

# 開発途上国における機能性集水技術の開発



青森県立名久井農業高等学校

Treasure Hunters

松橋大希、宮木琢愛、中堤康仁、田村侑晟、岩間友紀

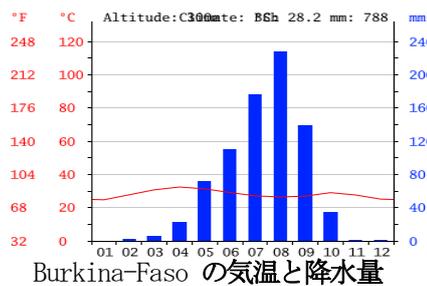
## 1 研究の背景

アフリカなどの乾燥地では年間降雨量が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では約800mm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。また異常気象による干ばつの影響もあり砂漠化や逆に雨季の豪雨による土壌流出、土壌栄養の欠乏など土壌劣化が進んでいる。このような地域で生活する住民は昔ながらの雨水を利用する自給自足の小規模農家であることから、常に深刻な食料不安にさらされている。そこで西アフリカではザイ (Zai) や半月工 (Half-moon) という降雨を集める技術がある。ザイは11~2月の乾季に直径30cm、深さ25cm程度の穴をあけ、そこに有機物を入れ播種する伝統農法で、雨季の流去水を穴の淵に盛った土手で受け止めて集水する技術である。半月工は直径4mの大型ザイを半円にしたもので数万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、乾燥地における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や川の水深が浅くなり、氾濫する災害も発生している。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、食料増産になかなか繋がらないのが現状である。対策としてコンクリート構造物やビニールシートで集水および土壌流出を抑制する方法はあるが、コスト高やマイクロプラスチックの発生原因に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) 技術に着目した。三和土は土、砂、石灰、にがり水を水でこねることで起こる水和反応を利用して土壌を硬化させる日本古来の伝統技術で日本家屋の土間に用いられている。施工する際、特殊な薬剤や機械がいらないうえに、次第に土に戻るため環境への影響が小さい。そこで三和土技術を応用して耐久性、土壌流出抑制、土壌への養分供給などたくさんの機能を持った新たなZai集水技術の開発に取り組むことにした。



ザイ (Zai)



半月工 (Half-moon)

## 2 研究の目的

- (1) 耐久力、集水力、土壌流出抑制力、養分供給力を持つ機能性ザイの開発
- (2) 機能性ザイが作物の生育に及ぼす影響を探る
- (3) 乾燥地、半乾燥地など開発途上国の持続可能な農業の実現に貢献する

## 3 研究の方法と結果

### (1) 土壌の硬化実験

アフリカには極端に分類すると砂質土と粘質土、そして中間の性質を持つ砂質粘土の3つに分けられる。西アフリカではいずれも存在する。そこでこれらの土壌で三和土を作れるか実験することにした。資料を参考に私たちが再現した3つの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% + カオリン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、pH 5.0前後と酸性のためピートモスを少し加え酸度を調整した。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水を添加する。それを木製の柵に詰めたら表面を叩いてなじませ、1週間放置し硬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見ると砂質粘土系統の土壌 (緑) が多いことから、今後の三和土は真砂土をベースにした砂質粘土で作成することにした。水はpH7.4の蒸留水を用いた。

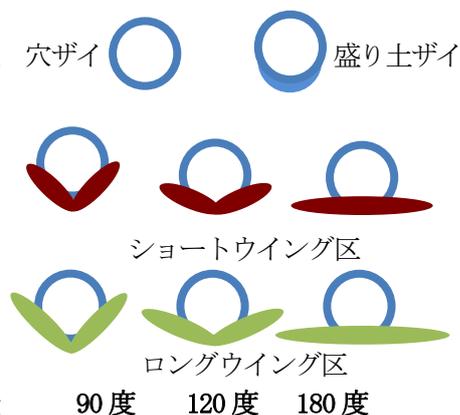
### (2) 三和土の硬度

すぐ崩れる脆い三和土では利用できない。またコンクリートの用に硬すぎでは取り除きにくい。そこで製作して50日経過した三和土の硬度を測定した。測定はEnhong社のデジタル硬度計 (ビッカース硬度) を使用した。



