

称号及び氏名	博士（緑地環境科学）	廣内 慎司
学位授与の日付	平成28年8月31日	
論文名	持続可能な灌漑稲作に資する西アフリカで利用可能な 低コスト水路保護対策に関する研究 ーガーナ国における低湿地水田を事例としてー	
論文審査委員	主査	堀野 治彦
	副査	藤原 宣夫
	副査	山田 宏之
	副査	中桐 貴生

論文要旨

第1章 緒論

日本では国民一人あたりのコメの消費量は1962年をピークに、50年で約半分になっている。しかし、世界的にはコメの一人あたり年間消費量は増加傾向にあり、特にアフリカでは近年その伸びが著しく、生産量も伸びているが消費量に追いついておらず、近年輸入量が拡大している。このため、「アフリカ稲作振興のための共同体 (CARD)」は、アフリカにおけるコメ生産を2017年までの10年間で倍増することを目標として掲げている。

現在西アフリカでコメが栽培されている低地は約170万haあり、そのうち灌漑が行われているのは48万haほどで、残りは天水低地である。すなわち、100万ha以上の天水田が灌漑水田に転換されるポテンシャルを有している。アフリカにおいてコメ生産の倍増を実現するには、この低湿地において効率的で持続的な灌漑稲作を行うことが重要となる。

持続的な灌漑稲作を行うためには、用排水路等の水利施設の機能が維持される必要があるが、流水や雨滴による侵食によりその機能が低下している。農家自らが維持管理を行い施設の持続性を高めるには、農民による施設の建造や補修および維持管理に関わる障壁を排除することが求められる。

以上の背景から、ガーナの低湿地を事例として、広く西アフリカへの普及が期待

される「農民自らの技術で造成かつ持続的な維持管理が可能な」低コスト水利施設の開発・提案を行うことを研究目的とした。

第2章 ガーナ国における水利施設の現状

本章では、まず研究対象としたガーナの一般社会情勢と水文環境について整理し、水稻栽培の展望を概観した。続いて、水路保護対策を検討するにあたっては、最初に農家レベルで整備した水田水利施設（土水路や畦畔）の維持管理状況について把握する必要があることから、その管理実態を調査した。その結果以下のことがわかった。1) 水田開発を行ったサイトのモニタリングにより、整備から4年後に天水田に戻っている場合が見られる。2) 維持管理状況から土水路の年間維持管理費は0.1～2.1GHS（4～77円、2015年）である。

また維持管理を行う上では、水路の機能低下状況の把握も重要となる。機能低下は粗度係数により判断ができる。しかし、土水路は通常路床に泥が溜まっており、粗度係数を求めるために必要な動水勾配を計測することは困難であった。このため、レーザー距離計を利用して水面を非接触で直接計測することを考えた。一般に、レーザーは鉛直方向に照射すると水面までの距離を正確に捉えることができない。そこで、ペットボトルと発泡スチロールを組み合わせることにより簡易に水面距離を計測する方法を工夫した。本方法はローテーティングレーザーを組み合わせることにより一人でも計測が可能となる。これにより土水路が供用開始後にどのように劣化が進行していくのか簡易に把握できる。

第3章 水路保護対策

天水田を灌漑水田に転換する際には、畦と水路、取水施設の整備が必要である。本研究では灌漑水田において劣化対策が優先される水路を取り扱った。このなかでも、農家が建設可能な技術を用いた水路という観点から、土水路を対象施設とした。

土水路の機能低下の対策を検討するにあたって、土水路の現況を踏査し、その問題点を明らかにした。この結果、土水路は断面の崩落や堆砂により通水機能が低下すること、水路肩に亀裂が発生し崩壊するという過程が少なくないこと、調査水路では侵食により1年未満で水路幅が20cm広がることがわかった。

これらを踏まえ、本研究では水路壁面の侵食・崩壊対策を中心に検討することとした。例えば、既往の技術である水路側壁を直接強化する現場打ち水路、二次製品水路、マグホワイトは初期費用が高く途上国の農家が容易に導入できるものではない。一方、木柵や被覆植物を利用した壁面保護対策も研究されているが、木柵は水路に水が流れない時期にシロアリの被害を受け、被覆植物は流水に弱いことから、いずれも特に「用水路」の保護には向いていない。このため、現地で容易に入手可能な原料であるラテライトを用いたブロック（レンガ）による保護対策が最も現実的と判断し検討を行うことにした。

ラテライトブロックは、何も処理を行わなければ水に漬けると容易に崩壊する。このため、ブロックを水路補強材として利用するためには、浸漬しても崩壊しないこと（静的耐侵食性）と、水の流れによる侵食が少ないこと（動的耐侵食性）の二

種類の性能が要求される。静的・動的耐侵食性を向上させる方策として、ラテライトに対して①もともとある結合力の強化、②粒子間を結びつける材料の投入、③焼結による結合力の強化、④撥水による結合の維持の4つについて効果の検証を試みることにした。

