

---

巻頭言	地盤工学とシミュレーション	名古屋大学名誉教授	川本朧万	1
小特集	防災・環境シミュレーションの最前線			
	防災対策支援ツールとしての数値シミュレータの可能性		目黒公郎	2
	個別有限要素法 (DFEM) による不連続性岩盤のモデル解析	アイダン オメル 渡嘉敷直彦 Iraj Mamaghani		8
	地圏水循環系プロセス統合型モデルによる流域シミュレーション		登坂博行	16
	2004年・2005年スマトラ沖巨大地震の震源過程		八木勇治	23
	山地流域を対象とした土砂移動シミュレーションの現状と課題		宮本邦明	29
	有限要素解析による進行性破壊の数値シミュレーションの試み		張 鋒	38
	都市火災の延焼予測シミュレーションの現状と課題		樋本圭佑 田中哮義	43

# 地盤工学とシミュレーション

名古屋大学名誉教授 川本 眺 万

シールドトンネルは船食い虫の生態をまねて考え出されたことは良く知られている。また、新幹線新型車両の先端(ノーズ)の形状は、トンネルに入ったときの車両前面によるトンネル内の空気移動(押し出し)による音の問題や空気抵抗を減少するために、カワセミの嘴の形状をまねたものと言われている。愛知万博「自然の叡智」においても、ロボットや熱のない光など生き物に学んだものが多く出されたことは記憶に新しい。このように自然界の生物や諸現象に学び、真似をして、すなわちシミュレートして、種々の分野で新技術や新製品の開発や、省資源・省エネルギーを行っていかうとしている。

自然界の複雑で広範な現象をシミュレートするためには計算機が必要であり、計算機に現象のシミュレーションをさせるのである。それは数値実験であって実際の現象の予測をたてたり、理論の妥当性を検討したりする。数値解析といえば、工学の分野では従来の解析的方法に対しての数値的方法の意味であることが多い。これまで工学の研究手法としては実験的解析と数学的解析があったが、数値解析はこの両者の中間的性格を持つ研究方法であり、具体的内容は、主としてシミュレーション(数値実験)であるといえよう。

数値解析以前の地盤工学の研究は、連続体力学に基づく理論解析や実験解析が主なものであった。この場合、地盤を弾性連続体、弾塑性体、粘弾性体、直交異方体などと仮定される場合もあるが、それも比較的単純な境界形状をもつ問題に限られていた。また、斜面の安定解析に対してはもっぱら極限釣り合い条件が用いられていた。これらの解析で地盤の変形状態や破壊現象が予測できるだろうか、また、実際の地盤構造物の安全性の評価や設計が十分にできるであろうかと言うことを常に疑問に思いながら、研究が進められてきた。

たとえば、重力ダムの応力・変形の理論解析をする場合でも、堤体と地盤に対して実際の状態(材料的および幾何的)をシミュレートすることすら困難であり、光弾性実験や石膏模型などによってシミュレートすることが必要であった。また、破壊現象の把握には主として現場観察(現場計測)、模型実験が用いられてきたが、現在では数値解析のおかげで、破壊に対する素因と誘因として地盤構造物のモデル化と破壊様式、地質構造、境界条件、初期条件、材料特性、地下水状態、地震などが考慮されるようになってきている。高度な数値解析の適用が地盤工学分野の現象をか

なりの精度でシミュレートすることを可能にしている。

実際のトンネルや斜面などの破壊や崩落は一種の実物実験と考えられ、地盤構造物の破壊現象に対するシミュレーションの好例である。地盤の変形問題には、地盤調査の精度、材料の力学特性の評価、適用される解析手法の選択など非常に難しい問題を含んでいる。そのため、「実測と予測」、「理論と実際」、「数値解析と現場計測」などという対比する課題に対して従来より多く解説されてきている。地盤工学に関連した設計や安全性の検討に際して、理論をよりよく適用して実際に合理的な答えを引き出すには、その過程で地盤調査や現場計測の限界、地盤のモデル化(材料的および幾何的特性)の限界、数値解析の妥当性と適用限界などを十分に把握しておくことが重要である。これらはいずれも実際の状態をよりよくシミュレートするために必要なものである。

2003年10月にアテネにおいて「地盤工学における予測とシミュレーション手法」に関する国際ワークショップが開催され、いくつかの論文が地盤工学論文集の同名特集号に掲載されている。そこでは、進行性破壊とひずみの局所化、材料不安定、分岐、液状化および熱依存性挙動、地盤一流体混合体の急送流れ、物質移動などの複雑な地盤力学の問題が取り扱われており、水を含む地盤材料の大変形や逐次破壊を含む、より複雑な挙動や地盤工学へシミュレーションの可能性について検討されている。

種々の地盤構造物の応力・変形状態や安定解析などの地盤力学に関する問題以外に、地盤工学に関連しては環境や防災の問題がある。これらは現在の大きな社会問題の一つであり、大きくは地球環境や自然災害の問題である。自然災害としての地震災害、風水害、土石流災害、津波災害、などや地下水保全、表流水や地下水汚染問題、海洋汚染などについても、それらの現象を物理現象と捉え、モデル化することにより数値シミュレーションが可能になってきている。

複雑な地盤力学の問題を高精度に予測するための構成式や数値解析手法が開発されてきているが、それらを適用して地盤工学の問題をシミュレートし、地盤構造物の挙動予測、設計、安全性の評価等を行うには、地質・地盤調査や現場計測、地盤のモデル化(材料的・幾何的特性とそれらの経時変化、境界条件)、数値解析などの選択と適用限界を十分に理解することの重要性を再度強調しておきたい。

# 防災対策支援ツールとしての 数値シミュレータの可能性

めぐろ きみ ろう  
目黒 公郎\*

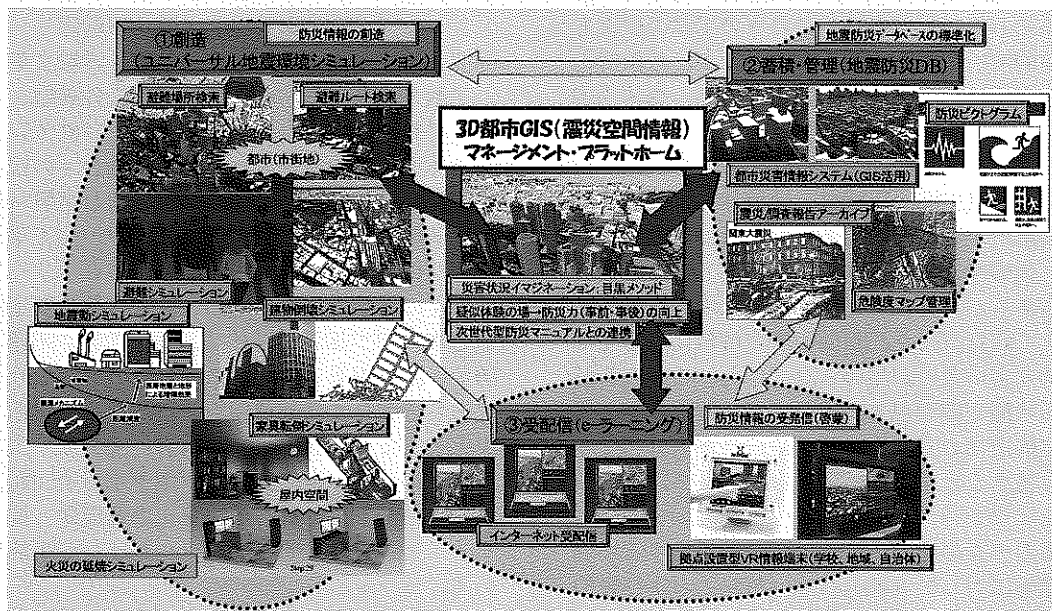
## 1. はじめに

地震被害を代表として、世界各地の災害現場に立ち、その実態を見てきた著者の考える防災力向上の基本は、発災からの時間経過の中で、自分の周辺で起こる災害状況を具体的にイメージできる人をいかに増やすかに尽きる。効果的な防災対策は、「災害状況の進展を適切にイメージできる能力」に基づいた「現状に対する理解力」と「各時点において適切なアクションをとるための判断/対応力」があつてはじめて実現する。イメージできない状況に対する適切な心がけや準備などは無理である。

適切な防災対策が進展しない最大の原因は、社会のさまざまな立場の人々、すなわち、政治家、行政、研究者、エンジニア、マスコミ、そして一般市民が、災害状況を適切

にイメージできる能力を養っておらず、この能力の欠如が最適な事前・最中・事後の対策の具体化を阻んでいる点にある<sup>2)</sup>。我々防災の専門家の使命は、災害の実像を認識できないことで準備せず、結果的に被害を被ってしまう人を減らすことである。このためには物理的根拠や社会的な根拠に基づいて災害時の環境を具体的に示すツールが必要であり、ここに数値シミュレータの存在意義がある。

一般に数値シミュレーションを行う背景には、次のような目的や理由があると思われる。専門家による現象の分析や検証と一般の人々の現象理解を補助するための「現象の再現手段」、実験に当たって、対象とする現象が種々の危険性を伴ったり、規模が大き過ぎたり小さ過ぎたり、あるいは材料パラメータや境界条件の自由度の制約等から実験の実施が困難な場合の「代替仮想実験手段」、実時間では再現



災害現象と対策効果の高精度な可視化、過去の事実と教訓のわかりやすい整理、簡便で効果的な学習環境の整備により、多くの人の災害イメージング能力を高める。そして適切なイメージングに基づいた状況理解力と対応力を向上させることで、都市震災を軽減する環境を実現する。このシステムは、防災情報を①創成(シミュレーション)し、②蓄積・管理(地震防災DB)し、わかりやすく③受信信(e-Learning)するシステムを④3次元都市GIS空間をプラットフォームとして統合するものである。

図1 危機管理/防災情報ステーションの概念図(地震防災版)

\* 東京大学教授 生産技術研究所

に長時間を要したり、逆に非常に短い時間の現象で観察が困難な場合の「時間の調節手段」などである。

防災や環境分野が対象とする現象には上で説明したようなものも多く、数値シミュレーションの利用価値とその可能性は非常に高いと言える。図1は、総合的な防災力を高めるために著者が提案している「危機管理/防災情報ステーション」の概念図(地震防災版)<sup>3)</sup>である。このシステムは、災害情報を創造する各種の数値解析モデルを融合したシミュレーションシステム(これをユニバーサル災害環境シミュレーションシステム<sup>4),5)</sup>と呼ぶ)、災害情報を利用しやすい形で標準化したうえでこれを蓄積・管理するシステム<sup>6),7)</sup>、多様なユーザとの間の災害情報の受配信システムの3つのシステムを、3次元都市GIS空間をプラットフォームとして統合するものである。

このシステムを介して、利用者の災害イメージ能力、現状理解力、対応力が向上するとともに、事前・最中・事後の対策の効果が定量的に評価される。本報では、このシステムの概要を説明するとともに、数値シミュレーションに關係するいくつかのサブシステムを紹介する。

## 2. 危機管理/防災情報ステーション

危機管理/防災情報ステーションは、①シミュレーションモジュール、②データアーカイブングモジュール、③eラーニングモジュールが、④Web3D-GISモジュールを共通のプラットフォームとして相互に有機的に結合されることで、従来になかった全く新しい機能と意味を持ったシステムである。

①のシミュレーションモジュールは災害情報を創造したり、過去の実際の災害記録を一般化して、より効果的に活用するためのシステムであり、各種の数値解析モデルを融合したユニバーサル災害環境シミュレーションシステムとなっている。地震動のシミュレーションから、構造物の挙動、対応行動、発災後の経済状況までをシミュレーションの対象としている。

②のデータアーカイブングモジュールは災害情報を利用しやすい形で標準化したうえでこれを蓄積・管理するシステムであり、過去の災害調査報告、新聞記事、教訓集などはもちろん、①によって作成された情報もこの中に入る。しかも①の精度向上と④の地域特性の変化に伴って、常に動的・かつインタラクティブにアップデートされる。

③のeラーニングモジュールは、学び手側からはラーニングシステムであるが、システム管理側からはデータ入手システムの機能も有している。すなわち一般ユーザの意識レベルを知るとともに、彼らが①のシステムにさまざまなデータを入力して得られる情報を②のデータとして整備するためのインターフェースとしての機能である。

④のWeb3D-GISモジュールは、対象となる地域の時空間都市情報であり、Web3D-GIS環境を基本として、その中に時間パラメータを有した地域住民や地域特性データが常にアップデートされて格納されている。

①~④の主な構成要素を紹介すると、①としては、地震

動シミュレーション、構造物完全崩壊シミュレーション<sup>8)-12)</sup>、家具の動的挙動シミュレーション<sup>13),14)</sup>、避難行動シミュレーション<sup>15)-17)</sup>、延焼シミュレーション<sup>18)</sup>、災害イメージネーションメソッド(目黒メソッド<sup>19)</sup>や目黒巻<sup>20)</sup>、災害対応シミュレーション(次世代型防災マニュアル<sup>21),22)</sup>、事前・最中・事後の施策効果シミュレーション<sup>2)</sup>、経済状況シミュレーション、他。

②は兵庫県南部地震教訓集や時刻歴対応活動記録、WTCテロ事件の新聞記事をはじめとして、過去の事故や災害の調査報告や新聞記事、さらに地域危険度分析や被害想定結果などを新しいスタイルでデータベース化したもの。この中には、マスコミが災害後のどの段階でどのような内容の記事や番組を、何に注意して報道すべきかが一目瞭然と判断できる「多次元マスコミ情報分析システム」<sup>21)</sup>なども入る。

③としては、子供から老人までが簡単に操作できるユーザフレンドリーな入出力インターフェースとして、多指認識型VR時空間情報端末等を用意している。内容としては危機発生前における独学・独習を支援する教材やゲームなどが入っている。④としては、東京23区をはじめ、わが国の大都市圏を対象として整備した建物1棟1棟の3次元GIS情報を共通プラットフォーム<sup>3)</sup>としている。

提案システムによって実現する種々の物理・社会現象に関する最新のシミュレーションモデルとデータベースの組合せは、単なる過去の危機管理事例を収集・整理するだけでなく、異なる時刻、自然条件、地域の防災力、社会情勢のもとでの危機発生状況をシミュレートし、それを「擬似危機事例」として蓄積・更新していくことを可能とする。「擬似危機事例」を量産し、教材として用いることで、実際の危機事例の稀少性を補完し、危機に対するイメージネーション能力を高めることが可能となる。また災害発生時には、実際の物理・社会環境条件を逐次入力することで、ごく近未来の災害状況を、高精度に予測・更新、危機対応時の意思決定を支援することが可能となる、などの特長を有している。

本システムは、平時は危機管理/防災教育支援システムとして働き、緊急時には危機管理/防災対応支援システムとして機能することで利用者の災害イメージ能力、現状理解力、対応力が向上するとともに、事前・最中・事後の対策の効果が定量的に評価され、総合的な防災力の向上に寄与する。

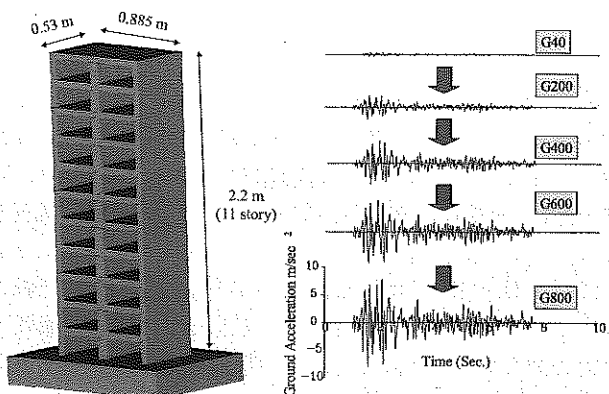
## 3. いくつかのサブシステムの紹介

ここでは、「危機管理/防災情報ステーション」を構成するいくつかのサブシステム(数値シミュレーションシステム)に関して簡単に紹介する。

### 3.1 構造物の崩壊シミュレーション<sup>8)-12)</sup>

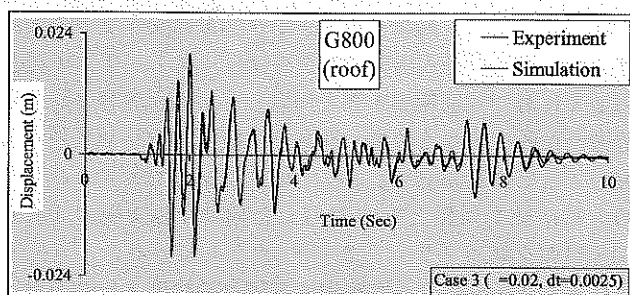
兵庫県南部地震では、多数の建築・土木構造物が崩壊し、多くの尊い生命が奪われた。崩壊に至るまでの破壊挙動の解明がいかに重要であるかが再認識されたわけである。しかし、あれだけ無残な被害を経験したにもかかわらず、今、





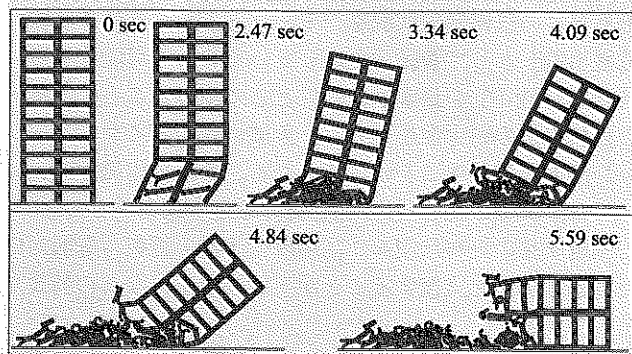
提案手法の解析モデルでは、鉄筋1本1本の位置までを正確に取り込むことが可能である。実験では波形が同じで振幅を増大した地震動を次々に加えていった (OKADA<sup>23)</sup> による)。

(1) 解析に用いた 1/15 スケールの RC ビル模型 (左図) と振動台実験に用いた入力地震動 (右図)



最大振幅 800 Gal の地震動を用いた時の屋上の応答結果、両者が驚くほど一致していることがわかる。

(2) 応用要素法による数値解析結果と実験結果の比較



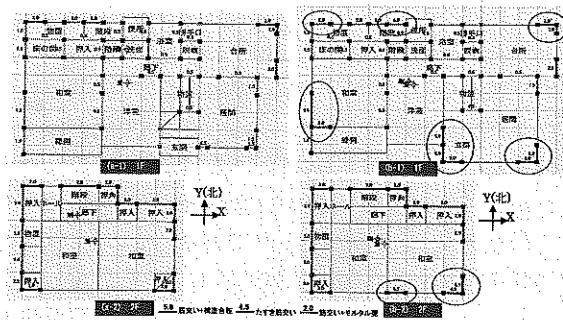
地震動の振幅を 1200 Gal に拡大し、時間スケールを 2 倍に伸ばした地震動外力によって崩壊過程をシミュレーションした。実際の実験では、振動台の性能の関係から、この挙動は再現されていない。AEM 解析では、図のように崩壊前の挙動を精度高く再現した上で、完全崩壊に至るまでの非線形挙動が追跡できる。

(3) RC ビルの崩壊過程の AEM シミュレーション

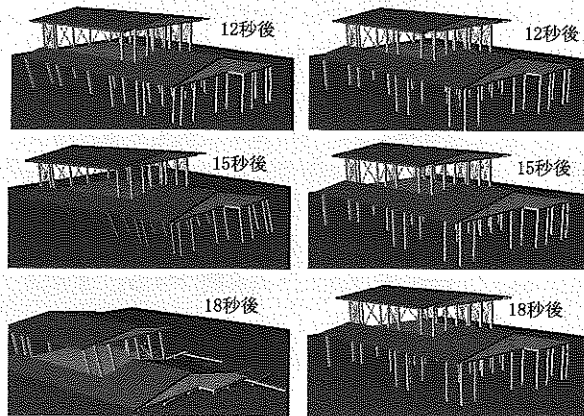
図 2 RC 構造物の振動台破壊実験と応用要素法解析によるシミュレーション結果の比較

我々のまわり、すなわち構造物の設計や施工に携わるコミュニティーを見渡すと、依然として破壊現象 (特に原型を留めないほどの崩壊) に対する注意が不十分ではないかと思われてしかたがない。

現在の設計においても、崩壊などの破壊挙動は設計思想の範疇外である。「壊れてはいけない。壊れないものを作ることが設計である」という人もいる。しかし、「壊れないもの」をつくるためには「壊れるという現象」を十分理解しなくてはならない。安全性の照査はもちろん重要である。しか



(1) 木造 2 階建て一般住宅の耐震改修以前 (a) と後 (b) のプラン (南側の壁が不足しているのを補強している)



(2) 耐震改修前後 (左: 改修前、右: 改修後) の木造 2 階建て一般住宅の地震時の挙動の違い

在来木造軸組住宅の動的挙動を追跡するために、接合部および耐力壁を間隙パネを用いてモデル化し、在来木造軸組住宅の耐力壁の静的水平加力実験結果を用いたキャリブレーションを行った。具体的には、接合部パネ・筋交い・モルタル外壁・サイディング・土壁・構造用合板の耐力壁パネのパラメータが静的加力実験結果と一致していることを確認した上で、耐震改修前後の建物に兵庫県南部地震の地震動を作用させた場合の動的挙動である。改修前の建物は、壁量の不足している南側からねじれるように崩壊するのに対して、改修後の建物は目立った被害を受けないことがわかる。

図 3 3次元拡張個別要素法を用いた木造 2 階建て住宅の地震時の崩壊シミュレーション

しこれにしても想定地震外力に対しての確認でしかない。

「この構造物は、想定を越えるこれだけの地震外力を受ければ、〇〇のように挙動し、最後には〇〇のような形で崩壊する。それに要する時間は〇〇秒である。」「その際、建物の動的挙動を受けて、家具などの屋内収容物や設備は、〇〇のように挙動して出口を塞いだり、人を傷つけたりする。」「そのような条件下での避難行動は〇〇のようにあるべきだし、避難安全性を考慮した構造物設計や最適誘導は〇〇のようにすべきだ。」等の検討は一切なされていない。

これらの検討を行って初めて、有事に際しての具体的な対策の立案が可能になるし、そもそも災害とは、想定を越える状況が起こったことによるアクシデントなのであるから、想定を越えた状況下での検討をしなくては意味がない。またこのような検討と評価こそが、「性能設計法」移行への不可欠なステップでなくてはならない。

そこで著者は、構造物が健全な状態から完全崩壊に至るまでの挙動を廉価な計算機環境で、しかも高い精度で解析できる手法の開発に取り組んでいる。これまでも個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) やこれに改良を加

