

北大東島における畑地土壌の実態と
生産力向上のための対策

2017年9月

東京農工大学大学院

生物システム応用科学府

生物システム応用科学専攻

吉田 晃一

目 次

I. 緒論

1. 沖縄農業におけるサトウキビ栽培	1
1) 日本における砂糖生産とサトウキビ	1
2) 沖縄県におけるサトウキビ栽培の歴史	2
3) サトウキビ栽培が地域経済に担う役割	5
4) サトウキビ栽培の課題	6
5) 北大東島におけるサトウキビ栽培	8
2. サトウキビ生産性向上に関する既往の研究	11
3. 本研究の目的	19

II. 北大東島におけるサトウキビ低収要因の解明

1. 目的	21
2. 材料および方法	23
1) 土壌理化学性	23
2) サトウキビ収量と甘蔗糖度	24
3) 栽培管理	24
4) 統計解析	24
3. 結果	25
4. 考察	29
1) サトウキビ収量に及ぼす影響	29
(1) 可給態窒素	30
(2) 作土深	31
2) 甘蔗糖度に及ぼす影響	32
(1) 交換性マグネシウム	32
(2) 土壌 pH(H ₂ O)	33
3) 結論	33
5. 要約	34

Ⅲ. 糖蜜施用がサトウキビの生育・収量及び土壌化学性に及ぼす影響

1. 目的	36
2. 材料および方法	38
1) サトウキビ糖蜜施用試験	38
(1) 試験区および栽培概要	38
(2) 生育及び収量調査	40
(3) 土壌分析	40
(4) 植物体分析	41
(5) 糖蜜施用による収益性への影響調査	42
2) 春植え収量と株出し収量の実態調査	42
3) 統計解析	43
3. 結果	43
1) サトウキビ糖蜜施用試験	43
2) 春植え収量と株出し収量の実態調査	48
4. 考察	49
1) 糖蜜施用によるサトウキビ生育・収量への影響	49
2) 糖蜜施用による甘蔗糖度への影響	53
3) 糖蜜施用による収益性への影響	53
5. 要約	54

Ⅳ. 北大東島におけるケイ酸肥沃度と可給態ケイ酸分析法の検証並びに可給態ケイ酸がサトウキビ生育に及ぼす影響

1. 目的	56
2. 材料および方法	58
1) 北大東島ケイ酸肥沃度の実態	58
2) AB法とPB法の比較及びAB法、PB法と 土壌pH(H ₂ O)の比較	59
3) 酸性矯正による可給態ケイ酸の向上が、サトウキビのケイ酸 吸収に及ぼす影響	59
3. 結果	60

1)	北大東島ケイ酸肥沃度の実態	60
2)	AB法とPB法の比較及びAB法、PB法と 土壌pH(H ₂ O)の比較	62
3)	酸性矯正による可給態ケイ酸の向上が、サトウキビのケイ酸 吸収に及ぼす影響	63
4.	考察	66
1)	北大東島ケイ酸肥沃度の実態	66
2)	AB法とPB法の比較及びAB法、PB法と 土壌pH(H ₂ O)の比較	67
3)	酸性矯正による可給態ケイ酸の向上が、サトウキビのケイ酸 吸収に及ぼす影響	69
5.	要約	70
V.	総合考察	72
1.	沖縄県におけるサトウキビ生産性の低迷について	72
1)	世界のサトウキビ生産	72
2)	国内主要農産物とサトウキビの比較	73
3)	沖縄県のサトウキビ収量はなぜ低迷しているのか	74
4)	北海道のテンサイにおける生産性向上対策の事例	76
5)	土層改良事業の実施状況	77
2.	サトウキビ生産性向上のために何をすべきか	77
3.	北大東島の土壌実態及び低収要因の解明と対策	79
1)	北大東島サトウキビ低収要因を検証するための解析方法 について	79
2)	サトウキビ生産性に影響する土壌要因と土壌条件	81
3)	サトウキビ収量および甘蔗糖度を改善する対策	82
4.	糖蜜施用によるサトウキビ生産性の向上	84
5.	北大東島におけるケイ酸肥沃度の実態とサトウキビ生育に 及ぼす影響	88
1)	北大東島のケイ酸肥沃度とサトウキビ収量との関係	88

2) AB法とPB法の比較及びAB法、PB法と土壌pH(H ₂ O) の比較	90
3) 酸性矯正による可給態ケイ酸の向上が、サトウキビの ケイ酸吸収に及ぼす影響	91
6. おわりに	92
VI. 摘要	95
謝辞	98
引用文献	100
論文目録	120

I . 緒 論

1 . 沖縄農業におけるサトウキビ栽培

1) 日本における砂糖生産とサトウキビ

我が国で消費される砂糖は、年間約 200 万 t で推移しており、そのうち 3 割程度を国内で生産されたテンサイとサトウキビで賄っている（農林水産省，2016）。2015 砂糖年度（2015 年 10 月から 2016 年 9 月）の国内産糖生産量は 81.3 万 t で、そのうちテンサイ糖は 67.6 万 t（83.1%）、甘しゃ（サトウキビ）糖は 12.9 万 t（15.8%）である（農畜産業振興機構，2017a）。我が国は、南北に長い地理的条件を活かし、温帯～亜寒帯で栽培されるテンサイと、熱帯～亜熱帯で栽培されるサトウキビという世界的に主要な 2 種の甘味資源作物を自国で生産可能である。日本のサトウキビ栽培は、主に、鹿児島県の南西諸島および沖縄県でおこなわれており、それぞれの地域で主要な農産物として扱われている（井上，2006）。

サトウキビ（*Shaccharum officinarum* L.）は、イネ科の多年生植物で C4 作物であり、高い光合成能力を有する（宮里，1986；寺内，2002）。原産地はインドとする説と、ニューギニアが原産でインドは第 2 次原産地とする説がある（宮里，1986）。サトウキビは、高温多雨条件に適し、主に熱帯・亜熱帯の大陸・島嶼地域で栽培されている（杉本・寺島，2006）。熱帯・亜熱帯の広範囲で、サトウキビが栽培されている理由の 1 つとして、C4 作物であるため高温・多照条件下で同化効率が高く、多くの作物の中でも栽培面積当たりのエネルギー生産量が高いことが挙げられる（永富，1989）。サトウキビが作物化したのは紀元前 1 万 5000 年～8000 年のニューギニア島付近と言われ（宮里，1986）、その後、ニューギニア各島々から近隣諸島を經由し、東南アジア、イン

ド、中国を経て各地に伝播したと考えられている（宮里，1986；永富，1989；寺内，2002）。日本に砂糖が伝わったのは、754年に鑑真によりもたらされたと言われているが、サトウキビ栽培が始まったのは1610年奄美大島からとする説や（前田，1971）、15世紀ですでに琉球王国で栽培されていたとする説がある（宮里，1986；深山，2014）。

2) 沖縄県におけるサトウキビ栽培の歴史

沖縄県は九州の南に弓状に並ぶ南西諸島のうち、琉球諸島に位置し、南北は硫黄島から波照間島までの約400 km、東西は北大東島から与那国島までの約1,000 kmの海域に展開する弧状列島である（図I-1，翁長・宜保，1984；国土地理院，2017）。地理的には、湿潤亜熱帯のアジアモンスーンに位置し、多雨地帯に属している（翁長・宜保，1984）。過去10年間（2007～2016）の年平均降水量と年平均気温は、それぞれ2,250 mm、23.3℃と温暖湿潤な気候である（気象庁，2017a）。

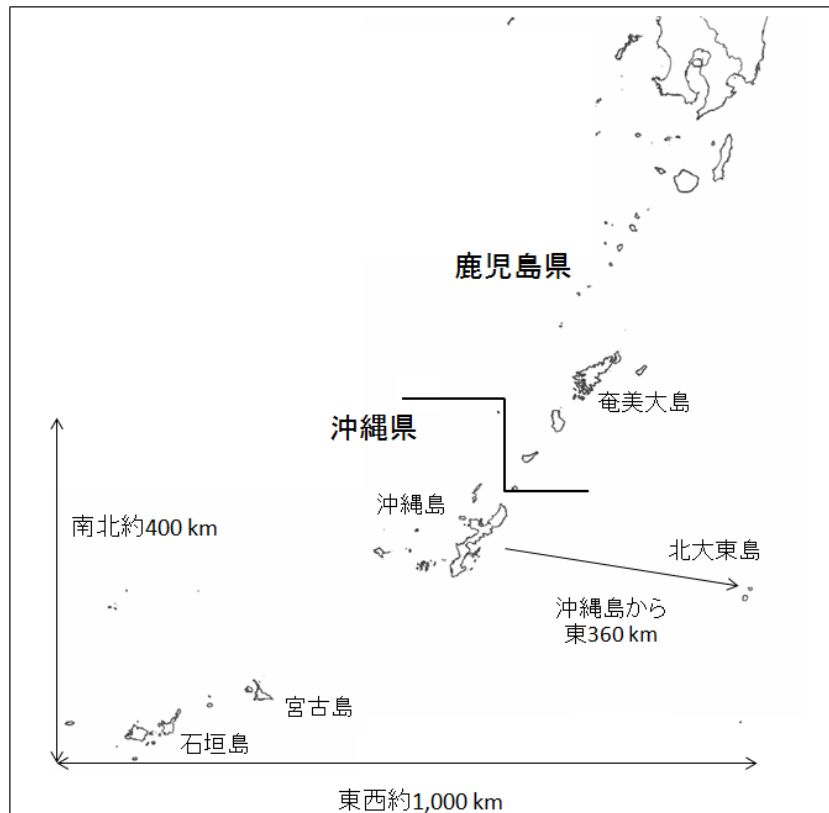


図 I -1 沖縄県および北大東島位置図

15～16 世紀から栽培が始まったサトウキビは、換金作物として琉球王府下で栽培が奨励されたが、収穫面積の増加に伴い食用作物の耕作面積を圧迫し、食糧生産の減退を招いた。そのため、サトウキビの作付面積は 1,500 ha に制限されていたが（久保田，1962；宮里，1986；深山，2014）、1888 年（明治 21 年）、明治政府の国内糖業振興を背景に作付け制限は解除された（金城，2012）。サトウキビの搾汁から粗糖を精糖する際、糖蜜と言われる茶褐色の有機物が発生するが（笹田，2000）、砂糖は製造方法の違いにより、糖蜜を分離していない含蜜糖と糖蜜を分離した分蜜糖の 2 つに分けられる。当時は含蜜糖（黒糖）が生産されていたが、1906 年（明治 39 年）から分蜜糖製造が開始し、併せて国外からの種苗・製糖技術導入などによりサトウキビ産業の基盤が築かれた（小那覇ら，1998）。

明治期から太平洋戦争が始まるまではサトウキビ産業は順調であり、サトウキビ収穫面積は昭和初期（1927 年～1931 年の平均）には 1.8 万 ha に達していた（図 I -2）。しかし、戦中から戦後直後は食糧生産が優先されたことから、糖業は一時中絶状態となった（宮里，1986）。

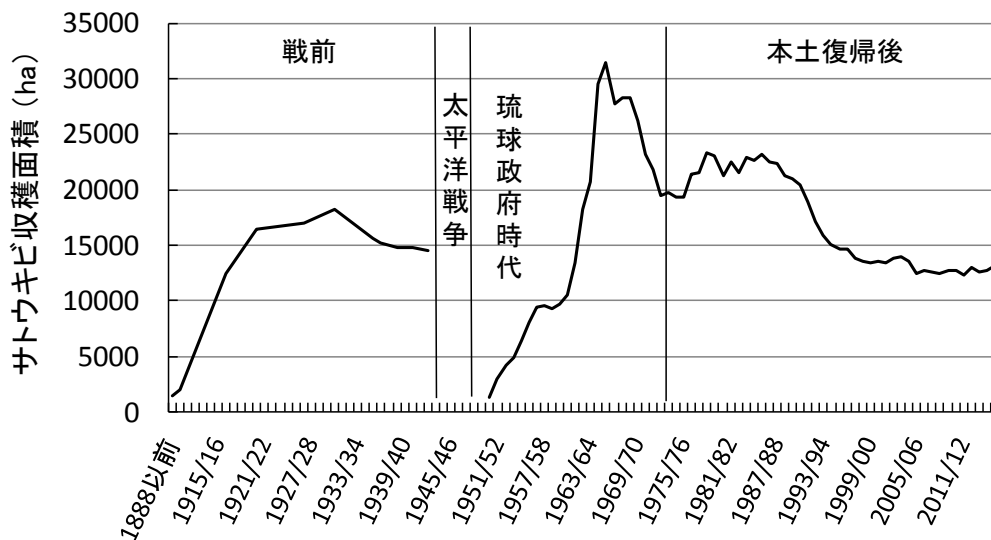


図 I -2 沖縄県におけるサトウキビ収穫面積の推移（2016 年まで）

※収穫面積データは久保田（1962）、宮里（1986）、斉藤（1997）および「沖縄県さとうきびおよび甘しゅ糖生産実績」より参照した。

終戦から5年後においても、サトウキビ収穫面積は約1,500 haと戦前の1/10程度に留まっていたが、糖業の振興により農村の立て直しを図る目的で、当時の琉球政府はアメリカの支援を得て、1950年（昭和25年）から糖業振興5ヶ年計画により、サトウキビ増産に乗り出した（久保田，1962）。その後、1960年代前半には日本政府の甘味資源自給力強化策による大型分蜜糖工場の設立や糖価格の国際的な高騰を背景に、「サトウキビブーム」とよばれるサトウキビ収穫面積の拡大がみられた。1960年代後半から1970年代前半までは国際糖価格の暴落の影響により一時的に縮小したものの、沖縄県の本土復帰以降は拡大に転じた。これは日本政府によるサトウキビ作を沖縄農業政策の柱にした生産者価格の引き上げに誘発されたもので、1985年にはサトウキビ収穫面積は2.3万 haに達した。また、この時期から離島地域におけるサトウキビ作の地位は突出していった（沖縄総合事務局，1998；永田，2012）。ところが、1985年からサトウキビ収益性の悪化を背景に収穫面積は減少していき、12年後の1997年には沖縄県全体で約1.5万 haと35%減少した。一方、離島地域のサトウキビ収穫面積の減少は緩やかで、1985年から1997年のサトウキビ収穫面積の減少率は、沖縄本島北部で57%、沖縄本島中南部で58%であったのに対し、沖縄本島周辺離島では26%、南北大東島で8%、宮古島地域で32%、八重山諸島で32%に留まった（沖縄総合事務局，1998；永田，2012）。1997年以降、沖縄県全体の収穫面積は横ばい傾向が続いているが、沖縄本島では減少傾向、離島ではわずかに増加傾向にある（井上，2006）。2015年のサトウキビ収穫面積は、沖縄県全体で13,212 haであり、このうち沖縄本島分は2,968 ha（全体の22.5%）に対して、離島分は10,244 ha（77.5%）となっている（沖縄県，2016b）。このように、近年の沖縄県におけるサトウキビ作は、離島地域が中心となっている。

3) サトウキビ栽培が地域経済に担う役割

2014年の沖縄県農業産出額は901億円で、そのうち耕種部門は490億円であった（沖縄総合事務局，2016）。サトウキビの生産額は153億円で耕種部門の31%を占める。沖縄県において、サトウキビが基幹作物として栽培されるようになった背景に、沖縄の厳しい自然環境とサトウキビの特性が合致したことが挙げられる。沖縄は温暖湿潤な気候である一方、台風の常襲地であるため農業を営む上で厳しい自然環境でもある。過去30年間（1987～2016年）で日本に接近した台風の年平均個数は11.8個で、そのうち沖縄県に接近した個数は7.6個と64%を占める（気象庁，2017b）。このように、農作物を栽培するためには厳しい環境の中、沖縄県でサトウキビ栽培が定着した理由として、サトウキビは①不良環境、干ばつ、多雨、強風、塩類土壌などの耐性が高いこと、②連作が可能であること、③収穫株の再生による株出し栽培ができるため、新植作業を必要とせず農作業の軽労化が可能なことなどの特性を持つことが挙げられる（永富，1989；岡，1990）。沖縄で栽培されている土地利用型作物はサトウキビ以外に、葉タバコ、パイナップル、カンショが挙げられるが、耕地面積率が高い島ほどサトウキビ作による土地の占有率が高い（井上，2006）。これは、農地を広く利用できる場合は複数の土地利用型作物の中から、サトウキビが選択されていることを示している。このように、サトウキビはその特性のために厳しい自然環境である沖縄であっても広く栽培されている。

また、離島においてサトウキビ栽培が継続している背景として、これらのサトウキビ特性に加え、野菜などのように生鮮品として島外出荷しなくてもよい点が挙げられる（沖縄総合事務局，1998）。野菜や果菜類などの作物を離島から沖縄本島や本州へ出荷する方法として、海上輸送は低コストな手段だが日数が掛かるため市場競争上、不利である。一方、サトウキビは島内の製糖工場へ持ち込まれた後、粗糖に加工され島外に出荷される。加工品としての粗糖は鮮度を問われな

め、海上輸送で大量に運搬可能となる。このように、沖縄の離島地域において、サトウキビは代替困難な土地利用型作物として農業上、大きな役割を果たしている。

また、サトウキビは地域経済に与える影響、すなわち経済波及効果が大きい。小那覇ら（1998）はサトウキビ生産は栽培に直接必要な肥料・農薬・農業機械部門に影響を与えるだけでなく、その生産量が県内製糖業の操業度を決定するため製糖業を経由した影響も生じることから、経済波及効果を生産額の 3.2 倍としている。白川（1998）はサトウキビ作から関連産業へ波及した金額から、経済波及効果を 3.8 倍としている。また、大城（2001）は経済波及効果は 4.3 倍で、県内の産業部門 278 種のうち第一であるとしている。経済波及効果は報告者により若干の差はあるものの、生産額の 3 倍以上であることは共通している。このため、サトウキビ栽培は雇用機会の少ない離島地域において、地域経済を支える重要な作物であると指摘されている（大城，2001）。井上（2006）はサトウキビ栽培は全ての離島で依存度が高いわけでないとしながらも、南北大東島や宮古島のように、他の経済部門が小さく輸送条件が不利な遠距離地域でサトウキビへの依存度が高いことを認めている。

このように、サトウキビはその特性のため自然環境・栽培条件の厳しい沖縄でも広く栽培されるようになり、沖縄農業において重要な作物となった。特に、沖縄の離島地域では代替困難な土地利用型作物として地域経済に果たす役割は大きい。

4) サトウキビ栽培の課題

沖縄県では農業振興を目的に、農業基盤整備と営農に対する支援事業を取り組んできた。農業基盤整備は日本復帰直後の 1972 年に策定された第一次沖縄振興開発計画の一環として、圃場整備、農道整備、畑地かんがい整備が実施された。以降 10 年おきに計画が見直されながら、

現在に至るまで継続的に事業が実施されている（沖縄県，2017）。

他方、営農支援においては、地域に即した生産対策や担い手の育成、生産組織等の育成による収穫面積の拡大と収量の向上を目指す「沖縄県さとうきび増産プロジェクト」が2006年に策定された。2015年に改訂された増産プロジェクトにおける具体的な取り組み目標は、沖縄本島地域では小型ハーベスタ等の機械導入による機械化一貫作業体系の確立と受委託組織の育成である。また、離島地域では農業用水の確保、防風防潮林等の生産基盤整備、優良品種の導入、バガス（原料茎以外の枯死葉、茎など）を活用した土づくり、植え付け機や管理機および収穫機械（ハーベスタ）を用いた収穫機械化一貫体系の導入を目標とした（沖縄県，2016e）。

これらの取り組みにも関わらず、沖縄県の農業において依然としてサトウキビの果たす役割は大きいものの、その生産量は1985年から減少に転じている。また、世界の主要なサトウキビ生産国であるブラジル、インド、中国の単位面積当たりの収量（単収）はそれぞれ70.5、71.6、71.4 Mg ha⁻¹であるが、沖縄県の収量は57.1 Mg ha⁻¹と主要生産国に比べ約20%低い（農畜産業振興機構，2017b；沖縄県，2016c）。

サトウキビ生産性が低迷している理由として、台風や干ばつの常襲地帯であり低肥沃な土壌であること（杉本・寺島，2006）、サトウキビの連作による土壌肥沃度の低減と病害虫の発生（岡，1990）、機械化の遅れ、農業従事者の高齢化と後継者不足（家坂，1989；杉本，1999）、収益性の低下と他産業分野との収入格差拡大（沖縄総合事務局，1998）、生産基盤が脆弱な小規模農家が大半を占めること（井上，2017）、など数多く指摘されている。仲地（2002）は離島地域における課題として土地生産性が低いことを課題として挙げ、基本的な地力の増進対策が必要であると報告している。特に、土壌肥沃度について沖縄県は地力保全基本調査結果から、県内土壌を生産力可能性等級で分級している。生産力可能性等級は、土壌の生産力阻害要因となる項目の要因強度に

よってⅠ～Ⅳ等級まで分かれる。Ⅰ等級は土壌的に農業生産上の制限因子がない良好な土地、Ⅱ等級は若干の制限要因がある土地、Ⅲ等級は大きな制限因子があり、土壌悪化の危険性がかなり大きい土地、Ⅳ等級はかなり大きな制限因子があり、耕地としての利用は困難と認められる土地である。沖縄県の普通畑は面積比で、Ⅰ等級が0%、Ⅱ等級が0.8%、Ⅲ等級が74.4%、Ⅳ等級が24.8%と、Ⅲ、Ⅳ等級の合計が99%を超える劣悪な土壌条件であることが報告されており、土壌改良が必須と言える（沖縄県，1979；儀間，2016）。

これらのことから、沖縄県におけるサトウキビ栽培の課題は生産性の低下であるが、農業基盤整備や営農支援などの生産拡大のための取り組みにもかかわらずサトウキビの生産性は向上していない。サトウキビ生産性の低迷は、特にサトウキビへの依存度が高い離島地域において地域経済にも大きく影響する。特に南大東島、北大東島、伊是名島はサトウキビへの依存度が高く、農家の総販売金額に対するサトウキビの割合が80%を超える農家が総農家数の81～95%を占める（井上，2006）。このように、サトウキビ生産性の向上は沖縄県において重要な課題であり、特に離島地域では経済振興上、喫緊に取り組む必要のある問題である。

5) 北大東島におけるサトウキビ栽培

(1) 北大東島と各離島地域との比較

2015/16年期の沖縄県サトウキビ生産量は75.5万トンで、そのうちサトウキビ栽培の盛んな離島の生産量は宮古島26.9万トン、石垣島7.7万トン、南大東島5.6万トン、久米島2.2万トン、北大東島1.4万トンであった（沖縄県，2016c）。これら5島の合計生産量は43.8万トンで県全体の58%を占める。1農家当たり5ha以上農地を営んでいる大規模経営農家割合は全農家数に対して、南大東島69%、北大東島49%、

石垣島 22%、伊是名島 11%、久米島 6%、宮古島 4%と、南大東島および北大東島が多い（農林水産省，2017）。南大東島と北大東島は大東諸島を構成する島々で、沖縄本島から東に約 360 km に位置している（図 I-1）。南大東島の総面積は 3,053 ha で、そのうち耕地面積は 1,830ha（約 60%）である。北大東島の総面積は 1,310 ha で耕地面積は 542 ha（約 40%）である（沖縄県，2016b）。両島の過去 10 年間（2006/07 年～2015/16 年）のサトウキビ収量を比較すると、南大東島の 48 Mg ha⁻¹ に対し北大東島は 40 Mg ha⁻¹ と 16%低い。

これらのように、北大東島は沖縄県離島地域における主要なサトウキビ産地であり大規模農業が盛んである一方、サトウキビ収量が低いことから生産性の向上が強く求められている。北大東島のサトウキビ収量がなぜ低いのか、その要因を明らかにすることは沖縄県や南西諸島のサトウキビ生産性向上に繋がると考えられる。そのため、本研究ではこの北大東島に焦点をあてる。

（2）北大東島におけるサトウキビ栽培の歴史

大東諸島は明治期に入植されるまで無人島であったが、八丈島出身の玉置半右衛門により開拓された（北大東村，1989）。北大東島は国内で珍しく、化学肥料の原料としてリン鉱石（グアノ）を出荷していた島である。リン鉱石採掘事業は 1911 年から開始され、1918 年から本格的な採掘実施、そして 1950 年まで操業していた。一方、サトウキビの栽培も 1911 年頃から開始され、1912 年には約 50 ha ほど栽培されていた（北大東村，1989）。その後、1935 年（昭和 10 年）までには収穫面積が 300 ha を超え、現在と同程度の規模となっている。1972 年には収穫期における人手を島外から募集することが困難になってきたことを背景に、オーストラリアから収穫機（ハーベスタ）を導入、農作業機械化の第一歩を踏み出した。当時の圃場は礫が多く、機械化に不適であったため、1973～1981 年の間に除礫事業が実施された。さらに、1983

年からは圃場の形を整え、機械作業がしやすくなるよう圃場整備事業および、農道、排水路の整備など、農業基盤整備が本格的に開始された。その結果、2015年における圃場整備率は沖縄県全体では60%であるのに対し、北大東島では89%と高く、2020年には100%となる予定である（沖縄県，2015c）。また、農作業の機械化、特に機械収穫面積率は、沖縄県内の主要なサトウキビ産地である宮古島、石垣島、久米島でそれぞれ68%、79%、46%であるのに対し、北大東島は100%となっている（沖縄県，2016d）。このように、北大東島は積極的に農作業の機械化に取り組み、機械化推進のために圃場整備を含めた基盤整備を継続的に実施しているサトウキビ大規模機械化農業の先進地域である。

（3）北大東島サトウキビ生産の課題

基盤整備や機械化一貫体系の導入が進んでいる一方、北大東島のサトウキビ生産性は低い。過去30年間（1986/87年～2015/16年）の北大東島におけるサトウキビ平均収量は 42.3 Mg ha^{-1} であり、沖縄県の平均収量 62.5 Mg ha^{-1} に比べおよそ30%低く推移している（図I-3、沖縄県，1986-2016）。北大東島の農業産出額（6.4億円）に占めるサトウキビの割合は74%（4.9億円）である（農林水産省，2017）。北大東島は典型的なサトウキビ単作地域で（福仲，1999）、島内に居住する世帯333世帯のうち83戸が農業に従事し、その全てがサトウキビを栽培している（農林水産省，2017）。このように、北大東島の農業におけるサトウキビへの依存度は高い。また、前述したように、サトウキビは経済波及効果が高いため、サトウキビ生産と製糖業が同島経済に占める割合は16.1%に達する。これは、沖縄県内におけるサトウキビ生産の盛んな他離島地域（宮古島5.3%、石垣島2.5%、久米島4.6%）に比べても高い（井上，2006）。このため、サトウキビ栽培に特化している北大東島のサトウキビ生産性の低迷は、同島農業および経済振興を図る上で重要な問題となっている。

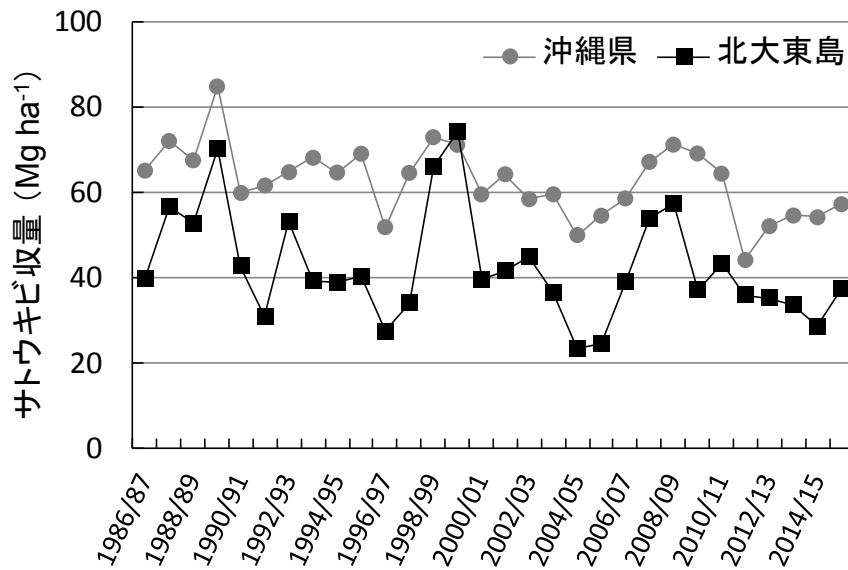


図 I -3 沖縄県および北大東島のサトウキビ収量の推移

2. サトウキビ生産性向上に関する既往の研究や対策

杉本ら（2003）は南西諸島のうちサトウキビ収量が極端に低い地域において圃場の生育状況調査と肥培管理状況の聞き取り調査をおこなった結果、低収要因は強風・干ばつ・低肥沃土壌によるものと指摘した。これまで沖縄県でおこなわれた既往の研究の中で、特に北大東島の低収要因に関わる強風害や干ばつ、低肥沃土壌に対応した研究や対策をサトウキビの品種改良、かんがい、土壌・肥料の分野毎に以下に示す。

1) サトウキビの品種改良

サトウキビの糖（スクロース）は、まず葉身において C4 光合成の結果として合成される（野瀬・川満，1993）。合成されたスクロースは、葉身師部、柔組織を経て、茎中にある貯蔵組織の液胞に蓄積される（Glasziou and Gayler, 1972; 野瀬・川満，1993; 寺内，2002）。サトウキビの糖蓄積は、冬期の低温により茎伸長が緩慢になり、かつ光

合成が継続することで促進される。一方、台風や冬期の季節風による生葉の急激な減少が、サトウキビの糖蓄積を不安定にしていることが判明した（杉本，1999）。このため、風折害を避けるため早期に糖を蓄積し、糖度を安定化させる品種の開発・導入が進められた。また、サトウキビは収穫後、残株の萌芽により次作の収穫茎を栽培する株出し栽培がおこなわれる。株出し栽培は、新規の定植を必要としない低コストな栽培体系であるため、通常、株出しを複数回（2～3回）続けた後に、新たな株に植え替える。一方で株出し栽培の問題は、収穫後、残茎から萌芽する時期が2～3月の低温期と重なり、生育不良になることであった（伊禮ら，2009）。サトウキビの幼芽の伸長は20℃以下で極めて緩慢となる（宮里，1986）。

これらのことから、近年のサトウキビ品種改良における育種目標として、風折抵抗性、早期高糖および株出し収量の安定化が挙げられる。すなわち、台風や季節風による風害軽減や糖度安定、低温期の萌芽性改善による株出し収量の増加でサトウキビ生産性の向上が図られてきた。

品種改良の結果、2007年に大東諸島向け品種「Ni26」が奨励品種に登録された。「Ni26」は旧来の品種である「F161」と比較して早期高糖性および風折抵抗性が向上し、株出し収量が多い品種特性を示した（宮城ら，2009）。さらに、大東諸島向け品種として風折耐性、黒穂病耐性が高く株出し収量に優れた「Ni28」や（内藤，2012）、直立性、耐倒伏性に優れ、より早期に糖度が高まる「Ni29」が開発された（伊禮，2012）。このように、風害や株出し収量向上を目的とした品種改良は一定の成果があったと考えられる。

また、風害を抑制する対策として防風林帯の設置が進められている。北大東島において現在の防風林整備率は71.3%であるが、2020年を目処に100%になる予定である（沖縄県，2015c）。防風林が生育するまでは防風効果は十分でない可能性があるため、それまでは耐倒伏性の品

種を導入するなどの対応が望まれる。

2) かんがい試験および干ばつ対策

沖縄県の年平均降水量はおよそ 2,300 mm であるが、降雨時期の分布に偏りがあり、特に梅雨期と台風時に集中する。沖縄県の月別平均降水量（2007 年から 2016 年平均）は梅雨期の 5 月、6 月、台風襲来期の 8 月でそれぞれ 279、270、319 mm となるが、7 月は 199 mm と少なくなる（図 I-4）。特に、北大東島では 7 月の平均降水量は 88 mm であり沖縄県平均の約 1/2 である（気象庁，2017a）。

