を明示するように記述した。これにより、個別の影響が被害と利益のどちらになるかを、明確に示すことができる。「大気大循環の変化」「食料貿易の変化」など、変化の仕方が複雑な（空間パターン・分布などが変わる）場合には「変化」の形で表現した。個別具体的な細かい現象は、できるだけまとめて表現することにより、リスクの項目の数が多くなり過ぎないように注意した。また、各々のリスク項目の間で、内容的な重複がなくなるようにも気をつけた。このような作業は、後述するネットワーク図の作成を行う上でも、非

常に重要な作業である。表 II-1-1 のリスク項目データは、数多くの専門家によって作成されたため、初期バージョンでは記述の仕方が統一されておらず、項目間での内容的な重複も多かったが、様々な調整を行い表 II-1-1 の形にまとめた。現在では表 II-1-1 にあるように、気候システムの変化と気候変動リスク項目を合わせて 130 の項目が挙げられている。

表 II-1-1 気候システムの変化（カテゴリ＝「気候」と、気候変動によって人間社会や生態系に生じる様々な被害や利益（カテゴリ＝「安全」「健康」「水資源」「エネルギー」「食料」「産業」「産業」「社会」「生態系」「地球科学的臨界現象」）の一覧

気候	温室効果ガス濃度の増加		エネルギー	水力発電効率の低下
	温室効果ガス濃度の減少			水力発電効率の上昇
	気温の上昇			火力発電効率の低下
	降水量の減少			原子力発電効率の低下
	降水量の増加			風力発電効率の低下
	大気循環の変化			冷房需要の増加
	季節サイクルの変化			暖房需要の減少
	雪氷の融解			エネルギー需要の増加
	凍土の融解			エネルギー価格の上昇
	猛暑の増加			エネルギー供給の不安定化
	海水温の上昇			エネルギー安全保障の悪化
	海面水位の上昇		食料	作物生産量の減少
	海洋循環の変化			作物生産量の増加
災害	強風の激化			作物品質の悪化
	豪雨の増加			牧草生産量の減少
	熱帯低気圧の強化			家畜生産量の減少
	高潮の強化			家畜生産量の増加
	洪水の増加			病害の増加
	土砂災害の増加			農地の被害
	海難事故の増加			漁獲量の減少
	家屋被害の増加			漁獲量の増加
健康	熱中症や熱関連死亡の増加		産業	肥料利用の増加
	寒冷関連死亡の減少			食料貿易の変化
	PTSDなどの精神疾患の増悪			食料流通の変化
	下痢の増加			飼料価格の上昇
	呼吸器疾患の増加			食料価格の上昇
	低栄養の増加			食料供給の不安定化
	水媒介感染症の増加			食料安全保障の悪化
	動物媒介感染症の増加			インフラ被害の増加
水資源	動物媒介感染症の減少			木材生産量の減少
	人間媒介感染症の増加			木材生産量の増加
	土壌水分の減少		社会	北極海航路の出現
	河川流量の減少			観光産業への悪影響
	河川流量の増加			島嶼地域への悪影響
	河川水温の上昇			居住地の移動
	河川水質の悪化			紛争の激化
	河川土砂運搬量の減少			風習の変化
	河口の塩水化			文化遺産の損傷
	湖沼水温の上昇			文化の変容
	湖沼の酸性化			
	地下水の枯渇			
	地下水の塩水化			
	沿岸部の塩水化			
	水需要の増加			
	水資源の減少			
	水資源の増加			
	水処理費用の増加			
	水価格の上昇			
	水安全保障の悪化			

生態系	土壌流出の増加		地球 科学的 臨界現象	エルニーニョの変質
	土壌有機物の減少			海洋深層循環の停止
	生物季節応答の変化			グリーンランド氷床の縮小
	植生帯の変化			サハラ緑化
	森林火災の増加			ツンドラの消失
	森林の衰退と枯死			凍土の消失
	マングローブ林や湿原の減少			西南極氷床の崩壊
	落葉や風倒の激化			熱帯雨林の大規模枯死
	藻類などの繁茂			氷河の消失
	益虫の減少			北極海氷の消滅
	害虫の増加			北方林の消失
	窒素固定量の増加			モンスーンの変質
	窒素酸化物放出の増加			
	生物多様性の低下			
	生物多様性の向上			
	生態系生産量の減少			
	生態系生産量の増加			
	海洋の酸性化			
	海洋炭酸カルシウムの溶解			
	海洋溶存酸素の減少			
	海洋窒素酸化物放出の増加			
	海洋表層栄養塩の増加			
	海洋表層栄養塩の減少			
	海洋生態系生産量の減少			
	海洋生態系生産量の増加			
	海洋生物生息域の変化			
	海洋生物多様性の低下			

(4) リスク間の因果関係の記述

次に、表 II-1-1 の作成手順と同様に、ICA-RUS に参画する同様のメンバーによって、既存の文献に基づき、リスク項目の間の因果関係を記述する作業を行った（表 II-1-2）。具体的には、表 II-1-1 で示した気候システムの変化と気候変動によって生じる被害や利益の各項目を、「原因」「結果」のいずれかに配置する。既存の文献に基づき、考えられる全ての因果関係を網羅したデータベースを作成し、現在では全体として 300 程度の因果関係の記述を行った。ここでも表 II-1-1 のデータの作成と同様に、因果関係の重複がなくなるよう、ある因果関係の内容が別の因果関係の一部に含まれることがないように気をつけた。また、原因と結果の間に別の現象が生じるようなことがないよう、「間接的な」因果関係が含まれないように注意してデータの作成を行った。リスク因果関係を記述したデータは

<http://www.nies.go.jp/ica-rus/inventory.html> において公開している。現在のデータには、因果関係の根拠となる文献の情報や、それぞれの因果関係の確信度は含まれていないが、今後はこれらの情報を含めた形でデータを公表する予定である。

表 II-1-2 リスク項目の間の因果関係の例

原因	結果
猛暑の増加	熱中症や熱関連死亡の増加
河川流量の減少	水資源の減少
水資源の減少	水安全保障の悪化
河川流量の減少	水力発電効率の低下
水力発電効率の低下	エネルギー供給の不安定化
水資源の減少	作物生産量の減少
作物生産量の減少	食料価格の上昇
食料価格の上昇	食料安全保障の悪化
食料安全保障の悪化	居住地の移動
居住地の移動	紛争の激化
強風の激化	文化遺産の損傷
降水量の減少	森林火災の増加
降水量の減少	森林の衰退と枯死
森林の衰退と枯死	生態系生産量の減少
生態系生産量の減少	温室効果ガス濃度の増加
森林の衰退と枯死	生物多様性の低下
海洋の酸性化	海洋炭酸カルシウムの溶解
海洋炭酸カルシウムの溶解	漁獲量の減少
森林の衰退と枯死	ツンドラの消失

※表 II-1-1 で示した気候システムの変化と気候変動によって生じる被害や利益の各項目を、「原因」「結果」のいずれかに配置する。既存の文献に基づき、考えられる全ての因果関係を網羅したデータベースを作成した (<http://www.nies.go.jp/ica-rus/inventory.html>)。ここに示すのはその一部であり、全体としては 300 程度の因果関係を記述した。

(5) リスク項目における主要な用語の定義

表 II-1-1 で示したリスク項目で挙げた現象は、後述する「ネットワーク図」の用語として用いるため、可能な限り簡略化された表現を用いている。表 II-1-1 において、特に社会が「被害を避けたい」と望むと考えられる現象（＝「エンドポイント」と呼ばれる）に関わる用語の内容は、以下のとおりである。表 II-1-1 には、ここに示した用語以外にもエンドポイントになりえる項目はあるが、それらは下記「リスク連鎖の概要」において解説を行った。

水安全保障の悪化：Millennium Development Goal による水安全保障（water security）の定義では、「安全な飲み水と公衆衛生へのアクセス（access to safe drinking water and sanitation）が可能なこと」である（UN general assembly 2010）。ここでは、人間活動のために必要な水、すなわち農業用水・工業用水・生活用水の入手可能性が損なわれることを「水安全保障の悪化」と表現した。

エネルギー安全保障の悪化：国連によるエネルギー安全保障（energy security）の定義は「安全で信頼性があり手頃な価格（safe, reliable and affordable energy service）の、調理・暖房・光熱・コミュニケーション・生産の利用のためのエネルギーサービスが得られること」である（Hoff 2011）。ここでは、人間活動のために必要なエネルギーの入手可能性が損なわれることを「エネルギー安全保障の悪化」と表現した。

食料安全保障の悪化：FAO による食料安全保障の定義は「活動的で健康な生活のための、必要な栄養と食物の好みを満たす（meet the dietary needs and food preferences）、十分で、安全な、栄養のある食料に対する入手可能性とアクセス（availability and access to sufficient, safe and nutritious）があること」である（Hoff 2011）。ここでは人間活動のために必要な食料の入手可能性が損なわれることを「食料安全保障の悪化」と表現した。

生態系生産量の減少・増加：陸域生態系においては、植物が光合成を行うことで大気中の二酸化炭素を吸収し、同時に呼吸によって二酸化炭素を排出することで、有機物の生産を行っている。ここでは、

光合成から呼吸などを引いた「純一次生産（net primary production）」の変化を、「生態系生産量の減少・増加」と表現した。海洋における同様のプロセスを「海洋生態系生産量の減少・増加」と表現した。生態系生産量の変化は、大気中の温室効果ガス濃度の変化に影響を与えるだけでなく、生態系における他の生物の食料となるため、生物多様性にも影響を与える。

生物多様性の低下・向上：生物多様性の生物学的な定義は、ある地域での遺伝子・種・生態系の全体的な多様性（Larsson 2001）である。ここでは、生物生息域の消失による生物種の絶滅、生物相の変化を「生物多様性の低下」と表現した。逆に、生態系生産量の増加による好影響を「生物多様性の向上」と表現した。

（6）リスク因果関係の可視化と解釈

私たちが作成した 130 程のリスク項目（表 II-1-1）と、その間の 300 程度の複雑な因果関係を理解するためには、工夫が必要である。そこで私たちは、複雑ネットワークを図化するための手法

（Fruchtman & Reingold 力指向アルゴリズム）を利用して、リスク項目の因果関係の視覚化を行った。この手法は、非常に数多くのものごとの間の複雑なつながり、ネットワークを表現するための手法で、様々な分野で利用されている。

（7）リスク連鎖の概要

この研究によって得られたリスク連鎖のネットワーク図を、図 II-1-1 から図 II-1-8 に表す。これらは本来、130 程のリスク項目（表 II-1-1）と、その間の 300 程度の因果関係を利用して、1 枚の図にまとめて表わされるものである。しかし 1 枚の図で表すと、リスク項目の数が多すぎて、ネットワークのつながりが複雑になりすぎるため、前述の「リスクのカテゴリ分け」8 枚の図に分割して表現している。1 枚であらわした図は <http://www.nies.go.jp/ica-rus/inventory.html> において公開している。

これらのリスク連鎖の図を解釈する上で注意すべきことは、図には様々な因果関係を矢印で示してあるが、因果関係によって、生起確率や確信度が異なることである。また、因果関係が生じる場所や規模（全球的か地域限定的か）も、因果関係によって異なる。ネットワーク図で表すと、すべての因果関係が確実に起こるという印象を与えるかもしれないが、そうでないことを注意していただきたい。因果関係によって性質が異なることは、今後グラフの中で表現する（確信度の高い因果関係とそうでないものを違う色の矢印で表現するなど）予定である。今後の課題の詳細については次節で解説した。

図 II-1-1 は、表 II-1-1 の「健康」カテゴリのリスク項目が、原因か結果に含まれる因果関係を表現した図である。気温の上昇は寒冷関連死亡の現象などの好影響ももたらすが、猛暑の増加なども要因となり、熱中症や熱関連死亡の増加をもたらす可能性がある。また、気温の上昇や洪水の増加などが食料媒介感染症（食中毒など）、水媒介感染症（コレラなど）、人間媒介感染症（人から人へ広がる感染症）の増加をもたらす可能性がある。食料安全保障の悪化や水安全保障の悪化は、低栄養の増加や下痢の増加をもたらす。熱帯低気圧の強化や作物の減少による精神疾患の増加も報告されている。この一方で、降水量の減少などによる乾燥化は、動物媒介感染症の減少という好影響ももたらす。

健康

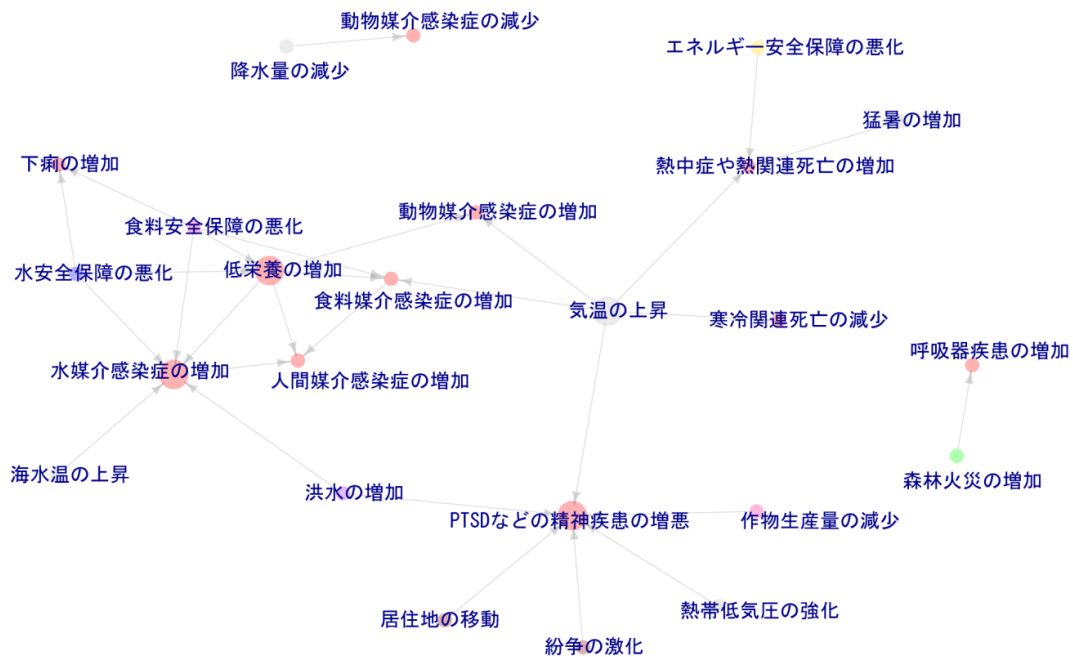


図 II-1-1 表 II-1-1 の「健康」カテゴリに含まれるリスク項目が、原因か結果に含まれる因果関係を示すネットワーク図

図 II-1-2 は、表 II-1-1 の「災害」「社会」カテゴリのリスク項目が含まれる因果関係の図である。豪雨や強風の増加が家屋被害やインフラ被害の増加を引き起こす可能性がある。また、食料や水の安全保障の悪化によって、紛争の激化や居住地の移動が生じる可能性がある。食料価格の変化による食文化の変容、海面水位の上昇による島嶼地域への悪影響も懸念されている。

災害 社会

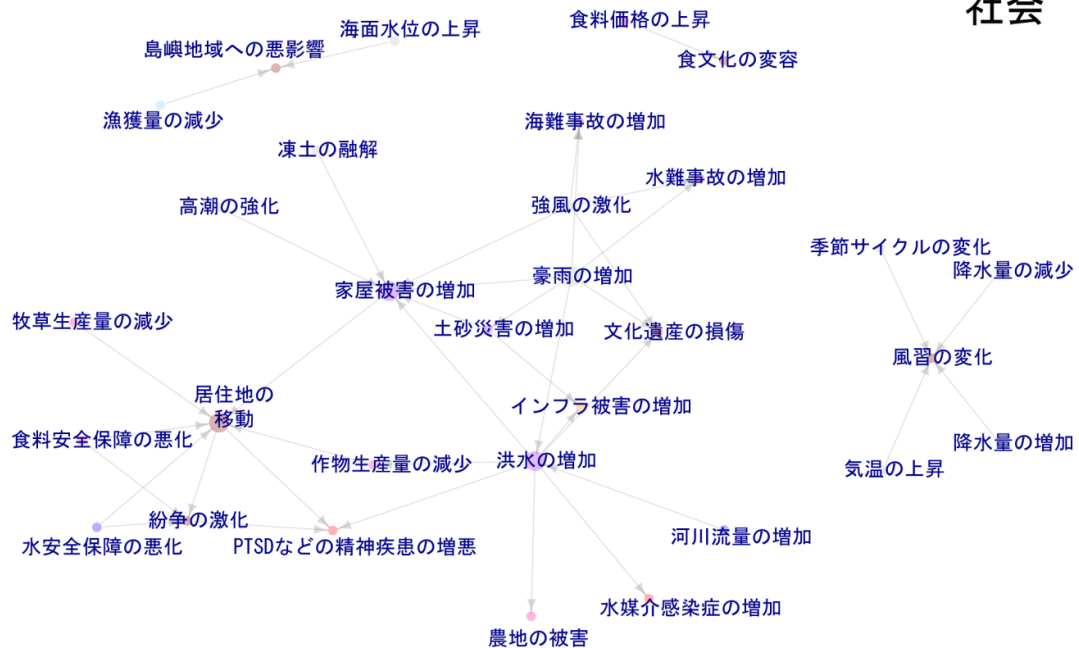


図 II-1-2 表 II-1-1 の「災害」「社会」カテゴリに含まれるリスク項目が含まれる因果関係を示すネットワーク図

図 II-1-3 は、表 II-1-1 の「水資源」カテゴリのリスク項目が含まれる因果関係の図である。降水量が減少する地域では、乾燥化によって河川流量や土壌水分が減少することにより、水資源が減少する。これにより水安全保障の悪化（農業用水・工業用水・家庭用水）が引き起こされる可能性がある。水安全保障の悪化は健康への影響（感染症・低栄養・下痢などの増加）を引き起こす可能性もあり、極端な場合には社会的な影響（居住地の移動や紛争の激化）さえも引き起こすかもしれない。また、河川流量の減少や河川水温の上昇は、発電施設における冷却効率に影響を与えるなどして、火力・水力・原子力発電の効率の低下をもたらす可能性もある。また、肥料の利用などによる河川や湖沼の水質の悪化は、エネルギー需要を増加させるとともに、水処理費用の増加をもたらすことで、水価格に影響を与える可能性がある。この一方で、降水量が増加する地域では、水資源の増加に伴い、作物生産量の増加や水力発電効率の向上などの好影響が生じる可能性もある。



