

## 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なおりである (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。

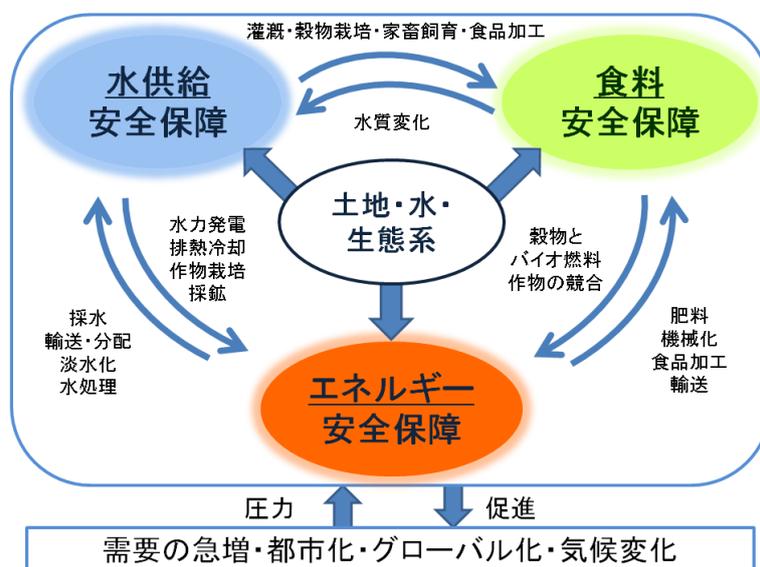


図 II-4-1 人間にとって必要不可欠な水・エネルギー・食料の安全保障の間の結びつき（nexus）。Hoff 2011 Figure 2 を改編。

## 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。

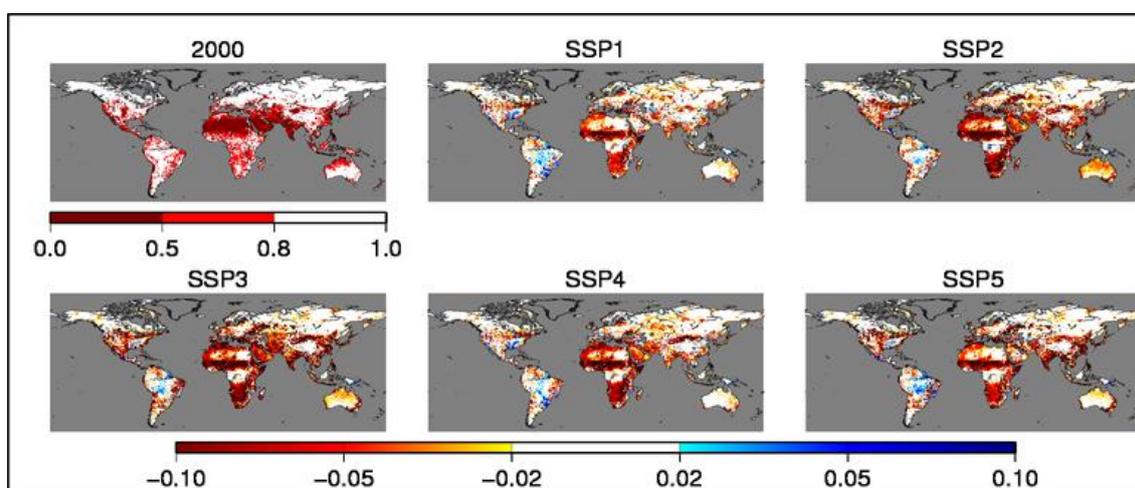
続いて、推定された水利用量が世界各地で持続的に川から取れるか調べた。これを調べるために、私たちがこれまでに開発した「全球水資源モデル H08」という名前のソフトウェア（Hanasaki *et al.* 2008a,b）を使った。このソフトウェアを使うと、ダムに川の水を貯める、川の水を汲むと川の流れが減る、といった人間の利用を含めて、1 日単位、50km 解像度で世界の水の流れをシミュレーションすることができる。最新の CMIP5 と呼ばれる気候シナリオと、将来の水利用の推定、そして全球水資源モデル H08 を使い、世界各地の「必要な時に必要な量の水が得られるか」についての指標を計算した。

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 年と比較したものを。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。

