

山地流域からの土砂流出に及ぼす

諸因子とくに森林の影響

難 波 宣 士⁽¹⁾

川 口 武 雄⁽²⁾

ま え が き

山地からの土砂流出に対しては、降雨、地形、土壌など、各種の自然的な条件のほか、林相・森林施業などによって異なる森林地被などが複雑に影響している。しかし、これらの影響具合についての調査・研究は、土砂流出の激しな区域あるいは小試験区や模型斜面において、局地的または個々の条件ごとの検討が多く、広範な地域において、しかも、山地流域からの土砂流出に及ぼす主要な因子を同時に考慮して考察が加えられた例はほとんどない。

従来の試験方法も、土砂流出の現象を細部にわたって解析する場合、あるいは、種々の土砂流出防止上の手段の優劣を判別する基準を得ようとする場合などにはきわめて有力な手法である。しかし、近時のごとく、山地からの土砂流出量が、流域全体としていかにになっているか、流域の保全上いかに処置されるべきか、などという広域的な場で問題になることが多くなってくると、上記のごとき個々の区域や個々の因子ごとの細部的な検討とは別に、環境条件がいろいろ組み合わさった実際の多くの流域を対象とし、土砂の流出に関係する主要な因子をなるべく多く、しかも同時に考慮しての検討がとくに必要になってきたといわねばならない。

既往の諸研究成果によれば、山地からの土砂流出には、豪雨による崩壊あるいは土石流などによるものと、平常の雨による表面侵蝕によるものではかなりの違いはあるが、まず基本的に降雨、地形、地質などの自然的な条件が支配し、森林などの地被状況が影響するところは、自然的な条件に比してかなり小さいとも考えられている。しかし、土砂流出に関係する自然要因は、現在のところ人力で大面積にわたってコントロールすることは不可能に近いことを考えると、たとえその影響力は小さくとも、その取り扱いかたのいかんによって人為的にある程度土砂流出をコントロールしうる点で、森林の機能には他の諸因子と違った重要な意味がある。

そこで、ここでは、面積的に相当の“ヒロガリ”をもった流域を単位に観察した場合、従来から明らかにされてきた、地形・降雨などごとの土砂流出の影響、また、林地というわくのなかでの森林の土砂流出防止機能は、総合的にみていかなる実情になっているかを知る目的で検討を行なった。すなわち、全国各地の山地流域からの土砂流出量と、これに影響すると思われる主要な因子との関係式を導き、究極においては、土砂流出の面から判断される危険地域の予想、さらには、その防止のための森林の活用法、すな

(1) 防災部治山科治山第一研究室長

(2) 防災部長

わち、土砂流出防備保安林の配備法や一般の森林の土地保全的な取扱い法の基礎資料を得ようとした。

この種の検討を行なうにあたり、とくに問題になるのは、相当の面積を有する山地流域からの土砂流出量そのものはあくであり、また、これに関係する主要な諸因子の具体的な決定法である。土砂流出量の客観的な表示や、これと関連する各種の因子の表現法などは、その 1 つ 1 つをとりあげても大きな研究課題といわねばならない。今回は、これら個々の研究課題をほりさげるといふ面はさておいて、従来、断片的に唱えられてきた土砂流出量と諸因子との関係の知識を現時点で総合するというたてまえで、主として既存の各種の資料を用いて定量的に解析してみた。

土砂の流出機構について、いまなお多くの未知なところを残している現在、この解析の結果の精度としてはそう高いものではない。しかし、最終的に導かれる結論に対し、ある程度の幅をもって解釈するならば、実際の山地流域からの土砂流出の大様や、その防止機能をもつ森林の活用法についての指針などは類推しうるものと考えている。

稿をおこすにあたり、各種資料の収集や現地調査に多大のご援助を仰いだ、当時の林野庁の岩崎技官、ならびに、千頭・富山両営林署の係官、また、統計的手法にいろいろの助言をいただいた理水研究室の各位に深じんの謝意を表しておく。

I 検 討 の 方 針

本報告では、終局の目標として、各地の山地流域からの土砂流出量と、それに関係する主要な諸因子との関係式を求めることによって、流域の条件を異にする各種の山地流域からの土砂流出量の実態と、各種の因子が土砂流出量に及ぼす相対的な重要度を明らかにしようと考えている。

したがって、ここで用いる資料はすべて量的な表示が可能なものではないし、最初に必要となる資料が相当の大面积の流域からの土砂流出量である。

一般に流出土砂量は流出水量に比し、1 つの流域からの総量を知ることには不安がともなう。なぜならば、測定地点より上流で河道に一時的に堆積する土砂もあれば、治山あるいは砂防の施設などで半永久的に溪床に固定されてしまう土砂もあり、しかもこれらの土砂は、豪雨の有無その他いろいろの偶発的な条件によって支配される確率が高いからである。したがって、流域からの土砂流出量を発電ダムを主体とする河川ダムの堆砂量におきかえた場合、その堆砂量が、雨量、地形、林相などを特定の数値で表示した当該流域からの土砂流出量と十分に対応しうるや否やにはかなりの疑問もある。しかし、現在のところ、数万 ha ないしそれ以上の面積をもった数多くの流域からの土砂流出量を、全国的に同じような精度ではあくするには、発電ダムなどの河川につくられたダムに堆積した土砂量を用いるよりほかに方法はない。また、このダム堆砂量そのものに、山地からの有害な流出土砂量という意味があることを考え、ここでは、山地からの土砂流出量は、発電ダムを主体とする河川のダム背後の貯水池に堆積した土砂量の、流域の単位面積あたりの年間堆砂量によってあらわすこととした。

一般に、1 流域からの土砂流出量に関係する因子としては、流域の地形、地質、土壌、降水量、土地利用状態などがあげられる。ここで、とくに問題にする森林は、このなかの土地利用状態の 1 つにすぎない。したがって、上記のように表現した年間の土砂流出量と森林状況を単純な形で対比させただけでは、森林状況以外の因子に影響される度合いが大きく、かならずしも森林固有の影響をはあくすることができなくなる可能性が高くなる⁶⁾。このため、かりに、流域からの土砂流出量に及ぼす森林の影響を論ずるとし

でも、森林よりも大きく土砂流出に関係する因子の影響はもちろん、森林と同等の作用をもつ因子の影響はできるだけさし引いておき、そのあとで森林の影響について検討することが必要となる。換言すれば、 F という数値によって森林状況を表現した場合、ただ単に、この F と上述した土砂流出量 E との関係を調べるのは不適当で、 E に関係する F 以外の主要な諸因子も同時に考慮した場合における土砂流出量の実情をはあくし、その結果のなかに見いだされる F の意義を考察しなければならない。このことは、他の因子、たとえば、降雨や地形などの因子の影響を考える場合にも同じである。

以上のように考えた場合、いかなる因子が土砂流出量に大きく影響しているか、また、それらの因子をいかに表現して土砂流出量を予想する式のなかにまとめあげるのが大きな課題となる。

一般的にいえば、採用する因子は多ければ多いほど、表現する方法は複雑にすればするほど、実態を説明する点で正確になっていく。しかし、現在のところ、基本となる土砂流出量において、全国的な規模で収集しうる値でなければならないという意味から、発電ダムなど河川ダム背後に堆積した年間の平均土砂量という、いわば概括的な値を用いざるを得ない点を考慮して、ここで考察する因子は、従来からこの種の問題で、ある程度定量的に論議されている、しかも、ダム堆砂量という資料に見合った因子に限ることとし、また、それら因子の表現法もつとめて簡略化することを旨とした。

従来から行なわれてきた個々の因子ごとの検討成果や各地点ごとの検討成果を、一応全国的な規模で論議してみるわけであるが、今後の研究により、考慮すべき因子の追加、あるいは、採用する因子の表現法の正確化などによって、以下にのべる諸因子の影響程度が大幅に修正される部分もでてくることは想像に難くない。しかし、逆の見方をすれば、単純な方法だけによっても見いだしうる傾向は、かなり一般的なものであるともいえるのではなかろうか。

II 従 来 の 研 究 成 果

山地からの土砂流出に関する研究としては、基礎的な土砂の流出機構に関する研究や、局地的な森林状態別の土砂流出量についての研究は多いが、各種の地況条件を同時に考慮した場合の研究はあまり多くない。相当な面積をもった流域を対象として土砂流出量を検討した諸研究のうち、ここで参考となる主要なものを列記すればつぎのごとくである。

蔵重¹⁹⁾は、昭和23年9月のアイオン台風による岩手県下の土砂による埋没面積と地形・地質・森林との関係を調べ、埋没した被害面積は川の長さ（本・支流の計）と直線的な関係があることを確かめてから、川の長さで被害面積を割った数値を被害係数として、以下のことが指摘しうるとしている。すなわち、被害係数 I は、その流域の起伏量 R に比例し、立木比（立木地面積と無立木地面積の合計に対する立木地面積の比） F に反比例するので、

$$I = C \frac{R}{F}$$

で表現しうることとなり、この式中の C が地質によってきまる常数であることを明らかにしている。

田中ら²⁰⁾は、もと日本放送電株式会社所属の32貯水池の堆砂量と集水区域の岩石の分布率、地形の緩急、標高の高低との関係を検討し、堆砂量に対しては、集水区域内の各種岩石の分布率よりも、地形の緩急との標高の高低のほうがより大きな影響力があることを確かめており、その結果、起伏量×高度を地貌係数と名付け、各地質地帯ごとに

$$(\text{堆砂量}) = a \times (\text{地貌係数}) + b$$

の関係式が成立するといっている。

林野庁の治山事業調査によって、昭和31年から昭和33年にかけて新設の治山ダムの堆砂量が全国的に調査された結果¹⁶⁾によれば、流域面積と年間の単位面積あたりの堆砂量の間には負の相関があり、堆砂量は集水面積が大きくなるにしたがって減少することが示されている。

