

宮古の水を守れ

ー土壌蓄積リンで環境に優しい有機肥料作りー

沖縄県立宮古農林高等学校 環境班

序論

宮古島は東京都より約2,040km、沖縄本島からは約290kmに位置し、宮古島から台湾までの距離は約380kmある（図1）。島の面積は約280km²、気候は亜熱帯性で、サンゴ礁の海に囲まれた島である。宮古島では約5万5千人の島民が生活し、基幹産業は農業であり、特にサトウキビ生産が盛んで、自然豊かな美しい島である。



図1 宮古島の位置

宮古島は、川や湖などの水資源がなく、島民の飲料水は地下水に全てを依存する世界的に例を見ない島であり、地下水汚染が生活および生命に直ちに影響を及ぼす。宮古島の土地利用状況は約65%が農耕地として活用され、そのため畑に施用される化学肥料に含まれる余分な硝酸態窒素が宮古島の命の源である地下水を汚染している。宮古島においても、近代農業の象徴である化学肥料が1980年代以降、急速に普及し作業の省力化や作物の生産性の向上に多大な貢献をした。しかし、その代償として化学肥料由来の硝酸態窒素によって、島民の生活に必要な不可欠な地下水が汚染されている。地下水に流入する窒素の占有率は、年間負荷量、960t中、化学肥料36.6%、畜産糞尿31.4%、自然循環16.6%および生活排水16.4%と推定されている¹⁾。日本の水道法では、硝酸態窒素濃度が10

mg/L以上の水は飲料水として使用できないと規定されているが、現在の宮古島の硝酸態窒素濃度は7~9mg/Lに上昇し、危機的状況にある（図2）。宮古島において農業が地下水汚染の加害者になるうとしていることは、農業を学び、将来農業を志す者としては大変悲しいことである。世界では、硝酸態窒素などに汚染された水や不衛生な水を飲んだりして、8秒間に一人の幼い命が失われており、人命も危機にさらされている。何故、硝酸態窒素に汚染された水が人命に関わる大きな問題を引き起こすかということ、還元された亜硝酸態窒素はヘモグロビンの酸素と結合するため、体内に酸素が供給されず呼吸困難に陥る。そのため呼吸器官が発達していない赤ちゃんなどが死亡する。病名は酸素欠乏で赤ちゃんが青くなってしまうことから、ブルーベビーシンドローム症候群と名付けられている。

日本にはリン資源がほとんどなく、その全てを輸入に頼っているのが現状である²⁾。しかし、世界的にリン鉱石資源の有限性が持続的な食料生産の見地から大きな問題になっている。作物栽培上、重要な肥料三要素の内、窒素（N）は大気からの固定が可能であり、カリウム（K）は海水からの回収により無限の資源を持つ。これに対して肥料三要素の一つリン（P）はリン鉱石でしか生産できず資源的に限界がある。Reidinger²⁾は、現在の生産量が年率5.4%で伸びるとすると約43年後にはリン鉱石は枯渇すると推定しており、人類の生命を維持するための食料生産は危機的状況にある。宮古島のような周囲を海に囲まれた島嶼域では、島外から移入される大量の化学肥料のみに頼った施肥方法から、島内で有機物資源を循環させる目的で有機肥料を研究開発し、島の農耕地に活用した有機農業への転換は急務である。また、小さな宮古島において有機資源の地域循環を促進することは、環

宮古の水を守れ

— 土壌蓄積リンで環境に優しい有機肥料作り —

沖縄県立宮古農林高等学校 環境班

境への負荷を軽減でき、特に命の源である地下水への窒素負荷の軽減にも繋がり意義がある。

宮古島には、サンゴ由来の琉球石灰岩を母岩とする暗赤色土の琉球石灰岩土壌というpHがアルカリ性を示すカルシウムを豊富に含有した土壌が多く分布しているが、その有効土層は浅く保水力に乏しい。しかも島面積の約65%を農耕地が占めている。近年、宮古島においても作業の省力化及び作物の生育促進を目的として多量の化学肥料が施用されている。その中のリン酸の大部分は琉球石灰岩土壌中のカルシウムと反応し、固定化されることによって不可給態となり難溶性のリン酸を形成し、土壌に蓄積するものと推測される。施用したリン酸の80~95%が固定化によって不可給態になってしまうのは無駄が大きいばかりでなく、土壌中のリン酸の蓄積量を増大させる要因となっている。

土壌リンの動態には土壌微生物が関与することが知られている³⁾が、その実態については不明な点が多く土壌への施用リン酸または土壌蓄積リンの活用のために微生物を利用するには至っていない。しかしながら最近、難溶性リンの溶解に関与する微生物として有機酸生成能力を有するリン溶解菌が注目され、植物に対するリン酸源の効率的な利用に関し基礎的研究⁴⁾が展開されている。

