

# 土壌微生物を応用した土砂流出防止技術の開発

## EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECTIVENESS OF NATURAL MICROORGANISMS ON THE GROUND SURFACE AT CONTROLLING EROSION

下村幸男\*・富坂峰人\*\*・島田政好\*・小林 豊\*\*\*・藤澤久子\*

栗原淳一\*\*\*\*・桜井 亘\*\*\*\*・田方 智\*\*\*\*

小澤 聖\*\*\*\*\*・南雲不二男\*\*\*\*\*・干川 明\*\*\*\*\*・中野武登\*\*\*\*\*

Sachio SHIMOMURA, Mineto TOMISAKA, Masayoshi SHIMADA, Yutaka KOBAYASHI, Hisako FUJISAWA

Jun'ichi KURIHARA, Wataru SAKURAI, Satoshi TAGATA

Kiyoshi OZAWA, Fujio NAGUMO, Akira HOSHIKAWA and Taketo NAKANO

The purpose of this study was to evaluate the erosion control properties of biological soil crusts formed from fungi and algae on the soil surface. Field observations and experiments were carried out, and the results subjected to quantitative analysis. Microorganism growth was expressed by the level of resistance to removal of a rod/lattice arrangement, and soil microorganism growth was translated into an expression of erosion rate based on erosion rates from hydraulic experiments.

With the right combination of temperature, humidity, and nutrient conditions, soil microorganisms can grow very quickly. This study demonstrated that soil microorganisms can provide effective temporary erosion control until such time as plants are able to take hold.

**Key Words :** *experimental study, erosion control, biological soil crust, erosion model*

### 1. 研究開発の背景と目的

沖縄県本島を中心とする南西諸島では、降雨時の赤土流出が河川や沿岸のサンゴ礁内の生物の死滅、生態系破壊を引き起こし、利水阻害と水産業（沿岸漁業、養殖業）や観光産業の障害になっている。沖縄県以外でも、ダム貯水池への濁水流入による利水阻害や発電施設に与える悪影響がしばしば問題になる。沖縄県では、開発工事に対して具体的な基準を定めた土砂流出規制条例を施行（1995 年）してから、工事現場からの赤土流出は減少した<sup>1)</sup>。しかし、農地・山地における改善は進んでいない。農地における土砂流出は、労力と施肥コストを投入した肥沃な耕土の流亡を意味し、農家においては重大な損失である。しかしながらビニールシートマルチや敷草対策は、コストおよび労力の負担が大きく、工事対策工のアスファルト乳剤や土壌固化剤などによる対策工もあるが、面的対策としては高コストで、植生や農作物への影響もあり、普及していない。一方農地や山地斜面では、地表面が植生に覆われると、土壌侵食が抑制されるという経験的認識がある。しかし、農地に

おいては、苗の植え付け後、作物が生長して地表面を覆うまでには半年程度を要する。また、山地における治山緑化工においては耐侵食効果を得るまでには播種後 4 ヶ月かかるといふ報告がある<sup>2)</sup>。このように、農地および山地斜面ともに、土壌侵食に対する暫定的な対策として即効性をもつ適切な手法が望まれている。

筆者らはこれまでの研究により、藻類や菌類などの土壌微生物に肥料やバガス（サトウキビから砂糖を抽出した絞りかす）を投与すると、地表面の菌類などの繁茂が旺盛になることを確認している<sup>3)</sup>。現地観測においても、菌類や藻類が繁茂した状態では、流出土砂量が裸地状態に比べて 10%以下に減少することを確認した<sup>4),5)</sup>。糸状菌類、藍藻類、緑藻類、地衣類および苔が地表面の土粒子（土塊）を絡めて形成する土壌微生物のコロニー（Biological Soil Crust）の耐侵食性についてはすでに認識され多くの研究があり、Technical Reference (U.S.D.I, 2001)<sup>6)</sup>などに纏められている。しかし、これらの研究では、土壌微生物による侵食抑制効果の定量的評価には至っていなかった。

そこで本研究では、土壌中に生息する微生物の繁茂による土砂の侵食抑制効果を対策工の計画・設計に資するため、その効果の定量的評価方法について、実験を主体とした手

\*1: 中央研究所 総合技術開発部

\*2: コンサルタント国内事業本部 福岡支店 沖縄事務所

\*3: コンサルタント国内事業本部 福岡支店 技術部

\*4: (独)土木研究所 土砂管理研究グループ火山・土石流チーム

\*5: (独)国際農林水産業研究センター沖縄支所島嶼環境管理研究室

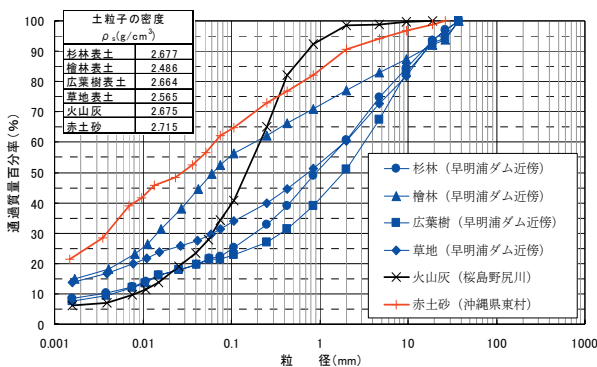
\*6: 広島工業大学 環境学部

法で開発するとともに、土壌の種類毎に、当対策法の適用性について実験的検討を行った。

2. 実験方法と結果

(1) 実験の対象土と土壌微生物の繁殖促進材

土砂流出抑止効果に関する定量評価に関して検討の対象にした土壌は、沖縄などの現地土壌（赤土など）である。その他の土壌における当対策工の適応性について、観察と室内侵食実験を主体とし、山地斜面土壌（早明浦ダム湖周辺斜面）および火山灰土（桜島）を対象とした。図－1 は各土壌の土粒子密度および粒度分布を示す。また、土壌微生物の繁殖を促進するために土壌に混合した材料は、バガスおよびワラとし、ワラは長さ 2～3cm に碎断して用いた。バガスには残留糖分があり、土壌微生物に養分補給する。ワラは後述するように無菌の標準砂でも菌糸の繁殖があることから、いわゆる納豆菌などの生育条件を土壌に与える効果がある。土壌に糖分を添加する方法については、バガスに限らず農産廃棄物の有効活用が期待できる。

