

# ブラジル北東域における植生動態－陸面結合データ同化手法による長期渇水解析に基づく穀物生産量・必要灌漑水量の推定に関する研究

筒井 浩行<sup>1</sup>・澤田 洋平<sup>2</sup>・生駒 栄司<sup>3</sup>・喜連川 優<sup>4</sup>・小池 俊雄<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 専門研究員 水災害・リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原 1-6)  
E-mail: t-tsutsui55@pwri.go.jp

<sup>2</sup>正会員 博(工) 准教授 東京大学 大学院工学系研究科 総合研究機構(〒113-0032 東京都文京区弥生 2 丁目 11)  
E-mail: yohei.sawada@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 博(工) 特任准教授 東京大学 地球観測データ統合連携研究機構(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)  
E-mail: eikoma@tkl.iis.u-tokyo.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 博(工) 教授 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)  
所長 国立情報学研究所 (〒100-0003 東京都千代田区一ツ橋 2 丁目 1-2)

<sup>5</sup>フェロー会員 工博 センター長 水災害・リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原 1-6)  
E-mail: koike@icharm.org

2000年代に入り、ブラジル北東域は、深刻な渇水被害を受け続けている。特に2012年以降続いた長期渇水は、Ceará州における貯水池の総貯水容量を約6%にまで落ち込ませた。本研究では、植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVDAS)を用いたブラジル北東域における長期農業的渇水解析(2003年～2017年)を行うと共に、その出力値であるLAIの偏差を用いることにより、その年の穀物生産量と目標収穫量を得るために必要となる灌漑水量を推定できることを確認することができた。

**Key Words:** Drought, Northeastern Brazil, Data assimilation, LAI, Agriculture

## 1. はじめに

農業的渇水は、その強度・頻度が気候変化により大きく変わり、水資源や農業環境に多大な影響を与える<sup>1)2)</sup>。ブラジル北東域では、2012年からも数年間続く深刻な長期渇水が発生した。特にCeará州における貯水池では、総貯水容量の約6%にまで貯水量が落ち込んだ。加えて、ブラジル北東域では、降雨に依存する天水農業が大規模に展開されているため、このような長期的な農業的渇水が、環境・社会・経済に大きな被害を与えた<sup>3)</sup>。そのような中、Marengo et al.<sup>4)</sup>は、雨季と渇水期におけるDDN(The number of days with water deficit)の傾向を分析し、渇水条件下では、植生へ与える水ストレスが根茎層において増大することで穀物への水の供給が阻害され、その生産性を低下させるというメカニズムを議論した。しかし彼らの気象学的な解析のみでは、成長から枯死までの植生動態を土壤水分量の変化と共に評価するまでには至

らなかった。そこで本研究では、マイクロ波衛星観測を統合してマイクロ波輝度温度を同化し、植生動態と土壤水分量を同時、かつ高精度に推定するよう開発された植生動態－陸面データ同化システム [Coupled Land and Vegetation Data Assimilation System (CLVDAS)]<sup>5)6)7)</sup>を適用し、ブラジル北東域を対象とした長期(2003年-2017年)農業的渇水解析を実施した。さらにCLVDASの出力値であるLAI(葉面積指数, m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)推定値からの穀物生産高 [t/ha]推定の可能性と深刻な渇水年において本来必要とされた灌漑水量推定の可能性について検討を行った。

## 2. CLVDAS による数値計算手法

### (1) モデル

CLVDASでは、植生動態と土壤水分量の変化を推定するためにEcoHydro-SiB<sup>8)</sup> [植生動態モデル (Dynamic vegetation model)]とSimple Biosphere model 2の水文モジュール

