

乾燥地域の 農業生産システムに 及ぼす地球温暖化 の影響

厳しい水の制約を受ける乾燥地域の農業生産システムが、地球温暖化による気候変動で受ける影響の方向や様相を、その幅が大きいといわれる地中海東岸地域のトルコ・セイハン川流域を対象にして、描きだすことを試みました。将来の地球温暖化による気候の変化を見通して、気温の上昇や降水量の減少、海面の上昇などによって、地域の農業にどのような問題が起こりそうかを考えました。この試みを通して、「自然と人間のインターフェイスとしての農業」の仕組みをより明確に理解し、地球規模の気候変動に対する課題と対策を検討しました。プロジェクトは、トルコ科学技術研究機構の支援も受け、日本人とトルコ人の研究者各40余名を中心にして、国際共同研究プロジェクトとして実施しました。

プロジェクトリーダー ■ 渡邊紹裕 総合地球環境学研究所

成果の概要

プロジェクトでは、セイハン川流域を対象に、最新の気候モデルなどを用いて2070年代の気候の温暖化影響を見通し、そのシナリオに基づいて流域の条件や農業生産にどのような影響が生じるかを検討しました。その結果、2070年代にはこの地域の気温はどの季節でも2~3.5度上昇し、降水量は夏を除いて20%程度減少する可能性が示されました。

この地域の主要な作物であるコムギは、気温と二酸化炭素濃度の上昇によって収量が増加する効果と、降水量の減少によって収量が減少するという、相反する効果が複雑に関わり、標高の高いアナトリア高原では、収量が増加する可能性が高いことが示されました。また、降水量の減少は、利用可能な水資源の減少をもたらす、作物の選択や灌漑面積の多寡によって水不足や生育障害が起こ

ることも分かりました。

こうした「見通し」や予測は、考え得る条件と利用できる材料を積み上げての議論であって、一種の思考実験です。今後も、変化をよく観察し、確認しながら対応していく「見直し」的なアプローチが重要であることも確認できました。

地球環境学への貢献

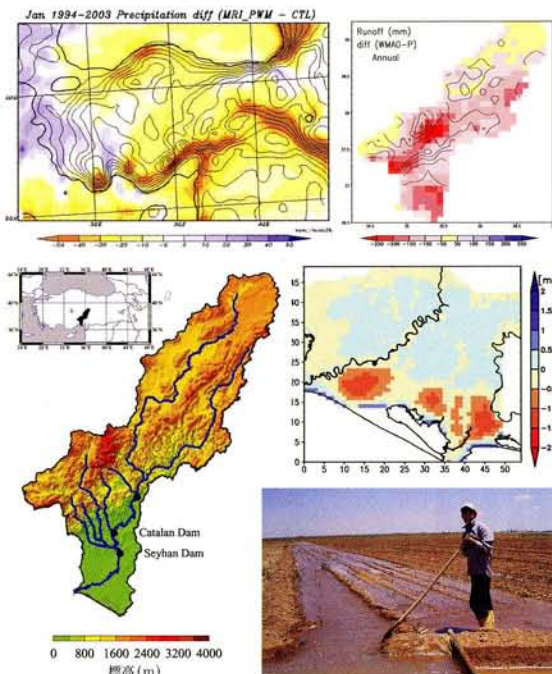
地球温暖化による気候変動が生じると、農業生産の基本的な条件に変化が生じ、それに対して人間の生産活動は影響を受けると同時に、その影響を活用したり、悪影響を回避し克服する次の活動を起こし、それがまた新たな影響を惹き起こす可能性があります。したがって、気候変動の農業への影響と、農業が気候変動に与える影響の基本な理解を背景にして、気候や地域の条件の変動に対応できる知恵や仕組みを常に機能させることが大切です。本プロジェクトでは、問題の構造を理解し、検討すべき対象を考察するツールを開発することができました。また、トルコ現地において、問題に取り組む総合的な学際研究の契機を提供し、温暖化の流域水文や農業への影響評価の重要性の認識を喚起することができました。

