

# 乾燥地の土壌流出抑制と食料増産を可能にする 多機能集水技術の開発

青森県立名久井農業高等学校 Treasure Hunters

## 1. はじめに

アフリカなどの半乾燥地は年間降雨量が1,000mm前後と少ない。特に西アフリカのブルキナファソ周辺(図1)では約600~1,200mmと少なく、作物栽培用の水の確保が大きな課題となっている。また干ばつによる砂漠化や土壌養分の欠乏などの土壌劣化、降雨による土壌浸食が進んでおり、住民の食料と安定した暮らしが脅かされている。

そこで西アフリカではザイ(Zai)や半月工(Half-moon)という雨水を集める技術(図2)が生まれた。ザ

イは11~2月の乾季、圃場に直径、深さとも約30cmの穴をあけ、雨季の流去水を穴の淵に盛った土で受け止めて集水する伝統農法である。半月工は直径4mの大型ザイを半円にしたもので3万haの農地で取り入れられている。レインウォーターハーベスティングと呼ばれるこの技術は、半乾燥地においてとても重要な農業技術である。しかしザイも半月工も盛土の構造物であり、流去水により次第に崩壊する。流去水で運ばれた土砂は水源に流れ込むため、池沼の水深が浅くなり氾濫しやすくなる。またこれらの技術は集水できても土壌の養分不足を解消する機能はないため、食料増産に繋がらない。コンクリート構造物やビニールシートである程度の対策はできるが、コストやマイクロプラスチックの発生原因にもなるため普及は難しい。

そこで私たちは日本伝統の三和土(たたき)に着目した。三和土は土に砂、消石灰、にがり(塩化マグネシウム)に水を混ぜこねることで土壌を固化させる日本の土木技術で、寺社や日本家屋の土間に用いられている。簡単に施工できるうえに、土に戻るため環境への影響が小さいことから三和土技術を応用して耐久力、集水力、土壌流出抑制、土壌への養分供給などたくさんの機能を併せ持つ新たなザイの開発に取り組むことにした。



図1 ブルキナファソの位置



図2 左:ザイ(Zai) 右:半月工(Half-moon)

## 2. 研究方法

### (1) 土壌の固化実験

アフリカの土壌は主に砂質土と粘質土、そして中間の砂質粘土に分類できる。そこでこれらの土壌で三和土ができるか実験した。私たちが再現したアフリカ土壌の配合は次のとおりである。

ア: 砂質土 = 砂40% + シリカ20% + 真砂土20%  
+ ピートモス20%

イ: 粘質土 = シリカ50% + カオリナイト30%  
+ ピートモス20%

ウ: 砂質粘土 = 真砂土80% + ピートモス20%

西アフリカの土壌はpH5.0前後と酸性のため、ピートモスを加えpHを5.0前後に調整した。製作した3種類の土1に対して消石灰0.5、砂0.5、塩化マグネシウム0.08を加えてよく混ぜ、握ると固まるようになるまでpH7.4の蒸留水を添加する。それを木製の枡に詰めたら表面を叩いてなじませ、1週間放置し固化したら完成とした。なおブルキナファソの土壌分布図を調べると、砂質粘土系統の土壌が多いことがわかる。よって今後の三和土は真砂土をベースにした土で作成することにした。

### (2) 三和土の硬度

脆い三和土では利用できない。またコンクリートのようには強固では取り除きにくい。そこで製作50日後、硬度をEnhong社のデジタル硬度計（ビッカース硬度）で測定した。

### (3) 三和土のデザインと集水力

ザイの盛り土は流去水を受け止めるため、穴の谷側に半円状に設置される。(図3) しかし土のため流去水によって次第に崩壊し、谷側に流される。そこで私たちは盛り土部分を三和土加工すると耐久性が高まり、形も自由にデザインできると考えた。そこでどのようなデザインだと水を集めやすいのかモデルを製作して実験した。

試したのは現地で使われている穴を開けただけのザイ(図4) と半円の盛り土を持つ一般的なザイの他に、穴の円周の半分の長さの羽根(ウイング)を90度、120度、180度で広げたショートウイング区(図5)、そ

してショートウイングの1.5倍の長さの羽根を持ったロングウイング区である。これを傾斜角10度にした幅20cm、長さ600cmの発泡スチロール板に設置し、斜面上方から200mlの水を散水し、穴に集めた水量平均を集水量とした。なおモデルのザイの羽根は、板鉛を切り出して成形した。