図 II-1-3 表 II-1-1 の「水資源」カテゴリに含まれるリスク項目が含まれる因果関係を示すネットワーク図

図 II-1-4 は、表 II-1-1 の「エネルギー」「産業」カテゴリのリスク項目が含まれる因果関係の図である。図 II-1-3 で示した河川流量や水温の変化による発電効率の低下によって、エネルギー供給が不安定になる可能性がある。また豪雨・強風・洪水・土砂災害の増加によってインフラ被害が増加する可能性がある。また、気温の上昇や河川や湖沼の水質の変化はエネルギー需要を増加させうる。エネルギー供給の不安定化・インフラ被害の増加・エネルギー価格の上昇などは、エネルギー安全保障の悪化につながる。また、気候変動に伴う生物多様性の変化や雪氷の融解は、海辺やスキー場などのリゾート地での観光産業に影響を与える可能性がある。この一方で、気温の上昇は暖房需要を減少させ、雪氷の融解によって北極海航路が出現するなど、好影響になりうる要素もある。



図 II-1-4 表 II-1-1 の「エネルギー」「産業」カテゴリに含まれるリスク項目が含まれる因果関係を示すネットワーク図

図 II-1-5 は、表 II-1-1 の「食料」カテゴリのリスク項目が含まれる因果関係の図である。気温の上昇や降水量の減少に伴う乾燥化などによって、作物生産量が減少する可能性がある。また熱帯低気圧の強化などによって引き起こされる、強風の激化や豪雨の増加などは、農地に被害を与えることを通して、作物生産量に悪影響を与える。同様の原因は、作物の生産量だけでなく、品質を悪化させることにもつながる。作物生産量の減少は、食料供給の不安定化を通して、食料安全保障の悪化を引き起こす可能性がある。食料安全保障の悪化は、前述のように健康に影響を与え、極端な場合には社会に対しても大きな影響を与える可能性がある。一方で特に寒冷地など、場所によっては気温の上昇・温室効果ガス濃度の増加や降水量の増加によって、作物生産性の増加がみられる可能性もある。

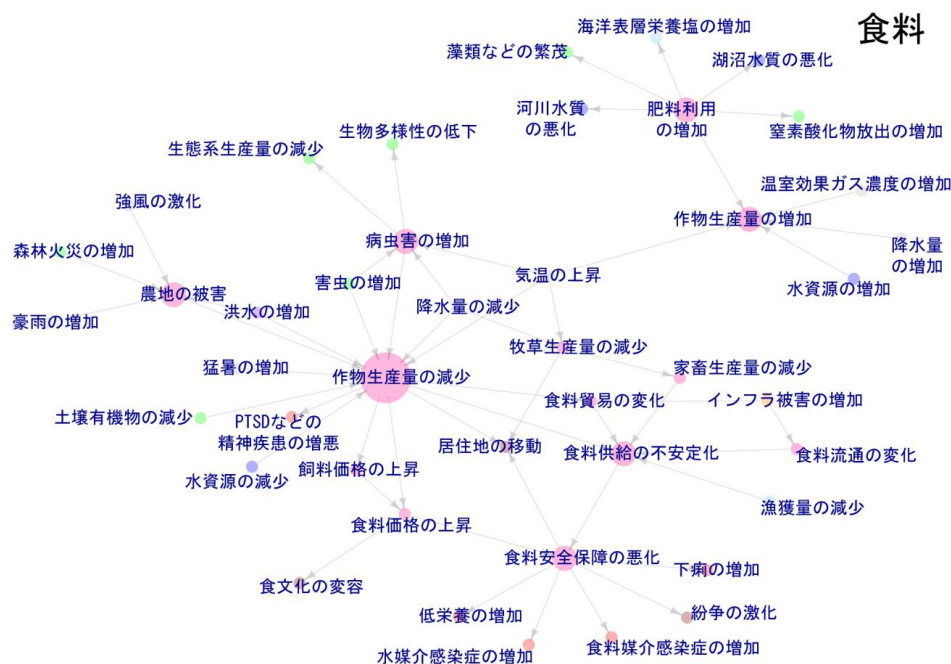


図 II-1-5 表 II-1-1 の「食料」カテゴリに含まれるリスク項目が含まれる因果関係を示すネットワーク図

図 II-1-6 は、表 II-1-1 の「生態系」カテゴリのうち陸域生態系に関わるリスク項目が含まれる因果関係の図である。生態系における因果関係は複雑なため、海洋に関わるリスク項目は図 II-1-7 に分離した。気温の上昇や降水量の減少による乾燥化によって、生物種間相互作用の変化・生物生息域や植生帯の変化・生物種の絶滅などが生じることにより、生物多様性が低下する可能性がある。強風の激化によって落葉や風倒の増加が起こる可能性も指摘されている。同様に気温の上昇と降水量の減少は、森林の枯死や衰退、そして森林火災の増加につながる。これらの減少は生態系生産量を減少させることになり、二酸化炭素を吸収する量が減る（排出する量が増える）ことになり、温室効果ガス濃度が増加することになる。また、肥料の利用は藻類の繁茂等を通して河川や湖沼の水質を悪化させる上に、窒素酸化物を放出することで、温室効果ガス濃度を増加させる。この一方で、温室効果ガス濃度の増加に伴う施肥効果によって二酸化炭素を吸収する効率が高まり、生態系生産量が増加するという好影響が生じる可能性もある。

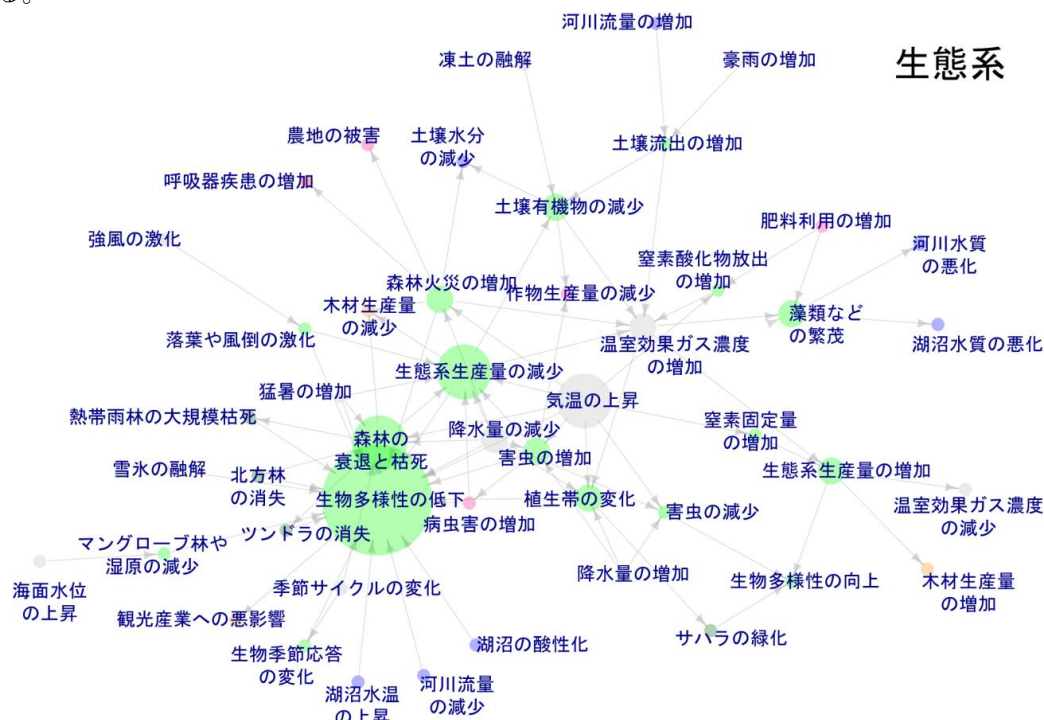


図 II-1-6 表 II-1-1 の「生態系」カテゴリに含まれるリスク項目のうち、陸域生態系に関わる項目が含まれる因果関係を示すネットワーク図

図 II-1-7 は、表 II-1-1 の「生態系」カテゴリのうち海洋生態系に関わるリスク項目が含まれる因果関係の図である。海水温の変化によって海洋生物生息域の変化し、また海洋の酸性化によって炭酸カルシウムが溶解することで、貝類に悪影響が生じる。海洋生物生息域の変化や貝類の炭酸カルシウムの溶解は、漁獲量の減少につながる。また、海水温の上昇や海洋循環の変化によって海洋表層栄養塩が減少し、海洋生態系生産量が減少する。これにより二酸化炭素の吸収量が減ることになり、生態系生産量が減少する。また、海水温の上昇によるサンゴの白化など、海洋生物多様性が低下する可能性もある。この一方で、肥料の利用によって海洋表層栄養塩が増加し、海洋生態系生産量が増加する可能性もある。

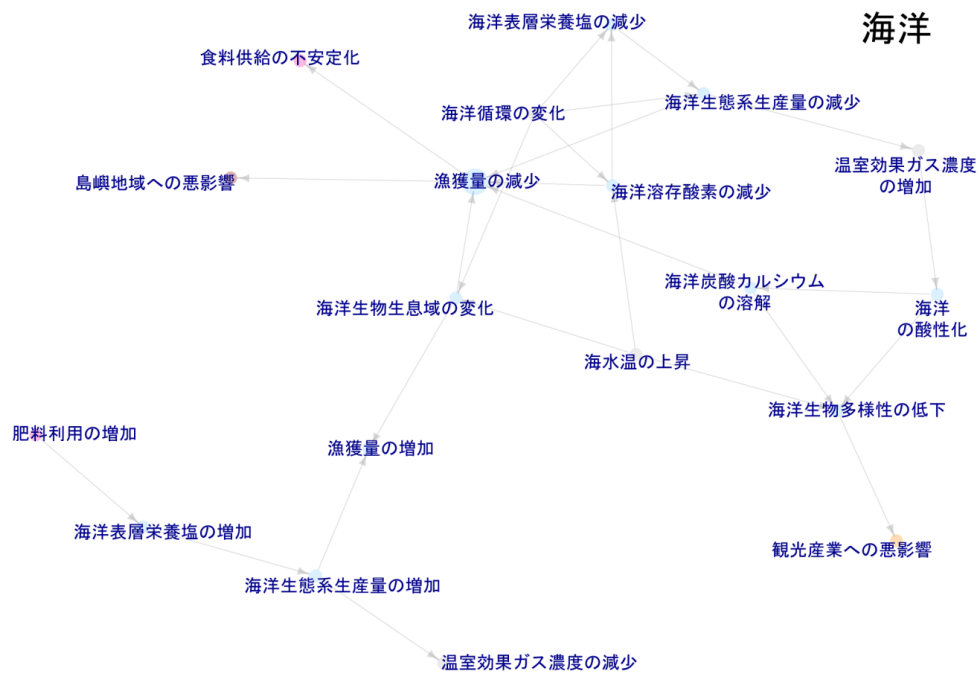


図 II-1-7 表 II-1-1 の「生態系」カテゴリに含まれるリスク項目のうち、海洋生態系に関わる項目が含まれる因果関係を示すネットワーク図

図 II-1-8 は、表 II-1-1 の「地球科学的臨界現象」カテゴリのリスク項目が含まれる因果関係の図である。ここでは、前述のように気候変動が進行してある「臨界点」を超えてしまった後の状態、結果として大惨事を引き起こす可能性があるよう気候変動の要素の因果関係を示している。図 II-1-1 から図 II-1-7 までの現象の時間スケール（2100 年頃まで）に比べて、図 II-1-8 で示した現象の時間スケールは長い（100 年～1,000 年）ことに注意していただきたい。気温の上昇による雪氷の融解が進むと、氷河の消失・西南極氷床の崩壊・北極海氷の消滅などに至る可能性がある。また、気温上昇や降水量の減少による乾燥化によって森林の衰退が進むと、ツンドラや北方林の消失、熱帯雨林の大規模枯死が生じる可能性がある。また、大気循環や海洋循環の変化によって、モンスーン（季節風）やエルニーニョの構造が変わり、また極端な場合には、海洋循環の変化は海洋深層循環の停止にまでつながる可能性もある。この一方で、モンスーンの構造が変わり、サハラ付近への水蒸気が大量に供給されることで、サハラの緑化という好影響が生じる可能性もある。

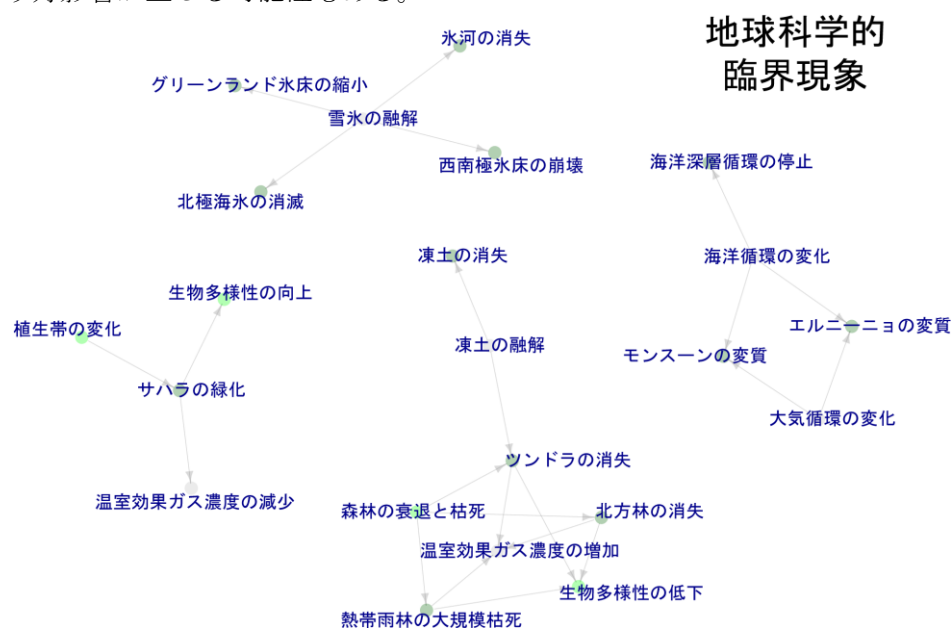


図 II-1-8 表 II-1-1 の「地球科学的臨界現象」カテゴリに含まれるリスク項目が含まれる因果関係を示すネットワーク図

Ⅱ-1-iii 今後の課題

リスクの因果関係を可視化したネットワーク図（図Ⅱ-1-1から図Ⅱ-1-8）によって、気候変動によって生じる様々なリスクを、複数の分野にまたがるリスクの連鎖も含めて、明快に示すことができた。これにより、気候変動リスクの全体像を把握することが可能である。

ここで得られた気候変動リスクの特徴を把握することで、気候変動リスク管理戦略の構築に生かすことが大きな目標である。我々は、リスク管理戦略の構築のために必要なリスクの特徴づけについて議論を行い、以下の要素が重要であると考えている。

影響の大きさ：気候変動への対策を施さなかった場合、経済・健康・生態系などに及ぼす影響はどの程度か。被害だけでなく利益も考慮する。

発生時期：発生が生じるおおよその時期を評価する。局所的に発生する時期、全球に広がる時期など、影響が顕在化する時期を評価する。

持続性：気候変動によって現れた影響がどれくらい持続するかを評価。不可逆的（生じた影響が元に戻ることが不可能）・持続的（影響が持続して長期にわたる）・短期的（影響の慣性が小さく、過去の影響をひきずることなく、もし気候変化が緩和したら影響がなくなるもの）の性質を評価。

一様性・公平性：影響の現れ方の一様性。多くの人に一様に公平に影響が及ぶものか、一部のの人たちだけが影響を受けるものか。

適応可能性：現実的に実現できなさそうな適応策によって適応できそうかを評価する。影響が現れた後に、適応可能かどうか。

生起可能性：気候変動によって生じる被害や利益が起こる可能性。

確信度：その現象が起こることにどれくらい確からしいか。証拠の量と見解の一致度による。文献が少なければ確信度は低い。文献が多くても見解の一致がなければ確信度は低い。

表Ⅱ-1-1では気候変動によって生じる様々なリスクの項目を抽出し、表Ⅱ-1-2のような形で、複雑なリスクの因果関係について明らかにした。今後は、表Ⅱ-1-1に挙げたリスク項目が、上記の要素に関して、どのような特徴を持つか、についてのデータを構築することが重要であると考えている。またこれまでの研究では、気候変動対策を講じなかった場合のリスクの評価を行ったが、気候変動対策を行った場合にも、様々なリスクが生じるはずである。将来的には、ここで作成したリスクインベントリと、前述したICA-RUSによって作成している「対策インベントリ」を融合することにより、気候変動リスク管理を行うために有用な情報の提示を行うことと考えている。

参考文献

Hoff, H. (2011), *Understanding the Nexus*, Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.

Larsson, T.B. (2001), *Biodiversity evaluation tools for European forests*, pp.178, Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, USA.

UN General Assembly (2010), Resolution adopted by the General Assembly. The human right to water and sanitation (A/RES/64/292), General Assembly, Sixty-fourth session, 108th plenary meeting, 28 July 2010, New York, NY, USA.

UKCCRA (2012), UK Climate Change Risk Assessment: Government Report, Department for Environment, Food & Rural Affairs, London, UK.

