

講演

土砂災害について

高橋 保

ご紹介いただきました高橋でございます。私に与えられた課題は「土砂災害についての研究を振り返る」ということですが、その全般を振り返るのは、とうてい私にはできることではないと思います。ここでは私の研究の中心的なテーマであります、土石流の研究を振り返ることで責めを果たしたいと思います。さらに、その土石流の研究と言いましても、非常に多彩で、盛りだくさんです。どうしても私の研究のレビューに偏ることをお許し願いたいと思います。

1. 順調に減ってきた土砂災害犠牲者の数

このようなグラフ(図1)はみなさん、もうどこかでご覧になった経験があると思います。これは戦後、終戦直後からの自然災害、特に水災害と土砂災害による死者・行方不明者の数の推移を示しています。地震によるものは除外されていることに注意してください。戦後間もなくから、1956年の伊勢湾台風までは、毎年千人を超える死者・行方不明者が出ておりまして、水害受難時代であったと言えます。その後は、順調に犠牲者の数が減ってきていることを示しています。

この犠牲者の数が減ってきたとについては、その間に、図中に示していますように、地すべり等防止法、災害対策基本法、急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律、あるいは総合治水対策

とか、ごく最近では土砂災害防止法、これは今年から施行されたのですが、こういった法体系や施設が整備されて、それに基づくハード・ソフトの対策にずいぶん力が入られてきたことが功を奏していると思います。

しかし、私どもは防災学を専攻しているわけであり、そういったハード・ソフトの対策の基礎として、我々の研究もお役に立っているに違いないと言いたいわけです。

2. ビンガム流体理論とダイラタント流体理論

図1の下半分には、上述のような法体系が整備されてきた年代に合わせて、大学あるいは研究がどのように推移してきたかを大雑把にまとめています。1951年には京都大学に防災研究所が設立されて、いろいろな災害が起こる中で、地すべり研究部門、地形土壌研究部門、砂防研究部門といった土砂災害関連部門が新設されてきました。それからまた災害科学総合研究班というものが設立され、大学横断的な災害研究が文部省の科学研究費を基礎としてなされてきました。このように、研究レベルにおいても、災害に対して力が入られてきたわけです。