ルが改良された Hydro-SiB<sup>9)</sup>が結合されたモデル]が陸面モデルとして用いられている。Hydro-SiB により計算された炭素固定量と土壌水分量鉛直プロファイルが植生動態モデルに渡される。その後、植生動態モデルは、土壌水分量鉛直プロファイルに応じた水ストレスに基づく炭素減少量を計算し、炭素固定量から差し引くことによりバイオマス量を計算・更新する。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[RTM, 植生における放射伝達プロセスを評価する  $\omega - \tau$ モデル<sup>10)</sup>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)<sup>12)</sup>が結合されたモデル]が適用されている。

## (2) 対象領域

本研究では、最も深刻な渇水被害を受けた Ceará 州と Piauí 州を含むブラジル北東域(空間分解能 0.25 度)を対象領域に設定した。

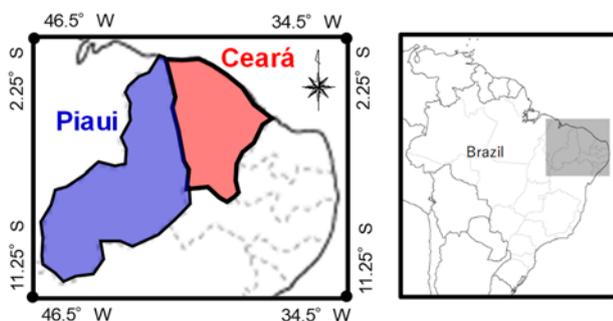


図-1 CLVDAS 対象領域: Ceará・Piauí 州を含むブラジル北東域:空間分解能 0.25 度、48×36 グリッド(南緯 2.25° -11.25°, 西経 46.5° -34.5°)

## (3) 入力データ

CLVDAS の入力データとして 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必要となる。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)が必要であるが、本研究では、これまでの CLVDAS シミュレーション<sup>5), 9), 7)</sup>において、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、宇宙航空研究開発機構(JAXA)より提供されている Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E)・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・18.7GHz(水平・垂直偏波)]を適用した。なお2010年12月31日以前は AMSR-E の観測データ、さらに2013年1月1日以降は、AMSR-E の後継機である AMSR2 の観測デー

タを適用し、2011年・2012年は対象から外した。

## (4) 最適パラメータ

CLVDAS は、RTM によって計算されたマイクロ波輝度温度と衛星観測マイクロ波輝度温度を比較し、モデルの状態量の推定精度を向上させる機能を持つ。未知パラメータの推定に関しては、International Satellite Land Surface Climatology Project 2 全球土地利用マップ(空間分解能 1 度)等から得られる陸面パラメータ(土壌の間隙率、砂・粘土の割合や透水係数など)の文献値を第一推定値として、Sawada and Koike (2014)<sup>9)</sup>における最適パラメータの選択手法[Variance-based global sensitivity analysis (GSA)によるマイクロ波輝度温度に対する水文・生態モデルパラメータの感度試験]の2種の感度指数を基に3年間の時間積分結果を用いて、Cost 関数で表現した「推定輝度温度と衛星観測輝度温度との差」が可能な限り小さくなるように最適なパラメータを Schuffled Complex Evolution 法により決定する。本研究では、Sawada and Koike (2014)<sup>9)</sup>の感度試験において最も重要と判定された葉(天頂)の Maximum rubisco capacity ( $V_{max}$ , mol/m<sup>2</sup>/s)、しおれ点における Soil matric potential ( $\psi_{wit}$ )、RMS height ( $\delta$ )の最適値を CLVDAS の最適パラメータとして求めた(図-2)。さらに次のステップとして、決定した最適パラメータを用い、また衛星観測マイクロ波輝度温度を粒子フィルタ(Genetic Particle Filter)同化手法により逐次的に同化することによりモデルの植生動態と土壌水分量を推定する。このように最適パラメータは、元々の森林域・穀物域・裸地などの土地利用データを初期値に、その近傍を探索するため、実際の土地利用と明らかに矛盾するパラメータが決定されることは無いと考えている。ただし空間分解能が粗いなど、必ずしも実際の状態に整合していない土地利用データが適用された場合、それは逆に制限要因ともなる。ゆえに、本システムの推定精度を向上させる上で、土地利用データの更新・高解像度化は、常に継続すべき課題であると考えている。さらに次のステップとして決定した最適パラメータを用いて、衛星観測マイクロ波輝度温度を粒子フィルタ(Genetic Particle Filter)同化手法により逐次的に同化することによりモデルの植生動態量と土壌水分量を推定する。

