

第 IX 章 まとめ

(1) 調査結果のまとめ

- ① 在来有機資材施用の稲収量への効果を検証するため、タマレ近郊のサバンナ帯で on-station 試験を継続実施し、また施用効果を実証するために農家圃場にて on-farm 試験を開始し、以下の結果を得た。
 - ◆ 稲わらを原料とした各種有機資材の施用効果は、前年度と同様、加工された資材（稲わら灰、稲わら炭、稲わら堆肥等）に比べ直接施用が最も大きく、稲わら直接施用は、有機資材無施用時の 1.35 倍の収量が得られた（昨年度は 1.76 倍）。
 - ◆ 有機物資材のみの施用では、稲わら直接施用による収量の増加は標準施用時に 1.2 倍、及び倍量施用時に 1.1 倍程度であったのに対し、化肥を併用した場合には、有機物無施用区に対し稲わら直接施用区の収量はそれぞれ 1.4 倍及び 1.5 倍となった（以上 on-station 試験の結果）。
 - ◆ On-farm 試験においても、稲わら直接施用の増収効果が確認された。一方、基肥としての窒素とカリウムの施用でも収量は増加したが、両者の相乗効果は見られなかった。
- ② ブルキナファソ産リン鉱石を用いて、その直接施用の効果について、on-farm の農家圃場で実証試験を継続し、また小型ポットにガーナ産の土壌を詰めて培養試験を行い、リン鉱石と有機物の同時施用の効果について、以下の結果を得た。
 - ◆ 北部サバンナ帯の農家圃場での on-farm 試験では、前年度試験と同様にリン鉱石の直接施用によりイネ収量は増加し、水溶性のリン肥料施用区と比較して、十分に高い収量を確保出来たことから、リン鉱石直接施用は有効であると考えられた。
 - ◆ リン鉱石直接施用時の残効は、地点によって異なることが示された。残効の大小は、栽培圃場の土壌環境、水分環境などによって規定されていると推測される。
 - ◆ リン鉱石の溶解特性に及ぼす土壌の pH の影響は小さかった。一方、土壌中有効態リン濃度の低い地点において、リン鉱石直接施用のイネ収量に及ぼす効果が大きいことが示された。
 - ◆ イネの成長に対し、リン鉱石の直接施用が水溶性リン肥料に比べて同等かそれ以上の効果を示すことが、培養試験で確認された。この効果は、リン鉱石と牛糞を同時施用した場合により顕著であった。

- ③ 培養試験により、土壤に添加されたブルキナファソ産リン鉱石の可溶化の条件を、有機物同時施用と植物生育の関係において、以下の通り明らかにした。
- ◆ リン鉱石は酸性、高リン吸着、高水分の土壤環境において、より溶解が進んだ。しかし高リン吸着条件では土壤溶液中リン濃度が低くなり、植物の生育が制限された。
 - ◆ 土壤コロイドに吸着されたリンを脱着するためには、リン濃度の高い有機資材が求められ、C/N 比や C/P 比の高い稲わらよりも牛糞の施用効果が期待できる。
 - ◆ 土壤中の有効態リンは微生物バイオマスの細胞内に固定されるが、これらバイオマスリンは易分解性であり潜在的な有効態リンである。バイオマスリンは有機物施用によって増加する。
- ④ リン鉱石可溶化のための処理技術について検討し、以下の結果を得た。
- ◆ リン鉱石可溶化技術として堆肥化過程の利用は有効であるが、可溶化したリンが堆肥化に伴い有機物によって吸着されることも考慮する必要がある。黒麹菌の添加による可溶化促進効果は確認されなかった。
 - ◆ リン鉱石を 300°C 程度の低温で焼成することにより、植物可給態リン量の指標であるクエン酸抽出(ク溶性)リンの量が 10 gP/kg 程度向上し、また焼成に要する時間は 1 時間程度で十分であった。
 - ◆ 赤道森林帯において容易に入手できる有機資源であるオガクズを用いて、燻炭化によるリン鉱石の低温焼成は可能であり、また各種作物のもみ殻燻炭化過程を利用すれば、様々な地域で実践が可能な技術である。
- ⑤ イネの初期生育を改善するため、種子や苗への前処理技術を検討するためのポット試験を行い、以下の結果を得た。
- ◆ 乾田直播栽培システムでは、1 kg のイネ種子あたり 92 g のリン酸二水素カリウムの粉末をコーティングすることで、リン欠土壤において播種後 40 日後まで、苗の成長が改善された。
 - ◆ 移植栽培システムでは、イネの苗を移植前に 5% のリン酸二水素カリウム溶液に 30 分間浸漬する処理より、リン欠土壤において移植後 75 日まで、苗の成長が改善された。
- ⑥ サバンナ帯のノーザン州とアッパーイースト州の農村で農民参加のワークショップ