ここで、私のテーマである土石流のような土砂の流れに関する研究について見てみますと、防災

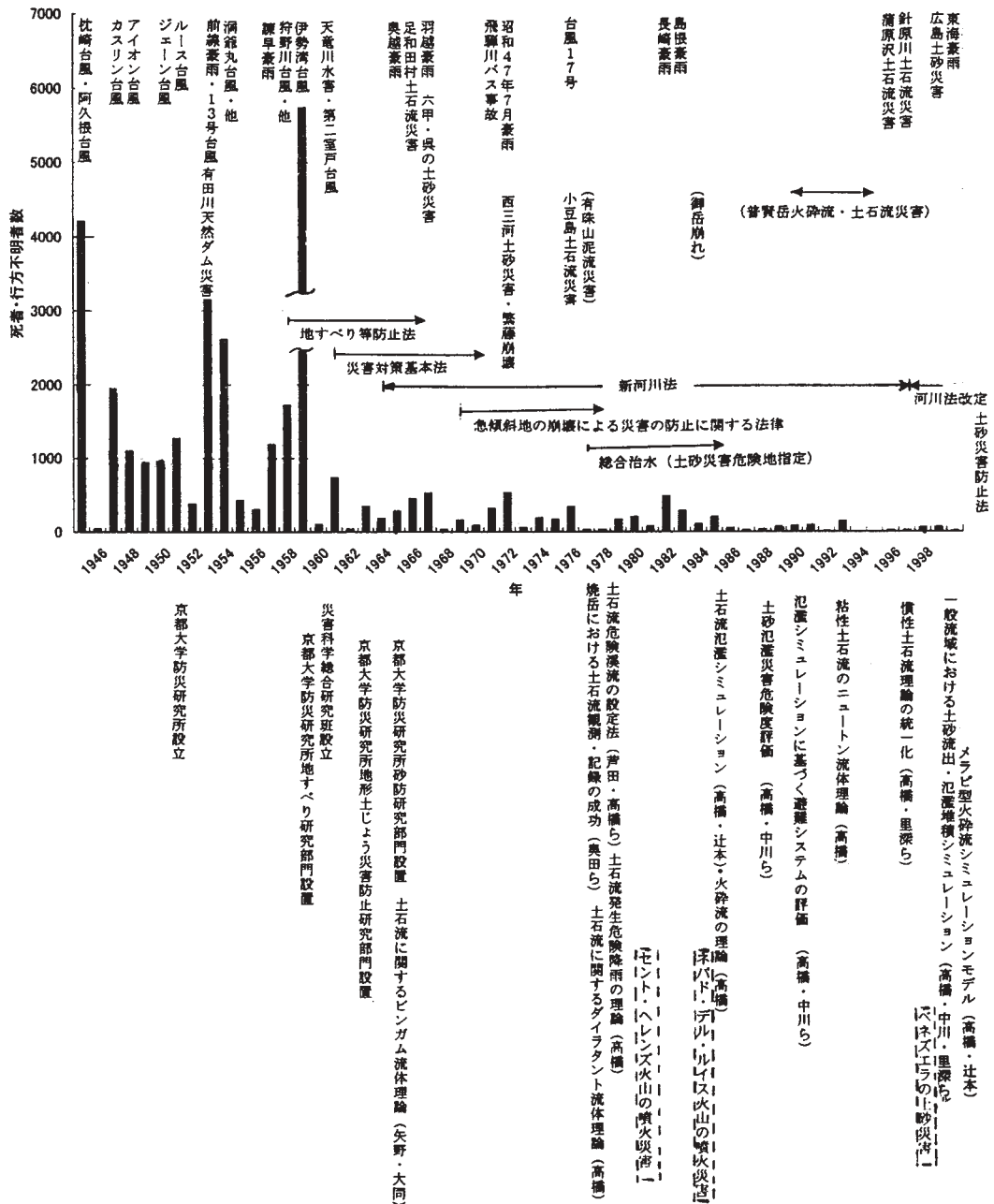


図1 洪水・土砂災害による犠牲者数の時代的推移，災害に対する施策の流れ，および土砂災害研究の進展

研究所に砂防研究部門が設立された頃に，世界に先駆ける格好で，防災研究所の矢野・大同とアメリカのジョンソンによって，それぞれ独立して土石流に関するピンガム流体理論が出されました。

それから時間が少したち，1977~78年に上高地の焼岳で土石流観測が行われ，その流動状況の記録が克明に撮られました。従来，「幻の災害」と言われていた土石流が，研究者の目に具体的な映像

として捉えられたのです。そのようなときに、私が、土石流に関するダイラタント流体理論を提唱しました。従来のビンガム流体理論と違って、ダイラタント流体理論というものを初めて出したわけですが、幸いこれが世界的にもかなりの注目を浴びることになり、現在に至るまで、土石流の流動モデルに関してはビンガム流体派、あるいはダイラタント流体派という、二大潮流をなしていると言っても過言ではないかと思えます。

3. 土石流危険渓流および氾濫シミュレーションの研究

1997年当時は、ちょうど総合治水対策が、建設省を中心として進められることになり、土砂災害に関しても、土砂災害危険地の指定と公表が必要であるという状況になりました。土石流研究は、まだそのような要請に十分に答えられるほどには成熟しておりませんでしたので、我々としては要請に応えるべく、土石流危険渓流の設定法に関する研究、およびどういった雨が降ると土石流が発生するのか、といった土石流発生予測に関する研究に力を入れることになりました。こうした研究の成果は、建設省の危険渓流指定ガイドラインに生かされております。

図1中に四角で囲んで示しております1980年のセント・ヘレンズ火山の噴火災害、1985年のネバド・デル・ルイス火山の噴火災害、1999年のベネズエラの土砂災害でございますが、これらは私自身が現地調査することができた、非常に大規模な災害の例であります。これらの調査は、今後どのような研究が必要であるかを考えさせられる貴重な機会となりました。たとえばセント・ヘレンズ火山の災害調査に際しては、巨大崩壊や火砕流の研究が必要であるということ、ネバド・デル・ルイス火山の噴火災害に際しましては、非常に大規模な泥流でアルメロという町が全滅し、2万人以上の人々が亡くなるということがあったのですが、その調査によって、火砕流の研究および泥流災害のハザードマップに関する研究の必要性を痛感いたしました。

このようなことをきっかけとして、土石流・泥

流の氾濫シミュレーションの研究や火砕流理論の研究を行ってきました。氾濫シミュレーションについては、その後、ずっと継続しているいろいろやってきて、ハザードマップはもちろんのこと、避難システムのあり方や災害復興計画を考えるのに生かせるような段階にまで発展してきました。しかし、火砕流の理論に関しましては、しばらく中断をしておりましたところ、残念ながら雲仙普賢岳の火砕流災害が起り、緊急にハザードマップが必要になりましたが、理論的な裏付けのある作成手法が存在していない中で、いわば間に合わせのハザードマップによって、警戒区域指定などの災害対策が講じられてきました。私たちは、ごく最近になって火砕流シミュレーションに関する研究を進め、なんとか普賢岳の火砕流が再現できる段階に至りました。今後、機会がありましたら、私たちの成果を使っていただけるのではないかと考えております。

4. 今後の土石流研究

土砂災害による犠牲者の数が、順調に減少してきたことをお話しましたが、土砂災害の発生件数そのものは決して少なくなっているということではありません。年間、平均千件以上発生しておりますし、土砂災害危険箇所は指定されているものだけで17万箇所以上といった膨大な数に上っているというのが実情です。それで、土砂災害対策のためにどのような研究が今後必要であるかという、非常にたくさんあるわけですが、代表的と思われるものをいくつかあげてみましょう。

