

植生の根系と葉系が 降雨による斜面浸食過程に及ぼす影響

EFFECTS OF VEGETATION ROOT AND LEAF ON SURFACE EROSION CAUSED BY RAINFALL

関根正人¹・鍋島康大²

Masato SEKINE¹, Kodai NABESHIMA²

¹ 正会員 工博 早稲田大学理工学術院教授 (〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

² 学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科 (同上)

In this study, the effect of vegetation leaf and root on surface erosion was investigated by conducting a series of experiments on slope erosion by artificial rainfall which has raindrop impact. Both a bare slope of sand and that with much vegetation were set in the experimental flume. Pachysandras which have many leaves to defuse raindrop impact were used. As a result, it was found that the amount of eroded sediment from slope with Pachysandra was considerably smaller than that from bare slope, and it was also proved that the surface erosion by the impact of raindrop was obviously reduced by the leaf system of Pachysandra. We also found that the extension of eroded channel network and the amount of eroded sediment from slope were affected by the arrangement of Pachysandras.

key word : surface erosion, vegetation, channel formation, sediment yield, artificial rainfall.

1. 序論

近年, 山腹斜面の浸食や農地からの土壌流亡など, 降雨により引き起こされる浸食被害が環境防災上話題となることが少なくない¹⁾. この現象は, 地球温暖化に伴い発生が懸念される豪雨によって, ますます深刻なものとなる可能性がある. 著者らは, こうした浸食現象の理解を深めることを目指した基礎的な実験と, これを数値予測可能とするための手法の開発とに努めてきている. こうした研究の一環として, 関根・大前²⁾らは, エンバク (*Avena sativa*) という植物を繁茂させた砂斜面を対象とした実験的研究を行った. この植物は成長の早いことが特徴で, 著者らの目的に適うものであるが, 実際に斜面に植えてグランドカバーとする植物とは明らかに異なる形状を有するものであった. そこで, 本研究では, この成果を踏まえた上で, 新たにフッキソウ (*Pachysandra terminalis*) という植物を検討の対象とし, その根系ならびに葉系が斜面の浸食過程に及ぼす影響を定量的に調べることにした. ここでは, 植生に被われた斜面を「植生斜面」と呼ぶことにし,

これと裸地斜面のそれぞれに対して同一の人工降雨を与えた実験を行うことで, 根系と葉系のそれぞれの効果によって斜面浸食量ならびに土砂流出量がいかに抑制されるかを明らかにすることを目指す. また, 植生の配置の仕方を変えた実験を行うことで, 斜面の浸食状況にどのような影響が現れるかを調べた. ここでは, 下流端から上流に遡上するように形成される流路のパターンが, 植生の存在によってどのように変化するかに注目している.

2. 実験の概要

実験は, 全長 160 cm, 幅 100 cm の水路内に斜面を形成し, その水路上方から散水ノズルを用いて粒状の人工降雨 (雨滴平均粒径 0.66mm) を与えることにより行った (写真-1 参照). この斜面は, 水路中心軸を谷線として左右対称に傾斜した”Open-book”型の横断面形状をもち, 流下方向にも一様に傾斜したものであり, 縦横断方向の傾斜はそれぞれ 5 % とした. 降雨量については, 斜面全域を 420 (流下方向 28 × 横断方向 15) の区画に分け, その各々に対



写真 -1 実験装置の概要：中央の Box 部分が水路であり、ここに模型斜面を構成する。また、写真上端に設置されたノズルを通して斜面に粒状の人工降雨を与える。水路手前に見えるのが、斜面下流端に設けたスリット状の開口部であり、ここから水および土砂が流出する。

して単位時間当たりの降雨量を測定した。その結果を整理したのが図-1であり、ここには計測された降雨強度のコンター図が描かれている。この図より、雨は斜面上ではほぼ一様に降っていたことがわかる。また、後述する5ケースの実験の降雨強度の平均値は147.4mm/hrであった。なお、この降雨量については時間によらずに一定とした。この人工降雨の雨滴については、その平均径が0.66mmの粒状の形状を有することから、雨滴衝撃の影響は顕著であると判断している。

