

令和 4 年 9 月 1 日現在

機関番号：18001  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2019～2021  
課題番号：19K06003  
研究課題名(和文) 葉内CO<sub>2</sub>濃度をターゲットにした節水灌漑

研究課題名(英文) Water saving irrigation targeting C<sub>i</sub>

## 研究代表者

川満 芳信 (kawamitsu, yoshinobu)

琉球大学・農学部・教授

研究者番号：20192552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：灌水の量や時期は土壌水分や蒸発散量に基づいて決定されるが、水資源に限られる島嶼地域では植物体の状態も考慮し効率的な灌漑が求められている。本研究では、葉内CO<sub>2</sub>(C<sub>i</sub>)、気象データ、土壌水分に基づいて灌水の時期を決定し、水利用効率の最適化を試みた。まず、我々は非破壊でしかも連続測定が可能なC<sub>i</sub> カップを開発し、C<sub>i</sub>が灌水の制御のターゲットとして制御系に組み込めるか否かを検討した。次に、水ストレスに伴うガス交換とC<sub>i</sub>の変化を計測し、C<sub>i</sub>を基礎にした灌水制御システムの開発に向けたデータを蓄積した。材料はC3のニトベギク、C4のサトウキビを用いて、蒸散速度、サップフロー、C<sub>i</sub>の日変化を同時に計測した。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

葉内CO<sub>2</sub>濃度(C<sub>i</sub>)は作物が水分ストレスなどに敏感に反応するため植物の健康状態を診る「聴診器」の機能を有する。そこで、土壌水分、微気象データに加えC<sub>i</sub>も同時計測し、植物の健康状態に基づいて灌漑設備を制御すれば精緻な節水灌漑が実現出来ると考えた。通常C<sub>i</sub>は高価な光合成蒸散同時測定装置を用いて各ガス交換速度パラメーターから計算によって求められる。我々は既報において非破壊でしかも長期間の連続測定が可能な新しいC<sub>i</sub>カップを開発した。本研究では、C<sub>i</sub>実測システムが灌水の制御のターゲットとして制御系に組み込めるか否かを検討したもので、画期的なアイデアといえる。

研究成果の概要(英文)：The amount and timing of irrigation are determined based on soil moisture and evapotranspiration, but in island areas where water resources are limited, efficient irrigation is required in consideration of the condition of plants. In this study, the timing of irrigation was determined based on leaf internal CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>), meteorological data, and soil moisture, and an attempt was made to optimize water utilization efficiency. First, we developed a non-destructive and continuous measurement C<sub>i</sub> cup, and examined whether C<sub>i</sub> could be incorporated into the control system as a target for irrigation control. Next, we measured gas exchange and changes in C<sub>i</sub> due to water stress, and accumulated data for the development of a C<sub>i</sub>-based irrigation control system. The materials used were Mexican sunflower of C3 and sugar cane of C4, and the transpiration rate, sap flow, and diurnal change of C<sub>i</sub> were measured at the same time.

研究分野：作物学

キーワード：葉内CO<sub>2</sub>濃度 スマート灌漑 サトウキビ 重量法蒸散 ニトベギク サップフロー 微気象データ

## 1. 研究開始当初の背景

葉内  $\text{CO}_2$  濃度 ( $C_i$ ) は光合成速度、蒸散速度、気孔伝導度、 $\text{CO}_2$  濃度、葉温、湿度を総合化したパラメーターで ( $C_i = C_a - A/g_s$ )、土壤水分ストレスなどに敏感に反応するため、計測は植物の状態を診る「聴診器」と同様である。言い換えるならば、 $C_i$  には葉の光合成能力やガス拡散過程が反映されており、植物のストレス状態を的確に表現している。土壤水分状態と  $C_i$  の両方で植物の状態を診断できれば、精緻な節水灌漑が可能になると考えられる。過去の研究において、葉の水ポテンシャルと  $C_i$  との関係は明らかにされているものの、その成果を灌水制御などに応用した例は少ない。しかし、作物の生育ステージや日々の微気象変化に対応して灌水条件を決めるには、 $C_i$  の連続的な測定が必要となる。通常  $C_i$  は高価な装置を用いて上述のパラメーターから計算によって求められる。我々は Boyer and Kawamitsu (2011) の  $C_i$  実測システムを改良し、非破壊でしかも長期間の連続測定が可能な「 **$C_i$  カップ実測システム**」を開発した。本研究では同  $C_i$  実測システムが灌水の On/Off 制御のターゲットとして利用可能か否かを検討する。