そこで、本研究では持続可能な農業、即ち化学肥

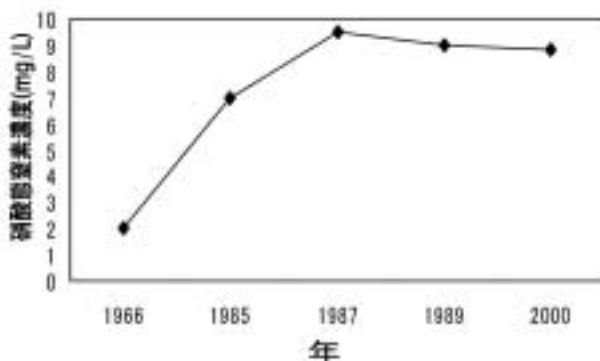


図2 宮古島の水道水源地における硝酸態窒素の推移

料の低投入型施肥技術 (LISA=Low Input Sustainable Agriculture) による作物栽培を目標に、肥料として大量に施肥されるリン酸の利用率の向上及び作物に利用されにくい土壌蓄積リンの再生・循環を目的に土作りを通じた地下水保全を目指した (図3)。その方法として、宮古島に分布する琉球石灰岩土壌を分離源に土着菌として分離・選抜した土壌微生物であるリン溶解菌を、サトウキビ製糖工場の副産物であるバガスおよび糖蜜に添加した有機肥料を研究開発した。また、宮古島の農業活動にも積極的に働きかけ、研究開発した有機肥料の普及にも努力している。

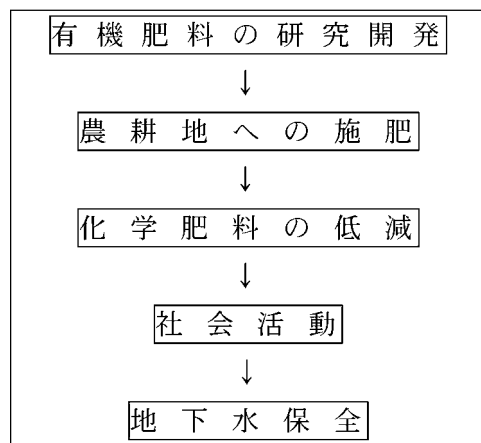


図3 本研究の概念図

研究材料および研究方法

① 土壌分析

土壌は、農耕地の0~30cmの作土層および林地の作物無栽培土壌を採取し、採取した土壌は風乾した後、粉碎器を用いて粉碎後、ふるい (2mm) にかけて風乾採土として分析に供した。pHは土と水の重量比が1:2.5の割合のサスペンションを作り、ガラス電極法によって測定した。有効態リン酸はトリオーグ法によって測定した⁵⁾。全リン酸は過塩素酸で分解抽出した液をバナドモリブデン酸によ

り発色後、吸光度を求めリン濃度を測定した⁵⁾。

② リン溶解菌の分離・選抜および大量培養

リン溶解菌の分離は土壌希釈平板法を、分離源は琉球石灰岩土壌を用いた。供試土壌10gを秤量し200mLの三角フラスコに蒸留水90mLを入れオートクレーブした滅菌水中へ添加し、往復振とう機で10分間振とうした。上澄み液1mLをメスピペットを用いてヒドロキシアパタイトを含有した滅菌シャーレ中へ接種した⁶⁾。これを28℃暗条件下にて10日間培養し、クリアゾーンを形成したコロニーについて調査し、乾土1gあたりに換算した⁷⁾。

土壌より分離したリン溶解菌100株のリン溶解能を、寒天透明帯直径測定法および寒天透明域深度測定法⁴⁾を用いて測定した。寒天透明帯直径測定法では、 PO_4 としての濃度が7.5mMの $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{FePO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ および $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を分散させたグルコース・イーストエキス培地（1.0%グルコース、0.05%酵母エキス、0.05%MgSO₄、0.01%KClおよび0.01%NaCl）20mLを直径90mmの滅菌シャーレに分注し、1白金耳の分離株を寒天表面に接種した。寒天透明域深度測定法では、 PO_4 としての濃度が7.5mMの $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{FePO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ および $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を分散させたグルコース・イーストエキス培地10mlを直径16.5mmの試験管に分注し、1白金耳の分離株を寒天表面に接種した。28℃暗条件下にて14日間培養し、シャーレではコロニーの周囲に形成された透明帯、また試験管ではコロニーの下に形成された深度を測定し、溶解したリン酸の量を計算した⁴⁾。

土壌より分離したリン溶解菌100株より高性能リン溶解菌としてStrain 22の菌株を菌株22として選抜し供試菌とした。この菌株22を滅菌した酸生成試験用液体培地0.02%MgSO₄、0.02%KCl、0.1%(NH₄)₃PO₄、0.02%酵母エキスおよび

0.5%グルコース、pH7.0およびVP試験用（J-ブロス）培地（0.5%トリプトン、1.5%酵母エキスおよび0.5%グルコース、pH6.8）に接種し、30℃で14日間培養した。得られた菌株22の培養液をメンブレンフィルターでろ過除菌した後、25mL容量のフラスコにろ液2.5mLを分取し、5%過塩素酸2.5mLを加え、蒸留水で定容とした。この液を再度メンブレンフィルターでろ過し、ろ液中の有機酸をHPLC（高速液体クロマトグラフィー）で測定した。同定には、有機酸標準品として6種類のコハク酸、乳酸、酢酸、ギ酸、プロピオン酸および酪酸を用いた⁸⁾。

リン溶解菌（菌株22）の大量培養に供試した基本培地は、Nutrient Broth（NB：Lab-lemco' Powder0.1%、酵母エキス0.2%、ペプトン0.5%、塩化ナトリウム0.5%、）を用い、培養液の濃度を1/4、1/2、原液および2倍液に調整した。菌株22の接種方法は、合成ヒドロキシアパタイト含有平板を用いて純粋培養しクリアゾーンを形成したコロニーより1白金耳をとり滅菌水10mLに懸濁し、その懸濁液1mLを振とう培養器中の培養液250mL中へ接種した。培養液中の最初の菌数は約 2×10^2 コロニー/mLであった。培養条件は、25℃、150rpm、暗条件下で30日間培養し、菌の増殖を求めた。

