

林道の路面浸食について (V)

—1980~1983年に観測された流出土砂量
等に関する総合的検討—

古谷 士郎・酒井 徹朗・佐々木 功

Study on Erosion of Forest Road Surface (V)

—the total discussion on sediment yield and others
obtained in 1980~1983—

Shirou FURUTANI, Tetsurou SAKAI and Isao SASAKI

要 旨

林道路面の浸食量の調査のため、京大芦生演習林内の林道、および、京都市北部の公有林林道に設けられた固定調査区において、昭和55~58年の内の2~4年間で得られた、林道路面からの流出土砂量、路面流量、一連続降雨量等についての検討を行なった。

検討の結果次のようなことが明らかとなった。

1) 一連続降雨量、単位時間当り流量の分布を検討した結果、一連続降雨量の頻度の超過確率は e^{-aR+b} (a, b : 係数, R , 一連続降雨量), 単位時間当り流量のそれは $\exp(-a'Q^{b'})$ (a', b' : 係数, Q : 流量) の形で表わされるのが妥当である。

2) 一連続降雨量 (R) と、それに伴う路面総流出量 (Q_s) は、 $Q_s = a''R^{b''}$ (a'', b'' 係数) の形で表わせる。

3) 林道路面からの流出土砂量の推定には、Meyer-Peter & Müller の掃流土砂公式の適用は可能であり、これを基にして、適正横断溝間隔 (L_c) と勾配 (S) との関係式 $L_c = a'''S^{-b'''}$ (a''', b''' : 係数) において重要な b''' の値について検討したところ、 $b''' = 1.6 \sim 1.7$ という値を得た。

1. はじめに

我が国のような急峻な山岳林の多い、しかも雨量の多い地域では、林道路面の雨水の適切な排水が、林道路面の保全や、車輛走行条件の悪化防止、さらには、林内への土砂流入の予防といった環境面からも重要な要因となる。この様な見方から、我々は、林道路面に形成されたリル断面の計測¹⁾や、固定調査区を設定して、リル断面の形状変化^{2), 3)}、調査区から流出する土砂量、路面流量の計測⁴⁾を行なってきた。そして、固定調査区の林道路面からの流出土砂量が、Meyer-Peter & Müller の掃流土砂量公式により推定できそうであるという結果を報告した⁵⁾。一方、これまで得られた検討結果を確証するためには、データ量を増やす必要があると考えられ、引続き固定調査区での上記の計測を行なった。本報告では、前報までに報告した観測結果に昭和58年度の観

測データを加え、4ヶ所の固定調査区での総計601降雨のデータについて、検討したので報告する。

2. 調査方法

林道路面からの流出土砂量、流量等の計測を行なった固定調査区は、京大芦生演習林内の林道の2ヶ所（既報と同じく、調査区名をA1、A2とする）と、京都市北部の公有林林道上の2ヶ所（H1、H2）であり、その概要については、前報を参照されたい。なお、plotの記号は前報と同じとする。

これらの調査区は、同時に設定されたものではなく、従って、得られたデータ数は各調査区で差がある。ちなみに、本報告で使用したデータは、A1では、昭和55年～58年の4年間の降雪期を除く、一連続降雨量、路面流量、および、一定期間ごとの流出土砂量であり、A1、H1については、昭和57～58年の2年間の、H2については、昭和56～58年の3年間のデータである。降雨回数、および、路面流出土砂量の計測回数は、それぞれ、A1では、266、24、A2では、107、13、H1では、96、13、H2では、132、17である。

流出土砂量の計測方法は、既報の通り、各調査区の下端に設けられた、溜樹に堆積した土砂の乾燥重量及び、見かけの比重から土砂量を求める方法である。また、路面からの流出水量は、溜樹内に導かれる水の水位変化から求めた。詳しくは、既報^{1)~7)}を参照されたい。

3. 結果と考察

新たに得られた、昭和58年度の流出土砂量等の実測結果を示すと表1のとうりである。

Table 1. the results of observation in 1983

	period	4/26 ~ 5/19	5/19 ~ 6/15	6/15 ~ 7/14	7/14 ~ 8/11	8/11 ~ 9/12	9/12 ~ 10/11	10/11 ~ 11/16	11/16 ~ 12/6	TOTAL
A1	rain fall	179.0(mm)	39.0	183.5	235.5	63.5	218.0	174.0	61.5	1154
	out flow	26.6(m ³)	1.87	11.9	19.5	20.4	28.7	11.6	4.8	125.37
	max dischargl	80(l/min)	1.9	75	122	99	22	23	—	—
	sediment yield	51.1(ℓ)	0.9	55.2	300.6	51.9	79.6	2.9	1.4	543.6
A2	rain fall	143.0	27.0	200.0	233.0	77.0	201.0	163.5	snow	1044.5
	out flow	47.2	0.6	67.5	50.2	10.4	35.6	8.1	—	219.6
	max dischargl	140.4	9.4	152	93.6	41.8	70.2	—	—	—
	sediment yield	30.2	1.2	149.5	241.1	14.7	41.7	7.9	—	486.3
	period	4/20 ~ 5/17	5/17 ~ 6/17	6/17 ~ 7/20	7/20 ~ 8/9	8/9 ~ 9/21	9/21 ~ 10/12	10/12 ~ 11/15	11/15 ~ 12/9	TOTAL
H1	rain fall	187.0	80.0	477.0	138.0	277.0	374.5	65.5	—	1599
	out flow	(8.1)	(13.3)	(1.4)	14.6	28.2	—	—	—	—
	max dischargl	—	—	—	269.5	—	—	—	—	—
	sediment yield	65.3	2.0	257.0	26.6	112.0	131.4	4.9	0.8	600
H2	rain fall	190.0	79.5	483.5	138.0	274.0	374.5	65.5	—	1605
	out flow	69.1	14.8	124.8	24.3	50.5	86.8	15.6	4.3	390.2
	max dischargl	64.6	30	509.0	80	282.0	444	24.0	—	—
	sediment yield	106.0	14.7	658.6	20.7	83.1	152.9	5.1	7.1	1180.5