Ⅱ-2 洪水被害の予測（定量的なリスク評価の例）

執筆担当

テーマ 3

東京工業大学	大学院理工学研究科	鼎信次郎
東京工業大学	大学院理工学研究科	井芹慶彦
東京工業大学	大学院理工学研究科	宮崎千尋
東京工業大学	大学院理工学研究科	Lim Wee Ho

Ⅱ-2- i これまでの知見

洪水は気候に関連した、最も主要な災害のひとつである。2001-2011 年における洪水による損失は年平均 240 億ドルに達し、同期間の年平均死者数は数千人と言われている。洪水による経済的損失及び死傷者の数は、地球温暖化などの気候変化によって将来増加する可能性がある。

しかし、最近の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による、極端気候に関する IPCC 特別レポート(いわゆる IPCC SREX レポート)の中では、洪水の将来予測に関しては、「全体として、河川洪水の変化予測は信頼性が低い。証拠は限られており、地域的な変化が複雑なため、信頼性が低い。」と記されている。というのも、洪水のリスクの将来予測は社会的な関心の高い研究課題であるにも関わらず、地球温暖化時の洪水の変化とそのリスクを世界全体で解析した研究はごくわずかであった。それらの研究は、大気海洋大循環モデル(AOGCM)と河道モデルを用いてシミュレートした月単位や日単位の河川流量に基づいて、主要河川流域での大洪水の頻度の将来変化を予測していた。しかしこれらの単一の AOGCM による研究では、SREX に記されたように、証拠が限定的であり、複数の気候モデルを用いて温暖化の将来見通し結果の不確実性を評価した研究は、これまで存在しなかった。また、これらの研究では、河川流量そのものから計算される量(洪水流量の再現期間など)を洪水リスクの主たる指標としており、洪水に暴露される人口や経済被害を求めたものはなかった。しかし、社会にとっては洪水に暴露される人口は経済被害は重要な関心事であり、河川流量だけでなく暴露人口や経済被害額の形で洪水リスクが推計されることも重要課題であった。

当時は IPCC 第 4 次評価報告書のための第 3 期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)が行われており、そこで用いられた AOGCM による河川流量データには入手制限があったため、全球規模の洪水予測は容易に実行できなかった。特に、複数の AOGCM による日単位の流出量データについては、データポータルなどの入手が容易な状況にはなかった。しかし IPCC 第 5 次評価報告書の時点からはこれらのデータが入手可能な状況になり、その結果Ⅱ-2・ii に紹介するような研究を実施することが可能になった。

II-2-ii ICA-RUS により明らかにされた知見

この節では、将来の気候下における洪水暴露人口の推計を行った Hirabayashi *et al.* (2013)について、記者発表資料 (http://hydroinfo.t.u-tokyo.ac.jp/Press20130609/hirabayashi20130606_v3.pdf) を基に紹介する。

本研究では、11 個という複数の気候モデルから推定された将来気候それぞれに対して、洪水暴露人口の将来変化を推計しその変化の一致度を調べた。このように、複数の気候モデルからの出力を利用して解析することで、気候モデルに起因する将来の洪水変化の不確実性を考慮した。また、洪水リスク変化の計算には最先端の河川・氾濫モデルを用いた。その結果、ヨーロッパの広い地域で洪水リスクが減少する一方で、アフリカやアジアの多くの地域で洪水リスクが増加し、世界全体では洪水リスクが増加する見通しであった。この傾向は大多数の気候モデルで一致しており、温室効果ガスの排出目標を設定する際には、洪水リスクについても考慮する必要があると考えられる。

また、本研究では現在から将来（2100 年）までの洪水暴露人口の年々変動も推計した所、洪水リスクは大きな年々変動を示していた。この結果から、洪水の増加トレンドが顕著になる前でも大規模な洪水が発生する可能性が考えられ、洪水の増加トレンドが顕著になる前の段階から適切な適応策を推進する必要があることが示唆された。

以下、本研究についてその詳細を述べる。なお以降の大部分は上記記者発表資料からの抜粋である。

本研究では、洪水氾濫の予測に用いるための気候データとして、11 の異なる研究機関の気候モデルから推定された将来気候を用いた。そして、それら複数の将来気候それぞれに対して最先端の河川・氾濫モデルを用いて将来の河川氾濫を推定し、その結果を基に将来の洪水暴露人口を推計した。現在および将来の気候をシミュレーションするモデルは、モデルで直接再現が困難な物理プロセスの表現方法や解像度に違いがあり、その結果として将来気候も気候モデルによって差異がある。その為、本研究では上記のように複数の将来気候の下で将来の洪水暴露人口の推計を行っている。また、このように複数の気候モデルを用いることで気候モデルに起因する不確実性を考慮するのみならず、各気候モデルに対して 4 つの異なるレベルの排出シナリオ毎に行われた将来気候予測の結果も用いることで、排出シナリオに起因する将来気候の不確実性も考慮した。ここで 4 つの排出シナリオとは、RCP (Representative Concentration Pathway) というものであり、その排出シナリオに相当する放射強制力（工業化以前と比較した 2100 年頃の放射強制力）に応じてそれぞれ、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 と呼ばれる。RCP の数字が大きいほど、温室効果ガスの排出濃度が高い将来像に相当する。

洪水暴露人口を推計するに当たり、将来気候として用いたデータは IPCC 第 5 次評価報告書に準拠した、第 5 次結合モデル相互比較プロジェクトによる将来見通し計算の結果である。これを最先端の河川・氾濫モデルに入力して数値シミュレーションを行い、将来の洪水の変化と、洪水リスクの推計を行った。ここで、洪水は「現在気候において、100 年に 1 度の超過確率(注 1)を持つ河川流量（以降、「現在気候の 1/100 洪水」と呼ぶ）」と定義する。将来の洪水頻度の変化は、現在気候の 1/100 洪水が将来気候では何年に 1 度生じるか、という超過確率の変化として計算される。

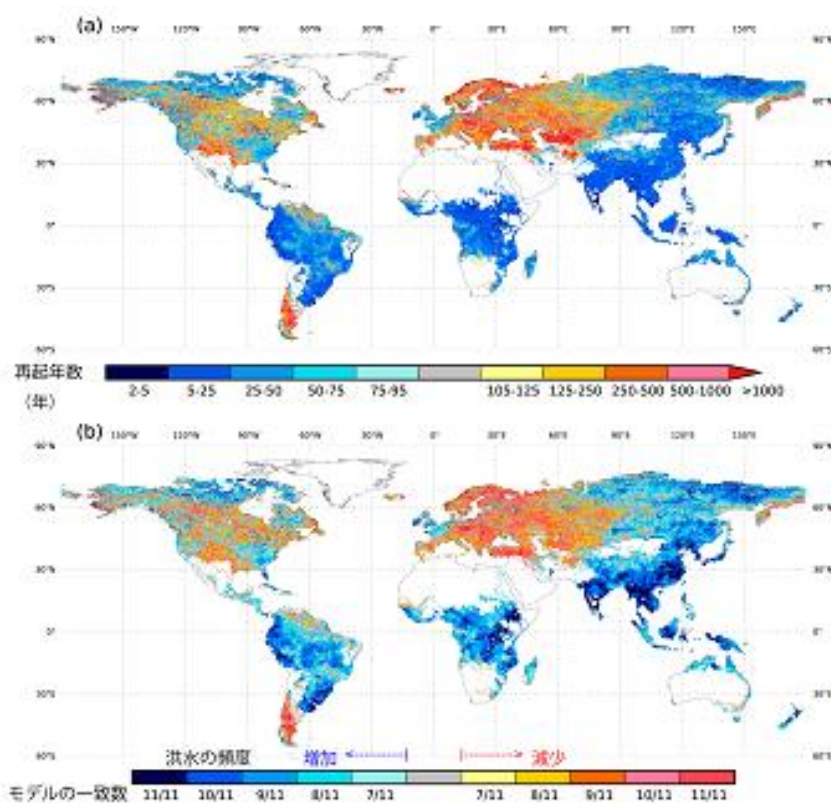
図 II-2-1 は、現在気候の 1/100 洪水が将来何年に 1 度生じるかを示している。なお前述のように将来気候の予測値は複数存在するため、ここでは 11 通りの将来気候を用いて計算した結果の中間値を示している。図 II-2-1 は RCP8.5、すなわち将来シナリオの中では最も温暖化が進行するシナリオの結果である。この図より、洪水の発生頻度は南アジア、日本と中国を含む東南アジア、北東ユーラシア、アフリカの東地域と低緯度地域、南アメリカの多くの地域で増加することがわかる。その逆に、ヨーロッパの北部と東部、アナトリア、中央アジア、北アメリカの中部、南アメリカの南部の多くの地域では、洪水の頻度は減少する。陸上の 26%にあたる乾燥地域と各研究機関の将来見通しのばらつきが大きい陸上の 14%を除くと、世界全体では陸上の 42%で洪水の頻度が増加し、18%で減少する。なお、将来の温暖化の程度が低い他の 3 つのシナリオにおいても、変化の大きさは異なるものの似たような傾向が見られた。

また、洪水の頻度が将来増加する地域の多くでは、各研究機関の気候モデル間の見通し結果が良く一致していた。洪水頻度が増加する陸上の 42%のうち、半分以上の 23%において、11 の研究機関の 9 以上が増加傾向を示していた。このように複数の研究機関による将来見通し結果を比較することにより、洪水変化の見通しの不確実性を同時に示すことに成功した。

次に、このような将来の洪水の変化が人間社会へ与える影響を、洪水リスクのポテンシャルが高い人の数を示す、洪水暴露人口というインデックスを用いて調べた。洪水暴露人口は、ある年に河川流量が

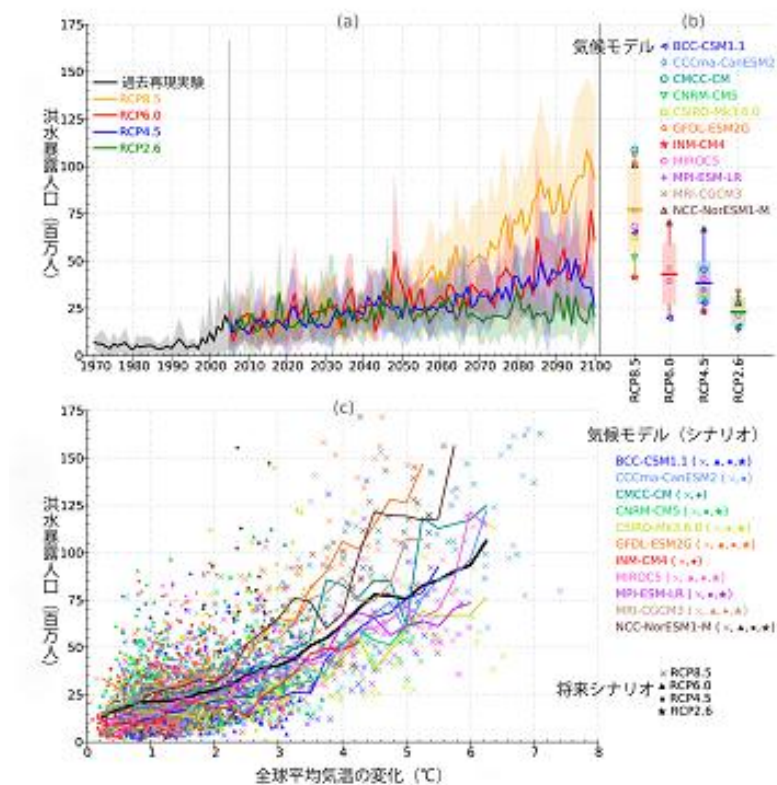
現在気候の 1/100 洪水の流量を超えた場合に、同じ場所のその年の最大の洪水の氾濫域に住む人の数を合計することで算出する。世界最先端の河川・氾濫モデルを用いることによって初めて、このような世界全体の洪水暴露人口の計算が可能となった。ただし温暖化によるリスクの変化に着目するため、人口は 2005 年の値に固定した。その結果、年あたりの平均の洪水暴露人口は現在気候では世界人口の約 0.1%であったのに対し、将来気候では 0.4~1.2%になることが判明した。世界全体の洪水暴露人口の増加は、人口の多い低緯度地域、特にアフリカとアジアにおける洪水頻度の増加が原因である。また、洪水リスクは毎年の変化が非常に大きいことから、洪水の被害を軽減するためには、洪水リスクの平均値のみならず最大値にも着目して、洪水の増加トレンドが顕著になる前に適切な対策を推進する必要があることが示唆された。

最後に、気温上昇量と洪水暴露人口の関係を散布図で示した。その結果、温暖化の程度に違いはあるものの、異なる研究機関による気候モデルの全てにおいて気温が上昇すると世界の洪水のリスクが増加する傾向が見出された(図 II-2-2)。現在気候における世界の洪水暴露人口は平均して 560 万人程度であるのに対し、陸上の気温が 2℃上昇すると平均で約 3 千万人、4℃上昇すると約 6 千万人になる。このような気温と洪水リスクとの関係から、温室効果ガスの削減目標を設定する際には洪水のリスクも考慮する必要があることが判明した。



※ a) 「現在気候の 1/100 洪水」の将来の再起年数 (年)。 b) 11 気候モデルの一致数。海上と乾燥地域(過去再現実験における 1979-2010 の平均年流量が 0.01mm/日未満)は白抜きされている。*図 II-2-1 は Hirabayashi *et al.* (2013)の図を一部改変したもの。

図 II-2-1 洪水頻度の変化



※ a) 洪水暴露人口の時系列変化。太線が将来シナリオごとの気候モデルの平均、網掛けは気候モデル間の標準偏差を示す。 b) 洪水暴露人口の 2071-2100 平均の箱ひげ根図。記号は各気候モデルの値、箱の高さは気候モデルの標準偏差、箱の中の横線は気候モデルの中央値を示す。 c) 洪水暴露人口と海を含まない陸上の平均気温の変化（1980-1999 平均からの偏差）。細線は各気候モデル・シナリオの 毎年の値（記号）を気候モデルごとに集計したもの、太線（黒）はその平均を示す。 * 図 II-2-2 は Hirabayashi *et al.* (2013) の図を一部改変したもの。

図 II-2-2 現在気候の 1/100 洪水以上の洪水に対する洪水暴露人口

Ⅱ-2-iii 今後 ICA-RUS が明らかにすること

Ⅱ-2-ii で紹介した研究では、洪水暴露人口を指標として洪水リスクを推定している。その一方で、例えば 2012 年における洪水による全世界の経済損失は 1,900 億ドルに上るといわれており、洪水による経済損失も甚大なものがある。従って今後は、暴露人口のみに着目するのではなく、洪水による将来の経済損失を明らかにすることも重要である。将来の経済損失を推定するには将来の社会経済シナリオが必要となるが、将来の社会経済がどうなるかを特定することは困難であり、そのため将来の社会経済については複数のシナリオを用いる必要がある。将来の社会経済シナリオとして SSP s(Shared Socioeconomic Pathways) というものが近年作成されており、SSPs では複数の異なる社会経済シナリオが提供されている。本研究ではそれら提供されている複数の SSPs を利用することで将来の社会経済シナリオの不確実性を考慮しつつ、洪水による将来の経済損失を推定する予定である。

また、Ⅱ-2-ii の研究で用いられた、「現在気候において、100 年に 1 度の超過確率(注 1)を持つ河川流量」を基準として洪水暴露人口を計算するという方法についても今後改良が望まれる。即ち、例えば日本の一級河川の多くは 100 年に 1 度程度の降水(や流量)を参照して河川計画が立案されていることから、日本の一級河川と同程度の河川整備が行われている地域においては、100 年に 1 度以上程度の流量を基準として洪水暴露人口を推定することには合理性があると言える。しかし、例えば発展途上国における、ほとんど河川整備がされていないような河川については、数年～数十年に 1 度程度の流量で河川が氾濫する恐れもありうる。従って今後は、100 年に 1 度以上の流量のみを基準として洪水リスクを推定するのではなく、各国の河川整備の実情を考慮して適宜適切な洪水流量の基準を模索しつつ、洪水リスクを推定することも肝要である。

更に、海面上昇や地盤沈下の影響を考慮して洪水リスクを推定することも重要である。海面上昇によりメガデルタでの洪水氾濫の危険性が高まる可能性は IPCC 第 4 次評価報告書でも指摘されているが、地下水の過剰揚水による地盤沈下を伴うことにより、メガデルタを含む沿岸部での洪水リスクは更に高まる。従って、将来の降水予測に加えて海面上昇や地盤沈下の影響も取り込みつつ沿岸域の洪水リスクを評価することは、今後の重要課題であるといえる。

補足・参考

注 1：洪水の超過確率とは、洪水の規模を示す場合に用いる指標の 1 つであり、平均して何年に 1 度の割合でその値（この場合は河川流量）を超過する洪水が発生するかという確率を示す。

参考文献

Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera, and X. Zhang (2012), Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, in *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, edited by C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley, pp. 109-230, Cambridge University Press, UK, and New York, NY, USA.

Hirabayashi, Y., R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim, and S. Kanae (2013), Global flood risk under climate change, *Nature Climate Change*, *3*, 816-821.