を開催し、肥沃度改善のための技術や資材に対する農民の意識調査を実施し、以下の結果を得た。

- ◆ 技術への受容性は化学肥料が最も高く、化肥のアクセス性が高まれば在来有機物資材のみよりも化肥との組み合わせが、農家にとって実現可能な肥沃度改善オプションであろう。
- ◆ 堆肥はこの地域の農民にとって、アクセス性も受容性も利用可能性も最も高く、肥沃度改善のために最も高いポテンシャルを持つ資材で、アッパーイースト州のある村では、すでに堆肥や小型反芻動物の糞を水田で使っていた。
- ◆ リン鉱石はこの地域の農家にとってなじみはないが受容性は高く、もしこの資源にアクセスできるのであれば使ってみたい、との声も多かった。
- ◆ 農家間のグループディスカッションで、資材を肥料として使うコストが化学肥料を買うよりも高いのではないか、という疑問も呈された。有機資材の化学的性質にばかり研究の焦点をあてるのではなく、資材を安価に調達するための技術開発もして欲しい、とのことである。

⑦ 水生シダ類の一種で赤道森林帯の水田で多く見られるアカウキクサ(アゾラ)について予備的調査を行い、以下の結果を得た。

- ◆ 自生するアゾラの体内窒素濃度は4%前後とマメ科植物に匹敵するほど高く、また共生するラン藻による生物的窒素固定の寄与も示唆された。
- ◆ 簡単な培養試験により、アゾラのバイオマス増加は溶液中のリンによって律速されることが示された。

(2) 総合考察

これらのことから、ガーナにおける在来資源を用いた土壌肥沃度改善技術のオプションと、技術の開発のための研究ニーズについて、以下のように考察を行った。

昨季に引き続き、サバンナ帯と赤道森林帯でそれぞれ、イネの収量を指標に試験場の圃場(on-station)と農家圃場(on-farm)にて有機物資材の施用効果を調査した。On-farmの試験では、昨年度実施した3カ所をコアサイトとして継続するとともに、新たにそれぞれ8カ所のブランチサイトを設け、より多様な環境での技術実証試験を拡大して進めた。逆に試行する技術の数は、賦存量の調査と農家における社経調査の結果に基づき、サバンナ帯では稲わら中心に、赤道森林帯では稲わらと鶏糞中心

に絞り込んだ。今年度は事業開始の遅れもあり、残念ながら赤道森林帯で実施した試験の結果は、まだまとめられていない。稲わらは、灰化や炭化した加工処理したものよりも直接施用が最も効果的であったが、その理由は不明である。赤道森林帯での結果も合わせて考察をしたい。

化学肥料の施用は、化学肥料そのものによる収量増加が見込めるだけでなく、稲わら直接施用時の増収効果を拡大すると考えられる。施用した稲わらの分解には窒素が必要であり、窒素の十分な施用が稲わらの分解を促進し、稲わら由来の栄養塩類を供給するとともに、土壌の物理性及び生物叢の改善に有効に作用したのではないだろうか。対して、化学肥料無施用区では、稲わらの分解が十分でなく、上述の有効性を得られなかった可能性がある。ガーナ国内での肥料の流通量が増え、あるいは補助金制度が農家にとって使いやすいものになるなど、肥料へのアクセス性がより高まる可能性はある。農民の意識調査は化肥への受容性が非常に高いことを示しており、有機物＋少量の無機肥料の複合効果を現地農家圃場で実証することは意味があると思われる。