昭和58年度において、最も土砂流出が多かった期間は、表1に見られるように、7月中旬であり、梅雨末期の豪雨によるものである。以下、前述の数年間の諸量について検討を行なう。

3-1 一連続降雨量について：浸食に關係する降雨を考える場合、降雨強度が大きなファクターである。そして、降雨に伴う林道路面の流水は降雨期間との時間的なズレが非常に短かいと考えられる。したがって、本来、単位時間当りの路面流量との關係などを調べるにはできるだけ短時間の降雨量を現場で計測することが望ましい。しかし、このような計測は行なわなかった。そこで、流出水量の關係を見るため、いわば、総量的な考え方から、一連続降雨量について、その特徴的な様子について検討することにした。

図1は、各調査区についての一連続降雨量の頻度を対数グラフ上に示したものである。図1に見られるように、一連続降雨量は、降雨量の増加に伴ない減少する傾向にあるが、外数グラフ上で直線的というより、やや上に凸な頻度の減少傾向を示す。そこで、これらの頻度と一連続降雨量がどのような関係式で表現されるのがよいか、その超過確率に3つの関数型を与えて計算した。

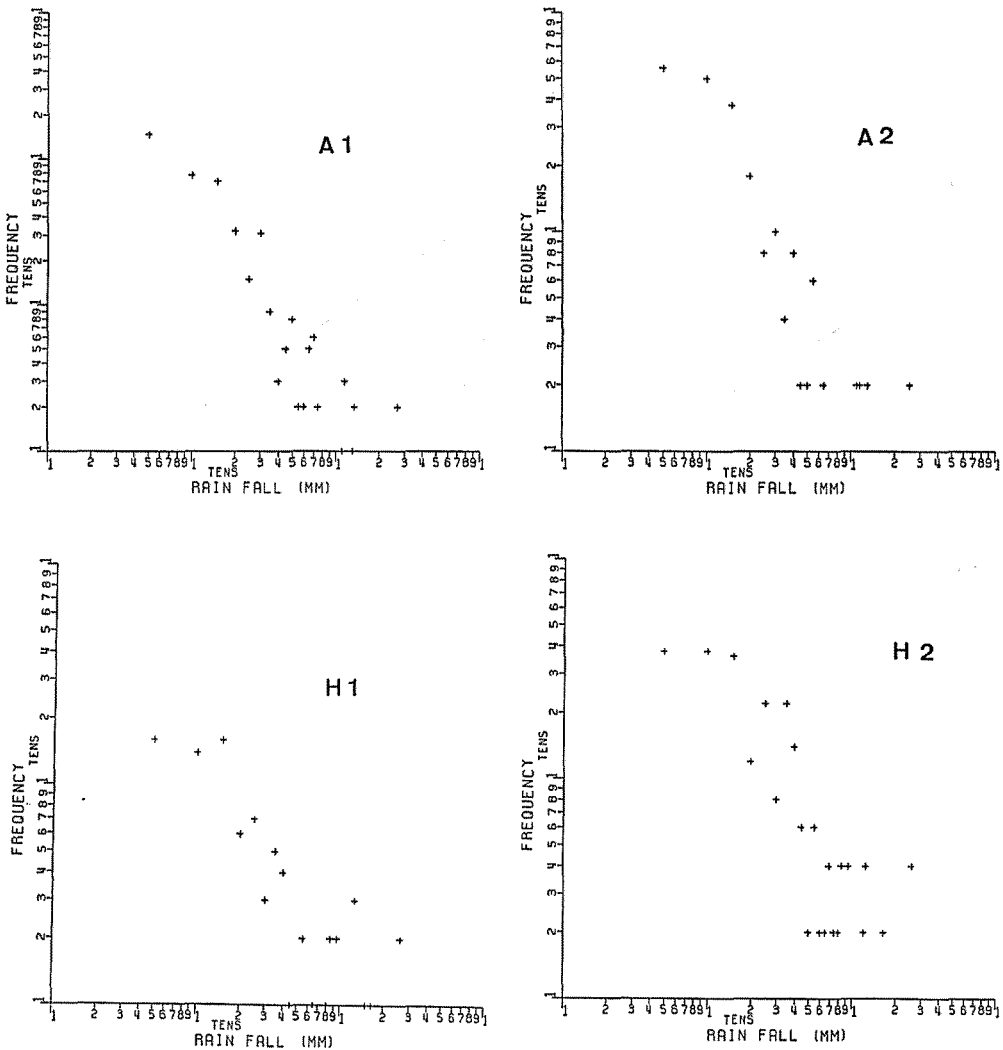


Fig 1. the frequency of one continuous rain fall in total rain fall on each plots.

