

熱帯アジア地域の問題土壌と農業生産

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者名	小林,優 小山,博之 渡部,敏裕 前島,恵理子 Sriprachote,A. 落合,久美子 清水,顕史 近藤,始彦 飯泉,佳子 渡辺,武 俵谷,圭太郎 渡邊,彰
発行元	日本土壌肥料学会
巻/号	88巻4号
掲載ページ	p. 346-351
発行年月	2017年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



2016年佐賀大会
シンポジウムの概要

熱帯アジア地域の問題土壌と農業生産

小林 優¹・小山博之²・渡部敏裕³・前島恵理子³・Anongnat Sriprachote⁴・
落合久美子¹・清水顕史⁵・近藤始彦⁶・飯泉佳子⁷・渡辺 武⁷・俵谷圭太郎⁸・渡邊 彰⁶

1. はじめに

熱帯アジア地域における安定的な農業生産は、この地域に生活する人々のみならず、食料を含む各種作物の生産供給をこの地域に大きく依存している我が国にとっても、直接的に重要な課題である。今後も増加が見込まれる世界人口を支えるためには農業生産量のさらなる増加が必要である。しかし、環境への影響を考えれば、従来のような森林伐採による農耕地拡大はもはや困難であり、今後は既存農地の保全と集約的な利用、あるいは荒廃地の修復利用を図っていかなければならない。

そこで、本シンポジウムではこれまで実際に熱帯アジア地域をフィールドとして研究に取り組んできた演者から、この地域の農業生産を制限する土壌肥料学的な諸問題を解説してもらうとともに、それら問題を克服する試みの事例についても話題提供を受け、持続可能な農業発展という難しい目標に対して、どのような方向で研究を進めるべきか議論した。以下に講演の概要を紹介する。

(小林 優・小山博之)

2. 強酸性土壌に生育する植物とアルミニウムの関係

熱帯アジア地域には酸性土壌が広く分布し、なかには pH (H₂O) が3.5を切るような強酸性土壌が存在している。そのような強酸性土壌のうち、酸性硫酸塩土壌では高濃度のアルミニウム (Al) イオンや水素イオン (H⁺) による障害、塩基性カチオンやリン等の養分欠乏により、多くの植物種は正常に生育することができない。しかしながら、このような環境にも適応し、繁殖する植物種も数多く存在する。

酸性土壌における各種の生育制限要因はそれぞれ独立して植物に作用するわけではなく、概して複合的に影響する。例えば、植物の根が受ける Al 障害機構として根原形質膜のリン脂質や細胞壁のペクチン質との強固な結合があげられている。これらには本来カルシウム (Ca) が結合するが、培地の Al 濃度が上昇することで Ca を Al が置換し、機能に障害が生じる。強酸性土壌では先に述べたように Ca などの塩基性カチオンの可給度が低く、一般の植物種では Al による障害はよりいっそう強く現れることがある。例えばイネの Al 耐性は作物の中で強いとされているが、その耐性は培地中の Ca 濃度の違いにより大きく変化し、Ca 濃度が低い培地では耐性が著しく低下する。一方、熱帯アジア地域の強酸性土壌に自生する *Melastoma malabathricum* (メラストーマ) のような植物種では、培地の Ca 濃度が低くても Al による障害を受けにくい。この理由には様々な要因が考えられるが、その一つとして脂質組成の違いがある。メラストーマや同じく強酸性土壌に生育する *Melaleuca cajuputi* (メラルーカ) は共通して根の脂質におけるリン脂質の割合が低く、ガラクト脂質の割合が高い。これにより原形質膜の安定化に必要な Ca 量は少なく、Al の結合は抑制されると推察される。

このような根の構造や機能に加えて、強酸性土壌に適応した一部の植物種がもつ特徴的な性質として Al を体内に高濃度に集積することがあげられる。これらの植物は Al 集積植物と呼ばれ、強酸性土壌で多く自生している。通常、植物は酸性土壌に生育しても地上部に集積する Al の量は少なく、100~200 mg kg⁻¹ 程度である。しかし Al 集積植物は地上部に数千~数万 mg kg⁻¹ の Al を集積する。Al 非集積植物が有機酸分泌などにより根圏環境を変化させ Al の根への侵入を防いでいるのに対し、Al 集積植物は体内での Al の隔離や無毒化に炭素源やエネルギーを集中

Masaru KOBAYASHI, Hiroyuki KOYAMA, Toshihiro WATANABE, Eriko MAEJIMA, Anongnat SRIPRACHOTE, Kumiko OCHIAI, Akifumi SHIMIZU, Motohiko KONDO, Yoshiko IIZUMI, Takeshi WATANABE, Keitaro TAWARAYA and Akira WATANABE: How can plant nutrition contribute to solving soil problems in tropical Asia?

