

気象データに基づく サトウキビスマート灌漑システムの構築

国立大学法人琉球大学 農学部 渡邊 健太、川満 芳信
NPO亜熱帯バイオマス利用研究センター 上野 正実
株式会社エーディエス 池田 剛

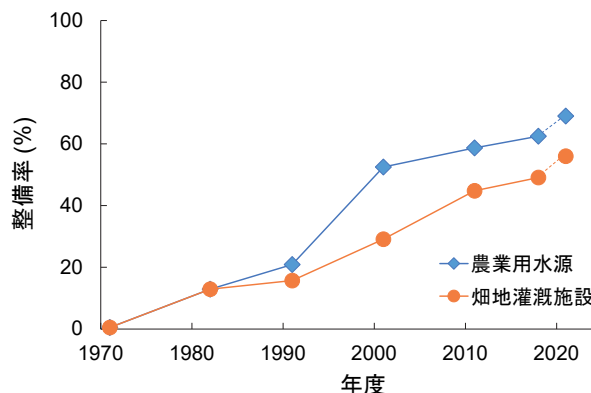
【要約】

水分要求量の大きいサトウキビにとって、灌漑^{かんがい}は最も重要な管理作業の一つであるが、生産者自らが灌漑のタイミングや量を決定するのは容易ではない。そこで、過酷な栽培環境を有する南大東島において、限りある水資源を無駄なく利用して省力・効率的にサトウキビ収量の増加、生産者収益の向上を達成できるスマート灌漑システムを考案、実証した。

はじめに

サトウキビは南西諸島の基幹作物であり、地域の経済を支える重要な役割を持つが、その単収は自然の降雨の影響を強く受け、年次変動が大きいのが現状である。特に干ばつ年には本来であれば生育旺盛期にあたる夏場のサトウキビの成長が著しく抑えられてしまうため、灌漑は最も重要な管理作業の一つだと言える。沖縄県では貯水池や地下ダムなどの建設が積極的に進んだこともあり、近年の農業用水源整備率、畑地灌漑施設整備率はかなり高まってきている¹⁾ (図1)。一方、干ばつ時にサトウキビに灌漑を行えば収量が増加することは明白であるものの、生産者が自らの経験や勘だけで灌漑のタイミングや水量を決定するのは難しく、また灌漑にかかる労力や時間的な制約から必要な時に灌漑を行うことができないといった問題もある。そこで、現在われわれがサトウキビスマート農業プロジェクトを行っている南大東島において、必要な時に必要な水量を与える効率的な灌漑システムに関する研究を行ったので本稿で紹介する。なお、本研究は独立行政法人農畜産業振興機構の令和3年度砂糖関係研究委託調査により実施したものである。

図1 沖縄県における農業用水および畑地灌漑施設整備率の推移



資料：沖縄県農林水産部「令和元年度版沖縄県の農業農村整備の概要」を基に筆者作成

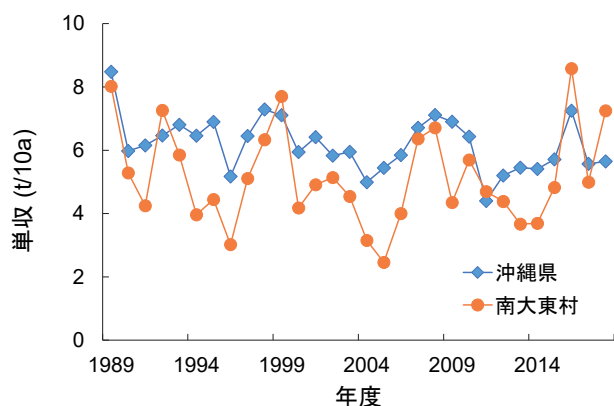
注：2021年度は目標値。

1. 南大東スマート農業プロジェクトの紹介

南大東島は沖縄本島から東に360キロメートルの位置にある円形の島であり、30平方キロメートルほどの面積に約1200人が居住している。この島の基幹産業はサトウキビ生産および製糖業であり、耕地面積の9割以上をサトウキビが占める、まさしくサトウキビによって成り立つ島である。南大東島は他の生産地域と比べて圃場^{ほじょう}一筆あたりの面積が大きく、1970年代からハーベスタを