一方、米国においてもこの種の研究が進められており、ANDERSON, H. W. および TROBITZ, H. K. が California 州の25個の流域における10年間の資料を検討した結果によれば、豪雨によって流域下端の貯水池に堆積した土砂量に關係する因子のうち、影響度の高いものとして挙げられるのは、流域面積 A (mile²)、最大24時間雨量 P (in)、荒廃地面積 B (acre/mile²)、火災跡地面積 F (acre/mile²)、森林面積や林相などから算出される地被密度 C (%) であり、この5因子と流出土砂量 E (acre-ft/mile²) との關係は

$$E = 12.93 A^{0.619} P^{1.688} B^{0.191} F^{0.255} C^{-1.816}$$

で導かれることが示されている。

FLAXMAN, E. M. および HOBBA, R. L. は、Columbia 川流域内 38 の貯水池について、おのおのの年間平均堆砂量を検討し³⁾、貯水池の年間平均堆砂量 S (yd³/mile²) は、流域単位面積あたりの最初の貯水池の容積 OC (acre-ft/mile²)、堆砂量の観測年数 Age 、流域面積 DA (acre)、年平均雨量 AP (in)、流域内の加速侵蝕をうけやすい面積 LSE (acre/mile²)——耕地・牧野・林地などの土地利用形態別に、地形・土壌を勘案しておのおのの侵蝕をうけやすい面積を算出し、一定の換算率によって流域ごとに合計したもの——によって

$\log S = 0.9426 + 0.4694 \log OC - 0.7374 \log Age - 0.2059 \log DA + 0.8705 \log AP + 0.2082 \log LSE$
で示せると述べている。

以上が、堰堤などでつくられた貯水池のところにまで流出してきて堆積した土砂量を中心に、これに關係するいくつかの因子の影響状況を考察した主要な研究例である。これらの研究とやや趣を異にするが、堰堤の堆砂現象そのものについて検討されたものも 2, 3 あり、いずれもが、堰堤に堆砂がおこりやすいか否かということに対するもっとも重要な因子の 1 つは、貯水池の面積あるいは容積と集水区域の面積との比であることとなっている。

すなわち、小出¹¹⁾は、中部地方の主要な高堰堤の若干について調査した結果、堰堤堆砂に対しては、貯水池の形状や、地形、さらに土壤母材としての地質、山地の荒廃状況が關係するが、貯水池の面積あるいは容積と集水区域の面積との比がもっとも密接な關係にあって、この比が大きければ堆砂はおこりやすく、小さければおこりにくいと指摘している。

また、定井¹⁷⁾が、砂防ダムの適正規模を検討するため、斐伊川の多くのダム堆砂量を解析した結果も、ダムの堆砂量には、ダムの貯水容量とダムの集水面積との比が大きく關係していることを示している。

上記の各氏の検討の過程には、結論には出てこない因子も多少あるが、叙上の諸例と、資料収集の能否を総合的に勘案して、今回ここで山地からの土砂流出量に關係する因子として検討する必要のあるものは、流域面積、標高、起伏量、地貌係数、貯水容量というおもに地況に關係する因子と、降水量、観測年数、森林状況の 3 因子を加えた 8 因子に限ることとした。

ここで検討する諸因子は、現在容易に量的な表示が行ないいうことを前提として選んだため、大面積をもった流域からの土砂流出量を考えるにあたって、つねにこれだけの因子を考えれば十分であるというのではない。資料がさらに整備され、また、この種の検討がすすんでくれば、一層密接な關係にある因子、

たとえば、荒廃地面積のごとき因子が有効となる場合もでてくるであろうし、表現方法が改善される余地は多分にある。しかし、現状においては、上記のごとき因子に限定したとしても、それらを同時に考慮して検討していけば1地点、1地点ごとに得られていた知識を数歩前進せしめて、現実の大流域における土砂流出量の実態はあくや、その防止機能をもつ森林の意義やその活用法に資しうる点が多いものと考えられる。

III 諸因子の表現法

山地流域からの土砂流出量を従属変量とし、これに対する独立変量として、当該流域における前記の8因子を考え、それらの間に見いだされる関係を1つの式にまとめていくわけであるが、これら各種の変量のはつぎのごとくにして表現することとした。

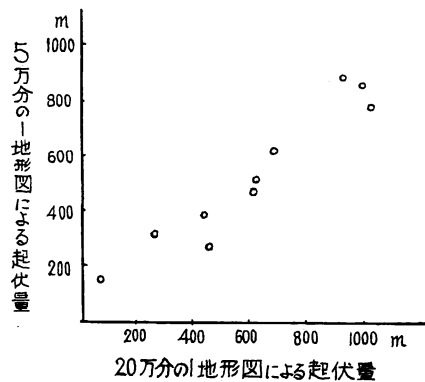
土砂流出量については、さきに述べたごとく、発電ダムを主体とするダムによってつくられた貯水池に年々堆積する土砂量によって表現する。ここで用いるダム堆砂量は、1950年に建設省河川局によって、資源調査会土地部会資料として発表されたもの¹⁰⁾を利用したが、このなかに掲記されている総数116例の堆砂量のうち、つぎの基準によって取捨選択を行なった。

- i) 1水系に近接して多数のダムがある場合には、最上流に位するダムの堆砂量のみを採用する。
- ii) 流域面積が小さいものは、簡単な地形計測の結果では地形の特徴をあらわしにくいので除外する。
今回の地形解析では、20万分の1地形図を用いたため、流域面積の最小を100km²とした。
- iii) 観測年数が短い場合には、ダム建設工事にともなう土量や災害による土量など、特殊な事情による影響によって堆砂量が左右されやすい。必要な年数をあまり長くすると資料としての堆砂例が少なくなるので、必要最低限の観測年数は3年を目途とする。
- iv) 北海道においては、森林状況についての資料が他地方のそれほど整理し得なかったもので、北海道関係分は除外する。

流域面積、観測年数、貯水容量についてはとくに記すべきことはないが、貯水容量は、ダム建設当時の総貯水量を流域面積で除した値によって表現した。これら各項目の数値は、いずれも前述した土地部会資料に掲記されている数字と変わらない。

起伏量の算定には20万分の1地形図の図上に4km×4kmに相当する方眼をきって、各方眼内の最高標高と最低標高の差を求め、それらを算術平均することによって1流域の起伏量を1個の平均起伏量で表現した。地形の緩急を、このようにして算出した起伏量で示すことには問題があり、しかも、1流域を1平均起伏量だけであらわすことにはさらに疑問のところがある。しかし、既往の2,3の調査例⁷⁾⁸⁾によって、この起伏量も、地形の緩急の大様を簡単に示しうることが確かめられているので、田中らの論文にしたがって上記の表現法を採用することとした。

なお、今回は全国的に数多くの大流域について計測する必要上、20万分の1地形図を用いた。広く一般に用いられている5万分の1地形図から得られる起伏量の値と比較するため、今回計測した流域から任意に10個の流域を選び、同一の流域で4km×4kmの方眼について、5万分の1地形図から得られる平均起伏量と、20万分の1地形図から得られる平均起伏量を対比させてみると第1図のごとくなる。絶対値においては、20万分の1地形図による値のほうが2割程度大きい、両者の間にはかなり密接な直線関係が認められる。このことは、一方の値から他方の値を簡単に予想することが可能であることを示し、したが



第1図 地形図の差と起伏量

って、次項でのべるような検討方法にあっては、5万分の1地形図の値を用いたとしても基本的な傾向は変わらず、単に係数の変化だけで対処しうることを意味している。

標高については、起伏量の算定と付随して各方眼内の平均標高が容易に求められるので、起伏量の計測を行なったものと同じ方眼について1つずつの平均標高を求め、それらを流域単位にまとめて1個の平均標高によって表現した。

地貌係数は、上記の起伏量と標高を乗じたものであるため、特に記すべきことはない。

降水量については、土砂流出量に直結しうる降水量としていかなる表現をした降水量をとるべきかについて幾多の問題がある。小区画のプロット試験などでは、降雨総量と降雨強度の両者が山地の土壌侵蝕に関係することが見いだされている⁴⁾。しかし、ここで問題とするような大流域の、しかも、年間の土砂流出量ということになれば、かならずしも上記の降雨総量と降雨強度の両者が関係するとはいいきれず、また、資料の採取という点で降雨強度¹⁵⁾には難点がある。融雪水による土砂流出も考えられるのでここではもっとも単純に平均年降水量をもってあてることとし、気象庁で編さんされた平均年降水量線図⁹⁾にもとづき、流域の位置を勘案して、各流域の平均年降水量を100mm単位に括約して表示することとした。

森林状態は、当該流域の林野面積のうちから無立木地の面積をさしひいた立木地面積を流域面積で除した森林面積率で表現することにしたが、これは以下の理由によったものである。

森林状況を数量的に表示することは、上記いずれの因子にもまして困難なところが多い。かりに、既往、アメリカで試みられた表現法をそのまま採用しようとしても、現在のところわが国にはそれだけの操作を行なえるに足る資料は整っていない。すなわち、ANDERSONらの地被密度を求めるには、各種の土壤条件ごとに、森林被覆の型と年齢に対応した地被密度が算出しうるものが前提となり、また、FLAXMANらの侵蝕をうけやすい面積を求める際にも、各種の土地利用形態別の侵蝕量の具体的はあくが必要となっている。これらの数量的なものは、わが国と違ってアメリカでは、地形あるいは林相条件が単純であったから容易であったのかもしれない。