本実験では、フッキソウを5種類のパターンで配置し、これが十分に成長した状態にある植生斜面を対象とした浸食実験を行った。斜面構成材料としては硅砂7号（平均粒径0.105mm）を用いた。また、この斜面の下流端には、中心軸の延長線上に幅4cmの開口部（スリット）が設けられており、浸食された土砂と雨水はここを通過して流出する。この開口部の下方には、固定堰が設置されており、砂層の浸食深が4cm以上に及ばないように制御されている。浸食実験開始時の初期斜面は、空隙が浸透水で満たされた状態とし、ほぼ飽和の状態にある。

フッキソウは、ツゲ科の常緑小低木であり、日本を含む東アジアに広く分布している。山地の林内に生え、地表を覆うグランドカバーとしての機能が期待されており、ここでの実験の目的には適した植物と判断している。根は主根と側根からなる被子植物の双子葉類であり、葉は深緑色で、上縁に数対の鋸

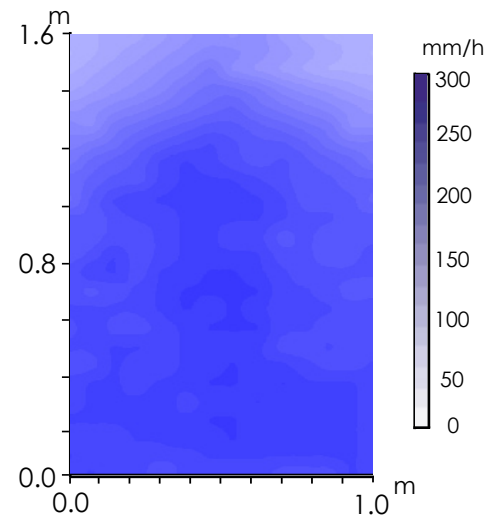


図-1 降雨量の面内分布

歯が存在している。本研究では、以下のように生育させたフッキソウを斜面に植え替えることにより植生斜面を構成した。まず、茎の高さが5cm程度の苗木3本を、直径8.5cm、高さ7.5cmの円柱型カップに挿し木し、黒土において28～29週間にわたって育成した。次に、3本の茎の高さが10cmを超え、根が十分に発育したものを、カップから取り出して黒土を落とす。そして、裸地斜面の所定の位置を掘り下げることで作った凹部に、このようにして育てた株単位のフッキソウを、根を束ねるように植え替えた。その後、さらに1週間かけて養生し、砂質土になじませてから浸食実験に供する。この結果、実験時にフッキソウが流水の作用や雨滴衝撃の影響を受けて倒伏したり、根が抜けたりすることはなかった。これにより、植生全般が発揮する耐浸食性について定性的に比較検討することが可能と判断した。ただし、フッキソウという植物が、本来持っている耐浸食性能を十分に発揮できる状態にまで成長していたかについては、厳密な確認ができていない。この点は今後の課題とする。

表-1に一連の実験条件をまとめて示す。ここでは、以下の二系統の実験を行った。第一は、植生の根ならびに葉茎が斜面の浸食に及ぼす影響を調べるためのものである。この実験はCaseA, B, C-1の3ケースに分けて行われた。Case Aは植生のない裸地斜面を対象とした実験であり、Case Bは植物を生育させた後に葉を切り落とし、茎を地表面から2cm程度の高さで切除した斜面を対象としたものである。最後のCase C-1は植物本来の耐浸食性をすべて発揮させた実験であり、Case AとBの比較により植物の根系の効果が、Case BとCの比較により植物の葉系の効果を明らかにできるものと考えた。第二は、Case C-1に対する対照実験であり、植生の配置方法を変