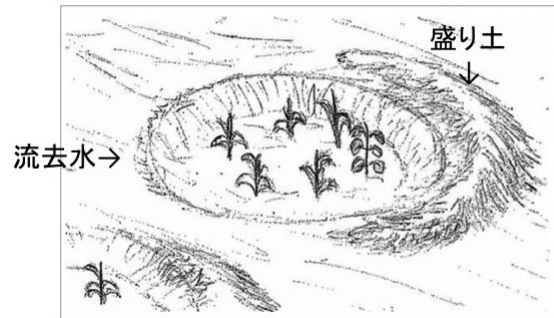


図3 一般的な盛り土のザイ



図4 穴だけのザイ

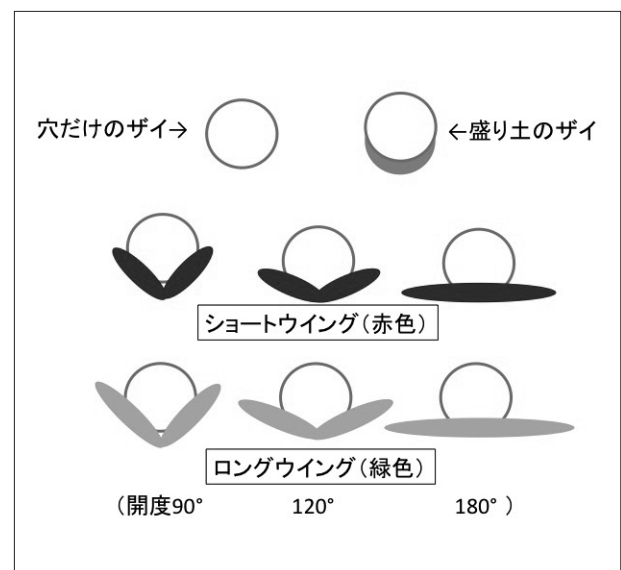


図5 考案したザイのデザイン

#### (4) ザイのレイアウト

現地でザイは50cm~100cmの間隔で設置される。新しいザイは耐久性があり自由に設置できる。そこでより効果的なレイアウトデザインを探ることにした。まず発泡スチロール箱に真砂土充填し、事前に水3,000ml散布し含水量をほぼ飽和状態にしておく。その土壤の上に一般的な盛り土のザイとウイングを持ったザイ模型を設置する。また水を受けるウイングは穴に対して直角に立てた壁型、流線型の断面を持つ流線型の2種類を用意した(図6)。さらにショートウイングを従来のように間隔を開けて設置した区とロングウイングを詰めて設置する区を設けた(図7)。散水量は1,500mlで、事前の3,000mlを加えると降水量は45mm/hに相当する。

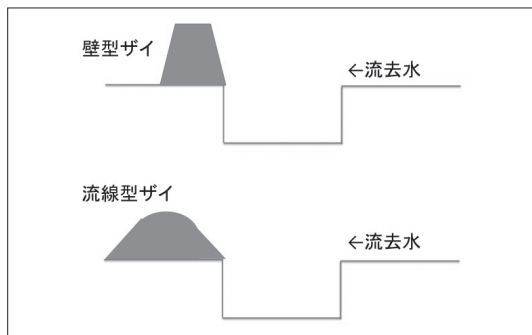


図6 考案したザイの断面図



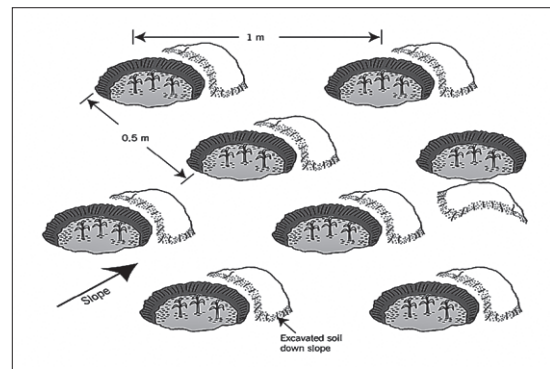
壁型



流線型ショートウイング



同ロングウイング



現地のザイのレイアウト

図7 ザイのレイアウト

#### (5) 三和土透過水の分析

三和土は屋外に設置するため降雨によってさまざまな物質が溶け出す。これを利用すると固形肥料のように土壤に栄養分を供給できる可能性がある。そこで各種三和土を製作して散水し、透過水を分析した。製作する三和土は5種類として(表1)、底に穴の開いた木製の柵に厚さ2.5cmで充填する。1週間後固化したら、170mlの蒸留水を流し込み、穴からしみ出た透過水を集水した。分析は共立理化学研究所の吸光度計を用いた。

一般的な土間に用いる三和土の配合をControlとした。この他に強度が増す藁を加えた区、さらに藁と発酵牛糞堆肥を加えた区、藁と発酵牛糞堆肥を加え消石灰の代わりに草木灰を使った区、藁と発酵牛糞堆肥を加え草木灰と消石灰を半分ずつ混合した5区とした。またControl他2区(●印)は、屋外にザイの形にして放置し、7週間後と13週間後に成分の変化を測定した。なお三和土に加えた藁、発酵牛糞堆肥、草木灰の成分は表の通りである(表2)。

表1 試験区と三和土の配合(蒸留水は除く)