③ リン溶解菌（菌株22）の有機酸生成に対する炭素源の検討

1/2 Nutrient Broth培地に、グルコース、バガスおよび糖蜜（糖分35%）を炭素源として添加し菌株22を培養した。炭素源の処理濃度は、培養液100mL当たり乾物として0.01g、0.05g、0.1gおよび0.5gを添加した。培養条件は25℃、150rpm、暗条件下で10日間培養し、培養液中のpHを経時的に測定し、pH低下を有機酸生成の指標とした。

宮古の水を守れ

—土壌蓄積リンで環境に優しい有機肥料作り—

沖縄県立宮古農林高等学校 環境班

④ リン溶解菌（菌株22）のキャリアーとしてバガス炭を用いた定着性試験

リン溶解菌（菌株22）の土壌中における安定性について測定した。1/2Nutrient Brothの培養液1mL当たり 1×10^9 コロニーに大量培養した菌株22を105℃で6時間乾熱滅菌したバガス1g当たりおよそ 1×10^3 コロニーになるように添加定着させた。そして、炭化物であるバガス炭が菌株22のキャリアーとしての機能があるか否かを検討するため、大量培養した菌株22をバガス炭1g当たり 1×10^3 コロニーになるように添加定着させた。このように調整した資材を105℃で6時間乾熱滅菌した琉球石灰岩土壌に3%添加し、30℃暗条件下にて6ヶ月間インキュベーションした。菌数の測定は、合成ヒドロキシアパタイトを含有した培地を用い、土壌希釈平板法によりクリアゾーンを形成したコロニーについて調査し、乾土1g当たりに換算した。

⑤ 栽培試験

供試土壌は沖縄県立宮古農林高等学校の第二農場にあるサトウキビ連作畑の琉球石灰岩土壌を用いた（表1）。リン酸源として10a当たり0.6kg（P-0.6区）及び6.0kg（P-6.0区）相当量のリン酸カルシウムを添加した。基肥は、リン酸カルシウムの添加と同時に窒素（N）及びカリウム（K₂O）を10a当たり窒素20kg、カリウム6kgを全区共通に施用した。1/2NutrientBrothの基本培地で大量培養した菌株22をバガスおよびバガス炭（バガス9割：バガス炭1割の混合割合）の混合有機物に添加定着させた。菌株22添加量は供試有機物1g当たり

1×10^6 コロニーで調整した菌株22含有バガスおよびバガス炭の混合有機物を10a当たり1t（4%糖蜜250kg/10a）および4t（4%糖蜜1t/10a）となるよう土壌に添加し耕起した後、農林8号の2節苗を畝幅135cm、株間40cmの密度で定植し、生育、品質、土壌のリン酸の溶解について調査した。また、バガス+バガス炭無処理区（対照区）および菌株22無接種バガス+バガス炭処理区（糖蜜も希釈後同量散布）も設定した。搾汁液中のリン濃度は、25倍希釈後ICP（ICP-2000S）で、甘蔗糖度は近赤外線分析装置（NIR）で定量した。土壌中のバイオマスリンは土壌懸濁液トルエン処理法⁹⁾で測定し、全窒素と全炭素はNCアナライザーで測定した。

⑥ ペットボトルろ過装置を活用した水質実験

研究開発した有機肥料（菌株22含有バガス+バガス炭）を活用することにより、硝酸態窒素による地下水汚染の軽減が出来るのかを確かめるために水質実験を行った。しかし、既製のろ過装置は高価で、簡単に高校生の実験に使えるものではない。そこで、ゴミとして捨てられている500mLのペットボトルを代用して簡易型のろ過装置を開発し、水質実験を試みた。

その方法として、野菜連作畑の琉球石灰岩土壌1,000gをペットボトルろ過装置に充填した区を慣行区とした。処理区は、土壌1,000gをペットボトルろ過装置に充填し硝酸アンモニウム5gを添加し化学肥料区とした。土壌970gに研究開発した有機肥料（菌株22含有バガス+バガス炭）を30g添加・混合した後、ペットボトルろ過装置に充填し

表1 供試土壌の化学的性質

pH		(mgP ₂ O ₅ /100g乾土)					
H ₂ O	KCl	全炭素	全窒素	水抽出リン酸	可給態リン酸	全リン酸	TC/TN
8.2	7.9	12.64	1.09	4.3	21.1	799.7	11.6

硝酸アンモニウムを5g添加し有機肥料区とした。そして、蒸留水を全処理区同量添加しろ過液を得、硝酸態窒素の分析に供した。

結果および考察

① 土壌分析

供試土壌の化学的性質は表2に示すように、pHは酸性からアルカリ性まで幅広い値を示した。また、耕地土壌では作物に利用可能な可給態リン酸は含有されているものの¹⁰⁾、作物に利用されにくい難溶性のリン酸が顕著に高い濃度で土壌に蓄積されていることがわかった。また、土壌採取区分間ではサトウキビ栽培畑の全リン酸が422.6mg (P₂O₅/100g) 含まれるのに比べ果樹または野菜畑の施設土壌の全リン酸は果樹畑で900.8mg (P₂O₅/100g) および野菜畑で666.7mg (P₂O₅/100g) 含有され、高いリン酸濃度の値を示した。林地の作物無栽培土壌に含有されるリン酸濃度は他の土壌に比べ顕著に低い値であった。

