

森林の部分的伐採および段階的伐採に伴う降雨侵食（砂漠化）現象

The rainfall-induced soil erosion (desertification) by partial and gradual cutting of a forest

福島 大介¹

Daisuke Fukushima

中井 正則²

Masanori Nakai

ABSTRACT: The rainfall-induced soil erosion by cutting of a forest may be an origin of desertification which is one of global environmental problems. In this study, the soil erosion phenomenon due to returning and saturated overland flows was experimentally investigated under the conditions of partial cutting of a forest and its repetitions (gradual cutting). In the cases of partial cutting in an upper region of a forest and its repetition, the remaining part of a forest greatly suppresses soil erosion arresting sand grains running away from the cut region. In contrast, in the cases of partial cutting in a lower region and its repetition, it cannot play an effective role to prevention of soil erosion, in addition, gully erosion appears not only in the cut region but also in the forest region. In latter cases, the damage of soil erosion will be serious at the final stage (full cutting).

KEYWORDS: Desertification, Rainfall-induced soil erosion, Returning and saturated overland flows, Partial cutting of a forest, Gradual cutting of a forest

1. はじめに

森林伐採は地球環境破壊の典型例であり、これに関連した問題が全地球上でさまざまな形で引き起こされている。そのなかでも、降雨による土壌侵食（降雨侵食）の問題は古くから知られており、また、近年とくにこの被害を受ける地域が急増している。いったん、降雨侵食が発生すると土地の荒廃が加速度的に進み、広大な面積の土地が不毛化し、最終的には砂漠化へと至る。このように、森林伐採に伴う降雨侵食は砂漠化現象の発端となりうるものであり、砂漠化の問題を自然科学的な側面より取り扱う際の重要なキーワードの一つと考えられる。

一般に、降雨侵食は雨滴の衝撃力による侵食と表面流の掃流による侵食の2つから成っている。ところが、森林域においては土壌表面に落葉・落枝からなるリター層（ A_0 層）が形成されており、この層が雨滴の衝撃力を緩和し、雨滴侵食が防止されている。また、リター層の下側には森林土壌特有の柔らかく透水性の高い土壌層（ A 層）が形成されており、雨水のほぼすべてが地下へ浸透するため、表面流（ Horton 流）の発生はほとんどない。つまり、森林域では基本的に降雨侵食は発生しない。

これに対して、森林が伐採されるとリター層が消失し、 A 層に激しい雨滴侵食が発生し始める。また、それに伴って A 層に目詰まりが生じ、浸透能が大幅に低下して Horton 流が発生する。その結果、降雨侵食が激化してガリ侵食へと発達し、やがて砂漠化へと至る。これが、森林伐採に伴って生ずる、降雨侵食を発端とした砂漠化のメカニズムと言われている¹⁾。しかし、この説明で砂漠化のメカニズムが十分言い尽くされている保証はなく、例えば降雨侵食の原因となる表面流として Horton 流以外のものを想定するなど、今後十分な検討が必要だろう。

¹ 東京電機大学大学院理工学研究科建設工学専攻 Graduate School, Tokyo Denki University

² 東京電機大学理工学部建設環境工学科 Dept. of Civil and Environ. Engineering, Tokyo Denki University

以上の点を踏まえて、本研究は森林伐採に伴って生じる降雨侵食について実験を行い、得られた結果について砂漠化現象を見据えて詳しく考察し、その素過程の自然科学的メカニズムを解明しようとするものである。

2. 既往の研究と本研究の概要

著者ら²⁾は既往の研究において、降雨侵食防止に対する森林の役割を一般に注目されているホートン流による降雨侵食ではなく、復帰流および飽和地表流によるそれを対象にして考察した。そこで取り扱われた内容は森林の有無による降雨侵食の違いであり、いわば広範囲にわたる完全伐採に対応している。しかし、実際の森林伐採は部分的伐採の繰り返しによって進行することが多く、この場合に対する検討が課題として残っていた。本研究ではこれらの問題を解明するために、最初に、森林の降雨侵食防止機能の基本的特性について実験的に検討した。次に、森林が斜面方向へ部分的に伐採される場合を対象にして、森林の部分的伐採位置と降雨侵食との関係について考察した。さらに、この実験結果を踏まえて森林が部分的伐採の繰り返し（以後、段階的伐採と称する）によって完全伐採される場合を対象にして、伐採の進行プロセスが降雨侵食に与える影響について考察した。なお、本研究においても、表面流として復帰流および飽和地表流に注目している。