¹京都大学大学院農学研究科 (606-8502 京都市左京区北白川追分町)

²岐阜大学応用生物科学部 (501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³北海道大学大学院農学研究院 (060-8589 札幌市北区北9条西9丁目)

⁴Faculty of Agriculture, Khon Kaen University (Khon Kaen, 40002, Thailand)

⁵滋賀県立大学環境科学部 (522-0057 彦根市八坂町2500)

⁶名古屋大学大学院生命農学研究科 (464-0814 名古屋市中種区不老町)

⁷国立研究開発法人国際農林水産業研究センター (305-0851 つくば市大わし1-1)

⁸山形大学農学部 (997-8555 鶴岡市若葉町1-23)

Corresponding Author: 小林 優

2017年1月31日受付・2017年2月15日受理

日本土壌肥料学雑誌 第88巻 第4号 p. 346~351 (2017)

させることで効率的に高濃度の Al を含む強酸性土壌に適応していると考えられる。調べてみると、このような Al 集積植物は特定の科や目だけではなく、シダ類を含む陸上植物で広範にみられ、地上部に Al を高濃度に集積する性質は原始的なものであるという考え方もある。

前述のように、Al 集積植物の体内での Al 毒性回避機構は隔離と無毒化の2つに大きく分けることができる。隔離では、液胞や表皮細胞の細胞壁などの細胞や組織の機能に対して影響が小さいところに Al を閉じ込める機構が知られている。一方、無毒化においては、何らかの物質と結合させることで体内での Al の毒性を下げる機構を Al 集積植物はもっている。体内で Al と結合させる物質としてこれまでに、有機酸、フェノール性成分(カテキンなど)、ケイ素、フッ素などが報告されている。この無毒化形態を様々な Al 集積植物において調査したところ、シダ類を含む多くの植物種の葉でシュウ酸と Al が結合して存在することが示唆された。シュウ酸は代謝の最終産物であり、高濃度集積は多くの植物種でみられる。シュウ酸は有毒であるため、植物体内で通常は Ca 塩として固定し無害化されているが、Al 集積植物では Al とシュウ酸を結合させることで両者を無害化できる一石二鳥の無毒化機構が酸性土壌への適応過程で発達してきた可能性がある。

また、強酸性土壌に生育する木本植物の根では、Al がフェノール性成分とも結合していることが報告されている。*Eucalyptus camaldulensis* の根に含まれる oenotherin B は Al と強く結合することから、この種の高い Al 耐性に寄与することが示唆されている (Tahara *et al.*, 2014)。メラストーマも根に高濃度のフェノール性成分を含み、Al と結合することで無毒化することが示されている。メラストーマの根ではフェノール性成分はアポプラストよりシンプラストにおける存在割合が高いことから、フェノール性化合物はシンプラストの Al 無毒化に主に関わると考えられる。なお、メラストーマの根に含まれるフェノール性成分の濃度と組成は Al による影響はほとんど受けない。

強酸性土壌に生育する植物では Al 耐性が強いだけでなく、Al が有用元素として働く例が多くみられる。例えばメラストーマでは水耕栽培で培養液に Al を添加することで根の酸化ストレスが軽減され、細根も増える。この原因について完全には明らかにされていないが、一つの要因として Al と鉄 (Fe) の相互作用が示されている。メラストーマは Fe イオン耐性が相当弱く、標準培養液に含まれる程度の Fe イオン濃度でも障害を受けるが、Al は Fe 吸収を抑制し、その毒性を軽減することが確認されている。同様の現象は同じく Al 集積植物であるチャでも報告されている。別の要因として Al 集積植物ではシュウ酸の毒性軽減も考えられる。多くの Al 集積植物種が高濃度に含むシュウ酸は、アルカリ金属や Al を除く多くのカチオンと難溶性の沈殿を生成するため、Al を高濃度に集積しないとシュウ酸が他の必須カチオンと結合、不活化してしまい代謝に異常が起こりうる。(渡部敏裕・前島恵理子)

