

流域水資源および農業への 温暖化影響評価に関する世界の先進研究調査

吉田武郎*・増本隆夫**・堀川直紀*

目 次

I 緒言	285	2 乾燥農地の水循環・収量予測モデル	291
II 影響評価研究における基盤技術	285	3 気候変動が食料生産に与える影響に関する 情報提供サービス	291
1 全球気候・流量データベース	285	V 結言	292
2 ダウンスケーリング	287	参考文献	292
III 地球温暖化が水資源に及ぼす影響	287	Summary	294
1 全球スケールの水資源への影響評価	287	参考資料	295
2 流域スケールの水資源への影響評価	289	I 調査の全行程	295
IV 地球温暖化が食料生産に及ぼす影響 評価	291	II 訪問した機関・大学の概要と研究分野	296
1 将来気候値を用いた食料生産予測手法	291		

I 緒言

地球温暖化に伴う気候変動に関連して関心が大きい課題の一つは、降水量やその分布、降雨強度等に代表される地球上の水循環がどのように変化するか、そしてそれが我々の生活にどのような影響を及ぼすかという点である。地球温暖化が将来、我々の生活や環境に及ぼす潜在的な影響を評価することが急務であり、これらの研究課題に対しては、気候学から水文学、農学まで各国で幅広い分野の研究機関が取り組んでいる。現在研究を進めている分野の全体像を概観するとともに、先進事例を収集するために、平成21年2月15日から3月8日の22日間にわたり、世界7カ国の14研究機関・大学を訪問し、地球温暖化に係わる分布型水循環モデルの開発と利用、大気大循環モデルと分布型水循環モデルの結合、地球温暖化の水資源・農業への影響評価に関する研究事例調査を行った。ここでは、1) 地球温暖化の影響評価に関する基盤研究・技術、2) 流域レベルの水資源への影響評価、3) 農業・食料生産に与える影響評価を中心にその概要を報告するとともに、農業における水資源分野の影響評価に向け、今後取り組むべき課題についてまとめた。

* 農地・水資源部 水文水資源研究室

** 農村総合研究部 地球温暖化対策研究チーム（兼農地・水資源部 水文水資源研究室）

平成21年12月14日受理

キーワード：気候変動，地球温暖化，影響評価，農業，水資源

Table 1, Fig.1に訪問した研究機関，大学を示し，調査の全行程と，それぞれの機関の概要や個別の研究テーマやその成果を，末尾に参考資料として示す。

なお，本調査は，農林水産省農村振興局海外土地改良技術室から(財)日本水土総合研究所を通して受託した「かんがい施設温暖化適応策検討調査に係る温暖化影響予測評価業務（H20～24年度，最終年は予定）」の元に行われた。また，訪問先の情報収集や現地との調整に当たっては，小尻利治・寶馨（京都大学防災研究所），国安法夫（FAO日本事務所），小野寺文彦（FAO本部），村瀬勝彦（WMO），森健（在豪州日本大使館参事官），小林保幸（在フランス日本大使館一等書記官），安中正実（国際農林水産業研究センター），藤田光一（国土交通省国土技術政策総合研究所），吉谷純一（土木研究所），上田達己（イーストアングリア大学）の諸氏（敬称略，いずれも当時の所属）の協力を得た。ここに記して，感謝の意を表す。

II 影響評価研究における基盤技術

1 全球気候・流量データベース

地球規模の気候変動については，長期間の全球規模の気候，流量の観測データの蓄積によって，その解明と検証がなされており，現在も世界気象機関 World Meteorological Organization（WMO）の下，気候，水文データのデータベースの構築と共有，気候変動に関する情報提供サービスは強化されつつある。

Table 1 訪問した機関 (訪問順)
Visited institutes and universities in chronological order

機関・大学名	英名 (略称)	所在地
生態・水文研究所	Centre for Ecology & Hydrology (CEH)	Wallingford, イギリス
ラフバラー大学	Loughborough University	Leicester, イギリス
イーストアングリア大学	University of East Anglia	Norwich, イギリス
ポツダム気候影響研究所	Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)	Potsdam, ドイツ
ドイツ連邦水文研究所	Federal Institute of Hydrology (BfG)	Koblenz, ドイツ
世界気象機関	World Meteorological Organization (WMO)	Geneve, スイス
国連食糧農業機関	Food and Agriculture Organization (FAO)	Rome, イタリア
フランス国立農業研究所	National Institute for Agricultural Research (INRA)	Paris, フランス
フランス国立気候温暖化影響観測網	National Observatory on Impacts of Climate Warming (ONREC)	Paris, フランス
米国地質調査所	United States Geological Survey (USGS)	Reston, アメリカ合衆国
米国農務省農業研究局	United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS)	Beltsville, アメリカ合衆国
アリゾナ大学 乾燥地流域持続性研究センター	University of Arizona Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas (SAHRA)	Tucson, アメリカ合衆国
米国農務省農業研究所 南西流域研究センター	United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS), Southwest Watershed Research Center	Tucson, アメリカ合衆国
豪州科学研究機構 ブラックマウンテン研究所	Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (CSIRO), Black Mountain Laboratories	Canberra, オーストラリア

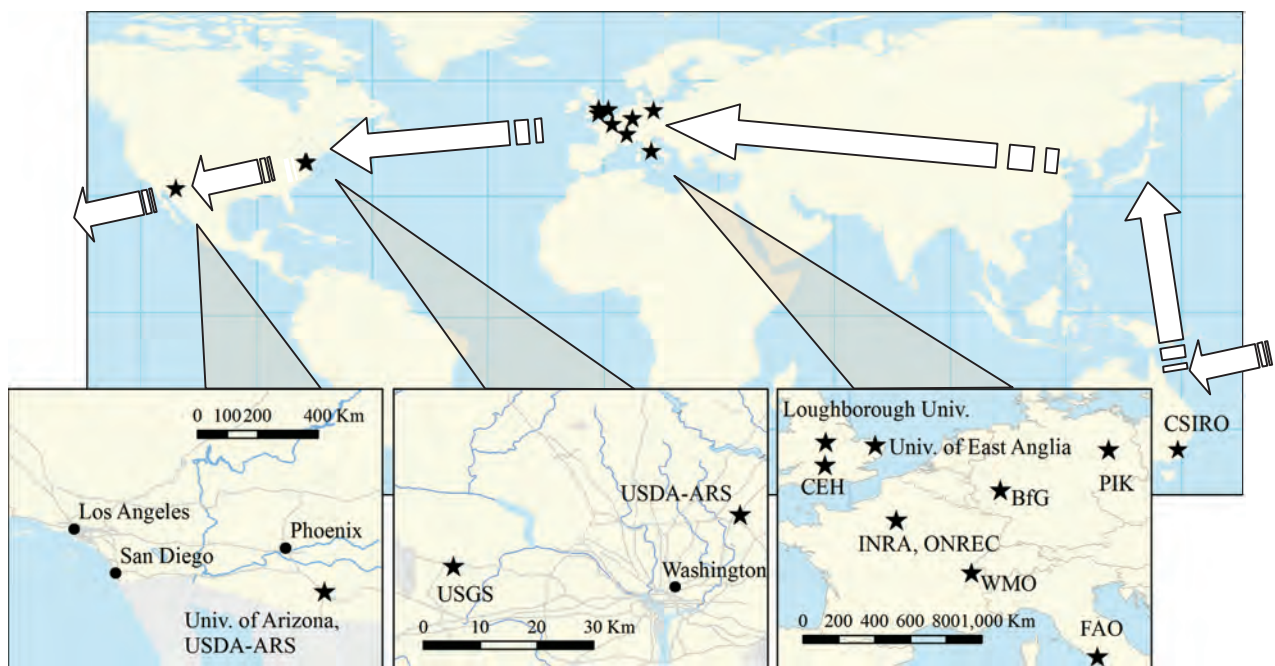


Fig.1 訪問した研究機関の位置
Locations of visited institutes and universities

WMOの世界気候研究計画 World Climate Research Program (WCRP) は、WMO、国際科学会議 (ICSU) および国連教育科学文化機関 (UNESCO) の政府間海洋学委員会 (IOC) がスポンサーとなり 1980 年より実行されている世界気候計画 World Climate Program (WCP) のサブプログラムの 1 つである。WCRP は、気候の予測可能性および人間活動の気候影響の程度を評価するために必要な、基礎的な気候システムおよび気候プロセス

の科学的理解を発展させることを目的とし、その研究分野は 10 年ごとに重点化が図られている。これまで、第 1 期には地球気候システムの現象解明と人間活動の影響評価、第 2 期には全球の気候観測の重要性の認識に重点が置かれてきたが、現在の第 3 期では気象、気候のデータを関連機関に提供するサービスに重点を移し、気候変動研究者と影響評価研究者、行政機関との情報交換を図ることが重要な目的の一つとなっている。

全球気候データの収集とそのデータベース化において世界の気候変動研究に大きな役割を果たしているのが、イギリスのイーストアングリア大学（University of East Anglia）にある気候研究ユニット Climate Research Unit（CRU）である。1972年に設立された当初のCRUの役割は全球の気候データを可能な限り集め、気候の長期変動の形成過程、植生との相互影響の現象解明を行うものであった。1978年には、これを発展させて全球の陸域における気温グリッドデータの作成が開始され、その後イギリス気象庁との協働により海域にもその対象が拡張され、過去157年間の地球の気温上昇傾向を明らかにした。この研究成果についてのサッチャー首相と当時の所長Tom Wigley氏の会談により、イギリス政府は気候変動研究の重要性を認識し、気象庁傘下ハドレー気候研究センター Met Office Hadley Centreの設置に結びついた。さらに、CRUでは降水量の全球データも同様に作成し、このデータベースは現在気候値の再解析データ作成に関する基礎的なデータとなっている。再解析データとは、風、気温、水蒸気場や降水量等の全球観測値を、データ同化システムによって力学的な整合性を図ったものであり、統一的な解析手法のもとで再現された現在気候の長期データである。CRUの作成したデータベースに基づく再解析データによって気候の長期的変動が見いだされ、今回訪問した他の研究機関をはじめ、多くの研究機関で用いられている（Rost et al., 2008, Meigh et al., 1999）。

全球気候のデータ配信に関しては、CRUが主体となつて行われたLINKプロジェクト（Climate Impacts LINK）では、ハドレーセンターの気候予測値を影響評価研究者に提供する枠組みが構築された。この枠組みを活用し、再解析値および全てのGCMの気候予測値の整備、配布を行うIPCCデータ配布センター（Data Distribution Center）が設立、運用されている。それにより、2009年から、英国全土の将来気候シナリオ（5kmグリッド、日単位）を、インターネットで配信するプロジェクトが開始されている。

気候のデータベース化に比べて、全球水文データベースの構築は遅れていたが、WCRPの下、全球流量データセンター Global Runoff Data Center（GRDC）が、ドイツ連邦水文研究所 Federal Institute of Hydrology（BfG）に設置、運用されている。GRDCは各国の水文行政機関との連携を図り、大河川の流量データを収集、データベース化、公開を行い、地表水の水文学に関する全球規模の情報交換を円滑に行っている。データは使用者の要求に応じて無料で公開され、政策決定者に対して水文学的問題の解決に必要な情報が提供されている。

2 ダウンスケーリング

数十～数百kmの空間解像度と、1日～月単位の時間解像度を持つ大気大循環モデル General Circulation Model

（GCM）の計算結果を、対象とする時間、空間領域での細かいスケールまで細分化することをダウンスケールとよび、GCMによる計算値と観測気象データの統計的な関係に基づく統計的ダウンスケールと、細かい格子間隔で計算する領域気候モデル Regional Climate Model（RCM）をGCMに組み込む（ネスティング）力学的ダウンスケールに大別される。統計的ダウンスケールやGCM、RCMには多数の種類があり、近年ではLinuxやWindows上で起動する多くのパッケージモデルが開発され、研究者だけでなく多くの実務者により用いられている。

計算の初期値・境界値や、物理過程のパラメタリゼーションに起因する不確実性によって、GCMやRCMの解析結果には系統的誤差（バイアス）が含まれ、IPCCの報告書等では、できる限り全ての原因を考慮した予測値の信頼幅の定量表示を目指している。初期値に起因する不確実性を評価するためには、初期値を少しずつ変えながら計算を繰り返すを行い、その結果を統計的に処理する方法（アンサンブル法）が採られる。他方、物理過程のパラメタリゼーションに起因する不確実性の定量的評価には多くの手法があるが、世界各国で開発された複数のGCMによって再現された物理過程の比較研究（マルチモデルアンサンブル）が、その一つとしてあげられる。例えば、EUの出資によるプロジェクト ENSEMBLES（2004～2009年）は、将来気候の予測を複数のGCM、RCMを用いてアンサンブル予測を行うためのシステムの構築と、人間活動によるフィードバックに起因する不確実性の減少を行っている。