## 3. 数値計算結果

### (1) 数値計算による渇水の描像

CLVDAS は、決定した最適パラメータを用い、また衛星観測マイクロ波輝度温度を逐次的に同化することにより、モデルの植生動態と土壌水分量の推定精度を高める。そのために同化手法として粒子フィルタ(Genetic Particle Filter)<sup>12)</sup>を用いている。粒子フィルタでは、粒子数を 100

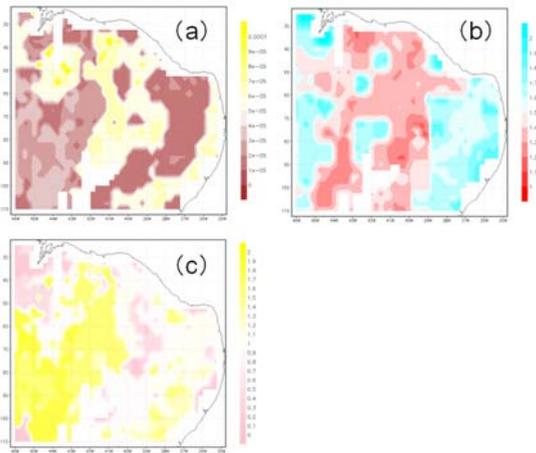


図-2 最適パラメータ：(a) 葉(天頂)のMaximum rubisco capacity ( $V_{max}$ , mol/m<sup>2</sup>/s), (b)しおれ点における Soil matric potential ( $\psi_{wilt}$ ), (c)RMS height ( $\delta$ )

個に設定し、陸面モデル・マイクロ波放射伝達モデルの全てのモデルパラメータ粒子に対して選択分析・リサンプリングを行い、それにより選定された粒子を対象に変異解析を行う。そして、この変異解析では、選定された粒子を中心とした分身粒子を生み出し(摂動)、それらのモデルパラメータ粒子を次の同化期間(window)の初期値とする。既存の陸面モデルは初期条件や境界条件に強く影響を受け、またマイクロ波衛星プロダクトは土壌表面の水分量しか推定できなかった。これに対してCLVDASは、表層の土壌と植生の両方の水分量に感度を持つマイクロ波輝度温度を同化することによって土壌水分量と植生水分量の精度を同時に改善することができるという利点を持つ。本研究では、このような利点を持つCLVDASにより数値計算を行い、Ceará州全体の空間平均の表層(0-5cm)土壌水分量[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]・根茎層[5-20cm]土壌水分量[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]・植生水ストレスファクター[-]・蒸発散量[mm/day]・LAI[m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]を推定した。なお、シミュレーション期間は、AMSR-E・AMSR2による1年を通した観測データの無い2011年・2012年を除いた2003年から2017年までの13年間を対象とした。図-3には、その中のLAI[m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>](上段)を示す。また下段は13年間の平均値に対する正規化した値(Normalized index =  $(x - \mu) / \sigma$ , x: 変数,  $\mu$ : 平均値,  $\sigma$ : 標準偏差)をプロットしたものであるが、降雨が地表面から表層土壌水分・根茎層土壌水分へと浸透し、その多寡に応じて植生水ストレスが定まり、それに応じた蒸発散量が発生して植生動態が評価され、その結果がLAIとして現れる。偏差が正から負に転じるタイミングが降水量→表層土壌水分→根茎層土壌水分→植生水ストレスファクター→蒸発散量→LAIの順に拡大していることが分かる。このようにLAIは、植生動態評価の最終的な指数としてCLVDASにより出力されるが、2004年・2007年・2008年・2009年などの通常年には高い値が示されるものの、2005年・2010年と2013

