

# 渇水の予測・評価技術の開発と適応方策に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：大沼克弘、望月貴文、

Abdul Wahid Mohamed Rasmy、筒井浩行

## 【要旨】

今世紀に入り、世界各地で大規模かつ深刻な渇水被害が発生している。本研究では、植生動態－陸面結合データ同化手法(CLVDAS)を核とした渇水監視・季節予測システムを、2012年から深刻な渇水被害を被ったブラジル北東域において開発し、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と再現予測を行った。またブラジル北東域だけではなく、CLVDASの他の渇水地域への適用性について、西アフリカ・ヨルダン・グアテマラにおいて検討した。さらに渇水に伴う深刻な水不足が発生しているパナマ地域に水・エネルギー収支-降雨・流出・氾濫モデルを適用し、渇水被害の軽減方策について検討した。

キーワード：渇水、監視、季節予測、陸面データ同化

## 1. はじめに

今世紀に入り、世界各地で大規模かつ深刻な渇水被害が発生している。本研究では、各種データをデータ統合・解析システム(DIAS)において収集・統合し、衛星データを同化することにより陸面での水循環と植生動態を求める植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVDAS)<sup>1)2)3)</sup>を核とした渇水監視・季節予測システムを2012年から深刻な渇水が発生したブラジル北東域において開発し、その応用として渇水に伴う州スケールの穀物収量への影響について検討した。さらに水・エネルギー収支分布型水循環モデルを併用して高解像度化することにより地区スケールの穀物収量の推定と再現予測を行った。本検討に並行して、ブラジル北東域だけではなく、CLVDASを西アフリカ・ヨルダン・グアテマラに適用し、他の渇水地域への適用性について検討した。加えて、近年、パナマ地域では、深刻な渇水が発生し、それに伴う水不足が大きな問題となっている。そこで本研究では、パナマ地域に水・エネルギー収支-降雨・流出・氾濫モデル(WEB-RR1)を適用し、渇水被害の軽減方策について検討した。

## 2. ブラジル北東域渇水監視・季節予測システムの開発

### 2.1 渇水監視システムの開発

渇水監視システムの対象領域としたブラジル北東域(西経 46.50°-34.50°, 北緯 2.25°-11.25°)を図-1に示す。

DIASは、気象全球データと衛星観測マイクロ波輝度

温度( $T_{b,obs}^{fp}$ )を読み込んで CLVDAS に入力する。さらに CLVDAS において気象データが陸面モデル(EcoHydro-SiB)に入力され、各種の植生動態水水量が計算される。そして、これらの計算値がマイクロ波放射伝達モデル(RTM)に入力されることによりマイクロ波輝度温度( $T_{b,est}^{fp}$ )が推定される。同時に衛星観測マイクロ波輝度温度( $T_{b,obs}^{fp}$ )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( $T_{b,est}^{fp}$ )と衛星観測値( $T_{b,obs}^{fp}$ )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水量が推定される(図-2)。



図-1 対象領域

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

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)。

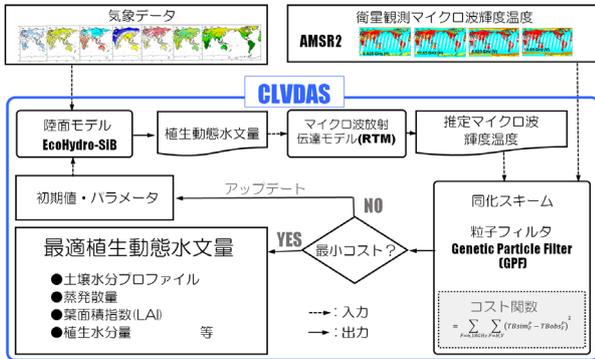


図-2 CLVDAS を核とする渇水監視システムの構造

なお、CLVDAS には、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 が適用されているが、本システムは、植生動態モデル (Dynamic vegetation model) と Simple Biosphere model<sup>24)</sup> の水文モジュールが改良された Hydro-SiB<sup>5)</sup> 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  $\omega-\tau$  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。CLVDAS の入力データは、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他、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があり、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、本システムでは、これまでの CLVDAS の開発過程<sup>1),2),3)</sup>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。また衛星観測マイクロ波輝度温度データには、高性能マイクロ波放射計 2 (AMSR2)のマイクロ波輝度温度(6.925GHz・10.65GHz, 水平・垂直偏波)を適用した。このように渇水監視システムにより日単位で監視される最適な植生動態水含量を視覚的に把握するための可視化システムを DIAS 上に開発した。本システムにおいて表示される植生動態

水含量は、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)であり、画面内での切り替えが可能である。図-3 は、LAI と根茎層土壌水分量の 2 つ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、渇水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。

