

美ら海を守れ！

三和土による沖縄の赤土流出抑制活動



青森県立名久井農業高等学校 Flora Hunters

【はじめに】

沖縄では赤土の流出という問題を抱えている。これは1950年代にパイナップルが換金作物と認知され、栽培面積が拡大したのが始まりである。その後、1972年に本土復帰したこともありダム建設、ゴルフ場などのリゾート開発が進み、土壌流出が進んだといわれる。赤土汚染を防止するため平成6年に「沖縄県赤土等流出防止条例」が施行されたが、農地からの流出は減らず、今も大きな問題となっている（表1）。

表1 沖縄の土壌流出量（万/t）

	条例施行前	条例施行後
開発事業	16.7	2.5
農地	32.1	25.5
米軍基地	2.5	1.1



図1 石垣島の土壌流出

土壌が流出した海には、世界遺産であり世界で一番美しい海の景観を阻害するだけではない。土壌の流出によって海水が濁ると、サンゴと共生している褐虫藻の活動が低下するためサンゴは栄養不足に陥る。さらに大量の土砂によってサンゴ自体が埋没すると窒息死することもある。発生原因のひとつは土壌の特性である。沖縄の土壌の50%以上を占める国頭（くにがみ）マーヅや30%の占める島尻（しまじり）マーヅは、土壌粒子の結びつきが弱いという特徴がある（表2）。もうひとつは地形。陸地は急勾配で河川は短いため、赤土は短期間で海に流れ出てしまう。また海は陸と珊瑚礁に囲まれた海域が多く、赤土が溜まりやすい地形である。さらに沖縄の降水量は年間2100mm前後と多く、短時間で激しく降る特徴がある。このような自然的条件に裸地の圃場やリゾート開発地など人間活動が加わり海を赤く染めている。（図1）。

表2 沖縄の主な土壌

種類	特徴
国頭マーヅ	55.1%：古い砂礫層が風化した粘質土壌。酸性のためパイナップルしか適さない。作物栽培に必要なカルシウムやマグネシウムの少ない土壌である。
島尻マーヅ	27.4%：琉球石灰岩が風化した中性土壌。保水力が低い野菜が栽培される。

対策として土壌流出を抑制する植物帯（グリーンベルト）の設置などが行われているが、土壌そのものが流出しやすいので改善されていないのが現状である。そこで私たちは、まず最も農業しやすい島尻マーヅを日本古来の土壌固化技術である三和土（たたき）で補強し、流出を抑制することを考えた。三和土とは土、砂、消石灰を水で練って固化する工法で、日本家屋の土間などに用いられてきた土木技術である。

【方法】

（1）島尻マーヅの分析

- ①土壌1：精製水5を試験管に入れ激しく振る。
- ②1時間後、上澄のpH、EC、Ca、Naを測定（HORIBAコンパクトメータ）する。

（2）三和土の製作と耐久試験

私たちは前研究で、下記のような砂質土壌の真砂土を使った三和土の配合割合（体積比）を見出している（表3）。しかし島尻マーヅは粘土のため固化させるには消石灰の量を変える必要があると考え、表4のような試験区を設定した。またニガリである塩化マグネシウムを加えた区も作った。

表3 基準とする三和土の配合割合（体積比）

	真砂土	砂	消石灰	水
配合割合	1	0.5	土と砂の15%	握れば固まる程度

表4 試験区

試験区No.	1	2	3	4	5	6
石灰添加量	20%	30%	40%	50%	60%	70%

試験区No.	7	8	9	10	11
石灰添加量	20%	30%	40%	50%	60%
塩化マグネシウム	10%	10%	10%	10%	10%

固化したら紙コップから取り出し、1リットル精製水が入った水槽に入れる。これは三和土が長期間水没するという最悪の状態を再現したもので、定期的に形状の変化を観察する。

(3) 三和土から溶出する成分

三和土は消石灰を使うため、降雨によってアルカリ水が溶出すると思われる。これは環境に影響を与える可能性がある。したがって三和土からどのような成分が溶出するか、また溶出したものが島尻マージに透過したらどのように変化するのかを測定した。実験は底に穴の空いた容器に基準となる島尻マージを5cmの厚さで充填した区、試験区3（消石灰40%）の三和土だけを2cmの厚さで充填する区、島尻マージを厚さ5cmで充填し、その上にさらに試験区3の三和土を厚さ2cmで充填した区を設けた。固化したら上から精製水を200ml流し込み、その透過水のpH、EC、Ca、SSを測定する。