年以降は低く、渇水状態にあったことを示している。ただし2017年には深刻な渇水状態から抜け出していることが分かる。

## (2) 推定精度検証

これまで多くの地域[アメリカ合衆国, モンゴル, オーストラリア連邦, マリ共和国, モロッコ王国・アルジェリア民主人民共和国・チュニジア共和国]においてCLVDASの高い性能と推定精度(土壌水分表層および根茎層: RMSE 0.05m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>以下・bias 0.045 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>以下, LAI: RMSE 0.16 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>以下, bias 0.13 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>以下)を得ている。さらに前節でCLVDASにおいてLAIが最終的な指数として出力されることを確認した。そこで本研究においてもLAIをCLVDASの推定精度検証の対象に選定し、2013年から2015年までの3年間の8日間平均・Ceará州全体の空間平均のMODIS LAI (Maryland 大学)との比較検証を行った。その結果, RMSE: 0.072 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, bias: 0.15 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>の高い推定精度を備えていることを確認した(図-4 a)。また2003年の16日間平均ではあるが, Ceará州全体の空間平均( $\mu$ )とその $\mu \pm 1\sigma$ (標準偏差)を図-4(b)に示す。

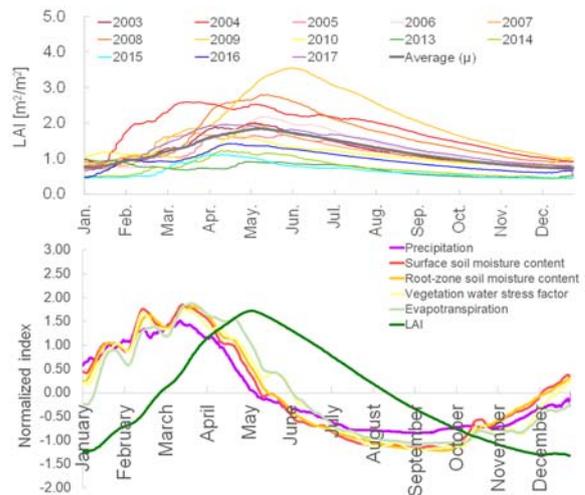


図-3 CLVDASによる数値計算結果：(上段) LAI [m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>], (下段) 降水量(GLDAS2.1)と各要素(降水量・表層土壌水分量・根茎層土壌水分量・植生水ストレスファクター・蒸発散量・LAI)の13年間の平均値に対する正規化した値(Normalized index)

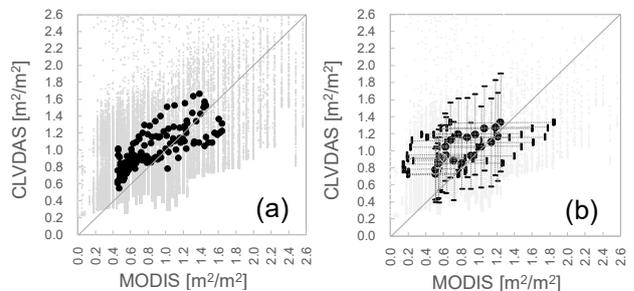


図-4 CLVDAS 推定精度検証：(a) LAI [m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, 2013年から2015年までの3年間の8日間平均, (黒色マーク) Ceará州全体の空間平均: RMSE: 0.072 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, bias: 0.15 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]・(灰色マーク) Ceará州内全グリッド, 縦軸 CLVDAS, 横軸 MODIS, (b) 2003年の16日間平均, Ceará州全体の空間平均( $\mu$ )とその $\mu \pm 1\sigma$ (標準偏差)

