

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05887

研究課題名(和文) 島嶼域サトウキビの蒸散量と水分消費に関する実証的研究

研究課題名(英文) Field study on transpiration and water consumption of sugarcane in islands, Japan

研究代表者

初井 和朗 (Momii, Kazuro)

鹿児島大学・農水産獣医学域農学系・教授

研究者番号：40136536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：鹿児島県種子島、沖縄県糸満市サトウキビ圃場の蒸散量、土壌水分、気象を観測し、島嶼域気象・土壌(火山灰土、琉球石灰岩風化土)条件下でのサトウキビの蒸散量及び大気蒸散要求量に対する根による土壌水分吸水量について検討した。蒸散量推定へのヒートパルス法の適用では、ヒートパルス速度を蒸散量に変換するための検定定数として1.3が妥当であることを実証した。土壌水分動態数値解析によれば、大気蒸散要求量に対するサトウキビ圃場蒸散量を定量的に評価することが可能であり、現地の気象・土壌特性に対応した水分消費量の評価に有用である。さらに、島嶼域サトウキビ圃場において、飽差に対する蒸散量のヒステリシス応答を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サトウキビに対してヒートパルス法により蒸散量を求めるための固有の検定定数の値を提案した点、及び圃場サトウキビ1本あたりの日蒸散量が、観測期間中の夏季晴天日において、種子島で最大0.55L/d、沖縄で最大0.66L/dであることを実証した点は、今後、異なる圃場での比較研究に対する貴重な学術的成果である。また、FAOによって提案されているサトウキビの蒸散係数が、基準作物蒸発散量の1.2倍であることを、国内島嶼域土壌水分動態解析から実証したことは、農業水文学分野において評価できる。さらに、根による吸水を考慮したサトウキビ圃場の土壌水分動態解析は、現地圃場特性に対応した農業用水計画管理に有用である。

研究成果の概要(英文)：The relationship between transpiration and meteorological factors in sugarcane fields was investigated on two islands of Tanegashima and Okinawa in Japan. On the heat pulse method, the calibration constant  $C=1.3$  was suitable. On a daily scale, a linear relationship between transpiration  $T_a$  and reference crop evapotranspiration  $E_{To}$  was found, with  $T_a=1.2E_{To}-0.73$ . On an hourly scale, we demonstrated a pronounced clockwise hysteresis response of sap flow to vapor pressure deficit in the field sugarcane. In a numerical analysis, total sink calculated from root water uptake agreed well with the actual transpiration measured by the heat pulse method. The actual transpiration agreed with the atmospheric transpiration demand of  $1.2E_{To}$  on an hourly basis. Therefore, numerical analysis of soil moisture dynamics under the transpiration demand can be an effective tool to evaluate field sugarcane water consumption at the study sites.

研究分野：農業水文学

キーワード：ヒートパルス法 基準作物蒸発散量 ペンマン・モンティース法 土壌水分 数値解析 飽差 短波放射 ヒステリシス応答

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

食料 Food, エネルギー Energy, 水 Water (FEW) は、人類にとって基本的で貴重な資源である。FEW 資源は複雑な相互関係にあり、FEW 資源を効率的に利用し、かつ保全することが求められている。特に、近年では、FEW の 3 者のつながりの解明が、自然科学および社会科学の連携により検討されている。このような背景のもと、本研究で対象とするサトウキビは、農産物としてだけでなく、バイオエネルギーとしても大きな注目を集め、食用作物と燃料作物として位置づけられ、この貴重な資源を得るために必要な水とのつながりについて総合的な検討が始まったところである。高い作物生産量を達成するには、高い蒸散量が必要であり、このためには、水ストレスを与えない土壌水分条件下で灌漑水管理を行うことが必要となる。また、燃料作物としてのサトウキビ生産の拡大は、今後、水資源保全への負の連鎖を引き起こすことが予想される。以上の FEW 連環に関する近年の学術的背景に基づいて、本研究では、対象作物としてサトウキビを選定した。