一つは今年から施行された土砂災害防止法に関連するものです。たとえば土石流についてですが、法律では土砂災害警戒区域と、土砂災害特別警戒区域という二つの区域を指定することになっております。土砂災害警戒区域の中では避難システムのようなソフト対策を充実していくということですが、土砂災害特別警戒区域になりますと新たな開発を規制すると同時に、すでにそこに建っている家屋があるとすると、その家屋が土石流に対して十分持ちこたえられるようにする必要があるということです。したがって、そういう線引き

は高精度であらねばならないし、また家屋に働く外力を的確に評価する必要があるということです。

行政のそういう要請がある一方で、科学・技術レベルは要請に十分応えられるところまで到達していません。それと先ほど言いましたように、非常にたくさんの危険箇所があるので、これらの全てに警戒区域指定のための調査をやらうとなると、1件1件非常に精緻なシミュレーションをやるのは難しいこともあり、安価で簡便にできる方法の開発も必要です。さらなる研究の高度化が必要であるということです。

土石流の発生理論に関しましては、小規模表層崩壊とか、急激な洪水流出が土石流を引き起こすといったタイプに関しては、研究がたくさん行われてきて、それなりの成果が上がっています。しかし、大規模崩壊が土石流になるというタイプ、これは最近たとえば鹿児島県の針原川ですとか、いろんなところでこういった例が目立ってきています。しかし、残念ながらこの土石流化機構についてまだはっきりしないところがあり、予測に結びつける段階にはなかなかいかないのが現状で、この立ち後れをなんとかしなければなりません。

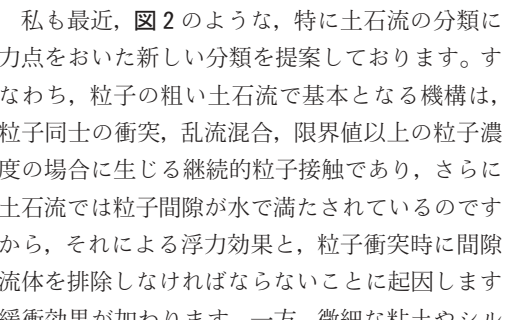
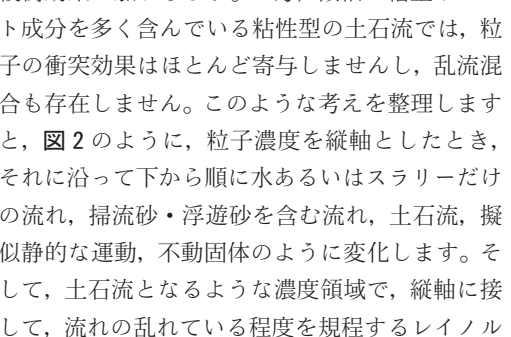
それから、河川法が最近改正されてきて、治水、利水に加えて、環境という3本柱が立つことになりました。土砂の問題に対しても、止める一方では済まなくなるということで、下流への河床低下とか、海岸侵食とか、生態系や景観の維持とかを考慮して、災害は止めるけれども下流へ必要な土砂は流すという、そういった環境と両立する対策がこれからは必要であるということで、新しい技術開発が期待されています。

5. 土石流の定義と分類

概論が長くなりましたが、もう少し具体的な内容に立ち入りしたいと思います。まずは土石流の定義および分類です。土砂移動現象全体の中で土石流を定義するという立場からの分類でもっとも有名なのはおそらくバーンズによるものでしょう。ここでは土石流は、粗い粒の流れとして定義され、細かい粒の流れは別に泥流として定義されています。また、ピアソンとコスタによりますと、固

体成分と水との割合がある値の範囲内にあるものを土石流と定義し、その速度は 10 m/s から 10^{-8} m/s といった非常に低速まで変化しております。水と固体の混合割合に着目するものには、クッツとムニエルのものもあります。これは左右の軸方向に水100%と固体100%までの変化をとり、上下方向に構成粒子径の粗いものから細かいものまでの変化軸をとった空間を想定した場合に、土石流はその空間の中央部に存在するものであるとの定義です。

以上のような定性的な定義のほかに、物理的な移動機構に着目した定義もあります。たとえばアイバーソンは、サベッジ数という粒子衝突による慣性応力と粒子接触による静的応力の比の値、バグノルド数という粒子衝突による慣性応力と間隙流体による粘性応力の比の値、それからダルシー数という間隙流体圧が粒子間作用を緩衝する程度を示す値の3つの無次元量によって各種の土砂移動現象が想定されることを示し、土石流はそれらの組み合わせがある値の範囲にある領域の内部に存在するものとして定義しています。ただ、それらの無次元数の具体的な数値範囲は明らかになっておりません。