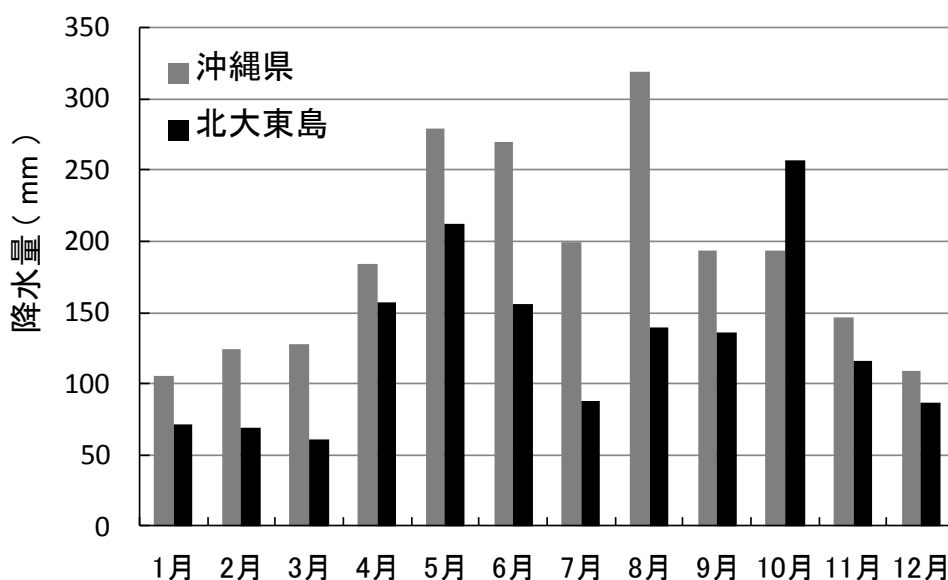


図 I-4 沖縄県および北大東島の月別平均降水量 (mm、2007～2016 年)

サトウキビの生育にとって 7 月から 8 月は草丈の伸長量が最も大きい時期であり、この時期の水不足は収量に強く影響する（山城，1970）。このため、サトウキビの収量を増加させるためには生育盛期の水不足を解消することが重要で、かんがいが必要である。干ばつに対応する研究としてサトウキビ栽培分野では、かんがい試験が大正時代からおこなわれ、当時、灌水回数と収量との関係が研究された（沖縄県，1981）。久貝・荷川取（1965）は、かんがい水を有効に利用するため畦間かん

がいについて検討し、20～60%の増収効果を報告している。山城（1983）はサトウキビのかん水試験の結果から、サトウキビへのかん水量は1回あたり25～40 mmが望ましいことを報告した。

北大東島における干ばつ対策としては、基盤整備事業の中で畑地かんがい整備がおこなわれている。かんがい施設整備率は2015年時点で沖縄県の46.7%に対し、北大東島は38.7%と整備が遅れているものの、2020年には100%となる予定である（沖縄県，2015c）。また、北大東島におけるかん水方法は点滴チューブによる節水型のかんがい方式であり、スプリンクラーによるかん水は見られない。さらに農道は雨水を農業用貯水池に集水する水兼道路が採用され、島全体で水利用効率を向上させる工夫がなされている。これらのことから、北大東島における干ばつ対策は解決に向けての一定の目処が立ちつつあると言える。

3) 土壌・肥料に関する研究

サトウキビ生産性向上のための土壌・肥料分野における主な研究は、肥料三要素試験、有機物施用、リン酸・ケイ酸肥沃度の向上、酸性矯正、心土破砕が挙げられる。

(1) 肥料三要素試験

明治期（1881～1912年）におこなわれたサトウキビ肥料に関する試験は、当時、化学肥料が高価であったことから、収量向上効果に加えて費用対効果についても検討された（沖縄県，1981）。大正期からは施用量や養分収奪量の検討も含まれ、昭和期以降（1932年）には窒素、リン酸、加里の3要素を組み合わせた試験がおこなわれた（宮里，1986）。その結果、当時の基準施肥量は窒素 150 kg ha^{-1} 、リン酸 113 kg ha^{-1} 、加里 75 kg ha^{-1} となった。基準施肥量はその後の三要素試験により変遷し、1960年になると基準施肥量は窒素 150 kg ha^{-1} 、リン酸 75 kg ha^{-1} 、加里 105 kg ha^{-1} とされた（島尻マージ、春植え栽培の場合、沖縄県，

1981)。また、久場（1993）の三要素試験や更なる改訂を受けて、2014年の基準施肥量は窒素、リン酸、加里でそれぞれ 200、60、60 kg ha⁻¹ となった（島尻マージ、春植、沖縄県、2014b）。現在の施肥量は 1960年代と比較して、リン酸と加里が低減されている。これは、サトウキビ畑のリン酸、加里が蓄積していること（國吉・儀間、2004）と、2008年の肥料高騰問題に対応したものである。

（２）有機物施用

沖縄県内土壌の作物生育阻害要因として、土壌中の有機物含量が少ないことが指摘されている（宮丸、2013）。沖縄は高温多雨の気候であるため、有機物の分解が速い（國吉・儀間、2004）。そのため、農耕地土壌の有機物含量は県外土壌と比較して低い。小原（2000）は、全国の定点調査データを取りまとめ、国内普通畑の全炭素含量は平均 3.8%と報告しているが、沖縄県内では概ね 1.1~1.2%である（國吉・儀間、2004）。鹿児島県の南西諸島における有機物連用試験では、堆肥を 7年間施用した結果、50 Mg ha⁻¹以上の施用により全炭素含量と経過年数の間に有意な正の相関が認められ、サトウキビ収量は 10~22%増加することが確認された（後藤・永田、2008）。また、宮丸ら（2012）は、沖縄県内の土壌（ジャーガル）における 10年間の有機物連用試験から、バイオマス炭素・窒素が有機物連用により有意に増加すること、バイオマス炭素・窒素が土壌呼吸活性および可給態窒素の増加に影響していることを報告している。このため、沖縄県内の土壌における地力増進には、有機物施用が不可欠であると考えられる。

（３）リン酸・ケイ酸肥沃度の向上

サトウキビにおいてリンは生育初期の分けつ成長や根茎の発達を促進する（宮里、1986）。沖縄県内の土壌、特に赤黄色土においてリン酸肥沃度が低いことから（宮城ら、1965）、リン酸肥沃度の向上を図る目

的で研究がおこなわれてきた。Abdul *et al.* (1997) は島尻マージ（暗赤色土）におけるリン酸施用試験の結果、可給態リン酸が高いと葉面積指数および乾物生産が高くなり、収量は約 40%多くなったことを報告している。また、ケイ酸はサトウキビが量的に最も吸収する養分であり (Ayres, 1930)、亀谷ら (1989) はサトウキビ圃場調査の結果、葉身ケイ酸含量が多いほど生葉数が多いこと、葉身ケイ酸含量が低いと耐病性が低下することを報告している。このことから、ケイ酸もサトウキビを栽培する上で重要な養分と考えられる。

リン酸及びケイ酸肥沃度を向上させるため、我那覇・大浜 (1975) は酸性土壌において過リン酸石灰およびケイ酸カルシウム（ケイカル）を併用する施用試験をおこなった。その結果、リン酸施用で 20~23%、ケイカルの施用で約 5%の増収が確認された。1978 年にも同様の試験がおこなわれ、増収効果が最も発揮されたのは過リン酸石灰 3.6 Mg ha^{-1} 、ケイカル 15.0 Mg ha^{-1} 施用した区で、無施用区と比較して約 40%増収した (宮城ら, 1979)。

サトウキビ畑土壌のリン酸肥沃度は、1979 年から 20 年間にわたる土壌環境基礎調査において向上したことが確認された (國吉・儀間, 2004)。このため、サトウキビ畑土壌におけるリン酸肥沃度の向上は、一定の進展があったと考えられる。

一方、サトウキビ畑土壌のケイ酸肥沃度については、実態把握が遅れている。ケイ酸に関する研究は、鹿児島県において可給態ケイ酸に対する土壌診断基準の提唱 (古江・永田, 2000)、徳之島での圃場試験 (古江, 2009)、ケイ酸供給能の比較 (井上ら, 2014) でみられるが、沖縄県においては 1970 年代以降ほとんどみられない。背景として、ケイ酸肥沃度を向上させるために必要なケイカルの施用量が 15 Mg ha^{-1} と多量であり現場で普及が進まなかったことが指摘されている (宮丸, 2013)。今後、沖縄県においてケイ酸肥沃度を改善させるためには、資材散布車の開発・導入やケイ酸供給効果の高い新資材 (原田・田中,

2004; 山下ら, 2012) の活用が必要になると考えられる。また、収穫残渣物(梢頭部、枯葉)や製糖残渣物(バガス、フィルターケーキなど)からのケイ酸供給を検討することも重要である。

(4) 酸性矯正

サトウキビ栽培における土壌の好適 pH は 5.5~6.5 とされているが、沖縄県の普通畑において、pH5.5 未満を示すことが多い赤色土、黄色土は耕地面積の 33%を占めている(沖縄県, 1979)。酸性土壌を改良する研究として、砂川・我那覇(1969)は炭酸カルシウム(炭カル)を用いた酸性矯正試験をおこない、土壌の pH を矯正することで、分けつ茎数が多くなること、増収率が 10%内外であること、甘蔗糖度が高くなることを報告した。宮丸ら(2013)は、酸性矯正で一般的に用いられている炭カルは、持続性が 1~1.5 年ほどしかないことを問題視し、代わりに粗砕石灰岩を用いた低コストで持続性の高い酸性矯正技術を開発した。粗砕石灰岩による酸性矯正により、夏植え栽培の収量は対照区と比較して 6~11%、株出し栽培は 6~25%増収し、酸度矯正効果が 2 年半ほど持続したことを確認した。また、2010 年に実施された沖縄県内サトウキビ畑の土壌診断と農家アンケート調査の結果、国頭マージ(赤黄色土)において、生育が良好と答えた農家(n=19)の土壌 pH(H₂O)は 6.7 であり、不良と答えた農家(n=26)の土壌 pH(H₂O) 5.6 より有意に高かった(吉田, 2011)。このことから、酸性矯正はサトウキビの生産性向上のために必要な技術と考えられる。

(5) 心土破砕

沖縄県に分布している土壌は、粘土含量が高く、下層土がち密化しやすい(渡嘉敷, 1993)。そのため、収穫機械の導入による耕盤層の形成がサトウキビ生育に影響することが指摘されている(亀谷, 2006)。土壌のち密度が山中式硬度計値で 20~22 mm 以上となると、植物の根

の伸長が抑制される(中津ら, 2004)。沖縄県内のサトウキビ畑土壌は、他作目の土壌に比べち密度が高く、20 mm を超えている(亀谷, 2006)。耕盤層の破壊は、一般に心土破砕によっておこなう。大城・浜川(1980)はサトウキビ畑において、心土破砕により収量が12%増収したことを報告している。また、心土破砕の効果として土壌浸食の抑制(赤地ら, 1994)や、排水改善効果(新里ら, 2013)が確認されている。

4) 沖縄県のサトウキビ生産性向上のために残された技術的課題

以上、沖縄県におけるサトウキビ生産性の向上、特に風害・干ばつ・低肥沃土壌に対する主な研究や対策例を挙げた。これらの研究は、1881年に沖縄県立農事試験場が設立されて以降、長期にわたっておこなわれてきた成果である。先に挙げたサトウキビの低収要因のうち、風害や気象災害には品種改良や防風林設置で、干ばつ・少雨にはかんがい方法の確立やかんがい施設整備の実施により抜本的な対策がとられている。

また、上記以外のサトウキビ低収要因として、線虫害およびサトウキビわい化病が挙げられる。沖縄県の線虫害に関する検証例は少なく、照屋(1967)がサトウキビ畑に分布する線虫のうち最も実害が大きい種類としてイシユクセンチュウおよびサツマイモネコブ線虫を挙げているが、それ以降の詳細な研究は途絶えていた。しかし、2014年に北大東島のサトウキビ圃場において植物寄生性線虫が広く蔓延しており、サトウキビの生育を抑制している可能性が示唆された(Kawanobe *et al.*, 2014)。以降、植物寄生性線虫への対策として殺線虫剤の効果の検証(Kawanobe *et al.*, 2016)や緑肥などの線虫対抗植物の導入など検討が進んでいる。また、サトウキビわい化病は、桿状バクテリア(*Leifsonia xyli subsp. xyli*)により維管束の導管が閉塞され、水ストレスが引き起こされることで生育不良を生じ収量が減少する病害である(出花ら, 2016)。沖縄県におけるサトウキビわい化病の研究は

1960～70年代におこなわれてきたものの（野原・松村，1965；西沢ら，1968；上運天・脇本，1976）、その後継続的な研究はみられなくなった。しかし、出花ら（2013）は奨励品種においてもサトウキビわい化病に罹患していることを警鐘し、農作業で扱う刃物の消毒による汁液感染防止対策や、種苗管理センターからの健全な種苗活用の必要性を指摘している。これらのように、1960～70年代にサトウキビ生産性への影響が示唆され、近年まで継続的な研究が滞っていた線虫害、サトウキビわい化病については再び新しい知見と対策の検討がみられるようになった。

一方で土壌・肥料の分野においては1970年代後半に、サトウキビ生産性向上に重要とされたケイ酸肥沃度やケイカル施用効果についての試験がおこなわれたが（大城・大城，1978；宮城ら，1979；亀谷ら，1989；大屋・喜名，1989；大屋ら，1989）、それ以降、沖縄県においては研究が途絶している。また、土壌・肥料分野の各研究において、リン酸資材の施用（我那覇・大浜，1975）や酸性矯正（砂川・我那覇，1969；宮丸ら，2013）などサトウキビ増収技術はみられるものの、低肥沃土壌の改善の対策は主に農家が主体となってしまい、肥培管理の徹底や有機物施用のような画一的な土づくり指導の域を出ていない。今後、サトウキビの生産性向上を図るためには、低肥沃度土壌の改善のための抜本的な対策に繋がる生産阻害要因の解明が必要である。

3. 本研究の目的

サトウキビは沖縄県の基幹作物であり、生産に伴う経済波及効果が高いことから、特に県内離島地域においては代替困難な土地利用型作物として栽培されている。沖縄県北大東島はサトウキビへの依存度が高い離島の中でも、特に大規模経営農家が多い地域である。同島は高い基盤整備進捗率や機械化一貫体系の導入により、県内でも有数なサ

トウキビ大規模機械化先進地となった。しかし、サトウキビ生産性は低く、過去 30 年間のサトウキビ収量は沖縄県平均と比較して約 30%低い。そのため、サトウキビ生産性の向上が強く求められている。北大東島のサトウキビ生産性が低い要因として、台風等の強風・干ばつなどの自然災害や低肥沃土壌が指摘されている。これまでに、風折抵抗性や株出し収量性の優れた大東諸島向け新品種の開発により、気象災害への対策がとられてきた。また、かんがい施設整備や点滴かんがい等の水利用効率の向上により、干ばつへの対応がなされている。一方、土壌肥沃度の低さについての対策は、農家による肥培管理の徹底のような土づくり指導の域を出ず、生産阻害要因が明らかでないため抜本的な対策ができないままとなっている。

そこで、本研究は、沖縄県北大東島におけるサトウキビ生産性の向上を目的に、土壌実態調査と対策の検討をおこなった。第Ⅱ章では、北大東島サトウキビ圃場における土壌理化学性および栽培条件の実態調査から、サトウキビ収量・品質（甘蔗糖度）に及ぼす影響を評価し、サトウキビ生産性へ影響する主な土壌要因を検討した。第Ⅲ章では、第Ⅱ章で明らかとなった土壌要因を改善するために、島内で発生する未利用の有機物である糖蜜を圃場へ施用することで、サトウキビ収量・品質への影響を検証し、併せて農家収益性向上の効果も評価した。第Ⅳ章では、北大東島のサトウキビ生産性を向上させるための残された土壌要因であるケイ酸肥沃度について、実態調査およびポット試験により評価した。

II. 北大東島におけるサトウキビ低収要因の解明

1. 目的

北大東島は沖縄本島より東に約 360 km に位置している。緯度と経度は、それぞれ $25^{\circ} 49' 44''$ N, $131^{\circ} 17' 56''$ E であり、過去 10 年間 (2007-2016) の平均気温は 23.3°C 、年間降水量は 1,535 mm である。北大東島はサンゴ礁が隆起して形成された島であり (阿部・福士, 1973; 沖縄県, 1986)、総面積 1,310 ha のうち約 40% (542 ha) を農地が占める (沖縄県, 2016b)。分布している土壌は「大東マーヅ」と呼ばれ、赤黄色で重粘質かつち密な特徴を持つ (阿部・福士, 1973; 渡嘉敷, 1993; 宮丸, 2013)。北大東島の主要な作物はサトウキビであり、同島農業産出額の 74% (4 億 9 千万円) を占め、島内に居住する世帯 378 戸のうち 103 戸が農業に従事している (沖縄県, 2015a; 農林水産省, 2016)。北大東島における過去 30 年間 (1986-2016) のサトウキビ平均収量は 42.3 Mg ha^{-1} であり、沖縄県の平均収量 62.5 Mg ha^{-1} より 30% 低く推移している (沖縄県, 1986-2016)。また、甘蔗糖度 (サトウキビの糖度) も北大東島では 14.9% と沖縄県平均 15.2% に比べ低い。サトウキビは、製糖業等の他産業への経済波及効果が高く (小那覇ら, 1998)、サトウキビ収量と甘蔗糖度の減少は、北大東島の農業と経済にとって重要な課題である。そのため、北大東島の経済振興のためにはサトウキビ生産性の向上が強く求められている。また、1994 年より品質取引制度が導入されて以降、サトウキビの販売価格は収量と甘蔗糖度の両者で決定される。そのため、農家収益を向上させるためには、収量または甘蔗糖度の増加が必要となる。

北大東島において、サトウキビが低収である理由として台風のような気象条件が指摘されている (杉本・寺島, 2006)。しかし、台風の接

近数（1981～2010年の年平均個数）は、北大東島の3.5個に対し、沖縄本島で3.5個、宮古島で3.8個であり、各島間に大きな差はない（沖縄気象台，2014）。また、北大東島のサトウキビ生産組合によると、春植えサトウキビ収量は20～70 Mg ha⁻¹の範囲で著しく変動する。北大東島のように平坦かつ小面積の島において、気象条件のみでこれだけの収量差が現れることは考えにくい。気象条件以外のサトウキビ低収要因としては、肥培管理（菊池ら，2007）と耕盤層の形成（亀谷，2006）が指摘されている。サトウキビ生産性に与える土壌・栽培要因は、土壌pH（宮丸ら，2013）、有機物施用（後藤・永田，2008）、心土破碎（村山ら，1990）、栽培時期（宮城ら，2012）、かん水（山城，1970；久貝・荷川取，1965）、栽植密度（井上・橋口，2011a）が報告されている。北大東島の土壌である大東マージは、赤黄色土と暗赤色土の2種類に分けられ、主に Typic Paleudults と Typic Eutrudepts に属しており（包括的土壌分類第一次試案、小原ら，2011；Soil Survey Staff, 2014）、土壌の種類によって肥沃度は異なる（沖縄県，1979）。北大東島におけるこれら土壌の分布面積は赤黄色土が422 ha、暗赤色土が165 haである（沖縄県，1986）。したがって、サトウキビの生産性は土壌の理化学性および栽培管理の影響を受けている可能性が推測される。しかし、北大東島のサトウキビ生産性と圃場における土壌・栽培要因との関係性を評価した研究はない。サトウキビの低収要因を明らかにすることは、サトウキビ生産性を向上させる上で不可欠である。

そこで本章では、北大東島の低収要因を解明することを目的に、同島サトウキビ春植え圃場50地点について、土壌理化学性、栽培条件、サトウキビ収量および甘蔗糖度を評価し、サトウキビ収量および甘蔗糖度に影響を及ぼす要因を解析した。

2. 材料および方法

沖縄県北大東島サトウキビ圃場 50 筆について、土壤理化学性および栽培管理について実態調査をおこなった。調査圃場は北大東島全域を網羅するよう、2013 年春にサトウキビが植えられた圃場より選定した。調査圃場の土壤は、赤黄色土が 39 圃場(78%)、暗赤色土が 11 圃場(22%)で、圃場面積は平均 1.1 ha (最大 2.4 ha、最小 0.5 ha) であった。

1) 土壤理化学性

土壤調査およびサンプリングは、2013 年 9 月 23 日から 26 日にかけておこなった。作土深は、1 圃場あたり 5 箇所について貫入式硬度計 (DIK-5531, 大起理化) によって測定した土壤硬度から求めた。貫入式硬度計の挿入箇所は、サトウキビの株元から 10~20 cm ほど離れた箇所とした。中津ら (2004) は、土壤硬度が 1.5 MPa より高い層を、耕盤層と報告している。根の伸長は耕盤層で抑制される(丹羽ら, 1999)。そのため、本研究では、土壤表層から土壤硬度が 1.5 MPa に達する層までを作土深とした。

土壤は、1 圃場あたり 10 箇所について、表層 (1~15 cm) から採取した。10 箇所から採取した土壤は 1 つにまとめ混和し、風乾後、2 mm 目の篩を通した。土壤 pH (H₂O) は、1:2.5 (土壤:蒸留水比) の土壤懸濁液を pH メーター (FEP20, METTLER TOLED) にて測定した。EC は、1:5 の土壤懸濁液を EC メーター (D-54, HORIBA) にて測定した。CEC、交換性塩基類 (Ca、Mg、K)、可給態ケイ酸および腐植は比色計 (ZA-II, 富士平) にて測定した。可給態リン酸と腐植の測定方法は、それぞれトルオーグ法および熊田法とした(土壤環境分析法編集委員会, 2003)。可給態窒素は培養法を用いた (Bundy and Meisinger, 1994)。すなわち、100 ml 容量の UM サンプル瓶に土壤 20g を入れ、最大容水量の 60% に相当する蒸留水を静かに添加し、これを 30℃ で 4 週間培養した。培

養前後に土壌の無機態窒素を 2 M KCl 溶液で抽出し、Auto Analyzer (SYNCA, BLTEC) で測定した。可給態窒素は、培養前後の無機態窒素の差から求めた。

2) サトウキビ収量と甘蔗糖度

サトウキビ収量と甘蔗糖度のデータは北大東製糖(株)より提供を受けた。各圃場でハーベスタにより収穫されたサトウキビは、製糖工場へ運ばれ、重量を計測される。甘蔗糖度は、スクロース含量で示される(日本作物学会九州支部, 2013)。本研究では、甘蔗糖度は氏原ら(2001)の方法に準じた。すなわち、シュレッダーによって粉碎されたサトウキビ試料 100g 程度を、専用の分析用容器に充填し、近赤外分析計 (InfraXact, Foss) にて 1438 nm の波長で測定した。

3) 栽培管理

植え付け時期、施肥管理および心土破碎などの栽培管理については、2013 年 12 月から 2014 年 2 月にかけて農家に対するアンケート調査をおこなった。

4) 統計解析

2 つの項目間の相関は、ピアソンの相関係数と単回帰分析で解析した。複数項目間の多重比較検定には、Tukey-Kramer 法を用いた。これらの統計解析には、Microsoft Excel のアドインソフトウェア「Statcel、(3rd ed., OMS)」を使用した。多変量解析は、分類回帰木 (Classification and regression trees: 以下、CART) を用いた。CART は、目的変数の値の変化を 1 つまたは複数の説明変数により説明する解析手法である。目的変数が連続変数(数値)の場合は、重回帰分析と同様の機能を持ち、カテゴリー(区分)の場合は、判別分析と同様の解析ができる(加藤ら, 2003; 包・對馬, 2009)。CART の解析結果は、

枝状に 2 進分岐していき、上位の分岐ほど目的変数に対して強く影響する。CART は、フリーの統計ソフト「R」を使用した。

3. 結果

サトウキビ圃場の作土深は 10~35 cm を示し、平均作土深は 22.1 cm で沖縄県の土壌診断基準値 (40 cm) を下回っていた (沖縄県, 1979)。土壌 pH (H₂O) は、3.9 から 8.0 まで著しく変化し、平均は 5.4 であった。可給態窒素は、7.6~25.3 mg kg⁻¹ で、平均 13.6 mg kg⁻¹ を示した。平均窒素施用量は 228 kg ha⁻¹ であり、沖縄県の標準施用量 (200 kg ha⁻¹、沖縄県, 2006) と同等であった。堆肥施用量は平均 2.9 Mg ha⁻¹ であり、沖縄県の標準施用量 (30 Mg ha⁻¹) の 10 分の 1 程度となった。また、堆肥が施用された圃場は調査圃場全体の 16% に留まった。サトウキビの植え付け月は 3 月 (調査圃場全体の 54%) が最も多く、2 月 (34%)、4 月 (10%)、5 月 (2%) と続いた (表 II-1)。

表 II-1 土壌理化学性と栽培条件およびサトウキビ収量・甘蔗糖度との相関

	作土深 (cm)	pH (H ₂ O)	EC (mS m ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	交換性塩基類 (cmol _c kg ⁻¹)			可給態 リン酸 (mg kg ⁻¹)	腐植 (g kg ⁻¹)	可給態 窒素 (mg kg ⁻¹)	窒素 施用量 (kg ha ⁻¹)	堆肥 施用量 (Mg ha ⁻¹)	植え付け 月
					Ca	Mg	K						
平均	22.1	5.4	15.7	13.7	5.5	3.8	0.8	385	15.0	13.6	228	2.9	3月
最大	35.0	8.0	69.4	19.1	17.3	10.5	1.9	2060	30.6	25.3	396	34.0	-
最小	10.0	3.9	9.0	10.9	0.8	0.8	0.4	81	10.3	7.6	73	0.0	-
収量	0.32*	-0.09	0.36*	0.17	0.00	0.07	-0.07	0.42*	0.36*	0.58**	0.28	0.00	-0.35*
甘蔗糖度	-0.12	0.37*	0.06	0.08	0.33	0.41*	-0.02	0.11	0.02	0.07	-0.15	0.11	-0.09

*, **はそれぞれ、5%、1%で有意であることを示す。

サトウキビ収量は 38.1 ± 15.0 Mg ha⁻¹ (最小 13.2 Mg ha⁻¹、最大 70.1 Mg ha⁻¹) で、甘蔗糖度は 16.1 ± 0.8% (最小 14.5%、最大 18.1%) であった。サトウキビ収量と有意な正の相関があった項目は、可給態窒素

($r=0.58$ 、 $p<0.01$ 、表 II -1、図 II -1)、可給態リン酸 ($r=0.42$ 、 $p<0.05$)、腐植 ($r=0.36$ 、 $p<0.05$)、EC ($r=0.36$ 、 $p<0.05$) および作土深 ($r=0.32$ 、 $p<0.05$) となった。また、有意な負の相関があった項目は、植え付け月 ($r=-0.35$ 、 $p<0.05$) であった。甘蔗糖度と有意な正の相関があった項目は、交換性マグネシウム ($r=0.41$ 、 $p<0.05$) と土壌 pH(H₂O) ($r=0.37$ 、 $p<0.05$) となった (表 II -1)。可給態窒素は腐植と有意な正の相関があった ($r=0.39$ 、 $p<0.01$)。

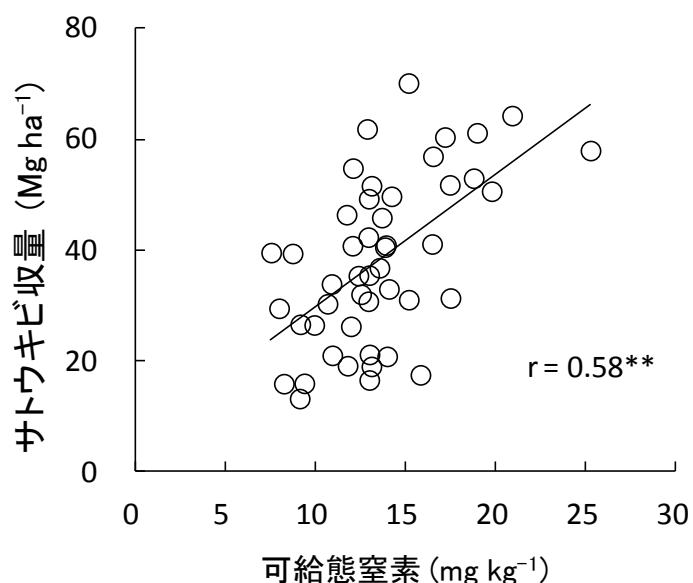


図 II -1 サトウキビ収量と可給態窒素の関係

(**： 1.0%水準で有意であることを示す)

サトウキビ収量を目的変数とし、サトウキビ収量と有意な相関があった項目、すなわち可給態窒素、可給態リン酸、腐植、EC、植え付け月および作土深を説明変数として CART で解析したところ、まず可給態窒素 (16.5 mg kg^{-1}) で分岐し、次いで作土深 (29 cm) で分かれた (図 II -2)。可給態窒素が 16.5 mg kg^{-1} 以上の圃場の平均収量は 54.2 Mg ha^{-1} であるが、可給態窒素が 16.5 mg kg^{-1} 未満かつ作土深が 29 cm 未満の圃場の平均収量は 32.2 Mg ha^{-1} であった。可給態窒素が 16.5 mg kg^{-1} 以上の圃場における平均作土深は 24.6 cm を示した。

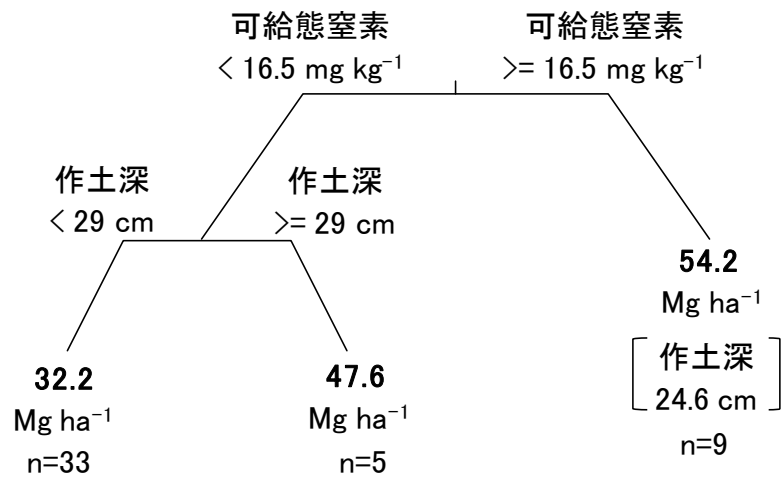


図 II -2 サトウキビ収量に影響する土壌要因の CART 解析結果

サトウキビの根の 60~70%は表層から 20 cm 以下の層に分布している (山城, 1968)。作土深が 20 cm 未満の圃場では、サトウキビ収量と作土深の間に有意な相関はなかった。しかし、作土深が 20 cm 以上の圃場では、サトウキビ収量と作土深の間に有意な正の相関があった (図 II -3、 $r=0.53$ 、 $p<0.01$)。

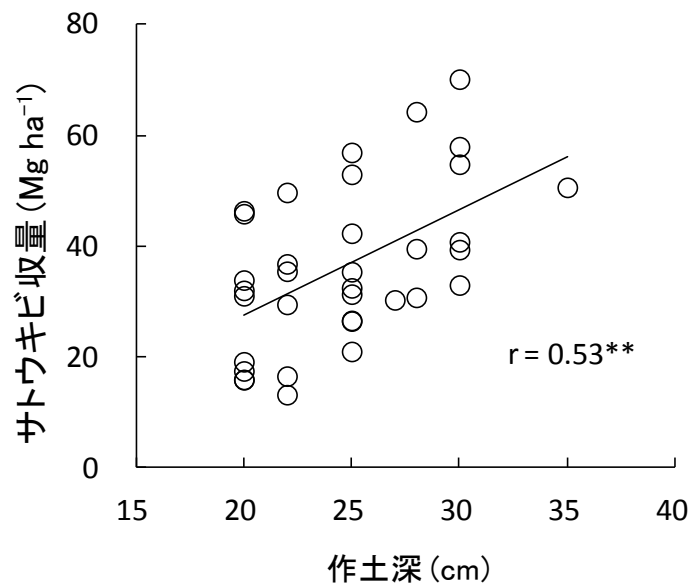


図 II -3 サトウキビ収量と作土深の関係

(作土深 20 cm 以上、**： 1.0%水準で有意であることを示す)

