

九州沖縄地域の特殊土壌の改良と作物生産性の改善

2020.3

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

山口典子

要旨

九州沖縄地域における不良土壌（作物の生育を阻害する大きな要因があり、耕地として利用するのが困難な土壌）は普通畑面積の約 70%を占め赤黄色土、黒ボク土が不良土壌に分類される要因となっている。そこで本研究では、赤黄色土と黒ボク土、さらに平成 28 年熊本地震対応として問題土壌の酸性硫酸塩土壌を対象土壌として物理性または化学性の改善を行った。

赤黄色土は物理性の悪化が生育阻害要因となりやすい。そこで湿害軽減法である畝立て播種技術を沖縄県大宜味村に導入し、土壌物理性、ソバ生育への影響を調査したところ、作土の気相率が改善し苗立ち数が増加すること、栽培期間中の作土の気相率が $0.25 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ 以上であれば、収量も増加することを明らかにした。また、赤黄色土におけるサトウキビ栽培に畜産由来液肥と堆肥を使用し、施肥管理による土壌の化学性の改善を沖縄県金武町で行ったところ、液肥 20t/10a および堆肥 1t/10a により投入される窒素、リン酸、塩基類の残効により土壌の化学性は改善し、慣行区並のサトウキビ収量が得られることが明らかとなった。

黒ボク土のなかでも非アロフェン質黒ボク土は強い土壌酸性を示し易く、作物の酸性害が問題となりやすい。そこで大分県久住高原に分布する非アロフェン質黒ボク土の分布状況と土壌の酸性（交換酸度 y_1 ）と牧草初期生育との関係について調査したところ、非アロフェン質黒ボク土は標高 720 m 以上に主に分布すること、非アロフェン質黒ボク土の多くは交換酸度 y_1 が 3 以上と強い酸性を示すことが明らかとなった。また牧草（イタリアンライグラス）の初期生育は新潟県の草地管理基準である y_1 3 以上の酸性土壌で抑制されることが明らかとなった。また、土壌酸性の改良には、簡易に測定できる pH(KCl)に基づいた石灰質資材の施用が有効であることが明らかとなった。

平成 28 年熊本地震では、問題土壌である酸性硫酸塩土壌が下層に分布する阿蘇カルデラ内の阿蘇谷においても農地に亀裂や段差が発生し、表層への酸性

硫酸塩土壌の混入が懸念された。酸性硫酸塩土壌の分布を調査したところ、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が1.0を下回る強い酸性を示す酸性硫酸塩土壌が存在し、作土付近にも出現することが明らかとなった。また、酸性硫酸塩土壌と判定された土壌の土色は緑色を帯びた黒色が多く、そのほとんどで泥炭物質（ヨシなどの植物遺体）が確認された。また、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が2を下回る土層では刺激臭（腐卵臭）が確認できることから、現場においても、土色や泥炭物質の有無、臭いにより酸性硫酸塩土壌を簡易的に判定できる可能性が示された。また、酸性硫酸塩土壌の中和石灰量は、 H_2O_2 処理S濃度から推定可能であり、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ 0.87～2.56の場合、中和石灰量は乾土重量に対して5%～30%と莫大な量となった。一方、酸化した酸性硫酸塩土壌中の酸性物質は水洗により速やかに除去することが可能であった。酸性硫酸塩土壌の中和には莫大な量のアルカリ資材が必要となること、また現地は豊富な水資源を利用できることから、対策としては、資材の施用のみではなく、1974年の改良工事（川崎，1982）で実施されたように、水洗による硫酸塩の除去と炭酸カルシウムなどの資材施用による酸性改善および塩基の補給の組み合わせが最も適切であることが示された。

本研究では農業振興に貢献するため、土木工事による大規模な改善ではなく営農努力で対応できる対策技術について検討した。各々の対策技術導入が可能な条件の整理、また、他分野との更なる連携が課題として残された。

九州沖縄地域の特殊土壌の改良と作物生産性の改善

目次

第1章	緒論	1
1.1	研究の背景	
1.1.1	九州沖縄地域の農業	
1.1.2	九州沖縄地域の土壌と農業	
1.2	本研究で取り組む課題	
1.2.1	特殊土壌とは	
1.2.2	対象土壌の特徴	
1.3	論文の構成	
第2章	沖縄本島北部の赤黄色土圃場におけるソバ生育不良の改善	9
2.1	背景と目的	
2.2	方法	
2.2.1	試験区および栽培概要	
2.2.2	ソバおよび土壌の調査および分析方法	
2.3	結果と考察	
2.3.1	土壌の物理性改善効果	
2.3.2	ソバ地上部の収量および特性	
2.3.3	生育ステージ毎の土壌条件がソバの収量へ及ぼす影響	
2.3.4	ソバの生育に適した最適な土壌条件	
2.4	まとめ	
第3章	沖縄本島北部の赤黄色土圃場におけるサトウキビの減化学肥料栽培のための施肥管理方法の開発	26
3.1	背景と目的	
3.2	方法	
3.2.1	試験圃場の概要と土壌中養分の分析方法	
3.2.2	豚ふん尿由来液肥, 牛ふん堆肥および汚泥発酵肥料の成分特性	
3.2.3	栽培概要	
3.2.4	サトウキビの調査および分析方法	
3.3	結果と考察	
3.3.1	サトウキビの茎数および仮茎長の推移	
3.3.2	サトウキビの収量および品質	

- 5.3.4 中和石灰量
- 5.3.5 水洗による酸性硫酸塩土壌の変化
- 5.4 まとめ

第6章 総論89

謝辞

引用文献一覧

第1章 緒論

1.1 研究の背景

1.1.1 九州沖縄地域の農業

九州沖縄地域は日本列島の南西端に位置し、東西約 300 km、南北約 350 km の九州本島と東西約 900 km、南北約 800 km の海域に点在する種子島から与那国島に至る南西諸島で構成されている（大場，2004）。九州沖縄地域は全国でも主要な農業地帯であり、農業算出額（2017年）は1兆9000億円（農林水産省，2019a）と全国の21%を占め、農耕地面積（2018年）は全国の13%に相当（農林水産省，2019b）する。

九州沖縄の農業は気候条件および次項で示す土壌条件を反映して多様である。表1-1には九州沖縄各県の農産物別上位5位までの農業産出額を示した。

表 1-1 九州沖縄各県の 2017 年農業産出額(上位 5 位)

(億円)								
順位	福岡		佐賀		長崎		熊本	
	農産物	産出額	農産物	産出額	農産物	産出額	農産物	産出額
1	米	425	米	279	肉用牛	241	トマト	458
2	いちご	218	肉用牛	159	米	131	肉用牛	420
3	鶏卵	119	みかん	145	みかん	129	米	380
4	生乳	83	たまねぎ	93	豚	123	生乳	259
5	ぶどう	75	いちご	89	ばれいしょ	110	豚	211

(億円)								
順位	大分		宮崎		鹿児島		沖縄	
	農産物	産出額	農産物	産出額	農産物	産出額	農産物	産出額
1	米	247	肉用牛	747	肉用牛	1,258	肉用牛	228
2	肉用牛	150	ブロイラー	702	豚	832	さとうきび	168
3	豚	96	豚	555	ブロイラー	645	豚	131
4	生乳	75	米	180	鶏卵	286	きく	74
5	ねぎ	65	きゅうり	170	米	221	鶏卵	45

(農林水産省，2019a)

九州北部では冬場の低温寡日照に順応したイチゴや軟弱野菜の産地が形成さ

れ（久保，2004），福岡県の農業産出額の2位，佐賀県の5位にイチゴが入る一方，亜熱帯に属する南西諸島ではサトウキビを基幹作物とし，キクの冬春期栽培やパインアップル，マンゴー等の熱帯果樹の栽培が行われ（久保，2004），沖縄県の農業産出額の2位にサトウキビが入る。

1.1.2 九州沖縄地域の土壌と農業

九州沖縄地域は，多くの種類の岩石及びその風化堆積物から構成される山地，丘陵地，台地，低地からなる。図 1-1 には九州沖縄土壌図（浜崎，2004）を示した。土壌は褐色森林土，赤黄色土，黒ボク土，暗赤色土，低地土，未熟土が分布し，各々の特徴は以下の通りである。

褐色森林土は火山灰の影響の少ない山地・丘陵地に分布する褐色あるいは黄褐色の次表層をもつ土壌で，主に普通畑，樹園地として広く利用されている（農研機構農業環境変動センター，2020）。丘陵地に分布する褐色森林土には樹園地が分布し，カンキツやナシの栽培が多い（久保，2004）。

赤黄色土は有機物の蓄積が少なく，塩基飽和度が低く，風化の進んだ赤色または黄色の土壌で，農耕地では普通畑，樹園地，水田として広く利用されている（農研機構農業環境変動センター，2020）。沖縄・長崎・佐賀県には赤黄色土が多く，畑や樹園地として利用されている（浜崎，2004）。佐賀県と長崎県ではみかんが農業産出額3位である（表 1-1）。

黒ボク土は主として母材が火山灰に由来し，リン酸吸収係数が高く，容積重が小さく，軽しょうな土壌である（農研機構農業環境変動センター，2020）。農耕地では畑（普通畑，牧草地，樹園地）として広く利用されている。火山の影響が大きい宮崎・鹿児島・熊本には黒ボク土が多く分布し，主に畑や樹園地として利用されているが，湿性の黒ボク土は水田として利用されている（浜崎，2004）。

暗赤色土は暗赤色の次表層をもつか，石灰岩あるいは「石灰質堆積物」に由来

する土壌で母岩となる塩基性の強い岩石（蛇紋岩，石灰岩など）に強く影響を受けた土壌である。農耕地では普通畑として広く利用されている。沖縄と鹿児島
の島嶼部に多くサトウキビなどの畑利用が多い（浜崎，2004）。

低地土は主に河川周辺に分布しており，河川氾濫により堆積した土砂等が低地土の主な母材で一般的には肥沃な土壌として知られる（農研機構農業環境変動センター，2020）。農耕地では主に水田として広く利用されている。平野部の広い福岡・佐賀は低地土が多く主に水田として利用されている。土地利用を反映し，福岡県，佐賀県および大分県の農業産出額1位は米である（表1-1）。

未熟土は土壌断面内で層位の発達が認められないか，あるいは非常に弱い土壌であり，農耕地では主に普通畑として広く利用されている（農研機構農業環境変動センター，2020）。沖縄本島南部には未熟土が分布し，野菜，サトウキビなどの畑利用がなされている（浜崎，2004）。

1.2 本研究で取り組む課題

1.2.1 特殊土壌とは

1975年から1977年まで実施された地力保全調査では，土地の生産力を評価するために土壌生産力可能性分級を行い，耕地をⅠ等級（良好な耕地）からⅣ等級（耕地として利用するにはきわめて困難な土地）に分級し，下位のⅢ，Ⅳ等級の土壌を不良土壌とみなした（土壌保全調査事業全国協議会，1991）。岡川（1993）は，不良土壌（poor soil）を，養分含量などの土壌の化学性と易耕性等の土壌の物理性が劣っているために潜在的な生産力（potential soil productivity）が低く，作物の生育・生産の悪い土壌と定義し，酸性土，泥炭土，重粘土などがあてはまるとしている。

九州沖縄地域における不良土壌（土壌生産力可能性分級のⅢ，Ⅳ等級）は水田面積の約40%，普通畑面積の約70%，樹園地面積の約60%を占める（土壌

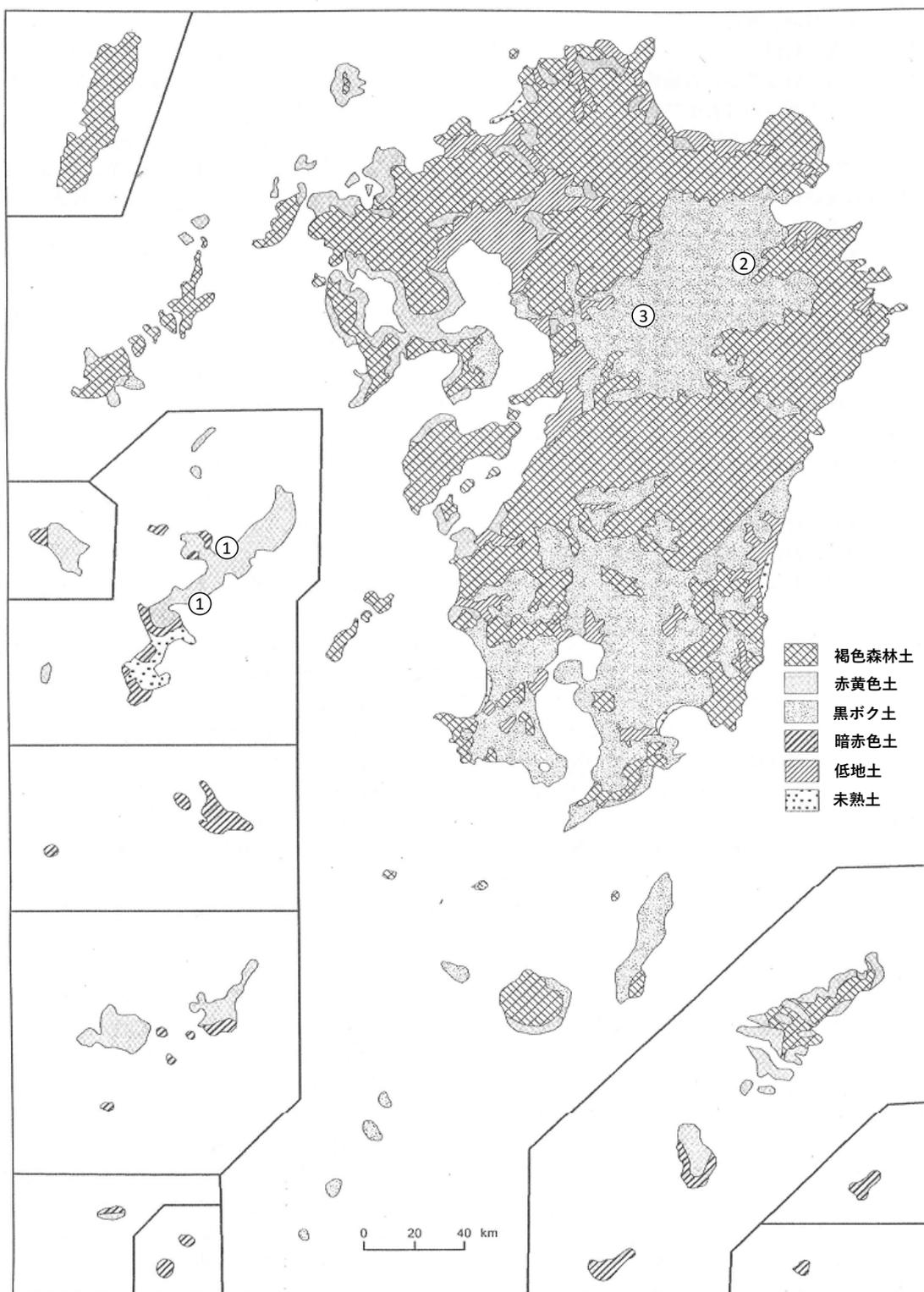


図 1-1 九州沖縄の土壤図(浜崎, 2004)

保全調査事業全国協議会，1991)。普通畑について県別の傾向を見ると，佐賀県（77%），長崎県（88%），宮崎県（99%），鹿児島県（97%），沖縄県（99%）で不良土壌の割合が高い（土壌保全調査事業全国協議会，1991)。佐賀県，長崎県，沖縄県の普通畑においては赤黄色土（各々66%，70%，30%），宮崎県，鹿児島県の普通畑においては黒ボク土（各々89%，74%）が多く分布しており（土壌保全調査事業全国協議会，1991)，赤黄色土と黒ボク土の作物生産性の改善は九州沖縄地域における重要な課題である。そこで本研究では，沖縄県の赤黄色土の物理性および化学性の改善と大分県久住周辺の非アロフェン質黒ボク土の化学性の改善を目指した。

また，岡川（1993）は，利用する上で重大な問題をかかえ，作物生育すら難しい土壌を問題土壌（problem soil）とし，泥炭土，塩類集積土，酸性硫酸塩土壌などを代表的な問題土壌としてあげている。2016年の熊本地震では熊本県阿蘇谷に分布する酸性硫酸塩土壌の作土への混入が作物生産の妨げとなる可能性があった。そこで問題土壌の酸性硫酸塩土壌についても本論文の研究対象とした。

本研究においては研究対象の不良土壌または問題土壌を特殊土壌と総称し，沖縄県，大分県および熊本県に分布する3つの特殊土壌

- 1) 沖縄県の赤黄色土（図1-1の①）
- 2) 大分県久住周辺の非アロフェン質黒ボク土（図1-1の②）
- 3) 熊本県阿蘇谷の酸性硫酸塩土壌（図1-1の③）

を対象とし，土壌の化学性または物理性の改良による作物生産性の改善を目指した。

1.2.2 対象土壌の特徴

1) 赤黄色土

沖縄県に分布する赤黄色土（国頭マージと呼ばれる）は鉄の結晶化指数が高い

こと、粘土あたりの陽イオン交換容量 (CEC) が低いことなどから、日本の土壌のなかで最も風化の進んだ土壌である (荒木, 1993)。

沖縄の他の土壌、暗赤色土 (島尻マージと呼ばれる)、未熟土 (ジャーガルと呼ばれる) 同様、降雨による侵食を受けやすい上、比較的傾斜地に分布 (登川・寺沢, 1982) するため、沖縄特有の大雨 (スコール) の後、土砂が海に流出する赤土流出は環境への影響が大きく問題となっている。

母材は玄武岩・安山岩・結晶片岩・粘板岩・第3紀層・洪積層など様々であり (浜崎, 2004)、その母材や風化程度を反映して、物理性も多様であり、粘土含量は約 10~60%と幅は広い (翁長・宜保, 1984)。また、下層土は緻密で排水性が悪い (翁長・宜保, 1984) 上、分散した土粒子による目詰まりやクラスト形成により、造成時の物理性改良により透水性が改善しても、透水性は容易に低下することから、物理性は悪化し易い。

一般的な化学性は、炭素含量は作土で 1%程度、下層土でその 1/2 以下と、非常に低い。pH(H₂O)は 5 と酸性を示すことが多く、CEC は 12 cmol_ckg⁻¹程度と沖縄の他の土壌よりも養分保持能は低い傾向を示す (渡嘉敷, 2004)。

沖縄本島北部地域では畑の 60%は赤黄色土であり (足立・與古田, 1981)、土壌生産力可能性分級では沖縄県の畑の 99%はⅢ, Ⅳ等級の不良土壌に属している (足立・與古田, 1981)。

2) 非アロフェン質黒ボク土

非アロフェン質黒ボク土は火山灰土として一般的なアロフェン質黒ボク土と比較して pH が低いこと、塩基飽和度が低いこと、有機物含量が高いことが特徴として挙げられる (農耕地土壌分類委員会, 1995)。交換酸度 y_1 は塩化カリウム溶液により土壌から交換抽出される Al を NaOH の滴定により定量する方法で、作物の根長との相関が高いことから酸性の黒ボク土における作物への Al 害の現実的な指標 (Saigusa et al., 1980) である。非アロフェン質黒ボク土はアロフェン質

よりも y_1 は大きく、活性 Al（反応性の高い Al 化合物）の主体がアロフェンではなく Al 腐植複合体 (Al_p) である点が特徴的（三枝ら，1987）であり，粘土鉱物および Al-腐植複合体に由来する活性 Al の違いにより，非アロフェン質黒ボク土はアロフェン質黒ボク土にくらべてより強い土壤酸性を示す(Saigusa et al., 1980; Shoji et al., 1980)。土壤分類では y_1 が 5 以上の層位をもつことが非アロフェン質黒ボク土の識別基準の一つである（小原ら，2011）。アロフェン質と非アロフェン質の違いは，土地利用，農地造成，土壤管理に影響を及ぼす重要な違いである（小原ら，2011）。

3) 酸性硫酸塩土壤

酸性硫酸塩土壤は還元状態では土壤の反応・pH は中性だが，土層・地層が地表に露出し酸化されると，土層に含まれるパイライトなどの可酸化イオウ・硫化物が酸化され，多量の硫酸塩を生成して強酸性となる土壤を言う（渡辺，1997）。酸性硫酸塩土壤は世界的には主として熱帯・亜熱帯の低湿地に分布する（岡川，1984）。日本においては小林（1938）により茨城県霞ヶ浦沿岸の干拓地における水稻生育不良の要因として明らかにされたのが最初の事例である。また，台地・丘陵地での大規模な農地開発により古い地層の海成粘土中の酸性物質が酸化されて酸性硫酸塩土壤になる事例も多い（渡辺，1997）。一方，熊本県阿蘇谷の酸性硫酸塩土壤は海成ではなく淡水条件下で生成したパイライトなどの可酸化イオウが原因物質（川崎，1986）であり，酸性物質の成因の点ではまれな事例である。

1.3 論文の構成

本論文は 6 章で構成されており，それぞれの内容は以下のとおりである。

第 1 章では研究の背景となる九州沖縄地域の農業および土壤の特徴について述べるとともに，研究対象土壤の九州沖縄地域における位置づけについて記述

した。第 2 章では沖縄本島北部の赤黄色土圃場におけるソバ生育不良に対する土壌の物理性の改善効果について、第 3 章では沖縄本島北部の赤黄色土圃場における有機質資源を活用したサトウキビの施肥管理による土壌の化学性改善効果について明らかにした。第 4 章では久住高原に分布する非アロフェン質黒ボク土における牧草生育不良に対する土壌の化学性改善効果について、第 5 章では阿蘇谷における酸性硫酸塩土壌の分布状況およびその特徴の把握と土壌の化学性改善効果について取りまとめた。第 6 章では総論を示す。

第2章 沖縄本島北部の赤黄色土圃場におけるソバ生育不良の改善

2.1 背景と目的

ソバ(*Fagopyrum esculentum* Moench)は畑作物の中でも極めて省力的な栽培が可能な作物であり、また地域特産作物として地域の経済活動を支える重要な作物でもある(大澤, 2011)。沖縄県においては従来、ソバの栽培は行われていなかった。しかしながら温暖な気候を活かして国内では一年の内で最も早く収穫できる可能性があることなどから、沖縄県でのソバ栽培が試みられている。これまでに、強酸性のパインアップル圃場においてソバ試験栽培を行い、堆肥施用による増収効果が得られている(原, 2011; 原ら, 2011)。さらに、基幹作物サトウキビの後作としての試験栽培(吉永ら, 2009)で高い生産性を示す結果が得られている。

沖縄本島北部の大宜味村では耕作放棄地対策事業の一環としてソバを導入しており、新たな村の特産作物として定着してきている。大宜味村における面積拡大に伴い、農林水産統計での沖縄県における2011年の作付面積は29 haと、2010年の作付面積1 haと比較して大幅に増加し、その後2018年には53 haと順調に増加している。しかし、規模拡大に伴いソバの生育不良が問題となる圃場が散見される。

ソバは気候適応性が広いことから、栽培適地は広い一方、乾燥地が原産であり湿害には極めて弱いと言われている(林, 1997)。湿害は「土壌中の過剰水分に基づく土壌の空気不足に起因して作物が生育障害を起こす現象」(小柳, 2010)であり、代表的な症状として、苗立ちの悪化、草丈・茎数・葉色の低下があり、それらの結果、収量・品質が低下する。

大宜味村が位置する沖縄本島北部には国頭マージと呼ばれる赤黄色土が分布しており、下層土が緻密(登川・寺沢, 1982)なうえ、一般に農地造成時の作業機械によるこね返し、転圧と相まって排水性が悪化しやすい(翁長・宜保, 1984)。

著者らは耕作放棄地対策事業によりソバ栽培が導入され、初年目は順調な生育がみられたものの、その後極端な生育不良が観察された大宜味村内現地のソバ圃場（赤黄色土）において、2010年5月に、ソバ生育と土壤水分や土壤物理性との関係について調査を行った。

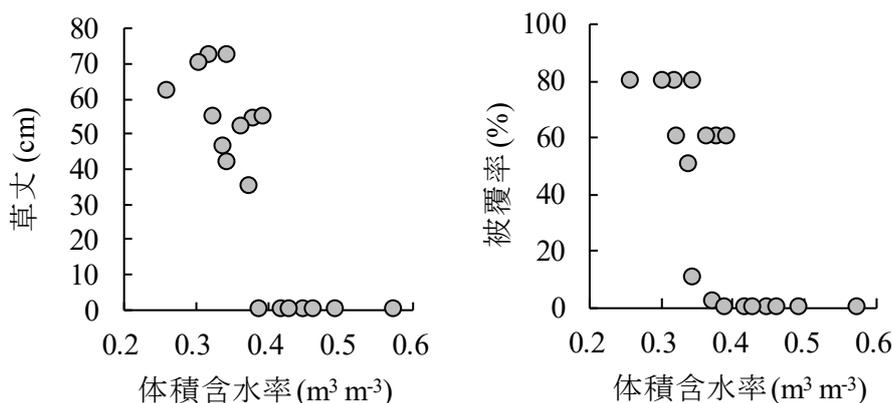


図 2-1 調査圃場の各地点における体積含水率と草丈、被覆率の関係(2010年圃場調査)*
 値は3回測定の中値。被覆率は達観、体積含水率はTDR計
 (Hydrosence, Campbell Sci.)で0~12 cm深を測定。

その結果、図 2-1 のように土壤体積含水率が高いほどソバの草丈及び被覆率（個体数）はともに低くなる傾向がみられた。また、図 2-1 の地点のうち、3地点で土壤の表層および次表層の土壤の物理性を調べたところ、表 2-1 のように次表層に加えて表層の気相率、透水性（飽和透水係数）が低い地点でソバの個体

表 2-1 調査区の体積含水率、草丈、被覆率と5~10 cm 深の土壤理化学性(2010年圃場調査)

区	草丈 ¹⁾ (cm)	被覆率 ²⁾ (m ² m ⁻²)	5~10 cm深				20~25 cm深			
			三相分布 ³⁾			飽和透水係数 ³⁾ (cm s ⁻¹)	三相分布 ³⁾			飽和透水係数 ³⁾ (cm s ⁻¹)
			気相	液相	固相		気相	液相	固相	
1	42	0.10	0.20	0.42	0.38	1.3×10 ⁻³	0.04	0.42	0.55	2.7×10 ⁻⁵
2	35	0.02	0.15	0.42	0.43	1.1×10 ⁻³	0.01	0.40	0.58	4.0×10 ⁻⁷
3	0	0.00	0.00	0.51	0.49	1.4×10 ⁻⁶	0.02	0.46	0.53	4.3×10 ⁻⁷
畑土壤の改善目標値 ⁴⁾						10 ⁻³ ~10 ⁻⁴				

1) 3回測定の中値。 2) 達観で行った。 3) 100mlコア2個の平均値。

4) 沖縄県農業試験場(1979)。

数は少なく、草丈は低い傾向があることから、赤黄色土表層の透水性の低下による気相率の低下、つまり湿害が生育不良の原因であることを明らかにした。しかし、ソバの生育不良解決のための最適な湿害回避技術については課題が残る。透水性を改善するには暗渠排水が最も一般的である（土壌保全調査事業全国協議会、1991）。しかし暗渠の埋設は土木工事を伴うことから営農者の判断による導入は困難である。そこで、通常の栽培管理で導入可能な技術について検討を行うこととした。

耕うん同時畝立て播種技術（細川，2011）は水田転換畑における大豆の湿害回避を目的に開発された播種技術で、長野県では平成21年末までに250 ha以上で導入され、内ソバは100 ha以上で作付けされている（細川，2011；井ノ口，2011）。長野県内の排水不良畑で実施された実証試験においては出芽が安定し、慣行栽培にくらべて約16～37%増収した（長野県，2006）。一方、表層散播技術（土屋ら，2010）は耕うん同時畝立て播種技術の一つで九州においてはムギ中心に普及している播種技術である（土屋ら，2009）。ソバの湿害回避にも効果が高く、大分県豊後高田市においてはソバへの実証試験が実施されている（手塚，2011）。

耕うん同時畝立て播種技術と表層散播技術では、共通してトラクタの進行方向と同じ方向に回転するダウンカット（正転）ロータリではなく、逆回転のアップカット（逆転）ロータリを用いることが特徴であり、それにより湿潤な重粘土における砕土率を向上させている。そして図2-2左のように、耕うん爪の曲がりを作り、作りたい畝の中心に向けてそろえて取り付け、一工程で耕うんと平高畝を作成可能な構造とした上、作業機の後方に施肥・播種機を取り付け、耕うんと同時に畝立てと施肥・播種を一工程で行うことができる（細川，2001；細川，2006；細川，2008；細川，2011）。表層散播技術では、さらに施肥・播種機の構成に特徴がある。耕うん同時畝立て播種技術で使用する通常の播種機はロータリ耕耘

直後の地表面に溝切りし、種子を落とし込むが、図 2-2 右のようにアップカットロータリ
ロータリの後方のカバーを外し、飛散する土壌中に散粒器で施肥および播種を
行うことで播種深度が浅い表層散播を可能にしている（土屋ら，2009；土屋ら，
2010）。

重粘質土壌における実証例が多いことから赤黄色土においても適用可能と考
えられるものの、耕うん同時畝立て播種技術の沖縄における導入事例は無く、効
果の検証が必要である。そこで本研究では、沖縄におけるソバの生育不良を解決
するために、大宜味村内のソバ圃場において湿害回避技術の耕うん同時畝立て
播種技術の現地実証試験を実施し、慣行栽培と比較して土壌物理性の改善効果
とソバ生育および収量への影響について調査した。

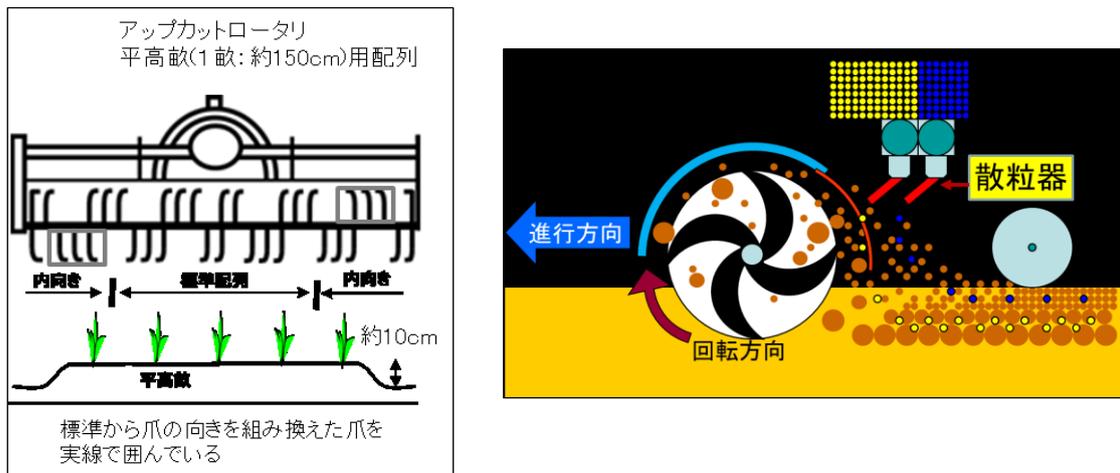


図 2-2 耕うん同時畝立て播種作業機の構造と畝形状(左)(細川, 2011)と、表層散播播種作
業機の構造(右)(土屋ら, 2010)

2.2 方法

2.2.1 試験区および栽培概要

試験は大宜味村内の農家圃場で行った。試験 1 として江洲地区(北緯 $26^{\circ} 38' 15''$, 東経 $128^{\circ} 7' 12''$) の 1 圃場, 試験 2 として大工又地区(北緯 $26^{\circ} 40' 01''$, 東経 $128^{\circ} 9' 10''$) の 1 圃場において, 2011 年に 3 月播種~5 月収穫

体系で耕うん同時畝立て播種技術の実証を行った。しかし処理の効果がソバ収量に反映されなかったため、圃場を白浜地区の1圃場（北緯 $26^{\circ} 39' 29''$ ，東経 $128^{\circ} 6' 48''$ ）に選定し直し、試験3として同年、10月播種～1月収穫体系において耕うん同時畝立て播種技術に加えて表層散播技術についても実証試験を行った。ソバ品種は、南西諸島の赤黄色土において3月播種～5月収穫体系で多収である中間秋型品種の「さちいずみ」（原，2011）である。