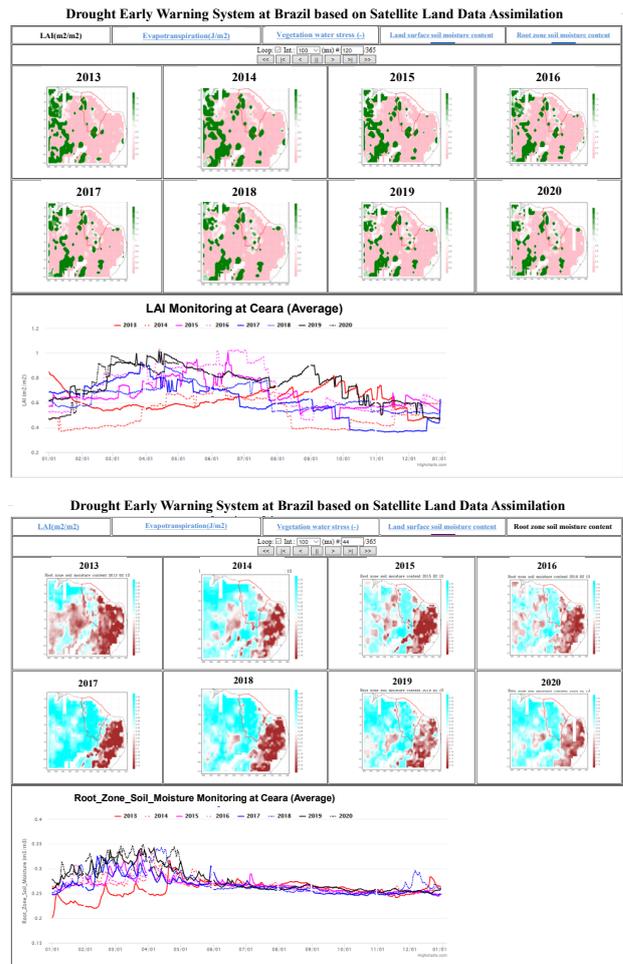


図-3 渇水監視可視化システム:(上)LAI、(下)根茎層土壌水分量

## 2.2 渇水季節予測システムの開発

渇水季節予測システムは、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含量を初期値として、気象データと合わせて陸面モデル EcoHydro-SiB に入力することにより最適な植生動態水含量(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(図-4)。

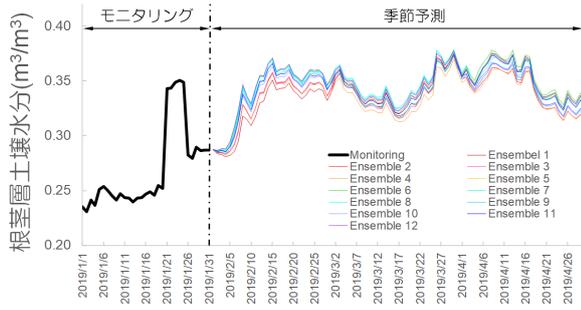


図-4 渇水季節予測システムによる 12 アンサンブルの季節予測 (3 ヶ月): 根茎層土壌水分量の事例

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 ヶ月を設定した。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学量を視覚的に把握するための可視化システムを DIAS 上に開発した(図-5)。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(図-5(1))。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 ヶ月間とその前の一年間の監視が表示される(図-5(2))。

### 2.3 州スケールの渇水システムの応用

渇水システムは、最適な植生動態水文学量を監視するが、その農業情報への応用は、渇水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となる。そこで本節では、渇水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渇水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渇水被害が深刻であったセアラ州(図-1)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て良く成長する。その結果として多くの収量を得ることができる。

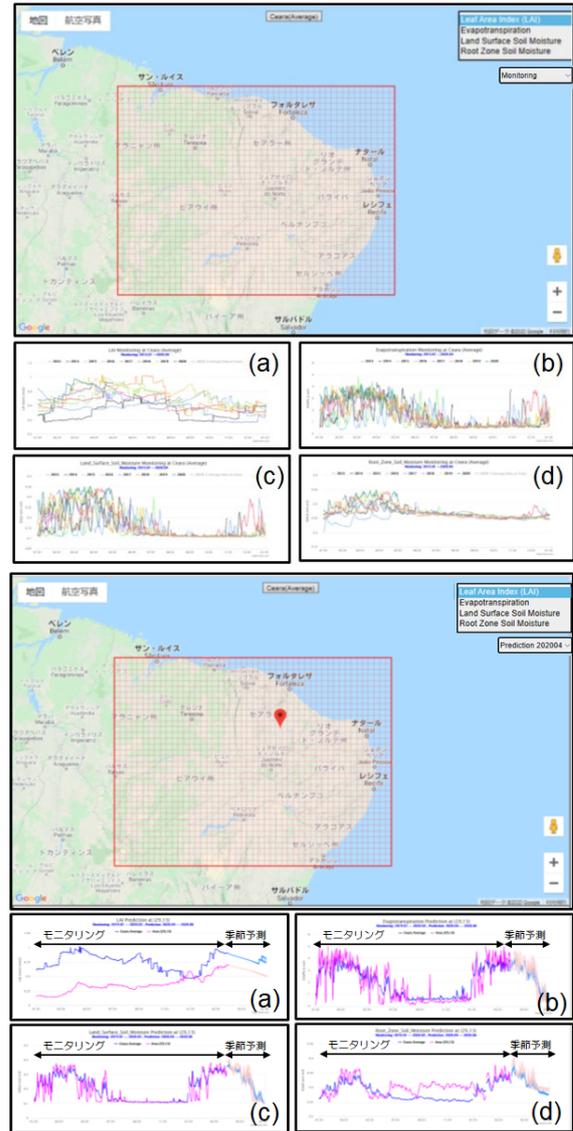


図-5 渇水季節予測可視化システム: (上) デフォルト画面、(下) ピクセル選択画面、(a) LAI、(b) 蒸発散量、(c) 表層土壌水分量、(d) 根茎層土壌水分量

CLVDAS は、陸面モデル(Eco-HydroSiB)とマイクロ波放射伝達モデルとの統合、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、マイクロ波放射伝達モデル内で、LAI から植生水分量を一意的に計算できる。そこで本研究では、LAI を穀物成長の指標として選定し、2003 年から 2013 年までの日単位の LAI から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  $\sigma$  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)を算定して用いた。また穀物タイ

ブとして、セアラ州の主要穀物であるカシューナッツ ( $P_{Cashew}$ )、フェイジョン豆( $P_{Beans}$ )を対象とし、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。

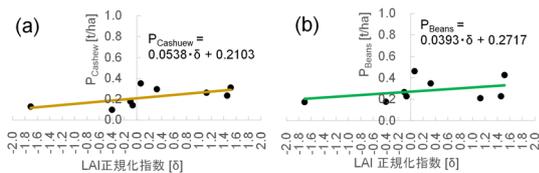


図-6 LAI 正規化指数( $\sigma$ )と穀物収量(P)からの穀物モデルの導出：(a)カシューナッツ ( $P_{Cashew}$ )、(b)フェイジョン豆 ( $P_{Beans}$ )

また 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、それを加算した降水を 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-7)。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つたであろう灌漑水量を求めることができた(図-8)。渇水被害は、2014 年に最も深刻であつ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つ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-9)。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済んだという結果が得られたことが分かった。

