海外レポート

世界灌漑農業アトラスが可視化する水と農業の関係

神戸大学大学院農学研究科
長野　宇規
小寺　昭彦

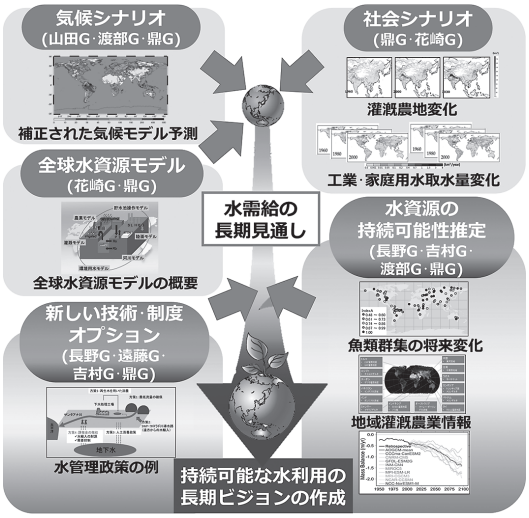
1．はじめに

私たちは世界の様々な場所において、作物の種類と栽培暦、土地利用の変化、洪水や干ばつなどの極端気象現象への反応を、衛星画像を主に用いながら分析している。ゆくゆくは世界全域の灌漑農業の動態を把握したいと思っている。本稿では今まで4年間の研究を通して見えてきた各国の農業と水の関係について、簡単に紹介したい。

2．世界の将来の水利用の見通し

この取り組みはJST（科学技術振興機構）が主催し、我が国の社会的・経済的ニーズの実現・革新を起こすためのチーム型研究であるCRESTのプロジェクト、「世界の持続可能な水利用の長期ビジョン作成（研究代表者：東京工業大学、鼎信次郎）」の一環として行われている。このプロジェクトは最新の気候変動データと今後の水利用の社会シナリオ、土地利用変化を組み合わせ、世界の大河川流域での今後の水利用を見通すことを目的とする（図―1参照）。

見通しを立てるには、まず各国の人口予測データを利用し、各国における人口分布の時系列を未来まで作る。次にその人々の水利用（生活用水、工業用水、農業用水）の原単位を仮定して、食糧需要を満たすように農地の分布を増やしていく。増やし方にはルールがある。まず過去から現在までの土地利用変化を整理し、河川流量、現存するダムや将来のダムの建設予定までを踏まえ、地表水を使える場所に農地を増やし、地下水が利用可能なところにも農地を増やしていく。それでも増加する食料需要を満たせない場所も出てくる。これに将来の気候変動データが提供する降雨量や気温を重ね、氷河からの流出も考慮して各河川の流量を予測すると、温暖化した世界においての洪水や水不足の頻度が見えてくる。



図―1　CRESTプロジェクト「世界の持続可能な水利用の長期ビジョン作成」の概要　（鼎、2009）

では洪水や干ばつが起きた場合に、地域的にはどのような影響が出るのだろうか。このプロジェクトでは、河川生態系と農業について、将来の気候変動との関係をより現実的に描写しようとしている。地域によって異なる農業の動態を把握し、世界規模の変化の地域への影響を描き出すのが私たちの役割である。

