

論 文

林地斜面における表層物質の移動 (I)

細土の移動

塚本 次郎*

塚本次郎：林地斜面における表層物質の移動 (I) 細土の移動 日林誌 71：469~480, 1989 林地斜面に沿う細土の移動量を、近接したアカマツ+広葉樹林(A), スギ林(S), ヒノキ林(H)で測定した。野鼠の影響を除く年間移動量は、地被物の量と質の違いを反映して $A < S < H$ となった。移動量の対数値の、降水指数(降雨量×最大1時間雨量)の対数値への回帰における相関係数は、Hで高く、地被物の保護機能の増加に伴い、 $H \rightarrow S \rightarrow A$ と低下した。降水指数が小さい降雨時の移動量は緩傾斜・凹地形(緩・凹) < 急傾斜・凸地形(急・凸)であり、豪雨時の移動量はその逆であった。緩・凹における豪雨時の移動量の著しい増加の主因は、局所的な大量移動の発生であった。Sでの年間移動量は明らかに急・凸 < 緩・凹であった。これはSの地被物が、緩・凹における豪雨時の移動量の急増の防止に有効でなかったためであった。AとHでは、地形の違いによる年間移動量の差は小さかった。これはAでは地被物の保護機能が高く、地形や降水指数とは無関係に移動が抑えられたためであり、Hでは地被物の保護機能が低く、緩・凹における豪雨時の大量移動と急・凸における通常の降雨時の大量移動が相殺したためであると考えられた。

TSUKAMOTO, Jiro: Movement of soil and litter down slopes in three types of forests (I) Movement of soil having particles less than two millimeters in diameter J. Jpn. For. Soc. 71: 469~480, 1989 The amount of eroded soil was measured on adjoining slopes covered with forests of Japanese red pine (*Pinus densiflora* S. and Z.) and hardwood trees (A), Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. DON) (S), and Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* (S. and Z.) ENDL.) (H). Soil erosion increased in the order of (A), (S), and (H). A curvilinear regression of the amount of eroded soil to the precipitation index (PI) yielded a very large correlation coefficient in (H). The correlation coefficient became less in the order of (H), (S), and (A) with increasing protection capacity of the ground cover. When the PI was not very large, soil erosion was greater on steep and convex slopes than on gentle and concave to straight slopes. The reverse was the case when the PI was extremely large because extremely heavy rain tended to bring about an unusually large amount of localized soil erosion on gentle and concave to straight slopes. The ground cover of (A) suppressed soil erosion regardless of the rainfall intensity or landform. The ground cover of (S) more or less effectively protected the soil against a not-so-heavy rain, but with an extremely heavy rain, it could not check localized bursts of soil erosion on a plot of gentle and concave landform. The ground cover on (H) was poor. Even with a not-so-heavy rain, a large amount of soil was eroded on a plot of steep and convex landform which counterbalanced the large amount of eroded soil due to the bursts of localized soil erosion on the plots of gentle and concave to straight landform with extremely heavy rain.

I. はじめに

A₀層による被覆と上方からの土砂の供給のない小区画(面積0.12~1.00 m²)の斜面を被侵食面としてこれまでに行われたいくつかの研究では、侵食土砂量と降雨との間にきわめて高い相関関係が報告されている(2, 10, 11)。

一方、区画処理を施さず、A₀層をそのままにした林

地斜面に捕集器具を設置して表層物質の移動量を測定した研究では、降雨因子と移動物質の量との関係の詳細な検討はなされていない(1, 3, 5, 6, 8, 9)。また東(1)が降雨強度と傾斜とを同時にとりあげ、細土移動量との関係を2要因により検討した例を除くと、後者の諸研究では、複数の要因が扱われている場合でも、各要因は個別にとりあげられ、移動物質の量との関係は、1要因のみにより検討されている。