(4) 三和土から溶出す成分の時間的变化

三和土から成分が溶出するのは一時的なものなのか、それとも常に溶出し続けるのか、また時間が経つと溶出量が減ってくるのかを探る。実験は試験区7の三和土100gを容器に入れ、精製水500ml加える。4日後に水の成分を分析し、三和土を新しい精製水に移す。これを8日後、12日後まで繰り返す。

(5) 低環境負荷の三和土開発

三和土からの高濃度なカルシウムの溶出がpHやECを高める可能性がある。そこで三和土に添加物を加え、その溶出を低減する技術の開発に取り組んだ（表5）。消石灰10%区は、固化作用を補助するために土壌改良で用いるドロマイトと硫酸カルシウムを加えた、また稲わら混合区では1cmに切断した稲わらを加えた。製作方法は（2）と同様なので省略する。

表5 試験区

試験区No.	慣行区	消石灰10%区	稲わら混合区
島尻マージ	180ml	180ml	180ml
砂	90ml	90ml	90ml
消石灰	土砂体積の40%	土砂体積の10%	土砂体積の40%
塩化マグネシウム	土砂体積の10%	土砂体積の10%	土砂体積の10%
ドロマイト	-	土砂体積の3%	-
硫酸カルシウム	-	土砂体積の3%	-
稲わら (1cm)	-	-	50g

【結果と考察】

(1) 島尻マージの分析

分析の結果、島尻マージは中性の粘質土壌であることがわかった（図2）。水に浸漬した土壌は長期間水中に浮遊し、微細な粒子であることがわかる（図3）。また国頭マージと違い、中性のため作物の栽培を行うには問題ないと思うが、ECが低く、栄養分が極めて少ないのではないかと推測される（表6）。

表6 島尻マージの成分

測定項目	測定値
pH	7.3
EC (mS/cm)	0.073
Ca (mg/L)	10
Na (mg/L)	4



図2 島尻マージ (石垣島) 図3 水に浮遊する島尻マージ

(2) 三和土の製作と耐久試験

消石灰の添加量を変えて製作した島尻マージは、いずれの区も1週間で固化し、三和土となった。そこで水に完全に浸漬して耐久性を観察した。すると消石灰だけ加えた試験区1～6は、消石灰の添加量に左右されず、ほとんどが24時間後には水中で亀裂が入った。しかしニガリである塩化マグネシウムを土砂の体積

の10%添加した試験区7~11では、消石灰の添加量に左右されず、すべてのものが水中に入れても崩れることはなかった。島尻マージは粒子が微細な粘土が多い(表7)。比表面積は不明だが、カオリナイトを多く含んでいることや国頭マージのデータから真砂土より表面積が多いことが推測された。そのため砂質土の配合割合より多くの消石灰を増やした。しかし、それでも安定して固化できないことがわかった。

表7 沖縄の土壌と関東ロームの粒径組成

土壌の種類	砂	シルト	粘土
島尻マージ	25.0	34.0	49.0
国頭マージ	48.0	26.0	26.0
ジャーガル	15.0	45.0	40.0
関東ローム	29.2	35.4	35.5

表8 主な土壌の陽イオン交換容量

土の種類	CEC (meq/100g)
島尻マージ	18
国頭マージ	11
ジャーガル	23
モンモリロナイト	80~150
カオリナイト	3~15
真砂土	67
赤玉土	310
鹿沼土	160

土壌の種類	比表面積 (m ² /g)
国頭マージ	20~40
真砂土	0.1
モンモリロナイト	770
カオリナイト	10~55

さらに調べてみると島尻マージは、粘土鉱物であるモンモリロナイトはもちろん、砂質土の真砂土よりも陽イオン交換容量が小さいことがわかった(表8)。これは添加した消石灰から溶出する陽イオンのカルシウムを土壌粒子があまり吸着しことを意味する。また赤土は鉄分を含むため、さらにカルシウムの吸着力は落ちる。三和土は土壌に吸着した水酸化カルシウムが二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムとなることで固化する。消石灰を増やしても三和土が水中で崩壊したのはこれが理由と考えられる。しかしニガリは古くから三和土の土壌固化を助けるとともに、粘度があがり作業性を高めることがわかっている(そもそも三和土とは土、消石灰、にがりの3つを混ぜるという意味)。したがって三和土にニガリを混ぜることで土壌粒子とカルシウムを糊のようにくっつけ、消石灰20%でも崩壊しない三和土となったと考えられる(表9)。