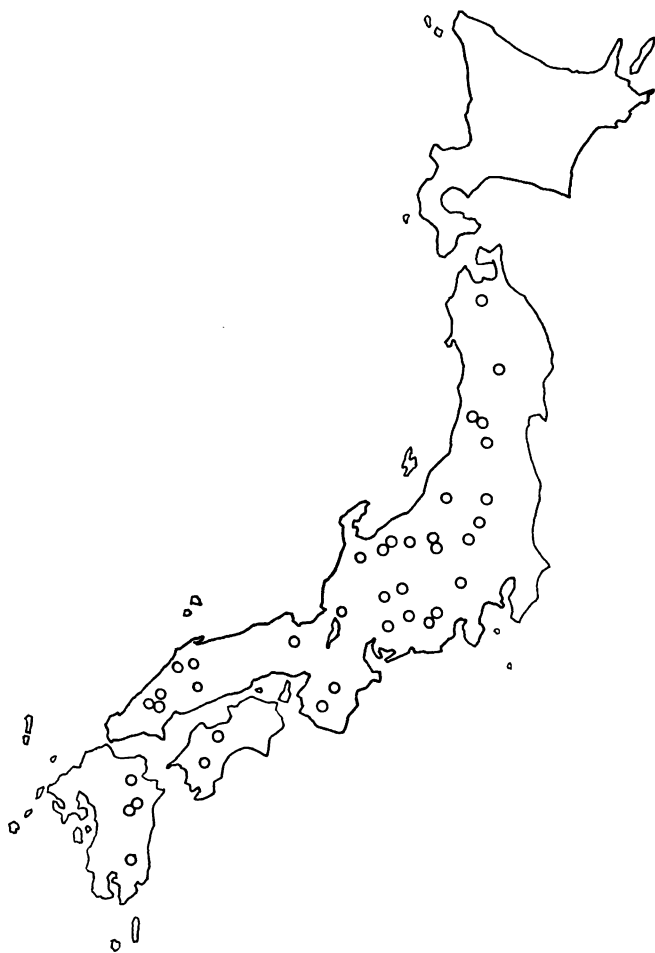
わが国では、侵蝕作用の見地からみた森林状況の定量的な表現法についての研究はなく、現状においては、量的な表現をするには単に森林面積と蓄積が考えられるにすぎない。蓄積を考えると、種類の異なった林木の蓄積を総合するにあたって適切な方法がみつからず、また、今回問題としたような大流域の国有林・民有林を通じて同じ精度の資料を整理することはきわめて困難である。

これらの理由によって、森林状況は、もっとも単純な、森林面積の流域面積に対する比率で表現することにしたわけであるが、森林面積を算出するには、林野面積のなかを立木地面積と無立木地面積に分離しなければならない。この数値の算定は、林野庁で行なわれる森林計画に用いられる森林区単位の結果を利用せざるを得なかったが、この森林区はかならずしも流域と一致しないため、すべてのダム流域ごとの立木地面積が算出しうるとは限らない。したがって、最終的に森林状況を含めた各種の因子と土砂流出量を検討する場合には、森林区の集まりで示される区域とダムの流域があまりにもく違っているところ

は、森林面積率算出不能として検討対象例から除かざるをえず、少なくとも両者の面積割合で過半の部分が重なったものについて検討することとした。

IV 検討結果とその考察

ダムの位置および観測年数によって前掲の土地部会資料のダム堆砂量を選別すると、全国で116例中38例が適格となる（第2図）。この38例については、地形関係の計測および降水量の推定は可能であるため、ダム堆砂量に及ぼす森林以外の諸因子を整理し、それら諸因子がダム堆砂量といかに関係するかを調べることは可能である。しかし、森林因子まで含めて検討しようとするれば、前記の森林面積率の算定方法からいって、この38例のすべてを資料とすることはできず、このなかから森林面積率の算定が不能な数例を除かねばならない。



第2図 資料採取地点の位置

Fig. 2 Location of watersheds that were used in the analysis.

第1表 森林面積率算定の適否

番号	ダム名	流域面積 A km ²	森林区面積 B km ²	B/A	資料の 適否	番号	ダム名	流域面積 A km ²	森林区面積 B km ²	B/A	資料の 適否
1	沖浦川	201	600	2.99	×	20	阿摺	768	758	0.99	○
2	大荒沢	569	597	1.05	○	21	本宮砂防	200	140	0.70	×
3	水ヶ字	204	254	1.25	○	22	祖山	929	870	0.94	○
4	梵人	254	573	2.26	×	23	仙谷	284	256	0.90	○
5	箒川	117	140	1.20	○	24	戸奈瀬	605	563	0.93	○
6	黒部	277	690	2.49	×	25	九五尾	121	150	1.24	○
7	大間	326	404	1.24	○	26	乙味	255	255	1.00	○
8	大津	454	337	0.74	×	27	乙立	276	340	1.23	○
9	大川	459	571	1.24	○	28	斐伊川	267	272	1.02	○
10	豊実	6061	6030	0.99	○	29	豊川	275	328	1.19	○
11	鏡神	373	338	0.91	○	30	常釈	134	105	0.78	○
12	水内	2620	3049	1.16	○	31	王泊	124	173	1.39	×
13	広戸	140	224	1.60	×	32	打梨	144	145	1.01	○
14	泰阜	2963	3060	1.03	○	33	大橋	190	210	1.11	○
15	常盤	554	586	1.06	○	34	橋原第一	149	238	1.60	×
16	西村	162	123	0.76	○	35	篠原	417	480	1.15	○
17	西平	600	586	0.98	○	36	篠屋	434	542	1.25	○
18	大井	537	499	0.93	○	37	星山	770	855	1.11	○
19	大千頭	178	241	1.36	×	38	大淀川第一	643	882	1.37	×

森林面積率を算出するにあたり、その算出の基礎とした森林区ごとの面積と、上記38例の流域面積を表示すると第1表のごとくで、両者のくいちがいがきわめて大きいものがある。表中の流域面積Aと、森林区のアつまり（時には1森林区）で示される面積Bの比率が1よりもあまりかけ離れると、そのBによって森林面積を算出しても、かならずしもそのAの森林面積率とは考えられなくなる懸念が大きいので、B/Aの値が0.75~1.25の間にあるものだけを資料として採用することとした。この0.75、1.25には格別の根拠はないが、この程度の範囲内にあれば、流域面積と森林区からの面積とでは70~80%以上が一致することとなるので、この場合のBについて算出した面積率はほぼAの森林面積率と考えてよからうとの仮定をしたものである。このようにして森林面積率が使用可能の資料をきめると、上記の38例中10例が不適格で、使用可能のものは28例となる。

以下のべるような統計的な処理によって結論を導こうとする場合、資料の数はできるだけ多いほうが望ましい。そこで、森林以外の因子の影響を論ずるには38例の資料を用い、森林因子も含めて検討する場合には、不適格の10例を除いた28例によることとし、各地のダム堆砂量とそれに関係する諸因子の資料を1表に整理すると第2表のごとくである。

第2表の数値を用い、まず、Eとそれに関係すると思われる諸因子との個別的な関連を考察し、つぎに、その結果から大きくEと関係をもつであろうと思われる因子を数個選んで、流域を示す諸因子、とくに森林までも含めた諸因子と山地からの土砂流出量の関係の数式化を考えていく。

1. 諸因子の個別的な影響の概要

Eに及ぼす諸因子の影響度合を調べるには、必ずしも第2表に記した数値そのものについて検討しなければならないわけではなく、対数をとったり、あるいは、2乗、3乗したものについて関連を調べてもさしつかえないわけである。しかし、ここでは、実用上の便宜と、この種の現象に対する理論的な考察の成果がかならずしも特定の式の形をとらなければならないことを示していない点を考え、つとめて簡単に表現することを主旨としたので、諸因子のEに対するウェイトのおよその比較を目標に第2表の数値をそのま

第2表 各流域の諸元 Table 2. Results of sedimentation surveys.

番号 Record number	河川名 Name of river	ダム名 Name of dam	流域km ² あたり 年間堆砂量 Annual sedi- ment volume per sq. km	流域面積 Drainage area	流域km ² あたり 初期貯水容量 Original capacity per sq. km	起伏量 Relief energy	標高 Altitude	地貌係数 Mode of mountain- land	年降水量 Annual precipita- tion	観測年数 Duration of observation	森林面積率 Forest cover ratio
			m ³	km ²	1000m ³	m	m	1000m ²	mm	年	%
1	浅瀬	石川	197	201	16.5	260	660	172	1700	2.9	72
2	瀬	瀬川	397	569	13.3	450	580	261	2200	8.0	92
3	和賀	川	86	204	2.0	550	970	534	2700	17.8	—
4	寒河	江	593	254	4.7	720	890	641	2700	7.3	93
5	赤瀬	川	18	117	0.8	620	1,060	657	1700	5.0	—
6	鬼良	川	212	277	8.5	960	1,490	1,430	1800	36.4	81
7	妻渡	川	25	326	0.6	790	1,010	798	1500	7.5	—
8	相模	川	29	454	0.6	510	1,380	704	1500	16.7	64
9	賀野	川	0	459	0.4	790	1,300	1,027	2200	23.5	75
10	阿賀	川	47	6,061	3.1	490	810	397	1700	16.8	85
11	阿賀	川	356	373	5.0	510	760	388	3000	7.2	67
12	破屋	川	140	2,620	1.6	710	1,290	916	1500	5.9	—
13	千曲	川	97	140	4.5	460	1,280	589	1500	22.3	70
14	天竜	川	224	2,963	3.6	650	1,230	800	1500	13.8	77
15	馬場	川	131	554	2.3	600	1,480	888	2000	7.8	90
16	木馬	川	34	162	1.7	450	980	441	2200	11.0	92
17	掛	川	272	600	7.5	650	730	475	3000	8.1	88
18	寸	川	101	537	1.5	930	1,680	1,566	2200	12.4	—
19	矢	川	1,278	178	27.8	1,000	1,600	1,605	2200	13.7	73
20	常	川	47	768	1.8	320	680	218	1800	14.3	—
21	願寺	川	1,867	200	25.0	1,040	1,630	1,695	3000	11.5	74
22	黒	川	911	929	35.5	790	1,100	869	2500	18.1	45
23	神	川	214	284	2.4	1,030	2,150	2,215	2800	7.9	79
24	山	川	14	605	1.6	450	450	203	1700	24.3	92
25	熊	川	91	121	9.5	860	1,160	998	2200	11.4	91
26	日	川	82	255	1.8	480	730	350	2300	19.4	72
27	神	川	0	276	0.0	380	530	201	1700	37.3	73
28	斐	川	13	267	0.1	370	580	215	1800	5.6	88
29	高	川	2	275	0.0	540	720	389	1800	19.8	79
30	高	川	44	134	106.6	360	580	209	1400	23.3	—
31	太	川	285	124	145.2	250	740	185	2000	12.8	89
32	野	川	43	144	3.2	460	930	428	1800	8.4	88
33	吉	川	88	190	126.5	680	1,040	707	2200	7.8	—
34	湊	川	43	149	0.8	620	840	521	2500	9.0	41
35	分	川	6	417	0.3	540	610	329	1800	24.0	88
36	大	川	533	434	19.1	720	1,000	720	2200	6.2	66
37	耳	川	123	770	3.4	490	770	377	2200	3.3	—
38	ケ	川	20	643	2.9	200	340	68	2600	22.3	—