5万分の1土地分類基本調査「名護・平良」（沖縄県，1991）の土壤図では、試験1の江洲地区は、耕地土壤で土壤統群名が細粒赤色土，沖縄県土壤統名で中川統に分類されている。簿冊によると土性は強粘質であり，粘着性や可塑性が強く耕耘しにくいとされている。試験2の大工又地区は林地土壤で土壤統群が乾性赤色土壤，土壤統は為又統に分類され，土層は最表部を除き非常に堅密で透水性も悪いとされている（沖縄県，1991）。試験3の白浜地区は耕地土壤で土壤群名が造成低地土，土壤統群名は細粒黄色土，グライ相に分類され，土壤統名は無い。排水不良を生じやすい土壤とされている（沖縄県，1991）。

処理区は，試験1と試験2では，農家慣行の播種機のロータリをアップカットロータリに付け替え約10 cm高さの畝を成型しながら条播した，耕うん同時畝立て播種技術の「畝立条播区」（幅170 cmの畝に条間22 cm×6条で播種）と，農家慣行の播種機で条播した「慣行条播区」（畝立て無し，条間30 cmで播種）の2処理区とした。試験3では，表層散播技術の「表層散播区」（幅150 cm畝に散播）を加え，「畝立条播区」（幅150 cmの畝に4条で播種），「慣行条播区」（畝立てなしで条間30 cmで播種）との全3処理で試験を行った。施肥は，赤黄色土では窒素，リン酸，カリで 4 g m^{-2} ， 8 g m^{-2} ， 6 g m^{-2} が標準とされている（原ら，2011）。試験1と試験2では，豚ふん堆肥を 1.5 kg m^{-2} 散布後，さとうきび専用BB肥料であるBB666号（16-6-6）を窒素，リン酸，カリで $2.6\sim 3.0\text{ g m}^{-2}$ ， $1.0\sim 1.1\text{ g m}^{-2}$ ， $1.0\sim 1.1\text{ g m}^{-2}$ を播種時に施用した。試験3では播種

前に採取した 0~20 cm 深の土壌において、土壌の EC 値、交換性塩基の値が圃場の北側 1/3 と南側 2/3 で異なっていたため、処理区は 3 反復のブロック配置とするとともに、地力を平準化するため、播種の 18 日前に肥料成分含量が高い鶏ふん堆肥を全面に 200 g m^{-2} 施用後、播種時に輸入化成入り BB688 号 (16-8-8) を施用した。施肥量は慣行条播区で窒素, リン酸, カリで 8 g m^{-2} , 4 g m^{-2} , 4 g m^{-2} , 畝立条播区で 6 g m^{-2} , 3 g m^{-2} , 3 g m^{-2} , 表層散播区で 8 g m^{-2} , 4 g m^{-2} , 4 g m^{-2} であった。播種量は 3 月播種の試験 1 で 8.5 g m^{-2} , 試験 2 で 7.5 g m^{-2} , 10 月播種の試験 3 の慣行条播区で 6.8 g m^{-2} , 畝立条播区で 6.4 g m^{-2} , 表層散播区で 6.5 g m^{-2} であった。

2.2.2 ソバおよび土壌の調査および分析方法

ソバについては、生育初期と成熟期の個体数と、成熟期の坪刈り収量および草丈等の特性について調査した。生育初期の個体数は、試験 1, 試験 2 では、両区とも条播きであったことから条当たりとし、播種から 14 日後 (2 週間後) に処理区内からランダムに選んだ 5 条 \times 1 m 当たりの個体数を数えた。試験 3 では、散播処理区を加えたことから面積当たりとし、播種から 18 日後に処理区内からランダムに選んだ 3 ヶ所の 0.5 m^2 当たりの個体数を数えた。成熟期の個体数と坪刈り収量は、試験 1, 試験 2 では、5 月 17~18 日に $1.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ の範囲内の成熟期の個体数を数え、数えた全個体を地際部より切断して採取し、通風乾燥機を用いて 35°C で 7 日以上乾燥させた後、全個体から子実を脱穀し、子実収量と茎葉重を秤量した。試験 3 では、成熟期の 1 月 8 日に $1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ の範囲内の個体数を数え、数えた全個体を地際部より切断して採取し、試験 1, 試験 2 と同様に処理して子実収量と茎葉重を秤量した。試験 1 および試験 3 では、各区で採取した個体から試験 1 では 6 本、試験 3 では 20 本をランダムに選び、草丈、主茎節数、初花節位、主茎花房、分枝花房、1 次分枝を調査した。試験 2 で

はほとんど子実収量が得られなかったために、特性調査は行わなかった。

土壌については試験 1, 試験 2 では播種から 2 週間後の 3 月 30 日から収穫調査直前の 5 月 14 日まで, 試験 3 では播種直後の 10 月 31 日から収穫時の 1 月 8 日まで, ECH₂O プローブ (Decagon Devices Inc.) を 10 cm 深に埋設して誘電率を測定した。また, 定期的に 7.5~12.5 cm 深の土壌を 100 ml コアで採取して三相分布を測定し, その体積含水率とコア採取時の ECH₂O プローブの値から埋設期間中の ECH₂O プローブの値を体積含水率に変換し, 埋設期間中の体積含水率のモニタリング値とした。また, 播種直後に, 土壌を崩さないように注意しながら, スコップで 0~5 cm と 5~10 cm または 10~15 cm 深の土壌を採取 (3~4 kg 程度), ふるい分けし, その重量比を計測して, 砕土率 (2 cm 以下の土塊の割合) を求めた。砕土率が高く土塊が小さいと播種深度が均一になりやすく, また, 土壌と種子が密着するため種子近傍の水分が好適に保たれ, 安定した出芽が期待できる (池永ら, 2012)。試験 3 では, 畝立条播区と表層散播区の物理性は同じであるとみなし, 砕土率, 三相分布, 体積含水率は慣行条播区と表層散播区でのみ測定した。そして収穫跡の土壌を採取し, 風乾, 2 mm 篩い後, 土壌環境分析法 (土壌環境分析法編集委員会, 1997) に準じて pH, EC, 交換性塩基, 可給態リン酸, 硝酸態窒素を測定した。

2.3 結果と考察

2.3.1 土壌の物理性改善効果

10 cm 深の三相分布は表 2-2 に, 土壌体積含水率は図 2-3 に示した。試験 1, 試験 2 において, 生育初期の 3 月 30 日の気相は両処理区ともに 0.3 m³ m⁻³ 以上と差は無く, 固相, 液相も差は無かったが, 播種から約 2 ヶ月後の成熟期になると試験 2 では慣行条播区の 0.092 m³ m⁻³ に対して畝立条播区では 0.199 m³ m⁻³ と有意に高く, 固相, 液相は畝立条播区で有意に低かった。試験 1 での同様

な傾向がみられた（表 2-2）。一方試験 3 では、播種直後の 10 月 31 日の気相率は両区ともに $0.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ と処理区間で有意差は無かったが、成熟期（収穫時）の 1 月 8 日の気相率は慣行条播区の $0.169 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ とくらべて表層散播区で $0.247 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ と有意に高く、固相率には差は無かったものの、液相率は表層散播区で有意に低かった（表 2-2）。

表 2-2 畝立て処理が土壌三相分布に及ぼす影響

試験地	処理区	播種直後			生育初期			成熟期		
		固相	液相	気相	固相	液相	気相	固相	液相	気相
		$(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$			$(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$			$(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$		
		3月16日			3月30日 (播種後14日目)			5月15日 (播種後60日目)		
試験1 ¹⁾	畝立条播区	—	—	—	0.376	0.285	0.339	0.445	0.358	0.197
	慣行条播区	—	—	—	0.375	0.289	0.336	0.462	0.405	0.133
	t-test				ns	ns	ns	ns	ns	ns
		3月17日			3月30日 (播種後13日目)			5月14日 (播種後58日目)		
試験2 ¹⁾	畝立条播区	—	—	—	0.352	0.255	0.384	0.406	0.395	0.199
	慣行条播区	—	—	—	0.324	0.269	0.392	0.449	0.459	0.092
	t-test				ns	ns	ns	*	*	*
		10月31日			11月18日 (播種後18日)			1月8日 (播種後69日目)		
試験3 ²⁾	表層散播区	0.372	0.340	0.288	0.486	0.269	0.245	0.393	0.360	0.247
	慣行条播区	0.346	0.367	0.287	0.354	0.500	0.145	0.416	0.415	0.169
	t-test	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	*	*

1)3 月播種試験，各処理区の値は 3 反復の平均値。2)10 月播種試験，各処理区の値は 3 ブロツクの平均値。3)*および**は $p<0.01$ ， $p<0.05$ で有意差有り，ns は有意差無し(t-test)。4)試験 3 の 11 月 18 日のデータは雨のなかでのコア採取であったため，参考値。

土壌体積含水率の推移は，試験 1，試験 2 とともに降雨に伴って上昇と低下を繰り返し，4 月 30 日の入梅以後，降雨量が増加すると体積含水率は上昇したまま維持されていた（図 2-3）。しかし畝立条播区では慣行条播区にくらべて土壌体積含水率の上昇が抑制され，より低い値で推移していた。また，試験 3 では慣行条播区にくらべて畦立散播区では低い値で推移していた（図 2-3）。

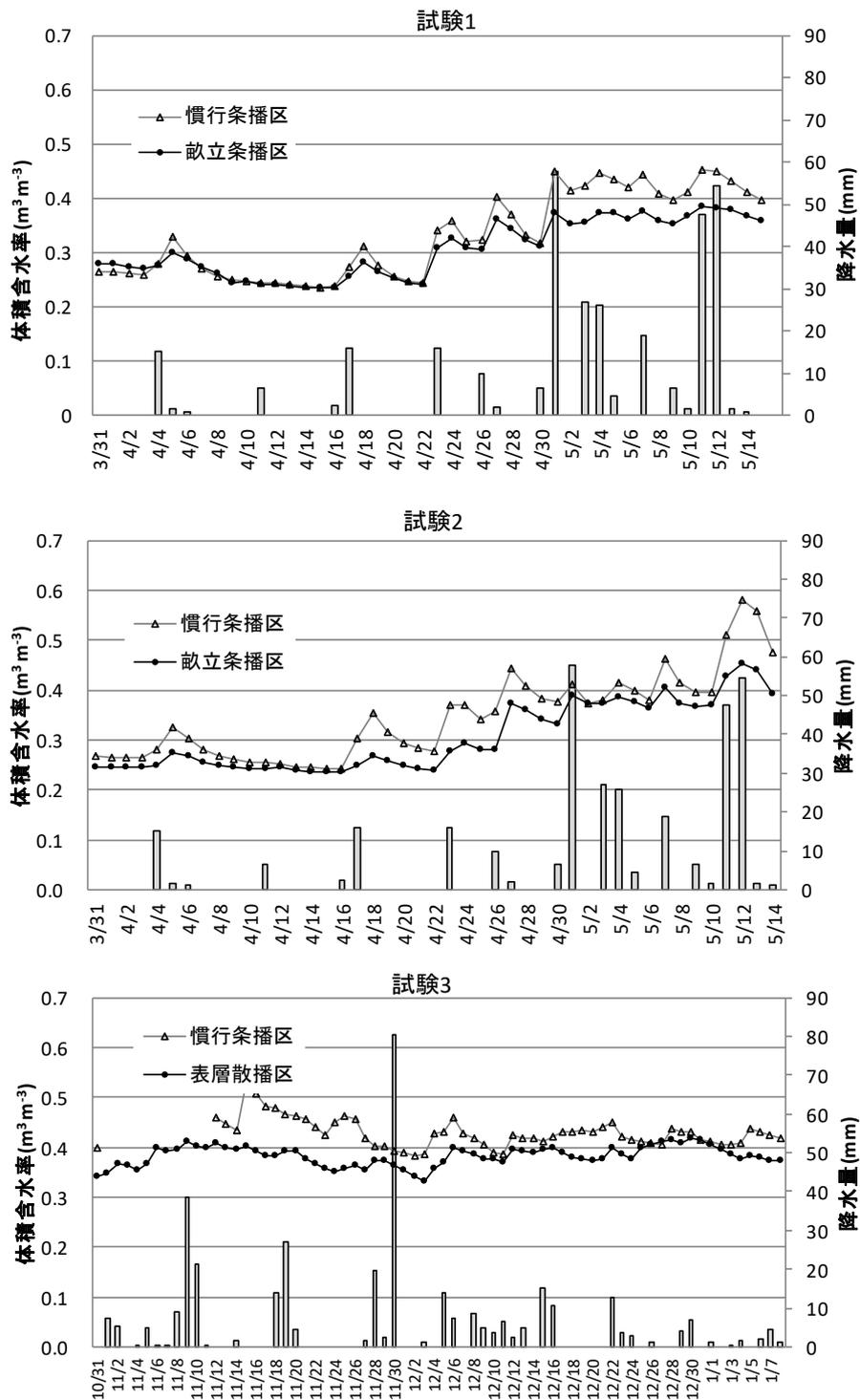


図 2-3 畝立条播区および畦立散播区と慣行条播区の 10 cm 深の土壤体積含水率

1) 土壤体積含水率の測定には ECH20 プローブ (Decagon Devices Inc) を用いた。2) 降水量は国頭地点のアメダスデータ。3) 試験 3 の慣行条播区では一部データ無し。

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/annually_a.php?prec_no=91&block_no=1586&year=2010&month=05&day=&view=p1

砕土率は表 2-3 に示した。3 試験ともに畝立条播区または表層散播区で表層 (0-5 cm 深) の砕土率は有意に高くなっており、大きな改善効果が見られた。

表 2-3 畝立て処理が砕土率に及ぼす影響

試験区	試験1		試験2		試験3	
	0~5 cm深 (%)	5~10 cm深 (%)	0~5 cm深 (%)	5~10 cm深 (%)	0~5 cm深 (%)	10~15 cm深 (%)
表層散播区	—	—	—	—	94	90
畝立条播区	69	45	92	88	—	—
慣行条播区	32	31	62	80	60	82
t-test	*	ns	**	ns	***	*

1)播種直後に調査。3 反復の平均値。2)*, **および***は各々 $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$ で有意差有り, ns は有意差無し(t-test)。

ソバ成熟期の土壌の化学性については表 2-4 に示すように 3 試験ともに処理区間差は無かった。試験 1 と試験 2 では施肥量が試験 3 に比べて少なかったものの、ソバ成熟期の土壌中の窒素、リン酸、カリは試験 3 の同程度以上であり、十分量の窒素、リン酸、カリが残存していた。原ら (2014) は沖縄県の赤黄色土において豚ふん堆肥を 1.0 kg m^{-2} 施用する条件においてリン酸肥料とカリ肥料を完全に削減可能であり、窒素肥料についても大幅に削減できることを明らかにしている。試験 1 と試験 2 では豚ふん堆肥を 1.5 kg m^{-2} 施用しており、ソバの生育に必要な養分は供給されていたと判断できた。また、高い交換性 Ca, Mg を反映して、pH は 3 試験の全ての処理区において高い値を示した。試験 2 では pH と交換性石灰 (CaO) において畝立て区と慣行区で差がみられたが試験 1 と試験 3 では差はないことから、畝立てによる差ではなく、他の要因であることが推察された。

表 2-4 ソバ成熟期の土壌の化学性(0~15cm 深)

試験地	pH	EC dS m ⁻¹	硝酸態窒素 ³⁾	交換性塩基			可給態 ⁴⁾	
			mg kg ⁻¹	K ₂ O	CaO	MgO	リン酸 mg kg ⁻¹	
試験1 ¹⁾	畝立条播	7.6	0.09	6.8	172	2950	152	424
	慣行条播	7.6	0.08	6.8	112	1973	110	342
	t-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
試験2 ²⁾	畝立条播	7.0	0.09	12.7	431	595	160	178
	慣行条播	7.4	0.08	8.1	442	823	186	266
	t-test	**	ns	ns	ns	*	ns	ns
試験3 ²⁾	表層散播	6.2	0.06	1.6	334	2547	800	255
	畝立条播	6.4	0.06	1.4	227	2959	935	214
	慣行条播	6.2	0.06	1.0	232	2540	943	135
	ANOVA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

1)3 月播種試験, 各処理区の値は 3 反復の平均値。2)10 月播種試験, 各処理区の値は 3 ブロツクの平均値。3)3 月播種では, 1:5 水抽出後, IC で定量。10 月播種では, KCl 抽出後, オートアナライザーで定量。4)トルオーグ法による。

2.3.2 ソバ地上部の収量および特性

生育初期および成熟期の個体数と子実収量および茎葉重は表 2-5 に示した。試験 1 と 2 では生育初期と成熟期では個体数の求め方が異なったため, 生育時期による推移の比較はできない。生育初期の個体数は, 試験 1, 試験 2 とともに処理間で有意な差はなかった。試験 3 では生育初期の個体数で差がみられ, 1 m² 当たり表層散播区で 152 本, 畝立条播区で 156 本, 慣行条播区で 124 本となり, 畝立条播区では慣行条播区にくらべ有意に上回っていた。成熟期の個体数は試験 1 では畝立条播区で慣行条播区よりも本数は多かった。試験 2 と試験 3 では慣行条播区で低い傾向がみられたものの, 有意な差は無かった。ソバの子実収量および茎葉重は, 試験 1, 試験 2 では処理区間で差は無く子実収量はほとんど得られなかった。また, 試験 2 では試験圃場全体にわたってべと病が発生し, 葉枯れ症状がみられていた。試験 3 では子実収量および茎葉重に処理区間差がみられ, 表層散播区で有意に高くなっていた。畝立条播区においては成熟期の個体数, 子実収量, 茎葉重は慣行条播区よりも高いものの有意な差はみられなかった。

表 2-5 畝立て処理が個体数と成熟期の茎葉重および子実収量に及ぼす影響

試験地	処理区	生育初期		成熟期	
		個体数 ³⁾ (本 m ⁻²)	個体数 ⁴⁾ (本 m ⁻²)	子実収量 ⁴⁾ (g m ⁻²)	茎葉重 ⁴⁾ (g m ⁻²)
		3月30日 (播種後14日目)	5月17日 (播種後62日目)		
試験1 ¹⁾	畝立条播区	193	228	9.2	91
	慣行条播区	186	185	10.6	79
	t-test	ns	*	ns	ns
		3月30日 (播種後13日目)	5月17,18日 (播種後61,62日目)		
試験2 ¹⁾	畝立条播区	202	196	3.5	129
	慣行条播区	184	190	4.6	125
	t-test	ns	ns	ns	ns
		11月18日 (播種後18日目)	1月8日 (播種後69日目)		
試験3 ²⁾	表層散播区	152 ab	96	87 a	119 a
	畝立条播区	156 a	77	48 ab	73 ab
	慣行条播区	124 b	59	39 b	50 b
	ANOVA	+	ns	*	*

1)3月播種試験。2)10月播種試験。3)試験1, 2:条長1m×5箇所 of 全個体を調査, 3反復の平均値, 試験3:0.45 m²の範囲内の全個体を調査, 3ブロックの平均値。4)試験1, 2:1.2 m²の範囲内の全個体を調査, 3反復の平均値。試験3:1.5 m²の範囲内の全個体を調査, 3ブロックの平均値。5)+は p<0.10 で有意, 同一の英文字を付した数値間には Tukey の HSD 法(p<0.1)による有意差無し, *は p<0.05 で有意, 同一の英文字を付した数値間には Tukey の HSD 法(p<0.05)による有意差無し。

表 2-6 試験1および試験3の草丈と収量関連形質

試験地	試験区	草丈 (cm)	主茎 節数	初花 節位 ³⁾	主茎 花房数 ⁴⁾	分枝 花房数	1次 分枝数	千粒重 ⁵⁾ (g)	子実重 ⁶⁾ (g/個体)	子実数 ⁷⁾ (個/個体)
試験1 ¹⁾	畝立条播区	32	—	3.4	2.5	1.4	1.2	—	0.06	—
	慣行条播区	33	—	3.1	3.7	3.8	1.9	—	0.04	—
	t-test	ns		ns	ns	ns	ns			
試験3 ²⁾	表層散播区	53 a	7.6	5.7 a	2.8	4.4	2.6	33.0 a	0.92	27.9
	畝立条播区	49 ab	7.5	5.6 ab	2.7	3.5	2.5	30.5 ab	0.62	20.1
	慣行条播区	43 b	7.3	5.4 b	2.7	3.9	2.5	27.9 b	0.63	21.8
	ANOVA	+	ns	+	ns	ns	ns	**	ns	ns

1)3月播種試験, 各処理区の形質は中庸な6個体について調査した, 3反復の平均値。2)10月播種試験, 各処理区の形質は中庸な20個体について調査した, 3ブロックの平均値。3)主茎で最初に開花した節位, 4)集合花房も1個と数えた。5)表2-5の子実収量の一部の粒数から導いた。6)表2-5の子実収量を個体数で割って導いた。7)表2-5の子実収量を千粒重で割って導いた。8)+および**は各々p<0.1, p<0.01で有意有り, nsは有意差無し, 同一の英文字を付した数値間には Tukey の HSD 法(p<0.05)による有意差無し。

表 2-6 には試験 1 と試験 3 の成熟期の草丈と収量関連形質について示した。試験 1 では処理区間差は無かったが、試験 3 では草丈、初花節位、千粒重は慣行条播区にくらべ畦立散播区で有意に高かった。

2.3.3 生育ステージ毎の土壌条件がソバの収量へ及ぼす影響

試験 3 の各処理区の子実収量と各収量関連形質との相関について表 2-7 に示した。子実収量と茎葉重、千粒重との間には 0.9 以上、子実収量と個体数、個体当子実重との間には 0.8 以上の相関があり、これら形質の子実重への寄与が大きくなっていった。表層散播区では茎葉重（表 2-5）と千粒重（表 2-6）が慣行条播区よりも有意に高かったこと、収穫時の個体数（表 2-5）、個体当たり子実重（表 2-6）が多い傾向があったことが収量増の要因として考えられた。

表 2-7 子実収量と各収量関連形質との相関¹⁾

	個体数	草丈	茎葉重	千粒重	個体当子実重	個体当子実数	初花節位	主茎節数	主茎花房数	1次分枝数	分枝花房数
子実収量	0.79	0.84	0.97	0.92	0.85	0.76	0.79	0.70	0.70	0.52	0.63

1) Spearman の順位相関係数。n=9。

ソバは過湿処理により根の活力低下、光合成速度の減少などの影響が生じる（田中ら，2005）が、出芽前後の過湿処理は個体数に（西牧，1983；杉本・佐藤，2000；坂田・大澤，2005；佐藤・杉本，2008）、生育初期の過湿処理は茎葉重、草丈に（坂田・大澤，2005；佐藤・杉本，2008）、開花始期の過湿処理は開花数、結実率が低下して粒数が減少するとともに千粒重が減少することで個体当たりの子実重に（池原ら，2007）、登熟期の過湿処理は乾物生産の不足による千粒重減少（杉本・佐藤，2000）としてソバの生育に影響を与えると報告されている。試験 3 では図 2-3 のように生育初期から降雨が続き、慣行条播区の土壌体積含水率は生育初期から成熟期にかけて高く過湿状態であった一方、表層散

播区では生育初期から登熟期にかけて土壌体積含水率の上昇が抑制され、各生育ステージでの湿害が回避されたことが収量増の要因と考えられた。一方畝立条播区においては、表 2-5 に示すように、生育初期の個体数は慣行条播区を有意に上回っていたことから出芽直後には最適な水分条件であったとみられるものの、子実収量、茎葉重は慣行条播区と差は無く、茎葉重も低いことから、生育初期から過湿条件となったことにより収量が低下したと考えられた。

試験 1 と試験 2 においては、畝立条播区において降雨時の土壌体積含水率の上昇が抑えられていたにも関わらず、試験 1、試験 2 ともに子実収量は極端に低く、湿害回避効果は得られなかった。個体数は生育初期、成熟期ともに多いものの、試験 1 においては表 2-6 のように成熟期の畝立条播区の草丈は 32cm と慣行条播区同様低く、また分枝数は 2 本以下と、矮小化および分枝の発達不良がみられた。植物の矮小化や分枝の発達不良は 1 葉期（生育初期）ならびに開花期の過湿処理が影響することが報告されている（杉本・佐藤，2000）。また、開花期に湿害を受けると開花数、結実率が低下して粒数が減少する（池原ら，2007）との報告があることから、生育後半の開花期からの梅雨入りによる多雨の影響を畝立てでは回避できず、矮小化や分枝の発達不良、極端な低収といった湿害を生じたと考えられた。試験 2 では表 2-5 のように茎葉重は高く、矮小化や分枝の発達不良は観察されなかったが、極端な低収であった。また、3 月 28 日の低温によりべと病に罹り、大宜味村内のソバ圃場の多くが壊滅的な被害を受け、試験 2 の圃場でも軽微ではあるものの、べと病に由来するまだら状の葉枯れ症状が観察された。また、花房数は多く生育は良かったものの、結実率は極端に低かったことから、梅雨入りによる多雨による湿害を回避できずに結実率の低下した、または多雨が虫媒に影響したことも推察された。

2.3.4 ソバの生育に適した最適な土壌条件

試験 1, 2 および 3 の畝立条播区では湿害が回避できていなかったが, 試験 3 の表層散播区では湿害が回避されていた要因として, 気相率の違いが挙げられる。幸田 (1982) は, 転圧し不透水層を作った陸田の上に中粗粒質土壌を盛り土して傾斜畑を作り, 地下水位と作物の生育や収量との関係を調査した結果, ソバ生育に適した気相率は 10~15 cm 深で約 $0.12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以上, 2.5~7.5 cm 深で $0.24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以上と推定し, これら気相率が得られるソバの適地下水位は約 35 cm 以下と示した。試験 3 においては, 収穫時の 7.5~12.5 cm 深の気相率は収量が良かった表層散播区で $0.247 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であったが, 収量の劣った慣行条播区においては $0.169 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。また, 収量がほとんど得られなかった試験 1 および 2 においては, 試験 1 の畝立条播区で $0.197 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 慣行条播区で $0.133 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 試験 2 の畝立条播区で $0.199 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 慣行条播区で $0.092 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ と試験 3 における表層散播区の気相率を下回っていた。これらの結果から, 耕うん同時畝立て播種技術または表層散播技術による土壌の物理性改善効果がソバの生育および収量に反映されるには 7.5~12.5 cm 深の気相率を栽培期間中 $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 程度に維持することが必要であることが示唆された。また, 試験 1 の圃場では収穫の 2 日前に約 30 cm 深の穴を掘ったところ, 20 cm 深まで水が停滞してくる状況であった。試験 2 の圃場も同様, 収穫前に掘った穴に水が停滞してくる状況であった。試験 1 および 2 においては, 地下水位の上昇により気相率がソバの生育に最適な値以下に低下したことが畝立条播区における収量低下の要因であると考えられた。

一方, 試験 3 の畝立条播区では表層散播区と同条件で畝立てをしたため, 7.5~12.5 cm 深の気相率は同じとみなされるにも関わらず湿害が生じていた。その要因としては播種深度が挙げられる。使用した播種機の設定により, 畝立条播区の播種深度は 52 mm と表層散播区の 16 mm よりも深くなっていた。それによ

り地下水位との距離が近くなり、畝立ての効果が軽減され、湿害が起きやすくなっていたと考えられた。

地下水位については、20 cm 深よりも高いとソバの収量は大きく低下する（二瓶ら，2006）との報告や、初期生育では地下水位は15～35 cm，成熟期の地下水位は40～50 cm に下げる必要があるとしている報告（本田，1997）など報告により異なるが、ソバの生育に適した気相率を維持できる、最適な地下水位は土壌により異なるためと考えられる。

赤黄色土（国頭マージ）はそれぞれの母材や風化過程を反映して物理性は多様（翁長・宜保，1984）であることや、圃場管理状況により、降雨による三相分布の変化や地下水位の変化は圃場により異なると考えられる。畝立て栽培は一時的な降雨に対しては湛水被害を受けにくい有効な技術である（林，1989）が、大量の降雨や連続した降雨では畝立てと同時に明渠や暗渠が重要な役割を果たす（細川，2006）。地下水位が高く、畝立てだけではソバの生育に最適な気相率が得られない圃場においては、ソバ栽培は見合わせるか、畝立てだけではなく明渠および暗渠等の排水技術の組み合わせによって圃場排水性を高め地下水位を下げるなど、圃場の土壌条件に合わせた対策を行うことが重要であることが示唆された。

2.4 まとめ

栽培期間中の土壌の気相率の低下に起因するソバの生育不良を解決するために耕うん同時畝立て播種技術および表層散播技術による畝立て播種を実施した。畝立て区では降雨時の10 cm 深の土壌体積含水率の上昇抑制がみられ、生育後半まで慣行区より高い気相率が維持され、個体数は生育初期から成熟期まで慣行区よりも多く、子実収量は有意に高かった。収量増の要因として、茎葉重と千粒重が高かったこと、収穫時の個体数、個体当たり子実重が多い傾向であったこ

とが示された。また、収量増に効果があった畝立て区の気相率は 10 cm 深で $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 程度であったことから、土壌の物理性改善効果をソバの生育および収量に反映させるには 10 cm 深の気相率を栽培期間中 $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 程度に維持することが必要であることが示唆された。一方、播種深度が深いと収量増の効果が得られなかった。畝立条播区の地下水位との距離が近くなり、畝立ての効果が軽減されたためと考えられた。

以上より、沖縄県の赤黄色土におけるソバの湿害回避にはソバの生育に最適な気相率を維持することが重要であり、畝立ては有効な湿害回避技術の一つであることが示された。

第3章 沖縄本島北部の赤黄色土圃場におけるサトウキビの減化学肥料栽培のための施肥管理方法の開発

3.1 背景と目的

沖縄県において、サトウキビは農家数の約8割、農作物作付面積の約5割、農業産出額の約2割を占める基幹作物である（沖縄県農林水産部，2018）。沖縄県におけるサトウキビの作型は3つあり、蔗苗を春（2月から4月）に植え付け当年の12月から翌年4月までに収穫する春植え栽培、蔗苗を夏（7月から9月）に植え付け翌年の12月から翌々年の4月までに収穫する夏植え栽培およびサトウキビ収穫後に地下株から萌芽する芽を肥培管理し当年の12月から翌年4月までに再度収穫する株出し栽培がある（沖縄県農林水産部，2018）。沖縄本島においては、春植えおよび株出し栽培が9割以上を占めている（沖縄県農林水産部，2019）。

一方、農業産出額の1位はその約4割を占める畜産業であり、サトウキビ栽培と並ぶ基幹産業である（沖縄県農林水産部，2018）。畜産業で発生する家畜ふん尿の処理施設の利用状況（沖縄県農林水産部畜産課，2010）によると、家畜ふん尿の一部は浄化处理されるが、多くは堆肥化または液肥化され地域の有機質資源として農業利用されている。

家畜ふん尿の農業利用に関連する研究成果として、比屋根ら（2008，2009）は、沖縄本島南部地域のアルカリ性土壌であるジャーガル（未熟土）において、最終追肥に豚ふん尿曝気処理水を施用して化学肥料の使用量を2割または4割削減するサトウキビ栽培試験を行い、春植えおよび株出しサトウキビの減肥栽培が可能であることを示した。また久場ら（1998）は、沖縄本島北部の金武町において、化学肥料はリン酸のみを施用し、窒素とカリは全量を発酵豚ふん尿で置き換えてサトウキビの春植え栽培が可能であることを示しており、豚ふん尿は液肥として有効であることが明らかとなっている。

金武町は沖縄県の中でも耕蓄連携に積極的な自治体であり、町内の養豚で発生するふん尿を回収し、町内 5 箇所計 6 基ある貯留槽で 45～60 日程度保管・熟成後、その上澄みを豚ふん尿由来液肥として町内の農地に散布している。豚ふん尿の回収は年間を通して行われているが、サトウキビ畑への豚ふん尿由来液肥の投入は、農地が裸地状態になる収穫から次作の植え付け、または株出し管理作業までの 2 月から 3 月に行うことが多く、投入時期に偏りが生じており、更なる有効活用が必要である。また、金武町においては新たな集落排水処理施設を計画中であり、汚泥の有効活用の検討も必要とされている（金武町産業振興課，2008）。

沖縄県では有機物の分解が早いために堆肥の投入または緑肥による土壌の物理性、化学性および生物性の改善が推奨されている（沖縄県農林水産部，2006）。また、金武町に分布する赤黄色土は酸性で塩基に乏しく、サトウキビの安定生産のためには化学性の改善が重要である。