## 2. 研究の目的

節水灌漑に関する研究は、灌漑工学や農業気象の分野で主に圃場の土壤物理性や蒸発散に着目して発展してきた。一方、作物が水を消費し生長するプロセスや植物の水分状態に関する研究は主に作物学や植物生理学が中心であった。本研究は、両分野の知見を融合させ革新的な水管理技術を確立しようとするものである。土壤の水分状態や蒸散量から灌水制御を行った研究はあるが、植物の水ストレス状態を診断し灌水制御に応用した例はない。Lauer and Boyer (1992) は長期的な  $C_i$  直接測定により水ストレスが光合成速度に与える影響をとらえたが、グロースチャンパー内の研究成果である。本申請研究は  $C_i$  実測システムを応用し、葉の水分生理情報が集約された  $C_i$  によって水ストレスに対する応答を診断し、精細で実用的な節水灌漑システムを確立するというユニークな試みである。 $C_i$  を計算によって求め、得られた  $A/C_i$  カーブから植物の生理活性状態を推察する手法を提案した ANU の G. D. Farquhar 博士は、その実績が評価され 2017 年に京都賞を受賞された。

## 3. 研究の方法

「 $C_i$  による灌水制御システム」を確立するため；

**実験 1.** 土壤から葉の光合成器官までの水分動態および水ストレスに伴うガス交換速度の変化、

**実験 2.** 葉のガス交換速度および  $C_i$  直接測定法による水ストレス診断法の確立、

**実験 3.**  $C_i$  を基礎にした灌水制御システムの開発、を行う。

**実験 1.** 土壤水分状態は耐乾燥性の異なる作物の葉の水分状態にどのように影響し、さらに植物の水分状態 (葉の水ポテンシャル,  $\Psi_w$ ) がどのように光合成能力 ( $C_i$ ) に影響するのかポット栽培試験にて評価する。測定項目としては、土壤含水率-pF との関係および透水性試験を行い、土壤物理性の連続測定を行う (図 1 C - D)。  $\Psi_m$  と  $\Psi_w$  の関係をサイクロメーターを用いて計測し (図 1 D - E)、  $\Psi_w$  と両  $C_i$  との関係プロットし、実測  $C_i$  の優位性を示す (図 1 E - A)。データ解析のポイントは  $C_i$  の経時変化 (変化の大きさや傾向) が水ストレスの強度をどう反映するか、ストレス応答の植物種間差 ( $C_3$ ,  $C_4$  植物) と合わせて評価する。

**実験 2.** 水ストレス強度を  $C_i$  の変化から診断し、異なる水ストレス強度における灌水処理が種々の作物水分状態と  $C_i$  応答に与える影響をハウス内にてポット実験により評価する。解析のポイントは、 $C_i$  の経時変化は再灌水により植物の水ストレス緩和をどう反映させるか、である。

**実験 3.** 灌水制御システムの実用化に向け、圃場で栽培される作物を対象に実験を行う

栽培期間全体を通して  $C_i$  をモニタリングし、灌水を制御する。さらに土壌含水率等に頼る既存の灌水方法と比較し、新灌水システムの有用性を節水効果から明らかにする。

#### 4. 研究成果

#### 光合成速度と蒸散速度の関係および圃場における蒸散速度の推定方法の検討。

灌水の量とタイミングの決定には土壌や作物体からどの程度の水が失われたかを調べる必要がある。そこで、1年目はサトウキビ個体の蒸散速度の日変化を電子天秤を用いて連続して計測し、一日の総蒸散量を求めた。