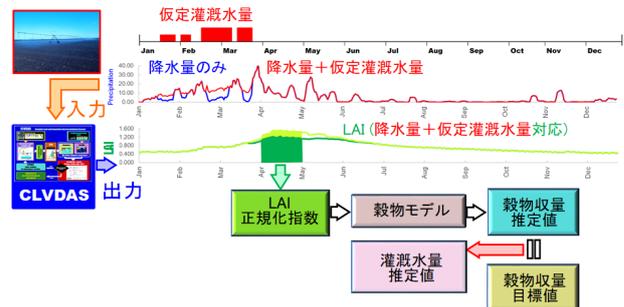


図-7 CLVDAS に基づく灌漑水量の推定プロセス

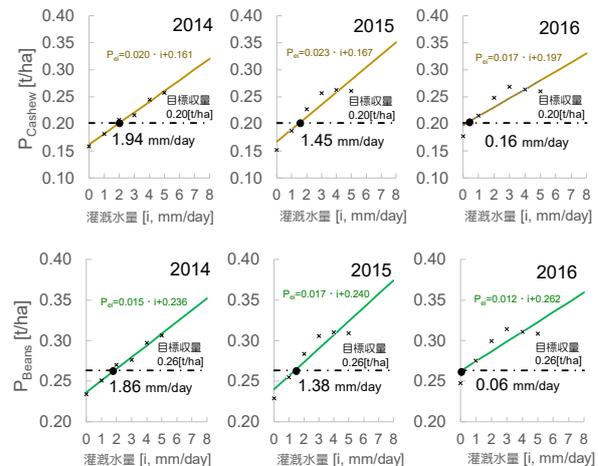


図-8 目標穀物収量を得るために必要な最適な灌漑水量の推定：(上)カシューナッツ、(下)フェイジョン豆

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

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。

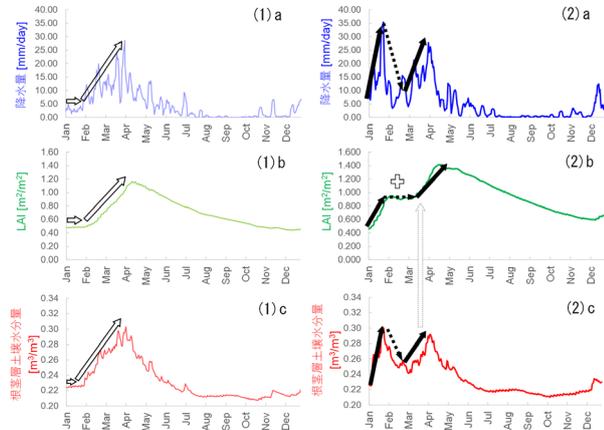


図-9 降水量(a)・LAI(b)・根茎層土壌水分量(c)の比較:(1)は2014-15年の平均値、(2)は2016年

## 2.4 地区スケールの渇水システムの応用

前節において、ブラジル北東域の中でも深刻な渇水被害を受けたセアラ州において渇水監視・季節予測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、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-10)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。そして以下のような植生状態水文量の高解像度化手法を確立した。25kmグリッドCLVDAS LAI [ $L_{25}$ ]と1kmグリッドWEB-DHM-Veg LAI [ $L_{01}(n)$ ]がそれぞれ推定されるが、1kmグリッドWEB-DHM-Veg LAI [ $L_{01}(n)$ ]とその平均値 [ $M$ ]との差 [ $\delta(n)$ ]を1kmグリッド単位で計算し、同時に25kmグリッドCLVDAS LAI [ $L_{25}$ ]と1kmグリッドWEB-DHM-Veg LAIの平均値 [ $M$ ]との比率 [ $L_{25}/M$ ]を計算した。そして両者の積を25kmグリッドCLVDAS LAI [ $L_{25}$ ]に足すことにより精度の高い25kmグリッドCLVDAS LAIをWEB-DHM-Veg LAIの持つ1kmグリッドの空間分布に再配分し、バナブイユ川流域における1kmグリッドLAI [ $LAI_{001}(n)$ ]を計算した(図-11, 12)。すなわち、これは、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グリッドに高解像度化する手法である。



図-10 セアラ州中央に位置するバナブイユ川流域

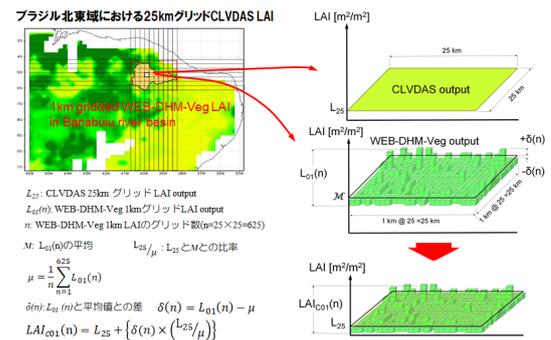


図-11 植生状態水文量の高解像度化手法

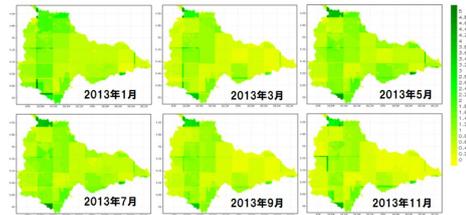


図-12 高解像度化手法適用後の1kmグリッドLAI

さらに渇水監視・季節予測システムは、2017年11月以降に12アンサンブル季節予測(3ヵ月)を行っているが、同手法により予測されたLAIの高解像化を行った(図-13)。またバナブイユ川流域は、17地区に区分されるが(図-14)、渇水監視・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。前節で記述したように、一般的に根から多くの土壌水分を吸収した穀物は多くの穀物収量を得ることができる。一方、CLVDASは、正確なLAIを計算し、RTM内でLAIから植生水分量を一意的に計算できる。そこで本節でもLAIを穀物成長の指標として選定し、2010年から2018年までの日単位LAIから一般的に渇水解析で用いられるzスコアに基づく正規化指数を算定して用いた。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。さらにブラジル北東域における主要農産物であるフェイジョン豆をターゲットとした。次に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。さらに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た(図-15)。推定精度は、相対誤差  $RE(\%) = \frac{Po - Pe}{Po} \times 100$  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の収量推定値である。図-16は、地区毎のフェイジョン豆収量の推定精度を相対誤差で示したものである。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る。前節で記述したように、渇水監視・季節予測システムの核である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、それを加算した降水を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-7)。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-17)。