* 高知県林業試験場 Kochi Pref. Forest Exp. Sta., Tosayamada, Kochi 782

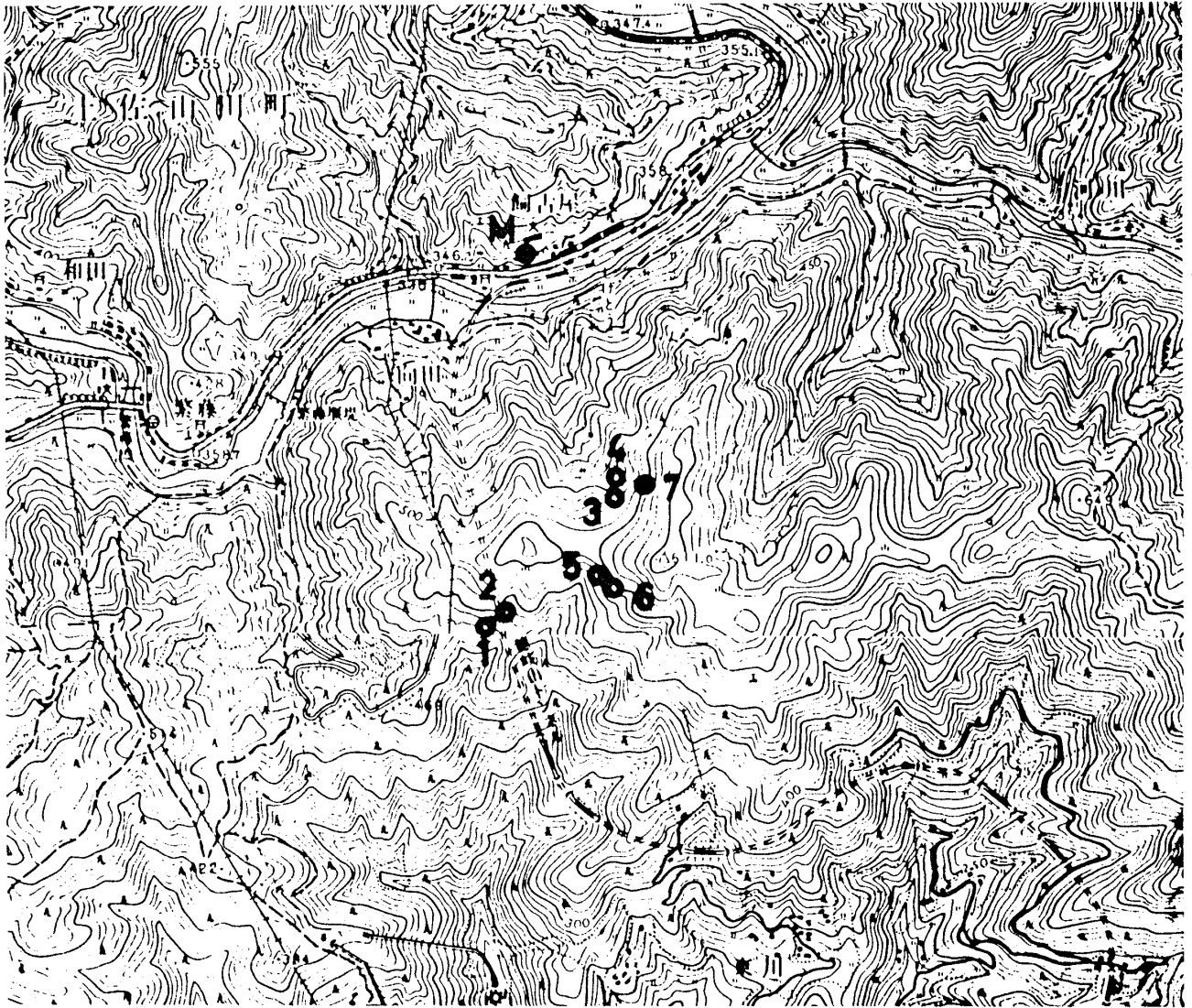


図-1. 試験区の位置

Location of studied plots

1, A-I ; 2, A-II ; 3, S-I ; 4, S-II ; 5, H-II ;
6, H-I ; 7, H-III ; M, Meteorological station.

国土地理院発行 25000分の1地形図 繁藤・土佐山田より作成。

本報告では、区画処理を施さず、 A_0 層をそのままにした林地斜面でも、細土移動量と自然降雨との間に相関関係が認められるかどうかを検討するとともに、樹種・地形・降雨の3要因を同時にとりあげて、細土移動量との関係を多要因により検討した。

II. 方 法

1. 調査地の概要

高知県香美郡土佐山田町平山、県立雨宮峰森林公園内の、アカマツ+広葉樹林に2区(A-I, A-II)、スギ林に2区(S-I, S-II)、ヒノキ林に3区(H-I, H-II, H-III)、合計7試験区を設けた。当地は古生層

の砂岩・泥岩互層地帯であり、7試験区はすべて谷の開析が進んでいない緩やかな広尾根の肩付近に位置する(図-1)。年降水量は3,307 mm, うち約80%が4~9月に集中する夏雨型の多雨地で(統計期間1951~1980年)、冬期には試験区表土の凍結がしばしば観察された。

2. 試験区の概要

図-2に各試験区における試験機材の配置を、表-1に試験区の林況を、表-2に試験区表土の受食性に影響すると思われる傾斜、微地形指数、表層土の礫含有量、下層植生と A_0 層の現存量等をそれぞれ示した。

林況調査は表層物質の移動量測定期間終了後の

1987年3月, 図-2に示した200 m²の試験区内の, 高さ2 mを超える全立木を対象として実施し, 樹高と胸高直径の測定と幹材積表からの材積の読み取りを行った。

傾斜Aは土砂受け箱を設置したラインから試験区上端のラインを望む仰角で, ラインの両端と中点, 計3点での測定値の平均値である。

傾斜Bは10個ずつ設置した土砂受け箱直上部の斜面に沿わせた, 長さ1 mの定規がなす傾斜をクリノメータで読み取った値の平均値である。

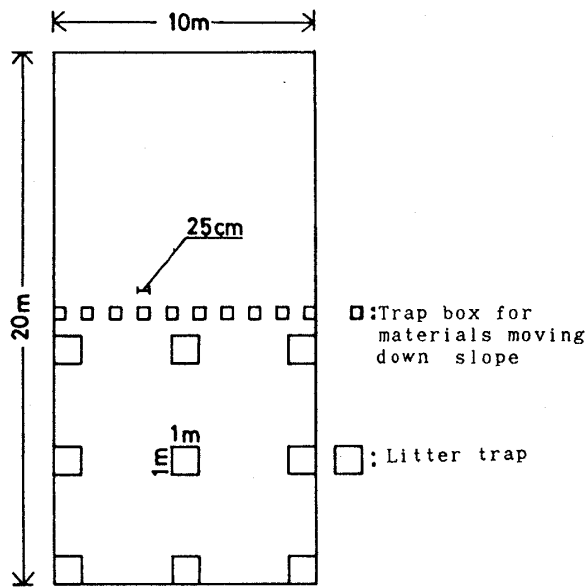


図-2. 試験区の見取図
Experimental makeup of studied plots

微地形指数は岩川ら(6)がヒノキ林の細土やリターの移動量との間に高い相関を認めた小林(7)の“Relief Index”であり, 土砂受け箱のラインの中点を中心とする20 m四方の方形区において, 中心点と, 方形の四隅および各辺の中点との高さの差を求め, これらを合計して求めた値である(+なら凹, 0なら平衡, -なら凸)。

表層土の礫含有量は, 深さ6 cmより浅い部分の土を400 cc採土円筒で採取し, 常法により求めた礫(粒径2 mm以上)の体積で, 表に掲げた数値は5~9個の標本の平均値である。

下層植生の現存量は, 高さ2 m以下の植物の地上部の80°C乾燥重量であり, 試験区に接して設けた等高線方向長さ10 mのラインに沿って, 1 mおきにとった5個の1 m x 1 mの方形枠での刈り取り調査により求めた。表には1985年8月と1986年9月の2回の調査による10個の標本の平均値を示した。

落葉落枝量の測定は, 図-2のように設置した受け口が1 m x 1 mのリタートラップ9個を用いて行い, 約1カ月の間隔で回収したリターを80°Cで乾燥後, 重量を求めた。表に掲げた数値は, 1985年1月~12月と1986年1月~12月について求めた年落葉落枝量の平均値である。

A₀層の現存量調査は, 1985~1987年の各年1月下旬, 試験区の下半分およびその周辺に, 50 cm x 50 cmの方形枠を設けて行った。採取した試料には土砂が混入していたので, これを水洗除去後, 80°C乾燥重量を

表-1. 試験区の林況
Descriptions of stands*

Plots	Tree species	Age (years)	Stand density (N/ha)	Mean height (m)	Mean DBH** (cm)	Stand volume (m ³ /ha)
A-I	Japanese red pine and hardwood trees	36	Total	: 15950	4.71	305
			Japanese red pine	: 700	11.40	204
			Hardwood trees	: 15250	4.41	101
A-II	Japanese red pine and hardwood trees	36	Total	: 19200	4.62	448
			Japanese red pine	: 1150	11.03	280
			Hardwood trees	: 18050	4.21	168
S-I	Japanese cedar	40	1250	18.45	26.4	633
S-II	Japanese cedar	31	2000	13.34	17.7	377
H-I	Japanese cypress	32	2050	11.62	18.8	364
H-II***	Japanese cypress	32	1350	11.65	20.4	256
H-III	Japanese cypress	30	Total	: 2400	9.95	328
			Japanese cypress	: 2100	10.08	296
			Japanese cedar	: 300	9.07	32

* Surveyed in March 1987 for trees taller than 2 m. ** DBH=diameter at breast height. *** 30% of the trees were thinned in the autumn of 1982.