3. 実験装置と実験方法

実験には、図 1 に示すような東京電機大学理工学部建設環境工学科所有の可変勾配水路と人工降雨装置を用いた。水路の寸法は縦 4.5(m)×横 0.4(m)×高さ 0.35(m)であるが、本実験では下流側 3.6(m)の部分を使用することとし、この部分に土試料を充填して模型土壌とした。実験に用いた土試料は比較的粒径のそろっている日光珪砂(粒径加積曲線は図 2 参照)であり、中央粒径 d_{50} と均等係数 α はそれぞれ $d_{50}=0.38(\text{mm})$ 、 $\alpha=1.74$ である。なお、本研究では前述のように、表面流として復帰流および飽和地表流に注目しているので、それらを誘発させるために斜面の上流側に斜面勾配の大きい領域(急斜面と称する)を設け、それ以外の領域の斜面勾配を 8° とした(考察の対象は急斜面の下流側である)。模型土壌の形状・寸法を図 3 として示す。また、模型土壌面に図 4 に示すような模型樹木と模型リターを配置した。模型樹木の間隔は水路縦方向に 12(cm)、横方向に 6(cm)とし(図 5 参照)、模型リターは模型土壌 10(cm^2)につき約 13.3(cm^2)の割合で散布した(実験ケースの一部に模型森林の状態が疎のケースが含まれているが、このケースでは模型樹木・模型リターの量をそれぞれ約 1/2 とし、模型リターを模型樹木の周りに散布した)。

実験は、降雨装置を用いて模型土壌面へ人工的な降雨(降雨強度: 80(mm/hr))を与えることによって行い、降雨は表面流の発生から約 80 分後まで継続させた。また、降雨終了時に地表面形状を図 1 における領域(E)の部分に限定して水路縦方向に 5(cm)、横方向に 2(cm)の間隔で測定した。実験ケースは、表 1、2 に示すようにシリーズ a とシリーズ b の 2 つに大別される(同表中の(A)~(D)は、図 3 の(A)~(D)に対応している)。シリーズ a では、森林の降雨侵食防止機能の基本的特性および森林の斜面方向への部分的伐採の影響について、種々の森林形態を設定し、降雨を 1 回のみ与える実験により検討した。一方、シリーズ b では森林の斜面方向への 4 回にわたる部分的伐採を経て、最終的に全域が裸地となる条件を設定し、伐採のたびに降雨を与える実験を実施した(初期状態(伐採無し)を含めて計 5 回の降雨を与えた)。なお、両シリーズとも比較のために全域裸地および全域森林のケース(ケース a-1、a-2、b-1、b-2)の実験も行っている。

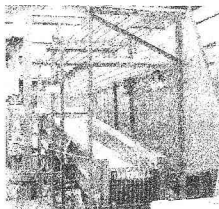


図 1 実験装置(可変勾配水路と人工降雨装置)

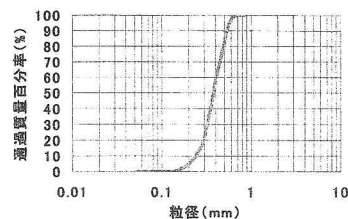


図 2 実験に用いた土試料の粒径加積曲線

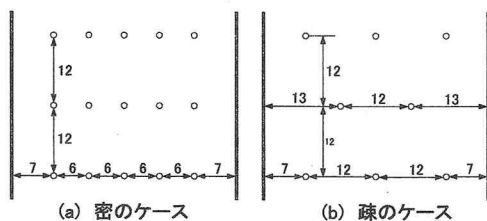
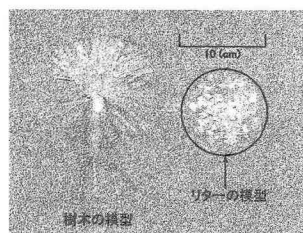
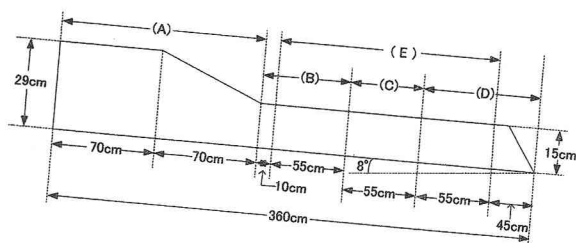