私も最近、のような、特に土石流の分類に力点をおいた新しい分類を提案しております。すなわち、粒子の粗い土石流で基本となる機構は、粒子同士の衝突、乱流混合、限界値以上の粒子濃度の場合に生じる継続的粒子接触であり、さらに土石流では粒子間隙が水で満たされているのですから、それによる浮力効果と、粒子衝突時に間隙流体を排除しなければならないことに起因します緩衝効果が加わります。一方、微細な粘土やシルト成分を多く含んでいる粘性型の土石流では、粒子の衝突効果はほとんど寄与しませんし、乱流混合も存在しません。このような考えを整理しますと、のように、粒子濃度を縦軸としたとき、それに沿って下から順に水あるいはスラリーだけの流れ、掃流砂・浮遊砂を含む流れ、土石流、擬似静的な運動、不動固体のように変化します。そして、土石流となるような濃度領域で、縦軸に接して、流れの乱れている程度を規程するレイノル

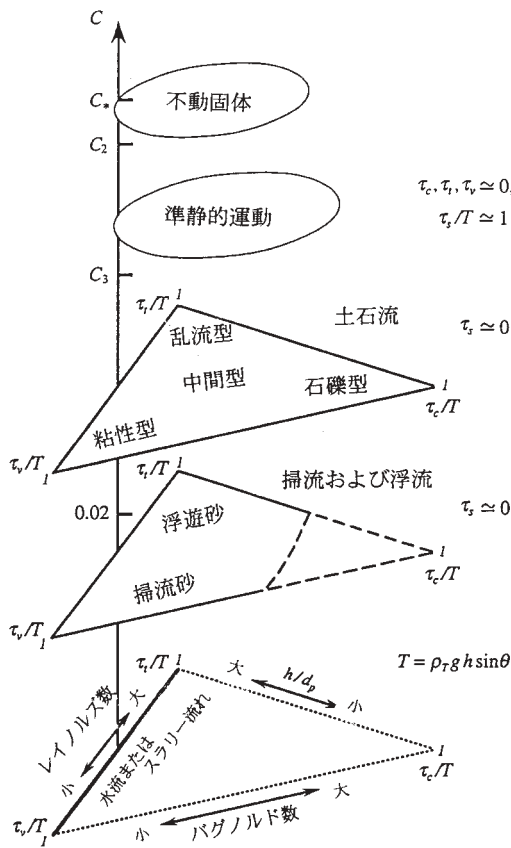


図2 水・粒子混合体の流動の分類

ズ数, 先ほど出てきましたバグノルド数, および流れの深さと構成粒子径の比を示す相対水深をそれぞれ代表する三軸からなる三角座標を想定します。そうすると, 三角座標の各頂点近傍に石礫型, 粘性型, および乱流型の土石流が存在し, 中心付近にはそれらの中間型の土石流が存在いたします。それぞれの型の土石流の存在領域を決める境界線の位置は, 縦軸の濃度によって変化しますが, まだ, その境界線を定量的に決定できるまでには至っていません。

6. 実験および理論によって分かった土石流のメカニズムとそれを応用した発生予測

次に, 土石流の発生過程について述べます。急

激な洪水流出によって土石流が発生するタイプについては理論がある程度できあがっています。また, 小規模崩壊が土石流になることについては, 材料の飽和時含水率と流動時の含水率の比の値をモビリティインデックスと定義し, これがかなり大きいときに崩壊が土石流になるという考えがあります。しかし, 大規模崩壊から土石流に変化する機構に関しては, 先にも述べましたように研究が立ち後れています。

最近, 私のところで大規模崩壊が土石流化する機構に関して, ある仮説を立てて実験による検証を企てております。それは, 鹿児島県の針原川で起こった土石流を想定しています。図3の概念図に示しているように, わりあい深い, 大きな規模の崩壊が地下水の作用で起こります。そうすると, 崩壊土塊の下の方が飽和状態になっていて, この部分がすべっているうちに下から順にある厚さで液状化します。液状化した部分は土石流になっていて, その上の部分は土の塊です。土石流は上方ほど速い流速分布系を持っていますので, 流れに乗っている土塊は流れの平均流速よりも速く, 前へ前へと運ばれて行きます。そして, 後ろには土石流が残されます。土塊の下方に飽和部分が残されている限り, 順次液状化が進みますから, このような運動形態が持続しますが, そのうちに土塊の中に飽和部分がなくなるともはや液状化しませんから, そこで土塊は停止します。後ろから土石流が追いかけてきて, 土塊を乗り越えて, 土石流だけがさらに下流へ行くというプロセスが生ずるのではないかということです。実験をやりますと, 確かにそういう現象が起こります。また, 現地の堆積物調査によりますと, 底の部分に元の地山のブロックがそのまま残っていて, その上に土石流堆積物が乗っていることが確認されています。したがって, こういったプロセスを定量的に説明する研究をこれから発展させていかなければならないと考えています。

図4は, 急激な洪水流出が渓床堆積物を侵食することによって発生する土石流について, 発生限界条件を示しています。渓床勾配が大体15度以上のところに表面流の水深を粒径で割った値すな