林地の土壌に比べ農耕地の土壌に高濃度のリン酸が認められたことは、化学肥料として施用されたリン酸の大部分が琉球石灰岩土壌に含有されるカルシウムと反応し、リン酸カルシウムの形態で土壌に蓄積されていることを意味する結果であった。これは、

研究開発した有機肥料を土壌に施肥することにより宮古島の琉球石灰岩土壌に高濃度で蓄積している難溶性のリン酸を可溶化し、作物に吸収利用できれば化学肥料の低投入型施肥技術による作物栽培が可能となり、化学肥料由来の硝酸態窒素による地下水汚染の軽減を示唆するものであった。

② リン溶解菌の分離・選抜および大量培養

分離したリン溶解菌は、表3に示すようにヒドロキシアパタイトを含有した寒天平板にコロニーの形成を認めた。採取土壌のリン溶解菌数は林地の土壌で最も多く乾土1gあたり3×10⁵コロニーであり、採草地・サトウキビ畑は2×10²コロニー、野菜・サトウキビ畑は7×10²コロニーおよび果樹畑は5×10²コロニーであった。なお、サトウキビ連作畑ではクリアゾーンを形成したコロニーを認めなかった。

表3 宮古島における採取土壌中のリン溶解菌数

栽 植	菌数 (コロニー/g乾土)
林地 (作物無栽培土壌)	3×10 ⁵
サトウキビ	—
採草地・サトウキビ	2×10 ²
野菜・サトウキビ	7×10 ²
果樹	5×10 ²

表2 宮古島における採取土壌の化学的性質

栽 植	pH		リン酸 (P ₂ O ₅ mg/100g乾土)		
	H ₂ O	KCl	全リン酸	可給態リン酸	難溶性リン酸 ^{#2}
林地 ^{#1}	6.53	5.79	13.5	1.5	12.0
サトウキビ	8.04	8.01	422.6	15.9	406.7
採草地・サトウキビ	8.33	7.89	628.0	13.7	604.3
野菜・サトウキビ	8.06	7.35	564.8	29.4	535.4
果 樹	5.75	5.75	900.8	57.0	843.8
野 菜	8.33	7.96	666.7	52.5	614.2

#1 林地の作物無栽培土壌

#2 (全リン酸) — (可給態リン酸)

宮古の水を守れ

— 土壌蓄積リンで環境に優しい有機肥料作り —

沖縄県立宮古農林高等学校 環境班

供試株100株のうちからリン溶解能を示した株は、リン酸三カルシウムに対して81株、リン酸マグネシウムに対して64株であったが、リン酸鉄に対しては極めて少なく2株にすぎなかった（表4）。本研究ではこれらのリン溶解菌の中から、すべての難溶性リン酸塩に対して溶解能を示した菌株22を選抜した（表5）。

表4 分離リン溶解菌の難溶性リン酸塩に対する（Ca、FeおよびMg塩）の溶解能（14日間培養（28℃））

リン溶解量 (mg)	菌株数		
	Ca	Fe	Mg
0	19	98	36
<0.1	6	2	8
0.1-0.5	68		52
1.0-1.5	7		4
>1.5			
全分離株数	100		

菌株22の生成する有機酸を表6に示した。用いた2種類の培地で主に乳酸と酢酸が検出された。また、コハク酸はJ-ブロス（VP試験）培地で検出された。Sperber（1958）⁸⁾ は、リン溶解菌の生成する有機酸について調査した結果、乳酸、グルコース酸およびクエン酸等の成分を認めている。

表5 高性能分離株の難溶性リン酸塩に対する（Ca、FeおよびMg塩）の溶解能（14日間培養（28℃））

分離株	リン溶解量 (mgP)		
	Ca	Fe	Mg
菌株9	0.8	0.0	0.6
菌株58	0.7	0.0	0.5
菌株38	0.6	0.0	0.4
菌株44	0.4	0.0	0.3
菌株22	0.9	0.1	0.5

表6 菌株22の培養液中の有機酸（30℃、14日間）

使用培地	有機酸	培養液中の有機酸（μg/ml）	
		菌株22	無接種培地
酸生成試験用液体培地	コハク酸	ND ^{#1}	ND
	乳酸	200	ND
	酢酸	100	ND
	ギ酸	ND	ND
	プロピオン酸	ND	ND
	酪酸	ND	ND
J-ブロス（VP試験用）	コハク酸	200	ND
	乳酸	1300	ND
	酢酸	400	ND
	ギ酸	ND	ND
	プロピオン酸	ND	ND
	酪酸	ND	ND

#1 ND：検出せず（検出限界：100 μg/mL）

サトウキビの連作畑ではクリアゾーンを形成したコロニーを認めなかった。その詳細な原因は不明であるが、採取したサトウキビ連作土壌では、サトウキビの収穫直後その残査を燃焼させており著しく有機物投入量の少ない土壌であった。Nishio³⁾は、土壌中の全炭素量とリン溶解菌数の関係について調査した結果、その両者間には高い相関があることを認めており、土壌中の可給態炭素量がリン溶解菌数を規定する最も大きな要因と推定している。