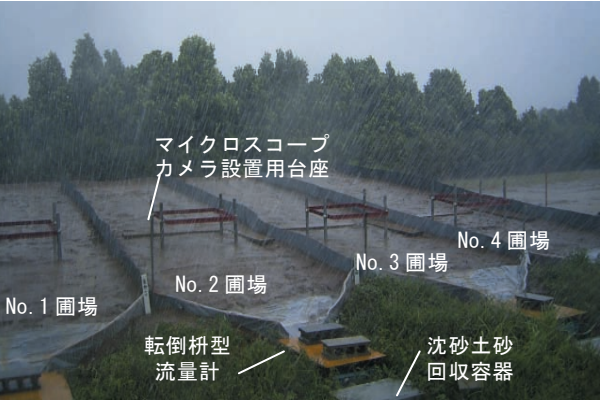


図－1 対象土の土粒子密度および粒度分布

(2) 現地侵食実験

1) 実験方法

試験は（独）国際農林水産業研究センター（JIRCAS）沖縄支所（石垣市）にある土砂溜枒および転倒枒式流量計が設置された赤土を耕土とする試験圃場（1 圃場：2.5×10.0m：写真－1）を用い、土壌微生物を人為的に早期形成した農地（2 圃場）と、通常の状態の農地（2 圃場）からの流出土砂量を比較することにより行った。各試験圃場の条件設定などの詳細は、表－1 に示すとおりである。それぞれの圃場を No.1～No.4 に分け、概略的には No.1 および No.4 が土壌微生物の早期形成をしないケースであり、No.2 および No.3 が土壌微生物の早期形成を行ったケースである。試験農地の作付けは、南西島嶼地域で作付面積が最も多いサトウキビとし、平成 16 年度に作付けしたものを株だし更新を行って初期状態とした。土壌微生物の早期形成方法は、これまでの成果を参考に、観測開始前に自生藻類などを風乾したものを少量（約 25g/圃場）散布して、地表面をビニールシートで覆って水分蒸発を防止する養生（20 日間程度）とした。



写真－1 降雨を受ける JIRCAS 試験圃場

表－1 試験圃場の条件設定

| 項 目                |                                                  |        |                     | 実施日                 | 作付からの経過日数(日) | 圃 場 No.                |          |          |                                                                                                 | 備 考                                                                      |
|--------------------|--------------------------------------------------|--------|---------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                                  |        |                     |                     |              | 1                      | 2        | 3        | 4                                                                                               |                                                                          |
| 圃場条件 (実験条件および作成方法) | 観測方法設定                                           |        |                     | (継続)                | —            | 土砂溜枒+転倒枒式流量計(JIRCAS施設) |          |          |                                                                                                 | 昨年度設置したものを継続使用                                                           |
|                    | 作物設定                                             |        |                     | H17.10.3            | 0            | サトウキビ(株だし)             |          |          |                                                                                                 | 従前に生育していたキビを根元から切って、各圃場の被覆状況を同程度とした。                                     |
|                    | 肥料設定                                             |        |                     | H17.10.4            | 1            | 混和                     | 表面       | 混和       | 表面                                                                                              | 混和:肥料を撒いてから培土<br>表面:培土してから表面散布<br>※散布量10kg/10a=10g/m <sup>2</sup>        |
|                    | Biological Soil Crust の形成対策の概要<br>※地表面への水分供給方法設定 | 対策資材設定 | 自生藻株(風乾試料)          | H17.10.11           | 8            | なし                     | 自生藻類(少量) | 自生藻類(少量) | なし                                                                                              | JIRCAS内(南雲氏試験圃場)で10月26日に採取し、風乾した藻類を適当に砕き散布した。<br>※散布量は少量(アクシデントにより計量なし)。 |
|                    |                                                  | 水分条件設定 | キビガラマルチ             | H17.10.11～H17.10.18 | 8～15         | なし                     | あり       | あり       | なし                                                                                              | マルチの実施により、地表面からの水分の蒸散を抑止することを想定したが、キビガラマルチ部で藻類等の明瞭な繁殖確認できず。              |
|                    |                                                  |        | (除草作業)              | H17.10.19～H17.10.24 | 16～21        | 裸地                     | 裸地       | 裸地       | 裸地                                                                                              | 雑草の成長が目立つようになってきたため、雑草除去、除草剤散布を実施。                                       |
| ビニールマルチ            |                                                  |        | H17.10.25～H17.11.16 | 12～44               | なし           | あり                     | あり       | なし       | 参考圃場(No.5)の一部に試験的に実施したビニールマルチ下で、藻類の明瞭な繁殖が目視確認できたため、マルチ資材をビニールシートに変更。その結果、目視で藻類等の繁殖が確認できる状態となった。 |                                                                          |

## 2) 観測結果

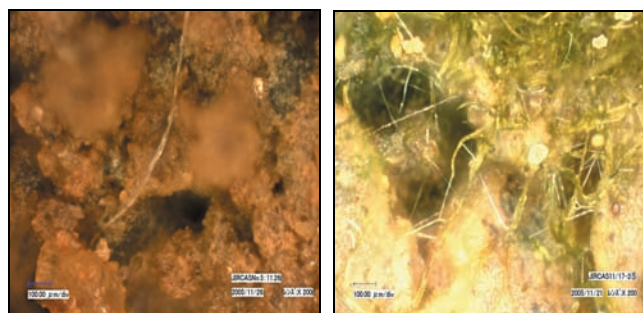
### ① 土壌微生物の形成状況

土壌微生物の早期形成を行った No.2 および No.3 圃場における土壌微生物の繁茂状況を写真-2 に示す。事前に行ったビニールシート被覆を行わないケースとビニールシート被覆を行ったケースとの現地比較試験によると、20 日間程度の養生では、ビニールシート被覆を行わないケースでは雨が少なかったため、土壌微生物の繁茂はほとんどなかったが、ビニールシート被覆を行ったケースでは良好な繁茂状況が得られた。この結果は、ビニールシート被覆を行うことによる土壌表面の水分保持が効果的であることを示唆している。別途行った室内における養生中の観察によると、土壌の含水比 10% 程度が土壌微生物繁茂の下限と判断され、短期間に土壌微生物を形成させるためには対策初期の水分保持が重要である。