成果の発信

研究成果は、報告書としてまとめた他に、書籍・講演・報道などの形で国内外に発信しています。共同研究者は、国内外の学術雑誌や国際会議・学会において成果論文を発表し、今後も多数の発表が見込まれています。トルコでは、土地・水管理のあり方に関するシンポジウムを開催し、テレビ番組にも成果を提供しました。さらに、国際機関や国際的な取り組みにも方法と成果を送り出しています。

図 トルコ・セイハン川流域での温暖化影響の評価

トルコ地中海地域のセイハン川流域(約25,000km²)では、山間部には天水小麦地帯が広がり、海岸平野部は冬の山岳地帯の雨や雪を貯水して夏に利用する広大な灌漑農業地帯で、主にトウモロコシや綿花、果樹などが栽培されています。ここでの2070年の気候シナリオを、領域気候モデルなどを使って設定し(左上: 将来の1月降水量変化の例。青: 降水量増加、赤: 降水量減少)、それによって流域の水文条件がどのように変化するかを流域モデルで予測(右上: 年流出量の将来変化。青: 流出量増加、赤: 流出量減少)。これらの条件を基に、農地での作物生育や水需給を推定しました(右中: 海岸平野の年平均地下水水位の将来変化。青: 地下水位上昇、赤: 地下水位低下)



大気中の物質循環に及ぼす人間活動の影響の解明

気候変動への人為的影響を評価する上で重要な温室効果気体やエアロゾルの分布と変動の将来予測を正確に行うためには、様々な人間活動と温室効果気体およびエアロゾルの排出、分布と変動の関係を解明することが重要です。本研究では、経済発展が目覚ましい最近約20～30年間の東アジア地域を中心に、(1)各国、各地域の経済、産業、社会の変化と大気中への人為起源物質の排出量の変化の関係解明、(2)大気中に排出された人為起源物質の気候変動並びに大気環境汚染への影響の解明、を目的として研究を実施しました。

プロジェクトリーダー ■ 早坂忠裕 総合地球環境学研究所

工業化による東アジア諸国の経済発展は、エネルギー消費量や温室効果気体、エアロゾル等の排出量を増加させました。SO₂に関しては、予想されていたほどに排出量は増加していません。CO₂に関しては、エネルギー効率の上昇により、排出密度はほぼ横ばいか、もしくは低下しています。この傾向は、「後発」諸国が国際競争に勝ち抜く必要性や、環境意識の高まり、直接投資、開発援助を通じた技術移転などによって促進されてきました。しかしながら、今後、CO₂の排出が増加する

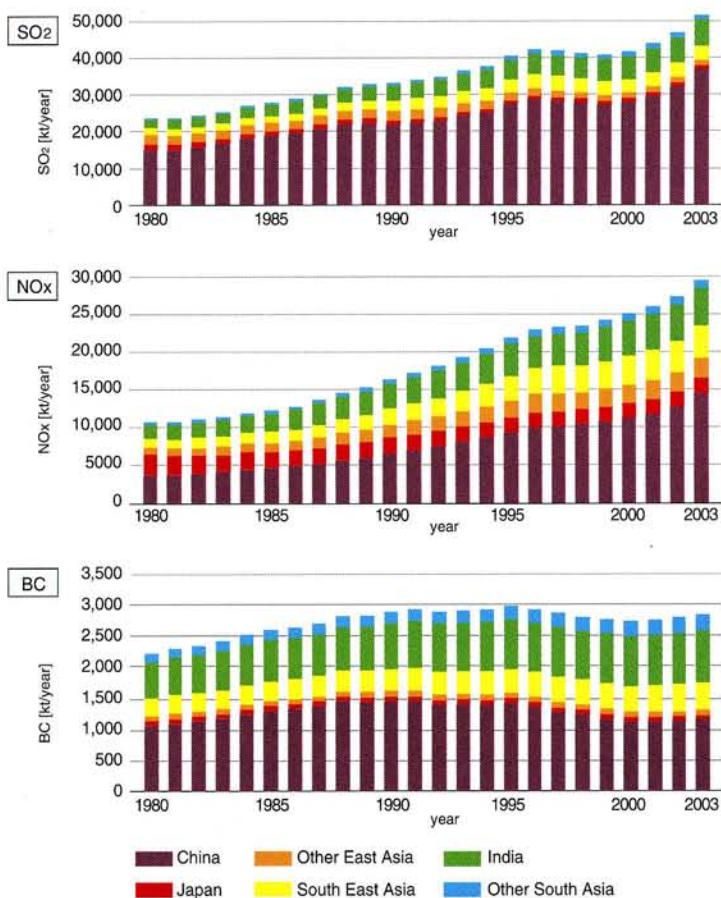
か否かは、経済成長と排出密度の低下と、どちらの速度がより大きいかによって依存します。