3. タイ国カドミウム汚染田での水稻栽培

タイ国北西部、ミャンマーとの国境地帯のターク県メーソット郡には、タイ国最大の亜鉛鉱山が操業しており、鉱山を流れるメータオ川の下流には鉱滓から流出したカドミウムに汚染された水田地帯が広がっている。

メーソット鉱山の亜鉛採掘は1980年頃開始され、周辺地域の土壌のカドミウム汚染の問題は2002年、International Water Management Institute により国際学会で報告されて知られるようになった。2004年には医療チームによる調査が流域全村の住民を対象として行われ、メータオ川流域住民の尿中カドミウム濃度が、ターク県内の他の地域の住民に比べて高いことが示されている (Swaddiwudhipong *et al.*, 2007)。住民の多くは農業生産者であり、自家栽培したコメがカドミウムの主要な摂取源である。

2004年、タイ国政府はメータオ川流域での稲作を禁止し、サトウキビなどへの転作を奨励した。2004、2005年の2年間にわたって転作補償金が支給され、この間に鉱山会社等の出資によるバイオエタノール工場がメーソット郊外に設立された。しかし、買取価格の低迷もあってサトウキビへの転作は進まず、補償金が打ち切られると多くの農家が稲作を再開した。稲作再開の背景にはおそらく、カドミウム慢性摂取の問題が住民にそれほど深刻な脅威としては受け止められていない、という可能性も考えられる。

京都大学植物栄養学研究室では2008年より、この地域で生産者のカドミウム摂取リスク低減のための研究に取り組んできた。まず、メータオ川流域のパデ村の23戸から飯米の提供を受けてカドミウム含有率を測定したところ、半数以上でコーデックス委員会の基準値である 0.4 mg kg^{-1} を超えるカドミウムが検出された (Sripachote *et al.*, 2012a)。聞き取り調査では、飯米品種はタイ国全土で人気の高い KDM105 号、モチ米の人気品種 RD6 号、ローカル品種の Khao' Khaeng であり、これらはいずれも栽培期間の長い日長感受性の品種である。

メーソットの稲作は一年一作の雨季作である。雨季が始まると、6月の初め頃に田苗代への播種、7月初旬に田植えが行われる。収穫は雨季があげた11月である。乾季にはダイズや飼料用トウモロコシが栽培されている。水稻栽培ではメータオ川支流からの灌漑が行われているものの、圃場の水位はその年の降雨量に左右されるため、水管理によるコメ中カドミウムの低減は現実的な対応策ではない。

そこで、コメ中にカドミウムが蓄積されにくく、かつ、現地の栽培慣行や食品としての嗜好に適した水稻品種を選抜するための栽培試験を開始した。栽培試験は飯米調査協力農家の一戸から圃場を借り受けて行い、有望品種が選抜され次第作付け品種を転換できるようにタイ国水稻優良品種計42品種を対象とした。

この選抜栽培試験において、籾カドミウム含有率には同一の品種でも栽培プロット間での変動ならびに年次変動が大きく、カドミウムの蓄積には環境要因の影響が大きいこ

とが示唆された。その一方で、籾カドミウム含有率には有意な品種間差が得られ、2009～2011年の3年間の栽培試験結果に基づき、低カドミウム品種候補として、ウルチ米日長感受性品種のRD5, RD15, Sang Yod, モチ米日長感受性品種のKhao' Niaw Ubon 1, Khao' Niaw Ubon 2が選抜された(Sriprachote *et al.*, 2012b)。日長非感受性品種にも籾カドミウム含有率が低いものは存在したが、雨季の最中に収穫期を迎えることから候補品種には含めなかった。