ま使い、まず、個々の因子と E の関係の概要を個別に検討してみた。

i) 流域面積

一般に、流域面積が広くなるにつれ、山地で侵蝕された土砂量のうち測定地点上流部に堆積してしまう土砂量が多くなるため、流域の下端にまで流出してくる土砂量の割合は減少すると考えられている。

Columbia 川流域での調査結果や、林野庁による調査結果などがこのことを裏書きし、前述したごとく、ダム堆砂量と流域面積の間には有意な負の相関があることが示されている。しかし、土砂の流送様式、たとえば、平常の流水によって流送される場合や、異常の出水によって流送される場合などによって、この関係もそれほど恒常的なものではないらしく、とくに洪水時の流量によって流送される土砂量を対象にすると、溪床自体が洗掘される土砂量の比率をますためか、上記の一般論とは趣を異にし、ANDERSON らの研究結果では、堆砂割合と流域面積の間には、上記の結果とは逆に正の相関が認められている。

今回の資料は、流域が広く全国各地に散在し、しかも、各種の堆砂様式でダム地点に長年にわたって堆積した土砂を平均したものであるため、堆砂量と流域面積の値をプロットすると値はちらばって、この相関係数は -0.0717 となり、有意水準²⁾には遠く及ばない。

流域面積の変域は $117 \sim 6,061 \text{ km}^2$ で、前記、アメリカの2研究における変域 $0.04 \sim 16.8 \text{ km}^2$; $0.26 \sim 523 \text{ km}^2$ 、治山調査における変域 $1.06 \sim 977.5 \text{ ha}$ に比して相当の違いのあることも、 E と A の関係をあいまいなものとしている一因であろう。ともあれ、大面積流域からの E はつねに少ないにもかかわらず、小面積流域からの E のなかにも少ない例が混在していることが、この相関係数を無意なものとしている一因と思われる。

したがって、流域面積は、面積規模が比較的にそろった場合で、しかも、流出土砂の流出形式がおおよそ相似しているときには考慮しなければならない因子かもしれないが、今回のごとく、土砂の流出形式や、流域面積の広狭などが千差万別の場合には、それほど明りょうに E に影響を与える因子と考えるくてよさそうである。

ii) 初期貯水容量

この因子 OC は最近かなり注目されはじめた因子であり、この値が大きければ上流から流送されてきた土砂が当該貯水池に堆積しやすく、逆に、この値が小さければ、上流で生産された土砂量のうち、貯水池に堆積することなく下流へ流出してしまうというのがこの因子に対する基本的な考え方である。

38例の資料について調べると OC の値は乙立ダムの約 11 m^3 を最小とし、王泊ダムの 14 万 5 千 m^3 を最大としているが、大部分のダムが数千 m^3 以下の値となっていて、 OC が数万 m^3 を境として、それ以上のダムとそれ以下のダムでは別個の傾向があるようにうかがえる。このため、全体としての相関係数が $+0.1430$ となって、危険率 10% の有意水準 0.2746 には及ばない。

今回の場合には、この OC も前記の流域面積にはまさるとしても、とくに重要な因子と判断しなくてよいようであるが、 OC の値が 10 万 m^3 をこす帝釈・王泊・大橋の3ダムを除くとかなり密接な直線関係が認められることから考えると、ダムの規模がそろった地域についての検討、または、今回におけるよりも細部にわたる検討を行なう場合などには、とくに考慮するに値する因子と思われる。

iii) 起伏量

山地における土砂流出の問題に対しては従来のほとんどすべての報告が、傾斜の有意性を指摘している。

今回の資料について、 E と起伏量 R の関係を図示すれば、第3図のごとくなり、両者の相関係数を算出すると $+0.5118$ となる。危険率1%の有意水準 0.4182 に比しても有意であることから考えると、次節で述べる E に及ぼす諸因子の複合した影響を論ずるには、当然この因子もあわせ考慮していかなければならないものと思われる。

なお、小区画の試験区における実験においては、侵蝕量 E と傾斜 S の間には

$$E = a S^b$$

a, b 常数

の関係があると報じた論文¹⁹⁾が多く、 b の値が1より小さいことから、“ある傾斜”までは、 E は S に比例して直線的に増加するものといわれている。実際の山岳地域での調査・観察などによれば、この“ある傾斜”とは、ほぼ $50 \sim 60^\circ$ と予想されるようになっている。

今回のごとく、大面積の流域の平均的な傾斜となれば、あまり極端に急斜という値はでてこないで、前記のごとく、 E と R が単純な比例関係になったものと判断される。

iv) 標高

集水区域の平均標高 H が高いほど E は増加するという説がある。今回の資料について、 E と H を図示してみるとある程度の直線関係がうかがわれ、その相関係数は $+0.3688$ である。この場合の有意水準は、危険率5%で 0.3246 、同2%で 0.3810 であることから判断すれば、 H は E に対してとくに関係が深いとはいえないとしても、ある程度の関連性をもった因子であると思われる。

一般に山岳地帯は平地より雨が多く、わが国の雨量観測値では、山地では海拔高とともに雨量が増加している例を示している場合が多い。もっとも、細部についてみると、山頂付近はふたたび降水量がわずかながら減少するようであるが、大局的にみれば、降水量は標高とともに増加すると考えられている。また、標高が高くなれば地形が山岳状を呈し、山腹傾斜と正の相関があるとも予想しうる。

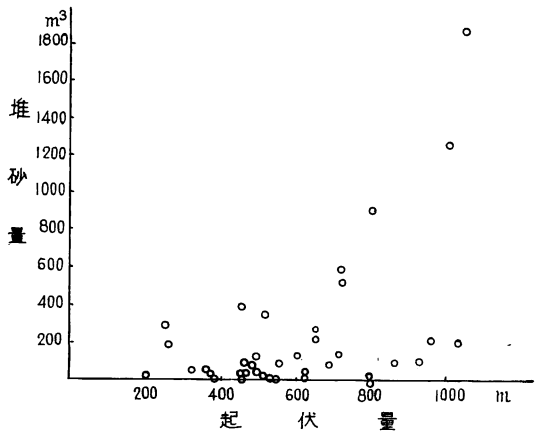
このように考えると、 H が E に関係するのは、 H が直接 E に関係するというよりも、 H は雨量あるいは傾斜を介して E に関係しているのではないかと思われる。

v) 地貌係数

集水区域の山岳が急峻であるほど、また、標高が高いほどダム堆砂量が増加すると予想されることから、起伏量と標高の両者を乗じた RH を地貌係数と名づけ、 E と RH の相関を認めた論文²⁰⁾がある。

今回の資料によって、すでに E と R 、および、 E と H の間にかなりの相関関係が認められているので、 E と RH の間にはかなり高い相関があることは想像に難くない。38例の資料についてこの相関係数を計算してみると $+0.4828$ となり、ほぼ E と R の相関度合と匹敵している。

山地からの土砂流出に対して、既往の検討のごとく、この RH がある程度の関連をもっているとの予想は成立する。しかし、ここでは、土砂流出に関係する主要な因子をなるべく数少なく選出し、選ばれた因子と土砂流出の関係式をなるべく簡単な形で導く前提として検討しているため、この RH が、 E と R 、ある



第3図 堆砂量と起伏量

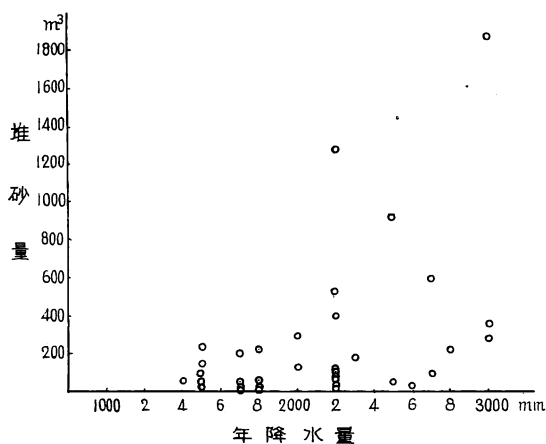
いは、 E と H の相関度合とあまり変わらないことは、この因子の重要性をやや小さくしているものと考えられる。なお、この点についての論議は、次項においてふたたびふれることとする。

vi) 年降水量

山腹面からの土砂生産、あるいは、溪床堆積物の流下は、基本的に流水によるものが大部分である以上、その流水の根源である降水量が土砂流出に大きな影響をもつであろうことは容易に想像しうる。