区	真砂土 ml	砂 ml	石灰 ml	草木灰 ml	塩化マグネシウム ml	発酵牛糞堆肥 ml	藁 g
Control●	60	30	30		5		
+藁	60	30	30		5		1.6
+藁+堆肥●	60	30	30		5	20	1.6
+藁+堆肥+草木灰●	60	30	30	30	5	20	1.6
+藁+堆肥+1/2草木灰	60	30	15	15	5	20	1.6

表2 藁、発酵牛糞堆肥、草木灰の成分

	pH	EC (mS/cm)	NH <sub>4</sub> -N (%)	PO <sub>4</sub> -P (%)	K (%)
藁	7.2	0.94	0.96	1.46	2.4
発酵牛糞堆肥	7.2	2.44	1.8	2.5	-
草木灰	10.2	4.0以上	0.4	11.3	3.9

## (6) 土壌透過水の分析

西アフリカの土壌はpH5.0前後と酸性である。そこで三和土を透過して地面に染み込んだ水が、土壌のpHとECにどのような影響を与えるか調査する。土壌は真砂土とし、真砂土80%にピートモス20%を加えてpH4.5~5.0の酸性土を製作した。土を500mlのペットボトルに200ml(深さ約10cm)充填し、その上に各三和土を厚さ2cmで施す。そこに蒸留水を170ml注ぎその透過水を採水する(図8)。試験区は(4)の三和土透過水の分析に用いた5区と三和土を施さない真砂土だけの6区とした。

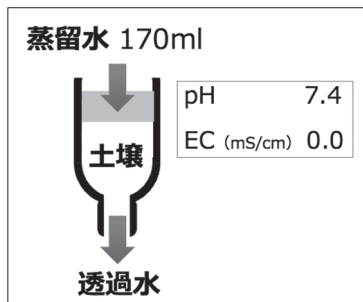


図8 透過水の実験方法

## (7) 圃場試験

圃場に新型のサイを設置して栽培試験を行う。まず圃場に直径、深さとも約30cmの穴をあけ中に発酵牛糞堆肥200ml(80g)と藁8gを入れ、土を上半分もどす。その穴の淵にウイングを設置する。ウイングはロングウイング120度タイプとした。大量に作るため、土にショベルでサイの型を作り、そこに水で練った三和土を入れ1週間放置して固化させた。その後、3週間以上空気で中和させて設置した(図9)。作物はアフリカでタンパク源となっているインゲンマメと主食であるト

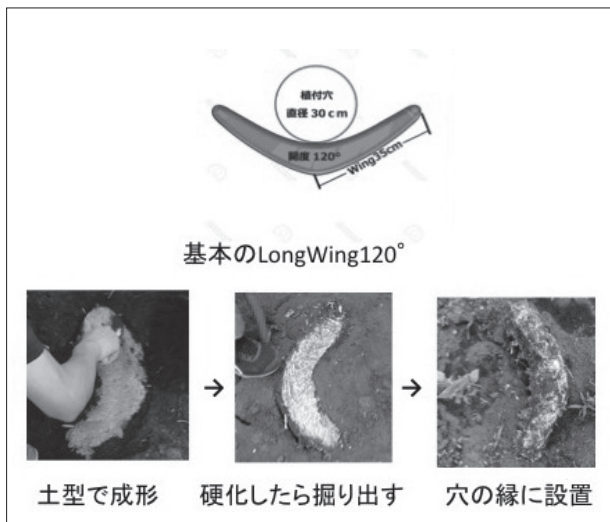


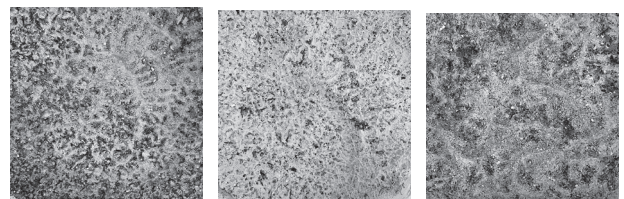
図9 サイの作り方

ウモロコシとし、生育や収量を調査した。試験区は従来の盛り土のサイ区、藁を加えた三和土サイ区、消石灰の代わりに草木灰を用いさらに堆肥と藁を加えたサイ区とした。

## 3. 結果と考察

### (1) 土壌の硬化実験

砂質土、粘質土、砂質粘土とも3日前後で硬化した(図10)。これによりどんな地域でも三和土加工できることがわかった。また製作後、ハンマーで叩くとすぐ破砕できるため、除去やリサイクルが容易であることもわかった。



左から砂質土、粘質土、砂質粘土の三和土  
図10 三和土の表面

### (2) 三和土の硬度

三和土表面のビッカース硬度を測定したところ、10度以上(アルミニウムが約15度)だった。しかし消石灰の量を半分に減らすと脆くなることがわかった。これは気硬反応に必要なアルカリ成分が半減したからだと考えられる。また草木灰は消石灰よりやや強度は下がるが、それでも12.5度と十分な硬さがあった。コンクリートより脆いが、穴周辺に設置するだけなので十分消石灰の代替となることがわかった。さらに消石灰を用いて製作した三和土を50日後に5~10mmに粉砕したものを砂代わりに使ったりサクル三和土も、硬度15度以上で十分な実用的な強度となることがわかった(図11)。