#### 4. 穀物生産量推定の可能性検討

植生動態や土壌水分量の監視だけでは無く、それに基づき穀物生産量をも同時に推定した情報は、渇水によって穀物生産に多大な被害を受けた現地の農業従事者にとって重要な情報となる。ここでは LAI 推定値と穀物生産量との関係から簡易モデルを導き、LAI からの穀物生産量推定の可能性について検討する。図-5 は 2003 年から 2017 年までの 13 年間(2011 年・2012 年を除く)の降水量(a)と LAI 偏差(b)を示したものである。ブラジル北東域の農事歴は、10 月～12 月が播種期、1 月～4 月(雨季)が成長期、5 月～9 月(乾季)が収穫期であるが、10 月～12 月に植えられ、1 月～4 月の雨季に成長した植生の LAI 偏差の大きさが 5 月はじめにほぼ決定し、5 月～9 月の乾季、かつ収穫期にそのまま推移することが分かる。またその LAI 偏差の年々変動が図-5(b)に現れている。そこで毎年 4 月の LAI 偏差平均値と年間穀物生産量との関係を調査した。

IBGE-SIDRA(<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>)からブラジル Ceará 州の穀物生産量(t)と作付面積(ha)を調査し、単位面積当たりの穀物生産量(P, t/ha)を求め、2003 年から 2013 年までの 9 年間(2011 年・2012 年を除く)における 4 月の LAI 偏差平均値との関係から簡易的な線形モデルを導いた(図-6)。なお穀物としては、Ceará 州において主要なカシューナッツ(P<sub>Cashew</sub>)、フェジヨン豆(P<sub>Beans</sub>)、キャッサバ(P<sub>Cassava</sub>)、コーン(P<sub>Com</sub>)を対象とした。次に各年の 4 月の LAI 偏差平均値を、導いた各穀物の簡易線形モデルに入力し、2003 年から 2017 年までの 13 年間(2011 年・2012 年を除く)の穀物生産量(P, t/ha)を計算した(図-7・表-1)。フェジヨン豆・コーンは 0.6、カシューナッツ・キャッサバは 0.7 とその相関係数は、やや低いものの、統計値である穀物生産量との比較であるにも関わらず、2012 年からの深刻な農業的渇水による穀物への影響を評価できているものと考えられる。また、このように簡易的な線形モデルであっても、雨季終盤 4 月の平均の LAI 推定値からその年の穀物生産量[t/ha]を推定することができる可能性を確認することができた。

#### 5. 最適灌漑水量推定の可能性検討

前章では、雨季の終盤 4 月平均 LAI 推定値からその年の穀物生産量[t/ha]を推定することのできる可能性を確認することができたが、推定した穀物生産量が渇水により目標とする収穫高に達しないような場合、現地の農業従事者にとって、その目標を達成するために必要な灌漑水量を推計することが非常に重要な課題となる。9 年間(2003 年～2013 年)における簡易線形モデルを検証した 2012 年から続いた渇水は 2014～2016 年になっても継続し、大規模農場では、毎日、灌漑が実施されたことを現

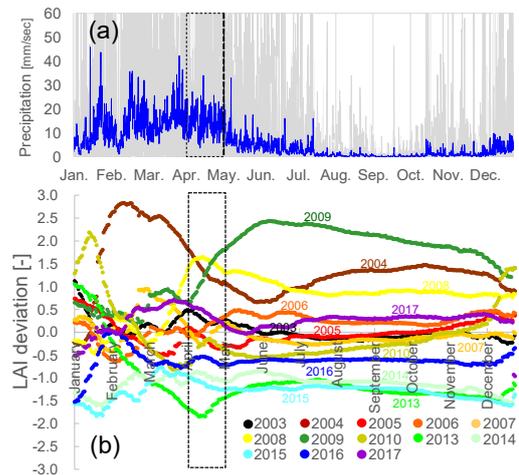


図-5 (a) 2003 年から 2017 年までの 13 年間(2011 年・2012 年を除く)の降水量(青色:平均, 灰色:各年), (b)2003 年から 2017 年までの 13 年間(2011 年・2012 年を除く)の LAI 偏差