図-14 バナブイユ川流域における地区区分

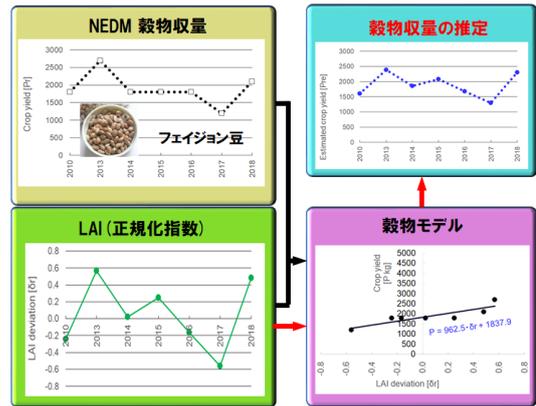


図-15 LAIの正規化指数・穀物収量に基づく穀物モデルの導出と穀物収量の推定

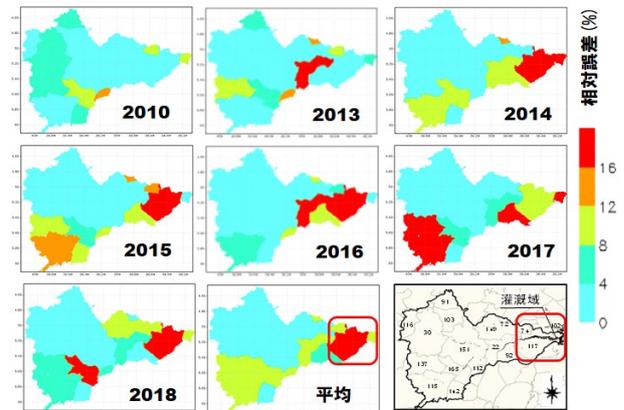


図-16 相対誤差によるフェイジョン豆収量の推定精度評価

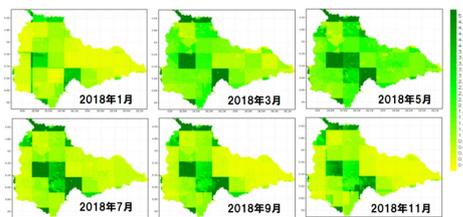


図-13 高解像度手法適用後の1 km グリッドLAI予測情報：2018年の事例、1カ月予測12アンサンブル平均

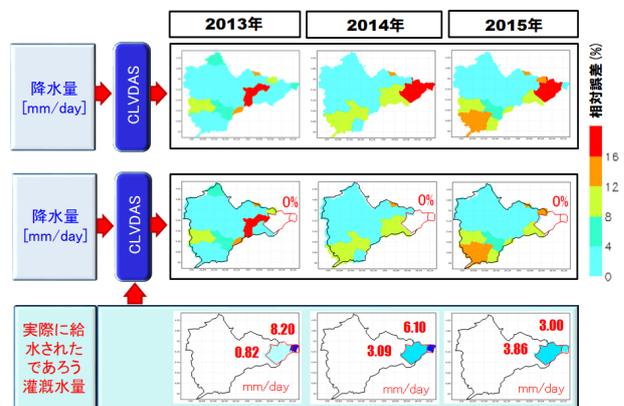


図-17 CLVDASに基づく灌漑水量の推定

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。渇水監視・季節予測システムの予測リードタイムは 3 ヶ月であるため、1 ヶ月予測(2018 年 1-2 月から予測を開始した時の 1 ヶ月目の予測)、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 ヶ月目の予測)、3 ヶ月予測(2017 年 11-12 月から予測を開始した時の 3 ヶ月目の予測)の 3 つの予測リードタイムを考えた(図-18)。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 ヶ月から 2 ヶ月であれば、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-19)。



図-18 穀物収量の再現予測プロセス

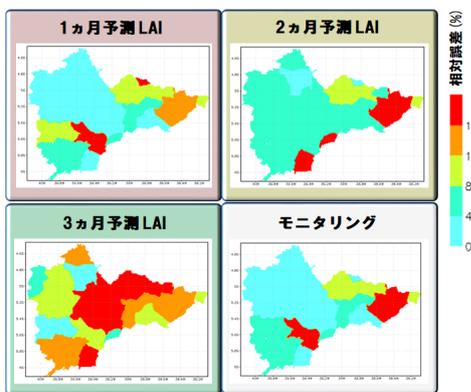


図-19 穀物収量の再現予測

### 3. 他の渇水地域への適用性の検討

第 2 章において記述したように、渇水検討における CLVDAS の有効性がブラジル北東域で確認された。しかし本システムが、ブラジル北東域以外にも適用可能なものであるかを確認する必要がある。そこでブラジル北東域以外の深刻な渇水地域(グアテマラ共和国、西アフリカ、ヨルダン・ハシミテ王国)に CLVDAS を適用し、CLVDAS の他の渇水地域への適用可能性につい

て検討した。

### 3.1 グアテマラ共和国

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、グアテマラ共和国全域(図-20)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-21)。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-22)。