すなわち、指数型、双曲線型、および、前報で、路面流出水の年間の超過確率が、ワイブル分布の超過確率関数から求められるということから、ワイブル分布型の3つである。それぞれ関数型として、 R を一連続降雨量とすると $e^{-a_1 R^{b_1}}$ (a_1, b_1 : 係数 $a_1 > 0$)、 $a_2 R^{-b_2}$ (a_2, b_2 , 係数 $b_2 > 0$)、 $\exp(-a_3 R^{b_3})$ (a_3, b_3 : 係数 $a_3 > 0$) である。その結果、相関係数が最も高くなったのは、全調査区とも、指数分布型の超過確率関数で表した場合で、いずれも0.95を越える値となった。このように、一連続降雨量の頻度分布は、指数関数型で表示することができるものと推定できた。

一連続降雨量の各調査区ごとの平均は、A 1で15.35mm、A 2で17.44mm、H 1で29.60mm、H 2で27.32mmで、A 1とA 2 (A 1, A 2を総称するときは芦生地区という)、H 1とH 2 (以下、同様に八丁地区という) とが似かよった値となり、地域による差が認められる。上述の指数関数で求めた超過確率の係数 a_1 は、A 1で0.036、A 2で0.033、H 1で0.021、H 2で0.027であり、八丁地区の方が一連続降雨量の多い確率が芦生地区よりも高い傾向にあるといえる。もちろん、係数 a_1 そのもの値は、データが増えれば若干変り得る。

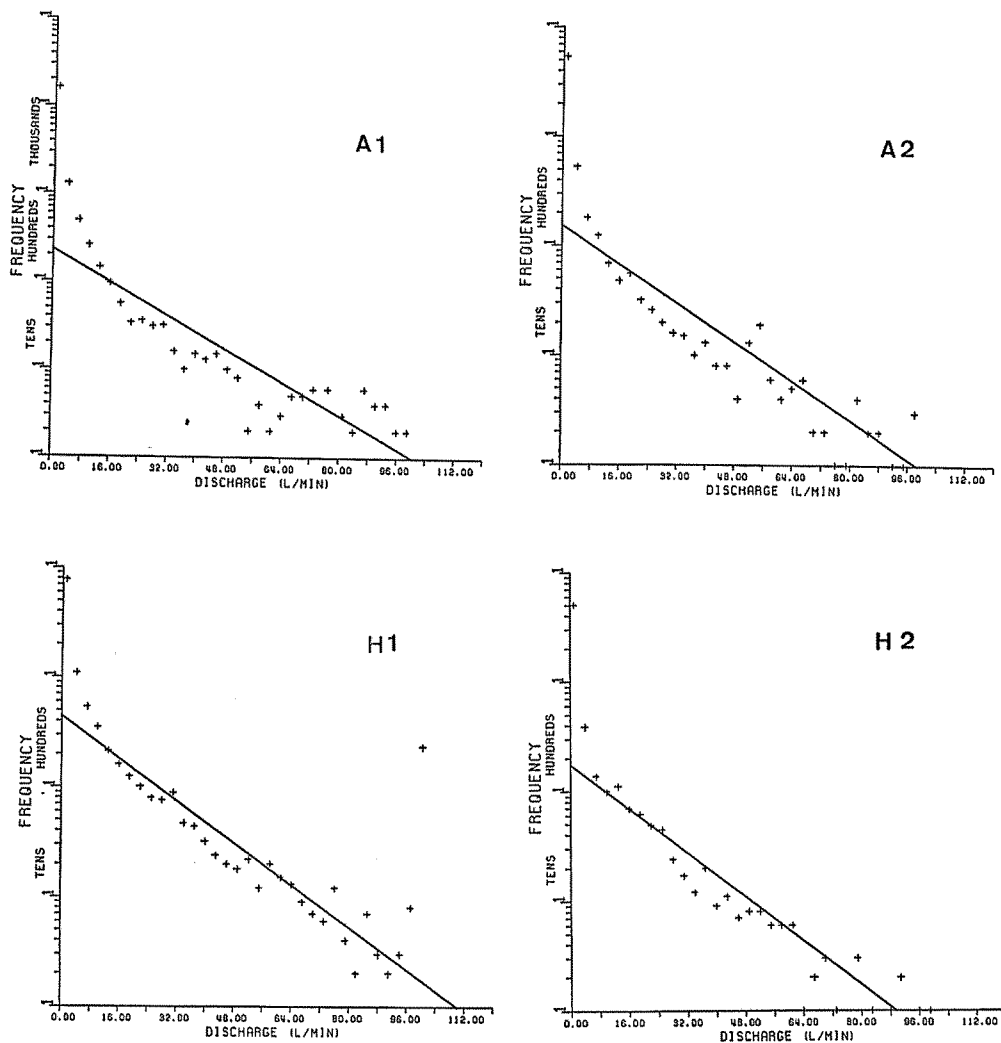


Fig 2. the frequency of discharge in total outflow on each plots.