次に、アジア域における1980～2000年の燃料消費量と大気中への物質 (SO₂, NO_x, CO, BC, OC, NMVOC, NH₃, CH₄, N₂O, CO₂) の排出量を推計しました。アジア域における燃料消費量は20年間で倍増し、それに伴って、大気中への物質の排出量も1.2倍 (BC) ～2.3倍 (NO_x) に増加しています。特に、中国における増加傾向が著しく、20年間におけるNO_x排出量の増加率は約3倍にもなることが示されました。

大気輸送モデルを用いた日本上空のCO₂濃度長期データの再解析から、大気境界層の上の2～4 kmの高度では中国の排出の影響を強く受けることが示唆されました。この結果から、1990年代半ば以降については中国政府が発表している石炭等化石燃料の消費量の経年変化と大気中の濃度変化は整合性がないことが示唆されました。また、中国国内7箇所でのCO₂とCH₄の観測を実施し、年平均のCO₂濃度は日本よりも数ppm高く、季節振幅も大きいことが明らかになりました。

エアロゾルの観測を福江島、奄美大島、沖縄等で実施した結果、全般的に東アジアのエアロゾルはBCの割合が多く、光吸収が強いことが分かりました。また、特に福江島では有機物の割合が多いことが分かりました。中国における石炭およびバイオマス燃料が関係しているものと思われます。これらのエアロゾルは中国では1960～1990年頃には増加傾向にありましたが、その後はあまり増加していません。また、エアロゾルの間接効果により低層雲の雲粒は小さくなっていますが、総雲量は減少しています。日射量は長期減少傾向にありますが、気温は1960年以降上昇しています。中国北部では降水量が減少していますので、蒸発量の変化が鍵を握っている可能性があります。

図 アジア各国・各地域のSO₂、NO_x、BC排出量の経年変化



琵琶湖－淀川水系 における流域管理 モデルの構築

流域管理の上では、流域の階層性に由来する多様なステークホルダー間の問題認識の違いが、トップダウンとボトムアップの対立を引き起こします。私たちは、この問題を乗り越えるために「階層化された流域管理システム」という制度（メカニズム）を提案しました（図参照）。この考え方に立って、琵琶湖流域における農業濁水問題を事例として、コミュニケーションを基盤とした環境診断・流域管理の方法論の開発を進めてきました。1) 住民参加・ガバナンスを理念とした流域管理のための新しい方法論を、2) 理工学と社会科学の連携による分野横断的なアプローチによって、3) 琵琶湖流域の3つの階層（滋賀県：マクروسケール、滋賀県彦根市稲枝地域：メソスケール、稲枝地域内の集落群：ミクروسケール）での実践的な調査活動をもとに、4) 時代の要請にこたえうる流域環境学・地球環境学をめざして推進してきた点に特徴があります。