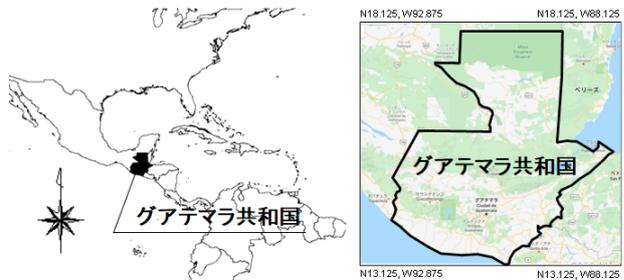


図-20 グアテマラ共和国対象領域

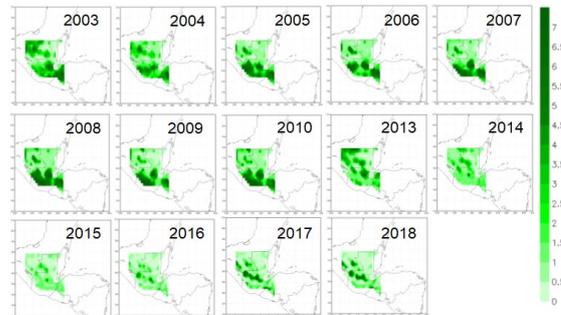


図-21 LAI 推定結果

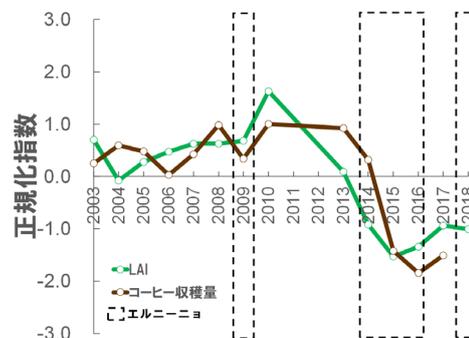


図-22 CLVDAS に基づく LAI とコーヒー収量との比較

### 3.2 西アフリカ

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。西アフリカに CLVDAS を適用し(図-23)、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-24)。さらにサヘル-内陸域(図-23)の植生水分量の空間平均を求めた。一方、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バッタ(蝗害)の年間発生日数を読み取った。そして、これらの正規化指数を計算して比較した。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が分かった。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。一方、2003-2004 年は、植生水分量が高いものの収量は低い。それに対して 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を考えると、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-25)。

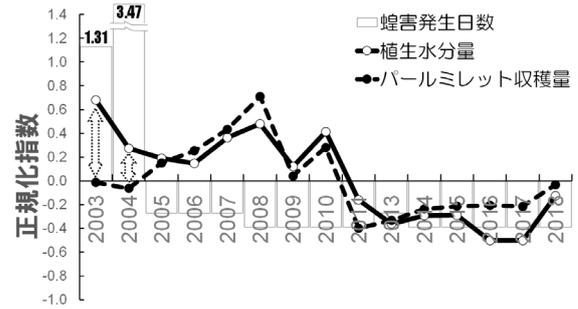


図-25 サヘル-内陸域におけるパールミレット収量・CLVDAS に基づく植生水分量・蝗害の年間発生日数の比較

### 3.3 ヨルダン・ハシミテ王国

ヨルダンは、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、ヨルダンに CLVDAS を適用し(図-26)、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-27)。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 より収量を入手した。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-28)。

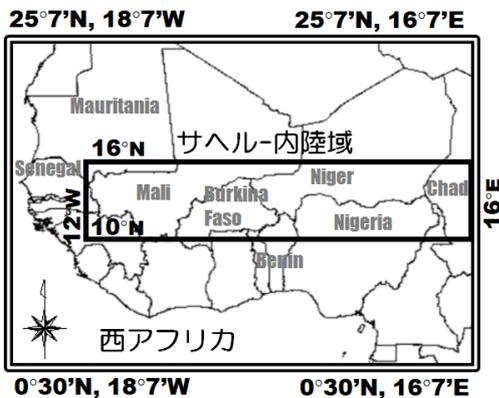


図-23 西アフリカ対象領域

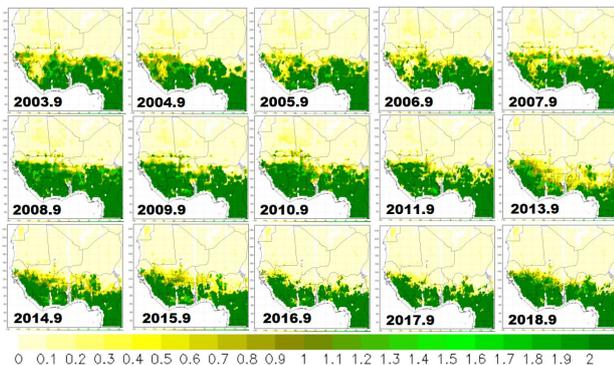


図-24 植生水分量推定結果

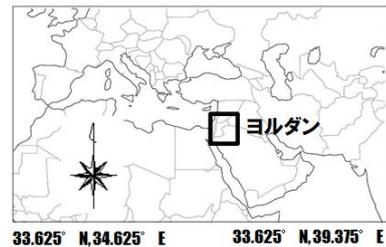


図-26 ヨルダン対象領域

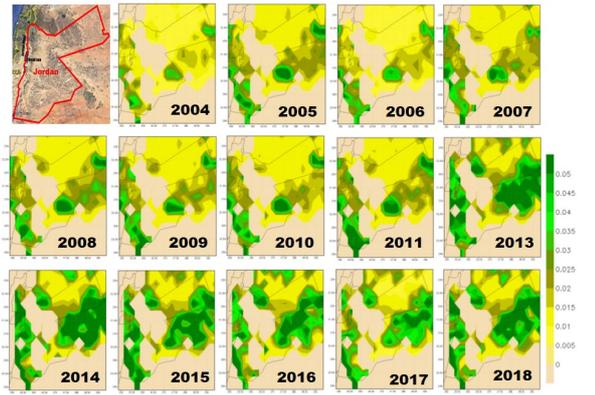


図-27 LAI 推定結果



図-28 CLVDAS に基づく LAI とトマト収量との比較

#### 4. パナマ地域における渇水検討

パナマ地域は、地球温暖化に伴う気候変化により乾季の渇水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、それに伴う水不足の対策として、パナマ運河庁が 2020 年に通航料金を増額したために、日本商船隊への年間約 30 億円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。国土交通本省の調査によれば、2015 年からその傾向が見えはじめた深刻な渇水が 2016 年の乾季に発生したと報告されている。その後、運河の拡張が行われたものの 2019 年にも深刻な渇水が発生した(図-29)。このことからパナマ地域における渇水被害の軽減については、2015 年・2016 年・2019 年の何れかを対象に検討すべきであることが分かった。

