

## 論文 (Original Article)

# 中国黄土高原における原位置表面流流出実験

張建軍<sup>1)2)\*3)</sup>・清水 晃<sup>2)</sup>・坪山 良夫<sup>2)</sup>

## In-situ surface runoff experiments in the China-Loess Plateau

ZHANG Jianjun<sup>1)2)\*3)</sup>, SHIMIZU Akira<sup>2)</sup> and TSUBOYAMA Yoshio<sup>2)</sup>

### Abstract

Using in-situ artificial surface runoff experiments, the flow velocity and the sediment transportation of surface runoff in different land types in the China-Loess Plateau, including Black locust (*Robinia pseudoacacia*) forest stand, Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forest stand, grass land and farmland, were investigated. When the initial flow velocity ranges 0.2-0.37m/s, the flow velocity of surface runoff was reduced to 54% in Black locust, 47% in Chinese pine forest stand, and 37% in grassland. This result suggests that the flow velocity of surface runoff can be obviously reduced by vegetation coverage and that the degree of reduction is closely related to the amount of the vegetation coverage. In the case of the runoff with high sediment concentration, the sediment concentration of the surface runoff was decreased to 53%, 43%, and 48% in Black locust forest stand, Chinese pine forest stand, and grassland, respectively, but increased to 197% in farmland, indicating that the sediment-transport ability of the surface runoff in different land types is ranked as Chinese pine forest stand, grassland, Black locust forest stand, and farmland, from low to high. Results suggest that the resistance against soil erosion in farmland is the minimum, compared with forest stand and grassland.

**Key words :** China-Loess Plateau, surface runoff, flow velocity, sediment transportation, forest stand, land use

### 要旨

中国黄土高原においてニセアカシア林地、アブラマツ林地、雑草地、農耕地を対象として、未攪乱の地表条件・土壌条件下で表面流及び土砂輸送量の変化を原位置表面流流出実験により検討した。実験の結果、植生・落葉落枝及びリター層の作用によって、表面流の流速は著しく低下した。ニセアカシア林地では落葉落枝と雑草は肥料として採取されているため、表面流の流速低下は雑草地とアブラマツ林地より小さかった。アブラマツ林地では厚い落葉落枝層により、低流速から高流速の広い範囲で一定流速へ減少した。雑草地においては地表植生量が最大であったため表面流流速は最も低下した。表面流が0.2～0.37m/sの初期流速でニセアカシア林地、アブラマツ林地、雑草地を流下すると、流速はそれぞれ54%、47%、37%に低下した。ニセアカシア林地、アブラマツ林地、雑草地で高濃度の土砂を含んでいる表面流を流下させると表面流の土砂濃度はそれぞれ53%、43%、48%となったが、農地表面流に含まれる土砂量は減少せず逆に197%増加した。土地利用ごとの表面流による最大土砂輸送量は、アブラマツ林地<雑草地<ニセアカシア林地<農耕地の順に大きかった。この結果、アブラマツ林地は表面流の侵食力に対して強い抵抗力を持ち、これに比較して農地の抵抗力は著しく低いことが分かった。

**キーワード :** 黄土高原、表面流、流速、土砂輸送量、林地、土地利用

原稿受付：平成15年12月9日 Received Dec. 9, 2003 原稿受理：平成16年3月24日 Accepted Mar. 24, 2004

\* 森林総合研究所水土保全研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: zhjj818@ffpri.affrc.go.jp

1) 北京林業大学水土保持学院 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University (BJFU)

2) 森林総合研究所水土保全研究領域 Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

3) 日本学術振興会 (JSPS) 外国人特別研究員 JSPS Postdoctoral Researcher

## 1. はじめに

斜面に発生する表面流によって土砂が運ばれる現象は、表面流の流速や、地面の被覆状況、土壌表層の構造などに影響される。斜面から流出した土砂は河川環境の劣化や水質汚濁などの社会問題を引き起こし、時には下流における洪水の要因の一つとなる場合もある。中国の黄河は土砂流出量が非常に大きいことで世界的に有名であるが、黄河のように大量の土砂を流出している河川に対して、斜面で生産される土砂を減少させることは非常に重要なこととなっている。表面流による土砂輸送量を知ることは斜面から生産される土砂の減少において不可欠である。