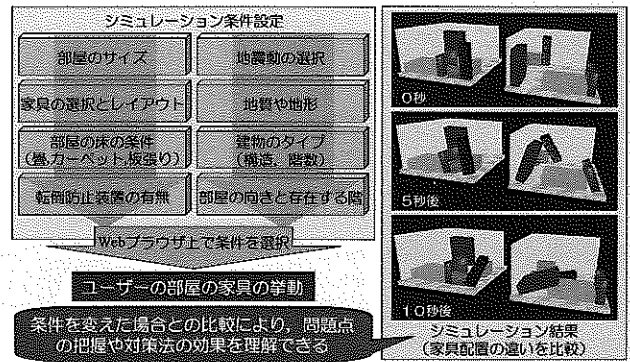
えた拡張個別要素法 (Extended DEM, EDEM)<sup>9)</sup>を用いて、連続体から非連続体に至るまでの破壊現象のシミュレーションを行ってきた。これらの手法は、取り扱える変形あるいは破壊の程度に特に制限がなく、要素同士の剝離、すべり、再接触、初期と違う要素との新たな応力場の形成などの現象が容易に取り扱えることから、破壊現象を取り扱う手法としては、高いポテンシャルを持つ手法と言える。ただし現在の問題点は、高い精度で定量的な議論をできるまでに至っていない点である。これは有限要素法 (FEM) が適用可能な変形領域で、両者の解析結果を実験や実現象と比較した場合に、明らかに FEM の解析精度が高いことから伺われる。そこで FEM の解析精度と EDEM の適用性を合わせ持つだけでなく、それぞれの欠点を補う特長も有する手法として応用要素法 (Applied Element Method, AEM)<sup>9),10)</sup>を開発した。このモデルを用いると、座屈などの大変形問題や完全に崩壊に至るまでの破壊過程が、リーズナブルな CPU タイムで、しかも驚くほどの高い精度で追跡できる。FEM におけるジョイント要素のように、クラックの発生位置や進展方向を予め仮定するなどの必要性は一切なく、破壊は任意の位置に発生し、自由な方向に進展していく。クラックの発生による応力状況の変化や境界条件の変化によって進展する進行性破壊現象を高い精度で解析できる手法となっている。また DEM や EDEM が苦手とする静的な問題への適用性、用いる要素の形状や配置の影響による解の不安定性の問題もない。解析に要する CPU タイムも圧倒的に短いなどの特長を有している。現在では、この手法に任意の断面形状を合理的に取り込む手法や熱で変化する材料特性を取り込むなどして、飛行機の衝突や火災などによる高層ビルの崩壊過程の解析なども行っている<sup>11)</sup>。

また従来は高い精度での定量的な議論が難しかった拡張個別要素法 (Extended DEM, EDEM) を、基本的な材料特性を決定できる実験結果とのリプレーションを行うことにより、高精度化することに成功した。そしてこれを地震被害において最も重要な木造建物の動的挙動解析に適用し、専門的な知識を有していない市民でも耐震性の重要性を理解できる環境の整備に努めている<sup>12)</sup>。

### 3.2 地震時の家具の挙動シミュレーション<sup>13),14)</sup>

建物の耐震化の進展や地震の規模別発生頻度を考えると、家具の落下や転倒による死傷者の問題は、今後の地震防災を考える上でますます重要になってくる。ここで紹介するシミュレータは直方体要素を用いた三次元拡張個別要素法 (3D-EDEM) により、配置の違いや転倒防止装置の有無などの影響も考慮できる地震時の家具の動的挙動を表現するものである。3D-EDEM は日黒研究室で開発された連続体から非連続体までの挙動を解析できる数値解析法である。

このシステムを利用することによって、特別な知識や経験のない一般市民でも、レイアウトの違いや転倒防止措置の有無などが地震時の家具の動的挙動に与える影響が比較できる<sup>13)</sup>。またこのシステムを拡張して、Web 環境や VR 環境を介して自分の家や部屋を模擬した環境のシミュレ-



地震時の家具の挙動に影響を及ぼすさまざまな条件を設定し、それらの影響を分析できるようにしている。

図4 地震時の家具の挙動に影響を及ぼす条件設定

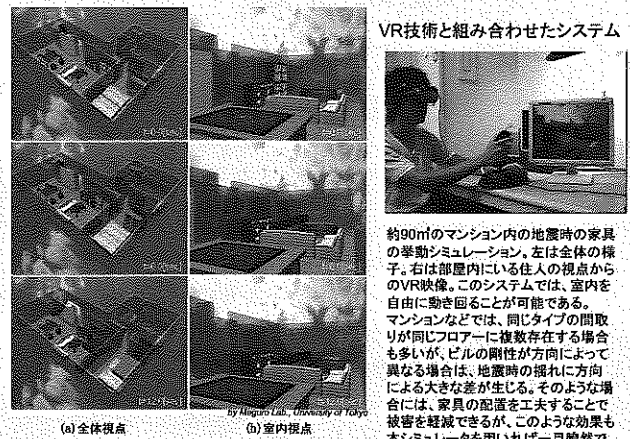
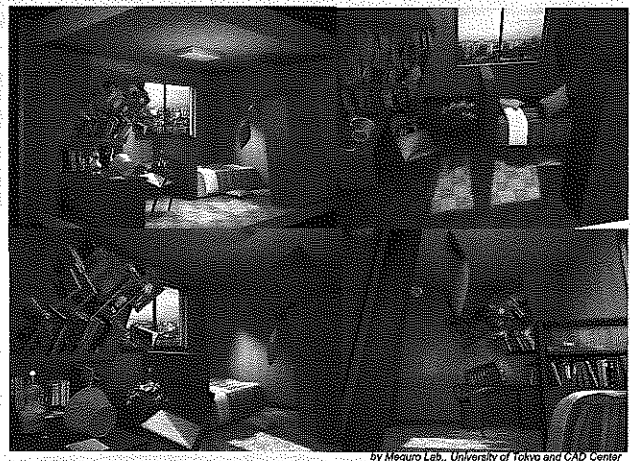


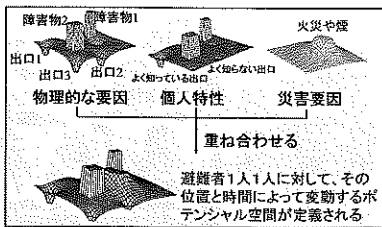
図5 マンション内の家具の挙動



数値シミュレーションとCGレンダリング技術によって、任意の時間や視点からのより詳細でリアルな映像を作成することができる。この映像は著者の研究室の大学院生の部屋。このような映像とともに、対策法やその効果を説明すると、市民の当事者意識と防災対策に対する真剣味は大きく変化する。

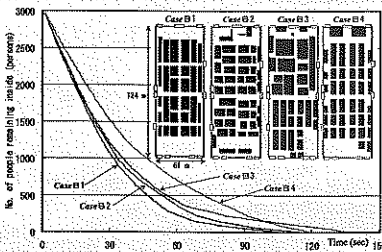
図6 自分の部屋の地震時の様子をリアルに体験する

シミュレーションが可能なシステムを構築している。Web 環境を利用したシステムでは、利用者は一般的なブラウザ環境だけで、特別なソフトやシステムを用いずに、地震時の家具の複雑な挙動をシミュレーションできる。VR 環境を活用したシステムでは、仮想空間の中に再現された自分の部屋内に入って、地震時の様子を疑似体験できる<sup>14)</sup>。このようなシミュレータは、市民の防災意識を高め、家具を固定するなどの具体的な防災対策行動を促進し、室内被害の軽減につ



避難者は周辺の8メッシュの中で負のポテンシャル勾配の最も大きなメッシュを進行方向として選ぶ。移動速度は観測結果に基づいて、人口密度の関数として与える。

(1) ポテンシャルモデルの概念



過去に実際に利用された展示ブースのレイアウトを対象としているが、避難安全性には大きな差があったことがわかる。避難安全性は通路幅だけでは決まらず、空間の持つ幾何学的な特徴の影響を受ける。

(2) 大規模展示場内の避難安全性の評価

図7 ポテンシャルモデルを用いた避難行動シミュレーション



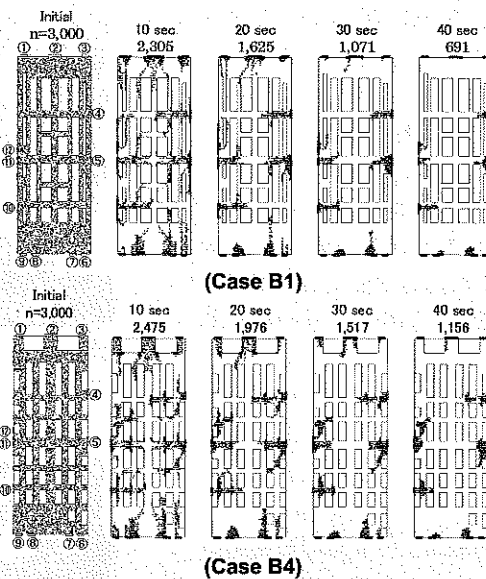
このシステムの開発コンセプトは「ドラえもん竹コプターを頭につけて空を飛び、自由自在の高さから自分の町や地域の安全性を確認しよう」というもの。住所を選ぶと、その地域に飛んでいき、その地点からの最寄の避難場所までの経路や距離を示したり、各種の危険度を表示する。このようなシステムを利用することで、市民1人1人が地域の危険性や自分の問題を把握できる。

図9 高精度3次元GISをプラットフォームとした地域危険度評価

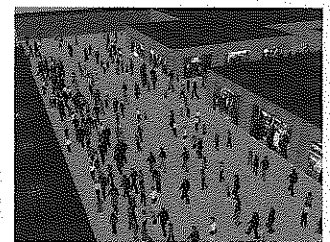
ながらるものと期待される。

3.3 避難行動シミュレーション<sup>15)~17)</sup>

安全な都市空間や構造物をつくるには、強制的な安全性はもちろん、日常的にも災害時にも、そこに住んだりその施設を利用する「ひと」の安全性が確保されなくてはいけない。そこで著者は、このような「ひと」の安全性を検討するために、個人特性を考慮した大規模避難行動シミュレ



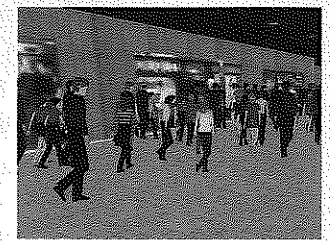
nは残留避難者の数、黒点1つが1人の避難者を表している。  
(3) 時間経過に伴う避難者の分布(利用者の初期配置はランダム、3000人)



(a) 鳥瞰的に見た様子



(b) 天井に取り付けたビデオからの眺め



(c) 壁際に立つ避難者からの眺め



(d) 群集に混じって避難している人の視点からの眺め

図8 ポテンシャルモデルとVRを組み合わせた避難行動シミュレーション

ーション手法の研究を進めている。ここで紹介するモデルは、ポテンシャルモデルとVRを用いたシミュレーションモデルである<sup>15)</sup>。ポテンシャルモデルとは、目黒研究室で開発した避難行動シミュレーション手法で、対象空間を「物理的な要因」「個人特性」「災害要因」の3つのポテンシャル分布の重ね合わせとして考えることで、異なった個人特性を有する多

数(数万人規模)の人間の避難行動が簡単に取り扱えるモデルである。またこの解析結果をVR空間上に展開することで、避難行動や災害状況をよりリアルに臨場感をもってイメージできる環境の整備を進めている。

このようなモデルを用いることで、災害時の「ひと」の安全性の確保を目的として、建設前の構造物の避難安全性の検討や既存構造物の避難安全性の診断、さらには災害時の避難誘導のあり方などが検討できる。最近では津波災害



を減らすための対策の提案や評価<sup>16)</sup>に用いたり、列車内の乗客の安全性の評価<sup>17)</sup>に活用したりしている。

### 3.4 都市の地域危険度評価と3次元マップ<sup>3)</sup>

災害に強いまちをつくっていくためには、行政による都市基盤の整備はもちろん、市民1人1人が自分の住んでいる地域の危険性に対して正確な知識を持ち、日頃から市民レベルでの十分な対策を講じておくことが重要である。そのための基礎情報を提示するのが地震危険度マップである。

東京を例として説明すると、東京都では、「建物倒壊危険度」、「火災危険度」、「避難危険度」の3つの危険度を、町丁名ごとに5つのランクに分けて相対的に評価するとともに、これら3つの危険度をもとに「総合危険度」を評価している。ここではこの評価値を活用して以下で説明するようなシミュレーションシステムを構築した。

このシステムでは、住所メニューから自分の住所を選択すると、3次元地図としてその地域の各危険度が色分けして表示されるとともに、自分の住まいから最も近い避難場所へのルートが表示される。また自由自在の高さで街の上空を飛び回って、各地の危険度を見てもらうことができる。このような1軒1軒のレベルで建物が識別できるミクロな都市3次元空間を対象とした危険度評価ならびに表示を進めていくことで、一般市民の地域危険度に関する正確な知識の普及が進む。結果として、発災前に適切な防災対策を具体的に講じる人が増え、地域の防災力の向上がはかれる。

## 4. おわりに

本報では、防災や環境分野における数値シミュレーション技術の重要性と、関連する現象や情報のビジュアルな表現が持つ効果を述べるとともに、その典型的な例として現在開発を進めている「危機管理/防災情報ステーション」の概要を説明した。そして、このシステムの中からいくつかのサブシステムを紹介した。

今後はこのようなシステムを効果的に活用していくことによって、社会のさまざまな立場の人々の災害状況を適切にイメージできる能力が向上し、適切な事前・最中・事後の防災対策が促進されることを望んでいる。

### 参考文献

- 1) 目黒公郎：ライフライン地震防災論，防災総合講座—都市災害論一，静岡県，pp. 33-55, 1999.
- 2) 目黒公郎：地震防災への実践的アプローチ，科学，Vol. 73, No. 9, pp. 952-960, 2003.11.
- 3) Meguro, K., Yoshimura, M., Takase, Y., Goh, B. and Sone, A.: Development of Integrated Information System for Total Disaster Management, Proceedings of the 2nd International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, pp. 339-344, Tokyo, Japan 2003.10.
- 4) 目黒公郎：災害軽減ツールとしての数値シミュレータの可能性，「1995年兵庫県南部地震」5周年特別企画シンポジウム講演集，土木学会，pp. 153-156, 2000.
- 5) 目黒公郎：ユニバーサル地震環境シミュレータ構想，そのI：地震発生直後編，比較防災ワークショッププロシーディング，pp. 71-76, 2001.
- 6) 近藤伸也・目黒公郎：実効性の高い防災対策を実現できる災害情報データベースの構築，地域安全学会論文集，地域安全学会，No. 4, pp. 261-266, 2002.11.
- 7) 近藤伸也・目黒公郎：効果的な防災対策の立案を支援する諸問題の多角的分析/評価システムの構築，地域安全学会論文集，地域安全学会，No. 5, pp. 335-341, 2003.11.
- 8) Meguro, K. and Hakuno, M.: Application of the Extended Distinct Element Method for Collapse Simulation of A Double-Deck Bridge, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol. 10, No. 4, pp. 175 s-185 s, JSCE, 1994.
- 9) 目黒公郎：崩壊過程までを考えた構造物の設計について，橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会—耐震設計の現状と今後の展望—，pp. 335-351, 1999.
- 10) Meguro, K. and Tagel-din, H.: Applied Element Simulation of RC Structure under Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 11, pp. 1295-1305, 2001.8.
- 11) Elkholy, S., Tagel-din, H. and Meguro, K.: Structural Failure Simulation due to Fire by Applied Element Method, JCROSSAR 2003, The Fifth Japan Conference on Structural Safety and Reliability, Tokyo, Japan, 2003.11.
- 12) 柳田充康・目黒公郎：地震時の木造軸組住宅の動的挙動シミュレータの構築，土木学会第60回年次学術講演会，1-196, 土木学会，2005.9.
- 13) 榎本美咲・目黒公郎：三次元拡張個別要素法を用いた地震時の家具の動的挙動シミュレーション，第57回年次学術講演会講演概要集，土木学会，第I部門，I-747, pp. 1493-1494, 2002.9.
- 14) 柳田充康・目黒公郎：Webを利用した地震時の家具の動的挙動シミュレータの構築，土木学会第59回年次学術講演会，1-797, 2004.9.
- 15) 目黒公郎・藤田 卓：ポテンシャルとVRを組み合わせた新しい避難シミュレーションツールの開発，生産研究，東京大学生産技術研究所，Vol. 54, No. 6, pp. 43-46, 2002.12.
- 16) Meguro, K. and Takashima, M.: Proposal of a Sustainable Tsunami Disaster Mitigation System for the Indian Ocean Region, ICUS Report No. 8, pp. 129-133, International Center for Urban Safety Engineering, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 2005.9.
- 17) 岡本 睦・目黒公郎：楕円形個別要素法を用いた鉄道車輦内の危険度評価に関する研究，土木学会第60回年次学術講演会，1-210, 土木学会，2005.9.
- 18) 目黒公郎：地震後の消防活動に与える耐震補強対策の効果，消防防災，夏季号（5号），pp. 71-79, 2003.7.
- 19) 目黒公郎：大規模地震の動的被害予測モデル，地学雑誌，日本地学協会，Vol. 110, No. 6, pp. 900-914, 2001.12.
- 20) 阿部真理子・目黒公郎：保育園の防災力向上に関する研究—保育園での防災ワークショップ—，土木学会第60回年次学術講演会，4-001, 土木学会，2005.9.
- 21) 近藤伸也・濱田俊介・目黒公郎：総合的な防災対策を可能とする次世代型防災マニュアルの提案，第26回地震工学研究発表会，土木学会，第2分冊，pp. 1481-1484, 2001.8.
- 22) Meguro, K.: Efficient Use of Information and Guidelines for Integrated Urban Disaster Management, Proceedings of the International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, pp. 81-88, 2003.4.
- 23) Okada, T., Kumazawa, F., Horiuchi, S., Yamamoto, M., Fujioka, A., Shinozaki, K. and Nakano, Y.: Shaking Table Tests of Reinforced Concrete Small Scale Model Structure, Bulletin of ERS, IIS, The University of Tokyo, No. 22, pp. 13-40, 1989.



# 個別有限要素法 (DFEM) による 不連続性岩盤のモデル解析

アイダン オメル\*

とかしき なおひこ  
渡嘉敷 直彦\*\*

Iraj Mamaghani\*\*\*

## 1. はじめに

岩盤構造物や石積み構造物の力学的な安全性を検討するために、これらの構造物が種々の外力を受けた際に、どのような力学的挙動をするかを把握することが必要となってくる。一般に、岩盤は、大小さまざまな不連続面を有しており、不連続面で区切られた岩石ブロックの集合体と考えて、その挙動を扱う方が多い場合が多い。一方、石積み構造物も、個々の積み石が相互に絡み合っていてバランスを保っており、安定性の検討は、積み石の集合体として、石相互の動きを把握するのが自然であろう。

このような不連続な岩石集合体の力学的な動きを検討するために、不連続性を考慮した適切な解析手法を用いることが必要となる。従来、不連続性を含む岩盤の挙動の解析では、解析の便宜上、岩盤を連続体として取り扱ってきた。しかし、実際の岩盤に見られる多くの現象は、不連続体としての変形、強度特性を示しており、連続体力学の範囲で岩盤の動きをとらえることに無理がある。

近年、コンピュータの高速化、大容量化とともに、地盤や岩盤工学の分野にも、有限要素解析法による数値解析手法が適用され、不連続性に起因する複雑な力学的特性を表現する種々の方法、たとえば、個別要素法 (Discrete Element Method; DEM) や不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis; DDA) が提案 (Cundall, P. A., 1971; Shi, 1988) されている。筆者らは、通常の有限要素法を基礎として、不連続体の大変形挙動を表現できる個別有限要素法 (Discrete Finite Element Method; DFEM) を提案している。ここでは、不連続性の岩盤構造物と石積み構造物の安定性の問題を例として取り上げ、個別有限要素法解析を行って、これらの不連続性構造物の挙動について説明する。さらに、提案された個別有限要素法が、不連続性を有する構造物の不連続的な挙動を解明するために有効であることを示す。

## 2. 個別有限要素法の定式化

### 2.1 個別有限有限要素法の定式化

不連続面と岩盤ブロックの構成則は、線形範囲内で Kelvin-Voigt 型であるとし、物理空間で運動量保存則を有限要素法に基づいて定式化すると下記のようなになる。

$$[M]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (1)$$

ここに

$$[M] = \int_{\Omega} \rho [N]^T [N] d\Omega, [C] = \int_{\Omega} [B]^T [V] [B] d\Omega,$$

$$[K] = \int_{\Omega} [B]^T [D] [B] d\Omega$$

$$\{F\} = \int_{\Omega} [\bar{N}]^T \{\bar{f}\} d\Gamma + \int_{\Omega} [N]^T \{b\} d\Omega$$

上式を時間空間でさまざまな手法で離散化した場合、下記のような連立方程式が得られる。

$$[\bar{K}]\{U\}_{n+1} = \{F\}_{n+1} \quad (2)$$

たとえば、中心差分法を用いた場合、上式における行列  $[\bar{K}]$  とベクトル  $\{F\}_{n+1}$  は、具体的に次のような形になる。

$$[\bar{K}] = \frac{1}{2\Delta t} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C]$$

$$\{F\}_{n+1} = \left( \frac{2}{\Delta t^2} [M] - [K] \right) \{U\}_n$$

$$- \left( \frac{2}{\Delta t^2} [M] - \frac{2}{2\Delta t} [K] \right) \{U\}_{n-1} + \{F\}_n$$

### 2.2 不連続面のモデル化

岩盤の不連続面やブロック表面は、スケールがことなる多少の凹凸を有する (図 1)。不連続面を力学的にモデル化する際にさまざまなモデルは提案されているが、個別有限要素法では、不連続面を厚みを有する薄帯 (バンド) としてモデル化し、その薄帯の各応力・ひずみ・ひずみ速度の成分を次のように定義している。

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A}, \epsilon_n = \frac{\delta_n}{h}, \dot{\epsilon}_n = \frac{\dot{\delta}_n}{h}, \tau_s = \frac{F_s}{A}, \gamma_s = \frac{\delta_s}{h}, \dot{\gamma}_s = \frac{\dot{\delta}_s}{h} \quad (3)$$

ここで  $A$  および  $h$  は薄帯の面積および厚みである。一般的に不連続面の構成則を線形挙動の場合 Kelvin-Voigt 型であるとし、非線形挙動の生じると粘弾塑性としている。

\* 東海大学海洋学部 教授

\*\* 琉球大学工学部

\*\*\* North Dakota University, Upson, USA

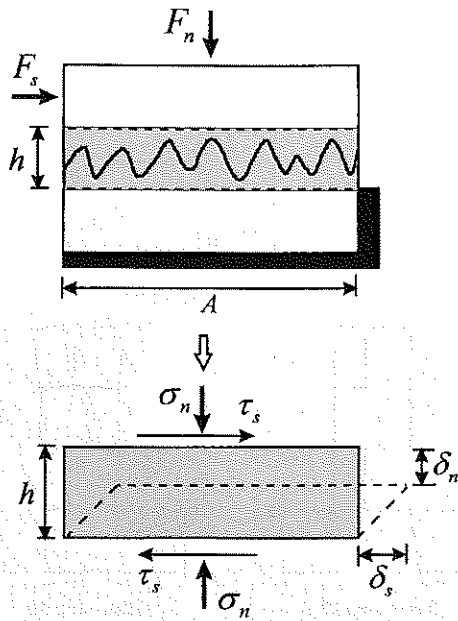


図1 不連続面の力学的モデル化

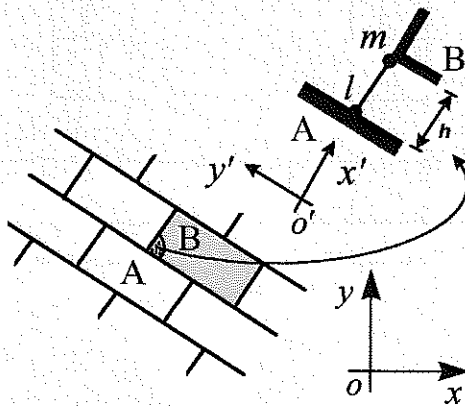


図2 接触要素の解析モデル

DFEM法では、不連続面を接触(コンタクト)要素を利用して表現し、図2のようにブロックAとブロックBのブロック接触節点間にコンタクト要素が存在しているものとしている。要素内の変位場を、下記のように与えることができる。

$$\begin{Bmatrix} u' \\ v' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_i U_i + N_m U_m \\ N_i V_i + N_m V_m \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに  $N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi)$ ,  $N_m = \frac{1}{2}(1 + \xi)$ ,  $\xi = (2x' + x'_i + x'_m)/h$ ,  $h = (x'_i - x'_m)$