### ② 土壌微生物の早期形成が作物に与える影響

観測期間中の各圃場のサトウキビの生育状況（被覆率）を整理した結果を図-2 に示す。被覆率は圃場の下流端付近を上空（約 3m）から撮影し、画像処理によって算定した。

土壌微生物の早期形成にあたっては、上記のとおり、株



(1)養生 21 日の No.1 圃場

(2)養生 21 日の No.2 圃場

（無処理の No.1 圃場では藻類の繁茂が僅かであるが、対策後の No.2 圃場では繁茂した藻類および菌類が土塊を連結している）

写真-2 試験圃場土壌における土壌微生物の形成状況  
（マイクロスコープ写真の例）

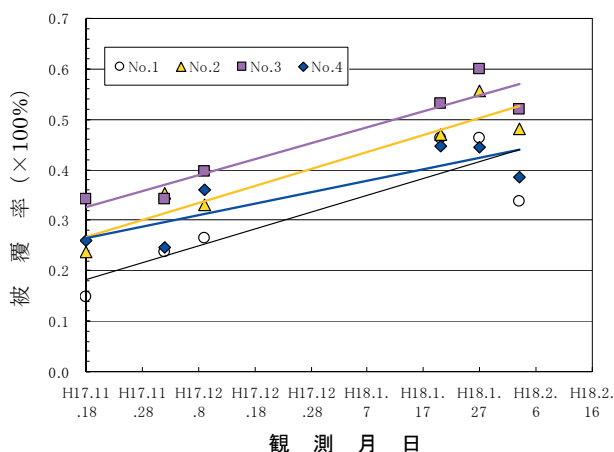


図-2 試験農地における被覆率の推移

だし更新直後にビニールシート養生を行う方法によったが、早期形成を行った No.2 および No.3 圃場と、早期形成を行わなかった No.1 および No.4 とでサトウキビの生育にあまり差が見られず、土壌微生物を人為的に早期形成しても、サトウキビの生育などに与える影響はほとんどないと考えられる。

### ③ 土壌微生物の早期形成による土砂流出防止効果

圃場からの土砂流出は、更新作業以降の数ヶ月～半年程度が顕著であるとされているが、時間の経過に伴い無対策でも、適当な降雨があり土壌水分が保持されれば自然に土壌微生物が形成され、土砂流出が抑えられることがこれまでの成果などによって明らかになっている。したがって、今回の観測では圃場更新直後の期間（平成 17 年 11 月中旬～平成 18 年 2 月中旬）における対策効果に着目した。

観測の結果は図-3 に示すとおり、単位面積当たりの流出土砂量は大きく異なり、土壌微生物を早期形成させた No.2 と No.3 の圃場からの流出土砂量は、無対策の No.1 および No.4 圃場の約 1/10 以下となっている。このとき、同時に観測した各圃場の転倒柵式流量計による流出量はいずれも同等である。また、図-4 に示す侵食に関する降雨エネルギーの評価指標（降雨係数：土壌流出予測式（USLE）

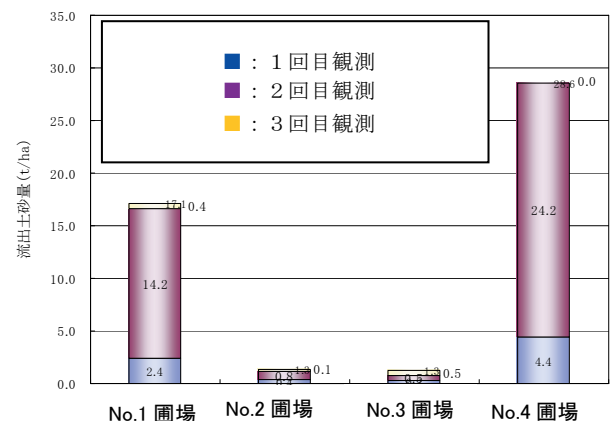


図-3 単位面積当たり流出土砂量

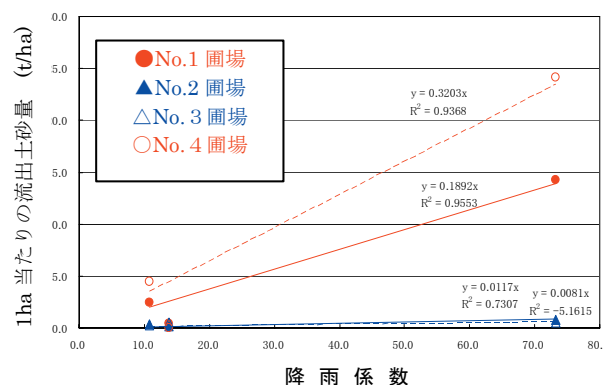


図-4 降雨係数と単位面積当たり流出土砂量

におけるパラメータ)との関係を見ても、No.1 および No.4 は降雨係数が大きくなる程、単位面積当たりの流出土砂量が大きくなるのに対し、No.2 および No.3 は降雨係数が大きくなっても単位面積当たりの流出土砂量は大きな変化はない。このように、土壌微生物による侵食抑制効果は明らかであり、これまでに確認してきた室内試験、小規模の野外試験などの結果を追証するデータが得られた。また観測結果によると、肥料の散布方法（混和、表面散布）などによる違いは見られていない。

#### ④ 現地における実験結果まとめ

被覆率の違いを考慮しても、上記のとおり土壌微生物の早期形成が、土砂流出防止に対して高い対策効果を有することは明らかである。また、ビニールシート被覆による水分蒸発防止を行うと土壌微生物の早期形成が促進されること、土壌微生物の早期形成が作物などの生育に影響を与えないことが確認でき、本対策の妥当性が認められた。