また、作物残査および堆肥等が多く投入され熟畑化した土壌では、多様な微生物層を形成し量的にも増加する¹¹⁾。そのことは、一般の微生物およびリン溶解菌が土壌中で定着し生息するためには、可給態炭素化合物として多量の有機物が土壌に投入されることが重要であることを示している。

琉球石灰岩土壌における土壌中でのリン酸塩の形態は主としてカルシウムおよび鉄塩と推定されるので、土壌蓄積リンを有効利用するためには、リン酸三カルシウム、リン酸鉄およびリン酸マグネシウムのリン酸塩にも溶解能を示した菌株22が最も有望と考えられた(表4)。

菌株22は有機酸生成型のリン溶解菌と推定された。本菌は可給態炭素化合物を取り込み、乳酸、酢酸およびコハク酸等の有機酸を生成し、生成した有機酸でリン酸三カルシウム、リン酸マグネシウムおよびリン酸鉄を可溶化すると考えられた。

図4より、培養液濃度の如何にかかわらず、同じ菌の増殖パターンを示している。基本培地の1/2希釈培地でやや優れた菌数がえられ、30日後の胞子の形成率は培養液1mL当たり 8×10^8 コロニーであった。

この結果より、1/2希釈のNB培地でpHを中性域に保って振とう培養すれば、菌株22は効率よく増殖できると結論された。また、菌株22は85℃、15

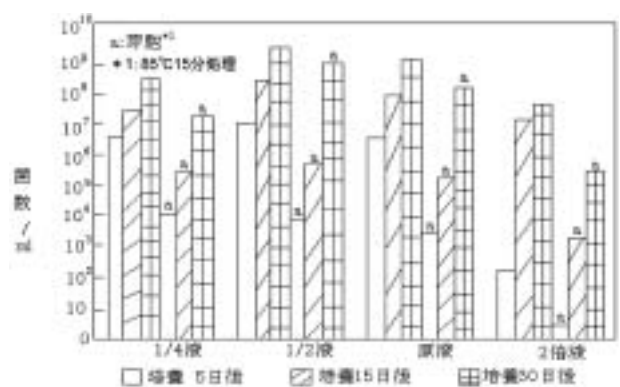


図4 リン溶解菌(22菌株)の増殖に及ぼす培地濃度の影響(25℃、150rpm、暗所)

分の熱処理をした結果、芽胞を形成することから耐熱性を有することが推測された。

③ リン溶解菌(菌株22)の有機酸生成に対する炭素源の検討

異なる炭素源を添加した培養液で菌株22を培養した場合のpHの経時的变化を表7に示した。炭素源添加によって、いずれの場合も培養液のpH低下が認められ、しかもその低下は添加濃度の増加とともに促進される傾向が得られた。

炭素源間の比較では、易分解性のグルコース添加区で最もpH低下度合いが大きく、次に糖蜜が続き、バガスではやや劣るpH低下を示した。培養液のpH低下が有機酸生成量に関連していると想定すれば、易分解性の炭素源が有機酸生成に有利と考えられる。しかし、良質なバイオマス資源であるバガスや糖蜜のように比較的容易に、しかも安価で入手できる炭素質材でも菌株22は炭素質材として利用し、有機酸を生成する能力を持っていることは興味深い。

宮古の水を守れ

—土壌蓄積リンで環境に優しい有機肥料作り—

沖縄県立宮古農林高等学校 環境班

表7 リン溶解菌（菌株22）を接種した培養液のpH変化に及ぼす各種炭素源の影響

各種炭素源	添加量 (g/100g)	pH (平均値±SE)					
		培 養 日 数					
		0	2	4	6	8	10
無添加	0.0	6.5±0.07	6.8±0.13	6.8±0.14	6.7±0.07	6.7±0.11	6.7±0.07
	0.01	6.5±0.13	6.5±0.07	6.3±0.07	5.0±0.07	4.8±0.11	4.7±0.09
グルコース	0.05	6.5±0.09	6.5±0.15	5.0±0.11	4.0±0.18	3.7±0.11	3.6±0.10
	0.1	6.8±0.07	6.0±0.10	4.8±0.09	4.0±0.14	3.6±0.14	3.5±0.14
	0.5	6.8±0.11	6.0±0.11	4.5±0.07	5.0±0.07	3.2±0.15	3.2±0.11
	0.01	7.0±0.07	7.0±0.07	7.0±0.14	6.3±0.11	6.1±0.09	6.0±0.07
バガス	0.05	7.0±0.11	6.9±0.07	7.0±0.07	6.0±0.08	5.7±0.07	5.6±0.08
	0.1	6.9±0.09	6.9±0.09	6.8±0.07	5.6±0.24	5.2±0.10	5.0±0.10
	0.5	6.9±0.14	7.0±0.07	6.8±0.10	5.1±0.10	4.9±0.07	4.6±0.09
	0.01	7.0±0.07	7.0±0.07	6.9±0.07	6.0±0.07	5.9±0.10	5.5±0.07
糖 蜜	0.05	7.0±0.11	6.9±0.07	7.0±0.07	6.0±0.08	5.7±0.07	5.6±0.08
	0.1	6.5±0.07	6.7±0.11	6.5±0.11	4.6±0.07	4.3±0.07	3.9±0.09
	0.5	6.3±0.11	6.2±0.09	6.0±0.07	4.6±0.11	3.7±0.07	3.5±0.07