従来、鹿児島県南西諸島から沖縄にかけての温帯、亜熱帯地域においては、基幹作物であるサトウキビの灌漑水管理は、一般に 3 mm/d で計画されている。サトウキビの消費水量に関して、国内では、沖縄県宮古島夏植サトウキビに対して、ボーエン比法により、年平均蒸散量 2.86 mm/d が得られている。従来の灌漑水管理上の消費水量の値は、この数値に対応しているが、サトウキビの消費水量として 3 mm/d は学術的に妥当な数値であるのか、および異なる島嶼域気候・土壌条件で統一的に扱うことができるのかの学術的問いに、十分に答え得る学術資料は見あたらない。海外では、渦相関法による蒸散量の評価は行われているが、圃場レベルでの蒸散量そのものに対するサトウキビの水利用について論じた研究は少ない。これは、圃場レベルで、蒸発を分離し、サトウキビの実蒸散量を精度良く直接測定することが困難なためである。サトウキビの収量に直接影響を及ぼす指標は蒸散量ではなく、蒸散量であり、蒸散量に基づいたサトウキビの水消費は十分に論じられていないのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究では、鹿児島県種子島、沖縄県糸満市のサトウキビ圃場を対象に、蒸散量、土壌水分、気象を現地観測し、アジアモンスーン域の温帯から亜熱帯島嶼域の気候および土壌（火山灰土、琉球石灰岩風化土）条件下でのサトウキビの蒸散量、および大気蒸散要求量に対するサトウキビの根による土壌水分吸水量を明らかにする。これにより、国内でのサトウキビの計画日灌水量としての値 3 mm/d の妥当性、および大気蒸散要求量に対するサトウキビの蒸散量の実証データを提示する。また、従来の微気象学的手法では評価が困難な小区画テラス圃場を対象に、サトウキビ圃場における実蒸散量評価に、熱パルスを利用した茎内流速測定法（ヒートパルス法）を適用し、その有効性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、鹿児島県農業開発総合センター熊毛支場の種子島圃場（30.7315°N, 131.0261°E; 海拔 51 m; 火山灰土）、および沖縄県糸満市の農家圃場（26.1346°N, 127.6819°E; 海拔 31 m; 琉球石灰岩風化土）を対象に、春株出後の夏季において、土壌水分、気象、蒸散量を現地圃場で観測し、サトウキビの蒸散量と基準作物蒸散量との関係、および大気蒸散要求量に対するサトウキビの水消費について検討する。蒸散量測定は東海大学竹内真一教授、土壌水分測定は鹿児島大学肥山浩樹准教授が担当した。現地観測は沖縄圃場（2018 年、2019 年）を中心に行い、種子島に対しては過去の現地観測資料（2016 年）を活用し、解析を行い、沖縄の結果と比較検討した。

### (1) サトウキビ蒸散量評価

ヒートパルス法を適用し、茎内流速に基づいて、圃場での蒸散量を直接評価した。ポット植サトウキビの蒸散量をヒートパルス法と秤量法により同時測定し、両者の値の比較からヒートパルス法による蒸散量直接測定に必要なサトウキビ固有のパラメータ（検定定数）を決定した。さらに、検定定数の妥当性は、現地において、ポトメーター法により検証した。なお、現地圃場での測定は、予め試験区内のサトウキビの平均直径に近い 6 本のサトウキビを選定、実施した。

### (2) 圃場土壌水分評価

小型誘電率型土壌水分計を埋設し、土壌水分鉛直分布の時間変化から対象圃場における根による吸水量を明らかにする。土壌水分測定の実用性は、現地土壌を採取し、水分計出力値と比較検討する。対象土壌は、南九州・沖縄の特殊土壌の火山灰土と琉球石灰岩風化土であり、それぞれの土壌特性を定量化し、土壌水分動態の数値解析に使用する。