心土破碎を実施していない圃場の平均作土深は、17.8 cm を示した。対照的に、植え付け前に 1 回心土破碎をしている圃場の平均作土深は 21.8 cm であり、心土破碎を 2 回（植え付け前と栽培期間中）おこなっている圃場では 25.3 cm であった。心土破碎を実施していない圃場と、2 回実施している圃場では、作土深は有意な差があった（図 II -4、 $p < 0.05$ ）。サトウキビ収量は、心土破碎なしで 35.1 Mg ha^{-1} に対して、心土破碎 1 回で 37.8 Mg ha^{-1} 、心土破碎 2 回で 40.1 Mg ha^{-1} と有意ではないが、増加する傾向がみられた。

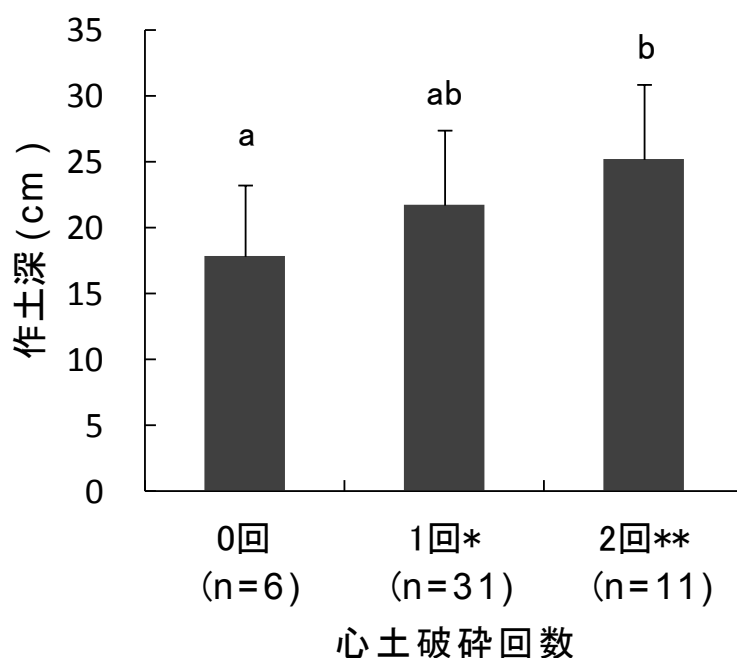


図 II -4 心土破碎の回数と作土深

*植え付け前に心土破碎を 1 回実施

**植え付け前と栽培期間中にそれぞれ 1 回（合計 2 回）実施
エラーバーは標準偏差、異英字間で有意差があることを示す ($p < 0.05$)

甘蔗糖度を目的変数とし、甘蔗糖度と有意な相関があった交換性マグネシウムと土壌 pH (H_2O) を説明変数として CART で解析したところ、まず交換性マグネシウム ($3.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) で分岐し、次いで土壌 pH

(H₂O) (7.2) で分かれることが示された (図 II -5)。交換性マグネシウムが 3.8 cmol_c kg⁻¹ 以上かつ土壌 pH (H₂O) が 7.2 未満の圃場の甘蔗糖度は 16.7%であるが、交換性マグネシウムが 3.8 cmol_c kg⁻¹ 未満の圃場の甘蔗糖度は 15.8%であった。交換性マグネシウムが 3.8 cmol_c kg⁻¹ 未満の土壌の pH (H₂O) は 4.7 を示した。

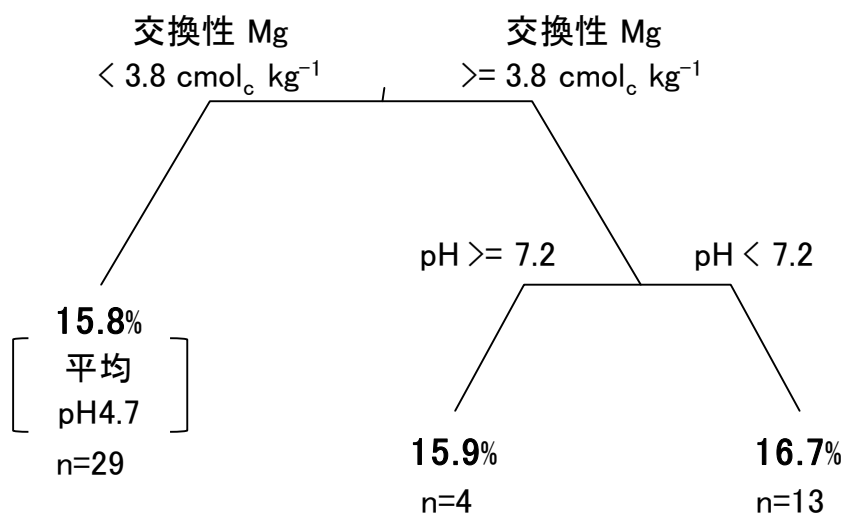


図 II -5 甘蔗糖度に影響する土壌要因の CART 解析結果

4. 考察

1) サトウキビ収量に及ぼす影響

サトウキビ収量は、可給態窒素 ($r=0.58$)、可給態リン酸 ($r=0.42$)、腐植 ($r=0.36$)、EC ($r=0.36$) および作土深 ($r=0.36$) と有意な正の相関があった (表 II -1)。また、植え付け月とは有意な負の相関が認められた ($r=-0.35$)。一方、これら有意な相関をもつ項目を説明変数として CART 解析した結果、サトウキビ収量は可給態窒素と作土深に強く影響されることが判明した (図 II -2)。その他の要因は、サトウキビ収量への寄与が小さいため、CART の結果から棄却された。そこで、本研究では、主に可給態窒素と作土深について検討をおこなった。

(1) 可給態窒素

Yanai *et al.* (2010) は、窒素がサトウキビ生産性において重要な養分であると指摘した。また、サトウキビ葉中の窒素含量は土壌中無機態窒素の増加に伴い向上し (川満ら, 1999)、葉の窒素含量はサトウキビ収量と相関がある (Meyer and Wood, 1994; Alison and Pammenter, 2002)。

一般に、サトウキビ春植え栽培における最終施肥は 6 月である (沖縄県, 2014b)。一方、サトウキビの生育盛期は 8 月から 10 月であり、これは、最終施肥と生育盛期の時期が約 3 ヶ月異なっていることを示している。宮沢ら (1981) は、最終施肥の効果がサトウキビの生育盛期まで持続しないことから、可給態窒素がサトウキビ生産性において重要であることを指摘している。本研究においても、可給態窒素はサトウキビ生産性に重要であることを支持している。北大東島の可給態窒素は平均 13.6 mg kg^{-1} であり、これは地力増進基本指針で定められている普通畑における改善目標 50 mg kg^{-1} や (農林水産省, 2008)、国内平均値 $53\sim 59 \text{ mg kg}^{-1}$ (小原, 2000) を大きく下回っていた。このことから、北大東島の可給態窒素は著しく低いと結論された。

土壌の可給態窒素は、有機物施用により増加する (片峯ら, 2000; 青山ら, 2002; 高間・廣澤, 2008; 宮丸ら, 2012)。杉田ら (2007) は、腐植と可給態窒素に有意な正の相関があることを報告し、Meyer *et al.* (1983) は、土壌有機物量と無機化窒素量に正の相関があることを示している。本研究でも、腐植と可給態窒素の間に有意な正の相関があることが明らかとなった。一方、可給態窒素と窒素施用量の間に相関はなく、堆肥施用量との関係は明らかにならなかった。これは、堆肥を施用した圃場が少なかったため (8 圃場) と考えられた。北大東島における腐植の平均値は 15 g kg^{-1} (表 II-1) であり、普通畑の改善目標値 (30 g kg^{-1} 、赤黄色土、農林水産省, 2008) より低い値を示した。土壌の腐植が低い原因として、北大東島の堆肥生産量が少なく、施用

できる有機物量が不足しているためと考えられる。北大東村役場によると、北大東島における堆肥の年間生産量はおよそ 1,000 Mg であった。北大東島は、典型的なサトウキビのモノカルチャー地域である（福仲ら, 1999）。Holt and Mayer (1998) は、サトウキビが長期間栽培された土壌では、サトウキビ栽培履歴がない土壌に比べ微生物バイオマス量は有意に低かったことを報告している。可給態窒素は土壌微生物バイオマスの炭素と窒素に正の相関がある（Sakamoto and Oba, 1993; 関ら, 1996; 宮丸ら, 2012）。したがって、サトウキビの長期連作は土壌微生物バイオマス量に悪影響を及ぼし、結果として、北大東島の可給態窒素が低減する恐れがある。北大東島のサトウキビ生産性を向上させるためには、有機物施用による可給態窒素の富化が重要である。施用できる有機物量が少ない北大東島では製糖副産物である糖蜜などのような未利用有機物か、堆肥と同等の効果が期待できる緑肥が（宮丸ら, 2012）窒素供給のための改善対策になる。

（２）作土深

今回の研究において、サトウキビ収量に影響するもう一つの重要な要因は作土深であり（図Ⅱ-2）、サトウキビ収量との間に有意な正の相関があった（ $r=0.32$ 、 $p<0.05$ 、表Ⅱ-1）。一方、相関係数は作土深が 20 cm 以上の圃場のみの場合の方が高かった（ $r=0.54$ 、 $p<0.01$ 、図Ⅱ-3）。サトウキビは深根性の作物であり、その根は表層から地下 1 m まで伸長する（山城, 1968; 福澤ら, 2009）。また、根の 60~70%は 20 cm 以下の深さに分布している（山城, 1968）。北大東島のサトウキビ生産性を向上させるためには、作土深を深くすることが効果的と考えられる。しかし、本研究では平均作土深は 22.1 cm であり（表Ⅱ-1）、沖縄県のサトウキビ栽培で推奨されている基準値（40 cm）より浅い（沖縄県, 1979）。沖縄県に分布している土壌は粘土含量が高く、硬化しやすい特性がある（浜崎, 1979; 沖縄県, 1979; 登川・寺沢, 1982; 翁長・吉

永, 1988; 渡嘉敷, 1993)。サトウキビ圃場の土壌は、収穫時に使用するハーベスタによりち密化していることが指摘されている（上野ら, 2008; Péreza *et al.*, 2010; 新里ら, 2013)。北大東島では、全ての圃場で収穫時にハーベスタを使用している。そのため、北大東島の土壌物理性を改善するためには、頻繁に心土破碎を実施することが必要である。サトウキビ圃場の土壌硬度を和らげるために、深耕と心土破碎の有効性が報告されている（翁長・亘保, 1984)。本研究では、心土破碎を2回おこなった圃場の作土深は25.3 cmであり、心土破碎をおこなわなかった圃場の作土深（17.8 cm）より深かった（図Ⅱ-4)。複数回の心土破碎で作土深が深くなった理由として、1回のみ的心土破碎では、耕盤層を破壊できなかったことが挙げられる。これは、複数回の心土破碎の実施が、作土深を深くする効果的な方法であることを示唆している。一方、複数回、心土破碎を実施した圃場の作土深は、15～35 cmの範囲で変動していたことも判明した。作土深が変動している理由としては、心土破碎の効果が、トラクタの速度や、元の土壌硬度によって影響を受けることや、土壌特性の不均一性に起因する可能性がある。したがって、作土深をより深くするために、効果的な心土破碎法を確立する必要がある。

2) 甘蔗糖度に及ぼす影響

(1) 交換性マグネシウム

サトウキビの収量および甘蔗糖度はサトウキビ生産性を評価するための重要な要素である。甘蔗糖度は交換性マグネシウムと有意な相関があったが（ $r=0.41$ 、表Ⅱ-1)、サトウキビ収量とは相関はなかった。CARTの結果、甘蔗糖度に交換性マグネシウムが影響していることが示された（図Ⅱ-5)。川満ら（2000）は、マグネシウムの吸収が抑制されることで、サトウキビの光合成能が低下することを指摘している。原

田ら（1981）は、マグネシウム欠乏がクロロフィル含量および光合成速度を低下させることを報告している。これら既報の研究と、今回の研究では、交換性マグネシウムが甘蔗糖度の増加に関連している可能性を示唆しているが、さらなる調査が必要である。

（2） 土壌 pH (H₂O)

甘蔗糖度は土壌 pH (H₂O) とも有意な相関があり (r=0.37、表 II-1)、土壌 pH (H₂O) が低いと甘蔗糖度も減少することが示唆された。一方、CART の結果、交換性マグネシウムが 3.8 cmol_c kg⁻¹ 以上の圃場において、pH が 7.2 以上の場合、甘蔗糖度は低下する傾向が示された (図 II-5)。一般に、土壌中の鉄やその他の微量元素 (銅、亜鉛、マンガン、ホウ素など) は、土壌 pH 7 以上で不溶化する (樋口, 2003; 松中, 2003)。サトウキビの生育に適した土壌 pH (H₂O) は、5.5~6.5 である (沖縄県, 1979)。土壌 pH (H₂O) が 7 以上の圃場において、サトウキビによる微量元素吸収の抑制により、甘蔗糖度が低下する可能性に注意する必要がある。また、土壌 pH (H₂O) が甘蔗糖度に及ぼす影響について、より詳しい検討をする必要がある。

3) 結論

本研究の結果、北大東島のサトウキビ収量に影響を与える主な要因は、可給態窒素および作土深であり、甘蔗糖度に影響を与える主な要因は、交換性マグネシウムおよび土壌 pH (H₂O) であることが明らかとなった。窒素肥沃度の改善には有機物施用が有効であるため、北大東島では、堆肥化されたバガス (製糖残渣物) や糖蜜を有機物源として活用できる可能性がある。サトウキビ収量の増加のためには、窒素肥沃度の向上に加えて、圃場の作土深を深くすることも重要である。また、甘蔗糖度を改善するためには、交換性マグネシウムおよび土壌 pH (H₂O) を最適化することが必要である。一方、サトウキビ収量と可給

態窒素の相関係数は $r=0.58$ (表 II-1) であり、サトウキビ収量の増加は可給態窒素のみでは完全に説明できず、収量に関係する他の要因が存在する可能性がある。サトウキビ生産性は、本研究で検証した土壤理化学性だけでなく、他の要因によっても影響を受けていると考えられる。既報の研究では、Kawanobe *et al.* (2014) は、北大東島のサトウキビ圃場には、比較的高密度で植物寄生性線虫 (PPN) が蔓延しており、この PPN がサトウキビの生育を抑制している可能性を示唆している。また、水稻と同じイネ科であるサトウキビは、無機養分のうちケイ酸を最も多量に吸収する (Ayres, 1930)。ケイ酸はサトウキビ生産性を向上させることが知られているが (Ross *et al.*, 1974; Anderson, 1991; Meyer and Keeping, 2000)、北大東島においてケイ酸肥沃度の実態やサトウキビ生産性に及ぼす影響については明らかでない。したがって、今後、サトウキビ生産性に影響する要因として、PPN やケイ酸肥沃度などの要因についても評価する必要がある。

5. 要約

沖縄県北大東島の主要な作物はサトウキビである。過去 30 年間 (1986/87 年期～2015/16 年期) の北大東島のサトウキビ平均収量は、 42.3 Mg ha^{-1} であり、沖縄県の平均収量 62.5 Mg ha^{-1} より約 30%低い状態が続いている。北大東島のサトウキビ生産性が低い原因のうち、土壤や栽培条件の影響は十分に検証されていない。そこで、本章では、北大東島サトウキビ春植え圃場 50 筆について、土壤理化学性、栽培条件、サトウキビ収量および甘蔗糖度を評価し、サトウキビ収量および甘蔗糖度に影響を及ぼす要因を明らかにする目的でおこなった。分類回帰木解析 (CART) の結果、サトウキビ収量の低い圃場は、可給態窒素が低く (16.5 mg kg^{-1} 未満)、かつ作土深が浅い (29 cm 未満) であることが示された。可給態窒素は、腐植と有意な正の相関があった。

作土深は、植え付け前と栽培期間中の 2 回心土破碎を実施した圃場では、1 回のみ心土破碎、心土破碎なしの圃場に比べ、有意に深くなった。甘蔗糖度の高い圃場は、交換性マグネシウムが $3.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 以上、かつ土壌 pH (H_2O) が 7.2 未満であった。これらのことから、北大東島のサトウキビ生産性を向上させるために、土壌管理は、可給態窒素、作土深、交換性マグネシウムおよび土壌 pH (H_2O) に焦点を当てるべきであると結論づけた。

Ⅲ．糖蜜施用がサトウキビの生育・収量及び土壌化学性に及ぼす影響

1．目的

沖縄県北大東島の基幹作物はサトウキビであるが、他地域と比較して低収状態が続いている。サトウキビの生産阻害要因として、干ばつや台風などの気象要因に加えて土壌肥沃度の低さが指摘されている（亀谷，2006；杉本・寺島，2006）。Ⅱ章では北大東島の実態調査から、同島のサトウキビ収量には、可給態窒素と作土深が特に影響していることを示した（Yoshida *et al.*，2016）。本章では、サトウキビ収量に対して、より影響が強かった可給態窒素に焦点を当てる。

一般に、可給態窒素を富化させるには堆肥や緑肥等の有機物施用が効果的とされている（片峯ら，2000；青山ら，2002；高間・廣澤，2008；宮丸ら，2012）。しかし、北大東島は畜産業がないため、堆肥生産量が少ない。また、島外から堆肥を輸送することはコストがかかりすぎるため、北大東島における一般的なサトウキビ栽培では堆肥を施用することは稀である。一方、緑肥の利用についても、サトウキビの作付け体系により限られた面積に制限される。サトウキビの作付け体系は、植え付け時期の違いにより大きく 3 つに分けられる。すなわち、春植え（2～3 月頃に植え付け、翌年 2～3 月頃に収穫）、夏植え（8 月～9 月頃に植え付け、翌々年 2～3 月頃に収穫）、株出し（前作収穫後に残った株をそのまま栽培し、翌年 2～3 月頃に収穫）である（沖縄県，2014b）。これらの作付け体系の中で、緑肥を栽培し、鋤込むことが可能な体系は、収穫から次の植え付けまで 6 か月ほど休閑期間のある夏植え栽培のみである。北大東島における主な作付け体系は、春植え後、株出しを 3～4 作栽培した後に更新する春植え一株出し体系であり、夏植えは北大東島におけるサトウキビ収穫面積の 6.2%に過ぎない（沖縄県，

2016c)。従って、北大東島においては緑肥栽培が可能な圃場は少ない。

このように、施用できる有機物が限られている問題を解決する手段として、製糖工場の製糖過程で発生する甘しや糖蜜 (Cane molasses、以下、糖蜜) に着目した。糖蜜は、サトウキビの搾汁から粗糖を製糖、または原糖を精製する際に発生する、茶褐色の液状有機物である (笹田, 2000)。日本では 2006 年 3 月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が策定されて以降、資源循環の観点から未利用資源の利用が進められている。その中で、糖蜜はエタノール生産の原料として位置付けられているが、農地への直接的な利用については言及されていない。沖縄県内で発生する糖蜜は、工業用アルコールや家畜飼料の原料として利用されることが多い (沖縄県, 2016a)。北大東島で発生する糖蜜は年平均 700 Mg でその全てが島外に出荷されている。一方、南アフリカでは糖蜜の施用によりサトウキビが増収した事例や肥料としての利用例が報告されており (Cleasby, 1959; Wynne and Meyer, 2002)、Wynne and Meyer (2002) は糖蜜施用の利点として、土壌有機物の富化や微生物活動の活発化を挙げている。世界的なサトウキビ生産地であるブラジルでは、糖蜜からエタノールを製造・蒸留した後の蒸留廃液を畑地へ還元するなどして資源循環を図っており (Bruna *et al.*, 2015; Claudia *et al.*, 2016)、蒸留廃液の継続的な施用によって、土壌中の窒素とカリウムが増加することや (Renato *et al.*, 2013)、サトウキビ収量が 12~13% 増加することが報告されている (Alexander *et al.*, 2006)。

北大東島のサトウキビ生産性向上と地域の有機物資源を有効活用する観点から、糖蜜を圃場へ施用することが望ましいが、現在、その利活用は進んでいない。北大東島において糖蜜が農業利用されていない背景として、糖蜜施用によるサトウキビ収量・品質への影響について検証した事例がなく、糖蜜を利用するための知見が乏しいことが挙げられる。そこで、糖蜜施用によるサトウキビ収量・品質および土壌化学性、特に可給態窒素への影響を評価し、糖蜜の施用効果を検証する

目的で圃場試験を実施した。

2. 材料および方法

1) サトウキビ糖蜜施用試験

(1) 試験区および栽培概要

沖縄県北大東島のサトウキビ圃場において糖蜜施用試験を実施した。当該圃場は15年前に圃場整備を実施しており、長方形(140 m×100 m, 1.4 ha)の形状をした現地農家圃場である。これまでサトウキビ以外の栽培履歴はない。土壌は大東マーヅ(赤黄色土, Typic Paleudults)である(包括的土壌分類第一次試案, 小原ら, 2011; Soil Survey Staff, 2014)。試験区は圃場の南東部分に設置した。

サトウキビは春植え栽培し、続けて収穫後の萌芽茎を栽培する株出し栽培を1作おこなった。試験区は対照区(糖蜜施用なし)、20Mg区(糖蜜 20 Mg ha⁻¹施用)、50Mg区(糖蜜 50 Mg ha⁻¹施用)の3処理、1区4畝×7 m(畝幅 1.5 m)の42 m²とし、各区4反復設けた。

2014年2月4日、20Mg区と50Mg区に糖蜜を散布した。散布方法は、糖蜜が試験区内で均一に散布されるように、20Mg区は糖蜜を10L容量のバケツを用いて30 cm間隔で4.2 kgずつ、すじ撒きした(計84 kg plot⁻¹)。50Mg区は糖蜜を30 cm間隔で10.5 kgずつ、すじ撒きした(計210 kg plot⁻¹)。散布翌日、すべての試験区をロータリで深さ20 cm程度まで耕うんした。本試験で施用した糖蜜の化学性(現物中)は、水分 296 g kg⁻¹、C 227 g kg⁻¹、N 13.5 g kg⁻¹でC/N比は16.8であった(表Ⅲ-1)。また、pHは6.3を示し、P₂O₅ 2.3 g kg⁻¹、CaO 11.0 g kg⁻¹、MgO 10.9 g kg⁻¹、K₂O 83.3 g kg⁻¹であり、K₂Oは特に多く含まれていた。これらの成分量は、既往の報告値と比較してほぼ同程度であった(Cleasby, 1959; 宮里, 1986)。

表 III-1 糖蜜の化学性（現物中）

pH	C/N比	水分	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
		(g kg ⁻¹)						
6.3	16.8	296	227	13.5	2.3	83.3	11.0	10.9

糖蜜施用によってもたらされる養分量は、20Mg 区で窒素 270 kg ha⁻¹、リン酸 (P₂O₅) 46 kg ha⁻¹、カリ (K₂O) 1,666 kg ha⁻¹ となり、50Mg 区は窒素 675 kg ha⁻¹、リン酸 115 kg ha⁻¹、カリ 4,165 kg ha⁻¹ であった (表 III-2)。

表 III-2 試験区概要

作型 (栽培期間)	処理区	糖蜜 施用量 (Mg ha ⁻¹)	糖蜜由来成分量 ^{※1}			基肥施用量			追肥施用量 ^{※2}		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
			(kg ha ⁻¹)			(kg ha ⁻¹)			(kg ha ⁻¹)		
春植え (2014.2~ 2015.2)	対照区	0	0	0	0	96	36	36	192	72	72
	20 Mg区	20	270	46	1666	0	0	0	192	72	72
	50 Mg区	50	675	115	4165	0	0	0	192	72	72
株出し (2015.2~ 2016.2)	対照区	0	0	0	0	65	36	50	192	72	72
	20 Mg区	0	0	0	0	65	36	50	192	72	72
	50 Mg区	0	0	0	0	65	36	50	192	72	72

※1 糖蜜由来成分量は全量を示す。

※2 追肥施用量は、2回分の合計量を示す。

2014年2月21日、対照区のみ化学肥料を地域慣行に準じて、窒素 96 kg ha⁻¹、リン酸 36 kg ha⁻¹、カリ 36 kg ha⁻¹を苗の植え付けと同時に植溝に施用し、覆土した。20Mg 区および 50Mg 区には化学肥料は施用しなかった。2月27日、サトウキビ(品種:F161)を植え付け、春植え栽培を開始した。4月27日と6月25日の2回、雑草防除と倒伏防止を兼ねて土寄せをおこなった。その際に、全ての試験区に対して、追肥として化学肥料でそれぞれ窒素 96 kg ha⁻¹、リン酸 36 kg ha⁻¹、カリ 36 kg ha⁻¹を株元の土壌表層へすじ撒きし、覆土した。2015年2月に

春植えサトウキビを収穫後、株出し栽培をおこなった。株出し栽培の肥培管理は全ての試験区で地域慣行に準じておこなった。すなわち、基肥は2015年2月21日に、窒素 65 kg ha^{-1} 、リン酸 36 kg ha^{-1} 、カリ 50 kg ha^{-1} を株元の土壌表層へすじ撒きし、覆土した。追肥は5月4日と6月7日の平均培土および高培土時に、それぞれ窒素 96 kg ha^{-1} 、リン酸 36 kg ha^{-1} 、カリ 36 kg ha^{-1} を株元の土壌表層へすじ撒きし、覆土した。2016年2月にサトウキビを収穫した。

(2) 生育及び収穫調査

追肥前の糖蜜施用66日後(2014年4月11日)に生育調査をおこなった。調査項目は茎数とし、試験区内の4畝(畝長7m)について正常な生育を示す茎数を計測した。

収穫調査は春植え収穫時(2015年2月14日~16日)と株出し収穫時(2016年2月12日~14日)におこなった。1区あたり平均的な生育を示す2畝を選抜し、さらに各畝の畝長7mのうち中庸な生育を示す4mを調査箇所とした。調査項目は、原料茎重、原料茎数、原料茎長、茎径、甘蔗糖度とした。調査箇所のサトウキビを剥葉、梢頭部除去後、全ての原料茎を試験区外へ持ち出し、原料茎数、原料茎重を調査した。収穫した原料茎のうち生育中庸な12本について原料茎長、茎径を測定した。さらに、このうち3本を無作為に採取し、甘蔗糖度を測定した。甘蔗糖度は氏原ら(2001)の方法に準じた。すなわち、採取した3本を全てシュレッダーにて粉碎し、その粉碎試料から100g程度を取り、測定用容器に入れ、北大東製糖(株)内の糖度測定装置(NIR: InfraXact、Foss)により測定した。

(3) 土壌分析

土壌は、2014年2月4日(糖蜜散布前)と2月28日(糖蜜散布24日後)、4月12日(67日後)、5月31日(116日後)、8月27日(204

日後)、2015年2月14日(375日後)、7月30日(541日後)、2016年2月12日(738日後)に試験区内の6ヶ所から、表層1cm程度を除いた後、作土(深さ20cm程度)をスコップで採取し、混和して1試料とした。礫や植物残さを取り除いて、室内にて風乾後、2mm目の篩を通し供試土壌とした。

分析項目は、pH(H₂O)、EC、可給態窒素、可給態リン酸、交換性カリウム、腐植とし、糖蜜散布前の試料については陽イオン交換容量も測定した。分析方法は、pH(H₂O)は1:2.5ガラス電極法、ECは1:5水浸出法、可給態リン酸、交換性カリウム、腐植およびCECは全農型土壌分析ZA-IIによる全農型分析法によりおこなった。可給態リン酸はpH3-0.001M硫酸抽出-Murphy-Riley法、交換性カリウムはpH4.8塩化ナトリウム-酢酸ナトリウム抽出-テトラフェニルホウ素ナトリウム比濁法、腐植は熊田法、CECはショーレンベルガー変法-インドフェノール法(改法)で測定した(土壌環境分析法編集委員会, 2003)。可給態窒素は保温静置法でおこなった。すなわち、100ml容量のUMサンプル瓶に土壌20gを入れ、最大容水量の60%に相当する蒸留水を静かに添加し、これを30℃で4週間培養した。培養前後に土壌の無機態窒素を2MKCl溶液で抽出し、Auto Analyzer(SYNCA、BLTEC)で測定した。可給態窒素は、培養前後の無機態窒素の差から求めた。また、この培養前の無機態窒素の分析値を土壌中の無機態窒素とした。

試験開始時の作土の化学性は、pH(H₂O): 5.2、EC: 15.5 mS m⁻¹、無機態窒素: 3.6 mg kg⁻¹、可給態窒素: 14.1 mg kg⁻¹、可給態リン酸: 74.4 mg kg⁻¹、交換性カリウム: 1.0 cmol_c kg⁻¹、腐植: 15.2 g kg⁻¹、陽イオン交換容量: 15.7 cmol_c kg⁻¹であった。

(4) 植物体分析

土壌中の過剰なカリウムがサトウキビのマグネシウム吸収を抑制し、光合成能の低下に伴い甘蔗糖度が減少することが指摘されている(川

満ら, 2000)。そのため、糖蜜施用によるマグネシウム吸収抑制がみられるか検証する目的で春植え収穫時の葉身カリウムおよびマグネシウム含量を分析した。試料は各試験区から第3展開葉を15枚採取し、風乾後、粉碎器（IMF-800DG、岩谷産業）にて粉碎し分析に供した。分析はまず試料0.1gを100mlテフロン性容器に測りとり、60%硝酸8mlと46%フッ化水素酸2mlを加え、200℃で50分間湿式分解した。その後、得られた分解液を原子吸光（AAAnalyst200、PERKINELMER）で分析した（植物栄養実験法編集委員会, 2001）。

（5）糖蜜施用による収益性への影響調査

糖蜜を施用することによる農家収益への影響を調査した。売上額は各試験区の収量（原料茎重）に各年のサトウキビ価格（春植え：21,767円 Mg^{-1} ，株出し：21,745円 Mg^{-1} ）を掛けて算出した。化学肥料は対照区で基肥と追肥2回の計3回施用した。施肥1回あたりの費用は57千円 ha^{-1} （1,900円 $\text{袋}^{-1} \times 30 \text{袋 ha}^{-1}$ ）かかることから、対照区における2作分の肥料コストは57千円 $\text{ha}^{-1} \times 3 \text{回} \times 2 \text{作}$ の342千円 ha^{-1} とした。20Mg区および50Mg区における2作分の肥料コストは春植えの基肥のみ施用していないことから、施肥1回分の費用を差し引き285千円 ha^{-1} とした。糖蜜施用コストは、北大東製糖（株）の糖蜜施用料金1,000円 Mg^{-1} から各試験区で施用した量（20Mgおよび50Mg）を掛けて算出した。対照区との収益差額は、売上額から2作分の肥料コストと糖蜜施用コストを引いた額について、対照区と20Mg区および50Mg区を比較した。

2）春植え収量と株出し収量の実態調査

本試験では春植え栽培後、株出し栽培をおこなった。春植え収量が良好な場合、次作の株出し収量も増加することが一般に認識されている。本試験における春植え収量と株出し収量にも同様の傾向がみられたことから、この要因を検証する目的で北大東島島内の26筆のデータ

も加えて、春植え単収と次作の株出し単収を比較した。単収は、2012年に春植え栽培した圃場 78 ha のうち、3分の1にあたる 22 ha について解析した。北大東島では一筆毎に原料茎を収穫し、トラックで製糖工場に搬入後、重量を計測する。本解析で使用したデータはこの重量データを北大東製糖(株)から提供いただき、ha 当たりの収量に換算して解析に用いた。

3) 統計解析

2つの項目間の相関は、ピアソンの相関係数と単回帰分析で解析した。複数項目間の多重比較検定には、Tukey-Kramer 法を用いた。これらの統計解析には、「Statcel 3rd ed., (OMS 出版)」を使用した。

3. 結果

1) サトウキビ糖蜜施用試験

生育調査の結果、糖蜜施用 66 日後 (2014 年 4 月 11 日) の茎数は、対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ試験区あたり 259, 326, 311 本と有意差はなかったものの、対照区に比べ糖蜜施用区で増加する傾向がみられた。