III 地球温暖化が水資源に及ぼす影響

地球温暖化が水資源に及ぼす影響評価は、GCMやRCMの計算値を集中型や分布型の水循環モデルに入力して行われるが、その際、GCM計算値や全球気候データセットを直接入力値とし、全球や大陸規模の水循環への影響を評価する研究と、GCM計算値をダウンスケールして流域スケールの研究を行うものに大別される。

1 全球スケールの水資源への影響評価

ドイツポツダム気候影響研究所 Potsdam Institute for Climate Impact Research（PIK）で開発中のLPJmL（Lund-Potsdam-Jena managed Land）は、陸面過程、植生モデルが統合された全球モデルで、この100年間の全球気候データセットを入力として、全球スケールの灌漑農業の発達、植生の変化傾向を高い精度再現することができる。LPJmLは、9種類の自然植生と、12種類の灌漑・天水農業を含めた植物の生育と、それに伴う炭素、水移動量をダイナミックに計算する全球植生モデルで、0.5度のグリッドで日単位の計算を行う。LPJmLの特徴のひとつは、河道流モデル、貯水池モデル、灌漑モデルに

改良が加えられ、河川、湖沼、貯水池からの取水、灌漑に起因する蒸発散量「ブルーウォーター」と、降水に起因する蒸発散量「グリーンウォーター」を明確に区別し (Fig.2), それらを全球で定量化できることである (Fig.3)。1901年から2003年までの気候データセットをこのモデルに適用した研究結果では、現在までの全球の植生分布の変化が過去の気候データをよく反映していることや、天水・灌漑農業、その他生態系システムによる水消費量の定量的な評価が可能であることが明らかにされている。また、農地の水循環は、全球規模で見れば小さいものの、灌漑が卓越した流域においては農業用取水の流域への影響が大きいことが確認されている。ただし、水田水利用などのアジアモンスーン域の特徴的な水利用が組み入れてあるかは不明である。

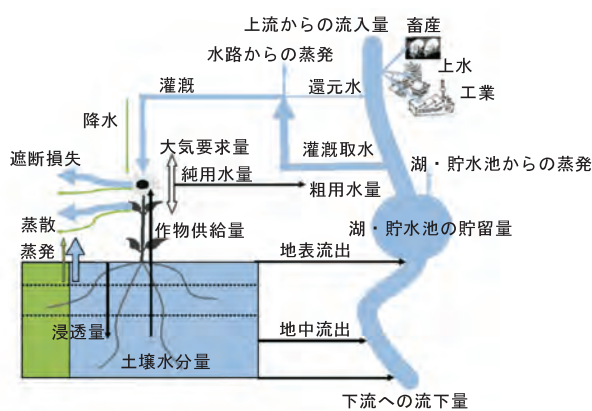


Fig.2 全球 LPJmL モデル中のブルーウォーターとグリーンウォーター計算の概念図 (Rost et al., 2008)
Schematic representation of green and blue water flows as computed in the LPJmL model

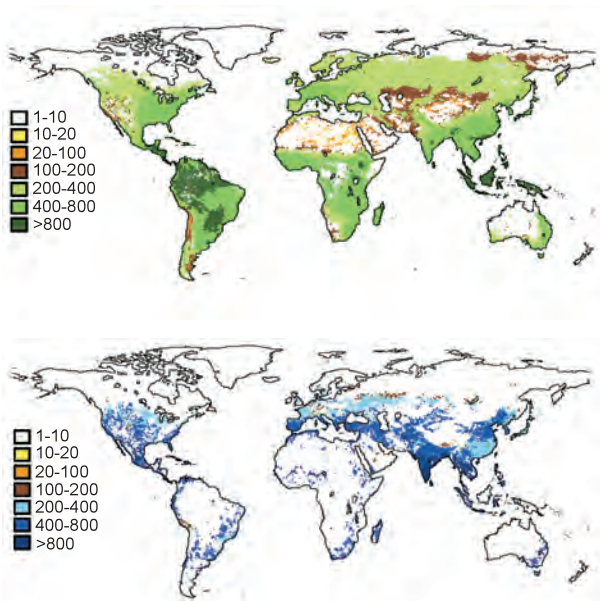


Fig.3 農地におけるグリーンウォーター (上) とブルーウォーター (下) の1971年から2000年の年平均消費水量 (Rost et al., 2008)
1971-2000 average annual green (above) and blue (below) water consumption on cropland

LPJmL モデルを用いた全球水資源予測では、気候変動が灌漑農業を含めた農業用水資源に及ぼす影響を評価できる点に特徴がある。モデル中では灌漑農業、天水農業が区別され、それらにどのくらい水が消費され、河川流量にどの程度影響があるかが示されている。また、農業用水の起源やその構成率を推定することができる。水源としては降水、地表河川水、地下水の他、再生不可能な深層地下水等も挙げられ、農業の持続可能性といった観点からの議論も可能である。このように、他の全球灌漑モデルに比べて農業用水を詳細に取り扱う LPJmL モデルにより、気候変動により将来の水資源ストレスの発生をより合理的に推定できる (Rost et al., 2008)。

また、イギリス生態・水文研究所 Centre for Ecology and Hydrology (CEH) で開発された全球水資源評価モデル Global Water Availability Assessment model (GWAVA) は、全球スケールの分布型流出モデルと GCM, RCM を結合した水利用可能量の推定モデルである (Meigh et al., 1999, Folwell et al., 2006, Fung et al., 2006)。GWAVA は、主にイギリス国際協力事業省 (DFID: Department for International Development) の国際援助事業を通して南アフリカ、ロシア、西アフリカ、バングラデシュ等の世界各国の流域への適用を通して改良が加えられ、氷河の融解や洪水等の各流域に特徴的な流出過程を取り込みながら発展してきた。同モデルは全球に適用可能だが、個々の成果は地域研究の側面が強いといえる。また、開発当初のメッシュサイズは 0.5° であったが、現在では RCM 計算値を利用し、水資源管理者に詳細で有用な情報を提供するために、メッシュサイズは 0.1° へ変更されている。各メッシュの地表流出量の推定は、集中型の概念モデルである確率分布モデル Probability Distributed Model (PDM) を用いて、土地利用と土壌のタイプ別に行われ、河道部分は Muskingum 法で計算される。そこでは、それぞれのメッシュ内の水供給可能量、用水需要が日単位で計算され、水需要に対して地表・地下を含めた供給可能量が充分なメッシュでは需要分が取水され、不足する場合には供給可能量が取水される。そこで、需要と供給の割合から水ストレスを指標として示すことが可能である。各メッシュの水需要は上水、工業用水、農業用水の和として計算されるが、具体的なデータが得られない場合には FAO や UNESCO 等の各種データベースが用いられている。

その中では、地球温暖化に対して洪水、渇水の両面から水資源が最も脆弱な国のひとつと考えられるバングラデシュにおいて、将来の水資源予測が行われた (Fung et al., 2006)。そこでは、地域の水資源予測に重要な影響を持つ氷河生成・融解モデルを精緻化するとともに、ハドレーセンターの GCM である HadCM2 を領域気候モデル PRECIS でダウンスケールして GWAVA への適用を行い、乾季流量の減少と人口の増加により、流域内の水ストレスが急激に上昇することが示されている。

2 流域スケールの水資源への影響評価

a モデルの不確実性の評価

数十～数百 km の空間解像度を持つ GCM の出力を流域評価研究に用いるためには、ダウンスケールして解像度を上げる必要があるが、この際 GCM や RCM のデータに含まれていた誤差やバイアスは、水資源評価モデルに引き継がれる。このため、単一のモデル、気候シナリオによって導き出される結果は「将来の可能性のひとつ」であり、それぞれの不確実性（シナリオ、GCM、RCM、水文モデル）による予測の幅を提示することが必要となる（Fig.4）。

ドイツの河川舟運の需要は、1997 年から 2015 年の間に 43% 増大することが予測されているが（Federal Ministry of Transport, Building and Urban Affairs, 2007）、一方で河川水位の低下、河床の上昇等の問題が顕在化し、その原因の一端として、降水量の空間分布の変動が指摘されている。また、東部の年降水量は西部に比べて約 300mm 少ないが（東部で 500mm、西部で 800mm）、気候モデルの将来の降水量分布の予測は、東部降水量が約 100mm 減少し、西部では逆に約 100mm 増加することを示しており、東西の河川水位を適切なレベルに管理しつつ、水資源の東西の格差を解消することが課題である。

この課題に対して、東西の河川を結ぶ導水路の建設が計画されている。ドイツ運輸・舟運省傘下の機関で、将来の水資源変化予測に基づいて水路の管理、整備方針を提言する機関であるドイツ連邦水文研究所 Federal Institute of Hydrology では、導水路の規模を推定することを目的の一つとして、気候変動がドイツの運輸（河川・舟運部門）に与える影響の将来予測を行うプロジェクト Impact of Climate Change on Waterways and Shipping Sector (KLIWAS, 2009～2013 年) を遂行している。この事業は巨額の資金を投入する公共事業に関する調査プロジェクトであるため、解析に用いる気候シナリオ、温室効果ガスの濃度、大気大循環モデル、領域気候モデル、水文モデルがそれぞれ持つ誤差やバイアスを定量的に把握し、取るべき対応策が持つ不確実性の幅を評価するこ

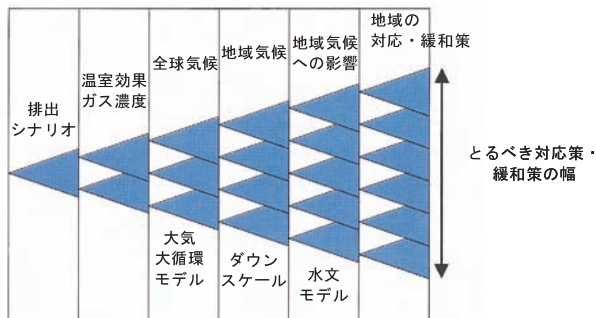


Fig.4 GCM から RCM にダウンスケールする際に生じる不確実性 (Viner, 2002)

Decreasing statistical significance that arises from the transfer of climate scenarios to regional climate impacts and measures

とが重要となる。そのため KLIWAS 開始前に、水文部門のみで実行されたパイロットプロジェクト（2007 年）とそのレビュー（2008 年）が行われ、5 本の気候シナリオ、5 種の GCM、7 種の RCM の組合せにより国内各河川の流量が計算され、結果の検証が行われている。

b 地球温暖化による確率洪水規模の変化

イギリス生態・水文研究所（CEH）で開発された分布型流出モデル Grid2Grid モデル（G2G モデル）は、汎用的な構造をもち、1km 四方の英国ナショナルグリッドを基準として開発された分布型流出モデルで、日または時間単位で計算を行う。G2G モデルは、各グリッドからの地表流、斜面流下方向の地下水流を、標高データから発生させた流路網に従ってキネマティックウェーブ法で流下させるモデルである（Bell et al., 2007a, Fig.5）。英国全土へ適用された G2G モデルに対し、英国内の 25 流域での流量との比較から、領域に共通のパラメータが試行錯誤的に与えられ、現在気候の降水量には 5km の空間解像度に空間内挿された気象庁による日降水量（1958～2008 年）、および再解析気候データ ECMWF を領域気候モデルに入力して得られた時間降水量（1979～1993 年）が用いられている。その結果、地形が流出特性に卓越した影響をもつイングランド北部、スコットランド等の地形が急峻な流域における計算結果は、既に最適化されている集中型モデルと同等に良好な結果が得られている。ただし、イングランド南東部、テムズ川流域等の基底流出が卓越した流域や、低平地、取水・排水量が多い流域での再現性は低いようである（Fig.6）。

このモデルにハドレーセンターの領域気候モデル HadRM3H による気候現在値（1961～1990 年）と将来シナリオ（2071～2100 年）を入力して、英国主要 25 河川での年最大流量の確率量が比較検討された。領域気候モデルの空間解像度の 25～50km で与えられる降雨に対して、英国ナショナルグリッドで得られる標準年降水量 SAAR (Standard Average Annual Rainfall) により重み付けを行い、領域気候モデルグリッド内の降水量の不均一性が考慮されている（Fig.7）。将来の気候シナリオ下でのイギリス北部、南東部の確率洪水量は現在気候値