### (3) 室内侵食実験

#### 1) 実験方法

現地での実証実験は沖縄県石垣島で実施したが、室内実験により当対策工の適応性を検証するために、他の土壌（早明浦ダム周辺の山地斜面の土壌および桜島火山灰）を対象とした。室内実験では、回転流型および通常の水路型の装置を用いた。回転流型（図-5）は、2重円筒内に一定水位を保持しつつ上部で羽付き円板を回転させ、内部の水に回転流を起こす構造である。回転速度は35～130rpmの5、6段階とし、各10分間回転させた。実測によると、地表面近傍約2mmの流速は回転数の0.76倍cm/minである。流出土砂は地表面近傍の吐出口から全量を受け、乾燥重量を計測した。また、赤土（国頭マージ）に対しては実際と同様の薄層流における流れと流出土砂量との関係を定量化するため、水路を用いた侵食実験を行った。実験は勾配3%に設定した水路（幅0.3m、延長3m）に、対象土を入れた容器（幅0.3m、長さ1m）を設置し、水深0、2、4、6、8、10mmの薄層流を各10分間流した。流出土砂量は、流末

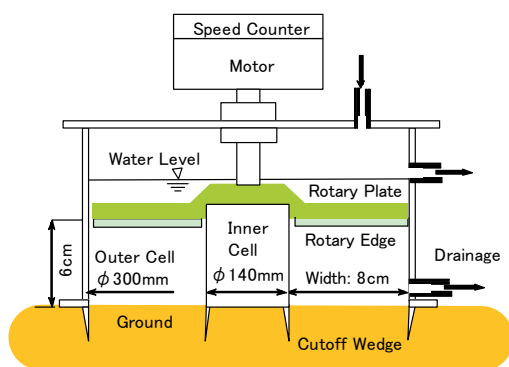


図-5 回転流式侵食試験装置

に貯留した全流出水および土砂を乾燥して土砂の重量を計測した。

#### 2) 実験結果

赤土、山地斜面土、桜島火山灰を対象として、バガスを混合した場合と無混合の場合における回転流型による実験結果を図-6に示す。実験に用いた試料はそれぞれ養生14日後のものである。早明浦ダム周辺の広葉樹林の山地斜面の土壌を除いて、バガスを混合したケースの方が土砂流出が始まる流速が大きくなっている。これは、バガスを混合することで土壌微生物が形成され（写真-2、3、4 参照）、侵食し始める限界の流速が大きくなっていることを示す。早明浦ダム周辺の広葉樹林土において無混合とバガス混合にこの流速の差がないのは、すでに現地で微生物の栄養源である腐食物が富んでいたため、土壌微生物の土砂流出抑制効果が顕著に現れないと推察される。

次に、赤土におけるバガス混合効果に関して、矩形水路を用いた実験を行った。水路勾配3%におけるバガス混合比0.2%（乾燥重量比）の養生日数別結果（図-7）のように養生日数の増加に伴って流出土砂量は明らかに低減している。

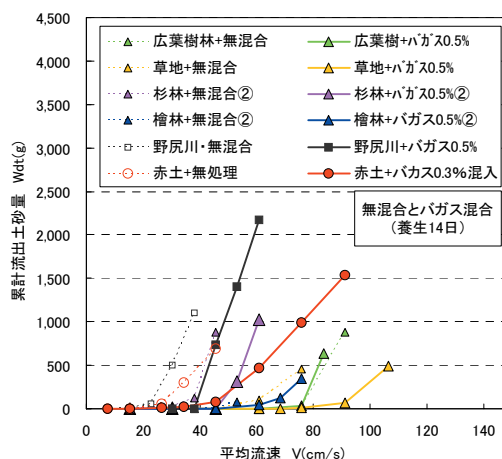


図-6 土砂流出量と平均流速の関係（回転流型）

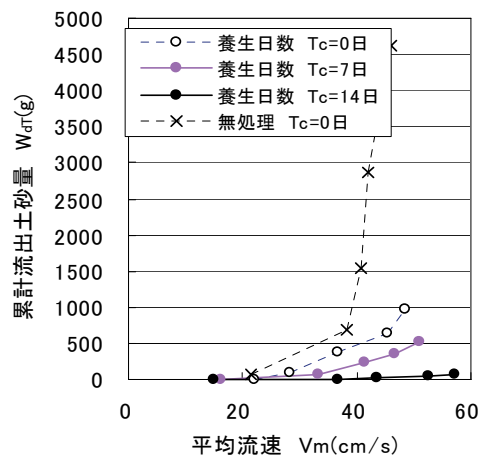


図-7 水路実験による平均流速と流出土砂量の関係（混合率0.2%）

一方、赤土のように細粒分を多く含む材料では、地表面に粘着力が働くことで耐侵食性が増すことが考えられる<sup>7) 8)</sup>。そこで、地表面のごく薄い層（地表から 3mm）の粘着力を計測できるように新たに作製した表層せん断試験機（土木研究所と日本工営による特許登録済）を用いて、赤土試料のもつ表層粘着力  $C_{0s}$  と水路実験の結果から求めた侵食速度  $E$  との関係性を求めた（図-8）。表層粘着力は、土壌の含水比とほぼ比例関係があり、飽和状態にある地表面の密度が低いほど粘着力は小さい<sup>9)</sup>。実験上の侵食速度は、流出土砂の体積を暴露面積と通水時間で除して求めた。図-8 より侵食速度は、表層粘着力の増加に伴って減少する。また、図-9 は赤土にバガスを混合した場合の混合比および養生日数をパラメータとする一連の実験結果に基づいて、侵食速度低減率（養生日数 0 日間の場合を 1）と養生日数の関係性を示す。水深  $h$  が 4~10mm では水深に関係なく、侵食速度は養生日数に比例して減少し、14 日経過で