図5 模型土壤面における樹木の配置

表1 シリーズaにおける森林の存在位置

実験ケース	森林存在位置	樹木	リター
a-1	—	×	×
a-2	(A), (B), (C), (D)	○	○
a-3	(A), (B), (C), (D)	△	△
a-4	(A), (B), (C), (D)	×	○
a-5	(A), (B), (C), (D)	○	×
a-6	(B), (C), (D)	○	○
a-7	(C), (D)	○	○
a-8	(D)	○	○
a-9	(B), (C)	○	○
a-10	(B)	○	○
a-11	(B), (D)	○	○

*○, △, ×は, 樹木・リターがそれぞれ密に存在, 疎に存在, なしを示している.

表2 シリーズbにおける森林の存在位置

実験ケース	1回目の降雨	2回目の降雨	3回目の降雨	4回目の降雨	5回目の降雨
b-1	—				
b-2	(A), (B), (C), (D)				
b-3	(A), (B), (C), (D)	(B), (C), (D)	(C), (D)	(D)	—
b-4	(A), (B), (C), (D)	(B), (C), (D)	(B), (C)	(B)	—
b-5	(A), (B), (C), (D)	(B), (C), (D)	(B), (D)	(D)	—
b-6	(A), (B), (C), (D)	(B), (C), (D)	(B), (D)	(B)	—

*森林域では、樹木・リターがそれぞれ密に存在している。

4. 実験結果と考察

4. 1 シーリーズ a の結果について

最初に、森林の降雨侵食防止機能の基本的特性に関する結果を述べる。図 6 に、ケース a-1~a-5 の降雨終了時における領域(E) (図 3 参照) の横断平均した地表面変位の結果を示す。図中の縦軸の地表面変位は+が堆積を、-が侵食を表しており、横軸は領域(E)の上流端からの距離を示している(図中の(B)~(D)は、図 3 の領域(B)~(D)に対応している)。ケース a-1 は模型土壤全体が裸地であるのに対し、ケース a-2, a-3, a-4, a-5 は模型土壤全体に森林が存在し、その内容はそれぞれ森林密度が密、森林密度が疎、リターのみ、樹木のみとなっている。ケース a-1, a-2, a-3 の実験結果を比較することにより、森林の有無および森林密度(樹木とリターの量)によって侵食状況が異なることがわかる。全域裸地であるケース a-1 では、表面流によって土砂が輸送され、激しい地表面侵食が発生している。これに対して森林が密に存在しているケース a-2 では、樹木およびリターが表面流および流出土砂に対して抵抗として働くため、地表面形状はほとんど変化していない。

また、森林が疎に存在しているケース a-3 については、上流部で侵食がほとんど見られないのに対し、下流部（領域(D)）においてケース a-1 の上流部（領域(B)）と同程度の侵食が確認できる。この理由は以下のように推察される。上流部では表面流の発生直後であるため、掃流力はそれほど大きくなく、森林は密度が疎の場合でも十

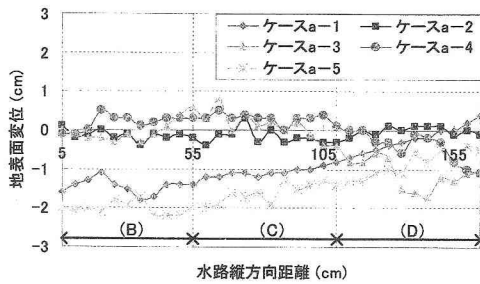


図6 横断平均した地表面変位 (シリーズ a) (1)