収量調査の結果、春植えの原料茎重は、対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 47.3、52.8、56.5 Mg ha⁻¹ と糖蜜施用量に伴って増加し、対照区と 50Mg 区で有意差があった ($p < 0.05$ 、図 III-1)。株出しの原料茎重も同様に、対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 39.9、48.5、55.4 Mg ha⁻¹ と糖蜜施用量に伴って増加し、対照区と 50Mg 区で有意差があった ($p < 0.05$)。春植えと株出しの原料茎重を合計すると、対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 87.2、101.3、111.9 Mg ha⁻¹ の順に増加した ($p < 0.05$)。

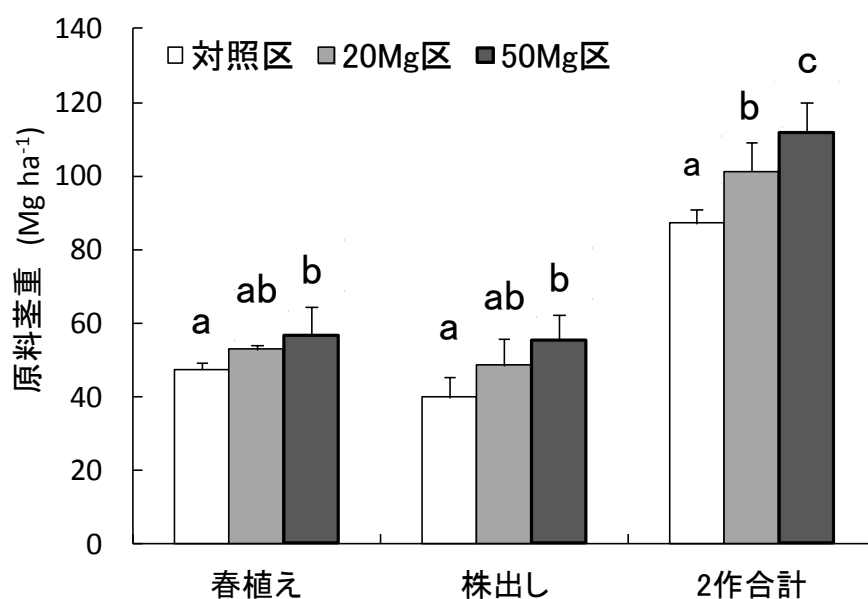


図 III-1 収穫されたサトウキビ原料茎重の比較

※同一項目で同符号を含むものに有意差がないことを示す ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 法)。また、エラーバーは標準偏差を示す。

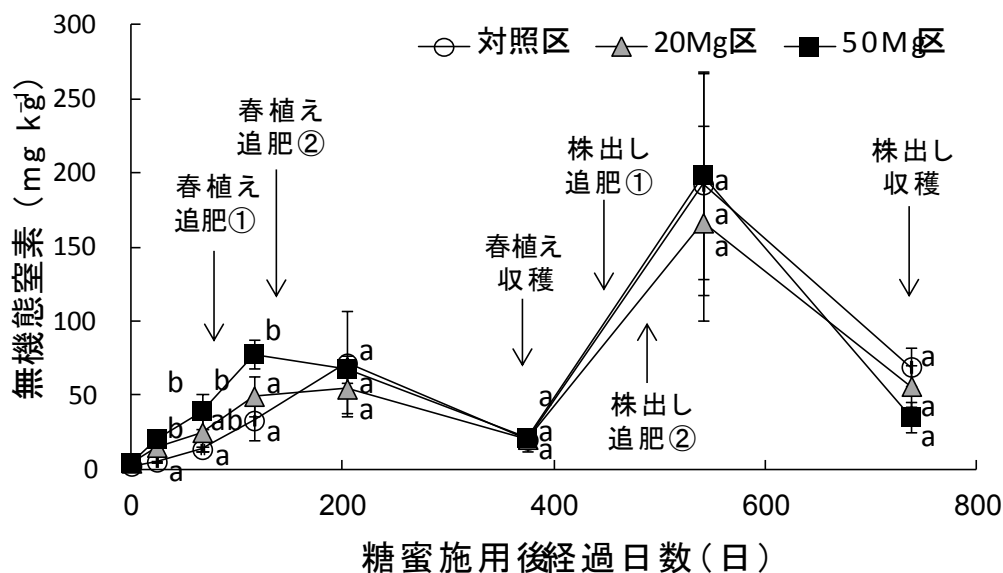
原料茎数は春植え、株出しともに糖蜜施用量に伴って増加し、対照区と 50Mg 区で有意差があった ($p < 0.05$ 、表 III-3)。一方、原料茎長、茎径、甘蔗糖度は試験区間に有意差はなかった。また、春植え収穫時の葉身 K および葉身 Mg においても、試験区間に有意差はなかった。

表 III-3 サトウキビの収量調査結果

	原料茎数 (本 a ⁻¹)		原料茎長 (cm)		茎径 (mm)		甘蔗糖度 (%)		葉身K (g kg ⁻¹)	葉身Mg (g kg ⁻¹)
	春植え	株出し	春植え	株出し	春植え	株出し	春植え	株出し	春植え*	
対照区	667 a	508 a	186 a	177 a	20.0 a	21.3 a	13.6 a	13.8 a	8.3 a	2.0 a
20Mg区	785 ab	642 ab	182 a	183 a	19.8 a	21.3 a	13.5 a	13.7 a	7.6 a	2.1 a
50Mg区	801 b	692 b	186 a	186 a	20.5 a	20.9 a	13.2 a	13.8 a	8.2 a	2.0 a

※同じ列の同符号を含むものに有意差がない ($p < 0.05$) ことを示す (Tukey-Kramer 法による多重比較検定)。葉身 K および葉身 Mg は、春植え収穫時のみ測定した。

サトウキビ生育初期における土壌中の無機態窒素は、糖蜜施用から24日後（2014年2月28日）では対照区、20Mg区、50Mg区でそれぞれ5.2、15.1、20.2 mg kg⁻¹と糖蜜施用量に伴って増加し、対照区と20Mg区および50Mg区で有意差があった（ $p < 0.05$, 図Ⅲ-2）。糖蜜施用から67日後（2014年4月12日）では対照区、20Mg区、50Mg区でそれぞれ13.6、25.1、39.0 mg kg⁻¹と糖蜜施用量に伴って増加し、対照区と50Mg区で有意差があった（ $p < 0.05$, 図Ⅲ-2）。一方、糖蜜施用204日以降（2014年8月27日）は、試験区間に有意差はなかった。



図Ⅲ-2 糖蜜施用後の無機態窒素の推移

※同経過日数で同符号を含むものに有意差がないことを示す（ $p < 0.05$, Tukey-Kramer法）。また、エラーバーは標準偏差を示す。

可給態窒素は糖蜜施用量に伴って増加し、春植え収穫時までその傾向は続いた（図Ⅲ-3）。糖蜜施用から24日後、可給態窒素は対照区、20Mg区、50Mg区でそれぞれ14.0、40.7、74.9 mg kg⁻¹の順に増加した（ $p < 0.05$ ）。その後、糖蜜施用区の可給態窒素は緩やかに低減した。春植え収穫時には対照区で13.8 mg kg⁻¹、20Mg区で17.3 mg kg⁻¹、50Mg

区で 24.2 mg kg^{-1} となり、50Mg 区は対照区、20Mg 区と比べて有意 ($p < 0.05$) に高かったものの、試験区間の差は小さくなった。株出し栽培時には各試験区間の差はさらに縮小し有意差はなくなり、収穫時には対照区で 19.7 mg kg^{-1} に対して、20Mg 区で 24.3 mg kg^{-1} 、50Mg 区で 23.0 mg kg^{-1} を示し、対照区は 20Mg 区と有意差 ($p < 0.05$) があるものの、50Mg 区とは有意差がなくなった。

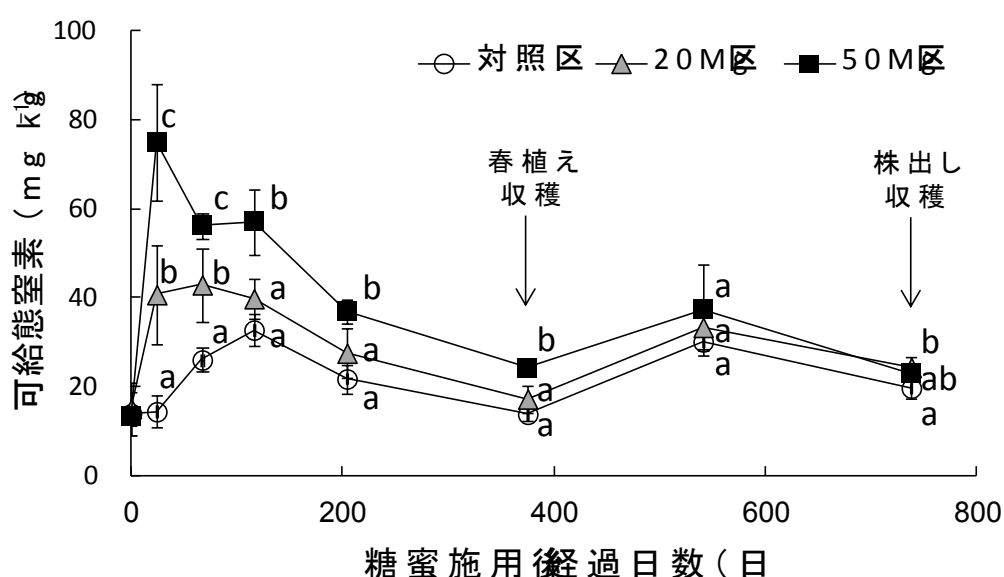


図 III-3 糖蜜施用後の可給態窒素の推移

※同経過日数で同符号を含むものに有意差がないことを示す ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 法)。また、エラーバーは標準偏差を示す。

交換性カリウムは糖蜜施用量に伴って増加し、20Mg 区と 50Mg 区は試験期間を通して、対照区に比べて有意 ($p < 0.05$) に高い値を示した (図 III-4)。すなわち、糖蜜施用から 24 日後、交換性カリウムは対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 1.1 、 2.6 、 $4.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の順に増加した ($p < 0.05$)。その後、糖蜜施用区の交換性カリウムは緩やかに低減していくものの、株出し収穫時においても、対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 1.0 、 1.5 、 $1.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の順で増加し、対照区と 20Mg 区およ

び 50Mg 区の間で有意差 ($p < 0.05$) があつた。

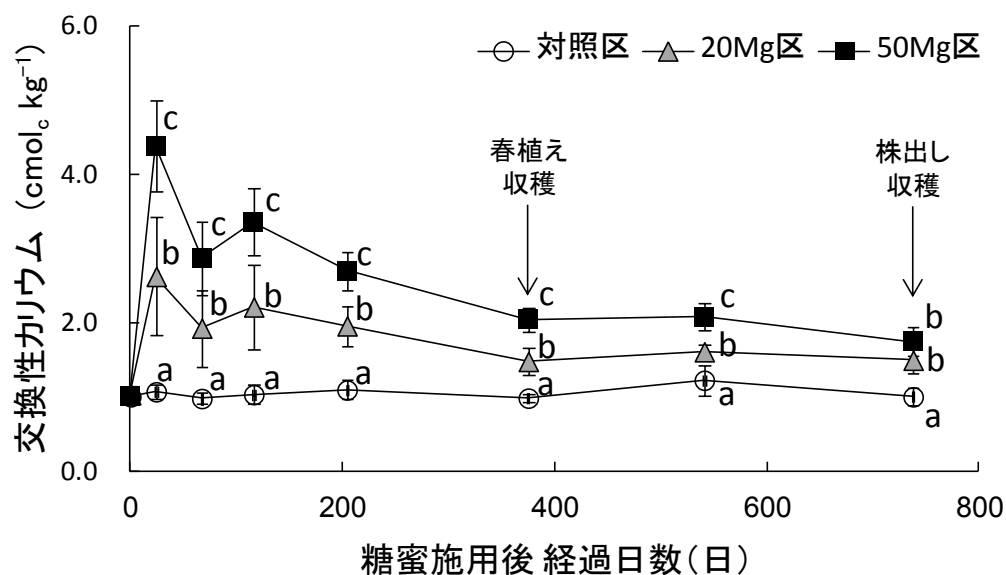


図 III-4 糖蜜施用後の交換性カリウムの推移

※同経過日数で同符号を含むものに有意差がないことを示す ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 法)。また、エラーバーは標準偏差を示す。

糖蜜施用による収益への影響を検証した結果を表 III-4 に示す。糖蜜施用量に伴って原料茎重が増加したため、売上げも増加した。また、糖蜜を施用した 20Mg 区および 50Mg 区では春植えの基肥として化学肥料を施用していないため、肥料コストが抑えられた (春植え基肥コストは 1 ha あたり 5.7 万円)。売上げの増加分と肥料コスト抑制分を合わせ対照区と比較すると、収益は対照区に比べ 20 Mg 区で 1 ha あたり 34.3 万円、50Mg 区で 54.4 万円増加した。

表 III-4 サトウキビ売上げから施肥コストを差し引いた糖蜜施用による収益性の向上 (1 ha 当たり千円)

	売上げ			2作分の 肥料コスト	糖蜜施用 コスト	対照区との 収益差額
	春植え	株出し	2作合計			
対照区	1,030	868	1,898	342	0	-
20Mg区	1,149	1,055	2,204	285	20	+ 343
50Mg区	1,230	1,205	2,435	285	50	+ 544

※売上げは、各年のサトウキビ価格×原料茎重から算出した。また、糖蜜の施用コストは、北大東製糖(株)の糖蜜散布料金(10 Mg あたり 1 万円)で算出した。

2) 春植え収量と株出し収量の実態調査

春植え収量と株出し収量の関係を検証するために、試験を実施した北大東島内の 26 圃場について比較したところ、両者に相関係数 0.574 の有意な正の相関が認められ、本研究で実施した 12 地点においても相関係数 0.364 の有意な正の相関がみられた。また、農家圃場と試験圃場の両者を併せると相関係数は 0.649 となり最も高くなった(図 III-5)。

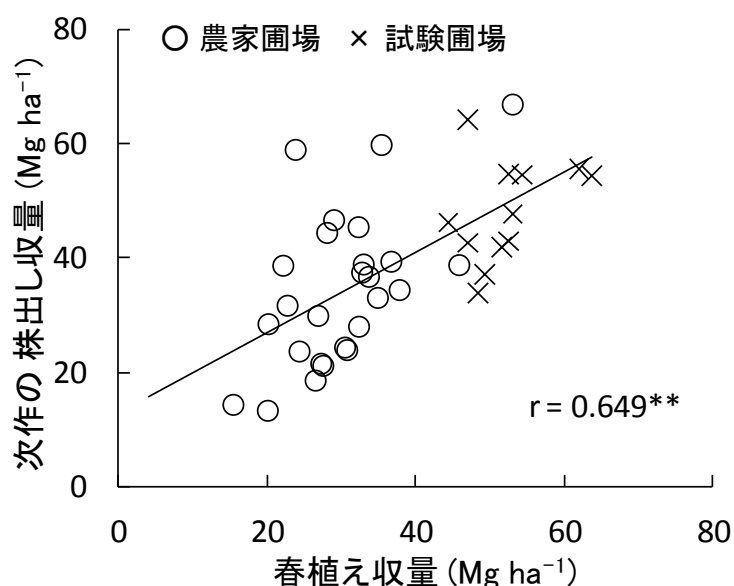


図 III-5 春植え収量と次作の株出し収量の関係

(**： 1.0%水準で有意であることを示す)

4. 考察

本試験において施用した糖蜜中の主な成分量を乾物あたりに換算すると、C 322 g kg⁻¹、N 19.2 g kg⁻¹、P₂O₅ 3.3 g kg⁻¹、K₂O 118 g kg⁻¹となる。金城ら（2011）の報告では、沖縄県産牛ふん堆肥の成分平均値（乾物あたり）はC 292 g kg⁻¹、N 23.0 g kg⁻¹、P₂O₅ 23.0 g kg⁻¹、K₂O 30.0 g kg⁻¹である。従って、糖蜜は牛ふん堆肥と比べ、P₂O₅は少ないものの、C、Nを同程度、K₂Oを多く含んでおり、地力を向上させるための有機物源として活用できると考えられた。

1) 糖蜜施用によるサトウキビ生育・収量への影響

糖蜜をサトウキビに対して施用した結果、糖蜜施用 66 日後の茎数は試験区あたり対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 259、326、311 本と有意差はなかったものの、対照区に比べ糖蜜施用区で増加する傾向がみられた。

収量調査の結果、原料茎重は糖蜜施用量に伴って有意に増加し、春植えで 12~19%、株出しで 22~39%増加した（図Ⅲ-1）。また、原料茎数は糖蜜施用によって、春植えで 18~20%、株出しで 26~36%有意に増加した（表Ⅲ-3）。サトウキビの収量構成要素は原料茎長、原料茎数、茎径からなる（宮平，1978；大内田ら，2015）。糖蜜施用によって原料茎長および茎径は変化がなかったことから、サトウキビが増収した理由は茎数が増加したためと考えられた。

窒素は作物の生育にとって重要であり、サトウキビにおいても収量に影響を与えている（宮沢ら，1981）。本試験において、糖蜜施用 24 日後における土壌中無機態窒素は対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 5.2、15.1、20.2 mg kg⁻¹と糖蜜施用量に伴って増加し、対照区と糖蜜施用区で有意差があった（ $p < 0.05$ ，図Ⅲ-2）。糖蜜施用 67 日後（4 月 12 日）では対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 13.6、25.1、39.0 mg

kg⁻¹と24日後の値に比べ増加していることから、窒素の無機化が進行したと考えられる。1回目の追肥（4月27日）前の4月11日における茎数は、対照区と比べ糖蜜施用区で増加する傾向があった。これらのことから、糖蜜由来の無機態窒素および速やかに無機化した窒素が、サトウキビの初期生育を促進したと考えられた。

一方、土壌中の無機態窒素は糖蜜施用204日（8月27日）以降、有意差はないにも関わらず原料茎数は増加した。本試験において春植えの窒素施用量（基肥＋追肥分）は、対照区で288 kg ha⁻¹となった。同じく、春植えの糖蜜施用区では糖蜜由来の窒素量（表Ⅲ-1の成分含量より試算）と追肥による施用量を併せると、20Mg区では462 kg ha⁻¹、50Mg区で867 kg ha⁻¹となり、対照区に比べ1.6～3.0倍量の窒素が施用されたことになる。一方で、窒素施用量がサトウキビ生育・収量に及ぼす影響について、久場（1993）は沖縄県内の国頭マージ熟畑において窒素を0、130、260、390 kg ha⁻¹施用し収量を調査したところ、260 kg ha⁻¹以上から増収しないことを報告している。また、Meyer *et al.*（1986）や Imtiaz *et al.*（2005）は窒素施用量として200 kg ha⁻¹以上から増収効果は鈍化することを示している。そのため、糖蜜施用による原料茎数増加の要因として、施用窒素量の増加による直接的な影響以外に、可給態窒素のような間接的な影響について検討する必要があると考えられた。

沖縄県サトウキビ栽培指針では、サトウキビに対する最終施肥時期は6月とされている（沖縄県，2014b）。その理由は、サトウキビの生育盛期（6月下旬の梅雨明けから10月ころまで）に入ると、サトウキビ作物体が大きくなり、畑内での施肥作業が困難になるためである。本試験においては、最終施肥は6月25日におこなった。宮沢ら（1981）はサトウキビ栽培における最終施肥時期が生育盛期に比べて早いことから、最終施肥の効果が生育盛期まで持続するかを問題視し、可給態窒素の水準を高めることが必要であると述べている。本試験では、糖

蜜施用によって可給態窒素の向上がみられた（図Ⅲ-3）。Wynne and Meyer（2002）は、糖蜜に含まれる固形物の55%がスクロースであることを報告し、神谷ら（2004）も同様の報告をしている。これらの知見から、本試験で使用した糖蜜もスクロースのような易分解性炭素が多かったと推測される。Sakamoto and Oba（1991）は、施用された有機物資材中の易分解性画分（熱水可溶有機物、炭水化物および粗タンパク）が微生物バイオマス形成に最も影響を及ぼしていることを報告している。また、微生物バイオマス量と可給態窒素には有意な正の相関がある（坂本・大羽，1993；関ら，1996；宮丸ら，2012）。これらのことから、糖蜜に含まれる易分解性炭素が微生物バイオマスを増加させ、可給態窒素を向上させたと考えられた。また、可給態窒素の向上によって、サトウキビが吸収できる窒素量が増え、結果として原料茎数の増加に寄与したと推測された。

一方、株出し栽培時の生育盛期において、可給態窒素は処理区間で有意差はなかったにもかかわらず、収量は増加した（図Ⅲ-1、図Ⅲ-3）。サトウキビの収量に影響する土壌要因として、可給態窒素が特に影響する（Yoshida *et al.*, 2016）。しかし、本試験における株出し栽培時の可給態窒素は、生育中期（糖蜜施用 541 日後、図Ⅲ-3）で各試験区間に有意差はなく、収穫時で有意差があった対照区と 20Mg 区でも、その差は 4.7 mg kg^{-1} 程度であった。このように、株出し栽培時において可給態窒素は大きな差はなかったにもかかわらず、原料茎重には有意な差がみられた。

一般のサトウキビ栽培農家には春植え収量が良い場合、次作の株出し収量も良好になるという認識がある。本試験においても春植え収量の増加傾向は、株出し収量に引き継がれていた（図Ⅲ-1）。この要因を検証する目的で、北大東島島内の 26 圃場のデータも含めて春植え収量と次作の株出し収量を比較したところ、有意な正の相関があり春植え収量が株出し収量に影響していることが確認された（図Ⅲ-5）。また、

井上・橋口（2011b）は収穫残茎中の窒素含有率を高めることは、次作の生育向上につながることを報告している。従って、本試験においては春植えの糖蜜施用により窒素肥沃度が向上し、春植え収穫残茎中の窒素含量が高まることで株出し栽培時の茎数増加につながり、サトウキビが増収したと考えられた。

本試験において、糖蜜施用によるサトウキビ収量の増加が確認された。一方、糖蜜の施用によって窒素が慣行施肥量より多くなりことで環境負荷の増加が懸念される。そこで、北大東内のサトウキビ栽培における肥料からの窒素量と糖蜜施用による窒素量を比較検討した。北大東島の各作型別収穫面積（2016年）は、春植え 63 ha、夏植え 23 ha、株出し 285 ha であった。各作型の窒素施用量は、春植え 200 kg ha^{-1} 、夏植え 240 kg ha^{-1} 、株出し 220 kg ha^{-1} であり（沖縄県，2016c）、北大東島におけるサトウキビ栽培で施用される化学肥料由来の窒素量は年間で 80,820 kg と推計できる。他方、北大東島から発生する糖蜜は年間 700 Mg 程であり、その窒素量は 9,450 kg となる（糖蜜中の窒素 13.5 g kg^{-1} で算出、表 III-1）。これは、窒素肥料として施用される量の 11.7%程度に留まる。また、本研究では糖蜜を施用した試験区には基肥を施用しなかった（表 III-2）。これは、糖蜜から施用される窒素量 9,450 kg を基肥の化学肥料窒素から削減できることを示唆している。さらに、北大東島の地下水の硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素は 0.06 ppm と環境基準値 10 ppm を大幅に下回っている（沖縄県，2014a）。これらのことから、北大東島で 1 年間に発生する糖蜜を島内のサトウキビ圃場へ全て施用したとしても、環境への影響は少ないと考えられたが、今後、島内の窒素収支も考慮し環境への負荷について検証する必要がある。

前述したとおり、北大東島における糖蜜発生量は年間約 700 Mg で、これを春植え圃場 94 ha (2006-2015 年平均) に施用したと仮定すると、その量は約 7.4 Mg ha^{-1} となり、本試験で検証した 20 Mg ha^{-1} より少なくなる。施用量が少なすぎる場合は、糖蜜施用効果が現れない恐れが

あるため、糖蜜は極度に収量が低い圃場から優先的に施用する等、効率的に利用する必要がある。

2) 糖蜜施用による甘蔗糖度への影響

本試験では糖蜜を施用することで、糖蜜由来のカリウムが 20Mg 区で約 1,700 kg ha⁻¹、50Mg 区で約 4,200 kg ha⁻¹と多量に施用された（表 III-2）。原田・篠原（1970）は、牧草において交換性カリウムの増加に伴って牧草中マグネシウム含量が低下したことを報告している。マグネシウムは葉緑素の構成物質であり、マグネシウムの減少で光合成能が減少する（花田ら，1981）。また、甘蔗糖度は交換性カリウムが高いと低下することも指摘されている（川満ら，2000）。このことから、本試験では当初、交換性カリウムの蓄積によるマグネシウム欠乏と、それに伴う甘蔗糖度の低下が懸念された。一方、後藤・永田（2008）のサトウキビに対する堆肥連用試験では、堆肥 100 Mg ha⁻¹までの施用量でも甘蔗糖度への影響はみられていない。この時の堆肥由来のカリウム施用量は約 370 kg ha⁻¹であった。本試験でも、20Mg 区、50Mg 区の甘蔗糖度は春植え、株出しともに低下はみられず、春植収穫時の葉中カリウム含量は同程度であり、葉中マグネシウム含量も変化はみられなかった。このことから、本試験においては糖蜜 50Mg ha⁻¹までの施用量であればサトウキビのマグネシウム吸収や甘蔗糖度への影響はないと判断された。すなわち、糖蜜 50 Mg ha⁻¹以下の施用量であれば、サトウキビの品質を低下させずに収量を増加させることができることが明らかとなった。また、今後は、交換性カリウムの蓄積によるマグネシウム欠乏と甘蔗糖度の低下は、どの程度のカリウム施用量から発生するか検証する必要がある。

3) 糖蜜施用による収益性への影響

糖蜜施用によって農家の収益性（2 作合計、1 ha あたり）は、対照

区に比べ 20Mg 区で 34.3 万円、50Mg 区で 54.4 万円向上した(表Ⅲ-4)。これらは、サトウキビの増収に伴う売上げ額の増加と、春植えの基肥削減によるものである。糖蜜は家畜飼料や工業用アルコールの原料として利用されているが、糖蜜を施用した際のサトウキビ増収に伴う農家収益の増加額は、糖蜜 1 Mg あたり 5~9 千円であり(1作、1 ha あたり)、これは、北大東島から出荷される糖蜜 1 Mg あたりの販売価格 2 千円より高い(沖縄県, 2016a)。このように、北大東島においては、糖蜜を島外へ出荷することで得られる利益より、農家圃場へ還元するほうが経済的に望ましいと結論された。

さらに、糖蜜はカリウムを豊富に含むことから、施肥する化学肥料の内のカリウムを削減することで肥料コストのさらなる低減を図ることも可能と考えられる。今回の試験において糖蜜施用により多量のカリウムが土壌へ供給された(表Ⅲ-2)。沖縄県サトウキビ栽培指針において、大東マージのカリウム施肥量は 60 kg ha^{-1} (春植え、熟畑)とされている。また、糖蜜施用区の交換性カリウムは、栽培期間中、常に沖縄県土壌診断基準値($0.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$:赤黄色土、サトウキビ畑、沖縄県, 1979)を上回っていた(図Ⅲ-4)。このことから、糖蜜施用によって化学肥料由来のカリウムを削減することで農家の収益性をさらに向上させることが可能になる。今後は、糖蜜施用した際の無カリ栽培試験をおこない実証する必要がある。

5. 要約

沖縄県北大東島の主要作物はサトウキビであるが、過去 30 年間の平均収量は 42 Mg ha^{-1} と沖縄県平均 63 Mg ha^{-1} より低く、収量向上が求められている。本章ではサトウキビ収量を向上させる手段として、製糖副産物の糖蜜に着目し、その施用効果を検証する目的で圃場試験をおこなった。試験区は対照区(糖蜜施用なし)、20 Mg 区(糖蜜 20 Mg ha^{-1})

施用)、50 Mg 区 (糖蜜 50 Mg ha⁻¹施用) の 3 処理、4 反復とした。栽培は春植え栽培および株出し栽培の 2 作とし、糖蜜は春植え栽培の植え付け前に施用した。

収量調査の結果、収量は対照区、20Mg 区、50Mg 区でそれぞれ 87.2、101.3、111.9 Mg hg⁻¹ の順に増加した ($p<0.05$)。原料茎数も糖蜜施用量に伴って有意に増加したが ($p<0.05$)、原料茎長、茎径は 2 作共に差はなく、収量増加は原料茎数増加によると推察された。

土壌化学性のうち、無機態窒素は糖蜜施用 116 日までは対照区に比べて有意に増加したが、糖蜜施用 204 日以降は試験区間に有意差はなかった。可給態窒素は春植え期間中、糖蜜施用量に伴って有意に高く推移し ($p<0.05$)、サトウキビの茎数および収量の増加に繋がったと考えられた。交換性カリウムは、全ての試験期間を通して対照区に比べ糖蜜施用区で有意に高く推移した ($p<0.05$)。交換性カリウムの蓄積によって光合成能に関与するマグネシウムの吸収抑制が懸念されたが、収穫時の葉中マグネシウム含量に差はなく、甘蔗糖度は 2 作とも処理区間で差はなかった。このことから、糖蜜 50 Mg ha⁻¹ までの施用量であれば、サトウキビのマグネシウム吸収や甘蔗糖度への影響はないと判断された。

糖蜜施用による農家の収益性 (1 ha あたり・2 作合計) を試算したところ、対照区に比べ 20Mg 区で 34.3 万円、50Mg 区で 54.4 万円向上した。

以上のことから、糖蜜は 50 Mg ha⁻¹ までの施用量であれば、品質を低下させずにサトウキビの収量、地力、農家収益性を向上させることができる有効な資材であることが示された。

IV. 北大東島におけるケイ酸肥沃度と可給態ケイ酸分析法の検証 並びに可給態ケイ酸がサトウキビ生育に及ぼす影響

1. 目的

イネ科の植物は特異的にケイ酸 (SiO_2) 含量が高くカルシウム含量は低いという特徴から、ケイ酸植物と言われている(三宅・高橋, 1976)。ケイ酸植物はケイ酸を積極的に吸収して地上部へ蓄積する機能を持ち、ケイ酸を必要量吸収できない場合は生育の著しい減退を示す(三宅・高橋, 1976)。ケイ酸は水稻で研究事例が多く、倒伏耐性や細菌性の病気に対する抵抗性の向上、光合成促進、増収効果があることが知られている(吉田, 1965; 間藤ら, 1991; 三宅, 1993; 前川ら, 2003; 小林ら, 2006)。加えて、ケイ酸は作物の耐乾性を高めるなど環境ストレス耐性を向上させることが報告されている(服部, 2005; 森・藤井, 2013)。また、土壌の可給態ケイ酸は水稻茎葉中のケイ酸含有率や水稻のケイ酸吸収量と正の相関を示す(今泉・吉田, 1958; Kato *et al.*, 1997; 茂角ら, 2002; 山下ら, 2012)。このように、水稻の生育にはケイ酸は重要な役割を果たしている。

水稻と同じイネ科であるサトウキビでは、無機養分のうちケイ酸を最も多量に吸収すること(Ayres, 1930)、ケイ酸カルシウムの施用によりサトウキビ葉中ケイ酸含量と収量および糖生産量が増加することが報告されている(Ross *et al.*, 1974; Anderson, 1991)。また、Meyer and Keeping (2000) はケイ酸がサトウキビの病虫害抑制、水利用率向上、光合成促進に影響するとし、外間・宮良(1982) は土壌型によるサトウキビの病害発病度の違いは、土壌中のケイ酸含量に起因するものと推測した。このように、水稻同様、サトウキビの生産においてもケイ酸は有効な養分と考えられる。

本研究の対象地域である北大東島は台風の常襲地である一方、過去10年間の年間降水量は1,535 mmと沖縄県平均の2,250 mmと比べ30%ほど低く（気象庁，2017a）、干ばつ傾向になりやすい環境にある。このような環境ストレスの観点からも、北大東島ではケイ酸はサトウキビ生産性に影響を及ぼしている可能性がある。しかし、北大東島におけるケイ酸肥沃度の実態およびサトウキビ収量への影響については検証されていない。