3-2 路面流出水：路面から流出した水については、5分間ごとに、単位時間（1分間）当りの流量が求められている。ここで、各調査区について、得られた流出水の頻度を、全降雨について1分ごとに度数別けして集計し、図示すると、図2のようになる。図2の各図に示された直線は、回帰直線を示したもので、 $\exp(-a_4Q+b_4)$ (a_4, b_4 係数, $Q \cdot 1$ 分当り流量), なる形式である。相関係数はそれぞれA1で-0.827, A2で-0.859, H1で-0.883, H2で-0.896であった。1分間当りの路面流水の超過確率については、前報で1年間のデータを使用した結果、 $\exp(-a_5Q^{b_5})$ (a_5, b_5 係数 $a > 0$) で表わすのが妥当となった。そこで、全データ利用の場合についても同様にして求めてみると、相関係数は、全調査区とも0.99を越え、単位時間当り流量の超過確率は、ワイブル分布の超過確率で表わすのが妥当であることがわかった。係数 b_5 は、A1で0.369, A2で0.374, H1で0.447, H2で0.449であった。このように、係数 b_5 は、同一地区内で非常に近い値となり、路面流水のパターンが地域的な特性を有するようにも考えられ、路面から流出している水の総量が求められれば、その地域の流出水の単位時間当り流量の分布が計算できることが推定される。

図3は、欠測値、異常値のほとんどなかった、A1での昭和57~58年の流出量の頻度分布を示したもので、分布のパターンが非常に似かよっていることが解る。このように単位時間当りの流出水の分布は、同一調査区では毎年同じような形を示すことが推定される。

3-3 一連続降雨量と流出水量：前項まで、一連続降雨量と流出水量を別々にみてきたが、ここで、これらの関係について検討してみる。図4は、各調査区ごとの一連続降雨量と、その降雨に伴う流出水の総量との関係を示したものである。図の流量の単位はm当りの l で表わされているが、これは、流量の降雨量表示と同義で、mmと読み換えてもよい。図4に見られるように、降雨量の少ないときには、バラツキが大きいのが、ほぼ直線関係にあるとみなしてもよく、回帰式を $Q_T = CR^d$ として、係数 c, d , 相関係数 (r) を求めた。A1では、 $c=0.234, d=1.128, r=0.90$, A2では、 $c=0.206, d=1.215, r=0.84$, H1では、 $c=0.155, d=1.360, r=0.94$, H2では、 $c=0.242, d=1.266, r=0.95$ であった。これらの係数を、前報の昭和57年のデータだけの場合と比較すると、大差なく、一連続降雨量と、そのときの流出水量との関係は、各調査区ごとにほぼ一定の係数をもった上式のような式で表わしてもよいように思われる。もちろん、このような式の適用には、Rの限界設定は必要ではあるが。

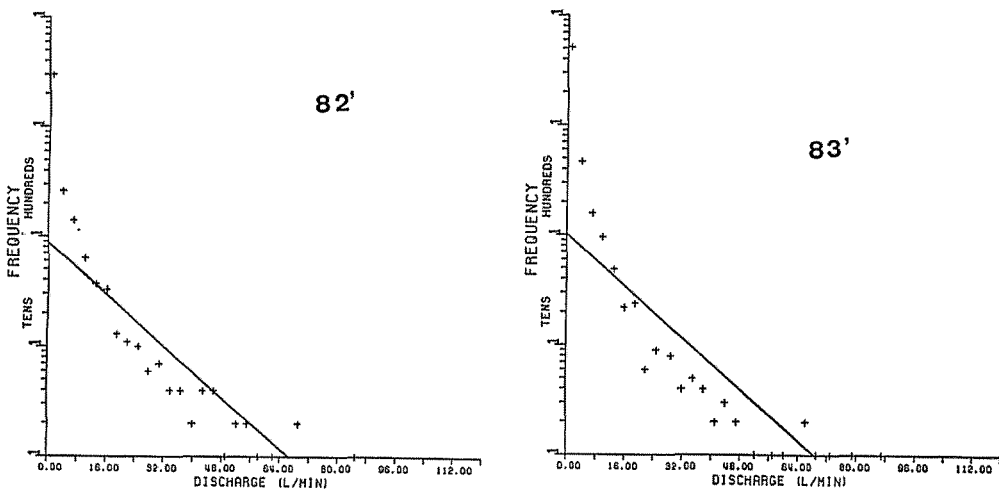


Fig 3. the frequency of discharge in total out flow in 1982 and 1983 on plot A.