そこで本研究では、赤黄色土におけるサトウキビの安定生産のために、赤黄色土圃場において春植え一株出し体系のサトウキビに地域の有機質資源を基肥および追肥として施用する試験を 2 カ年間行い、豚ふん尿由来液肥の利用によるサトウキビの減化学肥料栽培と豚ふん尿由来液肥と牛ふん堆肥や汚泥発酵肥料の利用による無化学肥料栽培がサトウキビの生育、収量および品質に及ぼす影響について検討し、有機質資源を利用した施肥管理方法の開発を行った。さらに、豚ふん尿由来液肥、牛ふん堆肥および汚泥発酵肥料の施用が土壌の化学性に及ぼす影響を明らかにした。

3.2 方法

3.2.1 試験圃場の概要と土壌中養分の分析方法

試験は沖縄県金武町の農家圃場（北緯 26°27'05"，東経 127°56'10"）で行った。

土壌は赤黄色土（国頭マージ）である。土壌試料は、春植え栽培前の 2013 年 3 月 1 日と株出し栽培後の 2015 年 1 月 21 日に表層土（0～20 cm）を 3.3.3 栽培概要で示す各処理区から採取した。春植え栽培では耕耘後の表層土を、株出し栽培後は株元の表層土を採取した。採取した土壌は風乾・粉碎後 2 mm の篩いを通して供試土壌とした。pH(H₂O)、電気伝導率（EC）、無機態窒素含量、可給態リン酸(Truog)含量、交換性塩基（カリ（K₂O）、石灰（CaO）、苦土（MgO））含量は土壌環境分析法編集委員会(1997)に準じて分析を行った。2 mol L⁻¹の塩化カリウム溶液で抽出した無機態窒素のアンモニア態窒素と硝酸態窒素はオートアナライザー（AACS-2, ブランルーベ社製）で定量した。2013 年 3 月 1 日に採取した栽培前土壌の測定項目の平均値は、赤黄色土におけるサトウキビ畑の土壌診断基準（沖縄県, 1979）の値と比較すると、交換性カリ含量のみ基準値の範囲を超え、pH(H₂O)、可給態リン酸、交換性石灰、苦土含量は基準値の範囲を下回っていた（p., 表 3-6）。また、春植え栽培前に同一圃場の処理区外から採取した土壌の全炭素含量は 7.8 g kg⁻¹であり、土壌診断基準（沖縄県, 1979）の炭素含量（12～29 g kg⁻¹, 腐植含量 20～50 g kg⁻¹を炭素に換算）よりも低い値であった。

3.2.2 豚ふん尿由来液肥, 牛ふん堆肥および汚泥発酵肥料の成分特性

施用した液肥の成分値を表 3-1 に示した。試験に用いた豚ふん尿由来液肥（以後、液肥）は、前記の金武町内の貯留槽の上澄み部分を施用直前にバキュームカーで採取したものである。液肥の水分は乾物率から求め、pH はガラス電極で、EC は電気伝導率計で測定した。窒素全量はケルダール分解後、分解液中のアンモニア態窒素濃度を比色定量で、リン酸、カリ、石灰、苦土全量は硝酸-硫酸分解後、分解液中のリン酸含量は比色法で、カリ、石灰、苦土含量は原子吸光光度法で定量した。水溶性のアンモニア態窒素、リン酸、カリ含量は液肥を 1400 ×

gで10分間遠心分離し、その上澄みを625倍希釈した後、さらに0.22 μmのフィルターでろ過し、イオンクロマトグラフィーで定量した。

牛ふん堆肥と汚泥発酵肥料については沖縄県内で生産された市販品を使用し、水分含量、pH、EC、リン酸、カリ、石灰、苦土の全量の分析は堆肥等有機物分析法（（財）日本土壌協会，2010）に準じて行った（表3-2）。全窒素および全炭素含量は70℃で乾燥後微粉碎した試料について全自動元素分析装置（エレメンタル社，vario EL cube）で定量し、C/N比を算出した。

表 3-1 供試液肥の成分特性

施用日	水分量 %	pH	EC dS m ⁻¹	全量					三要素水溶性成分		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2013/3/1	98.0	7.5	19.5	0.23	0.19	0.18	0.10	0.08	0.18	0.00	0.13
2013/5/9	97.8	7.7	18.6	—	—	—	—	—	0.15	0.00	0.12
2013/7/5	99.4	8.0	14.4	0.21	0.01	0.17	0.01	0.01	0.11	0.00	0.10
2013/7/26	99.3	7.9	14.2	0.21	0.02	0.17	0.02	0.01	0.11	0.00	0.11
2014/3/4	98.8	7.7	17.8	0.27	0.10	0.15	—	—	0.17	0.01	0.12
2014/5/25	98.6	7.8	15.8	0.24	0.11	0.13	0.07	0.05	0.12	0.01	0.09
2014/7/17	99.4	7.9	13.3	0.16	0.02	0.11	0.01	0.01	0.10	0.00	0.07
2014/7/29	99.5	8.1	12.7	0.17	0.01	0.12	0.01	0.00	0.10	0.01	0.07

1)水溶性成分の硝酸態窒素(NO₃-N)は検出されなかった。

表 3-2 牛ふん堆肥，汚泥発酵肥料の成分特性

	施用日	水分量 %	pH	EC dS m ⁻¹	C/N	全量				
						N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
牛ふん堆肥	2013/3/7	48.7	8.0	5.4	12.2	1.4	2.8	2.1	7.1	1.3
汚泥発酵肥料	2013/3/7	42.9	6.8	3.8	10.0	1.6	3.1	0.7	9.9	1.0

3.2.3 栽培概要

栽培試験は春植え、株出し栽培の2作を同一圃場で行った。1作目の春植え栽培は2013年3月8日にサトウキビ品種NiF8 (*Saccharum spp. hybrid*)を植え付け、収穫調査は同年12月25日に行った。2作目の株出し栽培は春植え収

穫後の2014年3月10日に中耕を行い、株出し栽培を開始し、収穫調査は2015年1月21日に行った。処理区は春植え、株出し栽培ともに慣行区、追肥有機区および完全有機区の3処理とし、各処理区における化学肥料、液肥、牛ふん堆肥、汚泥発酵肥料の施用日および施用量は表3-3に示した。なお金武町では、春植えおよび夏植え栽培の蔗苗植え付け前、また株出し栽培では株揃え、根切り・中耕など(宮里, 1986)の株出し管理作業前後に基肥としての効果を期待して液肥を土壌表面に施用することが一般に行われている。このため、春植え栽培の植え付け前と株出し管理作業時に慣行区を含む全ての処理区の土壌表面に直前に貯留槽から採取した液肥を春植え栽培で 37 t ha^{-1} 、株出し栽培で 50 t ha^{-1} 施用した(表3-3)。液肥の施用量は液肥中のアンモニア態窒素の投入量が基肥の窒素投入量(春植え栽培で 60 kg ha^{-1} 、株出し栽培で 69 kg ha^{-1})とほぼ同等となる量とした。液肥の表面散布は春植え栽培では2013年3月1日に行い、2013年3月7日に土壌と混和した。株出し栽培では2014年3月4日に液肥をサトウキビ株元の土壌表面に散布した後、2014年3月10日に株元に畦間の土壌を覆土した。

春植え、株出し栽培ともに全処理区共通の液肥施用を行った上で、慣行区では沖縄県のさとうきび栽培指針(沖縄県農林水産部, 2006)に準じ慣行の化学肥料の施肥を行った。春植え栽培では2013年3月8日に畦間140 cmで作畦後、基肥の化学肥料を植え溝に条施し、薄く覆土した上にサトウキビの二芽苗を並べ、苗を覆土して植え付けを行った。追肥は、5月5日および7月4日の培土時に化学肥料を株元に条施し、肥料が覆土されるようにした。株出し栽培では2013年春植え収穫後の刈り株の株元に、2014年3月3日に基肥として化学肥料を施用し、その後3月10日に覆土を行った。追肥は春植え栽培同様、5月25日および7月16日の培土時に化学肥料を株元に条施した。

表 3-3 各処理区における化学肥料, 液肥, 牛ふん堆肥, 汚泥発酵肥料の
施用日および施用量

施用日		慣行区	追肥有機区	完全有機区
春植え	2013/3/1 植え付け前	液肥 37 t ha ⁻¹	(慣行区と 同じ)	(慣行区と 同じ)
	2013/3/7or8 基肥	化学肥料 380 kg ha ⁻¹	(慣行区と 同じ)	牛ふん堆肥, 汚泥発酵肥料 各々 5.5 t ha ⁻¹
	2013/5/5or9	化学肥料 380 kg ha ⁻¹	液肥 30 t ha ⁻¹	
	2013/7/4or5 追肥	化学肥料 500 kg ha ⁻¹	液肥 45 t ha ⁻¹	(追肥有機区 と同じ)
	2013/7/26		液肥 45 t ha ⁻¹	
株出し	2014/3/4 株出し 管理時	液肥 50 t ha ⁻¹	(慣行区と 同じ)	(慣行区と 同じ)
	2014/3/3 基肥	化学肥料 430 kg ha ⁻¹	(慣行区と 同じ)	汚泥発酵肥料 10 t ha ⁻¹
	2014/5/25	化学肥料 430 kg ha ⁻¹	液肥 40 t ha ⁻¹	
	2014/7/ 16or17 追肥	化学肥料 580 kg ha ⁻¹	液肥 55 t ha ⁻¹	(追肥有機区 と同じ)
	2014/7/29		液肥 50 t ha ⁻¹	

1) 慣行区の化学肥料の施用量は沖縄県のさとうきび栽培指針(沖縄県農林水産部, 2006)に準じた。

2) 化学肥料は BB666 号 (N 16%, P₂O₅ 16%, K₂O 6%) を用いた。

追肥有機区では, 基肥は慣行区と同様に行い, 追肥は直前に貯留槽から採取した表 3-1 の液肥を用いた。液肥は液肥中のアンモニア態窒素の投入量が慣行区の追肥の窒素投入量 (春植え栽培で 140 kg ha⁻¹, 株出し栽培で 161 kg ha⁻¹) とほぼ同等となる量を施用した (表 3-3)。また, メタン発酵消化液の畑地における液肥施用のマニュアル (農村工学研究所, 2012) には, 液肥を均一に施用する

には 50 から 60 t ha⁻¹ が 1 回の施用量の限界との記述があることから、本試験における液肥の施用も 60 t ha⁻¹ を超えないようにした。液肥の施用は 3 回に分けて行い、春植え栽培では 2013 年 5 月 9 日と 7 月 5 日の培土後に各々 30 t ha⁻¹ と 45 t ha⁻¹、7 月 26 日に 45 t ha⁻¹ の計 120 t ha⁻¹ を、株出し栽培では 2014 年 5 月 25 日と 7 月 17 日の培土後に各々 40 t ha⁻¹ と 55 t ha⁻¹、7 月 29 日に 50 t ha⁻¹ の計 145 t ha⁻¹ を行った。液肥は培土時に碎土された土壌の表面に施用したため、速やかに浸透した。

完全有機区では、基肥として牛ふん堆肥と汚泥発酵肥料を用いた。春植え栽培では作溝前日の 2013 年 3 月 7 日に牛ふん堆肥 5.5 t ha⁻¹ と汚泥発酵肥料 5.5 t ha⁻¹ を処理区の土壌表面に均一に施用後、トラクタによるロータリ耕うんで土壌と混和した。植え付けは 2013 年 3 月 8 日に畦間 140 cm で作畦後、植え溝にサトウキビの二芽苗を並べ、苗を覆土した。株出し栽培では 2014 年 3 月 3 日に汚泥発酵肥料 10 t ha⁻¹ を株元の土壌表面に施用し、3 月 10 日に管理機で畦間を溝切りしながら畝間の土壌で株元を覆土した。追肥は春植え、株出しともに追肥有機区と同じ処理とした。

各処理区の 1 区面積は 28 m² (畦幅 1.4 m×畦長 20 m) とし、3 反復で配置した。処理区の間には番外を 2 畦設け、処理区間で影響が生じないようにした。また試験圃場から約 16 km 北に位置する名護地点のアメダスデータによると、春植え栽培期間 (2013 年 3 月～12 月) の降雨量は 2008 から 2012 年の 5 年間の平均 1910 mm よりも 21 %少ない 1509 mm で、特に 6 月～9 月の降雨量は 352 mm と、2008 から 2012 年の 5 年間の平均 942 mm を大きく下回った。このため、作物の生育状況を見ながら、全処理区に灌水チューブで灌水を行った。株出し栽培期間には作物が健全に育つための十分量の降雨があったため、灌水は行わなかった。

3.2.4 サトウキビの調査および分析方法

サトウキビ地上部については生育期間中、茎数、仮茎長を定期的に調査した。春植え栽培では各区内で畦長 3 m を 2 カ所選び、6 月 6 日と 7 月 4 日に全茎数を、7 月 25 日以降は有効茎数を調査し、そのうち各地点の健全な 20 本について仮茎長を調査した。株出し栽培では連続した萌芽が得られた畦長 2 m を 2 カ所選び、5 月 25 日と 7 月 16 日に全茎数を、8 月 19 日以降は有効茎数を調査し、そのうち各地点の健全な 10 本について仮茎長を調査した。収量調査は、春植え栽培では 2013 年 12 月 25 日に、株出し栽培では 2015 年 1 月 21 日に茎数、仮茎長の調査を行った 2 カ所の原料茎を全て収穫し、原料茎数、原料茎重、原料茎長、梢頭部重、葉重を測るとともに、健全な 5 本の蔗茎を搾汁し、蔗汁とバガスに分けた。蔗汁は現地で搾汁後速やかに冷凍して持ち帰り、POL は自動糖度計 (Anton Paar 社, MCP200 Sucromat), ブリックスはデジタル屈折計 (ATAGO 社, RX-5000) で測定した。蔗汁糖度はホーン法により POL から導き、繊維分は碎裂したバガス 200 g 当りの乾物重を定量して導いた。それらの値を以下の式にあてはめて甘蔗糖度を算出した。

$$\text{甘蔗糖度} = \text{蔗汁糖度} \times (1.049 - (0.01883 \times \text{繊維分}))$$

可製糖量は、以下の式により純糖率、可製糖率から算出した (農林水産省九州農業試験場ほか, 1982)。

$$\text{純糖率} = \frac{\text{蔗汁糖度}}{\text{ブリックス}} \times 100$$

$$\text{可製糖率} = \text{甘蔗糖度} \times 0.96 \times \left(1.4 - \frac{40}{\text{純糖率} \times 0.97} \right) \times 1.03$$

$$\text{可製糖量} = \frac{\text{原料茎重} \times \text{可製糖率}}{100}$$

また、春植え栽培、株出し栽培ともに、地上部を蔗茎 (バガスと蔗汁) とその他 (鞘頭部・葉) に分け、それぞれの窒素、リン酸、カリの含量から地上部の窒素、リン酸、カリの吸収量を求めた。試料は前述の甘蔗糖度算出に用いたサトウ

キビ 5 本を用い、蔗汁は原液のまま、バガスは破裂した試料の一部を 70℃で乾燥、ウィレー粉砕機で粉砕した試料について、鞘頭部・葉は鞘頭部と葉を混合して 1 cm 程度に破碎後、一部を 70℃で乾燥、ウィレー粉砕機で粉砕した試料について、硫酸一過酸化水素分解を行い、分解液中の窒素とリン酸は比色法で、カリは原子吸光光度法（株出し栽培の作物体試料は ICP 発光法）で定量し、1 ha 当たりの収量と乗じて窒素、リン酸、カリの吸収量を求めた。

3.3 結果と考察

3.3.1 サトウキビの茎数および仮茎長の推移

茎数と仮茎長の推移を図 3-1 に示した。生育期間中の茎数、仮茎長の推移は春植え栽培および株出し栽培ともに一元配置の分散分析で処理区間に有意な差は無かった。

春植え栽培では生育初期の 6 月 6 日の 1 ha 当たりの全茎数は慣行区で 89.8×10^3 本、追肥有機区で 91.2×10^3 本、完全有機区で 76.2×10^3 本であり、完全有機区で低い傾向となっていた。その後も完全有機区で低い傾向は変わらず、9 月 26 日の有効茎数は慣行区で 85.4×10^3 本、追肥有機区で 85.2×10^3 本、完全有機区で 76.0×10^3 本であった。一方、仮茎長は 6 月 6 日には慣行区で 29 cm、追肥有機区で 30 cm、完全有機区で 29 cm と慣行区と完全有機区で同じであったが、8 月 6 日は慣行区で 146 cm、追肥有機区で 150 cm、完全有機区で 141 cm、9 月 26 日は慣行区で 206 cm、追肥有機区で 208 cm、完全有機区で 190 cm と茎数同様、完全有機区で低い傾向となった。株出し栽培では、5 月 25 日の 1 ha 当たりの全茎数が慣行区で 121.4×10^3 本、追肥有機区で 134.5×10^3 本、完全有機区で 120.2×10^3 本と追肥有機区のみ慣行区を上回っていたが、7 月 16 日は慣行区で 75.6×10^3 本、追肥有機区で 94.1×10^3 本、完全有機区で 79.8×10^3 本

と5月25日に比べて各処理区で本数は減少し、春植え栽培とは異なり、株出し栽培では追肥有機区と完全有機区の全茎数が慣行区を上回る傾向となった。

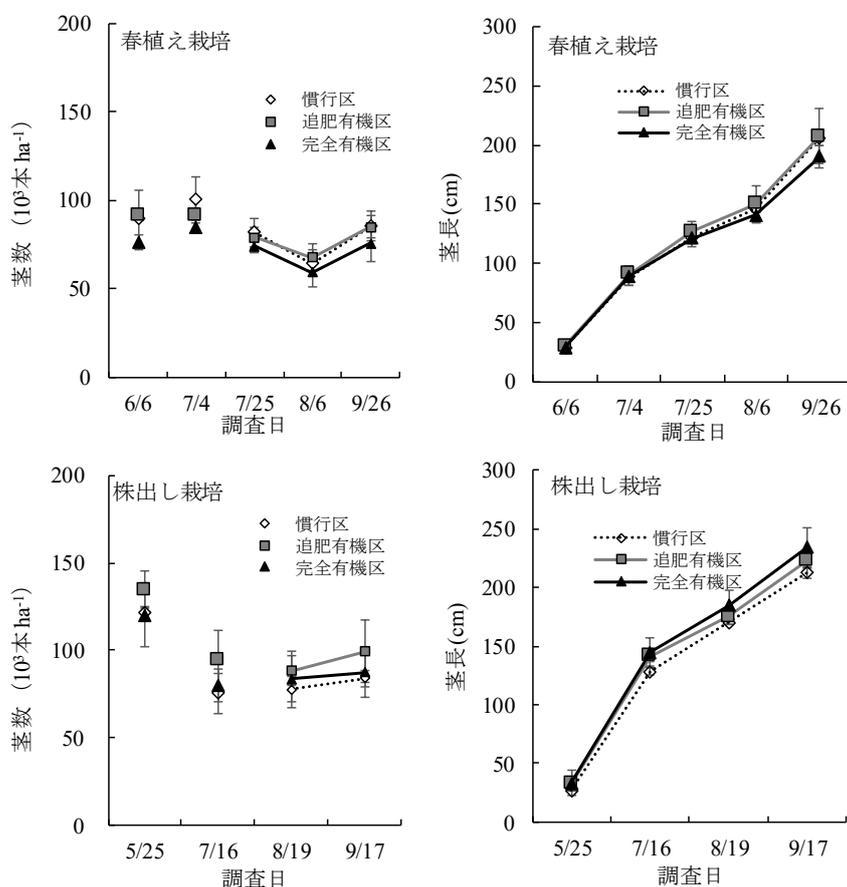


図 3-1 春植えおよび株出し栽培における茎数(全茎数と有効茎数)と仮茎長の推移

- 1)全茎数はデータを示す点のみとした。有効茎数はデータを示す点を線でつないだ。
- 2)春植え栽培においては6月6日、7月4日、7月25日、8月6日、9月26日に調査を行った。茎数については、6月6日と7月4日には全茎数を計数し、7月25日以降は有効茎数のみ計数した。
- 3)株出し栽培においては5月25日、7月16日、8月19日、9月17日に調査を行った。茎数については、5月25日と7月16日には全茎数を計数し、8月19日以降は有効茎数のみ計数した。
- 4)値は3反復の平均値、エラーバーは標準偏差。一元配置分散分析で処理区間に有意差なし。

株出し栽培では茎の地下部から多くの芽が一斉に発芽伸長するため春植え栽培にくらべて生育初期の全茎数は多かったものの、7月16日にはその3割程度

が枯死したと考えられた。9月17日の有効茎数も慣行区で 83.9×10^3 本、追肥有機区で 99.4×10^3 本、完全有機区で 87.5×10^3 本と追肥有機区と完全有機区の有効茎数が慣行区を上回る傾向となった。仮茎長は5月25日に慣行区で27 cm、追肥有機区で33 cm、完全有機区で33 cm、9月17日には慣行区で213 cm、追肥有機区で223 cm、完全有機区で234 cmと春植え栽培とは異なり追肥有機区と完全有機区の仮茎長も生育初期から慣行区を上回る傾向であった。

3.3.2 サトウキビの収量および品質

原料茎数、原料茎重、甘蔗糖度および可製糖量を表3-4に示した。春植え栽培、株出し栽培ともに原料茎数、原料茎重、甘蔗糖度および可製糖量は処理区間に有意な差は無かったが、図3-1の茎数、仮茎長の推移と同様の傾向が見られた。春植え栽培の原料茎数は慣行区で 90.1×10^3 本、追肥有機区で 87.7×10^3 本、完全有機区で 78.6×10^3 本、原料茎重は慣行区で 85.5 t ha^{-1} 、追肥有機区で 84.0 t ha^{-1} 、完全有機区で 79.0 t ha^{-1} であり、完全有機区で最も低い傾向がみられた。甘蔗糖度は通常よりもやや早い12月の収穫であったため全体的に低く、慣行区で12.8%、追肥有機区で12.7%、完全有機区で12.3%であり、可製糖量は慣行区で 9.8 t ha^{-1} 、追肥有機区で 9.5 t ha^{-1} 、完全有機区で 8.6 t ha^{-1} と、原料茎数、原料茎重と甘蔗糖度同様、完全有機区で低い傾向がみられた。

一方、株出し栽培の原料茎数は慣行区で 62.5×10^3 本、追肥有機区で 62.5×10^3 本、完全有機区で 64.9×10^3 本であり、完全有機区で高い傾向がみられた。原料茎重は慣行区で 45.8 t ha^{-1} 、追肥有機区で 50.0 t ha^{-1} 、完全有機区で 56.7 t ha^{-1} であり、慣行区とくらべて追肥有機区と完全有機区で高い傾向となった。

一方、甘蔗糖度は慣行区で14.7%、追肥有機区で14.5%、完全有機区で14.0%であり、完全有機区で最も低い傾向であった。可製糖量は、慣行区で 6.1 t ha^{-1} 、追肥有機区で 6.6 t ha^{-1} 、完全有機区で 7.2 t ha^{-1} であり、原料茎重同様、慣

行区とくらべて追肥有機区と完全有機区で高い傾向となった。

表 3-4 春植えおよび株出し栽培における収穫時のサトウキビの
原料茎数, 原料茎重, 甘蔗糖度, 可製糖量

処理区	春植え栽培			
	原料茎数 (10 ³ 本 ha ⁻¹)	原料茎重 (t ha ⁻¹)	甘蔗糖度 (%)	可製糖量 (t ha ⁻¹)
慣行区	90.1±3.4 (100)	85.5± 6.8 (100)	12.8±0.3 (100)	9.8±0.7 (100)
追肥有機区	87.7±6.9 (97)	84.0±15.5 (98)	12.7±0.5 (99)	9.5±1.5 (96)
完全有機区	78.6±7.2 (87)	79.0± 6.4 (92)	12.3±0.4 (96)	8.6±0.7 (88)
処理区	株出し栽培			
	原料茎数 (10 ³ 本 ha ⁻¹)	原料茎重 (t ha ⁻¹)	甘蔗糖度 (%)	可製糖量 (t ha ⁻¹)
慣行区	62.5±7.1 (100)	45.8± 5.4 (100)	14.7±0.4 (100)	6.1±0.8 (100)
追肥有機区	62.5±5.4 (100)	50.0±12.2 (109)	14.5±0.3 (98)	6.6±1.5 (108)
完全有機区	64.9±8.8 (104)	56.7±13.5 (124)	14.0±0.5 (95)	7.2±1.6 (118)

- 1) 春植え栽培は 2013 年 12 月 25 日に, 株出し栽培は 2015 年 1 月 21 日に調査した。
- 2) 値は 3 反復の平均値±標準誤差。括弧内は慣行区に対する比率(%)を表す。
- 3) すべての調査項目で, 一元配置の分散分析で処理区間に有意差なし。

3.3.3 窒素, リン酸, カリの投入量とサトウキビ地上部による吸収量

資材中の濃度と施用量から換算した化学肥料, 液肥, 牛ふん堆肥, 汚泥発酵肥料による窒素, リン酸, カリの施用量は表 3-5 に示した。春植え栽培における窒素の投入量は慣行区の 283 kg ha⁻¹に対し, 追肥有機区で 398 kg ha⁻¹, 完全有機区で 487 kg ha⁻¹と追肥を液肥に, 基肥を牛ふん堆肥および汚泥発酵肥料に代替することで増加した。リン酸の投入量は, 慣行区の 145 kg ha⁻¹に対し, 追肥有機区では 124 kg ha⁻¹と減少したが, 完全有機区では牛ふん堆肥および汚泥発酵肥料の施用により 422 kg ha⁻¹と増加した。カリの投入量は, 慣行区の 142 kg ha⁻¹に対し, 追肥有機区で 299 kg ha⁻¹, 完全有機区で 428 kg ha⁻¹と, 化学肥料を液肥, 牛ふん堆肥および汚泥発酵肥料で代替することで窒素同様増加した。株出し栽培においては窒素の投入量は慣行区の 365 kg ha⁻¹

に対し、追肥有機区で 476 kg ha⁻¹、完全有機区で 532 kg ha⁻¹と春植え栽培同様増加した。リン酸の投入量は、慣行区の 135 kg ha⁻¹に対し、追肥有機区では 133 kg ha⁻¹と減少し、完全有機区では 419 kg ha⁻¹と増加した。カリの投入量は、慣行区の 163 kg ha⁻¹に対し、追肥有機区で 274 kg ha⁻¹、完全有機区で 331 kg ha⁻¹と窒素同様増加したが、カリを多く含む牛ふん堆肥を施用しなかったため、春植え栽培よりも投入量は低かった。

表 3-5 各処理区における窒素(N), リン酸(P₂O₅), カリ(K₂O)施用量

	慣行区			追肥有機区			完全有機区		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2013年春植え									
植え付け前	83	69	66	83	69	66	83	69	66
基肥	60	23	23	60	23	23	149	321	152
追肥	140	53	53	255	32	210	255	32	210
2014年株出し									
株出し管理時	135	49	77	135	49	77	135	49	77
基肥	69	26	26	69	26	26	125	312	83
追肥	161	60	60	272	58	171	272	58	171
2013年春植え合計									
	283	145	142	398	124	299	487	422	428
2014年株出し合計									
	365	135	163	476	133	274	532	419	331

1)窒素, リン酸, カリは各資材中の全量と施用量から算出した。

2)2013年の春植え栽培において5月9日に施用した豚ふん尿由来液肥の窒素, リン酸, カリの全量は未分析であったため, 3月1日, 7月5日, 7月26日の分析値の平均値を用いた。

3)2014年の株出し栽培に施用した汚泥発酵肥料の窒素, リン酸, カリの含量は2013年の春植え栽培で使用した汚泥発酵肥料の分析値を用いた。

窒素, リン酸, カリの化学肥料, 液肥, 牛ふん堆肥, 汚泥発酵肥料による投入量と蔗茎(バガスおよび蔗汁)とその他(鞘頭部・葉)による地上部吸収量を図3-2に示した。各処理区の窒素, リン酸, カリの地上部吸収量は蔗茎(バガスと蔗汁)とその他(鞘頭部・葉)の窒素, リン酸, カリ含量に地上部のバイオマス量を乗じて求めた。表3-6に示すように窒素, リン酸, カリ含量は処

理区間で有意差はみられなかったため、地上部吸収量は地上部のバイオマス量を反映し、原料茎重と同様の傾向を示した。春植え栽培での地上部吸収量は完全有機区で慣行区と追肥有機区よりも若干少なかった。

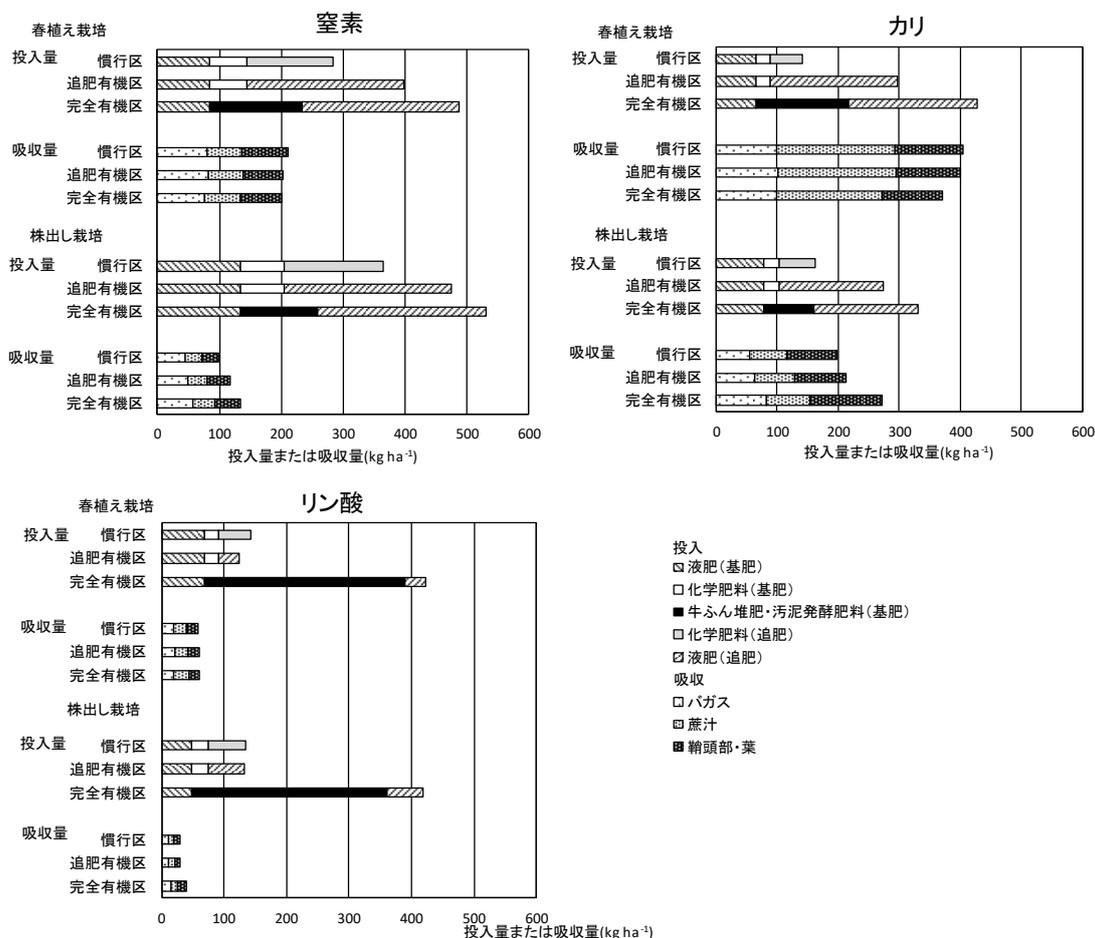


図 3-2 各処理区における窒素, リン酸, カリの投入量と
 蔗汁液, バガス, 鞘頭部・葉による地上部吸収量

- 1) 投入量は化学肥料, 豚ふん尿由来液肥, 牛ふん堆肥や汚泥発酵肥料による窒素, リン酸, カリ施用量の全量とし, 地上部吸収量は蔗汁液, バガス, 鞘頭部・葉の窒素, リン酸, カリ含量と 1 ha 当たりの収穫茎における各部位のバイオマス量を乗じた値とした。
- 2) 2013 年春植え栽培の 5 月 9 日施用の豚ふん尿由来液肥の窒素, リン酸, カリの全量は未分析であったため, 3 月 1 日, 7 月 5 日, 7 月 26 日の分析値を平均した値を用いた。
- 3) 2014 年株出し栽培において施用した汚泥発酵肥料の窒素, リン酸, カリの含量は未分析であったため, 2013 年春植え栽培で施用した汚泥発酵肥料の分析値を用いた。