今回の例では、 E と年降水量 P の関係は第4図のごとくになり、その相関係数は $+0.4668$ となる。危険率1%の有意水準に比しても有意であることから考えると、たとえば、降水量を単純に年降水量で表現しても、この P は E に対して一応の関連をもっていると考えられる。

降水量のなかには降雪量も包含されており、雨水の形で降る場合と、雪の形で降る場合とでは土砂の流出への影響状況が異なる点に着目すれば、何らかの方法で降水量のなかの雨と雪を分離することが望ましい。しかし、山腹面の土砂流出や、溪床堆積物の下流への流出は融雪期にも多く、また、ここで用いた



第4図 堆砂量と年降水量

今回の資料にしたような大規模のダムについて考えると、建設初期にはいちじるしく流況に変化を与えるため、観測年数が少ない間は一般に年間堆砂量は大きくなり、観測年数がながくなると比較的少ない年間堆砂量を示すとも考えられる。また、災害などによって荒廃地が新生した場合などについては、荒廃面が新しいうちは土砂の流出量が多く、その後しだいに土砂流出が減少するとの予想からも、この観測年数 Y と E の間に負の相関があるのではないと思われる。

今回の資料では、 E と Y の各数値をプロットすると雑然と分布し、その相関係数は -0.1472 となって、 Y は E ととくに密接に関係する因子とは考えられない。

発電ダムなどがつくられる流域は一般に土砂流出の面では安定した流域で、いわゆる荒廃河川は除かれているため流出土砂量の経年的変化はあまり考えられず、また、全国各地というような広汎な地域からの資料では、各ダム流域の諸条件の差が不規則である関係などもあって、観測年数がながくなればなるほど年間の平均堆砂量は減少するというような単純な関係は認められなくなったものと思われる。

viii) 森林面積率

既往各種の研究成果によれば、山腹面における土砂の生産は、地表面の被覆物とくに直接地表面を被覆する地被物の面積割合が増大すればするほど指数関係で減少することが報ぜられており¹⁹⁾、また、溪床に

E の値は、長年の間にダム背後の貯水池に堆積した土砂量の年平均値という、概括的な土砂流出量であるため、上記のごとく簡単な年降水量を用いても、この P と E の間に有意な関係が見いだされたものと思われる。

vii) 観測年数

Columbia 川での測定結果によれば、年数以外の因子に変化がないと仮定すると、たとえば25年間の測定によって得られるダムの堆砂割合は、4年間の測定によって得られた堆砂割合の1/4になると報じ、両者の間に明らかな負の相関が成り立つといっている。

堆積している土砂の下流への流出も、とくに問題となる洪水流量を含めた豊水流量が有林地流域より無林地流域において多くなる結果から判断して、森林面積率が大きくなるほど土砂の流下は少なくなるであろうと一般的に想像される。

今回の資料によって、堆砂量と森林状況を示す森林面積率とのおよその関係を見るため、*E*と*F*の両者の値を図示すれば第5図のごとく、各点は不規則にばらついてその相関係数はほぼ0となり、森林面積が増大すれば山地からの土砂流出が減少するであろうという予想はなりたない。しかし、しさいにみると、*F*の増大とともに*E*が減少するであろうという傾向をとくに乱しているものは、川茂・仙人・谷篠原という、図中のもっとも左側にプロットされた3者(◎印)であると思われる。以下、この特異なる地点について若干の考察を加えてみる。

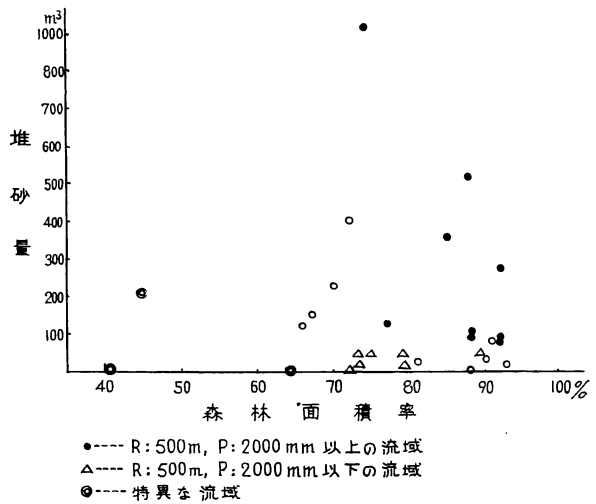
川茂ダムは、遠く富士山頂に水源をもち、北富士一帯を流域として(写真1)、わずかに下流で笹子川と合流して相模川となる大月～谷村間に位置している。流域

内には富士高原が広く分布し、山中湖・河口湖という2つの大きな湖もあって森林面積率はかなり少ない。土砂の流出程度としては、火山灰からなりたつ土砂の移動がはげしいところと思われるが、いわゆる富士のすそ野に堆積してしまうものも多く、また、湖水が大きなダム作用をして、そこから下流への土砂流出を防止している働きがとくに顕著なことも見のがせない。

これらの諸点と、河川の流水が地下に伏流することがはなはだしいため土砂の流出が減少させられる傾向などから判断すれば、流域からの土砂流出を防止するであろう地味状況を、簡単に流域内に立木地の面積割合だけで表現したのでは、他の流域に比してとくに変わった結果がでてくることは十分に考えられる場所ということができる。

仙人谷ダムは、北アルプスの主峰、槍ヶ岳に隣接する黒部五郎岳を水源地にもつ黒部川の上流部に位している。流域面積約2万ha中、標高2,000mを越す急峻な山岳地域が過半を占め、森林限界以上の区域(写真2)も相当合まれている。森林面積率としては45%となつて、28例中もっとも立木地面積が少ない流域の1つにあげられる。

北アルプス連峰をその流域内にもつ仙人谷流域では、無立木地といつても土砂生産の様相が全く異なる



第5図 堆砂量と森林面積率



写真1. 川茂ダム流域



写真 2. 仙人谷ダム流域

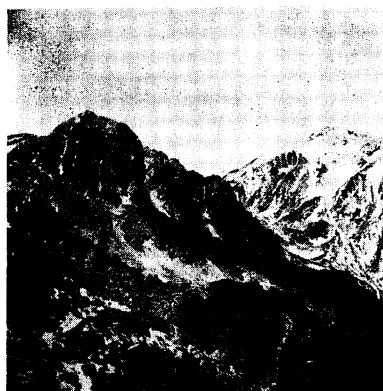


写真 3. 篠原ダム流域

る。露岩地や岩屑地が多く、このことが、森林面積率の少ない割に土砂流出量が多くない主因と思われ、森林限界以上の区域を含むような流域は、前記の川茂ダム流域と同じく、その流域の地被状況の表現に特殊の考慮を払わなければならないところと思われる。

篠原ダムの流域には、九州中央部の阿蘇～九重の広大な草地在く分布する(写真 3)。森林面積率の算定の際には草地は無立木地にはいるため、この流域の F は 41% となって 28 例中最小である。この草地帯は全国的にみてもきわめて優良な草生地帯で、地表の被覆状況としては完全に近く、土壌の表面侵蝕に対しては、林地に優るとも劣らぬ防止機能をもっていると考えてさしつかえない。こう考えれば、 F が小さくても、そこからの土砂流出が少なくなるのは当然で、草生地を主体とする流域では、土砂流出を防ぐ因子としての地被状況を表現する場合、単に立木地の面積割合を用いるのではなく、優良な草地は立木地と同じに扱うとか、地被密度の合計を用いていくなど、さらに詳しい表現法で処理していかなければならないものと思われる。

以上、第 5 図において特異な値を示す 3 地点について簡単な考察を加えてみた。そのいずれもが、草地が多い、露岩地が多い、大きな湖水があるなど、平均的なわが国の山岳流域から判断すると特殊な流域であることが共通的に指摘しうる。これらの地点では、土砂流出の実態を説明するにあたり、土砂流出を起こさせる原因としては、地形・降雨などだけでは不らず、土質というような因子をあわせて考える必要が認められ、一方の、土砂流出を防ぐほうの因子としては、森林の面積割合だけでは不足で、草地や湖沼の土砂流出防止機能を加えることが必要であろう。したがって、全国のあらゆる条件の流域までも対象にして、そこからの土砂流出現象を具体的に数式化するとすると、ここで用いた森林面積率だけによって地被状況を表現することは不備という。

これらの 3 地点を、特殊な流域という理由で除外すると、全体としてはまだかなり値はバラついている。しかし、起伏量・降水量ともに大きな流域(第 5 図中の●印の点)、反対に、起伏量、降水量ともに少ない流域(第 5 図中の△印の点)をそれぞれ区分して観察してみると、その両系統の流域の中間に、起伏量・降水量のいずれかが大きな流域がはいり、漠然とながら、各系統ごとにみると△印の流域は変化が少ないとはいえ、ほかの流域においては森林面積率の増大が堆砂量の減少を意味するよううかがえる。

このことは、地被物として森林に着目し、しかも、その量的な表現法としてもっとも単純な立木地の面積割合を採用しても、草地・露岩地・湖沼などが多い流域では表現法の不完全さが表面化してくるが、一

般の流域では、現在のところ、大面積の山地流域を対象として森林の土砂流出防止機能を論ずるにはかなりの価値をもっと考えてよいのではなかろうか。

今回の検討では、この種の研究の第一歩として、全国的にみて一般的な流域を対象とし、当該流域からの土砂流出量を、なるべく数少ない、しかも簡単に表現した因子で解析してみ、そこに見いだされる土砂流出の基礎的な実態をはあくしようとしている。そこで、特殊な地域までを含めた、さらに具体的な土砂流出機構を検討することは次の機会にゆずるため、次節以降の検討に際しては、ここで特異な値を示した3流域の資料は除外し、残余の25例の森林面積率を用いて考察をすすめていくこととした。