これまでの斜面における表面流に関する研究は、室内実験によるものが多い（小橋, 1966; 太田, 1981; 蔣, 1979, 1995; 劉, 1995）。さらに、土壌サンプルを用いた人工降雨による土壌侵食実験も数多く行われており（赤井, 1981; 上田ら, 1983; 吉村ら, 1983; 大貫ら, 1996; Ohnuki & Shimizu, 2004）、降雨量や降雨強度と侵食量との関係が求められている。しかしながら、大規模な土壌サンプルを使用する場合、特に林地では樹木根系の存在により、不攪乱サンプルの採取が困難であることが分かっている（張, 2001）。また、土砂輸送に関する研究も数多く行われているが、この種の研究結果を斜面表面流による土砂輸送量予測に直接適用することには問題がある（Julien, 1986; Nearing, 1999; 張, 2001）。これに対して、北原（1993, 1994, 1996）は、中国の黄土高原とチリ国の半乾燥地において各種土地利用別に地表流に関する現地水理実験を行って、各種土地利用の粗度係数と地被物との関係式を求めた。しかし、水土流出の発生が著しい黄土高原における地表流の流速と土砂輸送能力との関係についてはまだ未解明の問題が多いのが現状である。そこで、本研究では黄土高原において斜面から流出する土砂量を予測する第一段階として地表流の流速と土砂輸送量との関係を解析した。表面流による土砂輸送特性を解明するために、黄土高原において主要な植林樹種であるアブラマツ (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 及びニセアカシア (*Robinia pseudoacacia* L.) の林地、並びに雑草地、農地を対象に、中国山西省吉県にある紅旗林場で原位置表面流流出実験を行った。得られた土砂輸送量は黄土高原の水土流出防止工事の設計にも重要な参考になると考えられる。

## 2. 調査地の概況

調査地域は黄土高原の東側に位置する山西省吉県（東経  $110^{\circ} 27'$  ~  $111^{\circ} 07'$ 、北緯  $36^{\circ} 00'$  ~  $36^{\circ} 05'$ ）が管理する紅旗林場（試験地）である。平均標高は 1,100 ~ 1,300 m、年平均気温は  $10^{\circ}\text{C}$  である。土壌は主に褐色森林土で、全孔隙率は 50 - 60% である。年平均

降水量は 579.1 mm（1961 ~ 1999）で、その 70% は 6 ~ 9 月に集中し、豪雨となる場合が多い。この地域の年間土砂流出量は  $10,000 \text{ t/km}^2$  に達すると見積もられており（芦田, 1989）、主な侵食タイプは面状侵食、ガリー侵食、リル侵食などである。

研究対象の土地利用タイプは、以下の 4 種類である。まず、林地については黄土高原で主として使用される造林樹種のアブラマツ (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 及びニセアカシア (*Robinia pseudoacacia* L.) が植栽されている林地を選定した。さらに、広く分布する雑草地、農地を加えて、比較対象地とした。対象地の地被状況は Table 1 のとおりである。

Table 1. 試験区の地被状況  
The basic information of experimental site

土地利用状況	立木密度 (本/ha)	平均胸高直径 (cm)	平均樹高 (m)	地被物の量 (g/m <sup>2</sup> )
アブラマツ林	5,100	5.38	5.8	320 (落葉落枝)
ニセアカシア林	3,750	9.10	6.1	120 (落葉落枝と下層植生)
雑草地	---	---	---	260 (雑草)
農地	---	---	---	---

## 3. 実験方法

現地実験は土地利用ごとの表面流流出の変化と表面流による土砂輸送能力の評価を目的に Fig. 1 のように行った。

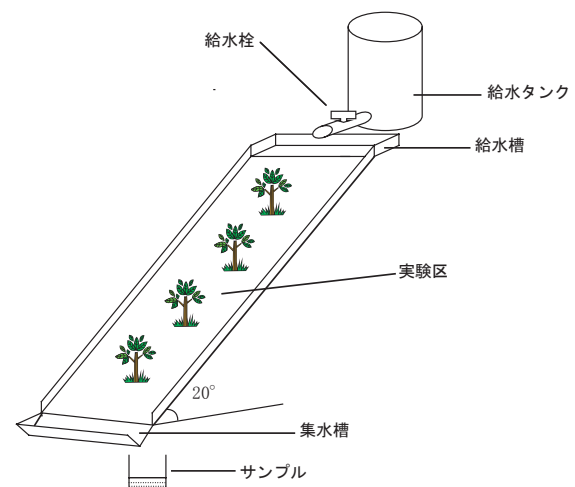


Fig. 1. 実験の模式図  
Schematic figure of the experiment

表面流出実験は、未攪乱の植生・地被物・土壌条件下で行えるように、現場の自然状態の斜面を使って実施した。実験方法は以下の通りである。各実験斜面に対して、長さ 2 m、幅 15 cm の鉄板 2 枚を斜面の最大傾斜方