投入量と地上部吸収量を比較すると、窒素とリン酸の投入量は全ての処理区において地上部吸収量を上回ったが、カリの投入量は慣行区と追肥有機区では地上部吸収量を下回り、完全有機区のみ、わずかに吸収量を上回った。株出し栽培での地上部吸収量は追肥有機区、完全有機区で慣行区よりも多い傾向が見られた。投入量と吸収量を比較すると、春植え栽培同様、窒素とリン酸の投入量は全ての処理区において地上部吸収量を上回った。カリの投入量は春植え栽培とは異なり、慣行区のみ吸収量を下回り、追肥有機区と完全有機区は吸収量を上回った。

表 3-6 蔗茎(バガスと蔗汁)とその他(鞘頭部・葉)の窒素, リン酸, カリの含量

体系	処理区	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
		蔗汁 %現物	バガス %現物	鞘頭部 %現物	蔗汁 %現物	バガス %現物	鞘頭部 %現物	蔗汁 %現物	バガス %現物	鞘頭部 %現物
春植え栽培	慣行区	0.11	0.24	0.30	0.04	0.06	0.08	0.37	0.30	0.45
	液肥有機区	0.11	0.25	0.27	0.04	0.06	0.07	0.37	0.31	0.44
	完全有機区	0.13	0.25	0.29	0.05	0.07	0.07	0.36	0.31	0.45
	ANOVA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
株出し栽培	慣行区	0.10	0.24	0.27	0.04	0.06	0.10	0.29	0.30	0.64
	液肥有機区	0.13	0.26	0.28	0.03	0.06	0.09	0.28	0.33	0.59
	完全有機区	0.13	0.25	0.28	0.04	0.07	0.09	0.33	0.35	0.57
	ANOVA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

1) ns は有意差無し(ANOVA)。

3.3.4 土壌の化学性の変化

春植え栽培前と株出し栽培後の土壌の分析値は表 3-7 に示した。慣行区においては、pH(H₂O)、無機態窒素含量および交換性カリ、石灰、苦土含量は、株出し栽培後に有意に低下し、追肥有機区においては、交換性カリ、石灰、苦土含量が有意に低下した。完全有機区においてはいずれの分析値も春植え栽培前と株出し栽培後で有意な差は無く、株出し栽培後の土壌の採取位置は地上部による養分吸収が盛んな株元であったにも関わらず、pH(H₂O)、可給態リン酸含量、交換性石灰、苦土含量は、春植え栽培前にくらべて上昇傾向であった。株出し栽培

後の完全有機区の pH(H₂O), 可給態リン酸含量と交換性石灰含量のみ, サトウキビ畑(土壌:赤黄色土(国頭マーヅ))における土壌診断基準値(沖縄県, 1979)を満たした。

表 3-7 春植え栽培前と株出し栽培後の土壌の理化学性

処理区	pH(H ₂ O)		EC		無機態窒素	
	春前	株後	春前	株後	春前	株後
			dS m ⁻¹		mg kg ⁻¹	
慣行区	5.14	4.28 *	0.07	0.11 ns	21.4	13.2 *
追肥有機区	5.25	5.00 ns	0.07	0.06 ns	19.0	15.2 ns
完全有機区	5.17	5.79 ns	0.07	0.07 ns	17.3	13.4 ns
土壌診断基準	5.5~6.5					

処理区	可給態リン酸		交換性カリ		交換性石灰		交換性苦土	
	春前	株後	春前	株後	春前	株後	春前	株後
	mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
慣行区	61	64 ns	226	92 *	841	324 **	174	90 *
追肥有機区	68	51 ns	317	190 *	896	570 *	211	150 **
完全有機区	66	214 ns	261	225 ns	881	1432 ns	189	233 ns
土壌診断基準	100以上		94~188		1402~2804		302~605	

1)土壌診断基準値は赤黄色土(国頭マーヅ)における栽培作物別土壌診断基準(案)のサトウキビ畑における基準値(沖縄県, 1979)を掲載した。2)値は3反復の平均値, *および**は p<0.05, p<0.01 で有意差あり, ns:有意差なし(t検定)。

3.3.5 液肥, 牛ふん堆肥や汚泥発酵肥料がサトウキビの茎数, 仮茎長と原料茎重, 可製糖量に及ぼす影響

追肥有機区における茎数, 仮茎長の推移は春植え栽培では慣行区と同等であり, 株出し栽培では慣行区をやや上回る傾向を示した(図 3-1)。原料茎重と可製糖量は, 表 3-4 に示したようにいずれも慣行区とほぼ同じ収量であった。このことから, 液肥を追肥として利用する減化学肥料栽培が春植え, 株出し栽培ともに可能であり, 液肥の施用量は追肥の化学肥料の窒素量に相当するアンモニア態窒素を含む量とみなせることを確認できた。慣行区では追肥の化学肥料は培

土時に 2 回に分けて施用しているが、追肥有機区では追肥の液肥は培土時の 2 回と培土後の 1 回の計 3 回に分けて施用している。一般的に液体肥料は固形の化学肥料にくらべて速効性が高い分、持続性は劣る。またアンモニア態窒素主体の液肥を土壌表面施用すると、施用した窒素の最大 30%がアンモニアとして揮散することが明らかとなっている（農村工学研究所，2012）。本研究においては 3 回に分けて施用したこと、液肥は培土時に砕土された土壌の表面に施用したため速やかに浸透したこと、液肥には有機態の窒素が含まれ一部は無機化したと考えられることなどから、アンモニア揮散による損失が補われ、化学肥料と同等の窒素供給が実現出来、慣行区と同等の生育、収量を確保できたことが示唆された。

一方、完全有機区における茎数、仮茎長の推移は追肥有機区とは傾向が異なっていた。春植え栽培においては、完全有機区の茎数は生育初期の 6 月から収穫時の原料茎数まで慣行区を下回り、仮茎長は生育初期には慣行区と同等であったものの、8 月以降、慣行区を下回っていた。茎数や仮茎長と同様、原料茎重と可製糖量も慣行区を下回った（図 3-1, 表 3-4）。しかし、株出し栽培においては、茎数は生育初期の 5 月末から収穫時の原料茎数まで慣行区と同等であり、仮茎長は生育初期から慣行区を上回る傾向を示した。そして仮茎長同様、原料茎重、可製糖量も慣行区を上回る傾向を示した（図 3-1, 表 3-4）。

単年の試験結果ではあるものの、春植え栽培では基肥の化学肥料を堆肥に置き換えると茎数を確保できず収量は下がってしまうこと、株出し栽培においては基肥の化学肥料を堆肥 10 t ha^{-1} に置き換えても化学肥料並の初期生育が得られ、収量も化学肥料並に得られる可能性が示された。表 3-3 に示したように、株出し管理時に液肥を施用しているため、液肥中の養分が効率的にサトウキビに吸収されて株に蓄積され、生育初期の茎数の確保に有効だったと考えている。

また、表 3-4 の春植え栽培の原料茎重は処理区により異なる傾向を示したも

の、いずれの処理区も 2013 年度春植え栽培サトウキビの沖縄全県平均および金武町平均の原料茎重（沖縄全県平均 41.9 t ha^{-1} と金武町平均 33.2 t ha^{-1} （沖縄県農林水産部，2014b））を大きく上回る結果であった。沖縄県農林水産部糖業農産課（2014a）は、2013 年度の沖縄本島におけるサトウキビの生育概況として、梅雨開け以降の少雨により干ばつ状態になり、生育が停滞したと述べている。本試験の収量が沖縄全県平均および金武町平均を大きく上回った要因として、3.3.3 栽培概要で記述したように少雨を補うために適切な灌水を行ったことにより生育が良好であったことが考えられた。また、本試験では確認はしなかったものの、液肥には灌水の効果も期待できる。一方、株出し栽培においては 10 月に沖縄本島に接近した台風 19 号による圃場全体の折損、倒伏害のため春植え栽培にくらべて収量は全体的に劣り、原料茎重は春植え栽培の 60%程度であった。いずれの処理区の原料茎重も 2014 年度株出し栽培サトウキビの沖縄全県平均および金武町平均の原料茎重（沖縄全県平均 44.5 t ha^{-1} と金武町平均 33.7 t ha^{-1} （沖縄県農林水産部，2015））をやや上回る結果となった。

3.3.6 液肥、牛ふん堆肥や汚泥発酵肥料が窒素、リン酸、カリ収支および甘蔗糖度に及ぼす影響

窒素、リン酸、カリの投入量と地上部吸収量の差は処理区により大きく異なっていた（図 3-2）。液肥の投入量は、含まれるアンモニア態窒素の投入量が化学肥料の窒素投入量と同等となる量としたが、表 3-1 および表 3-5 に示すように液肥の全窒素含量はアンモニア態窒素の含量よりも多く、その分、液肥による窒素の全投入量は化学肥料を上回った。また、堆肥の窒素肥効は低いものの、全窒素含量は化学肥料を上回っており、窒素の投入量は完全有機区において最も多かった。しかし窒素の吸収量は投入量に依存せず、窒素の投入量と吸収量の差も完全有機区で大きくなっていた。

リン酸については、追肥有機区における投入量は、慣行区に比べて 20 kg ha^{-1} 少なかった。久場ら (1998) が指摘しているように、豚尿中のリン酸は低濃度であるため液肥を使用することによりリン酸不足が生じることが懸念されたが、地上部の吸収量とくらべ $59\sim 60 \text{ kg ha}^{-1}$ 上回る量であり、原料茎重、可製糖量や甘蔗糖度に影響は無かった (表 3-4)。久場 (2004) は、リン酸の投入量はサトウキビによる吸収で持ち出される量を補充する程度で十分とも推察しており、追肥有機区でのリン酸不足は生じないと判断された。完全有機区におけるリン酸の投入量は牛ふん堆肥および汚泥発酵肥料からの投入量が多いために慣行区、追肥有機区のリン酸投入量の 3 倍であった。しかし、リン酸の吸収量は投入量に依存せず、投入量と吸収量の差は窒素同様、完全有機区で大きくなっていた。

カリは、慣行区では栽培指針のカリ施用量である春植え栽培の 100 kg ha^{-1} 、株出し栽培の 110 kg ha^{-1} とくらべ基肥前に液肥を施用している分、上乘せされ、各々栽培指針の 1.4 倍と 1.5 倍、追肥有機区では追肥を液肥に代替することで、各々 3 倍と 2.5 倍、完全有機区では窒素同様、液肥、牛ふん堆肥、汚泥発酵肥料により多く投入され、各々 4.3 倍と 3 倍のカリを投入していた。しかしカリはサトウキビ体内ではケイ酸に次いで多量に含まれる無機成分であり、施肥量に対する吸収量の割合はカリが著しく高い (宮里, 1986) ことが報告されている。本試験においてもカリの吸収量は窒素やリン酸に比べて多く (図 3-2)、春植え栽培の慣行区、追肥有機区および株出し栽培の慣行区においては、カリ地上部吸収量はカリ投入量を上回っていた。しかしカリ含量は表 3-6 に示すように各区で差は無く、表 3-4 のように原料茎重も県平均を大きく上回っていたことから、カリ不足は生じていないと判断できた。

本試験では地上部吸収量のみを対象とし、地下部については分析していない。サトウキビは 2 回培土を行い、地中の節数を増やすことで発根と根の生長を助け、養水分の吸収を促す (宮里, 1986)。そして株出しでは茎の地下部から萌芽

する分げつを収穫するため、地下部の茎および根による養分の吸収量は少なくないと考えられ、慣行区、追肥有機区におけるカリの全吸収量は投入量を大きく上回っていることが推察される。

一方、蔗汁中のカリ含量が高まることにより甘蔗糖度が低下することが川満ら（2000）や Watanabe et al.（2016）により報告されている。川満ら（2000）はそのメカニズムとして、土壌中にカリが過剰に存在することによりマグネシウムの吸収が抑制され、光合成速度が低下する可能性を示している。また、古江（2009）は黒糖焼酎廃液のサトウキビへの施用試験において多量施用により甘蔗糖度が低下することを認め、甘蔗糖度とサトウキビ鞘頭部の窒素含有率との関係から窒素過多を要因として挙げている。

本試験においては蔗汁中のカリ含量、鞘頭部・葉の窒素含量ともに処理区間で有意な差は無かった（表 3-6）。しかし春植え栽培、株出し栽培ともに処理区間で有意な差は無いものの、表 3-4 に示すように完全有機区の甘蔗糖度は低い傾向が見られた。堆肥や液肥の施用は甘蔗糖度の低下を招く可能性について長期的な影響を評価する必要があると考えられた。

3.3.7 液肥、牛ふん堆肥や汚泥発酵肥料が土壌の化学性に及ぼす影響

春植え栽培前と株出し栽培後の土壌分析値の変化は処理区により異なっていた（表 3-7）。可給態リン酸含量については完全有機区では上昇傾向がみられ、株出し栽培後の値は土壌診断基準値の範囲を満たした（表 3-7）。比嘉ら（2011）は、沖縄県南部のジャーガルにおける堆肥 25 t ha^{-1} の 9 年間の連用により可給態リン酸含量が経年増加したことを報告している。本試験においてもサトウキビによる吸収、持ち出しを上回る牛ふん堆肥と汚泥発酵肥料由来のリン酸の投入を行った結果、可給態リン酸含量は上昇傾向であったと考えられた。

交換性カリ含量は春植え栽培前には全処理区で土壌診断基準値の 94~188

mg kg⁻¹の範囲を超えていたが、株出し栽培後の慣行区と追肥有機区の値は減少し、慣行区の値は土壌診断基準値の範囲を下回っていた。慣行区と追肥有機区のサトウキビ地上部によるカリ吸収量は投入量以上であり、投入を超える分は土壌中の交換性カリが吸収されたと考えられた。

境垣内ら（2014）は、黒ボク土の圃場においてカリ施肥量を減らした条件下で飼料用サトウキビを栽培し、株出し回数が進むにつれて収量の低下が認められたことを示している。また、現行の施肥方法においても土壌の交換性カリ含量が減少傾向であることから、堆肥などでカリを還元することが収量維持に重要と述べている。一方、久場(1993)は交換性カリ含量が 28 mg kg⁻¹ と非常に低い赤黄色土において無カリ栽培が 4 作可能であり、非交換性カリ（熱濃硫酸抽出）の交換性カリへの移行が示唆されたとしている。本試験で使用した圃場の土壌も赤黄色土であるため、非交換性カリの交換性カリへの移行を期待できる可能性もあるが、長期的な収量維持の観点からはカリを多く含む堆肥や液肥を圃場に還元することにより、土壌の交換性カリ含量を土壌診断基準値の範囲に維持することが重要であると考えられた。

また、交換性石灰、苦土含量について慣行区と追肥有機区では減少していたが、完全有機区の交換性石灰、苦土含量は上昇傾向であり、株出し栽培後の交換性石灰含量は土壌診断基準値の範囲を満たした（表 3-7）。奄美地域における堆肥（1年当たり 20～100 t ha⁻¹）の 7 年間連用試験では、透水性が高く石灰、苦土が溶脱しやすい暗赤色土であるにも関わらず、堆肥の施用により交換性石灰、苦土含量の減少傾向が緩和されたことが報告されている（後藤・永田，2008）。本試験の赤黄色土は暗赤色土よりも溶脱は置きにくい。表 3-2 の牛ふん堆肥と汚泥発酵肥料の成分値と表 3-3 の施用量から慣行区よりも余分に土壌に投入された量を算出すると、完全有機区では春植え栽培と株出し栽培において石灰で 1 ha 当たり各々 936 kg と 992 kg，苦土で 1 ha 当たり各々 73 kg と 58 kg であった。

完全有機区では土壌 pH も上昇傾向で、株出し栽培後の値は土壌診断基準値の範囲を満たしており、牛ふん堆肥と汚泥発酵肥料の石灰質肥料としての効果も確認できた。

3.4 まとめ

赤黄色土において、地域の有機質資源である豚ふん尿由来液肥、牛ふん堆肥、汚泥発酵肥料を活用した春植え一株出し体系のサトウキビの減・無化学肥料栽培のための施肥管理方法の開発を行った。豚ふん尿由来液肥の施用量は、窒素肥料相当量のアンモニア態窒素を投入できる量とし、追肥の化学肥料の代替として豚ふん尿由来液肥を施用することで化学肥料を 70%削減でき、化学肥料と同等の収量を得ることが可能であった。本試験では全区に十分な灌水を行ったため、液肥による灌水効果は調査できていないが、干ばつ時には液肥による灌水の効果も期待できると考えられた。また、牛ふん堆肥と汚泥発酵肥料を合わせて 10 a 当たり 1 t 施用したところ、十分なリン酸およびカリの施肥効果があり、特にカリはサトウキビ収穫による収奪量を補うことが可能であった。また、豚ふん尿由来液肥、牛ふん堆肥と汚泥発酵肥料の施用は作物に対する養分供給効果があるだけでなく、作物に吸収されなかった養分が土壌に残存することにより赤黄色土の化学性（pH、可給態リン酸や交換性石灰、苦土、カリ含量）も改善した。一方、堆肥や液肥の施用は甘蔗糖度の低下を招く可能性があるため、長期的な影響を評価する必要も示された。

第4章 久住高原の草地における非アロフェン質黒ボク土の分布の特徴と土壤酸性管理基準の提案

4.1 背景と目的

わが国に広く分布する黒ボク土は粘土鉱物組成によりアロフェン質黒ボク土と非アロフェン質黒ボク土に区分される。アロフェン質黒ボク土はアロフェンとイモゴライトを多く含む一方、非アロフェン質黒ボク土は主に 2:1 型の粘土鉱物を含み(Shoji and Fujiwara, 1984), 粘土鉱物および Al-腐植複合体に由来する活性 Al の違いにより、非アロフェン質黒ボク土はアロフェン質黒ボク土にくらべてより強い土壤酸性を示し、非アロフェン質黒ボク土では農作物はその Al 毒性により生育が劣ることがある(Saigusa et al., 1980; Shoji et al., 1980)。

非アロフェン質黒ボク土は日本の広範囲に分布し、黒ボク土全面積の 30%(Saigusa and Matsuyama, 1998)を占めるが、九州地方では主にアロフェン質黒ボク土が分布し、非アロフェン質黒ボク土はそのなかに分散して分布することが明らかとなっている(松山・三枝, 1994)。

大分県の久住高原は九重連山の久住山、稲星山と大船山の南麓に位置し、その土壤は九重連山と阿蘇山から噴出した火山灰に由来する黒ボク土である(久保寺ら, 2013)。九州における非アロフェン質黒ボク土の分布は松山・三枝(1994)により報告され、分布には気候条件と完新世テフラ(阿蘇山、霧島等からの火山噴出物)の堆積が密接に関係すること、久住高原周辺はアロフェン質と非アロフェン質の分布境界に位置することが明らかとなっている。久保寺ら(2009, 2013)は、松山・三枝(1994)の分布図に示されている、久住高原と久住連山の北方の飯田高原のアロフェン質と非アロフェン質の分布の境界に位置する 10 断面(草地 3 断面、林地 7 断面)で土壤調査を行い、10 断面のうち 9 断面で上部は非アロフェン質、下部はアロフェン質であることを明らかにした。また、久保寺ら(2015)は久住高原の東側から阿蘇北外輪山の森林の 94 地点、草地の 39 地

点の表層 15 cm の土壌を採取，分析し，非アロフェン質黒ボク土は久住高原と阿蘇外輪山の北西の広い範囲に分布することを明らかにし，非アロフェン質黒ボク土の詳細な分布図を作成している。

以上のように久住高原における草地の土壌分類は久保寺ら(2015)によって明らかとなっている一方，気候などの環境要因が非アロフェン質黒ボク土の分布に与える影響は明らかとなっていない。また，牧草の生育に酸性の表層土が与える影響と土壌酸性の改良が及ぼす影響についての研究は多く(宝示戸ら，1983；Hojito et al.，1987；宝示戸ら，1988；小柳ら，1998；三枝・庄子，1984；Saigusa et al.，1994；藤間ら，1991；藤間ら，1992 など)，久保寺(2017)と Kubotera(2019)が指摘するように，久住高原で観察される草地の劣化や植生の流亡も土壌酸性が要因であると考えられているものの，久住高原の草地における牧草生育への土壌酸性の影響に関する知見は見当たらない。また，酸性土壌における作物根の伸長抑制や形態は交換酸度 y_1 と密接な関係性がみられ，交換酸度 y_1 と交換性 Al 含量とは当量関係にあることから，交換酸度 y_1 は酸性の黒ボク土における作物への Al 害の現実的な指標であることが示されている(Saigusa et al.，1980)。また，新潟県では y_1 が草地土壌管理の基準として採用され，基準値は 3 と設定されている(新潟県農林水産部，2005)。また，酸性矯正の重要性は認識されているものの，農業法人における担い手不足や高齢化などの理由により現状では十分な資材投入は行われず，野草地化した採草地が散見される。一方，人工草地の維持に意欲的な農業法人も存在し，土壌管理技術の提示は意義がある。

そこで本研究では(1) 草地土壌の酸性の調査，(2) 久住高原の非アロフェン質黒ボク土の分布への気候要因の影響の解明を行うとともに，(3)酸性改良の目安としての y_1 の有効性について，牧草の初期生育と土壌化学性への影響から明らかにし，非アロフェン質黒ボク土における牧草栽培管理の基準を策定することを目的とした。

4.2 方法

4.2.1 土壌採取および分析方法

調査地は、久住山の南方、久住高原の標高 400～1000 m 付近に位置する農業法人 21 牧場の 25 圃場(Field 1-25)である (図 4-1)。国土交通省の国土数値情報 平年値メッシュデータ (国土交通省国土政策局国土情報課, 2012) によると年降水量は 2000～2900 mm, 年平均気温は 10～13℃であった。

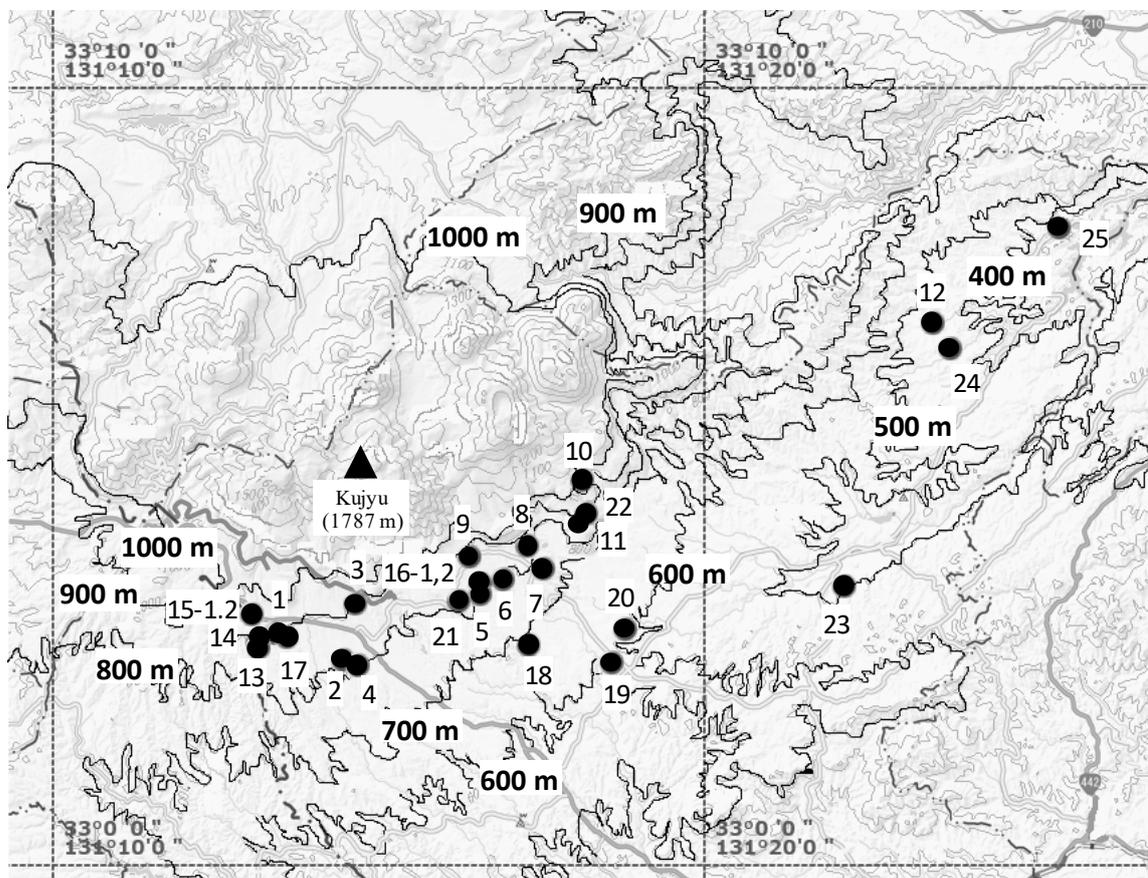


図 4-1 調査地点(大分県久住高原)

1)地図は国土地理院地図(<http://maps.gsi.go.jp/#12/33.075864/131.342926>)を使用。

土壌採取は 2014 年 3 月 25 日に行った。圃場 15 では牧草が観察されなかったため、雑草が生育している地点(Field 15-1)と裸地(Field 15-2)から、圃場 16 では牧草が生育している地点(Field 16-1)と裸地(Field 16-2)から土壌採取を行い、全

27 地点となった。斜面上方からの土壌流入の影響を除くため、微凸地 1 地点を圃場の代表地点と定め、表層（深さ 0~15 cm）と次表層（深さ 15~30 cm）各々から採土コア 2 個と攪乱土 1 kg を 1 点採取した。Fields 12, 23, 24 および 25 においては、次表層に多くの礫が確認できたため、土壌採取は表層のみで行った。Field 5 と 15-1 では攪乱土のみを採取し、採土コアから求める仮比重は、近隣もしくは同一圃場の値を参照した。

攪乱土は風乾後 2 mm で篩い、分析に供試した。分析項目は全炭素、pH(H₂O), pH(KCl), 交換酸度 y_1 , 交換性塩基 (Ca, Mg, K, Na), 陽イオン交換容量 (CEC), 0.2 mol L⁻¹ 酸性シュウ酸塩溶液および 0.1 mol L⁻¹ ピロリン酸塩溶液による選択溶解試験（酸性シュウ酸塩可溶の Si (Si_o), Al (Al_o), Fe (Fe_o) ならびにピロリン酸塩可溶の Al (Al_p) である。交換酸度 y_1 は森・嶋田 (1970) を小改変した久保寺ら (2014) の方法に従った。その他の項目は土壌環境分析法（土壌環境分析法編集委員会, 1997）に従った。全炭素は Vario EL cube (Elementar, Germany) で乾式燃焼法により測定した。pH(H₂O) と pH(KCl) はガラス電極法で測定した。交換性塩基, CEC はセミマイクロ Schollenberger 法で交換性塩基を交換・浸出した後、アンモニウムイオンを浸出し、ホルモール法でアンモニウムイオンを定量し、CEC とした。交換性塩基は ICP 発光分析法により、ICPE-9820 spectrometer (Shimadzu, Japan) で定量した。土壌コアは仮比重の測定に用いた。

土壌分類は日本土壌分類体系（日本ペドロロジー学会第五次土壌分類・命名委員会, 2017）に基づいて行った。日本土壌分類体系においては、Si_o が 0.6% (6 g kg⁻¹) 未満または Al_p/Al_o 比が 0.5 以上であることが「非アロフェン質黒ボク特徴」の識別基準となる（日本ペドロロジー学会第五次土壌分類・命名委員会, 2017）。さらに、「非アロフェン質黒ボク土」と判定されるには土壌表面から 50 cm 以内に、積算して厚さ 25 cm 以上の「非アロフェン質黒ボク特徴」を示す層をもつことが要件となり、満たさない場合は「アロフェン質黒ボク土」と判定される。本

研究においては、「非アロフェン質黒ボク特徴」を NAC と呼ぶ。表層（0–15 cm 深）と次表層（15–30 cm 深）が NAC を有する場合は、「アロフェン質黒ボク土」と判定した。また、NAC を有する土壌を「非アロフェン質土壌」、その他を「アロフェン質土壌」とした。

アロフェン質黒ボク土と非アロフェン質黒ボク土は粘土鉱物組成により区分されるが、粘土鉱物の生成は気象要因の影響を受けるとされている(Shoji and Fujiwara, 1984)。ソーンズウェイトの P-E (precipitation–evapotranspiration) 指標は降水量と蒸発量の比の指標であり、アロフェン質黒ボク土は年降水量 1100 mm 以下、P-E 指標 120 以下の地域に、非アロフェン質黒ボク土は年降水量 1100 mm 以上、P-E 指標 200 以上の地域に生成しやすい(Shoji and Fujiwara, 1984; Takahashi and Shoji, 1996)。松山ら (1992 ; 1994), 松山・三枝 (1994) と三枝ら (1993) では全国の黒ボク土の分類と P-E 指標の関係を検討し、必ずしも対応しない地域があるものの、概ね対応することを報告している。そこで、国土交通省の国土数値情報平年値メッシュデータ (1981 から 2010 の平年値) の降水量と気温の値から、P-E 指標 (各月の降水量 P (インチ) と平均気温 T (°F) の $115 \times (P / (T - 10)) \times 10 / 9$ を 1~12 月分合計した値 (前島, 1985)。) を計算し、P-E 指標が < 200 の地点と ≥ 200 の地点の土壌特性についても比較を行った。

4.2.2 ポット試験

酸性の表層土が牧草生育に及ぼす影響と石灰施用による生育改善を評価するために、4.3.1 で調査した牧草地のうち pH(KCl) が 5 以下の非アロフェン質土壌 7 点とアロフェン質土壌 2 点の計 9 土壌を選択した。ポット試験用の土壌は 2015 年 4 月 23 日に 4.3.1 で土壌を採取した代表地点付近の深さ 0~15 cm から 10 kg 採取し、すみやかに 10 mm で篩った後、湿潤状態で保管し、ポット試験に供した。また、採取した土壌の一部 (1 kg) を風乾後 2 mm で篩い、pH, y_1 , 交換性

塩基，トルオーグリン酸，リン酸吸収係数を分析した。これら 9 土壌は y_1 により， i) y_1 が < 3 の非アロフェン質土壌 3 点， ii) y_1 が ≥ 3 のアロフェン質黒ボク土壌 2 点と非アロフェン質土壌 4 点の 2 グループに分けた。

乾土換算で 180 g の 10 mm で篩った湿潤土に 10 a 換算で窒素 8 kg，リン酸 10 kg，カリ 8 kg 相当となるよう，特級試薬の $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を 377 mg， Na_2HPO_4 を 200 mg，KCl を 127 mg を各々混和した。さらに， y_1 が ≥ 3 の 6 土壌は $y_1 < 3$ となるよう，pH(KCl)を用いた緩衝曲線から土壌 pH(KCl)が 5.0 となる量の CaCO_3 を 1.5 ~2.5 g 混和するポットを設定した。すなわち，土壌環境分析法(1997)に準じ，4.3.1 で採取した風乾土，乾土 6 g 相当に CaCO_3 を 0~100 mg を加え，各々に 1N KCl 溶液 15 ml を加えて混合後 24 時間静置，5 時間振とう後，通気し，直ちに pH(KCl)を測定し， CaCO_3 と pH(KCl)との直線回帰式を得た (図 4-2)。その関係式から pH(KCl)5.0 相当の CaCO_3 量を推定し，施用量を導いた。

土壌は上記の資材を混和後，面積 100 cm^2 のノイバイエルポットに各々充填した。ポットは 1 反復で，全 15 ポットである。ポットは最大容水量の 60%に水分を調整した。2015 年 11 月 21 日に大分県飼料作物奨励品種であるイタリアンライグラス「ニオウダチ」の種子をポットに 30 粒播種し，発芽がそろった 12 月 9 日に 25 株とした。25 株に満たないポットはそのまま栽培した。栽培は 20°C ，明暗周期 12 時間の人工気象器内で行い，最大容水量の 60%を維持できるよう，適宜給水を行った。12 月 16 日に栽培を終了し，地上部と地下部に分けて採取し，蒸留水で洗浄後， 70°C で通風乾燥後，乾物重を調査した。また，各々フードミル Millser IFM-800 (Iwatani, Japan) で粉碎後，全量または一部 (1.5 g) を硝酸-過酸化水素分解 (織田ら，2004) 後，地上部および地下部のアルミニウム，カルシウム，マグネシウムを ICP 発光分析法により，ICP-AES Optima 5300DV (PerkinElmer, USA) で定量した。