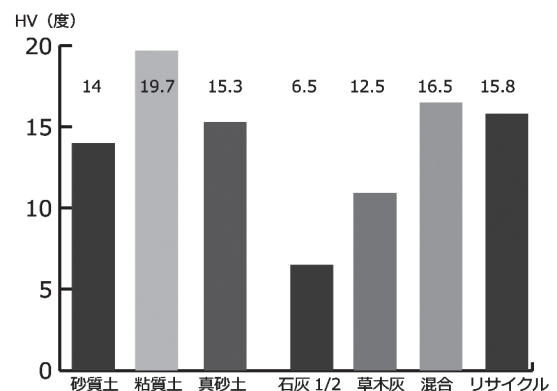


図11 三和土の強度

### (3) 三和土のデザインと集水力

現地で利用されている穴だけのザイや半円状の盛り土をしたザイよりも、ウイングがあると集水力が高まることがわかった。ウイングは長い方がより水を集めることができ、開度は120度が効果的だった。特にロングウイングを120度で設置すると雨水を従来の3倍も集めることができた (図12-13)。

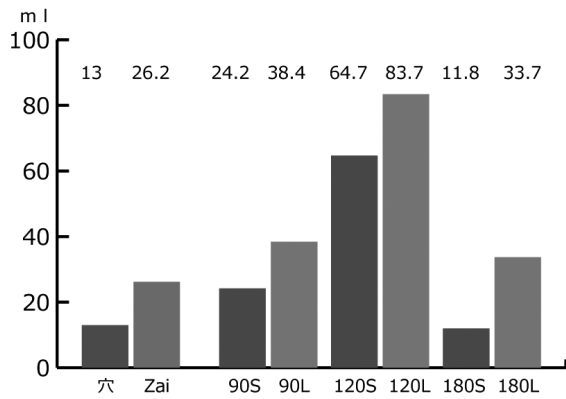
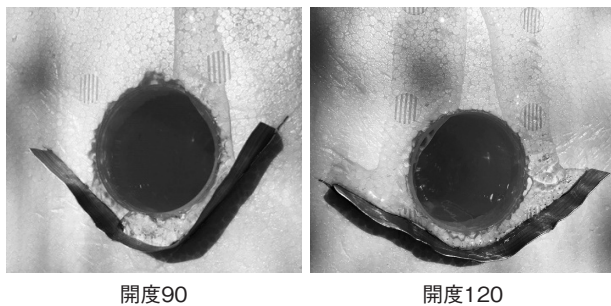


図12 集水量の比較



開度90

開度120



実験の様子

図13 集水量の比較実験

### (4) ザイのレイアウト

設置したザイを通過して谷側に流れた水の量はいずれの区も1,300~1,400mlと大差はなかった (図14)。しかし流出土壌量は断面が流線型のウイングが少なかった。特に流線型のロングウイングを隙間なく並べると極めて少なかった (図15)。これは従来のザイの20%でしかない。実験後、土壌表面を観察したところ従来

のザイでは穴の痕跡はほぼ無くなっていた。また壁型ではウイング後方の土壌が大きくえぐれている場所がたくさん確認された (図16)。おそらく壁を超えた水が渦を巻いて地面を掘り、土壌流出を加速させたものと考えられる。しかし流線型のウイングでは水をスムーズに後方に流し、土壌流出を抑えたと考えられる。ザイは圃場に設置されるので谷側に水を供給することも大切である。以上の結果から、流線型のロングウイングを隙間なくレイアウトすると土壌をせき止める堤の機能を発揮でき効果的だとわかった。ただし地形、コストや労力に応じて間隔を開けて設置しても、従来より土壌流出抑制効果が大きいので、現地の状況に応じて自在に選択できると考えられる。