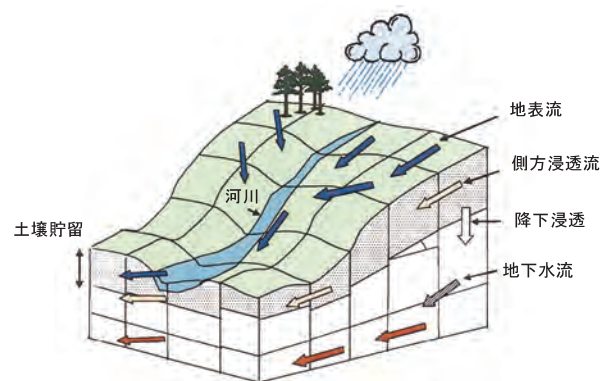


Fig.5 Soil G2G モデルの概略図 (Bell et al., 2007a)
Schematic representation of G2G model

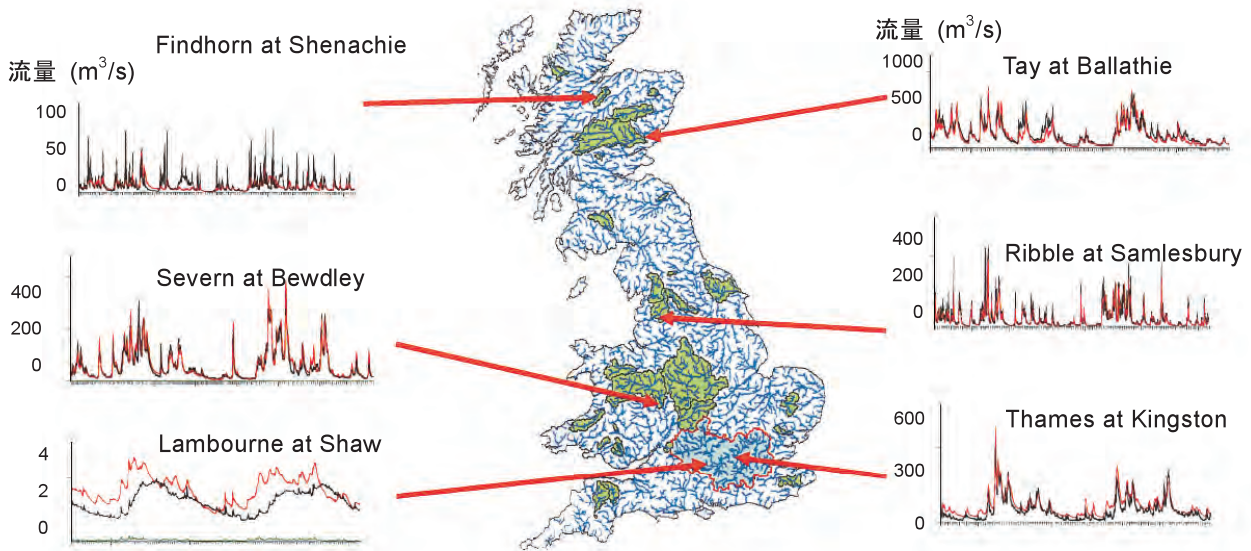


Fig.6 G2G モデルのイギリス全土への適用結果 (Bell et al., 2007a)
Comparison of the calculated and observed discharges in 6 representative basins of the United Kingdom

より増加し、危険度が増すことが明らかにされているが、将来予測値に極端に大きい降水量を含む単一の GCM を、複数の大気大循環モデルやマルチアンサンブルの導入による、より詳細な検討が今後の課題となっている (Bell et al., 2007b)。

また、モデルの高度化の方向として、現在の 2 層の土壌貯留構造 (Terrain G2G) から、3 層の貯留構造をもち、土壌分類ごとに異なる保留量をパラメータとして与えるモデル (Soil G2G) の開発や、CEH で開発された陸面過程モデル JULES (Joint UK Land Environment Simulator) との結合があげられている (Fig.8)。陸面過程モデルと G2G モデルとの結合は全ヨーロッパの河川を対象に行われており、多くの河川で観測流量値をよく再現することが示され、ダム管理、工業、農業等の人間活動の影響を受ける流域や、アルプスの積雪・融雪の影響を受ける流域の計算精度向上が図られている。

c 分布型水循環モデルの最適化手法

分布型流出モデルは、河道の任意地点での流量や、各メッシュでの蒸発散量、土壌水分の変化等を計算することが可能であるが、それらの計算結果を検証する面的なデータは限られる。また、分布型流出モデルのパラメータは最適化するパラメータの数が極端に多いため、最適パラメータは流域内の水文的、物理的特性の空間的不均一性が再現されず、流域の空間平均に最適化される。そのため、単純に最適化手法を適用するだけでは合理的な結果が得られない等の問題がある。

これまで、SCE-UA 法 (Duan et al., 1992)、MOCOM-UA 法 (Yapo et al., 1997)、MOSCEM-UA 法 (Vrugt et al., 2003) 等、一連の概念的流出モデルのパラメータの強力な最適化手法を開発してきたアリゾナ大学の研究グループでは、こうした分布型流出モデルの最適化問題に対し、以下の 2 つのアプローチを取ることにより、より合理的

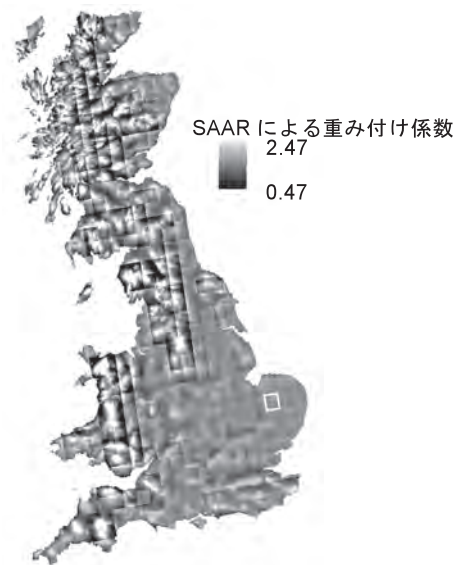


Fig.7 25km の RCM グリッド降水量に対する 1km のグリッド標準降水量 SAAR の比 (Bell et al., 2007a)
Map showing the ratio of 1km SAAR to the mean SAAR of a 25km RCM grid-cell

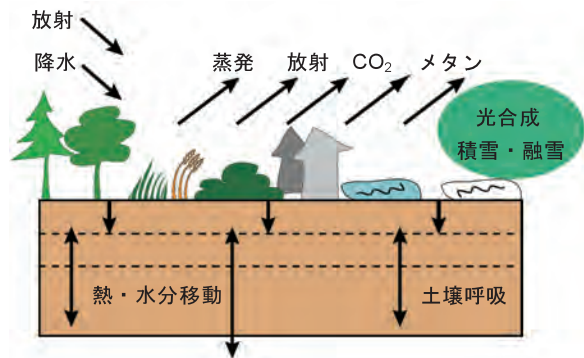


Fig.8 CEH で開発された陸面過程モデル JULES の概念図
Schematic representation of JULES, a land-surface scheme developed in CEH

で、物理的に首尾一貫したパラメータセットを推定する方法を検討している (Pokhrel et al., 2009)。

その一つは、流域の水文、物理的特性の空間分布を先験的情報として最適化過程に組み込み、最適化するパラメータの分布と数に制限をかける手法である (Pokhrel et al., 2009)。分布型流出モデルのパラメータ推定の場合、地質、土壌タイプ、植生、地形等の地表面に近い水理水文特性の空間的分布が流域の水文の応答を支配すると考え、それらがパラメータ分布の制限をかける要素として適用する。分布型流出モデルで最適化すべきパラメータの数は、対象流域のグリッド数 G と各グリッドに与えられるパラメータ数 P の積であるため、限られたモデルの応答を用いて非常に多数のパラメータを最適化することになる。ここで、あるパラメータ θ_{ij} ($i=1,2,\dots,G$:地点番号, $j=1,2,\dots,P$:パラメータ番号) が、先験的情報 X_i と、その変換パラメータセット $\phi\{\alpha,\beta,\gamma\}$ によって以下のように定式化できるとする。

$$\theta_{ij} = \alpha X_i^\beta + \gamma$$

上式が満たされると仮定すれば、モデル全体のパラメータを最適化する問題から、先験的情報をモデルパラメータに変換する関数とそのパラメータ $\phi\{\alpha,\beta,\gamma\}$ を最適化する問題に置換できる。

もう一つのアプローチは、ハイドログラフの時系列データを出来る限り活用する診断的指標の開発である (Yilmaz et al., 2008)。モデルを評価する目的関数には、これまで平均二乗誤差、対数平均二乗誤差等が用いられてきたが、これらの目的関数は流量の観測値と計算値の差を時間的に平均化して算出されるため、流量が持つ時系列情報は失われることになる。この時系列情報を可能な限り活用し、流量の観測値と計算値によって様々な誤差診断指標を開発することにより、長期水収支、土壌層内の鉛直方向の水分分布、長期基底流出、ピークのタイミングといった流域の降雨流出応答から、モデル構造の不適切さや限界を診断的に明らかにすることが可能となる。

これらの方向性は、現在著者らが開発している農業水利用を考慮した分布型水循環モデル (Masumoto et al., 2009) のパラメータ決定において大いに参考になることが判明した。

IV 地球温暖化が食料生産に及ぼす影響評価

1 将来気候値を用いた食料生産予測手法

世界銀行のプロジェクトとして気候変動の影響事例調査がモロッコを対象として行われ、その中で気候変動による同国内の食料生産への影響評価が行われた (FAO, 2009)。作物モデルは FAO-CCSWB (Crop Specific Soil Water Balance) を用い、現在の気象観測値と農業統計からモデルの有効性を確認した上で、GCM の計算値をダ

ウンスケールして将来の予測気候値として与え、作物ごとに収量を予測する。プロジェクトで対象としたモロッコ国内の6つの農業地帯における、50種の主要作物(灌漑、天水の区別を含む)の生産量を、2本の気候シナリオ(A2, B2)の元で検討したものである。気候モデルの不確実性を評価するため、それぞれのシナリオ、地帯、作物について100回ごとの計算を行い、予測値を統計的に評価している。

ただし、作付けされる作物、灌漑技術等は現在のトレンドが将来にも継続すると仮定し、さらに、作物に生じた水ストレスの緩和のために、常に作物が要求する量の灌漑が行われるものとしている。すなわち、現在の農業に地球温暖化した気候を適用した場合の評価方法を提示しただけで、水管理や灌漑の技術的な対応や、作付け時期や作物の変更等は考慮されていない。そのため、2100年までの検討が行われているものの、時間の経過とともに信頼性は低くなり、2030年までの予測に関してのみ信頼できる推定結果とされている。

2 乾燥農地の水循環・収量予測モデル

生態・水文研究所 CEH では、前述した水資源評価モデルとは独立して、乾燥農地における圃場レベルでの水分、溶質移動を計算する農地水循環モデル SALTMED (Ragab et al., 2005a) を開発している。そのモデルは乾燥農地における灌漑水管理、作物要求水量を計算するだけでなく、収量や土壌の塩類化の進行の予測・評価を行うモデルで、エジプト、シリアにおける生産量予測プロジェクトにおいて実証的に有効性が確認され (Ragab et al., 2005b)、乾燥地における農業生産予測の強力なツールの一つとなっている。また、Windows上で作動する SALTMED モデルは、ウェブ上で公開されている。

さらに同研究グループは、地球温暖化にともなう気候変動や土地利用、水管理の変化が、河川流量、土壌水分の空間分布、沿岸域の地下水資源に及ぼす影響を評価するために、地下水モデル MODFLOW、分布型流出モデル DiCaSM、海水浸入モデル SWI を統合した流域統合水文モデル Integrated Hydrological Modeling System (IHMS) を開発している。ただし、対象は乾燥地域であり、モンスーンアジアの湿潤な水田農業地帯への多くの課題を残しているとの印象を持った。

3 気候変動が食料生産に与える影響に関する情報提供サービス

世界気象機関 WMO では、地球温暖化の影響が各国の農業分野に与える影響に関する情報を提供し、また途上国の関連機関の担当者に研修を行って、担当者の情報理解、発信に関する能力向上を図っている。世界気象機関気候・水資源部 Climate and Water Department では、水文学、農学、気象学に関する技術委員会を設け、既存の気候、作物、水文モデルを活用して気候変動の影響を途