2012年には選抜された5品種について栽培プロットを増やして試験し、KDM105号やRD6号に比べて候補品種の籾カドミウム含有率が低いことを確認した。

ウルチ米品種の中ではRD15号の籾カドミウム含有率が最も小さく、平均するとKDM105号に比べて70%低下した。栽培試験圃場のオーナーが「これなら栽培してみても良い」と言ったのもこのRD15号である。これはKDM105号の γ 線照射変異株から選抜育種された品種で、KDM105号と同じくタイ国で好まれる香り米である。KDM105号に比べて収量性が良く、出穂期は2週間ほど早い。出穂期が早いこと、つまり、まだ降雨量が多く土壌が還元である時期に出穂を迎えることがRD15号の低い籾カドミウム含有率に寄与していると考えられる。

2013年4月にはメーソットで生産者に向けた研究成果報告会を開催し、KDM105号からRD15号への転換を奨励した。質疑応答では、RD15号に転換した場合の鳥獣被害や収穫物の売価、種子の入手先に関心が寄せられた。報告会后、数戸から種子のリクエストがあり、実際にRD15号が栽培され始めた。この年に栽培されたRD15号の籾カドミウム含有率は、直接的な比較はできないものの、隣接水田で栽培されたKDM105号に比べ低い値を示した。

残念なことに、2016年現在RD15号を栽培しているのは栽培試験圃場のオーナーのみである。繰り返しになるが、カドミウムの問題が深刻には感じられていないために、売価や食味の違いをおいても作付け転換するほどの誘因にならないと考えられる。

(Anongnat Sriprachote・落合久美子)

4. 連続無施肥水田を利用した、日本イネ集団による収量形質の全ゲノム関連解析

1) 低肥料用品種の開発に向けて

高品質の農作物を高収量かつ安定的に生産するには、十分な施肥が必要である。一方、肥料が少なくても収量の低下しにくい作物が育成できれば、原料となる有限資源の消費や肥料の製造時に生ずるCO₂やNO_xの排出を減らした低投入持続型農業を実現できる。

低肥料用品種の開発に向けて収量形質を評価する場合、圃場を用いた栽培試験が望ましい。より厳しい養分欠乏ストレスを課すためには、施肥量を制限するだけでなく地力養分をなるべく減らした圃場を使用する必要がある。我々の研究室では、連続無施肥水田を用いたイネ収量形質の全ゲノム関連解析を2014年から2016年までの予定で行っ

ており、本講演ではその経過を報告する。

2) 全ゲノム関連解析による遺伝資源探索

近年のシーケンスおよびジェノタイプング技術の進展により、生物種の全塩基配列解読が可能になり、それに伴って多品種多系統のゲノムワイドなDNA多型情報も容易に得られるようになった。多品種のゲノムワイドな多型情報を利用すると、QTL解析のように交雑分離集団を準備しなくても、品種集団の遺伝子型および表現型情報から関与する遺伝子座領域を検出できる場合がある。この手続きは全ゲノム関連解析(Genome Wide Association Study, GWAS)と呼ばれ、両親の2対立遺伝子間の比較を行う一般的なQTL解析と異なり、遺伝資源中の複対立遺伝子間の差を探索できる特徴がある。日本の栽培・在来イネ集団を圃場試験し収量形質についての全ゲノム関連解析を行った。

3) 材料および方法

供試した日本の栽培・在来イネ112品種は、3,232個のゲノムワイドなDNA多型が調査済みであり、Structureによって6種類の分集団から構成されると推定されている(Yamasaki and Ideta, 2013)。このイネ集団を2014年度は、58cm×28cm育苗パットに赤玉土2.4kgを用意し、N:P₂O₅:K₂Oを1.2gずつ加えたリン充分苗床と、P₂O₅のみ0.02gに減らしN:K₂Oを1.2gずつ加えた低リン苗床の2種類の条件で育苗した。2015, 2016年度は低リン苗床でのみ育苗した。育苗パットあたり20系統×20個体の催芽種子を播き、3週間育苗後に各品種各苗床当たり8個体ずつを以下の水田に移植した。

圃場試験には、滋賀県立大学圃場実験施設内にある2種類の水田を使用した。1996年以来連続無施肥で使用している水田(以下、無施肥水田)と2000年以来連続無施肥で使用し2014年から元肥として代かき時にNとK₂Oを5.0kg 10a⁻¹ずつ施肥した水田(以下、低リン水田)で栽培し、各個体の到穂日数、穂数、稈長、穂長、百粒重、一穂粒数などを調査し、Tassel ver. 4.2の混合モデルによって全ゲノム関連解析を行った。