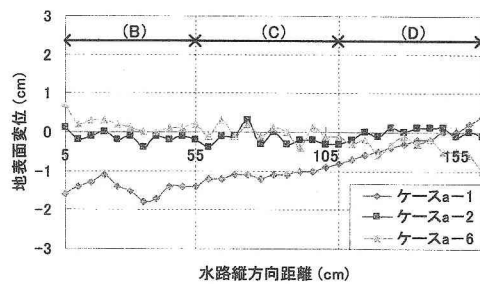


図7 横断平均した地表面変位 (シリーズ a) (2)

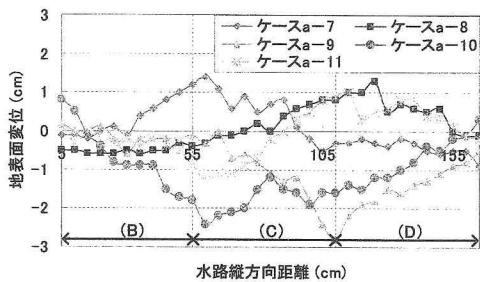
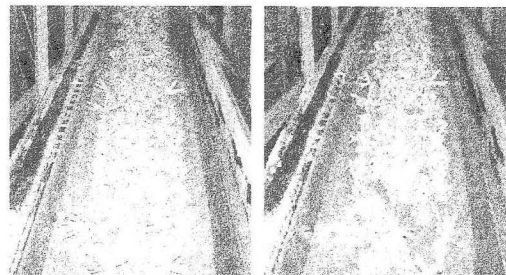


図8 横断平均した地表面変位 (シリーズ a) (3)

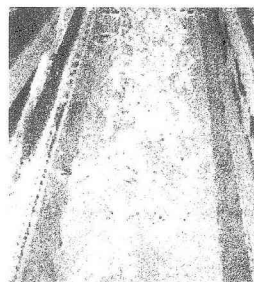


(a) 降雨開始時

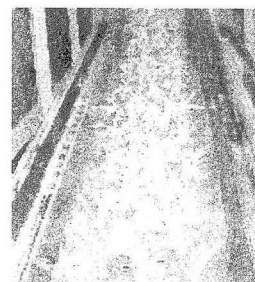
(b) 10分後



(c) 30分後



(d) 50分後



(e) 降雨終了時

図9 実験時の様子 (ケース a-3)

分な侵食防止効果を示す。しかし、表面流は流下するにしたがって掃流力が増大し、森林が疎であるために本来は抵抗として働くリターが流され、土壌面には樹木のみが残る。その結果、樹木を境界にしてガリ侵食が発生し、時間とともに成長するため、最終的にはかなり激しい侵食を呈する。図9はケース a-3 の下流部の様子であり、樹木を境界にして発生するガリ侵食の発達が明らかである。このように、森林の存在は降雨侵食防止において非常に重要であり、密な森林ほどその効果が大きいことを改めて確認できる。

ケース a-4, a-5 の結果について説明する。森林の降雨侵食防止機能について考える際には、森林が樹木およびリターの2つから構成されており、それぞれが別の機能を持っていることに注目すべきである。恩田³⁾は、人工林における観察から森林内に存在するリターが降雨侵食防止において重要な役割を果たすことを指摘している。そこで、本研究では模型土壌面にリターのみ (ケース a-4) および樹木のみ (ケース a-5) を配置することによって、森林の降雨侵食防止機能が樹木とリターにそれぞれどの程度依存しているかを明確にすることを試みた。図6のように、ケース a-4 はケース a-2 と、また、ケース a-5 はケース a-1 とほぼ同様な地表面変位を示しており、森林の降雨侵食防止機能のほとんどがリターによっていることがわかる。また、ケース a-5 では図10に示

