

「DIAS 解析環境」利用共同研究（無償）課題成果報告書

提出日： 2023年 4月 28日

課題番号	DIAS22-A002
研究課題名	衛星観測データと数値シミュレーションの統合による干ばつ監視・予測基盤の高度化
フリガナ 申請代表者氏名	サワダ ヨウヘイ 澤田 洋平
申請代表者の 所属機関名	東京大学大学院工学系研究科 附属総合研究機構戦略研究部門
研究実施期間	2022年9月16日～2023年3月31日

※「研究実施期間」は当該年度（年度末まで）を記入してください。

1. 研究概要

これまで気候変動に関する政府間パネル(IPCC)において、ハドレー循環に伴う熱帯降雨域の南北シフトが気候変動(Climate variability)の問題として長期にわたり議論されている。その中で、近年、熱帯収束帯・亜熱帯高圧帯における干ばつ被害がますます深刻化している。本研究では、熱帯収束帯・亜熱帯高圧帯に位置し、特に干ばつが深刻化している西アフリカ、ヨルダン・ハシミテ王国、グアテマラ共和国、ブラジル北東域に植生動態-陸面結合データ同化システム(CLVDAS)を適用し、そのシミュレーション値と主要穀物収量との比較検証を通じて、CLVDASの農業的干ばつ評価に対する有効性を検討した。特に2012年から深刻な干ばつ被害を被ったブラジル北東域では、CLVDASを核とした干ばつ監視・季節予測システムを開発し、その応用として水・エネルギー収支分布型水循環モデル(WEB-DHM-Veg)を併用することにより州～地区スケールの穀物収量の推定や再現予測を検討した。さらに干ばつに伴う深刻な水不足が発生するパナマ共和国に、水・エネルギー収支-降雨・流出・氾濫モデル(WEB-RRI)を適用し、渇水被害の軽減方策について検討した。



図-1 干ばつ被害の深刻化する熱帯収束帯・亜熱帯高圧帯

2. 課題の意義と目的

陸面における干ばつを評価するためには、植生動態水循環(降雨の土壌への浸透・根茎層への貯留・植生の根からの根茎層土壌水分の吸収・植生への水分の貯留・貯留された植生

水分と光合成による植生の動的成長)を正確に評価する必要がある。植生動態水循環を評価でき得る可能性のあるスキームとしては、衛星マイクロ波・可視/近赤外リモートセンシング・陸面モデル・陸面データ同化システムなどが挙げられるが、衛星マイクロ波リモートセンシングは、表層の土壤水分量を評価できるものの、根茎層の土壤水分量は評価することができない。衛星可視/近赤外リモートセンシングは、植生の面的情報[葉面積指数(LAI)・正規化植生指数(NDVI)等]は評価できるものの、植生水分量を正確に評価することができない。また多くの陸面モデルは、表層から根茎層までの土壤水分量や植生水分量を評価することはできるものの、データ同化のようなフィードバック機能が備わっていないために入力値である気象データの精度に大きく依存してしまう。さらに世界的に評価の高い現行の陸面データ同化システムとしてGLDASが挙げられる。GLDASは、地表面温度でデータ同化することにより気象データの不確実性に大きく左右されることなく表層から根茎層までの土壤水分量や植生水分量を評価することができるものの、可視/近赤外衛星センサ MODIS の LAI を入力値としており、厳密には植生動態水循環が評価されていない状態にある。

これに対して CLVDAS は、植生動態を評価できる陸面モデルにより計算した植生動態水文学量をマイクロ波放射伝達モデル(RTM)に入力してマイクロ波輝度温度を求めて、衛星受動型マイクロ波輝度温度(AMSR-E・AMSR2)と地表面でデータ同化することにより、気象データの不確実性に大きく左右されることなく表層から根茎層までの土壤水分量や植生水分量を精度良く推定することができる。このように衛星観測データと数値シミュレーションが統合された新たな陸面データ同化システムにより干ばつ監視・予測基盤の高度化を図ることは、本課題の大きな意義と言える。

本課題のマイルストーンは以下のとおりである。

2023-24 年：国内の渇水被害にも対処できるよう、国内の主要河川流域に WEB-RRI を構築し、植生動態や穀物の成長を評価して農業的渇水を検討できるよう改良する。また国内における WEB-RRI との併用による高精度・高空間分解能の農業的渇水評価を実現するために CLVDAS の国内(積雪の無い春～秋)への適用の可能性を検討する。さらに干ばつに起因する世界的な極端事象が発生した場合は、その地域に CLVDAS や WEB-RRI を適用し、干ばつ監視・予測基盤の高度化を推進する。

2025-26 年：植生動態・穀物成長を評価することのできる WEB-RRI を、さらに融雪流出も評価した上で、農業的渇水を評価できるよう改良する。また CLVDAS が積雪域をも評価できるようにするために、マイクロ波放射伝達モデルや陸面モデルにおける積雪スキームを検討する(可能であれば CLVDAS への導入を検討する)。さらに干ばつに起因する世界的な極端事象が発生した場合は、その地域に CLVDAS や WEB-RRI を適用し、干ばつ監視・予測基盤の高度化を推進する。

本年度は、干ばつ被害域に対する CLVDAS シミュレーションだけでは無く、その応用として水・エネルギー流出モデル(WEB-DHM-Veg・WEB-RRI)を併用した解析手法について検討を加えることで 2023-2024 年マイルストーンを達成するための下地を作ることを目標とした。以下の成果を通じて、その目標はおおむね達成された。

3. 研究成果

3.1. 植生動態-陸面結合データ同化システム(CLVDAS)

本節では、CLVDAS について簡単に説明する。CLVDAS は、植生動態と土壌水分量の変化を推定するために陸面モデルとして EcoHydro-SiB が適用されており、この EcoHydro-SiB は、植生動態モデル(Dynamic vegetation model)と Simple Biosphere model 2 の水文モジュールが改良された Hydro-SiB が結合されたモデルである。またマイクロ波輝度温度を計算するために RTM が適用されている。RTM は、植生における放射伝達プロセスを評価する ω - τ モデルと地表面における表面散乱を評価する Shadowing effect を考慮した Advanced Integral Equation Model (AIEM)が結合されたモデルである。本研究における入力データとして、International Satellite Land Surface Climatology Project 2 全球土性データなどの静的全球データの外、陸面モデルの入力データとなる気象データとデータ同化に用いる衛星観測マイクロ波輝度温度データの動的全球データを適用した。気象データとしては、降水量(mm/s)・気温(K)・気圧(mbar)・短波放射量 (W/m^2)・長波放射量 (W/m^2)・風速 (m/s)・比湿(kg/kg)が必要であるが、本研究では、これまでの CLVDAS の開発過程において、CLVDAS との相性とその有効性が示された Global Land Data Assimilation System version 2.1 (GLDAS 2.1) 全球気象データセットを適用した。

まず気象データが EcoHydro-SiB に入力され、各種植生動態水文量が計算される。さらに、これらの計算値が RTM に入力されることによりマイクロ波輝度温度が推定される。同時に衛星観測マイクロ波輝度温度が読み込まれ、式(1)のコスト関数が最小になるまでデータ同化スキームである粒子フィルタ(GPF)によりマイクロ波輝度温度推定値と衛星観測値がデータ同化され、表層土壌水分量(深 0~5cm: m^3/m^3)・根茎層土壌水分量(深 5~20cm, m^3/m^3)・蒸発散量(J/m^2)・葉面積指数(LAI, m^2/m^2)などの最適な植生動態水文量が推定される(図-2)。

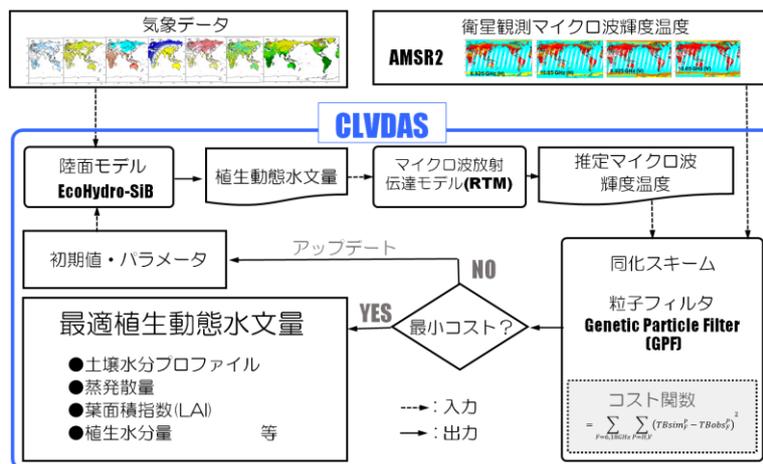


図-2 植生動態-陸面結合データ同化システム(CLVDAS)

$$COST = \sum_{t=0}^{t=T} \left[(T_{b,est}^{6V} - T_{b,obs}^{6V})^2 + (T_{b,est}^{6H} - T_{b,obs}^{6H})^2 + (T_{b,est}^{10V} - T_{b,obs}^{10V})^2 + (T_{b,est}^{10H} - T_{b,obs}^{10H})^2 \right] \quad (1)$$

ここに、 $T_{b,est}^{fp}$ は、CLVDAS 内の RTM により計算されるマイクロ波輝度温度、 $T_{b,obs}^{fp}$ は高性能マイクロ波放射計 2 (AMSR2)の衛星観測マイクロ波輝度温度、添字 f は周波数(6.925, 10.65GHz)、 p は V (垂直偏波)、 H (水平偏波)。

3.1.西アフリカにおける干ばつ解析

西アフリカは、チャーニー効果(草が減少することにより地表面が露出すると、地表面反射率が増加すると共に降水量が減少し、それにより草原の縮小がさらに促進されるフィードバック効果)により渇水の強まる典型的な地域であり食糧生産を低下させ易い地域である。この西アフリカに CLVDAS を適用し、他の植生動態水文量と共に LAI を推定し、植生水分量に変換した(図-3)。さらにサヘル-内陸域の植生水分量の空間平均を求めた(図-4)。その一方で、西アフリカの主要穀物であるパールミレット収量(Chad, Niger, Nigeria, Benin, Burkina Faso, Mali の合計)を FAOSTAT より入手した。また FAO Locust watch より、サヘル-内陸域における 10 以上の発生地点数を持つイナゴ(蝗害)の年間発生日数を読み取った。そして渇水解析において一般的に用いられる z スコアに基づく正規化指数($=((x_i - m) / \sigma)$ 、 x_i は任意の日(i)の変数、 m と σ は任意の日(i)の 2003 年から 2013 年までの期間の x_i の平均値と標準偏差)を算定して比較した。その結果、2005 年から 2010 年にかけて豊作であったパールミレット収量が 2011 年以降減少したことを確認した。また CLVDAS に基づく植生水分量の変動が、それに良く整合することが分かった。ただし 2003-2004 年は、植生水分量が高いものの収量は低いが、2005 年以降は見られない蝗害の影響が 2003-2004 年に発生していることが分かり、蝗害の影響が植生水分量と収量の乖離の原因になった可能性があることを理解した(図-5)。