4) 2014, 2015年度の結果

各形質の2014, 2015年次間の相関係数は、到穂日数、稈長、百粒重の順で高くなった(>0.97, >0.83, >0.67)。一穂粒数の年次相関は低リン水田と無施肥水田でそれぞれ0.80と0.58、穂数は0.42と0.12と、水田間の差が大きかった。特に無施肥水田の穂数は、2015年度の全品種平均が2014年度の3倍以上に増加していた。これは、2015年度でのみ移植時に散布した除草剤の効果によると考えている。

全ゲノム関連解析の結果は、到穂日数では両水田・両年ともにHd1など既知の遺伝子座近傍マーカーが検出された。収量性に深く関わる形質のうち、一穂粒数は染色体6と7に、穂数は染色体6に、2014, 2015年ともに有意差のあるマーカーが検出できた。穂数については、2015年度の無施肥水田で、コシヒカリ(少穂)×ユウカラ(多穂)の組換え自殖系統も同時に栽培しており、全ゲノム関連解

析によって検出された染色体領域の検証を行っている。

(清水顕史)

5. 熱帯アジアの稲作における生産制限要因と対策

コメは熱帯アジアの主要穀物であり、多様な環境下でイネが栽培されている。多くの場面で水管理や降雨量など水環境が土壌の養分環境と相互作用をもちながら収量性に影響している。このため、水と養分の両面から生産性の制限となっている要因を見極めて、栽培法や環境を改善していくことが必要である。ここでは水と土壌養分の関係が生産性に及ぼす影響について、水稻および陸稲における解析事例を紹介する。

熱帯アジアの水稻作では二期作が広く行われているが、一般に雨季作の収量は乾季作に比較して低い。地域のコメ生産の安定化には、日射量の豊富な乾季作の収量ポテンシャルをさらに向上させるとともに、雨季作の低収量性の改善も有効と考えられる。本研究の対象であるメコンデルタでも雨季作の収量が著しく低い地域があり、本研究ではその要因について土壌と気象両面から解析を進めている。2カ年の栽培試験で標準品種 OM6976 の雨季の粗収量は乾季の50.3% (乾季作 6.30t ha^{-1} , 雨季作 3.17t ha^{-1})であった。収量低下の主な要因は一穂粒数の低下にあった。雨季作では全乾物重が低下したが、収穫指数もほぼ同等に低下しており、このことが収量の大きな低下をもたらした。粒数の減少を穂の着粒位置別にみると、1次枝梗粒よりも2次枝梗粒で減少が顕著であった。これらの結果より、雨季作においては幼穂形成から登熟初期に何等かの要因で、特に2次枝梗の形成の抑制あるいは退化の促進が、収量低下の要因となっていると考えられた。気象条件として雨季は当然ながら低日射量が生育抑制の一因となる。この期間の日照時間と粒数には正の相関関係が認められた。また、気温や最大風速と粒数には負の相関関係があり、高温や乾燥が粒数抑制に関与する可能性も示唆された。一方、幼穂形成期から成熟期にかけての根の観察を行ったところ、雨季においては根表面への硫化鉄の沈着が乾季に比較して著しく多く、明瞭な黒色化が認められるとともに、根および茎基部の硫化物反応が強い傾向にあった。また、土壌水中の硫酸イオン濃度が雨季で高まる傾向がみられた。このため、土壌中の硫酸イオンから還元条件下で生じた硫化水素が、根や地上部に影響し、粒数や収量に影響している可能性がある。本地域では下層にパイライト層が存在する。このため、土壌層内での水分移動と硫黄の移動と形態の関係について現在調査中である。以上の結果より、雨季作の低収量には気象要因と土壌の還元障害の両方の関与の可能性が示唆された。高温による一穂粒数の低下は熱帯、温帯で一般に認められる現象であり、今回の傾向と一致する。しかし、気温 1°C の上昇あたりの粒数の低下程度は、これまでの熱帯での報告より大きかった。このような気象条件との関係解析からは、土壌要因の関与が示唆される。今後、硫化水素の発生など雨季と乾季の土壌環境の違

いをより詳細に解明し、栽培対策を構築することが望まれる。対策としては水管理の効果を検証中である。湛水期間の延長による硫酸の表層への集積の抑制や、作期中の落水による土壌表層での硫酸還元を抑制を試みている。また耐性品種の利用も考えられる。