上国の気象機関に提供するサービスを行う。そのサービスの内容は、気候変動が地域に与える影響を予測するためのダウンスケール手法に力点がある。気象データが得られる国、地域では、対象国の気象機関に統計的ダウンスケール手法 Climate Predictability Tool (CPT) を提供するとともに、研修を行って技術移転を図っている。気象データの得られない国の場合には力学的ダウンスケールを用いるが、そこではイギリスハドレーセンターで開発された PRECIS が用いられることが多く、統計的ダウンスケールと同様に技術移転が図られている。また、農業気象機関を対象として食料生産への気候変動の影響に関する情報を提供する農業気象委員会 CAgM (Commission for Agricultural Meteorology) があり、農民を対象としたセミナー、ワークショップの開催、農業気象機関と協働して政策決定への貢献を行っている。

また、気候変動がもたらす極端現象の増大に伴い、既往の統計値による発生頻度予測を上回る頻度で気象災害が発生することが懸念されている。オーストラリアの灌漑農地で20年確率の干ばつが5年以上連続して発生したことはその一例としてあげられる。そこで、WMOの気象・災害リスク低減サービス部 Weather and Disaster Risk Reduction Services Department では、気象災害による被害の予測や低減を図るため、WMOの全ての部門が関わって気候変動による極端現象の増大や、気候パターン自体の変動に関する情報を各国機関に提供するとともに、気象災害の発生を準リアルタイムで共有する枠組を構築している。

V 結 言

本報告では、地球温暖化の影響評価を行う世界の研究機関における先進事例調査の結果を、流域スケールの水資源と食料生産に対する影響評価という観点から概観した。ここで、農業用の水資源への影響評価に向けた課題を以下の2点にまとめた。

地球温暖化に伴う気候変動による降水量や降水分布、気温変化のモデル予測値を流出モデルに入力し、洪水規模等の流出特性の変化を評価する研究事例は多い。また、水資源への影響評価は、全球スケールで農業用の水資源の消費量を評価した研究にみられるように、数十kmオーダーのメッシュごとにメッシュ内の供給可能水量と需要量を比較し、マクロな評価が行われている。ただし、利用者間での水資源の配分や管理等の実態に即した評価を行う必要があり、特に灌漑水資源への影響を評価する場合には、複数のメッシュに跨った灌漑地区における取水量の決定や地区内の用水配分・管理の判断等といった、流域の地域性や人間の判断過程をモデル化することが、重要な課題の一つといえる。

また、農業用水資源への影響評価を行うためには、分布型水循環モデル等によって任意の地点、時点での河川

流量や、土壌水分、蒸発散量を的確に表現することが不可欠である。しかし、流出モデルのパラメータの最適化手法の多くは流域末端の流量計算精度の向上を図るものであり、それらの最適化方法では任意地点での流量や農地の土壌水分等の陸面過程の再現精度が必ずしも向上しないことから、モデル全体の水循環の挙動を妥当に再現するパラメータセットの推定法の検討も、今後は是非とも取り組むべき課題としてあげられる。

参考文献

- 1) American Geographic Union (2008): Fifty years of research and data collection, *U.S. Department of Agriculture Walnut Gulch experimental watershed*
- 2) Anderson, Martha C., William P. Kustas and John M. Norman (2007): Upscaling flux observations from local to continental scales using thermal remote sensing, *Agronomy Journal*, **99**, pp.240-254
- 3) Bell, V. A., A. L. Kay, R. G. Jones and R. J. Moore (2007a): Development of a high resolution grid-based river flow model for use with regional climate model output, *Hydrology and Earth System Sciences*, **11**(1), pp.532-549
- 4) Bell, V. A., A. L. Kay, R. G. Jones and R. J. Moore (2007b): Use of a grid-based hydrological model and regional climate model outputs to assess changing flood risk, *International Journal of Climatology*, **27**, pp.1657-1671
- 5) Crow, T. Wade (2003): Correcting land surface model predictions for the impact of temporally sparse rainfall rate measurements using an ensemble Kalman filter and surface brightness temperature observation, *Journal of Hydrometeorology*, **4**, pp.960-973
- 6) Crow, T. Wade and Eric F. Wood (2003): The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using Ensemble Kalman filtering: a case study based on ESTAR measurements during SGP97, *Advances in Water Resources*, **26**, pp.137-149
- 7) Crow, T. Wade (2008): A novel method for quantifying value in spaceborne soil moisture retrievals, *Journal of Hydrometeorology*, **8**, pp.56-67
- 8) Duan, Q. Y., S. Sorooshian and H. V. Gupta (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, **28**(4), pp. 1015-1031
- 9) FAO (2009): World Bank - Morocco study on the impact of climate change on the agricultural sector, *FAO component: impact on crop yields*
- 10) Federal Ministry of Transport, Building and Urban Affairs (2007): Navigation and waterways in Germany – Meeting the challenges of climate change – A review, 7p.
- 11) Folwell, Sonja and F. Farquharson (2006): The impacts of

- climate change on water resources in the Okavango basin, *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, Nov. 2006)*, IAHS Publ. **308**, pp.1-7
- 12) Fung, C. F., F. Farquharson, J. Chowdhury (2006): Exploring the impacts of climate change on water resources - Regional impact at a regional scale: Bangladesh, *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, Nov. 2006)*, IAHS Publ. **308**, pp.389-393
- 13) Krysanova, Valentina and Jeffrey Arnold (2008): Advances in ecohydrological modeling with SWAT- a review, *Hydrological Sciences*, **53**(5), pp.939-947
- 14) Masumoto, T., T. Taniguchi, N. Horikawa, T. Yoshida and K. Shimizu (2009): Development of a distributed water circulation model for assessing human interaction in agricultural water use, M. Taniguchi, W. C. Burnett, Y. Fukushima, M. Haigh and Y. Umezawa (Eds.), “*From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management*”, pp.195-201: Taylor and Francis
- 15) Meigh, J. R., A. A. McKenzie and K. J. Sene (1999): A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa, *Water Resources Management*, **13**, pp.85-115
- 16) Moran, M. Susan, Debra P. C. Peters, Mitchel P. McCaran, Mary H. Nichols and Mary B. Adams (2008): Long-term data collection at USDA experimental sites for studies of ecohydrology, *Ecohydrology*, **1**, pp.377-393
- 17) Pokhrel, P., H. V. Gupta and T. Wagener (2008): A spatial regularization approach to parameter estimation for a distributed watershed model, *Water Resources Research*, **44**, W12419, doi: 10.1029/2007WR006615
- 18) Pokhrel, P., K. K. Yilmaz and H. V. Gupta (2009): Multiple-criteria calibration of a distributed watershed model using spatial regularization and response signatures, *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.004
- 19) Ragab, R., N. Malash, G. Abdel Gawad, A. Arslan, A. Ghaibeh (2005a): A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management, 1. The SALT-MED model and its calibration using field data from Egypt and Syria, *Agricultural Water Management*, **78**, pp.67-88
- 20) Ragab, R., N. Malash, G. Abdel Gawad, A. Arslan, A. Ghaibeh (2005b): A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management, 2. The SALT-MED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria, *Agricultural Water Management*, **78**, pp.89-107
- 21) Reddy, V. R., D. N. Baker and H. F. Hodges (1991): Temperature effects on cotton canopy growth, photosynthesis and respiration, *Agronomy Journal*, **83**(3), pp.699-704
- 22) Reddy, V. R., K. R. Reddy and B. Acock (1995): Carbon dioxide and temperature interactions on stem extension, node initiation and fruiting in cotton, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **55**, pp.17-28
- 23) Reddy, V. R., Ya. A. Pachesky (2000): Predicting crop yields under climate change conditions from monthly GCM weather projections, *Environment Modeling and Software*, **15**, pp.79-86
- 24) Reddy, V. R., Ya. A. Pachesky (2001): Testing a convective-dispersive model of two-dimensional root growth and proliferation in a greenhouse experiment with maize plants, *Annals of Botany*, **87**, pp.759-768
- 25) Rost, S., D. Gerten, A. Bondeau, W. Lucht, J. Rohwer, and S. Schaphoff (2008): Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resources Research*, **44**, W09405, doi: 10.1029/2007WR 006331
- 26) Viner, D (2002): A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies, A short discussion paper, *Advances in Global Change Research*, **10**, pp.139-151
- 27) Vrugt, J. A., H. V. Gupta, L. A. Bastidas, W. Bouten and S. Sorooshian (2003): effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models, *Water Resources Research*, **39**(8), 1241, doi:10.1029/2002WR001746
- 28) Yapo, P. O., H. V. Gupta and S. Sorooshian (1998): Multi-objective global optimization for hydrologic models, *Journal of Hydrology*, **204**, pp.83-97
- 29) Yilmaz, K. K., H. V. Gupta and Thorsten Wagener (2008): A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model, *Water Resources Research*, **44**, W09417, doi: 10.1029/2007WR 006716
- 30) Zhang, Y. Q., F. H. S. Chiew, L. Zhang, R. Leuning and H. A. Cleugh (2008): Estimating catchment evaporation and runoff using MODIS leaf area index and Penman-Monteith equation, *Water Resources Research*, **44**, W10420, doi: 10.1029/2007WR006563

Intensive Investigations of Advanced Researches on Impact Assessment of Global Warming on River Basin-wide Water Resources and Agriculture

YOSHIDA Takeo, MASUMOTO Takao and HORIKAWA Naoki

Summary

One perspective of global warming we are keenly interested in is spatial and temporal variation of precipitation and its subsequent impact on water resources utilization. This report summarizes the outcomes of our intensive investigation for research institutes and universities that have been carrying out advanced studies of the assessment of potential impacts of global warming on water resources utilization. Here, we present 2 aspects of impact assessment studies on water resources for irrigated agriculture.

Many researches are carried out to estimate potential changes in water availabilities and/or river discharges by applying projected climatic data for forced input to various types of rainfall-runoff models. Compared to the assessment of hydrological characteristics variations, fewer attempts were made to perform impact assessment of water resources, especially that of agricultural water. Potential water stresses were estimated in the framework of grid-based distributed water circulation models, in which water availability and demand are roughly compared in large-scale grids on the order of 10~100km. However, in mid- and small-scale basins, where we carry out impact assessment studies on the order of 1~10km, we need schemes to estimate the irrigation intake and its allocation, because agricultural water is highly dependent on human decision making processes such as water management.

In addition, we need distributed water circulation models which provide river discharges at any point and time of interest to us, and the spatial dynamics of actual evapotranspiration and soil moisture content, because agricultural water intake points and irrigated agricultural area are spread over basins. In previous attempts, most of the optimization procedures, mainly for lumped models, were developed to obtain the optimal parameter which will improve the accuracy of the discharges at the outlet of target basins. Therefore, new approaches in parameter optimization strategies for distributed water circulation models are required to obtain optimal parameter sets.