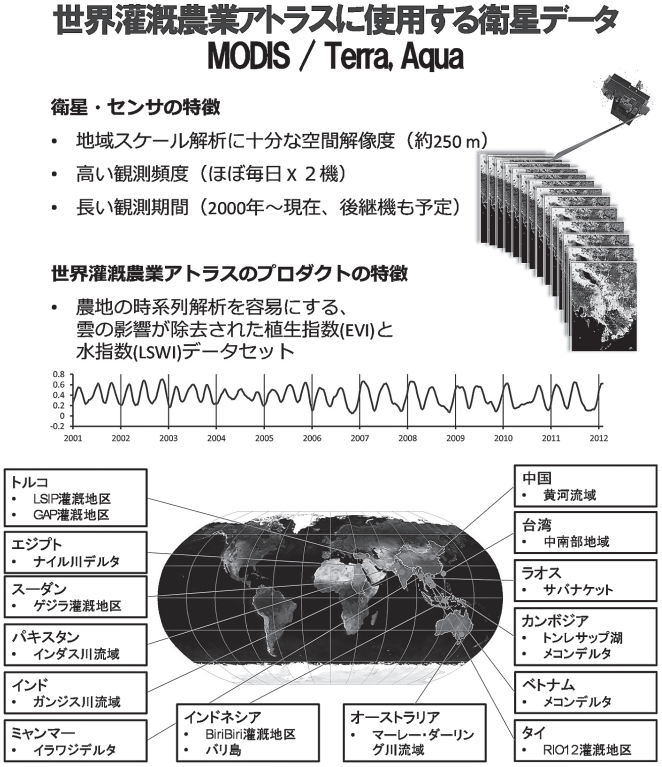
3．世界灌漑農業アトラス

将来農業に何が起きるのか考えるためには、まず過去から現在にわたって何が起きてきたのかを整理する必要がある。NASAの2つの地球観測衛星Terra、AquaはMODIS（中分解能撮像分光放射計）というセンサーを搭載し、36の波長帯で高緯度を除く地球全域を高頻度で撮影している。解像度が粗いものの（250～1000m）、そのデータは無償で公開されている。観測は2000年に開始されていて今年で運用15年目を迎える。

解像度が250mの波長帯の場合、判別可能な最小面積は6ha強となるので、日本やアジア

の小農地域では圃場一枚一枚は判別できないが、同じ場所の変化を毎日捉えることができる。可視光と近赤外域の観測波長を組み合わせると単位面積あたりの植生量を示す植生指数（ＥＶＩ）の時系列が作成でき、そのパターンから作物判別が可能となる（図―２）。これ以外にも陸面水指標（ＬＳＷＩ）を用いると、洪水による冠水を可視化することもできる。

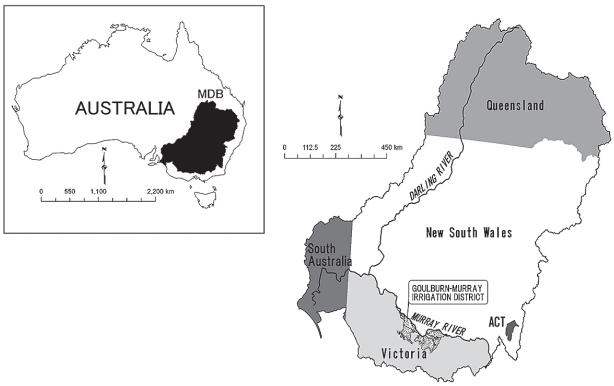
このＭＯＤＩＳデータを用いると、現地に赴く前に、その地域の農業の２０００年来現在までの動態を仮説的に分析することができる。そして現地調査に赴き、現地の研究者や技術者から情報提供を受け、解析を改良し、そのデータは協力者に無償で提供してきた。比較的手間のかかる方法だが、現地のニーズを汲み取りながら有用な情報構築を行うことができた。研究対象とした国は現在15ヵ国だが（図―２）、やがては世界を網羅できると考えている。そんな願いを込めて、この情報構築を「世界灌漑農業アトラス」と名付けた。以降水資源管理に特徴のある国々を訪れ、分析を進めながら見えてきたことを点描したいと思う。



図―２　世界灌漑農業アトラスのプロダクト概要と対象地域

４．オーストラリアの大干ばつと水利権改革

干ばつと農業生産の関係を見るため、まずオーストラリアの農業生産額の４割弱を担う大陸南東部、マレー・ダーリン川流域に着目した。この地域は統合的水資源管理の先進地である一方、21世紀に入ってから、10年にわたる長期の干ばつに直面した。マレー・ダーリン川は流域面積１００万㎢を誇り、クイーンズランド州、サウス・ウェールス州、ヴィクトリア州、サウス・オーストラリア州の４州にまたがる（図―３）。乾燥・半乾燥気候が卓越するため、流域平均降雨量５３０㎜のうち94％は蒸発し、河川流出となるのはわずか４％である。



図―３　オーストラリア、マレー・ダーリン川流域

オーストラリアの水資源管理はもともと各州の権限下で行われてきた。しかし灌漑農業の拡大に伴う下流地域での水不足と水質悪化（塩類化、富栄養化）が深刻化し、都市民からは河川生態系保全の声が高くなった。その対策として１９８７年に水取引が導入され、１９９８年以降は州間の水取引が可能となった。水取引の前提として農家の水費は従来から水車型の流量計を用いた従量課金制であった。一方水路は極めて簡素な開水路で、蒸発や漏水が多かった。そこで州政府は巨額の投資により水路のライニングと末端水路の管路化を進め、さらに集中管理型の高精度計量堰を流域内のすべての水路分岐、取水口に設置した。この工事により、農家はオンラインで必要時に水を購入できるようになった。そして水利権改革により水利権と土地は完全に分離された。工事は税金により受益者負担なしで行われた一方、工事により達成された節水量の３分の１ずつの水利権が、都市用水、環境用水に転用され、残りが従来の水利権者の水利権水量として再分配された。