表 -1 各実験条件

Case	A	B	C-1
根系の有無	無	無	有
葉系の有無	無	有	有
降雨強度(mm/h)	147.0	151.7	147.9
被覆率(%)			24.51
Case	C-1	C-2	C-3
配置方法	千鳥状	千鳥状	格子状
中心軸の植生(個)	4	5	0
降雨強度(mm/h)	147.9	146.0	144.5
被覆率(%)	24.51	25.91	25.75

えて行ったものである。Case C-1 は、下流端開口部の前面にフッキソウの株が位置しないように千鳥状に配置したものであるのに対し、Case C-2 は、開口部の前面に株がくるような千鳥状配置となっている。一方、Case C-3 では、斜面上に配置される植生の密度はほぼ等しいものの、その配列が格子状（横断方向 30cm × 縦断方向 20cm）になっている点が異なる。なお、この場合には上記の開口部の前面に株が存在しない配置となっている。一例として、Case B と C-1 の実験前の斜面の状況を写真 -2 に示す。この場合には、下流端に最も近い位置の植生数は横断方向に 4 株であり、30 cm を一辺とする正方形の角の位置に加えて、その対角線が交差する位置に植生を配置している。一方、Case C-2 では縦断方向のパターンを一行分ずらしており、下流端に最も近い位置の植生数が 3 株となっている。これら一連の実験により、根が発揮する緊縛効果と杭効果、葉による雨滴衝撃緩和効果をそれぞれ分けて評価し、これらが耐浸食性向上に及ぼす影響を定量的に検討した。

実験時の植生の状態について簡単に説明を加える。まず、植生の根については、実験後の測定により、ほぼ全ての苗の根系が想定される最大浸食深である 4 cm よりも長いことを確認しており、根系が浸食に及ぼす影響を考慮するには十分であったと判断している。また、実験開始前の地上部の高さ、種子根の長さ、葉全体の寸法などを計測している。一例として Case C-1 の結果についてふれる。浸食実験開始時のフッキソウの高さは地表面から 10.5 ～ 16.7 cm（平均 13.2 cm）、種子根の長さは 6.0 ～ 9.5 cm（平均 7.5 cm）であった（写真 -3 参照）。また、フッキソウ 1 株の葉全体の寸法を上方から測定し、各株の葉の被覆面積を算出した。その結果は、斜面全体に占める植生の被覆率として表 -1 に示されている。

実験では、降雨開始から 30 分間の浸食過程を調べることとし、この間は浸食が進行していく状況を写真ならびにビデオ映像として記録した。斜面の地形形状に関しては、降雨開始前ならびに浸食実験後



写真 -2 植生の配置状況：上段は Case B、下段は Case C-1 の実験前の様子である。



写真 -3 フッキソウの形状（左：挿し木後 28 週）とその周辺の浸食状況

にレーザ式変位センサーを用いてその高さの面的な計測を行った。この際、斜面側壁に平行な方向に縦断測線をとることとし、横断方向の間隔を 1 cm とし、合計 99 本の測線を設定した。そして、各測線に沿って変位センサーを走行させることで、それぞれ約 150 点の斜面高のデジタルデータを記録した。このほか、斜面下流端の開口部からの流出水ならびに流出土砂を 1 分毎に連続採取し、それぞれ計量した。さらに、斜面構成材料の含水比についての計測も実験の前後で行っている。