中心とした農業機械の導入が進み、作業効率の高い機械化作業体系が確立されている。しかし、近年では生産者の高齢化や後継者不足により、高精度な作業のできる熟練オペレータが不足するという深刻な問題に直面している。また、水資源や農地資源が限られており、生産が台風や干ばつに大きく左右され、不安定であるという離島地域に特有な問題もある。南大東島は以前より低単収地域として知られており、過去30年間（1989～2018年度）の単収は10アール当たり5.16トンと沖縄県平均同6.18トンには遠く及ばず、また最高となる2016年度の同8.58トンから最低となる2005年度の同2.46トンまで、年変動も極めて大きい²⁾（図2）。このような状況が続けばサトウキビ産業は衰退の一途をたどり、サトウキビに頼る南大東島の無人化にもつながりかねない。このような問題にスマート農業技術を用いて対処すべく、われわれは「さとうきびの生育情報に基づく精密管理によるスマート農業体系の実証」、通称UFSMA（ウフスマ）プロジェクトを立ち上げた。本プロジェクトは①農機のGNSS自動操舵による高精度・超省力栽培体系の確立②各種データの地理情報システム（GIS）ベース営農支援システムへの統合および高度活用③生育データ・生育環境データに基づく精密自動灌漑システムの確立ーを

図2 沖縄県および南大東村におけるサトウキビ単収の推移



資料：沖縄県農林水産部「さとうきび及び甘しや糖生産実績（1990～2019）」を基に筆者作成

実証目標とし、2019～2020年度の2年間にわたって行った（詳しくは本誌2021年7月号「ウフスマ・プロジェクトの終了とさとうきびスマート農業時代の幕開け」³⁾を参照）。

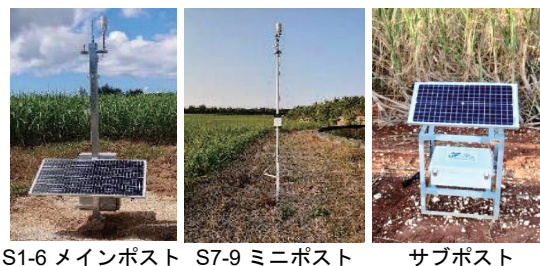
UFSMAプロジェクトの主な取り組みの一つに温湿度や風速、日射量などのデータを局地的に収集する微気象ポストの設置・運用がある。島内を網羅するよう9カ所にポストを設置し（S1～S9、図3）、微気象データと周囲のサトウキビ画像データを10分に1回収集している（図4）。さらにこれらのデータをパソコンやスマートフォンを用いてリアルタイムで閲覧できるシステムを構築し（図5）、現在実際に島内の生産者にも提供している。また、このシステムでは過去のデータにさかのぼることも可能で、微気象ポスト運営後の島内の気象情報をかなり正確に把握することが可能である。

図3 微気象ポストの設置位置



資料：筆者作成

図4 微気象ポストの種類

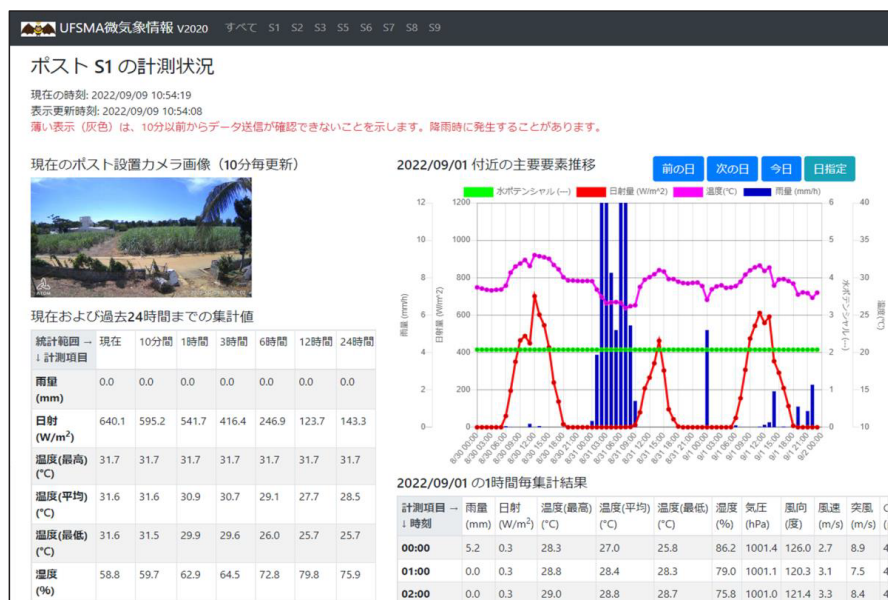


資料：筆者作成

注1：S1～6には大型台風にも耐える頑強なメインポストを、S7～9には移動可能なミニポストを設置している。

注2：各サイトにはサブポストも設置しており、土壌水分や地温など地下部のデータ収集も行っている。

図5 生産者向け微気象情報配信システム（2022年9月1日ポストS1の計測状況画面）



資料：UFSMA微気象情報v2020より

注：本システムの閲覧を希望する方、本システムに興味をお持ちの方はプロジェクトホームページ（UFSMA<<http://www.ufsma.jp/>>）よりお問い合わせください。