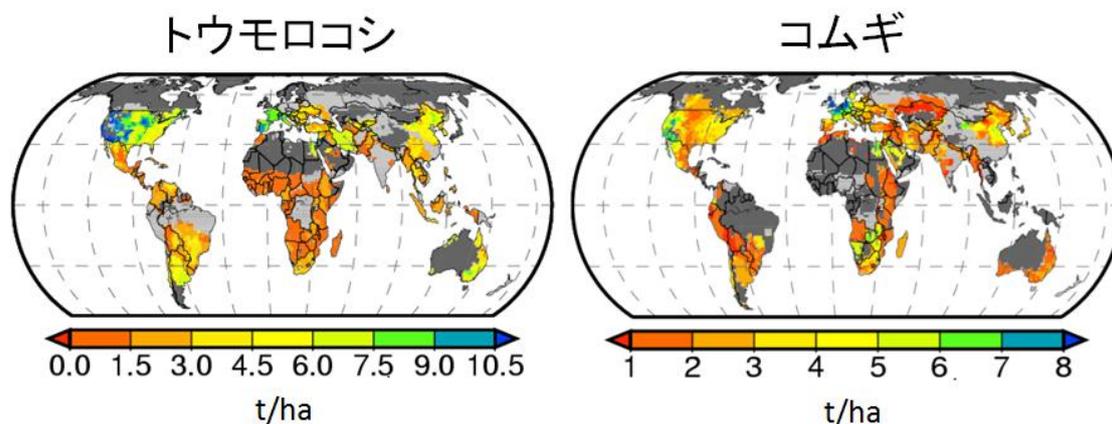
図 II-4-2 「必要な時に必要な量の水が得られるか」についての指標

## (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。

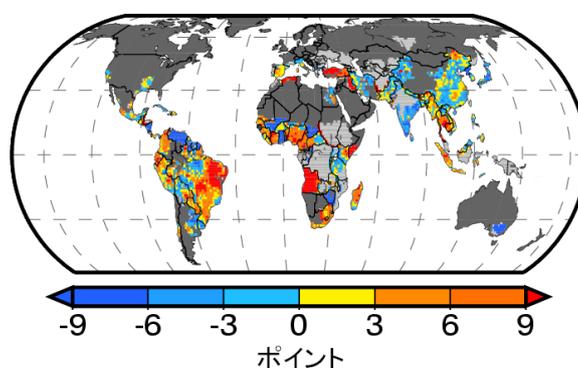
そこで、FAO の国別収量統計値と衛星観測（NOAA/AVHRR）から得られた作物別の植生指数（純一次生産量）、作物別の栽培地域分布・栽培暦を組み合わせ、メッシュごとの収量を 1982～2006 年について推定した。本データベースを利用することで、国の中でも収量の地域差があること（図 II-4-3）や、近年、いくつかの地域で収量の年々変動が増加していること（図 II-4-4）が分かった。

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の変化

### (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。

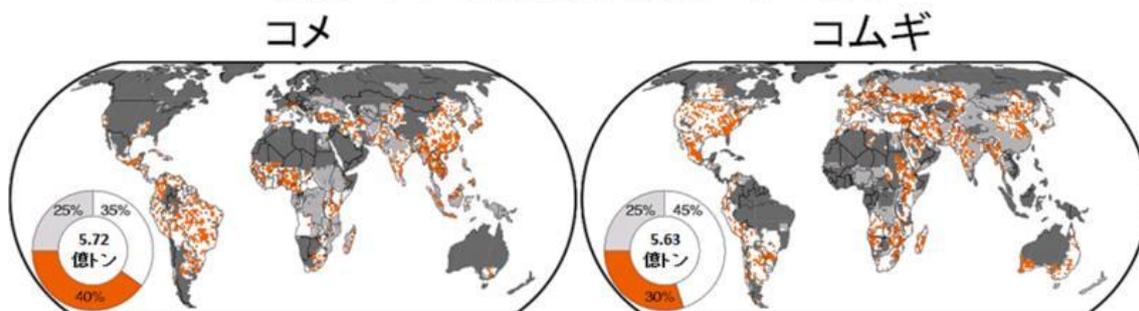
このため、世界の穀物生産の動向を監視するシステムが国連食糧農業機関（FAO）や米国国際開発庁（United States Agency for International Development, USAID）などで運用されているが、こうしたシステムに、短期気候変動による影響の予測を取り入れ、生産動向の監視を強化することが望まれている。世界の穀物生産の豊凶予測は、各国の備蓄量の調節や輸入先の選択などについての判断材料の一つとして利用でき、より効果的な飢餓対策への道が拓けると期待される。これまでの季節予測による主要穀物の豊凶予測は特定の地域（オーストラリアなど）が対象で、全世界を対象とする予測は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

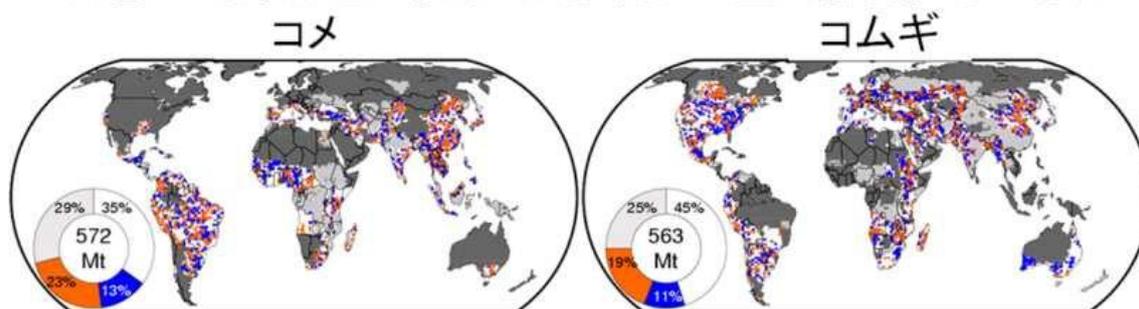
### 観測された気象条件(気温と土壌水分量)から 穀物の豊凶を精度良く推定できた地域