国内における可給態ケイ酸の分析法は、土壌中のケイ酸を pH4 酢酸緩衝液で抽出し、抽出液中のケイ酸含量を測定する酢酸緩衝液抽出法（以下、AB法）と、土壌中の吸着態ケイ酸をリン酸と置換して抽出液中のケイ酸を測定するリン酸緩衝液抽出法（以下、PB法）の2法がある。AB法は最も多用されている分析方法であるが、ケイ酸質肥料の施用履歴のある土壌では可給度の低い残渣ケイ酸塩まで溶解してしまい、水稻のケイ酸含量・吸収量を反映しない問題があるため（茂角ら，2002）、現在、水田土壌における可給態ケイ酸の評価はPB法が主流となっている（日本土壌協会，2001a）。古江ら（2000）はサトウキビ栽培における可給態ケイ酸の土壌診断基準値として、AB法分析値で 200mg kg^{-1} とすることを提唱している。井上ら（2014）は徳之島の非火山灰土について AB法と PB法の比較をし、有意な正の相関があることから、ケイ酸施用履歴が少ないサトウキビ畑では AB法による評価も有効と報告している。大屋ら（1989）は、宮古島の島尻マーグ（暗赤色土）において可給態ケイ酸の AB法分析値は土壌 pH (H_2O) と正の相関があると報告しているが、他土壌型も同様の傾向があるのか検証している事例は少ない。

そこで本章では、北大東島のケイ酸肥沃度の評価とサトウキビ収量への影響を検証することを目的に、第II章で検証した北大東島土壌について、可給態ケイ酸を AB法と PB法によって評価しサトウキビ収量との関係を調べた。また、サトウキビ畑土壌のケイ酸肥沃度を適切に

評価するための可給態ケイ酸分析法として、AB法とPB法の2法の比較、ついで、AB法あるいはPB法と土壌 pH (H₂O) との比較をおこなった。さらに、酸性矯正した土壌でサトウキビをポット栽培し、土壌 pH(H₂O) が可給態ケイ酸およびサトウキビのケイ酸吸収に及ぼす影響を調査した。

2. 材料および方法

1) 北大東島ケイ酸肥沃度の実態

北大東島ケイ酸肥沃度の実態および可給態ケイ酸分析法の比較のために供試した土壌試料は、第Ⅱ章で採取した土壌のうち無作為に抽出した40試料を用いた。サトウキビ収量、土壌 pH (H₂O) は第Ⅱ章のデータを使用した。可給態ケイ酸の分析は、以下の方法で測定した。

① 酢酸緩衝液抽出法 (AB法)

酢酸緩衝液抽出法は、「土壌、水質及び作物体分析法 (農産業振興奨励会, 1993)」に準じた。すなわち、風乾細土 4 g を 100 ml 容ポリエチレンビンにとり、これに pH4.0 酢酸緩衝液 40 ml を加え、振とう器で5分間振とうした。その後 40 °C 定温水槽に5時間静置し、静置中2時間後および4時間後に、15秒間手で振り混ぜた。静置後ろ紙 (No.6) でろ過し、ろ液 10 ml を 50 ml 容比色管にとり 0.6 N HCl 5 ml 及び 10% モリブデン酸アンモニウム液 5 ml を加え、混合した後、約3分間放置した。次いで、亜硫酸ナトリウム液 10 ml を加えてモリブデンブルーを発色し、約1時間後に、波長 810 nm で吸光度を分光光度計 (セル長: 10 mm) で測定した。

② リン酸緩衝液抽出法 (PB法)

リン酸緩衝液抽出法は、「土壌、水質及び植物体分析法 (日本土壌協

会, 2001b)」に準じた。すなわち、風乾細土 5 g を 100 ml 容ポリエチレンビンにとり、pH6.2 リン酸緩衝液 50 ml を加えて 5 分間振とうした後、40 °C 定温器中に 24 時間静置した。これを再び 5 分間振とうした後、ろ紙 (No.6) で固液分離し、抽出液を得た。この抽出液 1 ml を 100 ml 容比色管へ入れ、蒸留水を加えて比色管の目盛りで 25 ml にした。0.25 M 塩酸 10 mL を加え、よく混合した後、10 %モリブデン酸アンモニウム液 5 ml を加え、直ちに混合した。2 分後、20% 酒石酸溶液 7.5 ml を加え混合し、さらに 2 分後、混合還元剤 2 mL を加え、よく混合した。蒸留水を加え 50 ml とし、ふたをして混合し 1 時間経過した試料について、吸光度 (波長 810 nm) を分光光度計で測定した。

2) AB 法と PB 法の比較及び AB 法、PB 法と土壤 pH (H₂O) の比較

AB 法と PB 法の比較には前述の分析結果を用いた。また、土壤 pH(H₂O) は第 II 章のデータを用いて、AB 法および PB 法分析値と比較した。

3) 酸性矯正による可給態ケイ酸の向上が、サトウキビのケイ酸吸収に及ぼす影響

北大東島の土壤 (赤黄色土、pH4.4) を苦土石灰によって酸性矯正し、土壤 pH (H₂O) を 3 段階に調整した。酸性矯正後、土壤 9kg を 1/2000 ワグネルポットに充填しサトウキビ (F161) を栽培した。栽培期間は 2014 年 4 月から 2015 年 3 月とした。処理区は対照区 (酸性矯正なし)、L1 区 (苦土石灰 30 g pot⁻¹ 添加)、L2 区 (苦土石灰 60 g pot⁻¹ 添加)、L3 区 (苦土石灰 90 g pot⁻¹ 添加) の 4 処理 5 反復とした。植付け時の土壤 pH (H₂O) は対照区、L1 区、L2 区、L3 区でそれぞれ 4.4、5.0、5.8、6.0 となった (表 IV-3)。基肥は植付け前に化学肥料「BB666」をポットあたり 1.9 g (窒素、リン酸、加里でそれぞれ 60、23、23 kg ha⁻¹ となる量) を施用した。追肥は 5 月と 6 月の 2 回おこない、5 月は基肥と同量、6 月はポットあたり 2.5 g (窒素、リン酸、加里でそれぞれ 80、

30、30 kg ha⁻¹となる量)を施用した。

土壌は植付け時(4月)、生育中期(9月)、収穫時(3月)に採取した。採取方法は、サトウキビ株元から約5 cmほど離れた箇所の表層から15 cm下までをオーガで採取した。採取した土壌は礫や植物残さを取り除いて、室内にて風乾後、2 mm目の篩を通し供試土壌とした。分析項目は、土壌 pH(H₂O)および可給態ケイ酸とした。土壌 pH(H₂O)は1:2.5ガラス電極法により分析した。可給態ケイ酸はAB法で測定した。

サトウキビの作物体は収穫時に梢頭部、茎、葉を分けて採取した。梢頭部は第5展開葉の肥厚帯より上位部を、茎は株元から第5展開葉の肥厚帯より下位部を、葉は第3展開葉を採取後、中肋を取り除いた葉身を採取した。採取した各部位はそれぞれ裁断し、風乾・粉碎後、分析に供した。作物体のケイ酸分析は、「土壌、水質及び植物体分析法(日本土壌協会, 2001b)」に準じた。すなわち、粉碎した試料約0.2 gを秤量し、硝酸を加えマイクロ波湿式分解法で分解した。分解後の溶液を定量ろ紙(No.6)でろ過し、ろ紙に残った残渣をろ紙ごとマッフル炉にて、550 °Cで2時間強熱した。燃焼後、残渣の重量を測定しケイ酸含量を求めた。また、葉身のカルシウムおよびマグネシウムは、粉碎した試料0.1 gを100 mlテフロン性容器に測りとり、60%硝酸8 mlと46%フッ化水素酸2 mlを加え、200 °Cで50分間湿式分解した。その後、得られた分解液を原子吸光(AAnalyst200、PERKINELMER)で分析した(植物栄養実験法編集委員会, 2001)。

3. 結果

1) 北大東島ケイ酸肥沃度の実態

実態調査圃場の可給態ケイ酸はAB法分析値が平均164 mg kg⁻¹、PB法分析値が平均200 mg kg⁻¹を示した(表IV-1)。古江・永田(2000)はサトウキビ畑における可給態ケイ酸の土壌診断基準値をAB法分析値

で 200 mg kg^{-1} と提唱していることから、AB 法分析値 200 mg kg^{-1} 以上、 $100 \sim 200 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 100 mg kg^{-1} 未満で区分し圃場割合を検討した。その結果、 200 mg kg^{-1} 以上の圃場は全体の 35%程度であった。一方、 $100 \sim 200 \text{ mg kg}^{-1}$ の圃場は 20%、 100 mg kg^{-1} 未満の圃場は 45%となった（図 IV-1）。

表 IV-1 北大東島可給態ケイ酸
分析結果 (n=40)

	AB法	PB法
	(mg kg ⁻¹)	
平均	164	200
最大	462	444
最小	50	93

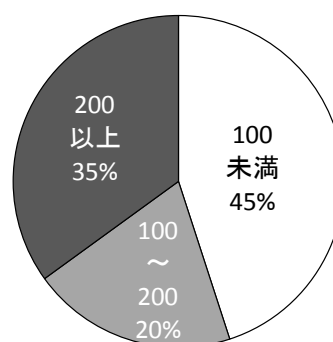


図 IV-1 可給態ケイ酸 (AB 法) から区分した圃場割合 (AB 法分析値単位: mg kg^{-1})

可給態ケイ酸とサトウキビ収量との関係を比較したところ、AB 法分析値、PB 法分析値ともに相関はなかった（図 IV-2）。

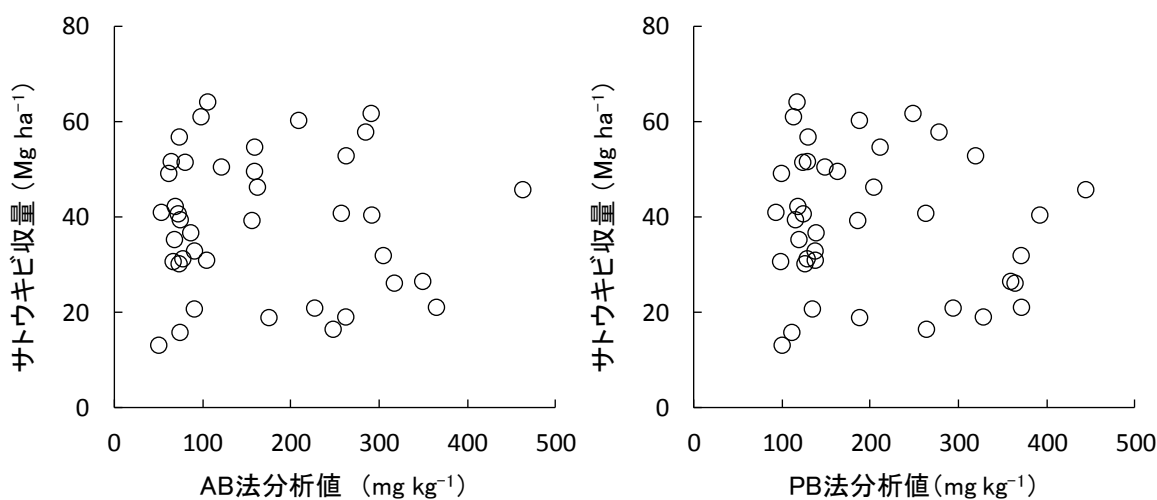
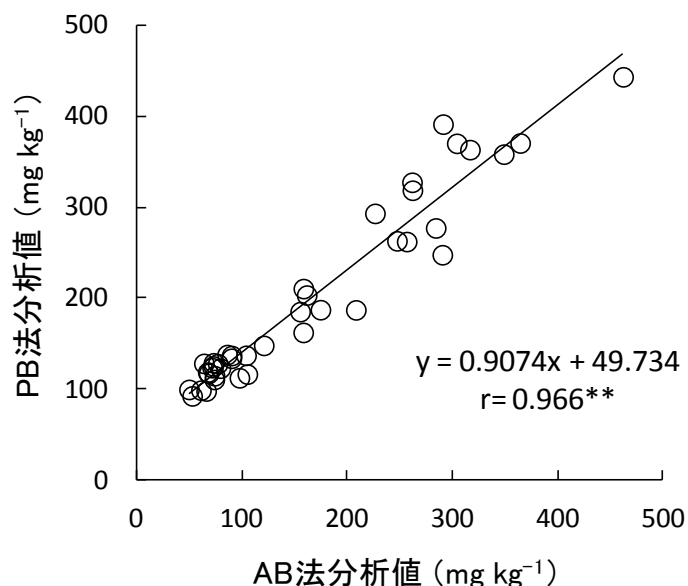


図 IV-2 サトウキビ収量と可給態ケイ酸 (AB 法・PB 法) との関係

2) AB法とPB法の比較及びAB法、PB法と土壌 pH (H₂O) の比較

AB法とPB法の分析値を比較した結果、両者に有意な正の相関があった(図IV-3、 $p < 0.01$)。近似式からAB法分析値で500 mg kg⁻¹までの範囲では、PB法分析値が高い値を示すことが明らかとなった。



図IV-3 AB法とPB法の関係

(**：1.0%水準で有意であることを示す)

AB法分析値およびPB法分析値は土壌 pH (H₂O) と有意な正の相関があり、相関係数はAB法分析値、PB法分析値でそれぞれ0.96、0.93であった(いずれも $p < 0.01$ 、図IV-4)。可給態ケイ酸のAB法分析値とPB法分析値は、土壌 pH (H₂O) が低いほど分析値の差が大きくなる傾向がみられた。そこで、土壌 pH (H₂O) を6.5以上、5.5以上6.5未満、5.5未満の3区分に仕分け、それぞれの可給態ケイ酸2法の平均値を比較した(表IV-2)。その結果、pH5.5未満ではAB法で88.3 mg kg⁻¹、PB法で130.4 mg kg⁻¹と両者に有意差があった($p < 0.01$)。

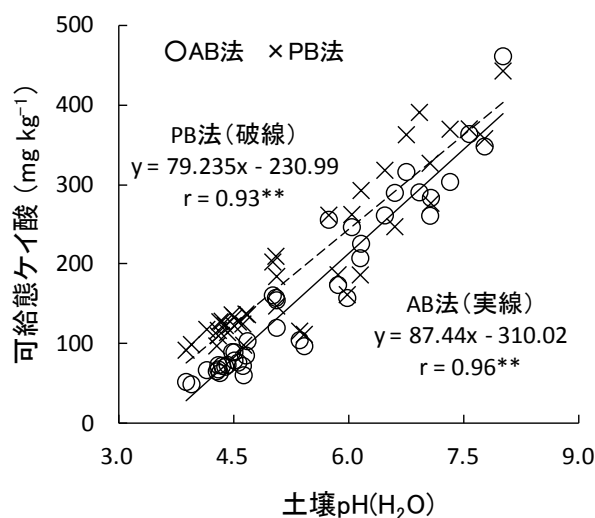


表 IV-2 土壤 pH と可給態ケイ酸
 平均値の比較

pH(H ₂ O)	可給態ケイ酸(mg kg ⁻¹)		
	AB法	PB法	
6.5以上	324.8	350.1	n.s.
5.5~6.5	219.0	239.2	n.s.
5.5未満	88.3	130.4	**

**： 1.0%水準で有意 (t 検定)

図 IV-4 土壤 pH と可給態ケイ酸の関係

(**： 1.0%水準で有意であることを示す)

3) 酸性矯正による可給態ケイ酸の向上が、サトウキビのケイ酸吸収に及ぼす影響

土壤 pH (H₂O) は酸性矯正の結果、植付け時は対照区、L1 区、L2 区、L3 区でそれぞれ 4.4、5.0、5.8、6.0 と順に高くなる傾向を示し、L2 区と L3 区の間以外で有意差があった (表 IV-3, $p < 0.05$)。生育中期以降は全ての処理区間で有意な差が認められた ($p < 0.05$)。可給態ケイ酸も土壤 pH (H₂O) に伴って増加する傾向があり、植付け時は対照区、L1 区、L2 区、L3 区でそれぞれ 84、89、111、121 mg kg⁻¹ と順に高くなる傾向を示し、対照区および L1 区と L3 区の間には有意差があった (表 IV-3, $p < 0.05$)。収穫時の可給態ケイ酸は、全ての処理区間で有意差が認められた ($p < 0.05$)。

表 IV-3 各処理区の土壌 pH (H₂O) と可給態ケイ酸

	pH(H ₂ O)			可給態ケイ酸 (mg kg ⁻¹)		
	植付時	生育中期	収穫時	植付時	生育中期	収穫時
対照区	4.4 a	4.3 a	5.0 a	84 a	86 a	59 a
L1区	5.0 b	4.9 b	5.9 b	89 a	96 a	95 b
L2区	5.8 c	5.9 c	6.9 c	111 ab	130 b	159 c
L3区	6.0 c	6.4 d	7.3 d	121 b	156 c	219 d

※各採取時期で異英字間に有意差（5%水準）があることを示す。

作物体中ケイ酸含量（乾物あたり）について、梢頭部は対照区、L1区、L2区、L3区でそれぞれ 10.3、10.9、8.1、5.5 g kg⁻¹ と順に低くなる傾向を示し、対照区および L1区と L3区の間に有意差があった（図 IV-5, $p < 0.05$ ）。茎は処理区間で有意差はなかった。葉は対照区、L1区、L2区、L3区でそれぞれ 19.0、12.7、12.4、9.6 g kg⁻¹ と順に低くなる傾向を示し、対照区とそれ以外の区で有意差があった（図 IV-5, $p < 0.05$ ）。

サトウキビのケイ酸吸収量は、対照区、L1区、L2区、L3区でそれぞれ 2.9、2.3、2.2、1.8 g pot⁻¹ と順に低くなる傾向を示し、対照区と L3区の間に有意差が認められた（図 IV-6, $p < 0.05$ ）。一方、サトウキビ乾物重は対照区、L1区、L2区、L3区でそれぞれ 359、364、370、386 g pot⁻¹ と順に大きくなる傾向を示したが、有意差はなかった（図 IV-6）。

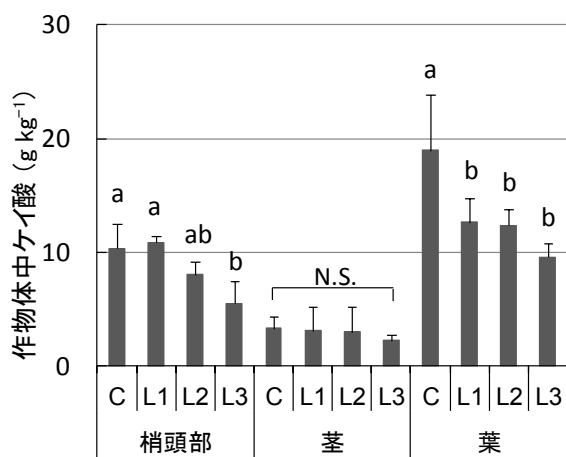


図 IV-5 各部位のケイ酸含量

※異英字間に有意差あり (5%水準)
 ※Cは対照区、エラーバーは標準偏差を示す。

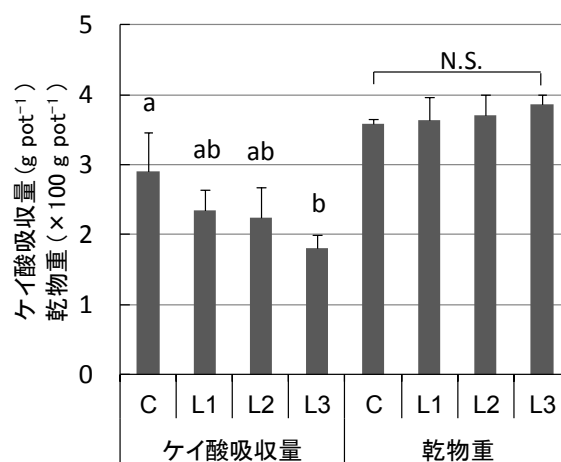


図 IV-6 ケイ酸吸収量と乾物重

※異英字間に有意差あり (5%水準)
 ※ケイ酸吸収量、乾物重共に3部位の合計を示す。
 ※Cは対照区、エラーバーは標準偏差を示す。

葉身中のカルシウムとケイ酸は、有意な負の相関があった (図 IV-7)。葉身中のマグネシウムとケイ酸は有意水準 10%ではあるものの、負の相関の傾向がみられた (図 IV-8)。

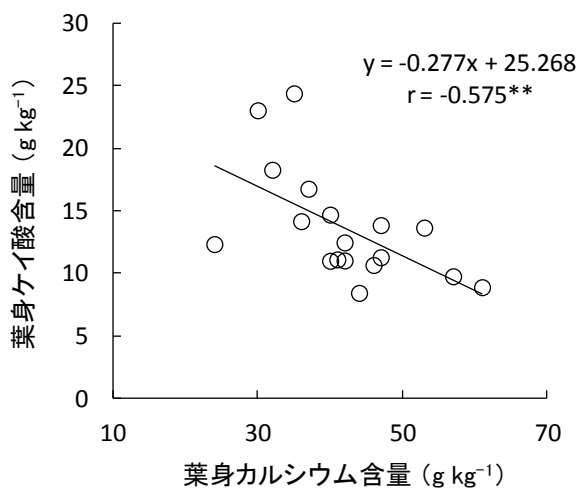


図 IV-7 葉身中のカルシウムとケイ酸の関係

(** : 1%水準で有意であることを示す)

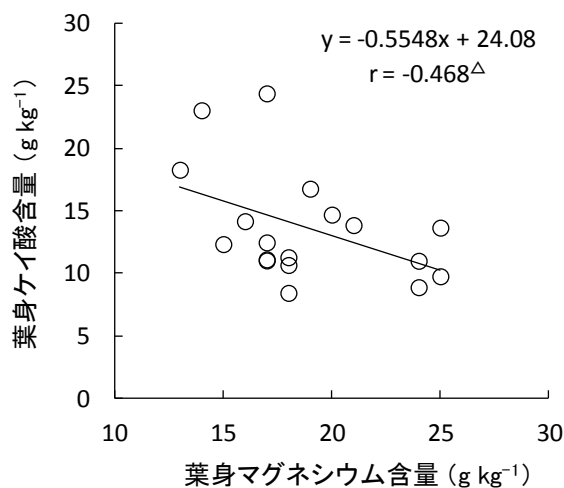


図 IV-8 葉身中のマグネシウムとケイ酸の関係

(Δ : 10%水準で有意であることを示す)

4. 考察

1) 北大東島ケイ酸肥沃度の実態

水稻をはじめとするイネ科の植物はケイ酸含有率が高く（高橋，1974；三宅，1993）、サトウキビもケイ酸を多量に吸収するため（大屋ら，1989）、サトウキビ増収に向けてケイ酸肥沃度向上のための研究は重要である。農林水産省が定めた地力増進基本指針では、水田の改善目標として可給態ケイ酸は 150 mg kg^{-1} としている（農林水産省，2008）。古江・永田（2000）は、鹿児島県徳之島でおこなったケイ酸圃場試験の結果からサトウキビ畑における可給態ケイ酸の土壌診断基準値として 200 mg kg^{-1} (AB法) を提唱している。沖縄県においては、大屋ら（1989）が可給態ケイ酸と土壌 pH (H_2O) および可給態ケイ酸とサトウキビ葉身ケイ酸含量に有意な正の相関があることを示した。その他、栽培分野でケイ酸質資材であるケイカル施用試験もおこなわれた（宮城ら，1979）。しかし、可給態ケイ酸とサトウキビ収量を直接評価した事例はなく、沖縄県内土壌におけるケイ酸肥沃度の実態について知見は少ない。

本研究の結果、北大東島の可給態ケイ酸は AB 法で平均 164 mg kg^{-1} であった（表 IV-1）。また、AB 法分析値 100 mg kg^{-1} 未満の圃場は全体の 45% に達した（図 IV-1）。古江・永田（2000）の可給態ケイ酸基準値（ 200 mg kg^{-1} ）と比較して、北大東島の可給態ケイ酸は低い実態が明らかとなり、ケイ酸肥沃度改善が必要と考えられた。

可給態ケイ酸とサトウキビ収量に有意な相関関係はなかった（図 IV-2）。この原因は、可給態ケイ酸のサトウキビ収量への影響が他の土壌要因より低かったことが想定される。第 II 章で北大東島のサトウキビ収量に影響する土壌要因を検証した際、複数の項目のうち可給態窒素と作土深が主な要因となった。その他の項目、例として土壌 pH (H_2O) は酸性矯正によるサトウキビの増収効果が圃場試験により確認されて

いるが（砂川・我那覇，1969；宮丸ら，2013）、第Ⅱ章の実態調査では収量との相関はなかった。これは、栽培管理、品種、土壌条件など様々な栽培条件が異なる母集団で収量への要因を検討する場合、影響の強い要因ほどデータとして抽出されやすいためと考えられる。このことから、今回の可給態ケイ酸とサトウキビ収量との関係においては、可給態ケイ酸よりも影響の強い要因が収量を規定したため相関がみられなかったと考えられた。一方で、ケイ酸がサトウキビ生産性に影響している報告例は多い（Ross *et al.*，1974；Anderson，1991；Savant *et al.*，1999；Meyer and keeping，2000；古江・永田，2000）。そのため、可給態窒素や作土深のようなサトウキビ収量に強く影響する要因が土壌改良などによって改善された場合、可給態ケイ酸が生産阻害要因になる可能性がある。従って、今後も実態調査によって生産阻害要因に変化がないか検証する必要があると考えられた。

2) AB法とPB法の比較及びAB法、PB法と土壌pH(H₂O)の比較

(1) AB法とPB法の比較

可給態ケイ酸の分析法であるAB法とPB法の分析結果を比較すると、有意な正の相関があり、近似式からAB法分析値で500 mg kg⁻¹までの範囲では、PB法分析値が高い値を示すことが判明した(図IV-3)。また、図IV-4より、土壌pH(H₂O)と可給態ケイ酸の相関はAB法とPB法で違いがみられた。両者の分析値は土壌pH(H₂O)が低いほど差が大きくなり、土壌pH(H₂O)が5.5未満の場合に有意差(1.0%水準)があった(表IV-2)。井上ら(2014)は非火山灰土壌(徳之島の赤黄色土)においてAB法とPB法分析値を比較したところ、両分析値に有意な正の相関があることと、酸性土壌の土壌pH(H₂O)が5.0未満ではAB法分析値に比べPB法分析値が高いことを報告している。本研究でも同様に、AB法とPB法は高い正の相関がある一方、土壌pH(H₂O)が酸性条件下では数値の乖離

が大きいことが明らかとなった。北大東島に分布する大東マージは強酸性を示すことが多いため（阿部・福士，1973；渡嘉敷，1993）、北大東島のケイ酸肥沃度の評価については、酸性土壌における可給態ケイ酸とサトウキビのケイ酸吸収量を検証し、AB法とPB法の適用性を検討する必要があると考えられた。また、PB法はケイ酸資材の施用履歴がある土壌のケイ酸肥沃度評価を目的としている（Kato and Owa, 1996；茂角ら，2002）。本研究において、AB法分析値よりPB法分析値が高い傾向にあったのは、北大東島においてケイ酸資材の施用履歴がなく、可給度の低いケイ酸塩を評価することがなかったためと考えられる。井上ら（2014）は、ケイ酸施用履歴が少ないサトウキビ畑ではAB法による評価も有効と報告している。沖縄県においてもサトウキビ畑でケイ酸資材を施用している圃場は少ないことから、AB法による可給態ケイ酸の評価は妥当と考えられる。一方で、今後、ケイ酸肥沃度向上のためにケイ酸資材の利用が進むことも考えられるため、まずはPB法の畑土壌への適用性やAB法とPB法の違いについてさらに検証する必要があると考えられた。

（2）AB法、PB法と土壌 pH（H₂O）の比較

McKeague and Cline（1963）は、ケイ酸の吸着は pH4～9 の範囲にわたって増加し、pH10 を超えると減少することを明らかにした。また、三宅（1993）は可溶性ケイ酸は土壌 pH の上昇に伴って増加すること、大屋・喜名（1989）は島尻マージにおいて可給態ケイ酸と土壌 pH（H₂O）に有意な正の相関があることを報告している。本研究においてもAB法、PB法分析値と土壌 pH（H₂O）に有意な正の相関があった（図IV-4）。加藤（1998）は、AB法は土壌の可給態ケイ酸量以外に土壌 pH によっても影響を受けるため、pH が異なる土壌の可給態ケイ酸量を比較する場合は留意する必要があると指摘している。前述の結果で示された酸性土壌でAB法とPB法の分析値に差が大きい点も踏まえて、土壌 pH（H₂O）

の変化に伴うサトウキビのケイ酸吸収への影響を詳細に検証し、適切な可給態ケイ酸の評価法を検討する必要があると考えられた。

3) 酸性矯正による可給態ケイ酸の向上が、サトウキビのケイ酸吸収に及ぼす影響

本研究で土壌 pH (H_2O) と可給態ケイ酸に有意な正の相関があることが判明した。これは、土壌 pH (H_2O) の高い土壌ではケイ酸肥沃度が向上し、サトウキビのケイ酸吸収が促進される可能性を示唆している。そこで、ポット栽培で酸性矯正が可給態ケイ酸やサトウキビ生育、ケイ酸吸収量に及ぼす影響を検証した。その結果、実態調査と同様に土壌 pH (H_2O) が高いほど、可給態ケイ酸は高かった (表 IV-3)。しかし、作物中のケイ酸含量およびケイ酸吸収量は、土壌 pH (H_2O) が高いほど低下した (図 IV-5、図 IV-6)。サトウキビのケイ酸吸収量が低下した原因は判然としないが、植物の養分吸収において 1 つの成分が高濃度に存在する条件では、他成分の吸収が妨げられる拮抗作用があることが知られている (原田・篠, 1970; 原ら, 1977; 松村ら, 2013)。本試験において、酸性矯正はカルシウムとマグネシウムを含む苦土石灰でおこなった。そのため、土壌 pH (H_2O) が高い処理区ほど土壌中にカルシウム、マグネシウムを多く含む。津野ら (1984) は、水稻の葉身中ケイ酸とカルシウムに有意な負の相関がみられたことから、両者の拮抗関係を指摘している。一方、養分の拮抗関係はカチオン相互あるいはアニオン相互で荷電の強さが同じ場合ほど強いとされている (農文教, 2012)。土壌中のケイ酸は荷電を持たない分子状ケイ酸 (モノマーケイ酸) の形態で存在しているため (三宅, 1993; 平舘, 2012)、本試験の結果は拮抗作用によるものとは考えにくい。Anderson (1991) はサトウキビ葉中のケイ酸含量とマグネシウム含量に有意な負の相関があったことを指摘した。その理由として、ケイ酸とマグネシウムの拮抗作用について指摘する以外に、サトウキビ生育が向上するに伴って

ケイ酸吸収量は増加するものの、マグネシウム吸収量は増加せず、結果として、葉中ケイ酸含量に比べてマグネシウム含量が低くなる希釈効果のためとしている。本研究においても葉身中のケイ酸含量とカルシウムは有意な負の相関があり、マグネシウムもその傾向がみられた（図IV-7、図IV-8）。一方、乾物重は処理区間で差がないことから、マグネシウムの希釈効果は確認できなかった。これらのことから、ポット試験において土壌 pH (H₂O) が上昇するに伴いケイ酸吸収量が低下した原因は判然としないものの、土壌 pH(H₂O)、カルシウムおよびマグネシウムが何らかの影響によってサトウキビのケイ酸吸収を抑制したと考えられた。

本研究で、土壌 pH (H₂O) の上昇がサトウキビの可給態ケイ酸吸収を抑制する可能性が示唆されたことから、過剰な酸性矯正には留意する必要がある。そのため、今後は、土壌 pH (H₂O) の変動による可給態ケイ酸やサトウキビのケイ酸含量について検証する必要がある。また、今泉・吉田（1958）は可給態ケイ酸の定義を作物が吸収したケイ酸含量との間に有意な相関がある土壌中のケイ酸含量としている。そのため、サトウキビのケイ酸含量との関連が強い可給態ケイ酸の評価方法を検討する必要がある。井上ら（2014）は AB 法より抽出力が低い 0.01 M 塩化カルシウム溶液による可給態ケイ酸分析の検討について述べている（井上ら，2014）。さらに、サトウキビのケイ酸吸収や根のケイ酸吸収機構についても詳細な検証が必要になると考えられた。