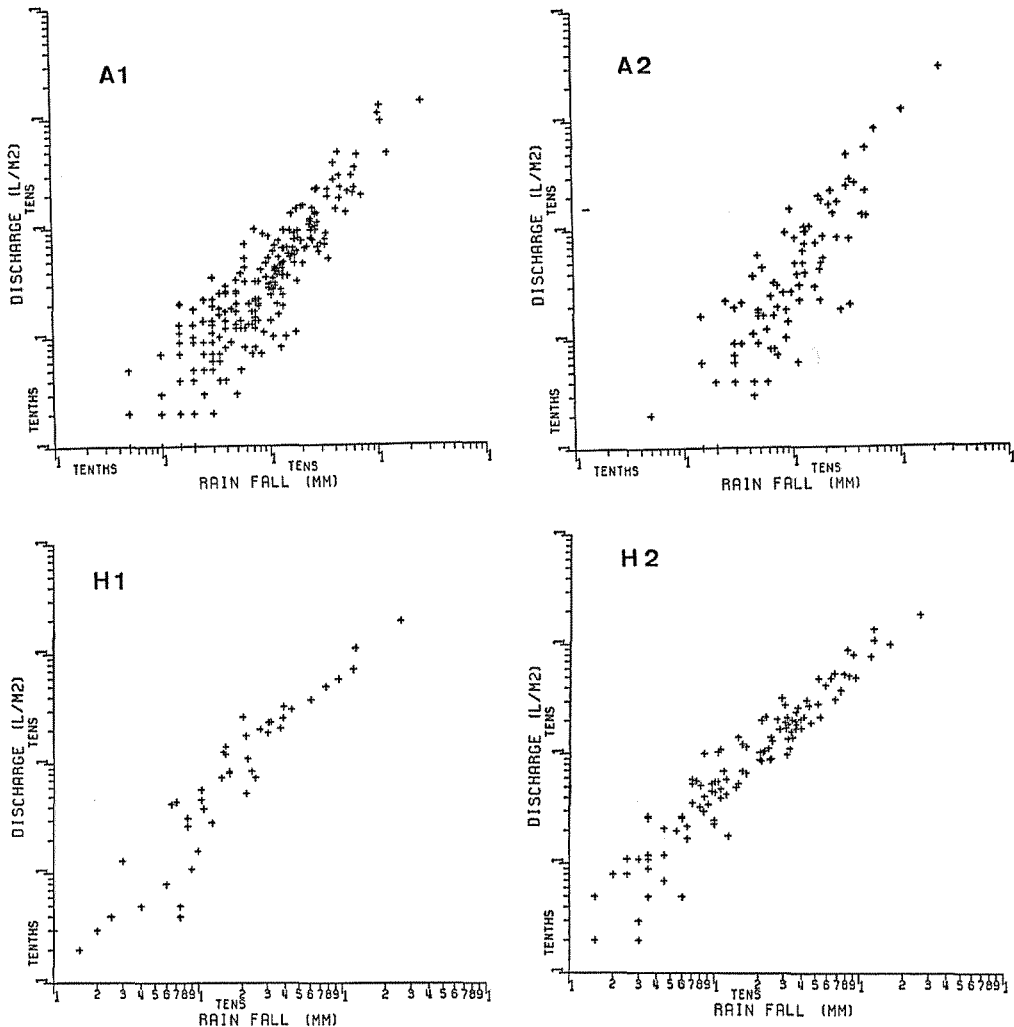


Fig 4. the relation between one continuous rain fall and total out flow in the rain

3-4 流出土砂量と流量、一連続降雨量との関係：各調査区のこれまで計測された全流出土量は、A 1で2613 l 、A 2で1491 l 、H 1で1527 l 、H 2で1956 l である。年平均にすると、A 1が706 l 、A 2が797 l 、H 1が816 l 、H 2が804 l となる。また、これらの値から、年平均浸食厚さを求めると、A 1が3.5mm、A 2が3.37mm、H 1が3.33mm、H 2が2.95mmとなる。なお、経過年は、計測開始初年度については、降雪期終了直後からの計測ではないので、経過月等から年数を求めた。勾配はA 1が11.2%、A 2が7.0%、H 1が10.0%、H 2が13.5%であるが、年平均浸食量はH 2が最も少なく、勾配の影響がみられず、ほぼ年平均3mm程度の流出土砂量が記録された。このことから、ただちに、林道路面の浸食はあまり勾配と関係がないというのは早計であり、各調査区の勾配差が少ないということから、別の因子（例えば、路面の断面形状、とか、敷砂利の有無）による影響が大きくてたためと考えるべきである。

裸地斜面の浸食量を表示するのに、掃流土砂公式が適用できるとされていることから、山岳地での適用性が最も高いとされる Meyer-Peter & Müller 式を用いて林道路面浸食量の推定を行なったところ、実測値と計算値の相関が高いということは前報でも報告した。そこで、今回、前