以上、個々の因子ごとに、 E との関連を検討してきたが、冒頭に記したごとく、山地流域からの土砂流出に対しては各種の因子が種々組み合いながら影響を与えているため、個別因子と E とをプロットした図からよみとれる傾向は、いわば見かけの部分も多く、これだけの操作で、 E に対する各種因子の影響度を云々することはできない。ただ、各因子と E との間に直線的な回帰関係の認められる因子も2、3あげられている点や、各因子のごく大まかな傾向を念頭において、本研究の主題である、各種因子と E の複合的な関係を述べていく。

2. 主要因子の選出

本検討においては、最終的に、山地からの土砂流出量 E と、それに関係する多くの因子の間にみられる

$$E=f(A, OC, R, \dots F)$$

の関係式を求めることをねらっている。この場合、終局として式のなかに含ませるべき因子は、 E に関係する度合の大きいものをなるべく多数とり入れるほうが統計的には好ましいといえる。しかし、統計学的に、厳密に個々の因子の E に関係する相対的な度合を計算することは因子の数がふえればふえるほど幾何級数的に困難さをましてくる。また、直線回帰を想定して多重回帰係数の値の大小という点だけから判断しても、必ずしも E と関係すると思われる因子だけでなく、独立変量としての他の因子と特殊な関係にある因子を採用したほうが有効となる場合が考えられる。いずれにしても、多数の因子の採用にあっては、何回となく複雑な計算の試行が必要となる。

一方、結果的に得られる関係式を用いて、調査されていない流域からの土砂流出の大様を予測するという見地にたてば、この関係式のなかの独立変数の数は少なければ少ないほど便利であり、また、この式から推定する値に対する誤差も、全体として相似た関連度合ならば独立変数の数が少ないほど小さいといえる。

今回の各因子の表現法はつとめて簡単にしてあることを考慮し、ここでは統計学的に多少の不完全さはあるとしても

i) 採用する因子の間に密接な関係があるものは、1つの因子によってそれと密接な関係にある他の因子の影響を表現することが可能であるという考え方のもとに、互いに相関連する因子は、そのなかでもっとも妥当と思われる1つの因子を独立変量と考える。

ii) 採用する因子の数を多くしたほうが、また、表現する方法を複雑にしたほうが E を説明する点で正確になるであろうが、結果の利用という面を重視して、独立変数の数としては3種類程度にとどめ、直線回帰を想定して解析していく。

iii) 独立変量の形としてはつとめて簡単にするため、因子の取捨にあたっての計算には、前項で用いた数値を変形することなく、そのままの値を用いる。

の方針により、既述の各種因子のなかから、最終的な関係式に用いるべき主要な因子を選別する。

前項で種々考察した各種因子相互間の関連性をみるため、おのおのの因子間の相関係数を算出すると第3表のごとくである。

第3表 各因子間の相関係数

<i>F</i>	×							
<i>Y</i>	−0.0568	×						
<i>RH</i>	0.1886	−0.0674	×					
<i>H</i>	0.1522	−0.1200	0.9424	×				
<i>P</i>	0.4303	−0.2441	0.2799	0.1434	×			
<i>R</i>	0.2772	−0.0746	0.9218	0.8114	0.3245	×		
<i>OC</i>	0.0674	−0.0259	−0.0955	−0.0890	−0.0459	−0.1328	×	
<i>A</i>	−0.4172	−0.0009	−0.0446	−0.0121	−0.1301	−0.0330	−0.1329	×
	<i>F</i>	<i>Y</i>	<i>RH</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>OC</i>	<i>A</i>

標本数は、*F*が関係した場合は25、その他の場合は38で、自由度35の相関係数の有意水準は危険率0.1%で0.5189、自由度25の場合のそれは0.5974となっている。これらの値から判断すると、*RH*は*R*あるいは*H*ときわめて密接な関係にあると思われ、さらに、*R*と*H*の間にも、とくに密接な関係があるといえるようである。

すなわち、今回の資料では、標高の高い流域では平均的にみて、地形は山岳状となって流域の傾斜は急になると認められ、また、この両者にきわめて高い相関があるため、標高と起伏量を乗じた地貌係数は、その個々の因子である標高や起伏量のいずれとも、ほぼ完全に近い相関になったものと思われる。したがって、起伏量・標高・地貌係数の3者は、いずれか1つの因子によって他の因子の影響を表現することが可能となり、前記1)の選定方針にしたがって、以下の検討には、算出の容易さと、既往の研究成果との結びつきなどを考慮して起伏量を採用することとする。

残余の因子は、相互間に関係ぶかい因子はないので、標高・地貌係数を除いた諸因子のなかから2因子ずつを選び、堆砂量*E*との重相関係数を算出した。その結果は第4表のごとくである。

第4表 *E*との重相関係数

<i>F</i>	×						
<i>Y</i>	0.2054	×					
<i>P</i>	0.6048	0.4629	×				
<i>R</i>	0.4263	0.5134	0.6025	×			
<i>OC</i>	0.1762	0.2026	0.4845	0.5543	×		
<i>A</i>	0.1604	0.1640	0.4669	0.5047	0.1527	×	
	<i>F</i>	<i>Y</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>OC</i>	<i>A</i>	

第4表の数値によれば、*E*との重相関係数が危険率0.1%の有意水準をこえるのは、*R*と*P*、および、*R*と*OC*を用いた場合であり、同じく危険率1%の有意水準をこえるのは、上記の組み合わせのほかに、*P*と*F*、*P*と*Y*、*P*と*OC*、*P*と*A*、および、*R*と*Y*、*R*と*A*を用いた場合となっている。いずれの場合にも、

2 因子のどちらかに R または P がはいっており、しかも、 R と P を用いて E との重相関係数を求めた場合がもっとも高い値を示している。 R または P を除外して、残余の 4 因子のなかから 2 因子を選んだのでは、 E との相関はいずれもきわめて小さく、もっとも重相関係数の値が高くて OC と Y あるいは F と Y を用いた場合の 0.2 前後でしかない。

これらの点から考えると、前項でのべた各種の諸因子のうち、まずはじめに、 E との関連において重要な意味をもつのは R と P であると思われる。

R と P の有意性は以上のごとくであるが、さらにもう 1 種類の因子を追加することを考えてみる。

R と P に A を加え、この 3 因子と E の重相関係数は 0.6586、 R と P に OC を加え、この 3 因子と E の重相関係数は 0.6030 となる。 $r_{E,RP}$ が 0.6025 であり、しかも、今回の係数の有意水準は自由度の減少のため 2 因子の場合の有意水準よりわずかながら高くなる点を考えると、これらの重相関係数は因子の数を 1 つましてもあまり高まっているとはいえない。

これに比すると、 R と P に F を加えて E との重相関係数を求めると 0.7056 となり、きわめて高いとはいえないとしても、危険率 0.1% の有意水準をこえており、 R と P だけを用いた場合の係数より一段と高くなっていることが注目される。

この相関係数からみると、さらにこの相関度合を高めるよう、因子の数をさらに追加させることが必要のようにも思えるが、前記の選出の方針から考えると、今回の検討の趣旨からいって、この R と P と F の 3 因子を選んで E との関係式を求めることで一応満足してよいとい得よう。

3. 主要因子とくに森林の複合的な影響

これまでの検討により、大面積にわたる山地流域からの土砂流出量 E は、第 5 図からもおよそ予想されたが、年降水量 P と起伏量 R と森林面積率 F の 3 者によって表現することが、他のいかなる 3 因子を用いて表現するより有効であると判断された。山砂からの土地流出は当然多数の条件の複雑な組合せによっておこるものでありながら、このなかから 3 因子だけを選び、しかもそれらの因子をきわめて簡単な表現法で数値化したわけであるから、この 3 因子を独立変量として、 E との関係式を求めるには多少の不安はある。

しかし、実験的な、あるいは理論的な解析結果ではなく、今回のごとく自然現象そのものを相手とした場合は、0.7 程度の相関度合にもかなりの意義があると考えられ、今回の 25 例の資料の範囲でこの 4 因子間の関係式を導くこととつぎのごとくである。

$$E = 0.474 R + 0.292 P - 0.118 F + 2.452 \dots\dots\dots(1)$$

$$E : \text{m}^3/\text{ha}, \quad R : 100\text{m}$$

$$P : 100\text{mm}, \quad F : \%$$

この式による推定値の標準誤差は ± 1.585 であり、各変数の係数の標準誤差は、 R に対して ± 0.065 、 P に対して ± 0.081 、 F に対して ± 0.041 となる。

標準誤差の大きさからいって、この式による推定値はあまり精度が高いとはいえないとしても、 R および P が増大すれば、つまり、地形が急になればなるほど、また、雨量が多くなればなるほど山地からの土砂流出はふえるが、 F の符号だけは負となって、大面積の山地流域を考えてみても、森林面積率が増大すればするほどダムに堆砂する土砂流出量は減少するという傾向が認められる。このことは、従来、比較的

小さな区域で森林地被の土壌侵蝕防止機能が立証されていたのと違って、数万 ha 以上の大流域においても、森林がよく土砂流出の防止に貢献していることを示したものであり、山地からの土砂流出に対し、森林のこの機能を積極的に活用するための有力な1根拠となりうる。

今回用いた資料を一括して一つの式にまとめるのではなく、たとえ、 R と P と F によって E を予測するとしても、流域面積の広狭、初期貯水容量の大小、さらに、起伏量の大小や降水量の多寡によってこの資料を分類し、そのおのおのの分類に属する流域ごとに式を組み立てれば、(1)式よりかなり相関の高い式の得られるのは当然である。第5図から考えただけでも、この25例をたとえば、多雨急峻な流域、寡雨平坦な流域、両者の中間的な流域に分け、そのおのおのについて別個の式を作れば(1)式よりかなり精度の高い式は求められるであろうし、森林の影響もさらに明りょうとなるう。