養生 0 日間の約 1/10 に低減するなど、侵食速度を指標とする効果の評価が可能である。

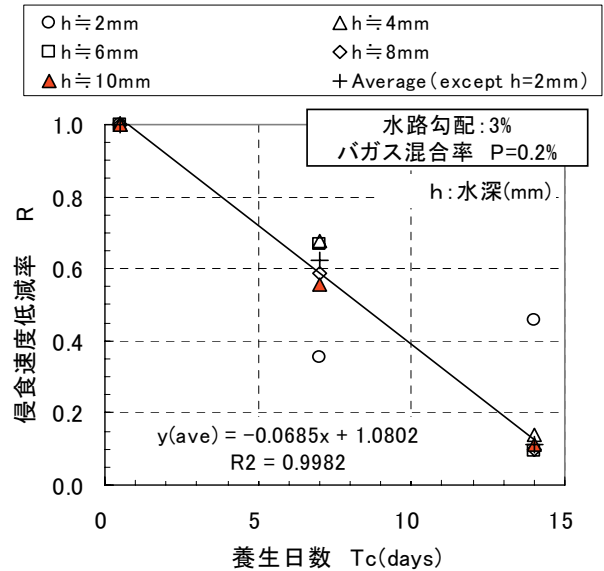


図-9 侵食速度低減率と養生日数の関係

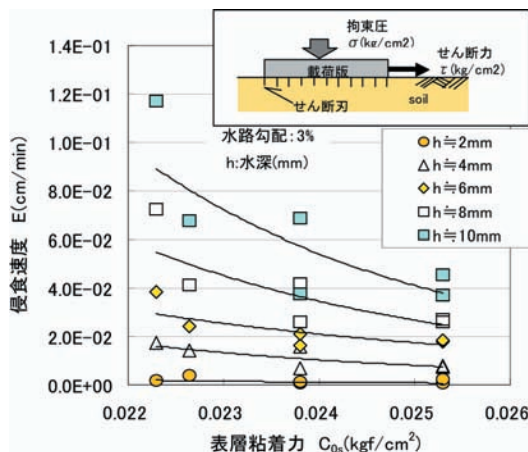


図-8 侵食速度と表層粘着力の関係

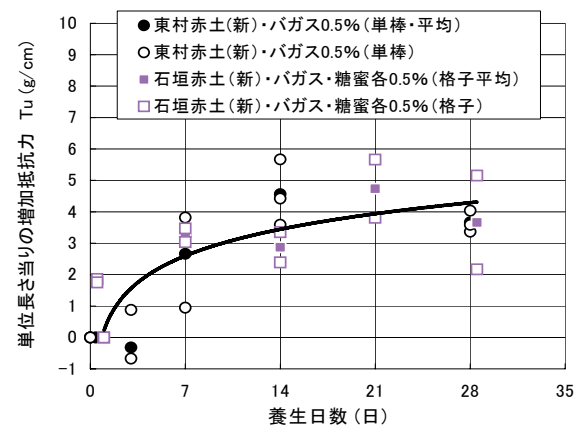


図-10 格子の引上げ抵抗力と養生日数の関係

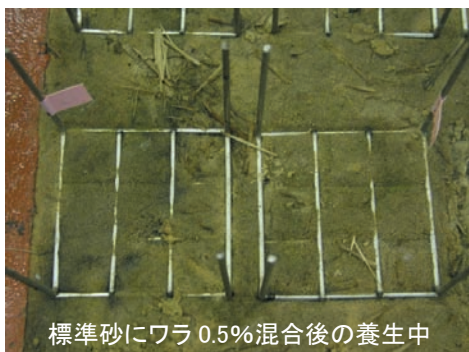


写真-3(1) ステンレス格子の地表面敷設状況

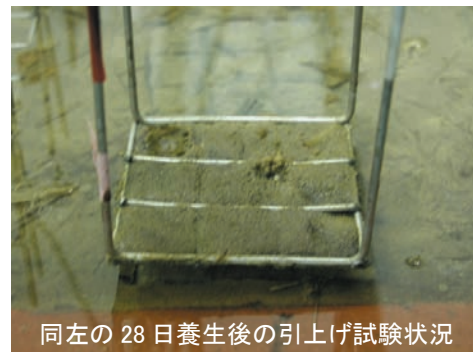


写真-3(2) 格子を引上げた状況

（地表面に敷設した格子には養生中に土壌微生物が格子間に繁殖するため、格子を水面上に引上げても自重では崩壊しない程度に土粒子が連結した膜を形成している）

#### (4) 土壌微生物繁茂による侵食抵抗に関する定量評価

##### 1) 試験の目的および方法

土壌微生物繁茂により表層のせん断抵抗力が増加すると考えられるが、試験結果によると試験機の構造的理(せん断前にせん断刃が微生物を切断する)のため、明確な差異を捉え得なかった。そこで土壌微生物の繁茂度の指標として、生体繊維群の引張り抵抗力に着目した。 $\phi 2.5\text{mm}$  のステンレス単棒もしくは格子を地表面に敷設しておき、養生後(土壌微生物の繁茂後)に静かに引上げると、棒を跨いで繁茂した微生物による引上げ抵抗力が生じる。抵抗力のピーク値と微生物が破断した後の死荷重との差を、土壌微生物繁茂による引張抵抗力としてみなすことができる。そのため、養生の経過に伴う微生物の繁茂度は、引張抵抗の増加として評価できる。この実験では長さ  $10\text{cm}$  の単棒、もしくは  $7 \times 7\text{cm}$  を 9 分割する格子(棒の延長は約  $70\text{cm}$ )を用いた(写真-3)。

##### 2) 試験結果

図-10 に、赤土(国頭マージ)にバガスを混合した場合の単位長さ当りの抵抗力と養生日数の関係を示す。土壌微生物は数日間で急速に繁茂し、14 日間で約  $3.5\text{gf/cm}$  の引張抵抗力の増加が見られる。写真-3 は無菌状態の標準砂にワラを混合し、下部を水浸した状態で養生した後、格子を引上げている状況である。繁茂した土壌微生物は土粒子を連結して膜を形成し、写真-3(2)のように水面上に持ち上げた状態でも形成された膜の自重による崩落がない程度の強さを持っていることが分かる。

ここでは、対策・養生後の侵食実験により得られた侵食速度を用いて、無対策で得られている表層粘着力と侵食速度の関係(図-8)に基づいてべき関数で近似)から土壌微生物繁茂後の表層粘着力を逆算により求めた。この逆算した粘着力と地盤本来のもつ粘着力との差は、微生物の繁殖によって増加した引張抵抗力によって、見かけ上、粘着力