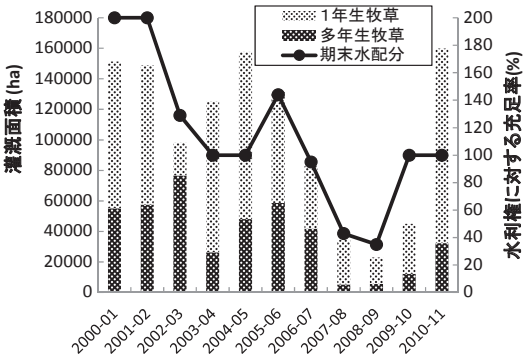
マレー・ダーリン川流域の流出は、巨大な洪水でない限り全量がダム群に貯水される。水利権はダムが満水貯水された場合の利用可能量と

して付与される。灌漑シーズンが始まるとダムの貯水量に応じて2週間ごとに利用可能水量が告知される。この水量は「水配分」と呼ばれる。降雨が少なく、ダム貯水量が低い場合は勿論水配分は少ない。取引は大きく分けて、水利権全体を取引するものと、水利権の水配分のみを取引するものの2つがある。渇水年は水配分が少ないので、当然取引価格は高騰する。

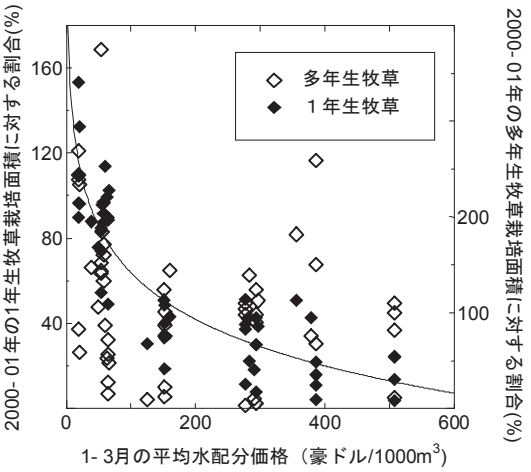
では10年間の干ばつで何が起きたのだろうか。対象としたのは、マレー・ダーリン川中流域、ヴィクトリア州に位置するGoulburn Murray灌漑会社の管轄灌漑区である。ここでは家畜飼料用に灌漑により多年生の牧草と一年生の牧草が栽培されている。時系列衛星画像分析を利用し、2000年から2011年までの多年生牧草と一年生牧草の栽培面積を比較すると図―4のようになった。図中の折線は水配分の水利権に対する充足率を示している。水利権は100年中96年充足される「高信頼度水利権」と不確実性の高い「低信頼度水利権」に分けられており、図では100%までが高信頼度水利権量、100~200%が低信頼度水利権量として示してある。実際の期末の水配分の充足率が100%程度であり、高信頼度水利権のみを満たした2003~2005年、2010~2011年は大干ばつ、充足率が50%を下回った2007~2009年は危機的な干ばつであり、栽培面積も大きく影響を受けていることがわかる。次に各年の灌漑最盛期の水配分価格と多年生牧草・一年生牧草の栽培面積を比較したものが、図―5である。横軸は水配分1000㎥あたりの価格（豪ドル）を示している。水配分価格が80豪ドルを超えると一年生牧草の栽培面積が激減していた。これに比べると多年生牧草は水配分価格の高騰に対し栽培面積が漸減しているのみであった。干ばつにより水価格が高騰すると農家は一年生牧草の栽培を放棄し、水を販売して対価を得るという行動が明らかになった。これで栽培時の約60%の収入が確保できるからである。従来この地域では多年生牧草の栽培が主体であったが、干ばつ時に高い水費を支払って多年生牧草を維持することにはリスクが生じる。そこで農家は長引く干ばつの中、多年生牧草より一年生牧草を育てる行動にシフトしたことが図―4から読み取れる。干ばつ時、流域内では米や綿花などの一年生作物の栽培農家は常に水の価格の推移を見ながら栽培を継続すべきか、水利権を売るかを判断している。一方、果樹栽培や畜産業など、水をどうしても必要とする水利権者は干ばつで自らの割り当て量が不足すると、高い取引価格でも水を市場から購入して確保する。つまり渇水時でも河川協議のように公的機関が介在して統一的な取水制限をすることなく、限界収益の異なる生産者間の自主的取引によって水量調整がなされる。