ここで導いた式を用いて、土砂流出防備林の必要面積とか、ある流域からの現実的な土砂流出量の予測など、絶対値の利用を考えるならば、可能なかぎり地域区分を行ない、それぞれに求められる式を使うことが望ましい。しかし、i) 地域区分する具体的な分類基準が明確に決めにくい、ii) 資料全体の数が少ない、iii) R と P による区分ならば、ある程度この(1)式で基本的なことは類推しうる、iv) この(1)式でも一応の相関度合の有意水準をこしている、などの理由から、今回の検討では地域分類することをやめ、 E に対する全体としての R や P や F の意義を考察することにとどめておく。

(1)式において、独立変量 R 、 P 、 F の E に対する相対的な重要さは、多重線形回帰における回帰平面の方程式

$$-\frac{R_{11}}{S_1} x'_1 + \frac{R_{12}}{S_2} x_2 + \dots + \frac{R_{1k}}{S_k} x_k = 0$$

ただし、

$$\begin{aligned} x'_1 &= x'_1 - \bar{x}_1 \\ x_2 &= x_2 - \bar{x}_2 \\ &\vdots \end{aligned} \quad R = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{kk} \end{vmatrix}$$

$\bar{X}$ ……算術平均

r ……単相関係数

S ……標準偏差

X_i ……測定値

の R_{1i} によって計られる¹⁸⁾。今回の資料では $R_{ER}=0.279$ 、 $R_{EP}=-0.464$ 、 $R_{EF}=-0.376$ となり、起伏量 R の重要度を1とすれば、降水量 P の重要さは約1.7、森林面積率 F の重要さは約1.3となる。この程度の差では、3者にそれほど差があるとはいえないとしても、少なくとも、一般にいわれているごとく、森林因子は他の自然的な要因である地形や降雨などの諸因子に比して、つねに影響が劣っているものではなく、相似たウェイトで森林状況も山地からの土砂流出に関連をもっている場合が多く、一般の山地流域からの土砂流出を論議するには、少なくとも地形、雨、森林の3因子は考慮していかなければならないことが指摘しうる。

R がますます、また、 P がますます E は増大し、逆に F がますます E が減少することから、 RP/F なる因子を考え、これと E との相関係数を求めると+0.6690となる。自由度20の危険率0.1%の有意水準でも0.6524であり、また、この値はこれまでに算出した重相関係数のうちもっとも高い0.7056について

高いものであることから考えると、 E と RP/F の関係式を求めるのもあながち無意ではなからう。(1)式の場合と同じ単位で計算すると

$$E = 2.743 \times RP/F - 2.409 \dots\dots\dots(2)$$

なる式が導かれる。この式は、 E と $R \cdot P \cdot F$ の関係の大様を簡単な図表で示すのに役立ち、 $R \cdot P$ が与えられた特定の面積流域において、土砂流出量を所望の値にするための F の必要量、あるいは、 F の変化に應ずる E の変化量の概略の目安を知るのに便である。

V 検討結果の利用とその問題点

今回の検討は、前項の(1)または(2)式に要約されるが、この(1)あるいは(2)式を利用して土砂流出の量的な問題を論議するにあたっては、いかなる流域についてあてはめるべきかを十分考慮することが必要である。ここでは、すべて1万 ha 以上の面積の流域の資料を対象としたため、面積の広狭による差異が明らかとならなかった。しかし、既往各種の、ここで考えた流域より小さい、数十ないし数百 ha の流域からの土砂流出量は、ここで得られた土砂流出量より一般にかなり大きい。したがって、ここで得られた式によって土砂流出量の略算を行なう場合には、露岩地や草生地などを含んだ特殊地域で使うべきでないのはもちろん、面積規模において、少なくとも数千 ha 以上の流域について利用するよう心掛けなければならない。

わが国の一般的な面積の山地流域においては、地形が急、降雨が大、森林が少ないところにおいて土砂流出が多いことが明らかであるため、土砂流出の危険地域の大局的な判定はこの式の利用によって可能である。この際、地形や降雨量は人為で変化させ得ないことを考えると、積極的にこの土砂流出量の防止を計るには森林の機能の活用をはかるより方法はない。

(1)式の形からは、 F の影響は R あるいは P のいかにかわらず同じ割合で E にあらわれることとなり、森林面積率の10%の増加は E で約 $1 \text{ m}^3/\text{ha}$ の減少をもたらすことを示している。また、(2)式によって考えると、

$$(E+2.409) F=2.743 RP$$

と変形でき、 R が一定ならば P が大きいほど、 P が一定ならば R が大きいほど右辺が大きな値となるため、 F の変化が大きく E に影響することとなる。

したがって、有限の森林を流域内に配置して、その流出土砂防止機能を有効に活用することを期待するならば、 R あるいは P が大きいところに配するのが得策と思われ、逆に、 P あるいは R が小さくてあまり土砂流出の危険が少ない流域では、森林面積の増大とか、森林の保全的な取扱いに対する規制などの処置はそれほど考えなくてもよいと考えられる。

土砂流出の危険地域の判定、その安定化のための森林の活用など、今回の検討で一応基本的な指針は得られたが、この結果の精度からも判るように、相似た地形や降雨条件をもった流域間の土砂流出量の比較、さらに、具体的に、特定流域内に配すべき土砂流出防備保安林の位置、面積の決定などに対してはまだ検討をすすめるべき余地はかなり残っている。全国的な見地からこの種の検討を進めていこうとすると、現在のところ、資料収集および諸因子の定量的な表現の点で難が多いと思われるので、今後は、地質条件や気象条件などを勘案して全国を数地域に区分し、区分された地域ごとに、考慮すべき因子の種類をふやす、表現法を詳細にする、などの考え方をとり入れて、今回の検討結果を発展させていくことが効果

的と思われる。

VI 要 約

1) 気象、地形などの諸条件が種々組み合わされた実際の山地流域からの土砂流出に対し、森林を含めた各種の因子がいかなる影響をもつかを定量的に考察するため、全国各地の発電ダムを主体とする河川ダム背後の貯水池に堆積する土砂量と、それに関係する各種因子の既存資料を中心に検討した。

2) 流出土砂量を予測するには、考慮する因子の数をませばますほど、また、表現方法としては複雑にすればするほど予測の精度は高まる。今回のとりまとめにあたっては、予測の精度の向上を第一にするのではなく、実用上の観点から、従来、この種の研究で論議された各種の因子をなるべく簡単に表現し、そのなかから主要なものを選出して山地からの土砂流出に及ぼす諸因子の基本的影響を見いだすよう心がけた。

3) 堆砂量に影響をもつ主要の因子として検討したものは、流域の面積、ダム建設時の貯水容量、起伏量、標高、地貌係数、年降水量、観測年数、森林面積率である。

4) ここで用いたダム堆砂量は、建設省河川局によって発表された全国各地の資料のなかから、1水系においては最上流部の、流域面積 100km^2 以上で3年間以上調べられた、北海道以外のところのものを、年間の単位面積あたりの土砂量であらわした。

5) 各因子の表現法のうち、各種の方法が考えられる因子は、つぎのように表現した。

起伏量は、20万分の1地形図上に、 $4\text{km} \times 4\text{km}$ の方眼をきり、各方眼内の最高標高と最低標高の差の平均値によって示した。なお、この値は、5万分の1地形図からの値と密接な直線関係にあって、一方の地形図による値から他方の地形図による値を算出することは容易である。

標高は、起伏量を計測した方眼ごとに平均標高を求め、その平均標高を流域ごとに平均してあらわし、地貌係数は、この標高と起伏量を乗じたものである。

年降水量は、気象庁からだされている平均年降水量図にもとづき、流域の位置を考慮して各流域の平均年降水量を 100mm 単位で表現した。

森林面積率は、流域面積に対する、当該流域内の立木地面積の百分率であらわした。立木地面積の算出は、林野関係で行なわれる森林区単位で行なった。このため、森林区の集まりで示される区域とダムの流域が面積的にあまりくい違うものは、森林面積率算出不能として検討対象例から除外した。

6) 個々の因子ごとに、ダム堆砂量との概略的な関連を記すると、つぎのごとくである。

流域面積が大きくなると、一般に単位面積あたりの堆砂量は少ないものとなるが、面積がそれほど広くないところからの土砂流出量にも少ない例があって、流域面積とダム堆砂量との間には、全体的としてそれほど密接な関係は認められない。貯水容量が大きいと、山地からの土砂流出のうち、ダム地点で堆積しないで下流に流下していく分が少なく、堆砂量が多くなるという傾向がうかがえないこともなかったが、それほど明らかな関係があるとは予想できなかった。

起伏量・標高・地貌係数は、いずれも相似た程度で土砂流出と有意の関連があるように思えた。ただし、起伏量と標高、あるいは、地貌係数と起伏量または標高との間には $0.8 \sim 0.9$ 程度の相関係数が認められるため、この3者は、山地からの土砂流出に対して、それぞれ独自の性格をもった因子と考えるよりも、いずれか1つの因子によって代表させ、その代表因子と土砂流出との関連を考慮していくほうが妥当と思われる。

年降水量は、起伏量などの因子と同じく、ダム堆砂量と有意な関係が予想され、年降水量が多くなれば堆砂量も多くなるといえるようである。しかし、観測年数は、上記の貯水容量と同じく、堆砂量に対してそれほど大きな影響を与えているとは考えられなかった。

草生地・露岩地などが過半を占めるような流域では、森林面積率が小さくても堆砂量は少ないが、その他の一般の流域では、地形の緩急・降雨の多少などの面から相似た流域ごとにとみると、森林面積率の増加は堆砂量の減少をもたらすようである。

7) 草地を主とする流域において、森林面積率が小さくてもダム堆砂量が多ならない点から判断すると、表面侵蝕を主たる原因とする土砂流出に対しては、大面積流域の場合でも、草生は森林にまさるとも劣らぬ防止効果を発揮するものと考えられる。