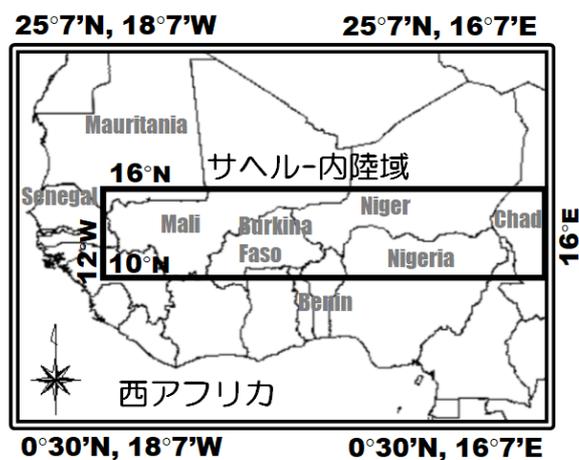


図-3 西アフリカ対象領域

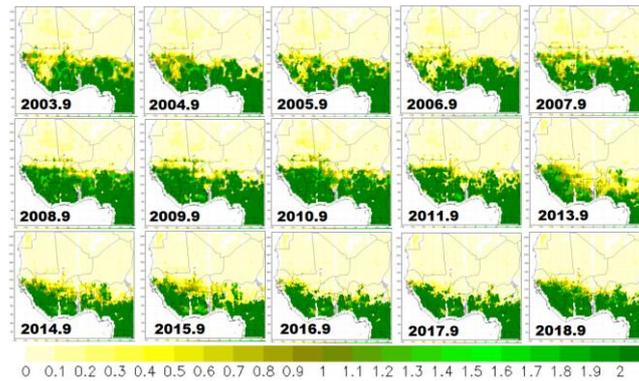


図-4 植生水分量の空間分布

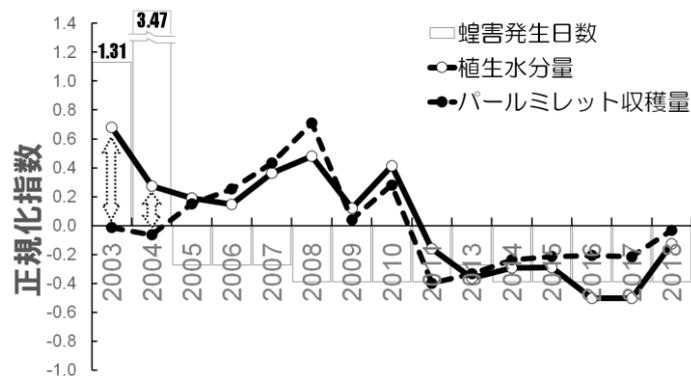


図-5 サヘル-内陸域におけるパールミレット収量・CLVDASに基づく植生水分量・蝗害の年間発生日数の比較

3.2. ヨルダン・ハシミテ王国における干ばつ解析

ヨルダン・ハシミテ王国は、893 万 ha の国土面積の内、年降水量 500mm 未満の半砂漠地域や乾燥・半乾燥地域が約 99% を占め、年降水量 500mm 以上の半湿潤地域は約 1% である。また降水量が少なく、唯一の水源地は、ヨルダン川の表流水と地下水であるために、深刻な渇水被害を受ける国の一つである。ここでは、ヨルダン・ハシミテ王国(図-6)に CLVDAS を適用し、2004 年から 2018 年にかけてシミュレーションを行ない、他の植生動態水文量と共に LAI を推定した(図-7)。またヨルダンの主要農産物は輸出量も多いトマトであるため、FAOSTAT より収量入手した。そして両者の正規化指数を計算して比較した。その結果、若干の乖離は見られるものの、変動傾向はおおよそ適合し、また 2009 年以前は渇水傾向であったが、2011 年以降には改善されていることが分かった(図-8)。

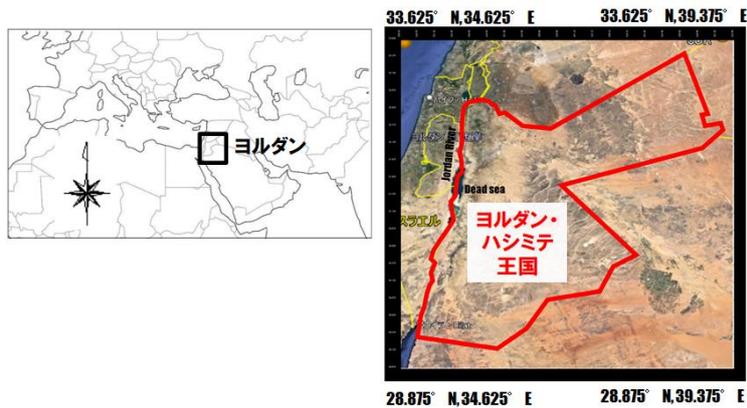


図-6 ヨルダン・ハシミテ王国対象領域

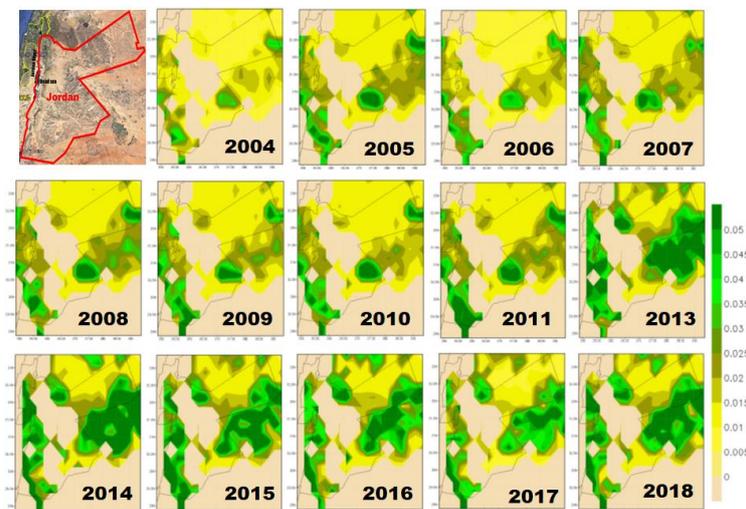


図-7 LAI の空間分布

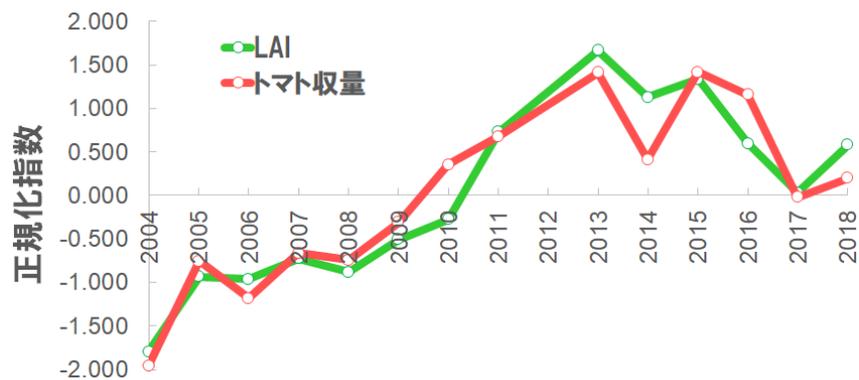


図-8 CLVDAS に基づく LAI とトマト収量との比較

3.3. グアテマラ共和国における干ばつ解析

グアテマラ共和国は、エルニーニョの影響を受け易く、深刻な渇水が発生し易い「乾燥回廊」として広く知られている(2017年には南端に位置するアテスカテンパ湖の水が完全に干上がったと言われている)。ここでは、グアテマラ共和国(図-9)に CLVDAS を適用し、2003年から2018年にかけてシミュレーションを行ない、他の植生動態水文量と共に

LAI を推定した(図-10)。また主要農産物であるコーヒー豆を選定して FAOSTAT より、その収量を入手した。さらに両者の正規化指数を計算し、2003 年から 2018 年までの期間の変動を比較した。その結果、コーヒー豆の収量と LAI との間に良好な整合性を確認し、また両者の減少がエルニーニョの発生とほぼ同期していることが分かった(図-11)。