結果として流域では水取引がなかった場合に比べ、柔軟に干ばつに対応し、経済被害は最小限に留めたということもできる。水利権の転用により都市用水と最低限の河川維持水量も確保できた。しかし、調整がうまくできたことと農家の被害は別である。水利権取引にうまく適応できなかった農家もあっただろう。結果として地域の開拓から長らく農業を行ってきた家族経営的農家は駆逐され、残ったのは資本力のある企業農家と採算を度外視できる趣味的農家（第二種兼業農家）となった。

現在水取引には農家だけでなく土地を所有しない民間資本も参加できるようにシステムが改



図―4　ヴィクトリア州Gouburn Murray灌漑会社管轄内Torrumbary灌漑区における多年生牧草と一年生牧草の栽培面積（棒グラフ、左縦軸）と水利権割当（右縦軸）の推移。水利権に対する充足率は100%までが高信頼度水利権量、100～200%が低信頼度水利権量（小野ら、2012）



図―5　ヴィクトリア州Goulburn Murray灌漑会社管轄内の多年生牧草、一年生牧草の栽培面積（2000～2011年）と1,000㎥あたり水配分価格の関係（小野ら、2012）

変されつつある。市場参加者を増やし、流動性を高めることが狙いである。この中で州政府は水利権を売買しながら試行錯誤で環境用水の確保を行っていた。公共セクターも市場参加者として収益を上げる経営が求められていた。水を「経済的資源」と位置づける考え方は統合的水資源管理における「合理的管理」に適うものであるが、その地平には裸の資本主義が待ち受けていると感じた。現地の技術者の話では、水の合理的管理が達成された一方、地域コミュニティは家族経営的農家の撤退で大きく変容したそうである。

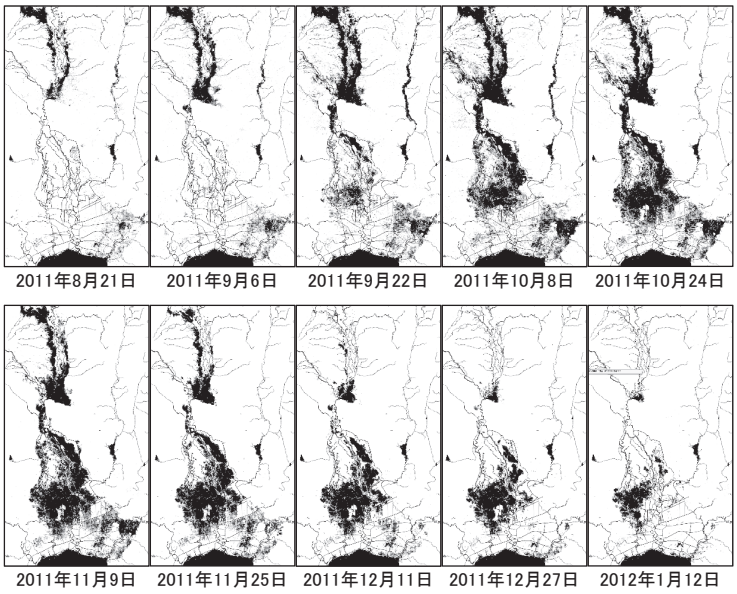
5．チャオプラヤ川下流域の洪水への対応

２０１１年のタイ、チャオプラヤ川の大洪水は、日本企業が工場拠点とするアユタヤにも大きな被害をもたらしたことから、我々の記憶にも新しい。チャオプラヤ川下流域での洪水は実は毎年起きているが、２０１１年の洪水は未曾有であった。５月から10月までの降水量が長期平均値より40％以上多く（沖ら、２０１１）10月はじめには上流の大ダムも満水となり、調整が不可能であった。