が増加したとみなせる。この見かけの粘着力の増加量と侵食速度低減率の関係を図-11 に示す。

侵食速度低減率は見かけ粘着力の増加量の対数と直線関係が見られ、初期の僅かな粘着力の増加(引張抵抗力の増加)でも侵食速度低減効果があることを示している。

##### 3) 土壌微生物の土砂流出抑止効果の定量評価

次に、降雨時の表面流に対する菌類などの緊縛による土壌の侵食抑制効果を定量的に把握するため、侵食実験と引き上げ試験結果を基に、この効果を侵食速度として評価することとした。侵食速度は土壌表面に与えられる外力としての薄層流に起因する掃流力に比例し、土壌の強さに反比例するとした考えに基づいて算出している<sup>10)</sup>。

ここでは、筆者らがすでに提案している<sup>11)、12)、13)</sup>無処理状態の赤土に関して、土壌の強さとしての表層粘着力に着目した式を基本形とした。養生によって格子周辺で繁茂する土壌微生物の影響を受けて増加する引上げ抵抗力を見かけ粘着力の増加分として補正係数( $\beta$ ;  $\beta=1$  のときは無対策状態を示す)を求めた。これらを用いて、以下の侵食速度式を導いた。

$$E = 4 \times 10^{-7} (U_* - U_{*c}) \cdot \left( \frac{C_{0sc}}{\beta \cdot C_{0s}} \right)^4 \quad (1)$$

$$\beta = R^{-1/4} \quad (2)$$

$$R = -21 \times \Delta \tau_T + 1 \quad (3)$$

$$\Delta \tau_T = 0.013 \ln(T) + 0.0013 \quad (4)$$

ここに、

$E$ : 侵食速度 (cm/s)、 $U_*$ : 摩擦速度 (cm/s)、 $U_{*c}$ : 限界摩擦速度 (cm/s)、 $C_{0s}$ : 表層粘着力 (N/cm<sup>2</sup>)、 $C_{0sc}$ : 限界表層粘着力 (N/cm<sup>2</sup>)、 $\beta$ : 菌類の繁茂による  $C_{0s}$  の補正係数(みかけ上の粘着力)、 $R$ : 侵食速度低減割合、 $\tau_T$ : 引き上げ抵抗力の増加分 (N/cm)、 $T$ : 養生期間(室内)(日)

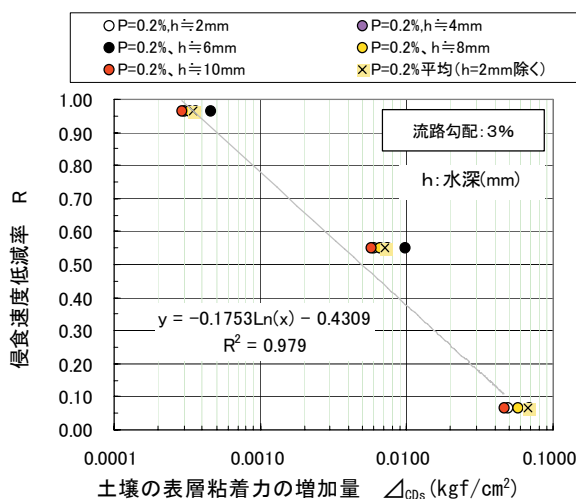


図-11 見かけ表層粘着力の増加と侵食速度の関係

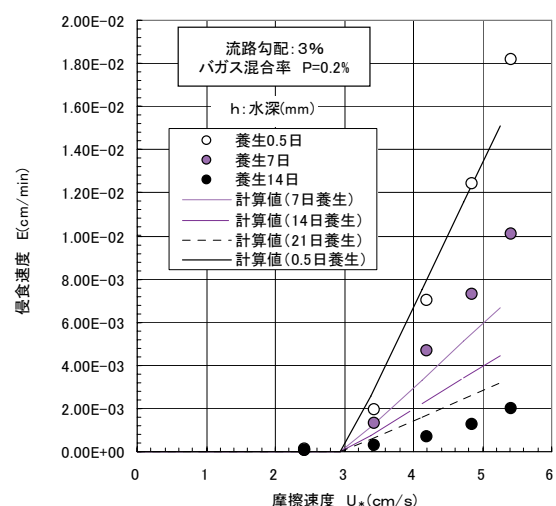


図-12 侵食速度と表流水による摩擦速度の関係における計算値と実験値の比較

上式に実験で得られた  $U^*c=3.0\text{cm/s}$ 、限界表層粘着力  $C_{osc}=1.0\text{N/cm}^2$ 、表層粘着力  $C_{osc}=0.25\text{N/cm}^2$  を代入し、図-12 に示すように実験値との適合をみると、養生14日間で計算値の方がやや大きくなるが、概ね実験値に整合する結果を得た。

### (5) 実体顕微鏡による繁茂状況の観察

#### 1) 観察方法

観察はデジタルマイクロスコープを用い、200倍で観察を行なった。対象土と繁茂促進材（バガス・ワラと土の乾燥重量比=0、0.2、0.5、1.0%）の混合試料をシャーレに入れ、養生箱内（相対湿度約100%、温度  $20\pm 2^\circ\text{C}$ ）で0、7、14、28日経過毎に定点観察した。

#### 2) 観察結果

写真-4 は赤土（国頭マージ）、早明浦ダム周辺の山地斜面の土壌（杉林）および火山灰土（桜島）の土壌微生物の繁茂状況である。どの土壌においても観察開始時には微生物は確認されていないが、14日間の養生でかなりの繁茂が確認できる。繁茂している土壌微生物を概略的に同定すると、赤土に繁茂している糸状菌は *Trichoderma*（トリコデ

ルマ：ツチアオカビ）、*Cladosporium*（クラドスポリウム：クロカビ）、*Alternaria*（アルタナリア：ススカビ）、*Penicillium*（ペニシリウム：アオカビ）などである。また、写真-4の赤土試料では藻類は見られないが、現地に自生している藻類には *Cyanophyceae*（藍藻類）、*Chlorophyceae*（緑藻類）などが確認されている。