### (3) 蒸散量と土壌水分動態解析

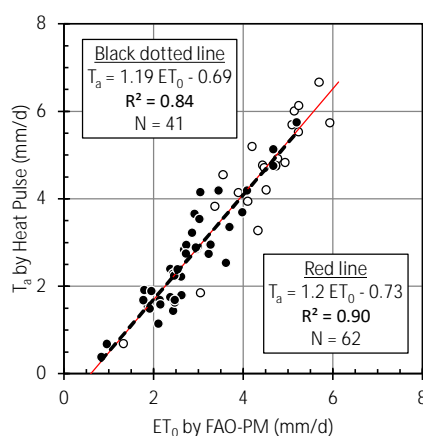
現地圃場での気象観測データに基づいて、FAO ペンマン・モンティース法による基準作物蒸散量  $ET_0$  を推定する。小区画圃場での実蒸散量  $T$  と、ペンマン・モンティース法に基づく蒸散量  $ET_0$  の関係について検討する。根による土壌水分吸水量をリチャーズ式に基づいて差分法により数値解析し、実測の蒸散量と比較する。根による土壌水分吸水モデルには、土壌の圧力水頭に応じて変化する吸水関数を適用し、また、根の空間分布（根密度）関数には、一様分布や上層で小さく下層で大きくなる台形、およびステップ関数等を設定し、検討した。

#### 4. 研究成果

(1) ヒートパルス法に関しては、茎内流速  $v$  から茎内流量  $Q$  を求めるための検定定数  $C$  ( $Q = CA_v$ ,  $A$ : 茎断面積) として、熱電対挿入深さをサトウキビ茎表面から茎直径の  $1/4$  にした場合、検定定数  $C=1.3$  で妥当であることを、ポット栽培サトウキビに対する温室内での秤量法試験、および現地圃場(沖縄糸満圃場, 2018年9月14日観測)でのポトメータ法試験により実証した。ヒートパルス法による観測結果によれば、圃場内のサトウキビ1本あたりの日蒸散量は、夏季晴天日において、種子島で最大値  $0.55 \text{ L/d}$  (2016年8月30日), および沖縄で最大値  $0.66 \text{ L/d}$  (2019年8月30日) を得た。また、観測期間中の同一期間(8月12日~9月5日の25日間)のサトウキビ蒸散量の日平均値は、種子島で  $4.5 \text{ mm/d}$  ( $0.38 \text{ L/d}$ ), 沖縄で  $5.3 \text{ mm/d}$  ( $0.47 \text{ L/d}$ ) であった。サトウキビ圃場群落内でのサトウキビ1本あたりの蒸散量を実証した例は少なく、今後、異なる圃場での比較研究における貴重な資料である。

(2) 種子島圃場においては、日単位の基準作物蒸発散量  $ET_0$  と蒸散量  $T_a$  は、**図1** のデータ数  $N=62$  の場合、決定係数  $R^2=0.90$  で、 $T_a = 1.2 ET_0 - 0.73$  の関係(図中の赤実線)にある。回帰直線の傾き  $1.2$  は、FAO(Allen, R.G. et al. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO) の Dual Crop Coefficient アプローチにおけるサトウキビ生育中期(草丈約  $3 \text{ m}$ ) の基準作物蒸発散量の  $1.2$  倍と一致している。図中のデータ数  $N=41$  の場合(黒点線)は、土壌水分が減少し水ストレス状況(土層全体の平均圧力水頭の  $pF > 3.0$ ) が考えられる場合を除いた回帰直線であり、全データ数  $N=62$  の場合と概ね類似している。両者に大きな違いがないことから、大気蒸散要求量に対して、根群域で不足する土壌水分を下層からの毛管水で補っていることが考えられる。大気蒸散要求量を  $1.2 ET_0$  とし、土壌面蒸発を  $0.5 ET_0$  として、数値解析した土壌水分の時間変化を**図2**に示す。深さ  $50 \text{ cm}$  では、下端境界条件として土壌水分の現地観測値を与えた。深さ  $15, 25, 35 \text{ cm}$  の土壌水分の観測値の時間変化を計算値はよく再現している。深さ  $35 \text{ cm}$  では、土壌水分が昼間に低下し、夜間に一定となる階段状の時間的変化を示している。この階段状の変化パターンは、昼間は蒸散に対応する根からの吸水で土壌水分が減少し、一方、夜間は蒸散量がほぼ  $0$  になり根からの吸水が停止することに対応している。**図3**には、種子島圃場におけるヒートパルス法による蒸散量  $T_a$  の実測値と、数値解析での根による吸水頂の根群域  $0 \sim 50 \text{ cm}$  の空間積分値である吸水量  $T_{\text{sink}}$  の時間変化を示す。図中の reference  $T_{\text{sink}}$  は、根群域を深さ  $60 \text{ cm}$  までと想定した場合の吸水量である。根による吸水量  $T_{\text{sink}}$  と蒸散量  $T_a$  は概ね一致している。根による吸水を考慮したサトウキビ圃場の土壌水分動態解析は、現地気象・土壌特性に対応した地域の消費水量評価に有効である。