陸稲については、降雨パターンと土壌窒素の動態が窒素吸収を通して、生産性に関与するフィリピンなどにおける事例を紹介する。イネは乾燥ストレスに感受性が高く、陸稲作においては低水分ストレスが大きな収量減少につながる。一般に降雨量が高い年次または地域で生産性は高い。一方、降雨は主要な窒素源である硝酸の溶脱を促進し、窒素吸収にマイナスに働く。アニオン吸着能の高い Ultisols では、溶脱が軽減されるため生育後半まで硝酸濃度は比較的高く維持され窒素吸収が促進された。一方、アニオン吸着能の低い Alfisols では、大きな降雨の際に無機化により生成した土壌硝酸が根圏より深の層に溶脱され、窒素吸収の抑制につながる事例がみられた。このため、Ultisols では生育後半の肥料としての窒素供給の必要性は小さく、Alfisols では生育後半に土壌窒素の低下に応じて追肥を施用することが有効であった。即効性肥料の表面追肥は、降雨による溶脱を受けやすいため、肥効調節型肥料を基肥として側条施用することも有効と考えられた。このように多様な土壌、気象環境でイネが栽培される熱帯では、養分と水環境条件に応じた栽培方法が生産性の向上に特に重要と考えられる。

(近藤始彦・飯泉佳子・渡辺 武)

6. 菌根菌を利用したインドネシアの露天掘り鉱山跡地の植生修復

1) はじめに

熱帯地域では過剰な伐採、森林火災、露天掘り鉱山採掘および森林のプランテーションへの転換により森林の減少が進んでいる。インドネシアでは石炭、ニッケル、スズ、およびボーキサイトなどの採掘で露天掘りが行われている。これらの鉱物は天然林下にあるため、採掘のために表層土壌および樹木を含む植生がすべて取り除かれる。このため鉱山跡地の土壌の物理的、化学的および生物的性質は極めて悪く、これらが植生修復を阻害している。ここでは、インドネシアの露天掘り鉱山跡地の状況、土壌からのアーバスキュラー菌根 (AM) 菌の分離および樹木苗への AM 菌の接種について紹介する。

2) インドネシアの露天掘り鉱山

土壌の全炭素含量は天然林で2.67%、石炭鉱山跡地で0.40%、全窒素含量は天然林で0.21%、跡地で0.09%、可給態リン酸含量は天然林で $0.96\text{mg-P}_2\text{O}_5\ 100\text{g}^{-1}$ 、跡地で 0.29mg 、陽イオン交換容量 (CEC) は天然林で $11.75\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ 、跡地で $9.45\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ であった。ボーキサイト鉱山跡地では、全炭素含量は天然林の土壌で2.88%、跡地の土壌で0.71%、全窒素含量は天然林で0.16%、跡地で0.04%、可給態リン酸含量は天然林で

1.34 mg-P₂O₅ 100 g⁻¹, 跡地で1.13 mg, CECは天然林で12.74 cmol(+)kg⁻¹, 跡地で8.90 cmol(+)kg⁻¹であった。ニッケル鉱山跡地では、全炭素含量は天然林で4.02%, 跡地の土壌で0.29%, 全窒素含量は天然林で0.26%, 跡地で0.01%, 可給態リン酸含量は天然林で1.23 mg-P₂O₅ 100 g⁻¹, 跡地で1.10 mg, CECは天然林で8.23 cmol(+)kg⁻¹, 跡地で3.15 cmol(+)kg⁻¹であった。これらのことから露天掘り鉱山跡地では表層土壌と植生の除去により土壌の有機物含量および養分含量が低下し、植物の生育制限要因となっていることが明らかになった。さらに露天掘りは過剰な伐採、森林火災および森林のプランテーションへの転換などの森林減少の要因に比べて土壌からの炭素の放出に及ぼす影響が大きいと考えられた。

3) 土着菌根菌の分離

天然林および露天掘り鉱山跡地から採取した土壌に *Sorghum bicolor*, *Trifolium repens*, *Allium cepa* を3カ月間生育させ、栽培後の土壌からAM菌の胞子を回収した。天然林と鉱山跡地の土壌から45のAM菌株が分離され、13菌株が *S. bicolor* の地上部リン濃度と地上部乾物重を増加させた。