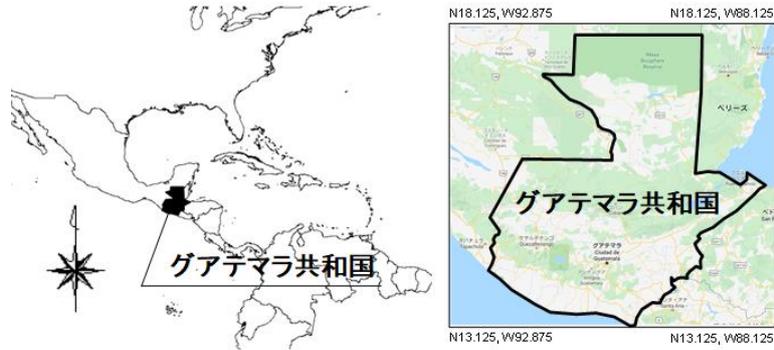


図-9 グアテマラ共和国対象領域

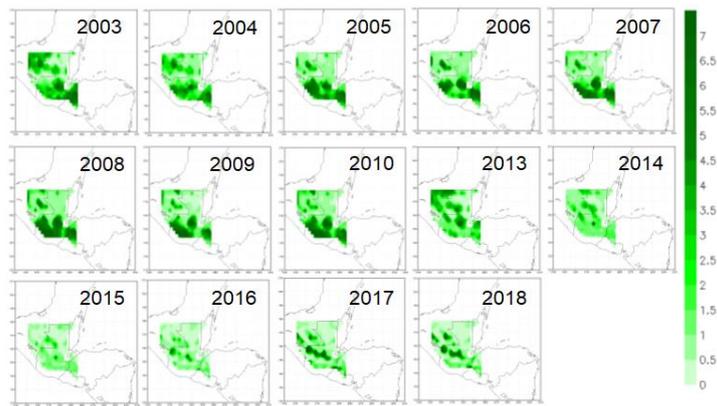


図-10 LAI の空間分布

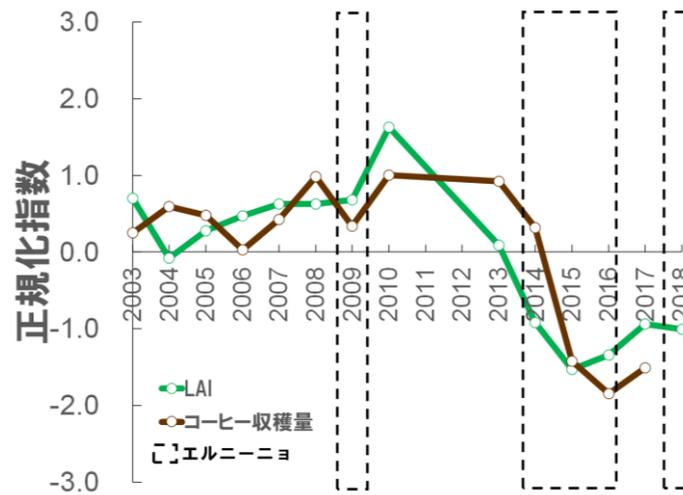


図-11 CLVDAS に基づく LAI とコーヒー収量との比較

3.4. ブラジル北東域における干ばつ解析

(1) 干ばつ監視システムの開発

ブラジル北東域(西経 46.50° - 34.50° , 北緯 2.25° - 11.25° , 図-12)を対象に CLVDAS を核とした干ばつ監視システムを開発した。このシステムでは、気象全球データ・衛星観測マイクロ波輝度温度が DIAS より読み込まれ CLVDAS に入力されて表層～根茎層土壌水分量・蒸発散量・LAI などの最適な植生動態水文量が推定される。



図-12 ブラジル北東域対象領域

さらに DIAS Core チームの尽力により干ばつ監視システムを自動的に稼働させた上、日単位で最適な植生動態水文量を視覚的にモニタリングするための可視化システムが開発された。可視化システムでは、植生動態水文量である LAI・蒸発散量 (Evapotranspiration)・植生ストレスファクター (Vegetation water stress factor)・表層土壌水分量 (Land surface soil moisture content)・根茎層土壌水分量 (Root-zone soil moisture content) が表示され、画面内での切り替えが可能である。図-13 は、LAI の事例を示したものであるが、8 つのパネルには、2013 年以降の空間分布 (空間分解能 25km, 時間分解能 1 日) が表示される。また下段の折れ線は、干ばつ被害が最も深刻であったセアラ州の空間平均値の変動を示している。

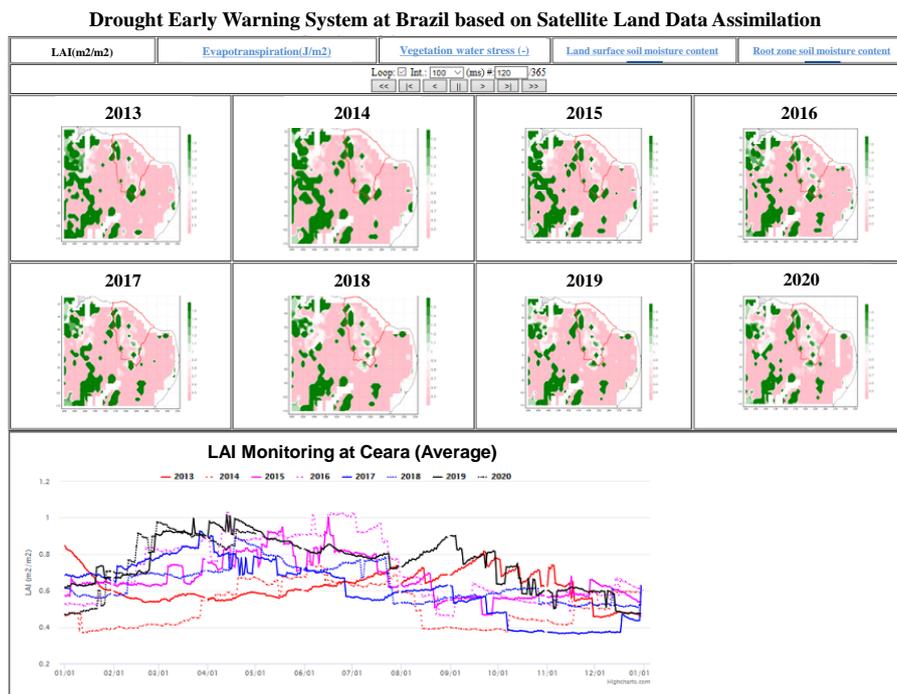


図-13 干ばつ監視可視化システム: LAI を表示

(2) 干ばつ季節予測システムの開発

DIAS Core チームの尽力により干ばつ季節予測システムも開発された。監視システムと同じ領域において。監視期間の最終日の各種植生動態水文量を初期値として、気象データと合わせて EcoHydro-SiB に入力することにより最適な植生動態水文量(表層土壌水分量・根茎層土壌水分量・蒸発散量・LAI)の 12 アンサンブル季節予測を行うシステムである(図-14)。

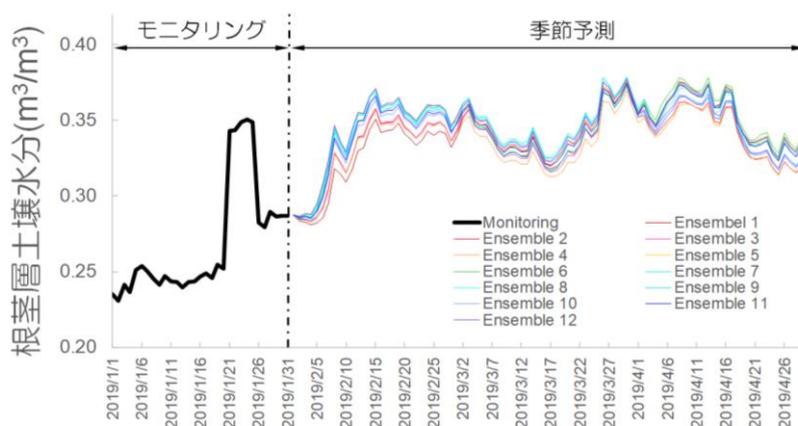


図-14 渇水季節予測システムによる 12 アンサンブルの季節予測(3 ヶ月):根茎層土壌水分量の事例

この際、気象データである気温(K)・気圧(mbar)・短波放射量 (W/m^2)・長波放射量 (W/m^2)・風速 (m/s)・比湿(kg/kg)は、前年の Global Land Data Assimilation System version 2.1 (GLDAS 2.1) 全球気象データを用い、渇水評価に重要な降水量については季

節予測プロダクトを用いて補正した。季節予測プロダクトとしては、12 アンサンブル GFDL 季節予測降水量(GFDL-CM2p5-FLOR-B01MONTHLY)を用いた。なお季節予測期間には、一般的に予測の信頼性が保証される 3 カ月を設定した。また監視システムと同様に、季節予測システムにより日単位で予測される最適な植生動態水文量を視覚的に把握するための可視化システムを DIAS Core チームの尽力により DIAS 上に開発した。デフォルト画面では、各年のセアラ州において空間平均された LAI(m^2/m^2)・蒸発散量(mm/day)・表層土壌水分量(m^3/m^3)・根茎層土壌水分量(m^3/m^3)の変動が表示される。さらにピクセル選択画面では、任意のピクセルを選択することによりセアラ州の空間平均値と共に任意のピクセルにおける季節予測3カ月間とその前の一年間の監視が表示される(図-5)。

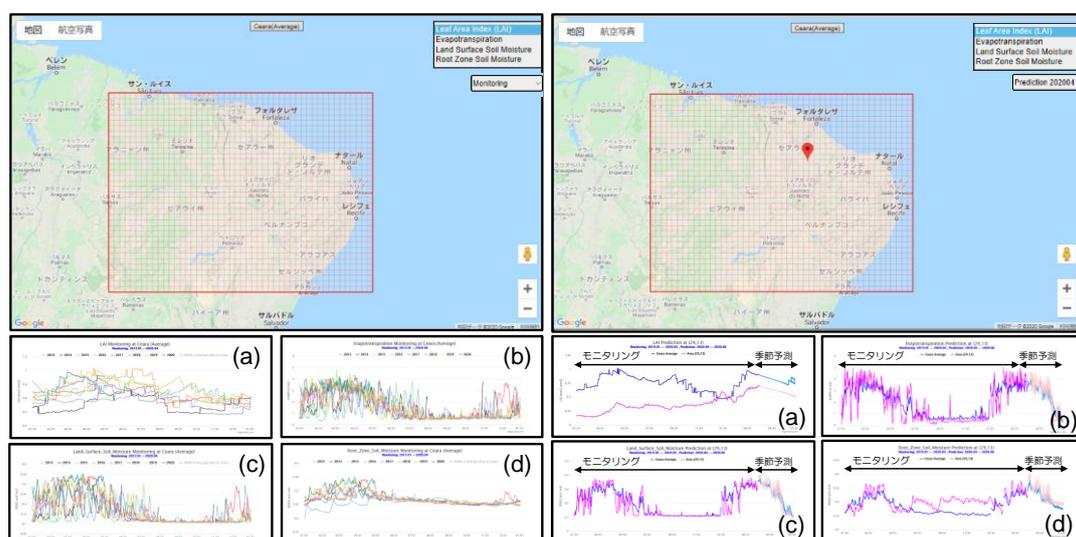


図-15 渇水季節予測可視化システム:(左)デフォルト画面,(右)ピクセル選択画面,(a)LAI,(b)蒸発散量,(c)表層土壌水分量,(d)根茎層土壌水分量

(3) 州スケールの干ばつ監視システムの応用

干ばつ監視システムは、最適な植生動態水文量をモニタリングを行うが、その農業情報への応用は、干ばつにより大きな被害を受けた現地の農業従事者にとって重要になる。ここでは、干ばつ監視システムの空間分解能が 25km と広域であるために、まずは州スケールで干ばつ監視システムの農業情報への応用の可能性について検討した。ここでは、ブラジル北東域でも最も干ばつ被害が深刻であったセアラ州(図-12)を対象とした。一般的に、穀物は根から多くの水分を吸収すると植生水分量を蓄え、光合成により良く成長する。その結果として多くの収量を得ることができる。CLVDAS は、Eco-HydroSiB と RTM との統合、並びにマイクロ波輝度温度のデータ同化により精度良い根茎層土壌水分量を計算することができ、その精度良い根茎層土壌水分を根から吸収した植生の動的成長を評価し、正確な LAI を計算する。さらに CLVDAS は、RTM 内で LAI から植生水分量を一意的に計算できる。そこで LAI を穀物成長の指標に設定し、2003 年から 2013 年までの日単位の LAI の正規化指数を算定して用いた。また穀物タイプとして、セアラ州の主要穀物であるカシューナッツ(P_{Cashew})、フェジョン豆(P_{Beans})を選定し、その穀物収量データは、IBGE-