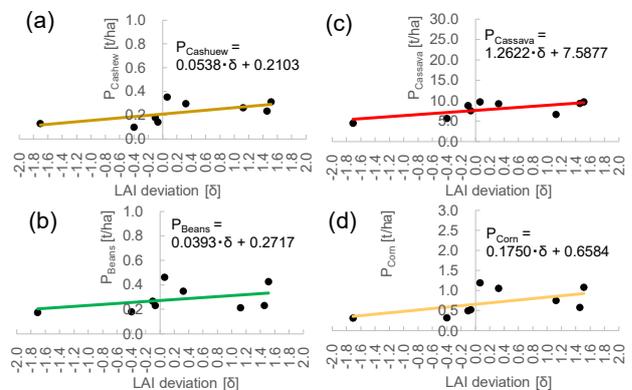


図-6 9 年間[2003 年～2013 年(2011 年・2012 年を除く)]の穀物生産量(P, t/ha)と 4 月平均 LAI 偏差(σ)からの簡易線形モデルの導出: (a)カシューナッツ(P<sub>Cashew</sub>), (b)フェジヨン豆(P<sub>Beans</sub>), (c)キャッサバ(P<sub>Cassava</sub>), (d)コーン(P<sub>Com</sub>)

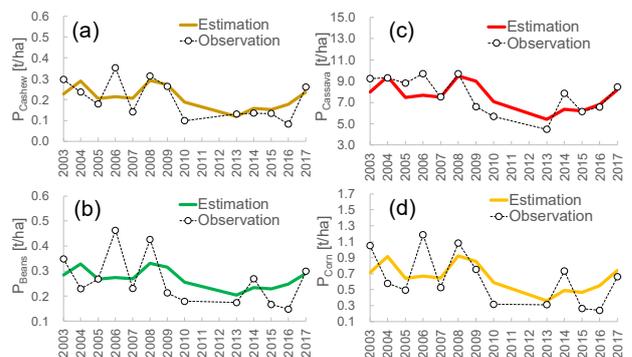


図-7 13 年間[2003-2017 年(2011 年・2012 年を除く)]の 4 月平均 LAI 偏差(σ)と簡易線形モデルによる穀物生産量(P, t/ha)の推定: (a)カシューナッツ(P<sub>Cashew</sub>), (b)フェジヨン豆(P<sub>Beans</sub>), (c)キャッサバ(P<sub>Cassava</sub>), (d)コーン(P<sub>Com</sub>)

表-1 簡易線形モデル導出期間を除く 4 年間[2014-2017 年]の 4 月平均 LAI 偏差(σ)と簡易線形モデルによる穀物生産量(P, t/ha)の推定精度

	RMSE [t/ha]	bias [t/ha]
カシューナッツ(P <sub>Cashew</sub> )	0.05	0.03
フェジヨン豆(P <sub>Beans</sub> )	0.06	0.03
キャッサバ(P <sub>Cassava</sub> )	0.78	-0.37
コーン(P <sub>Com</sub> )	0.22	0.09

地におけるヒアリングを通じて確認した。そこで本研究では、対象領域全域に、数ケース [1, 2, 3, 4, 5 (mm/day)] の灌漑水量を GLDAS 降水量データに加えた。なお GLDAS 降水量データは 3 時間データであるため、日灌漑水量を 8 分割して降水量データに加算した。また灌漑期間は不明であるため年間を通して本灌漑水量を降水量データに加算した。灌漑水量が加算された降水量データを CLVDAS に入力し、LAI を計算し、LAI 偏差を灌漑水量ケース毎に求めた。そして灌漑水量ケース毎に算定した 4 月平均の LAI 偏差をカシューナッツ、フェジヨン豆、キャッサバ、コーンの簡易線形モデルに入力して、それぞれの穀物生産量[t/ha]を推定した。その後、13 年間 [2003 年～2017 年(2011 年・2012 年を除く)]の穀物生産量[t/ha]の平均値を農業従事者の目標収穫高と仮定して、その目標を達成するために必要となる灌漑水量を推定することができるか、その可能性について検討を行った。その検討結果を図-8・表-2 に示すが、2014 年が最も多くの灌漑水量を必要とした深刻な渇水状態にあったことが分かる。