表-2. 表土の受食性にかかわる要因
Factors affecting sensitivity to surface erosion

Plots	Altitude (m)	Exposure (°)	Slope inclination (°)		Relief index* ¹	Amount of gravel in surface soil* ² (cc/400 cc)	Amount of undergrowth* ³ (g/m ²)* ⁷	Amount of litter fall (g/m ² /year)* ⁷	Amount of A ₀ -layer* ⁴ (g/m ²)* ⁷
			A* ⁵	B* ⁶					
A-I	490	166	26	30	4.07	15	426	474	1147
A-II	490	134	30	35	-7.38	30	234	510	1060
S-I	515	322	20	23	5.87	54	1166	530	1367
S-II	500	282	34	40	-5.45	65	1513(949)* ⁸	—	1264
H-I	540	252	29	29	0.06	28	494	535	753
H-II	530	243	25	25	4.29	35	360	377	612
H-III	560	340	34	40	-5.38	25	174	530	528

*¹ +, 0, and - indicate concave, straight, and convex landform of quadrat of 20 m × 20 m, respectively (KOBAYASHI, 1982). *² Less than 6 cm in depth (average of 5 to 9 samples). *³ All plants shorter than 2 m in height cropped in August or September ((1 m × 1 m) × 10). *⁴ Measured in January (just after the period of litter fall) ((50 cm × 50 cm) × 14). *⁵ Inclination within a range of 10 m in front of trap boxes for eroded soil (average of 3 samples). *⁶ Inclination within a range of 1 m in front of trap boxes for eroded soil (average of 10 samples). *⁷ Dry weight, oven-dried at 80°C. *⁸ Calculated from 9 out of 10 samples excluding a sample yielded the extremely large value of 6,580 g/m².

測定した。設けた方形枠数は、1985年に4個、1986年と1987年に5個であり、表にはこれら14個の標本の平均値を示した。

アカマツ+広葉樹林区は、低密度のアカマツの下に広葉樹が密生した林分で、林内は暗く、下層植生の現存量はヒノキ林区同様に少なかった。A₀層の現存量はスギ林区より少なかったが、厚さ2~3 cmのL層の下に、広がりのある広葉の断片が菌糸や根により縫い合わされた状態のF層がほぼ全面に形成され、地表の保護機能は高いものと考えられた。

スギ林区の下層植生とA₀層の現存量は、ともにアカマツ+広葉樹林区やヒノキ林区より多かった。しかし下層植生はシロダモ、アオキ、ヤブニッケイ等の灌木類が中心で、シダ類等地表近くを覆う植生は貧弱であった。またA₀層は枝の性格の強いリターが立体的に疎に堆積し、F層の面状の広がり認められなかった。

ヒノキ林の3試験区はいずれも下層植生とA₀層の現存量が少なく、傾斜地のヒノキ壮齡林の一般的傾向を示した。

スギ林区とヒノキ林区の5試験区は、傾斜と微地形指数に基づいて、急傾斜・凸地形のS-II、H-IIIと緩傾斜・凹~平衡地形のS-I、H-I、H-IIの二つのグループに区分できた。A-Iは相対的に後者のグループに、A-IIは相対的に前者のグループに近かった。

3. 降雨量のデータ

試験地の北約1 km、海拔高で約150~200 m 下方に

ある高知地方气象台、繁藤観測所(図-1)の地域気象観測毎時降水量日報のデータを借用し、各試験区共通の時間雨量として用いた。

4. 移動土砂量の測定法

土砂受け箱は岩川ら(4)が用いたものと同じ、受け口が幅25 cm × 高さ15 cm、奥行きが20 cmの木枠で、背面には水だけが抜けるように30メッシュのサラネットを張りつけ、受け口の下辺には接地部の土が箱の下へ抜けるのを防ぐために、ブリキ製エプロン板を垂直下方に約5 cm張り出すように取り付けられたものである。1984年10月、各試験区に10個ずつの土砂受け箱を図-2のように設置し、1984年12月から1986年12月までの間に合計34回、移動物を回収した。回収した物は礫、細土、リターに区分し、細土は105°Cで乾燥後、重量を測定した。以下の検討では、とくに断わらない限り、各回収回10個ずつの標本(g/25 cm)の平均値を求め、これを10 m当たりの値に換算したものを移動量とした。

5. 移動量の欠測と異常値の取扱い

(1) S-Iにおける台風時の欠測

S-Iでは、1985年9月の台風による豪雨(連続降雨総量650 mm, 最大日雨量408 mm, 最大1時間雨量75 mm)の後に行った第14回目の回収時に、大量に流入した土砂の重みで箱背面に取り付けた土砂止めのサラネットがはずれて回収不能となった箱が一つ生じた。この箱の標本値は著しく大きかったはずであるから、第14回目の移動量として残り9個の標本の平均値

を用いると、過小評価となる。そこで、この同じ箱に、連続降雨総量 198 mm, 最大日雨量 151 mm, 最大 1 時間雨量 26 mm の降雨後に行った第 15 回目の回収時にも異常に大量の土砂が流入していたことから、第 14 回目の移動量には、第 14 回目の 9 個の標本に、この箱の第 15 回目の標本を加えた 10 個の標本の平均値を用いた。

また受け箱ごとの移動量の頻度分布を示した図-4 においても、この箱の第 14 回目の値には第 15 回目の値を代用して作図した。

(2) H-IIIにおける測定期間後期の移動物捕捉率の低下

H-IIIでは表土の移動が激しく、測定期間の後期には土砂受け箱の接地部に隙間ができて、箱の下へ抜ける土砂が増えた。結果として、図-3 に示した細土移動量の降雨因子に対する曲線回帰において、測定期間の 1 年目と 2 年目の標本が二つのほぼ平行な曲線に分離した。そこで、過小評価とみられる 2 年目のデータは検討の対象から除いた。

(3) 全試験区共通にみられた第 29 回目の回収における異常

第 29 回目の測定期間は 1986 年 7 月 18 日～8 月 4 日である。繁藤観測所のデータによれば、この期間の降雨量は 1 mm の雨が 1 回と 2 mm の雨が 1 回の計 3 mm にすぎなかった。ところがこの期間の細土移動量は図-3 に×印で示したとおり、すべての試験区で同じようにこの雨から予想される量をはるかに上回っており、降雨データが試験区で測定されたものではないことに起因する異常の疑いが濃いと判断された。そこで降雨因子と細土移動量の相関関係の検討は、この標本を除外して行った。