3. 実験結果と考察

(1) 植物の根および葉が斜面浸食に及ぼす影響

図 -2 には、Case A, B, C-1 で得られた浸食実験の

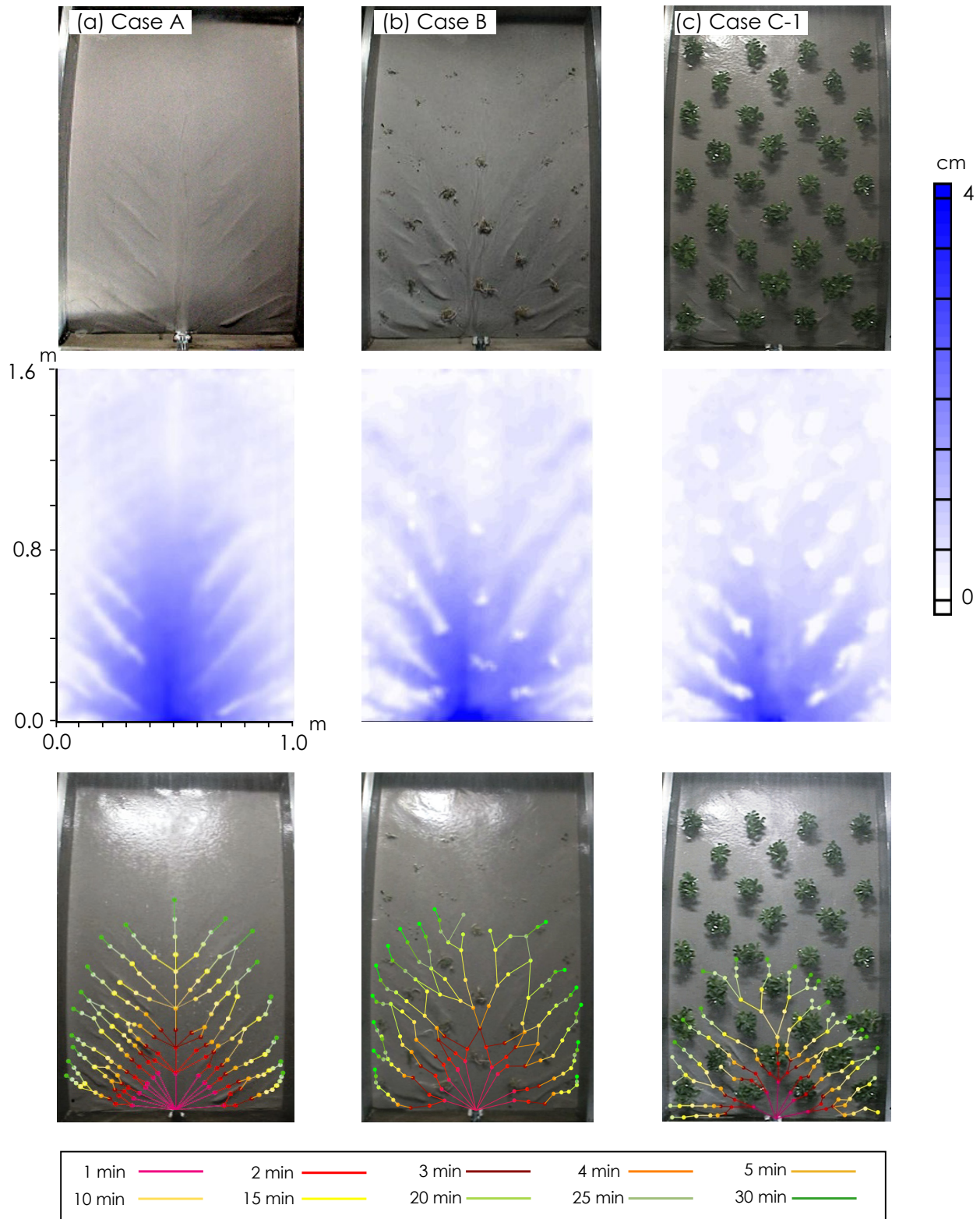


図-2 斜面の浸食状況 (Case A, B, C-1) : 上段が浸食後の斜面の写真, 中段が浸食深コンター図, 下段が流路の遡上パターン (降雨開始からの経過時間毎に色分けして示しており, 線分の上端が各時刻の流路先端部の位置を表す)。

結果を示す。図中には、終了時に撮影された斜面の浸食状況を表す写真と、実験前後に計測された斜面高の差（すなわち浸食深）のコンター図に加えて、各時刻における流路のフロント位置を結んで描いた流路遡上図を3つのケース毎に示してある。実験時