サトウキビの場合、個葉の光合成速度と蒸散速度は光強度が  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以上の強い光の場合、直線関係にあり、その結果から判断して、もし圃場において蒸散速度が計測できれば光合成速度も推定可能である（図 2, 3）。

しかし、圃場は風の影響が著しく、高精度の電子天秤は安定しないことが予想された。そこで、風の影響の少ないガラスハウス内にて、蒸散速度とサップフローを計測して両者の関係を明らかにし、圃場ではサップフロー値から蒸散速度を推定することにした。図 4 には品種

農林 29 号を用いて、個体の蒸散速度とサップフローを同時に計測し、また、微気象データ（日

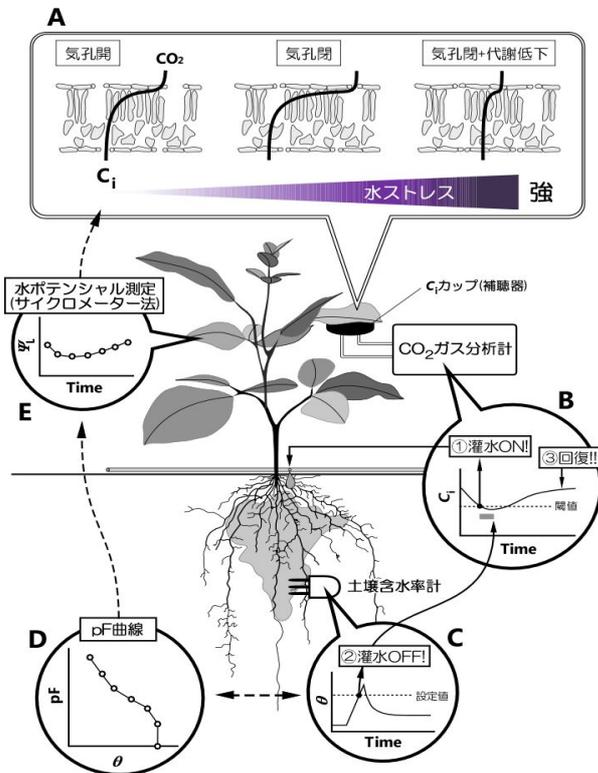


図 1  $C_i$  直接測定による灌水制御システムのイメージ。

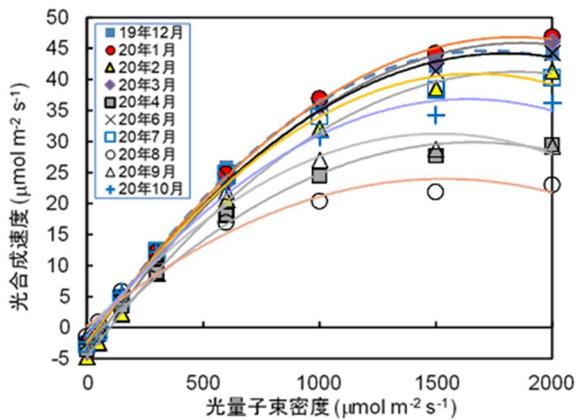


図 2 サトウキビ個葉の“光-光合成曲線”の季節変化。

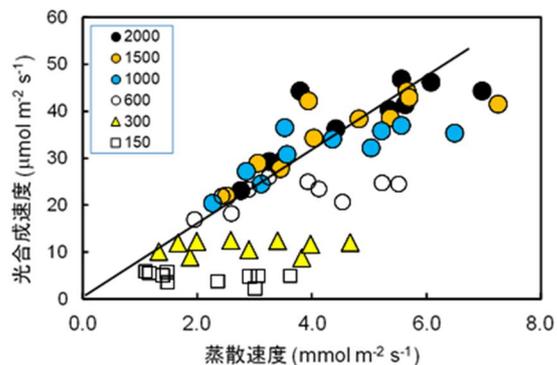


図 3 サトウキビ個葉の光合成速度と蒸散速度の関係。