第4章 かまどを用いた原料の作成

前章で述べた耐侵食性強化策の一つである、粒子間を結びつける硬化剤の投入について、その材料として農家が比較的入手しやすいと思われるカルシウムを取り上げた。カルシウムは材料として利用するにあたり酸化カルシウムの形態である必要があるがガーナでは市中で購入することはできない。一方、炭酸カルシウムは貝殻としてガーナでは容易に入手できるため、そこから酸化カルシウムを生成することとした。炭酸カルシウムは、熱を加えることにより二酸化炭素を解離して酸化カルシウムを生成するが、その温度は、燃焼している周辺環境の二酸化炭素の分圧により変化する。空気中で燃焼させる野焼きの場合、酸化カルシウムの生成温度は約800°Cが求められる。慣行の野焼きで得られる温度は300°C程度であり、酸化カルシウムが生成できないため、1) 燃焼時の二酸化炭素の分圧を下げる、2) かまどを利用して燃焼温度を上げる、の対策を検討した。

二酸化炭素の分圧を下げる方法として、燃焼時に発生する二酸化炭素を吸着させる物質（活性炭）を原料に混ぜることを考えた。しかし、炭酸カルシウムの反応温度に達する前に活性炭が燃焼してしまい（580°C程度）、解離温度を下げることはできなかった。

次に、かまどを利用した燃焼温度増強法として、地上にかまどを設置するタイプ（地上型）と地面を掘削してかまどを地中に埋める方式（地下型）を実地検証した。また地上型は上部を金属の波板で覆う形式（波板型）と素焼きブロックでドーム状に覆う形式（ドーム型）を個別に検討した。試験を行った結果、ドーム型では800°C前後の温度が約2時間継続した。一方、地下型、波板型は600°C程度までしか上昇しなかった。このことから、ドーム型かまどを利用することにより所期の温度が確保できることが確認された。

また、貝殻は一度500°C程度で燃焼させ、構造が脆くなった段階で再度細かく砕き、900°Cで燃焼させるという二段階燃焼を行うことにより効率的に酸化カルシウムが生成できることもわかった。今回試験のために作製したかまどのコストは71~111GHS（3,500~5,500円、2012年）/基程度となった。これはセメント5袋程度のコストに相当する。

第5章 供試体を用いた水路保護対策の評価

第3章で示したラテライトブロックの耐侵食性向上対策の評価のため、直径5cm、厚さ2cmの供試体を作成し、一定期間養生を行ったのち、一軸圧縮強度試験、静的耐侵食性試験（乾湿繰り返しに対する耐性）、動的耐侵食性試験（流水による侵食耐性）を行った。

元来の結合力強化としては、構成粒子サイズの影響（小さいほど結合力が向上）を

考慮するため、露頭由来ラテライト、蟻塚由来ラテライト、露頭由来粉碎処理ラテライトの3種による供試体を準備した。

粒子間結合強化剤としては、第4章で述べた貝殻のほか、農家が安価で容易に入手できるものとしてカカオの外皮、パームの花托、稲藁、もみ殻を第一候補とした。これら原料を電気炉で燃焼（900℃以上）させて灰にし XRF 分析を行った結果、貝殻、カカオの外皮、パームの花托は添加剤に適したマグネシウムやカルシウム含有量が多いことが示され、これらを添加した供試体を試用することとした。

焼結供試体は、予め十分乾燥させた（一週間程度の風乾）のち 500℃以上で 30 分間加熱し作成した。露頭由来ラテライトはすべて無難に焼き上がったが、蟻塚由来は 9 個中 7 個が割れてしまった。このことから後者は焼結に不向きと判断され供試体からは除外した。

最後に撥水供試体は、パームオイル（現地の市場で容易に入手可能、主に料理用として販売）を塗布もしくは混入することにより作成した。

上記供試体試験の結果、次のことがわかった。1) ラテライトに貝灰（酸化カルシウム）やパーム花托灰を混ぜることにより静的耐侵食性が向上する。2) ラテライトに撥水加工を行うことにより、静的耐侵食性が向上する。3) ラテライトは低温（500℃）で加熱することにより静的耐侵食性が向上する。4) 静的耐侵食性が認められる対策は同時にほぼ動的耐侵食性も認められる。5) ブロックの耐侵食性と一軸圧縮強度には明確な関係はない。

農家による利用という観点から、コストの比較も行った。この結果、ブロックの耐用年数が3年以上であれば、土水路の維持管理とほぼ同額となり本技術を導入することにより水利施設の持続性が高まることが期待される。

第6章 結論

アフリカにおけるコメの増産は、当事国だけでなく国際的な地域の政情安定や食料安全保障上、我が国にとっても重要な戦略である。水利施設が持続的に機能する灌漑稲作がコメの増産に果たす役割は大きい。このため本研究では、ガーナにおいて、農民が造成・維持管理を行える低コスト水利施設の開発を行うことに取り組んだ。水利施設の中でも灌漑に重要な役割を果たす水路に着目し、現地で容易に入手可能な原料用いたラテライトブロックによる水路保護対策について検討を行った。