表9 耐久試験の結果

試験区No.	1	2	3	4	5	6
石灰添加量	20%	30%	40%	50%	60%	70%
形状の変化	割れ	崩壊	割れ	崩壊	崩壊	崩壊

試験区No.	7	8	9	10	11
石灰添加量	20%	30%	40%	50%	60%
塩化マグネシウム	10%	10%	10%	10%	10%
形状の変化	維持	維持	維持	維持	維持

(3) 三和土から溶出する成分

三和土は消石灰を含むため三和土からは強アルカリ水が滲み出て環境に悪影響を与え可能性が高い。そこで三和土に精製水を流し込み、透過水を探取して分析した。またその透過水が島尻マージの中を通ったら成分はどのように変化するかも分析した。グラフは左が島尻マージからの透過水、中央は厚さ2cmの三和土(消石灰40%)からの透過水、右はその透過水が厚さ5cm島尻マージを通過した後の透過水である。島尻マージは中性であるが、三和土にするとpH12以上と極めて高くなる。しかし土壌を透過すると8.5まで低下した。これは河川や湖沼の水質基準範囲である(図4)。

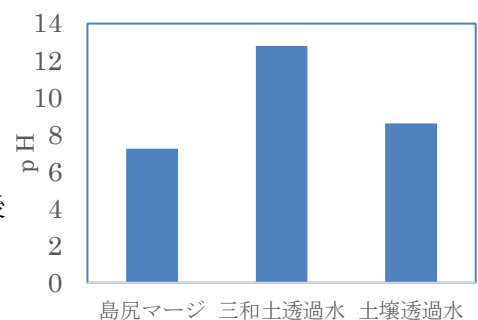


図4 pHの変化

また三和土からの透過水の EC (電気伝導度) が高いのはカルシウムの図5からもわかる通り、カルシウムが溶出しているからだと考えられる。しかし島尻マージを透過すると大幅に低下した。

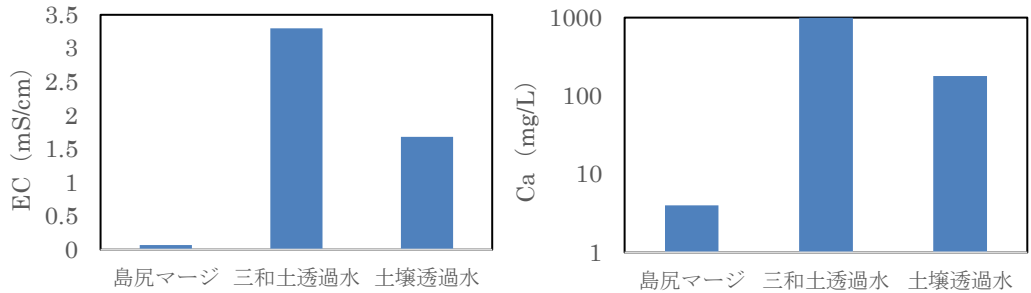


図5 EC と Ca 濃度の変化

これは陽イオン交換容量の小さい島尻マージだが、微細なたくさんの粒子に、カルシウムが少しずつ吸着されたためと思われる。一般的な畑のカルシウム濃度は、200~400mg/Lなのでこれは正常範囲内である。

図6は、消石灰40%の三和土にニガリ10%を加えた三和土の土壤透過水である。その結果、ニガリである塩化マグネシウムを加えたため、ナトリウム濃度が高くなった。塩分濃度が高いと作物は吸水できなくなり生育を阻害する可能性がある。一般に塩分濃度 (NaCl) は海3.2~3.5%、汽水0.05~3.2%、淡水0.05%である。また日本では畑に海水の10~100倍液 (0.032~0.32%)を散布して、成長を早める栽培法がある。今回の分析はナトリウム濃度であるが濃度は0.18%であり、ニガリによる環境への影響はほぼないと考えられる。