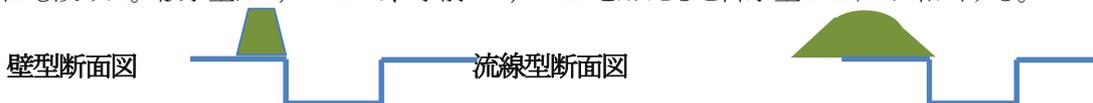
### (3) 三和土のデザインと集水力

ザイの盛り土は流れてくる降水を受け止めるため穴の谷側に半円状に設置される。しかし土のため流去水によって次第に崩壊し下方に流されてしまい土壌流出にも繋がっている。私たちは盛り土を三和土にすると耐久性が高まり形を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が適している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と半円の盛り土を持つ一般的なザイ(右図上段)の他、穴の円周の半分の長さの羽根(Wing)を90度、120度、180度で広げたショートウイング区(中段)。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(下段)である。これを傾斜角10度の発泡スチロール板に設置し、斜面上方から200mlの水をまんべんなく散水し、穴に集まった水量平均を集水量とした。なおモデルのザイの羽根は、板鉛を適したサイズに切り設置し実験した。



### (4) ザイの設置レイアウト

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るのでどのようにでも設置できる。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砂質粘土である真砂土充填し、事前に水3,000ml散布し含水量をほぼ飽和状態にしておく。その土壌の上に一般的な盛り土のザイと板鉛のウイングを持ったザイモデルを設置する。また水を受けるウイングの形状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。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で隙間をなくした区も設けた。散水量は1,500mlで、事前の3,000mlを加えると降水量45mm/hに相当する。



### (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とが予想できる。これを利用すると固形肥料のように土壌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、上から水を流し、その透過水を分析した。製作する三和土は下表の5種類として、底に穴の開いた木製の柵に厚さ2.5cmで充填する。硬化した1週間後、170mlの蒸留水を流し込み、穴から滲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。

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	5	20	1.6
+藁+堆肥+1/2 草木灰	60	30	15	15	5	20	1.6

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Controlの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(●)は7週間後と13週間後も成分を測定した。

### (6) 鉢での栽培試験

三和土が実際に作物の生育にどのような影響を与えるのか栽培試験を行う。9号鉢に無肥料の培養土8Lを詰める。試験区は鉢隅に藁を加えた三和土、藁と堆肥区を加えた三和土、消石灰を草木灰にかえ藁と堆肥区を加えた三和土、そして三和土を乗せない無処理の4区とした。三和土の量は500mlとし配合は(5)三和土透過水の分析に用いたものと同じなので省略する。三和土施工後、約2週間屋外に放置し中和させ、ポットで葉が3枚になるまで育てたフダンソウとテーブルビーツの苗を移植して生育を調査する。フダンソウ、テーブルビーツはヒユ科の1年生草本で、ともに暑さや乾燥に強く、アフリカや西アジア、ヨーロッパなど広く栽培されている。以上のことから本研究の栽培試験に用いた。

### (7) 圃場試験

圃場に考案した新型のザ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。この施肥量はアフリカを想定したものである。その穴の淵にザイを設置する。ザイはロングウイング 120 度タイプとした。大量に作るため、土にショベルでザイの型を作り、そこに水で煉った柔らかい三和土を入れ 1 週間放置して硬化させた。その後、2 週間以上空気で中和させて設置した。作物はアフリカで貴重なタンパク源となっているインゲンマメと主食であるトウモロコシとし、生育や収量を調査した。区は従来の盛り土のザイ区、藁を加えた三和土ザイ区、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ザイ区とした。

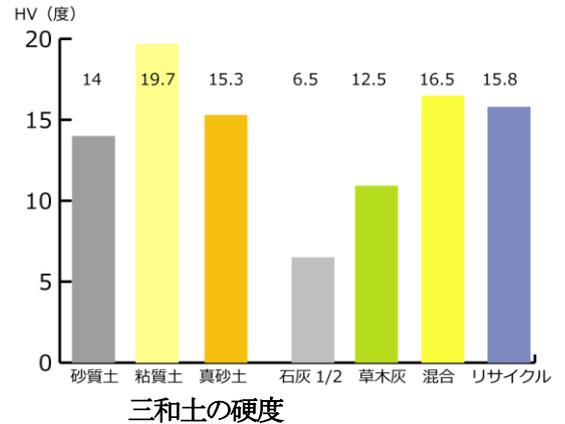
#### 4 研究の結果

##### (1) 土壌の硬化実験

砂質土、粘質土、砂質粘土とも簡単に硬化することがわかった。これによりどんな地域でも簡単に三和土を製作できることがわかった。また硬いもの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。