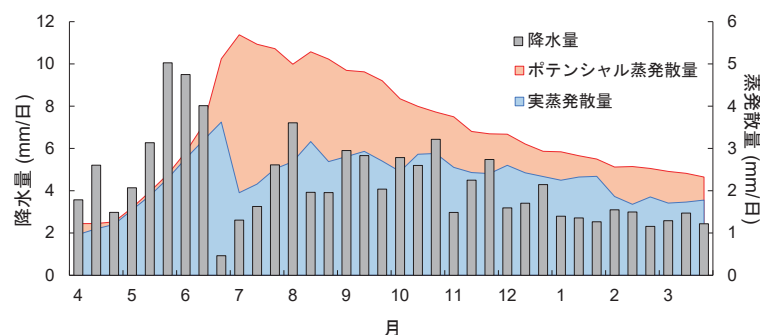
2. 南大東島サトウキビ畑における水収支

植物は葉の表面にある気孔を介して光合成の基質となる二酸化炭素を取り込むとともに蒸散によって水蒸気の放出も行っている。土壌が乾燥し、植物に水ストレスがかかると気孔は閉じ気味となるため光合成速度は低下するが、その分蒸散によって失われる水分も減る。このように一般的に植物の光合成速度と蒸散速度、すなわち成長量と消費水量との間には比例関係が存在する。土壌面からの蒸発と植物に

よる蒸散を合わせた蒸発散量は気象データから推定可能である。したがって、ある地点のある期間における気象データが得られればその植物の消費水量、ひいては成長量を推定することが可能となる。

まず、南大東島のサトウキビ畑における水収支の特徴を把握するため、気象庁ホームページ⁴⁾から過去30年間（1989～2018年度）の気象データ（降水量、気温、湿度、風速、日射量）を入手し、旬ごとの平年的な水収支を算出した（図6）。ここで「ポテンシャル蒸発散量」とは、サトウキビにまったく水ストレスがかからないと仮定した場合の気象条件