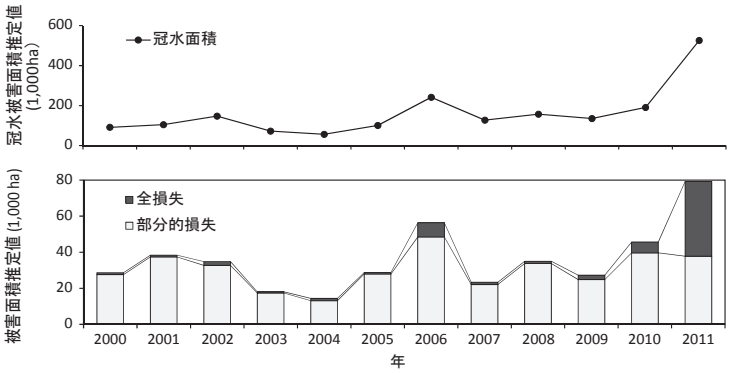
大洪水により農業の被害はどれほどだったのかを計測してみた。チャオプラヤ川流域ではコメの２期作が盛んで、場所により他の作物も含めて年３回耕作が行われる。耕作は洪水のタイミングを避けるように行われている。コメの収穫期に冠水に見舞われれば、収穫が台無しであるからである。

まず時系列衛星画像解析で作物の収穫時期の特定を行った。次に洪水による冠水域の広がりの時系列を作成した。例として図―６に２０１１年の洪水の冠水域を16日間隔で可視化したものを示す。この２つを比べ収穫前に洪水による冠水が到達していれば、収穫の全てか一部が被害を受けたと仮定した。図―７に２０００年からの２０１１年までの毎年の最大冠水面積と農業被害面積の関係を示す。冠水域の面積と農業被害面積には対応関係が見られた。一方この12年間で農業被害を２回以上受けた地域は存在しなかった。このことは重要なことを示唆している。人間は洪水被害を受ければ、同じ過ちは繰り返さないよう適応するのである。

タイ政府は２０１１年の洪水を受けて、排水路と堤防の強化とともに、今まで利水優先であったダム貯水量の管理を治水優先に改定することにした。農家は以前から年３回の耕作を禁止されていたそうであるが、規制は有名無実であった。今後は洪水時バンコクや工業地域を守るため、農地への冠水による調整をより積極的に行いそうである。農家の耕作状況の監視のため、タイの王立灌漑局は２０１３年、技術者を当研究室に派遣して時系列衛星画像解析法を習得させた。



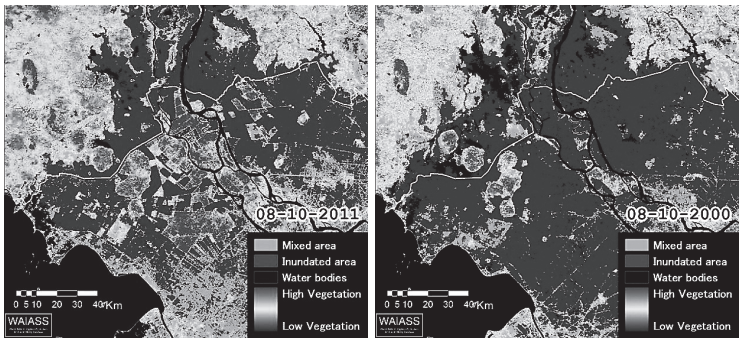
図―６　2011年のチャオプラヤ川下流域における冠水域の時系列変化（16日間隔）。黒色の部分が冠水域である。（Kotera and Nagano, 2012）



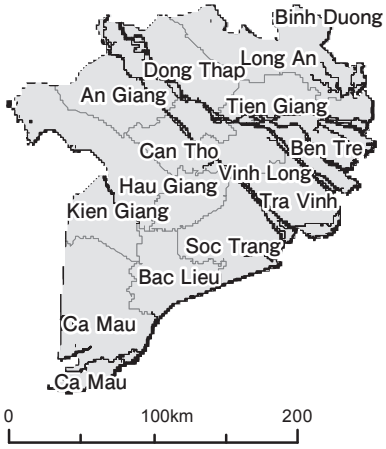
図―７　2000年から2011年のチャオプラヤ川下流域における雨季の冠水域面積（上）と稲作の冠水被害（下）（Kotera and Nagano, 2012）