8) 個々の因子ごとに、ダム堆砂量との大まかな関連をのべれば上記のごとくであり、起伏量とこれに類似の標高、地貌係数、および年降水量が一応ダム堆砂量との関連ぶかい因子と予想された。そこで、起伏量 R を標高 H 、地貌係数 RH の代表因子と考え、これに年降水量 P を加えた 2 因子を中心に、堆砂量 E との重相関係数によって検討を加えると、2 因子をとって係数を求めた場合は、 R と P を用いた場合が 0.6 程度となって最高であり、3 因子をとる場合には、 R と P と一般的な流域を対象とした森林面積率 F を用いた場合が 0.7 まであがって最高となる。

9) 草生地を主体とする流域や、露岩地の多い流域を除いて E と R 、 P 、 F の関係式を導くと

$$E = 0.474 R + 0.292 P - 0.118 F + 2.452$$

$$E: \text{m}^3/\text{ha}, \quad R: 100\text{m}$$

$$P: 100\text{mm}, \quad F: \%$$

となり、この式による期待値の標準誤差は、同じ単位で ± 1.585 、各独立変量の標準誤差は、 R で ± 0.065 、 P で ± 0.081 、 F で ± 0.041 である。

10) この式から、各独立変量の E に対する相対的な重要度を算出すると、3 者の間にそれほど大きな差はなく、相似たウェイトで E に関連をもっていると考えられる。 F の係数だけが負になっていることは、小地域でたしかめられている森林の土砂流出防止機能は、大面積の流域からの土砂流出に対しても発揮されていると考えてよい一証左といえる。

11) 上記の式で用いた数値は、同じ単位で

$$E = 2.743 \times \frac{RP}{F} - 2.409$$

とも表現でき、 E と R 、 P 、 F の関係を簡単なグラフで表わすのに便である。

12) 以上の結果から、山地流域からの土砂流出量は、地形が急なほど、降水量が大きいほど多くなり、森林面積が多いほど少なくなることが明らかとなったが、有限の森林を流域内に配置して、その流出土砂防止機能の効果を高めるには、地形は急のところ、降水量は多いところに配するのが得策と思われる。

13) 今回の検討で、相当の面積を有する一般的な山地流域からの土砂流出に及ぼす主要因子の基本的な影響を、ある程度定量的に明らかにし得たが、問題とした流域からの土砂流出量の正確な予測、あるいは、特定流域内に配すべき土砂流出防備保安林の具体的な位置、面積の決定などに対してはまだ検討をすすめるべき余地はかなり残っている。しかし、全国的な見地からこの種の検討を進めるには、現在では、定量化された資料収集などの面で難が多いので、今後は、地質条件などから全国を数地域に区分し、その区分された地域ごとにより詳細な検討を加えていくことが有効と思われる。

文 献

- 1) ANDERSON, H. W. & H. K. TROBITZ: Influence of Some Watershed Variables on a Major Flood, *Journal of Forestry* 47, 5, pp. 347~356, (1949)
- 2) 中央气象台編: 新日本気候図帖第一集, (1948)
- 3) FLAXMAN, E. M. & R. L. HOBBA: Some Factors Affecting Rates of Sedimentation in the Columbia River Basin, *Trans. American Geophysical Union*, 36, 2, pp. 293~303, (1955)
- 4) 川口武雄: 降雨と山地土壌侵蝕の関係, *日本林学会誌*, 33, 1, pp. 4~7, (1951)
- 5) 川口武雄: 山地土壌侵蝕の研究 (第1報), *林業試験場集報*, 61, p.10, (1951)
- 6) 川口武雄: 森林の土砂流出に及ぼす影響の解明方法への示唆, *林業技術*, 124, pp.9~13, (1952)
- 7) 川口武雄・難波宣士: 昭和29年台風水害に関する調査報告 第1部 四国地区 2. 山崩および治山一般対策, *林業試験場研究報告*, 84, p.48, (1956)
- 8) 川口武雄・難波宣士: 昭和28年6月の九州水害に関する調査報告 第一 阿蘇地区編 VI 砂防関係 (その1 一般対策), *林業試験場研究報告*, 69, p. 104, (1954)
- 9) 川口武雄: 森林物理学 気象編, 地球出版, p.21, (1962)
- 10) 建設省河川局水利課: 河川堰堤の堆砂量に就て, 資源調査会土地部会資料, 114, pp.1~37, (1950)
- 11) 小出 博: 貯水式堰堤に於ける堆砂, 治山事業参考資料, III, pp.71~74, (1951)
- 12) 蔵重一彦: 岩手県下に於けるアイオン台風による洪水被害調査, 資源調査会報告, 6, pp.93~107, (1950)
- 13) 村野義郎: 山地における砂石の生産に関する研究, *土木研究所報告*, 114, pp.1~45, (1962)
- 14) 中野秀章・菊谷昭雄・森林万佐男: 森林変化, とくに伐採が溪川流出に及ぼす影響(I) *林業試験場報告*, 156, p.73, (1963)
- 15) 林野庁治山課: 荒廃地の侵蝕土量について, 治山事業調査報告, I, 25 pp., (1957)
- 16) 林野庁治山課: 山地における流出土砂量, 治山調査報告 IV, pp.1~16, (1960)
- 17) 定井喜明: 砂防ダムの適正規模決定の爲の一考察, *土木技術* 12, 7, pp.17~22, (1957)
- 18) 佐藤良一郎: 数理統計学, 培風館 p.264, (1948)
- 19) 滝口喜代志・難波宣士: 山地土壌侵蝕の研究 (第4報), *林業試験場研究報告*, 164, pp. 146~147, (1964)
- 20) 田中治雄, 石外 宏: 貯水池の堆砂量と集水区域の地形及び地質との関係, *土木学会誌*, 36, 4, pp. 173~177, (1951)
- 21) 統計科学研究会編: 統計数値表 I, 河出書房, p.136, (1944)

Influences of Some Factors upon Soil Losses from Large Mountainous Watersheds.

Senshi NAMBA and Takeo KAWAGUCHI

(Résumé)

- 1) Soil losses from mountainous areas are related with many factors such as precipitation, topography, geology, forest and others. Though many reports analyze the figures of soil losses, most of them debate the relationship between soil loss and each factor individually by using model plots or empirical methods in Japan. So we wanted to clarify the effect of main factors on soil losses considering many watershed variables at the same time.
- 2) To clarify the independent effects of some watershed variables, we planned to derive an equation between soil losses and these variables. Therefore all of the data used here must be expressed quantitatively.
- 3) The more the number of variables and the more complicated the expression of its variable, the higher the accuracy of its expression of its variable, the higher the accuracy of its equation becomes generally. But, from the standpoint of practical application, it is convenient to explain this relationship simply by a few variables. As a first trial in this problem, we thought that the simpler this report is the better.
- 4) The important variables in soil losses were picked up as follows with reference to many past researches; size of drainage area, original storage capacity, relief energy, altitude, mode of mountainland, precipitation, duration of observation and forest cover ratio.
- 5) Soil losses from large mountainous watersheds were shown quantitatively by the annual sedimentation volumes per unit watershed area in the reservoirs existing in the river by high dams built for electric power generation.

Original storage capacity is the volume of reservoirs to be divided by watershed area. Relief energy, altitude and mode of mountainland are the variables regarding topography.

Relief energy and altitude were expressed by one mean value of many relief energies and mean altitudes calculated from a grid with $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ area per each watershed. Mode of mountainland is the product of relief energy and altitude.

The scale of the map used for analyzing topography is one to two hundred thousand (1:200,000). Forest cover ratio is the ratio of the woodland area to total watershed area. Location of watersheds that were used in analyses appear in Figure 2. These data were shown in Table 3.

- 6) Among the relative coefficients between soil loss and each variable, those of relief energy, altitude, mode of mountainland and precipitation are larger than those of other variables. But, relief energy, altitude and mode of mountainland are associated closely with each other.
- 7) In the watersheds covered with grassland or area above the timber line, the soil losses assumed from forest cover ratios were much smaller than those from ordinal watersheds having the same cover ratios. In the watershed having a large lake within, the same tendency appeared. We surmised that closely grass covered soil surface had a good erosion control function.

Except in the case of these unordinary watersheds, the higher the cover ratio of forest,

the smaller the soil loss becomes.

- 8) If we use two variables for making one equation between soil losses and watershed variables, relief and precipitation are to be preferred. The multiple relative coefficient in this case is 0.6025. This value is not high. When we use three variables for injuring the relationship between soil losses and their variables, it is the highest in the case of using relief, precipitation and forest cover ratio, excepting the unordinary watershed above mentioned. The multiple relation coefficient is 0.7056. This value is significant to the 0.1 per cent level.
- 9) In 25 ordinary watersheds, the independent effects of main three variables in influencing soil loss are given in the following equation

$$E = 0.474 R + 0.292 P - 0.118 F + 2.452 \dots\dots\dots(1)$$

where E : soil loss (m³/ha), R : relief energy (100m), P : precipitation (100 mm) and F : forest cover ratio (%). The standard error of estimate was ± 1.585 . The steeper the mountain slope, and the greater the precipitation, the more the soil losses, but the higher the forest cover ratio, the less the soil loss becomes. From this result, we can express the relation between soil losses and main variables as follows simply,

$$E = 2.743 \times RP/F - 2.409 \dots\dots\dots(2)$$

Each variable is expressed in the same units as those of (1) equation.

- 10) Judging from (1) or (2) equation, we see that there are large hazards of soil loss in the watersheds which are steep in topography, plentiful in precipitation and small in forest cover ratio. From the standpoint of the erosion control, we must consider these watersheds having hazards first. Moreover, we had better increase forest cover against soil erosion, one procedure being to adjust the forest management plan in these dangerous watersheds.