向に並べて地面から約 0.1 m の深さまで差し込む。2 枚の鉄板に挟まれた長さ 2 m、幅 0.3 m の部分が試験用の簡易水路となり、これを実験区と呼ぶことにする。その上部に 200 リットルの給水タンクを置き、タンクから給水される水が水路一面に流下するように調整用の給水槽を配置する。水路の下端には水路地表面を流下してきた地表流を集める集水槽を設ける。サンプルはこの集水槽から採取する。

まず第 1 に、地面被覆条件が表面流速へ与える影響を解明するために、5° の傾斜があるニセアカシア林地、アブラマツ林地、雑草地を対象地として、実験区上方から始点流速  $V_0$  を変えて水を注入した。発生した表面流は 2 m の斜面を流下後、実験区の下方において終点流速  $V_f$  を測定した。実験時の表面流速は、指標とするインクを表面流に混合し、インクが一定の斜面長を流下する時間を用いて計算した。

次に、表面流による土砂輸送能力を検討した。この作用を評価するため、傾斜 20° の斜面（黄土高原の小流域では 20 度以上の斜面が 50% 以上を占め、広い範囲に分布している）を対象として実験を行った。実験時には表面流の浸透を防ぐために、実験前にあらかじめ実験区に散水し、湿潤状態にしておいた。最初に給水タンク内において黄土を水に混ぜて高濃度の懸濁液を作り、土砂を含んだ表面流を発生させる。これを濃度を変えて繰り返し行い、その表面流の平均流速を測定する。土砂を含んだ表面流が実験区へ入る前と実験区から出た後にそれぞれ 1000 ml のサンプルをとる。実験区へ提供される濁水と実験区から流出する濁水に含まれる土砂量の差が各土地利用における地被物の土砂抑止効果を示し、実験区からの流出水に含まれる土砂量が表面流の土砂輸送能力と考えることができる。

表面流により輸送されている土砂の最大量を各土地利用に対する土砂輸送能力とみなし、単位体積に含まれている土砂量  $M(g/l)$  で評価する。 $M$  の値が大きいかほど表面流による土砂輸送能力は大きい。これは斜面の侵食可能性、堆積可能性を判断する指標でもある。すなわち、表面流に含まれる土砂量が同じ流速での土砂輸送能力  $M$  より小さければ、斜面は侵食される可能性が高い。一方、表面流に含まれる土砂量が同じ流速での土砂輸送能力  $M$  より大きければ、土砂は斜面に堆積する可能性が高い。表面流に含まれる土砂量とその流速での土砂輸送能力  $M$  と同じなら、斜面は侵食されないし、堆積もしないと考えられることができる。林地の落葉落枝と下層植生は表面流の流速低下に影響を与え、表面流の中に含まれる土砂を堆積させる方向に作用する。

#### 4. 結果及び考察

##### 4.1 土地利用毎の表面流流速の変化

表面流の土砂輸送能力は流速と密接な関わりがある

(砂防学会, 1992; 砂防学会, 1993)。流速は一般に地表面の被覆条件と地形などに影響されるが、本研究では土地利用を反映した地表面の被覆条件を研究対象としているため、傾斜はすべて 5 度のニセアカシア林地、アブラマツ林地、雑草地を選んで表面流を流下させて実験を行った。実験区に流入した表面流は 2 m の実験斜面を流下後、実験区の終端で終点流速  $V_f$  を測定した。その結果をとりまとめて Table 2 を得た。

Table 2. 各土地利用表面流流速の変化  
The change of flow velocity in different land types

ニセアカシア	初期流速 (m/s)	0.373	0.287	0.275	0.271	0.252	0.24	0.218
	終点流速 (m/s)	0.167	0.155	0.150	0.151	0.147	0.138	0.119
	終点流速 / 初期流速 (%)	44.77	54.01	54.55	55.72	58.33	57.50	54.59
	流速低下率 (%)	55.23	45.99	45.45	44.28	41.67	42.50	45.41
アブラマツ	初期流速 (m/s)	0.347	0.331	0.274	0.269	0.252	0.233	0.200
	終点流速 (m/s)	0.135	0.129	0.130	0.126	0.131	0.115	0.108
	終点流速 / 初期流速 (%)	38.90	38.97	47.45	46.84	51.98	49.36	54.00
	流速低下率 (%)	61.10	61.03	52.55	53.16	48.02	50.64	46.00
雑草地	初期流速 (m/s)	0.352	0.337	0.291	0.275	0.26	0.253	0.204
	終点流速 (m/s)	0.126	0.118	0.101	0.107	0.095	0.095	0.089
	終点流速 / 初期流速 (%)	35.80	35.01	34.71	38.91	36.54	37.55	43.63
	流速低下率 (%)	64.20	64.99	65.29	61.09	63.46	62.45	56.37

