

植生動態水文量監視・予測システムを用いた渇水評価

筒井浩行・大沼克弘・アブドゥル・ワヒド・モハメッド・ラスミ

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が発生している。一定期間に雨が降らないことにより気象的渇水が発生し、それが継続して根茎層における土壌水分までもが減少すると灌漑を行えない天水地域における農作物の成長に影響を及ぼす農業的渇水が発生する。さらに雨不足が継続するとダム・貯水池などの水量の低下までもを引き起こす水文的渇水が発生し、都市部における水不足や灌漑地域における農作物の成長に影響を及ぼす。

ただし気象的渇水が発生したとしても根茎層における土壌水分が豊富に存在していれば、農業的渇水や水文的渇水に移行したとしても農作物の成長は影響を受けることは無い。ゆえに雨水が土壤に浸透し、根茎層に貯水され、根から吸収されて農作物が成長する植生動態・水循環プロセスを正確に評価できるシステムの開発は重要となる。

そのシステムの適用手順としては、世界的に深刻な農業的渇水被害を受ける天水地域へ適用して十分な実績を得た上で、日本のような水文的渇水を受ける灌漑地域に適用し、ダムの最適操作や貯水池の有効活用などの渇水対策を検討すると共に農業への影響を評価することが理想的である。

そこで本研究では、植生動態・水循環プロセスを評価することのできる植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVDAS)^{1)・2)}に基づく監視・予測システムを開発し、2012年から深刻な農業的渇水被害を被った天水農業が盛んなブラジル北東域に適用し、その応用として、州スケールで渇水による穀物成長への影響について検討した。

2. 植生動態水文量監視・予測システムの開発

2.1 植生動態水文量監視システムの開発

植生動態水文量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。ブラジル北東域の北・東側



図-1 対象領域

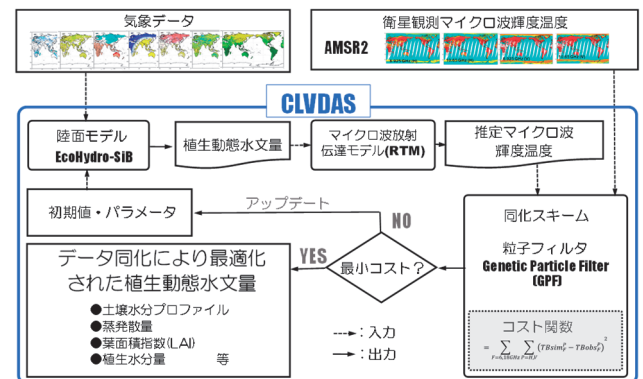


図-2 CLVDASを核とする植生動態水文量監視システムの構造

は南大西洋に面し、西側はアマゾン熱帯雨林地帯に近づく程、密な森林が増加する。さらにセアラ州を中心とした中央部には、礫が混在する痩せた土壤も存在するなど変化に富んだ地域的特徴を持つ。

データ統合・解析システムDIAS(<https://diasjp.net/>)は、気象全球データと衛星観測マイクロ波輝度温度を読み込んで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、各種の植生動態水文量が計算される。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、マイクロ波輝度温度の推定値と衛星観測値との差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がデータ同化される。その結果として表層土壌水分量(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, 単位面積当たりの葉の面積 : m^2/m^2)などのデータ同化により最適化された植生動態水文量が推定される(図-2)。

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、本モデルは、植生動態モデル(Dynamic vegetation model)と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マイクロ波放射伝達モデルが適用されている。マイクロ波放射伝達モデルは、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、全球の土性データなどの静的全球データの他、陸面モデルの入力値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などの動的全球データがある。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)が挙げられるが、本システムでは、CLVDASの開発過程^{1),2)}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。またオーストラリア・モンゴル・米国・マリなどの地上検証サイトにおいてCLVDASの推定精度検証が行われ、RMSE(二乗平均平方根誤差: 残差の標準偏差)で土壌水分量 $0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ 以下・LAI $0.16\text{ m}^2/\text{m}^2$ 以下の良好な推定精度が得られている。