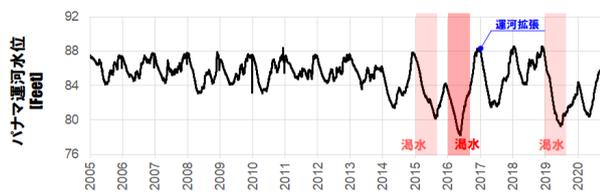


図-29 パナマ運河水位変動(国土交通省調べ)

パナマ地域における 8 つの上流域に降った雨は、河川水として Chagres 川・Boquerón 川・Pequenú 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湖へ流出す

る。その一方で、他の 4 つの上流河川からの河川水はガトゥン湖に直接流出する。その後、ガトゥン川(湖)を流下した河川水は、ガトゥン閘門(ガトゥン湖・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。このような流域システムによりガトゥン川流域は、パナマ地域に構成されている(図-30、表-2)。次に本流域の雨量計データであるが、調査の結果、流域内の雨量計データは、2000 年から 2017 年までしか無く、その内、2016 年に関しては存在しないことが分かった。雨量計データの代替案として衛星全球降水マップ(GSMaP)等のマイクロ波リモートセンシングに基づく降水量プロダクトを活用する手段も考えられる。しかし、その精度を考えると、今回のような第一ステップでは、より正確な雨量計データを適用すべきであると判断し、本研究では、2016 年の最も深刻な渇水を対象とすることはできないが、2019 年と同レベルの渇水が発生した 2015 年の渇水を対象とすることとし、シミュレーション期間を 2014 年から 2015 年に設定した。また本研究では、水・エネルギー収支-降雨・流出・氾濫モデル(WEB-RRI)を用いて、対象流域であるガトゥン川流域(約 106ha=104km×102km)を 500m×500m グリッドでモデル化した。第一に雨量計データを流域内で内挿処理して降水量データを作成した。次に流域に対応する WEB-RRI 用の陸面パラメータを作成した(図-31)。

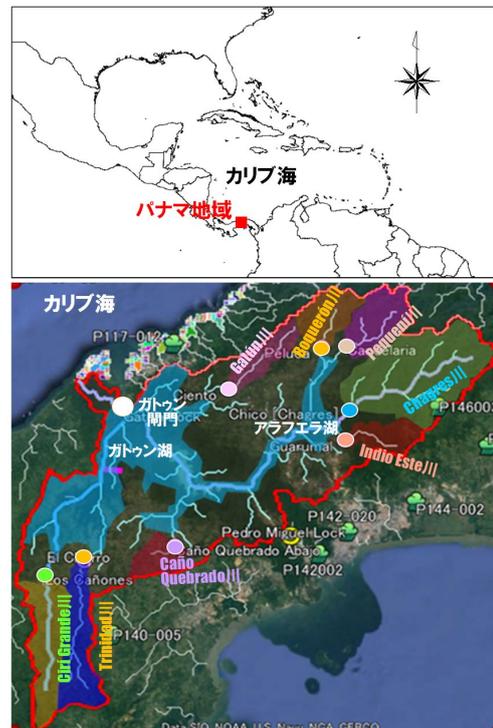


図-30 パナマ地域におけるガトゥン川流域

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	Chico	Chagres	79.5097	9.2625
2	Los Canones	Ciri Grande	80.0625	8.9489
3	El Chorro	Trinidad	79.9903	8.9753
4	Ciento	Gatún	79.7292	9.3017
5	Peluca	Boquerón	79.5608	9.3811
6	Candelaria	Pequeñi	79.5161	9.3839
7	Guarumal	Indio Este	79.5203	9.2044
8	Cano Quebrado Abajo	Caño Quebrado	79.8267	9.0042
ガトゥン閘門			79.9208	9.2686

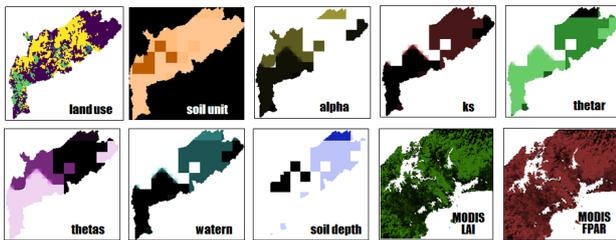


図-31 WEB-RRI 用陸面パラメータ

また前述のようにガトゥン閘門は、ガトゥン湖・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(図-32)を WEB-RRI モデルに組み込んだ。そして 8 上流河川の内 Ciri Grande 川と Trinidad 川の最下流地点である Los Canones と El Chorro における実績の流出量とのキャリブレーションを行ない(図-33)、ガトゥン川流域 WEB-RRI を構築した。構築した WEB-RRI を用いて 2014 年から 2015 年にかけてシミュレーションし、8 上流河川からガトゥン湖への流入量を求めた。なお、2008 年～2013 年および 2016 年については実績値である(図-34(1))。さらに 8 上流河川からガトゥン湖への流出量を換算してガトゥン湖の総水量を求めた(図-34(2))。次にガトゥン湖の総水量(Q, m<sup>3</sup>)と水位(h, 標高 m)との関係(図-35)にガトゥン湖の総水量を入力してガトゥン湖の水位を求め、1 月から 6 月までの乾季の平均値を求めた(図-36)。これを見ると、2016 年の渇水による水位低下は明瞭に示されているが、その渇水傾向は 2012 年から徐々に現れ始め、2015 年には 2016 年に近い水位低下が示され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 9.3cm も減少していることが分かった。