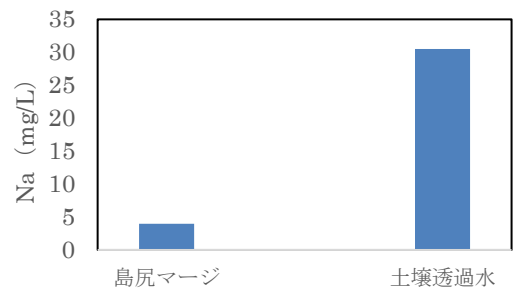


図6 Na 濃度の変化

島尻マージに水をかけると赤茶色の水が流れ出し、長い間浮遊する (図7)。これが赤土流出による環境被害の原因のひとつである。しかし三和土 (消石灰40%) に水をかけると固化しているので赤茶色の水は流出しない。濁度も表10のように低く、効果が出ている。以上のことから流出しやすい場所の土壤に三和土施工をすると、流出量は減少する可能性がある。

表10 濁度の比較

	濁度
島尻マージ	694.4
三和土 (消石灰20%、ニガリ10%)	20以下



図7 透過水(右が三和土)

(4) 三和土から溶出す成分の時間的变化

三和土を精製水に浸漬して溶出する成分の時間的变化を測定した。測定項目は環境に負荷を与える可能性のあるNaとCaとし比較してみた。分析は浸漬後4日毎に行い、その都度新しい精製水に変えた。その結果、Na、Caとも最初の4日間は溶出量が多く、高濃度となったが、8日後、12日後の溶出量は、Naは85%、Caは69%と大幅に減少した (図8)。

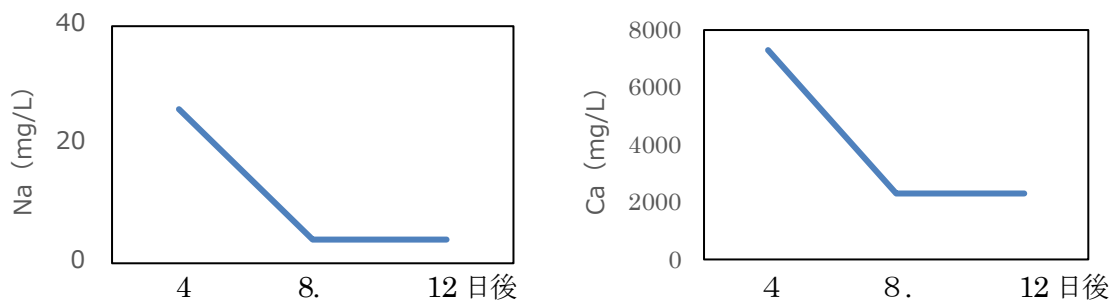


図8 Na と C 溶出量の時間的变化

NaもCaも陽イオンであり、陽イオン交換容量が小さい島尻マージといえども吸着される。しかしNaは吸着されても、より吸着されやすいCaとイオン交換が行われるため短時間に溶出する。その結果、4日目までに多くが溶出し、8日以降は溶出量が85%まで減少したと考えられる。ところがCaはNaより土壤粒子に吸着しやすく、水に溶けにくい炭酸カルシウムに変化していく。そのため8日以降の溶出量の減少が69%とNaより小さかったのではないかと考える。いずれにしても4日目から溶出量が減少し、さらに

島尻マーヅを透過するため環境への影響はとて小さいと思われる。

(5) 低環境負荷の三和土開発

新たに消石灰 10%区と稲わら混合区を考案した。いずれも固化し、水に浸漬しても崩壊することはなかった。問題としていた三和土からの Ca と Na の溶出は表 11 のとおりである。

表 11 三和土透過水の成分分析 (4日後)

	慣行区	消石灰 10%区	稲わら混合区
pH	12.5	7.9	8.3
EC (mS/cm)	3.3	2.6	0.9
Ca (mg/L)	995	900	82
Na (mg/L)	30.5	30.4	24.0