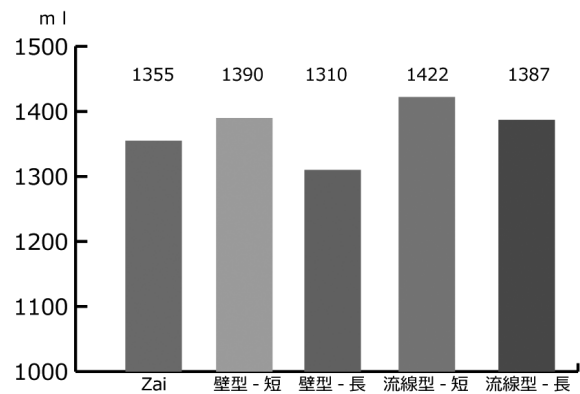


図14 流量の比較

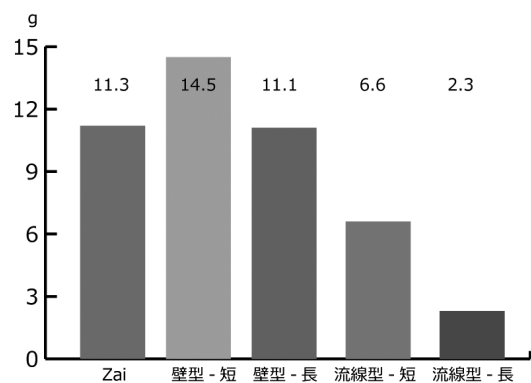
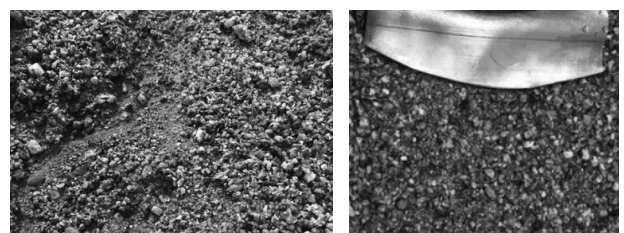


図15 土壌流出量の比較



左は壁型の後方にできた流出痕、右の流線型にはない

図16 土壌流出実験

### (5) 三和土透過水の分析

柁に充填した三和土に固化後、蒸留水170mlを流し込み透過水を分析した。また製作後、屋外に羽根形で放置し、7週間後と13週間後にも同じ測定を行い、成分の変化を調査した。

注いだ水が透過するまでの時間はどの区も15秒以内で、三和土は優れた透水性があることがわかった(図17)。またpHは製作1週間後では消石灰を入れた区でpH8.0~9.5とアルカリ性であったが、7週間後はどの区も中性となった(図18)。これはコンクリートでいう中和という作用で、空気中の二酸化炭素により中性になったものと考えられる。これにより三和土を設置しても、植物への影響はないと考えられる。またECは13週間経過しても藁や堆肥を入れた区で多いまだだった(図19)。有機物から栄養分が長期間にしみ出ていると考えられる。

アンモニア態窒素(図20)も硝酸態窒素(図21)も13週間経っても藁と堆肥を入れた区で多いまだだった。これはEC同様、三和土の中の藁や堆肥が微生物に

よって徐々に分解され、三和土から流出していると考えられる。またリン酸態リンについては13週間後も草木灰区で多かった(図22)。そもそも草木灰はリン酸含有量が多い。したがって消石灰の代わりに草木灰を用いることで、西アフリカ土壌で欠乏しているリン酸を供給できることがわかった。このように三和土の肥効は長期間効果が持続する緩効性肥料的機能があつた。これはアフリカで農業を行う際とても有意義だと考えられる。

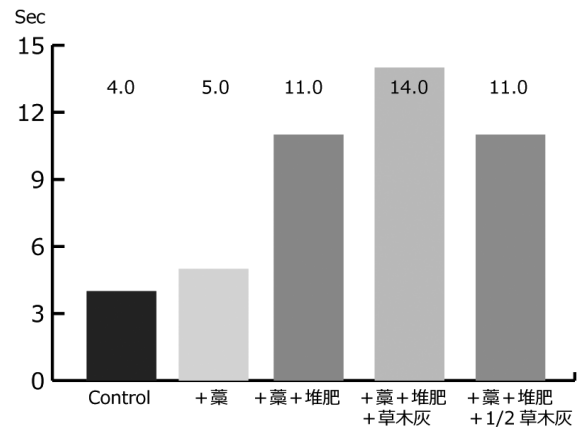


図17 透水開始までの時間(製作1週間後)

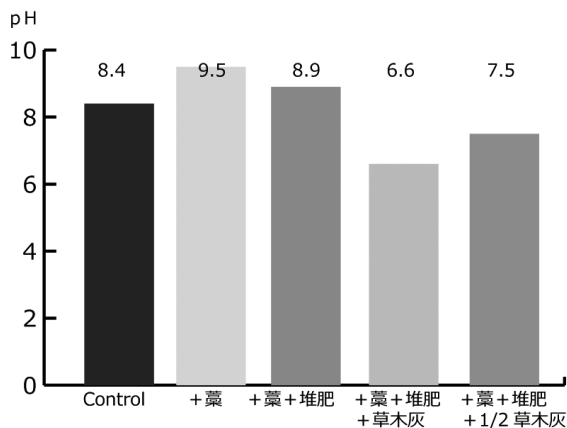


図18-1 透過水のpH(1週間後)