III. 結果および考察

1. 年間の移動量

表-3 に全表層物質 (細土+礫+リター) (A) および細土のみ (B) の年間移動量と年降水量を示した。A-I と A-II では、受け箱の前面に野鼠の巣穴が作られ、巣穴から土砂が掻き込まれたことが明らかにわかる箱が数多くみられたので、各回収ごとにこれらの標本を除いた平均値を求め、その積算値を () 内に示した。

この結果を、年間移動量と年降水量の数値データが、そろって与えられている他の報告と比較してみる。

岩川ら(5)は、59 年生ヒノキ林の、斜面上での位置を異にする 9 地点で、本研究と同じ方法により表層物質の移動量を測定した。全表層物質の年間移動量は斜面位置によって著しく異なり、降水量が 2,113 mm の年に 800～40,300, 平均 11,800 g/10 m, 降水量が 3,350 mm の年に 1,100～56,400, 平均 17,700 g/10 m であった。当試験地のヒノキ林区での 1 年目の結果を、岩川らの降水量の多い年の結果と、2 年目の結果を、同じく降水量の少ない年の結果とそれぞれ比較すると、当試験地のヒノキ林区での移動量は、いずれも岩川らの 9 地点での移動量の平均値付近に分布し、レンジは、岩川らの結果とくらべてごく小さかった。また傾斜 36 度の 20 年生スギ林とヒノキ林で、降水量が 3,250 mm の年に、河野・難波(8)が本研究とほぼ同じ方法により測定した全表層物質と 8 メッシュ以下の土の年間移動量は、スギ林で、それぞれ 7,663 g/10 m と 3,030 g/10 m, ヒノキ林で、それぞれ 16,453 g/10 m と 6,023 g/10 m であった。これらの値はそれぞれ、当試験地のスギ林区とヒノキ林区の 1 年目における、全表層物質と細土の移動量のレンジに納まるものであつ

表-3. 全表層物質と細土の年間移動量と年降水量
Amount of soil+gravel+litter(A) and soil(B) moved down the slope(g/10 m/year)*
and precipitation (mm/year)

Investigation period		Plots						Precipitation	
		A- I	A- II	S- I	S- II	H- I	H- II		H- III
Period I **	A	4443 (2305)	4538 (4064)	11427	5314	12868	18428	22570	3267
	B	2093 (585)	640 (462)	6154	1471	5419	9560	8800	
Period II ***	A	3537 (3013)	4336 (3127)	4832	3655	8074	8600	—	2436
	B	1049 (707)	1244 (687)	1524	858	2847	3196	—	
Average of the two	A	3990 (2659)	4437 (3596)	8130	4485	10471	13594	—	2852
	B	1571 (646)	942 (575)	3839	1165	4133	6378	—	

(), Samples subjected to direct effect of burrowing activity of field mice were excluded from the calculation process. Direct effects of field mice were not observed on the other plots. * Soil and gravel were oven-dried at 105°C and litter at 80°C.

** Dec.1, 1984~Dec.17, 1985. *** Dec.18, 1985~Dec.3, 1986.

*Samples

た。

次に当該試験地での細土移動量を、樹種間で比較してみる。

野鼠の影響を除いた2年間の平均値でみると、試験区間にアカマツ+広葉樹林区<スギ林区<ヒノキ林区の関係が認められた。

アカマツ+広葉樹林区での細土の移動はごくわずかであった。ここでの下層植生の現存量はヒノキ林区同様に少なかったため、これはアカマツ+広葉樹林区のA₀層の侵食防止機能が、きわめて高かったことを示すものと考えられる。

スギ林区は下層植生・A₀層ともに量的には最も多かったにもかかわらず、細土の移動量はアカマツ+広葉樹林区のそれより多かった。スギ林区のA₀層は堆積状態が疎であり、アカマツ+広葉樹林区のA₀層ほど高い侵食防止機能を発揮しなかったためであると考えられる。石川(3)は、本研究と同じ方法で測定した土砂の年間移動量が、広葉樹の天然生林とくらべてスギの過密林分で著しく多かったことの一因として、両者のA₀層の形態の違いを指摘し、スギ林のA₀層を“中抜けの状態”と表現している。

ヒノキ林区での結果は、枝葉が水平に展開し、樹冠の遮光率が高くなるヒノキの樹種特性と、鱗片化しやすく、動きやすいヒノキ落葉の特性を反映して、傾斜地のヒノキ林では下層植生とA₀層による地表の保護が貧弱となり、表土の流亡が進む、という通説を確認したといえる。

2. 降雨と細土移動量の相関関係

降雨と移動土砂量との相関関係を検討したこれまでのいくつかの研究では、降雨因子が降雨量と降雨強度の相乗作用を表現しうるように、それぞれ異なった方法で雨量データの加工が行われている。大味・綱本(11)は1週間ごとに移動土砂量を測定し、この期間の降雨総量 P 、同期間中の最大1時間雨量 I 、同期間中の最大10分間雨量 i の3者の積 PIi を降雨加速指数と名づけて、 PIi と移動土砂量との関係を検討した。また1連続降雨ごとに移動土砂量を測定した小高・遠藤(10)は、1連続降雨期間中の各30分間雨量のべき乗値 i_{30}^a の、同期間についての積算値 $\sum I_{30}^a$ を降雨因子として用いた。さらに、約1カ月間隔で移動土砂量を測定した井上ら(2)は、同期間中の降雨総量 P と最大1時間雨量 I の積 PI を降水指数と名づけ、 PI と移動土砂量との関係を検討した。

本研究では、1連続降雨の降雨総量 P と最大1時間

雨量 I の積 PI を降水指数とよぶこととし、各移動物回収期間に含まれる連続降雨について、これを積算した $\sum PI$ を降雨因子として用いた。またA-IとA-IIの細土移動量には、野鼠の影響を受けた標本を除いて求めた平均値を用いた。

図-3に2年間、34回の回収における細土移動量(g/10m)の対数值($\log E$)と各回収期間ごとに積算した降水指数の対数值($\log(\sum PI)$)との関係を示した。黒つぶしは4月~11月(以下、夏期)の標本、白抜きは表層土の凍結がしばしばみられた12月~3月(以下、冬期)の標本である。×は方法で述べた異常値であり、直線は×以外の標本から求めた回帰線である。H-IIIについては方法で述べたように、●、○と実線で示した1年目の標本のみを検討の対象とした。

表-4に全期間の33の標本と夏期のみの25の標本(H-IIIについては、それぞれ17と12)とについてそれぞれ求めた曲線回帰 $\log E = a + b \log(\sum PI)$ における相関係数を示した。

A₀層のない、小区画斜面での土砂の移動を調べたこれまでの研究では、降雨因子のとりあげ方はそれぞれに異なるが、土砂の移動量の降雨因子に対する曲線回帰において、一様に高い相関係数が報告されている(2, 10, 11)。