局所座標系における各ひずみ成分は、下記のように表わされる。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon'_n \\ \gamma' \end{Bmatrix} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ U_m \\ V_m \end{Bmatrix} \quad (5)$$

または  $\{\epsilon\} = [B]\{U\}$

局所座標系における剛性および粘性行列は

$$[K] = \begin{bmatrix} k'_n & 0 & -k'_n & 0 \\ 0 & k'_s & 0 & -k'_s \\ -k'_n & 0 & k'_n & 0 \\ 0 & -k'_s & 0 & k'_s \end{bmatrix}, \quad [C] = \begin{bmatrix} c'_n & 0 & -c'_n & 0 \\ 0 & c'_s & 0 & -c'_s \\ -c'_n & 0 & c'_n & 0 \\ 0 & -c'_s & 0 & c'_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。ここに、

$$k'_n = \frac{EA}{h}, \quad k'_s = \frac{GA}{h}, \quad c'_n = \frac{E^*A}{h}, \quad c'_s = \frac{G^*A}{h}, \quad A: \text{接触面の面積である。}$$

局所座標系で表わされた剛性・粘性行列は、全体座標系に次のように変換される、

$$[K] = [T]^T [K'] [T], \quad [C] = [T]^T [C'] [T] \quad (7)$$

ここに、

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

である。

非線形解析に関しては、各ステップごとに各要素の降伏状況をチェックし、降伏が発生した場合その残差荷重を求め、各接点の変位をその接点の座標に追加し、非線形構成則にしたがって剛性行列を再度求め、次の解析ステップに移る。方法論的に、本手法は、Updated Lagrangian型である。

### 3. 適用例と考察

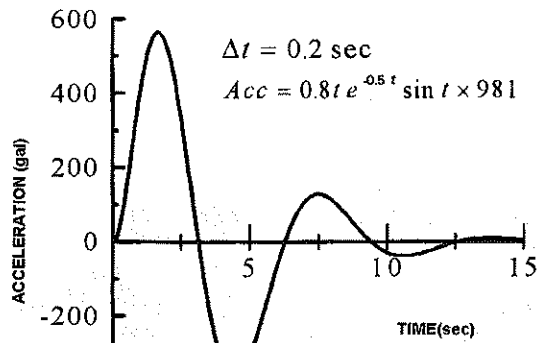
ここで、簡単に上記で紹介したDFEMの適用例を紹介する。最初のいくつかの適用例は、慣性項を考慮した適用例であるが、その後の適用例においては、慣性および粘性性質に関連する部分を強制的に無視する。その場合、各解析ステップを擬似時間ステップと見なす。

#### 3.1 慣性項を考慮した適用例

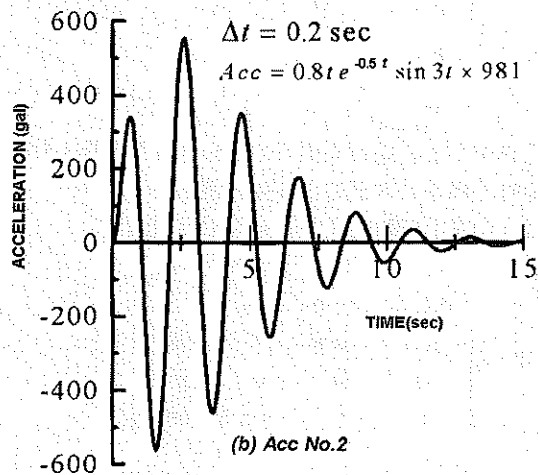
ここでは、石積み構造物として壁とアーチを例にとり、行った解析結果を紹介する。解析の際用いた物性値を表1に示す。また、構造物に作用させた加速度記録を図3に示す。時間ステップを0.2sとして行った解析結果を図4お

表1 解析に用いた物性値

Material	$\lambda$ (MPa)	$\mu$ (MPa)	$\lambda^*$ (MPa·s)	$\mu^*$ (MPa·s)	t (mm)	$\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> )	c (MPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_t$ (MPa)
Solid	30	30	30	30	—	25	—	—	—
Interface	5	2.5	5	2.5	5	—	0.0	35	0.0



(a) Acc No. 1



(b) Acc No. 2

図3 振動解析に用いた基盤の入力波形

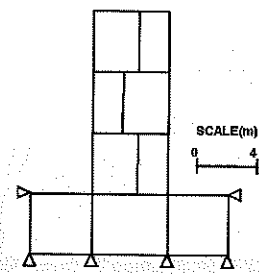
よび図5に示す。実際に観察される挙動に類似した解析結果が得られていることがわかる。このような解析における大きな問題は、数値積分に伴う解析の安定性である。また、ブロックが弾性体である場合、ブロックの振動が継続的に起こる。そこで、次節では、慣性項を無視して行った解析結果を紹介することとする。

### 3.2 慣性項を無視した適用例

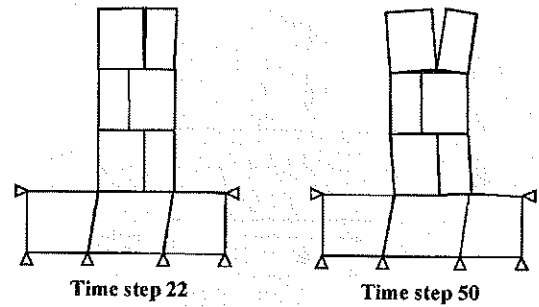
#### (1) 斜面上に横たわる岩石ブロックの安定挙動

個別有限要素解析によって、岩盤の動きをとらえる最初の例として、斜面上に横たわる単独の岩石ブロックの安定性について取りあげる (Tokashiki et al. 1997)<sup>3)</sup>。この問題は、岩盤斜面上の落石のメカニズムを考える基本的なモデルである。この例題を取りあげたもう一つの理由は、個別有限要素解析によって予測されるブロックの挙動が、正しく評価されているかを検証することにある。斜面上に横たわる単一ブロックの挙動については、力学的な理論解析から (Aydan ら, 1989)<sup>4)</sup>、その挙動が求められており、この理論解析による挙動と、個別有限要素解析による挙動を比較することによって、個別有限要素解析法の適用の有効性を検証する。

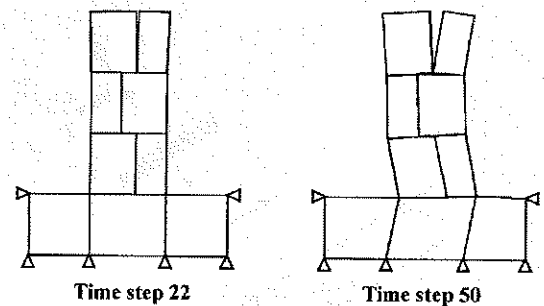
図6に、岩盤斜面上に横たわる岩石ブロックのモデルを示す。斜面の傾斜角は、水平面からの角度で与えられ、岩石ブロックの形状は、幅  $W$  および高さ  $H$  の角柱体であ



(a) Initial Configuration



(b) Acc. No. 1



(c) Acc. No. 2

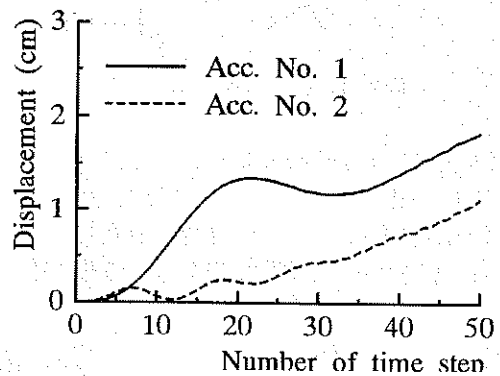


図4 石積み壁の応答

る。このブロックの挙動は、斜面傾斜角、ブロックの形状比 (ブロック高さ  $H$  / ブロック幅  $W$ )、および接触特性 (摩擦角、鉛直剛性、せん断剛性など) の関係によって異なる。図6に示す斜面上の岩石ブロックモデルについて、安定性に関わる要因をパラメータとして、個別有限要素解析による安定挙動を検討した。図7に、すべり破壊とトップリング破壊しているブロックの計算された応答を例として示す。図8に、理論解および安定挙動の解析結果を示す。図のように、理論解による安定挙動の各領域を実線で区分してあり、また、個別有限要素解析によって予測されたブロックの挙動を、それぞれプロットしている。数値解析によって求められたブロックの動きは、それぞれ、理論解が示

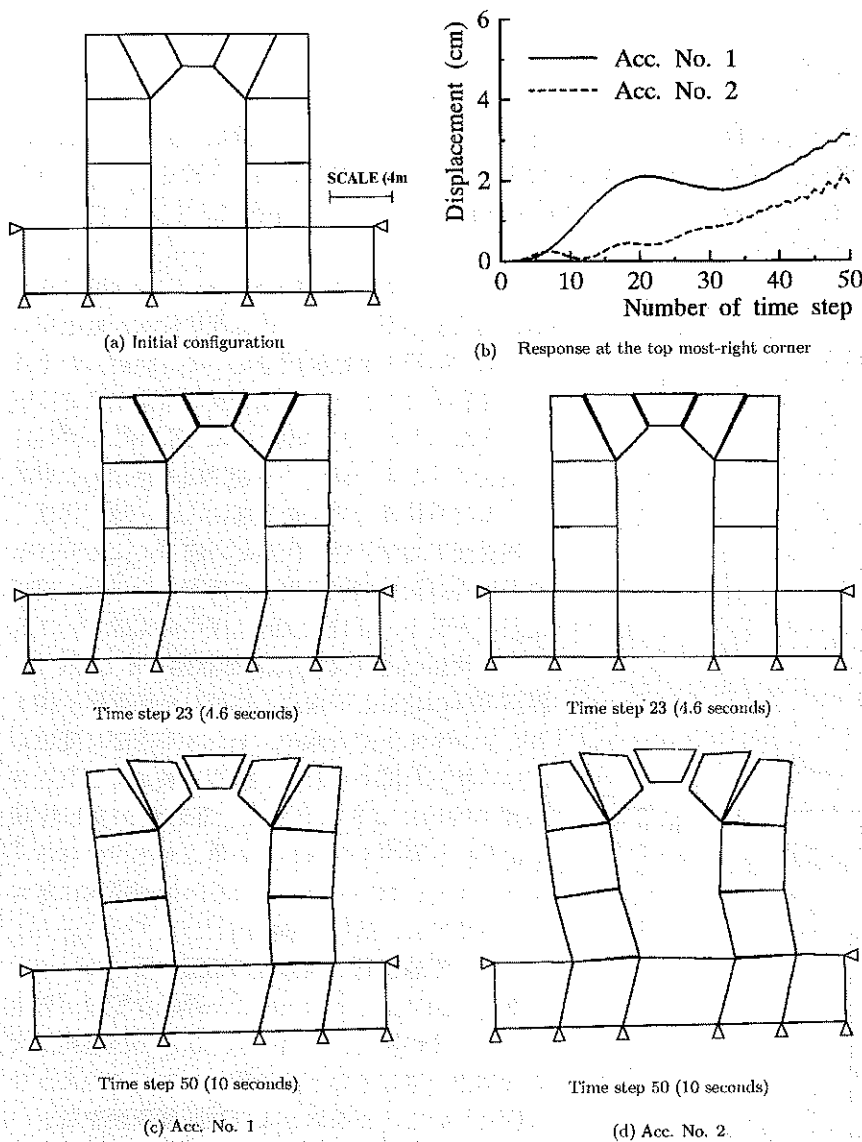


図5 石積みアーチの応答

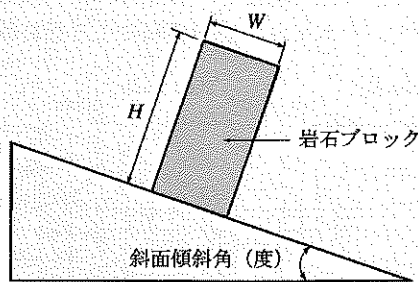


図6 斜面上のブロックに対する幾何学条件

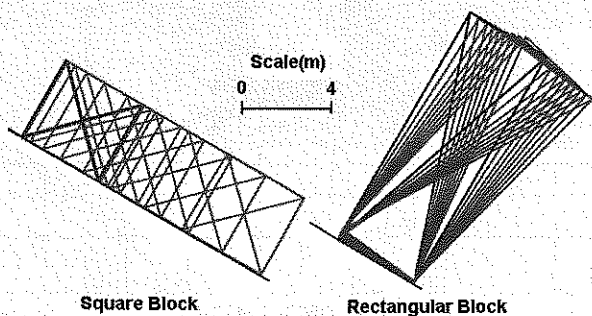


図7 ブロックのすべりおよびトッピング破壊時の運動

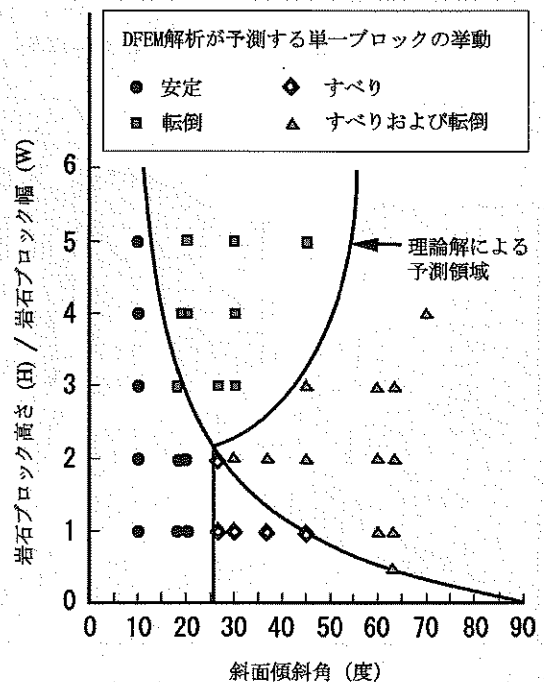


図8 斜面角度とブロックの破壊モードの関係

す状態の各領域で正しく評価されており、個別有限要素解析手法の有効性が確認された。

### (2) 斜面の平面および円形すべり破壊

ここでは、斜面の平面あるいは円形すべり破壊を起こす条件と同時に、極限解析法の妥当性を検証するため行った解析結果を紹介する（詳細については Aydan et al. 1997 を参照<sup>5)</sup>。両解析例に関して用いた物性値を表 2 に示す。それぞれの破壊モードに関して得られた解析結果を、図 9 および図 10 に示す。同斜面破壊モードに関して極限解析法より得られた傾向は同様であった。

### (3) 老朽化した素掘りトンネルの安全性

平成 8 年 2 月 10 日に発生した北海道豊浜トンネルの岩盤崩落事故をきっかけに、当時の建設省が、全国のトンネルの緊急点検を実施した。沖縄においても、県下のトンネルの一斉点検が行われ、現況調査の結果、危険と判断されたトンネルが指摘され、早急な安全対策が求められた。ここでは、対象となったトンネルについて、補修の可否を判断する力学的な安定性の評価を目的として、模型実験と個別有限要素解析により、安定性の検討を行ったので、簡単に紹介する。

安定性の評価を行ったトンネルは、



70年ほど前に建設された長さ約15m、地山かぶり約10mの素掘りのトンネルである。トンネルの安定性の検討に先立ち、トンネルの現況調査と地質調査を実施した。トンネル周辺の地質状況を図11に示す。トンネル周辺は、固結度の低い砂岩層が分布しており、図のような層理構造と発達した節理面が認められた。トンネル内壁には、これらの数

条の開口亀裂が確認されており、点検の際の目視調査から、危険性の高いトンネルと判断されている。

安定性の検討では、トンネル周辺岩盤の風化の進行や、雨水の浸透による節理面のさらなる開口や発達を考慮し、これらの要因に対応したきびしい条件を設定して、実験および解析の両面から周辺岩盤の挙動をとらえることにした。

表2 解析に用いた物性値

Material	$\lambda$ (MPa)	$\mu$ (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (MPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_t$ (MPa)
Solid	10	10	23	—	—	—
Fault	0.3	0.3	—	0.0	20	0.0

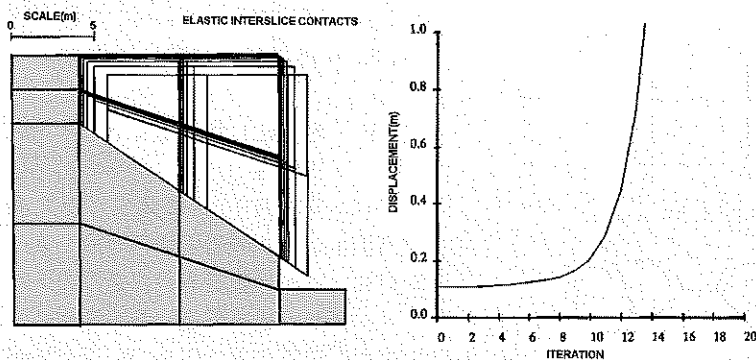


図9

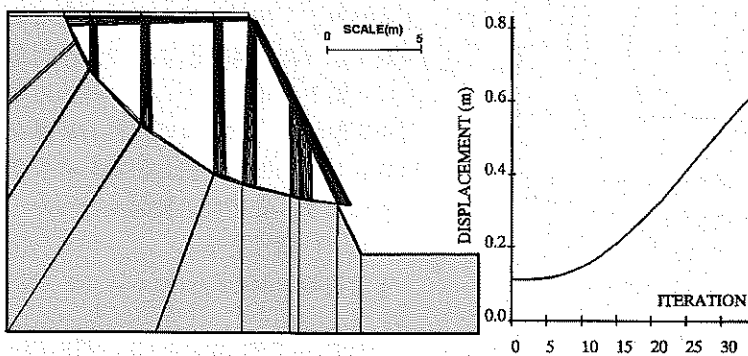


図10 平面および円形すべり破壊時の運動

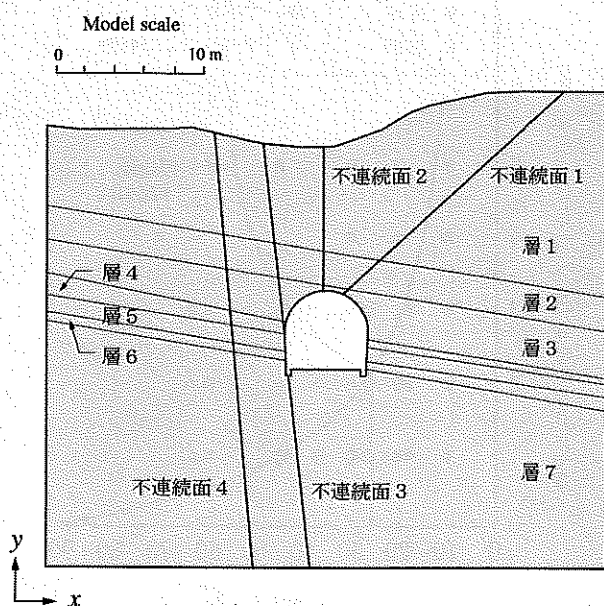
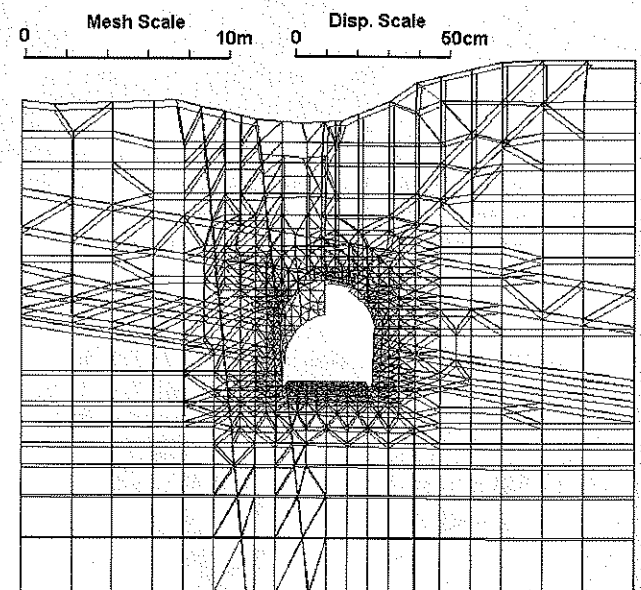


図11

実験では、筆者らが開発した、二次元的に岩盤構造物模型の重力場における変形状が観察できる底面摩擦模型実験装置を用いて、卓越した不連続面を有するトンネル上部岩盤の自重による変形状を調べた。一方、解析では、図11に示す地山の地質条件および風化や不連続面の長期的な要因による材料特性の変化を考慮に入れ、地山物性と不連続面の力学特性を仮定し、自重による変形状を個別有限要素法を用いて解析を行った。解析結果の一例を、図12に示す。図中の太線で示されている状態が、解析による変形状を示している。模型実験の結果と同様に、卓越した節理面で挟まれたトンネル上部岩盤が、トンネル内部に変位している状況が認められる。模型実験および個別有限要素解析によるトンネル上部岩盤の変形状が、たいへん良く一致している点が注目される。本トンネルにおいては、これらの検討結果に基づいて、すでに、適切な補修が行われている。

#### (4) 断層運動と構造物の相互作用

断層運動によって地表面に不連続な変形が発生しうる。その場合、断層の直上にある構造物が大きな損傷を受けることが予想される。このような問題について、正断層および逆断層運動を断層の上盤に強制変位を与えることによって再現し、鉄塔のようなトラスで構成されている上部構造物との相互作用を検証した。用いた材料定数を、表3に示す。それぞれの断層運動による最終的な変形の



DEFORMED CONFIGURATION

図12 老朽化した素掘りトンネルの変形挙動

様子を、図13および図14に示す（詳細についてAydan 2003を参照<sup>6)</sup>）。この解析結果と実際に観察された被害例がよく類似していることがわかる。

### (5) 石積みアーチ構造の安定解析

石積みアーチ構造は、石材の強度特性を上手に活かした構造体であり、橋、門や建築物などの石積み構造物にしばしば利用されている。沖縄でも、城の石造拱門や、石橋などの構造に多く見られる。しかし、これらの中には、地震などによって、崩壊の危険があるものも報告されており、安全性の評価が求められている。一方、県内の城址において、石造拱門の復元が予定され、アーチ構造の安全性の確認が求められている。このようなことから、石積みアーチ構造の力学的な安定性を考える最初の検討として、基本的な石積みアーチ構造のモデルを作り、筆者らが提案してい