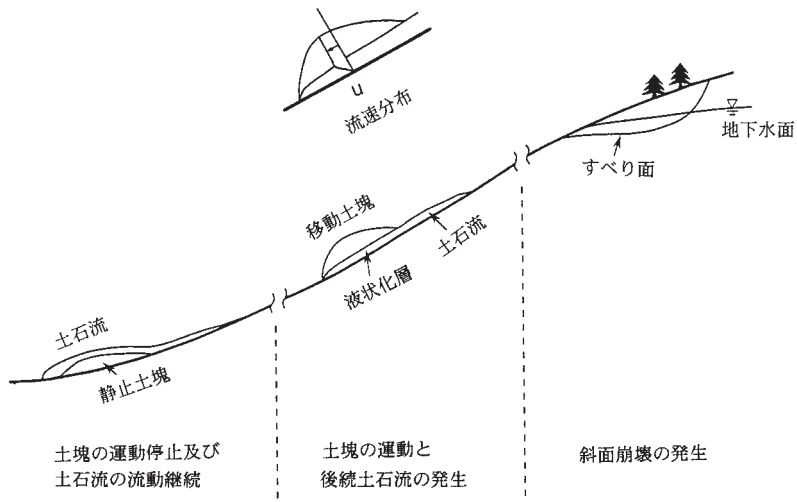


図3 斜面崩壊土塊の土石流化過程モデル

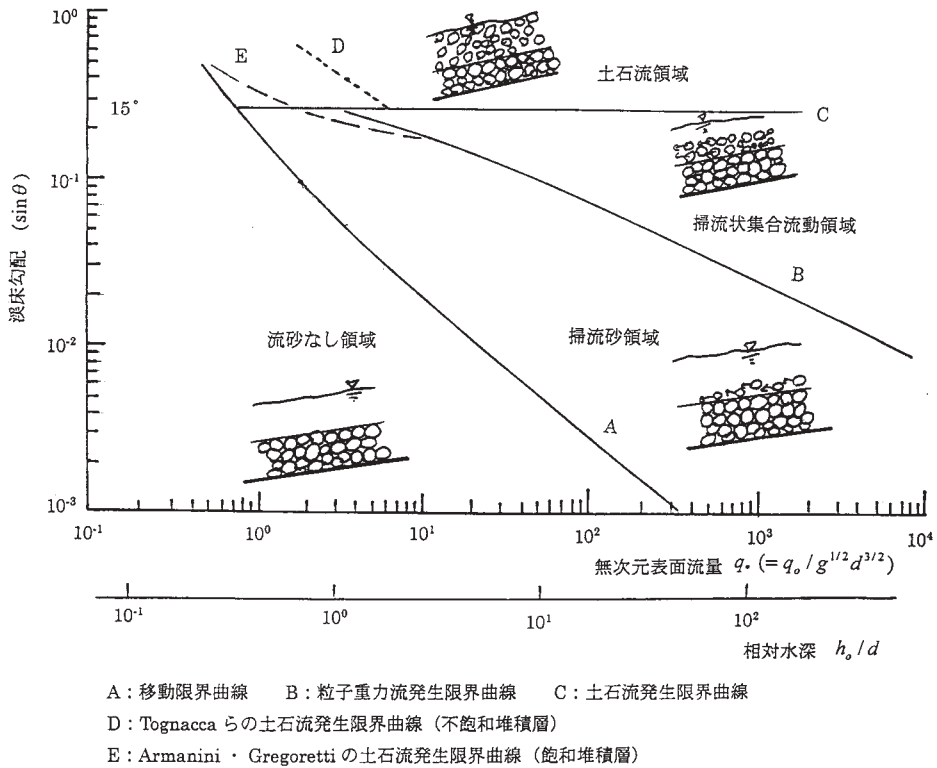


図4 粗粒子輸送パターンの領域区分

わち相対水深が1以上になるような出水があると土石流が発生することを示しています。このこと

を実際の流域に当てはめれば、土石流発生危険渓床を見出すことができるのではないかと方向

につながります。先ほど冒頭のほうでお話した、私たちが行った危険渓流指定の研究はそういう考え方からなっております。流域内の15度以上の沢の部分に土砂が大量にたまっている。そしてそこへ相対水深が1以上になるような水が集まってくると、土石流になるということですから、結局、15度以上の渓流部分の流域面積がある程度以上大きければ、土石流が起こる可能性が高いこととなります。これは土石流発生に対する一つの基準を与えていますが、それは溪床堆積物が土石流になるということですから、斜面が崩壊することによって起こる土石流の発生可能性についても考える必要があります。そのような崩壊の発生危険度については、地形・地質等のいろんな要因に対して点数を決めて、その点数がある程度以上大きい場合には土石流発生の危険性が高いと判断することにして、そういう二つの基準を組み合わせ、土石流危険渓流指定のガイドラインができております。

それから、土石流の発生時刻の予測ですが、結局先ほどもお話ししたように、相対水深が1以上になるような水が流出すること、また、斜面が崩壊することが土石流のきっかけになるわけですから、そのようなきっかけの発生を降雨情報を与えて知ることができれば好都合です。そういう考えから求めた結果を図5に示しておりますが、横軸