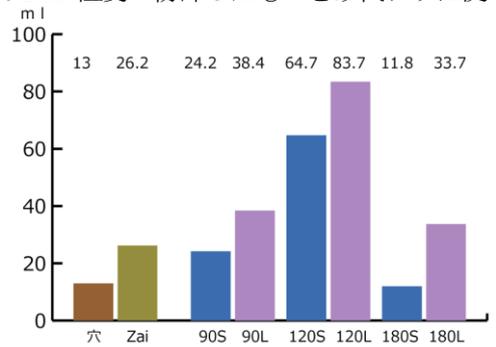
##### (2) 三和土の硬度

三和土表面に硬度計を押し込み、ビッカース硬度を測定したところ、低いものでも 10 度以上に硬化した。ところが消石灰の量を半分に減らすと脆くなることがわかった。これは水和反応に必要なアルカリ成分が半減したからで実用化は難しい。草や木を燃焼して作った草木灰だけではやや強度は下がるが 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 日後に手で 1 cm 程度の粉碎したものを砂代わりに使ったリサイクル三和土も 15 度を超える十分な強度を保てることがわかった。



##### (3) 三和土のデザインと集水力

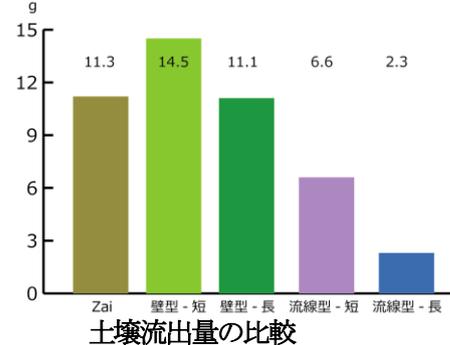
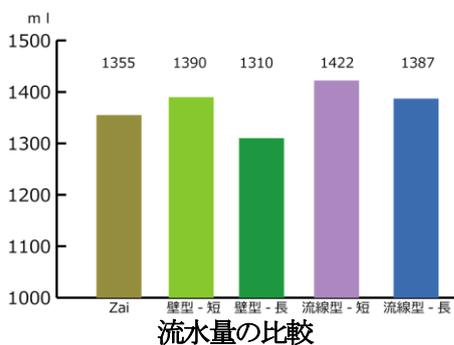
現地で利用されている穴だけのザイ、半円状の盛り土をしたザイよりも羽根があると集水力が高まることがわかった。特にロングウイングを 120 度で設置すると貴重な雨水を 3 倍も集めることができた。



##### (4) ザイの設置レイアウト

##### ロングウイング 120 度の集水

設置したザイを通過して下方に流れた流去水の量はやや流線型のウイングの方が多いが、いずれの区も 1,300 ~ 1,400ml と大差はなかった。しかし流出した土壌の量は流線型が極めて少なかった。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多くあり、壁を超えた水が渦を巻いて池面を掘り、土壌流出を加速させたと考えられる。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。以上からレイアウトは流線型のロングウイングを隙間なく並べると堤の機能も発揮し効果的だとわかった。