る個別有限要素解析による数値解析を行って、種々の条件下における石積みアーチ構造の基本的な力学的挙動について検討した。ここでは、基本的石積みアーチ構造モデルの自重場の静的挙動と、地震時の水平荷重に相当する水平力載荷による挙動について、簡単に紹介する。

解析を行った石積みアーチ構造モデルを、図15に示す。図15(a)は、石積みアーチ構造に、積み石の自重と、アーチ上部より等分布荷重が作用した時のアーチ構造の動きを検討するモデルである。一方、図15(b)は、同じアーチ構造に、自重と水平荷重が作用したときの挙動を求めるケースである。積み石の寸法は、幅60cm、高さ80cmの角ブロックとし、図に示すように、積み上げられているものとする。また、アーチ部は、中央部で合わせた2つのアーチブロックより組み合わせられた、単心円状の形状とする。アーチ部の形状寸法は、スパン180cm、幅 $H=21$ cm、ライズ長 $R=48.3$ cmと仮定している。なお、ケース(b)の載荷状態は、地震時に作用する水平力を想定し、石積み自重の0.2を水平載荷重として載荷している。石積みアーチ構造モデルの解析に用いる積み石および石積みブロック間の接触部における材料、力学特性を、表1に示す。解析モデルの境界条件は、石積み構造と地盤の接触領域において、

表3 解析に用いた物性値

Material	$\lambda$ (MPa)	$\mu$ (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (MPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_t$ (MPa)
Solid	2000	2000	26	—	—	—
Fault	50	50	—	0.0	40	0.0

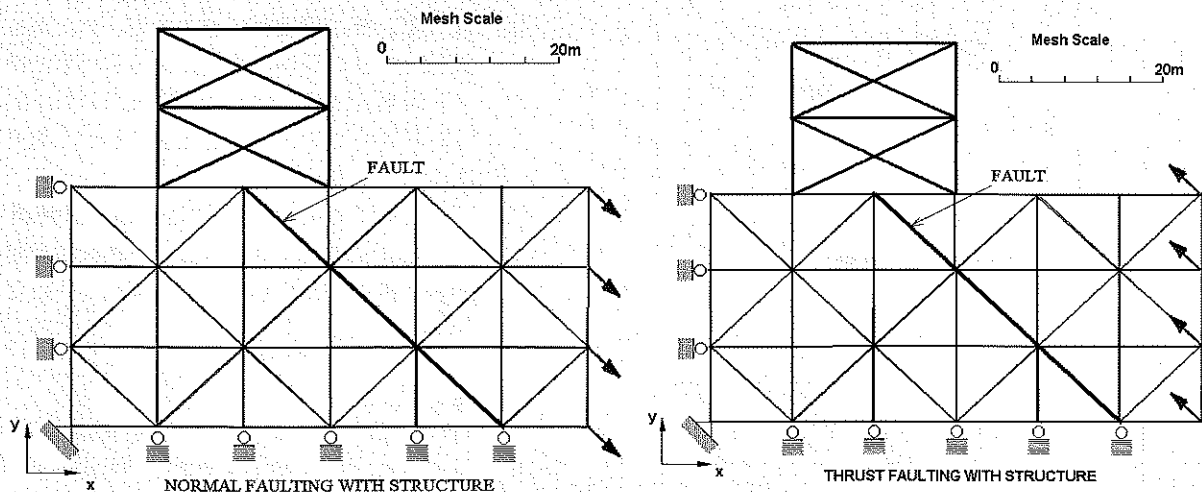


図13 解析に用いたメッシュと境界条件

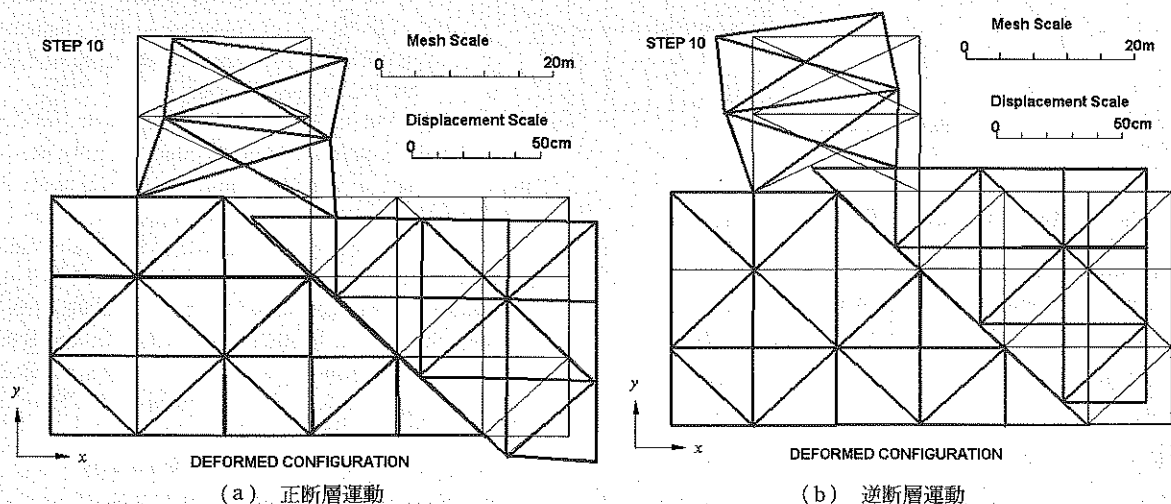
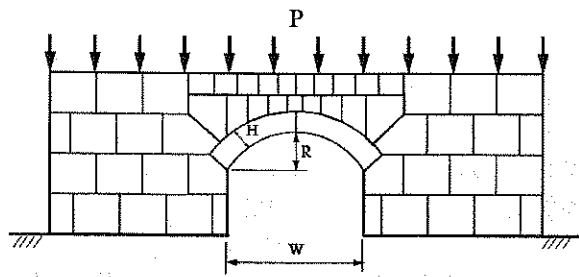
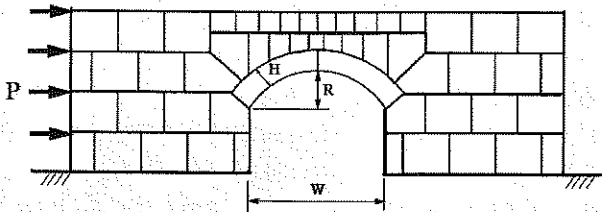


図14 正断層運動および逆断層運動に伴う構造物の挙動



(a) 自重+分布荷重載荷ケース



(b) 自重+水平力載荷ケース

図 15 石積みアーチの荷重条件

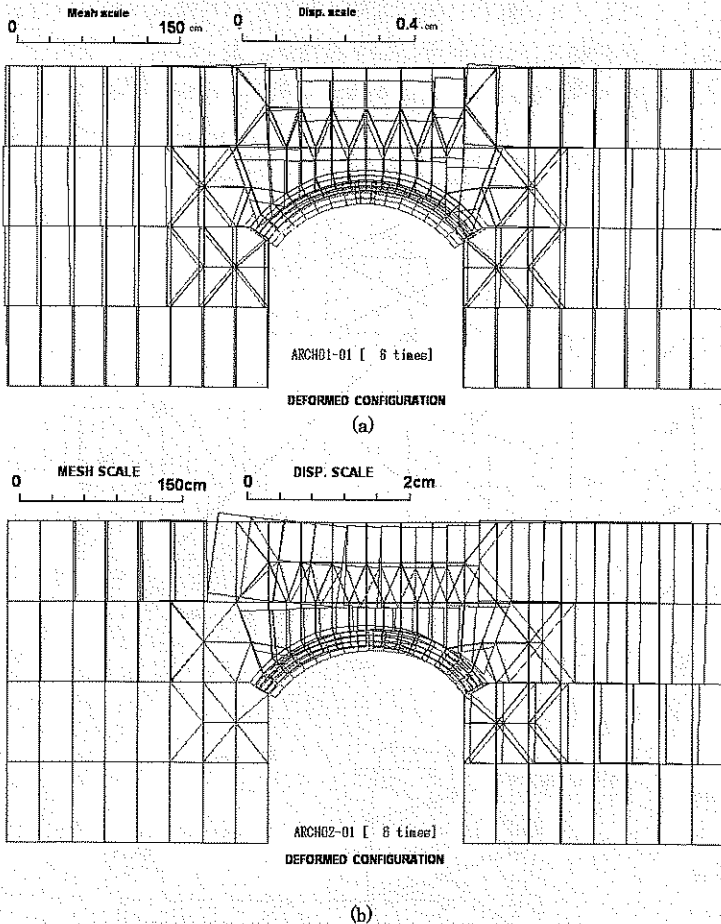


図 16 異なる荷重条件下で石積みアーチの変形挙動

水平方向の移動を、接触剛性に対応させて許している。また、石積み構造の側面の拘束は、自由に行っている。なお、図 15 に示した解析モデルについて、アーチ部の形状寸法、積み石間の接触条件や、石積み構造の底部および側面の拘束条件を組み合わせる解析を行っている。この解説では、一部の解析ケースにおける解析結果について述べることにする。

図 16 に、両載荷条件に対する変位および応力状態を示

す。自重解析および地震時水平力載荷解析が示す変位、応力挙動は、それぞれ、荷重載荷方向に対応した変位と、アーチ内部の応力発生がみられ、石積みアーチ構造の挙動として注目される。このような石積みアーチ挙動に類似した実際の変状例を、図 16 に示しておく。

#### 4. おわりに

岩盤構造物や、石積み構造物の力学的な挙動の解明には、いずれも、不連続な物体としての扱いが必要であり、筆者らは、個別有限要素解析手法を提案して、種々の不連続性の岩盤の挙動について検討を行っている。ここでは、問題となっている岩盤構造物および石積み構造物の例を通して、その力学的な挙動をモデル解析により検討し、個別有限要素解析の有用性を紹介した。

不連続性の概念を取り入れた数値解析手法の研究は、コンピュータの発達とともに、高度化、多様化し、その精度は、確実に向上している。しかしながら、岩盤は、大小さまざまな不連続面を有する物体であり、母岩や不連続面の複雑な力学特性、幾何学的特性の把握と、風化や雨水の浸透に起因する亀裂面の開口、劣化などの長期的要因に関わる力学特性の変化など、その評価が困難である。したがって、不連続性岩盤の問題の検討には、解析手法のみならず、問題を支配している不連続面の力学的、幾何学的特性をどのように評価するかが、重要な問題となっている。

今回紹介した不連続性岩盤の挙動解析を通して、解析法に対する理解と、不連続性岩盤の問題解決の課題が、少しでも、理解していただければ幸いである。

#### 参考文献

- 1) Aydan, Ö., Shimizu, Y. and Ichikawa, Y.: The Effective Failure Modes and Stability of Slopes in Rock Mass with Two Discontinuity Sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22(3), 163-188, 1989.
- 2) Aydan, Ö., Mamaghani, I. H. P. and Kawamoto, T.: Application of discrete finite element method (DFEM) to rock engineering structures, NARMS '96. pp. 2039-2046, 1996.
- 3) Cundall, P. A.: The Measurement and Analysis of Acceleration in Rock Slopes. Ph. D. thesis-University of London (Imperial College), Feb., 1971.
- 4) Kawamoto, T. and Aydan, Ö.: A review of numerical analysis of tunnels in discontinuous rock masses. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 23, 1377-1391, 1999.
- 5) Mamaghani, I. H. P., Baba, S., Aydan, Ö. and Shimizu, S.: Discrete finite element method for blocky systems, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, IACMAG, Morgantown, 1, 843-850, 1994.
- 6) Shi, G. H.: Discontinuous deformation analysis: a new numerical model for the statics and dynamics of block systems. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., University of California,

Berkeley, 378 p., 1998.

- 7) 渡嘉敷直彦・アイダン オメル・清水泰弘・川本眺万：個別有限要素法 (DFEM) による不連続性岩盤および石積み構造の力学的安定性評価, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム論文集, 岩の力学連合会, 2002.1.
- 8) 渡嘉敷直彦・アイダン オメル・清水泰弘：不連続性岩盤の動きを探る, 一個別有限要素法 (DFEM) によるモデル解析一, 建設情報誌「しまたてい」, No. 17, pp. 42-46, 2001.
- 9) 渡嘉敷直彦・アイダン オメル・清水泰弘：石積み構造物の力学的安定性を考える, 一石積み構造モデルの解析と模型実験の実施一, 建設情報誌「しまたてい」, No. 22, pp. 42-46, 2002.
- 10) Tokashiki, N., Aydan, Ö., Shimizu, Y. and Kawamoto, T.: The assessment of the stability of a very old tunnel by discrete finite element method (DFEM), Numerical Methods in Geomechanics, NUMOG VI, Montreal, pp. 495-500, 1997.
- 11) Tokashiki, N., Aydan, Ö., Mamaghani, I. H. P. and Kawamoto, T.: The stability of a rock block on an incline by discrete finite element method (DFEM), Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Wuhan, China, Vol. 1, pp. 523-528, 1997.
- 12) Tokashiki, N., Aydan, Ö., Shimizu, Y. and Mamaghani, I. H. P.: A stability analysis of masonry walls by discrete finite element method, Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Tucson, Arizona, USA, Vol. 2, pp. 1625-1628, 2001.



# 地圏水循環系プロセス統合型モデルによる 流域シミュレーション

と 登坂 博行\*

## 1. はじめに

水圏→気圏を経由する水（水蒸気）の大循環は、我々の住む地圏（陸域を主体とし気圏と水圏の一部を含む生活圏）において、動植物に必須の恵みをもたらすと同時に、時として大きな災いを与えるものでもある。近年、このような自然の水循環の様相が人間活動により変化しつつあると考えられ、国連等により世界的な水問題（水危機）の深刻化が警告されていることは良くご存知のことと思う。

水問題には時空スケールのさまざまなものがあり、いずれも現状の把握・評価と将来予測が必要なものである。すなわち、自然から人間が受ける恩恵を最大化しつつ、そこから受ける被害を最小化し、また人間から自然環境への加害を抑制し調和を図ることが必要となる。しかし、自然本来が持つ大きな曖昧さ、人間自体の無知、不確定な将来変動が含まれた水問題の的確な予測は、大変に難しいものがある。

地圏の水問題の科学的評価には、①蓄積された自然科学の知識・経験、②各種観測・探査によるフィールド情報、③それらを取り込んだ数値解析技術が必要である。本論では、③に関し筆者らの開発している水問題評価技術の概要、およびそれによる解析事例を紹介する。読者の中には、流出解析や地下水解析を実際に手がけた方も多数居られると思われるが、新しい視点での流域評価方法について知って頂ければ幸いである。

なお、本論では、地圏における水の動きを扱うため、以降“地圏水循環”、“地圏水問題”などと記述することにす

## 2. 評価を要請される水問題

地圏水問題は大きく、水資源問題（水の確保、枯渇・争奪、砂漠化などの回避）、水環境問題（汚染の防止、悪影響の回避）、水災害問題（洪水氾濫、土砂災害の防止）に分けられる。また、各々は大きな地域スケールから局地スケールまでさまざまなスケールの問題を含んでいる。表1には、

筆者なりに実際に評価が要請される問題をリストアップしてみた。

水資源問題としては、たとえばダム開発、島などの淡水資源確保、乾燥地などの地下水開発計画、自治体レベルの表流水・地下水総合管理の検討などが挙げられる。水環境問題としては、人間活動による水の汚染、たとえば生活排水などによる地表水の汚染（富栄養化）、地下水の汚染（肥料、農薬、油分、有機塩素系溶剤など）、人間活動による水環境変化（農業活動、大規模なダム、トンネル・道路、地下街、産業廃棄物処分施設など）が対象となる。水災害問題としては、豪雨時の洪水氾濫、土石流や土砂崩れなどの土砂災害がある。近年は、世界各地では大変に大きな洪水氾濫が起っており、ダムや河川の整備されたはずの日本も例外ではない。

## 3. 地圏水循環プロセスの統合型モデル

地圏水循環は、水を主体とした物理過程として見ると、図1に示したように、大きくは降水プロセス、遮断プロセス、蒸発散プロセス、地表流動プロセス、地下流動プロセスに分けられる。さらに随伴する固体の崩壊・運搬・堆積過程を加えた総体を水文地質プロセスと呼ぶ。

筆者らは、これら諸プロセスを包含した数理モデルの開発を進めているところである。ここでは、その基本となる地表水・地下水の統合的表現に関して、必要性および数式的取り扱いを説明したい。詳細に関しては末尾文献を参照して頂ければ幸いである。

### 3.1 基本表現の問題点

我々が地圏水循環を考える時、その主役は液相水、すなわち表流水と地下水である（遮断や蒸発散は若干脇役である）。

従来の研究の流れは大きく二つあり、一つは表流水解析（洪水流出解析、河川・湖沼内流動）を主体としたもの、もう一つは地下流動解析（地下水、石油・ガス、地熱）を主体としたものである。

読者の中で地下水解析の経験がある方は、地表からの降雨涵養の見積もりが地下水位形成に大きく関わることを知

\* 東京大学大学院助教授 工学系研究科

表1 地圏水問題と現状評価・将来予測の具体的内容

分類	対象	モデリングによる評価・予測内容
水資源問題	表流水資源量評価	ダム貯水量予測, 濁水予測, ダム周辺自然環境影響評価
	地下水資源量評価	資源量推定, 井戸配置, 最適取水計画, 地盤沈下予測
	島・沿岸域淡水資源量評価	沿岸域, 島における淡水利用対策 (地下ダム等貯水施設)
	その他水資源開発	乾燥地, 沙漠などの表流水・地下水資源探査・評価・利用最適化
水環境問題	溶質汚染評価	農薬, 肥料, 無機溶質, 重金属, 生活排水などによる汚染域の推定, 対策立案
	油分・有機塩素系溶剤汚染評価	工場等の有機塩素系溶剤地下侵入, 石油系物質による地下水汚染の範囲・汚染度推定, 対策効果検討
	自然汚染評価	砒素, 酸性水等地層含有物の溶出汚染, 沿岸・島における地下水塩化, 乾燥地の塩類集積
	地表・地下利用に伴う影響評価	道路・トンネル・地下施設等による地下水・表流水環境変化, 生態系変化などの影響予測
	流域生態系・環境保全に関する評価	河川・湖沼・地下水・生態系の広域・局地環境評価 湖沼富栄養化, 国立公園, 環境保全域の長期的環境予測
	都市域水循環評価	都市河川汚染, 下水道網, 地下構造物と都市域地下水
	廃棄物処分安全性評価	産業廃棄物処分 (建設位置・規模, 安全性・環境影響予測), 放射性廃棄物地層処分 (淡水・海水相互作用, 長期自然変動下の流動場予測)
	その他の環境評価	河川・湖沼・地下水系の相互影響評価, 熱の輸送, トレーサー水文学的評価 (H, O, Cなどの同位体の追跡)
水災害問題	洪水予測	降雨・流出応答予測, 危険地点予測, 洪水規模予測, 河川改修効果予測
	斜面崩壊, 地すべり	豪雨時地下水位上昇による斜面崩壊位置, 崩壊規模予測
	土石流, 泥流	発生位置予測, 流下被害域予測
	その他の災害問題	砂の流送・堆砂, など

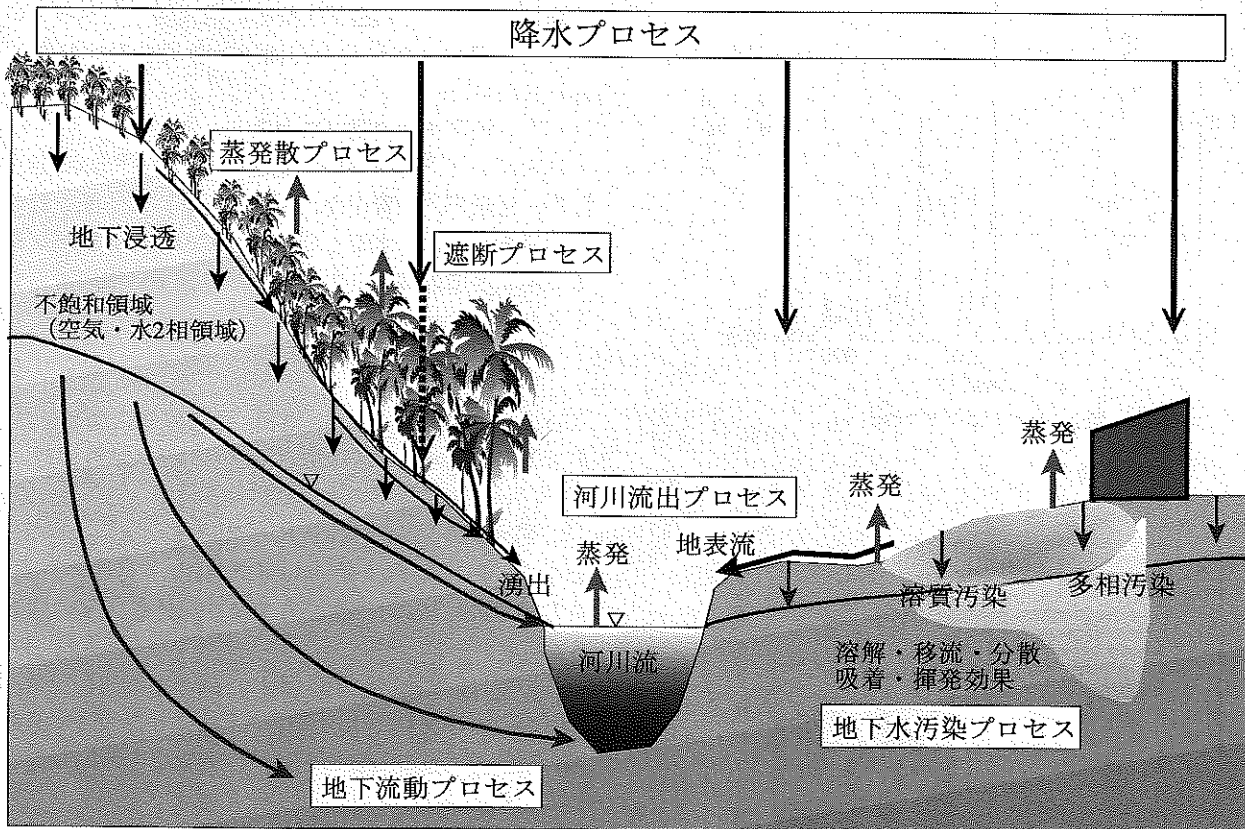


図1 地圏水循環プロセスの概念図

っておられよう。しかし、地下水解析ソフトでは地表からの涵養量・河川の影響は別に計算して規定せざるを得ない。また洪水解析に携わられた方は、河川流れに地下水流出(基

底流出)を考慮するが、地下水理構造を細かく表現はしないし、実際に細かく水理表現できるようになっていないことをご存知と思う。

以上の事情は、地表水と地下水の流れの物理・数学的表現が異なり、両者の相互作用を水理的に連成するのは難しいため避けられてきたことにある。また、実用評価上は大きな問題と考えられず、多少不自由ながらも受け入れられてきたものである。