Keywords : climate change, global warming, impact assessment, agriculture, water resources

参考資料

I 調査の全行程

アメリカで訪問した調査機関の位置を **Fig.A-1**, **Fig.A-2** にそれぞれ示す。

調査の全行程を **Table A-1** に示し、ヨーロッパおよび

Table A-1 調査の全行程 (St.: 駅, Apt.: 空港をそれぞれ表す)
Itinerary of the investigation (St. and Apt. represent station and airport, respectively)

日程	訪問機関および移動の概要 (出発地, 到着地)		移動手段
平成 21 年 2 月 15 日 (日)	東京 (成田空港)	London (Heathrow Apt.)	バス 鉄道 タクシー
	London (Heathrow Apt.)	Reading St.	
	Reading St. Didcot Parkway St.	Didcot Parkway St. Wallingford	
2 月 16 日 (月)	Center for Ecology and Hydrology (CEH) 訪問		
2 月 17 日 (火)	Didcot Parkway St.	Oxford St.	鉄道 鉄道 鉄道
	Oxford St. Derby St.	Derby St. Loughborough St.	
	Loughborough University 訪問		
2 月 18 日 (水)	Loughborough St.	Leicester St.	鉄道 鉄道 鉄道
	Leicester St. Peterborough St.	Peterborough St. Norwich St.	
	University of East Anglia 訪問		
2 月 19 日 (木)	Norwich (Norwich Apt.)	Amsterdam (Schiphol International Apt.)	飛行機 飛行機 鉄道 鉄道
	Amsterdam (Schiphol International Apt.)	Berlin (Tegel Apt.)	
	Berlin (Tegel Apt.)	S+U Zoologischer Garden St.	
	S+U Zoologischer Garden St.	Potsdam Central St.	
	Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) 訪問		
2 月 20 日 (金)	Potsdam Central St. Berlin (Tegel Apt.)	Berlin (Tegel Apt.) Frankfurt (Frankfurt Apt.)	鉄道 飛行機
	Frankfurt (Frankfurt Apt.)	Koblenz	
Federal Institute of Hydrology (BfG) 訪問			
2 月 21 日 (土)	Koblenz	Frankfurt (Frankfurt Apt.)	車 飛行機
	Frankfurt (Frankfurt Apt.)	Genève (Geneva Cointrin International Apt.)	
2 月 23 日 (月)	World Meteorological Organization (WMO) 訪問		
2 月 24 日 (火)	Genève (Geneva Cointrin International Apt.)	Rome (Fumicino Apt.)	飛行機
	Food and Agriculture Organization (FAO) 訪問		
2 月 25 日 (水)	Roma Termini	Paris	鉄道
2 月 26 日 (木)	National Institute for Agricultural Research (INRA) 訪問		
2 月 27 日 (金)	National Observatory on impacts of Climate Warming (ONERC) 訪問		
3 月 1 日 (日)	Paris (Charles de Gaulle International Apt.)	Washington D.C. (Dulles International Apt.)	飛行機
3 月 2 日 (月)	United States Geological Survey (USGS) 訪問		
3 月 3 日 (火)	United States Department of Agriculture Agricultural Research Service (USDA ARS), Beltsville Agricultural Research Center 訪問		飛行機
	Washington D.C. (Dulles International Apt.)	Tucson (Tucson International Apt.)	
3 月 4 日 (水)	University of Arizona, Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas (SAHRA) 訪問		飛行機
	United States Department of Agriculture Agricultural Research Service (USDA ARS), Southwest Watershed Research Center 訪問		
	Tucson (Tucson International Apt.) Los Angeles (Los Angeles International Apt.)	Los Angeles (Los Angeles International Apt.) Sydney (Kingsford Smith International Apt.)	
3 月 6 日 (金)	Sydney (Kingsford Smith International Apt.)	Canberra (Canberra International Apt.)	飛行機
	Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (CSIRO), Black Mountain laboratories (ACT), Land and Water 訪問		
3 月 7 日 (土)	Canberra (Canberra International Apt.)	Sydney (Kingsford Smith International Apt.)	飛行機 飛行機 飛行機
	Sydney (Kingsford Smith International Apt.)	Singapore (Singapore Changi International Apt.)	
	Singapore (Singapore Changi International Apt.)	東京 (成田空港)	



Fig.A-1 ヨーロッパの訪問機関位置図

Map showing the visited institutes and universities in Europe

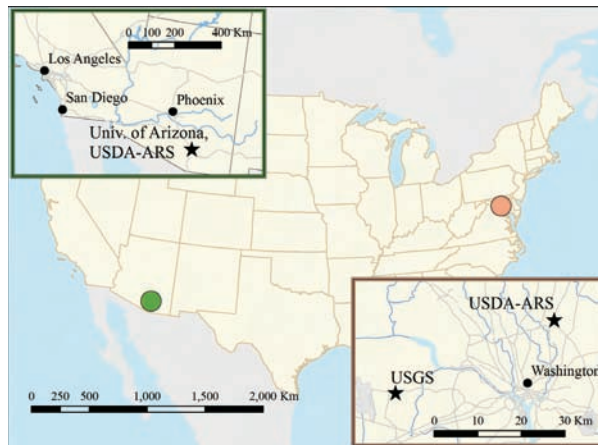


Fig.A-2 アメリカ国内の訪問機関位置図

Map showing the visited institutes and universities in the United States

II 訪問した機関・大学の概要と研究分野

1 生態・水文研究所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Mark Bailey (Director, CEH Biodiversity Programme)	
Neil Runnells (Business Development manager)	研究所概要紹介, ミーティング調整
Eleanor Blyth	乾燥地・熱帯雨林・北極圏での研究と陸面過程モデル JULES の構築
Victoria Bell	英国全土の分布型流出モデル G2G モデルの開発と気候モデルとの結合 (参照: III-2-b 地球温暖化による確率洪水規模の変化)
Simon Dadson	G2G モデルと気候モデルの結合とヨーロッパ全土への適用
Gwyn Rees (Head of National river flow archive) Egon Dumont	地域・全球水資源モデル GWAVA の構築 (参照: III-1 全球スケールの水資源への影響評価)
Richard Harding (Section Head, Global processes and WATCH coordinator)	ヨーロッパにおける気候・水研究分野紹介 プロジェクト WATCH の概要
Nick Reynard (Head of Hydrological extremes and climate modeling)	中国南部における洪水予測プロジェクト
James Blake	湿地モデル構築と気候変動による影響予測
Ragab Ragab	乾燥・半乾燥地における農地水循環モデルの構築 (参照: IV-2 乾燥農地の水循環・収量予測モデル)

生態・水文研究所 Centre for Ecology and Hydrology (CEH) は、Wallingford にあるイギリスの地圏と淡水域の生態系に対する総合研究機関である。当センターはイギリス自然環境研究評議会 Natural Environment Research Council (NERC) に属し、50%の予算を同評議会から受ける。CEH には 450 ~ 500 人の研究者が在籍し、そのうち本部のある Wallingford には 250 名ほどが勤務し、その他には 5 つの地域事務所 (Bangor, Edinburgh, Lancaster, Monks Wood, Oxford) がある。職員が大学の教師を兼任することも多く、ヨーロッパの多くの大学院生が当研究所で研究を行っている。CEH で取り扱う研究分野は、

陸面での微気象観測とそのモデル化や、分布型流出モデルの構築、圃場レベルでの農地水管理のモデル化等の基礎的研究から、気象モデルとの結合、流域水資源の評価にいたる応用的研究まで幅広いことが特徴である。また、イギリスにおける気候分野と水資源分野の協働関係が深いことも大きな特徴の一つであり、イギリス気象庁、ハドレーセンターとの人事交流や、計算機、気候シナリオデータの共有も行われている。

最初に、陸面過程の観測とそのモデル化について、Eleanor Blyth 研究員からその概略の説明を受けた。JULES (Joint UK Land Environment Simulator) は、CEH

が開発中の陸面過程モデルであり、農地をはじめ、北極圏（土壌凍結、メタン発生）、西アフリカの乾燥地域、森林地帯でのフィールドワークと観測に基づいたプロセスベースのモデルである。JULES はメタン、二酸化炭素のフラックスの他、9種類の植生それぞれの光合成、陸面からの熱フラックス量が計算でき、ハドレーセンターのGCMの下部境界条件として用いられている。流域内の土地利用、土壌水分の変化といった地表面の環境変化が、気候に影響を与えやすい乾燥地、半乾燥地や極地方での観測とモデル化を通して、モデルの精緻化が図られている。また、陸面過程モデルJULESだけを独立させ、RCMの将来気候値と植生の変化を入力し、大気中の二酸化炭素濃度、日射量の変化に応じた農業用水資源の将来予測や、エネルギー作物の栽培による、気象、水資源の影響予測が行われている。

次に、ハドレーセンターの領域気候モデル（HadRM3）と陸面過程モデルJULES、さらにG2Gモデルを結合により流出を計算する研究について、Simon Dadson 研究員から説明を受けた。HadRM3の空間解像度は25km、鉛直方向には大気38層、4土壌層を持ち、蒸発散量の計算にはペンマン・モンテイス法、地表流出の発生には確率分布法PDM（Probability Distribution Model）を適用し、標高データはUSGSのHydro-1Kデータセットを用いている。まず、欧州の中の6流域でGRDCの流量データ（Rhine川下流のMaas川、Elbe川（ドイツ）、Loire-Bretagne川（フランス）、Danube川等）を用いて各種パラメータの同定が行われ、その結果、多くの河川で観測と計算の流量はよく一致するが、ダム管理、工業、農業等の人間活動による水利用のモデル化やアルプス地帯の融雪現象には改良の余地があることが示されている。

同時に検討している課題には、西アフリカの洪水、湛水現象によって生じる季節的な湿地へのモデル適用により、湿地域が乾燥地の気候システムに対するフィードバックを評価している。陸面過程モデルと気候モデルのカップリングを行ったところ、湿地の上空で観測された8℃の冷却効果をモデルで再現できることが確認された。

さらに、EUのプロジェクトWATCH（WATER and global CHange）において、CEHはそのリーダーを務める機関である。WATCHはEUが出資する4年間のプロジェクトで、ヨーロッパの25の気候研究、水文研究機関が参画している。プロジェクトの目標は、1)現在のグローバル水循環を解析・モデル化し、将来の気候値によるグローバル水循環とその極端現象の変化を調べること、2)モデルによる予測の不確実性を評価すること、3)将来の水資源脆弱性を評価するためにモデル・データベースの枠組みを構築することである。プロジェクトの一つの研究課題として、共通の気象データセットを入力データとしてグローバル水循環モデルの比較検討が行われている。現在と将来の気候シナリオ、土地利用、人口のデータセットを共有し

て各機関が有するグローバル水循環モデルによる計算を行い、大流域の水収支をモデル間で比較したところ、流出量、蒸発散量にはモデル間で差がみられ、モデル自体に大きな不確実性があることが示されている。WATCHの推進リーダーRichard Harding氏は、気候変動の影響は流域レベルで評価する必要があること、また政策決定等の判断を行うためにはさらなる流域研究が重要であることを強調していた。

2 ラフバラー大学

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Dapeng Yu (Department of Geography)	地理学科の紹介 氾濫モデルの構築と温暖化影響評価
Koji Shiono (Department of Civil Building Engineering)	水理学

ラフバラー大学は、1909年に設立されたラフバラー・カレッジをルーツとし、1966年に大学となり、2009年に創立100周年を迎える。スポーツ、土木工学が高く評価されており、現在の学生数は約1万5000人、そのうち約15%が100カ国以上からの留学生である。日本との関係が深く、日英交流150周年を記念したJapan Dayというイベントが2009年3月7日に開催された他、ロンドンオリンピック（2012年）の日本選手のキャンプの有力候補地となっている。

地理学部のRob Wilby教授とコンピューター科学学部のChristian Dawson講師は、開発した統計的ダウンスケール手法をパッケージ化してSDSM（Statistical DownScaling Model）として公開している。SDSMは、途上国での地球温暖化影響評価を行う世界銀行、FAO等のプロジェクトでの統計的ダウンスケール手法として広く用いられている。また、Wilby教授は、統計的ダウンスケール手法に関するIPCCのガイドラインGuidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods（2004）を執筆している。温暖化に関しては、英国ハドレーセンター（Hadley Centre）のHadCM3（Hadley Climate Model）の結果をWilby教授等がダウンスケールを行い、その結果も公開している。これらは、UKCIP02と呼ばれ、2002年に行われた50kmグリッドの英国における気候変動影響評価シナリオに基づいている。

一方、Yu講師らがこれまで行ってきた洪水に関する研究は、航空測量による詳細な標高データにより対象域の精緻なモデル化を行い、小流域を対象にCFD（Computer Flood Direction）モデルを適用したものである。さらに、温暖化により土砂流出がどのように変化するかを検討を、CAS-HYDROモデルを用いて解析を行っている。

塩野教授は工学部土木建設学科において湾内水理から洪水水理を専門にしている研究者で、HR Wallingfordに

において博士号を取得し、その後英国を拠点に研究を継続している。英国の河川整備では、日本等で施工されている複断面と堤防による河川整備は行われておらず、単断面水路で住宅地や農地にも氾濫を許容する構造となっている。また、河道近辺の景観を大切にするために、氾濫域にも植えられる木の本数が決められているため、氾濫マップを作成するためには、粗度係数だけによる解析ではなく、木や家の影響を考慮した詳細な氾濫解析が不可欠である。洪水水理に関するこれまでの研究には、ロンドン南部の York 市に設置した人工洪水発生モデルサイトにおける、ビデオ撮影による詳細な流況観測や、室内実験、内部渦発生も再現する3次元 FEM モデルでの洪水再現等の手法に関する検討がある。

3 イーストアングリア大学

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Phil Jones (Professor, Director of the Climatic Research Unit)	気候研究所所長 (参照: II-1 全球気候・流量データベース)
Tatsuki Ueda (Department of Economics)	UEA 留学中(農村工学研究所 農地・水資源部 農地工学研究室)