(3) **図4**には、沖縄圃場における2018年8月18日の飽差  $VPD$  に対する茎内流量  $SF$  の時間応答を、それぞれの最大値(最大飽差  $VPD_{\text{max}} = 2.05 \text{ kPa}$ , 最大蒸散量  $SF_{\text{max}} = 63 \text{ cm}^3/\text{h}$ ) に対する比で示す。日射の時間変化に対応して茎内流量  $SF$  は変化している。一方、気温および飽差のピークは、茎内流量(あるいは日射)のピークに遅れてあらわれる。例えば、8月18日で2時間遅れてピークに達している。このため、図に示すように、同じ  $VPD$  の値でも、午前中に比べて午後の茎内流量は小さくなり、時計回りのヒステリシスループを描く。この茎内流量  $SF$  の飽差  $VPD$  に対するヒステリシス応答は、例えば木本類(オーストラリアのユーカリ, Zeppel et al., 2004, <https://doi.org/10.1071/FP03220>) や草本類(中国のトウモロコシ, Wang et al., 2020, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107849>) で観測されている。本研究では、島嶼域サトウキビ圃場において、飽差に対するサトウキビ茎内流量のヒステリシス応答を実証した。なお、飽差に対する蒸散量の応答の詳細な解析は、今後の課題である。