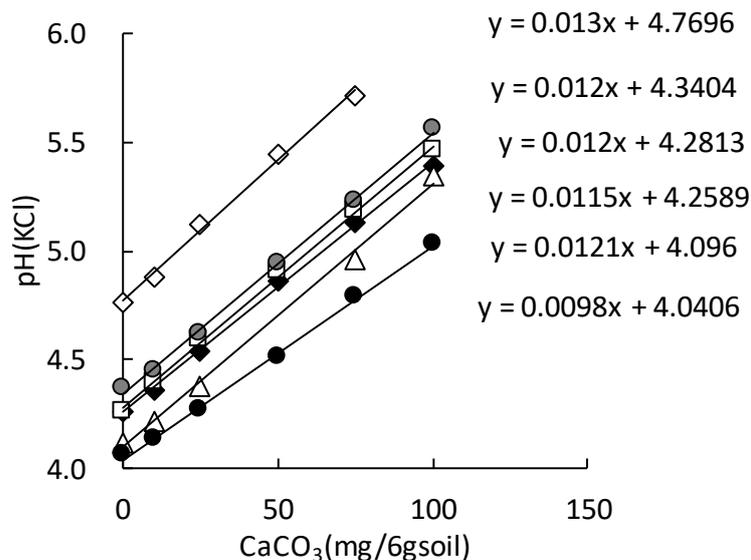


図 4-2 $y_1 \geq 3$ の 6 土壌の CaCO_3 添加量と pH(KCl) の直線回帰式

- 1) $y_1 \geq 3$ の風乾土, 乾土 6 g 相当に CaCO_3 を 0, 10, 25, 50, 75, 100 mg を加え, 各々に 1N KCl 溶液 15 ml を加えて混合後 24 時間静置, 5 時間振とう後通気し, 直ちに pH(KCl) を測定し, CaCO_3 添加量と pH(KCl) の関係をプロットし, CaCO_3 と pH(KCl) との関係の直線回帰式を得た。
- 2) 直線回帰式の切片は供試土壌の pH(KCl) から得られる。

栽培終了後のポットの土壌は各々風乾後 2 mm で篩い, pH(H_2O), pH(KCl), y_1 , KCl 抽出 Al, CuCl_2 抽出 Al, Al_p および Al_o 分析した。KCl 抽出 Al は 10 g の土壌に 1 M KCl 溶液 25 ml を加え 1 時間往復振とう後, No.6 ろ紙 (ADVANTEC, Japan) でろ過したろ液を ICP 発光分析法により, ICPE-9820 spectrometer (Shimadzu, Japan) で定量した。 CuCl_2 抽出 Al は土壌有機物に結合した反応性の高い Al 画分またはバーミキュライトに結合した OH-Al ポリマーである (Juo and Kamprath, 1979)。 CuCl_2 抽出 Al は Juo and Kamprath (1979) により, 3 g の土壌に 0.5 mol L^{-1} CuCl_2 溶液 30 ml を加え 2 時間往復振とう後, No.6 ろ紙 (ADVANTEC, Japan) でろ過したろ液を ICPE-9820 spectrometer (Shimadzu, Japan) で定量した。

4.3 結果と考察

4.3.1 土壌理化学性

土壌の理化学性は表 4-1 に示した。新潟県の草地土壌管理の目標値である $y_1 = 3$ (新潟県農林水産部, 2005) を上回るのは, 表層の 12 地点, 次表層の 9 地点であり, 目標値を超える地点が多くみられた。また, 大分県の土壌改良指針(大分県, 2011) では草地造成時に石灰飽和度 (CEC に占める Ca の比率) 50-70%, 苦土飽和度 (CEC に占める Mg の比率) 5-10% を目標として苦土含有石灰資材を 15cm 深まで施用することとされているが, 調査地点の表層の石灰飽和度は 1 地点を除き下限値 50% を下回り, 1% を下回るような著しく低い圃場も存在した。表層の苦土飽和度は 5% を超える地点が 9 地点あったものの, 多くは下回っていた。表層土 27 点のうち, 17 地点は $Al_p/Al_o \geq 0.5$ を, 10 地点は $Si_o < 6 \text{ g kg}^{-1}$ を示すことから, 表層の 17 点は NAC を有した。また, 次表層土 23 地点のうち, 11 地点は $Al_p/Al_o \geq 0.5$ を, 2 地点は $Si_o < 6 \text{ g kg}^{-1}$ を示し, 次表層の 11 点は NAC を有した。また, 表層および次表層が NAC を有する 10 地点は非アロフェン質黒ボク土と判定された。

表 4-1 土壤採取地点の標高、採取深さ、および土壤の理化学性

圃場 番号	標高 (m)	深さ (cm)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	y _i	交換性塩基				CEC (cmol _c kg ⁻¹)	石灰 飽和度 (%)	苦土 飽和度 (%)
						Ca	Mg	K	Na			
1	902		4.5	4.1	9.1	4.9	0.5	0.4	0.2	69.9	7	1
2	827		4.7	4.3	6.0	4.6	0.7	0.4	0.1	60.0	8	1
3	902		5.2	4.4	4.3	6.8	3.2	0.8	0.2	65.6	10	5
4	807		5.1	4.4	5.4	3.6	0.3	0.2	0.1	56.5	6	0
5	803		5.2	4.3	6.9	3.1	0.7	0.2	0.2	55.9	5	1
6	812		5.2	4.5	3.6	7.3	1.8	0.2	0.1	58.3	13	3
7	777		4.5	4.1	13.2	0.1	0.2	0.2	0.1	56.1	0	0
8	809		4.8	4.2	10.1	0.4	0.5	0.2	0.1	54.2	1	1
9	886		4.7	4.2	8.2	3.2	0.4	0.3	0.1	58.5	5	1
10	978		5.4	4.7	2.2	6.7	3.2	0.2	0.3	47.2	14	7
11	891		5.5	4.7	2.0	4.1	2.4	0.3	0.1	43.3	9	6
12	468		5.3	4.4	5.0	5.1	0.7	0.4	0.1	51.5	10	1
13	893		5.4	4.6	2.4	10.6	2.7	0.3	0.1	71.7	15	4
14	903	0-15	5.4	4.5	2.6	9.9	1.4	0.3	0.1	63.6	16	2
15-1	953		5.7	4.8	1.2	12.3	0.5	0.2	0.1	57.3	21	1
15-2	953		5.3	4.4	2.7	7.7	0.5	0.2	0.1	59.1	13	1
16-1	821		5.4	4.8	1.3	5.6	3.9	0.4	0.1	53.8	10	7
16-2	821		5.7	5.1	0.9	4.0	3.3	0.2	0.1	39.6	10	8
17	744		5.1	4.7	1.7	1.1	0.3	0.3	0.3	49.2	2	1
18	680		4.1	4.2	8.5	0.9	0.5	0.7	0.1	52.3	2	1
19	620		4.3	4.4	4.3	0.0	0.1	0.3	0.0	48.9	0	0
20	619		5.7	5.0	1.3	13.2	4.6	0.2	0.3	56.2	23	8
21	839		6.4	5.8	0.7	10.9	4.4	0.2	0.1	39.1	28	11
22	854		6.3	5.6	0.5	13.6	4.9	0.2	0.1	44.3	31	11
23	583		6.2	4.9	1.3	8.2	2.8	1.5	0.4	44.6	18	6
24	428		6.2	4.8	1.3	3.6	2.5	4.3	0.2	37.7	9	7
25	435		7.1	6.4	0.3	9.5	3.5	0.2	0.2	19.2	50	18
1	902		4.7	4.2	8.6	0.7	0.2	0.2	0.1	60.8	1	0
2	827		5.4	4.7	1.7	6.3	0.6	0.2	0.1	58.4	11	1
3	902		5.1	4.4	4.6	0.7	0.6	0.2	0.1	60.3	1	1
4	807		5.2	4.4	3.7	3.0	0.2	0.1	0.1	56.9	5	0
5	803		5.4	4.5	3.3	4.8	0.6	0.2	0.1	53.6	9	1
6	812		5.6	4.8	1.5	7.6	2.0	0.1	0.1	55.1	14	4
7	777		4.7	4.4	5.4	0.0	0.1	0.1	0.1	48.4	0	0
8	809		4.8	4.3	5.4	0.1	0.2	0.1	0.1	49.7	0	0
9	886		5.0	4.4	4.6	1.5	0.2	0.1	0.1	55.0	3	0
10	978		4.6	4.2	8.4	0.9	0.8	0.2	0.2	46.2	2	2
11	891		5.3	4.6	2.0	1.9	1.2	0.1	0.1	39.2	5	3
13	893	15-30	5.8	4.9	1.4	4.9	0.6	0.1	0.1	62.4	8	1
14	903		5.7	4.8	1.0	3.0	0.3	0.1	0.1	62.2	5	1
15-1	953		6.0	5.2	0.4	7.8	0.3	0.1	0.1	52.1	15	1
15-2	953		5.8	5.0	1.1	4.7	0.2	0.1	0.1	53.2	9	0
16-1	821		4.9	4.6	1.8	0.8	0.6	0.1	0.1	52.3	2	1
16-2	821		5.7	5.6	0.3	1.0	0.2	0.1	0.1	15.2	7	1
17	744		5.0	4.4	3.5	4.7	0.8	0.7	0.2	53.9	9	1
18	680		5.3	4.8	1.3	2.1	0.6	0.2	0.1	41.8	5	2
19	620		4.8	4.5	2.4	0.3	0.1	0.2	0.1	46.8	1	0
20	619		6.2	5.4	0.7	10.0	2.1	0.1	1.6	45.8	22	5
21	839		6.1	5.7	0.7	3.0	1.7	0.1	0.1	26.0	12	6
22	854		5.4	4.8	1.3	3.1	1.2	0.1	0.2	41.0	8	3

1)圃場 15 では牧草が観察されなかったため、雑草が生育している地点(Field 15-1)と裸地(Field 15-2)から、圃場 16 では牧草が生育している地点(Field 16-1)と裸地(Field 16-2)から土壤採取を行い、全 27 地点となった。

2)y_iは交換酸度(表層の太字は y_i≥3)、CECは陽イオン交換容量、石灰飽和度は CEC に占める交換性 Ca の比率。苦土飽和度は CEC に占める交換性 Mg の比率。

圃場 番号	仮比重 (g mL ⁻¹)	全炭素 (g kg ⁻¹)	選択溶解					備考
			Si ₀ (g kg ⁻¹)	Al ₀ (g kg ⁻¹)	Al _p (g kg ⁻¹)	Al _p /Al ₀	Al ₀ +1/2Fe ₀ (g kg ⁻¹)	
1	0.51	235	3.2	32.7	27.2	0.83	47.4	NAC
2	0.54	226	5.3	39.9	28.9	0.72	55.9	NAC
3	0.46	248	2.5	27.0	22.9	0.85	39.5	NAC
4	0.60	206	10.3	50.7	27.8	0.55	63.7	NAC
5		209	3.2	31.6	27.3	0.86	44.6	NAC
6	0.61	207	8.9	40.9	25.2	0.62	54.1	NAC
7	0.55	211	3.7	28.6	25.1	0.87	39.3	NAC
8	0.56	208	4.5	29.6	24.8	0.84	39.5	NAC
9	0.57	216	3.6	31.5	27.2	0.86	43.9	NAC
10	0.74	167	7.8	27.1	15.9	0.59	35.6	NAC
11	0.54	177	10.9	39.6	20.0	0.50	50.7	NAC
12	0.57	181	7.7	31.1	18.2	0.59	40.8	NAC
13	0.63	235	4.3	37.7	32.9	0.87	53.8	NAC
14	0.55	225	3.4	32.2	26.6	0.83	47.2	NAC
15-1		187	7.7	36.6	21.5	0.59	51.4	NAC
15-2	0.57	218	4.9	34.4	26.3	0.77	49.7	NAC
16-1	0.54	209	9.2	42.7	29.7	0.70	57.6	NAC
16-2	0.68	144	20.0	57.2	19.2	0.34	71.7	
17	0.59	165	21.9	72.3	26.2	0.36	92.7	
18	0.68	177	16.8	54.6	21.9	0.40	70.6	
19	0.58	166	21.2	67.7	23.2	0.34	86.4	
20	0.59	193	10.6	38.6	19.2	0.50	51.4	
21	0.53	114	31.2	76.1	11.4	0.15	94.1	
22	0.62	140	24.1	54.9	12.5	0.23	66.9	
23	0.68	140	12.2	36.6	13.1	0.36	47.5	
24	0.78	94	24.4	52.6	10.3	0.20	69.8	
25	0.93	2	3.5	6.9	0.9	0.13	15.6	Nonandic
1	0.44	206	7.5	41.3	27.4	0.66	57.3	NAC
2	0.57	209	9.0	50.2	32.0	0.64	68.7	NAC
3	0.44	217	6.7	51.8	41.1	0.79	71.1	NAC
4	0.54	202	9.8	44.9	29.1	0.65	60.2	NAC
5		199	4.0	33.0	28.9	0.88	46.4	NAC
6	0.47	187	11.9	48.3	25.3	0.52	63.3	NAC
7	0.51	167	8.6	43.0	25.9	0.60	54.6	NAC
8	0.52	178	9.2	42.5	24.5	0.58	54.0	NAC
9	0.51	192	7.8	45.9	31.7	0.69	63.7	NAC
10	0.64	179	5.8	29.3	21.7	0.74	39.0	NAC
11	0.54	148	10.4	41.2	20.0	0.49	52.8	
13	0.48	207	18.7	76.6	31.6	0.41	102.8	
14	0.46	208	17.8	73.1	32.2	0.44	98.6	
15-1		209	19.7	72.5	25.3	0.35	95.8	
15-2	0.45	192	18.8	72.5	28.8	0.40	95.3	
16-1	0.49	178	19.9	75.8	28.5	0.38	96.7	
16-2	0.59	46	38.0	72.6	8.4	0.12	85.0	
17	0.48	197	10.8	44.5	25.2	0.57	60.5	NAC
18	0.58	133	28.6	74.5	17.1	0.23	91.9	
19	0.58	160	22.0	68.3	23.0	0.34	86.8	
20	0.53	156	22.1	64.3	18.9	0.29	82.4	
21	0.57	73	38.3	83.9	9.8	0.12	100.2	
22	0.61	145	30.4	70.4	15.7	0.22	83.4	

3)Si₀, Al₀ は酸性シュウ酸塩可溶のケイ素(Si), アルミニウム(Al), Al_p はピロリン酸塩可溶のアルミニウム(Al)。Al_p/Al₀は Al_pと Al₀の比。Al₀+1/2Fe₀は酸性シュウ酸塩可溶の Alと酸性シュウ酸塩可溶の鉄(Fe)の 1/2 量の合計。NAC は「非アロフェン質黒ボク特徴」, Al_p/Al₀ ≥ 0.5 または Si₀ < 6 g kg⁻¹ は NAC の識別特徴(日本ペドロジー学会第五次土壌分類・命名委員会, 2017)。Nonandic は Al₀+1/2Fe₀ < 20 g kg⁻¹。

NACを有する非アロフェン質土壌と有さないアロフェン質土壌各々における土壌特性値は表 4-2 に示した。表層, 次表層ともに, 全炭素, y_1 , CEC と Al_p は非アロフェン質土壌で有意に高く ($P < 0.05$), $pH(KCl)$, Al_o と $Al_o+1/2Fe_o$ は非アロフェン質土壌で有意に低かった。非アロフェン質土壌の表層の仮比重はアロフェン質土壌よりも有意に低く ($P < 0.05$), 次表層では有意な差は無かった ($P < 0.05$)。また, 非アロフェン質土壌の次表層の $pH(H_2O)$ はアロフェン質土壌よりも有意に低い ($P < 0.01$), 表層では有意な差は見られなかった。

表 4-2 非アロフェン質土壌とアロフェン質土壌の土壌特性値

		n	仮比重 ($g\ mL^{-1}$)	全炭素 ($g\ kg^{-1}$)	pH	pH	y_1
					(H_2O)	(KCl)	
表層 (0 - 15 cm 深)	非アロフェン質	17	0.57 *	210 ***	5.1	4.4 *	5.1 *
	アロフェン質	9	0.64	148	5.6	4.9	2.3
次表層 (15 - 30 cm 深)	非アロフェン質	11	0.51	194 *	5.0 **	4.4 ***	4.6 ***
	アロフェン質	12	0.53	155	5.6	5.0	1.2

		n	CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	選択溶解		
				Al_o ($g\ kg^{-1}$)	Al_p ($g\ kg^{-1}$)	$Al_o+1/2Fe_o$ ($g\ kg^{-1}$)
表層 (0 - 15 cm 深)	非アロフェン質	17	57.8 ***	34.9 **	25.2 ***	47.9 **
	アロフェン質	9	45.8	56.7	17.4	72.3
次表層 (15 - 30 cm 深)	非アロフェン質	11	54.4 *	43.1 ***	28.4 *	58.1 ***
	アロフェン質	12	44.8	70.5	21.6	89.3

1) 数値は平均値。 $Al_p/Al_o \geq 0.5$ または $Si_o < 6\ g\ kg^{-1}$ は非アロフェン質土壌, $Al_p/Al_o < 0.5$ または $Si_o \geq 6.0\ g\ kg^{-1}$ はアロフェン質土壌。 y_1 は交換酸度。CEC は陽イオン交換容量。 Al_o は酸性シュウ酸塩可溶アルミニウム (Al), Al_p はピロリン酸塩可溶のアルミニウム (Al)。 Al_p/Al_o はピロリン酸塩可溶の Al と酸性シュウ酸塩可溶の Al の比。 $Al_o+1/2Fe_o$ は酸性シュウ酸塩可溶の Al と酸性シュウ酸塩可溶の鉄 (Fe) の 1/2 量の合計。

2) *, ** および *** は各々 $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ で有意差あり (t-test)。

表 4-3 には $y_1 \geq 3$ を基準に分類した地点数を示した。表層では非アロフェン質土壌の 10 地点, アロフェン質土壌の 2 地点が $y_1 \geq 3$ を示した。次表層では非

アロフェン質土壌の9地点が $y_1 \geq 3$ を示した。また、 $\text{pH}(\text{KCl})$ と y_1 の間には既往の報告 (久保寺ら, 2014) 同様, アロフェン質, 非アロフェン質に関わらず密接な関係がみられた ($y_1 = 11356 \exp(-1.809 \text{pH}(\text{KCl}))$, $r^2 = 0.848$, $P < 0.001$) (図 4-3)。一方, $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と y_1 の関係はアロフェン質と非アロフェン質で異なり, 同一の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ のときの y_1 はアロフェン質では非アロフェン質にくらべて低い値であった (図 4-3)。

表 4-3 非アロフェン質土壌とアロフェン質土壌における $y_1 < 3$ の地点と $y_1 \geq 3$ の地点数

	表層		次表層	
	非アロフェン質	アロフェン質	非アロフェン質	アロフェン質
$y_1 < 3$	7	7	2	12
$y_1 \geq 3$	10	2	9	0

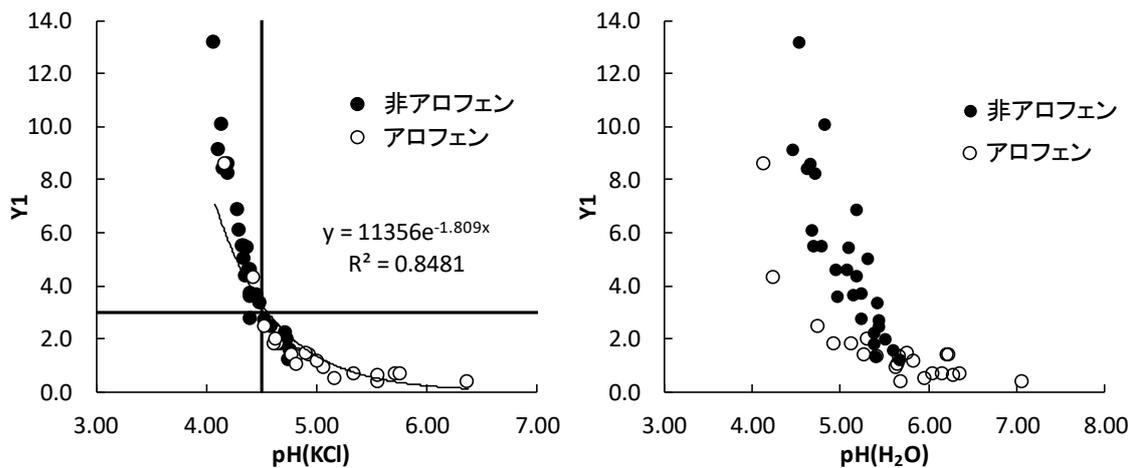


図 4-3 大分県久住高原の草地における $\text{pH}(\text{KCl})$, $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と y_1 の関係

1) プロットは 27 地点の表土 (0~15 cm 深) 27 点, 次表層 (15~30 cm 深) 23 点合わせて 50 点。そのうち非アロフェン 28 点, アロフェン 22 点。

2) $\text{pH}(\text{KCl})$ と y_1 の近似式は非アロフェン, アロフェン全てのプロットから作成。***は $p < 0.001$ で有意差あり (F test)。

また, y_1 と塩基飽和度, 石灰飽和度の関係も $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と同様の傾向がみられた (図 4-4)。

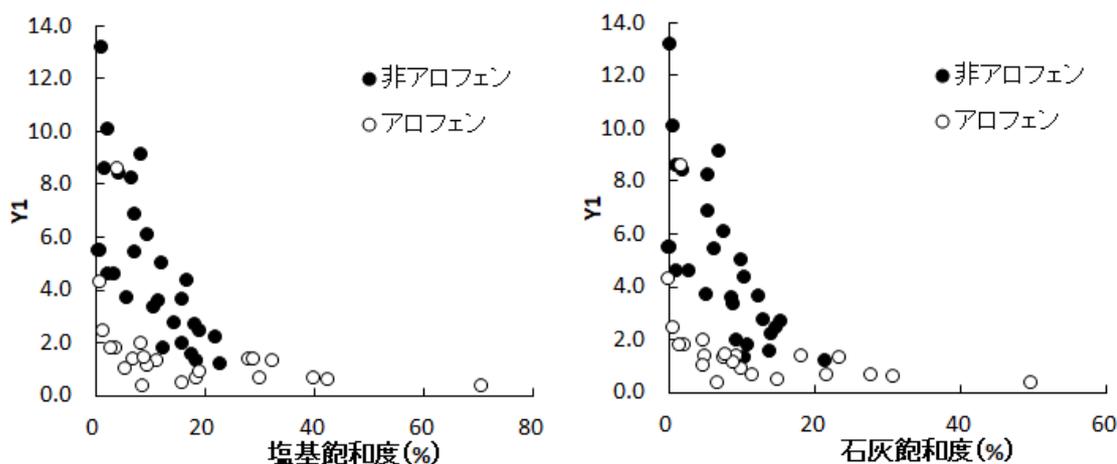


図 4-4 大分県久住高原の草地における塩基飽和度, 石灰飽和度と y_1 の関係

1)プロットは 27 地点の表土(0~15 cm 深)27 点, 次表層(15~30 cm 深)23 点合わせて 50 点。そのうち非アロフェン 28 点, アロフェン 22 点。

4.3.2 非アロフェン質黒ボク特徴を示す土壌の特徴とアロフェン質との違い

久住高原の草地においては 25 圃場のうち 16 圃場の表層土は NAC を示す非アロフェン質土壌であり (表 4-1), 非アロフェン質土壌である 16 圃場のうち 10 圃場は $y_1 \geq 3$ の酸性を示した (表 4-3)。また, 同一の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$, 塩基飽和度または石灰飽和度の条件のときに, y_1 は非アロフェン質土壌でアロフェン質土壌よりも高く, 非アロフェン質黒ボク土はアロフェン質黒ボク土にくらべてより強い土壌酸性を示すとの既往研究(Saigusa et al., 1980; Shoji et al., 1980)を支持する結果となった (表 4-2)。一方, y_1 と $\text{pH}(\text{KCl})$ の関係性は久保寺ら (2014) が示すように, アロフェン質, 非アロフェン質に関わらず同一かつ密接な曲線関係がみられた。 $\text{pH}(\text{KCl})$ を指標とすることでアロフェン質, 非アロフェン質に関わらず同一の指標を設定でき, y_1 を予測可能であることが示された。

また非アロフェン質土壌では, アロフェン質土壌よりも Al_p が有意に高かった。Takahashi et al. (1995) は非アロフェン質土壌では腐植複合体 Al すなわち Al_p が土壌からの Al の溶解を制御することを明らかにし, 高橋 (2011) は腐植の負荷電での H^+ と Al イオンの交換反応で交換性 Al 含量を規定すると指摘し

ている。4.1でも述べたように y_1 と交換性 Al 含量とは当量関係であり、久住高原の非アロフェン質土壌においても高い y_1 は腐植複合体 Al の量との関係が示唆された。

アロフェン質土壌に含まれる粘土鉱物の主体であるアロフェン、イモゴライト含量は Si_o 含量から評価できる（土壌環境分析法編集委員会，1997）。Shoji et al. (1985) によると，東北地方の非アロフェン質土壌には Si_o がほとんど含まれないことから，アロフェン，イモゴライトが含まれないことが示されているのに対し，久住高原の非アロフェン質土壌の Si_o 含量は 2.5 から 11.9 g kg⁻¹ 含む（表 4-1）ことから，久保寺ら（2015）の指摘のように，一定量のアロフェン，イモゴライトを含むことが示された。

4.3.3 土壌理化学性と P-E 指標

表 4-4 には P-E 指標 200 を基準に分類した，地点数および地点の特性値の平均値を示した。P-E 指標 ≥ 200 では P-E 指標 < 200 よりも標高は高かった。また平均気温は低く，年降水量は高く，低温多雨の気候条件を示した。土壌採取地点の P-E 指標は 143 から 265 を示し，非アロフェン質の表層土 17 地点のうち 15 地点は P-E 指標 ≥ 200 にあてはまった。

表 4-4 P-E 指標 <200 と ≥ 200 における標高，平均気温，年降水量，アロフェン質土壌と非アロフェン質土壌の地点数，pH(H₂O)， Si_o ， Al_o ， Al_p および Al_p/Al_o 。

P-E指標	標高 (m)	平均 気温 (°C)	年降水量 (mm)	アロフェン 質	非アロフェン 質	pH(H ₂ O)	Si_o	Al_o	Al_p	Al_p/Al_o
< 200	629	12.2	2257	6	2	5.3	15.7	49.2	19.7	0.41
≥ 200	863	10.8	2629	3	15	5.3	8.8	39.5	23.7	0.67
t-test	**	***	***				*			**

1)pH(H₂O)， Si_o ， Al_o ， Al_p および Al_p/Al_o は平均値。 Si_o と Al_o は酸性シュウ酸塩抽出のケイ素とアルミニウム。 Al_p はピロリン酸塩抽出のアルミニウム。 Al_p/Al_o は Al_p と Al_o の比。2)*，**および***は各々 $p<0.05$ ， $p<0.01$ および $p<0.001$ で有意差あり(t-test)。

これより、久住高原の非アロフェン質土壌は主に P-E 指標 ≥ 200 に分布することが示された。Si₀ と Al_p/Al₀ は P-E 指標 < 200 と ≥ 200 の間で各々有意な差が見られた(P < 0.05, P < 0.01)。しかし、pH(H₂O)、Al₀ と Al_p には有意な差は見られなかった (表 4-4)。

P-E 指標 < 200 の地点では、Al_p/Al₀ は 0.20 から 0.59、平均値は 0.41、P-E 指標 ≥ 200 の地点では、Al_p/Al₀ は 0.15 から 0.87、平均値は 0.67 を示し、P-E 指標 ≥ 200 にも関わらず NAC を示さない地点が 3 地点存在した(図 4-5)。

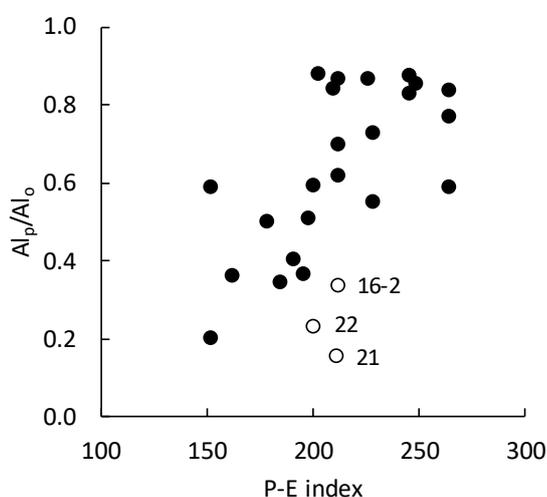


図 4-5 P-E 指標と Al_p/Al₀ の関係

- 1)久住高原の 25 圃場の 26 地点の表層土壌。Al_p/Al₀ は 0.2 mol L⁻¹ 酸性シュウ酸塩溶液可溶 Al (Al₀) と 0.1 mol L⁻¹ ピロリン酸塩溶液可溶 Al (Al_p) の比。
- 2)白丸 (Field 16-2, 21 および 22) は P-E index ≥ 200 にも関わらず NAC を示さない地点。

4.3.4 久住高原の気象条件と非アロフェン質土壌分布の関係

東北地方の十和田地域においては、土壌中の活性アルミニウムの形態および含量は P-E 指標に依存することが示されている (Takahashi and Shoji, 1996)。九州地方の久住高原では東北の十和田地方同様、低温多雨を示す P-E 指標 ≥ 200 で NAC を有した。しかし、図 4-5 で示したように P-E 指標 ≥ 200 にも関わらず NAC を示さない地点が 3 地点あった。これら 3 地点 (Field16-2, 21 および 22) はのうち Field16-2 と Field21 では風化礫が表層土にあり、Field22 で

は土壌侵食による裸地が観察された。Field16-2 と Field21 の表層の風化礫は、Field 21 から 700 m, Field 16-2 から 1300 m 離れた地点の 36–51 cm 深のアロフェン質の地層で観察された米窪 B スコリアもしくは米窪 A 火山灰 (Kamata and Kobayashi, 1997) と一致すると考えられ(久保寺ら, 2013), 3 地点(Field16-2, 21 および 22) の表層はもともと下層にあったアロフェン質土壌が表層に露出していると推察された。すなわち Field16-2, 21 および 22 で P-E 指標 ≥ 200 にも関わらず NAC を示さないのは侵食による例外事例であり, 久住高原の非アロフェン質土壌の分布は P-E 指標 ≥ 200 で説明できることが示された。

一方, 多雨条件下では土壌の塩基飽和度が低下することから, 土壌 pH は P-E 指標と負の相関関係を示す (Takahashi and Shoji, 1996) ことが明らかとなっているが, 久住高原においては P-E 指標 < 200 と ≥ 200 の間で pH(H₂O) に有意な差は見られなかった (表 4-4)。Shoji and Fujiwara (1984) は, 年降水量 > 1100 mm では塩基の強い溶脱により, 表層土は pH(H₂O) < 5.0 となることを示している。久住高原の草地土壌においては, いずれも 2000 mm を超える多雨であるため, 差が出なかったと考えられた。

P-E 指標は, Takahashi and Shoji (1996) の東北地方における報告のとおり, 標高と密接な関係がみられた (P-E 指標 = $63.59 + 0.19 \times$ 標高, 図 4-6)。この式では P-E 指標 200 のときの標高は 720 m であり, 非アロフェン質土壌 17 地点中 16 地点は標高 > 720 m に分布することから, 久住高原においては非アロフェン質土壌は P-E 指標 ≥ 200 となる標高 720 m 以上に主に分布することが示された。