プロジェクトリーダー ■ 谷内茂雄 総合地球環境学研究所

何がどこまでわかったか

- (1) 流域診断手法の開発と流入河川－琵琶湖の関係解明
安定同位体や微量元素などの新しい環境診断手法を取り入れて検討した結果、琵琶湖の水質形成・富栄養化に、湖東の中小河川の農業活動の潜在的インパクトが大きいこと、地域住民によるボトムアップからのきめ細かい水管理や水路掃除などが、琵琶湖の環境保全において有効・必要であることがわかりました。
- (2) 農業濁水問題の全体像とコミュニケーション手法の開発
濁水問題の背景には、戦後農政や地域農業構造の大きな変化、それにとまなう農家の兼業化・後継者問題の深刻化という、社会的な問題構造があることがわかってきました。また、住民が地域の水環境やその未来像について話し合い考えていくことを支援する、実践的なワークショップ手法を

開発しました。水環境の現況や保全策に関する情報提供が、農家の環境配慮の意識や行動へ及ぼす影響を検証する、実践的なワークショップを開催しました。これらの調査活動を通じて、集落の個別性を前提としたコミュニケーション手法の必要性と、社会関係資本などの社会的条件の重要性が明らかになりました。

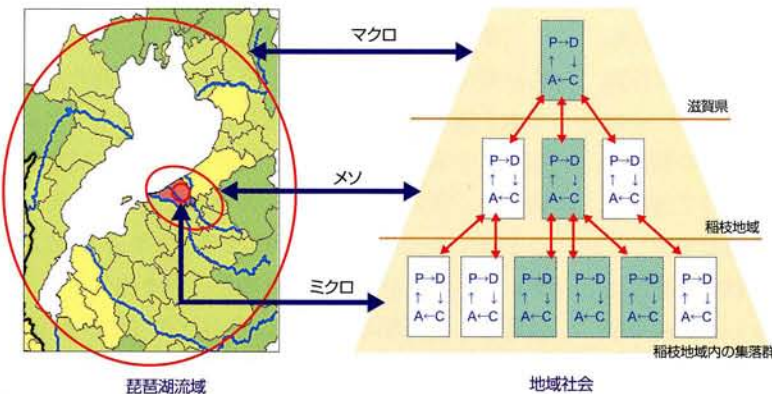
地球環境学に対する貢献

グローバルな地球環境問題の解決には、1) 流域が、地域の環境問題だけでなく、地球環境問題の具体的な解決を実践する重要な空間スケールでもあることへの留意と、2) その際、流域内のステークホルダーの、多様なものの見方や環境への関わり方をどのように調整するかが重要な課題となります。私たちは、コミュニケーションを基盤とした流域管理の研究を通じて、地球環境問題解決のための実践的な方法論構築にも貢献できたと考えています。

成果の発信

プロジェクトの「最終成果報告書」をぜひ読んでいただきたいと思います (ISBN 4-902325-11-X)。全国の大学図書館、滋賀県の自治体図書館等でご覧いただけます。5年間の分野横断的な流域管理研究の成果を、地球環境問題を見据えた「流域環境学」構築のはじめの一歩としてまとめています。最新の研究成果だけでなく、新しい学問を創るために私たちが試みた、地域における実践、分野を超えた学問の連携の意義、また研究者が挑戦すべき学問的・社会的課題など、その根幹にある地球研のプロジェクトとしてのメッセージとダイナミズムを伝えるよう執筆しました。

図 農業濁水問題を事例とした琵琶湖流域における階層化された流域管理システム



赤い円(左図)と緑のボックス(右図)で示した滋賀県、彦根市稲枝地域(■で示した地域)、稲枝地域内の集落群は、いずれも農業濁水問題に関係した地域社会のステークホルダーですが、その問題意識は異なります。階層化された流域管理システムとは、1) 不確実性に対処するための、各階層に応じた環境診断によるモニタリングとフィードバックの仕組み(PDCAサイクル)、2) 階層間で分断されたコミュニケーションを促進する仕組み(赤い矢印)を、地域社会の中につくっていくことで、多様なステークホルダーのガバナンスに基づいた流域管理を進めようとする考え方で。

水資源変動負荷に対する オアシス地域の適応力評価 とその歴史的変遷

中国西部の乾燥地域にある黒河流域は、東西文化の交流路であるシルクロードと、南北の異なる文化が交流する主要な交易路とが交差する歴史的に最も重要ないわば文化の十字路口に位置します。本プロジェクトでは、この流域を対象として、過去2000年間にわたる歴史を、人間と自然系との相互作用という視点で見直しました。