SIDRA(<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>)より入手した。次に 2003 年～2013 年を対象に LAI 正規化指数と穀物収量との関係から穀物モデルを導いた(図-6)。さらに穀物モデルを求めた 2003～2013 年以降の 2014-2017 年の LAI 正規化指数を穀物モデルに入力した。その結果、カシューナッツ・フェイジョン豆共に RMSE 0.06(t)以下、bias 0.03(t)以下であることを確認した。

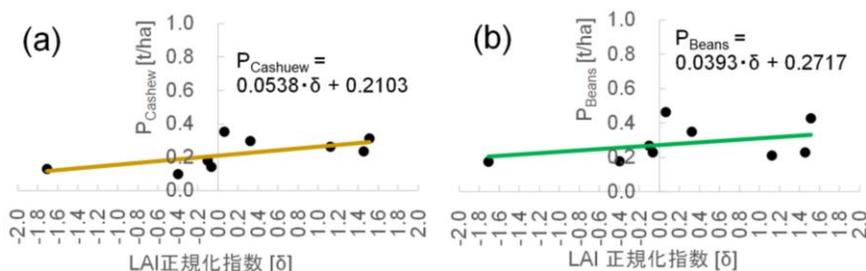


図-16 LAI 正規化指数(σ)と穀物収量(P)からの穀物モデルの導出:(a)カシューナッツ(P_{Cashew}), (b)フェイジョン豆(P_{Beans})

通常、CLVDASには、降水量のみが入力され、天水条件下での LAI が推定される。ゆえに灌漑域を含む地区では LAI が過少に推定される傾向がある。しかし換言すれば、灌漑水を仮定し、それを降水量に加算した水量を CLVDASに入力することにより降水量+灌漑水量に対応して成長した穀物の LAI が推定され、それを穀物モデルに入力することにより、それに対応した穀物収量を推定することができる。加えて、穀物収量の推定値が現地の農業従事者が目標とする収量に等しくなる灌漑水量を見出すことにより、目標収量を得るために必要な灌漑水量を推定することもできる(図-17)。そこで灌漑水量を段階的に降水量に加算し、CLVDASに入力して求めた LAI を穀物モデルに入力することにより得られる灌漑水量と穀物収量との関係に、目標穀物収量(2003年から2017年までの穀物収量の平均値を仮定)を入力することにより、目標穀物収量を得るために実際に必要であったであろう灌漑水量を求めることができた(図-18)。干ばつ被害は、2014年に最も深刻であって多くの灌漑水を必要としたが、それは次第に緩和し、2016年には、あまり灌漑水を供給しなくとも目標穀物収量を得ることができたという結果が得られた(表-1)。この結果に対して現地の農業従事者より「2016年も2014年・2015年と同様、深刻な渇水被害があったはずなので灌漑水量も多かったはずである」という指摘を受けた。そこで CLVDASにより出力された2016年の降水量と根茎層土壌水分量・LAIを2014年・2015年の平均と比較してみた(図-19)。2014年・2015年は4月に1度だけ降水ピークが発生し、穀物(LAI)は、それが浸透した根茎層土壌水分を吸収して4月中旬にピークを迎える。それに対して2016年には、1月と4月に2度の降水ピークが発生しており、穀物(LAI)は根茎層土壌水分を吸収して1月に一度成長し、それを消費しながら3月一杯持ちこたえ、4月の降水ピークが浸透した根茎層土壌水分を吸収して、もう一度さらに成長していることが分かった。2016年は、このような降水パターンの違いにより穀物が2014年・2015年に比べて良く成長したために、必要とされる灌漑水量も少なくて済んだという結果が得られたことが分かった。現地では、このような降雨パターンによる穀物成長プロセスの変化を理解することができないために、2016年も、2014年・2015年と同程度の灌漑水を供給したものと考えられる。しかし本研究では、実際には2016年は、2014年・2015年

と同程度の灌漑水を供給しなくとも目標生産高を収穫できたという結果となっており、より経済的な灌漑を行うことができたであろうことを示している。

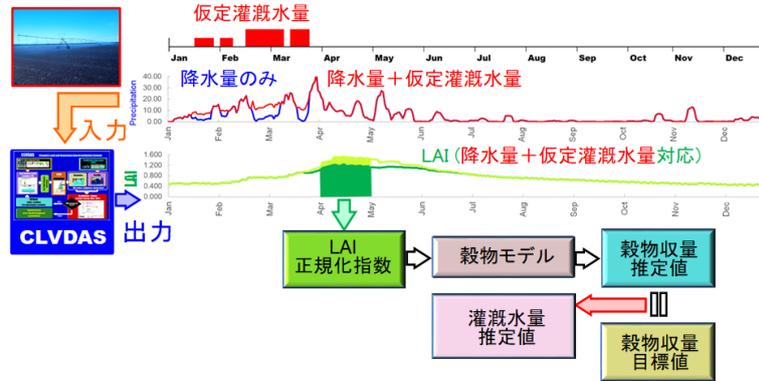


図-17 CLVDASに基づく灌漑水量の推定プロセス

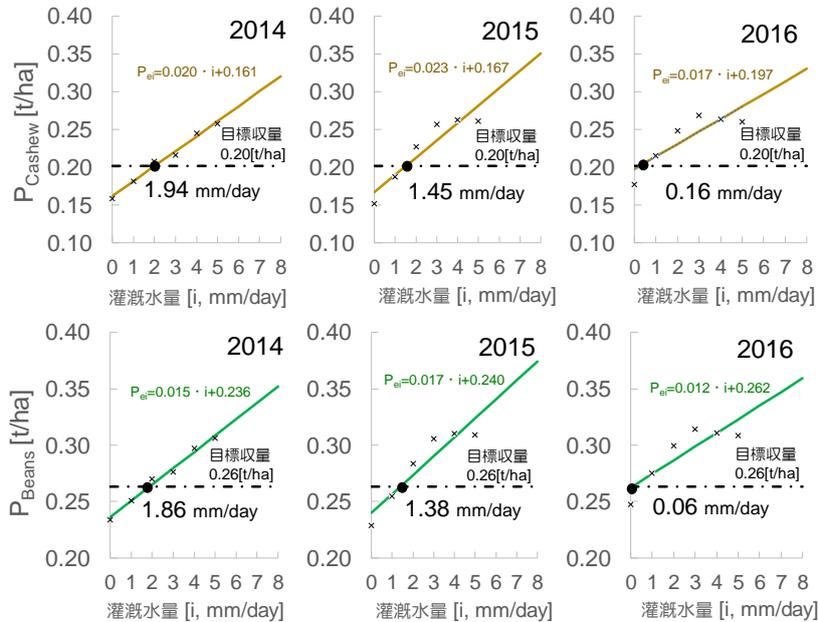


図-18 目標穀物収量を得るために必要な最適な灌漑水量の推定:(上)カシューナッツ,(下)フェイジョン豆

表-1 目標穀物収量を得るために必要な灌漑水量(mm/day)

	2014	2015	2016
カシューナッツ	1.94	1.45	0.16
フェイジョン豆	1.86	1.38	0.06

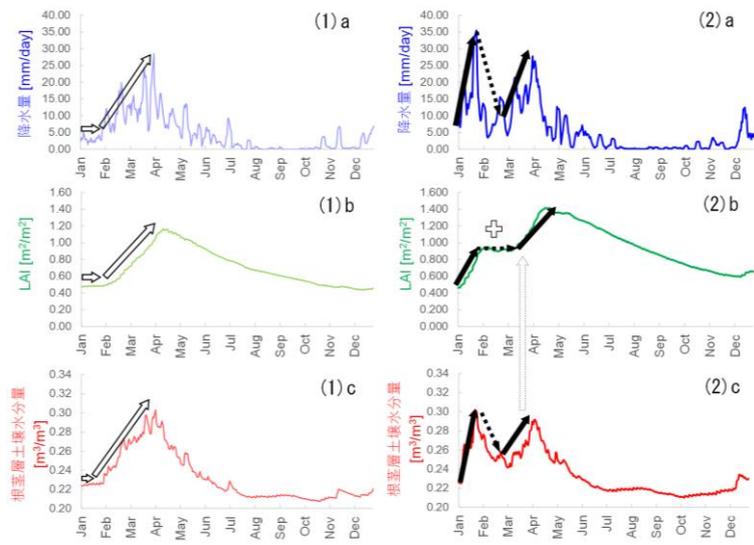


図-19 降水量(a)・LAI(b)・根茎層土壌水分量(c)の比較:(1)は 2014-15 年の平均値, (2)は 2016 年

(4) 地区スケールの干ばつ監視・季節予測システムの応用

前節において州スケールに対する干ばつ監視システムの穀物情報への応用の有効性が確認された。そこで本節では、農場スケールに対する干ばつ監視・季節予測システムの穀物情報への応用の有効性を確認するために、セアラ州の中央に位置し、東西に走るバナブイユ川沿いに農地の広がるバナブイユ川流域(図-20)に水・エネルギー収支分布型水循環モデル(WEB-DHM-Veg)を適用し、1km グリッドの陸面情報を推定した。またデータ同化により精度の高い 25km グリッドの CLVDAS LAI を 1km グリッド WEB-DHM-Veg LAI の空間分布を用いて、1km グリッドに高解像化手法を考案した(図-21)。これにより 1km グリッドの CLVDAS LAI を算定した(図-22)。さらに 2017 年 11 月以降、12 アンサンブル季節予測(3 ヶ月)を行なう干ばつ季節予測システムにより予測された 25km グリッドの CLVDAS LAI 季節予測値についても、同高解像化手法を適用して、1km グリッドの CLVDAS LAI 季節予測値を計算した。