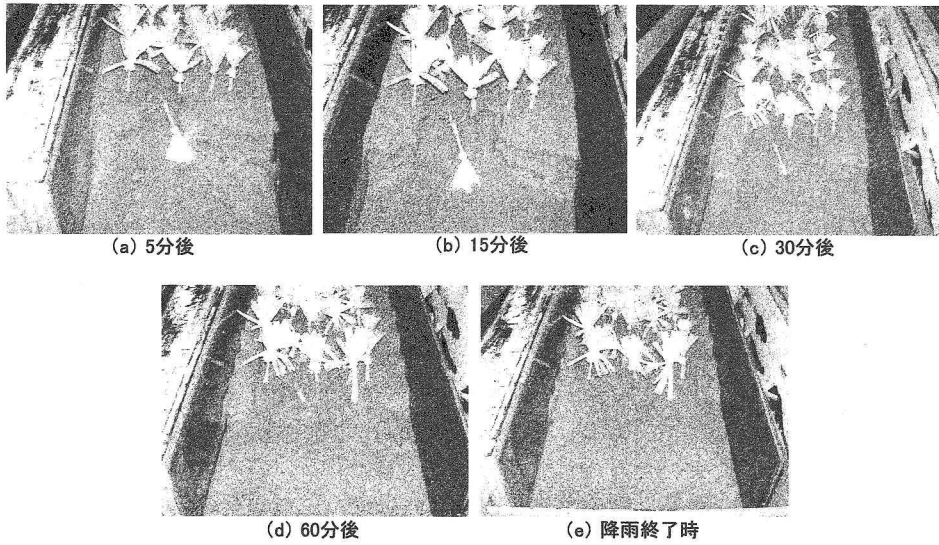


図 10 実験時の様子 (ケース a-5, 下流端付近)

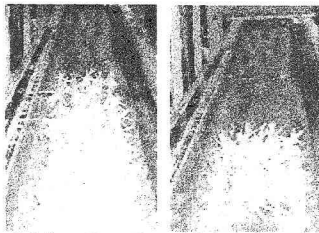


図 11 降雨終了時の地表面状況

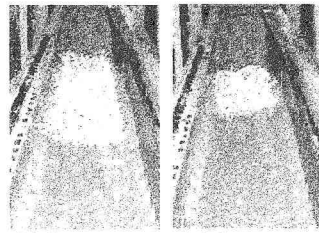


図 13 降雨終了時の地表面状況

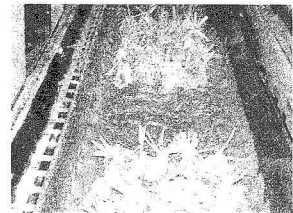


図 15 降雨終了時の地表面状況
(ケース a-11)

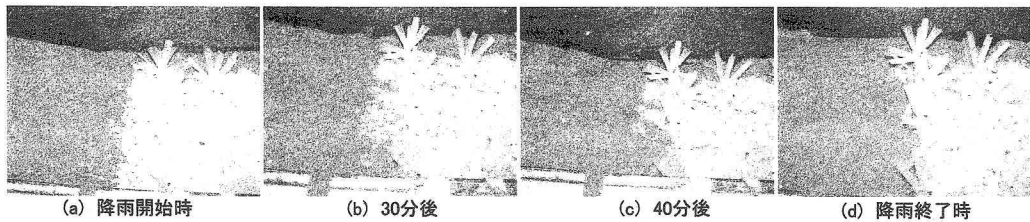


図 12 実験時の様子 (ケース a-7)

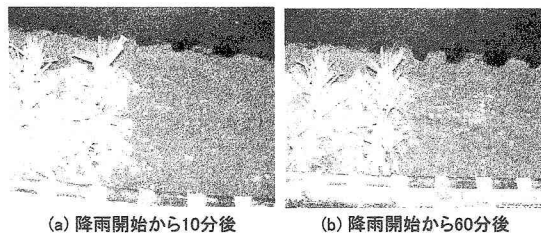


図 14 実験中におけるガリ侵食の成長の様子 (ケース a-9)

すように、樹木を境界にして発生したガリ侵食が発達していく様子が観察された。この現象はケース a-3 の下流部で確認されたものと同様であり、樹木はガリ侵食を促進し、降雨侵食を防止するどころか、むしろ激化させる可能性を持っていると言える。