Ⅱ-3 ネガティブ・エミッション

執筆担当

テーマ 2

独立行政法人国立環境研究所

加藤悦史

独立行政法人国立環境研究所

伊藤昭彦

テーマ 4

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

黒沢厚志

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

都筑和泰

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

森山亮

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

石本祐樹

東京大学 政策ビジョン研究センター

杉山昌広

独立行政法人海洋研究開発機構

増田耕一

Ⅱ-3- i これまでの知見

(1) ネガティブ・エミッション概要

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関しての認識が深まっている。気候変動対策は、緩和策、適応策、および気候工学と大別される。気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第一作業部会の第5次評価報告書では、温室効果ガス累積排出量と世界平均気温上昇との関連性が指摘されているが

(IPCC, 2013)、これは、今世紀前半のCO₂排出量を急激に下げることができない中で厳しい温度上昇制約を実現するのであれば、今世紀後半において、気候を直接制御する規模でCO₂排出量をマイナスとする、いわゆる「ネガティブ・エミッション」を実現すること、または太陽放射の反射を増やす「太陽放射管理」が必要である可能性を示唆している。これらの技術オプションは、まとめて気候工学と呼ばれている。

そのうち前者のネガティブ・エミッションを実現するためには、直接的または間接的に大気中からCO₂を除去する必要がある。その実現のための技術は、二酸化炭素除去技術(CDR; carbon dioxide removal)あるいはネガティブ・エミッション技術と呼ばれ、自然界のCO₂吸収を増大させる方法と化学工学的技術を使って大気中からCO₂を除去する方法がある(IPCC, 2013)。下記にネガティブ・エミッション技術の代表的例を示す。

- ・ 鉄散布による海洋肥沃化：熱帯東部太平洋、南極海、北部北太平洋などの海域で重要な海洋微量栄養素である鉄を散布し、光合成によるプランクトンの発生増加を促進し、大気中からのCO₂吸収を増やす。
- ・ リン・窒素による海洋肥沃化：栄養素であるリン・窒素を散布することで、鉄散布の場合と同様に光合成を促進する。リンや窒素は鉄と異なり主要栄養素(macronutrient)であるため投入量は大きくなる。
- ・ 湧昇流・沈降流の促進：海洋の深いところからの栄養素の供給を増やすためにわき上がり(湧昇流)を促進させる。例えば一方向に水が流れるパイプを海洋に設置する。また北大西洋の沈降流を増加して、大気からのCO₂を吸収した海水が下層に沈むのを促進する手法も考えられる。
- ・ 風化反応の促進(土壌へのアルカリ物質の散布、海洋のアルカリ性化(石灰石・ケイ酸塩・水酸化カルシウムの散布)、地中でのケイ酸塩の炭酸化)：非常に長い地質学的時間スケールで地球が大気中のCO₂を吸収する化学風化という仕組みを加速することで、大気中のCO₂を除去する。
- ・ バイオ炭：木材などのバイオマスを乾留して得られる木炭(バイオ炭)を、燃焼させることなく土壌に混ぜたり地中に埋めたりして炭素を長期間貯留する。
- ・ バイオマス地中埋設：枯死した樹木あるいは選択的に収穫した木材などのバイオマスをそのまま地中に埋設保管し、分解を遅らせことにより炭素を長期間貯留する。
- ・ CO₂直接空気回収：アルカリ物質などを用いた化学工学的手法でCO₂を大気から吸収し、回収したCO₂を地中(帯水層)などに隔離する。
- ・ バイオエネルギー・二酸化炭素回収貯留(Bio-energy with Carbon Capture and Storage, BECCS または Bio-energy with Carbon Storage, BECS)：バイオマス発電やバイオ燃料製造プロセスに二酸化炭素回収貯留(CCS)を組み合わせる。バイオマスは大気中のCO₂を取り込んでできているため、燃焼時や発酵時に発生するCO₂をCCSで回収することで大気からCO₂を除去する。
- ・ 植林・土地利用改善：植物は成長している間CO₂を大気から吸収し、固定する。小規模の植林は緩和策に分類するが、非常に大規模な植林は副作用も否定できず気候工学と分類できる。

なお、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、二酸化炭素除去技術のいずれのオプションについても、その実施を積極的に行うべきであるという意見の一致には至っていない。IPCC 気候工学専門家会合の報告書をもても、評価の視点として、科学的側面からの環境リスク、社会的な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。

ここでは、上記二酸化炭素除去技術のうち、特にポテンシャルが大きいBECCS、植林およびCO₂直接空気回収を中心に、まず科学的な観点から、技術成立性、ポテンシャル、コスト、環境リスクを

明確化し、その上で、社会的問題を整理していく。そうすることで、実施の判断に資する材料を提供していくことを目標としている。

(2) 植林について

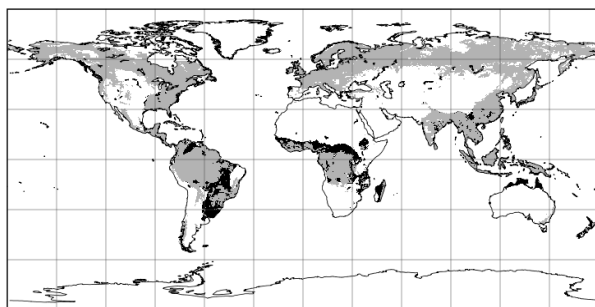
植林 (afforestation) は、人工林造成における最初の施業過程として広く実施されてきた。林業的な植林を行う目的は、良質な木材の収穫に加え、水源涵養や斜面安定化などの公益的機能の活用であった。近年の環境問題の深刻化を受けて、砂漠化防止 (いわゆる緑化)、生物多様性保全、そして温暖化緩和のために植林が各地で実施されている。ここでは、温暖化緩和とメカニズムとしての植林について科学的知見をまとめる。なお、森林を伐採した後の再植林は検討内容から外し、裸地や草地・耕作放棄地など森林以外の土地利用に対する植林について検討する。

1) 植林地の炭素吸収固定ポテンシャル

植林による炭素固定量は、植林前後の炭素ストックの差から求めることができる。例えば IPCC Good Practice Guidance ではアジア地域の湿潤な人工林について、地上部と地下部をあわせたバイオマスは広葉樹林で 143 t C/ha 、その他の種で 85 t C/ha とされている (拡大係数は 1.3 を使用)。草原のバイオマスは $3.2 \sim 8.1 \text{ t C/ha}$ とされているので、草原への植林による炭素固定ポテンシャル (バイオマス分) は $77 \sim 140 \text{ t C/ha}$ と概算される。仮に樹木が成熟状態になるのに 50 年かかるとすれば、平均して年間 $1.5 \sim 2.8 \text{ t C/ha}$ の正味吸収となる。実際には、土壌炭素としての炭素固定も生じると考えられるが、その評価には大きな不確実性を伴う。Post and Kwon (2000) のメタ分析によると、植林後の土壌への正味炭素固定量は、平均して年間 0.338 t C/ha とされる。上記のバイオマス分と合わせると、年間 $1.8 \sim 3.1 \text{ t C/ha}$ 程度が植林地の炭素吸収ポテンシャルという概算値になるが、これはフラックス観測による世界各地での CO_2 固定速度と比較しても妥当な範囲である。しかし、京都議定書における森林吸収源など実務的に評価が必要な場合、森林や植林・施業の定義によって炭素固定量 (そしてそれに伴い発生するクレジット) の評価に不確実性が伴う点には注意が必要である (Yamagata and Alexandrov 2001)。また、バイオマスと土壌有機物ともに、炭素固定の速度は一定では無い。一般に、植林直後は残存有機物の分解が卓越して炭素の放出が起こり、植栽された樹木の成長回復に伴って吸収源へと転換されていく。その吸収速度は壮齢林の頃にピークとなり、老齢林へと移行するに従って漸減して最終的には炭素収支が均衡状態に至ると考えられている。ただし、最近になって、老齢林・老齢木でも相当量の正味 CO_2 吸収をしている可能性を示す研究成果 (例えば Luyssaert *et al.* 2008) も出されている。

2) 潜在的に植林可能な面積

現在の森林面積は、FAO の調査レポートなどによると 2007 年時点で約 4,050 万平方キロとされている。人為が加わる前の自然状態 (潜在植生) での森林面積 (図 II-3-1 の灰色部) については 5,527 万平方キロという推定 (Ramankutty and Foley 1999) があり、森林を拡大可能な面積に対する 1 つの答えはその差分 (1,477 万平方キロ) ということになる。ただし、その土地は相当部分が都市・住宅・耕作地などに利用されており、現実には植林が可能とは限らない。上記の研究で示された耕作放棄地の推定面積は 235 万平方キロ (1992 年時点) であり、その方が植林可能な面積に近いと考えられる。その一方、乾燥や寒冷などストレス耐性の高い樹種の開発や灌漑・施肥により、潜在的には森林が成立し得ない土地にも植林地を拡大できる可能性がある。試算として、技術的に克服可能な生育環境の範囲を年平均気温 0°C かつ年降水量 $1,000\text{mm}$ とすると、非森林地への植林可能な面積 (図 II-3-1 の黒色部) は 1,007 万平方キロとなる。

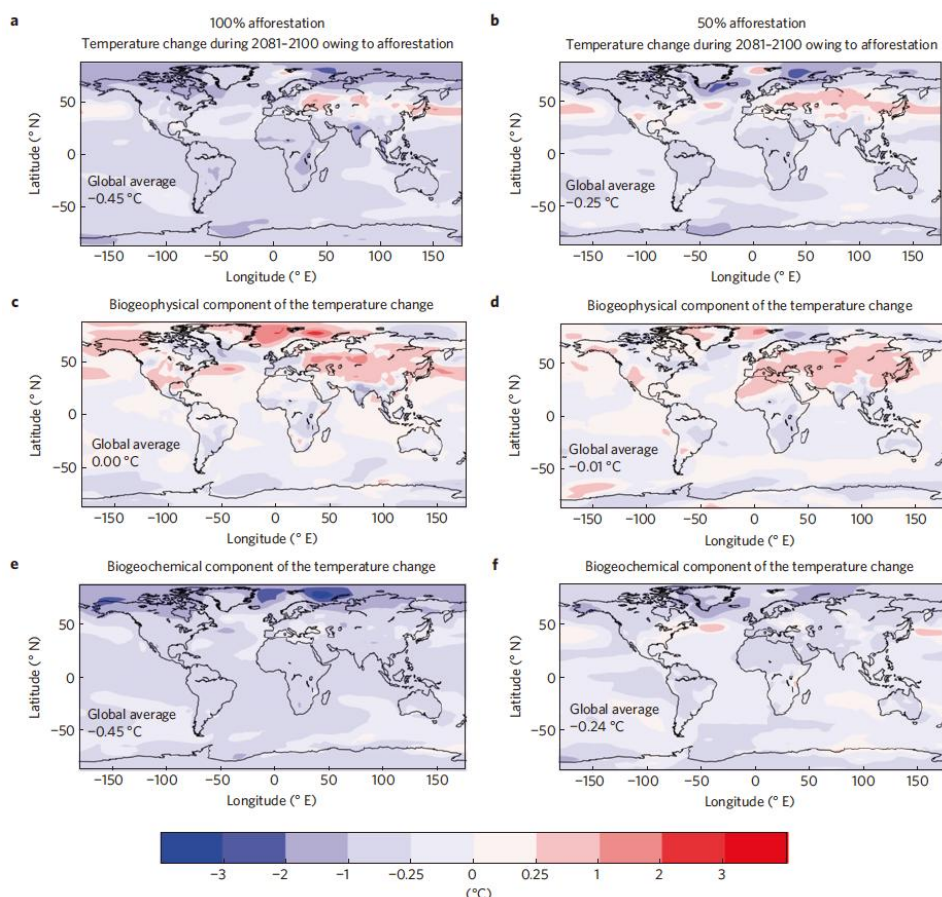


※Ramankutty and Foley (1999)および CRU 気象データを使用。詳細は本文参照。

図 II-3-1 潜在植生での森林分布 (灰色) と、植林により拡大可能な土地分布 (黒色)

3) 植林による温暖化緩和効果

植林地は二酸化炭素を吸収固定するだけでなく、その他の微量ガス放出やエネルギー収支を介して気候システムに影響をもたらす。それら生物地球化学的 (biogeochemical) フィードバックと生物物理学的 (biogeophysical) フィードバックの正味の効果について、両プロセスを組み込んだ陸域モデルおよびそれを気候モデルと結合した統合モデルで研究が行われるようになっている (Bathiany *et al.* 2010 など)。一般に、裸地を植林地に転換すると、日射に対する反射率が低下するためにより多くのエネルギーを吸収して地表温度を高める方向に作用するが、その一方で植生からの蒸散により潜熱輸送が増加して温度を低下させる作用も同時にはたらく。これまでのモデル研究によると、低緯度では植林による CO₂ 吸収効果の寄与が上回るが、高緯度では反射率の高い雪面を植生で覆うことで多くの日射エネルギーが吸収されるようになり、CO₂ 吸収による緩和効果よりも加温効果の方が量的に勝る場合もあるとされている。Arora and Montenegro (2011)は、カナダで開発された地球システムモデル CanESM2 を用いて、耕作地の植林転換による正味効果を推定している。そこでは、現存する耕作地（ここでは 2,020 万平方キロ）を 2060 年までに 50%または 100%の割合で植林地に転換する設定で実験を行っており、その結果として累計で 120 Pg C または 240 Pg C の CO₂ が植林地に吸収固定されていた。しかし、前記のような日射吸収効果により、全球平均気温を低下させる効果はそれぞれの場合で -0.25℃または -0.45℃に留まっており、温暖化に対する根本的な緩和策としては不十分であることが示唆された (図 II-3-2 は温度変化の分布)。このようなドラスティックな植林ですら緩和効果は限定的であるという知見は、ネガティブ・エミッションを含む今後の温暖化対策・陸域の最適利用を検討する上で非常に重要と考えられる。



※土地利用変化を考慮しないコントロール実験との差で示されている。左：100%植林、右：50%植林。下：生物地球化学的效果、中：生物物理学的効果、上：合計の正味効果。
図 II-3-2 CanESM2 による耕作地の植林転換に伴う将来 (2081-2100 年) の正味の温度変化

4) 植林に伴うリスク

緩和策として大規模な植林が実施される可能性を検討するには、その潜在的なリスクを把握しておく必要がある。統合評価モデルを用いた検討として、例えば Calvin *et al.* (2014)は GCAM によるシナリオ研究を実施している。そのうち森林の炭素に化石燃料と同程度の炭素税を課するシナリオでは、森林減少が抑えられるだけで無く、森林面積が 500 万 km² 以上も増加するという推定が得られてい

る。これは極端な例としても、このような大規模な植林活動は緩和効果以外にも様々な影響をもたらす可能性がある。

多くの植林地は単一樹種で構成されており、天然林と比較して生物多様性は顕著に低下している。日本国内でも、戦後の拡大造林期に広大な人工林造成が行われたが、それは林床植生や動物相の多様性低下につながったと考えられる。また、植林地周辺の動物（例えばシカ・クマなど）が採餌などを行う生息域が狭められ、人家や耕地に出没して被害を与える「負の生態系サービス」が生じていることも指摘されている。さらに、森林（木材）の価格低下とともに管理放棄された森林が増え、景観悪化や病虫害発生などの被害を及ぼしている例もあるが、これは植林に伴う将来的なリスク要因としても検討を要する課題であろう。大規模で急激な植林活動は、もとの植生が草原や低木であったとしても、固有の動植物相の生息地を狭めることで生物多様性を低下させる危険性がある。それは、炭素吸収固定以外の、花粉媒介・水源涵養・産物供給といった生態系機能・サービスの劣化につながり、特にそれに依存する地域住民の生活に悪影響を及ぼす恐れがある。また、単一樹種で構成された植生は、気候変動や攪乱への耐性と適応性が低く、環境変動に対する生態系の脆弱性を高める恐れがある。さらに、プランテーションなどに用いられる一部の樹種（ポプラ、ヤナギ、ユーカリなど）は、イソプレンなど生物起源の揮発性有機物質を多量に放出することが指摘されているが、それは対流圏オゾンの生成を促し、大気汚染を悪化させることで健康被害や農作物の収量低下を招く可能性がある

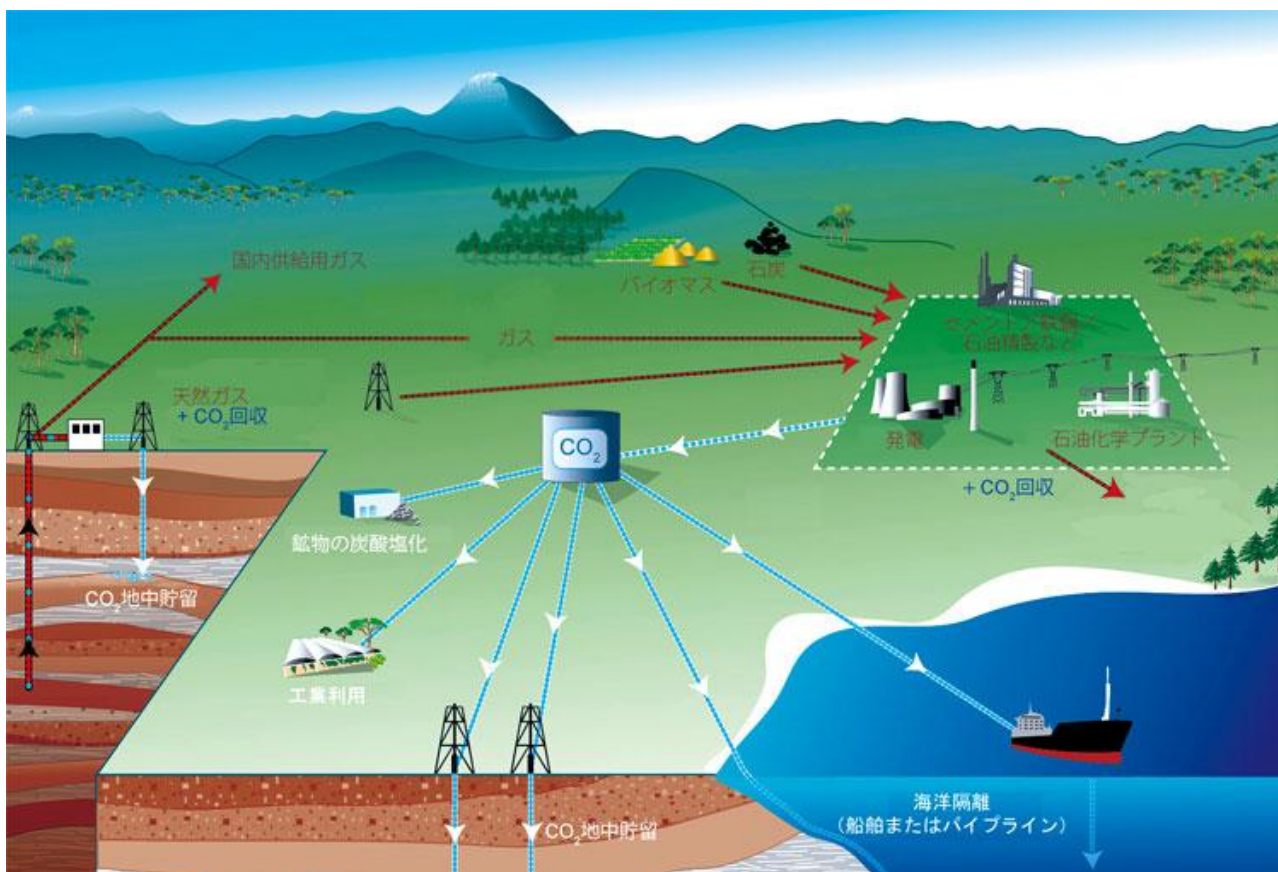
(Ashworth *et al.* 2013)。植林地がもたらす正負の生態系サービスを総合的に評価し、他セクターとのコベネフィットやトレードオフを精査することが必要であろう。