図-20 セアラ州中央に位置するバナブイユ川流域

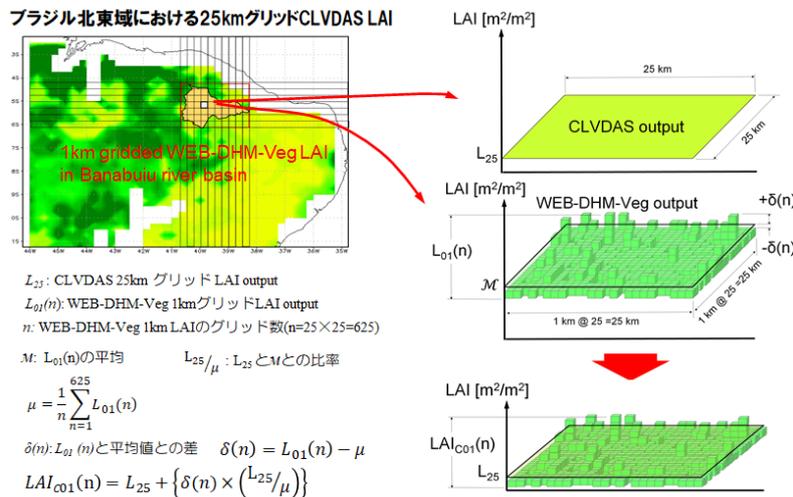


図-21 CLVDAS LAI の高解像度化手法

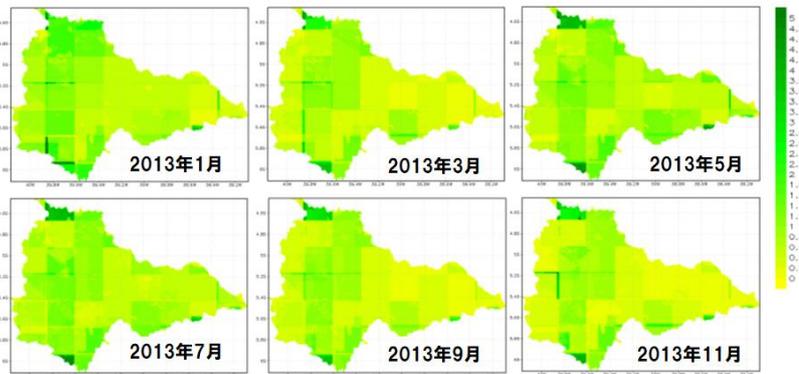


図-22 1km グリッド CLVDAS LAI

またバナブイユ川流域は、17 地区に区分されるが(図-23)、干ばつ監視・季節予測システムは 25km グリッドであるために解像度が粗く、それぞれの地区の LAI を分析することができない。しかし 1km グリッドの高解像度化された LAI を各地区の領域内で空間平均することにより、それぞれの地区の LAI を分析することができる。次に 2010 年から 2018 年までの日単位 LAI の正規化指数を算定した。また現地の農業データである Northeast Drought Monitor (NEDM)を用いて、各地区における 2010 年から 2018 年までの穀物カレンダーや穀物収量を把握した。さらに 17 の全ての地区において 2010 年から 2018 年までのフェイジョン豆の収量と LAI の正規化指数から穀物モデルを導いた。そして全ての地区において、各年の LAI を穀物モデルに入力することにより各年のフェイジョン豆の収量を推定し(図-24)、その結果を示した(図-25)。この際、推定精度については相対誤差 $RE(\%) = |Po - Pe| / Po \times 100$ により評価した。なお Po はフェイジョン豆の収量実績値、 Pe は穀物モデルによるフェイジョン豆収量の推定値である。2010 年から 2018 年までの各年の結果に着目すると、相対誤差 10%以上の地区もやや見られるが、他のほとんどの地区の相対誤差は 10%未満であることが分かる。さらに 2010 年から 2018 年までの平均に着目すると、バナブイユ川の上流に位置する東部地区の相対誤差が 16%以上と大きく、それが灌漑域に対応していることが分かった。



図-23 バナブイユ川流域における地区区分

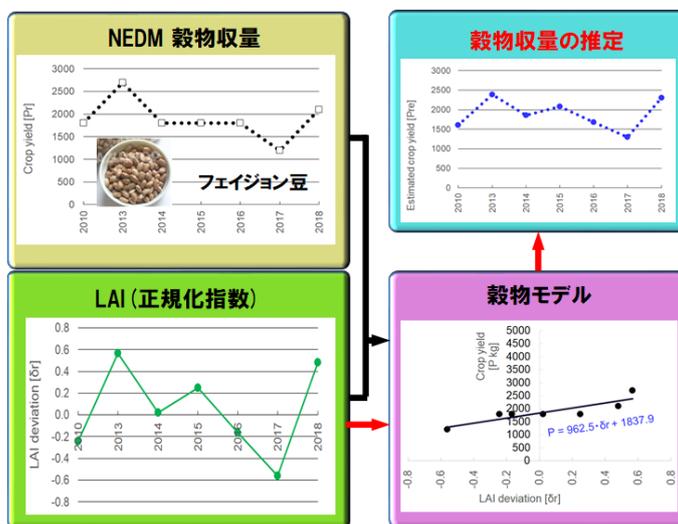


図-24 LAI の正規化指数・穀物収量に基づく穀物モデルの導出と穀物収量の推定

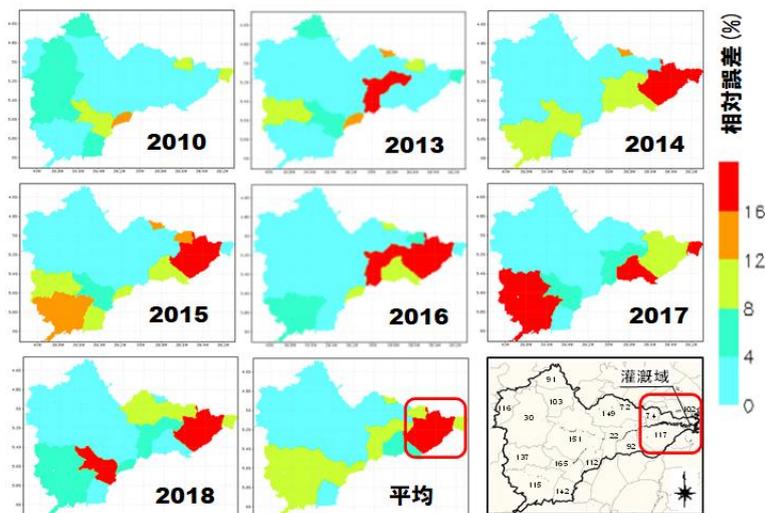


図-25 相対誤差によるフェイジョン豆収量の推定精度評価

また前述のように、CLVDAS には、降水量のみが入力され、天水条件下での LAI が推定される。灌漑水を仮定し、それを降水量に加算した水量を CLVDAS に入力することにより降水量+灌漑水量に対応して成長した穀物の LAI が推定され、それを穀物モデルに入力することにより穀物収量を推定することができる。加えて、穀物収量の推定値と実績値が等しくなる灌漑水量を見出すことにより実際に給水されたであろう灌漑水量を推定することもできる(図-17)。そこで 2013 年・2014 年・2015 年において、フェイジョン豆収量の推定値が実績値に等しくなる(相対誤差が 0 になる)ように灌漑水量を仮定することにより、東部灌漑域において 0.8mm から 8.2mm の灌漑水が実際に給水された可能性があることが分かった(図-26)。

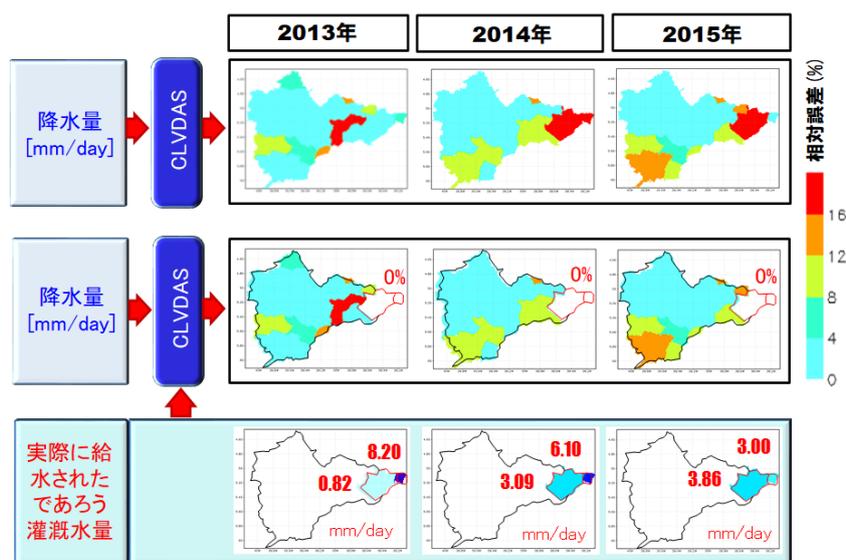


図-26 CLVDAS に基づく灌漑水量の推定

さらに計算した 1km グリッド LAI 季節予測値を地区毎に空間平均し、穀物モデルに入力して 2018 年のフェイジョン豆の収量を求めた。なお NEDM 農業データは 2018 年までしか無いため 2018 年のフェイジョン豆収量の再現予測を行った。干ばつ季節予測システムの予測リードタイムは 3 カ月であるため、1 カ月予測(2018 年 1-2 月から予測を開始した時の 1 カ月目の予測)、2 ヶ月予測(2017 年 12 月-2018 年 1 月から予測を開始した時の 2 カ月目の予測)、3 カ月予測(2017 年 11-12 月から予測を開始した時の 3 カ月目の予測)の 3 つの予測リードタイムを考えた(図-27)。その結果、予測リードタイムが長くなる程、相対誤差は大きくなるものの、予測リードタイム 1 カ月から 2 カ月であれば、モニタリング相当の精度が確保されることも同時に分かった(図-28)。