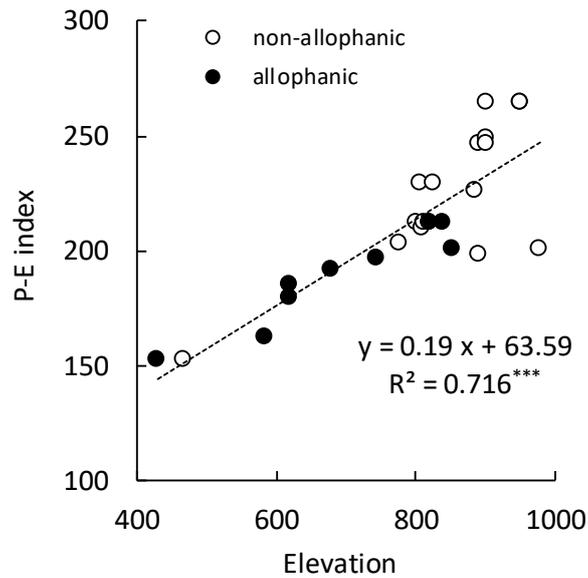


図 4-6 久住高原の草地 25 圃場の全 26 地点における標高と P-E 指標の関係
 1)***は $p < 0.001$ で有意差あり(F test)。

4.3.5 ポット試験における牧草イタリアンライグラスの初期生育

$y_1 \geq 3$ を示す酸性土壌における地上部乾物重は、 $y_1 < 3$ の土壌にくらべ低く ($P < 0.01$)、地下部の Al 含量は高かった ($P < 0.01$) (図 4-5)。また、有意な差は見られなかったものの、 $y_1 \geq 3$ では地上部 Al 含有量は高まり、地下部乾物重は抑制される傾向がみられた (図 4-7)。 $y_1 \geq 3$ を示す酸性土壌 ($y_1 3.9 \sim 13.2$) について、土壌 pH(KCl)が 5.0 となる量の石灰質資材量 (10a 当たり換算量 700 ~ 2000 kg (仮比重 0.6, 15 cm 深まで)) を算出し、施用すると、 $y_1 < 3$ に改善し、地上部乾物重は有意に高まり ($P < 0.01$)、地下部の Al 含有量は低下した ($P < 0.01$) (図 4-6)。地上部 Al 含有量と地下部乾物重も有意ではないものの、改善する傾向がみられた (図 4-8)。

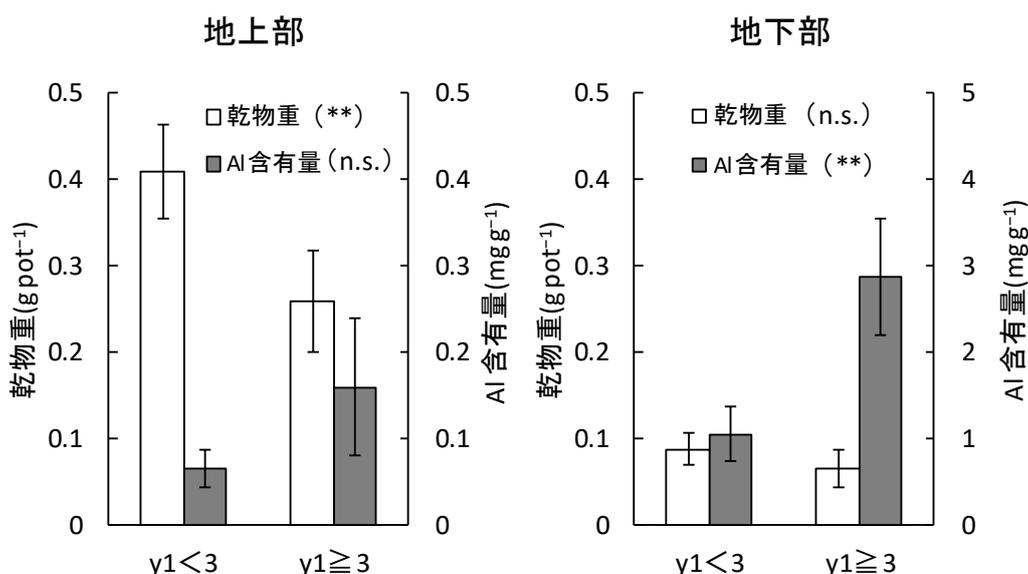


図 4-7 異なる y_1 の草地土壌におけるイタリアンライグラスの地上部および地下部乾物重とアルミニウム (Al) 含有量

1) $y_1 < 3$ 区は非アロフェン質土壌 3 点で供試土壌の pH(H₂O), pH(KCl)および y_1 は各々 5.3 ± 0.2 , 4.8 ± 0.1 および 1.1 ± 0.6 ($r=3$, 平均値±標準偏差)。 $y_1 \geq 3$ 区はアロフェン質土壌 2 点と非アロフェン質土壌 4 点で、供試土壌の pH(H₂O), pH(KCl)および y_1 は各々 4.4 ± 0.2 , 4.3 ± 0.2 および 7.7 ± 4.3 ($r=6$, 平均値±標準偏差)。2) **は $p < 0.01$ で有意差あり (t test)。

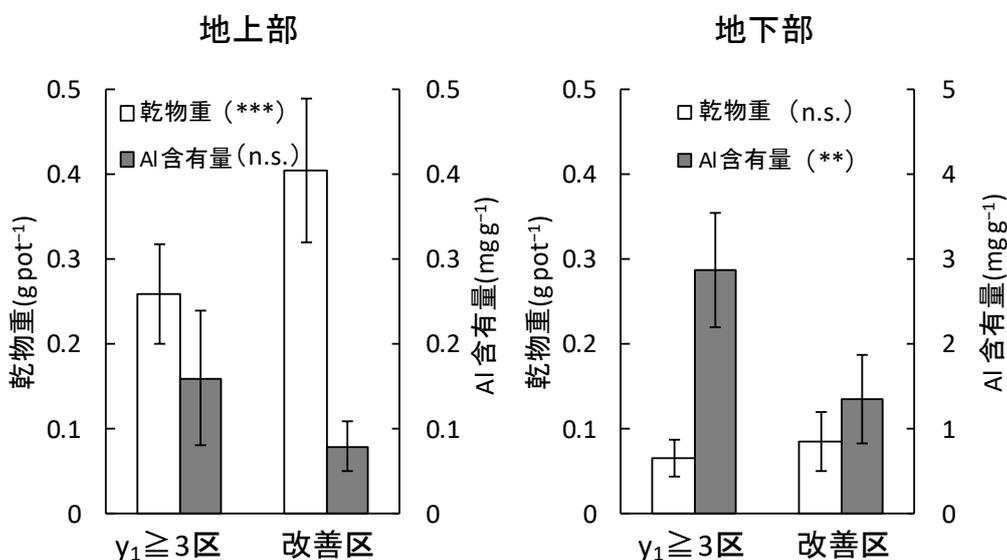


図 4-8 pH(KCl)に基づく改善区におけるイタリアンライグラスの地上部および地下部乾物重とアルミニウム (Al) 含有量

1) $y_1 \geq 3$ 区は図 4-5 の $y_1 \geq 3$ の 6 土壌。栽培跡土壌の pH(H₂O)は 4.2 ± 0.2 , pH(KCl)は 4.1 ± 0.1 , y_1 は 12.4 ± 6.6 ($r=6$, 平均値±標準偏差)。改善区は $y_1 \geq 3$ の 6 土壌に各々の土壌で作成した pH(KCl)と CaCO₃ 施用量の関係式で pH(KCl)が 5.0 となる CaCO₃ 量を混和し, $y_1 < 3$ とした。栽培跡土壌の pH(H₂O), pH(KCl)および y_1 の平均値は各々 5.1 ± 0.1 , 4.7 ± 0.1 および 1.4 ± 0.5 ($r=6$, 平均値±標準偏差)。2) **および***は各々 $p < 0.01$, $p < 0.001$ で有意差あり (paired-t test)。

表 4-5 には石灰施用による土壤酸性と Al 含量の変化を示した。pH(H₂O), pH(KCl), y₁の土壤酸性と交換性 Al (KCl 抽出 Al), 有機物と結合している Al (CuCl₂ 抽出 Al と Al_p) は石灰施用により変化したが(P<0.01), 活性 Al の総量 (Al₀) は変わらなかった (表 4-5)。石灰施用による変化量は Al_p>CuCl₂-Al>KCl-Al の順に大きかった。

表 4-5 石灰無施用区と石灰施用区の土壤酸性と Al 含量

pH(H ₂ O)		pH(KCl)		y ₁			
石灰無	石灰有	石灰無	石灰有	石灰無	石灰有	石灰無	石灰有
4.18	5.08	4.08	4.68	12.4	1.4		
(0.18)	(0.09)	(0.15)	(0.10)	(6.6)	(0.5)		
**		***		**			

KCl抽出Al		CuCl ₂ 抽出Al		Al _p		Al ₀	
(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)	
石灰無	石灰有	石灰無	石灰有	石灰無	石灰有	石灰無	石灰有
0.24	0.01	4.0	3.3	24.5	23.1	43.9	44.3
(0.13)	(0.004)	(0.3)	(0.3)	(3.0)	(3.4)	(13.8)	(13.4)
**		***		***			

1) 図 4-5 の石灰無施用区と石灰施用区の栽培跡土壤の分析値。n=6, 平均値(標準偏差)。

2)**および***は各々p<0.01, p<0.001 で有意差あり(t test)。

4.3.6 酸性土壤が牧草生育に及ぼす影響と土壤改良による生育改善効果

地上部の生育と地下部のアルミニウム含量は y₁ ≥ 3 のアロフェン質および非アロフェン質土壤と y₁ < 3 の非アロフェン質土壤では有意な差がみられた (図 4-5)。また, pH(KCl)を用いた pH(KCl)と施用量の関係式に基づいた石灰施用により, 土壤を y₁ < 3 に中和することによりイタリアンライグラスの初期生育は改善した (図 4-6)。地下部の Al 含量が低下し, 地上部の Al 含量も低下傾向がみられたことから, 既往の報告(Saigusa et al., 1980; Shoji et al., 1980) のとおり, Al 害を抑制できたことが要因と考えられた。また, アロフェン質お

よび非アロフェン質土壌ともに効果があったことから、新潟県で草地土壌の管理指標として用いられている $y_1 \geq 3$ は、久住高原の全ての黒ボク土に適用できることが示された。また、 $y_1 \geq 3$ のときの $\text{pH}(\text{KCl})$ は 4.5 (図 4-3) であり、 $\text{pH}(\text{KCl})$ 4.5 もまた、久住高原の草地土壌の管理の目安となる。

しかし、本研究ではポット試験で牧草の初期生育への影響は確認できたものの、牧草収量への影響は未確認であることから、草地土壌の管理指標の提案のためには久住高原の草地での長期間の圃場試験により収量への影響を確認する必要がある。

また、本研究ではアロフェン質、非アロフェン質に関わらず、 $y_1 < 3$ に中和することにより、土壌中の CuCl_2 抽出 Al と Al_p の含量は減少した (表 4-5)。Takahashi et al. (2006) は土壌を石灰中和することにより、 KCl 抽出 Al 同様、 CuCl_2 抽出 Al と Al_p も減少することを示している。Juo and Kamprath (1979) によると、 CuCl_2 抽出 Al は KCl では抽出されないものの、石灰とは反応する、反応性の高いアルミニウムの形態であるとしている。本研究では、土壌の高い炭素含量から、 CuCl_2 抽出 Al は有機物と結合している Al とみなすことができる。その場合、久住高原の草地土壌中の有機物と結合している Al (CuCl_2 抽出 Al と Al_p) は石灰施用により容易に形態が変化し、土壌中の Al_o 含量は中和前後で変化しないことから、 CuCl_2 抽出 Al と Al_p は有機物との結合が切れ、無機態の形態に変化したことが推察できる。草地土壌の非アロフェン質土壌の Al_p/Al_o が 0.5 付近である場合、石灰施用により Al_p は減少し、 $\text{Al}_p/\text{Al}_o < 0.5$ と変化する可能性がある。久保寺ら (2015) は森林土壌 94 と草地土壌 39 点をアロフェン質と非アロフェン質に分類し、その Al_p/Al_o の頻度分布を調べたところ、最頻値はいずれも 0.5 付近であり、この地域のアロフェン質と非アロフェン質は明確に 2 分されず、その境界に近い土壌が最も多いことを報告している。また、4.3.2 で記述したように久住高原の非アロフェン質土壌はアロフェン、イモライトを含む

こと、表 4-1, 図 4-3, 4-4 に示したように、アロフェン質であるにも関わらず $y_1 \geq 3$ と強酸性を示すアロフェン質土壌が存在するのはアロフェン質と非アロフェン質が明確に 2 分されないことを示している。草地管理等の土壌管理がアロフェン質と非アロフェン質の分類に影響することが十分に起こりうる事が推察された。

4.4 まとめ

九州地方には主に弱酸性を示し易いアロフェン質黒ボク土が分布するが、大分県久住高原では強酸性を示し易い非アロフェン質黒ボク土が分布し、草地の牧草生育抑制要因の一つとみなされている。そこで大分県久住高原の草地において土壌酸性の実態調査を行ったところ、非アロフェン質黒ボク土は標高 720 m 以上に主に分布すること、調査圃場の半数は交換酸度 y_1 が 3 以上と強い酸性を示し、その多くは非アロフェン質黒ボク土であること、しかし、 y_1 が 3 以上と強い酸性を示すアロフェン質黒ボク土も存在することが明らかとなった。(図 4-9)。草地の土壌を用いてポット試験を行ったところ、牧草(イタリアンライグラス)の初期生育は新潟県の草地土壌管理基準として採用されている y_1 3 以上の酸性土壌で抑制され、非アロフェン質黒ボク土だけではなく強酸性のアロフェン質黒ボク土においても適用できた。また、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と y_1 の関係はアロフェン質と非アロフェン質で傾向が異なるものの、 $\text{pH}(\text{KCl})$ と y_1 の間にはアロフェン質と非アロフェン質に関わらず同一の関係があること、石灰質資材と pH の関係から石灰の必要量を求める緩衝曲線は $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ では曲線になるが $\text{pH}(\text{KCl})$ では直線回帰が可能で推定がより簡易であることから、土壌酸性の改良には、簡易に測定できる $\text{pH}(\text{KCl})$ に基づいた石灰質資材の施用が有効であった。

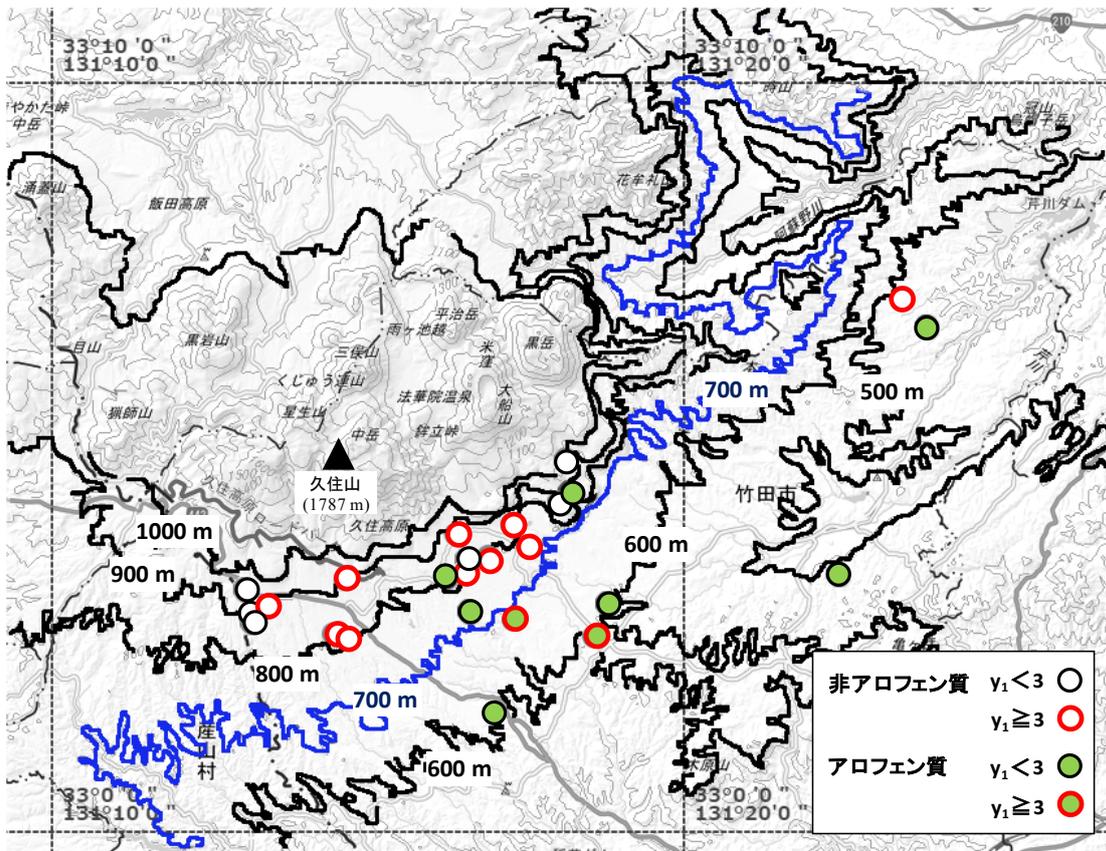


図 4-9 大分県久住高原の草地における表土(0~15 cm 深)の分類と標高の関係
 1)標高 700 m は青線とした。

第 5 章 阿蘇谷における酸性硫酸塩土壌の分布状況およびその特徴の把握

5.1 背景と目的

熊本県の阿蘇地域は阿蘇火山の中央火口丘を中心に広がる高原地帯である。阿蘇火山は 4 回の巨大噴火によりカルデラを形成しており、阿蘇カルデラ内の阿蘇中央火口丘より北側の地域は阿蘇谷と呼ばれている。平成 28 年熊本地震では、熊本県内の広い範囲の農地で亀裂や段差が発生し（吉田ら，2016）、甚大な農業被害が発生した（金森，2017）。平成 28 年熊本地震ではこの阿蘇谷においても農地に亀裂や段差が発生し、修復工事が計画された。しかし阿蘇谷の一部の土壌の下層には、空気に触れて酸化すると硫酸イオンを生成し、強酸性を示す酸性硫酸塩土壌へと変化するパイライト（ FeS_2 ）に富む土層が分布することが明らかとなっている（川崎，1982）。川崎・古閑（1976）は泥炭物質を含む層にパイライトが多く含まれ、かつ現地の湧水中の硫酸濃度が高いことから、有機物の分解による還元条件下で地下水中の硫酸が還元され、鉄とイオウが結合することでパイライトが生成されたと推察している。また、イオウの給源については地下水だけではなく泥炭物質からの植物性起源のイオウの供給についても言及している（川崎，1986）。

阿蘇谷における修復工事では表土扱い（表土を一度持ち出し、修復後に表土を戻す工法）が予定されており、下層の酸性硫酸塩土壌が作土に混入し、工事後の作物栽培に悪影響を及ぼすおそれは低いものの、酸性硫酸塩土壌は還元状態での土壌 pH は中性（渡辺，1997）であり、一定期間空気にさらすか、あるいは酸化剤で土壌を強制的に酸化しないと強酸性を示さないため、通常の pH 測定では酸性硫酸塩土壌の判定は困難であり、誤って判定する可能性が高い。そこで修復工事施工にあたっての参考とするため、修復工事实施予定圃場から土壌を採取して酸性硫酸塩土壌の判定を行い、酸性硫酸塩土壌の空間的分布、色および臭いなどの特徴を調査した。また、修復工事实施予定圃場近くの、地

震により生じた段差を伴った亀裂において、土壌断面を観察し、酸性硫酸塩土壌の垂直分布について調査を行うとともに、酸性硫酸塩土壌の中和石灰量についても検討を行った。

5.2 方法

5.2.1 調査地点の概要

阿蘇谷は阿蘇中央火口丘と北外輪山に囲まれた標高 480～490 m の水田地帯である。調査地点は図 5-1 の亀裂や段差の修復工事が予定されている阿蘇谷の 2 工区（以後、工区 1、工区 2）で、工区 1 と 2 は約 5 km 離れ、ともにカルデラ内を流れる黒川沿いに位置する。5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査（熊本県，1982；熊本県，1992）の地形分類図では両区ともに扇状地および谷底平野に該当する低地である。

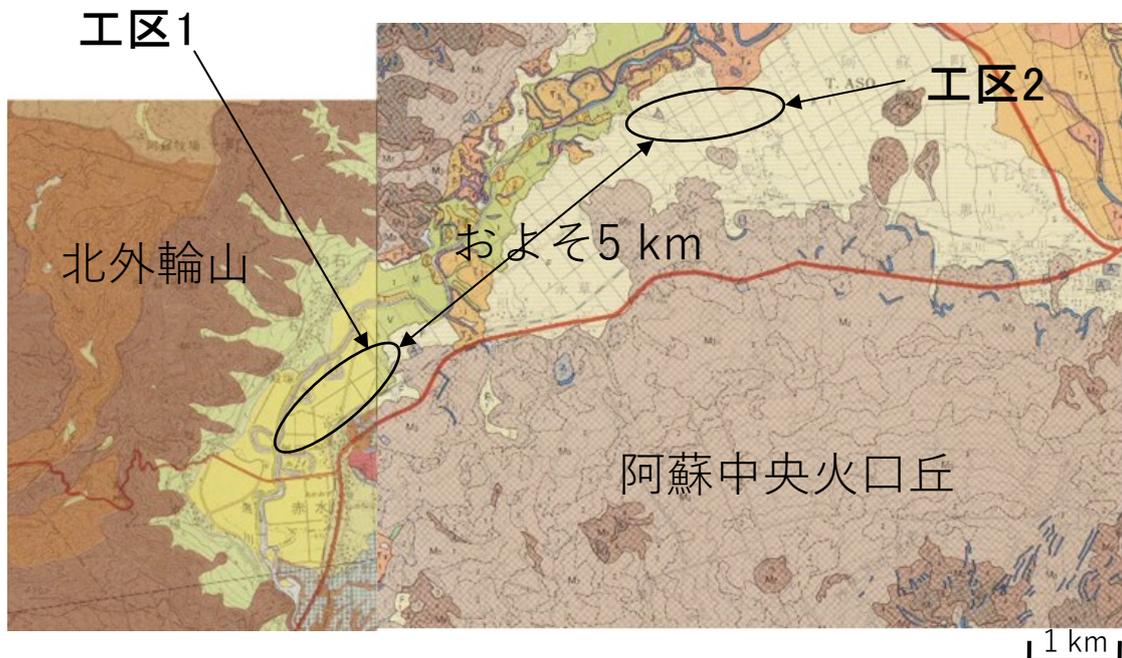


図 5-2 阿蘇谷の地形分類図

『1/50,000 土地分類基本調査(地形分類図)「菊池」熊本県(1982), 「阿蘇山・竹田」熊本県(1992)』

5.2.2 土壌の採取方法と分析項目

熊本県阿蘇地域振興局から指定された2工区の各5圃場（工区1—A～E，工区2—A～E）で酸性硫酸塩土壌の圃場内分布を調査した。土壌採取は2016年9月15～16日に行った。各圃場内の採取地点は5地点とし、圃場の中心を採取地点2，圃場の中心と長辺との中間点を北西側から順に採取地点1，3，圃場の中心と短辺との中間点を南西側から順に採取地点4，5とした（図5-2）。土壌は20 cm刻みで深さ1 mまでハンドオーガーで採取し，採取地点毎に5点ずつ採取した。一部，地下水位が高く，土壌の採取が困難であった層位の土壌は採取しなかったため，採取した土壌は全246点となった。土壌は高水分であったため1週間風乾させた後，村上（1961）および土壌環境分析法（1997）に準じ，土壌2 gに30% H_2O_2 (pH5.2)を20 ml加え放置後，加熱して強制的に酸化させ，放冷後pH(H_2O_2)を測定した。また，pH(H_2O_2)の測定に用いた土壌抽出液に塩化バリウム溶液を滴下し，硫酸イオンの生成を確認した。土壌環境分析法（1997）に準じ，pH(H_2O_2)が3.0未満かつ硫酸イオンの生成が確認され

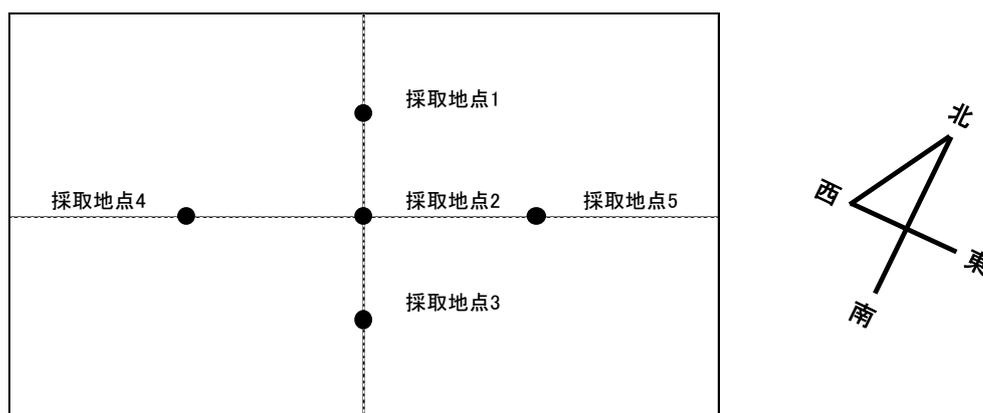


図 5-2 調査圃場内の土壌採取地点

1)圃場の北西側長辺の中央から南東側長辺の中央に引いた線上の圃場の中心を採取地点2とし，圃場の中心と縁との中間点を北西側から順に採取地点1，3とした。また，圃場の南西側短辺の中央から北東側短辺の中央に引いた線上の圃場の中心と縁との中間点を南西側から順に採取地点4，5とした。

た土壌を酸性硫酸塩土壌とした。

そして酸性硫酸塩土壌と判定された全ての土層および酸性硫酸塩土壌と判定されなかった一部の土層について、土色や泥炭物質混入の有無などを調査した。さらに、地表に移動した酸性硫酸塩土壌が酸化した状態を想定して3ヶ月間風乾させた同一試料の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ を測定し、上述の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ との関係調べた。

さらに地震により工区1-B 圃場から南に40 m 離れた地点に生じた、深さ1 m 程度の段差を伴った亀裂において土壌断面を観察した。工区1-B 圃場では酸性硫酸塩土壌が浅い層から出現したことから、B 圃場周辺の酸性硫酸塩土壌の詳細な観察の対象とした。調査は2016年10月14日に行った。段差の露出面の表面を削り整形後、土壌調査ハンドブック改訂版（日本ペドロロジー学会編，1997）に従い土壌層位を区分した。それぞれの層位について土色，斑紋，有機物，野外土性，土壌構造，コンシステンシー，ジピリジル反応，活性Al を記載した。層位別に土壌試料を採取し，リン酸吸収係数， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ ， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ ，EC を土壌環境分析法（土壌環境分析法編集委員会，1997）に従い測定した。

中和に必要な石灰資材量を求めるため，過酸化水素処理による方法で酸性硫酸塩土壌と判定された土壌から6土壌（a～f）を選び， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ の測定に用いた土壌抽出液中のイオウ（S）濃度（以後， H_2O_2 処理 S 濃度）をICP 発光分光分析装置（ICPE-9820，島津製作所）で定量した。過酸化水素処理後は土壌抽出液中のイオウは全て硫酸にまで酸化されていると仮定し，硫酸の中和に必要な Ca^{2+} を含む炭酸カルシウム量を硫酸塩中和石灰量とし，次の式で計算した。中和により CaSO_4 が生成すると仮定すると，1モルのイオウ（S）の中和には1モルのカルシウム（Ca），つまり1モルの炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）が必要となる。そこで， H_2O_2 処理 S 濃度をイオウの原子量 32.07 で割ってモル

を求め、炭酸カルシウムの分子量 100.09 を乗じて硫酸塩中和石灰量を求めた。

$$\text{硫酸塩中和石灰量 (mg/g 乾土)} = \text{H}_2\text{O}_2 \text{ 処理 S 濃度 (mg/g 乾土)} \times 100.09 \\ / 32.07$$

また、渡辺 (1992) に準じ、上記 6 土壌のうち 2 土壌 (c, d) に異なる量の炭酸カルシウムを混和し、保温静置実験後の土壌 pH(H₂O) から推定した最適な炭酸カルシウム量を土壌中和石灰量とした。すなわち 100 ml の培養びんで乾土 10 g 相当の風乾土と試薬の粉状の炭酸カルシウム (0, 1.0, 2.0, 5.0 g の 4 水準) を混和後、イオン交換水を最大容水量の 60 % となるよう添加し、ポリエチレンフィルム 0.02 mm で培養びんの口を覆い、週に 1 回、減少分の水分を添加しながら 30°C で 4 週間保温静置した。培養は 2 反復で行った。4 週間の保温静置後の pH(H₂O)、電気伝導率 (EC) および水溶性イオン (S) 濃度を測定し、pH(H₂O) の酸性硫酸塩土壌の判定基準 (pH(H₂O) が 4 未満) との比較、異なる炭酸カルシウム添加量における EC および水溶性 S 濃度の比較、H₂O₂ 処理 S 濃度から計算で求めた硫酸塩中和石灰量と保温静置実験から推定した土壌中和石灰量との比較を行った。

水洗による酸性硫酸塩土壌の改善効果についてもカラム試験により比較を行った。すなわち 6 土壌 (a~f) の風乾土を厚さ 70mm 程度になるように各々 2.5 g~6 g カラムに充填し、土壌を通過した浸出水がカラム下方から 1ml 分⁻¹ の速度で流出するよう蒸留水を滴下した。浸出水は滴下当初は 10ml ずつ、滴下後半は 100ml ずつプラボトルに採取し、各々の pH および EC を測定した。また、浸出水の pH の改善がみられなくなったところで粉状の炭酸カルシウムをカラム上方から 0.05g を 1 回と 0.1g を 2 回の合計 0.25g 添加し、引き続き蒸留水の滴下と浸出水の採取を行い、pH および電機伝導率 (EC) を測定した。

5.3 結果と考察

5.3.1 酸性硫酸塩土壌の分布

調査圃場から採取した土壌を分析した結果、工区 1 では調査した 5 圃場のうち 2 圃場、工区 2 では 5 圃場のうち 3 圃場において酸性硫酸塩土壌が確認された。図 5-3 には工区 1—A～E、工区 2—A～E の 10 圃場について、全土層の pH(H₂O₂)値と一部の土層の土色名、Munsell 方式の記号、泥炭物質の有無を記載した。土壌採取は 20 cm 刻みで行い、各々混合サンプルとしたことから、20 cm の土層全てが酸性硫酸塩土壌ではなかった可能性はあるが、圃場内の地点や工区により酸性硫酸塩土壌が出現する土層の深さおよび pH(H₂O₂)値は異なった。図 5-3 に示すように、工区 1—B 圃場では、圃場の北側の採取地点 1 および 5 では 20～40 cm 深の比較的浅い土層から出現した一方、圃場の南東側の採取地点 3 では 80 cm 以深のみに出現した。工区 1—E 圃場では、圃場の南西側の採取地点 4 では 0～20 cm 深の浅い土層から出現したが、圃場の北東側の採取地点 5 では 60 cm 以深に出現した。このように工区 1 では、2 圃場の 5 採取地点全てに酸性硫酸塩土壌が出現し、圃場内の広い範囲に分布したが、出現の深さは採取地点で異なり、作土付近の浅い層からも出現した。一方、工区 2 の酸性硫酸塩土壌は、工区 2—B 圃場では、北西側の採取地点 1 と南東側の採取地点 3 の 80 cm 以深のみに出現し、工区 2—C 圃場では、採取地点 2～5 において 80 cm 以深に、工区 2—D 圃場では、北東側の採取地点 5 にのみ 60 cm 以深に出現した。工区 2 では、酸性硫酸塩土壌が出現する採取地点は 3 圃場の一部の地点であり、深い土層のみに分布した。また、酸性硫酸塩土壌の土層の pH(H₂O₂)は、工区 1 では 1 を下回る強い酸性を示す土層も存在したが、工区 2 では 3 を下回る程度の土層のみで、酸性は比較的弱かった。