リンの枯渇が叫ばれている中、また化学肥料の価格高騰が進む中、肥料としてのリン鉱石への期待が高まっている。リン鉱石の農業利用上の問題で一番大きいのは、その可溶性の低さである。昨年度の調査では、水田稲作におけるリン鉱石の利用可能性について、農家圃場での on-farm 実証試験を実施し、リン鉱石の直接施用のイネ収量に対する効果をサバンナ帯と赤道森林帯の両方の水田で示した。今年度と同じ設計で試験を行ったところ、リン鉱石直接施用の効果の再現性が確認された。またリン鉱石は溶解度が低いことから、緩効性の肥料としても捉えることができ、作期を越えた残効も期待することができる。そこで前作で施用されたリン鉱石の残効をやはりイネの収量で評価したが、サバンナ帯の on-farm 試験では圃場によって結果が異なった。すなわち、リン鉱石の残効が期待できる地点と期待できない地点があることが示唆された。しかし、残効はリン鉱石に特有のものではなく、水溶性リン肥料においてもほぼ同様の結果であったため、リン肥料の残効における地点間差異は、各地点の水分環境の差異に起因するものと推察された。今後、リン鉱石直接施用効果及びその残効に及ぼす主な環境要因を明らかにすることで、稲作圃場の土壌特性等を考慮した適切なリン鉱石施用方法を提案できると考えられる。

リン鉱石の肥効に大きく影響する可溶化のメカニズムを解明するために実施した培養試験でも、イネの成長に対し、リン鉱石の直接施用が水溶性リン肥料に比べて同等かそれ以上の効果を示すことが確認された。この効果は、リン鉱石と牛糞を同時施用した場合により顕著であった。昨年度に石垣島のリン欠土壌を用いて実施した試験ではリン鉱石の肥効が確認できなかったが、今季は化学的性質の全く異なるガーナの土壌を用いたことが要因と思われた。圃場試験との連関を考察するには、同じ土壌で

試験を行った今回の培養試験が相応しい。ブルキナファソ産のリン鉱石は、酸性、低有効態リン、及び高リン吸収土壌環境においては、特にリン溶出に必要な土壌水分がある場合において、直接施用による農業利用の可能性が十分にあると考えられる。

イネ植物のバイオマス量において各処理の相対農学的効率(RAE)を評価したところ、牛糞をリン鉱石と同時施用した場合、化学肥料に比べて高い値を示し、土壌条件によっては、牛糞のみの施用でもイネバイオマス収量に有効に作用することが示された。リン鉱石と同時に施用する有機資材の性質の差異は、その分解や栄養塩溶出、及び土壌溶液中リン濃度に強く影響する。土壌肥沃度の改善及びリン鉱石の溶解においては、リン含量が高くC/N比の低い有機資材が適切である。その意味で、鶏糞や牛糞を含む動物性廃棄物及び人糞や下水汚泥等のリン含量の高い資材が推奨される。しかしながら、これら資材のアクセス性を考慮にいと、賦存量が確認されていること、及び重金属除去等の前処理が不要なことから、鶏糞並びに牛糞が有力な資材であろう。

今年度調査では、リン鉱石可溶化のための技術について検証を行った。堆肥化のプロセスにリン鉱石を加え、微生物活動によって産出される有機酸と熱によってリン鉱石の溶解を図る方法を、昨年度から継続して検証している。リン鉱石可溶化技術として堆肥化過程の利用が有効であることが今年度も示されたが、前回の試験結果と異なる傾向もみられた。特に稲わら堆肥においては、水溶性、遊離性無機態リンともに減少傾向を示し、結果として有効態リン量の減少につながった。前年度試験において、有効態リン量が二次発酵期に増加する傾向を示したのに対し、本年度試験で減少傾向を示した背景には、溶出したリンと堆肥化に伴い生成される低分子有機化合物との吸脱着反応があるものと考えられ、可溶化したリンが堆肥化に伴い有機物によって吸着されることも考慮する必要がある。また、このような有機吸着態リンの土壌環境下における植物可給性を検証する必要もあると思われる。堆肥化のもつ一般的な効果、即ち、リン濃度の増大や有機物のC/N比低下などの肥料効果の増大や、病原菌リスクの低下などの効果が期待できることから、ガーナ稲作において有用な技術であると考えられる。