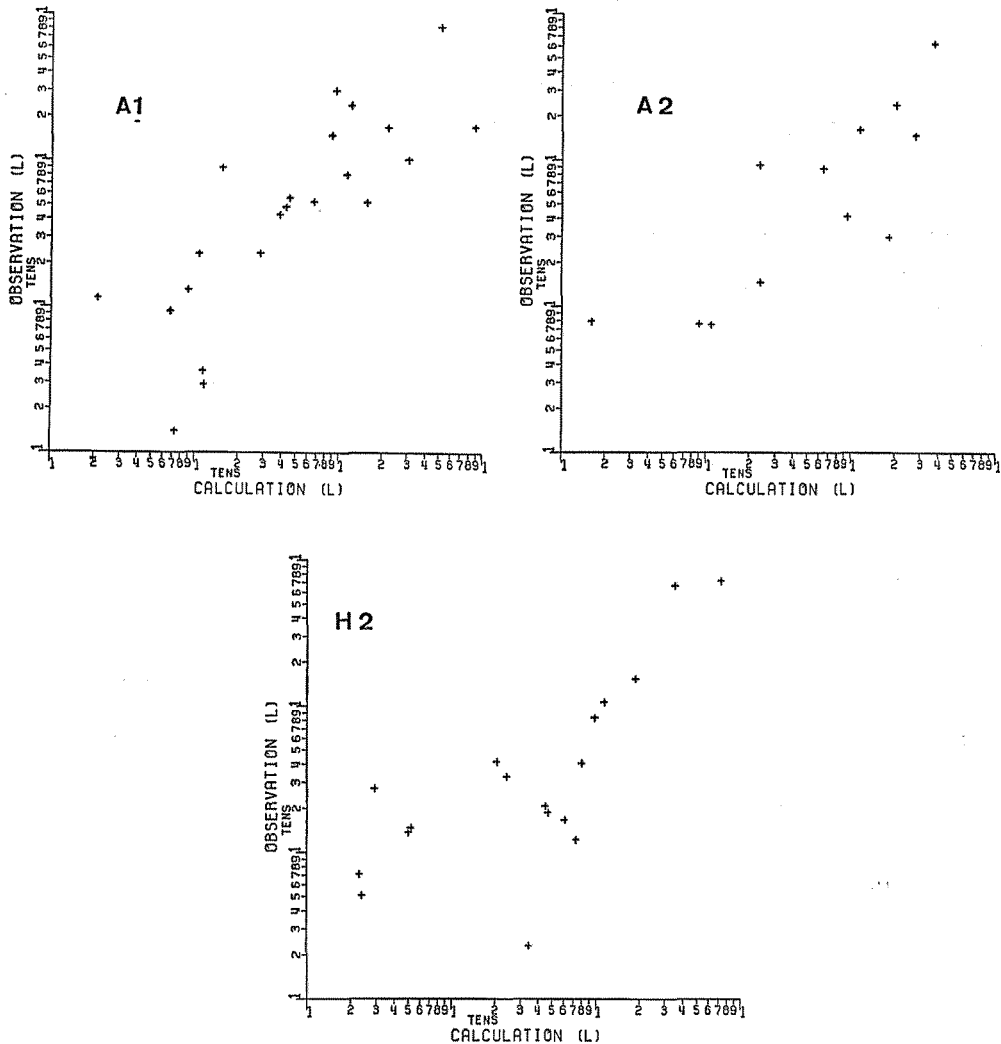


Fig 5. comparison of calculation value with observation value on sediment yield in each terms on each plots

報で行なわなかった、H 1, H 2 の場合も含めて、各調査区ごとに計算を行なってみた、その結果、H 1 については適合性が低かったが、他の場合は、ほぼ実測値と計算値とが相関していることがわかった。H 1 での適合性の低さは、流水量観測値に欠測値が多かったことによるものと思われる。ちなみに、実測値と計算値の相関係数は、A 1 で0.76, A 2 で0.83, H 2 で0.73であり H 1 では0.22であった。A 1, H 2 は、A 2 の場合に比して、やや相関係数は劣るが、欠測値、異常値を示した流水量データの場合の実測土砂量データを除くと、A 1 で0.82, H 2 で0.81となり、ほぼA 2 と同程度の相関係数となり、Meyer-Peter & Müller 式により推定できることが確実となった。図 5 は、全データについて、各調査区別に計算した値と実測値との関係を示したものである。なお、式の適用にあたり、路面流下水の水路断面形状は、いずれも、溜柵直前の路面横断面の形状から、これを、単位時間当たり流量で表わす、いわゆるレジムセオリーを利用したことは前報のとうりである。この場合、いずれの調査区とも、単位時間当たりの流出土量 (Q_T) は

$$Q_T = \alpha Q^{\beta} (\beta Q^{\beta} - 0.047)^{1.5} \quad \dots\dots(1)$$

という形式で表現されることになった。(1)式の係数 α , β には、土粒子、水の密度、平均粒径、粗度係数、勾配、および、水深と水面幅に関する係数を含んだものであり、厳密に言うならば、降雨のたびごとに、変化している可能性のある諸量もある。しかし、一応、各調査区で係数 α , β は一定とし、A 1, A 2 では前報で計算して得られた結果を用いた。H 2 について計算すると $\alpha=32.62$, $\beta=0.00622$ という値を得た。この β の値は、A 1 の0.0117, A 2 の0.172という値に対して小さくなった。ところで、(1)式の()の中は、土砂が流れ出す限界の指標にもなり、カッコ内がマイナスならば、土砂流出が発生しないことを意味する。したがって、H 2 の場合、A 1, A 2 に比して、それだけ、流出が発生しにくい事になり、単位時間当り流水量の小さな頻度が多いということから考えて、耐浸食性が高いということになる。前述したように、H 2 の年平均流出土砂量は、勾配が、4 調査区の中で最高であったにもかかわらず、最小となったことが、この係数の値からも説明し得る。

以上のように、掃流土砂公式により、路面浸食量が計算されるとして、3ヶ所の調査区について、流下距離、縦断勾配が変化したとき、流出土砂量がどの程度変化するかを考えてみる。このため、次式を導入する。今、林道路面を流下する水は、各調査区がそうであるように、調査区以外からの流入水はないものとし、降雨に伴うものだけとする。このとき、流体の連続性から、次式がなりたつ。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \dots\dots(2)$$

q : 単位時間当り、単位林道長当りに路面に形成された水路に流入する水量、A : 流水断面積、Q : 単位時間当り流量、上部横断溝からの距離、t : 時間

(2)式において、自由水面の開水路で、流れを定常だとすると $\partial A / \partial t = 0$ であり、対象路面以外から流入する水がない場合、 $x=0$ で $Q=0$ である。したがって、単位時間当りの路面流水量は流下距離に比例して

$$Q = qx \quad \dots\dots(3)$$

となる。(3)式と各調査区の林道長、および実測値の Q から、q を求め、これを基にして、林道長が xm のときの単位時間当り流水量を用いて、流出土砂量がどの程度変化するものか調べてみた。例えば、今、各調査区の中央付近に横断溝を入れ、雨水の流下距離を $\frac{1}{2}$ にした場合、上流部側、下流部側合計して、A 1 で、横断溝を入れない場合の70%, A 2 で74%, H 2 で62%となった。すなわち、横断溝を中央部に入れることにより、26~38%, 浸食土砂量の減少が見込まれることになる。そして、各調査区の路面勾配から考えて、急な勾配の路面ほど、横断溝導入の効果が良いといえる。