その結果、ラテライトに貝殻、植物の燃焼灰を混ぜる、低温で焼く、オイルを混ぜるなどの処理によりブロックが水流に対して耐侵食性が発揮されることを実証した。このとき、硬化剤に適した酸化カルシウムを多量に含む貝殻灰を生成するには、農家でも作成可能なドーム型かまどを利用することが有効であることがわかった。また、水路の通水機能を評価するための簡易な動水勾配測定法も提案できた。こうした本研究の成果は工学的な見地や何より実効性のある見地から有用と思われる。

審査結果の要旨

アフリカではコメの一人あたり年間消費量は増加傾向にあり、生産量も伸びているが消費量に追いついておらず、近年輸入量が拡大している。このため、「アフリカ稲作振興のための共同体 (CARD)」は、アフリカにおけるコメ生産を10年間で倍増することを目標として掲げている。アフリカにおいてコメ生産の倍増を実現するには、効率的で持続的な灌漑稲作を行うことが重要となる。

このためには、用排水路等、水利施設の機能増進・維持が求められるが、流水や雨滴による侵食によりその機能が劣化している。そこで本研究では、ガーナ国を対象として持続可能な灌漑稲作に資する、広くアフリカに普及する「農民自らの技術で造成が可能で、かつ持続的に維持管理が可能な」低コスト水利施設の開発を行うことに取り組んだ。水利施設の中でも灌漑に重要な役割を果たす水路に着目し、現地で容易に入手可能な原料であるラテライトや貝殻、作物残滓の燃焼灰などを用いた水路保護対策について実証的に検討を行った。本論文は6章から構成される。第1章では研究の背景と目的について触れており、主となる成果は第2章から第5章において以下のように整理している。

第2章ではガーナ国における水利施設の現状把握として、供用開始後の土水路の劣化進行の様子や圃場基盤の変遷を形態分類するとともに、劣化の重要な評価尺度となる水路の粗度係数を省力的に計測する新しい方法を提案し同係数の確認を行っている。

第3章では、水路保護対策の一步として、まず事例水田域の土水路診断から問題点が抽出された。その結果、土水路は壁面の侵食や堆砂により粗度係数が増大し通水機能が低下すること、水路肩が亀裂崩壊する過程も少なくないこと、調査水路では侵食により局所的に1年未満で幅員が20cm広がることがわかった。続いて、ラテライトを用いたブロックを水路に設置することによる水路の侵食抑制について検討している。ラテライトブロックは、何も処理を行わなければ水の浸漬時に容易に崩壊する。このため、ブロックの耐侵食性向上対策法として、①もともとある結合力の強化、②粒子間を結びつける材料の投入、③焼結による結合力の強化、④撥水による結合の維持の4種が提案された。

第4章では、ブロック強化に向けた材料の作成・準備として、耐侵食性を強化する原料の1つである酸化カルシウムを、現地で容易に入手可能な貝殻(炭酸カルシウム)とかまどを用いて生成する方法について検討している。この結果、まず、かまどの構造としてその天端をブロックでドーム状に覆うことにより、酸化カルシウムの生成に必要な800℃以上の環境が得られることが示された。また、貝殻は一度500℃程度で燃焼させた後、構造が脆くなった段階で再度粉碎しより高温で燃焼させるという二段階燃焼を行うことにより、効率的な酸化カルシウムの生成が可能となることもわかった。なお、作製したかまどのコストはセメント5袋程度に相当し、農家の過大な負担とはならないことを確認している。

第5章では、第3章で提案したブロックに耐侵食性を持たせるための各種対策に

ついて、供試体を用いて静的耐侵食性試験（静水状態における乾湿繰り返し崩壊レオロジー試験）と動的耐侵食性試験（流水環境下における耐侵食性評価）を行うとともに、耐侵食性と供試体の一軸圧縮強度の関係について検討している。その結果、次のことが明らかにされた。1) ラテライトに貝灰やパーム花托灰を混入すると静的耐侵食性が向上する（燃焼灰の XRF 分析から添加剤に適したマグネシウム、カルシウムの高含有も確認）。2) ラテライトに撥水加工を行うことで静的耐侵食性が向上する。3) ラテライトは低温（500°C）で加熱するだけでも静的耐侵食性が向上する。4) 静的耐侵食性が認められる対策は同時にほぼ動的耐侵食性も認められる。5) ブロックの耐侵食性と一軸圧縮強度には明確な関係はない。

最後に第6章では、結論として本研究のとりまとめを行うとともに、今後の施工時に予見される現地での課題を整理している。

本研究では、ガーナ国を事例に、農民が自ら造成・維持管理を行える灌漑稲作向けの水路整備に取り組んだ。すなわち、コスト、労力、技術力などを念頭に置き、現地でも対応可能なラテライトブロックによる水路保護対策について検討を行ったものである。アフリカにおけるコメの増産は、当事国だけでなく国際的な地域の政情安定や食料安全保障上、世界的にも重要な戦略である。本研究は、そのための基盤整備に重要な工学的、技術的証左を与えるものであり、緑地環境科学の発展にも寄与すると考えられる。また、応用科学に課せられた役割を果たした一例といえる。したがって、本論文の審査ならびに最終試験の結果と合わせて、博士（緑地環境科学）の学位を授与することを適当と認める。