④ リン溶解菌（菌株22）のバガス炭をキャリアーとした定着性試験

菌株22含有バガスに含まれている菌株22の土壌中における定着性（生存率）について実験した結果、菌株22含有バガスを土壌に添加して約4ヶ月後から菌株22の数が若干下がり、6ヶ月後では著しく下がった（図5）。その原因はバガスなどのエサが

分解され、様々な土壌要因により菌株22が死滅したものと考えられた。

一方、炭化物であるバガス炭に定着した菌株22は土壌処理6ヵ月後において、菌株22の高い定着率を認めた（図6）。土壌中における菌株22の高い定着性を認めたことは、キャリアーとして用いたバガス炭の物理性に要因があると考え、電子顕微鏡

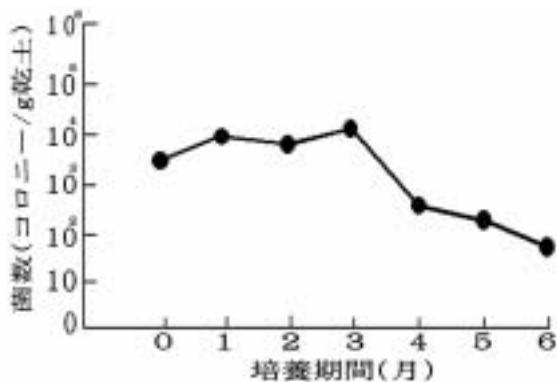


図5 バガス炭に付着した菌株22の土壌中における定着性

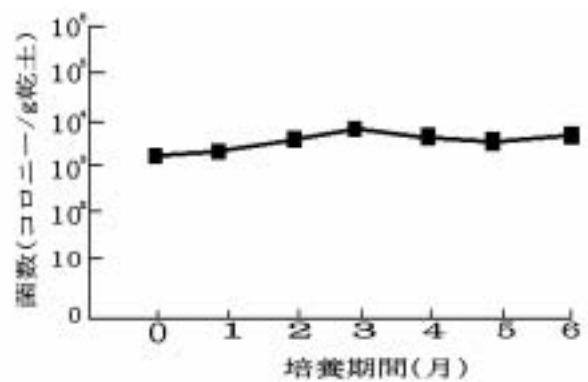


図6 バガス炭に定着した菌株22の土壌中における定着性

を活用し菌株22含有バガス炭の観察をした。

その結果、バガス炭はポーラス状でたくさんの細かい空隙があることが認められた（写真1）。

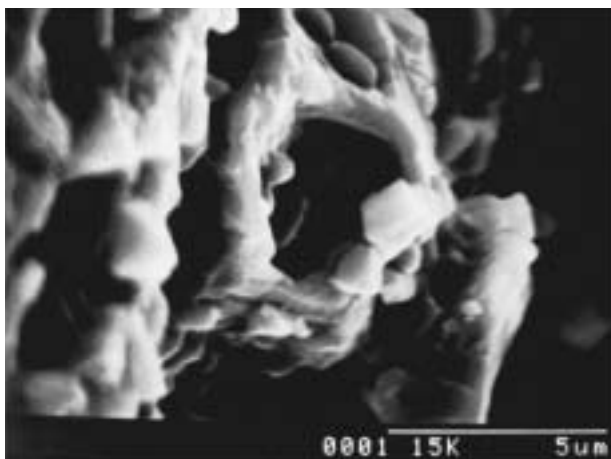


写真1 バガス炭に定着した菌株22在来種の電子顕微鏡写真

キャリアーとして用いた菌株22はバガス炭に効率よく定着することにより、バガス炭の空隙の中で生息が可能となり、バガスや糖蜜などをエサとして増殖しながら有機酸を生成し、生存に不利な土壤要因から守られたものと推測した。

⑤ 栽培試験

茎重はリン酸多量施用のP-6.0区における対照区およびバガス+バガス炭施用区間に有意差は認められなかったものの、P-0.6区においては対照区に比べバガス+バガス炭施用区で高くなる傾向にあった（図7-A）。甘蔗糖度は、P-0.6区の対照区で13.2%を示し、P-6.0の対照区で13.9%であった。一方、各リン酸濃度区におけるバガス+バガス炭処理区の甘蔗糖度は対照区に比べ高く、P-0.6区で22菌株含有バガス+バガス炭4t区は14.5%で、P-6.0区では22菌株含有バガス+バガス炭4t区は15.12%と高かった（図7-B）。また、P-6.0区の対照区に比べ、P-0.6区の株菌22含有バガス+バガス炭区で高い甘蔗糖度となった。産糖量は、P-0.6、P-6.0両区と

もバガス+バガス炭処理および処理濃度が増加するに伴い高くなる傾向にあったが、P-0.6区の菌株22含有バガス+バガス炭区の値はP-6.0区の対照区に比べ有意な差ではなかった（図7-C）。搾汁液中のリン成分と甘蔗糖度とは正の相関関係にあり、甘蔗糖度は吸収されたリン成分によって高まることが示唆された（図8）。収穫時の栽培土壌におけるリン酸の溶解は可給態リン酸についてはP-0.6区およびP-6.0区間で大きな差は認められないが、バガス+バガス炭処理区でバイオマスリンが高くなる傾向を示し、その濃度はP-0.6区及びP-6.0区の対照区に比べ有意な差となった（表8）。

宮古島の農耕地の大部分を占めるサトウキビ畑で化学肥料の低投入型施肥技術（LISA）によるサトウキビ栽培が可能となり、化学肥料由来の硝酸態窒素による地下水汚染の軽減を示唆した。