射量, 気温)も並行して計測した。

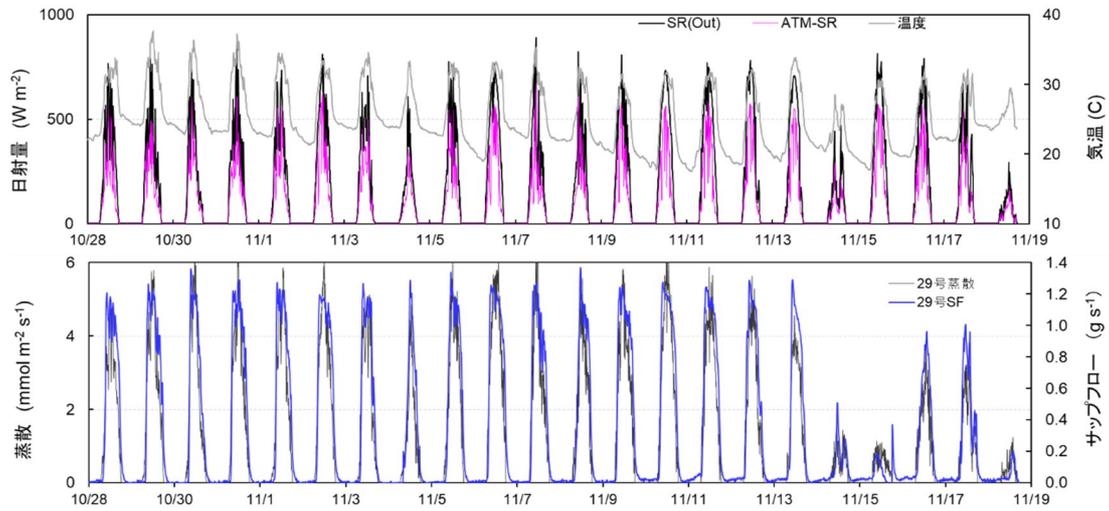


図4 サトウキビ個体の蒸散速度とサップフローの日変化(下図)と微気象データ(上図)。

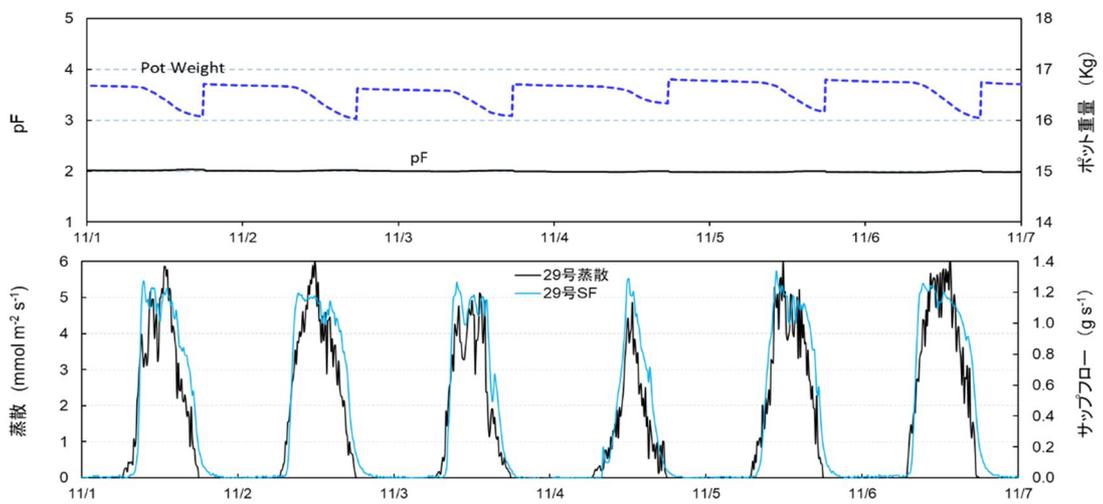


図5 通常灌水下の蒸散速度とサップフロー(下図)およびpFとポット重量(上図)の日変化。

図5は通常灌水条件下のサトウキビを用いた計測値で, 図6は灌水を停止し, 土壤水分ストレス

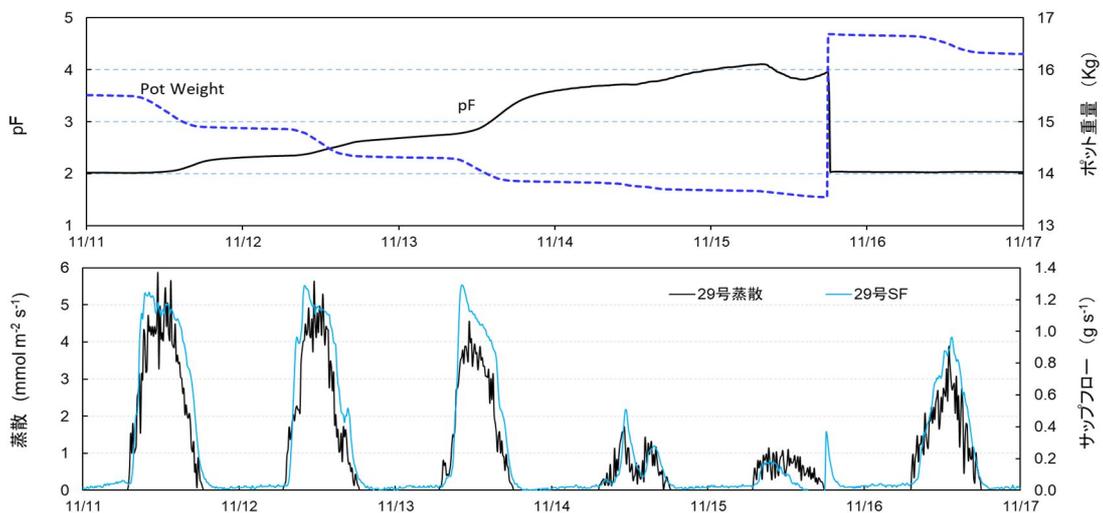


図6 水ストレス下の蒸散速度とサップフロー(下図)およびpFとポット重量(上図)の日変化。

を与えた場合の蒸散速度とサップフローの日変化である pF 値が 4.0 に達した段階で 11 月 15 日に再灌水を実施したところ, サップフローのみに変化がみられた(図6)。

蒸散速度とサップフローの関係をプロットしたところ、蒸散速度が  $4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  付近でサップフローは飽和に達し、それ以上では変化しなかった。

### サトウキビ ( $C_4$ ) およびニトベギク ( $C_3$ ) における葉内 $\text{CO}_2$ 濃度 ( $C_i$ ) の日変化の実測。

$C_i$  カップを用いて  $C_4$  植物のサトウキビ (図7) と  $C_3$  植物のニトベギク (図8) を用いてハウス条件下で葉内  $\text{CO}_2$  濃度 ( $C_i\text{-m}$ ) を実測した。日中のサトウキビの  $C_i\text{-m}$  は  $10 \sim 20 \mu\text{mol mol}^{-1}$  の範囲で変化したが、ニトベギクの場合、 $160 \sim 300 \mu\text{mol mol}^{-1}$  の範囲で変化した。夜間はサトウキビが  $1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$  まで上昇したが、ニトベギクは  $500 \mu\text{mol mol}^{-1}$  であった。水ストレスを与えた場合、サトウキビでは大きな変化は観察されなかったが、ニトベギクは低下した (図8, 矢印)。