### 3. 土壌微生物の強さに関する若干の考察

土壌菌糸・藻類の一本の太さは数  $\mu\text{m}$  でしかない。このような微弱な生体の強さについて若干の考察を以下に行った。格子引上げ試験によると、引上げ抵抗力は図-10に示すように、14日養生時で  $2\sim 8\text{gf/cm}$  である。赤土（国頭マージ）は膨潤性があり、水浸後の地表面は指に抵抗をほとんど感じないほどに軟弱化している。このときの土壌の強さは、せん断粘着力が  $10\sim 20\text{gf/cm}^2$ 、また同じ状態での引張り粘着力（図-14に示す方法で求めた）が、 $0.2\sim 2\text{gf/cm}^2$  であった。

流水下の地表面における応力状態は図-13が想定されるが、非粘着性の砂礫とは異なり、粘着性土壌の侵食メカニズムにおける物理モデルはまだ明確になっていない。しかしながら、水深1cmの勾配3%程度の薄層流（水路実験による実測の平均流速は  $40\sim 60\text{cm/s}$  で土壌微生物の繁茂程度で流速は異なる）であり、土砂ブロック下面の流速を0とすると、単純にベルヌーイの定理により揚力として  $0.7\sim 2\text{gf/cm}^2$ （揚力係数0.5）が推定できる。このように揚力と引張り粘着力とは、ほぼ釣り合い状態にあるが、これに土壌微生物の引張り抵抗力が作用したときに、土壌の流出を防止する機能が十分に発揮されるとの推察が可能である。