この植生動態水文量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文量を視覚的に把握するための可視化システムをデータ統合・解析システム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文量は、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。乾季(8-12月)のセアラ州において、深刻な渇水が発生した2014から2018年にかけてLAIが小さい値を示していることが分かる。しかし渇水が解消された2019年にはそれが回復している。

2.2 植生動態水文量予測システムの開発

植生動態水文量予測システムは、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文量を初期値として用いた。また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た。

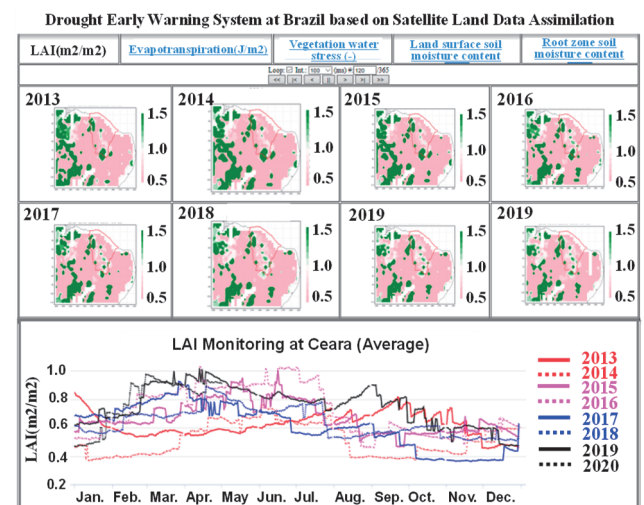


図-3 植生動態水文量監視可視化システム:葉面積指数(LAI)

さらに渇水評価に重要な降水量については将来季節予測プロダクトを用いて前年のGLDAS 2.1 全球降水量データを補正した。そしてこれらの気象データおよび将来季節予測降水量データを陸面モデルに入力することによりデータ同化により最適化された植生動態水文量(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った。将来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

と言われる3カ月を設定した。また監視システムと同様に、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上に開発した。ピクセルを選択し、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)の内、確認が必要な植生動態水文量を選択することにより、選択した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-4はLAI(m^2/m^2)を選択した事例である。

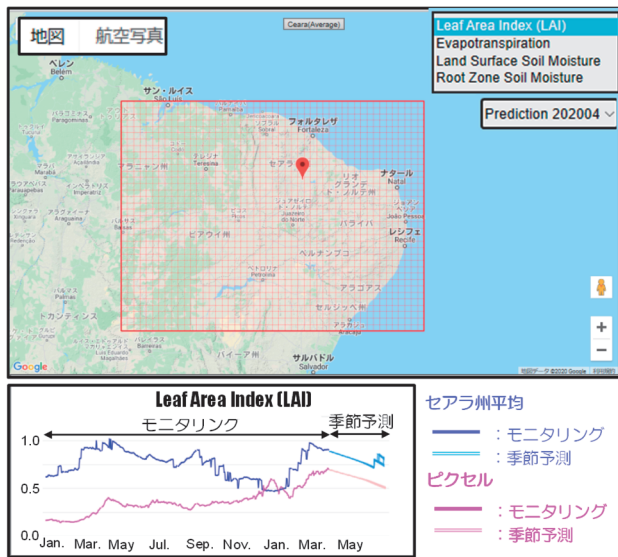


図-4 植生動態水文量予測可視化システム：葉面積指数(LAI)の選択事例

植生動態水文量監視・予測システムは、データ同化により最適化された植生動態水文量を監視するが、その農業情報への応用は、渇水により被害を受けた現地の農業従事者にとって重要である。そこで本研究では、セアラ州を対象に本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。一般的に、穀物は根から多くの水分を吸収することにより多くの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。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、それ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LAIから渇水解析において一般的に用いられる正規化指数($=((x_i - M)/\sigma)$ 、 x_i は任意の日(i)

の変数、 M と σ は任意の日(j)の2003年から2013年までの期間の x_j の平均値と標準偏差)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})とフェイジョン豆(P_{Beans})を対象とした。さらに、その穀物収量はブラジルの穀物統計データベース(IBGE-SIDRA)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-5)。次いで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RMSE0.06(t)以下、bias (バイアス: 誤差のうち一定の傾向を持った誤差)0.03(t)以下であることを確認した。