4) 樹木の苗木への菌根菌の接種と鉱山跡地への移植

Albizia saman, *Paraserianthes falcataria*, *Cassia siamea* および *Melaleuca leucadendron* の種子にAM菌 *Rhizophagus clarus*, *Gigaspora decipiens* および *Scutellospora* sp. の胞子を接種し、滅菌した培土を詰めたポットに播種した。非接種の種子も播種した。苗床で6カ月間生育させた。苗木を露天掘り石炭鉱山跡地に移植した。7カ月間生育させ、地上部と根部を採取した。AM形成率、茎の直径、地上部乾物重、苗木の生存率および地上部の窒素およびリン濃度を測定した。移植時にAM形成率は3~82%であった。AM菌の接種は苗床における苗木のリン吸収量と地上部乾物重を増加させた。石炭鉱山跡地における接種したAM菌の菌根形成率は25~78%で、土着のAM菌の菌根形成率は17~59%であった。AM菌の接種は石炭鉱山跡地において *A. saman* の茎の直径、地上部窒素吸収量、地上部リン吸収量および地上部乾物重を増加させ、*P. falcataria* の生存率を増加させた。生存率の増加には、窒素やリン吸収以外の養分吸収と水吸収、耐病性などが寄与していると考えられる。

AM菌の接種による苗床における苗木の初期生育と養分吸収の促進および移植後の露天掘り鉱山跡地における樹木の生育と生存率の促進は、AM菌の利用が熱帯の露天掘り鉱山跡地の植生修復技術となりうることを示している。

(俵谷圭太郎)

7. 熱帯泥炭湿地におけるサゴヤシ栽培

熱帯泥炭土壌は東南アジアに約2,500万ha分布し (Page et al., 2011), 高い有機物含量, 高い地下水位, 低いpH, 低い養分含量等の特徴をもつ。畑地や樹園地として利用するには排水が必要であるが、極度の排水は土壌の収縮によ

る地盤沈下をもたらすだけでなく、有機物分解の促進とそれに伴う温室効果ガス発生が増大も懸念される。ゆえに泥炭湿地の農業利用では、湿地環境に適した作物を選定し、生産性を維持あるいは改善するための水・肥培管理技術を確認することが望ましい。また、環境(炭素(C)バランス、温室効果ガス発生等)に対する配慮も重要である。

サゴヤシ (*Metroxylon sagu*, *Metroxylon rumphii*) は、アブラヤシと異なり、湛水期間が長くても生育可能な高デンプン生産植物である。年数回の落葉による土壌へのC供給量も大きく、C循環から見た持続性も期待できる。ただし、泥炭土壌では鉱質土壌と比較して生育が遅く、収量も劣る。泥炭土壌で生育したサゴヤシにCuやZnの欠乏を示唆する症状がみられることから、生育の改善には養分補給が必要と考えられるが、適切な施肥法は確立されていない。サゴヤシは一般に分枝(吸枝)を移植して栽培するため、苗立ち率と初期生育の向上が生産量の増大につながると思われる。

1) サゴヤシ圃場におけるCの動態

サゴヤシ土壌(移植3~7年)からの二酸化炭素(CO₂)およびメタンフラックスは、移植後3年のCO₂を除いて近接する森林土壌との間に差を示さなかった。サゴヤシは地下水位が低すぎると成長が抑えられるが、-40~-50cm程度に制御すれば、成長速度に影響を与えずにメタン発生を抑制できることを示唆した (Watanabe et al., 2009)。また、サゴヤシ圃場では、サゴヤシバイオマスC蓄積速度とサゴヤシリーターCの土壌への蓄積速度の和が土壌から大気へのC放出速度と拮抗しており、幹立ち後の個体数を一定以上に維持することでC収支を0以上にできると見積もられた。