注：流速低下率 = (初期流速 - 終点流速) / 初期流速 × 100

Table 2 によると、各土地利用の落葉・落枝及びリター層は表面流の流速を著しく低下させたことが分かる。ここで、落葉・落枝及びリター層が流速を低下させる効果を流速低下率として次のように定義した。

$$\text{流速低下率} = (\text{初期流速} - \text{終点流速}) / \text{初期流速} \times 100$$

初期流速 0.22 m/s ~ 0.37 m/s の表面流がニセアカシア林地を流下すると流速は平均で 54% に低下し、その流速低下率は 42% ~ 55% になった。初期流速 0.20 m/s ~ 0.35 m/s の表面流がアブラマツ林地を流下すると流速は平均で 47% に低下し、その流速低下率は 46% ~ 61% になった。同様に初期流速 0.20 m/s ~ 0.35 m/s の表面流が雑草地を流下すると流速は平均で 37% に低下し、その流速低下率は 56% ~ 65% になった。このように、各土地利用とも初期流速が速いほどその流速低下率は大きいということが分かった。

以上の結果、各土地利用の中では雑草地での表面流の流速低下が最大であると考えられた。すなわち雑草地の地被物は表面流の流速低下に高い能力を発揮すると思



われた。この理由として、雑草地には草本植物が密生して、地表面の粗度が大きいことが考えられた。アブラマツ林地では草本植物が非常に少ないにもかかわらず、落葉・落枝が厚いことにより表面流の流速が大幅に低下した。これは厚い落葉・落枝による地表面粗度の増大によるものと推察された。一方、ニセアカシア林地の場合は落葉・落枝が分解しやすく、かつ住民がニセアカシアの落葉落枝と雑草を肥料として採取する習慣があるため、林地での落葉落枝の現存量は少なく、下層植生も非常に少ない状況になっている。その結果、ニセアカシア林地における表面流の流速は他の土地利用に比較すると低下率は少ないと考えられた。

今回の試験では表面流が長さ2mの林地を流れた場合、その流速変化は次のようになった (Fig. 2)。

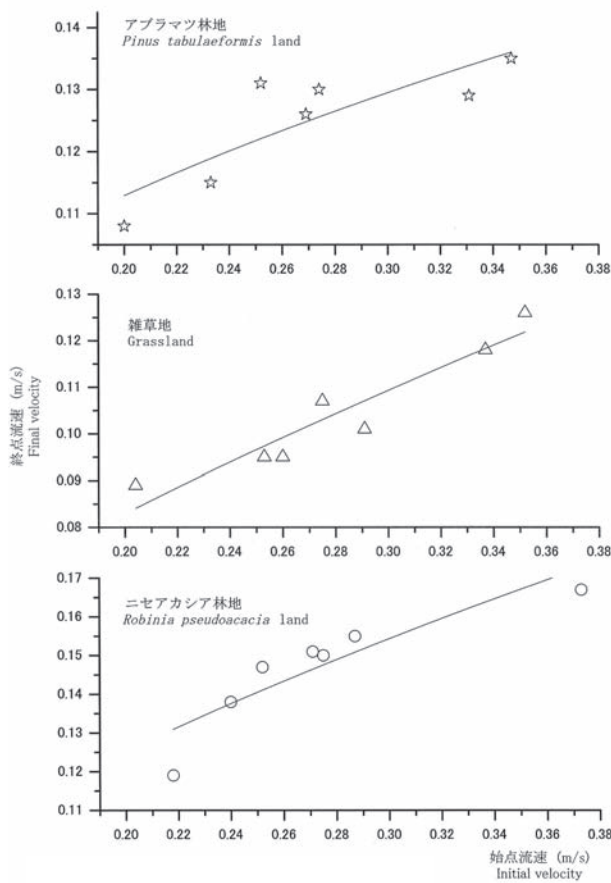


Fig. 2. 各土地利用表面流流速の変化  
The change of surface runoff velocity in different land types