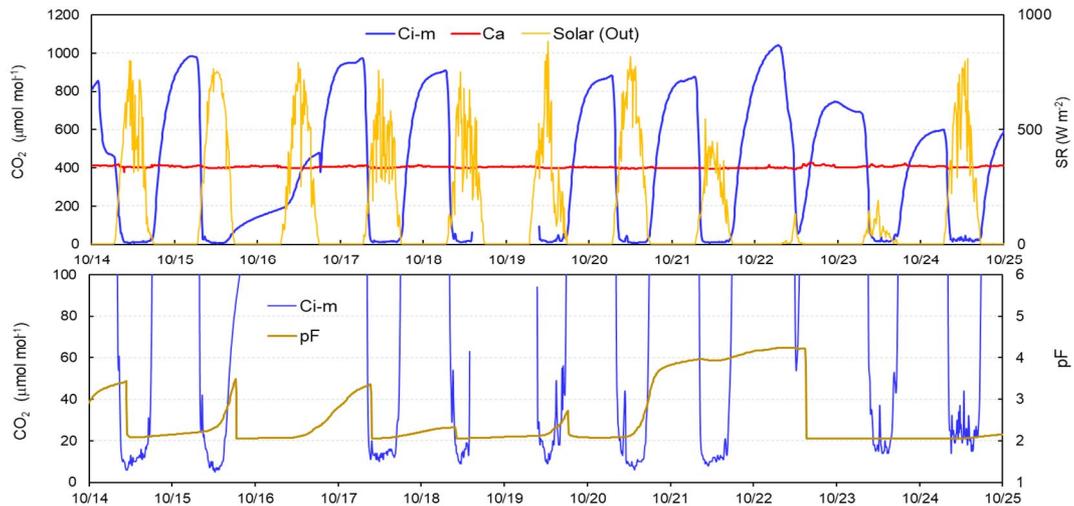


図7 ハウス条件下のサトウキビ ( $C_4$  植物) における実測した葉内  $\text{CO}_2$  濃度 ( $C_i\text{-m}$ )、外気  $\text{CO}_2$  濃度 ( $C_a$ ) と日射量 (SR)、土壌 pF の変化。

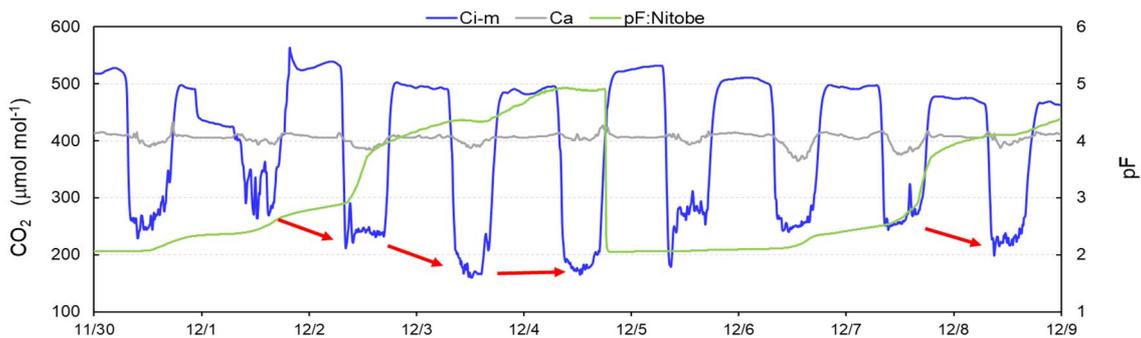


図8 ハウス条件下のニトベギク ( $C_3$  植物) における実測した葉内  $\text{CO}_2$  濃度 ( $C_i\text{-m}$ )、外気  $\text{CO}_2$  濃度 ( $C_a$ ) と土壌 pF の変化。

### 圃場におけるサトウキビ (品種農林8号) のサップフローの経時変化。

圃場で栽培したサトウキビのサップフローを計測し、無風状態であるハウス内で計測した結果と比較した (図9)。9月23日には降雨のため、pFが低下したものの、10月4日は地中灌水による低下である。圃場で計測したサップフローの日変化はハウス内で計測した結果 (図5,6) と同様で、日射量の影響を強く受けていた。