図6 南大東島サトウキビ畑の旬ごとの平年的な水収支（1989～2018年度）



資料：筆者作成

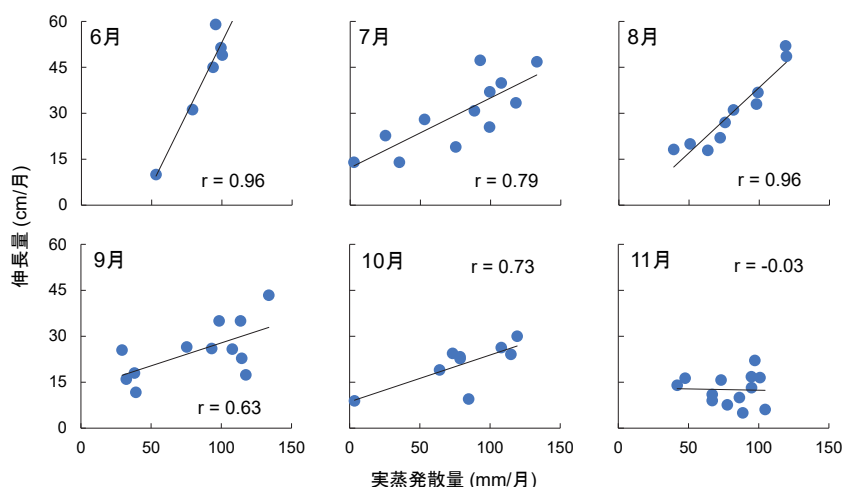
注：4月上旬植え付け、3月下旬収穫を想定した。

下で得られる最大の蒸発散量を指し、「実蒸発散量」とは、サトウキビが受けた水ストレスによって減少する蒸散を考慮した蒸発散量を指す。つまりサトウキビが受ける水ストレスが強くなればなるほど実蒸発散量が低下し、ポテンシャル蒸発散量との差が開く。まず、降水量の推移を見ると、5月中旬から6月中旬にかけて値が高くなっているのが分かるが、これは梅雨の降雨によるものである。そして梅雨明けとなる6月下旬に年間を通して最も低くなり、7月中旬までは比較的低い状態が続いている。次にポテンシャル蒸発散量を見ると、植え付け直後の4～5月は低いがその後は直線的に増加を続け7月上旬に最大となる。9月頃までは高い値を維持するが、その後は収穫まで緩やかに減少し続けている。一方、実蒸発散量の方は6月下旬まではほぼポテンシャル蒸発散量と同様に推移しているが、7月上旬に急激に減少している。これは7月に入って気温や日射が高まりサトウキビの成育が盛んになるためピークを迎えるポテンシャル蒸発散量に対して降水量が圧倒的に不足し、水ストレスがかかってしまうことによる。その後、実蒸発散量はやや増加するものの依然として降水量が不足しており、ポテンシャル蒸発散量と実蒸発散量の間には大きな差が認められる。

11月以降は気候も穏やかになりポテンシャル蒸発散量も低下するために実蒸発散量との差も少しずつ小さくなっていく。以上より、南大東島では梅雨明けから10月頃までサトウキビに水ストレスが生じやすくなるため、特にこの時期における水管理が重要であることが分かる。

南大東島における水収支の特徴が分かったところで、次に水収支が成育や収量にどのような影響を及ぼすかを解析したい。図7は過去13年間（2006～2018年度）にわたる月ごとの南大東島のサトウキビ畑における実蒸発散量とサトウキビ伸長量との関係である。なお、台風は大きな降雨をもたらす一方でサトウキビに甚大な被害を与えることから、データの解析精度を保つため最大風速が暴風域の目安となる25メートル毎秒以上の台風襲来年は省いてある。11月を除くすべての月で実蒸発散量と伸長量との間には高い正の相関関係が認められ、降雨が多く水ストレスの小さい年ほどサトウキビの成長が著しいことが分かった。特に6月や8月の相関係数は0.96と非常に高いことから、サトウキビの成長のほとんどを水が決定していると言っても過言でない。このような傾向が11月には見られなかった理由として、亜熱帯気候を有する沖縄でも徐々に気

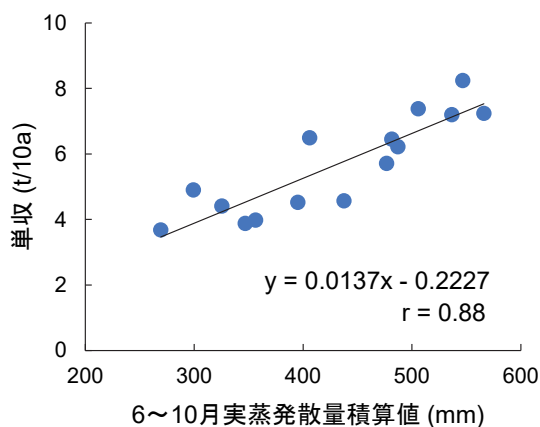
図7 南大東島サトウキビ畑における実蒸発散量とサトウキビ伸長量との関係



資料：筆者作成

注：2006～2018年度のうち台風襲来年を除く。

図8 南大東島サトウキビ畑における6～10月
実蒸発散量積算値とサトウキビ単収との関係



資料：筆者作成

注：1989～2018年度のうち台風襲来年を除く。

温や日射量が低下し始めるため、実蒸発散量に年ごとの差が表れにくいこと、そして光合成産物が茎伸長よりも糖蓄積に利用されることが挙げられる。このように水収支と成長との関係は、サトウキビの生育旺盛期にあたる6～10月により強く認められることが分かった。そこで次に過去30年間（1989～2018年度）にわたる6～10月の実蒸発散量の積算値とサトウキビ単収との関係を図8に示した。図7同様、台風襲来年のデータは省いている。実蒸発散量積算値は269～566ミリメートル、単収は10アール当たり3.68～8.24トンまで年によって大きく変動し、両者の間には高い正の相関関係が確認された。この関係の一次回帰式が $y = 0.0137x$

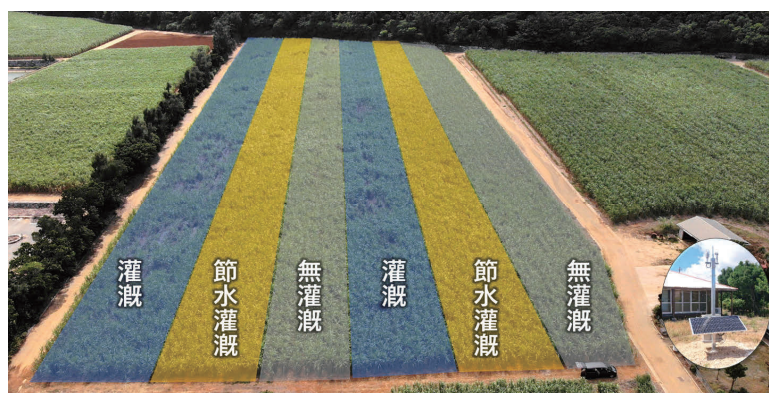
- 0.2227であることから、実蒸発散量を100ミリメートル高めることができれば単収を同1.37トン増加できることが分かる。この解析結果からも、夏場の水収支がサトウキビの生育および収量に強い影響を与え、干ばつ時には灌漑により実蒸発散量を高めることで増収を図ることが可能だと示された。