が積算雨量、縦軸が1時間毎の降雨強度で、この平面上に双曲線のような発生限界曲線を引くことができます。このことに関しては理論的な根拠も明らかになっています。ところで、その考えをいろんな地方で起こった雨と土砂災害の事例に適用して、それぞれの地方での限界ラインを求めましたところ、地方によってもものすごくバラつきます。また、同じ地方でも、前は確かにこういう雨で土石流が発生したけれども、今回は発生しないというようなことも起こります。その原因は、時間的に地盤や溪床堆積物の特性が変わることもあり得ますし、雨の局地的な降り方もずいぶん違うということもあるでしょう。こういった方法で土石流発生を予測して、避難に結びつけることについては、相当のバラつきといいますか、空振りといいますか、そういうものは覚悟しておかなければならないわけで、これは、精度が今後どんどん上がっていくかという、なかなか難しい面も思っています。

崩壊の発生場所、あるいは土石流の発生場所、それからその発生時刻を同時に予測しようとの研究もなされています。図6はそういうことを長崎災害についてやってみた例で、実際に降った雨を与えますと、理論上は図中に黒く塗りつぶした所で崩壊が発生し、谷沿いの点々で示した所で土石流が発生する可能性があることとなります。実際

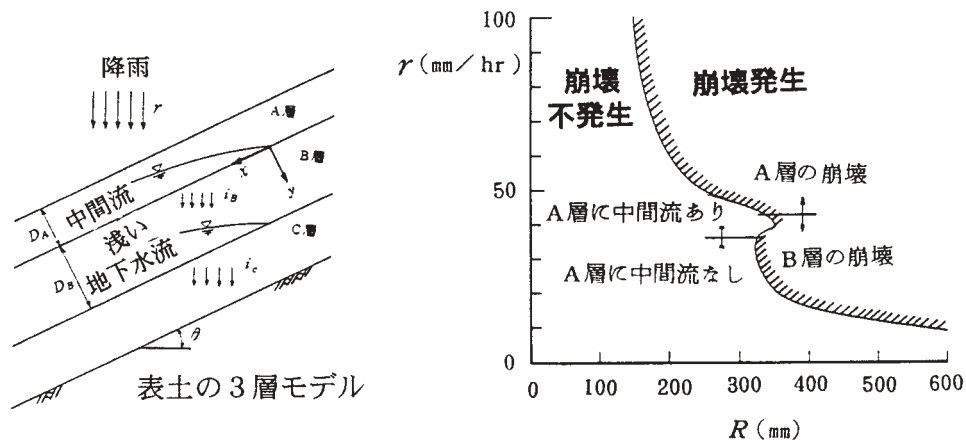


図5 崩壊・土石流発生限界降雨

にもこういう所で予測したような時刻に大体発生したことが分かったのですが、崩壊発生の可能性があると判断された場所で、実際には崩壊が発生しない事例もあります。結局、実際の流域での表層土の厚さとか、斜面勾配とか、土の強度とか、透水係数とかいような要因を、いかにきめ細かく、正確に把握するかということにネックがあり、現地情報の的確な把握法の研究が重要です。

7. 土石流の流動機構に関する研究

話があちこちへ飛んで恐縮ですが、次に土石流の流動機構に関する研究について話したいと思います。1922年にビンガム流体の概念ができて、1954年にバグノルドのダイラタント流体の構成則が提案されました。先ほど述べました矢野・大同のビンガム流体モデルとか、ジョンソンのビンガム流体モデルというのがわりあい早い時期にできました。そして、1977年に私のダイラタント流体モデルが出て、それから後、粒子流の構成則に

関する研究が進展しました。そういう背景の下、土石流モデルには粒子流モデルに基礎を置くダイラタント流体モデルとビンガム流体の粘・塑性流体モデルが、時代の経過に関わらず両者入り交じる状況で存在し続けています。そして、どちらのモデルが正しいかといった議論も続けられています。

このような状況が続いているのは、それぞれの研究者がどういう土石流をイメージしているのかにもよっており、議論がかみ合っていないのも否めない点であります。ここでビンガム流体モデルと私が当初提案したような濃度分布を持っているダイラタント流体モデルの二つのモデルの長所・短所を整理いたします。まず、ビンガム流体モデルですが、これは流体自身がある程度強度を持っているということですので、静止状態から運動を始めて、また止まるという過程を説明するには非常に都合がいいわけです。しかし、粒子間の作用や間隙流体と粒子との相互作用を考慮できないため、モデル流体の強度と粘性係数を予測できな