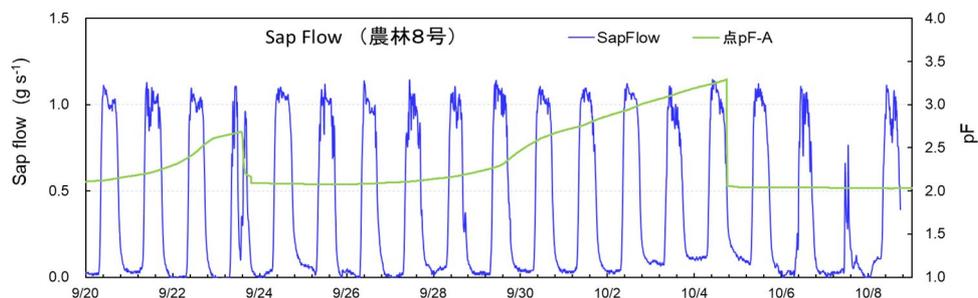


図9 圃場のサトウキビ茎のサップフローと土壌 pF (下図)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 LE Lu Trong, DINH Hoang Thai, TAKARAGAWA Hiroo, WATANABE Kenta, KAWAMITSU Yoshinobu	4. 巻 59
2. 論文標題 Whole-plant and Single-leaf Photosynthesis of Strawberry under Various Environmental Conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environment Control in Biology	6. 最初と最後の頁 173 ~ 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2525/ecb.59.173	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Le, L. T., Dinh, H. T., Takaragawa, H., Watanabe, K., Ureshino, K., Kawamitsu, Y.	4. 巻 86
2. 論文標題 Photosynthetic responses and reproductive ability of strawberry following sunlight application in a plant factory closed system in subtropical Okinawa	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Horticultural Science	6. 最初と最後の頁 590 ~ 598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17660/eJHS.2021/86.6.2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Le, L. T., Dinh, H. T., Ureshino, K., Yamamoto, M., Kawamitsu, Y.	4. 巻 65(1)
2. 論文標題 Improved reproductive growth and fruit sugar accumulation in strawberry through manipulation of phosphorus concentration and light spectrum under plant factory conditions.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tropical Agriculture and Development.	6. 最初と最後の頁 29-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Watanabe Kenta, Takaragawa Hiroo, Fukuzawa Yasunori, Ueno Masami, Kawamitsu Yoshinobu	4. 巻 90
2. 論文標題 Relationships between Water Balance and the Growth and Yield of Ratoon Sugarcane on Minamidaito Island	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Crop Science	6. 最初と最後の頁 324 ~ 333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1626/jcs.90.324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 竇川 拓生、川満 芳信	4. 巻 13
2. 論文標題 南西諸島におけるサトウキビ品種の多様性および構成要素の変遷	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 熱帯農業研究	6. 最初と最後の頁 20～26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11248/nettai.13.20	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 川満 芳信、中原 麻衣、竇川 拓生、ディンT. ホアン、渡邊 健太、平良 英三、池田 剛、後藤 秀樹、上野 正実	4. 巻 13
2. 論文標題 サトウキビ個体の蒸散速度の実測と気象および土壌水分データを用いた推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 熱帯農業研究	6. 最初と最後の頁 8～19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11248/nettai.13.8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Kenta, Takaragawa Hiroo, Ueno Masami, Kawamitsu Yoshinobu	4. 巻 10
2. 論文標題 Changes in Agronomic and Physiological Traits of Sugarcane Grown with Saline Irrigation Water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 722～722
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/agronomy10050722	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakabaru Mai, Hoang Dinh T., Watanabe Kenta, Takaragawa Hiroo, Yabuta Shin, Ueno Masami, Kawamitsu Yoshinobu	4. 巻 24
2. 論文標題 Responses of leaf gas exchange rate to acute soil drying in <i>Jatropha curcas</i> L	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Production Science	6. 最初と最後の頁 1～10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/1343943X.2020.1730699	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 渡邊健太・竇川拓生・川満芳信	4. 巻 12(2)
2. 論文標題 国内サトウキビ生産地における灌漑水中塩濃度の調査および灌漑水中塩化ナトリウム濃度がサトウキビの生育および糖度に与える影響について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 熱帯農業研究	6. 最初と最後の頁 65-72.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

#### 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------