表-2 深刻な渇水年(2014～2016年)を対象とした目標穀物生産量[t/ha(2003-17年の平均相当)]を収穫するために必要な灌漑水量[mm/day]の推定

	目標穀物生産量[t/ha(2003-17年の平均相当)]を収穫す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
フェジヨン豆	1.86	1.38	0.06
キャッサバ	2.70	2.10	1.07
コーン	2.02	1.52	0.25

その後、2015年、2016年と次第に農業的渇水が弱まり、必要灌漑水量が減少するという結果になった。このように CLVDAS 出力の LAI 偏差(4月平均)を用いることで、目標とする収穫高を得るために必要な灌漑水量を推定できる可能性を確認することができた。

## 6. まとめ

2000年以降、ブラジル北東域は度重なる渇水被害を受けている。本研究において、2012年以降数年間続いた深刻な長期渇水を対象とした CLVDAS による農業的渇水解析(2011年・2012年を除く2003年から2017年までの13年間)が行われ、CLVDASにより推定された4月のLAI偏差平均値からその年の穀物生産量と現地の農業従事者の望む収穫高を得るために、本来必要であった灌漑水量を推定することができる可能性を確認することができた。本研究では、LAI 偏差から穀物生産量と必要灌漑水量を推定する可能性について検討するために、IBGE-SIDRAにおいて穀物生産量が公開されている2017年までの過去の期間を対象にした。しかし本研究とは別に、GLDAS2.1 気象データ・AMSR2 輝度温度データを1カ月単位で取得して CLVDAS により LAI をはじめとする植生動態水量をモニタリングするシステム、そして季節予測データ[GFDL-CM2p5-FLOR-B01 MONTHLY from Models NMME: North American Multi-Model Ensemble (<http://indl.ideo.columbia.edu/SOURCES/Models/NMME/GFDL-CM2p5-FLOR-B01/MONTHLY/>)]を用いた3カ月季節予測システムを開発していることから、本研究と組み合わせることにより穀物生産量と目標とする収穫高を得るために必要な灌漑水量を3カ月前に現地の農業従事者へ情報提供できる可能性のあることを確認することができた。具体的には、灌漑設備を持つ農業従事者への運用情報を提供することができ、また推定された灌漑水量に対する便益を算定できると考えている。