(3) BECCS について

バイオマス CCS (BECCS) はバイオマスを燃焼することによるエネルギー生成と炭素回収貯留(CCS)の2つの緩和オプションを組み合わせた技術である。バイオマスのエネルギー利用プロセスを CCS と組み合わせることによって、大気中の CO₂を植物によって回収し、エネルギー転換において発生する CO₂を地層に恒久的に貯蔵することによってネガティブ・エミッションを生み出すことになる。バイオマスによるエネルギー利用において、バイオマス単体を燃料として利用することに加え、石炭と混合し燃焼させることもある。このプロセスにおいてネガティブ・エミッションは副次的なものであり、エネルギー生成が主要な生産物と考えることができる。このような性質のため、BECCS はネガティブ・エミッション技術の選択肢の中で、近い将来の利用において、コスト・技術的な面で最も潜在能力がある技術である。このような観点からネガティブ・エミッションの柱として多くの統合評価モデルの温暖化対策シナリオにおいて用いられている(Azar *et al.* 2013)。

CCS (Carbon capture and storage) はCO₂を分離・回収し、それを地中や海洋等に長期間にわたり安定的に貯留・隔離することにより、大気中へのCO₂放出を抑制し、地球温暖化を防止する技術である。CCSは、CO₂の分離・回収、輸送、圧入、及び貯留というプロセスから構成される。そのうち、CO₂の分離・回収は、CCSの技術開発の中核の1つにあげられる技術で、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、物理吸着法、及び深冷分離法がある。

もう1つの中核技術であるCO₂貯留には地中貯留と海洋隔離がある。地中貯留には、帯水層貯留、石油・ガス増進回収、枯渇油・ガス層田貯留、及び炭層固定がある。海洋隔離には希釈溶解法や深海底貯留法があるが、廃棄物その他の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（通称ロンドン条約）のため、海洋底地下を除き、海洋への直接隔離は実施されていない。



(出典) 産業総合技術研究所 web ページ

※原典：IPCC CO₂回収貯留に関する特別報告書（産総研和訳）

図 II-3-3 CCS の仕組み

1) バイオマス供給源

BECCS 実施に用いるバイオマスとしてさまざまなものが利用可能である。主なものをあげると食用作物による第 1 世代バイオエネルギー作物（サトウキビ、トウモロコシ、ナタネなど）、非食用である第 2 世代エネルギー作物（Miscanthus, Switchgrass などの多年生草本、ナンヨウアブラギリ、短期伐採のヤナギやポプラなど）、廃棄物（廃食用油、食品廃材、下水汚泥）、農作物の残渣（稲わらやトウモロコシの茎など）、木材および林業での残渣、そして研究開発中ではあるがバイオ燃料向け藻類などがある。バイオマスエネルギーの供給量は 2008 年で 50.3EJ yr⁻¹ と全一次エネルギー供給量の約 10.2%となっている。将来的にはその値は増加すると考えられており、2050 年で 100 から 300EJ yr⁻¹ と専門家によって推測されている（Chum *et al.* 2011）。しかしその値はバイオマスエネルギーの利用方法に関する仮定に大きく依存するため、さらに大きな不確実性が存在する。持続可能性を考慮すると 50-150EJ yr⁻¹ と典型的に推定され、生物多様性の損失を起こさないために自然林などの利用を厳しく制限する場合には 100EJ yr⁻¹ 以下になると考えられている（van Vuuren *et al.* 2010）。また、BECCS に利用できるバイオマス量は、食糧需給との関係、またエネルギー効率やコスト的に BECCS に見合わない場合など様々な要因によって影響を受ける。政策決定の議論に向け、空間的に詳細な実データに基づいたボトムアップ手法によるバイオマス供給量の推計が必要であると指摘されている（Slade *et al.* 2014）。

2) エネルギーへの変換と CO₂ 回収

バイオマスのエネルギーへの変換方法は使用する原料の性状およびエネルギーの利用形態に応じて様々なものがある。各方法は直接燃焼やガス化といった熱化学的変換と、発酵による生物化学的変換に大別でき、熱化学的変換では目的生産エネルギーとして電気、熱もしくは水素やメタンなどの可燃性ガスが製造され、生物化学的変換ではエタノールやメタンなどの燃料が製造される（図 II-3-4）。

熱化学的変換と生物学的変換では、CO₂の回収工程や回収率が大きく異なる。熱化学的変換の中でも直接燃焼による発電の場合は、バイオマス専焼発電やバイオマス・石炭混焼発電の燃焼時に発生した排ガス中に含まれるCO₂を分離・回収する。生成物が熱や電気であり需要端でのCO₂発生はない

め、排ガス中のCO₂を高効率で回収できれば、全体として高いC回収率可以实现できる。一方、生物化学的変換である発酵によるバイオエタノール製造の場合、サトウキビなどのバイオマスに含まれる糖質成分が微生物によってエタノールに変換される際に発生するCを回収する。この場合、液体であるエタノールと気体のCO₂が主として生成するため、排ガス中のC濃度は高く、脱水工程以外の特別なCO₂の分離・回収工程を必要としないことが特徴的である。ただし、エタノールを燃料として使用する際にCO₂を排出してしまうことから、回収率は中程度にとどまる。以上をまとめて、特徴を表 II-3-1に示す。

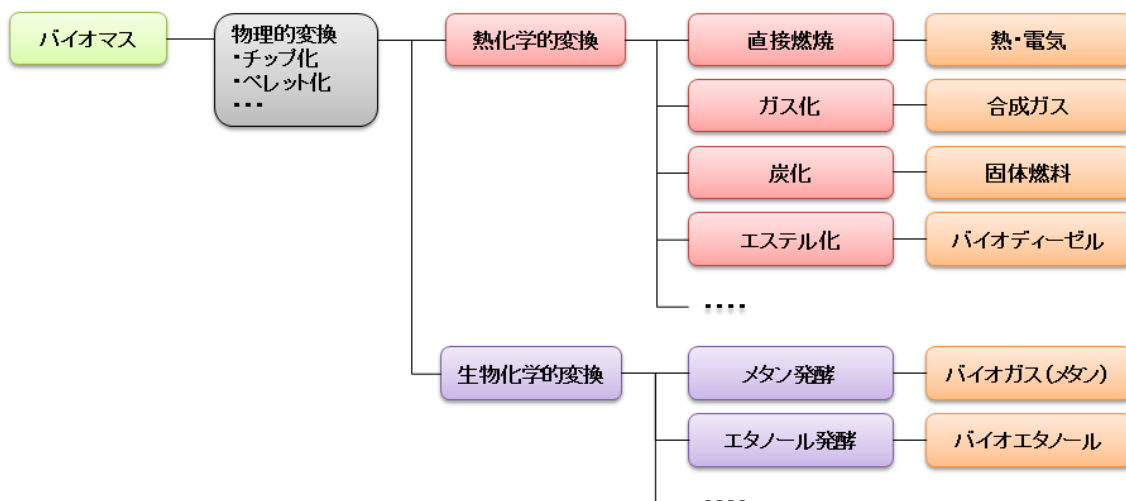


図 II-3-4 主要なバイオマスのエネルギー変換方法

表 II-3-1 バイオマスのエネルギー変換方法と潜在的 CO₂ 回収率

分類	変換方法	目的生産エネルギー	潜在的CO ₂ 回収率
熱化学的変換	直接燃焼	電気	高
		熱	高
	ガス化	液体燃料、バイオSNG、水素	中～高
生物化学的変換	メタン発酵	バイオガス、水素	中～高
	エタノール発酵	バイオエタノール	中

3) BECCS プロジェクトの現状（黒沢他，2013）

いくつかの国や地域において、すでに BECCS の試みがなされている。オーストラリア政府が資金を提供して設立した Global CCS Institute (GCCSI) は、Global Status of BECCS Projects 2010 で 2010 年時点での世界の BECCS プロジェクトの状況をまとめている。対象となったのは、欧米およびアフリカの計 15 件のプロジェクトである。化石燃料 CCS プロジェクトとして継続したドイツの Ketzin プロジェクトを除けば、プロジェクトの 14 件の状況は、完了 1 件、運転 4 件、評価 3 件、構想 3 件、中止 3 件である。化石燃料を対象とした CCS プロジェクトにもみられるが、地域合意、補助金獲得失敗などでプロジェクトが中止となったケースがある。

適用分野は、エタノール 10 件、パルプ工場 2 件、バイオガス 1 件、汎用的ガス化パイロット 1 件であり、対象貯留層は、石油増進回収(Enhanced Oil Recovery, EOR) 3 件、温室 1 件、塩水層 10 件となっている。アメリカでは、バイオエタノール生産と EOR の組み合わせによる 3 つのプロジェクトがある。原油価格が高騰している条件下では、石油製品と競合できるバイオエタノール生産、追加的原油生産につながる EOR の両者が経済的に成立するため、導入が進んでいるものと考えられる。年間 CO₂ 貯留量規模は年間数百トンの小規模のものから、数十万トンの中規模のものまで様々である。

バイオエタノールが先行している感もあるが、バイオマスのエネルギー用途は、液体燃料以外にも、

発電、水素を含む気体燃料など多岐にわたる。これらの技術は長期的にみて多様なエネルギー利用に導入されていく可能性があり、温室効果ガス排出制約がより強く求められるようになった場合は、CCS との組み合わせは、気候変動対策の有力なオプションとなりうる。GCCSI レポートでは、パルプ、エタノール、発電などが大規模プロジェクトとしての可能性があるとしている。

(4) CO₂ 直接空気回収の現状

大気からの CO₂ 回収そのものは、それほど新しい技術ではない。歴史的には空気分離機の熱交換器が CO₂ によって閉塞するのを防止するために実用化され、小規模なものでは、宇宙船や潜水艦といった閉鎖空間における C を回収するために用いられた。ただし、これらは、設備が小規模かつ生産や生存に必要不可欠なためコストはさほど重視されていなかったこと、また回収した CO₂ は系外に放出が可能であるという点が、気候工学としての CO₂ 直接空気回収とは異なる。

CO₂ 直接回収の技術としては、吸着剤を樹木のように広げて受動的に回収する方法と、ファンを利用して能動的に回収する方法がある。C 回収工程は後述する NaOH と Ca(OH)₂ を用いる方法など既存の技術の延長上のものが一般的である。また、いくつかの検討事例はあるものの、概念設計や実験レベルの段階であり、本格的な実証事業には至っていない。また、実施コストについて統一的な見解も出されていない。

II-3-ii ICA-RUS より明らかにされた知見

(1) 2°C目標達成に必要な BECCS potential 評価

IPCC 第5次報告書の WGI では、4つの濃度経路シナリオを用い、気候モデルによる将来温暖化予測実験がなされた (IPCC 2013)。このシナリオのうち、産業化以降の全球平均気温上昇を 2°C に抑えることを目指した最も排出削減を行うシナリオが RCP2.6 である。RCP2.6 では、2°C 目標の達成のため大規模な BECCS がシナリオ内で用いられている。BECCS に用いられるバイオエネルギーは今世紀半ばで約 80EJ、2100 年では約 140EJ (それぞれ 1 次エネルギー供給量) と、2010 年において世界で利用されているバイオエネルギー(約 50EJ、主に開発途上国での熱利用)に比べ多くのバイオエネルギーが BECCS に利用され、そのエネルギー利用による CO₂ 排出のほぼ全てが回収貯留される必要がある。RCP2.6 はこのネガティブ・エミッション技術を用い、21 世紀末には人為的化石燃料利用による CO₂ 排出は正味でマイナス、つまり CO₂ を大気から吸収するシナリオである。

このような大規模 BECCS を達成するためには、現状の土地利用を変化させ、バイオエネルギー作物を広域に栽培する必要がある。現在地球上に農地は約 15 億ヘクタール存在するが、RCP2.6 シナリオの農地は 2100 年には約 21 億ヘクタールまで達し、その増加する農地の 83% がバイオエネルギー作物に利用されるシナリオとなっている。2°C 目標を達成するための社会経済シナリオの多くでは、RCP2.6 と同様な BECCS 利用が仮定されているが、実際の生態系の制約でどれだけ現実的に BECCS が達成可能といった検討はあまりなされていないのが現状である。ICA-RUS テーマ 2 では、RCP2.6 で仮定されているバイオエネルギー作物の土地利用の制約下で、現実的に実現可能な BECCS 量をプロセススペースの作物モデルを用い、気候変動、二酸化炭素濃度の変化、肥料投入量等を考慮し、ボトムアップ的に推定をおこなった。

推定において、現状用いられている第 1 世代バイオエネルギー作物 (サトウキビ、ビート、トウモロコシ、ナタネ) によるバイオエタノールおよびバイオディーゼル利用、将来利用が期待されている第 2 世代バイオエネルギー作物 (Switchgrass, Giant Miscanthus) 由来リグノセルロースを利用したガス化における BECCS の二種類の実施方法を考慮した。第 1 世代バイオエネルギー作物を利用した場合での BECCS 達成可能量は、肥料投入量に依存して不確実性が存在するものの、RCP2.6 で必要とされる量の 34%-43% と推定され、肥料投入量を 160 kgN ha⁻¹ yr⁻¹ まで増加させるといった高肥料シナリオにおいても、必要量の半分にも満たないことがわかった。また、第 2 世代バイオエネルギー作物を栽培し、ガス化による BioSNG 生産の過程で BECCS を行った場合、2100 年までに約 80Pg C 固定できることがわかったが、これも必要量の約半分の吸収量である。これに加え BioSNG 燃焼後の回収技術を仮定した CCS を行う場合では、必要量の 95% ほどを満たすことが可能であった。現状の技術において、空気燃焼後の CO₂ 回収技術においては排出ガスの CO₂ 濃度が低いためにコストとエネルギーが比較的多くかかる点があり、これらの技術革新あるいは、ガス化による水素エネルギーの利用など、CO₂ 回収率の高い技術の利用が重要となることがわかった。

(2) 土地利用影響評価

上で示したように、バイオエネルギー利用および回収技術の進歩が進まない場合、つまり第 2 世代バイオエネルギー作物の広域生産およびコスト的に見合うようなバイオ燃料利用における燃焼後回収技術の高度化が進まない場合には、2°C 目標に必要な大規模バイオエネルギー生産による BECCS を達成するためには、さらなるバイオ燃料作物栽培の土地を増やす必要がある。この場合、RCP2.6 で仮定されているバイオエネルギー作物生産面積の倍以上に増やす必要があり、食料生産の農地との競合がおこることが考えられる。また、RCP2.6 の土地利用変化において、農地拡大による森林伐採による 21 世紀中の炭素排出は、不確実性が大きいものの 80±34 Pg C ほどと量と推定され、食用作物の農地と競合させない場合には、さらなる森林伐採によって BECCS で達成した吸収量をオフセットしてしまうことが考えられる。

(3) CO₂ 直接空気回収のコスト評価

CO₂ 直接空気回収については、技術やコストについて、体系的な整理は不十分という状況であった。House *et al.* (2011) はレビューを行ったが、プロセスの詳細に踏み込んだ分析は行っていない。またコスト以外の技術側面、例えば資源投入量などは細かく分析されていない。

まず、文献を幅広く調査することにより、CDR のコスト評価の現状を整理した。その結果、図 II-3-5 に示すとおり、10¹ ~ 10³ ドル/t-CO₂ と、不確実性が非常に大きいことが明らかになった。

文献を評価手法で大別すると、特定のシステムや物質等を想定せずに原理的なアプローチでコスト試

算している文献と実在またはあるシステムを想定してコスト試算をしている文献がある。前者の例である Ranjan (2011)は、大気中の CO₂ と発電設備の CCS は回収対象の CO₂ の濃度が 300 倍程度異なることに着目し、濃度とコストのスケールリング則から直接回収コストを概算した。そのコストは発電設備の CCS の 100 倍程度となると推定し、直接大気回収は非現実的なコストであると指摘している。さらに、CO₂ 回収のために熱力学的に必要なエネルギー 20kJ/molCO₂ からエネルギーコストを概算する方法でも同等の値を得ている。

最も安価である Heidel (2011)の検討は積み上げ型の試算例であり、ベンチャー企業である Carbon Engineering 社が開発している大気からの CO₂ 回収設備を対象としてコスト評価をしている。設備の外観は巨大な換気扇のようである。積算に際しては、構造材、溶媒、ファンの速度などについて、試験装置による実験検討を含む具体的な検討を実施し、コスト削減を進めてきている。CO₂ 回収コストは、49～80 ドル/t・CO₂ と試算されており、内訳は、建設コストが 29～49 ドル/t・CO₂、人件費、水、ファンやポンプの動力に 20～31 ドル/t・CO₂ である。このコストは CO₂ の回収のみであり、CO₂ の圧縮、貯留のコストは含まれていない。Carbon Engineering 社は断面積が約 1m² の装置を開発、運転試験を実施しており、さらなるスケールアップやそれに伴う投資が課題であるとしている。

このように、CO₂ 直接空気回収のコストは現状では評価が大きく分かれており、今後 CO₂ 直接空気回収を気候変動対策のオプションの一つとして検討していく上では、それぞれの論文の計算の前提条件についてより詳細に比較し、コストに対する我々なりの見解を出していくことが必要である。

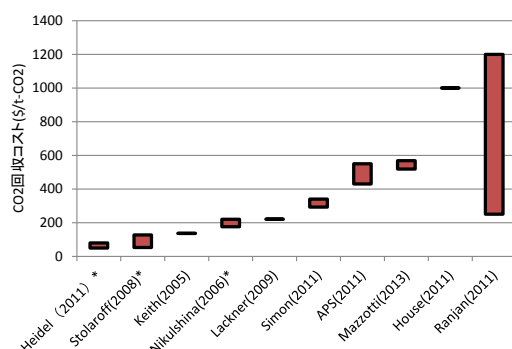


図 II-3-5 CO₂ 直接空気回収の実施コストの不確実性(*はシステムの一部の評価)

この状況を踏まえつつ、先行研究が比較的多い図 II-3-2 の NaOH と Ca(OH)₂ を用いた CO₂ 直接空気回収技術について、簡易モデルを作成し、実施コストの試算を行った。