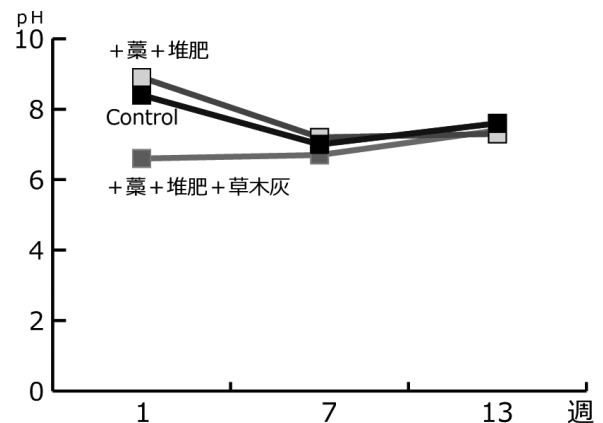


図18-2 透過水のpHの推移

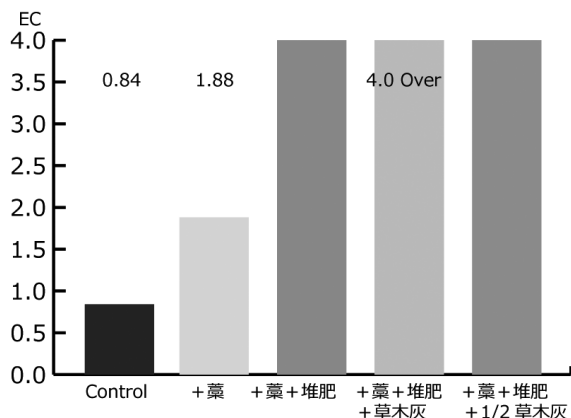


図19-1 透過水のEC(1週間後)

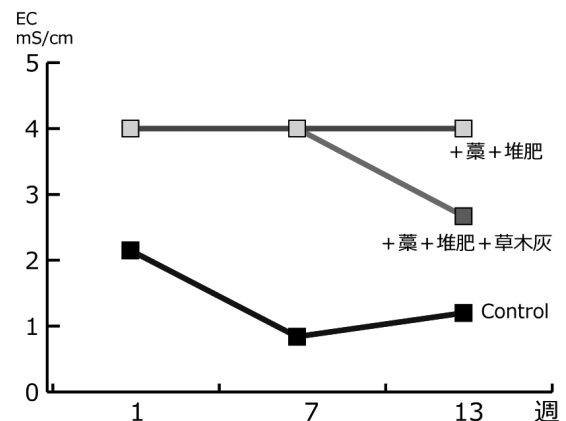


図19-2 透過水のECの推移

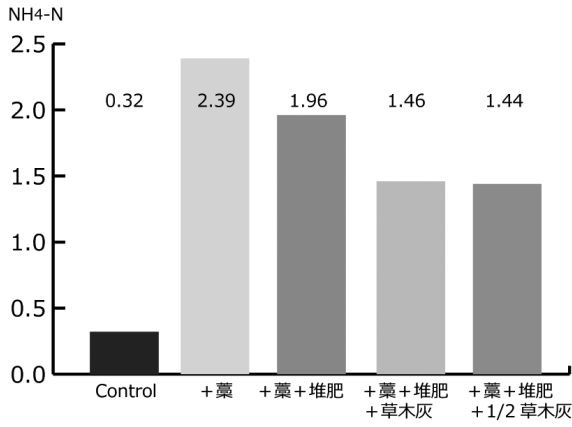


図20-1 透過水のアンモニア態窒素 (1週間後)

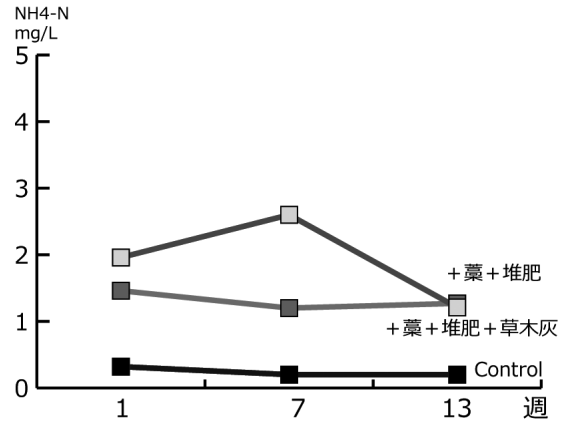


図20-2 透過水のアンモニア態窒素の推移

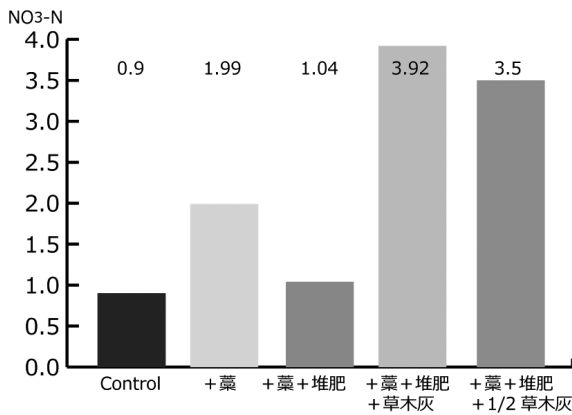


図21-1 透過水の硝酸態窒素 (1週間後)