地表と地下の往來を場所ごとの地形条件、地質条件、地下状態に従って水理的に表現することは、水循環系の連続性を表現するうえで本質的に重要であろう。それを実現することにより、流域流動系全体が追跡可能となり、その内部現象としての流出現象から環境・災害まで包括的に扱うことができ、結果的に現象のより深い理解、より信頼性のある評価につながると考えられる。

### 3.2 流れの表現

#### (1) 地表流・河川流れ

降雨が山岳地において集められ河川流出に転換される過程は、その時間的速さから、表面流出・中間流出・地下水流出などに分けられることが多い。この和として図2のような河川流量記録(ハイドログラフ)が得られることになる。

斜面の地表流、河川の流れは、図3のような「自由水面

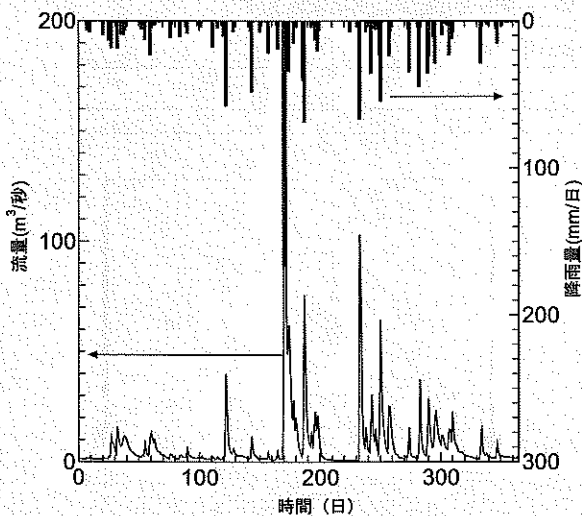


図2 ハイドログラフの例

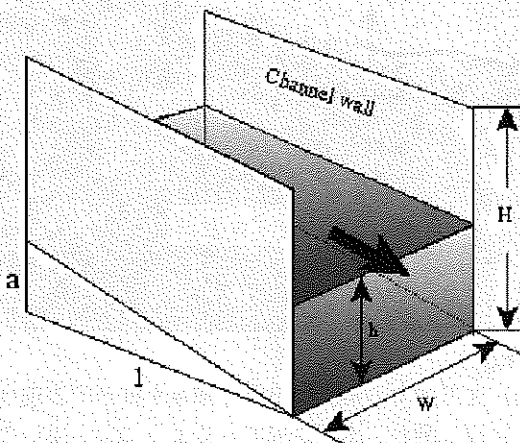


図3 開水路流れの模式図

を持つ浅い水深の開水路内の流れ」として近似される。開水路の流れは運動量保存則と質量保存則により記述されるが、水文学的にはそれを完全に解くことは労多くしてほとんど意味を持たない。そこで、河川、あるいは山地斜面などの傾斜の比較的大きな地表面上を流れる水深の浅い水流は、次の開水路におけるマニング (Manning) の平均流速公式により見積もることが多い。

$$v = \frac{R^{2/3}}{n} \sqrt{\left| \frac{\partial z}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[ \frac{\partial z}{\partial x} \right] \quad (1)$$

ここで、 $R = Wh / (W + 2h)$  (矩形水路の場合) は径深 (図3参照)、 $x$  は河床に沿った軸、 $z$  は河床標高、 $n$  はマニングの粗度係数、 $\operatorname{sgn}$  は [ ] 内が正か0の時1、負の時-1である。これは、傾斜による下方への重力と壁面からの摩擦力が釣り合った流れである (この近似をキネマティックウエーブ近似と称する)。また、傾斜の小さい水路では水深の差が水の駆動力となるので、それを考慮すると前式の  $(\partial z / \partial x)$  を水深を考慮した  $\partial z / \partial x + \partial (h \cos^2 \theta) / \partial x$  で置き換えればよい (拡散波近似)。ここで、 $h$  は水深、 $\theta$  は河床傾斜である。

粗度係数の値は、一般的な河床では0.01~0.04程度(自然河川ならおおよそ0.025程度と考えればよい)である。草地や森林地の表面の粗度係数(等価粗度係数)は、ずっと大きくなる。

河川は蛇行、渦、河床の乱れなどがあり、このような式が成り立つとはとても思えないのであるが、平均流量としてのハイドログラフは結構うまく再現できることが多い。これは、多数の分布型流出解析の研究からわかっている。

より一般化した表現の詳細は参考文献1)~4)をご覧ください。

#### (2) 地下多相流動プロセス

地表面から下方への地下浸透は、地下媒体の水理特性(間隙率、浸透率、毛管圧力、相対浸透率)に支配される。地下の降雨浸透は、水の不飽和状態での流下(空気が存在する2相状態での流下)であり、その様子は次のような一般化されたダルシー則で表現される。

$$v_p = - \frac{K k_{rwp}}{\mu_p} \frac{\partial \Psi_p}{\partial x} \quad (2)$$

ここで、添え字  $p$  は水相、気相、汚染原液相などを表わし、 $K$  は浸透率 [ $m^2$ ]、 $k_r$  は相対浸透率、 $\mu$  は粘性係数、 $\Psi$  はポテンシャルで以下のように書ける。

$$\Psi_p = P_p + \rho_p g z, \quad P_p = P_n - P_{cp} \quad (3)$$

となる。ここで、添え字  $n$  は非濡れ相、 $\rho$  は流体密度、 $g$  は重力加速度、 $P_{cp}$  は毛管圧力であり流体飽和率の関数である。

この形は、飽和地下水の流れ、降雨の不飽和浸透、不飽和帯の空気の流れ、水が気相や石油などと同時に流動する場合(多相流れ)も含んでおり、非常に一般的な表現となっている。

#### (3) 地表と地下の水の往來

地表と地下の水の往來は、地表水のポテンシャルと地下水のポテンシャルの差によって起こる。地表水のポテンシャルは地表面にかかる水圧から計算でき、直下の多孔

表2 地表・地下の流れの型分類

流れの種類	流れの領域	流れの型
地表の浅水流	自由空間中	マニング型
河川の流れ	自由空間中	マニング型
トンネル内の流れ	自由空間中	マニング型
速い中間流出	パイプ中と地質媒体中	混合型
降雨の地下浸透	自由空間から地質媒体へ	ダルシー型
地下水の湧出	地質媒体から自由空間へ	ダルシー型
地下の流れ	地質媒体中	ダルシー型
割れ目中の流れ	パイプ中+地質媒体中	混合型

質体の水理ポテンシャルは気相圧力、飽和率、毛管効果を基に表現できる。この勾配によりダルシー型流動による相互交換が行われると考えられる。他の流体についても同様である。具体的な計算法は参考文献4)を参照いただきたい。

### 3.3 流れの連成解法

#### (1) 流れの種類と一般化

表2に水循環系の液相流動の種類を示した。流れは、マニング型、ダルシー型、混合型に分けられる。混合型は一般的には高速のダルシー流れと見て良い。

河川や地表を覆う洪水などの流れは、自由水面を持つ水深の比較的浅い乱流状態の流れであり、マニング型と考えられる。地下は基本的にダルシー的な流れである。浸透や湧出現象は地下を通るため、全てダルシー型として定式化できる。

両者を同時に扱うため、次の一般化された流量公式を考えよう。

$$M_b = -K^* A^* \cdot f_1(P) \cdot f_2(S) \cdot f_3(P, S) \quad (4)$$

ここで、 $M_b$ はある面を通過する流体成分の質量流量、 $K$ は浸透率に対応するもの、 $A^*$ は流動断面積、 $f_1(P)$ は圧力依存の物性(密度、粘性)、 $f_2(S)$ は飽和率依存の物性(相対浸透率)、 $f_3(P, S)$ はポテンシャルに関係する部分(毛管効果を含む)である。前記の地表流、地下水多相流れの流速公式は、どちらもこのような非線形の一般形に変換できる。

#### (2) 統合型モデルの構造

非線形の一般化流量公式と質量保存則から流れの支配方程式が考える流体成分や汚染成分個々に立てられ、連立して解かれる。

- ① 通常の水循環のみ(汚染物質がない)を考える場合は、水と空気に関する2式を圧力、水飽和率に対して解く。地表水深は圧力から換算される。これにより、地表の河川流と地下の不飽和・飽和流動系の同時追跡、準動的氾濫解析が可能となる。
- ② 塩分など溶質が入り込む時には、溶質の移流分散方程式を加え3式を解く。これにより、河川や地下の汚染溶質輸送、沿岸域塩淡水境界問題などが追跡できる。

③ 石油や有機塩素系溶剤などによる汚染問題では、3相流動問題として4式を解く。これにより、河床・地表からの水の浸透と同時に起こる地下NAPL汚染が追跡可能となる。

④ いずれの場合も、地表面より上に、河川・地表流の流れる格子、およびその上方に大気層をおき、地下と数値的に一体化する。

このような定式化は、計算付加の増大が避けられないが、地圏の水の動きを自然らしく表現でき、信頼性・説明性を格段に向上させることができる。

数値解法としては有限差分法や有限要素法が適用可能であろう。非線形性や多相流動を考慮すると有限差分法による同時完全陰解法が有利と考えられる<sup>1)~4)</sup>。

## 4. 流域シミュレーションの事例

ここでは、前記の統合型モデルによるいくつかの実流域シミュレーションの事例を紹介したい。解析結果のグラフなどは省略し、全体的な水の動きをグラフィクスにより示すことにする。

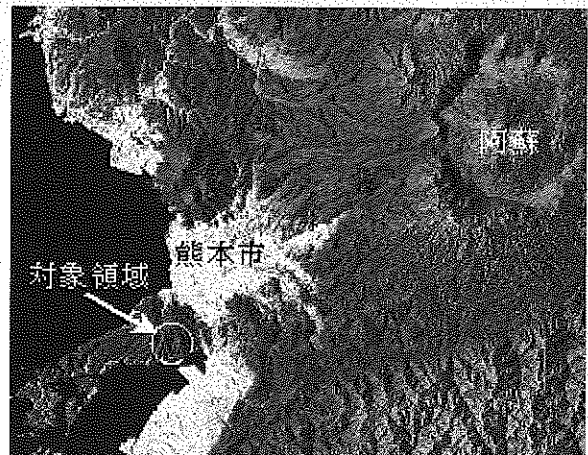


図4 対象領域位置図



図5 対象領域の地形および境界線



#### 4.1 源流域水循環シミュレーション

山地の水循環機構の究明を目的としたフィールドモデリングの事例を紹介する。対象地域は、図4、図5に示すように熊本県・宇土半島のつけ根にある一流域であり、流域面積は約8.5km<sup>2</sup>である。ここでは、現在までにさまざまな調査がなされており、フィールド情報を総合的に集約・フィールドバックした流域モデルにより地下地質・水理構造の同定が進められている。

##### (1) 地質概要

ここは第三紀の火山岩（安山岩および角礫凝灰岩、火砕流堆積物）が広く覆っており、地下で数層の帯水層を構成していると推定されている。流域内での4本の観測井（最大掘深長200m）の結果から、この地域の安山岩は少なくとも4つの岩層からなり、風化した透水性の良い部分が繰り返し現われることが知られている。南側には沖積低地が開けており、厚さは海岸付近で30m程度と推定される。遠浅の海底面は引き潮時に数百m程度が露出し、海底から淡水が湧水する状況が見られる。

##### (2) 流域モデル

図6は筆者らの作成した三次元数値モデルの鳥瞰図である。

水文調査結果を考慮し、モデルには領域分水界の北側に広がる谷も含めて考え、南側の不知火海側は、引き潮時に露出する海底を含めて考える。また、領域内には二本の河川があり、連続した流路として滑らかな形状で離散化してある。

領域西側、東側は閉境界、北側も閉境界であるが、河川については開放境界である。南側は、沖合いで閉境界であり、地表は潮位変動のある変動境界である。離散格子数は東西59、南北175、鉛直22、合計227150個である。

##### (3) 現状再現計算

現在状態の再現、すなわち、現在の河川流量や地下水分布に相当する状態を作り出すことがシミュレーションの出発点である。しかし、山岳地の地下水分布は長期の降雨の変動と地形や地質に調和するように自然に出来上がったもので人間が与えることはできない。そこで、統合型モデルの機能を生かし、次のような手続きにより現状を再現

する。

- ・計算出発時点の全域の地下水位を地表面、すなわち地形標高と同じ値とする。
- ・領域全体に年平均降雨を降らせながら計算を開始する。
- ・地下の余分な水は低地で地表に湧き出し、あるいは斜面で地表に湧き出し、やがて河川を形成する。
- ・数十年～数万年代程度の計算を行うと、地下水位は地形に整合的な位置に形成され、上部に不飽和帯が現われる。
- ・降雨の季節変動、さらに日変動を繰り返し与えて数年～数十年の計算を行うと、さらに地下水位分布が多少変更され、現時点（着目する季節や日時）に近い状態が出来上がるはずである。
- ・この時点の計算河川流量や地下水位を観測されている記録と比較して、状態の適切性を判断する。

図7、図8は以上の手続きの中で得られたもので、図7は地表に現われた河川の様子、図8は上流地下の地下水飽和率断面である。統合型シミュレーションでは表流水・地下水の連成がなされているため、観測された河川流量や地下

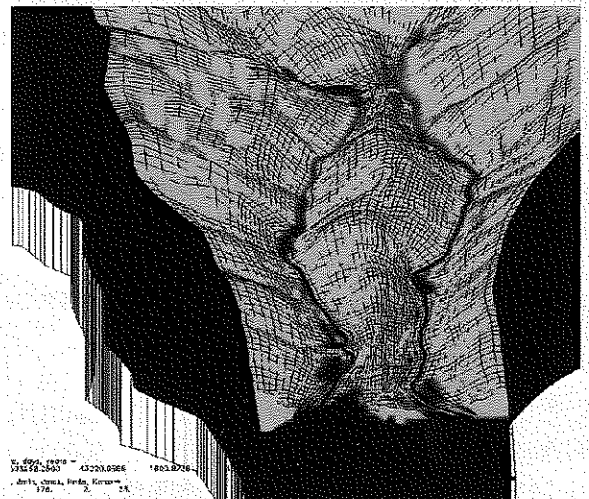


図7 地表面に現われる河川（手前が海側）

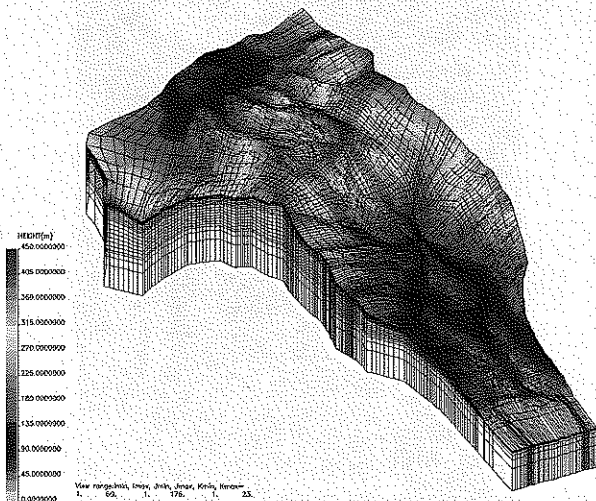


図6 3次元モデル鳥瞰図

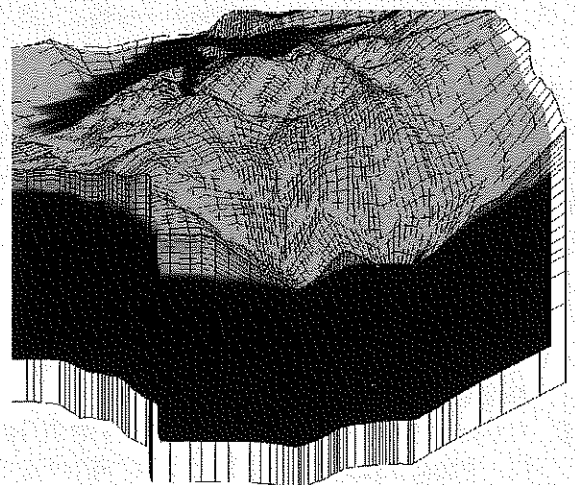


図8 上流の地下水位変化の様子（手前に地下水面が見える、水理物性の与え方で地下水面位置は大きく変わる）

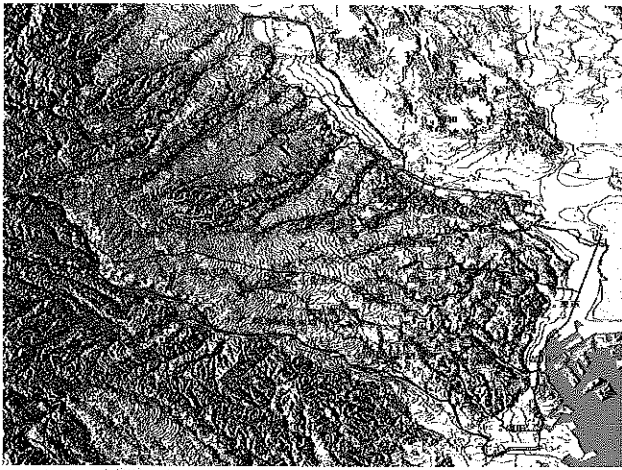


図9 武蔵野台地と縁辺地域の全景（南：多摩川，北：荒川，西：入間川，東：隅田川・東京湾で囲まれており，内部には多数の河川があり，東京都の主要な部分がついている）

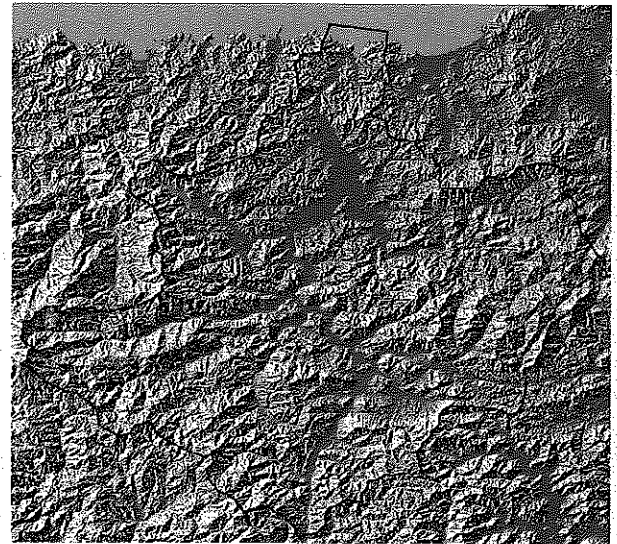


図11 円山川水系の陰影図（国土地理院50mDEMをカシミール3Dにより描画）

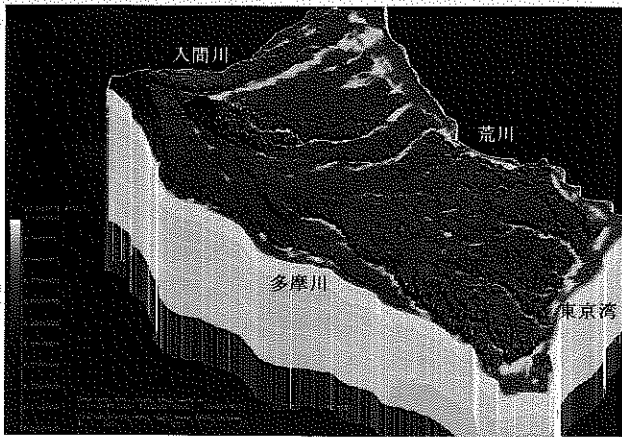


図10 現状再現計算で出現する水の分布（黒色は乾燥，白色は飽和状態）

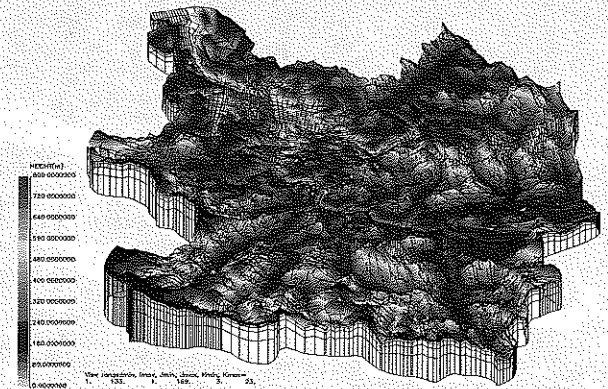


図12 円山川広域流出モデルの例（左上方が北，右下方が南）

水位を同時整合的に比較し，地表・地下水理構造の同定に利用することができることになる。

このような手続きにより，本領域の地質・水理構造を変更しながら試行錯誤により観測情報と計算値を比較しつつ同定してゆくことになる。その結果については別報の予定である。

#### 4.2 その他の事例

紙面の都合上，連成モデルの特長を生かした他の事例の一端のみを紹介しておきたい。

##### (1) 都市域水循環シミュレーションの試み

図9は武蔵野台地の全景である。ここは，南の多摩川，北の荒川，西の入間川，東の東京湾に囲まれた領域であり，境界に沿って沖積低地が存在する。台地内部は西から東にかけて都市化が進んでおり，湧水の減少，地下水水位上昇，都市型洪水，ヒートアイランドなどの都市域水問題が起こりつつある。筆者らは，本地域の地圏水循環を捉える目的で，試みに約1000km<sup>2</sup>にわたる本地域を平面的に2万個，垂直に22層を区別し，総格子数45万個程度の武蔵野台地モデルを作成した。

詳細な地質を全域に入力することは残念ながらすぐにはできないので，ここでは数理的に積層状態を作り出し入力

し，第一段階のシミュレーション（現在状態の再現）を行った。その結果を図10に示す。地表部に河川ができ，不飽和状態の台地が顔を出した様子が見られる。もし，地下内部を断面で見るなら，地形に従った地下水水位分布が出来上がっているはずである。

今後は，精細な地質・水理構造，地表土地利用・被覆状態，地下利用（地下街，トンネルなど）などを反映することで，台地の都市域地下水の動きを捉えたいと考えている。

##### (2) 広域河川流出・洪水氾濫シミュレーションの試み

平成16年は集中豪雨による多数の洪水被害，土砂災害，高潮災害等が日本各地で発生し，多くの死者・行方不明者が出た。従来から一級河川等では，長期確率豪雨を想定し事前に氾濫対策が講じられているが，中小河川を含めた新たな対策の必要性も浮き彫りとなった。

ここでは，広域水循環モデルと動的氾濫モデルを組み合わせた氾濫予測シミュレーションの一端を紹介する。これは，精細に流域水循環を捉えるとともに，流域任意地点の氾濫進展・危険度予測，防災対策の評価・提案に資するものと考えられる。

対象流域として円山川水系（図11）を取り上げる。広域流出解析モデルは図12のように円山川水系全体を対象と

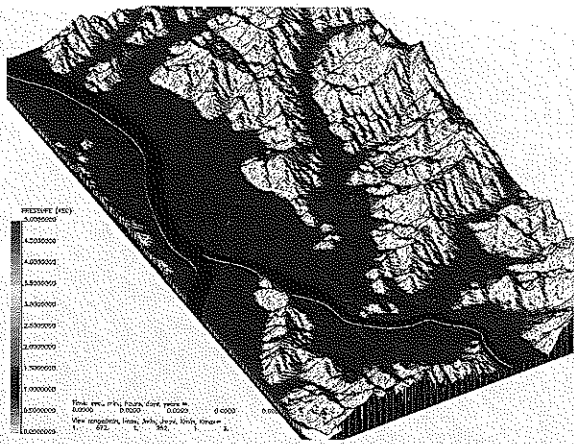


図13 精細氾濫解析モデルの例(豊岡付近の地形を10 mDEMからとり、約60万個の格子により表現、河床形状、堤防等は暫定的に設定)