イーストアングリア大学は1964年に創立された大学で、開発学、環境学が高い評価を受けており、社会科学、科学、人文、保健学部の4学部に1万3千人の学生が在席している。環境学部 School of Environment の学部生180名のうち、大気科学コース Atmospheric Science Course には約30名の学生が学び、修士課程には約25名が在籍する。

イーストアングリア大学気候研究所は1972年の設立であるが、同研究所が世界に先んじて気候分野の重要性と将来の発展性に着目していたことは必記に値する。気候研究所の役割は、1) 自然や人間が関与した気候変動の性質、予測、影響評価における先端的な研究を行うことで、その分野の世界的研究を行うこと、2) 気候に関連する問題の情報、データ、分析ツールさらに研修の主要な機関として機能すること、3) 社会の全ての分野に対して専門家としての評価や指導を行うことにより、気候変動や変化により発生する挑戦や機会に対して持続的なコミットメントを行うことである。

本文で前述したように、CRUは全球気候データの収集とそのデータベース化において、世界の気候変動研究に大きな役割を果たしている。また、英国内の温暖化影響評価予測に向けて、Hadley センターの5kmの解像度を持った日単位のダウンスケーリングデータを用いて英国の新しい温暖化シナリオを公表する予定である。第5次 IPCC 報告は2013年の公表を目指しているが、それに向けた英国の温暖化影響予測はCRUで主導したいと考えている。

4 ポツダム気候影響研究所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Uwe Böhm	力学的ダウンスケール CLM モデル
Alberte Bondeau	全球水資源・農業モデル LPJ モデル(中止)
Valentina Krysanova Fred Hattermann Shaochun Huang	土壌・水統合モデル SWIM の紹介 気候変動が流域スケールの水資源に及ぼす影響評価
Frank Wechsung Andrea Lüttger	気候変動が流域スケールの水資源に及ぼす影響評価(中止)
Dieter Gerten	全球水資源・農業モデル LPJ モデルによる気候変動の影響評価 (参照: III-1 全球スケールの水資源への影響評価)

ポツダム気候影響研究所 Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) は1992年に設立され、自然科学、社会科学系の研究者が、気候変動とその変動が経済、生態系、社会システムに与える影響についての研究を進めている。設立当初の研究者数は約150人であったが、気候変動研究の重要性が認識されると共に増加し、現在は約230人が研究を行う。研究予算は6400万ユーロであり、その大部分(5000万ユーロ)が外部的な研究資金による。

PIK では、自然科学と社会科学の研究者が地球規模気候変動とその生態や社会経済への影響評価について、分野横断的な研究を行い、1) 地球システム解析、2) 気候変動の影響と脆弱性、3) 持続可能な対応策の検討、4) 分野をまたいだ概念及び方法の適用という4研究領域の研究が遂行されている。研究所全体が温暖化研究を主要な研究対象にしているため、地球温暖化に関する多くの分野で世界のトップレベルの研究を行っている。その範囲は気候モデルの利用、領域モデルによる力学的ダウンスケール(統合モデル CLIMER (CLIMate BiosphERe model) の開発)、統計的ダウンスケールから、それらの結果を用いた各種分野への影響評価などを精力的に行っている。対象とする地域として、流域レベルのものから全地球を対象としたものまで幅広い対象を扱っている。また、社会経済分野からの解析や灌漑や農業への影響予測など、参考になる研究が幅広くかつ深く行われている。訪問を予定していた当日に、大雪により飛行機が大幅に遅れ、予定していたプログラムの一部が中止されたことは残念であった。

まず、力学的ダウンスケールの問題に取り組む Uwe Böhm 博士らのグループの説明を受けた。領域気候モデル CCLM (COSMO Climate Local Model) は、空間解像度を200kmの全球レベルから25kmの領域モデル、7kmの局所モデルへとダウンスケールするものである。現在進行中の研究は、過去の極端現象の再現(例えば、2003年の大渇水)、水平解像度の改良、4種類の領域モデルで

の20世紀の結果の比較, COFFEE プロジェクト (COupled Fluid Flow in Energy and Environmental research) の推進, REACCT (REsimulated Agro-landscapes to Climate Change in Tanzania) での検討等がある。さらに, 将来の研究方向は, 極端現象が再現可能となる2~3km程度への空間解像度の向上, 気候モデルと水文モデルの統合であり, 我々の研究グループが目指すものと一致していた。

次に, PIK が開発中の陸面過程モデル SWIM (Soil Water Integrated Model) に関して, 気候変動影響・脆弱性研究チームの Valentina Krysanova 博士 (Climate Impacts and Vulnerabilities) に説明を受けた。SWIM (Krysanova and Arnold, 2008) は, 擬似分布型流出モデル SWAT をベースとして開発された陸面過程モデルで, 陸面過程と流出過程を結合した点に特徴がある。陸面過程モデルは, 2層の土壌構造からなる水循環過程と植生過程から構成され, 土地利用, 土地管理, 標高, 土壌タイプが小流域ごとに基礎的な情報として与えられる。蒸発散量は, 放射量, 降水量, 気温, 比湿, 風速の気象要素, 葉面指標 LAI, 表面粗度により推定され, 2層の土壌貯留と地下水帯からは, 地表流, 側方浸透流, 地下水フラックスがそれぞれ計算される。また, 植生部分は, 植生の成長過程, 光合成過程, 窒素循環過程がサブモデルとして組み込まれている。基礎条件として与えられた作物, 森林等の植生は気象要素, 水分ストレスから植生の成長が LAI を指標として得られ, それに基づいて蒸発散, 窒素循環過程も計算される。

上記の SWIM を用いてドイツの主要5流域での水資源予測を行ったところ, 5流域24カ所の観測流量データの再現性は非常に高く, Nash-Sutcliffe 係数で0.8~0.9の好結果が得られているとのことであった。ただし, 低平地と人間活動が卓越する地域と, フランスでの気象データを用いるモーゼル川流域, アルプスの融雪の影響を受ける流域の流量再現性には課題があり, 今後の検討事項となっている。ドイツの年降水量は, 北部で500~800mm, 中部で700~1500mm, 南部山岳地帯で2000mm以上であり, また西部より東部が少ないという傾向がある。将来の気候シナリオでは, 東部の降水量が100mm程度減少し, 逆に西部では100mm程度上昇しており, 水資源の東西の格差をいかに解消するかが将来の課題となると予測されている。

5 ドイツ連邦水文研究所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
—Ing. Thomas Maurer (Department Head, Water Balance, Forecasting and Predictions)	研究プロジェクトリーダー (参照: I-1 全球気候・流量データベース)
Peter Krahe (Department of Water Balance, Forecasting Methods)	水文モデル研究者 (参照: III-2-a モデルの不確実性の評価)

ドイツ連邦水文研究所 Federal Institute for Hydrology (BfG) は, ドイツのコブレンツに位置する組織で, ドイツ国内水路・河川の持続的で経済的な利用に関する科学的知見に基づき, コンサルティングや応用研究を行うとともに, 連邦水路の水文データの観測記録を行っている。1902年に設立され, 1952年にコブレンツに移動する際に, 河川輸送・舟運を中心として河川水文研究を行う機関として再編された。BfG はドイツ連邦水路・舟運省傘下の機関であり, 行政機関と研究機関との人事交流が盛んであり, 水文部, 水質水文部, 生態部の265名のスタッフ(その内70名前後はプロジェクトで雇用)で構成されている。予算は, 85%は連邦政府(特に, 運輸・都市建設省)からの資金が主であるが, EUからの外部資金も5%程度ある。国際協力の点では, 1988年に設立した世界流量データセンター (GRDC) の役割を担い, WMO や UNESCO の下で世界の河川流量データの収集と水資源評価の活動を行う他, 国際水文プログラム (IHP), WMO の HWRP に参画し, ドイツ政府の代表事務局として活動している。

BfG における地球温暖化に関する研究は, 主に水文部を中心に行っており, 2008年からは, BMVBS-KLIWAS と称して, マックスプランク研究所から2名の専門家を招聘し, 研究所を挙げて温暖化対応策の検討を重点的に始めている。

温暖化対応の検討は4つのグループに分けられ, 1) 気候, 流量の将来予測, 2) セクター毎の影響評価や変動性の分析, 3) 対応策, 適応戦略等の決定, 4) 分野横断的な総合的対策・管理の検討を行っている。まず, 2008年にはドイツにおける温暖化研究のレビューを行うとともに, 2009~2013年のプロジェクトとして30名の研究者が関与する課題を開始している。ここでは, 気候モデルの利用, 地域レベルの気候変動予測, 不確実性の評価などを目的として, 気温, 降水量, 両極端現象(洪水と渇水)について, マックスプランク研究所 (MPI) の気候モデル, 河川流域のモデル等を利用して解析している。気候シナリオは MPI の REMO モデルにより空間解像度18km (2006年は10km), 時間解像度1時間へ力学的ダウンスケールされた。まず, 計算負荷の小さい半分布型流出モデル HBV-SMHI モデルにより気候変動による流況の大まかな変化が把握され, 次に18kmのメッシュで14種の土地利用を表現できる水収支モデル LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model), さらに低平地ではオランダの低平流域の解析にも用いられた RhineFlow-3 モデルにより詳細な温暖化影響評価が行われる予定である。ドイツ国内の河川流域で重要なライン川, イン川, エルベ川, オデル川を中心にした解析を行い, ライン川流域での洪水に関しては, 冬に増大傾向を示すが夏期は将来も同レベルであると予測されている。

6 世界気象機関

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Masahiko Murase	洪水管理、水文水資源プログラム専門官（国土交通省から出向）
Avinash C. Tyagi (Director, Climate and Water Department)	気候・水資源部長
Rupa Kumar Kolli (Chief, World Climate Applications and Services Div., Climate Prediction and Adaptation Branch)	気候変動予測・緩和対策課長 (参照：Ⅳ-3 気候変動が食料生産に与える影響に関する情報提供サービス)
Geoff Love (Director, Weather and Disaster Risk Reduction Services Department)	気象・災害リスク軽減サービス部長
Ghassem R. Asrar (Director, World Climate Research Program)	世界気候研究プログラム長

世界気象機関 World Meteorological Organization (WMO) は、ジュネーブに本部を持ち、職員数 230 名の国際機関である。各国の気象庁に相当する行政機関と連絡・調整を行い、気象・水文観測所の国際的なネットワークの構築、気象情報の迅速な交換の促進、気象観測の標準化、一定のフォーマットでの観測結果および統計結果の公表、航空・海運・水問題・農業等の人間活動に対する気象学の応用を目的とした機関である。その課題の実行は WMO の職員が行うのではなく、加盟している先進国の研究者や行政官と発展途上国の政府職員が協力して行い、協働の場として会議やワークショップをコーディネートするのが WMO の役割である。主要プログラムには、全球規模の気象観測ネットワークを整備する世界気象監視計画 (WWW: World Weather Watch)、全球規模の気候変動研究を行う世界気候研究プログラム (WCRP: World Climate Research Program) 等が挙げられる。また、気候変動に関連する部門には、気候・水資源部 (CWD: Climate and Water Department)、気象・災害予測サービス (Weather and Disaster Risk Reduction Services Department) と前述の WCRP が挙げられる。

気候・水資源部においては、気象、農業気象、気候の各種観測、研究、データ解析に関するガイドラインの作成、気候・水に関する会議の開催等を行っている。水文水資源、農業気象の各分野に技術委員会が設けられ、メンバー国でモデル開発を共同で行い、途上国への技術移転を図っている。水文分野ではデンマーク水理研究所 (DHI) やデルフト水理研究所 (Delft Hydraulics) と協力してモデルを構築し、特に DHI の SHE モデルを用いた温暖化リスク解析のため検討会を開催している。また、気候変動下の将来気候を予測するための解析ツールを参加国に提供するとともに、技術移転を図っている。解析ツールの基礎には、コロンビア大学国際気候研究

所 International Research Institute for Climate and Society の統計的ダウンスケールモデル CPT (Climate Project Tool) や、英国 Hadley Center のユーザーフレンドリーな力学的ダウンスケールモデル PRECIS (Providing Regional Climate Impact Study) が広く用いられている。

気象・災害予測削減サービスでは、温暖化影響予測と結びつけて災害リスクの削減や初期警報システムに対する検討を行う。気象災害としては渇水と洪水の両面を扱い、それらの規模に関してはこれまで再起確率の概念が使われてきたが、気候変動により極端現象の発生頻度が増大している現況では、既往の再起確率だけでは説明できない状況も生まれている。そこで、EU や UN の援助の下で、温暖化に伴う極端現象の発生を発展途上国が準リアルタイムで知ることの出来る全球データベース構築が行われ、特に、気象データに対して整備が遅れている水文データを先進国と発展途上国で同じレベルで収集、配信されている。また、水文モデル研究に対しても、先進国と発展途上国間のギャップを取り除くような人材育成やモデルの標準化を目指している。