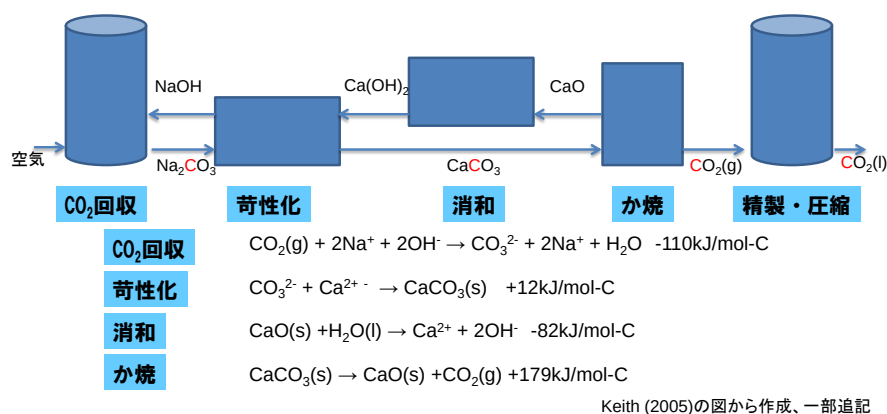


図 II-3-6 NaOH と Ca(OH)₂ のサイクルを用いた CO₂ 直接空気回収技術プロセスの例

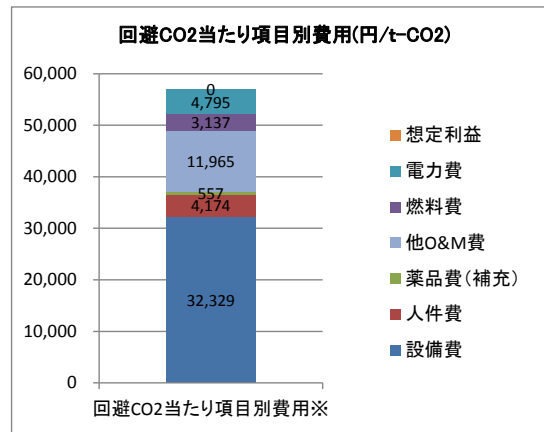


図 II-3-7 CO₂ 直接空気回収技術の実施コストの試算例

図 II-3-7 に 1Mt・CO₂/年の CO₂ 直接空気回収技術の実施コストの試算例を示す¹⁾。標準的と考えられる条件での回避できる 1 トン当たりの費用は、約 57,000 円/t・CO₂ であり、CCS 等、他の緩和技術に比較して 1 桁程度高いが、既存技術で実施できるため技術的な観点からは実現可能と考えられる。世界の CO₂ 排出量削減に寄与できる規模として、1Gt の CO₂ 回収に必要なコストは 41 兆円/年、燃料は 210Mtoe/年、電力は、511TWh/年程度であると試算された。このように CO₂ 直接空気回収技術を用いてグローバルな CO₂ 削減に寄与するには膨大なエネルギーが必要であることがわかる。また、プロセスにおける副反応やリサイクルの程度に依存するが、膨大な水やケミカルの供給を示唆する結果も得られた。

(4) 二酸化炭素除去に係わるリスク分析

リスク評価に際しては、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。

BECCS の導入に関しては、通常のバイオエネルギー導入時の注意点に加えて、CCS の実施に関する注意点に気を付ける必要がある。例えば、バイオエネルギー大規模利用に関しては、土地利用、食糧競合などの持続可能性に関するリスクに注意する必要がある。エネルギー変換時のユーティリティ使用や原料の収集活動によって化石燃料が消費され、CO₂ が発生する場合もあるため、カーボンニュートラルに対するライフサイクル的視点も重要となる。さらに、CCS の有望貯留地選定に対する地域住民の理解や長期にわたる CO₂ 貯留のリスクモニタリングなどにも留意して実施していく必要がある。

大気直接回収の場合には、土地利用、食糧競合などのリスクは小さいが、CO₂ 貯留にかかわるリスクは BECCS と同等である。海洋肥沃化については、海洋生態系への影響が大きなリスク要因となる。

また重要となるのは、これらの技術の多くは CCS インフラの開発に依存していることである。これらの技術が大気濃度に影響を与えるまでスケールアップさせるには短期間では難しい可能性があるため、一般的な緩和努力が依然として重要となる。表には含めていないが、またネガティブ・エミッション技術の保険的な役割から大規模 CDR を想定して 21 世紀前半で削減量を緩めることは、ある意味排出削減を先送りする。この結果将来世代が CDR の利用せざるをえない状況を作り出すことは、世代間倫理の問題および政策決定者が効果的な緩和プログラムや低炭素技術開発を促進しない口実を与えるといった、モラルハザードの問題ももたらす。

表 II-3-2 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、改変、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
	風化促進	バイオマス利用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)
		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

II-3-iii 今後 ICA-RUS が明らかにすること

(1) CDR の課題総括

前述のように、CDR には直接空気回収と、間接的除去（バイオエネルギーCCS、バイオ炭、植林、海洋肥沃化、化学風化など）がある。いずれのオプションであっても、大規模実施時には、土地利用、水や必要物質の確保などに伴う環境影響が考えられるため、その評価にあたっては注意が必要である。

BECCS についていえば、バイオエネルギー利用の原料が草本系か木質系にかかわらず、設備規模を大きくして経済性を確保するためには、広大な面積からの原料収集運搬が必要である他、CCS に関する制度的・経済的なインセンティブが課題である。

BECCS プロジェクトの例でもわかるように、CCS プロジェクトについては、炭素税や排出権取引のような CO₂ への規制が導入されない場合、回収した CO₂ に経済的価値をもたせるべく、EOR、温室利用、化学原料利用などのプロジェクトが試みられている。このようなプロジェクト群は、CCS の中でも、CO₂ 回収・利用・貯留（CO₂ Capture, Utilization and Storage, CCUS）と呼ばれており、先行実施される可能性が高い。

また、バイオエネルギーCCS の大規模導入には、化石燃料 CCS 実証や CCS を伴わないバイオエネルギー利用が前段階として必要である。これらの大規模導入も合わせて進めることが、バイオエネルギーCCS の積極導入に対しての前段階として有効である。

(2) BECCS の課題

大規模 BECCS の影響評価として、水・食料・エネルギー間の相互作用（NEXUS）の観点からのリスク評価が今後望まれる。特に、気候変動下での水資源変動によるバイオエネルギー生産に必要な水の制約、また肥料投入による生態系への影響などを統合的に把握する必要がある。また、農地の利用だけに限らず、森林での持続的な木材利用と林業における残渣の BECCS 利用ポテンシャルを空間詳細的に考慮することも重要となる。

(3) 大規模植林の課題

植林に関することでは、耕作地から植林地への大規模な転換が、炭素固定（CDR）だけでなく別の生態系サービスに及ぼす影響を明らかにすることが重要な課題である。最適利用の観点から、地域の水収支、気候調節、可能であれば生物多様性などの多様な評価軸を検討する必要がある。

過去の研究例から、大規模な植林が気候に与える影響は地域差があることが示唆されている。高緯度と低緯度での差だけでなく、湿潤地と半乾燥地域の差違、大陸別の植林影響の違いなど、より地域性を考慮した解析を行うべきであろう。

(4) 直接空気回収の課題

図 II-3-7 に示すように、CO₂ 直接空気回収技術の実施コストの半分は設備費に起因する。また、薬品や水の再利用率によっては薬品費が大きな割合を占める可能性を示唆する結果を得た。今後は、実施コストに大きな影響を与えると考えられる建設費や薬品・水の再利用率を精査し、さらに不確実性の幅を小さくすること、また、今回評価した NaOH と Ca(OH)₂ を利用する技術とは異なる技術のサーベイも進める必要がある。

これまで CO₂ 空気回収技術は、比較的实施地域を選ばないと考えられてきたが、実施に必要なエネルギーや薬品の供給の観点から、実施可能な地域等が制限される可能性が出てきた。したがって、これらを考慮した CO₂ 直接空気回収技術の実施可能性に制約を与える要因についての考察を行う。

今後は、上記の課題を明らかにすることでこれらの影響等を考慮した CO₂ 直接空気回収技術の定式化を行い、統合評価モデルにて評価するための技術情報を整備する。

(5) CCS の課題（社会受容、制度）

世界の CCS プロジェクトは、現段階では化石燃料を対象としたものがほとんどであるが、計画段階で中止となったものが数多くみられるなど、順調に進んでいるとは言い難い。二酸化炭素除去の実施にあたっては、CCS が順調に進まない原因を分析し、その改善策を考えていく必要がある。

政策的要因としては、経済性が確保できなかったもの、ステークホルダーの合意形成が困難であったもの、などがあると考えられる。また、政策的要因としては、欧州 CCS 指令は、CCS の環境リスクとそれに対する責任を管理する法的枠組みを確立するように加盟国に求めていたが、その法制化が困難となったドイツの事例などが知られている。また、経済性確保については、フィージビリティスタディの

結果プロジェクトコストが上昇した、回収 CO₂ の EOR への販売先やクレジット価格が不確定と判断された、合成ガス製造を含んだプロジェクト計画であったがシェールガス開発に起因する価格低下から中止となったなどの事例がある。また、ステークホルダー合意については、地域住民が CO₂ 地中貯留に反対したオランダやドイツの例がある。

これらのことを踏まえつつ、政策としての補助金、炭素税、排出権価格、制度や法規制（長期的責任など）の確立、コスト低減のための技術開発やプロジェクト管理、ステークホルダー合意のためのプロジェクトの初期段階からの CCS 技術や CCS の CO₂ 削減への貢献への理解促進のあり方等を検討する。

（6）リスク情報の整理

CDR を含む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。特に、導入規模そのものを慎重に決めねばそれ自体がリスクとなる、という点が一つの注意点となる。

参考資料

- Arora, V. K., and A. Montenegro (2011), Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts, *Nature Geoscience*, 4, 514–518.
- Ashworth, K., O. Wild, and C. N. Hewitt (2013), Impacts of biofuel cultivation on mortality and crop yields, *Nature Climate Change*, 3, 492–496.
- Azar, C., D.J.A. Johansson, and N. Mattsson (2013), Meeting global temperature targets-the role of bioenergy with carbon capture and storage, *Environ. Res. Letter.*, 8, 034004.
- Bathiany, S., M. Claussen, V. Brovkin, T. Raddatz, and V. Gayler (2010), Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI earth system model, *Biogeosciences*, 7, 1383-1399.
- Calvin, K., M. Wise, P. Kyle, P. Patel, L. Clarke, and J. Edmonds (2014), Trade-offs of different land and bioenergy policies on the path to achieving climate targets, *Clim. Change*, 122, 401-414.
- Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, and B. Gabrielle, A. Goss Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, and K. Pingoud (2011), Bioenergy, in *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, edited by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, and C. von Stechow, pp. 209-331, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Heidel, K., D. Keith, A. Singh, and G. Holmes (2011), Process design and costing of an air-contactor for air-capture, *Energy Procedia*, 4, 2861-2868.
- House, K. Z., A.C. Baclig, M. Ranjan, E.A. van Nierop, J. Wilcox, and H.J. Herzog (2011), Economic and energetic analysis of capturing CO₂ from ambient air, *PNAS*, 108, 20428–20433.
- ICA-RUS (2013), ICA-RUS REPORT 2013, NIES, Tsukuba, Ibaraki, Japan
- IPCC (2012), *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Geoengineering*, edited by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, C. Field, V. Barros, T.F. Stocker, Q. Dahe, J. Minx, K. Mach, G.-K. Plattner, S. Schlömer, G. Hansen, M. Mastrandrea, pp. 99, IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.
- IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, IPCC, Geneva
- Lenton, T.M., and N. E. Vaughan (2009), The radiative forcing potential of different climate geoengineering options, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5539-5561.
- Luyssaert, S., E.-D. Schulze, A. Börner, A. Knohl, D. Hessenmöller, B. E. Law, *et al.* (2008), Old-growth forests as global carbon sinks, *Nature*, 455, 213-215.
- Post, W. M., and K. C. Kwon (2000), Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential, *Global Change Biol.*, 6, 317-327.
- Ramankutty, N., and J. A. Foley (1999), Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992, *Global Biogeochem. Cycles*, 13, 997-1027

Ranjan, M., and H. Herzog (2011), Feasibility of air capture, *Energy Procedia*, 4, 2869-2876.

Royal Society (2009), *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*, Royal Society, London, UK.

Slade, R., A. Bauen, and R. Gross (2014), Global bioenergy resources, *Nature Climate Change*, 4, 99-105.

van Vuuren, D., E. Vellevrat, A. Kitous, and M. Isaac (2010), Bioenergy use and low stabilization scenarios, *Energy Journal*, 31, 193-221.

Yamagata, Y., and G. A. Alexandrov (2001), Would forestation alleviate the burden of emission reduction? An assessment of the future carbon sink from ARD activities, *Climate Policy*, 1, 27-40.

杉山昌広, 西岡純, 藤原正智 (2011), 気候工学 (ジオエンジニアリング), *天気*, 58, 577-598.

杉山昌広, 黒沢厚志, 増田耕一, 都筑和泰, 森山亮, 石本祐樹 (2012), 気候工学と気候政策: レビュー, 環境経済・政策学会 2012 年度大会, 東北大学, Miyagi, Japan

黒沢厚志, 森山亮, 村上嘉孝 (2013), バイオエネルギーCCS, *日本エネルギー学会誌*, 92, 211-215

石本祐樹, 黒沢厚志, 杉山昌広, 増田耕一, 都筑和泰, 森山亮 (2014), 気候工学のコスト分析 ～二酸化炭素直接空気回収, 第 32 回エネルギー・資源・経済コンファレンス, 2014 年 1 月 24 日, Tokyo, Japan.

産業総合技術研究所 Web ページ,

http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol08_01/vol08_01_p12_p13.pdf

Ⅱ-4 土地・水・生態系等の相互作用

執筆担当

テーマ2

独立行政法人国立環境研究所	横畠徳太
独立行政法人国立環境研究所	花崎直太
独立行政法人国立環境研究所	眞崎良光
独立行政法人農業環境技術研究所	飯泉仁之直
独立行政法人国立環境研究所	伊藤昭彦
独立行政法人国立環境研究所	仁科一哉
独立行政法人国立環境研究所	山形与志樹

Ⅱ-4- i これまでの知見

(1) 背景：需要の急増・都市化・グローバル化・気候変化

過去 50 年人類は急速に開発を進め、1 人あたりのカロリー生産量は 1 日あたり 2,280Kcal から 2,800Kcal に増加した (Hoff 2011)。人類はいたるところで自然資源を開発し、地表の陸地のおよそ 3 分の 1 を改変し、純一次生産のおよそ 4 分の 1 を、主として食料生産のために利用している (Sachs *et al.* 2010)。ただし、開発によって得られる恩恵は公平ではなく、世界人口の 7 分の 1、最下層の 10 億人は安定して食料が供給されず、清潔な水、公衆衛生、あるいは生活を便利にするエネルギーへのアクセスが制限されている (Hoff 2011)。

今後も、人口の増加、中産階級の拡大、人々の生活様式や食生活の変化、そして経済発展のために、自然資源に対する圧力は強まることが予想される。我々の生産や消費のスタイルを大きく変えない限り、2050 年までには 70% の穀物生産の増加が必要であり (Bruinsma 2009)、また 2035 年までには 50% の一次エネルギーの増加が必要である (Hoff 2011) との推定もある。このような需要の増加は、将来広範囲にわたって、土地・水・生態系などの自然資源に大きな影響を与えるだろう。

急速な需要の増加は、都市化とともに進行する。より多くの人々が、より快適な生活を求めて、都市に住居を求めるためだ。現在、世界人口の 50% が都市に住んでおり、毎週 80 万人もの人が新たに都市にすむようになり、2050 年には都市人口の割合は 70% に達するだろうという予測もある (UNPD 2011)。都市は人口密度が高く、1 人あたりのエネルギー消費量が大きいため、資源の需要と廃棄物生産は都市に集中している。例えば、温室効果ガス排出の 75% は都市からの排出である (Hoff 2011)。この一方で、現在で 10 億人、2030 年には 20 億人に達すると見込まれているスラム街の住人は、食料が行き渡らず、政府から供給される水やエネルギー供給から隔離されている (UN habitat 2003)。

そして、グローバル化によって世界は結びつきを強めている。貿易と海外直接投資は、技術革新や発展途上国での雇用を生み出し、資源が欠乏している地域への資源供給を効率的に行うことができる。しかしながら世界中が経済的につながることにより、多くの国々が、変動しやすい国際市場にさらされることになる (Hoff 2011)。さらに、グローバル化が自然資源に及ぼす影響も大きい。そもそも、貿易のための長距離輸送は非常にエネルギー集約的である。また、海外直接投資は、発展途上国における主要な駆動力であるが、例えばサハラ以南国の 2~20% の農地は、過去数年のうちに売却・貸与され、特に中国・インド・アラブ諸国における急速に拡大する食料・飼料・バイオ資源の需要を満たすために利用されている (Friis *et al.* 2010)。現在の急速な海外直接投資の波は、現地の人々の生活や、土地・水・食料へのアクセスに、大きな課題を与えている (Hoff 2011)。

さらに、気候変動が人間社会や生態系の脆弱性を悪化させる (「リスクインベントリの作成」を参照)。特に水や農業の関わる分野で脆弱性が大きく (IPCC 2007)、すでに水資源が欠乏している地域における乾燥化、氷河に蓄えられている水資源の減少、より深刻な極端現象の影響、穀物生産性の減少などによって、大きな影響を受けるだろう。食料とエネルギーの生産システムは、特に干ばつに対して脆弱性があり、近年のアフリカにおける食料危機、2003 年のフランスで原子力発電所の閉鎖、あるいは干ばつに伴う水力発電の減少などで明らかとなり得る (Hoff 2011)。近年のアマゾンにおける干ばつなどによって、様々な生態系サービスにも影響が及んだ。一方で、気候緩和のためには、例えば、森林保護や植林、バイオ燃料、炭素隔離、炭素回収と貯留 (Carbon Capture and Storage, CCS) のために、水資源と土地利用に対して新たな需要を生み出し、生物多様性にも影響を与える。さらに、気候変化に対する適応策のためには、灌漑の強化や追加的な淡水化など、新たなエネルギー需要が生じるだろう (Hoff 2011)。

(2) 土地・水・生態系の相互作用

このように、需要の急増・都市化・グローバル化・気候変化は、人間社会や生態系システム全体に、大きな影響を与える。このような圧力は、お互いに密接に関係し合うことで、社会的・環境的なショックや様々な危機に対するシステムの復元力 (resilience) を、弱体化させる。今後も現在までの傾向が続くならば、水資源の欠乏、食料やエネルギーの危機、また土地や生態系サービスの劣化などを通して、社会生態系システム全体を、ある閾値を超えるレベルまで押しやり、社会経済の発展、貧困の解消、生態系に大きな影響をもたらすことで、社会的な混乱や紛争、そして移民をもたらす可能性がある。この問題を克服するために提唱されたのが「融合的アプローチ (nexus approach)」である (Hoff 2011)。水・エネルギー・食料の安全保障に関わる様々なスケールの現象の間の結びつき (=nexus) を、分野