酸性硫酸塩土壌の土層の土色は 10YR2/2（黒褐色）や 7.5YR1.7/1（黒色）など、酸性硫酸塩土壌と判定されなかった土層と同じ土色も確認されたが、図

採取深さ (cm)	工区1-A 採取地点					工区1-B 採取地点					工区1-C 採取地点				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	①4.36	①4.08 ②黒 ③10YR1.7/1	①3.98	①4.09	①4.83	①3.70 ②暗褐 ③10YR3/3	①3.47 ②暗褐 ③10YR3/3	①3.90	①3.88	①3.97	①3.4	①2.95	①3.94	①3.11	①3.43
20	①4.2	①4.51 ②黒 ③10YR1.7/1	①4.5	①4.93	①4.46	①2.07 ②黒褐 ③10YR2/2	①3.52 ②黒褐 ③2.5Y3/2	①4.58	①3.92	a ①2.24 ②黒 ③5Y2/1 ④有り	①4.72	①3.76	①4.33	①3.53	①4.23
40	①3.32	①4.19 ②黒 ③7.5YR1.7/1	①4.95	①4.56	①4.75	①1.82 ②黒褐 ③2.5Y3/2 ④有り	①2.16 ②オリブ黒 ③5Y2/2 ④有り	①3.82	①2.92 ②暗褐 ③10YR3/3	①1.58 ②オリブ黒 ③5Y2/2 ④含む～含む	①3.94	①5.43	①4.26	①3.6	①4.46
60	①4.26	①4.19 ②黒 ③10YR1.7/1	①5.42	①5.11	①5.03	①1.64 ②オリブ黒 ③5Y2/2 ④含む	①1.99 ②オリブ黒 ③5Y3/2 ④有り～含む	①3.66	①2.12 ②暗褐, 黒 ③7.5YR3/4, 2.5Y2/1	①1.48 ②オリブ黒 ③5Y2/2 ④含む	①3.4	①4.41	①4.3	①3.03	①3.52
80	①4.63	①4.43 ②黒褐, 暗褐 ③7.5YR2/2 ④7.5YR3/4-6.4	①4.89	①5.1	①4.85	①1.49 ②オリブ黒 ③5Y2/2 ④含む	図5-3上 ①1.81 ②黒 ③5Y2/1 ④含む	①2.67 ②オリブ黒 ③5Y2/2	①1.87 ②褐, オリブ黒 ③7.5YR4/4, 5Y2/2	b ①1.64 ②オリブ黒 ③5Y2/2 ④含む～含む	①4.08	①4.38	①4.33	①3.41	①2.74
100	工区1-D 採取地点					工区1-E 採取地点									
0	①4.28	①3.92 ②黒褐 ③7.5YR2/2	①3.93	①4.02	①3.87	①4.53 ②暗褐 ③10YR3/3	①4.47 ②暗褐 ③7.5YR3/3	①4.16	①2.38 ②暗褐 ③7.5YR3/4	①3.92					
20	①4.86	①3.75 ②黒褐 ③7.5YR2/2	①3.92	①4.01	①3.87	①3.62 ②黒褐 ③10YR2/2	①3.36 ②暗褐 ③赤褐 ④7.5YR3/3 ⑤5YR4/8	①2.91 ②褐> オリブ黒 ③7.5YR4/6 ④>5Y2/2	①1.68 ②黒>褐 ③5Y1.7/1 ④>10YR4/6 ⑤有り～含む	①2.68					
40	①5.55	①5.18 ②黒褐 ③7.5YR2/2	①4.68	①4.14	①4.79	①1.19 ②黒>黄褐 ③5Y1.7/1 ④>10YR5/6	c ①0.87 ②黒 ③オリブ黒 ④>5Y1.7/1 ⑤5Y2/2 ⑥有り	①4.76	①1.49 ②黒>黄褐 ③5Y1.7/1 ④>10YR5/8 ⑤含む	①2.60					
60	①5.1	①5.27 ②黒褐 ③7.5YR2/2	①4.78	①4.31	①5.14	①0.95 ②黒 ③5Y1.7/1 ④含む	①1.70 ②黒>暗赤褐 ③5YR1.7/1 ④>5YR3/6 ⑤有り～含む	①4.73	①1.40 ②黒 ③5Y1.7/1 ④有り	①2.02 ②黒>赤褐 ③5Y1.7/1 ④>5YR4/8 ⑤含む					
80	①5.19	①5.03 ②黒褐 ③7.5YR2/2	①4.88	①4.26	①3.76	①0.91 ②黒 ③5Y1.7/1 ④含む	d ①1.60 ②黒 ③5Y1.7/1 ④含む	①2.73 ②黒褐 ③>暗褐 ④5YR2/2 ⑤>10YR3/4	①1.57 ②黒 ③5Y2/1 ④有り	e ①0.92 ②オリブ黒 ③5Y2/2 ④含む					
100															

図 5-3 工区 1, 工区 2 における土壌採取地点および採取深さ毎の酸性硫酸塩土壌と pH(H₂O₂), 土色および泥炭物質の有無

- 1) 灰色の網掛けは酸性硫酸塩土壌と判定された土層とした。
- 2) 枠内の①は pH(H₂O₂)値, ②は土色名, ③は Munsell 方式の記号, ④は泥炭物質の有無について記した。②と③は小山・竹原(2003)に従い記した。①は全ての土層について, ②, ③, ④は一部の層位のみ調査した。
- 3) 工区 2-A の採取地点 2 の 80~100 cm, 採取地点 4 の 60~80 cm, 80~100 cm, 採取地点 5 の 80~100 cm は地下水位が高く, 土壌の採取が困難であったため, 土壌は採取しなかった。
- 4) 赤枠の土層 a~f は中和石灰量の試験に供試し, 表 5-2, 表 5-3, 図 5-7 にデータを示した。青枠の土層の写真は図 5-4 に掲載した。

採取深さ (cm)	工区2-A 採取地点					工区2-B 採取地点					工区2-C 採取地点				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	①5.12	①4.86 ②黒袴、赤袴 ③7.5YR 2/2 ※ 5YR 4/8	①5.25	①4.54	①4.75	①3.75	①3.62	①3.81	①4.10	①4.02	①3.95	①3.86 ②暗オリーブ ③ 2.5Y3/3	①3.94	①4.33	①4.35
20	①5.53	①5.96 ②黒袴 ③7.5YR 2/2	①5.76	①5.57	①5.19	①4.54	①4.77	①4.34	①4.49	①4.40	①4.26	①5.13 ②黒袴※極 暗袴 ③5YR2/1 ※7.5YR2/3	①5.08	①5.51	①5.80
40	①5.65	①6.59 ②極暗袴 ③7.5YR 2/3	①6.36	①6.07	①5.87	①3.74	①4.90	①4.65	①4.30	①5.09	①3.14	①5.04 ②黒袴=暗 袴 ③ 7.5YR2/2 = 7.5YR3/3	①3.73	①5.73	①5.80
60	①6.46	①6.98 ②極暗袴 ③7.5YR 2/3	①6.87	-	①5.90	①3.37	①3.51	①3.16 ②黒袴 ③ 2.5Y3/2 ④有り~含む	①4.22	①3.67 ②暗袴※明 袴 ③7.5YR3/3 ※7.5YR5/8	①3.87	①4.80 ②暗袴 ③ 10YR3/4	①3.38	①5.25	①4.28
80	①6.26	-	①6.69	-	-	①2.68 ②オリーブ 黒 ③5Y2/2 ④有り	①3.05 ②黒 ③5Y1.7/1 ④有り~含む	①2.88 ②オリーブ 黒 ③5Y2/2	①4.53	①3.12 ②オリーブ黒 ③5Y2/2 ④有り	①3.91	f ①2.56 ②暗オリーブ 袴 ③2.5Y3/3 ④有り	①2.90 ②黒 ③5Y2/1 ④有り~含む	①2.83 ②黒※暗袴 ③ 7.5YR1.7/1 ※7.5YR3/4 ④含む	図5-3中 ①2.72 ②オリーブ 黒 ③5Y2/2 ④有り
100	工区2-D 採取地点					工区2-E 採取地点									
採取深さ (cm)	工区2-D 採取地点					工区2-E 採取地点									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
0	①3.18	①3.14	①4.21	①4.22	①2.97 ②暗袴 ③10YR3/3	①4.76	①4.6 ②黒袴 ③ 7.5YR3/1	①4.58	①3.59	①4.85					
20	①3.69	①4.12	①3.77	①4.68	①4.09 ②黒袴 > 暗灰黄 ③10YR3/2 > 2.5Y4/2 ④有り	①5.02	①4.91 ②黒袴 ③5YR2/1	①5.46	①5.48	①5.52					
40	①3.49	①3.63	①3.52	①3.64	①3.32 ②暗赤袴 ③5YR3/4 ④含む~す こぶる含む	①4.81	①5.62 ②黒袴 ③5YR2/1	①5.72	①5.59	①5.5					
60	①3.15 ②極暗袴 ③ 7.5YR2/3 ④有り	①3.55 ②黒袴 ③ 7.5YR3/2 ④有り~含む	①3.83	①3.50	①2.61 ②黒 ③5YR1.7/1 ④含む~す こぶる含む	①5.00	①3.99 ②黒 ③ 7.5YR2/1	①4.38	①4.62	①5.46					
80	①3.25 ②オリーブ 黒 ③5Y2/2 ④有り	①3.02 ②黒袴 ③ 7.5YR2/2 ④有り	①3.02 ②黒 ③ 7.5YR2/1 ④含む~含む	①3.13 ②黒 ③ 7.5YR 1.7/1 ④有り	①2.62 ②黒 ③2.5Y2/1 ④含む~含む	①4.27	①3.56 ②黒袴 ③ 10YR2/2	①3.34	①5.41	①3.44					
100															

5-3 および図 5-4 に示すように、工区 1、工区 2 とともに 2.5Y2/1～3/3（黒色～暗オリーブ褐色）、5Y1.7/1～3/2（黒色～オリーブ黒色）など緑色を帯び、酸性硫酸塩土壌に特徴的な土色が多かった。泥炭物質が確認されない酸性硫酸塩土壌もあったものの、工区 1、工区 2 とともにほぼ泥炭物質が確認され、阿蘇谷の酸性硫酸塩土壌は黒泥層（泥炭を含む黒色ないし黒褐色の土層）との川崎（1982）の報告と一致した。また採取したそのままの土壌（生土）と風乾後の土壌のそれぞれで臭いを調査したところ、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が 3 程度の土層では確認は難しかったが、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が 2 を下回る土層では生土の状態でもわずかに刺激臭（腐卵臭）が確認でき、1 週間風乾後では強い刺激臭（腐卵臭）があった。このように、土色や泥炭物質の有無、臭いにより現場でも酸性硫酸塩土壌が簡易的に判定できる可能性が高かった。以上の結果は、農地の修復工事を担当する熊本県阿蘇地域振興局に報告した。



図 5-4 調査圃場から採取した酸性硫酸塩土壌と泥炭物質

- 1) 左上: 工区 1—B 圃場の採取地点 2 の 80～100 cm 深の土層, 左下: 工区 1—B 圃場の採取地点 2 の 80～100 cm 深の土層に含まれていた泥炭物質, 右上: 工区 2—C 圃場の採取地点 5 の 80～100 cm 深の土層
- 2) 図 5-3 の青枠内の土層の一部である。

5.3.2 阿蘇谷の酸性硫酸塩土壌における過酸化水素処理による判定法の有効性の確認

工区 1—A～E, 工区 2—A～E の 10 圃場から採取した土壌 246 点について、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ と 3 ヶ月間風乾後に測定した $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ の関係を図 5-5 に示した。

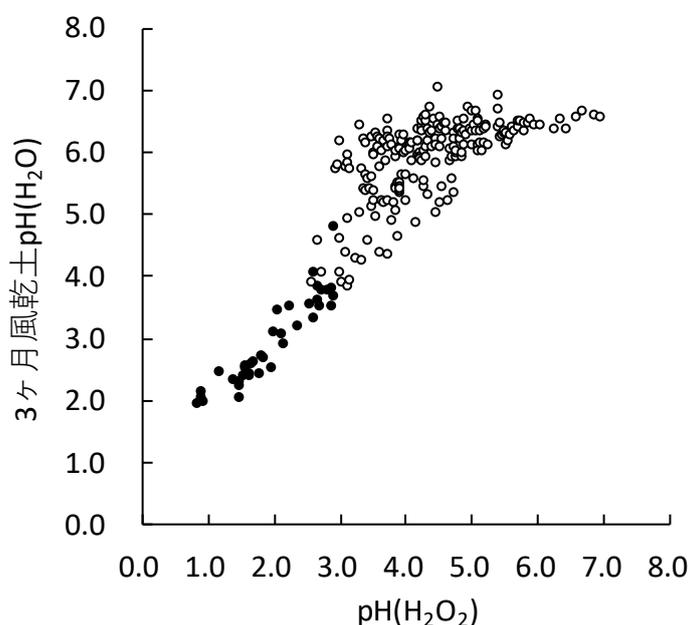


図 5-5 工区 1 と工区 2 から採取した土層の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ (1 週間風乾後測定)と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ (3 ヶ月間風乾後測定)の関係

1) 黒色のプロットは酸性硫酸塩土壌と判定された土層 ($n=38$; $r=0.927$, $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ の平均値, 最小値および最大値はそれぞれ 2.9, 1.9 および 4.8)。白色のプロットは酸性硫酸塩土壌と判定されなかった土層 ($n=208$)。

2) $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は, 3 ヶ月間風乾した風乾土 10 g に純水を 25 ml 加え, 30 分振とうおよび 30 分静置後に pH 計で測定した。 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ は, 高水分のため 1 週間風乾した生土 2 g に 30% H_2O_2 ($\text{pH}5.2$)を 20 ml 加え加熱, 放冷後に pH 計で測定した。

$\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ により酸性硫酸塩土壌と判定された土壌の, 3 ヶ月間風乾後の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は平均値が 2.9, 最小値が 1.9, 最大値が 4.8 と強酸性であった。

$\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ による強性的な酸化と 3 ヶ月間風乾による自然状態での酸化の結果

があてはまったことから、阿蘇谷の酸性硫酸塩土壌についても $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ による迅速な判定が有効であることが確認できた。また、酸性硫酸塩土壌の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ と 3 ヶ月風乾後の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ の相関係数は 0.927 と高く、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ は酸性硫酸塩土壌の酸性の強さも評価していることが確認できた。

5.3.3 浅い層から酸性硫酸塩土壌が出現する地点における土壌断面の観察

酸性硫酸塩土壌が浅い層から出現した工区 1-B 圃場から南に 40 m 離れた地点の、深さ 1 m 程度の段差を伴った地震による亀裂において土壌断面を観察した。観察地点周辺の景観と土壌断面の写真を図 5-6 に示した。

土壌断面記載と層位毎のリン酸吸収係数、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ 、EC は表 5-1 に示した。断面は 6 層位に分けられた。第 1 層～第 2 層 (0～30 cm) の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ はそれぞれ 4.5 と 5.0 と値は高かったが、第 3 層～第 6 層 (30～100 cm+) の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ はそれぞれ 2.3, 1.2, 1.4 および 1.7 といずれも 3 未満であり、かつ硫酸イオンの生成が確認され、酸性硫酸塩土壌にあてはまった。これは工区 1-B 圃場の酸性硫酸塩土壌の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ および出現の深さとほぼ同じであった。図 5-5 の土壌断面の写真からも 0～30 cm は暗褐色および褐色であり、表 5-1 に示すように $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は 6 かつ亜角塊状の構造がみられ、30～100 cm+ とは土色や構造の発達が異なることから、基盤整備による客土または営農の影響がうかがえた。第 1 層 (Ap1, 0～14 cm) と第 2 層 (Ap2, 14～30 cm) の土色はそれぞれ 7.5YR3/3 (暗褐色) と 7.5YR4/4 (褐色) であったが、第 3 層 (B, 30～45 cm) は 5YR4/6 の赤褐色の層の中にレンズ状に黒色の層が挟まっていた。その下の第 4 層～第 6 層 (H～3H, 45～100 cm+) はそれぞれ 5G1.7/1 (緑黒色)、7.5YR1/1 (黒色) と 5G1.7/1 (緑黒色) の黒色の層が連続しており、泥炭物質が含まれていた。第 4 層～第 6 層には泥炭物質が含まれ、構造は壁状であること、さらに第 4 層と第 6 層はジピリジル反応が即時鮮

明，土色は 5G であったことから，第 4 層～第 6 層は地下水グライ層と判断できた。また，第 1 層（0～14 cm）と第 3 層（30～45 cm）はリン酸吸収係数がそれぞれ 1637，1760 で，かつ泥炭物質を含まないことから，黒ボク特徴を示した。以上，第 1 層（0～14 cm）と第 3 層（30～45 cm）は黒ボク特徴を示し，第 4 層～第 6 層（45～100 cm+）は地下水グライ層であり，第 1 層は腐植物質に乏しく褐色を示すことから，包括的土壌分類第 1 次試案（小原ら，2011）に基づいて分類を行うと，典型泥炭質グライ黒ボク土に分類できた。

0～30 cm 深までは pH(H₂O)は 6 を示し，基盤整備または営農努力による改良の跡が観察されたにも関わらず，工区 1 では 30cm よりも浅い作土付近にも酸性硫酸塩土壌が出現した地点が確認されたことから，地震により何らかの攪乱が生じ，酸性硫酸塩土壌が下層から作土付近に移動したと考えられた。



図 5-6 土壤断面調査地点周辺の景観(上)と段差を伴った亀裂における土壤断面(下)
1)調査地点は工区 1—B 圃場から約 40 m 南に位置する。

表 5-1 浅層から酸性硫酸塩土壌が出現する地点における土壌断面の層序, 断面記載
および層位毎のリン酸吸収係数, pH(H₂O), pH(H₂O₂)と電気伝導率(EC)

層位	深さ (cm) ・層界	土色	有機物	土性	構造	コン シス テンス	ち密度 (mm)	ジピリ ジル 反応	リン酸 吸収係数 (mg/100g)	pH (H ₂ O)	pH (H ₂ O ₂)	EC (dS/m)	備考
第1層 Ap1	0-14	7.5YR 3/3		CL	亜角塊・ 不明瞭 2~3 cm	粘着性 中 可塑性 中	22 mm	-	1637	5.9	4.5	0.9	
	平坦画然												
第2層 Ap2	14-30	7.5YR 4/4		L	亜角塊・弱 3~5 cm	粘着性 弱 可塑性 中	22 mm	-	1433	5.8	5.0	1.5	糸根状斑紋有
	波状画然												
第3層 B	30-45	5YR 4/6	黒>>黄 1:1~1:4	LiC	壁状	黄: 粘着性 強 可塑性 中	黒 16 mm 黄 17 mm	-	1760	2.9	2.3	8.1	泥炭-テフラ互層
	平坦明瞭												
第4層 H	45-60	5G 1.7/1	泥炭(ヨシ) 含む	HC	壁状			+++	1057	1.4	1.2	18	テフラ(レンズ状) あり
	平坦漸変 ~判然												
第5層 2H	60-75	7.5YR 1/1	泥炭 (ヨシ5 mm、 褐色) 35%	HC	壁状			+	1133	1.7	1.4	11	68 cmに ポケット状に灰
	平坦漸変 ~判然												
第6層 3H	75-100+	5G 1.7/1	泥炭 (ヨシ1.0-1.5 cm、 灰色) 30%		壁状			+++	2447	2.3	1.7	10	94 cmに ポケット状に灰

1)調査地点は工区 1—B 圃場から約 40 m 南に位置する。2)活性アルミニウム反応は全層無し。
3)第 3 層は泥炭-テフラ互層, 上端が基盤整備により切れている。黒連続悪く, しばしばレンズ状
(厚 4 cm×30 cm)。

5.3.4 中和石灰量

表 5-2 に土壌 a~f の pH(H₂O₂), H₂O₂ 処理 S 濃度と硫酸塩中和石灰量を示した。H₂O₂ 処理 S 濃度および硫酸塩中和石灰量は 6 土壌で様々であり, 中和石灰量は土層毎に推定が必要であった。保温静置実験に供試した 2 土壌 (c, d) の pH(H₂O₂)はそれぞれ 0.87 と 1.60, H₂O₂ 処理 S 濃度は 94.9 と 50.9 mg g⁻¹であり, H₂O₂ 処理 S 濃度から求めた硫酸塩中和石灰量は乾土 10 g 当たり 3.0 g と 1.6 g であった (表 5-2)。

表 5-2 土壌 a~f の pH(H₂O₂), H₂O₂ 処理イオウ(S)濃度および硫酸塩中和石灰量

土壌No.	pH(H ₂ O ₂)	H ₂ O ₂ 処理S (mg/g)	乾土10 g当たり 硫酸塩中和石灰量 (g)
a	2.24	16.4	0.5
b	1.64	104	3.3
c	0.87	94.9	3.0
d	1.60	50.9	1.6
e	0.92	92.9	2.9
f	2.56	25.4	0.8

1) pH(H₂O₂)は、高水分のため 1 週間風乾した土壌 2 g に 30 %H₂O₂(pH5.2)を 20 ml 加え 60°C 前後で加熱、放冷後に pH 計で測定した。

2) pH(H₂O₂)の測定に用いた土壌抽出液中のイオウ(S)濃度(H₂O₂ 処理 S 濃度)は pH(H₂O₂)測定後の上澄み液を 5B のろ紙でろ過後、ろ液を ICP 発光分光分析装置に供試し求めた。

3)過酸化水素処理後は土壌抽出液中のイオウは全て硫酸にまで酸化されていると仮定し、硫酸の中和に必要な Ca を含む炭酸カルシウム量を「硫酸塩中和石灰量」とし、次の式で計算した。中和により CaSO₄ が生成すると仮定すると、1 モルのイオウ(S)の中和には 1 モルのカルシウム(Ca)、つまり 1 モルの炭酸カルシウム(CaCO₃)が必要となる。そこで、H₂O₂ 処理 S 濃度をイオウの原子量 32.07 で割ってモルを求め、炭酸カルシウムの分子量 100.09 を乗じて硫酸塩中和石灰量を求めた。

$$\text{乾土 10 g 当たり硫酸塩中和石灰量(g)} = \text{H}_2\text{O}_2 \text{ 処理 S 濃度(mg/g 乾土)} \times 100.09 / 32.07 / 100$$

2 土壌 (c, d) の保温静置後の pH(H₂O)を表 5-3 に示した。土壌 c では、乾土 10.0 g に対し炭酸カルシウムを 2.0 g 添加しても土壌 pH(H₂O)は 2.0 と低かったが、土壌 c の硫酸塩中和石灰量である 3.0 g を超える量の炭酸カルシウム (5.0 g) を添加すると、6.3 にまで上昇した。土壌 d では、乾土 10.0 g に対し炭酸カルシウムを 1.0 g 添加しても土壌 pH(H₂O)は 2.2 と低かったが、土壌 d の硫酸塩中和石灰量 1.6 g を超える炭酸カルシウム (2.0 g) の添加により 6.4 にまで上昇した。

表 5-3 保温静置実験における炭酸カルシウム添加量と pH(H₂O), 電気伝導率(EC)および水溶性イオウ(S)濃度

土壌	炭酸カルシウム (g)	pH(H ₂ O)	EC dS/m	水溶性S mg/g
c	0.0	1.1	39	133
	1.0	1.9	26	99
	2.0	2.0	19	70
	5.0	6.3	5	21
d	0.0	2.1	17	59
	1.0	2.2	11	26
	2.0	6.4	3	9
	5.0	7.1	3	9

- 1) pH(H₂O), EC および水溶性 S 濃度は酸性硫酸塩土壌に所定量の炭酸カルシウムを混和後, 水分量を最大容水量の 60 %に調整し, 30°Cで 4 週間保温静置した後に測定した。
- 2)炭酸カルシウムは乾土 10 g 当たりの添加量を示した。
- 3) pH(H₂O)は保温静置後の土壌に純水を乾土当たり 2.5 倍量となるように加え, 30 分振とうおよび 30 分静置後に pH 計で測定した。EC は pH(H₂O)測定後, 純水を乾土当たり 5 倍量となるようにさらに加え, 30 分振とう後に電気伝導率計で測定した。
- 4)水溶性 S 濃度は EC 測定後の上澄み液を 5B のろ紙でろ過後, ろ液を ICP 発光分光分析装置に供試し求めた。

このように, H₂O₂ 処理 S 濃度から求めた硫酸塩中和石灰量を超える量の炭酸カルシウムを酸性硫酸塩土壌に添加後保温静置すると, pH(H₂O)は酸性硫酸塩土壌の判定基準値である 4.0 (土壌環境分析法編集委員会, 1997) を上回り, 熊本県土壌診断基準 (熊本県土づくり・減農薬運動推進本部, 1998) の pH(H₂O)5.5~6.5 にまで上昇した。このことから, H₂O₂ 処理 S 濃度から求めた硫酸塩中和石灰量は酸性硫酸塩土壌の中和石灰量とみなせることが推察された。また図 5-7 のように, a~f の 6 土壌の pH(H₂O₂)と H₂O₂ 処理 S 濃度の関係式の決定係数は 0.687 と低かった。酸性硫酸塩土壌の中和石灰量の推定にあたっては, pH(H₂O₂)のみによるよりも, H₂O₂ 処理 S 濃度による方が望ましいと考えられた。

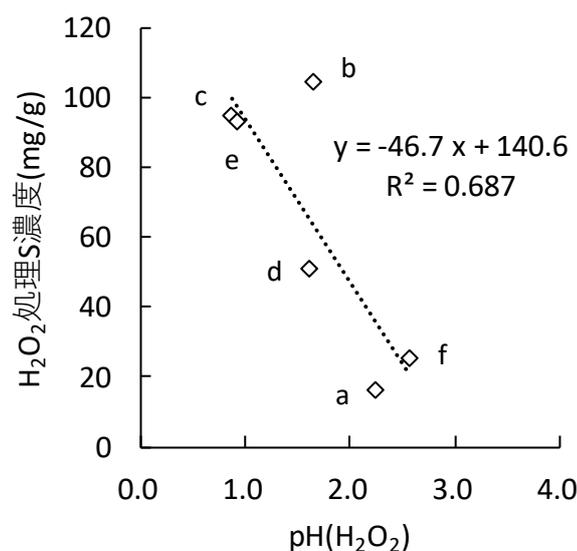


図 5-7 土壌 a~f の pH(H₂O₂)と H₂O₂ 処理イオウ(S)濃度の関係

- 1) pH(H₂O₂)は、高水分のため 1 週間風乾した土壌 2 g に 30% H₂O₂(pH5.2)を 20 ml 加え加熱、放冷後に pH 計で測定した。
- 2) H₂O₂ 処理 S 濃度は pH(H₂O₂)測定後の上澄み液を 5B のろ紙でろ過後、ろ液を ICP 発光分光分析装置に供試し求めた。

表 5-3 のように、保温静置後の EC は炭酸カルシウム 0 g 区では土壌 c および土壌 d でそれぞれ 39 dS/m および 17 dS/m、水溶性 S 濃度はそれぞれ 133 mg/g および 59 mg/g と非常に高かったが、炭酸カルシウム添加により pH(H₂O)が 6.0 以上に矯正された土壌では EC はそれぞれ 5 および 3 dS/m、水溶性 S 濃度は 21 mg/g および 9 mg/g まで低下していた。しかし、pH(H₂O₂) 0.87~2.56 の酸性硫酸塩土壌 10.0 g を改良する場合に必要な炭酸カルシウム量は、表 5-2 に示すように 0.5 g~3.0 g (乾土重量に対して 5%~30%) と土壌に対して莫大な量となった。工区 1 では強い酸性を示す酸性硫酸塩土壌が作土付近にも出現することから、工事の実施にあたっては注意が必要である。が推察された。

5.3.5 水洗による酸性硫酸塩土壌の変化

カラム試験の結果は図 5-8 に示した。蒸留水滴下当初の浸出水の EC は 5.4 ~22 mS/cm と非常に高かったが 50 mm 程度の滴下で 1 mS/cm 程度にまで低下、滴下当初の浸出水の pH も 1.6~3.5 であったのが 50 mm 程度の滴下で 3 程度にまで上昇した。その後、水洗のみでは上昇した pH が低下し始めたことから、300mm 滴下毎に炭酸カルシウムを添加した。pH および EC の変化は比較的緩やかであり、6 土壌の平均値で浸出水の pH は 4.2 に、EC は 45 μ S/cm まで改善したのが図 5-8 である。用いた酸性硫酸塩土壌は風乾状態で 3 ヶ月以上経過していたことからイオウ化合物は十分に酸化し硫酸塩に変化しており、水洗により速やかに水に溶け出して土壌から浸出除去されたと推察された。しかし水洗による硫酸塩の除去のみでは十分な pH 上昇は得られないことから、水洗による土壌からの硫酸塩の除去と炭酸カルシウムなどの資材施用による土壌への塩基補給の組み合わせが最も適切であることが示された。

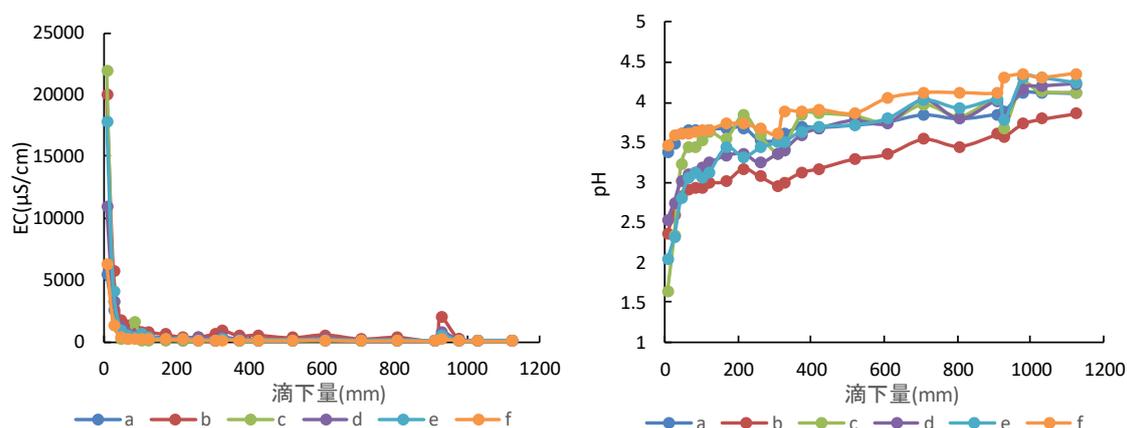


図 5-8 カラム試験における土壌 a~f からの浸出液の EC と pH の関係

1) 浸出水は 10~100 ml ずつプラボトルに採取し、各々の EC および pH を測定した。また、浸出水の pH の改善がみられなくなった 300mm 滴下後に粉状の炭酸カルシウムをカラム上方から 0.05g 添加、その後 300mm 毎に 0.1g 添加して引き続き蒸留水の滴下と浸出水の採取を行い、EC および pH を測定した。

5.4 まとめ

平成 28 年熊本地震により修復工事が計画された阿蘇市内の 2 工区で酸性硫酸塩土壌の分布を調査したところ、工区 1 では $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が 1.0 を下回る強い酸性を示す酸性硫酸塩土壌が存在し、作土付近にも出現した。工区 1 近傍の亀裂面における土壌断面調査では 0~30 cm 深までは $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は 6 を示したにも関わらず、工区 1 では 30 cm よりも浅い作土付近にも酸性硫酸塩土壌が出現した地点が確認されたことから、地震により何らかの攪乱が生じ、酸性硫酸塩土壌が下層から作土付近に移動したと考えられた。一方、工区 2 では $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が 3.0 程度の土層のみで比較的酸性は弱く、出現する深さも 80 cm 以深と作土付近での出現は確認できなかった。

酸性硫酸塩土壌と判定された土壌の土色は緑色を帯びた黒色が多く、そのほとんどで泥炭物質（ヨシなどの植物遺体）が確認された。また、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が 2 を下回る土層では刺激臭（腐卵臭）が確認できた。以上の結果より、現場においても、土色や泥炭物質の有無、臭いにより酸性硫酸塩土壌を簡易的に判定できる可能性が示された。また、酸性硫酸塩土壌の中和石灰量は、 H_2O_2 処理 S 濃度から推定可能であった。 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ 0.87~2.56 の場合、中和石灰量は乾土重量に対して 5%~30% と莫大な量となった。以上より、酸性硫酸塩土壌の中和には莫大な量のアルカリ資材が必要となること、また現地は豊富な水資源を利用できることから、対策としては、資材の施用のみではなく、1974 年の改良工事（川崎，1982）で実施されたように、水洗による硫酸塩の除去と炭酸カルシウムなどの資材施用による酸性改善および塩基の補給の組み合わせが最も適切であった。

第6章 総論

1. 九州沖縄地域に分布する特殊土壌の特徴

九州沖縄地域における不良土壌（土壌生産力可能性分級のⅢ，Ⅳ等級）は水田面積の約40%，普通畑面積の約70%，樹園地面積の約60%を占める（土壌保全調査事業全国協議会，1991）。県別の傾向を見ると，佐賀県，長崎県，宮崎県，鹿児島県，沖縄県で不良土壌が多く，佐賀県，長崎県においては赤黄色土，宮崎県，鹿児島県においては黒ボク土，沖縄県においては赤黄色土と暗赤色土が多く分布し不良土壌に分類される要因となっている。そこで本研究では，九州沖縄地域における不良土壌である赤黄色土と黒ボク土，そして熊本地震対策として問題土壌である酸性硫酸塩土壌を対象土壌とした。