3. 南大東島における灌漑試験

前章で用いた水収支算出法に基づき灌漑を行う試験を現地南大東島で実施した。夏植えサトウキビを収穫後、2021年2月11日に株出し管理を行った南大東村字池之沢の圃場を試験に用いた。試験区として、点滴チューブを設置しなかった無灌漑区、全畝間に設置した灌漑区に加え、一畝飛ばしでチューブを設置し灌漑区の半分の水量を与えた節水灌漑区をそれぞれ2反復ずつ設けた（図9）。灌漑処理期間を8月1日～11月3日までとし、灌漑区のサトウキビが水ストレスを受ける前に圃場容水量に達するまで灌漑を行った。なお、試験圃場の横には微気象ポストのうちの 하나가設置してあり、水収支の計算に必要な気象データはここから取得した。また、灌漑には遠隔操作が可能なエンジンポンプを使用し、沖縄本島からスイッチのオンオフを行った。

図10は試験期間中の無灌漑区の水収支を表す。

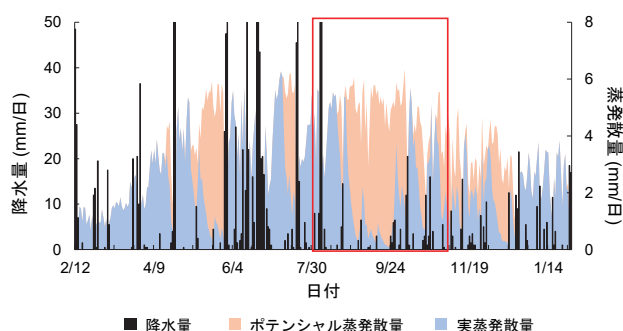
図9 灌漑試験圃場の外観



資料：筆者作成

注：圃場横には微気象ポストが設置されている。

図10 無灌漑区における試験期間中の水収支



資料：筆者作成

注1：50mm超の降水量は表示されていない。

注2：赤枠で囲まれた部分が灌漑処理期間。

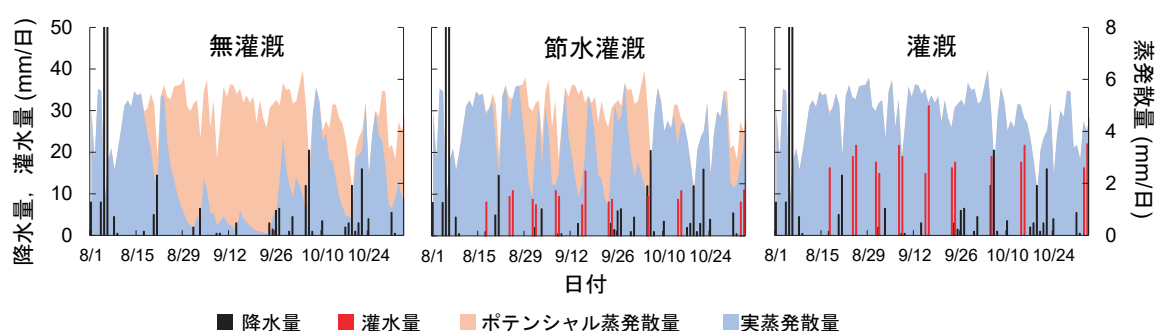
図6同様、ポテンシャル蒸発散量と実蒸発散量の差が水ストレスを受けて減少した蒸発散量である。2021年度は梅雨入り後に少雨となり、5月は実蒸発散量が大きく低下しているのが分かる。しかし、6月に入ると雨が続き、1日に数10ミリメートルとなる大雨が何度も観察された。7月に入ってから定期的な降雨が見られ、灌漑処理を開始する8月まで圃場は比較的湿潤な状態が続いた。