ドロマイトと硫酸カルシウムを用いた消石灰 10%区は pH の上昇が抑えられた。しかし硫酸カルシウムの影響で溶出する Ca 濃度は低下しなかった。またナトリウムも変わらなかった。さらに消石灰を 10%に減らしたこともあり、水に浸漬するとやや三和土の周囲が崩れることがわかった。しかし稲わら混合区では、まったく崩壊しなかった。昔から、わらは漆喰の強度を増すために使われており、ニガリとともにさらに強度を高めたものと考えられる。さらに Ca や Na の溶出が減少し、pH と EC の上昇が抑えられた。堆肥などの腐植は陽イオンを吸着することがわかっている。三和土に稲わらを混ぜたため内部で Ca などを吸着し、溶出量を抑えたのではないかと考えられる。わらを混ぜる漆喰は日本の古い工法ではあるが、三和土に応用すること耐久性と低環境負荷を併せ持つ新しい三和土になることがわかった。身近な資材なので、普及させるうえで大いに役立つと思われる。

【結論】

沖縄の赤土流出問題は、なかなか解決できない深刻な課題である。流出している場所の多くは農地であるため、この問題は景観や海洋生物の生態への影響も大きく、沖縄の持続的農業の危機にもつながっている。現在、植物を植えるなどさまざまな対策を行なっているが、抑制するにはいろいろな技術を組み合わせる必要があると考える。幸い三和土はコンクリートほど強度がないため不要になったらすぐ取り壊せる。

今回研究した三和土は、誰でもどこでも簡単に比較的安価で土壌を固化できる日本伝統工法である。三和土は土間など屋内のイメージがあるが、寺社の境内、現在はカーポートや庭の通路など屋外での施工も増えている。施工するには、三和土を使って流出しやすい斜面や圃場周辺を補強する方法、畑の谷側に土を受け止める小さな土留や、流出を防ぐ緑地帯周辺の補強に使うなどさまざまな方法が考えられる (図9)。

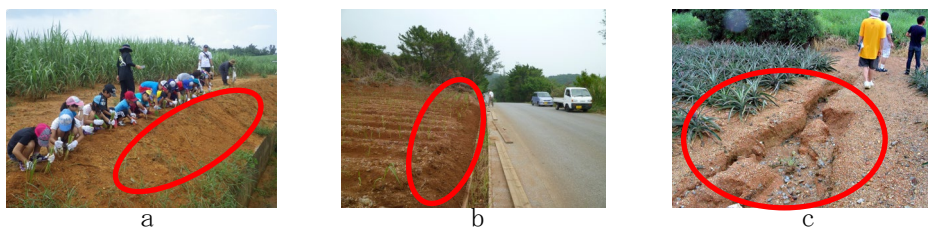


図9 三和土を施工できる場所の例 (a: 圃場の法面 b: 圃場の周辺 c: 畑の通路)

今年3月、コロナ禍で現地での活動は制限されていた。そこで石垣島の赤土協議会、農家や高校生と連携して三和土のオンライン講習会を何度か開催し、私たちの代わりに簡易堤防の施工をしてもらった。現在は耐久性の実用化試験を行っているところである。また5月には実際に沖縄やんばるの名護市に出向き、地元の方々と国頭マーヅの三和土施工を行った。北国東北と南国沖縄の高校生が連携して行う赤土流出抑制活動は注目され、テレビでも紹介された。温暖化により気候変動がより顕著になってきている現在、簡易に土壌を固化できる工法は世界の環境問題に役立つと考える。今後も SDGs の視点に立って活動していきたい。

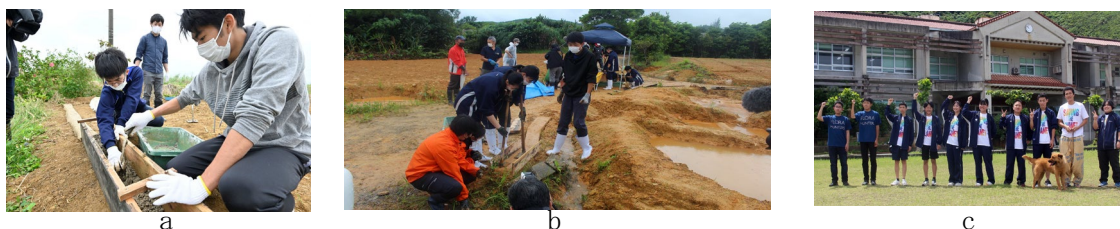


図10 沖縄での環境活動 (a: 石垣島の農園 b: 名護市の農園 c: 沖縄の高校生との連携)