最後に、WCRP において世界の気候変動研究の方向性について討議した。WCRP は、気候の予測可能性および人間活動の気候影響の程度を評価するために必要な、基礎的な気候システムおよび気候プロセスの科学的理解の発展を目的としている。WCRP における研究の連携による近年の目覚ましい成果のひとつは、100 年単位の地球規模の気候の長期変動予測と、地域での各年内の季節予測や 10 年単位の年間変動、日内変動を継ぎ目なしに行う事が可能となったことである。

また、その研究分野は 10 年ごとに重点化が図られ、第 1 期には地球気候システムの現象解明と人間活動の影響評価、第 2 期には全球の気候観測の重要性の認識に重点が置かれ、現在の第 3 期では気象、気候のデータに関連機関に提供し、気候変動研究者と影響評価研究者、行政機関との情報交換を図ることが重要な目的とされている。特に、2009 年 8 月 31 日～9 月 4 日に開催された第 3 回世界気候会議 (WCC-3: World Climate Conference) は、全世界の気候変動の研究成果を取り纏め、極端現象に対するリスク管理、適応緩和策の検討に結び付ける重要な機会であり、WCC-3 においては、気候モデル研究と影響評価研究・政策決定プロセスのギャップを埋めるための活動が討議された。

7 国連食料農業機関

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Fumihiko Onodera (Associate Professional Officer, Field Development Service (TCAP), Policy Assistance and Resources Mobilization Division, Technical Cooperation Department)	技術協力部農地開発課専門官（農林水産省農村振興局から出向）

Rene Gomme (Senior Agronomist, Climate Change and Bioenergy Unit (NRCB), Environment, Climate Change and Bioenergy Division (NRC), Natural Resources Management and Environment Department (NR))	自然資源管理・環境部 気候変動・バイオエネルギー研究領域 上席研究員 気候変動が食料生産に及ぼす影響評価 (参照：IV-1 将来気候値を用いた食料生産予測手法)
Hideki Kanemaru (Climate Modelling Officer, NRCB, NRC)	自然資源管理・環境部 気候変動・バイオエネルギー研究領域 気候モデリング専門家 気候変動が食料生産に及ぼす影響評価
Pasquale Steduto Jacob J. Burke Jippe Hoogeveen	自然資源管理・環境部 土地・水資源課

国連食料農業機関 Food and Agriculture Organization (FAO) は、ローマに本部があり、ローマの本部に 2,500 人、世界の地方事務所には 500 人の職員を持つ。局、部、課に分かれて職員が配置されているが、各課に所属する少人数の職員はそれぞれのプロジェクトや課題を持っている。温暖化に関して 2008 年に自然資源管理・環境部 Natural Resources Management and Environment Department (NRCB) の下に、環境・気候変動・バイオエネルギー部門 Environment, Climate Change and Bioenergy Division (NRC) が創設され、温暖化に関する課題を従来からの組織と協力しながら重点的に遂行している。自然資源管理・環境部の約 60 人の職員のうち環境・気候変動・バイオエネルギー部門に 20 人が所属する。また、農業開発を行ってきた土地・水開発部 Land and Water Development も自然資源管理・環境部へ組み込まれており、環境問題への取り組みが盛んとなっている。

気候変動の分野では Rene Gomme 上席研究員や金丸専門家が中心となり、気候変動によるモロッコの食料生産への影響評価が世界銀行のプロジェクトで行われた。作物モデルは、15～20ヶ国が所属する南アフリカ開発委員会 SADC (South African Developing Communities) で開発された FAO CCSWB (Crop Specific Soil Water Balance) が用いられた。同モデルは、実蒸発散量と土壌水分と収量の経験的な関係から将来の気候下における収量を予測するもので、現在の気象観測値と地域ごとの農業統計からモデルをキャリブレーションした上で将来の予測気候値として与え、作物ごとの地域収量が予測される。プロジェクトでは、対象としたモロッコ国内の 6つの農業地帯における 50種の主要作物(灌漑、天水の区別を含む)の生産量を、2本の気候シナリオ(A2, B2)で検討し、それぞれのシナリオ、地域、作物について 100回の計算を行って予測値を統計的に評価している。ただし、将来の作物収量には施肥量、農薬使用量、灌漑技術や作付けパターン等の技術・政策の長期的な変化にも影響を受けるため、30年以上長期の影響予測の

信頼性は低いとされている。

土地・水資源部 水管理開発課では、FAO がデータベース化している全世界の土地利用データと 1/6° のグリッドで、B2 シナリオ下の 2050 年の流出量と農業生産量への影響予測が行われた。この気候データセットでは、作物収量に最も影響の大きい雨量の精度に問題があることが明らかにされている。また、同課は自然資源管理・環境部 NRCB のプロジェクトとの連携も行っており、前述したモロッコにおける食料生産予測プロジェクトにおいて、同国における将来の水利用可能量の予測結果を提供している。

8 フランス国立農業研究所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Yves Griveau (Mission Relations Internationales, Secrétaire general et responsable Asie - Océanie)	国際研究計画部門アジア太平洋担当
Bernard Seguin (Head of the Climate Change and Greenhouse Effect Unit, INRA Research Center of Avignon)	気候変動・温室効果研究ユニット長

フランス国立農業研究所 INRA (National Institute for Agricultural Research) は職員数約 10,000 名(うち研究職員 3,000 名)の農業分野の総合的な研究を行う組織で、フランス国内外の 21 カ所に研究拠点がある。それぞれの研究拠点の専門分野は異なっているが、分野横断的な研究部では他の研究拠点との協働研究も行われている。INRA での温暖化研究は、約 20 年前から生態学、土壌、農学等の分野で個別に研究されてきたが、1979 年に開催された二酸化炭素濃度上昇やその影響に関する会議を契機とし、その後地域レベルへの影響も研究されるようになり、2000 年頃に本格化した。現在の温暖化研究は、Avignon を主要な拠点として環境・農業部 Environment and Agronomy Department で生物気象学、農学、土壌学の研究者が行うほか、森林に関する研究がボルドー Bordeaux 事務所で行われている。

フランスにおける将来の気候変動は、夏期の降水量の 20～30% の減少と 3～4℃ の気温上昇があると予測されている。現在までもこの変動傾向は現れており、ここ 50 年間のワインの開花時期、収穫時期の変化を追跡した研究において、開花は 2 週間、収穫に至っては 1 ヶ月早期化している傾向が確認されている。また、全ヨーロッパに熱波が襲来し多数の死者を出した 2003 年は特徴的な年で、夏は高温日が続き、通常約 600mm (地域により 300～1,000mm) 期待できる年間降水量が 300mm 程度に止まった。さらに、過去 5 年間の気象データも IPCC の A1, B1 シナリオで示された将来の気候予測に近い傾向を示す。

遂行中の研究テーマには、土壌中への二酸化炭素の貯留、森林や土壌における炭素循環、バイオ燃料やバイオ

マスの社会経済評価, 作物や生体燃料のための土地利用, 最適な肥料投入などがあり, 特に近年では農地からのガス放出の影響や緩和策の検討が本格化している。また, 作物収量の予測は大変重要であり, 作物モデルの開発による農作物の収量への影響予測が行われている。

9 フランス国立気候温暖化影響観測網

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Jean-Luc Redaud (Water Resource Specialist, the General Council for Agriculture, Food and Rural Space)	フランス農漁業省 農業・食料・農村評議会 (大臣直結諮問機関) チーフ技官
Bertrand Rasset (Climate Change Adaptation Officer, ONERC/DGEC, Ministry of Ecology, Sustainable Development and Town and Country Planning)	フランス生態省 持続的開発・都市計画部 気候変動緩和策技官

フランス気候変動影響観測所 National Observatory on Impacts of Climate Warming (ONERC) は2001年2月に設立された機関で, 1) フランス国内及び海外のフランス領の気象観測網と水文観測網を連携させ, 2) 衛生, 水, リスク管理, 森林, 農業, 発電等の各分野でそれぞれ行われている気候災害に関する研究を取り纏め, 3) 警報システムの整備と気候変動への適応策の提言を行う組織である。研究者だけでなく国・地方政策者を加えた推進委員会が中心となっている点が特徴的である。また, 気候変動への適応策の策定に取り組む地方組織のために, 観測された気候変動の指標や地域の気候変動シナリオを提供する。

2006年11月, フランス政府はONERCが中心に纏めた総合的な国家対応戦略を採用した。そこでは, 温暖化の課題探索と対応策の方向性が示されており, 3種の要素, すなわち, 6分野 (農業, エネルギーと産業, 交通, 建設と居住, 観光, 金融と保険), 4種の環境 (都市, 沿岸と海洋, 山地, 森林), 4種の資源 (水, 生物多様性, 健康, リスク) について包括的な検討がなされている。そのうち, 生態省が取り纏めた水資源への影響は, 夏期の降水量減少, 雪や氷河の減少, 飲料水・灌漑水・冷房用工業用水等に対する水資源量逼迫の増大と, 土壌浸食の増大の可能性がとされ, 他方, 農業への影響は, 二酸化炭素濃度の増加に伴う作物収量の増大と, 収量変動量の増加, 温暖化による牛の繁殖能力の増大, 家畜流行病の増加の可能性, 仏国南部で森林増大の一方で気候耐性や極端現象への適応力の低下等が挙げられている。

フランスの灌漑農業は南西部を流れる Adour-Garonne 流域におけるメイズ栽培と南東部を流れる Rhone-Mediterranean 流域における果樹栽培に集中しており, 北部農業地帯は天水に依存したトウモロコシ栽培が中心で, 肥料, 農薬の多投入による集約的な農業が展開されている。気候変動が農業水資源に及ぼす影響として, Adour-Garonne 流域の農業水資源問題があげられる。同

流域の6月のメイズ灌漑の水資源は融雪に依存しているが, 気温上昇に伴い融雪出水が5月頃に早まることが予想されている。6つの河川流域には水委員会 (Water Agency) があり, 河川流量がある一定基準を下回る日が続くと, 灌漑取水を止める権利を持つ。フランスにおけるダム建設は環境配慮の観点から難しいうえ, Adour-Garonne 流域の河川流量確保は, 流域下流の観光業にとっても重要な点であるため2003年には実際に取水を止める決定がなされ, 既に問題が顕在化している。

10 米国地質調査所

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Harry Lins	洪水氾濫のモデル化, 水文気象データの非定常性

米国地質調査所 United States Geological Survey (USGS) は1879年に設立された機関で, 米国内務省に属する直轄研究所であり, 水資源部門, 地理部門, 地質部門, 情報システム部門, 事務部門の5部門に分かれている。アメリカを8地区 (北東部, 南東部, 中東部, 北中部, 南中部, ロッキー山地, 北西部, 南西部, アラスカ) に分けて組織化されており, 訪問したバージニア州レストン Reston は, ワシントン DC 中心部から西へ約30キロメートル, 車で約30分の距離に位置し, ここには北東地区の本部が設置されている。Reston では20年前には2500人の職員が勤務したが現在は1500人程度になり, 水資源部門も25人から現在8~9名に減少した。全米各地の事務所, デンバーにおける中部統括事務所等における研究プロジェクトの予算は当統括本部から予算執行がなされる。各州事務所における水文観測の費用は政府50%, 州政府50%の予算が使われる。主な研究活動として, 水資源分野では, 洪水氾濫のモデル化, 流出, 気候変動に伴う水資源変化等の研究テーマを行っている。

レストンには, 全米の河川の河川水位観測をとりまとめる部門があり, Water Watch というプログラムにおいて, 全米で7,000カ所の河川観測所における各種水質・水文量の測定値をはじめ, 全米の河川水位の現在値, 最近の変動, 過去の統計値をインターネット上で提示している。

米国全体では50億USDの予算が温暖化研究に向けられているが, その内, 200万ドルのみがUSGSに向けられている。しかし, 地球温暖化に関連する研究はレストンにある統括本部では余り行われておらず, 研究の中心は, デンバーに設置してある米国中部統括事務所において, 水資源分野として気候変動, 融雪流出, 流出モデルの開発, GISの利用等の研究が行われている。特に, 気候モデルの地域へのダウンスケールでは, 地域レベルから流域レベルへのものが精力的に行われている。そこでは, 主な実験設備等としてロッキー山脈内に試験流域を設定し, 研究目的の水文観測を継続して行っている。