2) サゴヤシへの窒素(N)施用

泥炭土壌のN無機化速度は、鉱質土壌と同程度かより高いが (Purwanto et al., 2005), 仮比重が低いこと、面積あたりのN供給ポテンシャルは鉱質土壌に劣る。サゴヤシのNの一部は窒素固定菌によってまかなわれるが、泥炭土壌ではPやKとともにNの補給も必要と考えられている。しかしながら、速効性、緩効性に関わらずNの施肥効果が認められることはほとんどない。移植1年目のサゴヤシに対する¹⁵N標識尿素施用試験では、施肥N吸収量は施用量の3%にとどまった。通常の7倍量の化学肥料を施用した試験では重量の増加が認められた。しかし、母本よりも吸枝の生育が促進されたため、施肥効率を上げるには吸枝の制御が重要であると考えられた (Kakuda et al., 2005)。養成時の吸枝への緩効性N肥料の投与は、移植半年後のSPAD値および地上部各部位の新鮮重を増大させ、その後の生育改善効果が期待された。ただし、緩効性肥料の使用は経済的に困難であることから、安価な代替技術の開発が求められる。

3) サゴヤシへの微量元素施用

微量元素 (Cu, Fe, Zn, Mn) を6年連用した圃場試験では、施用量や施用元素の組み合わせに関わらず、植物生

育, 葉中元素濃度のいずれにも有意な効果は認められなかった (Ando *et al.*, 2007). モデル実験によって泥炭土壌中における金属元素 (硫酸塩として添加) の挙動を確認した結果, 断続的な透水によって Zn と Mn は添加量の 20~30% が溶出したが, Cu や Fe は 2~7% しか溶出されなかった. また, 土壌に残留した微量元素のうち 60~90% はキレート剤 (DTPA-TEA) を用いても抽出されなかった. これらのことから, 微量元素, 特に Cu や Fe は土壌に強く吸着されることで植物が利用できなかつたと推定され, 施用位置や施用形態の工夫改善が必要と考えられた.

(渡邊 彰)

文 献

- Ando, H., Hirabayashi, D., Kakuda, K., Watanabe, A., Jong, F.S., and Purwanto, B.H. 2007. Effect of chemical fertilizer application on the growth and nutrient contents in leaflet of sago palm at the rosette stage. *Jpn. J. Trop. Agr.*, **51**, 102–108.
- Kakuda, K., Watanabe, A., Ando, H., and Jong, F.S. 2005. Effects of fertilizer application on the root and aboveground biomass of sago palm (*Metroxylon sagu* Rottb.) cultivated in peat soil. *Jpn. J. Trop. Agr.*, **49**, 264–269.
- Page, S.E., Rieley, J.O., and Banks, C.J. 2011. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Glob. Change Biol.*, **17**, 798–818.
- Purwanto, B.H., Watanabe, A., Jong, F.S., Kakuda, K., and Ando, H. 2005. Kinetic parameters of gross N mineralization of peat soils as related to the composition of soil organic matter. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **51**, 109–115.
- Sriprachote, A., Kanyawongha, P., Ochiai, K., and Matoh, T. 2012a. Current situation of cadmium-polluted paddy soil, rice and soybean in the Mae Sot District, Tak Province, Thailand. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **58**, 349–359.
- Sriprachote, A., Kanyawongha, P., Pantuwan, G., Ochiai, K., and Matoh, T. 2012b. Evaluation of Thai rice cultivars with low grain cadmium. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **58**, 568–572.
- Swaddiwudhipong, W., Limpatanachote, P., Mahasakpan, P., Krintratun, S., and Padungtod, C. 2007. Cadmium-exposed population in Mae Sot District, Tak Province: 1. Prevalence of high urinary cadmium levels in the adults. *J. Med. Assoc. Thai.*, **90**, 143–148.
- Tahara, K., Hashida, K., Otsuka, Y., Ohara, S., Kojima, K., and Shinohara, K. 2014. Identification of a hydrolyzable tannin, oenothin B, as an aluminum-detoxifying ligand in a highly aluminum-resistant tree, *Eucalyptus camaldulensis*. *Plant Physiol.*, **164**, 683–693.
- Watanabe, A., Purwanto, B.H., Ando, H., Kakuda, K., and Shoon, J.F. 2009. Methane and CO₂ fluxes from an Indonesian peatland used for sago palm (*Metroxylon sagu* Rottb.) cultivation: Effects of fertilizer and groundwater level management. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **134**, 14–18.
- Yamasaki, M., and Ideta, O. 2013. Population structure in Japanese rice population. *Breed. Sci.*, **63**, 49–57.