ニセアカシア林地  $V_f = 0.31V_o^{0.56}$   $R^2 = 0.80$  (99%有意)

アブラマツ林  $V_f = 0.20V_o^{0.36}$   $R^2 = 0.73$  (99%有意)

雑草地  $V_f = 0.24V_o^{0.64}$   $R^2 = 0.88$  (99%有意)

式中、 $V_f$  は2mの試験区を流下した表面流の終点流速 (m/s)、 $V_o$  は試験区に流入する表面流の初期流速 (m/s)、 $R^2$  は決定係数である。

今回の実験ではアブラマツ林地における表面流の流速低下効果はニセアカシア林地より高いという結果が得

られた。これは北原ら (1993, 1994) が同じ地域で測定したアブラマツ林地粗度係数  $0.32 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$  (表面流流速低下に影響する) がニセアカシア林地  $0.2182 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$  より大きいという傾向と一致した。今回の実験斜面は長さ2mであるが、黄土高原の斜面は一般に数10mである。降雨時に発生した表面流は数10mの斜面を流下するため、その流速変化の予測は土壌侵食と土砂輸送に対して重要である。一方、雑草地でも表面流流速の低下は見られ、表面流による侵食が発生するような半乾燥地域 (恒常的に水不足状況を呈する) では草の種を播いて、雑草地に回復させることが水土保持における重要な方法と思われた (中国では退耕還草と呼ぶ)。本地域では雑草は水分消費量が少なく、植栽費用も安いので、まだ豊かではない黄土高原地域においては実用性が高い方法であると考えられる。

4.2 表面流による土砂輸送能力

表面流による土砂輸送能力について検討を行った。これは表面流による侵食、堆積、土砂輸送過程を土砂濃度を指標として総合的に評価したものである。各土地利用に対して、前述の方法にしたがい、それぞれ10回の実験を行った。実験結果は Table 3 ~ Table 6 にとりまとめた。

Table 3. アブラマツ林地表面流土砂濃度の変化  
The changes of sediment concentration of surface runoff in Pinus tabulaeformis land

番号	平均流速 $V_p$ (m/s)	供給土砂濃度 $S_L$ (g/l)	流出土砂濃度 $S_f$ (g/l)	流出土砂濃度 / 供給土砂濃度 $S_f/S_L$ (%)
1	0.23	133.12	52.64	39.54
2	0.22	99.44	50.62	50.91
3	0.20	100.92	49.3	48.85
4	0.17	127.21	50.67	39.83
5	0.16	110.64	48.26	43.62
6	0.16	99.16	47.07	47.47
7	0.13	113.77	44.19	38.84
8	0.13	108.25	42.48	39.24
9	0.12	95.09	39.98	42.04
10	0.11	94.34	38.74	41.06
平均	0.16	108.19	46.4	43.14

Table 4. ニセアカシア林地表面流土砂濃度の変化  
The changes of sediment concentration of surface runoff in Robinia pseudoacacia land

番号	平均流速 $V_p$ (m/s)	供給土砂濃度 $S_L$ (g/l)	流出土砂濃度 $S_f$ (g/l)	流出土砂濃度 / 供給土砂濃度 $S_f/S_L$ (%)
1	0.22	121.68	61.48	50.53
2	0.2	114.28	57.25	50.1
3	0.19	80.61	57.99	71.94
4	0.17	77.41	56.13	72.51
5	0.17	109.3	56.54	51.73
6	0.15	112.66	50.96	45.23
7	0.14	104.16	48.32	46.39
8	0.12	96.34	46.46	48.23
9	0.11	113.78	47.51	41.76
10	0.09	89.42	44.97	50.29
平均	0.16	101.96	52.76	52.87

Table 5. 雑草地表面流土砂濃度の変化  
The changes of sediment concentration of surface runoff in grassland

番号	平均流速 $V_p$ (m/s)	供給土砂濃度 $S_i$ (g/l)	流出土砂濃度 $S_j$ (g/l)	流出土砂濃度 /供給土砂濃度 $S_j/S_i$ (%)
1	0.24	97.77	55.62	56.89
2	0.22	101.9	55.05	54.02
3	0.21	127.62	53.97	42.29
4	0.19	100.07	52.45	52.41
5	0.18	109.54	52.51	47.94
6	0.16	112.42	50.69	45.09
7	0.16	94.56	46.69	49.38
8	0.14	100.25	45.87	45.76
9	0.12	89.93	43.01	47.83
10	0.11	99.02	40.11	40.51
平均	0.17	103.31	49.6	48.21