図 7 は、ケース a-6 の結果に比較検討の目的でケース a-1, a-2 の結果を挿入したものである（図の見方は図 6 と同じである）。ケース a-6 は領域(B)～(D)にのみ森林が密に存在している場合であり、このケースの特徴としてケース a-2 と同様に地表面形状があまり変化していないこと、また、領域(E)の上流部において若干の土砂堆積が見られることが挙げられる。これらの結果は既往の研究結果²⁾と一致しており、急斜面下流側の森林の重要性を再確認できる。

次に、森林の斜面方向への部分的伐採に関する結果について述べる。図 8 にケース a-7～a-11 の結果を示す（図の見方は図 6 と同じである）。ケース a-7, a-8 は、領域(E)の森林を上流部分から 1/3 および 2/3 だけ伐採したケースであり、両ケースの降雨終了時の様子を図 11 として示す。これらのケースでは、伐採域と森林域の境界付近に顕著な土砂堆積が見られること、その下流側における地表面侵食が小さいことが特徴として挙げられる。第 1 の点については、森林域上流端付近の樹木とリターが復帰流、飽和地表流ならびに流砂に対して抵抗となり、伐採域からの流出土砂をせき止めるためである。ただし、図 12 に示すように、伐採域と森林域の境界付近のリターは時間の経過とともに両表面流によって流され、あるいは上流部からの流砂の下に埋没し、結果的にほとんど消失する。このことより、この堆積現象において森林域上流端付近の樹木が果たす役割は予想外に大きいことがわかる。つまり、樹木は先のケース a-3, a-5 とは異なり、土砂堆積を促進し、侵食を緩和するという正の貢献をしている。一方、第 2 の点については、堆積土砂および下流側の森林（樹木とリター）が両表面流の抵抗として作用し、掃流力の増大を防ぐためである。以上のように、森林の上流側を部分的に伐採する場合には、残存森林が降雨侵食を大きく緩和すると言える。

ケース a-9, a-10 は、領域(E)の森林を下流部分から 1/3 および 2/3 だけ伐採したケースである。両ケースの降雨終了時の様子を図 13 として示す。これらのケースでは先のケース a-7, a-8 と異なり、伐採域はもちろん森林域においても大きな地表面侵食が生じている。これは、復帰流および飽和地表流が急斜面下流側を流下するに従って成長し、掃流力を増大させるのに対し、（掃流力が大きくなる）下流域に表面流の抵抗となる森林が存在しないためと考えられる。また、ケース a-9 では図 14 に示すように、伐採域に発生したガリ侵食が時間の経過とともに森林域へと発達している（ケース a-10 でも同様の特徴が確認された）。このことがケース a-9 の領域(C)における激しい地表面侵食に反映されており（図 8 参照）、更なる降雨によって地表面侵食が領域(B)にまで及ぶことが予測される。以上のように、森林の下流側を部分的に伐採する場合には、残存森林の侵食緩和効果をほとんど期待できないことがわかる。

ケース a-11 は、領域(E)の森林を中央部分の 1/3 だけ伐採したケースである。このケースの降雨終了時の様子を図 15 として示す。ケース a-11 の森林配置はケース a-8, a-10 のそれを組み合わせたものであり、実験結果も両ケースの特徴を合わせ持ったものとなっている。また、領域(C)に見られる明瞭な堆積と侵食は、長期間あるいは多数回の降雨によってさらに成長する可能性があり、侵食緩和効果はあまり期待できないかもしれない。なお、このケースではケース a-9, a-10 で見られた森林域へのガリ侵食の成長が確認されず、今後の詳しい検討が必要である。

4. 2 シリーズ b の結果について

本節では、シリーズ b（段階的伐採に関する検討）の結果について述べる。図 16～21 に、各回の降雨終了時における領域(E)（図 3 参照）の横断平均した地表面変位（初期状態からのトータルの変位）の時間変化（ケース b-1～b-6）を示す（図の縦軸と横軸の定義は、図 6～8 と同じである）。図 16, 17 に示したケース b-1（完全裸地）、ケース b-2（完全森林）の実験結果を比較すると、ケース b-2 の方がケース b-1 に比べて明らかに地表面変位が小さいことがわかる。このことより、数回の降雨に伴って森林域は多少の地表面侵食を受けるものの、