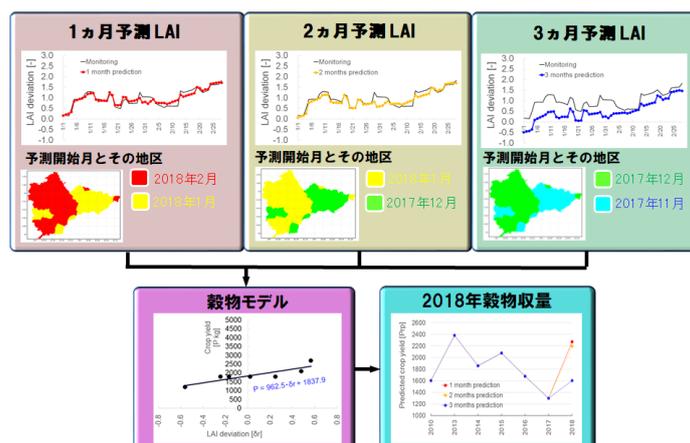


図-27 穀物収量の再現予測プロセス

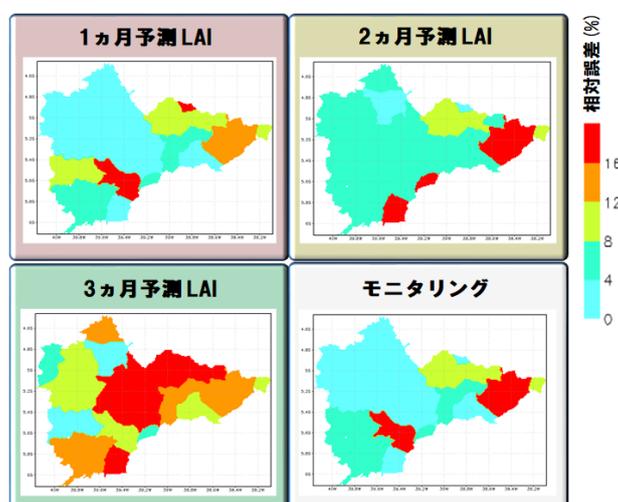


図-28 穀物収量の再現予測

3.5. パナマ共和国における干ばつ解析

(1) パナマ共和国の干ばつ被害状況

パナマ共和国は、北アメリカ大陸と南アメリカ大陸との境界に位置する共和制国家であり、北西でコスタリカ共和国、南東でコロンビア共和国に隣接し、また北はカリブ海、南は太平洋に面する北海道よりもやや小さな約 75,000 km² の国家である(図-29)。閘門式のパナマ運河における水が最大の資源となっているが、近年の気候変化に伴い「乾季の干ばつ」と「雨季の洪水」の社会・経済に与える影響が増大している。特に渇水は、それに伴う水不足とパナマ運河における水位の低下が問題となっている。このような状況により、パナマ運河庁が 2020 年に通航料金を増額したために、日本商船隊の負担増が発生するなど、日本にとっても深刻な問題となっている。

このような干ばつは、2015 年からその傾向が見えはじめ、2016 年の乾季に深刻化した。その後、運河の拡張工事が行われたものの 2019 年にも渇水が発生した(図-30)。



図-29 パナマ共和国

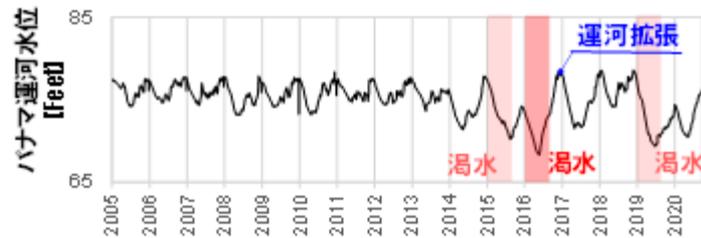


図-30 パナマ運河水位変動(2005-2020年)

(2) AMSR-E/AMSR2 L3 輝度温度プロダクトを用いた CLVDAS の適用

パナマ共和国における干ばつを評価するためにコスタリカ共和国も含むドメインを設定してCLVDASを適用した。これまでと同様、CLVDASのRTMにより計算されたマイクロ波輝度温度をデータ同化するための衛星マイクロ波輝度温度として、AMSR-E/AMSR2 L3 輝度温度プロダクトを用いた。その結果、CLVDAS は空間分解能が 25km と比較的粗いために海洋・運河などの水域の干渉を受け、狭いパナマ共和国を解析することができないことが分かった(図-31)。

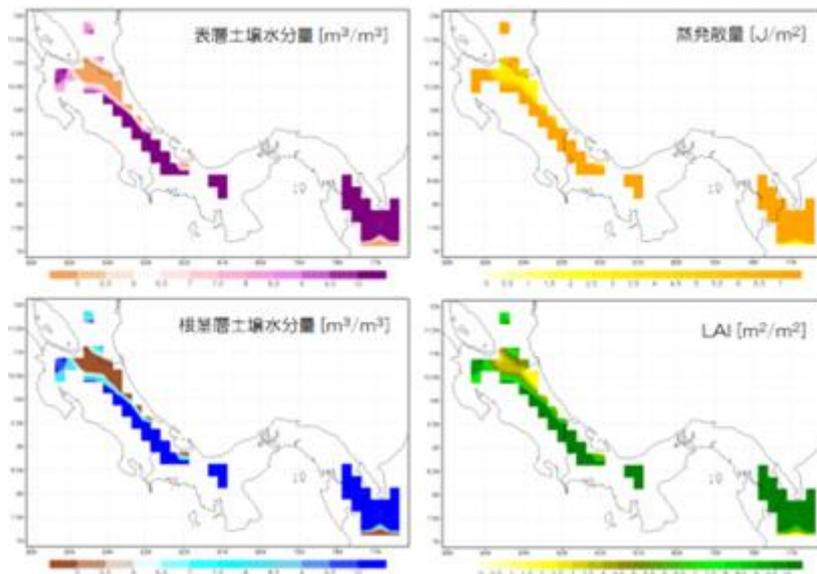


図-31 AMSR-E/AMSR2 L3 輝度温度プロダクトを用いた CLVDAS のパナマ共和国への適用結果

(3) AMSR-E/AMSR2 LIR 輝度温度プロダクトに基づく CLVDAS の適用

JAXA は、小さい(89GHz)アンテナパターン群を大きい(6GHz)アンテナパターンに適切な重み付けを行い合成して再現した新たな LIR 輝度温度を開発した。この輝度温度を適用することにより海岸間際まで輝度温度分布を鮮明に示した実績を持つ。そこで新たな LIR 輝度温度プロダクトを用いて、再度、パナマ共和国に CLVDAS を適用した。なお、LIR は Swathe データであるため、パナマ共和国を含む Swathe を L3 輝度温度プロダクトに Overwrite する形で用いた。しかし LIR プロダクトに基づき CLVDAS を適用しても海洋・運河などの水域の干渉を解消することができず、狭いパナマ共和国を解析することができなかった(図-32)。

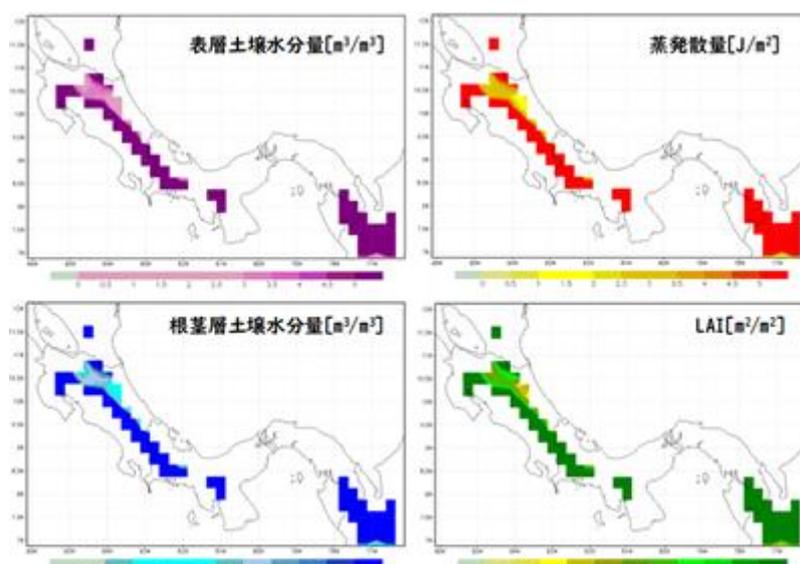


図-32 AMSR-E/AMSR2 LIR 輝度温度に基づく CLVDAS のパナマ共和国への適用結果

(4) 水・エネルギー収支-降雨・流出・氾濫モデル(WEB-RRI)による干ばつ解析

干ばつ被害が深刻化する熱帯収束帯・亜熱帯高圧帯であってもパナマ共和国のように領域の狭さから、どうしても CLVDAS を適用することのできないケースが今後も必ず発生する。そこでデータ同化機能は無いものの、河川流出量に基づくキャリブレーションにより精度が保証される水・エネルギー流出モデルを用いて干ばつ解析を行う手法を適用した。水・エネルギー流出モデルを用いることで流域スケールではあるが、1km 未満の空間分解能の解析が可能であり、パナマ共和国のような水域に囲まれた狭い領域においても適用することができる。

そこで本研究では、パナマ共和国において発生した干ばつ年の中で現地雨量計データの存在する 2015 年を対象に、水・エネルギー流出モデルとして水・エネルギー収支-降雨・流出・氾濫モデル(WEB-RRI)をパナマ運河に構築し、干ばつに伴うパナマ運河における水位低下を緩和対策について検討した。

1) 流域概要・シミュレーション期間

パナマ運河は、太平洋とカリブ海を結ぶ閘門式運河であるが、流域としてみれば 8 つの上流河川からの雨水がガトゥン川に合流してガトゥン閘門からカリブ海に流出するガトゥ

ン川流域(N8.6542-9.5000° , W79.2500-80.1125°)である。具体的に流域に降った雨は、河川水として Chagres 川・Boquerón 川・Pequení 川・Indio Este 川の 4 つの上流河川からアラフエラ湖へ流出し、その後、アラフエラ川を流下してガトゥン川へ流出する。その一方で、Ciri Grande 川・Trinidad 川・Gatún 川・Caño Quebrado 川の 4 つの上流河川からの河川水はガトゥン川に直接流出する。その後、ガトゥン川を流下した河川水は、ガトゥン閘門(ガトゥン・アラフエラ湖の水位変動に応じて制御・操作される)からカリブ海へ流出される(図-33,表-2)。またシミュレーション期間を 2014 年から 2015 年に設定した。