横断的に考慮し、資源を効率よく利用し、生産と消費によって得られる恩恵を最大化することを目指す（図 II-4-1）。「融合的アプローチ」では、水・エネルギー・食料安全保障を強化するために、様々な部門における「外部性」（ある部門の外部で起こり、様々な主体に影響を及ぼすこと）を考慮することが重要である。例えば、淡水化のエネルギー効率、再生可能エネルギーの水需要、炭素貯留のための植林における水需要などを考慮することで、トレードオフの解消や相乗効果（シナジー）を確立し、複数の部門にまたがる意思決定や合意形成を促進する（Hoff 2011）。

水・エネルギー・食料の安全保障に関わる結びつきについて、主要なプロセスを図 II-4-1 に示す。水供給のためにはエネルギーが必要であり（採水・輸送・分配・淡水化・水処理）、エネルギー供給のためには水が必要である（水力発電・排熱冷却・採鉱・穀物栽培）。また、食料供給のためにはエネルギーが必要であり（肥料・機械化・食品加工・輸送・分配）、バイオ燃料作物の生産などを通して、エネルギー供給と食料供給は競合する。さらに、食料供給のためには水が必要であり（灌漑・穀物栽培・家畜飼育・食品加工）、食料生産は水資源に影響を与える（水質の変化など）。そして、自然資源としての土地・水・生態系を利用することによって、これらのプロセスは結びついている（図 II-4-1）。

前述したように、世界的な需要の急増・都市化・グローバル化・気候変化がおよぼす圧力は、重要な自然資源である土地・水・生態系に大きな影響を与え、資源の劣化や欠乏をもたらす（Hoff 2011）。これにより人間にとって必要不可欠な、水・食料・エネルギーの安全保障が脅かされる可能性がある。そして、人間活動による土地・水・生態系の利用は、温室効果ガスの排出や炭素循環を変えることにより、気候変化をさらに促進する。電気などのエネルギーの生産は、人類の温室効果ガス排出全体に対して 27% の寄与があり、農業は 15%、土地利用変化と林業で 14% の寄与がある（UNDP 2011）。この一方で、バイオマス燃料の利用などの気候緩和策や、エネルギー集約的な気候適応策を行うことも、人間社会や生態系に様々な影響を与える（Hoff 2011）。

これらをふまえ、ICA-RUS では、気候・土地・水・生態系を記述する全球規模のモデルを開発し、将来の社会経済の変化が及ぼす影響、気候変化や気候対策によって生じるリスクの評価、様々なリスク管理策のトレードオフやシナジーの解析を目的とした研究を行っている。これまでの研究では、水資源、土地利用、生態系、農業など、それぞれの部門において生じる気候変化リスクの評価は行われてきたが、様々な部門の間の現象の結びつき、それによって生じるリスクや対策の評価は、まだまだ不十分である。このため私たちは、主として全球規模の数値モデルと様々なデータを駆使することにより、前述した地球環境に加わる様々な圧力と、土地・水・生態系の相互作用についての研究を行っている。

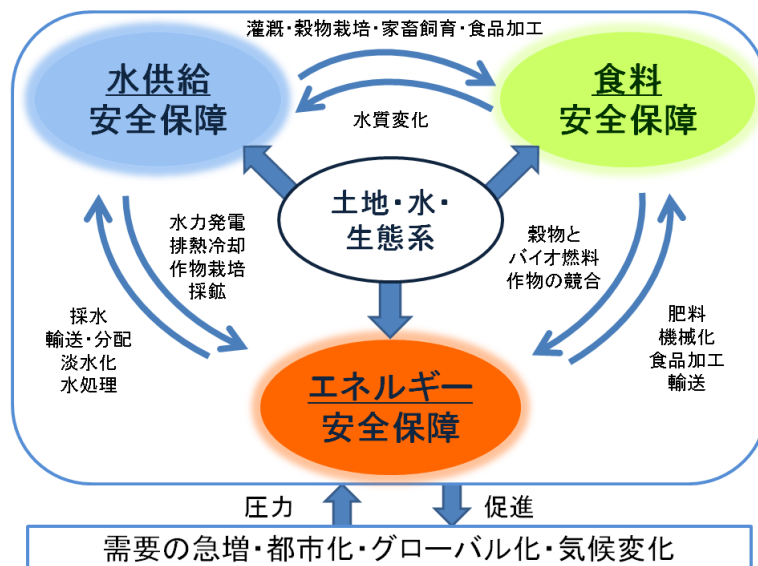


図 II-4-1 人間にとって必要不可欠な水・エネルギー・食料の安全保障の間の結びつき（nexus）。Hoff 2011 Figure 2 を改編。

II-4-ii ICA-RUS により明らかにされた知見

これまで ICA-RUS では、土地・水・生態系の相互作用に関する様々な研究を行ってきた。以下では、そのうち二つの研究成果を紹介する。一つは、社会経済や気候に関する将来予測にもとづき、我々は将来に十分な水資源が得られるかどうかを評価した研究（(1) 将来の世界逼迫の評価）である。もう一つは、将来の気候変化のリスクを評価するために必要不可欠な、過去の穀物収穫量に関する様々な分析（(2) 世界の主要生産地域における過去 25 年間の主要作物の収量データベースおよび (3) 季節予報による穀物収穫量の世界豊凶予測）についての研究である。

(1) 将来の世界水逼迫の評価

人間が使える水の量（水資源量）と使う水の量（水利用量）を比べ、水が足りなくなる地域や期間を調べることを水逼迫評価という。将来の水資源量は、温暖化によって将来の降水・蒸発・流出がどれくらい変わるか、という気候の将来想定（シナリオ）に強く影響を受ける。将来の水利用量は、将来の人口や経済活動、技術がどれくらい変わるか、という社会経済シナリオに大きく影響を受ける。私たちは、世界の研究者が共同作業して作った最新の気候シナリオと社会経済シナリオを使って、21 世紀の世界の水逼迫評価を行った（Hanasaki *et al.* 2013a, b）。

私たちが使った社会経済シナリオは SSP（Shared Socioeconomic Pathways）という。将来の世界がどうなるかはだれも予測できないが、SSP は起こり得る 5 つの世界の様相を、表 II-4-1 のように特徴づけたものである。この中から 2 つだけ紹介すると、SSP1 は持続可能な世界を示している。世界的に人口はそれほど増えず、経済は好調で、技術進歩は速い、という社会が描かれている。SSP3 は分裂した世界を示している。人口は増え続け、経済と技術進歩は停滞するという世界が描かれている。ここで、SSP には将来の人口や GDP（国内総生産）などの想定は具体的に数値で示されている。ところが、SSP には水の利用に関する想定がほとんど示されておらず、このままでは水逼迫評価に使うことができなかった。

そこで私たちは、まず、農業・工業・都市用水それぞれについて、さまざまな国の過去の変化をよく調べた。そして、水利用の将来の変化のパターンを 3 つ設定し、SSP が描く 5 つの世界の様相と合うように、組み合わせを考えた。こうして世界各国の水利用が将来どのように変化するかをはじき出した。最後に、各国の推定を地図上に分布させる作業を行い、2100 年まで 5 年おきに、50km 解像度の水利用の世界地図を完成させた。

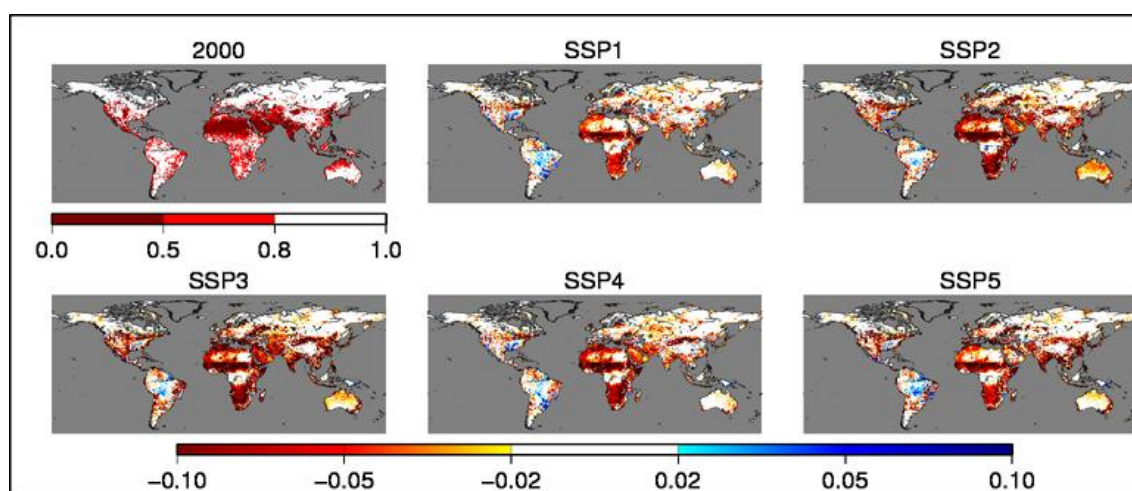
続いて、推定された水利用量が世界各地で持続的に川から取れるか調べた。これを調べるために、私たちがこれまでに開発した「全球水資源モデル H08」という名前のソフトウェア（Hanasaki *et al.* 2008a,b）を使った。このソフトウェアを使うと、ダムに川の水を貯める、川の水を汲むと川の流れが減る、といった人間の利用を含めて、1 日単位、50km 解像度で世界の水の流れをシミュレーションすることができる。最新の CMIP5 と呼ばれる気候シナリオと、将来の水利用の推定、そして全球水資源モデル H08 を使い、世界各地の「必要な時に必要な量の水が得られるか」についての指標を計算した。

図 II-4-2 は、SSP の 5 つの世界それぞれについて、2050 年頃は今より水逼迫が改善するか（指標の値が大きくなると改善）、悪化するか（指標が小さくなると悪化）を示したものである。まず SSP3 を見ると、アジアやアメリカを含む多くの地域が濃い赤で示されている。これは現在よりも水逼迫がひどく悪化し、必要な時に必要な量の水が得にくくなることを示している。次に SSP1 を見ると、アフリカ以外のほとんどのところは白く示されている。これは、現在から水逼迫が悪化しないことを示している。ここで、どの SSP でもアフリカで指標が悪化するのは、温暖化の影響に加え、人口や経済活動の伸びにより、現在は非常に少ない水利用量が急に伸びることが避けがたいことも原因である。5 つの世界のうち、SSP1 以外では水逼迫が今よりも大きくなるという結果が示され、水逼迫への対応が重要だということが分かる。

以上のように、私たちは SSP 社会経済シナリオに沿って水利用量の推定を行い、CMIP5 気候シナリオからはじき出された世界の水資源量と組み合わせることにより、「必要な時に必要な量の水が得られるか」について詳しく調べた。現在は、水を節約したり、貯めたりして温暖化の悪影響を軽減する対策（適応策）を取ることで、どれくらい水逼迫が避けられるか、研究を続けている。

表 II-4-1 SSP が描く 5 つの世界の様相

シナリオの名前	世界の様相
SSP1	持続可能：低所得国の急速な発展と格差の縮小、速い技術進歩、高い環境意識
SSP2	中庸：現在の社会や経済の延長
SSP3	分裂：貧困と人口増加、環境の破壊と遅い技術進歩、地元の資源の搾取
SSP4	不平等：国内・国家間の格差の拡大
SSP5	従来型の開発：化石燃料への依存による経済の発展



※左上の 1 枚は 2000 年のときの指標。赤が濃い（値が小さい）ほど、水逼迫が大きいことを示す。残りの 5 枚は SSP1～SSP5 の 2050 年頃の結果を過去 2000 年と比較したもの。赤（値が負）は水逼迫が悪化することを、青（値が正）は改善することを示す。

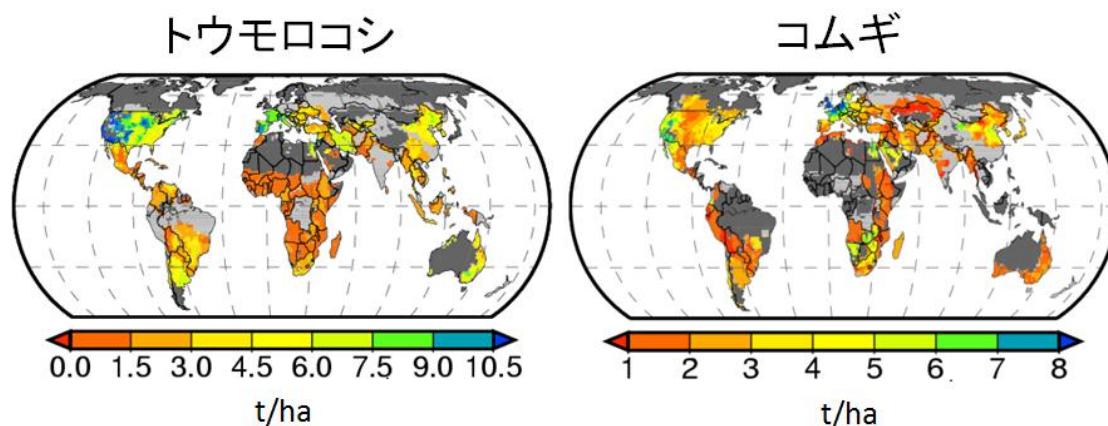
図 II-4-2 「必要な時に必要な量の水が得られるか」についての指標

(2) 世界の主要生産地域における過去 25 年間の主要作物の収量データベース

前述したように、世界人口は今世紀半ばには 90 億人に達すると見込まれ、十分な食料を供給するうえで、単位面積当たりの作物の生産量（収量）を増加させることが特に重要である。今後、収量の大きな増加が期待できる地域を特定するには、空間詳細なメッシュデータが必要となる。そして、それぞれのメッシュでこれまでの収量の時間変化を明らかにする必要がある。しかしながら、世界の作物収量データは、国連・食糧農業機関（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）の国別統計値に限られ、過去の収量変化の空間詳細な地理分布はこれまでよく分かっていなかった。このため、過去、数十年にわたる収量のメッシュデータが求められていた。

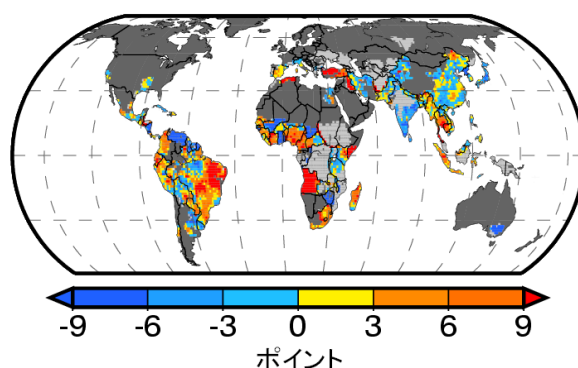
そこで、FAO の国別収量統計値と衛星観測（NOAA/AVHRR）から得られた作物別の植生指数（純一次生産量）、作物別の栽培地域分布・栽培暦を組み合わせ、メッシュごとの収量を 1982～2006 年について推定した。本データベースを利用することで、国の中でも収量の地域差があること（図 II-4-3）や、近年、いくつかの地域で収量の年々変動が増加していること（図 II-4-4）が分かった。

メッシュごとの推定収量は、別途、収集した主要生産地域 23 カ国の郡別（国によっては州別）の収量統計値と比較した。その結果、対象作物が広く栽培されているメッシュでは信頼性の高い推定値が得られたが、対象作物があまり栽培されていないメッシュでは信頼性が高くないことが分かった（図 II-4-4）。本データベースの収量推定値は、主要生産地域を解析する場合に非常に有用な知見である。一方、小規模な生産地域の解析のためにも、今後さらに検証を行うことが重要な課題である。



※メッシュごとの 1994～2006 年の平均収量。薄い灰色はデータがない地域、濃い灰色は非生産地域を示す。国の中でも収量の地域差があることが分かる。

図 II-4-3 本データベースから得られたトウモロコシとコムギの平均収量



※最近（1994～2006 年）の収量の変動係数（標準偏差÷平均×100）と以前（1982～1993 年）のそれとの差。暖色は収量の年々変動が近年、増加した（不安定化）ことを示し、寒色は収量の年々変動が近年、低下（安定化）したことを示す。薄い灰色はデータがない地域、濃い灰色は非生産地域です。

図 II-4-4 近年のコメ収量の変動性的変化

(3) 季節予報による穀物収穫量の世界豊凶予測

近年、多くの国でコムギやコメなどの輸入量が増加しており、輸出国での不作や国際市場価格の上昇が、特に開発途上地域の低所得層の栄養状態を悪化させる一因となっている。IPCC の報告では、気候変化に伴い、干ばつや熱波などが将来、増加する可能性が高いとされており（IPCC 2007）、長期的な気候変化による異常気象の増加も考慮しつつ、年々の異常気象による穀物輸出国の不作に輸入国が対応する必要性が高まっている。

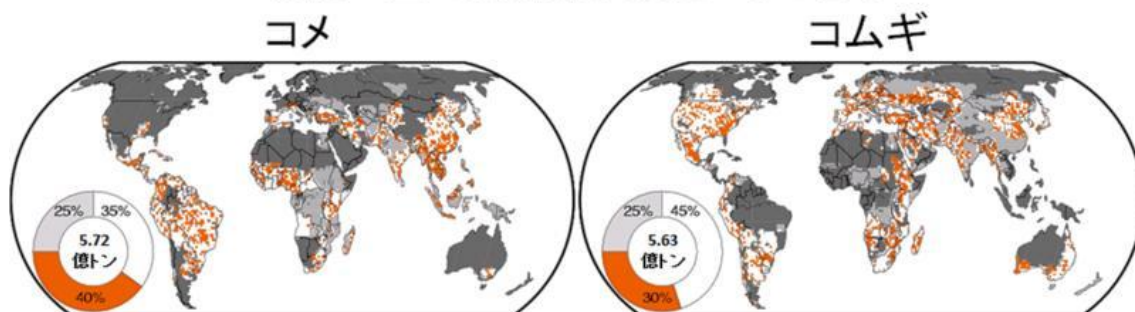
このため、世界の穀物生産の動向を監視するシステムが国連食糧農業機関（FAO）や米国国際開発庁（United States Agency for International Development, USAID）などで運用されているが、こうしたシステムに、短期気候変動による影響の予測を取り入れ、生産動向の監視を強化することが望まれている。世界の穀物生産の豊凶予測は、各国の備蓄量の調節や輸入先の選択などについての判断材料の一つとして利用でき、より効果的な飢餓対策への道が拓けると期待される。これまでの季節予測による主要穀物の豊凶予測は特定の地域（オーストラリアなど）が対象で、全世界を対象とする予測は例がなかった。そこで私たちは、豪・英・米の研究者と協力して、短期気候変動予測モデルを活用し、全世界を対象とする豊凶予測を行った（Iizumi *et al.* 2013a）。