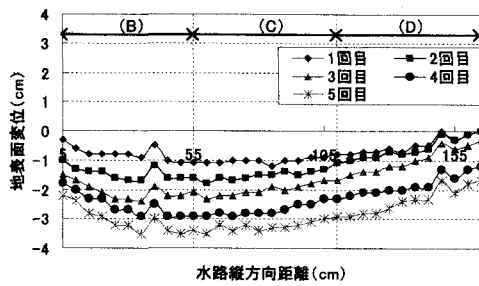


図 16 横断平均した地表面変位 (ケース b-1)

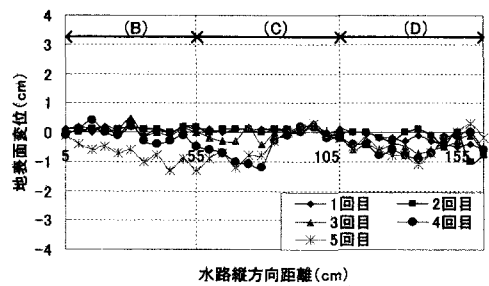


図 17 横断平均した地表面変位 (ケース b-2)

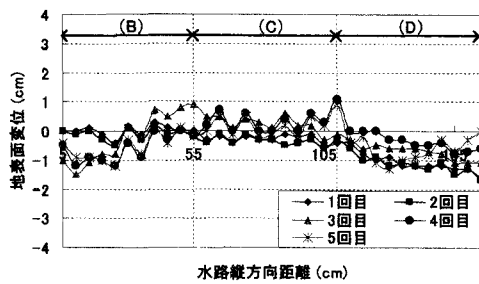


図 18 横断平均した地表面変位 (ケース b-3)

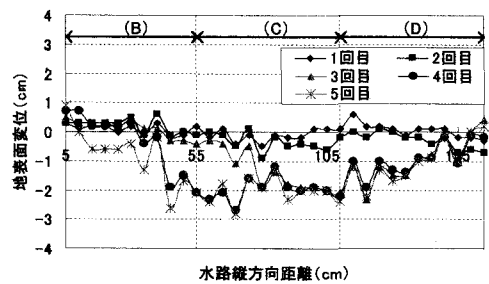


図 19 横断平均した地表面変位 (ケース b-4)

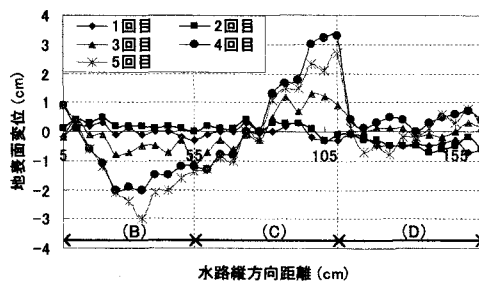


図 20 横断平均した地表面変位 (ケース b-5)

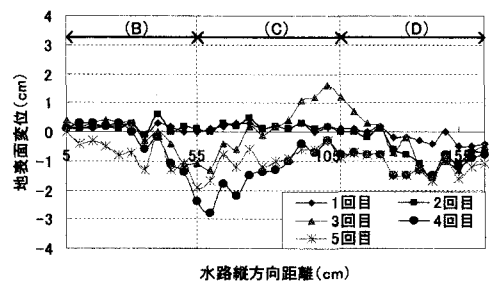


図 21 横断平均した地表面変位 (ケース b-6)