次に図11に灌漑処理期間中の各試験区の水収支を示す。処理期間中の南大東島は干ばつ気味で、8月上旬に300ミリメートル近い降雨があった後はまとまった降雨は認められず、サトウキビは強い水ストレスにさらされた。その結果、無灌漑区では実蒸発散量が大きく低下し、8月末に実蒸発散量は0付近まで低下した。10月上旬に20ミリメートルを超える降雨が見られ一時期実蒸発散量の増加が見ら

れたが、干ばつ傾向は変わらず、その後再び実蒸発散量は低下した。この約3カ月間のポテンシャル蒸発散量と実蒸発散量の差は223ミリメートルに達した。一方、期間中に計9回の灌漑（節水灌漑区：153ミリメートル、灌漑区：306ミリメートル）を行ったため、灌漑区ではほとんど水ストレスの影響を受けず、実蒸発散量はポテンシャル蒸発散量に限りなく近かった。図を見ると、赤いバーで示した^{かんすい}灌水量が降雨の不足を補い、実蒸発散量が増加している様子がよく分かる。灌水量がその半分となる節水灌漑区における実蒸発散量は灌漑にあわせて増減を繰り返す形となり、無灌漑区と比べて大幅に増加したものの、ポテンシャル蒸発散量には達していない。その結果、期間中のポテンシャル蒸発散量と実蒸発散量の差は90ミリメートルとなった。

また、図12は土壌センサーを用いて灌漑区のpFを測定した結果である。pFとは植物が土壌水分を吸い上げるのに必要な力を数値化したものであり、値が高いほど土壌が乾燥していることを示している。著者らのこれまでの研究からpFが3.5以上になると、サトウキビの成長阻害程度が著しくなり、4.0に近づくと光合成速度はゼロ付近まで低下することがわかっている。灌漑区のpFは給水に非常によく反応しており、降雨および灌漑の後にはただちにpFが低下する様子が観察された。本研究で用いた灌漑法は気象データから算出した水収支に基づくもので

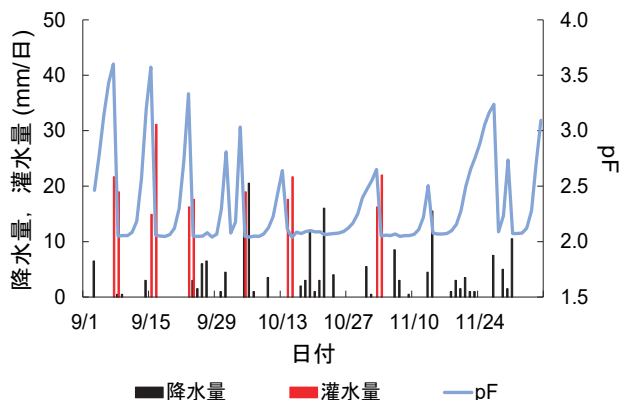
図11 灌漑処理が各試験区の水収支に与える影響



資料：筆者作成

注：50mm超の降水量は表示されていない。

図12 降水量、灌水量および灌漑区におけるpFの推移

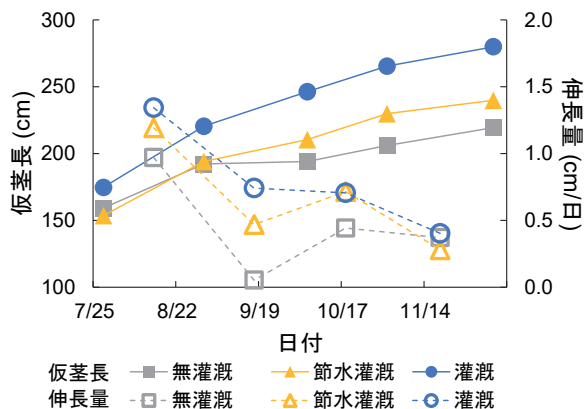


資料：筆者作成

あったが、サトウキビに害を与える前に灌漑を行っていたことが土壌pFデータからも読み取れる。

サトウキビの成育の指標となる仮茎長は灌漑処理開始前となる7月末時点ではどの試験区も同様の値であったが、処理期間が延びるにつれて灌漑の効果が表れ、徐々に試験区間差が見られるようになった(図13)。8月31日から10月5日にかけては特に干ばつがひどく、無灌漑区の伸長量はほぼ0となった。一方、その前の期間に比べ減少したものの、節水灌漑区、灌漑区では比較的高く伸長量が維持された。最終調査を行った12月7日時点で無灌漑区と節水灌漑区との間には24センチメートル、無灌漑区と灌漑区との間には61センチメートルの差が見られた。