つぎに、(1)式において、係数 α , β の中に含まれる勾配因子を取り出し、浸食土砂量がどの程度になるかを H 1 を除き、勾配10%の場合について、年平均浸食深さで表わすと、A 1 で2.8mm, A 2 で6.8mm, H 2 で1.7mm という値となった。この数字はあくまでも、他の条件(流路となる断面形状、流下距離など)を変化させない場合の値である。A 2 の7%が10%になったとき、年平均浸食深さが3.37mm から6.8mm というように、各調査区別にみると、勾配変化の影響はかなり大きいと考えられるものの、3つの調査区を同一勾配にそろえて比較すると、実際の路面勾配が急であった路面ほど年間の浸食量は小さくなるのがよりはっきりとする。今回、単位面積当りの流出土砂量を、流量、勾配などの指数の積で表わされるものとして、重回帰分析による検討も試みたが、勾配の指数がマイナスとなり、勾配が増加するほど、浸食量が少なくなると

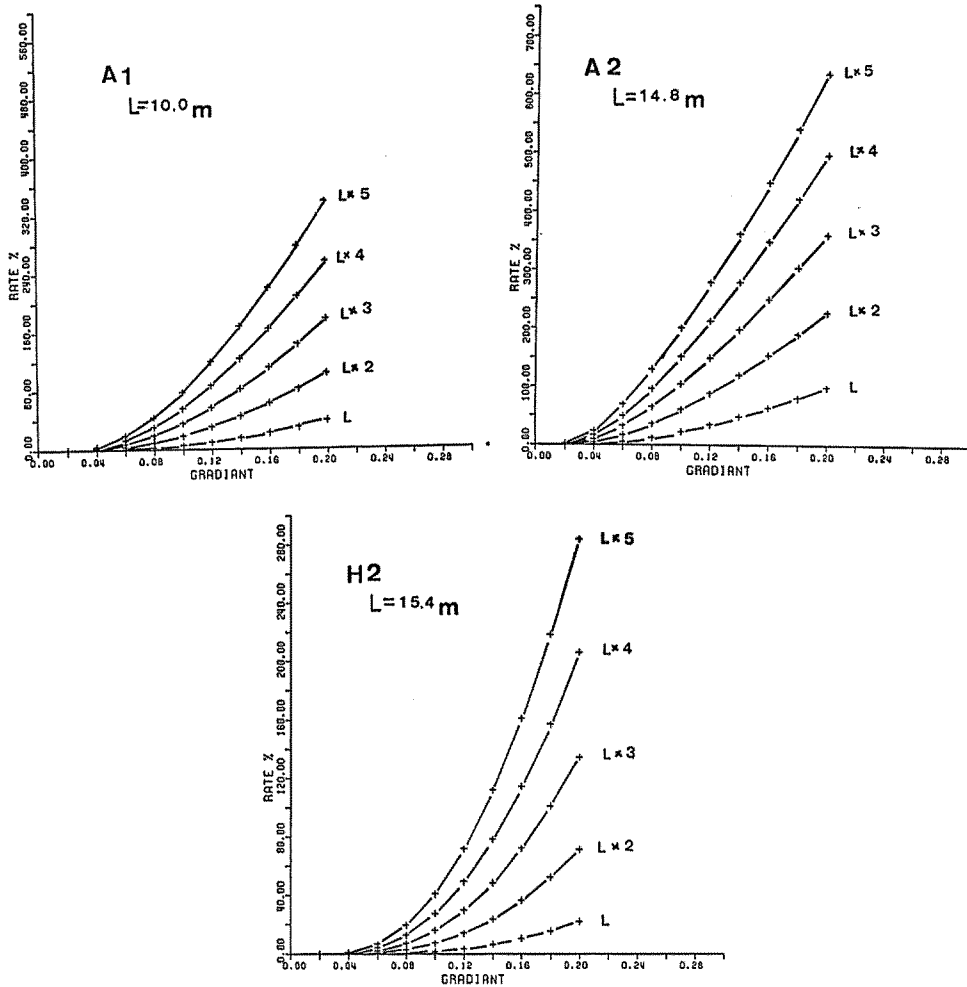


Fig 6. the ratio of calculation value by gradient to observation value on each plot.

いう矛盾した結果となった。このような傾向は、勾配の数が4個と少なく、勾配の幅も少ないことから、すでに述べたように、他の影響因子が大きくきいてきたためと考えられる。また、勾配と土砂流出量との相関係数は0.2と非常に小さかった。そして、前述の10%勾配として計算したときの浸食量の差はこのような事情をより強調した形を示しているともいえる。図6は、以上のべた流下距離別の勾配の変化に伴う、実測流出土砂量に対する割合をパーセントで表示したものである。

3-5 適正横断溝間隔について：前項までに述べたように、過去2~4年間の4ヶ所の固定調査区での数種の観測結果について検討してきたが、ここで、若干、適正横断溝間隔と路面浸食量との関係について検討してみたい。路面横断溝の適正間隔に関しては、欧米では古くから研究が行なわれ発表⁶⁾⁻⁹⁾されている。また、我国でも、最近、こういった研究¹⁰⁾⁻¹²⁾が盛んになってきている。ところで、これらの研究の多くは、実際の林道路面の浸食状態を調査した結果をもとに、ある種の条人因子により分類を行ないながら、適正間隔(L_c)を勾配(S)の関数としてあらわし、係数を求めている。そして、多くの研究では、 $L_c = a'S^{-b'}$ (a' , b' 係数)として L_c を表わしている。我々も、路面に形成されたリルの断面積及び流水長の関係から a' , b' を求め、報告