プロジェクトリーダー ■ 中尾正義 総合地球環境学研究所

研究内容

研究は、歴史文書やプロクシー（雪氷コアや樹木年輪試料、湖底堆積物などの代替記録媒体）を解読して歴史を復元する研究と、歴史データを解釈するための水の循環にかかわる素過程を解明する研究とに大別されます。素過程研究としては、地球規模変動にともなう気温や降水量および水河からの水の供給量の変動や、供給された河川水や地下水の流出過程、また灌漑農業や遊牧産業に水がどのように使われているのか、さらに、そのことによる蒸発散量の評価など水の循環過程を、現地観測や聞き取り調査などにより明らかにしてきました。

研究結果概要

ユーラシア大陸のほぼ中央に、居延沢とよばれる巨大な湖がありました。およそ2300年前その面積は琵琶湖の3倍にも達していました。当時匈奴に長く押さえつけられていた漢は、その地やその上流域に多数の屯田兵を送り、匈奴のくびきからの脱却を図ります。しかしその頃から居延沢の面積は次第に減少してきました。

この地が再び脚光を浴びるのは西夏・モンゴルの治世となってからです。この地にカラホトを築き、周囲には灌漑水路をめぐらして広大な耕地で作物

を作りました。その面積は現在の額済納オアシスの2倍にも達するほどです。しかし気候の寒冷化にともない、氷河の融け水は細り、黒河の水は次第に減少してきました。しかし同時に、黒河の中流地帯にあるオアシスで

も活発な灌漑農地の開発を行いました。その結果、黒河の水量はますます減少し、末端付近では、河の水がしばしば断流しました。

明代に引き続き清代に入ると、中流での農業生産はますます活発化してきました。黒河の河床からはるかに高い場所をも農地にするために地下水道を建設し、より広い面積を農地に変え、黒河からの取水量は増えてきました。

20世紀に入って、祁連山脈から流れ出てくる水は次第に増えてきました。しかし、黒河末端部では再び断流の頻発が問題となってきたのです。そして河畔の植生は衰退し、地下水位は低下してきました。

そこで中国政府は、「生態移民」政策と中流地帯での取水制限を実施しました。その結果、下流地帯への河の水量はある程度増加しました。しかし中流地帯は水不足に陥りました。生態移民で移住した牧民による新たな水需要と取水制限による従来の農民の水需要が急増したからです。その結果、彼らは不足分の水を地下水に頼るようになり、地下水の揚水量は最近20年間で6倍にも急増しました。現在は、地下水資源の枯渇が問題です。

対象地域での水利用の歴史を見ると、人の活動の活発化による水不足を、自らの生活範囲を超えて水を持ち込むという手法によって解決してきました。土木技術等の発達がそれを可能にしてきたのです。言い換えれば、システムを拡大するという手法によって問題を解決してきました。しかし、グローバル化が顕在化した現在、我々のシステムは地球という閉じた範囲に広がりきっています。従来成功してきた、システムを広げるという手法による解決が難しい時代になってきているのです。つまり我々は、システムを広げるという手法によらない解決手段を見つけなければいけない時代に生きているのです。

写真 黒河の河床に遊ぶラクダたち（撮影：2002年）



20世紀のはじめには毎秒20トンもの水量を誇っていた黒河の流れは涸れ果て、その河床にはたまり水が残るだけとなってしまった

地球規模の水循環変動 ならびに世界の水問題 の実態と将来展望

21世紀は「水の世紀」とも呼ばれ、人口増加や地球規模の気候変動に伴う水不足が懸念されます。石油を巡って争われた20世紀に対し、21世紀は水を巡る争いになるとまで言われることもあります。この水問題に対し、世界各地での現地観測や調査研究をグローバルな視点で結び付け、自然の水循環、それを利用している人間社会の実態を明らかにし、世界の水問題の本質を見極め、水という側面から未来可能性のある社会の構築への道筋を示すことがこのプロジェクトの目標です。