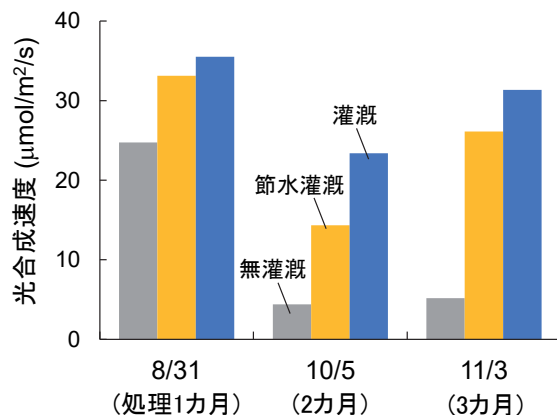
図13 灌漑処理期間とその前後における各試験区の仮茎長および伸長量の推移



資料：筆者作成

図14は各試験区の光合成速度データである。灌漑処理開始1カ月後となる8/31時点では節水灌漑区、灌漑区と比べて無灌漑区で値がやや低くなっている。さらに2カ月後、3カ月後はより明確な差が見られ、無灌漑区の光合成速度が0付近を示しているのに対し、節水灌漑区、灌漑区の光合成速度は15~30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (マイクロモル毎平方メートル毎秒) と高い値を維持している。伸長量同様、よりミクロなレベルである葉の生理活性にもこのように灌漑の効果が表れていることが分かる。

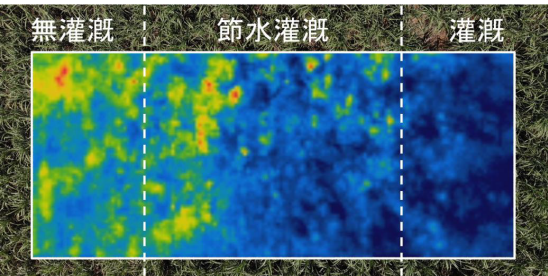
図14 灌漑処理が各試験区の光合成速度に与える影響



資料：筆者作成

さらにドローンを用いた熱画像の撮影も行った。活性の高い葉は光合成および蒸散を盛んに行っているが、蒸散によって水分が葉から放出される際に気化熱によって周囲の熱を吸収するため、元気な葉ほど葉表面の温度が低下する。熱画像によって葉温を可視化することができれば、直感的にサトウキビの水ストレス程度を把握することが可能となる。図15は灌漑処理開始1カ月後となる8月31日に撮影したドローン画像である。無灌漑区では赤や黄、緑のピクセルが観察されるが、灌漑区ではほぼすべて青のピクセルによって占められており、葉温の違いが明確に表れている。さらにこの画像からは、節水灌漑区の中でも無灌漑区に近い側でより葉温が高くなっていることも明らかになった。

図15 灌漑処理期間中（8/31）に撮影したドローン熱画像



資料：筆者作成

表1は2022年1月末に行った収穫時の収量調査データである。無灌漑区の単収は最も低く10アール当たり4.36トンであった。一方、節水灌漑区、灌漑区の単収は同4.95トン、同6.37トンとなり、それぞれ無灌漑区と比較し同0.59トン、同2.01トンの増加となった。節水灌漑区では灌漑区の半量の水を与えていたが、増収効果は灌漑区よりも圧倒的に低かった。一方、甘しや糖度やトラッシュ率といった品質に関する項目に大きな試験区間差は見られなかったが、トラッシュ率は灌漑区で最も低くなった。単収

と甘しや糖度の積で表される糖収量は無灌漑区、節水灌漑区、灌漑区でそれぞれ10アール当たり620、705、891キログラムとなり、単収同様灌漑区でより増収効果が大きかった。このように灌漑は最終的な収量に対してもプラスに働くことが分かった。

最後に各試験区における収益の計算を行った。エンジンポンプ、点滴チューブを含む灌漑資材代、ポンプの稼働に使用した燃料代、通常の株出し栽培にかかる生産費、収穫作業に要するハーベスタ料金を合わせて、必要経費は無灌漑区、節水灌漑区、灌漑区でそれぞれ10アール当たり4万1800円、5万2000円、5万8500円となった（表2）。各試験区の単収、糖度から算出された10アール当たりサトウキビ価格はそれぞれ10万円、11万3500円、14万5400円であった。この値から必要経費を差し引いた10アール当たり粗収益はそれぞれ5万8200円、6万1500円、8万6900円となり、無灌漑区と比べて節水灌漑区で3300円の増収、灌漑区で2万8700円の増収となった。