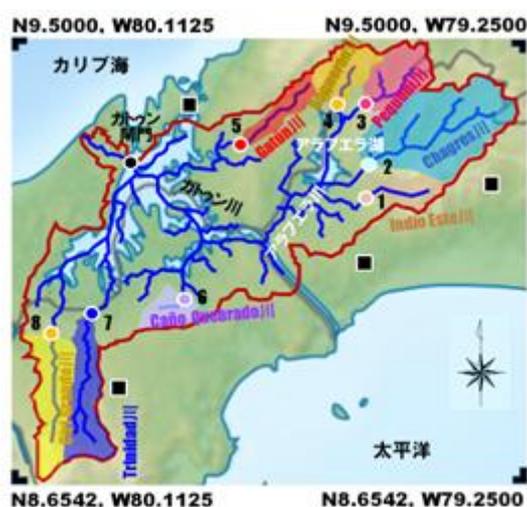


図-33 ガトゥン川流域図：■雨量計位置

表-2 ガトゥン川流域における 8 上流河川

	合流地点名	河川名	経度(W)	緯度(N)
1	Guarumal	Indio Este	79.5203	9.2044
2	Chico	Chagres	79.5097	9.2625
3	Candelaria	Pequení	79.5161	9.3839
4	Peluca	Boquerón	79.5608	9.3811
5	Ciento	Gatún	79.7292	9.3017
6	Cano Quebrado Abajo	Caño Quebrado	79.8267	9.0042
7	El Chorro	Trinidad	79.9903	8.9753
8	Los Canones	Ciri Grande	80.0625	8.9489
	ガトゥン閘門		79.9208	9.2686

2) 水・エネルギー収支-降雨・流出・氾濫モデル

水・エネルギー収支分布型水循環モデル(WEB-DHM)は、 Simple Biosphere model 2(SiB2)の水文モジュールが改良された陸面モデル Hydro-SiB とモデルグリッドベースの分布型流出モデル GBHM を融合させた水循環モデルであり、斜面勾配を考慮した地表面と土壌水分の鉛直・斜面方向の水移動が再現されている。また地表面における水・エネルギー収支と斜面水文過程を組み合わせることにより、大気-陸面相互作用の正確な評価を実現した。また降雨流出氾濫モデル(RRI)は、従来の氾濫モデルでは考慮されなかった水文・流水制御の過程を表現し、また低平地における降雨流出プロセスや氾濫状況を的確に

解析するために移流項を省略して拡散波近似する二次元の浅水方程式を流域に適用した二次元拡散波近似が導入されたモデルである。本研究では、降雨流出氾濫モデル(RRI)の二次元拡散波近似方程式が陸面モデル Hydro-SiB に統合された水・エネルギー収支-降雨・流出・氾濫モデル(WEB-RRI)を適用した。

3) WEB-RRI 流域モデルの構築

WEB-RRI 流域モデルをガトゥン川流域(10,608km²=104km×102km)に 500m グリッドで構築した。次に 2014 年 1 月から 2015 年 12 月までの 2 年間を対象に、雨量計データを流域内で内挿処理して 1 時間分解能の降水量データを作成し、さらに気象庁 55 年長期再解析(JRA55)の気温(K), 気圧(mbar), 短波放射量(W/m²), 長波放射量 (W/m²), 風速 (m/s), 比湿(kg/kg), 相対湿度 (%)を流域内で内挿処理して 1 時間分解能の気象フォーシングデータを作成した。さらに WEB-RRI の陸面モデルである Hydro-SiB に対応する土地利用や土壌情報(透水係数, 飽和度等)は、United States Geological Survey よりダウンロードし、また植生情報としては、可視・近赤外センサー-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)のプロダクトである葉面積指数(LAI)・光合成有効放射吸収量の割合(FPAR)を NASA EARTH DATA よりダウンロードして、WEB-RRI 用の陸面パラメータとして作成した。また前述のようにガトゥン閘門は、ガトゥン・アラフエラ湖の水位に応じて制御・操作されるため、実績の流出量(観測時間間隔：日, 図-34)を WEB-RRI 流域モデルにおけるガトゥン閘門(N9.2686, W79.9208)に制御流量として組み込んだ。WEB-RRI 流域モデルに気象フォーシングと降水量を 1 時間分解能で入力してモデル計算を実施し、8 上流河川の中の Ciri Grande 川と Trinidad 川の最下流地点である Los Canones(N8.9489, W80.0625)と El Chorro(N8.9753, W79.9903)における実績流出量と推定流出量が等しくなるようにモデルパラメータを調節してキャリブレーションを行なった。

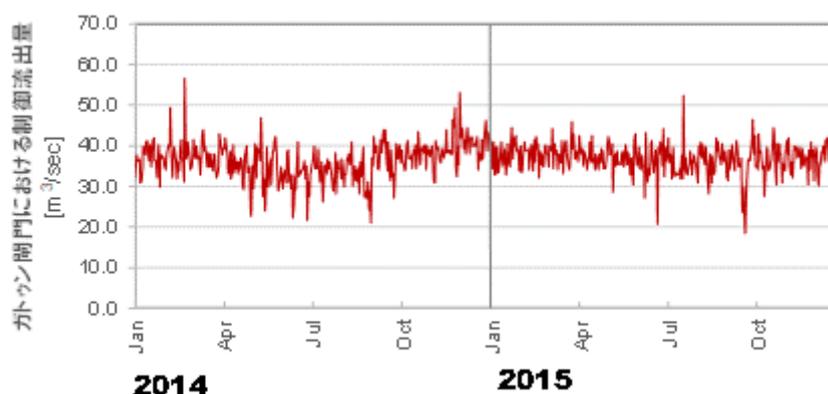


図-34 ガトゥン閘門における制御された実績流出量

4) ガトゥン川への流入量と乾季の水位変動

構築した WEB-RRI 流域モデルを用いて 2014 年 1 月から 2015 年 12 月にかけてシミュレーションし、8 上流河川からガトゥン川への流入量を求めた。なお、2008 年～2013 年および 2016 年については実績の流入量である。一方、ガトゥン川の実績水位データを用いて 1 月から 6 月までの乾季の平均水位を求めた(図-35)。これを見ると、2016 年の

干ばつによる水位低下は明瞭に示されているが、その干ばつ傾向は 2012 年から現れ始め、2015 年、2016 年と次第に水位が低下していることが分かる。また 2015 年の乾季(1 月～6 月)の水位は、前年の 2014 年よりも 39cm も減少していることが分かった。



図-35 ガトゥン川の水位変動: 日変動と乾季(1-6 月)の平均

5) ガトゥン川水位低下の緩和対策検討

干ばつに伴うガトゥン川における水位低下を緩和するためには、乾季に水を供給するための方策が必要である。そこで Ciri Grande 川と Trinidad 川との合流地点にモデル上で仮想的なダムを新設し(図-36)、2014 年の雨季(10-12 月)に上流からの流出量の一部をダムに貯水し、2015 年乾季(1-6 月)に流出量を割り増ししてガトゥン川に放流する。このような単純な手法により 2015 年の干ばつに伴う水位の低下を、どの程度緩和できるかを、次の 4 種の仮定を設定して WEB-RRI シミュレーションを行ない調査した。2014 年雨季(10-12 月)に Ciri Grande 川と Trinidad 川の流出量を 20%, 40%, 60%, 80%カットしてダムへ貯水し、2015 年乾季(1-6 月)にそれぞれ 30%, 60%, 90%, 120%割り増しした流出量をダムから放流する。この 4 種の操作をそれぞれ Case1 から Case4 とした(図-37)。

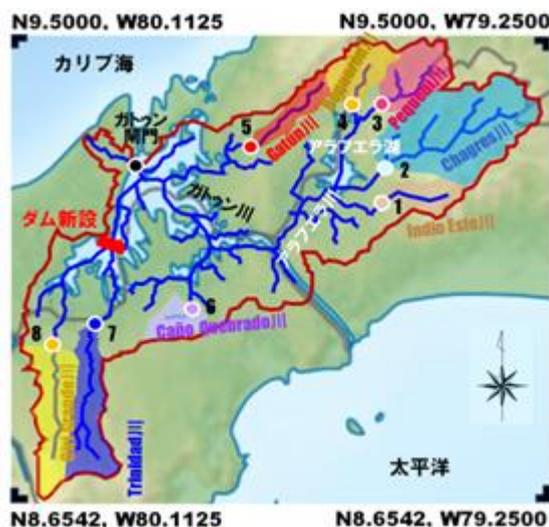


図-36 Ciri Grande と Trinidad 川との合流地点へのダムの新設

その結果、新設ダムからの流出量(図-38)とガトゥン川への流入水量(図-39)は、ダム操作の仮定に応答するように変動していることを確認した。またガトゥン川の水深分布をみると、新設ダムへの貯水期間中の2014年10月27日の事例における水位差(=対策あり[Case 4]-対策なし)はマイナス(水位低下)を示し(図-40)、新設ダムからの放流期間中の2015年5月25日の事例における水位差(=対策あり[Case 4]-対策なし)はプラス(水位上昇)を正確に示していることを確認した(図-41)。またCase 1~4の仮定を設定してWEB-RRIモデルシミュレーションを行った結果、2014年雨季にCiri Grande川とTrinidad川との流出量の80%をカットしてダムへ貯水し、2015年乾季に120%割り増した流出量をダムから放流する最も多くの貯水を行なって渇水期に放流できるケースを適用したとしても39cmであった2014年と2015年との水位差を僅か30cmまでしか改善することができないことが分かった(図-42)。