プロジェクトリーダー ■ 鼎 信次郎 総合地球環境学研究所

何がどこまでわかったか

「実態を明らかにし将来展望を描く」という最大目標に関しては、世界でもほぼ最先端の世界水循環・水需給の推定を行い、それらの将来展望を行うことに成功しました。例えば地球水循環に関しては、過去100年(1901-2000)の日々の陸域水文学量(流出、蒸発、土壌水分、積雪、洪水・渇水等々)の変動を世界で初めて再現し、同時に将来100年についても幾つかの手法により推定値を作成しました。また、現在および将来100年の世界の水需要量も推定し、それらを統合することによって、現在および将来の世界の水逼迫度を算定しました。

地球環境学に対する貢献

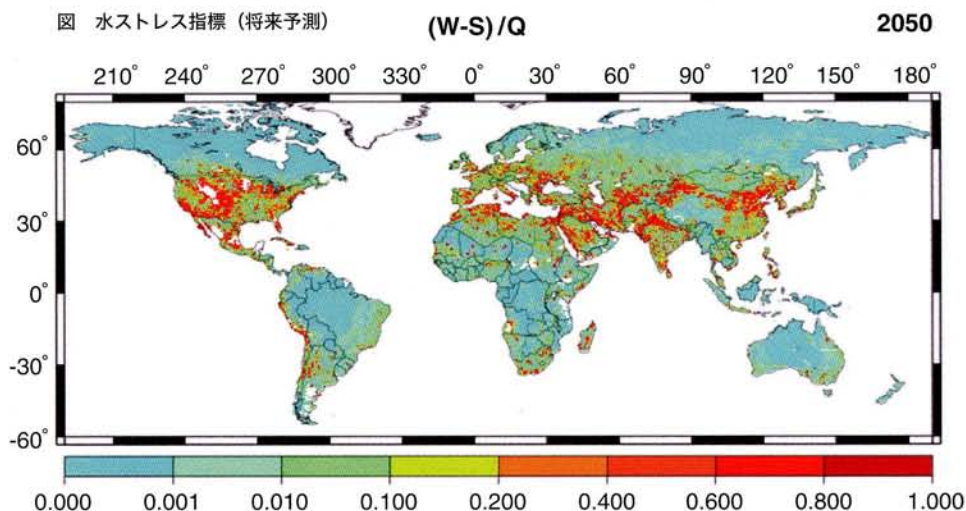
本研究は自然と人間の相互作用を視野に入れつつ、地球規模の水循環を明らかにしました。これまで地球の自然水循環に関する研究は多数ありましたが、人間活動の影響はあまり考慮されていませんでした。この意味で人的要素を加味した我々の研究は、自然と人間の相互作用を重視する、い

わゆる「地球環境学」的研究の一例になり得ると考えられます。またグローバルな視点だけでなく、具体的な地域(タイ、カリフォルニア)の水問題を対象とした研究も進めました。そこでは水問題解決に向けた具体的な政策の分析が行われ、この点でも文理融合的な研究が進められました。

成果の発信

前リーダーがIPCCおよびミレニアムアセスメントのリードオナーであることから、IPCC/AR4への成果反映が期待されます。また、Scienceの淡水特集の冒頭を飾ることによっても国際社会に向けて大いに成果を宣伝しました。また特にVirtual Waterに関する我々の成果図が、幅広くマスコミに取り上げられたこともあり、国内向けの成果発信も十分に達成できたと考えております。最後に、今後、水関係のプロジェクトが立ち上げられた際、我々の作成した図が何らかの発想の種になってくれれば幸いです。

図 水ストレス指標(将来予測)



この図に示されているのは「2050年に、それぞれの地域で使用している水の量」を「2050年に、それぞれの地域で使用可能な水の量」で割った値である。この値が大きいところ(黄色や赤色のところ)は、水をほとんど使い果たすと予想される場所であり、いわゆる「世界水危機の「ホットスポット」」の候補地である。