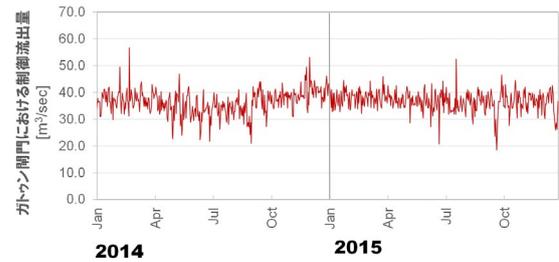
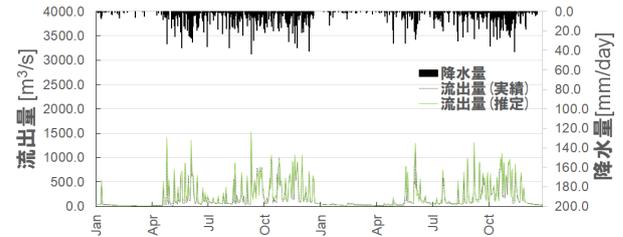


図-32 ガトゥン閘門における制御された実績流出量

(1) Los Cañones



(2) El chorro

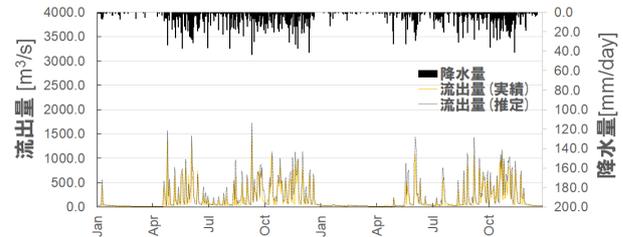


図-33 ガトゥン川流域 WEB-RRI モデルのキャリブレーション: (1) Los Canones、(2) El Chorro

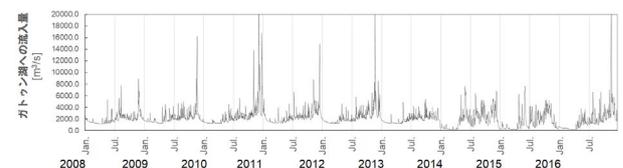
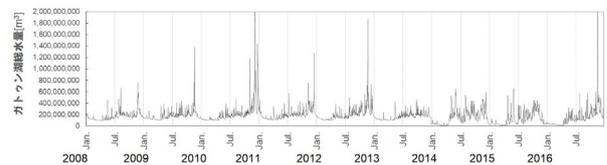


図-34 ガトゥン湖への流入量(1)と総水量(2)



図-35 ガトゥン湖の総水量と水位との関係



図-36 ガトゥン湖の水位変動

そこで本研究では、Ciri Grande 川と Trinidad 川との合流地点にモデル上でダムを新設し(図-37)、単純な流量操作による渇水被害の軽減方策について検討した。一般的に渇水の予測では、信頼性の面において、3 ヶ月程度の季節予測が限界であると言われる。そこで仮に乾季に入る 2015 年 1 月の 3 ヶ月前の 2014 年 10 月の時点で、2015 年 1 月の渇水傾向が確認された時に、その 3 ヶ月前の 2014 年 10 月から 12 月までの雨季に雨水を新設ダムに貯水し、2015 年 1 月から 6 月の乾季に流出量を増量してガトゥン湖に放流する操作を行う。このような単純な新設ダムの操作により 2015 年の渇水に伴う水位の低下を 2014 年相当にまで増加させることが可能であるか調査を行った。次の 4 ケースのダム操作を設定して WEB-RRI シミュレーションを行った。2014 年 10-12 月(雨季)に 20%、40%、60%、80%、Ciri Grande 川と Trinidad 川との流出量をカットしてダムへ貯留し、2015 年 1-6 月(乾季)に 30%、60%、90%、120%増量した流出量をダムから放流する。そして、それぞれを Case1 から Case4 とした(図-38)。新設ダムからの流出量とガトゥン湖への流入水量は、ダム操作にตอบสนองするように変動していることが分かる(図-39)。またガトゥン湖の水深分布を見てみると、新設ダムへの貯水期間(2014 年 10 月 27 日)の場合は、水深差(=対策あり[Case 4]-対策なし)が負となり、逆に放流期間(2015 年 5 月 25 日)の場

合は、正になる状況を明瞭に理解することができる(図-40)。



図-37 Ciri Grande 川と Trinidad 川との合流地点へのダムの新設

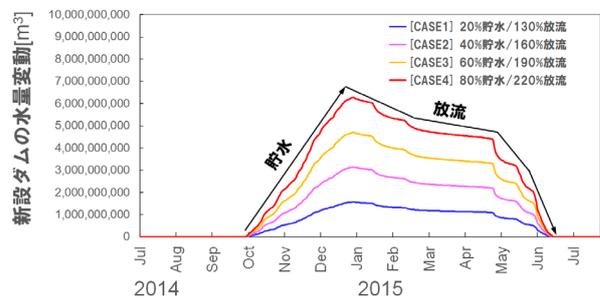


図-38 4 ケースのダム操作

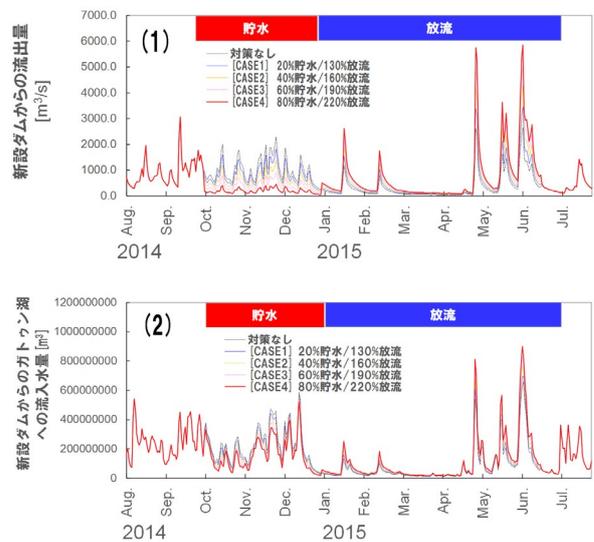


図-39 新設ダムからの流出量(1)とガトゥン湖への流入水量(2)