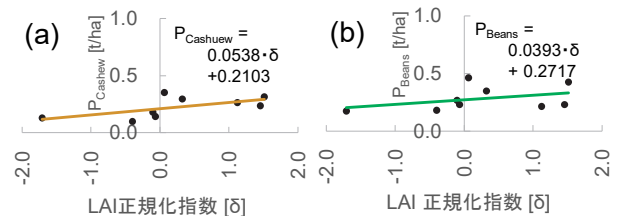


図-5 LAI正規化指数(a)と穀物収量(P)からの穀物モデルの導出：(a)カシューナッツ(P_{Cashew})、(b)フェイジョン豆(P_{Beans})

2.3 植生動態水文量監視・予測システムの応用

CLVDASには、降水量のみが水として入力され、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-6)。

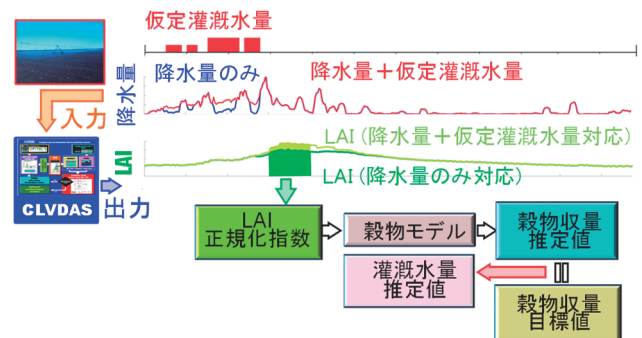


図-6 CLVDASに基づく灌漑水量の推定プロセス

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。

渇水被害は、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-7)。

その結果、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。

3. まとめ

本研究では、CLVDASを核とした植生動態水文量監視・予測システムを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、その応用として渇水の穀物収量への影響について、州スケールで検討し

た。その結果、植生動態水文量監視・予測システムは、降雨パターンの違いに伴う陸面の水循環や穀物の成長を評価することができ、穀物収量やより経済的な灌漑水量の推定などの農業情報を現地の農業従事者に提供でき得る可能性を見出した。今後は、予測システムにより得られる植生動態水文量の予測値から数カ月先の主要穀物収穫量を予測し、現地の農業従事者に提供する手法を確立したいと考えている。

表-1 目標穀物収量を得るために必要な灌漑水量

	2014	2015	2016
カシューナッツ	1.94 mm/day	1.45 mm/day	0.16 mm/day
フェジヨン豆	1.86 mm/day	1.38 mm/day	0.06 mm/day

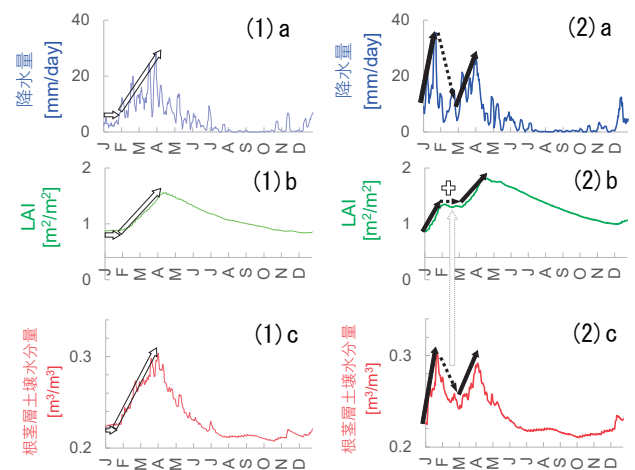


図-7 降水量(a)・LAI(b)・根茎層土壌水分量(c)の比較:(1)は2014-15年の平均値、(2)は2016年

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. 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

筒井浩行



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 専門研究員
TSUTSUI Hiroyuki

大沼克弘



研究当時 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 上席研究員、現 国土交通大学校
ONUMA Katsuhiko

アブドゥル・ワヒド・モハメッド・ラスミ



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター 水災害研究グループ 主任研究員、博士 (工学)
Ph.D. Abdul Wahid Mohamed Rasmy