の観察ならびにビデオ映像から、斜面が浸食され流路が形成されていく過程において、表面流の掃流力に起因する表面浸食、人工降雨の雨滴衝撃による浸食の促進、ならびに側岸ならびに流路フロントにおける斜面崩落、の3つが重要であると考えられる。

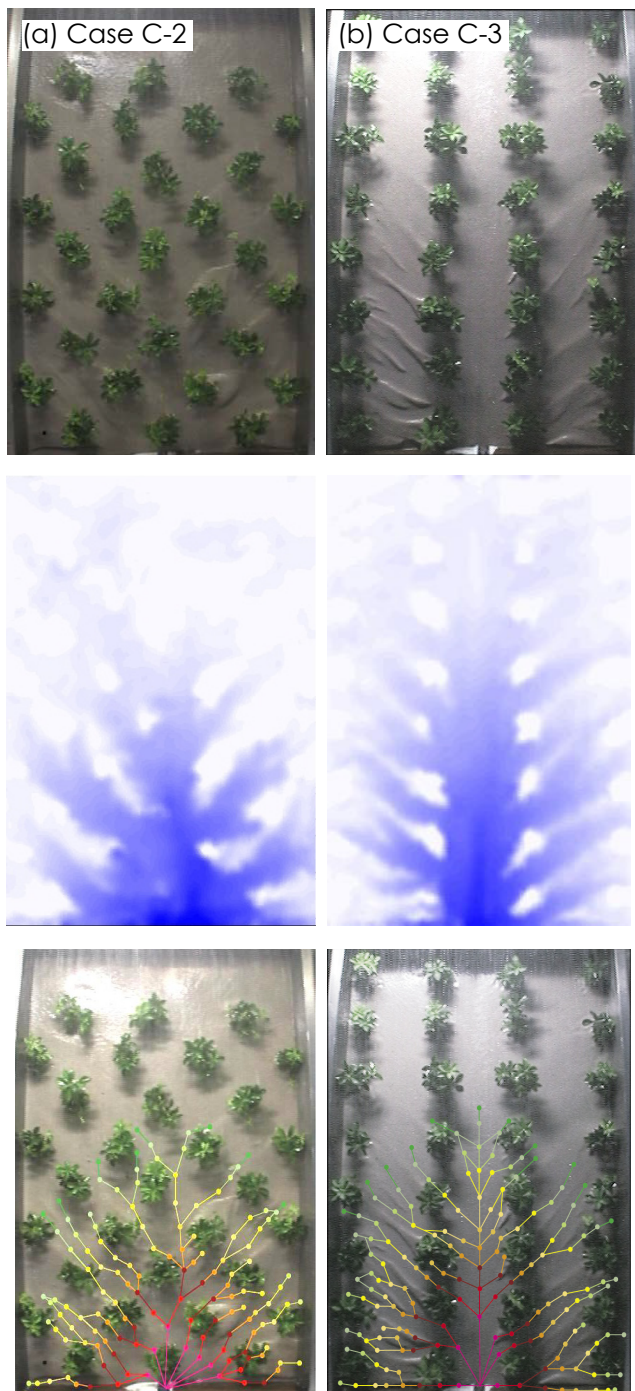


図-3 斜面の浸食状況 (Case C-2,C-3) : 上段が浸食後の斜面の写真, 中段が浸食深コンター図, 下段が流路の遡上パターン (凡例は図-2 と同一)

たとえば、植生の根系の土砂捕捉効果により斜面崩落が抑制され、オーバーハング状の斜面が形成されている。また、葉系の雨滴衝撃を緩和する効果により、表面浸食自体が抑制されたと判断される。さらに、図-2 ならびに実験時の観察から次のことが理解された。植生斜面の場合には、植生を避けるように流路が形成され、それが上流に向かって伸びていくため、植生の背後、言い換えれば斜め上方の区域で浸食が抑制される傾向が見られる。この傾向は、根