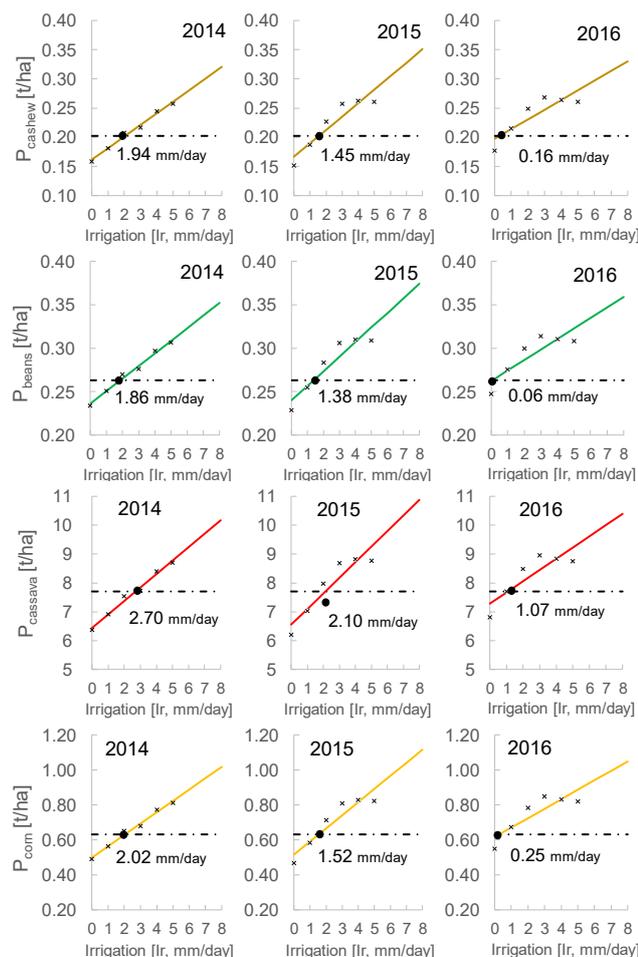


図-8 13年間[2003～2017年(2011・2012年を除く)]の穀物生産量[t/ha]の平均値を得るために必要な2014年(左)・2015年(中央)・2016年(右)灌漑水量推定の可能性：上からカシューナッツ(P<sub>Cashew</sub>)、フェジヨン豆(P<sub>Beans</sub>)、キャッサバ(P<sub>Cassava</sub>)、コーン(P<sub>Corn</sub>)

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、地球観測データ統融合連携研究機構 地球環境情報統融合プログラム (DIAS-P) ,

水災害・リスクマネジメント国際センター(ICCHARM), 世界銀行委託費(Contract 7187738), 科研費 (JP17K18352, JP18H03800), および 宇宙航空研究開発機構地球観測研究委託費(JX-PSPC-500188)の支援を受けた。ここに記して深く謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Wetherald, R. T. and Manabe, S.: Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. D19, 4379, pp.7-1 – 7-15 doi:10.1029/2001JD001195, 2002.
- 2) Sternberg, T.: Regional drought has a global impact, *Nature*, Vol. 472, pp.169, 2011.
- 3) Lewis, S.L., Brando, P.M., Phillips, O.L., van der Heijden, G.M.F., and Nepstad, D.: The 2010 Amazon Drought, *Science*, Vol. 331, Issue. 6017, pp. 554, DOI: 10.1126/science.1200807, 2011.
- 4) Marengo, J.A. and Bernasconi, M.: Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections, *Clim Change*, Vol. 129, pp.103-115, 2015.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Mo, T., Choudhury, B. J., Schmugge, T. J., Wang J. R. and T. J. Jackson; A Model for Microwave Emission From Vegetation-Covered Fields, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, pp.11,229-11,237. 1982.
- 11) Kuria, D., N., Koike, T., Lu, H., Tsutsui, H. and Graf, T. ; Field-Supported Verification and Improvement of a Passive Microwave Surface Emission Model for Rough, Bare, and Wet Soil Surfaces by Incorporating Shadowing Effects, *IEEE Trans. Geosci. Remote.*, Vol. 45, pp.1207-1216, 2007.
- 12) Qin, J., Liang, S., Yang, K., Kaihotsu, I., Liu, R. and Koike, T. ; Simultaneous estimation of both soil moisture and model parameters using particle filtering method through the assimilation of microwave signal, *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, D15103, doi: 10.1029/2008JD011358, 2009.

(Received May 31, 2019)

(Accepted August 7, 2019)

## STUDY ON THE ESTIMATION OF CROP PRODUCTION AND REQUIRED IRRIGATION WATER BASED ON LONG-TERM DROUGHT SIMULATION BY USING THE COUPLED LAND AND VEGETATION DATA ASSIMILATION

Hiroyuki TSUTSUI, Yohei SAWADA, Eiji IKOMA,  
Masaru KITSUREGAWA and Toshio KOIKE

After 2000, the northeastern Brazil has been suffering by serious droughts. Particularly, the reservoirs reduced to only 6 % of the total water storage in Ceará State caused by the severe drought in several years after 2012. In this study, the long-term agricultural drought (2003-2017) was simulated by the coupled land and vegetation data assimilation system (CLVDAS) over the northeastern Brazil. Simultaneously, we could recognize that the annual crop production and the irrigation water volume, which is necessary to obtain a target yield, are estimated by using LAI's deviation from CLVDAS.