ヒノキ林区での、降雨因子と細土移動量との相関係数は、これらの報告に劣らぬ高い値を示した。A₀層や下層植生が貧弱であったヒノキ林区では、雨の作用が細土の移動に直ちに反映したといえる。この相関は、ヒノキ林区→スギ林区→アカマツ+広葉樹林区と順次低くなる傾向を示した。A₀層や下層植生は、細土の移動量そのものを低下させるだけでなく、その侵食防止機能が高くなるに従って降雨因子と細土移動量との相関をも低下させるものと考えられる。

アカマツ+広葉樹林区では、年間の細土移動量の5割以上が、野鼠の直接の影響を受けた標本に由来する年があった(表-3)。これらの標本を除かない場合、降雨因子と細土移動量との相関関係が著しく低下することはいうまでもない。

次に表層土の凍結・融解がみられた冬期を含む期間と、これを除く夏期のみとについて相関係数を比較してみる。アカマツ+広葉樹林区とスギ林区では全期間の相関係数が夏期のそれとくらべてやや低くなったが、いずれの試験区でも両者の差はごくわずかであった。またヒノキ林区では、むしろ全期間についての相関係数の方がやや高くなった。さらに、表層土の凍結・

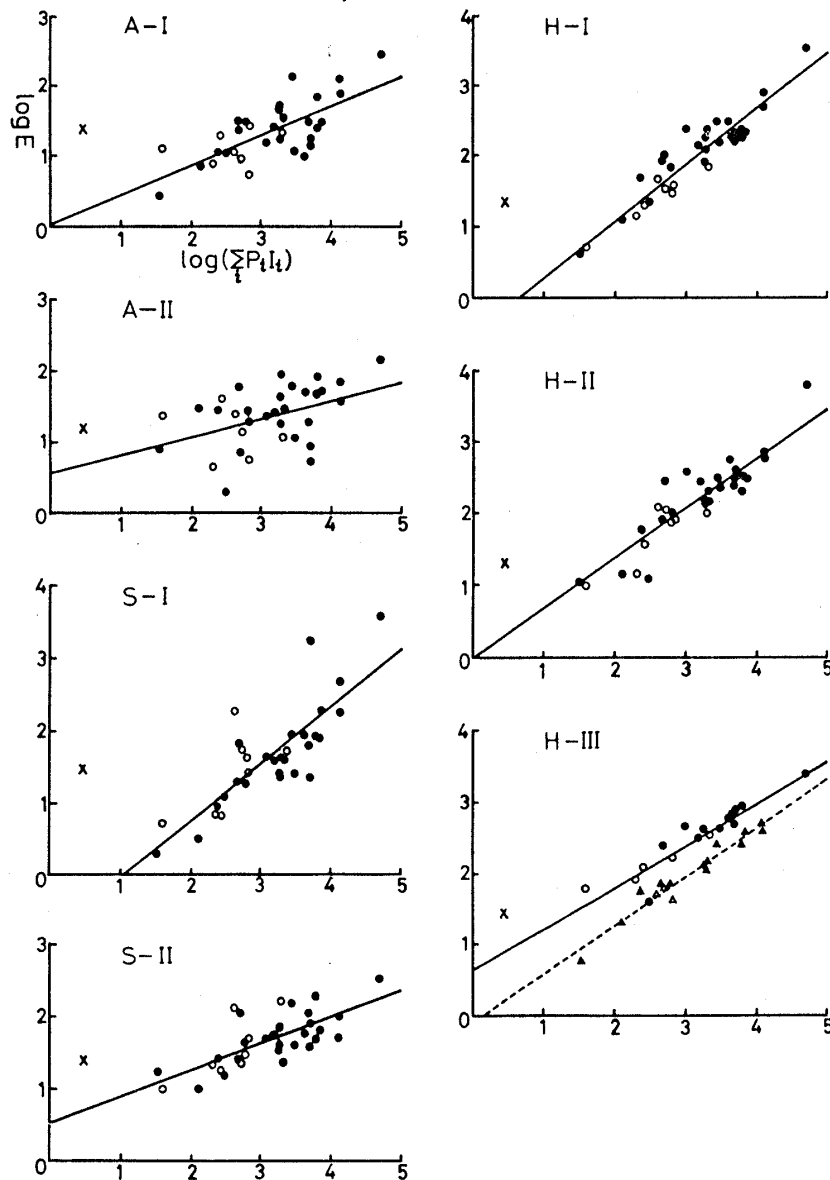


図-3. 降水指数 ($\sum PI$) と移動細土量 (絶乾重 g/10 m) の関係

Relationships between Precipitation Index ($\sum PI$) and weight of eroded soil oven-dried at 105°C (g/10 m)

P , Total precipitation in a continuous rainfall period; I , Maximum of one-hour precipitation in the same period; $\sum PI$, Sum of PI in a sampling period; E , Weight of eroded soil oven-dried at 105°C (g/10 m) in the same period; \times , Sample from the period Jul. 18~Aug. 4, 1986 probably influenced by localized rainfall and omitted in the analysis.

For all plots except for H-III: \circ , Samples from the period December to March; \bullet , Samples from the period April to November.

For H-III: \circ , \bullet , Samples from Investigation Period I (see Table 3); \triangle , \blacktriangle , Samples from Investigation Period II; White, December to March; Black, April to November.

Influence of field mice is excluded from the data.

表-4. 細土移動量の降水指数への回帰における相関係数
Correlation between amount of eroded soil and Precipitation Index (ΣPI)*

Season	No. of sampling periods	Correlation coefficient "r" in a curvilinear regression analysis : $\log E^{**} = a + b \log (\Sigma PI)$						
		Plots						
		A- I	A- II	S- I	S- II	H- I	H- II	H- III
Months without freezing (April to November)	25 (12)***	0.731	0.463	0.856	0.721	0.932	0.906	0.911
Throughout the year	33 (17)***	0.720	0.440	0.820	0.710	0.943	0.920	0.936

* P, Total amount of precipitation in a continuous rainfall period ; I, The maximum of one-hour precipitation in the same period. ** Amount of eroded soil (oven-dried at 105°C, g/10 m). *** For H-III only.