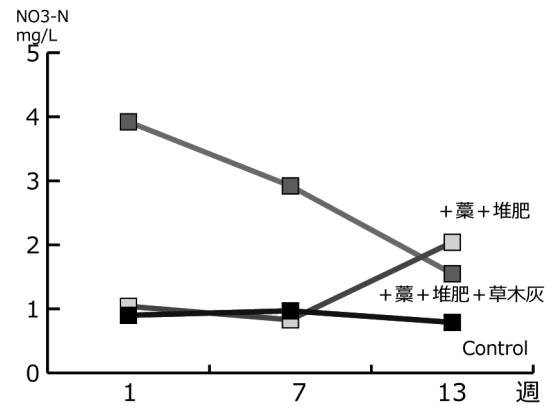


図21-2 透過水の硝酸態窒素の推移

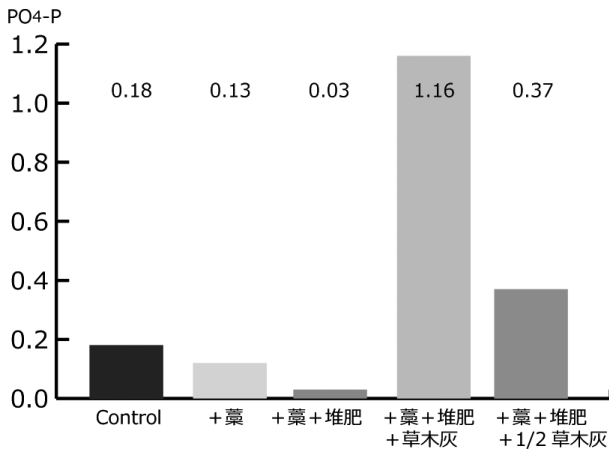


図22-1 透過水のリン酸態リン (1週間後)

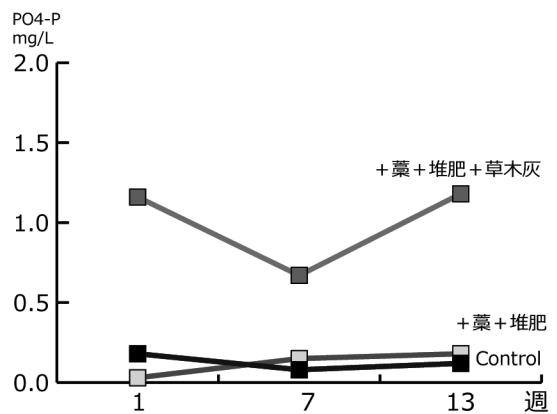


図22-2 透過水のリン酸態リンの推移

## (6) 土壌透過水の分析

三和土を施さなかった土壌の透過水はpH4.4と酸性だったが、製作1週間後の三和土を施した区は6.5～7.1と中性になった(図23)。これは消石灰や草木灰のアルカリ成分により中和されたと考える。これにより酸性土壌の多い西アフリカでは、製作後すぐ使うと、固形の土壌改良剤としても活用できると考えられる。また

ECでは堆肥を加えた区で多くなった(図24)。肥料分が土中まで浸透していると考えられる。

## (7) 圃場試験

三和土を製作して2週間中和させたらザイに設置し、インゲンマメとトウモロコシの苗を6月11日に定植した。そして最も早く収穫適期を迎えた区の収穫に合わせて

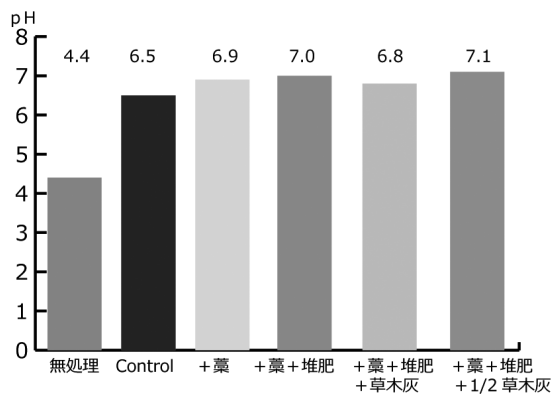


図23 土壤透過水のpH

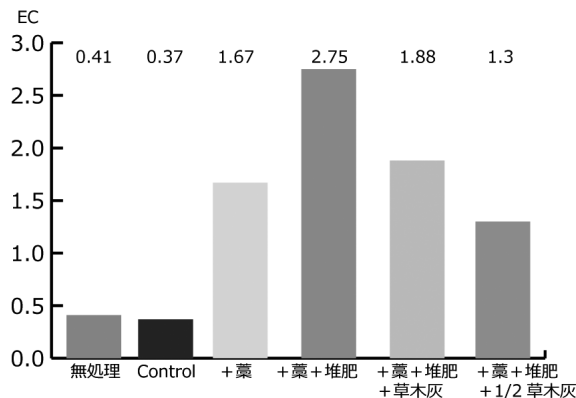


図24 土壤透過水のEC

表3 インゲンマメ (収穫:7月26日)