5. 要約

ケイ酸はサトウキビにとって最も多く吸収される養分であり、収量・品質の向上を促す。一方、北大東島のケイ酸肥沃度の実態やサトウキビ収量との関係は明らかではない。また、可給態ケイ酸の分析方法は酢酸緩衝液抽出法（AB法）とリン酸緩衝液抽出法（PB法）があるが、北大東島の土壌において両法の違いは検証されていない。そこで、

第Ⅱ章で採取した土壌を用いて可給態ケイ酸の実態とサトウキビ収量との関係性を評価した。また、AB法、PB法の分析値およびこの2法と土壌pH(H₂O)を比較することによりその特性を調べ、さらに酸性矯正した土壌を用いてサトウキビをポット栽培し、土壌pH(H₂O)が可給態ケイ酸とサトウキビ生育に及ぼす影響を評価した。その結果、北大東島サトウキビ圃場の可給態ケイ酸はAB法で平均164 mg kg⁻¹であり、100 mg kg⁻¹未満の圃場割合は45%とケイ酸肥沃度が低い実態が明らかとなった。また、可給態ケイ酸とサトウキビ収量に相関関係は認められなかった。この理由は判然としないものの、サトウキビ収量へ強く影響するほかの要因があったためと考えられた。AB法とPB法の分析値は有意な正の相関があり、さらに両分析値は土壌pH(H₂O)とも有意な正の相関が認められた。一方、PB法分析値はAB法分析値より高い値を示すことと、酸性条件で分析値の差が大きくなることが判明した。このため、両分析法の酸性土壌における適用性やサトウキビのケイ酸吸収との関係を検証する必要があると考えられた。ポット栽培試験の結果、土壌pH(H₂O)の上昇に伴い可給態ケイ酸は増加したが、サトウキビのケイ酸吸収量は低下した。これは、酸性矯正による土壌pH(H₂O)とカルシウムおよびマグネシウムの増加が、ケイ酸吸収に何らかの影響を及ぼした可能性が考えられた。今後は、サトウキビのケイ酸吸収に関しては土壌pH(H₂O)の変動による可給態ケイ酸への影響の検討以外に、AB法、PB法以外の分析方法の適用や、可給態ケイ酸の形態およびサトウキビ根のケイ酸吸収機構にも詳細な検証が必要になると考えられた。

IV. 総合考察

1. 沖縄県におけるサトウキビ生産性の低迷について

1) 世界のサトウキビ生産

1960年代、世界のサトウキビ主要生産国であるブラジル、インド、中国におけるサトウキビの収量は約 45 Mg ha^{-1} であったが（図 V-1）、その後、徐々に増加し続け 2000年代以降は約 1.6 倍の 70 Mg ha^{-1} に達している。一方、日本に目を転じると 1960年代の収量はおよそ $60 \sim 70 \text{ Mg ha}^{-1}$ で推移しているが、2000年代以降は 50 Mg ha^{-1} を割り込む年もみられるようになった。このように、主要生産国でサトウキビ収量が増加する中、日本は特異的に低下傾向にある。

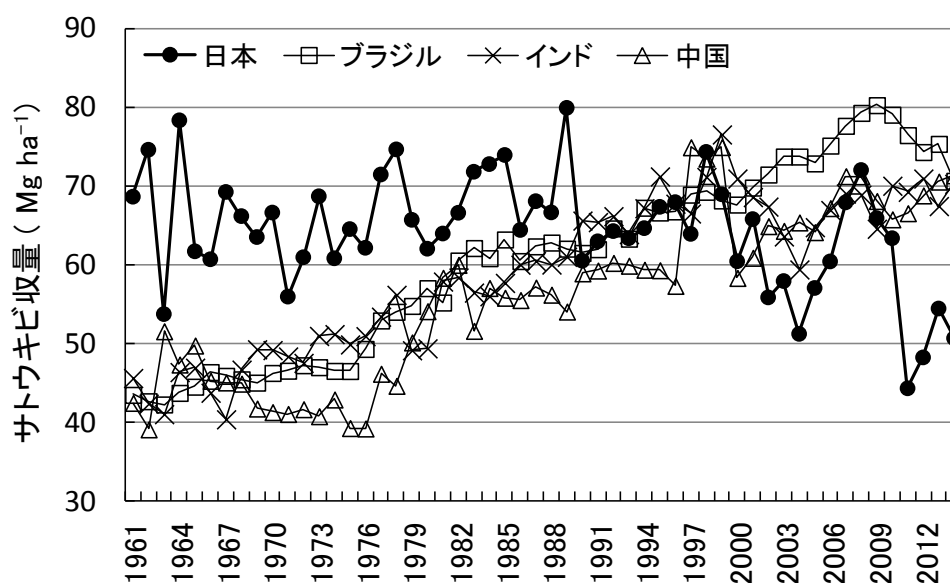


図 V-1 日本およびサトウキビ主要生産国の収量推移
(FAOSTAT よりデータを参照)

2) 国内主要農産物とサトウキビの比較

国内主要農産物の生産性はどうか。コメ、コムギおよび甘味資源作物であるテンサイの収量推移を調べると、1961年の収量を100とした場合、2000年代以降のコメ、コムギはおよそ130~150まで増加、テンサイは250にまで達している（図IV-2）。一方、サトウキビの収量は前述の通り低迷しており、2000年代以降の平均は85である。このように、国内主要農産物の収量は着実に増収する中、サトウキビのみが低下している。

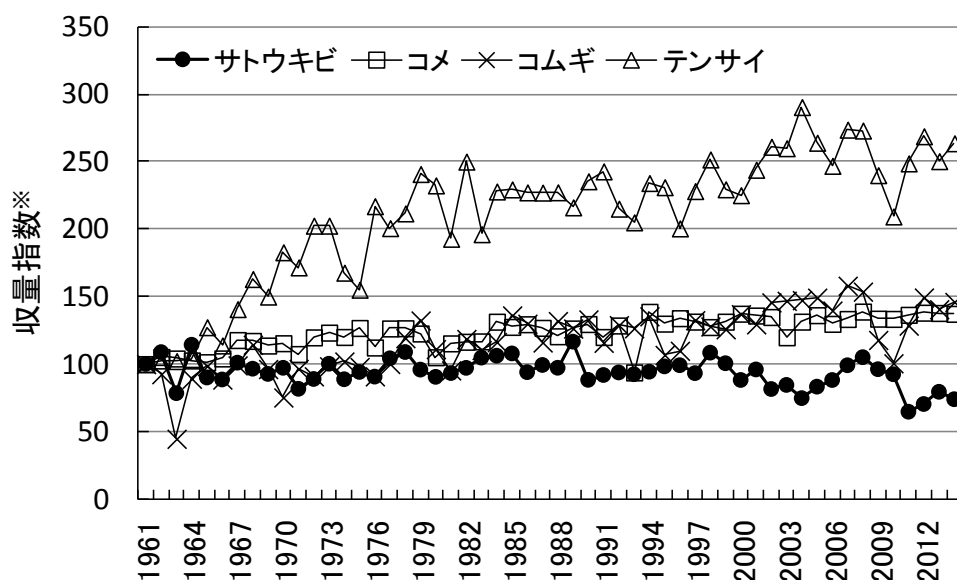


図 V-2 サトウキビと国内主要農産物の収量推移

(※：1961年を100とした場合の指数、FAOSTATよりデータを参照)

日本における主要なサトウキビ生産地は鹿児島県と沖縄県であり、2015年のサトウキビ生産量は鹿児島県で50.5万トン、沖縄県で68.9万トンである（鹿児島県，2016；沖縄県，2016c）。鹿児島県、沖縄県の両県ともにサトウキビ生産性は低迷しており（井上，2017；沖縄総合事務局，2016）、解決すべき課題となっている。本研究では、サトウ

キビ生産量の多い沖縄県について焦点をあてる。

3) 沖縄県のサトウキビ収量はなぜ低迷しているのか

サトウキビは多照多雨条件での栽培に適する作物である（杉本，1999）。C4植物であるサトウキビは光合成能力が高く（川満，2004）、光飽和点が高いため光が強くなるに伴って光合成速度は増加し続ける（宮里，1986）。そのため、熱帯・亜熱帯における強い日射条件下で高いバイオマス生産を示す（寺内，2002）。サトウキビの芽は8℃以下の低温では伸長せず、25℃以上で急速に伸長する（宮里，1986）。沖縄県は湿潤亜熱帯のアジアモンスーンに位置し、年平均気温は23.3℃、年平均降水量は2,250 mmであることから（気象庁，2017a）、サトウキビの栽培条件に適した気候である。沖縄県のサトウキビ収量が低い理由として、サトウキビ栽培地の北限に近く気温が低いという声を聞くこともあるが、ブラジルのサトウキビ主産地であるサンパウロ州の年平均気温は20.2℃と沖縄県より低い（WMO，2017）。そのため、沖縄県は少なくともブラジルと同程度の収量が得られる栽培環境ではあると考えられる。

また、沖縄県ではサトウキビ生産性向上のため、1972年の本土復帰以降、沖縄振興開発計画の一環として農地基盤整備が始まり、現在も進行している（沖縄県，2017）。2006年には沖縄県さとうきび増産プロジェクトが策定され、地域に即した生産対策として農地集約、機械化一貫作業体系の導入や受委託組織の育成が取り組まれてきた（沖縄県，2015b）。これらのことから、サトウキビ生産のための基盤整備や生産体制の充実が図られてきたものと考えられる。

一方、サトウキビ低収要因の解明とそれに対する対策はどうだろうか。杉本ら（2003）は南西諸島のうちサトウキビ収量が極端に低い地域における調査結果から、低収要因は強風・干ばつ・低肥沃土壌によると指摘している。これらに対する研究・対策として、サトウキビの

品種改良・導入により台風・季節風等の対策がなされた。また、かん水技術の開発やかんがい施設整備の実施により干ばつや少雨への対応がとられた。低肥沃土壌についても肥料施用量や有機物施用などの様々な試験がおこなわれ、増収技術が開発されてきた。しかし、品種改良で開発された新品種は種苗管理センターから配布され、かんがい施設整備によって容易にかん水できるよう抜本的な対策が施されるようになった反面、低肥沃土壌の改良は農家の自主的な対応に依存したままである。沖縄県の農家は、いわゆる「土づくり」という個々の営農努力のみで劣悪な不良土壌と向き合わざるを得ないのが現状となっている。そのため、低肥沃土壌への対策は、個々の農家で対応可能な対策しかなされず、肥培管理の徹底や有機物施用のように画一的な土づくり指導の範疇に留まり、その場限りの対処療法的な対応に終始している。

本研究では土壌肥沃度がサトウキビ生産性に与える影響について検証をおこなっている。土壌肥沃度とは、「新版 土壌肥料用語辞典」によると「地力と類似語であるが、地力が総合的な土壌の生産力を指しているのに対し、土壌肥沃度は自然肥沃度と養分の豊否を中心とした化学的側面を重視しており、特に地力窒素（無機化して有効化する窒素）などの潜在的な土壌の養分供給力に重きをおいている」としている（農文教，2012）。松中（2003）は、土壌肥沃度について「作物の根を支える条件を備え、その根を通して作物の生育に伴って必要となる量の水分と養分を作物に供給する土壌の能力」と考え、土壌肥沃度を耕地の作物生産力規制要因の一つと位置づけた。これらのことから、本研究における土壌肥沃度は、作物、特にサトウキビの根による養水分吸収を妨げず、サトウキビの生産に必要な養分を供給する土壌の機能として考えた。また、土壌肥沃度の定量的な評価は地力増進基本指針の改良目標値や（農林水産省，2008）、沖縄県土壌診断基準値案（沖縄県，1979）を指標とした。

土壌肥沃度がサトウキビ生産性に影響する事例として、ブラジルのサトウキビ生産性が向上した背景を挙げるができる。ブラジルの主なサトウキビ産地は中南部と北・北東部の 2 つに大別され、中南部地域はサトウキビ栽培に適した肥沃な農地が広がっている（農畜産業振興機構，2010）。清水（2004）の報告では、地域別生産量は 1975 年には中南部 62%、北・北東部 38%の割合であったが、2004 年には中南部 85%、北・北東部 15%となり、土壌肥沃度の高い中南部の比率が高まっている。このことから、ブラジルのサトウキビ収量が増加した要因の一つに、生産性の高い肥沃な土壌が広がっている中南部地域における生産の拡大が寄与したと考えられる。

以上のことから、サトウキビ生産性に土壌肥沃度が影響していると考えられるものの、沖縄県では低肥沃土壌の改善に対して抜本的な対策がおこなわれていない。これが、サトウキビ生産性が恒常的に低迷している原因の一つと考えられる。

4) 北海道のテンサイにおける生産性向上対策の事例

サトウキビと同じ甘味資源作物で土地利用型作物であるテンサイは、1960 年代から現在に至るまでに収量は約 2.5 倍に向上した（図 V-2）。テンサイでは生産性向上の対策が数多く実施されている。農地集約化（北海道，2011）や大規模機械化作業体系の導入（北海道てん菜協会，2016）が進められ、農業基盤整備や作業機械化による効率化も図られてきた。また、テンサイの生産性が向上した理由として品種改良の役割も大きいとも指摘されている（黒沢，1994）。これらのように生産性向上のための農地集約、大規模機械化、品種改良は、沖縄県においても同類のものはみられる。一方、北海道でおこなわれた様々な取り組みのうち、沖縄県で取り組まれていない対策としては、低肥沃土壌の問題点を抜本的に改良する土層改良事業の実施が挙げられる。

5) 土層改良事業の実施状況

土層改良とは、広義の意味では農用地の土層状態を作物生育と農作業に適するように、持続的に改善するあらゆる処理として定義される（内山，1983）。土壌改良という言葉と似ており、重複する部分も多いが、土壌改良は主に土壌の化学性を改良する意味で使われることが多いのに対し、土層改良は土壌の化学性に加えて物理性の改良も含まれる（内山，1983）。北海道の土壌は22種類もの土壌群が分布しているが（小原ら，2016）、その中で、酸性土壌や排水不良の重粘土が存在し、農業上多くの問題を抱えることから改善が必要とされた（岩崎，1968）。北海道では昭和初期、食糧確保を目的に国費で土地改良事業が重点的に行われ、その一環として土層改良事業が実施された（岩崎，1968）。2008年には土層改良事業の採択面積は1,500 haを超える規模に及んだ（赤坂，2013）。このように、北海道では不良土壌の改善のために、行政が主体となって土層改良事業を継続的に取り組んできた。しかし、沖縄県において土層改良事業は実施されておらず、土壌肥沃度改善は農家任せであるため、対策として不十分なことも多々みられる。これが、北海道と沖縄県における土壌肥沃度改善のための対策の大きな違いの一つであり、効果的な対策実施の有無がテンサイとサトウキビにおける収量向上と低迷に現れたと考えられる。

2. サトウキビ生産性向上のために何をすべきか

サトウキビは土地利用型の作物であり、労働集約型の作物と異なり土壌の影響が強く現れる。宮丸（2013）は沖縄のサトウキビ生産性が低迷している要因として、土壌肥沃度の低さが一因と指摘している。テンサイの収量が向上した北海道では不良土壌の改良を農家だけでなく、行政による土層改良事業により抜本的な改善に取り組んできた。農林水産省の土地改良事業計画基準には、土層改良計画にあっては生

産力を制限あるいは阻害するような土壌条件を改良するための計画としなければならないと定められている（農林水産省，2006）。また、内山（1984）は土層改良計画の基本的要素を決定するために、土壌調査を念入りにおこなう必要性を指摘している。すなわち、土層改良事業を実施する前には、対象地域の土壌の「何が」生産阻害要因になっているかを実態調査によって把握し、その結果に基づいて計画を策定することが重要である。

沖縄県に分布する代表的土壌は国頭マージ（赤黄色土）、島尻マージ（暗赤色土）、ジャーガル（陸成未熟土）である。これら3土壌型の主な問題点は、国頭マージでは強酸性、島尻マージでは土層の浅さ、ジャーガルは排水不良などであり、共通して有機物含量が低いことである（亀谷，2006；儀間，2016）。これらの問題点を個別に改良してサトウキビ収量が向上したことは、これまでの試験研究で明らかになっている。例えば、酸性土壌の改良により10～25%増収すること（砂川・我那覇，1969；宮丸ら，2013）、心土破碎による排水改善で10%増収すること（新里ら，2013）、堆肥の連用で3～22%増収すること（後藤・永田，2008）が挙げられる。しかし、サトウキビの生産環境には様々な問題が同時多発的に発生しており、その数ある問題のうちの「何が」強く生産を阻害しているのかは、過去のデータから一概に決められない。そのため、土層改良事業を実施するためには「何が」主要な生産阻害要因なのかを明らかにすることが必要となる。

沖縄県のサトウキビ生産性を向上させるためには土壌肥沃度の抜本的な改善が必要であり、その対策は農家個人だけではなく行政が主体となる土層改良事業のように広域的な対策が解決の早道になると考える。しかし、その抜本的な対策を実施する前には、対象地域において土壌の「何が」主要な生産阻害要因なのかを詳細に検討しなければならない。

3. 北大東島の土壌実態及び低収要因の解明と対策

沖縄県の北大東島は、サトウキビ栽培に依存している離島地域の一つで、大規模機械化農業の先進地である。北大東島の農業産出額（6.4億円）に占めるサトウキビの割合は74%（4.9億円）である（農林水産省，2017）。2015年における圃場整備率は沖縄県全体では60%であるのに対し、北大東島では89%と高く（沖縄県，2017）、5 ha以上農地を経営している大規模経営農家割合は49%（農林水産省，2017）、機械化収穫面積率は100%と大規模機械化農業が定着している（沖縄県，2016d）。このように、北大東島は沖縄県が推進している圃場基盤整備、農地集約、機械化一貫作業体系の導入が実現している島である。また、かんがい施設整備の実施や大東諸島向け新品種の導入もおこなわれており（宮城ら，2009；内藤，2012；伊禮，2012；沖縄県，2015c）、サトウキビ生産性向上の対策が数多く取り入れられてきた。しかし、土壌肥沃度改善のための対策は農家個々の土づくりに任せられている。北大東島の土壌はその約7割が大東マージとよばれる赤黄色土である。本土壌は重粘質で下層土はち密になりやすく、土壌pHは強酸性を示す場合が多い（阿部・福士，1973；渡嘉敷，1993；宮丸，2013）。北大東島の過去30年間（1986/87年～2015/16年）のサトウキビ平均収量は42.3 Mg ha⁻¹であり、沖縄県の平均収量62.5 Mg ha⁻¹に比べおよそ30%低く推移している（沖縄県，1986-2016）。サトウキビ生産性向上のための多くの対策がとられる中で、低収状態が恒常化しているのは低肥沃土壌に起因していると考えられる。

1) 北大東島サトウキビ低収要因を検証するための解析方法について

そこで、北大東島における畑土壌の実態を調査し、土壌の生産阻害要因を検討した（第II章）。調査の結果、サトウキビ収量と有意な相関があった項目は、可給態窒素、可給態リン酸、腐植、作土深であり（表

Ⅱ-1)、有意な負の相関があった項目は植え付け月だった。甘蔗糖度と有意な正の相関があったのは交換性マグネシウムと土壌 pH (H₂O) であった (表Ⅱ-1)。これらの解析結果により、サトウキビ収量および甘蔗糖度と関係する要因が判明した。一方、本研究で明らかにしたいことは、「サトウキビ収量や甘蔗糖度に最も強く影響する要因とその土壌条件」である。土壌の生産阻害要因をすべて改良していくという結論では、数多くの対策が必要となる。これでは、対策を講じるために時間と予算が多く必要となり喫緊の問題解決につながらない。そのため、生産性に影響する要因の中で、最も強く影響する項目を明らかにし、その対策を優先的にこなうことが生産性向上への近道だと考えた。また、土壌改良のためには定量的な指針が求められる。さらに、土壌条件や栽培条件、圃場管理の仕方などが不均一な母集団の解析には、調査したデータ間の相互作用も考慮しなければならない。これらのことから、調査結果を更に多変量解析にて評価した。

実態調査結果などから目的とする現象の変動要因を明らかにする研究・報告は多い。川俣(1979)はナシの硬化障害の要因説明、関ら(2000)はキュウリ栽培土壌の生産性評価に主成分分析を用いた。樗木・堀口(2000)はソラマメ種皮褐変障害(しみ症)の原因を順位相関係数で明らかにした。横田・大森(2009)はアスパラガスハウス土壌の低収要因をクラスター解析で土壌を類型化し、分類されたそれぞれのグループの土壌化学性を評価した。しかし、これらの解析方法では本研究で明らかにしたいサトウキビ収量や甘蔗糖度に最も強く影響する要因は示されたとしても、低生産性土壌の土壌条件は定量化できない。そこで、多変量解析の一つである分類回帰木解析(CART)を用いた。CARTは、目的変数の変化を複数の説明変数により説明する手法で、目的変数がカテゴリー(区分)の場合は判別分析と同等の機能を持ち、目的変数が数値の場合は重回帰分析と同等の分析が可能である(加藤ら, 2003; 包・對馬, 2009)。De'ath *et al.* (2000)は、CARTは重回帰解

析、分散分析、回帰分析、対数線型モデル、線形判別分析の代替として使用できるとしている。包・對馬（2009）は、回帰木解析の利点として、①数値、区分、順位など幅広いデータを取り扱えること、②データの線形性を確保するための変換が必要ないこと、③交互作用も含めて結果が解釈しやすいことを挙げている。

これらのことから、サトウキビの生産性に影響する要因を検討するために CART を用いることが適切と考えた。

2) サトウキビ生産性に影響する土壌要因と土壌条件

CART を用いて解析した結果、サトウキビ収量にはまず可給態窒素が影響し、次いで作土深が関係することが判明した（図 II-1）。また、サトウキビ収量が低い土壌は可給態窒素が 16.5 mg kg^{-1} 未満かつ作土深 29 cm 未満であることも明らかとなった。これにより、北大東島のサトウキビ収量を増加させるためには、可給態窒素と作土深に重点を置いた土壌改良が必要であることが判明した。また、その土壌改良は可給態窒素を 16.5 mg kg^{-1} 以上かつ作土深を 29 cm より深くすることが目安となる。沖縄県のサトウキビ畑における土壌診断基準値では、作土深の深さは 40 cm 以上とされているが、可給態窒素の基準値は設定されていない。宮沢ら（1981）はサトウキビの生育における可給態窒素の重要性を指摘し、宮丸（2013）は診断基準策定の必要性に言及している。本研究では、可給態窒素の重要性について生産現場において確認することができ、可給態窒素の診断基準値策定に向けて一定の役割を果たすことができたと考えられた。

サトウキビ収量と同様に甘蔗糖度へ影響する土壌要因を検証した結果、まず交換性マグネシウムが影響し次いで土壌 pH (H_2O) が影響した（図 II-5）。また、甘蔗糖度の高い圃場の土壌は交換性マグネシウムが $3.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 以上かつ土壌 pH (H_2O) が 7.2 未満であることが明らかとなった。サトウキビの取引価格は 1994 年の品質取引制度の導入によ

りサトウキビ原料茎重と甘蔗糖度で決定される。そのため、甘蔗糖度もサトウキビ生産性を考慮する上で重要な要素である。サトウキビの品種改良により高糖型の品種が導入され、甘蔗糖度が向上するよう対策がおこなわれているが、土壌管理によってもさらに甘蔗糖度は増加する可能性が示唆された。

3) サトウキビ収量および甘蔗糖度を改善する対策

(1) 可給態窒素の改善対策

収量に影響する土壌要因の一つは可給態窒素であった。Yanai *et al.* (2014) によると、熱帯地域における土壌窒素の状態は作物生産の最大の制限要因の一つと指摘されている。本研究では、可給態窒素と相関があった土壌化学性は、土壌中の有機物含量の目安となる腐植であった。杉田ら (2007) は、腐植が可給態窒素と有意な正の相関があることを報告し、Meyer *et al.* (1983) は、土壌有機物量と無機化窒素量に正の相関があることを示している。このように、可給態窒素の増加には有機物施用が有効である (片峯ら, 2000; 青山ら, 2002; 高間・廣澤, 2008; 宮丸ら, 2012)。有機物施用により可給態窒素が増加する理由は、有機物の施用によるバイオマス窒素・炭素量の増加が考えられる。可給態窒素は土壌微生物バイオマスの炭素と窒素に正の相関がある (関ら, 1996; 坂本, 1998; 宮丸ら, 2012)。Kaur *et al.* (2005) は有機物施用で土壌微生物バイオマス炭素・窒素量が増加したと報告している。一方、Holt and Meyer (1998) は、サトウキビが長期間栽培された土壌では、サトウキビ栽培履歴がない土壌に比べ微生物バイオマス量は有意に低かったことを報告している。また、Pushpa *et al.* (2013) はサトウキビ栽培を 7 年間おこなった結果、微生物活性の低下を確認している。このことは、典型的なサトウキビのモノカルチャー地帯である北大東島において (福仲ら, 1999)、長期間のサトウキビ栽培が微生物バイオマス量の減少を招き、可給態窒素を低下させてい

る可能性を示唆している。

これらのことから、北大東島のサトウキビ収量向上には、まず有機物を施用することで土壤微生物バイオマス炭素・窒素の増加を図り、可給態窒素を富化させることが必要であると考えられた。

(2) 作土深の改善対策

サトウキビ収量に影響するもう一つの土壤要因は、作土深であった。サトウキビは深根性の作物で、根は表層から地下 1 m まで伸長し、その 60~70%は 20 cm 以下の深さに分布している(山城, 1968; 福澤ら, 2009)。本研究では、作土深を表層から耕盤層が出現するまでの深さとし評価した。耕盤層は、ロータリで耕起される作土層と耕起されない下層土の境界面に形成される非常に硬い層とされる(松中, 2004)。沖縄県に分布している土壤は粘土含量が高く、硬化しやすい特性がある(浜崎, 1979; 登川・寺沢, 1982; 翁長・吉永, 1988; 渡嘉敷, 1993)。ロータリによる耕起の影響に加えて、収穫時に使用するハーベスタによりち密化していることが指摘されている(上野ら, 2008; Péreza *et al.*, 2010; 新里ら, 2013)。北大東島の機械化収穫面積率は 100%であり、耕耘や機械収穫によって土壤が圧密を受ける機会が多い。一般に、耕盤を破壊する対策は深耕や心土破碎である。本研究では、作土深の深さは心土破碎を複数回実施することで深くなった(図 II-4)。しかし、複数回の心土破碎で作土深は深くなるものの、その深さは 15~35 cm の範囲でばらつきがあることも明らかとなった。これは、心土破碎をおこなうトラクタの機種・性能やトラクタの速度、心土破碎前の土壤硬度等によって影響されていると考えられた。

これらのことから、サトウキビ収量を向上させるために作土深を深くすることが重要であることが明らかとなった。しかし、農家個人でおこなう心土破碎には限度があり、土壤硬度が硬すぎた場合、十分に破碎できないおそれもある。サトウキビ栽培における機械化一貫作業

体系が進む中、効果的な心土破碎方法を取り入れた土づくりの方法を新たに検討する必要があると考えられた。

(3) 甘蔗糖度の改善対策

甘蔗糖度に影響する土壌要因は、交換性マグネシウムと土壌 pH (H₂O) であった。Anderson (1991) は土壌中のマグネシウムと糖生産量に有意な正の相関があることを示しており、本研究でも同様な結果が得られた。一方、交換性マグネシウムが 3.8 cmol_c kg⁻¹ 以上の圃場において、土壌 pH (H₂O) が 7.2 以上の場合、甘蔗糖度は低下する傾向があった (図 II-5)。この原因は判然としないが、土壌 pH (H₂O) が 7 以上では光合成に関与する鉄やその他の微量元素が不溶化し、サトウキビへの吸収が抑制されることが関係すると推測される (樋口, 2003; 松中, 2003)。Naik (1988) は土壌 pH が 7.8~8.6 を示す土壌でサトウキビの鉄欠乏による黄化がみられたことを報告している。このため、過度な土壌 pH (H₂O) の上昇は甘蔗糖度の向上に好ましくないことが推測された。

これらのことから、甘蔗糖度の向上のためには交換性マグネシウムに着目した土壌改良が必要である。一方、土壌 pH (H₂O) が高すぎる場合は、甘蔗糖度が低下する恐れもあるので、土壌改良の前には土壌診断による化学性のチェックが必須である。また、土壌 pH (H₂O) の増加で甘蔗糖度が低下する原因の一つに、後述するケイ酸吸収と関連する可能性が考えられることから、甘蔗糖度に影響する土壌要因について、より詳細に検証する必要があると考えられた。

4. 糖蜜施用によるサトウキビ生産性の向上

II 章の結果から北大東島のサトウキビの収量を向上させるためには、可給態窒素の増加と作土深を深くする対策が必要であることが判明した。作土深を深くする対策は心土破碎方法の検討が必要ではあるもの

の、心土破碎のためのリッパやサブソイラ、プラソイラのような土木機械・農機具は島内にあるため、心土破碎の実施について支障はない。一方、可給態窒素を向上させるためには堆肥や緑肥等の有機物施用が効果的であるが、北大東島は畜産業がないため堆肥生産量が少なく、有機物を施用する対策が速やかにおこなえない。緑肥は堆肥と同等の地力増進効果を持つが（宮丸ら，2012）、緑肥栽培のための休閑期間を必要とするため、夏植え栽培しか利用できない。夏植え栽培の面積が約1割の北大東島では、緑肥を有機物源として活用する機会は少ない。そこで、第Ⅲ章では堆肥や緑肥に代わる有機物源として製糖工場から発生する糖蜜に着目し、圃場試験をおこなった。

糖蜜施用の結果、2作合計のサトウキビ収量は対照区と比べ16～28%増加した（図Ⅲ-1）。糖蜜はカリウム含量が多いことから、交換性カリウムの増加による甘蔗糖度の低下が懸念されたが、2作とも低下はみられなかった（表Ⅲ-3）。さらに、糖蜜施用によって農家の収益性は34～54万円（haあたり・2作合計）向上した（表Ⅲ-4）。糖蜜施用によりサトウキビ収量が向上した理由は、可給態窒素の増加による原料茎数の増加と考えられた（表Ⅲ-3）。また、井上・橋口（2011b）は収穫茎中の窒素含有率を高めることは、次作の生育向上につながることを報告している。本研究で、株出し栽培においても増収効果がみられたのは、春植え時の糖蜜施用により窒素肥沃度が向上し、春植え収穫茎中の窒素含量が高まることで株出し栽培時の茎数増加につながったためと考えられた。

糖蜜に含まれる固形物の50%以上はスクロースであることが報告されている（Wynne and Meyer, 2002; 神谷ら, 2004）。Sakamoto and Oba（1991）は、施用された有機資材中の易分解性画分（熱水可溶有機物、炭水化物および粗タンパク）が、微生物バイオマス形成に最も影響していることを報告している。また、微生物バイオマス量は可給態窒素と有意な正の相関がある（坂本・大羽, 1993; 関ら, 1996; 宮丸ら,

2012)。これらのことから、糖蜜を施用して可給態窒素が増加した理由は、スクロースのような易分解性有機物を施用したことによる微生物バイオマス量の増加であると考えられ、糖蜜はサトウキビ収量、土壌肥沃度、農家収益性を向上させる有効な資材であることが明らかとなった。

第Ⅱ章と第Ⅲ章の結果から、サトウキビ収量の向上のため可給態窒素を増加させることが必要であり、堆肥等の有機物源が少ない北大東島においては、製糖副産物である糖蜜の施用が効果的であることが示された。