リン鉱石を高熱処理することによって、その溶解度を大幅に向上することが出来ることは広く知られており、高熱処理したリン肥料は、一般に焼成リン肥料及び熔成リン肥料と呼ばれ化学肥料として利用されている。しかしその温度は1300°Cと非常に高く、ガーナの農家やコミュニティーにとって利用できる技術ではない。そこで今年度調査では、リン鉱石を低温で焼成することで、リン鉱石の溶解度を上げることができかどうか検討した。その結果、300°C程度の温度で焼成することで、植物可給態リン量の指標であるクエン酸抽出リンの量が10 gP/kg程度向上させることができた。また焼成に要する時間は1時間程度で十分であった。これらはマッフル炉を用いた国内実験の結

果であるが、同じ条件をガーナの現地農家で再現できるかどうかはまず鍵となろう。今の段階で最も可能性の高い技術は、オガクズ燻炭化の試験で用いるために日本から現地に持ち込んだステンレス製もみ殻燻炭器である。オガクズを材料にクマシ近郊の土壤研究所で行った燻炭作成の予備試験では、温度は容易に 300°C に達しており、このプロセスの中にリン鉱石を入れれば低温焼成に十分使用できるものと考えられた。もちろん、元々粃殻用に作られた装置であるため、ガーナの稲作地帯に豊富に存在する粃殻でも同様の結果が得られることが期待される。

乾季に乾田となるサバンナ地帯の水田では、裏作物としてリン鉱石の可溶化を促すマメ科等の栽培が可能である。今年度は、on-farm 試験の一環として作期にリン鉱石を施用したプロットを収穫後二つに分け、一方にキマメを植え付け乾季の間栽培することを計画した。しかしながら今季は干ばつが激しく、雨期の終わった10月の時点で土壤水分が著しく少なかったため、作期の長いキマメの乾期作は断念した。作期が短いササゲであれば、残った土壤水分で栽培が可能かも知れない。

播種前の種子や移植前の苗に処理を施すことにより、イネの初期生育を改善しその後の栄養吸収や成長を促進できる可能性がある。そこで種子や苗への前処理技術を検討するためのポット試験を行った。これらの技術は、栽培システムの違いにより適用化を図る必要があり、乾田直播栽培システムと移植栽培システムの両方でそれぞれの技術を検証した。

乾田直播栽培システムでは、1 kg のイネ種子あたり 92 g のリン酸二水素カリウムの粉末をコーティングすることで、リン欠土壤において播種後 40 日後まで、苗の成長が改善された。また移植栽培システムでは、イネの苗を移植前に5%のリン酸二水素カリウム溶液に30分間浸漬する処理により、リン欠土壤において移植後 75 日まで、苗の成長が改善された。これらの技術は安価で実施も容易であり、リン施肥をしていない土壤においてもイネの初期成長を飛躍的に増加させることがわかった。しかし、目指すべきイネの生産、収量レベルに達するためには、作物が生活環を全うできるよう土壤に十分な栄養分が供給されていることが前提となる。

水生シダ植物アカウキクサ(アゾラ)は熱帯の水田の田面に繁茂する雑草であるが、体内にラン藻を共生して空中窒素固定を行うことが知られているため、水田生態系にとって窒素栄養を取り入れるため積極的な緑肥としての活用が考えられている。赤道森林帯クマシ近郊の水田では繁茂が確認されている一方、サバンナ帯タマレ近郊の水田ではあまり見かけない。本調査事業でも、在来資源の一つとして位置付けることが考えられてきたものの、これまで手を付けることができなかった。今年度、クマシ近郊の on-farm 圃場で繁茂しているアゾラをサンプリングし、窒素栄養構造について調査した。

移植期の水田で繁茂しているアゾラは、窒素含有濃度が4%前後と、窒素固定をする陸上マメ科植物に匹敵するほど高かった。またアゾラの窒素源を推察するために必要な情報として体内窒素の安定同位体比 $\delta^{15}\text{N}$ を測定したところ、値は+2~3‰で、空中窒素固定の寄与率が高いことが示唆された。田面水の中に含まれる溶存窒素の $\delta^{15}\text{N}$ を知ることができれば、正確な窒素固定寄与率を算出することができる。ただ、水田生態系全体への寄与率を考察するためには、全体のアゾラのバイオマス量を調査する必要があるだろう。

アゾラの増殖や窒素固定には、リンが不可欠であると言われており、リン欠でアゾラは黄変するという報告もある。人工的な培養試験の結果では、リンの欠乏した環境ではアゾラの増殖はほとんど見られなかった。リンの施用により、アゾラの生育は大幅に改善したが、リン鉱石の施用よりも可溶性リン肥料である重過リン酸石灰施用の効果が大きかった。これは、アゾラにとって有効なリンが培養液中にどれだけ溶け出しているかの違いによると思われる。