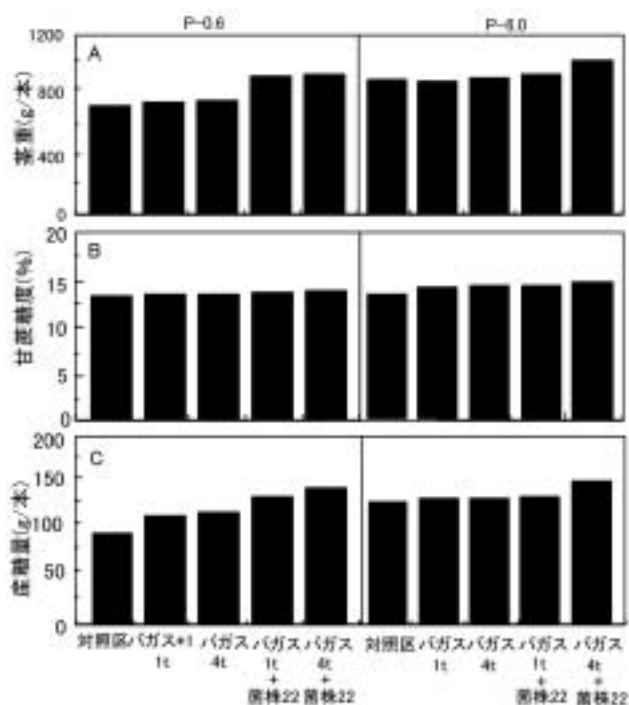


図7 供試菌株22含有バガス処理がサトウキビの茎重、甘蔗糖度及び産糖量に及ぼす影響
*1バガス+バガス炭

宮古の水を守れ

—土壌蓄積リンで環境に優しい有機肥料作り—

沖縄県立宮古農林高等学校 環境班

表8 サトウキビの供試土壌におけるリン酸の溶解に対する菌株22含有バガス処理の影響

リン酸濃度区 (kgP2O5/10a)	バガス添加区 #1 (t/10a)	供試菌 (菌株22)	リン酸の溶解 (mgP2O5/100g乾土)		
			Biomass-P	Truog-P	溶解量 #2
P-0.6	0.0	—	3.35	12.79	16.14
		—	10.70* #3	23.11	33.81
	+	14.20*	26.18*	40.38**	
	—	10.82**	24.65**	35.48	
	+	15.20**	26.84*	42.04	
P-6.0	0.0	—	4.67	19.11	23.77
		—	13.73**	28.11	42.22**
	+	22.30**	31.58	53.88**	
	—	20.31**	28.46	48.36**	
	+	22.12**	32.41	54.53**	

#1 バガス+バガス炭

#2 収穫土壌 (Biomass-P+Truog-P) の増加

#3 *、**はそれぞれ5%及び1%レベルで有意、他は有意ではない。各リン酸処理区におけるバガス+バガス炭無添加と添加区間のリン酸溶解との関係。

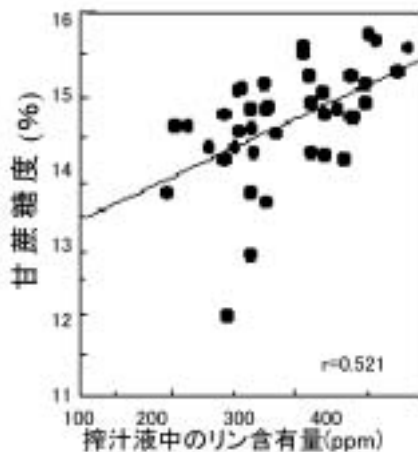


図8 甘蔗糖度と搾汁液中のリンの変化

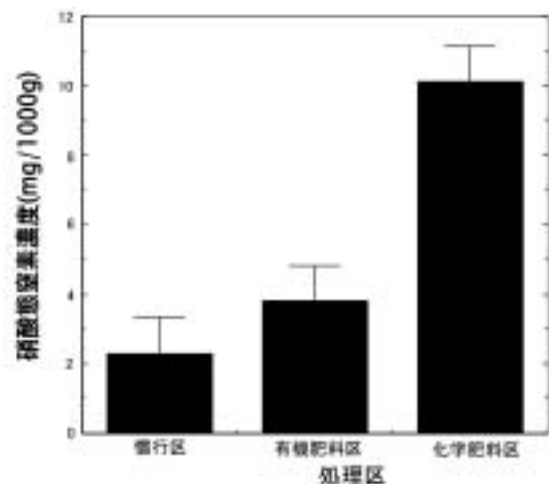


図9 甘蔗糖度と搾汁液中のリンの変化

⑥ ペットボトルろ過装置を活用した水質実験

慣行区でのろ過液の硝酸態窒素濃度は、低い値であったものの化学肥料区は高い値を認めた。化学肥料区に比べ有機肥料区でのろ過液に含まれる硝酸態窒素濃度は低い値であった (図9)。