6．輪中化するメコンデルタ

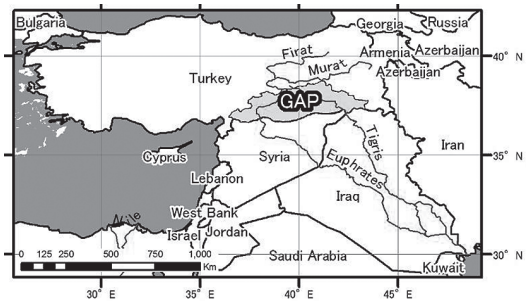
チャオプラヤ川と同様にメコン川のデルタ



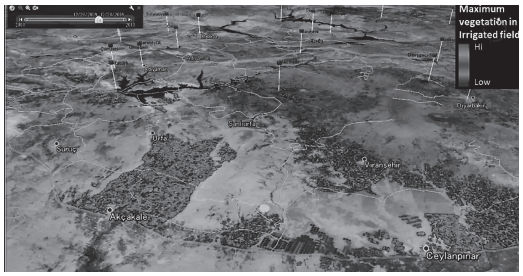
図―9　2000年（右）と2011年（左）の冠水域の比較。MODIS衛星画像による判別結果。色の濃いエリアが冠水域。色の薄い部分が非冠水域（輪中）（小寺ら、2013）



図―8　メコン川下流域（ベトナム領）の概要　（小寺ら、2013）



図―10　トルコ東部の南アナトリア開発計画（GAP）対象地域



図―11　世界灌漑農業アトラスによってGoogle Earth上で可視化した南アナトリア開発計画（GAP）の灌漑農地。手前左がハラン平原、その上がアタチュルクダム。

（カンボジア、ベトナム）でも農業生態系は洪水へ適応する形で展開してきた。水さえ十分に確保できれば、2期作はたやすい。今ベトナム領内（図―8）では輪中化を進めることによりさらなる農業生産の追及に邁進している。農地の周りに堤防を築くことにより、洪水期の冠水を回避し、洪水のリズムの束縛から逃れることで、コメの3期作、時には2年で7回の耕作をこなすようになりつつある。

輪中の建造は2000年の大洪水を契機にベトナムのアンジャン省を中心に広まった。当初は海外援助からこの動きが始まったが、後に農民自らが投資するようになり、10年を経て輪中はメコン川の流路を遮るように60万haの広域に展開するようになった（図―9）。堤防はブルドーザで土寄せをした簡易なものである。2011年、一帯は輪中建造が始まって以来、初めての大洪水に見舞われた。この時いくつかの輪中の堤防が決壊し、却って大きな被害が出る結果となった。輪中に遮られた洪水は上流のカンボジア側の冠水期間を長くするという悪影響も引き起こした。ベトナムでは洪水の排水を促すため、西のタイ湾に向けて複数の排水路を掘削している。デルタの肥沃さは、本来洪水の氾濫によってもたらされてきたものであるが、輪中化が更に進むとデルタ下流に洪水が及ばなくなることも長期的には懸念される。

7．トルコで進む政府主導の大規模灌漑農地開発

トルコ共和国の東部では新たな灌漑農地が急速に増加している。南アナトリア計画（GAP）はトルコに源を持つチグリス・ユーフラテス川水系に22のダムを建設し、水力発電とともに180万haの灌漑農地を創出する、貧困対策の性格を持った地域開発計画である（図―10）。1980年代後半に開始された計画は、財政難で長らく滞っていたが、近年になって加速的に進行している。

トルコの農業は放牧と天水の小麦栽培が原型であり、灌漑農業が本格的に始まったのは1960年代以降である。水資源開発は国家水利総局が管轄している。トルコの行政の特徴は強い中央集権であり、水資源開発は国家主導で行われている。

ハラン平原（図―11）はGAPで最初に開発された灌漑農地で、約15万haの面積を誇る。1995年に灌漑が開始してからわずか数年で末端部での塩害が深刻化した。灌漑農業を初めて行う人々の教科書的な過剰水利用の結果である。GAPの中核として建造されたアタチュル

クダムは４８０億ｔの貯水量を持つ。現在の受益農地はまだ40万haであり、今のところ水は十分にある。しかし地球温暖化によってこの地域の降雨は大幅に減少すると見込まれており、１８０万ha全てが灌漑されると破滅的な結果を招きそうである。