2. 沖縄本島北部の赤黄色土圃場におけるソバ生育不良の改善

赤黄色土は有機物含量が低く，粘土含量が高く，ち密なため，物理性の悪化が生育阻害要因となりやすい。一方，沖縄における新規作物であるソバは，沖縄の気候に適した品種の選抜，堆肥施用による高い増収効果が明らかとなり導入が進んでいたものの，沖縄県大宜味村の現地圃場においては安定生産が課題となっていた。生育不良が散見される圃場は赤黄色土であり，作土の水分が高いとそばの生育が抑制される傾向がみられたことから，ソバ生育不良の要因は，作土の水分の上昇に起因する土壌空気の減少による湿害であった。そこで，通常の栽培管理に導入可能な対策技術として湿害軽減法である畝立て播種技術を沖縄県大宜味村に導入した。新潟県や長野県などの水田転換畑においてダイズ，ソバ，コムギ等で効果が実証されている技術で，沖縄では初めての導入である。その結果，畝立てにより作土の気相率をより高く維持することが出来，苗立ち数が増加すること，また梅雨や台風による降雨が少ない時期であれば，作土の気相率は高い状態で維持でき，収量も増加することを明らかにした。またソバ収量改善の条件として，栽培期間中の作土の気相率は $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$

以上との指標を提示した。一方、条播よりも散播で増収効果が得られることが示唆されたものの要因については不明であり課題として残った。

3. サトウキビの減化学肥料栽培のための施肥管理方法の開発

ここまでで赤黄色土における生育阻害要因である物理性については軽減技術の有効性と指標を提示できた。一方、赤黄色土は塩基溶脱作用を激しく受けているために土壤中の塩基は乏しく、強酸性を示すことが特徴であり、化学性も作物生育の阻害要因の一つとなっている。そこで、施肥管理による化学性の改善について研究を行った。サトウキビは台風による強風でも比較的折損が少ないこと、長大作物であることから根域が広くかつ深いことから干ばつ害にも強く、収量が0になるリスクが低いこと等から沖縄においては農業産出額が第2位の基幹作物である。一方、畜産も沖縄においては農業産出額が第1位と基幹産業であるが、適切なふん尿処理が課題となっている。沖縄県金武町は養豚が盛んであり、豚のふん尿を貯留、発酵させ液肥化し、サトウキビ圃場およびタイモ圃場に還元する耕畜連携システムを構築している先進的な自治体である。しかし、液肥の投入は圃場が裸地状態となる作物植え付け前が主であるため投入時期に偏りが生じており、また化学肥料は削減されていないのが現状である。そこで沖縄県金武町において、作物植え付け後に追肥の代替として液肥を施用する減化学肥料栽培を実施した。また液肥にはほとんど含まれていないリン酸を補うために堆肥を基肥の代替として施用する無化学肥料栽培についても合わせて実施し、サトウキビの収量および生育への影響を調べるとともに、液肥および堆肥施用が赤黄色土の化学性改善効果についても調査を行った。その結果、赤黄色土の化学性は液肥 20t/10a および堆肥 1t/10a により投入される窒素、リン酸、塩基類の残効により改善し、土壌診断基準を満たすことが明らかとなった。またm含有するアンモニア態窒素量が追肥相当となるように液肥を投入すると、慣行区と同程度のサトウキビ生育が得られることが明らかとなっ

た。一方、慣行区においてはサトウキビ地上部のカリ吸収量はカリ供給量を大きく上回り、栽培跡の土壌中のカリ含量は減少しカリ収奪傾向がみられた。

葉、鞘頭部、バガスを圃場に還元して蔗汁のみ持ち出したと仮定しても若干上回ることから、畜産由来の液肥や堆肥によりカリを投入することが有効であることが明らかとなった。一方、液肥および堆肥の残効が冬季のサトウキビの株の生育を促進することが示唆されたが関係は不明であり、課題として残った。

2章、3章において赤黄色土の物理性および化学性の改善方法について提示できた。

4. 久住高原の草地における非アロフェン質黒ボク土の分布の特徴と土壌酸性管理基準の提案

本章では強い土壌酸性を示し易い非アロフェン質黒ボク土を対象とし、化学性の改善、主に酸性改善について研究を行った。久住高原には非アロフェン質黒ボク土が分布し、観察される草地の劣化や植生の流亡も土壌酸性が要因であると考えられ酸性矯正の重要性は認識されているものの、農業法人における担い手不足や高齢化などの理由により現状では十分な資材投入は行われず、野草地化した採草地が散見される状況であった。一方、人工草地の維持に意欲的な農業法人も存在し、土壌管理技術の提示は意義がある。そこで、久住高原の草地における非アロフェン質黒ボク土の分布について調査するとともに、新潟県の草地土壌管理基準である交換酸度 $y_1=3$ の適用性について、牧草初期生育と y_1 との関係から導いた。その結果、非アロフェン質黒ボク土は標高 720 m 以上に主に分布すること、調査圃場の半数は交換酸度 y_1 が 3 以上と強い酸性を示し、その多くは非アロフェン質黒ボク土であること、しかし、 y_1 が 3 以上と強い酸性を示すアロフェン質黒ボク土も存在することが明らかとなった。またポット試験から、牧草（イタリアンライグラス）の初期生育は $y_1=3$ 以上の酸性土壌で抑制され、 $y_1=3$ は非アロフェン質黒ボク土だけではなく強酸性のアロフェ

ン質黒ボク土においても適用できることが明らかとなった。また、石灰質資材と pH の関係から石灰の必要量を求める際に pH(KCl)を指標とすると直線回帰が可能で推定が簡易であること、pH(KCl)と y_1 の間にはアロフェン質と非アロフェン質に関わらず同一の関係があることから、黒ボク土の土壤酸性の改良には、簡易に測定できる pH(KCl)に基づいた石灰質資材の施用が有効であることが明らかとなった。しかし、pH(KCl)に基づく診断の黒ボク土以外における適用性、得られる換算式の係数の適用範囲については課題として残った。

5. 阿蘇谷における酸性硫酸塩土壌の分布状況およびその特徴の把握

前章までに不良土壌である赤黄色土と非アロフェン質黒ボク土の物理性または化学性の改良方法を提示できた。一方、平成 28 年熊本地震では、熊本県内の広い範囲の農地で亀裂や段差が発生し（吉田ら、2016）、問題土壌である酸性硫酸塩土壌が下層に分布する阿蘇カルデラ内の阿蘇谷においても農地に亀裂や段差が発生し、表層への酸性硫酸塩土壌の混入が懸念された。そこで本研究では問題土壌である酸性硫酸塩土壌についても対象とした。修復工事が計画された熊本県阿蘇市内の 2 工区で酸性硫酸塩土壌の分布を調査したところ、工区 1 では pH(H_2O_2)が 1.0 を下回る強い酸性を示す酸性硫酸塩土壌が存在し、作土付近にも出現することが明らかとなった。地震により何らかの攪乱が生じ、酸性硫酸塩土壌が下層から作土付近に移動したと考えられた。酸性硫酸塩土壌と判定された土壌の土色は緑色を帯びた黒色が多く、そのほとんどで泥炭物質（ヨシなどの植物遺体）が確認され、pH(H_2O_2)が 2 を下回る土層では刺激臭（腐卵臭）が確認できた。以上の結果より、現場においても、土色や泥炭物質の有無、臭いにより酸性硫酸塩土壌を簡易的に判定できる可能性が示された。また、酸性硫酸塩土壌の中和石灰量は、 H_2O_2 処理 S 濃度から推定可能であった。pH(H_2O_2) 0.87~2.56 の場合、中和石灰量は乾土重量に対して 5%~30%と莫大な量となった。一方、酸化した酸性硫酸塩土壌中の酸性物質は水洗により

速やかに除去することが可能であった。酸性硫酸塩土壌の中和には莫大な量のアルカリ資材が必要となること、また現地は豊富な水資源を利用できることから、対策としては、資材の施用のみではなく、1974年の改良工事（川崎，1982）で実施されたように、水洗による硫酸塩の除去と炭酸カルシウムなどの資材施用による酸性改善および塩基の補給の組み合わせが最も適切であることが示された。

6. 本研究で得られた結果の意義と課題

本研究では農業振興に貢献するため、不良土壌である関黄色土、黒ボク土と問題土壌である酸性硫酸塩土壌の改良に取り組み、播種同時畝立て技術の導入、地域の有機質資源の活用による化学肥料削減、pH(KCl)による改良方法の提示などの導入効果を検証した。その結果、各々で土壌の改善効果が得られ、作物生産性を向上することができた。土木工事による大規模な改善ではなく営農努力で対応できる対策技術について検討していることからこれらの技術の普及可能性は高い。一方で赤黄色土の物理性改善で用いた播種同時畝立て技術の効果は限定的であり、作物生産性の向上に必ずしも結びつかなかった。また、赤黄色土の化学性改善で用いた有機質資源による化学肥料削減は有機質資源である畜酸由来液肥の散布に時間とコストがかかることから、散布を町で担う金武町以外での普及は進んでいないのが現状である。これらの課題の解決には各々の対策技術導入が可能な条件の整理、また、土壌肥料分野だけでは対応は難しいため、機械、経営等の異なる分野との連携が不可欠である。

謝辞

本研究のとりまとめにあたり、東京農工大学生物システム応用科学府生物機能システム科学専攻の豊田剛己教授には多くのご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。本研究は著者が農研機構九州沖縄農業研究センターにおいて主に行った研究内容を取りまとめたものであり、同センターの久保寺秀夫氏（現中央農業研究センター）には非アロフェン質黒ボク土研究の端緒を与えていただくとともに、懇切なご指導を賜りました。また、ペドロロジー研究とエダフォロジー研究をつなぐ研究の面白さ、意義について教わりました。深く感謝申し上げます。また同センターの古賀伸久氏にはとりまとめにあたり懇切なご指導を賜りました。同センターの原貴洋氏にはソバ研究の端緒を与えていただくとともに、多大なご指導を賜りました。同センターの手塚隆久氏（現竹田市役所）、同センターの小林透氏にはソバ調査手法について、同センターの土屋史紀氏（現北海道農業研究センター）、田坂幸平氏には畝立て播種機の現地実証の実施についてお力添えいただきました。また、同センターの小柳敦史氏には有益なご助言をいただきました。同センターの田中章浩氏にはソバおよびサトウキビ研究遂行にあたり格段のご配慮を頂くとともに、有機質資源の施用方法、現地試験の実施方法についてご指導頂きました。元同センターの氏原邦博氏にはサトウキビの調査方法を、また、同センターの境垣内岳雄氏にはサトウキビ研究の基礎からとりまとめにわたり多大なご助言を賜りました。同センターの草場敬氏には地形や土壌生成を考慮した現地調査の実施方法について、同センターの島武男氏には地図情報の利用方法についてご教授頂きました。同センターの井原啓貴氏、山根剛氏（現北海道農業研究センター）、新美洋氏には阿蘇谷における酸性硫酸塩土壌研究の遂行およびとりまとめにあたりお力添え頂きました。中央農業研究センターの関正裕氏には畝立て播種機の現地実証の実施についてご助力いただきました。熊本県農業研究センターの身次幸二郎氏、富永純司氏（現熊本県保健環境科学研究所）、門田健太郎氏には阿蘇谷における調

査にあたり、多大なご助力を賜りました。元大東製糖株式会社の名嘉眞繁氏にはサトウキビの生産管理、調査について多大なお力添え、ご助言を賜りました。元九州大学教授の増田泰久氏、大分県農林水産研究指導センターの酒井奏氏（現大分県西部振興局）、鶴岡克彦氏（現大分県産業科学技術センター）には久住高原における土壌採取、現地試験実施にあたり多大なご協力を賜りました。現所属である中央農業研究センターの大谷卓氏には本研究の遂行にあたり格段のご配慮を賜りました。また、金澤健二氏、江波戸宗大氏には貴重なご助言を賜りました。他にも現地試験を快く受け入れていただいた自治体の皆様、生産農家の皆様、現地試験を補助頂いた九州沖縄農業研究センター技術支援センターの皆様、実験を補助いただいた研究室の皆様にも深く御礼申し上げます。また、研究者としての一步を踏み出した沖縄でご指導、励ましのお言葉を頂いた元琉球大学教授渡嘉敷義浩氏、沖縄県農業研究センターの皆様、元九州沖縄農業研究センター南西諸島農業研究チームの生駒泰基氏（現西日本農業研究センター）、比屋根理恵氏、住秀和氏（現大宜味村役場）、また熊本からサポート頂いた九州沖縄農業研究センター荒川祐介氏にも厚く御礼申し上げます。

最後に、私の研究者としての基礎を築いて下さった元東京農工大学教授岡崎正規氏はじめ、今までお世話になった全ての皆様に感謝申し上げます。

令和2年1月22日 山口典子

引用文献一覧

足立嗣雄・與古田幹也 1981. 主要土壌群の生産的特性, 沖縄県に分布する特殊土壌の生産的特性. 九州農試研資, 60, 1-35.

荒木茂 1993. 国頭マージ, フェイチシャの特性—世界の赤黄色土のなかで—, ペドロジスト, 37, 113-125.

土壌保全調査事業全国協議会 1991. 都道府県別耕地土壌の実態. 日本の耕地土壌の実態と対策, p.36-55. 博友社, 東京.

土壌環境分析法編集委員会 1997. 土壌環境分析法. 博友社, 東京.

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. 鹿児島農総セ研報 (耕種), 3, 147-223.

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.

浜崎忠雄 2004. 土壌の分布と特徴. 日本土壌肥料学会九州支部編九州・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.13-16. 日本土壌肥料学会九州支部, 福岡.

原貴洋 2011. 沖縄における新品種を活用したソバ振興. 特産種苗, 10, 81-84.

原貴洋・荒川祐介・竹内誠人・住秀和・塩野隆弘・高嶺 (山口) 典子・照屋寛由・生駒泰基 2011. 南西諸島の極強酸性土壌における家畜ふん堆肥施用がソバ (*Fagopyrum esculentum* Moench) の生育と収量に及ぼす影響. 日作紀,

80, 35-42.

原貴洋・荒川祐介・長浜隆市・山口典子・住秀和・田中章浩・生駒泰基 2014.

南西諸島の極強酸性土壌における牛ふん堆肥・豚ふん堆肥施用によるソバ

(*Fagopyrum esculentum* Moench) の減化学肥料栽培. 日作紀, **83**, 118-

125.

林久喜 1989. 長野県におけるソバ栽培の現状と問題点. 北陸作物学会報, **24**,

71-73.

林久喜 1997. そば栽培の現状と課題. そばの栽培技術, p.3-7. 社団法人日本蕎

麦協会, 東京.

比嘉明美・儀間靖・亀谷茂・國吉清・桃原弘 2011. 有機物の長期連用がサトウ

キビと土壌の理化学性に与える影響. 沖縄農研セ研報, **5**, 11-15.

比屋根真一・眞境名元次・比嘉明美・儀間靖・新里良章・生駒泰基 2008. 沖縄

本島南部地域のサトウキビ畑におけるタンクモデルを用いた豚ふん尿曝気処

理水の散布時期と量の推定. 日作九支報, **74**, 39-42.

比屋根真一・新里良章・眞境名元次・比嘉明美・出花幸之介・生駒泰基 2009.

沖縄本島南部地域における豚ふん尿曝気処理水の散布がサトウキビの生育,

砂糖収量および土壌下層への窒素溶脱量におよぼす影響. 日作九支報, **75**,

31-37.

宝示戸雅之・佐藤辰四郎・高尾欽弥 1983. 草地土壌の酸性化に伴うアルミニウ

ム溶出と牧草生育. 北海道立農試集報, **50**, 43-53.

Hojito, M., Higashida, S., Nishimune, A. and Takao, K 1987. Effects of liming on grass growth, soil solution composition, and microbial activities. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33, 177–185

宝示戸雅之・西宗昭・高尾欽弥 1988. 牧草の耐酸性. 北海道立農試集報, 57, 79-92.

本田裕 1997. 地域に適した作付体系と栽培技術. そばの栽培技術, p.15–18. 社団法人日本蕎麦協会, 東京.

細川寿 2001. 重粘土に適した耕うん同時畝立て作業機. 農業および園芸, 76, 999–1006.

細川寿 2006. 多様な土壌に対応する耕うん同時畝立て播種技術. 機械化農業, 3057, 12–15.

細川寿 2008. 耕うん同時畝立て播種作業機の汎用利用による麦・そばの湿害軽減技術. 機械化農業, 3080, 17–20.

細川寿 2011. 転換畑栽培における耕うん同時畝立て播種における湿害軽減. 特産種苗, 10, 40–44.

池原匡彦・杉本秀樹・河村裕子・佐藤裕・亀石高洋・原貴洋 2007. 春まき栽培における普通ソバ品種の耐湿性と培土による湿害軽減. 日作四国支報, 44, 20–21.

池永幸子・細川寿・足立一日出・大野智史・野村幹雄・関正裕 2012. 北陸地域における耕うん同時畝立て播種技術がオオムギの生育・収量に及ぼす影響. 日

- 作紀, 81, 49–55.
- 井ノ口明義 2011. 長野県におけるソバ振興の取組. 特産種苗, **10**, 71–72.
- Juo, A. S. R. and Kamprath, E. J. 1979. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*,43,35–38.
- Kamata, H. and Kobayashi, T. 1997. The eruptive rate and history of Kuju volcano in Japan during the past 15,000 years. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*,76,163–171.
- 金森伸彦 2017. 平成 28 年熊本地震における農業被害と普及組織の取り組み. 日作九支報, 83, 57–60.
- 川口健太郎 2011. 湿害軽減による多収を目指した麦・大豆の栽培技術と耐湿性育種のイノベーション. 作物研報, **12**, 69–85.
- 川満芳信・永江哲也・野原江利子・上野正実・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. 日作紀, 69 (別 1), 12–13
- 川崎弘・古閑孝彦 1976. 阿蘇カルデラ内の酸性硫酸塩土壌. 九農試報, 18, 271–292.
- 川崎弘 1982. 5.阿蘇谷における酸性硫酸塩土壌. あるいて見る九州の土壌, p.113–119. 土壌調査研究会, 福岡.
- 川崎弘 1986. 阿蘇カルデラの酸性硫酸塩土壌. 特集酸性硫酸塩土壌. アーバンクボタ, 25, 52–56.

金武町産業振興課 2008. 金武町バイオマスタウン構想.

<http://ogb.go.jp/nousui/kankyoku/kinbu1.pdf>

小林嵩 1938. 茨城県に於ける湖沼の干拓地不良土並にその改良に就て：第一報
干拓地土壌の反応に就て. 土肥誌, 12, 308-311.

国土交通省国土政策局国土情報課 2012. 平年値メッシュデータの詳細.

<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02.html>

幸田浩俊 1982. 野菜類と普通作物による低湿地帯の田畑輪換栽培に関する研
究. 茨城県農業試験場研究報告, 22, 25-63.

小山正忠・竹原秀雄 2003. 新版標準土色帖. 富士平工業株式会社, 東京.

久場峯子 1993. 沖縄の農地の実態と土壌管理—土壌化学性とサトウキビ畑にお
ける施肥管理—. ペドロジスト, 37, 126-137.

久場峯子・大田守也・屋良千賀子 1998. サトウキビへの未利用資源の環境保全
的利用(1)豚ふん尿施用効果試験. 第25回サトウキビ試験成績検討会発表要
旨, 24-25.

久場峯子 2004. サトウキビの適正施肥量. 日本土壌肥料学会九州支部編九州・
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.120-
123. 日本土壌肥料学会九州支部, 福岡.

久保研一 2004. 九州・沖縄農業の動向. 日本土壌肥料学会九州支部編九州・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.7-12.
日本土壌肥料学会九州支部, 福岡.

久保寺秀夫・増田泰久・小路敦 2009. 久住高原に見られる非アロフェン質およびアロフェン質土層の累積した黒ぼく土断面. ペドロジスト, 53, 11-20.

久保寺秀夫・草場敬・猪部巖 2013. 久住高原における非アロフェン黒ぼく土の分布と層序. ペドロジスト, 57, 72-80.

久保寺秀夫・森清文・草場敬・島武男 2014. pH(KCl)に基づく交換酸度 y_1 の推定. 土肥誌, 85, 48-51.

久保寺秀夫・草場敬・島武男・猪部巖・影井雅夫 2015. 久住高原から阿蘇外輪山北方における非アロフェン質の黒ボク土表層の特性. 土肥誌, 86, 17-23.

久保寺秀夫 2017. 九州沖縄地域の各種土壌が有する問題点の解析と管理指針の提示. 土肥誌, 88, 375-378.

Kubotera, H. 2019. Analysis of problems in certain soils of the Kyushu Okinawa region for suitable management. Soil Sci. Plant Nutr., doi:10.1080/00380768.2019.1647554

熊本県 1982. 土地分類基本調査菊池 5 万分の 1 地形分類図. <http://nr-www.mlit.go.jp/kokjo/tochimizu/F3/data/L/4304L.jpg>

熊本県 1992. 土地分類基本調査阿蘇山・竹田 5 万分の 1 地形分類図. <http://nr-www.mlit.go.jp/kokjo/tochimizu/F3/data/L/4315L.jpg>

熊本県土づくり・減農薬運動推進本部 1998. 土壌診断ノート, 24 p

前島郁雄 1985. ソーンスウェートの気候分類. 吉野正敏・浅井富雄・河村武・設楽寛・新田尚・前島郁雄編“気候学・気象学辞典”, p.297-298. 二宮書店, 東京.

松山信彦・三枝正彦・菊池晃二・阿部篤郎 1992. 北海道に分布する黒ボク土の
類型区分. 川渡農場報告, 8, 13-19.

松山信彦・三枝正彦・故阿部篤郎 1994. 関東および中部地方におけるアロフェ
ン質黒ボク土と非アロフェン質黒ボク土の分布. 土肥誌, 65, 304-312.

松山信彦・三枝正彦 1994. 西日本におけるアロフェン質黒ボク土と非アロフェ
ン質黒ボク土の分布. ペドロジスト, 38, 2-9.

宮里清松 1986. サトウキビとその栽培. 日本分蜜糖工業会, 沖縄.

村上英行 1961. 過酸化水素による干拓地土壤中の可酸化性イオウの半定量法.
土肥誌, 32, 276-279.

長野県 2006. 耕うん同時畝立て播種機を用いた水田転換畑の麦類・大豆・そば
栽培技術. 平成 18 年度長野県農業関係試験場成果情報.

<http://www.alps.pref.nagano.lg.jp/hukyu/06-2/062h04.pdf>

二瓶直登・星泰彦・高萩勇雄 2006. 地下水位及び湛水時間がダイズ・ソバの根
系発達に及ぼす影響. 根の研究, 15, 85.

日本ペドロロジー学会編 1997. 土壌調査ハンドブック改訂版. 博友社, 東京.

日本ペドロロジー学会第五次土壌分類・命名委員会 2017. 日本ペドロロジー学会日
本土壌分類体系.

<http://pedology.jp/img/Soil%20Classification%20System%20of%20Japan.pdf>

新潟県農林水産部 2005. 新潟県における土づくりのすすめ方, p.27.

http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/nii01.html

西牧清 1983. ソバ栽培の現状と技術的課題. 農業および園芸, **58**, 140–146.

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.

農研機構農業環境変動センター2020. 日本土壌インベントリー土壌分類.

<https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/explain.html>

農耕地土壌分類委員会 1995. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 農環研資料, 17, 1–79.

農林水産省 2019a. 全国農業地域別農業産出額及び生産農業所得 実額. 生産農業所得統計.

http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/nougyou_sansyutu/index.html

農林水産省 2019b. 耕地面積及び耕地の拡張・かい廃面積 耕地面積 田畑別耕地面積. 作物統計調査.

<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/index.html>

農林水産省九州農業試験場・鹿児島県農業試験場・沖縄県農業試験場・財団法人甘味資源振興会 1982. サトウキビに関する調査基準.

農村工学研究所 2012. メタン発酵消化液の畑地における液肥利用—肥料効果と環境への影響—. <http://www.naro.affrc.go.jp/nkk/introduction/files/ekihiriyou.pdf>

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. 農環研報, 29 (別), 1–73.

岡川長郎 1984. 2.2.3 硫酸酸性の土壌.第 2 章世界における酸性土壌の分布と利用
実態. 酸性土壌とその農業利用—特に熱帯における現状と将来—, p.21. 博友
社, 東京.

岡川長郎 1993. 不良土壌. 土壌の事典, p.435—436. 朝倉書店, 東京.

沖縄県 1979. 地力保全基本調査総合成績書, p.276. 沖縄県農業試験場, 沖
縄.

沖縄県 1991. 1/50, 000 土地分類基本調査 (土壌図) 沖縄本島北部「名護」「国
頭平良」. [http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/5-
1/4709.html](http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/5-1/4709.html)

沖縄県農林水産部 2006. さとうきび栽培指針. 沖縄県農林水産部糖業農産課.

沖縄県農林水産部 2013. 平成 24/25 年期さとうきび及び甘しや糖生産実績.

沖縄県農林水産部 2014a. 農業関係統計. 沖縄県農林水産部農林水産企画課.

沖縄県農林水産部 2014b. 平成 25/26 年期さとうきび及び甘しや糖生産実績.

沖縄県農林水産部 2015. 平成 26/27 年期さとうきび及び甘しや糖生産実績.

沖縄県農林水産部 2018. 農業関係統計. 沖縄県農林水産部農林水産企画課.

沖縄県農林水産部 2019. 平成 30/31 年期さとうきび及び甘しや糖生産実績.

沖縄県農林水産部畜産課 2010. おきなわの畜産.

[http://www.pref.okinawa.jp/site/norin/chikusan/chikusei/mobile/okinawachikusan.ht
ml](http://www.pref.okinawa.jp/site/norin/chikusan/chikusei/mobile/okinawachikusan.html)

沖縄県農林水産部糖業農産課 2014. 沖縄県における平成 25 年産さとうきびの生産状況について. http://www.alic.go.jp/joho-s/joho07_000982.html

翁長謙良・宜保清一 1984. 日本の特殊土壌（その 11・最終講）沖縄の特殊土壌（マージ, ジャーガル）. 農土誌, **52**, 49–56.

大場和彦 2004. 気候の特徴. 日本土壌肥料学会九州支部編九州・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.3–6. 日本土壌肥料学会九州支部, 福岡.

小柳敦史 2010. 湿害の現実とは何か?—水田作小麦を中心として. 平成 22 年度農研機構シンポジウムの記録麦・大豆栽培における湿害の現実と研究展開—水田高度利用に向けた耐湿性の生理・遺伝研究—, p.3–11.

小柳渉・本間暁子・平尾賢一・小林清四郎 1998. 土壌 pH の矯正が牧草の生育・ミネラルバランスに及ぼす影響. 新潟畜試研報, **12**, 34–37.

Saigusa, M., Shoji, S. and Takahashi, T.1980. Plant root growth in acid Andosols from northeastern Japan 2. Exchange acidity y_1 as a realistic measure of aluminum toxicity potential. *Soil Sci.*, **130**,242–250.

三枝正彦・庄子貞雄 1984. 黒ボク土下層の酸性がアルファルファとオーチャードグラスの施肥窒素吸収・生育収量におよぼす影響. 日草誌, **30**, 255–263.

三枝正彦・松山信彦・故阿部篤郎 1993. 東北地方におけるアロフェン質黒ボク土と非アロフェン質黒ボク土の分布. 土肥誌, **64**, 423–430.

Saigusa, M., Toma, M. and Abe, T.1994.Effect of phosphogypsum application in topsoil on amelioration of subsoil acidity of nonallophanic andosols. J. Japan. Grassl. Sci., 39,397–404.

Saigusa, M. and Matsuyama, N. 1998.Distribution of allophanic Andosols and nonallophanic Andosols in Japan. Tohoku Journal of Agricultural Research, 48,75–83.

境垣内岳雄・寺内方克・服部太一郎・石川葉子・松岡誠・田中穰・樽本祐助・寺島義文・安藤象太郎・原田直人 2014. カリ施用量の違いが多回株出しで栽培した飼料用サトウキビの生育および養分吸収に及ぼす影響. 日作紀, 83(4), 305–313.

坂田清華・大澤良 2005. 普通ソバの出芽および生育に及ぼす湛水処理の影響. 日作紀, 74, 23–29.

佐藤裕・杉本秀樹 2008. 播種後の過湿条件が普通ソバの出芽と初期生育に及ぼす影響. 日作四国支報, 45, 68–69.

Shoji, S., Saigusa, M. and Takahashi, T.1980.Plant root growth in acid Andosols from northeastern Japan 1. Soil properties and root growth of burdock, barley and orchard grass. Soil Sci.,130,124–131.

Shoji, S. and Fujiwara, Y.1984. Active aluminum and iron in the humus horizons of Andosols from northeastern Japan: their forms, properties, and significance in clay weathering. Soil Sci.,137,216–226.

Shoji, S., Ito, T., Saigusa, M. and Yamada, I.1985. Properties of nonallophanic Andosols from Japan. Soil Sci.,140,264–277.

杉本秀樹・佐藤亨 2000. 生育時期別過湿処理の差異が夏ソバの子実収量に及ぼす影響. 日作紀, **69**, 189–193.

Takahashi, T., Fukuoka, T. and Dahlgren, R. A.1995. Aluminum solubility and release rates from soil horizons dominated by aluminum-humus complexes. Soil Sci. Plant Nutr.,41,119–131.

Takahashi, T. and Shoji, S.1996.Active aluminum status in surface horizons showing continuous climosequence of volcanic ash-derived soils in Towada district, northeastern Japan. Soil Sci. Plant Nutr.,42,113–120.

Takahashi, T., Ikeda, Y. Fujita, K. and Nanzyo, M.2006. Effect of liming on organically complexed aluminum of nonallophanic Andosols from northeastern Japan. Geoderma, 130,26–34.

田中冬彦・杉本秀樹・砂刈智 2005. 転換畑におけるソバの湿害対策—播種時の畦立ては湿害対策として有効か—. 日作四国支報, **42**, 40–41.

手塚隆久 2011. 暖地の気象を活用した新しいソバ栽培技術「春まき栽培」. 特産種苗, **10**, 45–48.

渡嘉敷義浩 2004. 土壌資源評価 (沖縄に分布する特殊土壌). 日本土壌肥料学会九州支部編九州・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.24–28. 日本土壌肥料学会九州支部, 福岡.

藤間充・三枝正彦・渋谷暁一・阿部篤郎 1991. 非アロフェン質黒ボク草地における土壌酸性の経年変化と牧草収量および塩基吸収量. 東北大学川渡農場報告, **7**, 75–81.

- 藤間充・三枝正彦・西谷光生・渋谷暁一・阿部篤郎 1992. 各種石灰資材による非アロフェン質黒ボク草地の酸性改良. 東北大学川渡農場報告, 7, 75-81.
- 土屋史紀・田坂幸平・佐々木豊 2009. 表層散播（糸島方式）播種の特徴と性能. 農作業研究, 44, 83-84.
- 土屋史紀・田坂幸平・増田欣也・深見公一郎 2010. 施肥の深さや分布の調節が容易な耕うん同時施肥播種機. 2010年研究成果情報
<http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/karc/2010/konarc10-13.html>
- 渡辺春朗 1992. 表層腐植質黒ボク土畑地帯における土層改良に関する研究. 千葉県農業試験場特別報告, 21, 1-98.
- 渡辺春朗 1997. 16. 酸性硫酸塩土壌の判定法. 第V章土壌科学. 土壌環境分析法, p. 297-301. 博友社, 東京.
- Watanabe, K., Nakabaru, M., Taira, E., Ueno, M. and Kawamitsu, Y. 2016. Relationships between nutrients and sucrose concentrations in sugarcane juice and use of juice analysis for nutrient diagnosis in Japan. *Plant Production Science*, 19(2), 215-222.
- 吉田一希・関口辰夫・中埜貴元 2016. 熊本地震に伴い生じた地表の亀裂分布図の作成. 国土地理院時報, 128, 201-206.
- 吉永育生・原貴洋・原口暢朗・山口典子・生駒泰基 2009. 伊江島での調査研究と研究発表会「ソバ栽培と水質について」報告. 沖縄農業, 43, 79-84.
- (財) 日本土壌協会 2010. 堆肥等有機物分析法. (財) 日本土壌協会, 東京.