森林が降雨侵食防止に対して有効な働きをしていることが確認できる。

図 18, 19 (ケース b-3, b-4) は、最初に急斜面上流側の森林を伐採し、続いて急斜面下流側の森林を上流側から順に 1/3 ずつ伐採した場合および下流側から順に 1/3 ずつ伐採した場合であり、最終的に全域裸地に至るケースである。両図を比較すると、ケース b-3 では全体的に地表面変位が小さいのに対し、ケース b-4 では激しい地表面侵食が見受けられる。両結果の差異は以下のように説明できる。ケース b-3 では上流側から森林を伐採するため、各回の降雨終了時において伐採域と森林域との境界付近に、(ケース a-7, a-8 と同様に) 復帰流および飽和地表流によって侵食・流送された伐採域の土砂が堆積する (図 22 参照)。そして、この土砂堆積部分が次の部分的伐採位置に一致しているため、そこが伐採によって裸地化したときの侵食が軽減され、完全伐採時においてもわずかな地表面侵食が見られるにすぎない。これに対して、ケース b-4 では下流側から森林を伐採するため、ケース b-3 で見られるような土砂の堆積現象は起きず、下流側から順に侵食が進行していく。また、地表面侵食は伐採域のみに留まらず、(ケース a-9, a-10 と同様に) ガリ侵食の上流側への成長に伴って森林域にまで達する (図 23, 24 参照)。さらに、両表面流が成長し、掃流力が大きくなる下流側が完全伐採に至るまでの長期間にわたって裸地化しているため、完全伐採時には全体として激しい地表面侵食が生じると考えられる。



図 22 3回目の降雨終了時の様子
(ケース b-3)

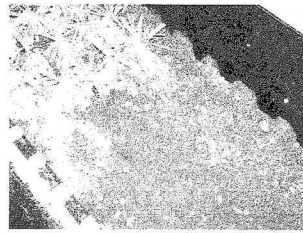


図 23 3回目の降雨終了時の様子
(ケース b-4)

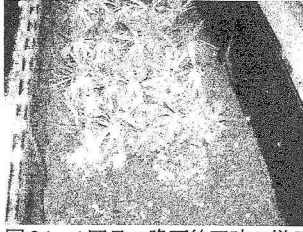


図 24 4回目の降雨終了時の様子
(ケース b-4)



図 25 3回目の降雨終了時の様子
(ケース b-5)

図 20, 21 (ケース b-5, b-6) は、最初に急斜面上流側の森林を伐採し、続いて急斜面下流側の森林を中央部分から順に 1/3 ずつ伐採した場合であり、最終的にはケース b-3, b-4 と同様に全域裸地に至るケースである。両図より、これらのケースでは侵食領域はケース b-4 に比べて相対的に小さく、また、侵食量も少ないことがわかる。しかし、ケース b-5 の 3 回目の降雨終了時に降に見られるように、高低差の大きい極端な地形（明瞭な堆積と侵食）が形成される可能性がある（図 25 参照）。これはケース a-11 で観察された現象が発達したものであり、この結果の持つ重要性はケース b-4 と比較して決して劣らないと考えられる。

5. まとめ

本研究では、復帰流と飽和地表流を想定して、森林の斜面方向への部分的伐採および段階的伐採によって生じる降雨侵食現象について実験的に検討を行った。本研究より得られた主要な結論を列挙してまとめる。

- 1) 森林の斜面方向への伐採を降雨侵食防止との関係において考える際に重要なことは、流下に伴う表面流の掃流力の増大を残存森林により抑制すること、残存森林の上流端付近における流出土砂のせき止め効果を発揮させること、の 2 つと考えられる。
- 2) この観点より考察すると、森林の上流部分の部分的伐採および上流側からの段階的伐採は、1) の 2 つの特徴が出現する森林の伐採方法であり、降雨侵食の被害を最小限に抑えられる。
- 3) 逆に、森林の下流部分の部分的伐採および下流側からの段階的伐採では、1) の 2 つの特徴がみられず、地表面侵食は伐採域はもちろん森林域にまで及び、完全伐採時には全域にわたる激しい降雨侵食が発生する。
- 4) また、森林の中央部分から順に段階的伐採を行う場合には、極端な地形（明瞭な堆積と侵食）が形成される可能性があり、十分な注意が必要である。

参考文献

- 1) 塚本良則：森林・水・土の保全—湿潤変動帯の水文地形学，pp.80-88，朝倉書店，1998。
- 2) 福島大介，中井正則：砂漠化へとつながる降雨侵食に対する森林の役割，土木学会第 57 回年次学術講演会概要集第Ⅶ部，pp.37-38，2002。
- 3) 恩田裕一：人工林化と土壌侵食，地理，第 40 巻，第 3 号，pp.48-52，1995。