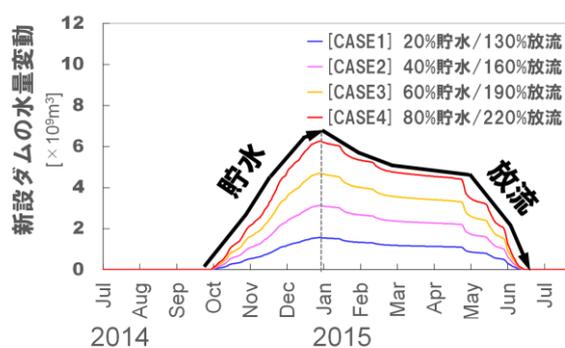


図-37 4 ケースのダム操作

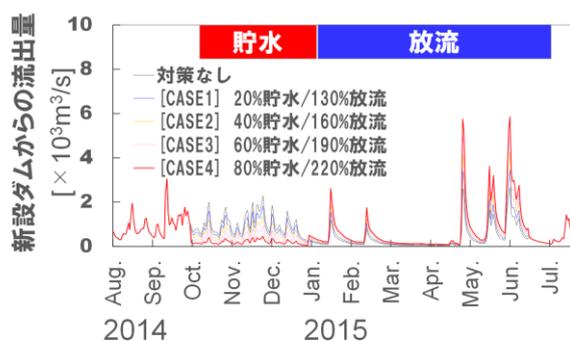


図-38 4 ケースに対応する新設ダムからの流出量

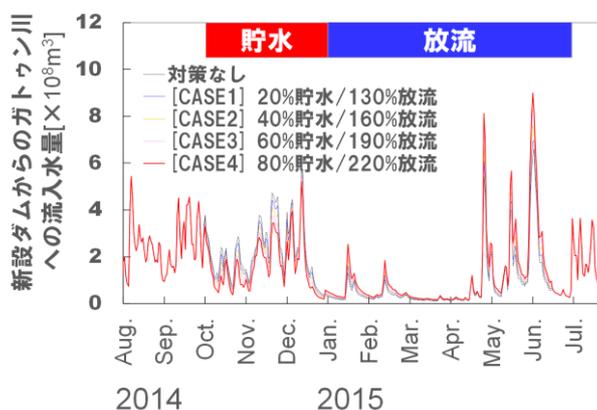


図-39 4 ケースに対応するガトゥン川への流入水量

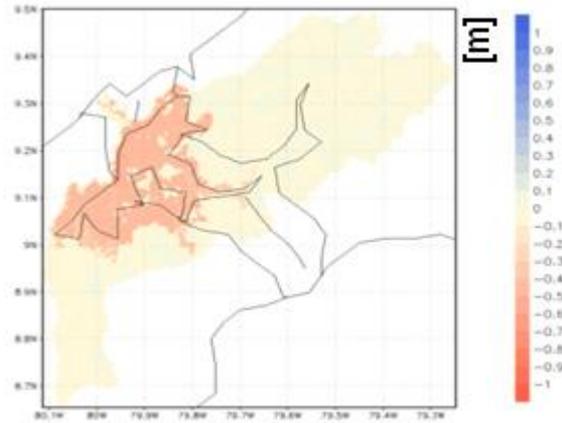


図-40 ガトゥン川の水深差(=対策あり[Case 4]-対策なし):貯水期間の中の 2014 年 10 月 27 日の事例

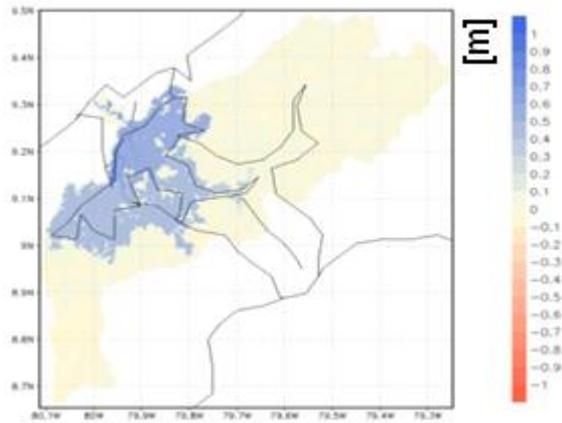


図-41 ガトゥン川の水深差(=対策あり[Case 4]-対策なし):貯水期間の中の 2015 年 5 月 25 日の事例

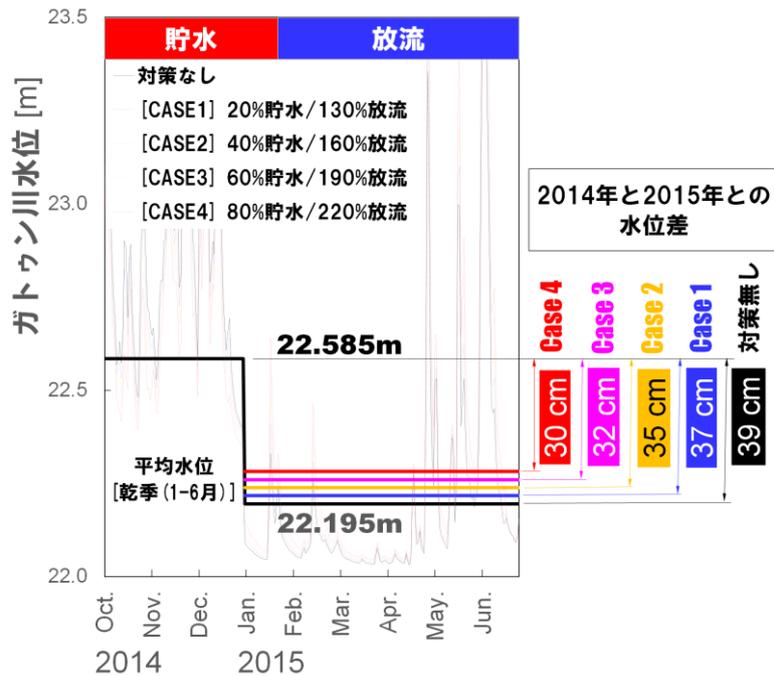


図-42 4 ケースの対策に伴うガトゥン川の水位の変動

6) 結論・課題

本研究では、干ばつに伴うパナマ運河の水位低下に対する緩和対策を検討するために WEB-RRI 流域モデルを構築し、モデル上の仮想的なダムを新設した上で単純なダム操作を仮定してシミュレーションを行った。その結果、最も多くの貯水を行なって乾季に放流できるケース(Case4)を適用した場合であっても、対策無しの場合に 39cm あった 2014 年と 2015 年との水位差を 30cm までにしか緩和することができないことが分かった。本研究では、「パナマ運河における数少ない情報・データを用い」、「工業用水や水力発電用水など人為的使用水量が考慮されていない」、「WEB-RRI において陸面の蒸発散量は考慮されているがガトゥン川の水面における蒸発水量は厳密には考慮されていない」、「ガトゥン閘門における制御・操作された流出量は実績値を用いている」などの様々な制約条件の下、モデル上の仮想的なダム操作の仮定により、その効果を試算した訳であるが、その結果としてパナマ運河岸において、既に渇水対策として提案されている Ciri Grande 川と Trinidad 川の合流点におけるダムの新設だけでは、干ばつに伴うパナマ運河の水位低下の緩和に対する効果が薄い可能性があることを理解することができた。ゆえにダム新設の他にパナマ運河岸が既に提案している「近隣のバヤノ湖から導水(図-43)」、「海水の淡水化(図-44)」や「下水処理場の処理水の利用」などの対策の適用も考える必要があると考えられる。さらにパナマ運河に豊富な水があった 2011 年と、2015 年よりも深刻な渇水が発生した 2016 年との水位差がまだ 1m を超える状況を考えると、パナマ共和国内だけの対策では根本的な解決に至らない可能性も想定される。ゆえに国境を越えるような、より広域の導水による補間も視野に入れた渇水対策も考えておく必要があるかと思われる。

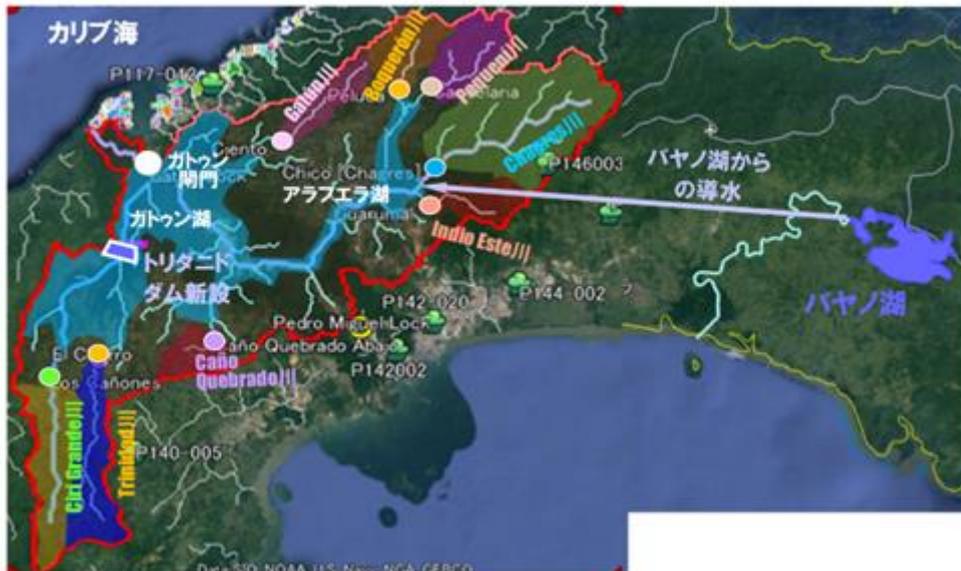


図-43 近隣のバヤノ湖から導水



図-44 海水の淡水化: オーストラリアニューサウスウェールズ州 Major Urban Centres における Desalination plants

3.6. 波及効果（国民生活の質の向上・産業振興・社会貢献へのつながり等）

本研究では、干ばつ被害が深刻化する熱帯収束帯・亜熱帯高圧帯の幾つかの地域を対象とした CLVDAS シミュレーションを行い、主要穀物収量との比較を通じて農業的干ばつ評価の有効性を確認することができた。特にヨルダン・ハシミテ王国に関しては、AI-Balqa Applied 大学との間で開催された気候変動と水問題に関するワークショップにおいて解析結果が紹介され、同国における干ばつ対策について深く議論された。

またブラジル北東域では、CLVDAS を核とした干ばつ監視・季節予測システム(25km グリッド)を開発しただけでは無く、WEB-DHM-Veg を併用することにより州～地区スケール(1km グリッド)の穀物収量の推定や再現予測を検討した。その高空間分解能の検討結果をワークショップ等において現地のステークホルダー・農業従事者・研究者と共有することによりブラジル北東域における営農の方向性について深く議論することができた。

さらに同じく深刻な干ばつ被害を受けるパナマ共和国に対して CLVDAS を適用したが、空間分解能が 25km と比較的粗いために海洋・運河などの水域の干渉を受け、狭いパナマ共和国を解析することができなかった。しかし WEB-RRI による 500m 空間分解能の降雨・流出・氾濫解析を行うことにより渇水被害の軽減方策を検討し、現在、パナマ運河岸が提案しているダムの新設のみでは、根本的な干ばつ被害対策にはならないことを明らかにすることができた。

熊本宣言において end-to-end アプローチの重要性が示されたことは記憶に新しいところであるが、粗い空間分解能のために CLVDAS のみでは社会に貢献し難いような場合であっても、高空間分解能の水・エネルギー流出モデル(WEB-DHM-Veg・WEB-RRI)を併用することで社会に貢献できる結果を引き出すことのできる上記のようなアプローチは、まさに end-to-end アプローチの一つの形とも考えられる。