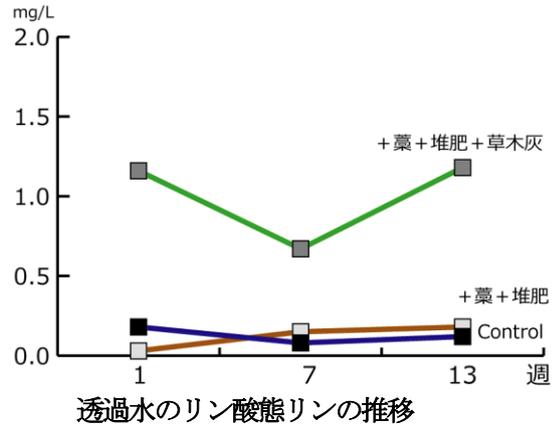
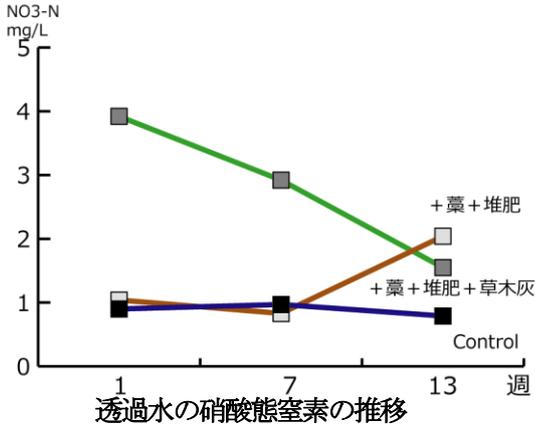
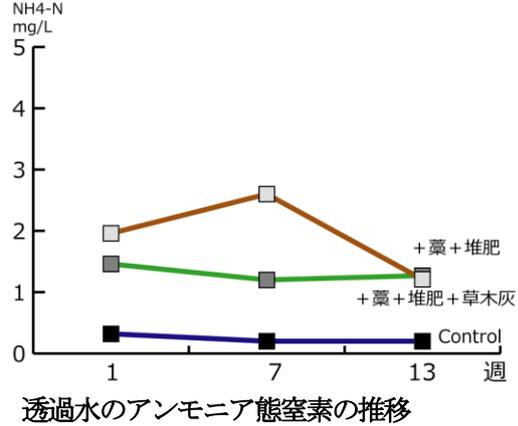
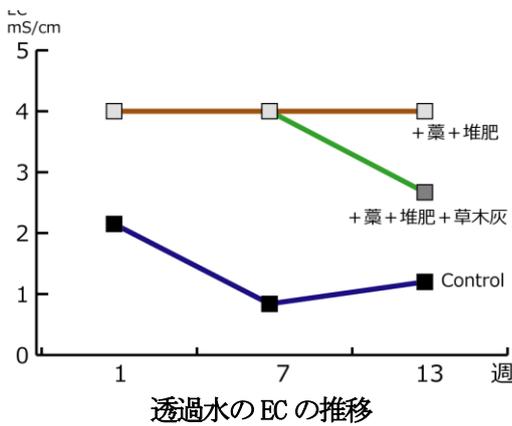
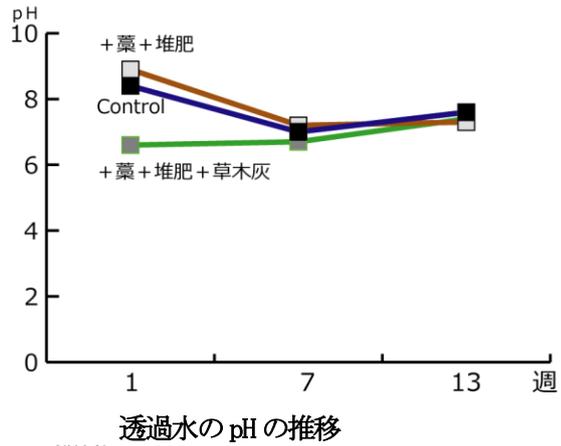
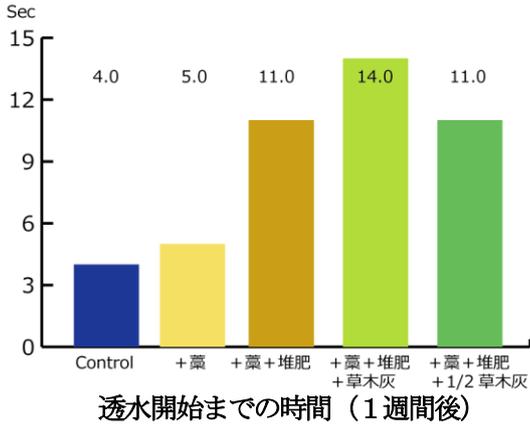


しかし圃場の形状、コストや労力に応じて間隔を開けて設置しても従来のザイより土壌流出抑制効果が大きいので、この新型ザイは十分実用的だと考えられる。

##### (5) 三和土透過水の分析

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。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 と強アルカリであったが、7 週間後はどの区も中性となった。これはコンクリートでいう養生という作用で、空気中の二酸化炭素により中和されたものと考えられる。これにより植

物への影響はなくなると考えられる。また EC は 13 週経過しても藁や堆肥を入れた区で多いままだった。有機物から栄養分が長期間に滲み出ていると考えられる。



アンモニア態窒素も硝酸態窒素とも 13 週経っても藁と堆肥を入れた区で多いままだった。これは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、長期間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 週後も草木灰区が多かった。発酵牛糞堆肥はそもそもリン酸含有量が少なく草木灰は多い。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特に欠乏しているリン酸を供給できることがわかった。また製作 7 週間後には中性になるのでその後使用すると栽培に影響がないと思われる。このように三和土の効果は製作した時だけの一時的なものではなく、肥効が持続する緩効性肥料的機能がかった。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。