コムギとコメについて、観測された生育後期 3 か月間の気象条件（気温と土壌水分の前年差）と、当該年の収量と前年の収量との比を重回帰分析したところ、世界の栽培面積の 30%（コムギ）と 33%（コメ）で、気象条件から収量の前年比を精度良く推定できることが分かった（図 II-4-5）。豊凶予測が可能な地域が、世界全体でどの程度あるのかを定量化できたことは本研究の大きな成果である。

また、収穫 3 か月前に短期気候変動予測モデルで予測した生育後期の気温と土壌水分量のデータを、得られた重回帰式に入力したところ、豊凶を予測し得る地域の約半分で、観測された不作（当該年の収量が前年よりも 5%以上低下する場合）を再現できた（図 II-4-6）。また、前年に比べて豊作（当該年の収量が前年よりも 5%以上増加）になる場合についても、不作と同様に、再現できた。不作が再現できた地域は世界の栽培面積の 18%（コムギ）と 19%（コメ）に相当した。例えば、コムギでは、図 II-4-6 に示すように、米国やオーストラリアの一部（図 II-4-7）で、またコメではタイやウルグアイなどの一部で（図 II-4-8）、収量前年比を収穫 3 か月前に予測できた。

気温と土壌水分量について季節予測の精度が向上すれば、さらに広範な地域で精度の高い豊凶予測が可能になると見込まれる。また、収量変動予測モデルを精緻化すれば、気象条件から収量の前年比を精度良く説明できる地域はさらに広がる。こうした予測技術を、FAO などが運用している既存の食糧動向の監視システムに組み込むことができれば、世界の穀物の生産動向の監視を強化することが可能である。例えば、開発途上国では、予測情報に基づいて、国内の備蓄量を積み増す、あるいは食糧の緊急援助の申請時期を早めるといった、より効果的な対応を促し、干ばつなどに起因する飢餓や貧栄養の危険にさらされる人口を減らす上で有効と期待できる。

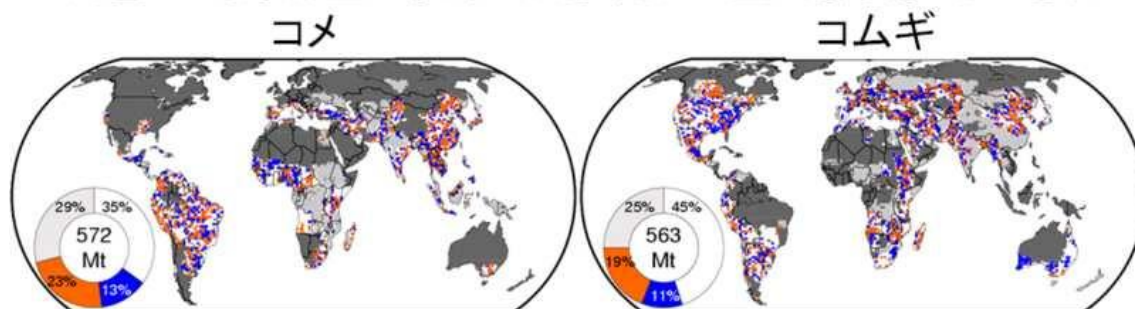
観測された気象条件(気温と土壌水分量)から 穀物の豊凶を精度良く推定できた地域



※コメとコムギについて、生育後期 3 か月間に観測された気象条件（気温と土壌水分量）から、当該年と前年の収量比を精度良く推定できた地域（オレンジ色）、推定できなかった地域（白色）、栽培暦がないため解析できなかった地域（薄灰色）、非栽培地域（濃灰色）。

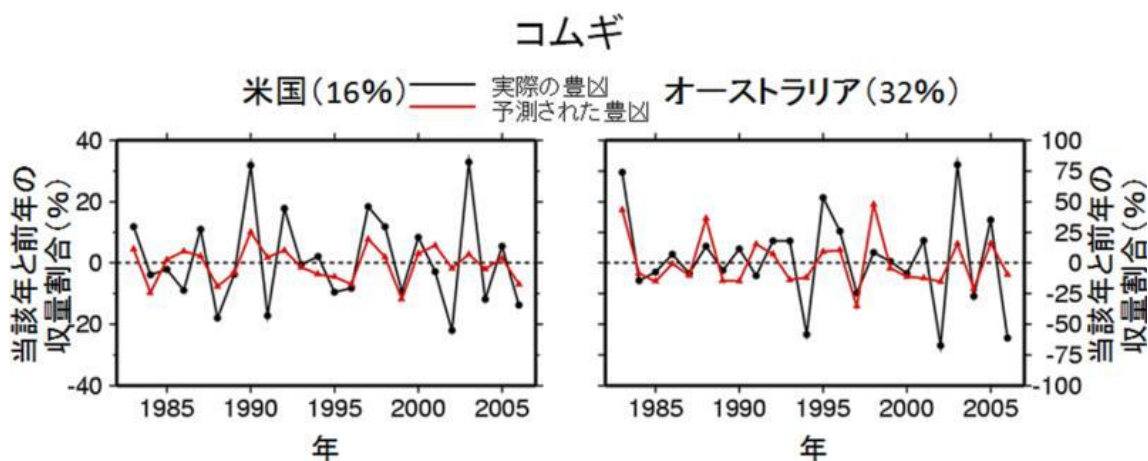
図 II-4-5 観測された気象条件から穀物の豊凶を予測できた地域

気温と土壌水分量の予測から観測された豊凶を再現できた地域



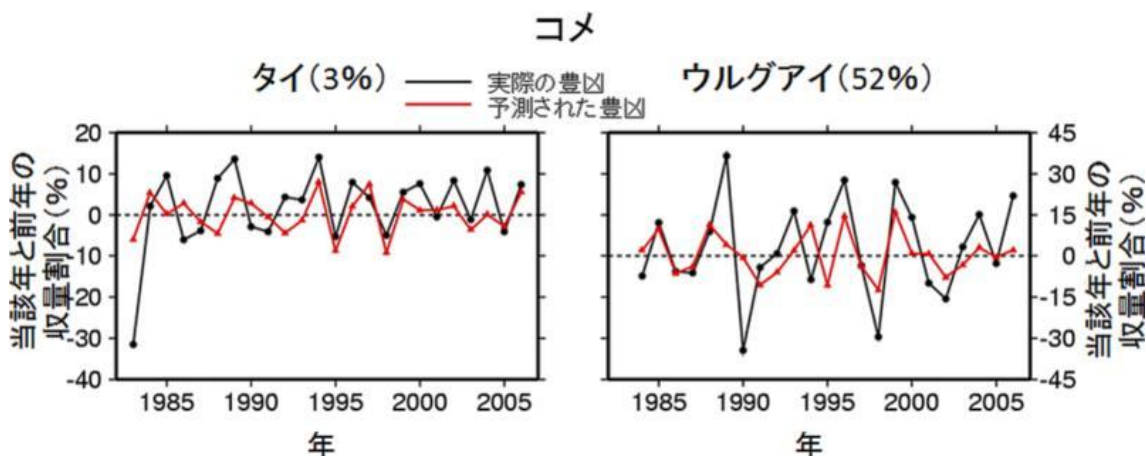
※収穫 3 か月前に海洋研究開発機構が予測した生育後期 3 か月の気温と土壌水分量を、得られた重回帰式に入力した結果、観測された不作（当該年の収量が前年よりも 5%以上低下する場合）を再現できた地域（オレンジ色）。当該年と前年の収量比を観測された気象データから精度良く推定できた地域のうち、季節予測から観測された不作を再現できなかった地域（青色）。観測された気象条件から豊凶を再現できなかった地域（白色）、栽培暦がないため予測できなかった地域（薄灰色）および非栽培地域（濃灰色）。

図 II-4-6 季節予測により豊凶を予測できた地域



※米国とオーストラリアにおける実際のコムギの豊凶（黒線）と収穫3か月前時点のデータを用いて生育後期3か月の気温と土壌水分量の予測値を計算し、豊凶の算出を行った数値（赤線）。国名の脇の数字は、当該国のコムギの全栽培面積に占める豊凶を予測できた栽培面積の割合。示した図は豊凶が予測できた地域のデータのみを集計して使用。なお、米国は2008年におけるコムギの輸出量が世界第1位、オーストラリアは第6位である。

図 II-4-7 収穫3か月前の季節予測によるコムギの主要輸出国での豊凶予測



※タイとウルグアイにおける実際のコメの豊凶（黒線）と収穫3か月前時点のデータを用いて生育後期3か月の気温と土壌水分量の予測値を計算し、豊凶の算出を行った数値（赤線）。国名の脇の数字は、当該国のコメの全栽培面積に占める豊凶を予測できた栽培面積の割合。示した図は豊凶が予測できた地域のデータのみを集計して使用。なお、タイは2008年におけるコメの輸出量が世界第2位、ウルグアイは第3位である。

図 II-4-8 収穫3か月前の季節予測によるコメの主要輸出国での豊凶予測

Ⅱ-4-iii 今後 ICA-RUS が明らかにすること

前述したように ICA-RUS では、気候・水資源・陸域生態系・農作物・土地利用を記述する全球規模のモデルを開発し、研究を進めてきた。我々が開発に関わった気候モデル MIROC (Watanabe *et al.* 2010) によって、温室効果ガス濃度が変化した際の、地表や土壌の温度や水分、降水量の変化などを予報することが可能である。前述した水資源モデル H08 (Hanasaki *et al.* 2008a,b) では、灌漑農地において農作物を生産するための水の河川からの取水や、大規模ダムにおける放水・貯水操作などをシミュレートすることにより、人間による水の利用と水資源の変化を記述する。陸域生態系モデル VISIT (Ito and Inatomi 2012) では、陸域生態系における温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素など）の放出・吸収量に加えて、気候変化に伴う植物の生産性の変化や枯死や乾燥化に伴う森林火災の発生をシミュレートすることが可能である。農作物モデル PRYSBI2 (Iizumi *et al.* 2013b) は、穀物成長のプロセスを記述するモデルであり、前述した過去の農作物収量データベース (Iizumi *et al.* 2014) を利用することにより、モデルがよく観測事実を再現するように、調整されている。そして、土地利用モデルでは、経済的な収益を評価することにより、各グリッドでの農地・林地・牧草地の転換を予測する。経済的な収益性は、農作物・木材・燃料の価格や生産コストに関する情報と、農作物や森林の生産性の情報を利用することで評価を行う。

これらのモデルは非常に複雑な現象を扱うため、モデルの中には数々の不確実性がある。この問題を克服するため、引き続き、モデルの高度化を行う。つまり、これまでモデルで考慮されてこなかったプロセスを、新たに考慮することにより、モデルによる予測の精度を向上させる。例えば、気候モデルにおける凍土に関わる過程、水資源モデルにおける河川に関わる過程、陸域生態系モデルにおける植生分布の変化、農作物モデルにおける灌漑や技術革新に関するパラメータ推定、土地利用モデルにおける農作物生産性の推定方法などが、今後のモデル高度化の課題である。この一方で、土地・水・生態系の相互作用を本格的に考慮するために、異なるモデルの結合を行う。現在私たちは、気候・水資源・陸域生態系・農作物・土地利用それぞれのモデルが予報する変数を、時間発展しながら別のモデルに受け渡すシミュレーションシステムである「陸域統合モデル」の開発を進めている (Yamagata and Yokohata 2013)。

私たちが開発した様々なモデルを用いることで、土地・水・生態系の相互作用の理解を目指した研究として計画しているのが、窒素循環に着目した研究である (図 Ⅱ-4-9)。将来の需要の増加に対応するべく、穀物の生産量を増やすためには、農地の拡大か肥料の利用による穀物生産性の拡大が必要である。肥料は穀物の成長に使われるが、過剰な投入などによって生じる残渣は、生態系での様々な窒素反応プロセスを経て、主として窒素酸化物や硝酸イオンといった反応性窒素の形で、大気・河川・海洋に運ばれる。この際に放出される一酸化窒素は温室効果ガスであり、気候変化を促進する役割を持つ。また硝酸イオンは過剰な栄養塩の供給となり、河川や海洋の汚染につながる。つまり、急増する需要を満たすための穀物生産の増加が、環境の汚染をもたらし、さらに気候変化に影響を与えることを通して、さらなる悪影響をもたらし可能性がある。これらの一連のプロセスを、前述の土地利用・穀物・生態系・水資源・気候モデルを用いて評価することで、土地・水・生態系における相互作用と、それによって生じる様々なリスクを定量的に評価することができる。このように、全球規模の様々なモデルシミュレーションを通して、将来の気候変化に対するリスク管理戦略の構築と、前述の「融合的アプローチ」を通じた水・エネルギー・食料の安全保障の向上、持続可能な社会の発展に貢献することが大きな目標である。

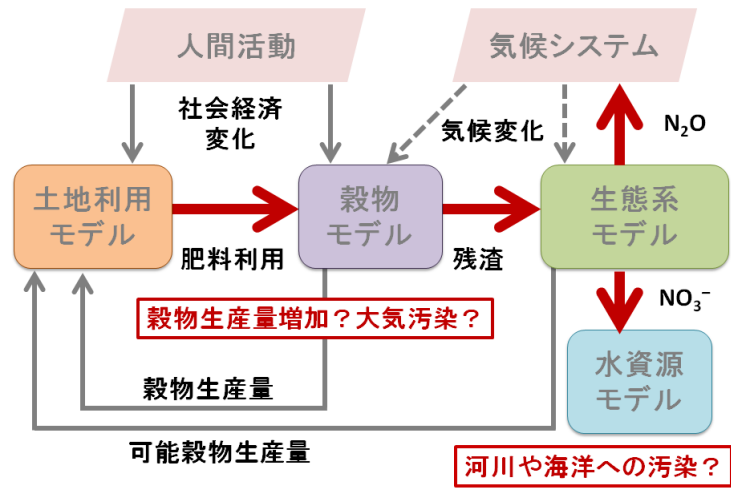


図 II-4-9 地球システムにおける窒素の循環と土地・水・生態系とのつながり

参考文献

- Bruinsma J. (2009), *The Resource Outlook to 2050: By How Much Do Land, Water and Crop Yields Need To Increase by 2050?*, paper presented at the FAO Expert Meeting, “How to Feed the World in 2050”, 24-26 June 2009, Rome, Greece.
- Friis C., and Reenberg A. (2010), *Land grab in Africa: Emerging land system drivers in a teleconnected world*. GLP Report No. 1. GLP-IPO, Copenhagen.
- Hanasaki, N., S. Kanae, T. Oki, K. Masuda, K. Motoya, N. Shirakawa, Y. Shen, and K. Tanaka (2008a), An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrology and Earth System Sciences*, *12*, 1007-1025.
- Hanasaki, N., S. Kanae, T. Oki, K. Masuda, K. Motoya, N. Shirakawa, Y. Shen, and K. Tanaka (2008b), An integrated model for the assessment of global water resources – Part 2: Applications and assessments, *Hydrology and Earth System Sciences*, *12*, 1027-1037.
- Hanasaki, N., S. Fujimori, T. Yamamoto, S. Yoshikawa, Y. Masaki, *et al.* (2013a), A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways - Part 1: Water use, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *17*, 2375-2391.
- Hanasaki, N., S. Fujimori, T. Yamamoto, S. Yoshikawa, Y. Masaki, *et al.* (2013b), A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways - Part 2: Water availability and scarcity, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *17*, 2393-2413.
- Hoff, H. (2011), *Understanding the Nexus*, Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- Iizumi, T., M. Yokozawa, G. Sakurai, *et al.* (2014), Historical changes in global yields: Major cereal and legume crops from 1982 to 2006, *Glob. Ecol. Biogeogr.*, *23*, 346-357.
- Iizumi, T., H. Sakuma, M. Yokozawa, J.-J. Luo, A. J. Challinor, M. E. Brown, G. Sakurai, and T. Yamagata (2013a), Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production, *Nature Climate Change*, *3*, 904–908.
- Iizumi, T., G. Sakurai, and M. Yokozawa (2013b), An ensemble approach to the representation of subgrid-scale heterogeneity of crop phenology and yield in coarse-resolution large-area crop models, *Journal of Agricultural Meteorology*, *69*, 243-254.
- Ito, A., and M. Inatomi (2012), Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty, *Biogeosciences*, *9*, 759–773.
- IPCC (2007), *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva.
- Sachs, J., R. Remans, S. Smukler, L. WInowiecki, S.J. Andelman, K.G. Cassman, D. Castle, R. DeFries, G. Denning, J. Fanzo, L.E. Jackson, R. Leemans, J. Lehmann, J.C. Milder, S. Naeem, G. Nziguheba, C.A. Palm, P.L. Pingali, J.P. Reganold, D.D. Richter, S.J. Scherr, J. Sircely, C. Sullivan, T.P. Tomich, and P.A. Sanchez (2010), Monitoring the world’s agriculture, *Nature*, *466*, 558-560.
- UN Habitat (2003), *The challenge of the slums: global report on human settlements 2003*, UN Habitat, Nairobi, Kenya.

UNPD (2011), *World Urbanization Prospects, the 2011 Revision*, <http://esa.un.org/unup/>, accessed 29 August 2011, UNPD, New York, NY, USA.

Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe, and M. Kimoto (2010), Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity, *J. Climate*, *23*, 6312-6335.

UNDP, UNEP, World Bank, and World Resources Institute (2005), *The Wealth of the Poor –Managing Ecosystems to Fight Poverty*, World Resources Institute, Washington, D.C., USA.

Yamagata, Y., and T. Yokohata (2013), *Land, water and ecosystem nexus for climate risk management*, paper presented at the ICA-RUS workshop, 6 December 2013, Tokyo, Japan.