試験区	草丈 (cm)	さや数 (個)	収量 (g)
Control (従来 of ザイ)	28.0	10	41.3
三和土+藁のザイ	37.2	20	40.4
三和土+藁+堆肥+草木灰	39.2	18	55.1

表4 トウモロコシ (収穫:8月8日)

試験区	草丈 (cm)	出穂日	収量 (g)
Control (従来 of ザイ)	95.0	6月25日	65.4
三和土+藁のザイ	91.2	6月27日	143.5
三和土+藁+堆肥+草木灰	189.2	7月16日	260.0

全区の草丈、収量を測定した。調査の結果、インゲンマメでは堆肥と草木灰入りのザイの生育と収量が良かった(表3)。特に草木灰の区で収量が多かった。これは開花結実を促すリン酸を含む草木灰の効果だと考えられる。また三和土だけ施しても生育収量が良かった。これは三和土に含まれる藁の栄養分がインゲンマメに提供されるからだと思う。トウモロコシについては、無肥料である従来 of ザイでは草丈が低いうえ出穂が早くなった(表4)。これは肥料分が少ないため、十分成長しないうちに生殖成長に移行したものと考えられる(図25)。それとは逆に堆肥と草木灰が入ったザイでは生育も良く、出穂も順調だった。ザイの穴は周辺より湿っており、水分が多いのがわかる。また三和土のザイは13週間、屋外に設置しても耐久性があるため変化はなかったが、従来 of ザイでは風雨で盛り土がなくなってしまった(図26)。



図25 左が+藁、右が+藁+堆肥+草木灰



図26 設置2ヶ月後のザイ (左)と三和土ザイ (右)



#### 4. 結論

考案した集水システムは西アフリカで利用されているザイや半月工を日本の三和土技法で改良したものである。この技法を用いると現地の土壌と消石灰に塩化マグネシウムを添加するだけで集水力、耐久性などの高いザイを製作できることが証明できた。これは農業生産だけでなく砂漠化が進む地域での緑化活動に大いに役立つものである。また製作には機械は不要で、材料も自分たちで調達できるものばかりである。さらに撤去も簡単ですぐ土壌に戻るため持続可能な技術だと考える。なお現地では雨の降らない乾季に屋外で製作するのが好ましい。なぜなら中和している期間に雨が降らないため、安心して大量生産できるからである。アフリカでは石堤（ディゲット）を圃場に設置して土壌流出を抑制しているが、石を調達するのは経済的、労力的に問題で普及の障害となっている（図27）。しかし私たちのザイは土ながら堤防機能もあるので導入しやすいと考える。

2018年の世界人口は76億人。100億人を突破するまで50年かからないといわれている。また2019年に開催された国連のIPCCは、熱波の増加で干ばつ、砂漠化、土壌浸食などにより2050年には穀物が不足し、食料不足と飢餓のリスクがより高まると警告している。これはすでに人口増加による食料問題を抱えている途上国にとって深刻な問題である。このように私たちが考案した技術は乾燥地の降雨による土壌浸食による池沼や河川の氾濫対策、乾燥地での緑化対策など環境問題解決はもちろん、乾燥地での食料増産に貢献できるものである。そして国際連合の持続可能な開発目標であるSDGsの達成もサポートできる技術になると確信している。今後は世界に情報発信したいと考えている。



図27 石を積んだディゲット（石堤）

#### 5. 参考文献

- (1) Characterization of the rainy season in Burkina Faso and it's representation by regional climate model  
([https://www.researchgate.net/publication/229811105\\_Characterization\\_of\\_the\\_rainy\\_season\\_in\\_Burkina\\_Faso\\_and\\_it's\\_representation\\_by\\_regional\\_climate\\_models](https://www.researchgate.net/publication/229811105_Characterization_of_the_rainy_season_in_Burkina_Faso_and_it's_representation_by_regional_climate_models))
- (2) The greatest challenge challenge (<http://www.fao.org/3/ca4395en/ca4395en.pdf>)
- (3) Assessment of Best Practises and Experience in Water Harvesting  
([https://www.pseau.org/outils/ouvrages/bafd\\_rainwater\\_harvesting\\_handbook.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/bafd_rainwater_harvesting_handbook.pdf))
- (4) Zai pit System  
(<https://www.echocommunity.org/resources/d676d269-5f1f-47f1-812a-ed6d3e253989>)
- (5) 人々の暮らしと砂漠化対処（環境省）  
<https://www.env.go.jp/nature/shinrin/sabaku/download/panph.pdf>

#### 6. 謝辞

研究にあたってアフリカの土壌についてご教授いただいた特定非営利活動法人 アフリカ日本協議会、コンクリート等についてご教授いただいた日本コンクリート工学会の方々に感謝したい。

青森県立名久井農業高等学校  
Treasure Hunters