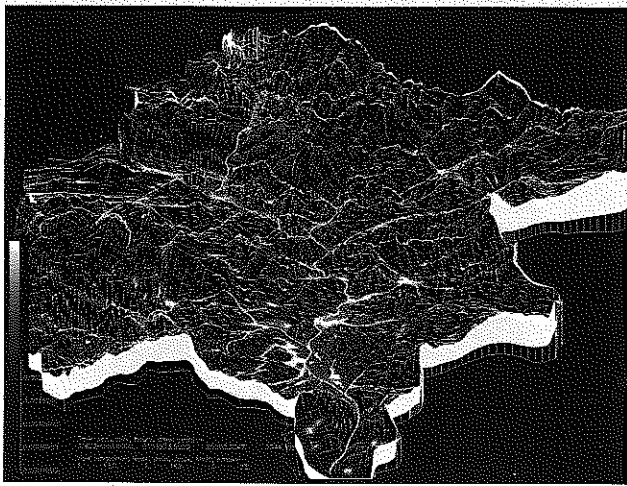


図14 広域流出モデルに現れた豪雨時の河川模様(手前が北、上方が南)

し、河川の形状や地形・地質は平面約2万個、垂直約20層の格子により表現している。このモデルにより計算される河川流量は、図13の格子数約60万個の精細氾濫解析モデル<sup>6)</sup>の入力となり、越流・内水氾濫・破堤に伴う氾濫進展が追跡される。なお、広域モデルにおいても準動的な氾濫進展を描くことができる。図14は広域流出モデルに現われた水系模様が示されている。氾濫モデルの計算結果は紙面の都合上省略する。

#### 4.3 計算パフォーマンスについて

いずれの事例も大規模な数値シミュレーションに属するものであるが、実用的に現代のPC上(メモリ1GB程度、クロック2~3GHz程度)で計算を実行することが可能である。計算時間は問題にも依存するが、経験的には、現状再現に数日~1週間程度、その後の短期的・部分的な試行計算は数時間~数日程度である。たとえば、前記の円山川の

計算では、広域モデルの第一段階シミュレーションに2~3日、1日程度の豪雨時の計算は広域モデルで2~3時間程度、精細氾濫シミュレーションでも同程度であった。

出力としては、全域の圧力、飽和率情報、任意点の河川流量、地下水位、濃度、流向・流速などが得られる。今後は、より自然に近づけた精細・大規模モデル化も要請されており、並列計算の実用化が必要と考えている。

## 5. まとめ

ここでは地圏水問題評価のための統合型数値モデルと流域シミュレーション技術に関し、その概要と事例を紹介した。

水循環系においては、物質としての水の移動とともに、水質変化・土砂流送・熱循環が起きている。これらは流量とか水位以外に水温や水質(溶質、pH、酸化還元電位、安定同位体比、濁度など)という情報を運び、見えざる地圏の水理構造を知るために役立つものであろう。多種類の情報を総合的に生かすことも今後の大きなテーマと考えられる。

現在では水問題に関する数値シミュレーションは多数実施されているが、それは自然を擬似的に計算機上に表現していること、不自然あるいは人為的な設定は極力排除する必要があること、を常に意識したいものである。そのためには、シミュレーションを実施し判断する人間の力量や意識が大変に重要と思われる。適切な設定と入出力データの透明性を確保し、行政などの意思決定や、市民と行政の議論の客観的資料として役立つものを提供して行きたいものである。

#### 参考文献

- 1) 登坂博行・伊藤一誠・蛭原雅之・稲葉 薫・伊藤 彰・小島圭二: 多成分多相移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析, 地下水学会誌, 38-3, pp. 167-180, 1996 a.
- 2) 登坂博行・小島圭二・三木章生・千野剛司: 地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発, 地下水学会誌, 38-4, pp. 253-267, 1996 b.
- 3) 登坂博行: 地下水と地表水・海水との相互作用, その9. 地表水流れと地下水流れの結合解析, 地下水学会誌, 第44巻, 1号, 45-52, 2002.
- 4) Tosaka, H., Itoh, K. and Furuno, T.: Fully Coupled Formulation of Surface flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation, Hydrological Process, 14., 449-464, 2000.
- 5) 橋爪 渉・登坂博行・嶋田 純・長谷義隆: 宇土半島源流域における水循環モデルの構築, 2005 地下水学会春季大会講演要旨集, 2005.
- 6) 張 馳・岩堀康希・阿部真郎・登坂博行: 急勾配地形を有する場における洪水氾濫の数値解析, 土木学会水工学論文集, 第48巻, 625-630, 2004.

# 2004年・2005年スマトラ沖巨大地震の震源過程

やぎ ゆうじ  
八木 勇治\*

## 1. はじめに

2004年12月26日に、スマトラ沖でマグニチュードが9の巨大地震が発生し、インド洋周辺の国々に大きな津波被害をもたらした。この巨大地震による死者数は30万人を超え、150万人もの避難民が発生した。さらに、その約3ヵ月後の2005年3月29日に、前回の巨大地震の南端近辺を震源とするM8後半の巨大地震が発生した。前者の地震規模と比べると、後者の地震が開放したモーメントは5~10分の1程度であり、小さい地震であるかのように思えてしまうが、日本で発生する地震に置き換えると、南海地震・東南海地震・東海地震の震源領域が同時に動いた時の地震規模に匹敵する。2004年12月の地震は、インド洋周辺の幅広い国々に被害が広がったのに対して、2005年3月の地震は、ニアス島近傍に被害が集中している。これは、2004年12月の地震は津波が主な被害要因であったのに対して、2005年3月の地震は地面の揺れ（地震動）が主な被害要因

であったためと考えられる。

最近になって、このような人間活動に多大な被害を及ぼす地震が発生すると、全世界の地震計網により、地面の動きを正確に観測することができるようになってきている。その結果、このような地震の震源領域で何が起こったのか、理解が深まってきた。

このような知見は、理学的な探求心を満たすだけではなく、今後発生しうる地震の危険性を正しく認識し、地震災害を軽減するうえで非常に重要である。自然現象に対する無知は、いたずらに自然被害を増幅することになる。地球上で人間活動を行う限り、地震という、危険極まりない自然現象を正確に理解し、上手に付き合っていく必要がある。

スマトラ沖では、プレートの沈み込み速度と年代より、このようなM9近傍の巨大地震が発生する領域と考えられてこなかったり。過去の記録を見ても、M9以上の地震は存在しない（図1）。しかし、現実として、世界で2番目に大きいと言われる巨大地震が発生している。このような地震がなぜ、発生するのか？また、日本でも発生する確率はないのか？について、過去の研究にとらわれることなく議論する必要がある。

## 2. 震源過程の研究の背景

地震時の断層面上の破壊伝搬過程（震源過程）の研究は、主に、地震現象を理解する目的で行われてきたが、最近では、防災に役立つ技術と結びつける研究が多く行われている。ここで、震源過程の研究は、リアルタイム地震防災・強震動予測の二つの分野に貢献している。阪神淡路大震災以降、日本では強震動観測網が整備され、準リアルタイムに強震動分布等が発表されている。これらの情報は、初動体制・緊急対応を行うのに役立っている。しかしながら、地震被害が発生するすべての国で、日本のような高密度な強震動観測網を運営するのは困難であり、他の方法により強震動分布を推定する必要がある。大地震が発生すると、全世界の地震計ネットワークにより、地震動を観測することができる。これらの地震動は、地下構造の情報と、震源過程の情報を有している。適切に地下構造の影響を評価することにより、断層面で解放した力や詳細な震源過程の推

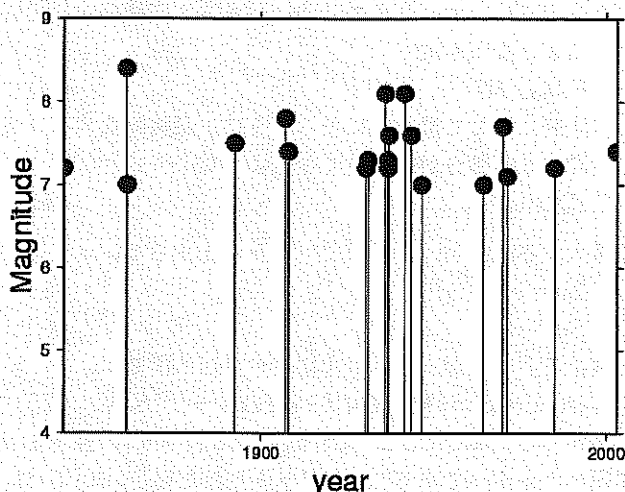


図1 2004年・2005年スマトラ沖地震の震源域近傍（緯度2~20度、経度90~105度）におけるマグニチュードの時間履歴（1600~2002年；M7以上）。最大のマグニチュードは8.4であり、マグニチュードが9を超える地震は記録されていない。宇津地震カタログ（<http://iisee.kenken.go.jp/utsu/>）

\* 国立大学法人筑波大学大学院 生命科学研究所 助教授  
独立行政法人建築研究所 客員研究員



定が可能である。一般に、断層近傍の強震動は、震源過程（特に、断層の大きさ・すべり分布・破壊伝搬の方向）の影響を受けることがわかっている。準リアルタイムに震源過程を決定して、その結果を基に波動場計算を行い、強震動分布を推定するシステムを構築することは重要になりつつある。

地震の強震動分布を推定するためには、どの程度現実的な震源過程のモデルを提示できるかが鍵となる。これは、将来発生する地震の強震動分布を予測するときにも同じことが言える。将来発生する地震の正確な震源過程モデルを構築することは容易ではないが、仮に、予測可能である場合、地震が発生する前の被害シミュレーションがより正確に行えることになる。特に、地震動の周期帯域、震幅、継続時間は、超高層ビル群の被害を推定するのに重要である。

さて、今回発生した、2004年スマトラ沖巨大地震は、既存の解析手法で、概要のみならず、規模をつかむのも困難である地震であった。この巨大地震の余震は1200 km以上にわたって分布していることが判明しており、仮にこの余震分布が断層のサイズを示すとすると、地震波を励起している領域を、点で近似する仮定（点震源モデル）は適用できない。しかしながら、地震の規模を表す実体波マグニチュード（Mb）、表面波マグニチュード（Ms）、気象庁マグニチュード（ $M_{JMA}$ ）は点震源を仮定して地震の規模を決定している。また、現在最も信用されているHarvard CMT解で得られるモーメントマグニチュード（ $M_w$ ）にしても、地震波を励起している領域を点で仮定して、その点で全エネルギーが開放されたとして、地震の規模を求めている。これらの手法で得られた値から、今回の地震のような巨大地震の規模を議論するのは困難である。

一般に、津波警報ネットワークは、地震の規模と深さを判断材料としている。ここで、信頼できる情報を出すためには、巨大地震の規模を精度良く推定する手法の開発が急務である。巨大地震が発生した時に破綻するシステムであってはならない。ここでは、有限断層を仮定した場合の、震源過程インバージョンの説明をした後、今回発生した、2004年・2005年スマトラ沖地震の震源領域で何が発生したのかについて述べ、今後の改善点について議論する。

### 3. 解析手法

一般に、特殊な地震（たとえば、火山性地震、核爆発、核実験、地すべり等）を除くと、地震は、断層面を破壊する現象である。最近になって、大地震が発生する断層面は、強度が弱い領域という概念から、歪みが蓄積しやすい領域という概念に移行しつつある。いずれにせよ、地震を発生する源である震源をモデル化するためには、断層面を仮定して、その面における破壊（断層すべり）が時間と空間に対して自由度を持たせる必要がある。

ここでは、まず断層面（走向、傾斜）を仮定して、その断層面を、 $M$ ノットの0次のスプライン関数（ボックスカー関数）で展開する。次に、各ノットの断層すべりを、2個のすべりベクトル成分に分割する。次に、各すべりベクトル

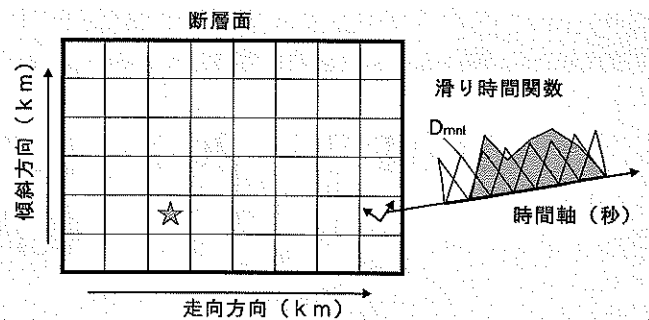


図2 震源モデルの概念図

ルの時間履歴をLノットの1次のスプライン関数で展開する。断層モデルの概略図を図2に示す。この結果、 $j$ 観測点で観測される地震波形  $W_j(t)$  は、下記のように書くことができる。

$$W_j(t) = \sum_{mnl} D_{mnl} G_{jmn}(t + \Delta t_{mnl}) + e \quad (1)$$

ここで、

$M$ : 空間的なノットの番号 ( $M=1, \dots, M$ )

$n$ : 断層すべり方向の成分 ( $n=1, \dots, N$ )

$l$ : 時間方向のノットの番号 ( $l=1, \dots, L$ )

$D_{mnl}$ : 断層すべり量 ( $M$ )

$G_{jmn}(t)$ : グリーン関数（小断層  $Mn$  が1 M ずれた時の理論波形）

である。ベクトル化すると、

$$W = Gd + e \quad (2)$$

と書くことができる。グリーン関数の計算には、Kikuchi and KanaMori<sup>2)</sup> (1991) のプログラムを使用した。この行列式を解けば、断層すべりの時空間分布を求めることができるが、より詳細に求めようとすると、観測誤差、モデル化に伴う誤差の影響をより受けやすくなり、数値的に不安定になってしまう。そこで、今回は、時間に対して滑らかなるように、すべり量の時間に対する2回微分が0に近くなるような条件式

$$\partial^2 D_{mnl} / \partial t^2 = e_t \quad (3)$$

と、空間に対して滑らかなように、最終的なすべり量の空間の2回微分が0に近くなるような条件式

$$\Delta \sum_l D_{mnl} = e_s \quad (4)$$

を導入する。式(3)、(4)をベクトル化すると、

$$Td = e_t \quad (5)$$

$$Sd = e_s \quad (6)$$

と書ける。したがって、最小にすべき目的関数は、

$$O(d, \alpha, \beta) = \|W - Gd\|^2 + \alpha^2 \|Td\|^2 + \beta^2 \|Sd\|^2 \quad (7)$$

と書ける。ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ は条件式(5)、(6)の強さを示す超パラメータである。 $\alpha$ 、 $\beta$ が与えられた場合、式(7)は、Jackson and Matsu'ura<sup>3)</sup> (1985) に従って解くことができる。ここで解は、 $\alpha$ 、 $\beta$ の値によって変化し、ユニークな解を求める事は困難である。本論文では、Fukahata et al.<sup>4)</sup> (2004) によって導入された複数の超パラメータが存在する場合のAkaike's Bayesian Information Criterion (ABIC) の定式化を導入して、最尤法に基づくユニークな解を求める。本研究の場合、ABICは、



$$ABIC(\alpha, \beta) = N \log O(d, \alpha, \beta) - \log |a^2 T^t T + \beta^2 S^t S| + \log |G^t G + a^2 T^t T + \beta^2 S^t S| \quad (8)$$

と書ける。ここで、ABICが最小になる時の、 $\alpha$ と $\beta$ の値を求めればよい。解析的に式(8)が最小になるような $\alpha$ と $\beta$ の値を求めるのは困難である。したがって、数値的に、 $\alpha$ と $\beta$ の値を変えて繰り返しインバージョンを行い、ABICが最小となるような $\alpha$ と $\beta$ の値を求める。今回の地震にこのような手順を踏んで、解析をしたところ、地震モーメントの値が、他の解析結果を比べて大きな値となってしまった。そこで、今回は、観測記録を説明する範囲で、地震モーメントが大きくなるのを抑制する拘束条件を新たに導入した。

#### 4. 2004年スマトラ沖巨大地震

2004年12月26日に北スマトラ沖でM9クラスの巨大地震が発生した。この規模の地震は、広帯域地震計観測網が整備されて以来、初めての地震である。同地域は、インドプレートとオーストラリアプレートがユーラシアプレートの下に沈み込んでいる地域で、M8クラスの地震も過去数回発生していることが確認されているが、今回のようなM9クラスの地震が過去に発生したという定量的な報告は、まだない。米国地質調査所が決定した余震分布は、長さ1200kmにわたって分布しており、ハーバード大学が決定したモーメントマグニチュードは、9.0に達する(図3)。

一般に、地球の減衰構造の関係上、P波は高周波の波を多く含んでいる。ここで、今回の地震の破壊継続時間を見積もるために、1Hz近傍の周波数帯域のみを通すフィルターをかけた波形を図4に示す。比較のために、今回の震源近傍で発生し、かつ、同じようなメカニズムを持つ地震波形も同時に示している。ここで、高周波の波の継続時間は、破壊継続時間とP-sP時間に相当する。この場合、P-sP時間は約20秒程度であるので、地震波形からは、少なくとも400秒以上にわたって破壊が継続していることが示唆される。ここで、高周波成分から破壊の継続時間を算出してマグニチュードを推定する方法は、魅力的に感じる。これは、破壊継続時間が長ければ長いほど、マグニチュードが大きくなる傾向があるといった観測事実を基にして、P波継続時間のみで規模を算出する方法である。この解析方法は、このような規格外とも言える巨大地震の準リアルタイム解析に適している。ここで、破壊継続時間とマグニチュードの関係式は、地震時の破壊伝搬の不規則性に影響を受けるため、どの程度の誤差範囲で

求められるのか、検討する必要がある。

このような巨大地震の全貌を捕えるために、IRIS-dmcによって収録されている広帯域地震計観測点の記録21点を解析に使用した。ここで、解析に使用した観測波形には、波線の長さの1乗で減衰する遠地実体波に加え、波線の長さの2乗で減衰する中距離項の波、波線の長さの4乗で減衰する近地項の波が含まれている。一般に、十分に震源から離れた観測点の記録では、中距離項・近地項の波は無視できるほど優位に小さい。しかし、中距離項の波と近地項の波は長周期に富んでいるために、今回の2004年の地震の

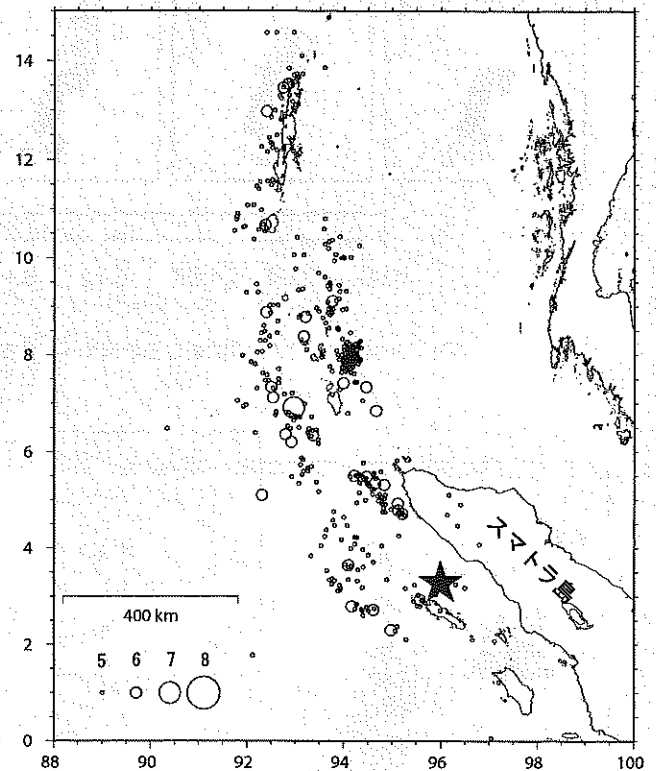


図3 USGSが決定した本震の位置と余震分布

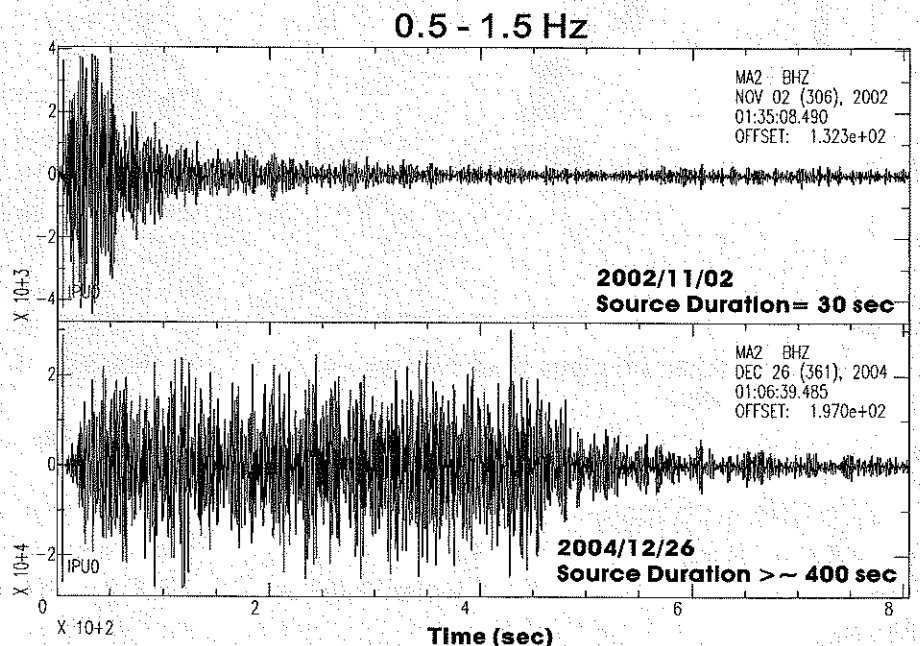


図4 観測点MA2で観測された短周期地震動(0.5~1.5 Hz)。2002年スマトラ沖地震(Mw 7.3)と2004年スマトラ沖巨大地震(Mw 9.0)の比較。