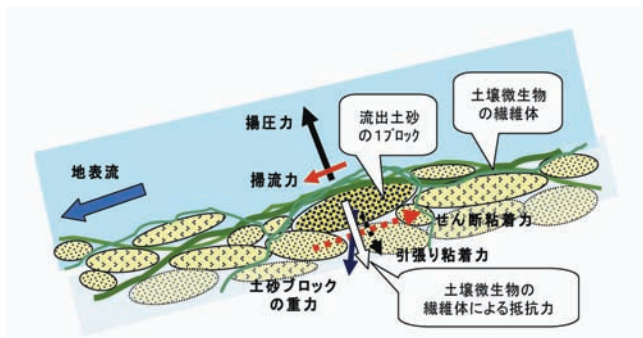


図-13 表流水と土砂ブロックに発生する応力状態

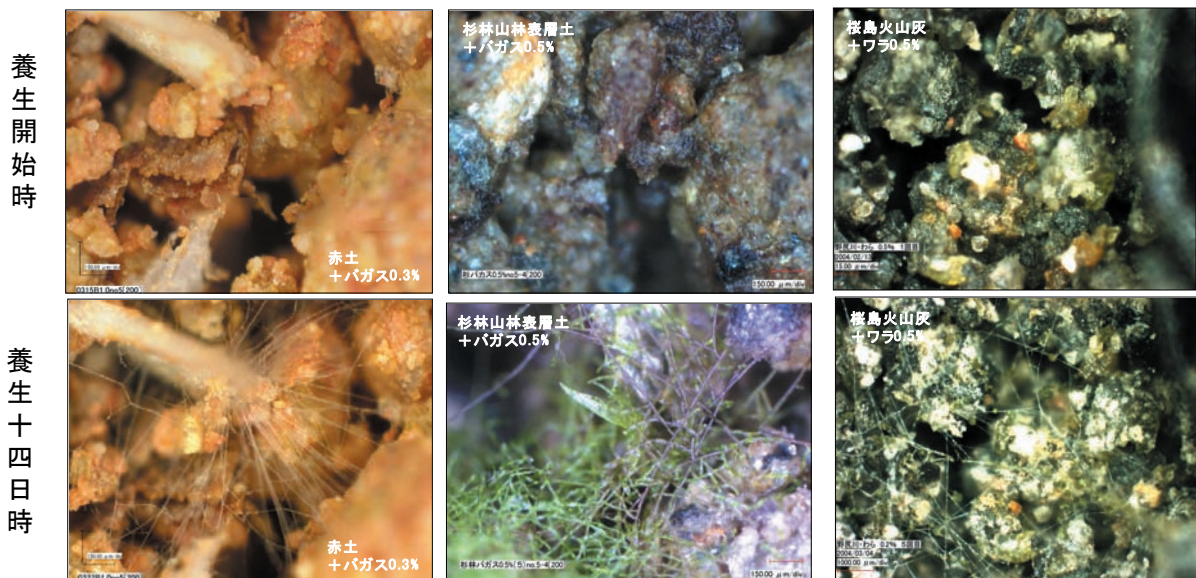


写真-4 養生前および養生14日の顕微鏡観察結果の比較

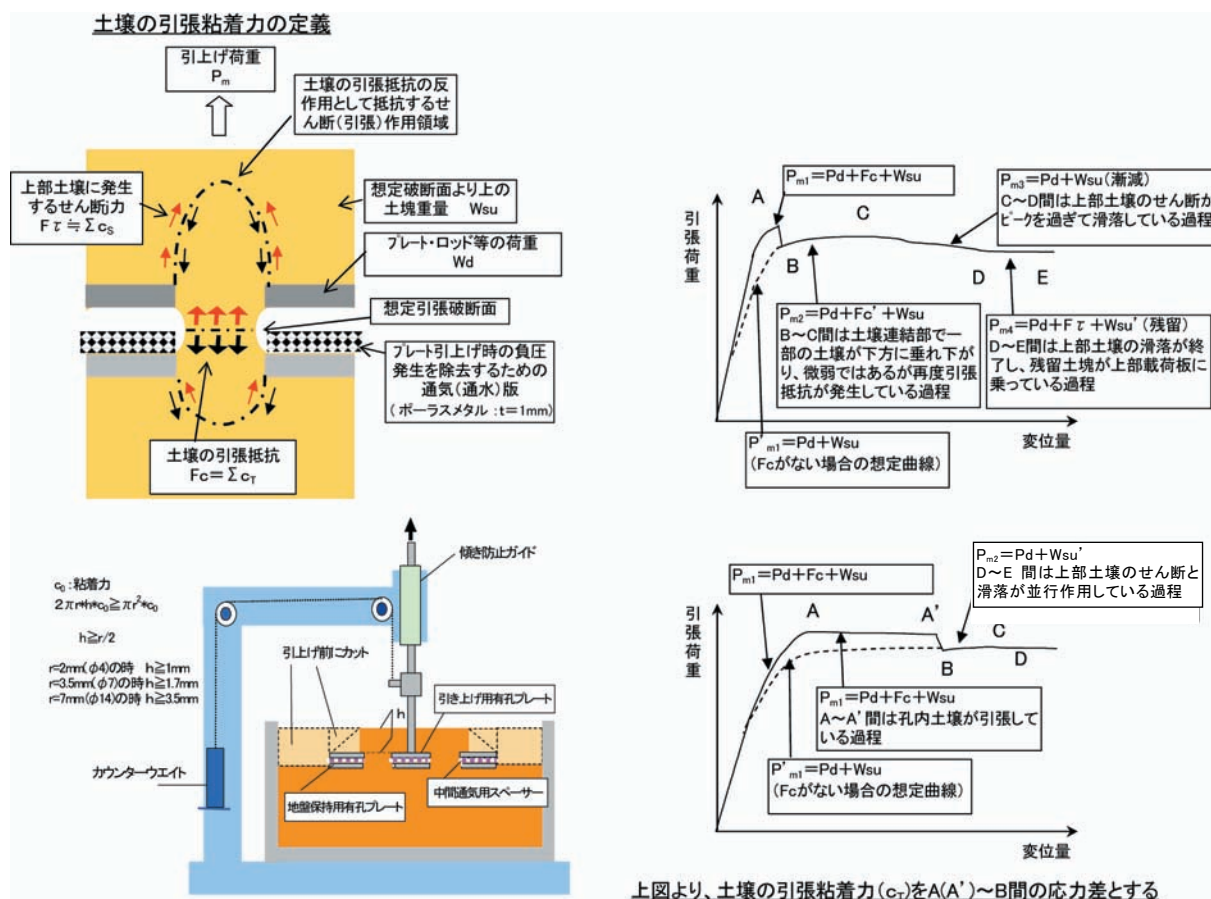


図-14 超軟弱粘性土の引張り粘着力測定方法

#### 4. まとめと今後の課題

土壌微生物の早期導入が、農地などの面的発生源に対して環境や営農へのリスクが少なく、適用性の高い対策手法になることが概ね確認できた。これらの成果は土木研究所と日本工営との共同で特許申請しており、バガスなど農産廃棄物を有効活用して土壌菌類を活性化する方法が公開中であり、乾燥して粉体にした藻株を散布する方法はすでに登録済みである。土壌微生物の早期繁茂には、対策後の初期(約1~2週間)の土壌水分の維持(含水比として約10%以上)が必要である。しかし、ビニールマルチは労力、コストの面で問題があるため、より簡便な対策を開発する必要がある。

また、粘性土の侵食メカニズムについては未解明領域にあるが、赤土における侵食速度式(経験式)を用いて、土壌微生物による侵食抑制効果を見かけ表層粘着力の増加として評価することにより、対策効果を定量評価する目途が得られた。さらに、粘性土の侵食メカニズムとして、土壌ブロックと流水における力の釣り合いを詳細に考察することにより、粘性土の侵食メカニズムの解明と並行して土壌微生物の効果を力学的に説明することが発展的課題である。

謝辞：菌種の同定については、(独)農業環境技術研究所微生物分類研究室の對馬誠也室長、小坂橋基夫主任研究官お

よび吉田重信研究官に多大な協力をいただきました。ここに深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 南哲行、小山内信智、山田孝、黒崎靖介、仲村勝正、与那嶺淳(2001): 沖縄島における流域単位での赤土砂の流出特性について、砂防学会誌、Vol.54、No.3、p.39-46
- 2) 北原 曜:「森林が表面侵食を防ぐ」、森林科学、1998.2、pp16~22
- 3) 桜井亘、徳永敏朗、南哲行、山田孝、下村幸男(2002): バガス混入による赤土砂の耐侵食性の向上について、平成14年度砂防学会研究発表会
- 4) 小山内信智、田中秀基、桜井亘、下村幸男(2004): 菌類等を利用した侵食対策手法に関する研究、平成16年度砂防学会研究発表会、P067、pp.376-377
- 5) 溝淵綾、中野武登、下村幸男、冨坂峰人、長谷川啓介(2004): ラン藻を利用した土壌微粒子流出防止に関する研究:土木学会第59回年次学術講演会、7-157、pp.313-314
- 6) U.S.D.I. Bureau of Land Management (2001): BIOLOGICAL SOIL CRUST: ECOLOGY AND MANAGEMENT, Technical Reference 1730-2
- 7) 日下達郎、田中宏平、藤田則之、四ヶ所四男美(1980): 粘着性のある土壌の剥離・移動限界について一雨水流による土

壤の侵食特性 (I) 一、農業土木学会論文集、第 90 号、p.9  
- 16

- 8) 関根正人、熊谷利彦、尾藤文人 (1999) : 粘着性土の侵食機構に関する基礎的研究、水工学論文集、第 43 巻、p.747-762
- 9) 南哲行、仲野公章、山田孝、下村幸男、小野寺勝 (2002) : 沖縄島の圃場地表面に形成される過飽和層での赤土侵食機構、砂防学会誌、Vol.55、No.3、p.3-11
- 10) 欧国強、石川芳治、前田昭浩、草野慎一 (1994) : Ground-erosion Resistance Property of Kanto Loam、新砂防、砂防学会誌、Vol.47、No.3 (194)、p.11-17
- 11) 桜井亘、仲野公章、南哲行、山田孝、下村幸男、菊地英明 (2003) : 赤土砂の侵食速度式を考慮した赤土砂流出予測手法、平成 15 年度砂防学会研究発表会
- 12) S. Tagata, J. Kurihara, T. Yamakoshi, S. Shimomura, M. Tomisaka, Y. Kobayashi (2006): Experimental Study on Erosion Control Using Natural Soil Microorganisms, 14th International Soil Conservation Organization Conference, Morocco,
- 13) Nyoman Suwartha, Takashi YAMADA and Sachio SHIMOMURA (2006): An Experimental Study on Cohesive Soil Erosion due to Overland Flow at the Steep Slope Field in the Mrica Watershed, Indonesia, INTERPRAEVENT International Symposium, Niigata