している。このような、路面の状態の調査から、適正横断溝間隔を求めることは有効であるが、一方、それとは別に、適正間隔は、林道路面から、年間単位面積当り… m^3 以下の浸食量となるような距離とする方法もまた有効であろう。もちろん、このためには、多くの場所で、これら浸食量と、降雨量、流量などの諸量との関係をより多くのデータ集積することにより、明らかにする必要がある。ところで、今まで、我々が調査計測を行なった結果から、実際問題として、どの程度の土砂流出量ならば許容されるのだろうかという疑問が生じる。そこで、欧州で有力な基準とされている Hafner が与えた適正横断溝間隔をとりあげてみる。彼が与えた基準には、良悪 2つの条件についての基準が示されているが、調査区の状態から、条件のよい場合の基準をとりあげ、芦生地区の場合にあてはめてみると、A1 で35m、A2 で50mが適正横断溝の間隔となった。このときの、平均年間浸食深さを(1)式を基にして求めてみると、A1 で2.1mm A2 で1.9mm となり、両方ともほぼ、実際の年平均浸食深さの60%程度となる。そこで、実測流出土砂量の60%のときの流下距離と勾配とを求め、このときの流下距離(L)と勾配(S)との関係式を $L = a''C - b''$ として、 b'' を求めると、A1 で1.7 A2 で1.66を得る。H2についても同様の条件で b'' を求めると1.65であった。ここでは対数グラフ上で、横断溝設置間隔と勾配との関係を見るために重要な b'' についてだけ述べたが、この数字は、既報で我々が報告した、回帰分析結果から求めた b'' の値が1.9~2.2であったこと、また市原の研究によって示されたリル断面形がV字形のときの b'' の値1.5の中間的な値となり、非常にラフな求め方で求めたものではあるが、 b'' で1.6~1.7という数字は、リル断面形が必ずしも単純ではないことからすると、ほぼ妥当な値であると考えてもよいように思われる。この数値の確認ないしは、立証には、多くの勾配や流下距離での土砂流出量の計測などから行なう必要があることは言うまでもない。

4. お わ り に

今報告では、過去2~4年間の、4つの固定調査区で得られた、流出水量、流出土砂量等についてのデータをとりまとめたが、やはり、数量的な確かさを得るためには、一連続降雨について、その降雨中の、路面流下水の水深、水面幅、流速等の変化や、一連続降雨だけの流出土砂量を調査する必要があると思われる。最後に、本研究の調査に当り、林業工学研究室の、学生諸氏ならびに芦生演習林の教職員の皆様にご手伝いただいた事を記し、合せて感謝の意を表します。

文 献

- 1) 酒井, 佐々木, 藤井, 古谷: 林道の路面侵食について(1) 93回日林論集, 539~540 (1982)
- 2) 藤井, 古谷, 酒井, 佐々木: 林道路面におけるリル侵食の形状および形状変化について, 93回日林論集 541~544 (1982)
- 3) 藤井, 古谷, 酒井, 佐々木: 林道路面におけるリル侵食の形状変化(II) 京大演報 131~139 (1982)
- 4) 古谷, 佐々木, 藤井, 酒井: 林道の路面侵食について(III) 93回日林論集, 545~546 (1982)
- 5) 古谷, 佐々木, 藤井, 酒井: 林道の路面侵食について(IV): 京大演報 230~240 (1983)
- 6) TRIMBLE, G. R. and WETZMAN, S: Soil Erosion on Logging Roads: Soil Sci. Soc. Proc., vol 17, 152~154, 1953
- 7) PACKER, P. E: Criteria for Designing and Locating Logging Roads to Control Sediment: Forest Sci, Vol 13, (1), 10~18 (1967)
- 8) HAFNER F and HEDNIGG, W: —: ALL. Forstztg, Vol 70 (11/12), 1959
- 9) KREMPLE, H: —: ALL. Forstztg Vol 69 (17/18) 1958
- 10) 中尾博美: 林道の構造と路面侵食について: 91回日林論 455~456 (1980)
- 11) 市原恒一, 小松正宏, 堀高夫: 横断排水溝の適正間隔について, 84回日林講 448~450, 1971
- 12) 峰松浩彦, 南方康, 西尾邦彦, 伊藤幸也, 神田一宏: 林道における横断排水溝間隔決定式の適用範囲:

Résumé

In order to obtain the optimum informations on the erosion of forest road surface, the mesurment as following were carried out on the four fixed investigation plots; 1) a continuous rain fall, 2) discharge from the road suface in each plots, 3) sediment yield from the road surface.

In this paper, those data obtained on each plots from 1980 to 1983 were discussed.

The results were following.

1) The excess probability on one continuous rain fall and discharge from the road surface wrer given as following function $\exp(-aR+b)$ (a, b ; coefficient, R ; one continuous rain fall) $\exp(-a'Q^b)$ (a', b' ; coefficient, Q , discharge)

2) The cocerning equation with one continuous rain fall and total discharge (Q_s) from the road surface according to one continuous rain fall was as following;

$$Q_s = a'' \cdot R^{-b''} (a'', b''; \text{coefficient})$$

3) Sediment yield from the forest road surface could be estimated with the sediment discharge fomula by Meyer-Peter & Müller, and important coefficient (b'') in the function to calculate the optimum interval between cross drain was discussed. The function is $a'' S^{-b''}$.