表-5. 曲線回帰 $\log E = a + b \log (\Sigma PI)$ (A) と $\log E = a + b \log (\Sigma I_{60}^a)$ (B) における相関係数 (r) と回帰係数
Correlation coefficient (r) and regression coefficient in regression analysis applying $\log E = a + b \log (\Sigma PI)$ (A) and $\log E = a + b \log (\Sigma I_{60}^{a*})$ (B)

		Plots						
		A- I	A- II	S- I	S- II	H- I	H- II	H- III
A	r	0.720	0.440	0.820	0.710	0.943	0.920	0.936
	a	0.033	0.561	-0.815	0.547	-0.501	-0.020	0.644
	b	0.422	0.258	0.790	0.365	0.794	0.703	0.588
B	α yielding maximum of r^{**}	3.0	4.9	2.1	1.4	2.7	2.1	2.5
	Maximum of r^{**}	0.727	0.482	0.840	0.742	0.945	0.922	0.940
	a	0.131	0.608	-0.847	0.391	-0.344	-0.002	0.811
	b	0.316	0.128	0.843	0.551	0.653	0.735	0.534

* I_{60} , Every one-hour precipitation in a continuous rainfall period. ** Cited from (10)

融解により細土が不安定な状態におかれたとすれば、冬期の標本は回帰線の上に偏って分布したはずである。しかしこのような傾向は認められなかった。細土の移動に対する表層土の凍結・融解の影響は、凍結の深さ、凍結・融解の頻度、冬期の降雨量等によって異なるものと考えられるが、当試験地では、表層土の凍結・融解は降雨因子と細土移動量との関係に大きな影響は及ぼさなかったとみられる。

これまで、降雨因子に降水指数の積算値 ΣPI を用いて、細土移動量との関係を検討した。この指数は、降雨量と降雨強度を同時に取り込むという点で一応の意義をもつが、強度の因子は1連続降雨中で最大の雨量を記録した1時間だけに限定して取り込まれているにすぎず、 P に I を乗ずることに理論的な根拠はない。この点、小高・遠藤(10)が降雨因子として提案した、1連続降雨における各30分間雨量のべき乗値の積算値 ΣI_{30}^a は、一定時間当たりの雨量であるという点で本質的には同じものである降雨量と降雨強度とを分離

するという不自然を冒さず、1連続降雨のすべての30分間雨量をとりあげ、しかも降雨強度の違いを表現しうるものとなっている。また、これを用いた回帰分析においては、回帰係数に加えて a も、被侵食面に固有の性質に関する情報源となりうるので、理論的には優れた降雨因子のとりあげ方であると考えられる。

表-5に、 $\log E = a + b \log (\Sigma PI)$ と、小高・遠藤(10)の降雨因子に準ずるものとしての、回収期間ごとのすべての1時間雨量のべき乗値の積算値 ΣI_{60}^a を降雨因子に用いた $\log E = a + b \log (\Sigma I_{60}^a)$ とにより回帰分析を行った結果を対比して示した。

回帰係数 a, b には降雨因子のとりかたによる多少の差がみられたが、これらについての試験区間の大小関係はほぼ同じであり、相関係数における差も小さかった。理論的には弱い面のある ΣPI であるが、実用上大きな問題はなかったものと考えられる。

3. 樹種・地形・降雨因子と細土移動量

大味・綱本(11)は、山腹工法面の小区画斜面におけ

表-6. 雨の降り方と細土の移動

Patterns of rainfall and amount of eroded soil less than 2 mm in particle diameter

Investigation period	Period I			Period II			
Sampling period	4~30 Sept.	1~8 Oct.	Other periods	3~17 Jul.	4~26 Sept.	Other periods	
<i>N</i> of continuous rainfall	4	1	54	1	4	43	
$\sum PI$	51550 (58)	5148 (16)	31970 (36)	13611 (26)	13263 (25)	25383 (49)	
Maximum of <i>PI</i>	48750	5148	5106	13611	9975	6384	
Maximum of <i>P</i>	650	198	222	349	161	228	
Maximum of one day rainfall	408	151	135	129	126	199	
Maximum of <i>I</i>	75	26	26	39	75	28	
	Plots						
Amount of eroded soil (oven-dried at 105°C, g/10 m)	A-I	296 (51)	18 (3)	271 (46)	131 (19)	78 (11)	498 (70)
	A-II	140 (30)	5 (1)	317 (69)	38 (6)	70 (10)	579 (84)
	S-I	3905 (64)	1675 (27)	574 (9)	187 (12)	478 (31)	859 (57)
	S-II	331 (22)	82 (6)	1058 (72)	100 (12)	52 (6)	706 (82)
	H-I	3470 (64)	172 (3)	1777 (33)	480 (17)	726 (25)	1641 (58)
	H-II	6170 (65)	406 (4)	2984 (31)	588 (18)	703 (22)	1907 (60)
	H-III	2606 (30)	783 (9)	5411 (61)	—	—	—

(), Percentage of each sampling period of the total investigation period.

る土砂の移動量 E の、降雨加速指数 PI_i に対する回帰式 $\log E = a + b \log(PI_i)$ の回帰係数について、 a は傾斜が急なほど大きく、 b はその逆の傾向を示すことを報告した。本研究の回帰分析で得られた a, b についても、同一樹種の試験区間で比較すると、 a は相対的に急傾斜・凸地形の A-II, S-II, H-III で大きく、 b は相対的に緩傾斜・凹～平衡地形の A-I, S-I, H-I, H-II で大きかった(表-5)。これは降雨因子と細土移動量の関係が、地形によって異なることを意味する。

表-6 に、1年目と2年目のおのおのについて、最大の降水指数をもたらし雨を含む回収期間、第2位の雨を含む回収期間およびそれ以外の回収期間を通算した期間(各年 $n=15$)の三つの期間における降雨の状況と細土の移動量を示した。1年目に最大の降水指数を記録した雨は台風によるもので、6日間に年間の降水指数の58%を降らせる著しい豪雨であった。2年目に降水指数が最大となった雨は14日間降り続いた梅雨前線による雨で、降雨強度はそれほど大きくなかった。降雨強度の大きかった第2位の雨は逆に降雨量が少なく、2年目には1年目のような極端な豪雨はなかったといえる。

1年目の9月4~30日と2年目の9月4~26日の期間には複数の連続降雨が含まれたが、降水指数が最大のもの以外はすべて降水指数のごく小さい雨であったので、ここではこれらの期間の細土の移動は大半が期間中最大の降水指数を記録した雨の際に生じたものとして両者の関係を検討することにする。

1年目の細土移動量をみると、S-I, H-I, H-IIでは年間移動量の60%以上が9月の台風による豪雨で生じたのに対し、S-IIとH-IIIではこの雨による移動は年間の30%以下であった。また、この豪雨の際の移動量がスギ林区では、S-I > S-II、ヒノキ林区では、H-I, H-II > H-IIIであったのに対し、第2位までの雨を除く残り15回の通算期間の移動量における試験区間の大小関係は、これとちょうど逆であった。S-IIとH-IIIは相対的に急傾斜の凸地形であり、S-I, H-I, H-IIは相対的に緩傾斜で、S-IとH-IIは凹地形、H-Iは平衡地形であった。降水指数が比較的小さい雨の際の細土移動量は、緩傾斜地 < 急傾斜地であったが、極端な豪雨の際には、平衡～凹地形の緩傾斜地での移動量が著しく増すことにより、これが逆転したといえる。A₀層の高い侵食防止機能により、野鼠の活動を除く細土の移動が低く抑えられたアカマツ+広葉樹林区においても、相対的に緩傾斜・凹地形のA-Iと相対的に急傾斜・凸地形のA-IIでは、細土の移動の仕方上と同様の違いがみられた。東(I)はヒノキ林の急斜面では日常的に林地表層の物質の移動が生じやすいのに対して、緩斜面では強度の強い降水時に集中的に流亡する可能性のあることを指摘している。地形の凹凸をも考慮すれば、このことは程度の差こそあれスギ林や広葉樹林の林地斜面にもあてはまるものと考えられる。