だけしか残っていない斜面の場合にも見られ、特に主流路の形成が始まる段階において顕著であった。なお、裸地斜面では流路が中心軸からほぼ左右対称に伸びていくのに対して、植生を伴う斜面の場合には、株単位の植生の位置のわずかな違いの影響を強く受け、結果として非対称とも見える流路パターンとなった。なお、葉が存在する Case C-1 の場合には、雨滴が葉を伝って斜面に落下するため、斜面の上に不規則な斑状の浸食跡が観察されている。

(2) 植生の配置の違いが斜面浸食に与える影響

図-3 には植生の配置パターンの違いに伴う浸食状況の変化を調べた結果をまとめて示した。これと前出の図-2(c) の Case C-1 とを比較して見ていくことにする。前述の傾向は同じく認められたほか、これらの結果の比較から、流路の形成に次のような特徴が現れることが理解された。

(1) 植生を千鳥状に配置した場合と格子状に配置した場合とでは、浸食形状に大きな違いが認められる。下流端開口部の前面に植生が存在しない Case C-1 と C-3 を比較すると、格子状配置の場合には主流路の発達とその遡上が顕著であり、一直線に上流に伸びる明確な流路が形成されることになった。また、浸食を受ける区域もより上流まで及んでいる。このことから、植生の存在が流路の形成にきわめて強い影響を与えることがわかる。

(2) Case C-1 と C-2 との違いは、下流端開口部の前面に植生が存在するかしないかにある。前面に植生がある Case C-2 では、前面に位置する植生の影響により流路分岐の初期段階がより複雑となり、その後の流路形成にも大きな影響を及ぼしている。これは、流路がこの前面の植生を回り込むように遡上するためであり、結果としてこの植生の周辺で大きな浸食域を形成することになった。

(3) 植生が土砂の流出特性に与える影響

流出土砂量について調べる前に、水路下流端開口部から流出する水量の時間変化について見ておく。図-4 にこの計測結果を示した。本論文で説明した 5 ケースの実験は、いずれもほぼ同一の降雨強度の雨に対して行われており、降雨開始前の斜面は水で飽和された状態にあった。このことを念頭に図を見ると、流出水量は実験開始後 4 分程度でほぼ一定となり、それ以降はいずれのケースともほぼ等しい値となるが見て取れる。このように流出水量に顕著な差はなく、いずれのケースも適切に降雨が供給されたと判断できる。そこで次に、図-5 に示された流出土砂量の時間変化について見ていく。流出土