※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

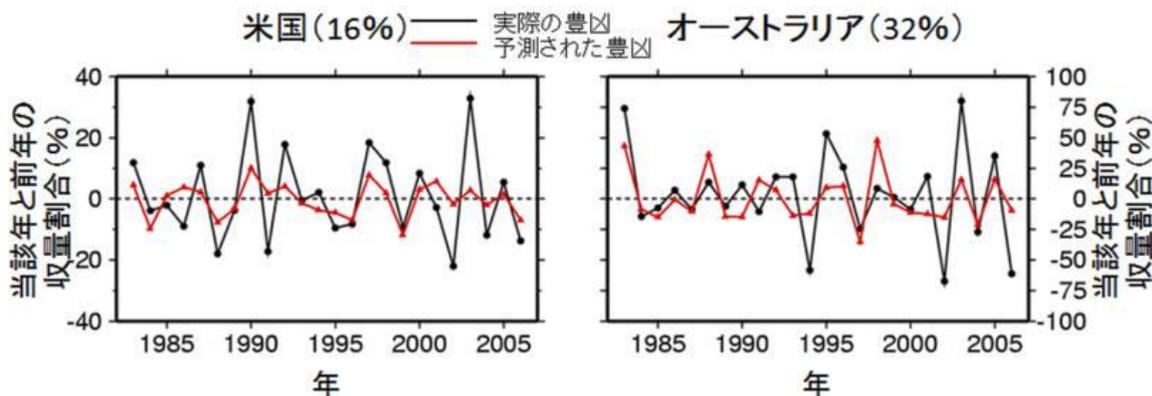
### 気温と土壌水分量の予測から観測された豊凶を再現できた地域



※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

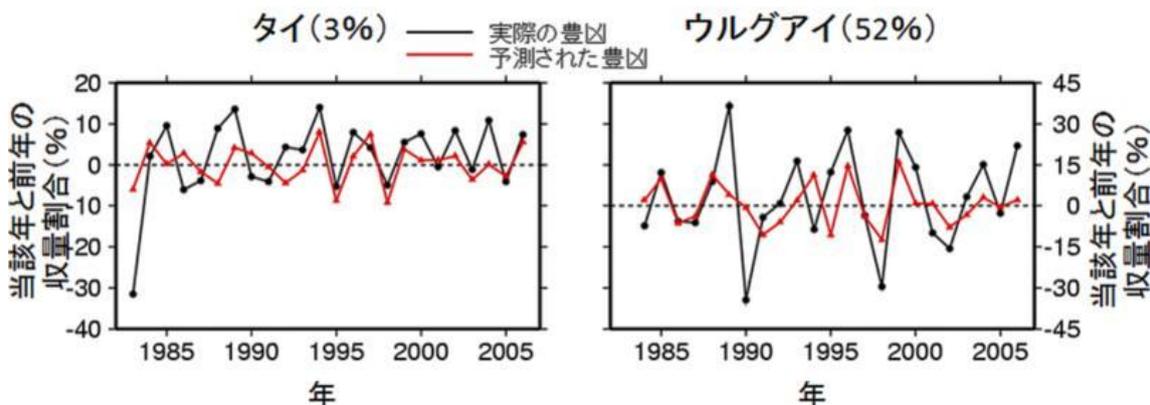
## コムギ



※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

## コメ



※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場合の、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す、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す可能性がある。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。

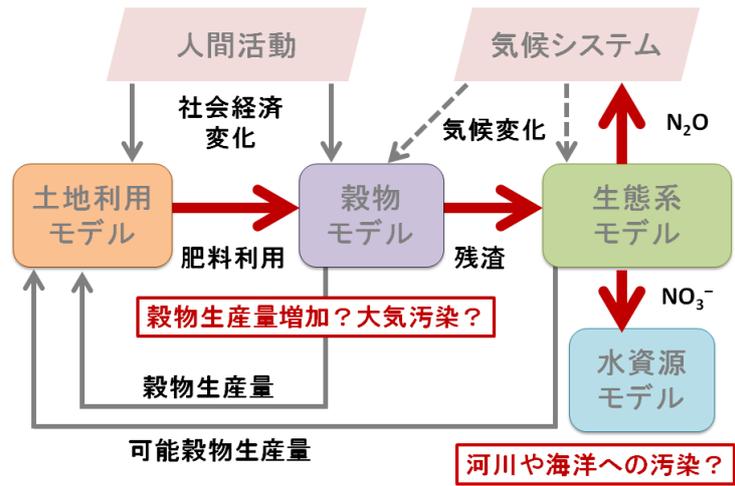


図 II-4-9 地球システムにおける窒素の循環と土地・水・生態系とのつながり

## 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.