Table 6. 農地表面流土砂濃度の変化  
The changes of sediment concentration of surface runoff in farmland

番号	平均流速 $V_p$ (m/s)	供給土砂濃度 $S_i$ (g/l)	流出土砂濃度 $S_j$ (g/l)	流出土砂濃度 /供給土砂濃度 $S_j/S_i$ (%)
1	0.27	146.16	286.11	195.75
2	0.25	109.98	271.69	247.04
3	0.22	136.81	257.31	188.08
4	0.2	122.07	257.27	210.76
5	0.18	129.55	244.02	188.36
6	0.17	120.23	230.99	192.12
7	0.16	111.65	231.05	206.94
8	0.15	100.46	216.99	216
9	0.14	123.01	201.39	163.72
10	0.12	114.74	189.47	165.13
平均	0.19	121.47	238.63	197.39

Table 3～Table 6 よると、高濃度の土砂を含んでい  
る表面流で土砂量に明瞭な変化が生じている。Table 3  
によると、アブラマツ林地では 0.11 m/s～0.23 m/s の  
流速 ( $V_p$ ) で供給土砂濃度 ( $S_i$ ) 94.34 g/l～133.12 g/l  
の表面流を流下させると、流出土砂濃度 ( $S_j$ ) は 39%  
～51%に減少した。10 回行った実験の平均では 43%に  
なった。ニセアカシアの場合には、0.09 m/s～0.22 m/  
s の流速 ( $V_p$ ) で供給土砂濃度 ( $S_i$ ) 77.41 g/l～  
121.68 g/l の表面流を流下させると、流出土砂濃度 ( $S_j$ )  
は 42%～73%に減少した (Table 4、全実験の平均で  
53%)。雑草地の場合には、0.11 m/s～0.24 m/s の流速  
( $V_p$ ) で供給土砂濃度 ( $S_i$ ) 89.93 g/l～127.62 g/l の表  
面流を流下させると、流出土砂濃度 ( $S_j$ ) は 41%～57  
%に減少した (Table 5、全実験の平均で 48%)。林地や  
雑草地においては実験区に供給した土砂濃度が高く、流  
速が遅い場合に表面流土砂濃度の減少率は高いことが分  
かった。以上の結果に対して、Table 6 によると流速 ( $V_p$ )  
0.12 m/s～0.27 m/s、供給土砂濃度 ( $S_i$ ) 100.46 g/l～  
146.16 g/l の表面流が農地を流れた場合には、流出土砂  
濃度 ( $S_j$ ) は減少せず、逆に 164%～247%の割合で大

幅に増加した。10 回行った実験の平均では 197%にな  
った。すなわち、農地において表面流が流下する場合の  
土砂収支を計算すると供給土砂濃度に対して流出土砂濃  
度は約 2 倍に増加した。このように農地では、地表面に  
植生が無いことから土壌の耐侵食性が低くなると考えら  
れ、その結果、今回の実験のように流出土砂が多くなる  
ことが予想される。

今回の試験の結果、アブラマツ林地では表面流の流  
速が 0.11～0.23 m/s の場合、流出土砂濃度は 38.74  
～52.64 g/l となった。同様にニセアカシア林地では表  
面流の流速が 0.09～0.22 m/s の場合、流出土砂濃度  
は 44.97～61.48 g/l となり、雑草地では表面流の流速  
が 0.11～0.24 m/s の場合、流出土砂濃度は 40.11～  
55.62 g/l となった。これによると、雑草地の表面流の  
土砂輸送能力は厚い落葉落枝があるアブラマツ林地と同  
じレベルであることが分かる。また、農地では表面流の  
流速が 0.12～0.27 m/s の場合、流出土砂濃度は 189.47  
～286.11 g/l と他の土地利用に比較して、4～5 倍程度  
であった。以上まとめると、表面流流速が 0.1 m/s～  
0.3 m/s の時、アブラマツ林地の表面流に含まれる土砂  
量は最も少なく、流出土砂濃度が最小という結果になっ  
た。農地の表面流に含まれる土砂量は一番多く、土砂輸  
送量は最大であった。言い換えると、アブラマツ林地は  
表面流に含まれる土砂を捕捉する能力が他の土地利用よ  
りも高く、これに比較して農地では土砂を捕捉する能力  
は著しく低いと考えられた。