サトウキビ栽培において堆肥施用量は春植えて 30 Mg ha⁻¹、夏植えて 45 Mg ha⁻¹とされている（沖縄県，2014b）。しかし、亀谷（2006）は沖縄県内の定点調査結果から土壌中の全炭素含量が 2%を下回る地点が多く、有機物の施用が進展していないことを指摘している。農家が堆肥を施用しない背景として、高齢化に伴い堆肥施用にかかる労力負担の増加が原因の一つと考えられる。辻ら（2002）によると、農家に対して堆肥利用上の問題点についてアンケート調査をおこなった結果、60代以上農家の 62%が「散布に労力がかかる」と回答している。沖縄県における 60 歳以上の農業従事者の割合は全従事者の 56%を占め、全国割合の 52%よりやや高い（沖縄県，2016b）。加えて、北大東島は 1 農家が所有している耕地面積は広く、5 ha 以上の農地を所有している農家が全体の 49%を占め（農林水産省，2017）、広い面積に堆肥を施用しなければならない状況が伺える。本研究において、農家への聞き取り調査をした際、収穫や植え付けは機械化され作業効率が進んだ一方、肥料や堆肥の施用が重労働だと話を聞くことがあった。これらのことから、有機物施用の問題点として、散布労力の軽減が必要であることが考えられる。

一方、本研究の結果を受けて、2017 年から北大東島では糖蜜散布体制が整えられた。これは、農家から散布依頼を受けた業者が製糖工場

で糖蜜をトラックにて引き取り、荷台のタンクに入った糖蜜を圃場で自然流下にて散布するというものである。この体制であれば農家は有機物施用に伴う過大な作業負担がないまま、サトウキビ生産阻害要因の一つである可給態窒素を改善できる。さらに、本研究の結果から糖蜜を施用した年は基肥の施用が必要ないことも明らかになったため、基肥コストの削減も可能となった。本研究により糖蜜の施用効果が明らかとなり、北大東島にて糖蜜の散布体制が構築されたことで、可給態窒素の向上対策にも一定の目途が立った。

近年のサトウキビ品種改良により株出し萌芽性が向上した品種が開発されたこと（謝花ら，2009）、ベイト剤によるメイチュウ害の抑制技術が確立したことで（河崎ら，2011）、株出し栽培面積が増加している。これは、緑肥を鋤込める夏植え栽培の機会が少なくなることを意味している。沖縄県に分布する土壌は、有機物含量が乏しいため有機物施用による地力増進が必要である（亀谷，2006；儀間，2016）。一方で、沖縄県内で発生する堆肥等の流通可能有機物量は、農家が施用するために必要な有機物量を下回ることが指摘されている（橋本ら，2004）。このため、堆肥や緑肥に代わる有機物源が求められていた。2016年における沖縄県内で発生した糖蜜は約2.4万トンで、主に飼料や工業用アルコールの原料として販売された（沖縄県，2016a）。本研究では糖蜜施用量1Mgあたり5～9千円の農家収益性向上が認められた。そのため、各製糖工場において糖蜜1Mgあたりの販売額が5～9千円未満である場合は、サトウキビ圃場へ還元する方が製糖工場管内のサトウキビ生産性および農家収益の向上、さらに持続可能な農業の実現に有効と考えられた。

5. 北大東島におけるケイ酸肥沃度の実態とサトウキビ生育に及ぼす影響

第Ⅱ章でサトウキビ収量に影響する主な土壌要因は、可給態窒素および作土深であることが明らかとなった。しかし、サトウキビ収量と可給態窒素、作土深の関係における決定係数はそれぞれ $R^2=0.34$ 、 0.28 であり（図Ⅱ-1、図Ⅱ-3）、他にもサトウキビ収量に影響する要因の存在が推測される。土壌・肥料分野において調査・研究が不十分なことは何かを考えると、ケイ酸肥沃度の影響に思い当たった。沖縄県において、サトウキビにおけるケイ酸肥沃度に関する研究は1970～1980年代に活発におこなわれていた（大城・大城，1978；宮城ら，1979；亀谷ら，1989；大屋・喜名，1989；大屋ら，1989）。しかし、その後継続的な研究はみられず、沖縄県内のケイ酸肥沃度はどの程度なのか、ケイ酸肥沃度とサトウキビ収量の関係についての検証は不十分なままである。そこで、北大東島におけるケイ酸肥沃度の実態とサトウキビ収量に及ぼす影響の検討をおこなった。併せて、可給態ケイ酸分析方法の適用性を検証し、さらにポット試験により土壌 pH (H_2O) が可給態ケイ酸とサトウキビのケイ酸吸収に及ぼす影響を調査した。

1) 北大東島のケイ酸肥沃度とサトウキビ収量との関係

北大東島の可給態ケイ酸(AB法)は平均 164 mg kg^{-1} と古江・永田(2000)が提唱している可給態ケイ酸基準値 200 mg kg^{-1} を下回り（表Ⅳ-1）、 100 mg kg^{-1} 未満の圃場が全体の45%を占めていることが判明した（図Ⅳ-1）。一方、可給態ケイ酸とサトウキビ収量の間を比較したところ、相関はなかった（図Ⅳ-2）

ケイ酸は土壌の構成成分の一つであり、土壌質量の50～70%を占めている（山地・馬，2006）。しかし、植物が利用できるケイ酸は土壌溶液中に溶存する微量なケイ酸であり、その供給量は土壌鉱物の種類で異

なる（平舘，2012）。土壌溶液中の可溶性ケイ酸は、通常土壌中では電荷を持たない分子状ケイ酸 $\text{Si}(\text{OH})_4$ の形態をしており、植物が吸収するケイ酸はこの形態だけと考えられている（平舘，2012）。また、分子状ケイ酸の重要な供給源は非晶質ケイ酸鉱物であるため、黒ボク土では分子状ケイ酸の供給量は多いが、花こう岩などを母材とする土壌では低いとされている（平舘，2012）。古江・永田（2000）は母材別に可給態ケイ酸を分析した結果、石灰岩、花こう岩、粘板岩の順に平均値が低くなったことを報告している。北大東島に分布している大東マーヅの主要な粘土鉱物はカオリン鉱物およびイライトであり（阿部・福士，1973；渡嘉敷，1993）、非晶質ケイ酸鉱物はみられない。これらのことから、北大東島のケイ酸肥沃度が低い原因の一つとして、分子状ケイ酸の供給能が高い粘土鉱物が乏しいことであり、ケイ酸肥沃度の向上にはケイ酸資材等によるケイ酸供給が必要になると考えられた。

ケイ酸植物であるサトウキビはイネと同様ケイ酸を積極的に吸収し、コムギやダイズと比較してケイ酸含量が多い（Van der Vorm, 1980）。そのため、サトウキビの収穫茎以外の部分をケイ酸供給源として活用することも視野に入れる必要がある。サトウキビ収穫時や製糖時にはトラッシュ（原料茎以外の梢頭部、枯葉や枯死茎など）やバガス（搾汁後の残渣物）が発生する。井上（2017）はトラッシュに含まれるケイ酸は春植えで $485\sim 548 \text{ kg ha}^{-1}$ 、株出しで $556\sim 686 \text{ kg ha}^{-1}$ と報告している。これは、トラッシュをケイ酸供給源として活用できる可能性を示している。北大東島ではトラッシュやバガスを原料とした堆肥が、年間約 $1,000 \text{ Mg}$ 製造されている。第II章の結果から、サトウキビ収量を向上させるため有機物施用が重要であることが明らかになったが、バガス堆肥を施用することにより可給態窒素の向上と併せて可給態ケイ酸の供給も可能になると考えられた。

一方、サトウキビ栽培において堆肥は新植時に施用されるが、北大東島のバガス堆肥 $1,000 \text{ Mg}$ 全てを新植圃場に施用したと仮定すると、

その施用量は約 12 Mg ha^{-1} でしかなく効果に不安が残る。バガス堆肥以外のケイ酸供給源としては、Savant *et al.* (1999) は、製糖工場のボイラーにて助燃材として燃焼されたバガスの灰 (BFA: Bagass fly ash) がケイ酸供給源として有望であることを指摘している。BFA は北大東島において農業利用はされていないことから、未利用資源の活用という観点からもケイ酸供給源としての利用を検討する必要がある。

本研究では可給態ケイ酸とサトウキビ収量の間に関係は認められなかった。この原因は判然としなかったが、可給態ケイ酸よりもサトウキビ収量に影響する要因が存在したためと思われる。ケイ酸がサトウキビ生産性に影響している報告例は多いことから (Ross *et al.*, 1974; Anderson, 1991; Savant *et al.*, 1999; Meyer and keeping, 2000; 古江・永田, 2000)、今後も継続的に可給態ケイ酸とサトウキビ収量の関係およびケイ酸供給源について検討する必要があると考えられた。

2) AB 法と PB 法の比較及び AB 法、PB 法と土壌 pH (H_2O) の比較

可給態ケイ酸の分析方法である AB 法と PB 法を比較したところ、① PB 法分析値は AB 法分析値より高い値を示すこと、②両分析方法とも土壌 pH (H_2O) と有意な正の相関があること、③土壌 pH (H_2O) が低いほど両分析値の差が大きくなることが明らかとなった (図 IV-4、表 IV-2)。今後は、両分析法について、特に酸性土壌におけるサトウキビのケイ酸吸収との関係を詳細に検証する必要がある。また、AB 法、PB 法よりサトウキビのケイ酸吸収を反映する分析方法を検討することも重要である。オーストラリアでは AB 法より抽出力の弱い塩化カルシウム溶液によってケイ酸肥沃度の評価をしている (高橋, 2007; 井上ら, 2014)。そのため、沖縄県に分布する土壌においてもケイ酸抽出力に着目した検討をおこなう必要があると考えられた。

他方で、可給態ケイ酸と土壌 pH (H_2O) は高い正の相関をもつため (図 IV-4、AB 法 $r=0.96$ 、PB 法 $r=0.93$)、土壌 pH (H_2O) の分析値からの推

定により可給態ケイ酸の簡易診断も可能であることが考えられる。可給態ケイ酸分析法は AB 法、PB 法共に一定以上の研究設備がなければ測定できない。そのため、一般の農家が自らの圃場の可給態ケイ酸がどの程度なのか知る機会は少なく、ケイ酸肥沃度改良のための関心を持ちづらい。しかし、土壌 pH (H₂O) からの推定が可能であれば、土壌診断項目として容易に盛り込むことができ、農家に対するケイ酸肥沃度改善への啓発にもつながる。そのためには、まず沖縄県内の各土壌型において、土壌 pH (H₂O) と可給態ケイ酸の分析結果を比較し、データの精度を高める必要があると考えられた。

3) 酸性矯正による可給態ケイ酸の向上が、サトウキビのケイ酸吸収に及ぼす影響

可給態ケイ酸と土壌 pH (H₂O) に有意な正の相関があった結果から、酸性矯正による土壌 pH (H₂O) の上昇がサトウキビのケイ酸吸収に与える影響について考察する。もし酸性矯正でサトウキビのケイ酸吸収量が増加したとすると、酸性矯正がケイ酸肥沃度改善のための一手法となるためである。そこで、ポット試験により酸性矯正された土壌を用いてサトウキビを栽培し、土壌 pH (H₂O) が可給態ケイ酸とサトウキビのケイ酸含量や吸収量に及ぼす影響を検証した。その結果、作物中のケイ酸含量およびケイ酸吸収量は、土壌 pH (H₂O) が高いほど低下した (図 IV-5、図 IV-6)。この原因は判然としないが、水稻の葉中ケイ酸とカルシウムに有意な負の相関があること (津野ら, 1984)、サトウキビ葉中ケイ酸含量とマグネシウム含量に拮抗関係が報告されており (Anderson, 1991)、本研究でも同様の傾向がみられた (図 IV-7、図 IV-8)。イネの高いケイ酸吸収能力にはトランスポーター (Lsi1) が関与していることが報告されている (Ma and Yamaji, 2006)。Lsi1 はケイ酸を特異的に吸収する働きをしており、イネでは他作物と比較して多く発現している (山地・馬, 2006)。サトウキビもケイ酸を積極的に吸

収することから、イネと同様の吸収機構を有すると考えられる。本研究の結果から、土壌 pH (H₂O)、カルシウム、マグネシウムがサトウキビのケイ酸吸収に何らかの影響を及ぼしている可能性があるため、今後、サトウキビのケイ酸吸収については、トランスポーターやその他の機作も含めた研究が必要になると考えられた。

また、第Ⅱ章において甘蔗糖度は交換性マグネシウムが 3.8 cmol_c kg⁻¹ 以上の場合、土壌 pH (H₂O) が 7.2 以上で低くなる傾向がみられた (図Ⅱ-1)。ケイ酸はサトウキビの受光態勢を改善することで光合成能の向上に寄与している (Meyer and Keeping, 2000)。また、サトウキビの光合成によって、蔗糖 (C₁₂H₂₂O₁₁) の原材料となる単糖 (ブドウ糖、果糖) が合成される (宮里, 1986)。このことから、第Ⅱ章の結果で土壌 pH (H₂O) 7.2 以上で甘蔗糖度が低かった原因は、ポット試験の結果を考慮すると土壌 pH (H₂O) が高いことによってケイ酸吸収量が低下し、それに伴う光合成能の減退により甘蔗糖度の減少につながったと思われる。

これらのことから、酸性矯正によって可給態ケイ酸は増加するものの、土壌 pH (H₂O) が高いとケイ酸吸収を抑制する恐れが示唆された。これは、過剰な酸性矯正はサトウキビ生産性を低下させる危険性を示すものである。そのため、今後は、土壌 pH (H₂O) とサトウキビのケイ酸吸収能の関係を詳細に検証する必要があると考えられた。

6. おわりに

北大東島のサトウキビ生産性を制限する要因は何かと考える際、「ドベネックの桶」が頭から離れなかった。ドベネックの桶はリービッヒの最小律の説明に用いられる図で、作物の生育は最も少ない養分によって制限されるという最小律の考えをドベネック博士が桶の図で説明したものである (図Ⅴ-3、Whitson and Walster, 1912)。

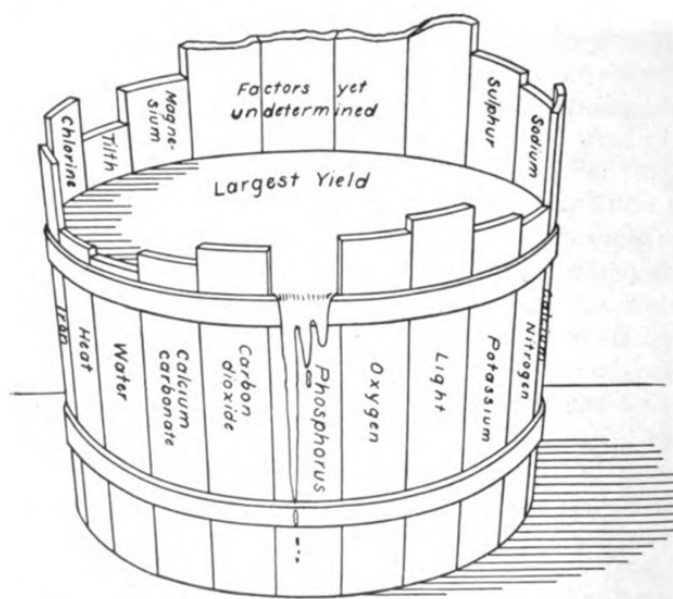


図 V-3 ドベネックの桶
(Whitson and Walster, 1912 より)

図 V-3 は Phosphorus が制限要因となって桶の中身の Largest Yield を制限していることが示されている。本研究では、桶の中身であるサトウキビ収量は可給態窒素と作土深に、甘蔗糖度は交換性マグネシウムと土壌 pH (H_2O) に影響を受けていることが明らかとなった。これらの要因を改善することで、北大東島のサトウキビ生産性を向上させることができると考えられた。

また、可給態窒素の改善には島内で発生する糖蜜の施用が効果的であることを示すことができた。さらに、この結果を受けて、北大東村と製糖工場が主体となり糖蜜散布体制を構築するまでに至った。このように土壌実態の把握、対策の検討、行政施策の一環として対策を実施するまでの一連の流れは、レギュラーサイエンスの考えに近い。レギュラーサイエンスとは、「科学的知見と行政施策・措置との間を橋渡しする科学のことであり、行政施策・措置の検討に利用できる科学的知見を得るための研究と科学的知見に基づいて施策・措置を決定する行政の両方が含まれる」と定義されている（農林水産省，2016）。

レギュラーサイエンスの考え方である科学的知見に基づいた行政施策の実施によって、問題解決のための対策を合理的に講じることが可能となる。今後も、このレギュラーサイエンスの考えを念頭に、土壌・肥料分野からの問題提起・対策検討・政策提言が必要と考える。

その一環として、沖縄県の低肥沃土壌を抜本的に改良するための土層改良事業の実施について、サトウキビ生産性向上の観点から強く提案していきたい。本研究の結果は、土層改良事業を実施するための科学的知見として活用できる。農家への聞き取り調査をする中で感じたことは、低肥沃土壌の改善のために各農家ができることは、経営規模の違いや農家の年齢によって異なることであった。所有している農地の先天的な土壌肥沃度の低さが、農業経営に影響を与えることはあってはならない。農家の生産意欲を減退させないためにも、個々の農家において同じ営農努力には同じ成果が達せられるよう、生産基盤である土壌の肥沃度は一定にする必要がある。そのために、低肥沃土壌の改善は個々の農家のみならず、行政が主体となる土層改良事業により広域的に実施することが効果的と考えられた。

最後に、沖縄県は 2012 年に「沖縄 21 世紀農林水産業振興計画」を定めサトウキビ増産を目的に、農地集約による規模拡大、栽培の機械化一貫体系導入を推進している（沖縄県，2012）。サトウキビ大規模機械化農業の先進地である北大東島の低収問題は、今後、県内他地域においても同様に発生する可能性が高い。そのため、本研究で得られた知見は、サトウキビ大規模機械化一貫作業体系に対応した土壌改良の方向性を示すと同時に、サトウキビ作の持続的な栽培に寄与するものと考ええる。

摘 要

沖縄県の主要作物はサトウキビ (*Saccharum officinarum* L.) であり、農業産出額（耕種部門）の約 30% を占める。サトウキビ生産は他産業部門への経済波及効果が高く、地域経済に果たす役割が大きい。特に、沖縄県北大東島においてサトウキビは、同島農業産出額の 74% を占める重要な農作物である。一方、大規模機械化農業の先進地域でもある北大東島のサトウキビ平均収量（1987～2016）は、 42.3 Mg ha^{-1} であり沖縄県の平均収量 62.5 Mg ha^{-1} に比べおよそ 30% 低く推移している。サトウキビの生産阻害要因として土壌肥沃度の低さが指摘されているが、土壌理化学性のうち何が主要な低収要因となっているのか、詳細な検討はなされていない。そこで、本研究では北大東島の土壌実態調査により主要な低収要因を解明し、さらに、生産性向上のための対策を検討することを目的とした（I 章）。

北大東島のサトウキビ圃場 50 筆について、土壌理化学性がサトウキビ収量および品質（糖度）に与える影響の評価をおこなった。分類回帰木解析 (CART) の結果、サトウキビ収量は主に可給態窒素と作土深に強く影響されていることが判明した。また、サトウキビ低収圃場は可給態窒素が 16.5 mg kg^{-1} 未満かつ作土深が 29 cm 未満であることが明らかとなった。甘蔗糖度は交換性マグネシウムと土壌 pH (H_2O) に影響を受けており、甘蔗糖度の高い圃場は交換性マグネシウムが $3.8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 以上かつ土壌 pH が 7.2 未満であった。これらのことから、北大東島のサトウキビ生産性を向上させるためには、有機物施用、心土破碎および土壌診断による交換性マグネシウム、土壌 pH (H_2O) の適切な管理が有効であると考えられた（II 章）。

可給態窒素を改善するためには、堆肥等の有機物施用が必要であるが、北大東島は畜産業がないため施用可能な有機物が少ない。この問題を解決するため、製糖工場の製糖過程で発生する糖蜜 (molasses) に

着目し、圃場試験をおこなった。試験区は対照区、20Mg区(糖蜜 20 Mg ha⁻¹施用)、50Mg区(糖蜜 50 Mg ha⁻¹施用)の3処理、4反復とした。サトウキビ栽培は春植え栽培、株出し栽培の2作とし、糖蜜は春植え栽培の植え付け前に施用した。収量調査の結果、2作合計の収量は対照区 87.2 Mg ha⁻¹、20 Mg区 101.3 Mg ha⁻¹、50 Mg区 111.9 Mg ha⁻¹で、対照区に比べ糖蜜施用区で有意に増加した。土壌化学性のうち、無機態窒素は糖蜜施用 116 日までは対照区に比べて有意に増加したが、糖蜜施用 204 日以降は試験区間に有意差はなかった。可給態窒素は、春植え期間中糖蜜施用量に伴って有意に高く推移した。交換性カリウムは、全ての試験期間を通して対照区に比べ糖蜜施用区で有意に高く推移した。交換性カリウムの蓄積により光合成能に関与するマグネシウムの吸収抑制が懸念されたが、収穫時の葉中マグネシウム含量に差はなく、糖度は2作とも処理区間に差はなかった。また、糖蜜施用による農家の収益性(1 ha 当たり・2作合計)は、対照区に比べ20Mg区で34.3万円、50Mg区で54.4万円向上した。これらのことから、糖蜜は50 Mg ha⁻¹までの施用量であれば糖度を低下させずにサトウキビ収量、土壌肥沃度、農家収益性を向上させる資材であることが明らかとなった(Ⅲ章)。

ケイ酸はサトウキビにとって最も多く吸収される養分であり、収量・品質の向上を促すとされている。一方、北大東島のケイ酸肥沃度の実態やサトウキビ収量との関係は明らかではない。そこで、北大東島のケイ酸肥沃度の実態とサトウキビ収量との関係および可給態ケイ酸分析法(酢酸緩衝液抽出法:AB法、リン酸緩衝液抽出法:PB法)の検証をおこなった。さらに酸性矯正した土壌を用いてサトウキビをポット栽培し、土壌 pH(H₂O)が可給態ケイ酸とケイ酸吸収量に及ぼす影響を調査した。その結果、鹿児島県の可給態ケイ酸診断基準値 200 mg kg⁻¹と比較して、北大東島サトウキビ圃場の可給態ケイ酸はAB法で平均 164 mg kg⁻¹であり、100 mg kg⁻¹未満の圃場割合は45%とケイ酸肥沃度が低い実態が明らかとなった。一方、可給態ケイ酸とサトウキビ収量に相

関関係は認められなかった。この原因は、他の土壌要因の影響が強かったためと考えられた。AB法とPB法および両分析法と土壌 pH(H₂O)には有意な正の相関が認められた。また、AB法とPB法は酸性条件で分析値の差が大きくなることが判明した。このため、両分析法の酸性土壌における適用性を検証する必要があると考えられた。ポット試験の結果、土壌 pH(H₂O)の上昇に伴い可給態ケイ酸は増加したが、サトウキビのケイ酸吸収量は低下した。原因は判然としないものの、葉身中のケイ酸およびカルシウム含量に有意な負の相関があったことから、ケイ酸とカルシウムの拮抗作用が考えられた。これらのことから、過剰な酸性矯正はサトウキビのケイ酸吸収を抑制する可能性が示唆された。そのため、土壌 pH(H₂O)とサトウキビのケイ酸吸収能の関係を詳細に検証する必要がある(IV章)。

沖縄県は2012年に「沖縄21世紀農林水産業振興計画」を定めサトウキビ増産を目的に、農地集約による規模拡大と機械化一貫体系の導入を推進している。サトウキビ大規模機械化農業の先進地である北大東島の低収状態は、今後、県内他地域においても発生する可能性が高い。そのため、本研究で得られた知見は、サトウキビ大規模機械化一貫作業体系に対応した土壌改良の方向性を示すと同時に、サトウキビ作の持続的な栽培に寄与するものとする(Ⅴ章)。

謝 辞

本論文の取りまとめは、東京農工大学大学院生物システム応用科学府教授豊田剛己博士のご指導のもとにおこないました。サトウキビの低生産性問題に関する本研究に目を留めていただき、研究の実施から論文の執筆まで懇切丁寧なご指導を賜りました。深く感謝申し上げます。

また、東京農工大学大学院生物システム応用科学府准教授橋本洋平博士にはデータの解釈や論点の整理など、研究に対する考え方について蒙を啓かせていただきました。厚く御礼申し上げます。本論文をご審査いただきました生物システム応用科学府教授梶田真也博士、同学府教授佐藤令一博士、農学府准教授田中治夫博士に深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、調査・分析のご協力や環境分野の視点からの貴重なご意見をいただきました(株)沖縄環境分析センターの川中岳志氏、琉球環境リサーチ(株)の大城浩照氏に御礼申し上げます。沖縄県南部農業改良普及センターの儀間靖氏にはデータの解釈について貴重なご指摘をいただき考察を深めることができました。感謝申し上げます。北大東島での実態調査において北大東製糖(株)の吉原徹氏には、調査圃場の選定や甘蔗糖度分析にご協力いただきました。御礼申し上げます。北大東島でサトウキビ栽培を営む平良栄二氏には、圃場試験の実施や調査にご協力いただき大変お世話になりました。心から感謝致します。北大東村役場、北大東製糖(株)ならびにJAおきなわ北大東支店のみなさまには、調査圃場の案内やその他様々なご協力に対して感謝申し上げます。また、栽培管理アンケート調査にご協力いただいた農家のみなさまに感謝の意を表します。

研究の機会を与えていただいた北大東村村長宮城光正氏に厚く御礼申し上げます。

最後に、前職の沖縄県農業試験場時代から土壌肥料学分野の先達として厳しく指導していただいた東京農工大学客員准教授宮丸直子博士には、本研究の学術的な意義を諭していただき、さらに生産現場への適用について様々なご助言、ご協力をいただき大変励みになりました。深く感謝申し上げます。

引用文献

- Alexander S. R., Rogério P. X., Octávio C. O., Segundo U, Bruno J. R. A., and Robert M. B. 2006. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. *Plant Soil*, **281**, 339-351.
- 阿部和雄・福士定雄 1973. 沖縄離島の農耕地の土壌調査と分類. 農業技術研究所報告 B, **24**, 367-424.
- Abdul Matin Md, Oya K, Shinjo T, Horiguchi T 1997. Phosphorus nutrition of sugarcane: Growth, yield and quality of Ratoon Cane as Affected by Residual Soil Phosphorus. *Jpn. J. Trop. Agr.*, **41**, 177-186.
- 赤坂浩 2013. 畑地の基盤整備と土壌有機物. 土壌の物理性, **123**, 19-24.
- 赤地徹・仲宗根盛徳・大城健・宮平守邦 1994. 農地からの土砂流出防止技術の実証 (1) 新開地における耕盤破碎による下層土改良と牧草被覆効果. 沖縄県農業試験場研究報告, **15**, 45-49.
- Allison JCS, Pammenter NW 2002. Effect of nitrogen supply on the production and distribution of dry matter in sugarcane. *S. Afr. J. Plant Soil*, **19**, 12-16. doi:10.1080/02571862.2002.10634430.
- Anderson DL 1991. Soil and leaf nutrient interactions following application of calcium silicate slag to sugarcane. *Fertilizer Research*, **30**, 9-18.
- 青山喜典・大塩哲視・松浦克彦・津高寿和 2002. 有機質資材の11年間連用による水田土壌の変化と水稻の収量. 兵庫県農業技術センター研究報告, **50**, 33-36.
- Ayres A 1930. Cane growth studies at Waipio substation. Haw. *Plant*.

- Rec.*, **34**, 445-460.
- 包智華・對馬誠也 2009. 土壤微生物生態研究への回帰木解析の応用. *土と微生物*, **63**, 39-43.
- Bruna MS, Zaiot M, Bonomi A 2015. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil. Challenges and perspectives. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **44**, 888-903.
- Bundy LG, Meisinger JJ 1994. Nitrogen availability index. In *Methods of Soil Analyses. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*, Eds. Weaver, RW, Angle, S, Bottomley, P, Bezdicek, D, Smith, S, Tabatabai, A, Wollum, A, pp. 951-984. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- 樗木直也・堀口毅 2000. 農家ほ場調査により推測されるソラマメ種皮褐変障害の原因. *土肥誌*, **71**, 372-377.
- Cleasby TG 1959. Use of molasses on the land. *Proc S Afr Sug Technol Ass.*, **33**, 95-102.
- De'ath G, Fabricius KE 2000. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*, **81**, 3178-3192.
- 出花幸之介・加藤雅明・与那覇至・下地格・比屋根篤・伊志嶺弘勝・他3名 2013. 最近のサトウキビ奨励品種においてサトウキビわい化病が収量に及ぼす影響. *日作九支会報*, **79**, 55-58.
- 出花幸之介・与那覇至・加藤雅明 2016. サトウキビわい化病と種苗対策. *植物防疫*, **70**, 792-761.
- 土壤環境分析法編集委員会 2003. 土壤環境分析法. p. 312. 博友社, 東京.
- FAOSTAT 2017. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. (May, 2017)
- 深山直子 2014. 沖縄・久米島におけるサトウキビ栽培の始まり. *コミ*

- ユニケーション科学, **39**, 97-111.
- 福仲憲・安谷屋隆司・仲地宗俊 1999. 沖縄における土地利用の地域分析: (第2報)大東諸島、宮古島及び八重山諸島における土地利用. 琉球大学農学部学術報告, **46**, 51-60.
- 福澤康典・小宮康明・上野正実・川満芳信 2009. サトウキビ初期生育における根の種類・量と生育量に関する研究. 日作紀, **78**, 356-362. doi:10.1626/jcs.78.356.
- 古江広治・永田茂穂 2000. さとうきびに対するケイ酸質肥料の効果- 土壌、栄養診断基準値設定に向けて-. 土肥誌, **71**, 391-395.
- 古江広治 2009. 奄美群島に分布する土壌の特性と生産力向上のための土壌管理. 鹿児島県農総研報, **3**, 147-223.
- 我那覇伊照・大浜当八 1975. 酸性土壌における過石、珪カルが多施がサトウキビの生育、収量に及ぼす影響. 沖縄農業, **13**, 12-17.
- The Geospatial Information Authority of Japan. (2015). Okinawa Prefecture municipality of latitude and longitude. http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOH0/CENTER/kendata/okinawa_heso.htm. (March, 2016).
- 儀間靖 2016. 沖縄県の農耕地土壌について. ペトロジスト, **60**, 71-75.
- Glasziou KT, Gayler KR 1972. Storage of sugars in sugarcane. *The Botanical Review*, **38**, 471-490
- 後藤忍・永田茂穂 2008. 亜熱帯地域の暗赤色土畑における堆肥の連用がサトウキビの収量と土壌理化学性に及ぼす影響. 土肥誌, **79**, 9-16.
- 関鋼・坂本一憲・吉田富男 1996. 各種畑土壌における微生物バイオマス窒素・炭素量と主要な土壌理化学性との関係. 土肥誌, **67**, 1-6.
- 浜崎忠雄 1979. 南西諸島の母材と土壌. ペトロジスト, **23**, 43-57.
- 花田俊雄 1981. キュウリ個葉の光合成に及ぼす N・Mg・P 濃度の影響.