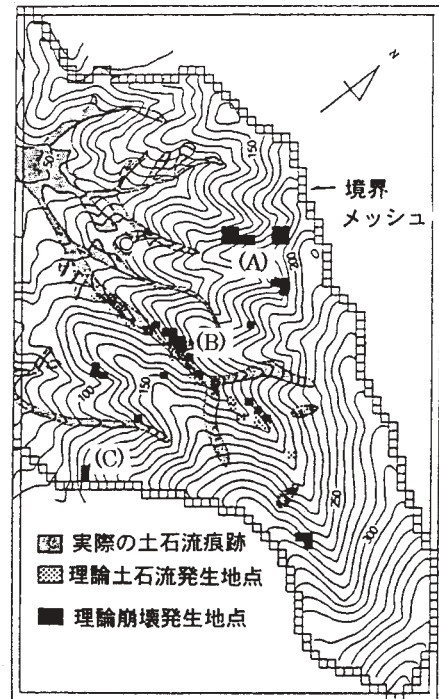
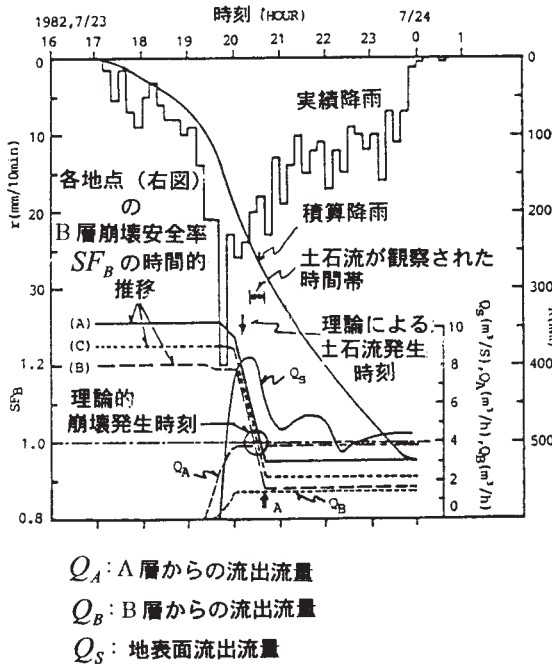


図6 長崎長龍寺地区への理論適用結果

いとか、粒子濃度を規定する機構が不明であるとか、堆積物の上部から下部へ粒子径が小さくなる逆グレーディング現象が説明できないとかの短所の他に、中国で見られる代表的な粘性土石流でビンガム流体としての説明が続けられているにも関わらず、実際にはビンガム流体を特徴づけるプラグ部分が存在していないなど、どうも粘性土石流といえどもビンガム流体モデルは違うのではないかというのが私の考えです。一方、粒子が均等に分散しているという仮定の下でのダイラタント流体モデルですが、ここでは粒子間の作用が考慮されているので流動中の粒子選別現象とその結果生じる堆積物の逆グレーディング現象が説明できること、粒子濃度および粒径に応じて抵抗則が理論的に求められることといった長所に対して、間隙流体の粘性が高い場合や構成粒子が微細な場合には、この理論を適用すると実際とかけ離れた流速を与えることや、均等に粒子が分散しているという仮定が入っているために、平衡状態の流れに対して濃度が決まってしまうことが欠点として指摘されています。しかし、平衡状態で流れることができる濃度を与える式は、我が国で広く使われている土石流の平衡濃度式に他ならず、実際の土石流はこの平衡濃度に近づくように河床を侵食したり、堆積したりして流下していると解釈されます。また、間隙流体の粘性が高い場合や構成粒子径が小さい場合は、図2でも見たように、ダイラタント流体モデルが対象としている石礫型とは違ったタイプの土石流であって、それらに対する別の理論が必要なのです。

当初の、粒子が一様に分散しているという仮定はいわば第一近似であり、その仮定を外して、濃度が流れの下の方で濃くて、上の方で薄いという分布をしているとした理論を立てることはもちろん可能です。そのような場合の流速分布、濃度分布および濃度の絶対値は、同じ勾配と水深でも材料の粒径によって相当の違いが出るのですが、今ではそういった特性の違いも定量的に説明できる段階にまで達しています。

それから、粘性の高い土石流では流れは層流状態になっています。普通、流れの内部で粒子が分

散するのは、粒子同士の衝突によるのでなければ乱流によって浮遊しているというのが一般的な概念ですが、層流の中で粒子がどうして浮遊するのかということは、力学的に大変興味深いものがあります。私は、これは粒子同士が接近すると高粘性の間隙流体を排除しなければならないという効果、また、下の方が高濃度であるとする、粒子を下方へ輸送するよりも上方へ輸送するほうがラクであるという効果によると考えています。平衡状態のせん断流れ中の粒子連続式にこのような効果を導入すると、濃度分布や流速分布の解が得られます。それによりますと、勾配がわりあい急なときには、上から下までほとんど様な濃度分布になるという結果になります。そこで、濃度が一樣に分布していることにしますと、流速分布形はビンガム流体ではなくて、ニュートン流体になります。非常に粘性の高い土石流においてもビンガム流体ではなくて、ニュートン流体なんだというのが最近の私の研究成果です。そのような議論を通して、従来、ビンガム流体モデルで説明されている中国の土石流の特徴的な挙動が、数値的にも説明できます。