2年目には極端な豪雨がない一方で、降水指数が第1位と第2位の雨を除く残りの期間中に1年目とくら

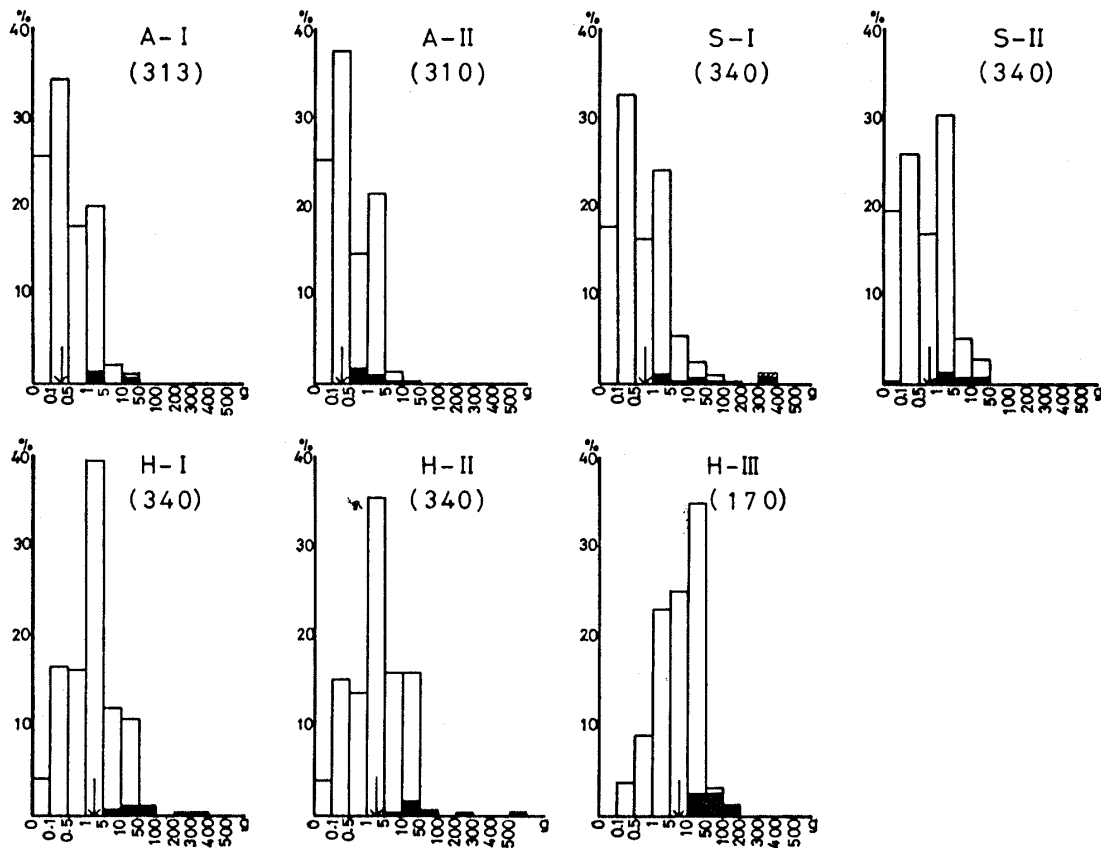


図-4. 移動細土量 (絶乾重 g/25 cm) の百分率階級頻度分布

Percentage frequency distributions of dry weight of eroded soil oven-dried at 105°C (g/25 cm)

(), Number of samples; ↓, Median. Black, Distribution of the samples of the period Sept. 4~30, 1985 having an extremely heavy rain accompanied by a typhoon; Hatched, A sample from the period Oct. 1~8, 1985 influenced by the last typhoon. Influence of field mice is excluded from the data.

べてやや大きな雨があり (第3位, 第4位の雨の降水指数, 1年目: 5,106, 3,417; 2年目: 6,384, 4,730), 雨の降り方が相対的に均等であった。そのため試験区間の細土の移動の仕方にも1年目ほどきわだった違いはなかったが, やはり降水指数が第1位と第2位の雨の際の移動量が年間の移動量に占める割合には, A-II, S-II < A-I, S-I, H-I, H-IIの関係が認められた。

以上の事実から, 回帰式 $\log E = a + b \log(\sum PI)$ の回帰係数 a, b について, 上に述べた地形による違いは, 次のように説明される。急傾斜・凸地形では, 降水指数が小さい降雨時の移動量は相対的に大きい。しかし豪雨時の移動量の増加が極端に大きくなることは少ない。したがって切片 a は大きく, 傾き b は小さくなる。一方, 緩傾斜・凹～平衡地形では逆に, 降水指

数の小さい降雨時の移動量は小さいが, 豪雨時の移動量の増加が著しい。その結果, a は小さく, b は大きくなる。

図-4は, 2年間, 34回の回収における受け箱ごとの細土移動量 (g/25 cm) の百分率階級頻度分布図である。図中()内に各試験区の標本数を示した。矢印は中央値の位置, 黒つぶしの部分は1年目の豪雨を含む回収期間(9月4~30日)の10の標本の分布である。S-Iの斜線部は9月4~30日の期間に欠測を生じた箱で, 10月1~8日の回収期間に得られた標本である。

相対的に水が集まりやすく, たまりやすい緩傾斜・凹～平衡地形のS-I, H-I, H-IIでは, 黒つぶし部分のなかにとびはなれて上位の階級に分布するものがあつたのに対し, A₀層の侵食防止機能の高いアカマ

表-7. 表層土の(礫体積)/(絶乾細土体積+礫体積)(%)
Percentage of volume of gravel (diameter ≥ 2 mm)
of total volume of soil and gravel constituting the
surface soil*

	Plots						
	A-I	A-II	S-I	S-II	H-I	H-II	H-III
Mean	16	28	52	56	28	35	26
Standard deviation	14	6	10	8	8	10	8
Number of samples	5	7	7	8	9	9	6

* Soil less than 6 cm in depth.