表1 灌漑処理が収量関連項目に与える影響

	単収 (t/10a)	甘しや糖度 (度)	トラッシュ率 (%)	糖収量 (kg/10a)
無灌漑	4.36	14.2	16.3	620
節水灌漑	4.95	14.2	18.5	705
灌漑	6.37	14.0	14.6	891

資料：筆者作成

表2 各試験区におけるサトウキビ価格、必要経費および粗収益

(単位：円/10a)

					必要経費 合計	サトウキビ 価格	粗収益
	灌漑資材代	ポンプ燃料代	生産費	収穫費			
無灌漑	0	0	30,000	11,800	41,800	100,000	58,200
節水灌漑	8,000	600	30,000	13,400	52,000	113,500	61,500
灌漑	10,000	1,300	30,000	17,200	58,500	145,400	86,900

資料：筆者作成

注1：10円単位で四捨五入した値を表示した。

注2：灌漑資材は、節水灌漑区、灌漑区の資材代を40,000円/10a、50,000円/10a、耐用年数を5年とし、減価償却費8,000円、10,000円をそれぞれ計上した。

注3：ポンプ燃料は、ポンプ総稼働時間を113時間、燃料消費量を0.08L/10a/時間、燃料（軽油）代を140円/Lとして計算した。

注4：生産費は、通常の株出し栽培にかかる農薬、肥料、管理機使用料金を合わせて30,000円/10aとした。

注5：収穫費は、ハーベスタ料金を2,700円/tとして計算した。

注6：サトウキビ価格は、無灌漑区、節水灌漑区を22,924円/t（甘しや糖度14.2度）、灌漑区を22,839円/t（甘しや糖度14.0度）として計算した。

注7：粗収益は、サトウキビ価格－必要経費合計として算出した。

以上の結果をまとめると、気象データから水収支を算出することでわざわざ畑まで出向かなくとも畑の水分状態やサトウキビの水ストレス程度を正確に把握できることが分かった。また、それに基づき灌漑を行うことで、夏場サトウキビにかかる水ストレス程度を軽減し、成長速度および光合成速度を高く維持できたことから、収量を大きく増加させることができた。一方で、本研究から灌漑による増収効果は確認できたものの、本研究で用いた灌漑法が従来の灌漑法と比べて節水や水利用率の向上を達成することができたかは不明であったため、この点に関しては今後の研究で明らかにしたい。

おわりに

本研究で考案した灌漑法を用いることで、島の限りの水資源を無駄なく利用しながらサトウキビの単収増加、生産者の収益向上を効率的に達成できることが明らかとなった。現在、配信している微気象情報システムの中に本研究で用いた実蒸発散量を組み込むことができれば生産者自身で灌漑のタイミングや水量を決定するのに役立つことができる。さらに、希望する生産者にはサトウキビが水ストレス

を受けそうになった時にスマートフォンやパソコンに通知が届くアラーム機能を取り付け、遠隔操作が可能なポンプを用いていつでも自由に灌漑が行えるシステムを今後構築したいと考えている(図16)。

台風や干ばつにしばしば見舞われ、また資源が限られている南大東島は日本で最も過酷なサトウキビ栽培環境を有していると言っても過言ではない。しかしながら全県的に豊作となった2016年度以降、島のサトウキビ生産は確実に向上している。近年の南大東島の単収は2018年度が10アール当たり7.25トン、2019年度同8.15トン、2020年度同8.17トンと高単収を記録し続けている。このようにサトウキビの増産、収量の安定化を達成しつつあるのも新品種の導入や管理作業の適期実施といった生産者や糖業関係者の並々ならぬ努力があってこそである。本研究成果が島のサトウキビ産業のさらなる発展へとつながれば幸いである。

最後に、本研究を遂行するにあたって大東糖業株式会社および農業生産法人アグリサポート南大東株式会社に多大なる協力をいただいた。この場を借りて感謝申し上げる。

図16 本研究から提案されるスマート灌漑システム



参考文献

- 1) 沖縄県農林水産部 (2019)「令和元年度版沖縄県の農業農村整備 (Ⅲ 農業農村整備事業等の概要)」
- 2) 沖縄県農林水産部 (1990～2019)「さとうきび及び甘しゅ糖生産実績 (さとうきび作型別生産実績)」
- 3) 上野正実・川満芳信・渡邊健太 (2021)「ウフスマ・プロジェクトの終了とさとうきびスマート農業時代の幕開け」『砂糖類・でん粉情報』(2021年7月号) pp.46-56.
- 4) 気象庁「過去の気象データ検索」<<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>> (2022/9/15アクセス)