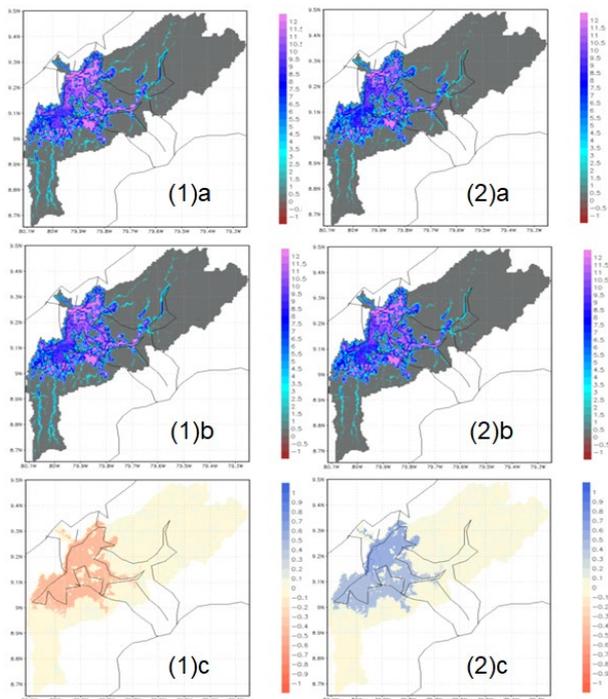


図-40 ガトゥン湖の水深分布：(1)貯水期間(2014年10月27日)、(2)放流期間(2015年5月25日)、aは対策なし、bは対策あり(Case4)、cは、水深差(=対策あり[Case4]-対策なし)

本研究におけるWEB-RRIを用いた対策検討シミュレーションでは、「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、ガトゥン湖面における蒸発水量は厳密には考慮されていない」・「ガトゥン湖では考慮されているが、アラフエラ湖の水量(Q)-水深(h)関係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た」などの条件はあるものの、シミュレーションを行った結果、Case4(2014年10-12月(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留し、2015年1-6月(乾季)に120%増量した流出量をダムから放流する)を採用した場合、9.3cmであった乾季(1-6月)の平均水位の2014年と2015年との差を、それに近い8.7cmまで増加させることができることが分かった(図-41)。しかしながら2010年以前の高い水位には、ほど遠いため、さらに渇水に伴う水不足を緩和するためには、パナマ運河岸が立案している

「Chagres川上流の北東に位置するバヤノ湖から導水」、「海水の淡水化」や「下水処理場の処理水の利用」なども渇水被害の緩和対策として加える必要があるかと思われる。

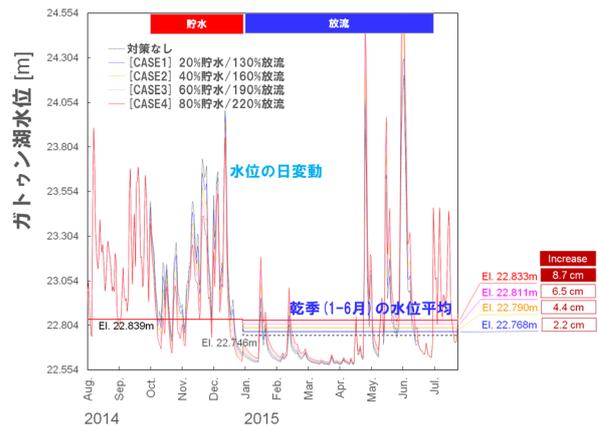


図-41 各対策に伴うガトゥン湖水位の変化

#### 参考文献

- 1) Sawada, Y. and Koike, T.: Simultaneous estimation of both hydrological and ecological parameters in an eco-hydrological model by assimilating microwave signal, Journal of Geophysical Research – Atmospheres, Vol.119, pp.8839-8857, 2014.
- 2) Sawada, Y., Koike, T. and Walker, J. P. : A land data assimilation system for simultaneous simulation of soil moisture and vegetation dynamics, Journal of Geophysical Research – Atmospheres, Vol. 120, pp.5910-5930, 2015.
- 3) Sawada, Y. and Koike, T.: Towards ecohydrological drought monitoring and prediction using a land data assimilation system: a case study on the Horn of Africa drought (2010-2011), Journal of Geophysical Research – Atmospheres, Vol. 121, pp. 8229-8242, 2016.
- 4) Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D. and Bounoua, L. : A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part I: Model formulation, J. Clim., Vol. 9, pp.676–705, 1996.
- 5) Wang, L., Koike, T., Yang, D. and Yang, K. : Improving the hydrology of the Simple Biosphere Model 2 and its evaluation within the framework of a distributed hydrological model, Hydrol. Sci. J., Vol. 54(6), pp.989–1006, 2009.
- 6) Hiroyuki Tsutsui, Yohei Sawada, Katsuhiko Onuma, Hiroyuki Ito, Toshio Koike, Drought Monitoring over West Africa Based on an Ecohydrological Simulation (2003–2018), Hydrology 2021, 8, 155, DOI <https://doi.org/10.3390/hydrology8040155>.

# STUDY ON THE DEVELOPMENT OF DROUGHT PREDICTION AND ASSESSMENT AND ITS ADAPTATION

Research Period: FY2019-2022

Research Team: Water-related Hazard Research Group

Author: OONUMA Katsuhiro

MOCHIZUZKI Takafumi

Abdul Wahid Mohamed Rasmy

TSUTSUI Hiroyuki

**Abstract:** Since this century began, significant and serious drought disaster has been occurred over the global. In this study, the drought monitoring and seasonal prediction system based on the Coupled Land and Vegetation Data Assimilation System (CLVDAS) was developed in the Brazilian Northeast where has been suffering from prolonged droughts since 2012. As its applied research, the estimation and reproducible prediction of crop yield was studied for state - municipal scale by using the water and energy budget-based distributed hydrological model together. Furthermore, applicability of CLVDAS to another region was researched not only he Brazilian Northeast but also the West Africa, Jordan, and Guatemala. In addition, the reduction measures for drought damage were studied by using the water and energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation model (WEB-RRI) in the Panama region where has been serious water shortage accompanying drought disaster.

**Keywords:** Drought, Monitoring, Seasonal prediction, Land data assimilation.