11 米国農務省農業研究サービス（ベルツヴィル研究センター）

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Bill Kustas (Research Leader of the Hydrology and Remote Sensing Lab)	水文・リモートセンシング研究室リーダー
Wade T. Crow	リモートセンシングを活用した陸面水収支モデルの開発
Martha C. Anderson	蒸発散と干ばつモニタリング
Paul C. Doraiswamy	圃場レベルから地域レベルへの作物収量予測のアップスケール
Vangimalla R. Reddy (Research Leader of the Crop Systems and Global Change Lab)	作物システム・気候変動研究室リーダー

米国農務省農業研究所 United States Department of Agriculture, Agricultural Research Services (USDA-ARS) は、米国農務省に属する直轄研究機関で、同組織の研究者数は全米で7,000人である。訪問したベルツヴィル農業研究センター Beltsville Agricultural Research Center は、ワシントン DC 中心部から約 20 キロメートルのメリーランド州ベルツヴィルに位置する。1,500 人の職員が所属しており、動物・自然資源研究室、栄養学研究室、作物・気候変動研究室、水文・リモートセンシング研究室の 4 分野が研究拠点を置いている。

最初に訪れた水文・リモートセンシング研究室には、8 名の研究者と 3 名の研究補助者が在職し、広域の蒸発散量予測から農地灌漑量・地下水取水量の推定に用いられる熱波長の観測による蒸発散量推定法、衛星観測雨量の補正のためのマイクロ波による土壌水分観測、リモートセンシングによる広域の早期収量予測モデルの開発に関する研究を行っている。

Martha Anderson 研究員は、衛星画像の熱バンドを用い、陸面熱収支から土壌からの蒸発量を推定する方法を開発している (Anderson et al., 2007)。灌漑農地へも同様な手法を適用し、60m の解像度を持つ Landsat データから、実蒸発散量／基準蒸発散量の関係に基づいた蒸発ストレス指標 Evapotranspiration Stress Index (ESI) を提案し、農地における過剰な地下水取水の防止に役立っている。また、定点観測の METEOSAT データを用いて全米の蒸発散量の推定、作物の成長過程の推定を行ってきた。一連の手法は ALEXI (Atomosphere, Land-surface EXchange Index) と名付けられ、渦相関法による全米各地点での観測実蒸発散量と比較して高い再現性を示している。

Wade Crow 研究員はリモートセンシングによる情報をさらに展開させ、広域土壌水分の推定法の開発に関する研究を行っている (Crow 2003, Crow et al., 2003,

Crow 2008)。一連の研究は、全球降水計画 GPM (Global Precipitation Mission) の広域降水データセットを陸面過程モデルに入力し、推定した地表面の土壌水分をマイクロ波による観測値とアンサンブルカルマンフィルターで修正して広域土壌水分のデータを作成するものである。この手法は、2013年に打ち上げられる NASA のミッションのひとつ SMAP (Soil Moisture Active/Passive) への適用が検討され、全球の地表層の 5cm の土壌水分量を 2～3 日間隔、10km のメッシュで把握することが期待されている。

さらに、推定された土壌水分を広域の作物収量の予測に用いようとする研究が、Paul Doraiswamy 研究員によって行われている。これらの研究を進展させ、地球温暖化に関連する二酸化炭素排出量抑制のための土壌・作物管理の提案や、流域の水質予測へと繋げたりすることも検討されている。収量予測結果については、250m 解像度の MODIS, Terra/Aqua バンドを用いて、米国中部のコーンベルト地帯の収量の早期予測が行われ、6～10月の重要な作物作期期間について、アメリカ農務省の 1ヶ月の収量予測に利用されている。

他方、作物システム・気候変動研究室では、詳細なチャンバー試験、現地実証試験に基づいた物理過程ベースの作物収量予測モデルの開発が行われている。作物学の実験室として綿、メイズ等を対象にして大気中の二酸化炭素、オゾン濃度や気温が光合成や収量に及ぼす影響について解析を行っていたが (Reddy et al., 1991, Reddy et al., 1995)、2001年に「気候変動」の名称がついた現在の研究室名に変わり、温暖化による作物収量の変化予測に研究の力点が移りつつある (Reddy et al., 2000, Reddy et al., 2001)。これまで開発されてきた作物成長シミュレーションモデルは、チャンバー試験により得られた土壌水分、炭素呼吸過程、土地利用等の変化が成長に与える影響を考慮したもので、経験的法則でなく作物成長の物理過程に基づいたモデル解析が行えることが特徴である。また、試験圃場のみならず、経営農家の圃場への適用も行われ、実用性も十分に確保されたモデルでもある。

12 アリゾナ大学

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Hoshin V. Gupta	アリゾナ大学水文水資源学部教授 (参照：Ⅲ-2-c 分布型水循環モデルの最適化手法)
Seshadri Rajagopal	SAHRA 研究員、水文モデルの開発・適用
Francina Dominguez	SAHRA 研究員、ダウンスケーリング
Juan Valdes	SAHRA 所長
Christopher Castro	大気科学部教授、領域気候モデル開発
Xubin Zheng	大気科学部教授
Koichi Sakaguchi	大気科学部大学院生

アリゾナ大学はアリゾナ州ツーソン Tucson にある。ツーソン空港から約 10 キロメートル、車で約 15 分のところに位置する大学で、1885 年創立である。水文水資源学部は全米一の研究実績とスタッフを有し、16 人の専任研究者、他学部からの併任研究者 11 人、その他 6 人の客員研究者が所属している。また、アリゾナ大学における温暖化研究は、水文・水資源学部、大気科学学部、自然地理学分野、植生分野、農業気象分野をはじめ、様々な分野との分野横断的な融合研究が行われている。そこで、水文・水資源学部と大気科学部を統合した自然科学分野を組織再編により作り、地表面と大気の大気熱循環や水循環を一体として捉え、温暖化の影響評価等も協働で行おうという動きもある。さらに、USDA-ARS, USGS との協働関係があることも特徴で、長期の観測データ（流量、土壌水分、渦相関法による蒸発散量等）をモデルの検証用、あるいは観測データからの温暖化傾向の解析を行っている。さらに、San Pedro 川流域の検討を産官学共同で行っていることも大きな特徴で、その中では地球温暖化に伴う影響変化は重要な話題の一つである。また、Tucson から北方約 50km には、土壌-水-大気-植物の相互作用や気候変動の影響を大規模実験によって明らかにする総合実験施設 Biosphere 2 が設けられており、アリゾナ大学の水資源、気象関係の研究者と共同で研究を進めている。

乾燥地流域持続性研究センター SAHRA (Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas) は、アメリカ国立科学財団 NSF (National Science Foundation) によりアリゾナ大学に設置された研究センターで、分野横断的研究によって流域単位の水循環構造を明らかにし、アメリカ南西部における気候変動が乾燥・半乾燥地の水資源に及ぼす影響を評価するとともに、その持続可能な管理手法を推進することを目指している。一連の研究では、GCM の選択とその力学的・統計的ダウンスケールがこれまでにいわれ、今後、流出モデル、陸面過程モデルによる水資源評価を行う計画である。現在のところ、複数の GCM の比較検討を行って過去の北米モンスーンの再現性が高い Hadley Center と ECHAM が GCM として選択され、アリゾナ大学大気科学部の Christopher Castro 教授が開発した領域気候モデルによる 12km へのダウンスケールが、Francina Dominguez 研究員らによって行われている。この RCM はコロラドの米国大気センター (National Atmospheric Center) の Rarry Winter 博士の開発した北米をカバーする NARCCP モデルとも比較検討されている。さらにアメリカ南西部への統計的ダウンスケールは、Seshadri Rajagopal 研究員らによって今後行われる予定であり、これらの将来気候値の下で土壌水分、地下水面がどのように変化するかを評価することが今後の課題となっている。

水資源の多くを地中水に頼る半乾燥地に用いるモデルは、土壌水分量を概念的に表すのではなく、土壌水分、

地下水面の明示的な表現が必要であり、陸面過程モデル VIC が現在主に適用されている。近年開発され、地下水水位の明示的な表現を行える懸垂帯上昇モデル capillary rising model に関する検討も他方では進んでおり、Marek Zred 教授らのガンマ線を用いた土壌水分の推定との比較検討が行われる予定である。また、地下水面の位置は地表の土壌水分にも影響し、顕熱、潜熱輸送量の推定精度向上が期待でき、USGS の観測データや USDA-ARS の Russell Scott 研究員の土壌水分観測結果等と比較検討も進行中である。詳細な土壌水分の鉛直分布により、根が伸びる深度も推定可能となるため、農業分野の影響評価予測にも有用だと考えられている。

13 米国農務省農業研究所 (南西流域研究センター)

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Susan Moran	リモートセンシングによる土壌水分の推定
Russell L. Scot	渦相関法によるフラックス研究

米国農務省農業研究所 United States Department of Agriculture, Agricultural Research Services (USDA-ARS) の南西流域研究センター Southwest Watershed Research Center は、ツーソンのアリゾナ大学の近くに位置し、研究員は 12 名所属している。

南西流域研究センターの特筆すべき研究成果の一つは、Walnut Gulch 試験流域 (149km²) における 50 年にわたる継続した詳細な観測と、それに基づく水文・水質・土砂流出予測モデルの構築である。観測は、気象水文要素、流量、土砂流出、マイクロライシメータによる多地点の土壌水分量の観測、渦相関法による農地の蒸発散測定を行っており、Water Resources Research 誌の特集号 (American Geographic Union, 2008) として取り扱われている。また、これらの全観測データは Web サイトで公表されている。同試験流域での観測に基づいて開発された KINEROS はキネマティックウェーブ法を基本とした流出モデルで、植生の違いによる流出特性の変化、土壌浸食量や水質の推定が評価できる。我々の訪問日には不在であったが、同所に属する David C. Goodrich 博士は、農業分野に限らず、水文、流出、洪水モデリング等で全米を代表する研究を行っている。

14 豪州科学研究機構

面会した研究者	研究内容あるいは所属
Yongqiang Zhang	リモートセンシングを活用した蒸発散量の推定
Enli Wang	農業・作物モデルの構築、リモートセンシングによる土地利用の把握
Lu Zhang	プロジェクトリーダー、水文モデル開発、蒸発散量の推定

豪州科学研究機構 Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (CSIRO) は、オーストラリアの連邦政府の下にある研究機関である。6,000 人の職員が各地に広がって研究を実施しており、キャンベラに位置するブラックマウンテン研究所 Black Mountain Laboratory の土地・水研究領域 Land and Water には、約 600 人の研究職員が所属している。CSIRO では数年前にプロジェクト単位の組織に移行し、研究職員は所属部署と FLAGSHIP と呼ばれるプロジェクトチームの両者に属しているのが特徴である。

気候変動に関するプロジェクトとしては、Water in a Changing Climate System が実行されており、現在気候の分類、気候変動予測の高解像度な影響評価、季節変動の予報が3つの大きなテーマとしてあげられ、気候分野、水文水資源分野、作物分野の 47 名の研究者が共同して研究している。また、プロジェクト Water Availability in Murray は1年半という短期間で行われ、行政部門への技術的提言を行う研究組織としても存在感を示している。オーストラリアにおける将来の降水量は減少傾向にあるが、一方で強度の大きい降雨イベントの増大が予

測される。これは、5年連続で渇水に見舞われた Murray 川流域や、年間降水量 600mm 程度の地域において観測された 150mm の降雨に代表されるように、近年の観測データも同様の傾向を示している。

気候変動研究の推進リーダーは Lu Zhang 博士であり、プロジェクト Water in a Changing Climate System を精力的に進めている。一連のプロジェクトでは、まず、Enli Wang 研究員らが農業・作物分野の取り纏め、リモートセンシングを利用した土地利用の抽出および作物モデルの構築を行っている。ここでは、作物の生長過程や収量予測は、1次元モデルの APSIM を基礎としたモデルを用いて行われ、作物の生産量と自然生物、地下水の上昇による塩害発生予測等の解析可能性である。また、植生や土地利用の変化による流出特性の変化や、河川流量の将来予測、流量の季節的予測、長期予測などについて検討している。特に、流域内の土地利用ごとの実蒸発散量の推定には、MODIS Tera/Aqua を利用した土地利用の情報、作付時期の特定などが行われている (Zhang et al., 2008)。