今回の実験による表面流の最大土砂濃度と流速との  
関係は次のようになった (Fig. 3)。

$$\text{アブラマツ林地 } M=94.40V_p^{0.39} \quad R^2=0.88 \quad (99\% \text{ 有意})$$

$$\text{ニセアカシア林地 } M=105.76V_p^{0.37} \quad R^2=0.92 \quad (99\% \text{ 有意})$$

$$\text{雑草地 } M=104.51V_p^{0.42} \quad R^2=0.94 \quad (99\% \text{ 有意})$$

$$\text{農地 } M=554.04V_p^{0.50} \quad R^2=0.96 \quad (99\% \text{ 有意})$$

式中： $M$ —表面流の流出土砂濃度、g/l

$V_p$ —表面流の平均流速、m/s

$R^2$ —決定係数

前述したように、北原ら (1993, 1994) は同じ地域の  
アブラマツ林地で流速 2.75 cm/s の表面流流下実験を行  
い、侵食量として 0.001 g/m<sup>2</sup>/s の値を得ている。土砂  
濃度に換算すれば 12.49 g/l 以下である。今回のアブラ  
マツ林地表面流の土砂輸送濃度と平均流速との関係に基  
づいて 2.75 cm/s の流速で計算すると、アブラマツ林地  
表面流の流出土砂濃度は 23.24 g/l で、北原らの結果の  
約 2 倍となった。また、北原らはニセアカシア林地で流  
速 3.67 cm/s の表面流実験を行い、土砂濃度 12.93 g/l  
の結果を得たが、本実験のニセアカシア林地における  
土砂濃度と平均流速との関係から得られる流出土砂濃  
度 (流速 3.67 cm/s) は 31.13 g/l となり、北原の結果  
の約 2.4 倍であった。これは北原らの実験では斜面長が  
0.93 m と短く、表面流が含む土砂量はまだ最大に達し

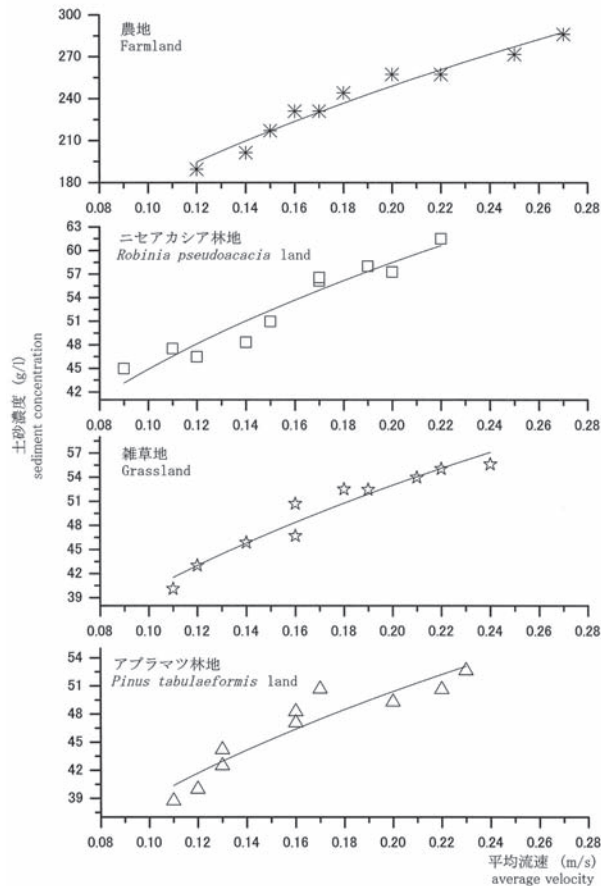


Fig. 3. 各土地利用表面流土砂濃度と流速の変化  
The relationship between sediment concentration and velocity of surface runoff in different land types

ていなかったことによると思われた。

以上の結果から、地表面の厚い落葉落枝と密生した雑草は表面流流速と土砂濃度を低下させる効果を持っており、水土保持林の水土保持効果を発揮するためには林地におけるこれらの表面被覆物を保全することが肝要であると考えられた。農地では地表面の被覆物が少ないため、表面流の土砂濃度は非常に高くなった。作物（小麦）が生長している期間には地面に小麦が密生するため、流出土砂量は収穫後よりかなり少ないと推測できるので、小麦の収穫時には地表面に高い刈り株を残すことが斜面畑における土砂流出を防ぐための方法の一つと考えられた。