本研究により研究開発した有機肥料 (菌株22含有バガス+バガス炭) を宮古島の畑地に処理する

ことにより、化学肥料由来の硝酸態窒素による地下水汚染の軽減が示唆される。

⑦ 社会活動

本研究では、研究開発した有機肥料を宮古島に普及させるべく、様々な社会活動に取り組み大きな成果をあげている。

(1) 宮古島の小学校、中学校および高校から研究開発した有機肥料（菌株22含有バガス+バガス炭）を環境学習に活用したいとの要望があり提供した（写真2）。沖縄県立宮古農林高校における作物の栽培実習や校内美化にも有機肥料を活用し、生徒達の土壌および地下水保全に対する意識を高めた。また、体の不自由な方やお年寄りの方々が、筆者らが研究開発した有機肥料を活用し花壇作りに取り組み、リハビリのサポートに役立つことができた（写真3）。



写真2 小学校における有機肥料を活用した環境教育の実践



写真3 老人施設における有機肥料を活用したリハビリ活動

(2) 宮古島の水道水源流域で農業をされている農家の方々と、宮古島上水道企業団の環境保全型農業実践事業の一環として、筆者らが研究開発した有

機肥料（菌株22含有バガス+バガス炭）を活用し、化学肥料に頼らない地下水保全型農業に取り組み、化学肥料由来の硝酸態窒素の汚染から地下水を守ることに挑戦している（写真4）。



写真4 有機肥料を活用して地下水保全型農業に挑戦

(3) 筆者らが研究開発した有機肥料（菌株22含有バガス+バガス炭）を活用し環境保全型農業に取り組んでいる農家の砂川さんらが有機栽培したニガウリ、キュウリおよびメロンを本校の即売会で販売し、地域の方々にも有機肥料活用による土づくりを通じた地下水保全の大切さを訴えた（写真5）。



写真5 農家の砂川さんが有機肥料を活用し地下水保全を目指した農業に挑戦

宮古の水を守れ

— 土壌蓄積リンで環境に優しい有機肥料作り —

沖縄県立宮古農林高等学校 環境班

結論

本研究は、宮古島の命の源である地下水保全を目標として、土壌に高濃度で蓄積している難溶性リンの再利用の機能を有する環境に優しい有機肥料の研究開発を目的にした。その方法は、琉球石灰岩土壌より分離・選抜した土壌微生物であるリン溶解菌のリン溶解能を指標として、良質な有機物源であるバガスおよび糖蜜等を有効に活用し、土壌蓄積リンの再生・循環を目指した。

本研究では、土壌蓄積リンの利用率の向上を目指し一連の基礎的な実験とその基礎データを基にして地下水保全を目的に環境に優しい有機肥料の研究開発を試みた。本研究を通して研究開発した有機肥料を土壌に施肥することにより、リン酸の利用率の向上が認められ基肥として施用される過剰な窒素を現行の施肥規準値より低減することが可能であることがわかった。

研究開発した有機肥料を宮古島の農耕地に施肥することで、化学肥料の低投入型施肥技術が確立でき、これは化学肥料由来の硝酸態窒素による地下水汚染の軽減を示唆している。

このように、筆者らの研究開発した有機肥料を宮古島の農耕地に施肥することにより、土壌蓄積リンの再利用ならびに化学肥料の低投入型施肥技術を確立することが可能となり、化学肥料由来の硝酸態窒素による地下水汚染の軽減も期待できる。

参考文献

1. 宮古島地下水水質保全対策協議会. 1997. 宮古島地下水水質保全調査報告書. 宮古広域事務組合
2. 栗原淳・越野正義 1986. 肥料製造学. 養賢堂 : 95-143
3. Nishio, M. 1985. Some ecological features of phosphate-solubilizing microorganisms in grassland soils. Proceedings of the 15th international Grassland congress : 483-4855.
4. 西尾道徳・木村龍介 1986. リン溶解菌とその農業利用の可能性. 土と微生物. 28, 31~40.
5. 土壌環境分析法編集委員会 1997. 土壌環境分析法. 博友社 : 11-267.
6. Kucey, R. M. N. 1983. Phosphate-solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. Can. J. Soil Sci. 63 : 671-678.
7. Sperber, J. I. 1958. The incidence of apatite-solubilizing organisms in the rhizosphere and soil. Aust. J. Agr. 9 : 778-781.
8. Sperber, J. I. 1958. Solution of apatite by soil microorganisms producing organic acids. Aust. J. Agr. Res. 9 : 782-787.
9. 木村龍介・西尾道徳 1992. 土壌バイオマスPの測定法. 土と微生物. 39, 49~52.
10. 新田孝子・森山高広・池田正治 1991. 沖縄県における主要土壌群草地のミネラル分布. 沖畜試験報. 29 : 119-129.
11. 鈴木彦彦・石沢修一 1965. 畑土壌の微生物およびその活性と肥沃土. 農業 研究所報告B-15 : 92-179.

追補

今後の課題として、宮古島の命の源である大切な地下水を保全するためには、硝酸態窒素による地下水汚染の原因が農業に起因することから、宮古島の農家に筆者らが研究開発した有機肥料を活用してもらい普及活動に取り組むことが必要である。

そのためには、筆者らの手作りによる研究開発した有機肥料の生産だけでは限界があり、宮古島の農家の方々に研究開発した有機肥料を活用し地下水保全型農業に取り組んでもらうには、有機肥料の生産量拡大が必要である。

そこで、研究開発した有機肥料の製造工場の建設を視野に入れ、「考えは地球規模で、行動は足下から」を合い言葉に、筆者らは宮古島の命の源である地下水保全を目標とした、土壌蓄積リンの利用率の向上機能をさらに高めた環境に優しい有機肥料の研究開発に挑戦したい。

そして、かけがえのない宮古島を守り次の世代へ。