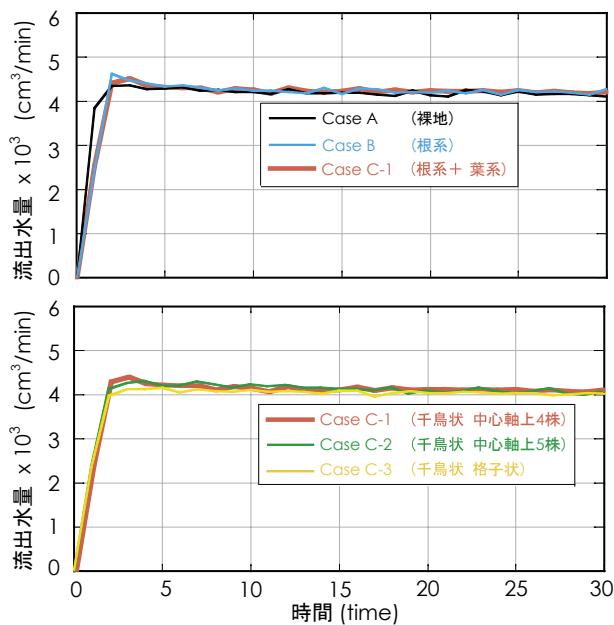


図-4 流出水量の時間変化（上段：図-4(a) Case A, B, C-1；下段：図-4(b) Case C-1～3）

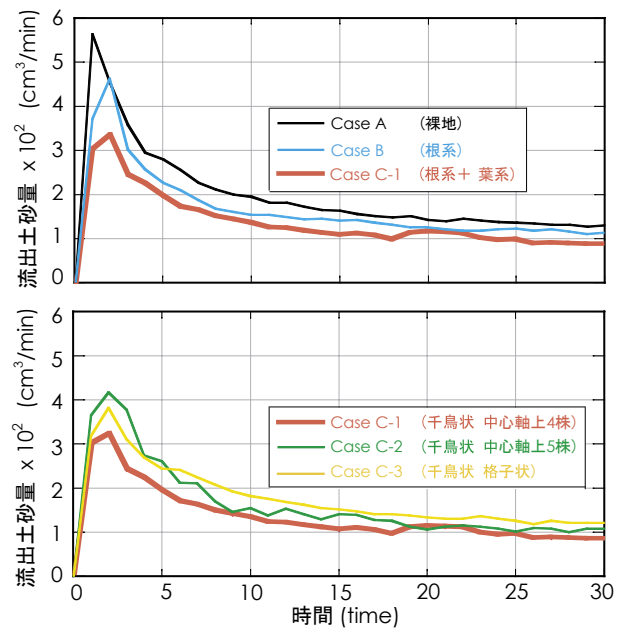


図-5 流出土砂量の時間変化（上段：図-5(a) Case A, B, C-1；下段：図-5(b) Case C-1～3）

砂量に関して明らかになったことは以下の通りである。

(1) 図-5(a)には Case A, B, C-1 の結果をまとめて示してある。この図より、浸食土砂量が最も多いのが Case A の裸地の場合であり、根系のみの Case B、すべての植生が配置された Case C-1 の順に小さくなっていくことが見て取れる。これは予想通りの結果といえ、Case A と B の結果の差が根系の効果、Case B と C-1 の差が葉系の効果ととらえることができる。この図より、根系と葉系の効果はそれぞれ顕著であり、相対的には同程度かわずかに前者の方が大きいと判断される。

(2) 図-5(b)には、植生の配置の違いを調べた結果が示されている。この図より、植生の配置の密度が同じであっても、その配置の違いにより流出土砂量に顕著な差が現れることがわかる。この差は、前述した流路の形成状況とも密接に関係しており、下流端開口部前面に植生を配置した Case C-2 では、この植生の周辺区域に組織的な浸食域が形成されるため、その浸食量が大きくなったものと推察される。また、格子状の植生を配置した Case C-3 の場合には、開口部に向かってまっすぐに伸びる流路が形成されるため、全般的に浸食が顕著で、流出土砂量も大きくなったと考える。

4. 結論

本研究では、砂からなる斜面にフッキソウという植物を植え、よく養生した上で、その浸食実験を行った。ここでは、植生の根系ならびに葉系がそれぞれ発揮する耐浸食性について定量的な評価を行うとともに、植生の配置が浸食量の違いに及ぼす影響を調べた。結果として、植生の効果によって形成される流路のパターンに明確な差が現れることが確認された。また、これが浸食量の差を引き起こすことも明らかになった。実物の植生を用いた実験にはその準備も含めて、多大な時間を要する。引き続き知見を蓄積するよう努めて行く予定である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、松島貴之君（当時、早稲田大学大学院学生）の協力を得た。

参考文献

- 1) 大澤和敏，山口悟司，池田駿介，高椋恵：農地における土砂流出抑制対策の比較試験 水工学論文集，第49巻，pp. 1099-1104，2005。
- 2) 関根正人，大前謙友，松島貴之：植生の根系が斜面の表面浸食に及ぼす影響に関する実験的研究 水工学論文集，第52巻，pp. 559-562，2008。

(2009. 9. 30 受付)