ツ+広葉樹林区と、水が集まりにくく、たまりにくい急傾斜・凸地形のS-IIとH-IIIでは、黒つぶし部分は上位の階級を占めはしたが、ほぼ通常の連続した分布の範囲内におさまった。また降水指数で第2位の雨がかった1年目の10月1~8日の回収期間にも、S-Iでは大量の細土が移動した(表-6)。この時も、図-4に斜線で示した移動量最大の標本(383g)を除く9個の標本の範囲は0.09~19.30g,平均は3.96gであり、一つの標本だけがとびぬけて大きな値を記録した。

先に緩傾斜の凹~平衡地形では急傾斜の凸地形とくらべて、豪雨時の細土移動量の増し方が著しかったと述べた。このことのおもな原因は移動量が全体として増したことよりも、とびぬけて大量の移動が局所的に生じたことにあるといえる。

1.では、細土の年間移動量が樹種により異なることを述べた。ここでは以上の結果をふまえて、同一樹種の試験区間にみられた、野鼠の影響を除く細土の年間移動量の違いについて、樹種・地形・降雨の3因子を同時に考慮しながら検討してみる。

アカマツ+広葉樹林区では、地形を異にするA-IとA-IIでの細土の年間移動量の差は小さかった。ここではA₀層の侵食防止機能がきわめて高く、降水指数の大小、地形の緩急・凹凸を問わず、細土の移動が低く抑えられたためと考えられる。

スギ林区の細土の年間移動量にはS-I>S-IIの関係が明瞭であった。スギ林区の下層植生およびA₀層がある程度の侵食防止機能をもつことは、S-IIでの移動量が比較的小さかったことから推察される。しかしこれらの地表保護物は、豪雨時に緩傾斜の凹~平衡地形で起こりやすいとみられる局所的な大量移動に対しては十分な防止効果を発揮せず、これがS-Iでの大量の移動につながったものと考えられる。スギ林区の

試験区間での、細土の年間移動量における大小関係は、豪雨時の移動量の差によってほぼ決定されたものである(表-6)。

ヒノキ林区では、アカマツ+広葉樹林区と同様、地形の違いによる移動量の差は小さかった。ヒノキ林区の下層植生とA₀層は、貧弱であったため、降水指数の大小、地形の緩急・凹凸を問わず、細土の移動を抑える力は小さかった。H-IとH-IIでは、豪雨時に局所的な大量の移動が発生したが、H-IIIでは降水指数の大きくない降雨時にも多くの細土が移動した(表-6)。試験区間での、豪雨時における差と、そうでない降雨時における差は、符号が逆で相殺され、年間移動量の差は小さくなったものと考えられる。

4. 表層土の礫含有量と細土移動量

塚本(12)は地表の直径2mm以上の粒子が表面侵食に対してpavementとなる可能性を指摘している。当試験地のスギ林区ではアカマツ+広葉樹林区やヒノキ林区よりも表層土の礫含有量が大きかった(表-2)。表-7に、表層土の(礫体積)/(絶乾細土体積+礫体積)の値を%で示した。スギ林区では表層土中の土砂の、体積割合にして5割強が直径2mm以上の粒子によって占められた。

年間の細土移動量における、スギ林区<ヒノキ林区の大小関係には、下層植生やA₀層の侵食防止効果に加えて、礫のpavementの効果も影響した可能性は否定できない。しかしスギ林区の年間細土移動量は、アカマツ+広葉樹林区の、野鼠の影響を除く移動量とくらべて明らかに大きく、またS-Iでは台風時に局所的な大量の移動が生じている。当試験地では礫によるpavementの効果は、かりに存在したとしても、細土の移動量に対する樹種や地形の影響を無効にするほどの影響力はもたなかったといえる。

スギ林区では、表層土の礫体積が大きかった結果として、絶乾細土体積はアカマツ+広葉樹林区やヒノキ林区とくらべて明らかに小さかった。スギ林区において移動源となる細土の絶対量が少なかったことが、細土移動量における、スギ林区<ヒノキ林区の関係をもたらす主要因であったとすれば、スギ林区の下層植生あるいはA₀層の侵食防止機能がヒノキ林区のそれに勝るとした、これまでの議論は無効となる。しかし、全表層物質の年間移動量にも、スギ林区<ヒノキ林区の関係があり(表-3)、礫のみの移動量についても同様の関係が得られている。したがって表層土の礫含有量の差を考慮に入れても、これまでの議論の有効性は失

われない。

なお、礫の移動量や表層土と移動土砂の粒径組成の関係については、別の報告で検討する。

最後に、本報告は国庫補助の林業普及情報システム化課題、“林地貯水能の定量化に係わる因子の測定分析に関する試験”を実施して得た成果の一部を詳細に検討し直したものである。実施にあたり、ご指導、ご援助いただいた森林総合研究所企画調整部連絡科長牧勉氏、岐阜大学農学部教授脇孝介博士、森林総合研究所関西支所長有光一登博士に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- (1) 東 敏生：ヒノキ及び落葉広葉樹林の A₀層形成について(II)。第38回日林関西支講：57～60, 1987
- (2) 井上輝一郎・岩川雄幸・吉田桂子：ヒノキ単純林における落葉および土砂の移動。林試研報 343：171～186, 1987
- (3) 石川知明：林種、林相による土壌孔隙組成の相違。第38回日林関西支講：41～44, 1987
- (4) 岩川雄幸・石塚和裕・井上輝一郎：ヒノキ林の地表侵

食一枝下高の違いが地表侵食に及ぼす影響。昭和58年度林試四国支年報：22～23, 1984

- (5) ———・井上輝一郎・酒井正治：山腹斜面のヒノキ林におけるリターおよび土砂の移動について(I)移動量と斜面位置ならびに降水条件との関係。第38回日林関西支講：49～52, 1987
- (6) ———・—————：山腹斜面のヒノキ林におけるリターおよび土砂の移動について(II)移動量と立地因子との関係。第38回日林関西支講：53～56, 1987
- (7) 小林繁男：森林の皆伐に伴う土壌の変化。ペドロジスト 26：44～57, 1982
- (8) 河野良治・難波宣士：林地からの土砂流出についての一測定。第75回日林講：457～459, 1964
- (9) 中村恭二：ヒノキ林地における土砂の流亡量について。第34回日林関西支講：61～64, 1983
- (10) 小高和則・遠藤治郎：雨滴侵食に関する研究—林内と林外の侵食状況と降雨因子の関係。日林誌 66：67～71, 1984
- (11) 大味新学・綱本皓二：山腹工法面の侵食に関する研究—降雨加速指数と土砂流出との関係について。日林誌 49：286～292, 1967
- (12) 塚本良則：林内の雨滴と飛沫侵食。東京農工大演報 5：65～77, 1966

(1988年10月24日受理)