**図1** 基準作物蒸発散量  $ET_0$  と実蒸散量  $T_a$  の相関(種子島圃場)  
 $R^2$ : 決定係数,  $N$ : データ総数

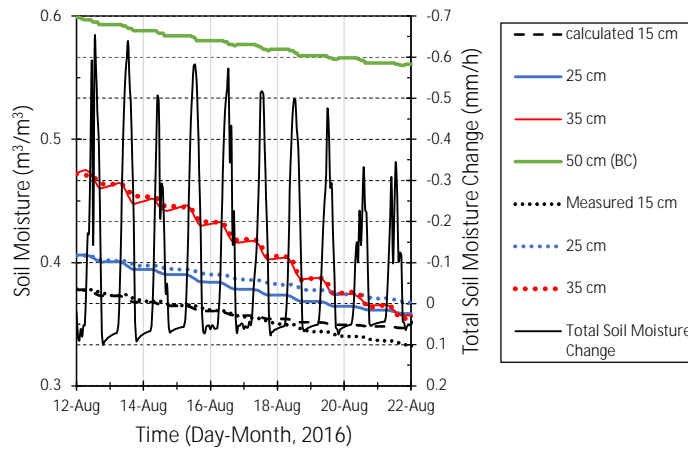


図2 晴天日の土壌水分の実測値と計算値，及び根群域総土壌水分時間変化量の計算値（種子島圃場）図中の黒実線：土壌水分変化量（+；増加，-；減少）

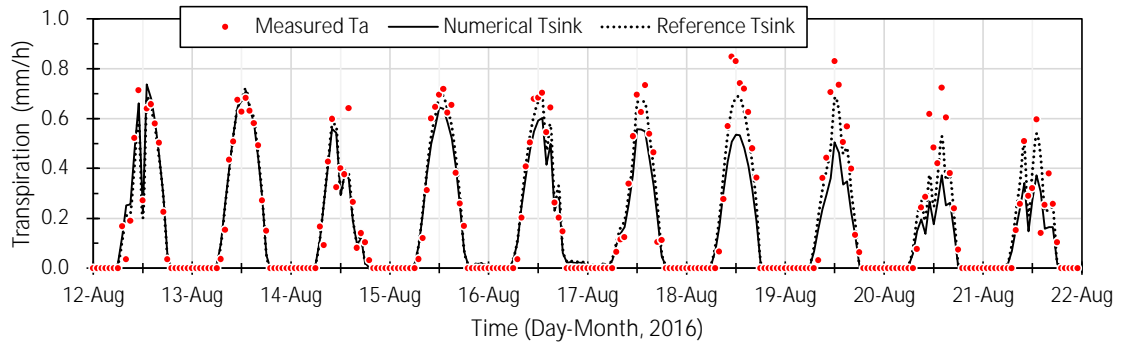


図3 連続晴天日におけるヒートパルス法による蒸散量  $T_a$  の実測値と数値解析による根による吸水量  $T_{sink}$  の計算値の比較（種子島圃場）

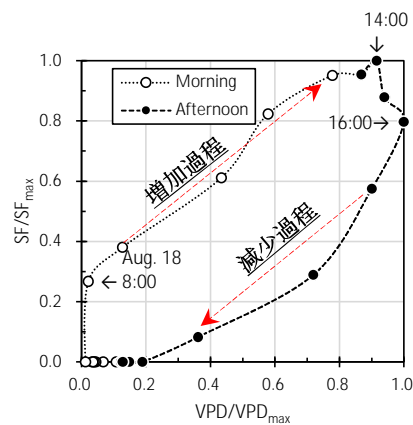


図4 飽差 VPD に対する蒸散量 SF のヒステリシス時間応答（沖縄圃場，2018 年 8 月 18 日）（最大飽差  $VPD_{max}=2.05$  kPa（時刻 16:00），最大蒸散量  $SF_{max}=63$   $cm^3/h$ （時刻 14:00））

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 竹内真一・初井和朗・肥山浩樹	4. 巻 87
2. 論文標題 ヒートパルス法に基づいた種子島サトウキビ圃場の蒸散量の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 289 - 296
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 Momii Kazuro, Hiyama Hiroki, Takeuchi Shinichi	4. 巻 250
2. 論文標題 Field sugarcane transpiration based on sap flow measurements and root water uptake simulations: Case study on Tanegashima Island, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural Water Management	6. 最初と最後の頁 106836 - 106836
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agwat.2021.106836	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 肥山浩樹・初井和朗・竹内真一
2. 発表標題 土壌水分測定に基づくサトウキビ圃場の消費水量の評価 種子島・沖永良部島試験圃場での検討
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会（東京農工大学，府中）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinichi Takeuchi, Kazuro Momii, Hiroki Hiyama
2. 発表標題 Evaluation of transpiration rate based on the heat pulse method in the sugar cane field of the four southern islands in JAPAN
3. 学会等名 XI International Workshop on Sap Flow (Finland), International Society for Horticultural Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森田くるみ・入江一冨・初井和朗・竹内真一
2. 発表標題 島嶼域サトウキビ圃場における蒸散量の推定 - 沖縄県糸満市照屋圃場の事例 -
3. 学会等名 農業農村工学会九州沖縄支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野瑞希・肥山浩樹・初井和朗・竹内真一
2. 発表標題 土壌水分測定に基づくサトウキビ圃場の消費水量の評価 - 沖縄試験圃場での検討 -
3. 学会等名 農業農村工学会九州沖縄支部大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鹿児島大学重点領域研究「水」グループ編	4. 発行年 2019年
2. 出版社 南方新社	5. 総ページ数 171
3. 書名 鹿児島の水を追いかけて	

〔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
研究 分担 者	肥山 浩樹  (Hiyama Hiroki)  (10208788)	鹿児島大学・農水産獣医学域農学系・准教授   (17701)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	竹内 真一  (Takeuchi Shinichi)  (30268817)	東海大学・海洋学部・教授    (32644)	

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