社経研究による農家の意識調査は、今年度は調査対象地をノーザン州のみではなく、さらに北にあるアッパーイースト州に広げて実施した。家畜の多い地域であるので、在来資材として家畜糞やそれを材料としたコンポストの利用はすでに実施可能性が高いことが確認された。一方、化学肥料はアクセス性が低いのに対し、受容性は非常に高く、農家の関心を反映したものと考えられる。稲わらに対しては、直接施用の受容性が低く、圃場試験で見られたイネ収量への高い増収効果とは裏腹の結果となった。リン鉱石に対しては、初めて見る資材ではあるが、試してみたいという声も多かった。今年度予定していた赤道森林帯の農家を対象にした社経調査は実施できなかった。

(3) 次年度計画への提案

技術の開発と実証

- 次年度に調査検討する技術は以下を考えている。日本国内の試験でこれまで検討してきた技術は、有望なものを現地での実証試験に移して実施する。このため、日本での調査活動は、土壌や植物の分析と結果解析が主となると思われる。

技術	想定する稲作生態系	
	北部サバンナ帯	中南部赤道森林帯
有機物施用	稲わら直接施用と化肥との併用を中心、On-farmでも展開	On-stationの試験を継続し、技術を絞り込み
リン鉱石直接施用	再現性のため試験継続、On-farm 圃場拡大	
リン鉱石残効	再現性のため試験継続（今季の on-farm 圃場を利用）、圃場ごとの残効の違いを説明するための栽培環境比較（水分環境）	収穫後に、施用したリンが残っていない結果を再確認（今季の on-farm 圃場を利用）
有機物＋リン鉱石同時施用（リン、窒素、栄養塩類など含む総合的な肥沃度改善技術として検討）	牛糞＋リン鉱石	鶏糞＋リン鉱石
低温焼成によるリン鉱石可溶化技術	籾殻燻炭作成時、焼成技術も含め on-farm で実施	オガクズ燻炭作成時、焼成技術も含め on-farm で実施
堆肥化過程を利用したリン鉱石可溶化技術	今後の検討は行わない、これまでの試験結果は報文としてまとめる	
乾季植物によるリン鉱石可溶化技術	キマメを使った今季の試験が実施できず、今後ササゲで検討する（国内ポット試験）	
種子、苗の前処理	肥料粉末コーティングをした種子を乾田直播	苗への肥料溶液の浸漬後に水田移植
アゾラ		バイオマス量と環境の関連調査

- 北部サバンナ帯での試験には開発研究大学と、中南部赤道森林帯での試験には土壌研究所と、それぞれの協力関係を築きながら実施する。

社経研究

- ◇ 社経調査は、サバンナ帯では引き続き開発研究大学の研究者に担当して実施するが、今年度実施できなかった費用便益分析(cost/benefit analysis)に向けた活動も早々に開始する。
- ◇ 赤道森林帯においては、土壌研究所に適切な社経研究者がいなかったためこれまで行われてこなかったが、このたびクマシ近郊のカカオ研究所に良いカウンターパートを見出したので、次年度より社経調査を実施する。

普及機関との連携

- ◇ ガーナ国の農業技術普及機関との関係を構築する。食糧農業省(MOFA)の州あるいは郡レベルの出先単位で、普及員との連携が図れるように努める。関係構築にあたっては、先行している農水省補助金「条件整備」プロとその後継、JICAの「持続的天水稲作」技プロの協力を仰ぐとともに、委託元の本省国際協力課からも働きかけをお願いする。
- ◇ 普及機関との連携を図るため、ガーナ国内でWSを開催する。

技術マニュアル作成への道筋

- マニュアルのアイデア出し、目次作りをカウンターパート機関並びにMOFAと協力しながら実施する。
- 農水省補助金「条件整備」プロで作成したマニュアルに、本調査事業で得られた知見を盛り込む作業を開始する。

宣伝・広報関連

- ◇ 再来年度のTICAD Vを見据え、本事業の宣伝に努める。イベント等にも積極的に参加する。
- ◇ 本省国際協力課の宣伝・広報活動に協力する。