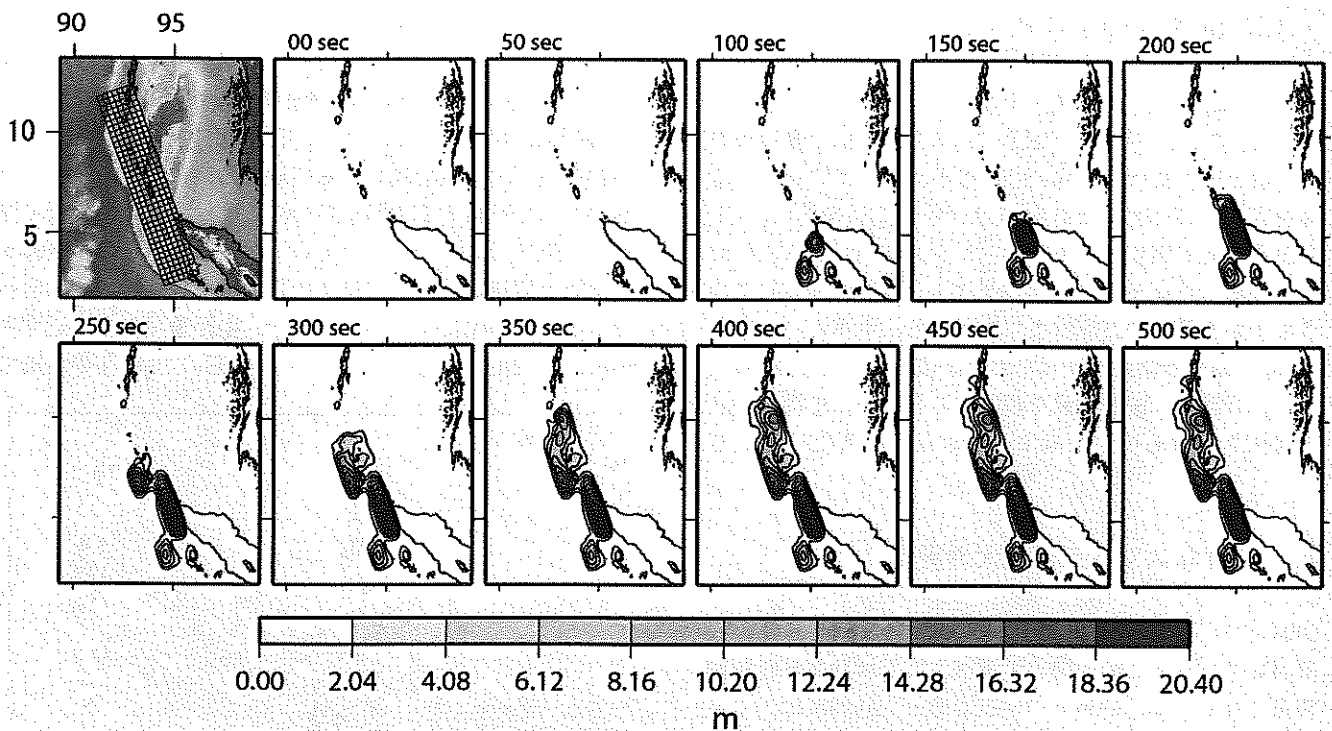


図5 2004年12月の地震における断層すべり分布の時間変化。北側に破壊が伝搬していることがわかる。

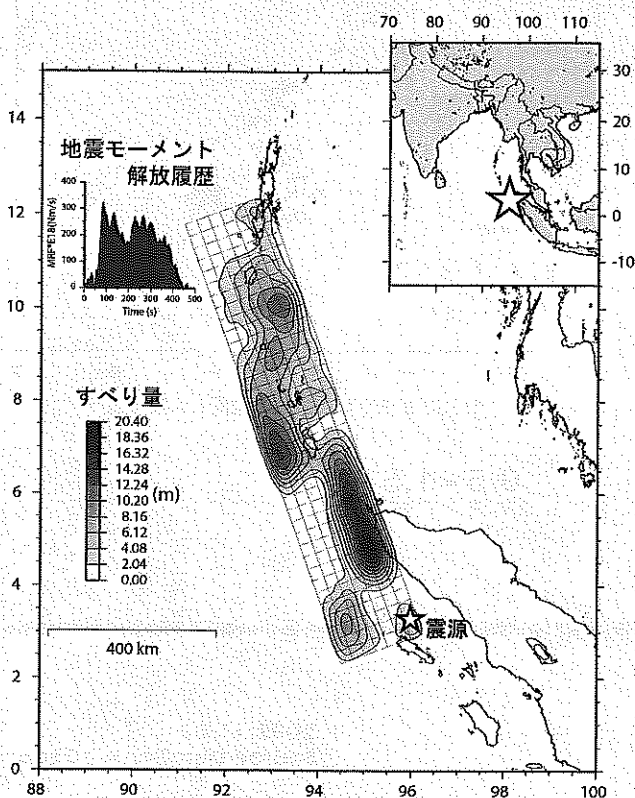


図6 2004年12月の地震における最終的な断層すべり分布と地震モーメント開放履歴。

ように400秒以上にわたって破壊が継続した場合、無視できなくなるほど増幅される可能性が高い。そこで、本研究では、それらの波を除くために、0.005~0.25 Hzのバンドパスフィルターをかけ、2 Hz サンプリングの変位波形に変換した。

図5は、50秒刻みの断層のずれのスナップショットを示す。この図から、地震発生後約50秒間にわたって、震源近

傍でマグニチュード8.2相当の破壊が進行した後、破壊はさらに北へ伝搬し、アングマン諸島まで約1100 kmにわたって、断層面を破壊していることがわかる。破壊の伝搬速度は約2.5 km/sec、破壊継続時間は450秒、最大すべり量は20 m 近くにも達する。

図6に最終的なすべり量分布と、地震のモーメント開放履歴を示す。最終的なモーメントマグニチュードは9.2となる。このマグニチュードは、明らかにハーバード大学が決定したマグニチュード9.0より大きく、地震の規模は数倍になるが、ノースウエスタン大学の研究グループが地球の自由振動より決定した値9.3と良い一致を示す。ここで、地震モーメントを拘束しない場合、モーメントマグニチュードは9.4となり大きな値となる。一般に、長周期の波がマグニチュードの値を決定する。したがって、観測波形に理論波形計算に取り入れていない長周期の波が存在するか、長周期のノイズが載っている場合、地震モーメントが実際よりも大きく求まる場合がある。ここで、完全に取り除けなかった中距離項・近地項の波が、解析を不安定にし、マグニチュードが上手く決定できなかった可能性が高い。図7に、解析に使用した観測点と、観測波形と得られた震源像から再現された理論波形の比較の図を示す。観測波形は、理論波形によって良く再現されている。

## 5. 2005年スマトラ沖巨大地震

2005年3月29日に、前回の巨大地震の南端近辺を震源とするM8後半の巨大地震が発生した。

図8は、15秒刻みの断層すべりのスナップショットです。この図から、地震発生後約30秒間にわたって、震源近傍で破壊が成長した後、破壊は主に南へ伝搬し、ニアス島近傍で大きくすべり起こし、さらに南に伝搬している。破

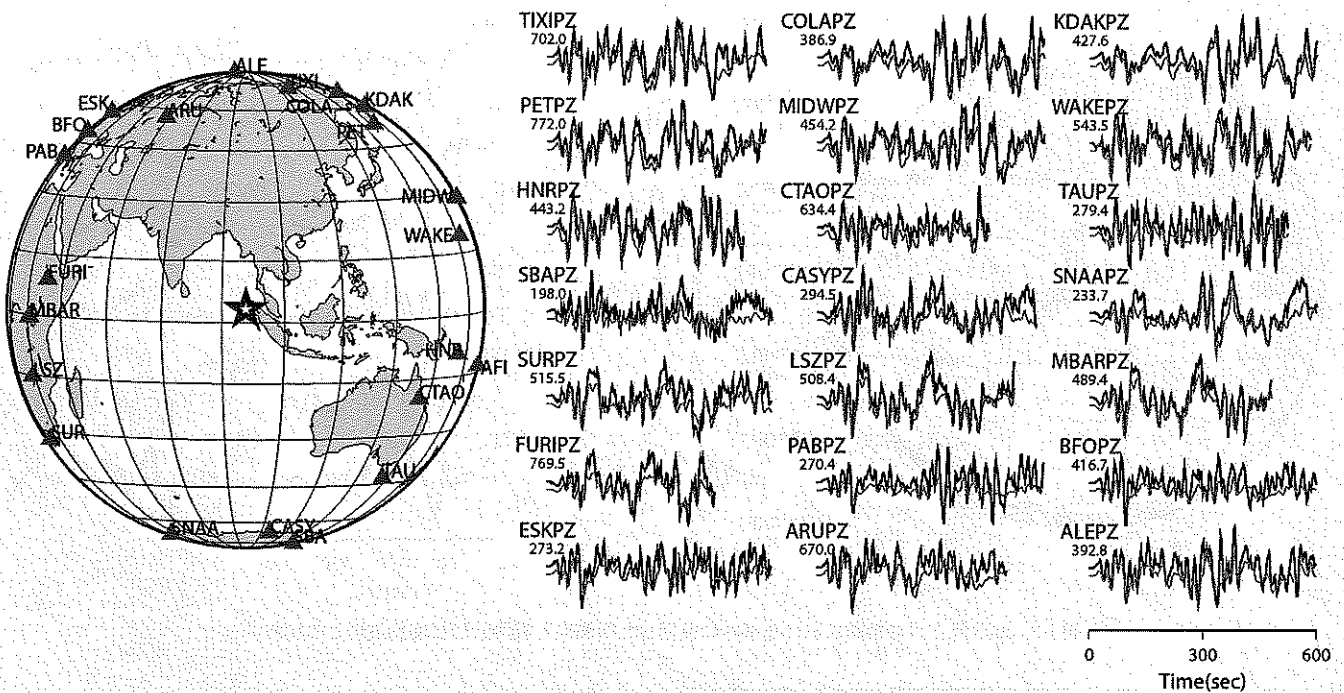


図7 2004年12月の地震における解析に使用した観測点と観測波形と理論波形との比較。

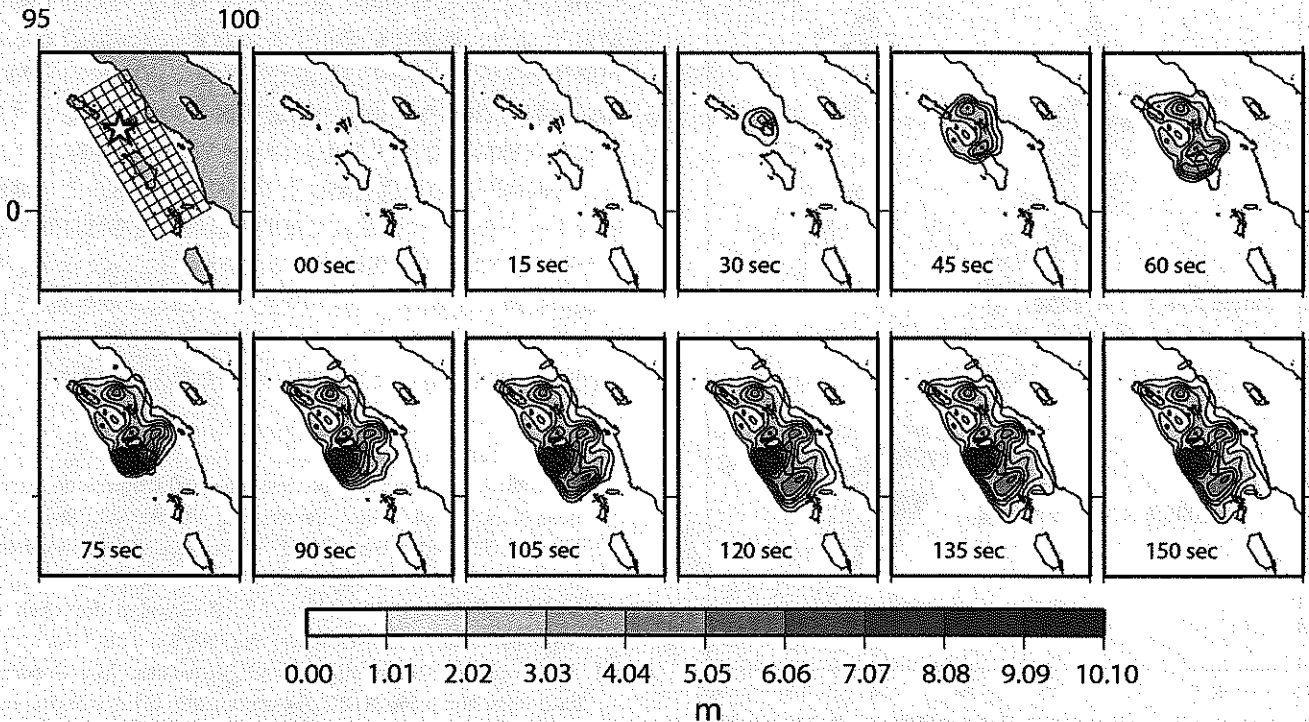


図8 2005年3月の地震における断層すべり分布の時間変化。北側に破壊が伝播していることがわかる。

壊の伝播速度は約 2.5 km/sec, 破壊継続時間は 150 秒, 最大すべり量はニアス島直下に位置し 10 m 近くにも達する。最終的なモーメントマグニチュード 8.7 となり, ハーバード大学が決定した値と調和的である。

図9に最終的なすべり量分布と, 地震のモーメント開放履歴を示す。ここで重要なのは, 主な破壊は, ニアス島の直下で発生したことである。今回ニアス島に被害が集中したのは, まさに, ニアス島の直下で大きなすべりが発生したためだと理解することができる。また, ニアス島直下で大きなすべりが発生したために, 励起される津波の規模が小さくなったと理解することができる。2004年12月の地震の震源領域と比較すると, 2004年12月の震源領域の近

傍で破壊が開始しているが, 破壊領域は全く重ならない。

図10に, 解析に使用した観測点と, 観測波形と得られた震源像から再現された理論波形の比較の図を示す。観測波形は, 理論波形によって良く再現されている。

## 6. 最後に

スマトラ沖地震は, 従来のルーティン解析で行われてきた, 点震源の仮定が崩れた地震である。今後, 地震の規模と深さの情報を使用して津波警報システムを構築するのに従来のルーティン解析手法をそのまま使用すると, 巨大地震には対応できない。巨大地震に対応するためには, 有限

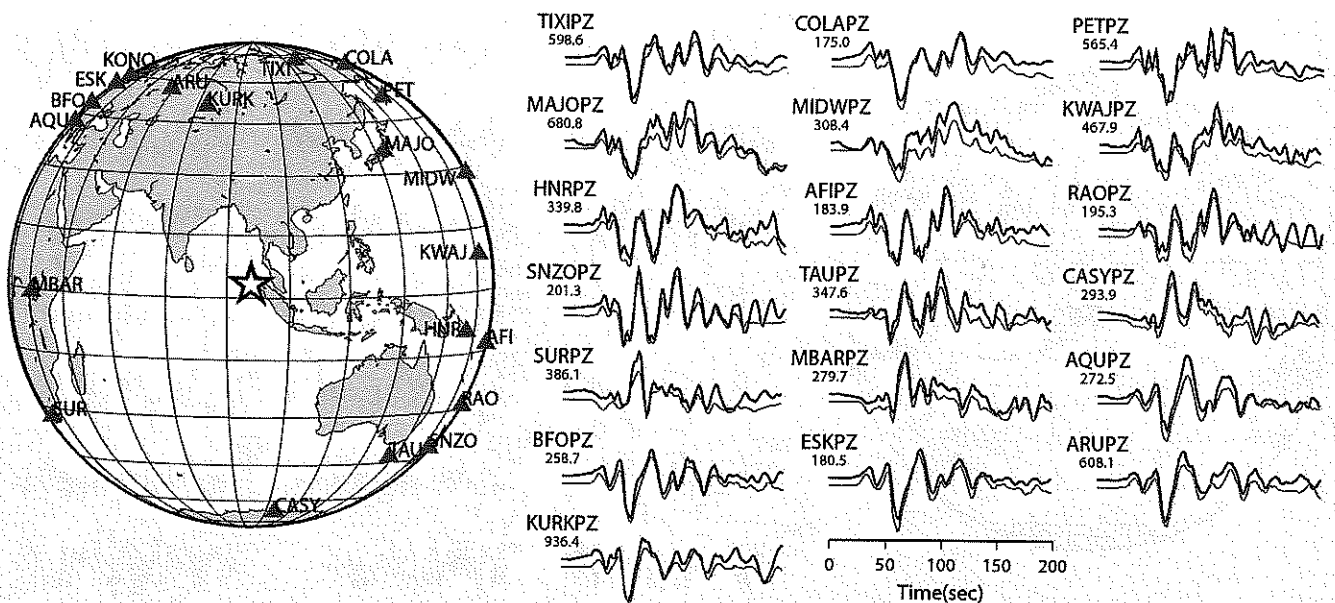


図10 2005年3月の地震における解析に使用した観測点と観測波形と理論波形との比較。

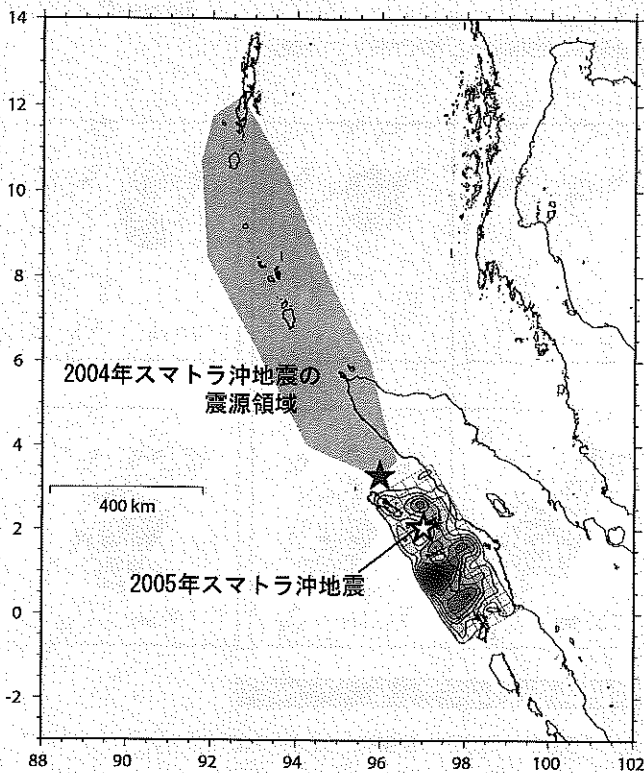


図9 2005年3月の地震における最終的な断層すべり分布と地震モーメント開放履歴。太線は海溝を示す。

断層を仮定したモデルで、地震の規模を決定する必要がある。

ここで、「何故、2004年の地震と2005年の地震の震源領域が同時に破壊しなかったか?」と「何故、3カ月の時間差が発生したのか?」考えることは、将来発生する巨大地震の地震活動を理解するうえで、重要である。ここで、日本

で観測された1994年三陸はるか沖地震の余効変動と1996年10月・12月に日向灘で発生した地震の余効変動の解析結果<sup>5),6)</sup>より、地震後に発生する余効すべりが原因である可能性は高い。三陸沖や日向灘での結果と同じように、2004年の地震と2005年の地震の震源領域の間には余効すべりのような準静的なすべりを起こす性質の領域が存在すると、今回の一連の地震活動は上手く説明できる。この準静的なすべりを起こす領域にて動的な破壊の伝搬は抑制されるために、2つの震源領域は同時に破壊しにくく、また、その領域で顕著な余効すべりが発生したため、3カ月に、巨大地震が誘発されたと考えることが可能である。今後、地震記録、GPS記録をより詳細に解析する必要がある。

参考文献

- 1) Kanamori, H.: Rupture process of subduction-zone earthquakes, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 293-322, 1986.
- 2) Kikuchi, M. and Kanamori, H.: Inversion of complex body wave-III, *Bull. Seism. Soc. AM.*, 81, 2335-2350, 1991.
- 3) Jackson, D.D. and Matsu'ura, M.: A Bayesian approach to nonlinear inversion, *J. Geophys. Res.*, 90, 581-591, 1985.
- 4) Fukahata, Y., Nishitani, A. and Matsu'ura, M.: Geodetic data inversion using ABIC to estimate slip history during one earthquake cycle with viscoelastic slip-response functions, *Geophys. J. Int.*, 156, 140-153, 2004.
- 5) Yagi, Y., Kikuchi, M. and Nishimura, T.: Co-seismic slip, post-seismic slip, and largest aftershock associated with the 1994 Sanriku-haruka-oki, Japan, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi: 10.1029/2003 GL 018189, 2003.
- 6) Yuji Y., Kikuchi, M. and Sagiya, T.: Co-seismic slip, post-seismic slip, and aftershocks associated with two large earthquakes in 1996 in Hyuga-nada, Japan, *Earth, Planets and Space*, 53, 793-803, 2001.