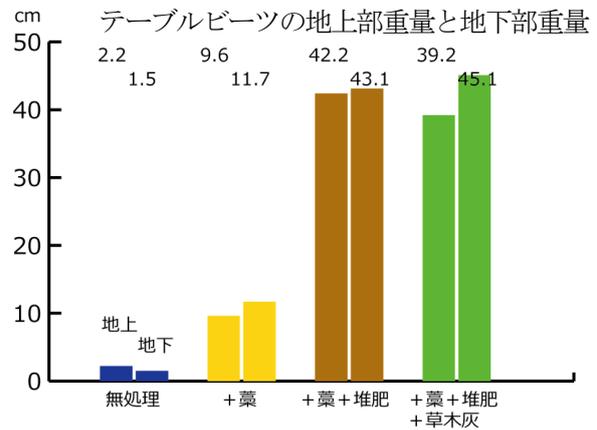
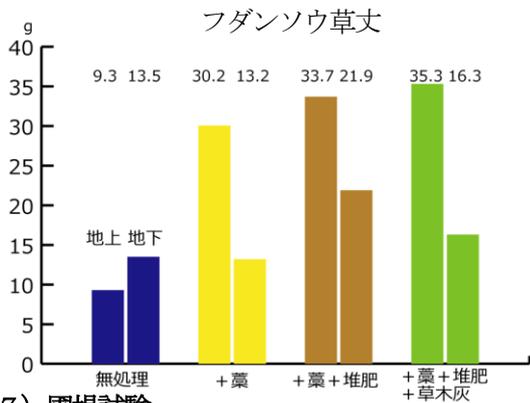
## (6) 鉢での栽培試験

### ①フダンソウ

鉢での試験では堆肥、草木灰を用いた区の生育が良く収量では 3 倍増えた。三和土に含まれる窒素などの効果と考えられる。また藁だけでも無処理より生育が良く、有機物の効果が感じられた。

### ②テーブルビーツ

堆肥を入れた区の生育、収量とも良かった。特に地下部重量ではやや草木灰を使った区が良かった。これは堆肥の窒素分に加えて、草木灰のリン酸とカリウムが地下部の成長を促進させたものと考えられる。これにより三和土のザイは収量を増やす機能も確認された。



### (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全区の草丈、収量を測定した。

#### ①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 (従来のザイ)	28.0	10	41.3
三和土+堆肥のザイ	37.2	20	40.4
三和土+堆肥+草木灰	39.2	18	55.1

#### 圃場試験



#### ②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 (従来のザイ)	95.0	6月25日	65.4
三和土+堆肥のザイ	91.2	6月27日	143.5
三和土+堆肥+草木灰	189.2	7月16日	260.0

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。特に草木灰の区で収量が多かった。これは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われる。トウモロコシについては、肥料分を持たない従来のザイと三和土のザイで草丈が低いというえに出穂が早くなった。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。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、屋外に設置しても変化はなかったが、従来のザイでは風雨で盛り土がなくなってしまった。開発途上国ではこれが土壌流出になると考えられる。

### 5 研究のまとめ

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20150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。私たちが考案した集水システムは西アフリカなど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降雨でも流されない耐久性のあるザイを製造できることがわかった。また土壌を求める形状に簡単に硬化させられるため、高い集水と土壌流出抑制機能を持つ形状に成形できることもわかった。さらに消石灰の代わりに草木灰を使うことでリン酸やカリウム、牛糞堆肥を混ぜることで窒素など不足している栄養分を供給できることがわかった。これらの機能は植物の成長促進に効果があるため。干ばつによる砂漠化が進む地域の緑化活動にも大いに役立つものである。またシステム製作には高価な機械やプラスチックを使わず、現地で自作できる草木灰や牛糞堆肥を使用するため環境汚染は抑えられる。さらに不要の際は、土壌に返すため持続可能なエコ技術だと考える。製作は乾季である10~6月に屋外で土型を使って製造することが好ましい。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。現地ではザイの他に、石の堤(ディグット)を組み合わせて土壌流出を抑制しているが、遠くから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。しかし三和土と考案したレイアウトを用いるとザイに堤の機能を持たせることができ、土壌流出を抑制しながら植物の栽培が可能となる。このように私たちが考案した技術は乾燥地の環境問題解決へ貢献できるものであり、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。今後は情報発信するだけでなく、積極的に学会等に参加し広く普及したいと考えている。