## 5. まとめ

林地と雑草が持っている土砂流出抑止能力は非常に高い結果となった。平均流速が等しい場合には厚い落葉落枝があるアブラマツ林地の表面流で土砂輸送が最も少なく、地表に密生している草本植物も表面流による土砂輸送を弱める能力を持っていると思われた。したがって、落葉落枝と下層植生の存在が土砂流出抑止には望ましいと考えられる。しかしながら、黄土高原の植林では

アブラマツ林のような一斉人工林が多く、高密度林分による林内光環境の問題や分解しにくい落葉落枝の存在により、下層植生の生長は困難である。これは表面流による土砂流出には利点となるが、生態的な観点からは問題が残る。これらの点を考慮すると、針葉樹と広葉樹の混交林などの導入が必要と思われる。

農地表面流による土砂流出量は、林地と雑草に比較すると非常に大きいという結果が得られた。したがって、黄土高原地域では斜面畑を林地と草地に転換すること（中国では退耕還林還草という）が重要であると推察された。

## 引用文献

- 赤井竜男ら (1981) 人工降雨によるヒノキ林内の落葉、土壌の流出移動について (II), 日林論, **92**, 213 - 214.
- 赤井竜男ら (1982) 人工降雨によるヒノキ林内の落葉、土壌の流出移動について (VII), 日林論, **93**, 349 - 350.
- 芦田和男 (1989) “黄河の治水と開発” 黄河水利委員会治黄研究組編, 古今書院, p.38.
- 上田晋之助ら (1981) 人工降雨によるヒノキ林内の落葉、土壌の流出移動について (IV), 日林論, **92**, 217 - 219.
- 上田晋之助ら (1982) 人工降雨によるヒノキ林内の落葉、土壌の流出移動について (IX), 日林論, **93**, 355 - 356.
- 太田岳史ほか (1981) 粗大空隙材料中の水の運動, 第25回水理講演論文集, 379 - 384.
- 大貫靖浩・清水 晃・寺園隆一・生沢 均 (1996) 人工降雨装置を用いた沖縄地方の森林土壌の侵食実験, 地形, **17**(1), 43.
- Ohnuki and Shimizu (2004) Experimental studies on rain splash erosion of forest soils after clearing in Okinawa using an artificial rainfall apparatus, Journal of Forest Research, **9**(2), (in press).
- Julien, P. and Simons, B. (1986) Sediment transport capacity of overland flow. Transactions of the ASAE., **28**(3), 755 - 762.
- 北原 曜・張洪江 (1993) 中国黄土高原における森林の侵食防止機能の水理的解明, 日林論, **104**, 747 - 750.
- 北原 曜・張洪江 (1994) 中国黄土高原における森林の侵食防止機能の水理的解明 (II) 地被量と粗度係数の関係, 日林論, **105**, 587 - 590.
- 北原 曜ほか (1996) 表面侵食に及ぼす地被の影響, 日林論, **107**, 331 - 334.
- 小橋澄治 (1966) 急斜面上を流れる薄層流について, 77回日林講, 548 - 549.
- 蔣定生 (1979) 黄土区不同利用類型土壌抗冲能力的研究, 土壤通報, **4**, 20 - 29.
- 蔣定生・李新華 (1995) 黄土高原水土流失嚴重地区土壌

- 抗蝕性的水平变化和垂直变化規律, 水土保持学報, **9**(2), 1 - 8.
- 砂防学会 (1992) 斜面の土砂移動現象, 山海堂, 357p.
- 砂防学会 (1993) 土砂の生成・水の流出と森林の影響, 山海堂, 348p.
- 張光輝 (2001) 坡面水蝕過程水動力学研究進展, 水科学進展, **3**, 395 - 402.
- Nearing, M. and Sinanton, R.(1999) Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hills lope. *Earth Surface Processes and Landforms.*, **24**, 677 - 686.
- 吉村健次郎ら (1981) 人工降雨によるヒノキ林内の落葉、土壌の流出移動について (Ⅲ), 日林論, **92**, 215 - 216.
- 吉村健次郎ら (1982) 人工降雨によるヒノキ林内の落葉、土壌の流出移動について (Ⅵ), 日林論, **93**, 347 - 348.
- 劉国彬・張光輝 (1995) 原状土冲刷法与人工降雨模擬降雨法研究土壤侵蝕对比分析, 水土保持通報, **15**(4), 37 - 41.