私たちは現在トルコの研究者と共同でＧＡＰにおける統合的水資源管理を推進しており、水資源モデルを用いて開発の妥当性と地球温暖化の影響を検証しようとしている。一方ＧＡＰは下流国であるシリア、イラクとの水紛争の種であり、流域の水文気象情報やダム管理情報は、政府と良好な関係を持っていても機密扱いのために入手ができない。

こんな時に灌漑農業アトラスが役に立つ。毎年の灌漑面積の変化と栽培作物を把握できれば、作物用水量と水利用効率を乗じて灌漑農地の水使用量を把握することができる。また巨大ダムの場合、水面面積の毎日の変化が衛星から捉えられると、ＮＡＳＡなどが公開している全球標高データの利用で貯水量も概算することができる。

8．データに基づく対話

今日誰もがスマホの地図情報などで、衛星画像や地理情報（ＧＩＳ）を気軽に活用する時代となった。衛星画像自体も無料公開のものが増えている。私たちが頻繁に利用しているＭＯＤＩＳも無料であり、昨年からＬＡＮＤＳＡＴの最新画像や過去の画像も無料公開されるようになった。一方で独自の地図情報を作成する労力やノウハウの敷居は未だに高い。衛星画像解析ソフトは市価１００万円以上する上、解析にも専門的知識が必要である。

私たちは利用者の要望に応じて情報を無料で作成している。地域レベル、国レベルの広域データを過去15年分提供することにより、初めて訪れる場所でも現地協力者との良好な関係を確立できる。それまでの海外調査ではデータ入手と現地協力者との良好な関係の確立のために少なからずの研究予算を「外交的」に使用してきたことを考えれば革命的である。データを見るのも簡単である。Google Earth 上で動作するファイル形式や動画を用意しているので、スマホやタブレットがあれば、農家、政府関係者、研究者の分け隔てなく、誰でも操作し、自分の興味のある場所を手軽に見ることができる。現地の防災、水管理の改善、合意形成など、使用者の発想で役立ててもらいたい。

9．おわりに

世界灌漑農業アトラスは地域における地球温暖化対策の広域モデリングの入力・検証データとしての性格と、地域レベルでの水資源管理・合意形成のツールとしての性格を併せ持つ。プロジェクトの開始から４年半が経過し、条件の異なる様々な国で試行を行った結果、情報構築の勘所は大分掴めた気がする。

昨年からＬＡＮＤＳＡＴ８の運用が始まり、データが無料で公開されたことを受けて、日本でも時系列衛星画像解析を農業管理に利用することが格段に容易になった。読者の方の土地改良区でも試行されたい場合は連絡を頂きたい。

今後５年間は大陸スケール、全球スケールでの情報構築を進めたいと思っている。この情報構築は日本の農業戦略、海外援助戦略にとっても極めて有用になると確信する。今年度で本研究に対する５年半にわたる科学技術振興機構の支援が終了する。タイ・メコン川下流域の解析には㈶日本水土総合研究所にもご支援いただいた。大きな課題にじっくり取り組ませていただいたことを深く感謝したい。今後は本研究の受益者となる可能性の高い農水省やＪＩＣＡに是非直接研究支援をしていただきたいと願っている。

（参考引用文献）
・鼎信次郎：（２００９）世界の持続可能な水利用の長期ビジョン作成、ＣＲＥＳＴ領域「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」、独立行政法人科学技術振興機構（ＪＳＴ）
http://www.water.jst.go.jp/project/index.html#post-80
・小寺昭彦、長野宇規：（２０１３）ベトナム・メコンデルタにおける輪中農業のレジリアンスと脆弱性、（ＡＲＤＥＣ）（No.48:18-22）
・小野由美子、小寺昭彦、長野宇規：（２０１２）水利権市場における農家の渇水対策の分析、農業農村工学会全国大会、北海道大学、札幌、２０１２年９月
・沖ら：（２０１１）２０１１年タイ水害調査結果（第四報）、東大沖研ＨＰ、http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/Mulabo/news/2011/ThaiFlood2011.html
・Kotera, A., Nagano, T：(2012) Assessing Flood Damages of Rice in the Chao Phraya Delta, Using MODIS Satellite Imageries, PAWEES 2012 -International Conference on “Challenges of Water & Environmental Management in Monsoon Asia.” Nonthaburi, Thailand, 27-28 Nov. 2012.

ながのたかのり・
神戸大学大学院　農学研究科　准教授
こてらあきひこ・
神戸大学大学院　農学研究科　学術推進研究員