8. 土石流研究の究極の目的

ある自然の流域に豪雨が降った場合に、人の住んでいるところへどのような規模の土石流がやってくるのかを予測したい、その土石流がやってきてどういう範囲がどのぐらい危ないのかということを知りたい、これがまあいわば土石流研究の究極の目的といえるわけです。先ほど申しました石礫型土石流、あるいは乱流状の土石流については、ある程度そういう要請に応えられる段階にまで来たことができます。雨を与えて洪水流出計算をして、それから土砂の連行あるいは堆積を考慮して流量を修正し、河床変動を計算して、下流へ出てくる土砂量を見積もる、というやり方で計算を進めるわけです。

そういう方法で、3万人くらいの死者が出たといわれております、1999年のベネズエラの土砂水害における土石流の再現計算を行いました。図7は与えられた雨の時間分布と、それに対応する

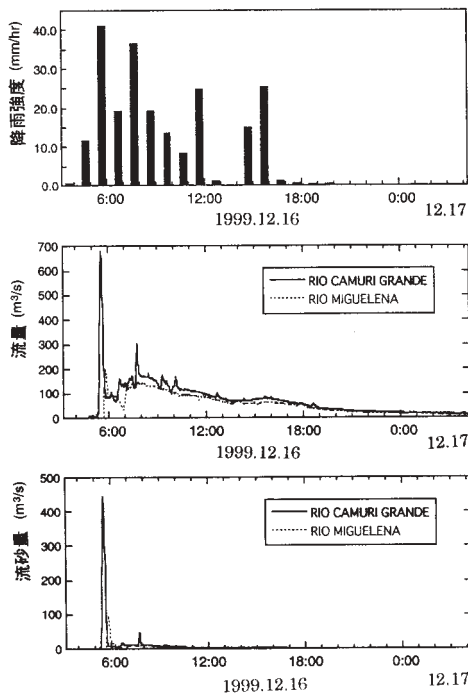


図7 降雨実績と計算された流出流用および流砂量

下流扇状地への流出流量および流砂量の時間的変化を示しています。初期に土石流がやってきて、その後は流量はわりあい大きいですが、土砂濃度はわりあい少ないという結果になっています。そのようなハイドログラフを扇頂部に与えて、民家のある場所で氾濫が進むプロセスも図8のように計算できます。この結果は現地調査の結果をかなり良く再現しております。

ただ、先ほども申しましたように、大規模な崩壊が土石流になる場合については、このような図が作成できる段階にまで至っておりません。その他、粒度分布の効果をどう評価するかとか、先にも述べてきましたこれからの課題もたくさん残されていますが、土石流に関する研究は着実に発展していると思っております。研究成果が大いに実際問題に生かされ、災害軽減に役立つことを期待しております。

大変、雑駁な話になりましたが、時間になりましたので私のお話はこれで終わらせて頂きます。ご清聴ありがとうございました。

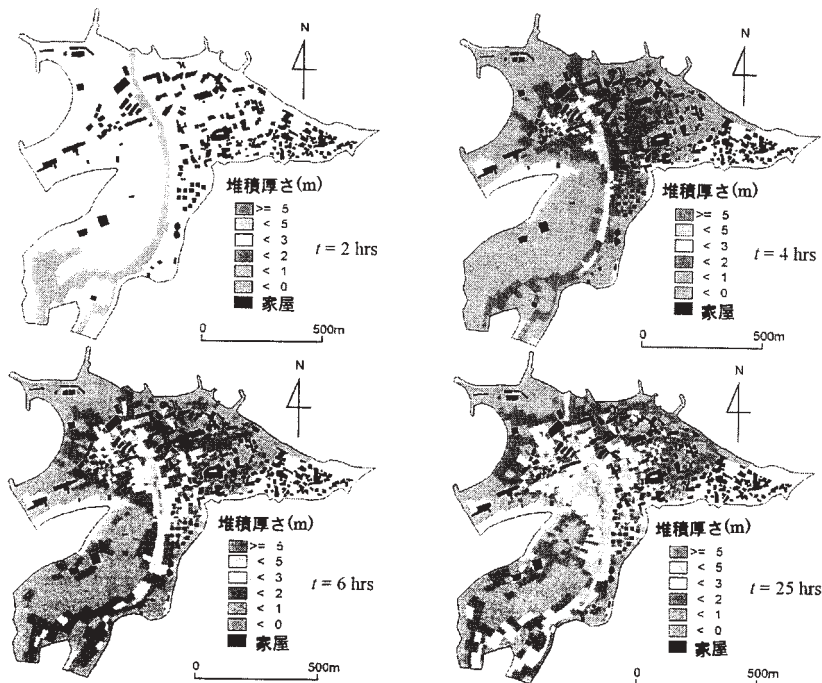


図8 カマリ・グランデ扇状地における土砂氾濫の再現