- 野菜試験場報告, **9**, 83-96.
- 原徹夫・園田洋次・岩井巖 1977. ホウレンソウの栄養生理と施肥に関する研究(第3報) 圃場および水耕試験におけるカルシウムとマグネシウム吸収の拮抗作用について. 土肥誌, **48**, 107-110.
- 原田勇・篠原功 1970. 牧草農業における無機 balance に関する研究(第1報) 土壌の無機養分環境条件が牧草体内の無機 balance におよぼす影響についてその1. オーチャードグラス. *J. Coll. Dairy Agr.*, **3**, 262-280.
- 原田靖生・田中達也 2004. 最近の土づくり肥料の動向-新しいケイ酸質肥料を中心に-. 圃場と土壌, **36**, 48-53.
- 橋本知義・神山和則・久保田哲史 2004. 農林業センサスを利用した家畜ふん尿由来有機物の窒素換算流通量及び圃場投入量の推定. 土肥誌, **75**, 593-600.
- 服部太一郎・安 萍・稲永忍 2005. 作物の耐乾性に及ぼすケイ酸施用効果. 根の研究, **14**, 41-49.
- 樋口恭子 2003. 植物における鉄代謝機構の解明に向けて. 土肥誌, **74**, 237-242.
- 平舘俊太郎 2012. 近年の農業へのケイ酸利用と研究 2. 土壌および土壌鉱物からのケイ酸の溶解. 土肥誌, **83**, 455-461.
- 外間数男・宮良安正 1982. 沖縄におけるサトウキビ病害の発生と品種及び土壌型との関連について. 九州病害虫研究会報, **28**, 106-108.
- 北海道 2011. 北海道のてん菜生産の現状について. 特産種苗, **12**, 6-8.
- (一社) 法人北海道てん菜協会 2016. てん菜生産に係わる取組事例集. http://www.h-tensai.sakura.ne.jp/file/torikumi-zirei_2016.pdf. (May, 2017).
- Holt JA, Mayer RJ 1998. Changes in microbial biomass and protease

activities of soil associated with long-term sugar cane monoculture. *Biol. Fertil. Soils*, **27**, 127-131. doi:10.1007/s003740050410.

家坂正光 1989. 沖縄におけるさとうきび作経営の現状と課題. 農業経済論集, **40**, 63-75.

今泉吉郎・吉田昌一 1958. 水田土壌の珪酸供給力に関する研究. 農業技術研究所報告 B, **8**, 261-304.

井上建一・橋口健一郎 2011a. 栽植密度の違いが茎重型サトウキビ Ni17 の生育、収量に及ぼす影響. 土肥誌, **82**, 25-30.

井上建一・橋口健一郎 2011b. サトウキビ春植え時における栽培管理が株出し栽培の生育に及ぼす影響. 土肥誌, **82**, 375-380.

井上建一・餅田利之・橋口健一郎・西浩之・古江広治 2014. 鹿児島県サトウキビ栽培地域における土壌からのケイ酸供給能の比較. 土肥誌, **85**, 458-460.

井上建一 2017. 期待されるサトウキビ単収改善に向けた取り組み-鹿児島県における対応-. 土肥誌, **88**, 158-165.

井上荘太郎 2006. 沖縄県におけるさとうきび作と製糖業の現状と課題. 農林水産政策研究, **12**, 65-84.

伊禮信・松岡誠・寺島義文・境垣内岳雄・氏原邦博・福原誠司・寺内方克・杉本明 2009. さとうきびの秋収穫による安定株出しのための基本技術の開発. 九州沖縄農業研究センター研究資料, **93**, 19-27.

伊禮信 2012. 南大東島向けさとうきび新品種「Ni29 (農林 29 号)」の特性と利用. 砂糖類情報. https://www.alic.go.jp/joho-s/joho07_000534.html. (May, 2017).

岩崎五郎 1968. 北海道の特殊土壌と土地改良. 農業土木学会誌, **36**, 124-128.

- 謝花治・宮城克浩・伊禮信・宮平永憲・金城鉄男・島袋正樹・他 13 名
2009. 台風の影響が少なく株出し収量が高いサトウキビ品種
「Ni17」. 沖縄県農業研究センター研究報告. **3**, 55-65.
- 國吉清・儀間靖 2004. 九州・沖縄の農業と土壌肥料-自然と共存した
食料供給基地をめざして-. P. 55-58, シモダ印刷株式会社, 熊本.
鹿児島県 2016. 鹿児島県さとうきびおよび甘しや糖生産実績. 鹿児
島県農政部.
- 亀谷茂 2006. 沖縄県の農業と土壌肥料. 土肥誌, **77**, 695-697.
- 亀谷茂・仲宗根盛徳・大浜当八・大城正市 1989. 土壌からみたサトウ
キビ品質低下の原因. 九州農業研究, **51**, 86.
- 上運天博・脇本哲 1976. わい化病罹病サトウキビの導管内に見られる
細菌について. 日植病報, **42**, 500-503.
- 神谷充・岩間祐子・田中正仁 2004. 廃糖蜜の飼料成分と泌乳牛に対す
る嗜好性. 九州農業研究, **66**, 119.
- 片峯美幸・亀和田國彦・鈴木康夫・伊藤良治・中山喜一・内田文雄 2000.
黒ボク土畑における各種有機物の 20 年間連用が作物生育ならびに
土壌理化学性に及ぼす影響. 栃木県農業試験場研究報告, **50**,
25-32.
- Kato N, Owa N 1996. Evaluation of Si availability in slag
fertilizers by an extraction method using a cation exchange
resin. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **43**, 351-359.
- Kato N, Yanagisawa K, Owa N 1997. Measurement of Si adsorption and
“Active Si” in a soil amended with slag fertilizers by using
stable isotope ^{30}Si . *Soil Sci. Plant Nutr.*, **43**, 623-631.
- 加藤直人 1998. 鉍さいケイ酸質肥料の水田土壌中での溶解過程の解
明と可給態ケイ酸量の評価法に関する研究. 農業環境技術研究所
報告, **16**, 19-75.
- 加藤和弘・一ノ瀬友博・高橋俊守 2003. 分類樹木を用いた生物生息場

- 所の分類 河川水辺の鳥類を対照とした事例研究. 応用生態工学, **5**, 189-201. doi:10.3825/ece.5.189
- Kaur K, Kapoor KK, Gupta AP 2005. Impact of organic manures with and without mineral fertilizers on soil chemical and biological properties under tropical conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **168**, 117-122.
- 川俣恵利 1979. 日本ナシ果実の硬化障害に関する研究第2報. 園芸学雑誌, **48**, 137-146.
- 川満芳信・永江哲也・野原江利子・上原正実・渡嘉敷義浩・川中岳志・浅沼康清 2000. サトウキビの糖度向上に関する作物, 土壌, 生産システム学的研究 第3報. カリ過剰がサトウキビの糖度を抑制するプロセスの解明. 日本作物学会紀事, **69**(別1号), 12-13. doi:10.1626/jcs.69.12.
- 川満芳信 2004. サトウキビの増産と地球環境調節. 南方資源利用技術研究会誌, **20**, 29-34.
- Kawanobe M, Miyamaru N, Yoshida K, Kawanaka T, Toyota K 2014. Plant parasitic nematodes in sugarcane fields in Kitadaito Island (Okinawa), Japan, as a potential sugarcane growth inhibitor. *Nematology*, **16**, 807-820. doi:10.1163/15685411-00002810
- Kawanobe M, Miyamaru N, Yoshida K, Kawanaka T, Toyota K 2016. A field experiment with nematicide treatment revealed potential sugarcane yield loss caused by plant-parasitic nematodes in Okinawa, Japan. *Nematol. Res.*, **46**, 9-16.
- 河崎俊一郎・富永淳・藪田伸・福澤康典・諏訪竜一・上野正実・川満芳信 2011. 久米島における Fipronil ベイト剤の処理がサトウキビの生育および収量に与える影響. 沖縄農業, **45**, 23-31.
- Khan IA, Khatri A, Nizamani GS, Siddiqui MA, Raza S, Dahar NA 2005. Effect of NPK fertilizers on the growth of sugarcane clone

- AEC86-347 developed at NIA, Taando Jam, Pakistan. *Pak. J. Bot.*, **37**, 355-360.
- Kikuchi K, Ueno M, Kawamitsu Y, Sun L, Taira E, Maeda K 2007. Sugarcane fertilisation management in island regions of Japan and its impact on production: a case study of Kitadaito Island. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.*, **26**, 1842-1847.
- 金城功 2012. 近代沖縄の糖業, p76, おきなわ文庫, 那覇.
- 金城和俊・吉田晃一・宮丸直子・儀間靖 2010. 沖縄県で生産される堆肥の理化学性. 土肥誌, **82**, 228-233.
- 気象庁 2017a. 各種データ・資料. <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>. (May, 2017).
- 気象庁 2017b. 各種データ・資料、過去の台風資料. <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/index.html>. (May, 2017)
- 北大東村 1989. 北大東村誌, p.103.
- 小林紀子・真弓洋一・鈴木和美・三枝正彦 2006. 宮城県の代表的な水田土壌のケイ素供給能と水稻に対する新ケイ酸資材の施用効果. 複合生態フィールド教育研究センター報告, **22**, 39-43.
- 国土地理院, 2017. 沖縄の地理. <http://www.gsi.go.jp/okinawa/okinawa-index.html>. (May, 2017).
- 久場峰子 1993. 沖縄の農地の実態と土壌管理. ペトロジスト, **37**, 56-67.
- 久保田富三 1962. 日本の甘蔗糖業. 日本甘蔗糖工業会, p.26
- 久貝晃尋・荷川取勝永 1965. 甘蔗に対する畦間かんがい試験. 沖縄農業, **4**, 6-15.
- 國吉清・儀間靖 2004. 九州・沖縄の農業と土壌肥料-自然と共存した食料供給基地をめざして-. P.55-58, シモダ印刷株式会社, 熊本.

- 黒沢厚基 1994. テンサイ品種の育成型に関する作物学的解析. 北海道大学農学部邦文紀要, **19**, 99-149.
- 日本作物学会九州支部 2013. 作物調査基準, p.126, 城島印刷, 福岡.
- 社団法人農村漁村文化協会 2012. 新版土壌肥料用語辞典第2版, p.111, 藤原印刷(株), 東京.
- 前田浩敬 1971. 日本におけるサトウキビの育種. 育種学雑誌, **21**, 234-235.
- 前川和正・渡辺和彦・相野公孝・岩本豊 2001. 各種ケイ酸資材施用による育苗期のイネいもち病の発病抑制. 土肥誌, **72**, 56-62.
- 間藤 徹・村田伸治・高橋英一 1991. イネへのケイ酸施用が有用である理由. 土肥誌, **62**, 248-251.
- 松村昭治・遠藤雄大・蜷木朋子・後藤逸男. ヒマワリのセシウム吸収に及ぼす土壌交換性塩基の影響. 土肥誌, **84**, 175-178.
- 松中照夫 2003. 土壌学の基礎-生成・機能・肥沃度・環境-, p.155, p.162, p. 278, 農文教, 東京.
- Mckeague JA, Cline MG 1963. Silica in soil solutions: II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. *Can. J. Soil Sci.*, **43**, 83-96.
- Meyer JH, Wood RA, McIntyre RK, Leibbrandt NB 1983. Classifying soils of the South African sugar industry on the basis of their nitrogen mineralizing capacities and organic matter contents. *Proc. S. Afr. Sugar Technol. Assoc.*, **57**, 151-158.
- Meyer JH, Wood, RA, Leibbrandt NB 1986. Recent advances in determining the N requirement of sugarcane in the South African sugar industry. *Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.*, 205-211.
- Meyer JH, Wood RA 1994. Nitrogen management of sugar cane in South Africa. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, **15**, 93-104.
- Meyer JH, Keeping MG 2000. Review of research into the role of

- silicon for sugarcane production. *Proc S Afr Sug Technol Ass.*,
74, 29-40.
- 宮城克浩・下地格・伊志嶺弘勝・手登根正・下地浩之 2012. 沖縄県宮古地域における植え付けおよび収穫期の異なるサトウキビの収量特性. 日作九州支部, 78, 29-33.
- 宮城克浩・崎山澄寿・前田剛希・伊禮信・その他 15 名 2009. 早期収穫に適したサトウキビ新品種「Ni26」. 沖縄県農業研究センター研究報告, 3, 44-54.
- 宮城勝治・稲嶺盛三郎・大城豊秀・大城喜信 1965. 琉球土壤の理化学的性質 第 3 報 沖縄本島土壤の腐植、全窒素、有効態リン酸含量について. 沖縄農業, 4, 45-52.
- 宮城幸照・比嘉正行・吉元寛 1979. 国頭マーヅ(鉍質酸性土壤)におけるサトウキビに対するりん酸と珪カルの施用効果について. 沖縄県農業試験場研究報告, 4, 34-39.
- 宮平永憲 1978. サトウキビの収量予測について. 沖縄農業, 14, 1-6.
- 三宅靖人・高橋英一 1976. ケイ酸の比較植物栄養学的研究第 9 報. 土肥誌, 47, 375-382.
- 三宅靖人 1993. 土壤の活性ケイ酸と植物. 岡山大農学報, 81, 61-79.
- 宮丸直子・伊波聡・儀間靖・亀谷茂・豊田剛己 2012. 緑肥と堆肥の連用がジャーガルの各種性質に及ぼす影響. 土肥誌, 83, 280-287.
- 宮丸直子 2013. 沖縄県の低生産性土壤改良における土壤微生物性の評価. 沖縄県農業研究センター研究報告, 7, 1-44.
- 宮丸直子・大城浩照・中村英二郎・儀間靖 2013. 粗砕石灰岩による低コストで持続性が高い酸性矯正技術. 土肥誌, 84, 302-306.
- 宮丸直子 2013. 沖縄県の低生産性土壤改良における土壤微生物性の評価. 沖縄県農業研究センター報告, 7, 1-44.
- 宮里清松 1986. サトウキビとその栽培. 日本分蜜糖工業会, p. 1, 2, 5, 6, 92, 149, 277, 261, 335, 那覇.

- 宮沢数雄・伊東裕二郎・銘苺敏夫 1981. 沖縄県に分布する特殊土壌の生産的特性・主要土壌群の施肥基準の設定. 九農試研究資料, **60**, 38-64.
- Moore CCS, Nogueira AR, Kulay L 2016. Environmental and energy assessment of the substitution of chemical fertilizers for industrial wastes of ethanol production in sugarcane cultivation in Brazil. *Int. J. Life Cycle Assess.*, **22**, 628-643.
- 森静香・藤井弘志 2013. 近年の農業へのケイ酸利用と研究 6. 水稲の気象災害に対するケイ酸の収量および玄米品質の低下軽減効果. 土肥誌, **84**, 190-195.
- 茂角正延・橘田安正・久保省三・水落勁美 2002. リン酸緩衝液抽出法による水田土壌の可給態ケイ酸評価法. 土肥誌, **73**, 383-390.
- Murayama S, Uddin SMM, Nose A, Kawamitsu Y 1990. Effects of agronomical practices on sugarcane yield. *Sci. Bull. Fac. Agr. Univ. Ryukyus*, **37**, 1-6.
- 永田淳嗣 2012. 沖縄サトウキビ作の長期動態. 砂糖類情報, **187**, 1-4.
- 永富成紀 1989. サトウキビの起源と遺伝資源. 農業技術, **44**, 405-408.
- Naik GR 1988. Use of low grade iron pyrite as an amendement for calcareous alkaline soil to improve sugarcane productivity in India. *J. Plant Nutr.*, **11**, 1451-1458.
- 内藤孝 2012. 南大東島向けさとうきび新品種「Ni28」(農林28号)の特性と利用. 砂糖類情報. https://www.alic.go.jp/joho-s/joho07_000520.html. (May, 2017).
- 仲地宗俊 2002. 沖縄農業における生産性の変化と地域的分化. 農業経済論集, **53**, 1-12.

- 中津智史・東田修司・沢崎明弘 2004. 耕盤層の簡易判定法と幅広型心土破碎による対策. 土肥誌, 75, 265-268.
- 財団法人 日本土壌協会 2001a. 土壌機能モニタリング調査のための土壌、水質及び作物体分析法. p. 88-90.
- 財団法人 日本土壌協会 2001b. 土壌、水質及び植物体分析法. p. 84-86, p. 259-261, 大雄社, 東京.
- 西沢正洋・宮良高忠・津止健市・諸見里安勝 1968. 沖縄におけるサトウキビウイルス病の診断および防除と今後の問題点 (2) わい化病について. 沖縄農業, 7, 7-20.
- 丹羽勝久・辻修・大淵清志・菊池晃二 1999. 細粒質褐色低地土に生成した耕盤層が土除水分動態およびテンサイ根茎発達に及ぼす影響. ペトロジスト, 43, 7-15.
- 登川伸・寺沢四郎 1982. 沖縄県本島の主要土壌の物理性について. 土壌の物理性, 46, 2-12.
- 野原堅世・松村猛 1965. サトウキビわい化病の発生調査. 沖縄農業, 4, 20-21.
- 野瀬昭博・川満芳信 1993. サトウキビの糖分蓄積機構. 沖縄農業, 28, 77-81.
- 財団法人 農産業振興奨励会 1993. 土壌、水質及び作物体分析法, p. 88-90. (財)農産業振興奨励会, 東京.
- 農林水産省 2006. 土地改良事業計画設計基準 計画「ほ場整備 (畑)」, p. 89.
- 農林水産省 2008. 地力増進基本指針. http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/pdf/chi4.pdf. (December, 2015).
- 農林水産省 2016. 食料・農業・農村白書, p. 142, p. 152.
- 農林水産省 2017. 農林水産省統計情報「わがマチ・わがムラ」. <http://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/47/358/inde>

- x.html. (May, 2017).
- 農畜産業振興機構 2010. ブラジルの砂糖産業の概要～急拡大する世界最大の砂糖産業～. http://www.alic.go.jp/joho-s/joho07_000049.html. (June, 2017)
- 農畜産業振興機構 2017 a. 砂糖及び異性化等の需給総括表. [http://sugar.alic.go.jp/japan/data/jd1-\(1\).pdf](http://sugar.alic.go.jp/japan/data/jd1-(1).pdf). (May, 2017)
- 農畜産業振興機構 2017 b. 砂糖類及び異性化糖の需給総括表. [http://sugar.alic.go.jp/japan/data/jd1-\(1\).pdf](http://sugar.alic.go.jp/japan/data/jd1-(1).pdf). (May, 2017).
- 小原洋 2000. 定点調査データの概要と農耕地土壌の全国的な傾向. ペトロジスト, **44**, 134-142.
- 小原洋・大倉利明・高田裕介・神山和則・前島勇治・浜崎忠雄 2011. 包括的土壌分類第1次試案. 農環研研究報告, **29**, 1-73.
- 小原洋・高田裕介・神山和則・大倉利明・前島勇治・若林正吉・神田隆志 2016. 包括的土壌分類第1次試案に基づいた1/20万日本土壌図. 農環研報, **37**, 133-148.
- 岡三徳 1990. 島嶼部農業とさとうきび生産. 農林水産技術研究ジャーナル, **13**, 40-47.
- 沖縄県 1979. 地力保全基本調査総合成績書. 沖縄県農業試験場, p33, p35, p148, p276-278.
- 沖縄県 1981. 沖縄県農業試験場百年史. 沖縄県農業試験場, p.90, p.543, p.573, 光文堂印刷, 南風原町.
- 沖縄県 (1986-2016). さとうきび及び甘しゅ糖生産実績. 沖縄県農林水産部.
- 沖縄県 1986. 土地分類基本調査現地検討会資料, p. 26-27.
- 沖縄県 2005-2015. さとうきび及び甘しゅ糖生産実績. 沖縄県農林水産部.

- 沖縄県 2012. 沖縄 21 世紀農林水産業振興計画. 沖縄県農林水産部.
- 沖縄県 2014a. 平成 26 年度公共用水域及び地下水の水質測定結果について.
http://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/hozen/mizu_tsuchi/water/public_water.html. (July, 2017).
- 沖縄県 2014b. 沖縄県さとうきび栽培指針. 沖縄県農林水産部, p10, p12, p58-60.
<http://www.pref.okinawa.jp/site/norin/togyo/kibi/mobile/saibaisinh26-3.html>. (September, 2015).
- 沖縄県 2015 a. 農林関係統計. 沖縄県農林水産部, p. 20, p.119, p.178, p.206.
- 沖縄県 2015 b. さとうきび増産に向けた取組目標及び取り組み計画. 沖縄県農林水産部.
- 沖縄県 2015 c. さとうきび増産に向けた取組目標及び取り組み計画 (北大東島). 沖縄県農林水産部.
- 沖縄県 2016 a. 平成 27/28 年 期 バガス・ケーキ及び糖蜜の利用状況調査. 沖縄県農林水産部, p80.
- 沖縄県 2016 b. 農業関係統計. 沖縄県農林水産部, p. 120.
- 沖縄県 2016 c. さとうきび及び甘しゅ糖生産実績. 沖縄県農林水産部.
- 沖縄県 2016 d. さとうきび収穫機械稼働実績. 沖縄県農林水産部.
- 沖縄県 2016 e. さとうきび増産に向けた取組目標及び取り組み計画.
<http://www.pref.okinawa.jp/site/norin/togyo/kibi/mobile/zoupuuro/documents/lokinawaken.pdf>. (May, 2017).
- 沖縄県 2017. 沖縄県の農村整備.
<http://www.pref.okinawa.jp/site/norin/muradukuri/jigyougaiyou.html>. (May, 2017).
- 沖縄気象台 2014. 台風の接近数.

- http://www.jma-net.go.jp/okinawa/menu/syokai/toukei/data/assei_sekkin.pdf (December, 2015)
- 沖縄総合事務局 1998. これからのさとうきび作のあり方. さとうきび作検討会事務局, p1-2.
- 沖縄総合事務局 2016. 統計データから見た沖縄の農林水産業. 内閣府沖縄総合事務局農林水産部統計調査課.
- 翁長兼良・宜保清一 1984. 日本の特殊土壌-沖縄の特殊土壌 (マーシジャーガル) -. 農業土木学会誌, **52**, 517-524.
- 翁長兼良・吉永安俊 1988. 沖縄の畑地土壌の物理性. **58**, 17-29.
- 小那覇安優・島袋正樹・与儀建一・家坂正光 1998. サトウキビ産業の新たな展開. 沖縄農業, **33**, 61-73.
- 大城豊秀・大城喜信 1978. 国頭マーシ(鉍質酸性土壌)の改良に関する研究 第2報国頭マーシにおけるサトウキビの初期生育に対するリン酸と珪カルの併用効果. 沖縄県農業試験場研究報告, **4**, 27-33.
- 大城健 2001. さとうきびの生産振興に向けた取り組み. 砂糖類情報, https://sugar.alic.go.jp/japan/view/jv_0103b.htm. (May, 2017).
- 大城喜信・浜川謙 1980. よみがえれ土 沖縄の土壌と改良. P.89-118. 新報出版, 那覇.
- 大内田真・長谷建・上野敬一郎 2015. 種子島におけるサトウキビ「NiF8」の生育に及ぼす気象の影響と収量予測. 日作九支報, **81**, 39-42.
- 大屋一弘・喜名景秀 1989. サトウキビ増収法に関する土壌肥料学的研究 第3報 暗赤色土の pH と可溶性ケイ酸. 琉球大学農学部学術報告, **36**, 25-32.
- 大屋一弘・黒瀬恵子・外間安雄 1989. サトウキビ増収法に関する土壌肥料学的研究 第2法 土壌の pH と可溶性ケイ酸. 琉球大学農学部学術報告, **36**, 19-23.

- Prado RDM, Caione G, Campos CNS 2013. Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. *Appl. Environ. Soil Sci.*, Article ID 581984.
- Pérez LD, Millanb H, Gonzalez-Posada MG 2010. Spatial complexity of soil plow layer penetrometer resistance as influenced by sugarcane harvesting: A prefractal approach. *Soil Till. Res.*, **110**, 77-86. doi:10.1016/j.still.2010.06.011
- Singh P, Suman A, Rai RK, Singh KP, Sricastava TK, Arya N, Gaur A, Yadav RL 2013. Bio-organic amendment of Udic Ustochrept soil for minimizing Yield Decline in Sugarcane Ratoon Crops under Subtropical Conditions. *Communications in Soil Sci. plant analysis*. **44**. 1849-1861.
- Ross L, Nababsing P, Wong you Cheong Y 1974. Residual effect of calcium silicate applied to sugarcane soils. *International Cong. the Soc. Sugar Cane Technol.*, **15**, 539-542.
- Sakamoto K, Oba Y. 1991. Relationship between the amount of organic material applied and soil biomass content, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **37**, 387-397.
- 坂本一憲・大羽裕 1993. 畑土壌における可給態 N 量と土壌バイオマスとの関係. 土肥誌, **64**, 42-48.
- 坂本一憲 1998. 微生物バイオマスと土壌窒素肥沃度. 土と微生物, 51, 35-47.
- 笹田 敬 介 2000. 糖 蜜 . 砂 糖 類 情 報 .
https://sugar.alic.go.jp/japan/view/jv_0011b.htm (February, 2017).
- Narayan K, Savant NK, Komdorfer GH, Datnoff LE, Snyder GH 1999. Silicon nutrition and sugarcane production : A review. *J. Plant*

- Nutr.*, **22**, 1853-1903.
- 関稔・山田良三 2000. 主成分分析による施設キュウリ栽培土壌の類型化と生産性評価. 土肥誌, **71**, 94-96.
- 清水純一 2004. ブラジル砂糖産業の展開. 平成 16 年度米州地域食料農業情報調査分析検事業実施報告書, 79-106.
- 新里良章・深見公一郎・山口悟・上野正実 2013. 心土破碎と暗渠によるサトウキビほ場の排水性改善効果. 農業機械学会誌, **75**, 426-433.
- 白川繁利 1998. 地域経済におけるさとうきび産業の役割. 沖縄農業, **33**, 74-78.
- Soil Survey Staff 2014. Keys to Soil Taxonomy, Twelfth edition, p. 193, 298. U.S.D.A, Washington D.C.
- 杉本明 1999. サトウキビの早期高糖性品種の育種に関する研究. 沖縄農業試験場研究報告, **22**, 1-68.
- 杉本明・宮城克浩・末川修 2003. 琉球弧のサトウキビ少収地域における栽培改善に必要な品種特性. 日作九支報, **69**, 63-66.
- 杉本明・寺島義文 2006. 台風・干ばつ・低肥沃度土壌での作物生産. 農業機械学会誌, **6**, 3, 4-8.
- 杉田麻衣子・国信耕太郎・徳永哲夫 2007. ハウスハウレンソウの硝酸イオン含量を低減させるための肥料・堆肥適正施用技術. 土肥誌, **78**, 597-601.
- 砂川浩一・我那覇伊照 1969. 酸性土壌における pH 矯正に関する試験 pH の矯正がさとうきびの生育と収量に及ぼす影響について. 琉球農業試験場研究報告, **5**, 45-50.
- 植物栄養実験法編集委員会 2001. 植物栄養実験法. p.125, p. 134. 博友社, 東京.
- 高橋英一 1974. イネのケイ酸吸収におよぼす土壌水分状態の影響 植物の影響特性と生育環境. 土肥誌, **45**, 591-596.

- 高橋英一 2007. 作物にとってケイ酸とは何か. p64, 農文教, 東京.
- 高間由美・廣澤美幸 2008. 土壌の化学性, 作物収量および周辺環境への影響から判断した黒ボク土畑の有機物連用方法. 栃木県農試験報, **63**, 35-45.
- 寺内方克 2002. サトウキビ生産の現状と砂糖収量向上のための課題. 日作紀, **71**, 297-307.
- 照屋林宏 1967. サトウキビの初期生育におけるネマトーダの加害について. 熱帯農業, **10**, 196-201.
- 渡嘉敷義浩 1993. 沖縄に分布する島尻マージおよびジャーガルの土壌特性. ペトロジスト, **37**, 99-112.
- 辻和良・光定伸晃・西岡晋作. 和歌山県における耕種農家の堆肥利用の実態と課題. 和歌山県農林水産総合技術センター研究報告, **3**, 99-108.
- 津野幸人・東健志 1984. 水稲における珪酸と石灰の拮抗作用に関する研究 第2報葉身部にみられる珪酸と石灰含有率の拮抗現象. 日本作物学会紀事, **53**(別号2), 80-81.
- 上野正実・平良英三・孫麗亜 2008. バイオマス利用に向けた新たなサトウキビ生産技術. 農業機械学会誌, **70**, 15-20.
- 氏原邦博・杉本明・下田聡・前田秀樹 2001. 近赤外分光分析法によるサトウキビ品質評価. 熱帯農業, **45**, 148-154.
- 内山直治 1983. 土層改良計画の考え方. 農業土木学会誌, **51**, 999-1006.
- 内山直治 1984. 土地改良事業計画設計基準 計画「土層改良」の制定について. 農業土木学会誌, **52**, 459-462.
- Van der Vorm PDJ 1980. Uptake of Si by five plant species, as influenced by variations in Si-supply. *Plant and Soil*, **56**, 153-156.
- Whitson AR, Walster Harlow L 1912. Soils and soil fertility. P.73,

- Webb publishing co., St. Paul, Minn.
- WMO 2017. World weather information service.
<http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=1083>. (July, 2017).
- Wynne AT, Meyer JH, 2002. An economic assessment of using molasses and condensed molasses solids as a fertilizer in the South African sugar industry. *Proc S Afr Sug Technol Ass.*, **76**, 71-78.
- 山地直樹・馬建鋒 2006. イネのケイ酸吸収機構. *化学と生物*, **44**, 453-458.
- 山城三郎 1968. サトウキビの有効根群域について. *沖縄農業*. **7**, 1-12.
- 山城三郎 1970. 沖縄におけるサトウキビに対するかんがいの必要性. *琉球大学農学部学術報告*, **17**, 458-472.
- 山城三郎 1983. 沖縄におけるサトウキビのカンガイ用水量決定に関係ある 2、3 の要素に関する研究. *琉球大学農学部学術報告*, **30**, 367-488.
- 山下耕生・小宮山鉄兵・新妻成一 2012. 近年の農業へのケイ酸利用と研究 3. ケイ酸質資材の開発の変遷と現場での資材利用の現状. *土肥誌*, **83**, 613-619.
- Yanai J, Nakata S, Funakawa S, Nawata E, Katawatin R, Kosaki T 2010. Effect of NPK application on growth, yield and nutrient uptake by sugarcane on a sandy soil in Northeast Thailand. *Trop. Agr. Dev.*, **54**, 113-118.
- Yanai J, Omoto T, Nakao A, Koyama K, Hartomo A, Anwar S 2014. Evaluation of nitrogen status of agricultural soils in Java, Indonesia (Soil fertility). *Soil Sci. Plant Nutr.*, **60**, 188-195.
- 横田仁子・大森誉紀 2009. 愛媛県内におけるアスパラガスハウス土壌

- 特性の類型化による低収量要因の検討. 愛媛県農業研究部研究報告, **1**, 21-26.
- 吉田晃一 2011. 土壌診断から見た沖縄県内サトウキビ畑土壌の現状. 土肥要旨集, **57**, 117.
- Yoshida K, Miyamaru N, Kawanaka T, Hashimoto Y, Toyota K. 2016. Low nitrogen availability and shallow plow layer decrease sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) productivity in Kitadaito Island, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **62**, 504-510.
- 吉田昌一 1965. 水稻体内におけるケイ素の存在様式と生理的意義に関する研究. 農業技術研究所報告 B, **15**, 1-58.

論文目録

学位論文

1. 題目：北大東島における畑土壌の実態と生産力向上のための対策
2. 冊数：1
3. 関連論文の印刷公表の方法及び時期
 - (1) Koichi Yoshida, Naoko Miyamaru, Takeshi Kawanaka, Yohey Hashimoto, Koki Toyota
Low nitrogen availability and shallow plow layer decrease sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) productivity in Kitadaito Island
Soil Sci. Plant Nutr., 62, 504-510 (本文の第Ⅱ章と関連)
 - (2) 吉田晃一、宮丸直子、川中岳志、大城浩照、橋本洋平、豊田剛己
北大東島の赤黄色土における糖蜜施用がサトウキビの生育・収量及び土壌化学性に及ぼす影響
日本土壌肥料学雑誌 第88巻第6号(2017年12月)掲載予定 (本文の第Ⅲ章と関連)

参考論文

- (1) 吉田晃一、金城和俊、渡嘉敷義浩
沖縄南部地域土壌におけるZA-II土壌分析器の適用性
沖縄農業 44巻 1号 2010年8月 p. 57-63
- (2) 吉田晃一、儀間靖
国頭マージにおける全農型土壌分析法の適用性
沖縄農業 45巻 1号 2011年8月 p. 17-22
- (3) 吉田晃一
沖縄県の花き栽培における土壌化学性の現状と課題
農業と科学 678号 2016年1月 p. 6-10
- (4) 吉田晃一
沖縄でがんばる農家の土づくり：サトウキビとキク
土づくりとエコ農業 48巻 4号 2016年6月 p. 13-17