# 山地流域を対象とした 土砂移動シミュレーションの現状と課題

みやもと くにあき\*  
宮本 邦明\*

## 1. はじめに

土石流、地すべりや斜面崩壊などは直接的な土砂災害の原因となるだけでなく、時には河道内での異常な堆積を引き起こし洪水氾濫の間接的な原因ともなる。その一方で適度な土砂の供給は河道の安定や河川環境の維持、海岸線の維持に必要である。近年、このような土砂流出の抑制と確保といった背反した要求に対して流域一貫した土砂管理の必要性、重要性が強く認識されるようになり、概念として流砂系という言葉が用いられている。たとえば流域一貫した土砂管理のため下流河川の河床変動を予測しようとするとき、上流からの土砂の供給について、ひいては山地流域で発生する崩壊、土石流などの土砂移動について分かっている必要がある。すなわち、これらは下流河川から見ると上流端の境界条件として取り扱われることが理解される。したがって山地流域における土砂移動現象を理解することは直接的な土砂災害の予測のみならず流砂系の土砂動態を考えるうえで最も基本的な事項のひとつである。

このような背景のもとに山地流域を対象とした土砂移動に関する数値シミュレーション手法の開発研究が精力的に行われている。現在提案されている数値シミュレーション手法は、その目的と対象とする現象によっていくつかに分けることができる。その目的からは大きく2つに、すなわち、土砂移動現象そのものによる直接的な災害範囲の予測と、山地流域から下流河川へ供給される土砂によるインパクトの評価に大別される。前者は災害予想図（ハザードマップ）などの作成に役立てられ、後者は山地流域における効果的な土砂管理計画の検討に役立てられる。また、現象面からは、土砂移動現象の発生とメカニズムにより実に多様に分類される。一般的には豪雨に伴い発生する土石流や地すべり、崩壊などが思い浮かぶが、それ以外にも、たとえば地震により発生する崩壊、火山噴火に伴い発生する溶岩流、火砕流、泥流、降灰等も挙げることができる。実際、溶岩流、火砕流などについても数値シミュレーションモデルが開発されており火山のハザードマップ作成に利用されている。

ここでは、主に土石流や崩壊に焦点をあて、筆者らがこれまでに提案してきた数値シミュレーション手法について紹介することとし課題について述べることにしたい。

## 2. 基礎となる支配方程式について

数値シミュレーション手法について記述する際、基礎となる支配方程式とその離散化法について述べる必要がある。たとえば、個々の砂礫粒子の運動に着目して運動方程式を適用する方法も考えられるし、マクロな運動に着目して一種の連続体として取り扱い、偏微分方程式系で表現して差分法等を用いて解くことも考えられる。このように、支配方程式として何を選ぶかによってシミュレーション手法が大きく異なってくる。筆者らは運動全体が質量・運動量・エネルギーなどの保存則を満たすような一種の連続体として取り扱われるとして数値シミュレーションの支配方程式系を構築している。

変位し変形する連続体の運動は質量保存則（連続式）と運動量保存則（運動方程式）を用いて追跡される。工学的にはこれらの運動は地形上の1次元のあるいは2次元の運動としていわゆる浅水流方程式を用いて追跡されることが多い。特に1次元のな取扱いはその基礎でもあり理解も容易なのでここではその支配方程式について紹介する。支配方程式は土砂と水の混合物全体の運動に対する連続

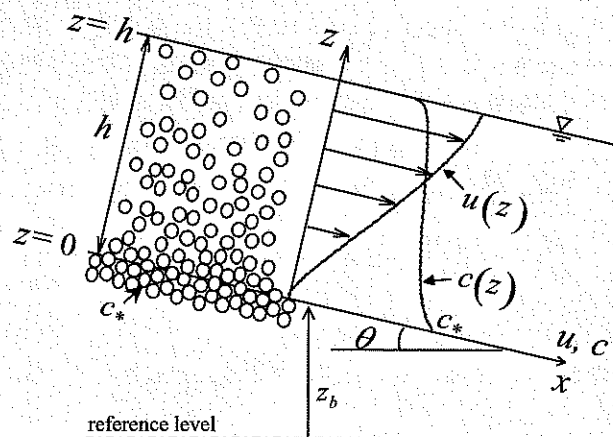


図1 1次元流れと座標系

\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科生物圏資源科学専攻



式, 運動方程式, および土砂の連続式により構成されるが, 図1のように座標系を導入することによりそれぞれ以下のように表される。

混合物の連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dz = \frac{\int_0^h \epsilon dz}{h} \quad (1)$$

混合物の運動量保存則

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_0^h \rho_m u dz \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^h \rho_m u^2 dz \right) + \int_0^h \rho_* \epsilon u dz \\ = \int_0^h \rho_m g dz \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^h \rho_m g (H-z) dz \right) - \tau_0 \quad (2) \end{aligned}$$

土砂の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_0^h c dz \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^h c u dz \right) = \frac{\int_0^h \epsilon c_* dz}{h} \quad (3)$$

ここに,  $h$  は流動深,  $t$  は時間,  $u$  は水深平均流速,  $\epsilon$  は流れから見た侵食に伴う内部沸きだし速度,  $\rho_m$  は混合物の見かけの (平均) 質量密度,  $\rho_*$  は土砂の堆積層における見かけの (平均) 質量密度,  $g$  は重力加速度,  $z_b$  は河床の標高 (河床位),  $H$  は流れの表面の標高 (水位,  $H = z_b + h$ ),  $\tau_0$  は河床面せん断力,  $c$  は土砂の体積濃度,  $c_*$  は堆積層の土砂の体積濃度である。

ここで, 以下のように平均量を導入する。

$$\bar{c} = \frac{\int_0^h c dz}{h} \quad (4)$$

$$c_t = \frac{\int_0^h c u dz}{\int_0^h u dz} \quad (5)$$

$$\bar{\rho}_m = \bar{c} \rho + (1 - \bar{c}) \rho \quad (6)$$

$$\bar{u} = \frac{\int_0^h u dz}{h} \quad (7)$$

$$M = \bar{u} h \quad (8)$$

$$E = \frac{\int_0^h \epsilon dz}{h} = \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (9)$$

ここに,  $\bar{c}$  は土砂の断面平均体積濃度,  $c_t$  は土砂の輸送濃度,  $\bar{\rho}_m$  は混合物の断面平均質量密度,  $\bar{u}$  は断面平均流速,  $M$  はフラックス (単位幅流量),  $E$  は河床の侵食速度である。なお,  $\rho_*$  は  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $c_*$  を用いて次式で表わされる。

$$\rho_* = c_* \sigma + (1 - c_*) \rho \quad (10)$$

式(4)~(9)を式(1)~(3)に代入し, 深さ方向に流速分布が存在することによる運動量補正係数  $\beta$  および侵食に伴う運動量わき出しに関する補正係数  $\beta'$  を導入することにより, それぞれ以下のように表わされる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = E \quad (11)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (\bar{u} M)}{\partial x} + \beta' E \bar{u} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\bar{\rho}_m} \quad (12)$$

$$\frac{\partial (\bar{c} h)}{\partial t} + \frac{\partial (c_t M)}{\partial x} = E c_* \quad (13)$$

なお,  $\beta$ ,  $\beta'$  はそれぞれ以下のように定義されている。

$$\beta = \frac{\int_0^h u^2 dz}{h \bar{u}^2} \quad (14)$$

$$\beta' = \frac{\int_0^h \rho_* \epsilon u dz}{\bar{\rho}_m E \bar{u}} \quad (15)$$

支配方程式, 式(11)~(13)によると未知数は, 河床面せん断力  $\tau_0$  を除くと  $h$ ,  $M$  あるいは  $c$ , および  $E$  あるいは  $z_b$  の4つである。したがって, 式系を閉じるためには  $\tau_0$  と  $E$  に対する支配則 (構成則) が必要である。山地流域の土砂移動シミュレーションの難しさはこの支配則に関する理解が不十分なことによっている。

### 3. 土砂移動現象の構成則

土砂と水の混合物からなる流れの構成則については数多くの研究がなされ, 流れと応力の関係式 (いわゆる構成則) が数多く提案されている。土砂を固相とし水あるいは泥水を液相とする固液混相流として取り扱うところは共通しているもののそれぞれ異なった力学的・運動学的観点からアプローチが行われている。それぞれ合理性・妥当性について主張がなされているがそれらの間に共通の視点を獲得できないでいる。ここにも問題の難しさと深刻さを垣間見ることが出来る。

筆者らは応力のなす仕事と散逸エネルギーとの間の関係に着目し, 非圧縮性流れで固相と液相がマクロ的に同じ運動をしている場合は両者が等しいことを導き, 固液混相流を構成する各相の空間とエネルギー損失を支配する物理的要因について考察して構成則を導いている。その結果を要約すると, エネルギー消費メカニズムからみた固液混相流の空間は, 図2の模式図に示すように, 固相 (粒子) 内部 (②) と固相 (粒子) 表面 (①) および液相 (間隙流体) (③) により構成されており, それぞれの空間におけるエネルギー散逸の支配的な物理的要因として非弾性的性質, 固体摩擦, 粘性を上げている。これらの要因はそれぞれ反発係数, 摩擦係数, 粘性係数で代表される。なお, 液相については, 崩壊土塊や土石流のように粒径が大きく速度が速い現象においてはレイノルズ数が大きく粘性より乱流による運動量輸送が卓越していることが確認されており, 粘性係数がパラメータとして現れてこない。こうして, 摩擦損失空間の独立性から, 構成則としてひずみ速度に対するせん断応力が次式のように得られている<sup>2),3),4),5)</sup>。

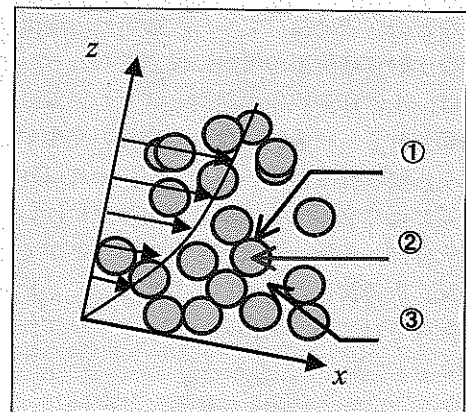


図2 固液混相流の模式図

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y + \tau_d + \tau_f \\ \tau_y &= p_s \tan \phi_s \\ \tau_d &= k_d \sigma (1 - e^2) c^{1/3} d^2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \\ \tau_f &= k_f \rho \frac{(1 - c)^{5/3}}{c^{2/3}} d^2 \left( \frac{du}{dz} \right)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

ここに、 $\tau_y$  は粒子間接触により生じる粒子表面の固体摩擦によるせん断応力、 $\tau_d$  は粒子の衝突により生じる粒子の非弾性的性質による応力、 $\tau_f$  は間隙流体のせん断により生じる流体摩擦である。また、 $p_s$  は粒子相互の接触により受け持たれる粒子相の圧力(骨格応力)、 $\phi_s$  は摩擦角、 $k_d$ 、 $k_f$  は係数でそれぞれ、0.0828、0.16~0.25、 $e$  は反発係数、 $d$  は粒径である。3つのせん断応力項のうち、 $\tau_y$  はひずみ速度に依存しておらず流速には依存しない応力項で降伏応力としての性質を持つ。せん断力と同様圧力についても固液混相流では両相により受け持たれている。仮定している流れの条件のもとでは液相(間隙流体)が受け持つ圧力  $p_f$  は静水圧で近似でき、固相の圧力(粒子間圧力)については静的な骨格応力  $p_s$  と衝突により生じる動的な圧力  $p_d$  の和により受け持たれている。なお、固相の動的圧力は次式で見積もられている。

$$p_d = k_d \sigma e^2 c^{1/3} d^2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (17)$$

また、骨格応力は粒子間圧力に対する分配率  $\alpha$  により粒子濃度の関数として次式のように関連づけられている。

$$p_s = \alpha(p_s + p_d), \quad \alpha = \left( \frac{c}{c_*} \right)^{1/5} \quad (18)$$

#### 4. 数値シミュレーションの例

##### 4.1 崩壊土塊の運動に関する数値シミュレーション

崩壊土塊の場合、土砂濃度が高く運動中に濃度はほとんど変化しない。したがって、その運動の終焉は土石流のように土砂の堆積の結果としてではなく、土塊そのものの運動の停止として現われる。数値シミュレーションでは、支配方程式、式(11)~(13)の侵食速度  $E$  を0とおいて計算を行う。この場合、土塊の運動はあらかじめ与えられたすべり面上の滑動として表現されることになる。土塊の停止は降伏応力によりもたらされる。一般に、土塊の停止は差分時間内に現われるので支配方程式を差分化するだけでは土塊の停止を表現することができず、停止条件を別に与える必要がある。図3は1次元シミュレーションにおける停止条件の考え方を示したものである<sup>9)</sup>。差分時間内で土塊が停止するためには必ずその間に速度0をまたぐ必要があるため、差分時間前後の速度の積が負であることが停止の必要条件となる。停止の十分条件は速度が0となった時点で合力が降伏応力より小さいことにより与えられる。2次元シミュレーションの場合、停止条件は必要条件・十分条件とも多少面倒になる<sup>7)</sup>。

2次元数値シミュレーションの例として1792年に長崎県島原半島で発生した眉山の崩壊の再現計算について紹介する。眉山崩壊は雲仙普賢岳の火山活動に伴う火山性地震により生じ、崩壊した山体は有明海に突入して津波を発生

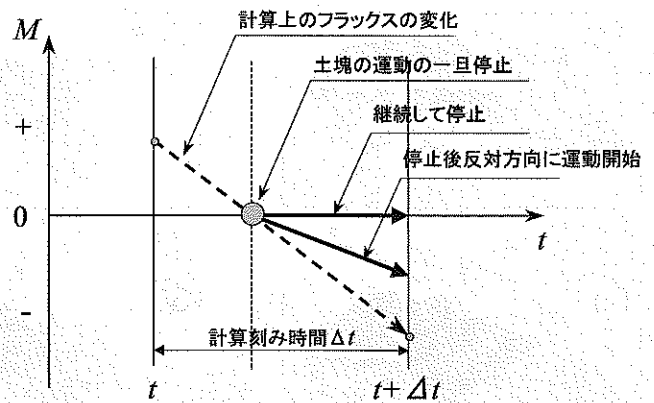


図3 土塊の停止条件の模式図

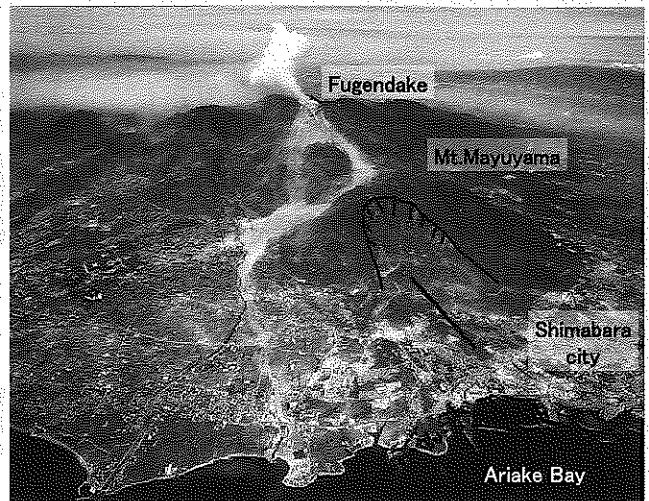


写真1 眉山と山体崩壊あと

させ島原大変肥後迷惑と呼ばれる約15,000人の死者・行方不明者を出した歴史的な災害を発生させた。数値シミュレーションは崩壊した山体の運動のみならず津波の発生・伝播についても行われており、災害の全体像の再現が行われているが、ここでは崩壊した山体の運動について紹介する<sup>8)9)</sup>。写真1は現在の眉山と崩壊した山体の位置を示したものである。図4は土塊の運動を時系列的に示したものである。図より崩壊の発生から約1分程度で土塊が海岸線に到着し2分後には現象がほぼ終了していることがわかる。

##### 4.2 土石流の氾濫・堆積に関する数値シミュレーション

土石流は、たとえば急勾配の渓床に崩壊などにより土砂が供給され堆積しているところに豪雨などにより大量の水が供給されると発生する。流れが輸送できる土砂濃度は勾配の増加関数で、勾配がゆるくなると土砂を堆積させる。図1に模式的に示されるように河床(移動床における土砂堆積層)では土砂粒子は相対的に運動をしていないためひずみ速度が0であり、式(16)より粒子間せん断力は骨格応力に対応する静的なせん断抵抗力(降伏応力)により受け持たれている必要がある。河床より上方では流動が生じておりひずみ速度は0でないため、ちょうど河床の位置で外力と降伏応力が釣りあっている。この条件から土石流の平均土砂濃度  $\bar{c}$  と勾配  $\theta$  の間に以下の関係が導かれる。

$$\bar{c} = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \quad (19)$$

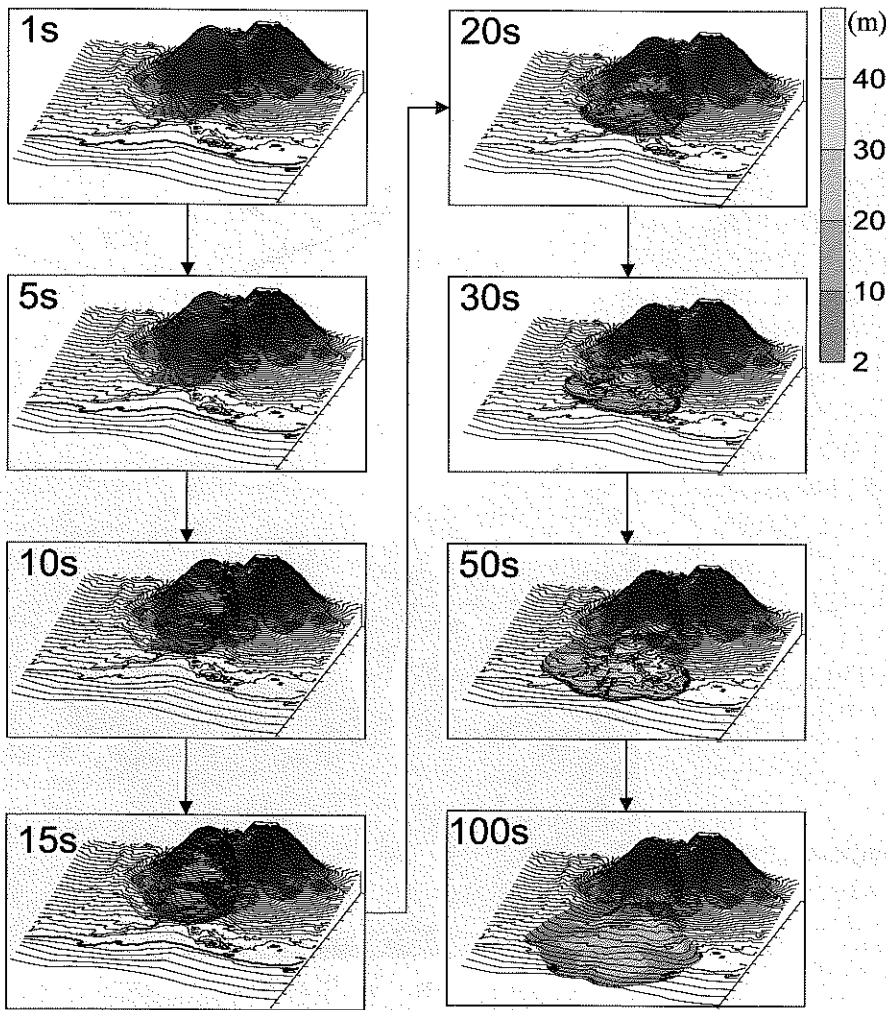


図4 眉山崩壊の数値シミュレーション結果

一方、土石流では侵食・堆積が生じるので支配方程式中の侵食速度  $E$  は0ではない。そのため  $E$  を定める支配則を与える必要がある。式(19)は流れが定常な状態、したがって、侵食も堆積も生じない状態での濃度と勾配との関係を表わしたものである。侵食・堆積を生じるような場合は必ずしも式(19)の関係が成り立つとは限らない。とはいえ、現象は定常に向かうように推移すると考えられるので式(19)は堆積・侵食速度に深く関わっていることが推定される。そこで、式(19)を次式のように濃度に対応する地形条件の形に書き改める。

$$\tan \theta_e = \frac{\bar{c}(\sigma/\rho - 1)}{\bar{c}(\sigma/\rho - 1) + 1} \tan \phi_s \quad (20)$$

すると、式(20)は平衡状態での濃度  $\bar{c}$  に対応する勾配  $\theta_e$  (平衡勾配) を示していることになる。侵食・堆積は常にこの平衡状態式(20)に向かって進行する。このような考察に基づいて、侵食・堆積前後の河床位と勾配の変化に関する幾何学的考察から侵食速度として次式が提案されている<sup>10)</sup>。

$$\frac{E}{|\bar{u}|} = \tan(\theta - \theta_e) \quad (21)$$

土石流シミュレーションの例として1996年12月6日に姫川水系蒲原沢で発生した土石流の再現計算を紹介する。当時、蒲原沢ではその前年7月に発生した姫川流域におけ

る豪雨災害関連の復旧工事が行われており復旧工事に従事していた建設作業員14名が犠牲となった<sup>11)</sup>。写真2は姫川との合流点に形成されている扇状地の災害発生直後の様子が示されている。写真上部が谷の出口(扇頂部)であり、下端が姫川との合流点である。扇頂部には建設中の砂防堰堤が見え、扇状地上には建設中の流路工(Channel Work)と床固工(Consolidation Work)が見える。再現にあたっては蒲原沢における土石流の挙動を1次元計算で追跡し姫川との合流点に形成されている扇状地の扇頂部における土石流のハイドログラフを求め、それをもとに扇状地上の土石流の挙動を追跡している。図5は土石流の氾濫範囲の時系列的変化を示している。図の左側が上流で右が下流である。また、建設中の砂防堰堤は図の最上流端に位置している。図6には単位幅流量(フラックス)の空間分布が時系列的に示されており、また各地点におけるフラックスの最大値の分布(final)が示されている。この両図から土石流は扇状地上に広く氾濫したものの、その主な部分は流路工の中を流下していったことがわかる。図7は

土砂の堆積厚の分布を示している。図より建設中の砂防堰堤の直下流に多くの土砂が堆積していることがわかる。この土砂の堆積分布は図8の実績と良く一致している。

土石流の数値シミュレーションで留意する点がある。それは、式(21)で侵食・堆積を生じさせると土砂濃度は式(19)



写真2 蒲原沢扇状地



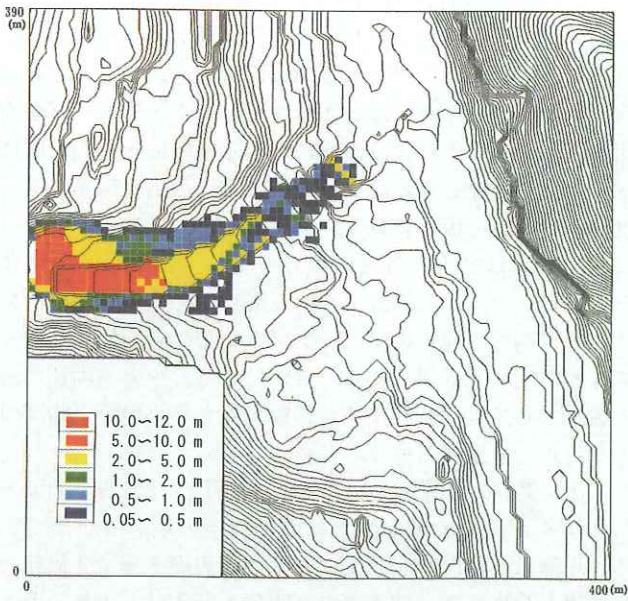


図5 土石流氾濫範囲の経時変化

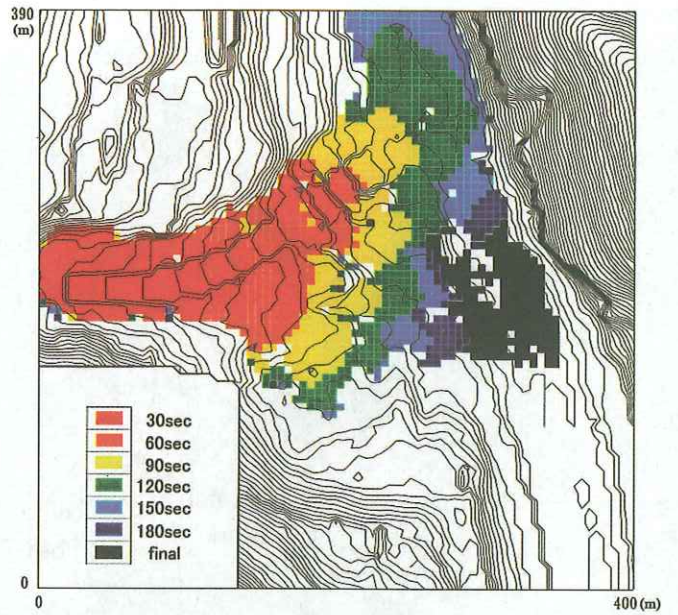
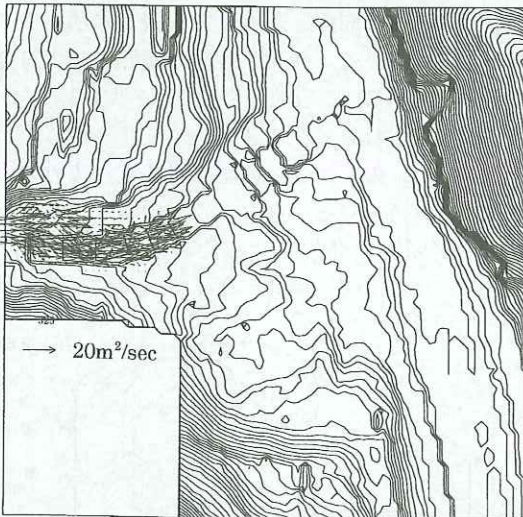
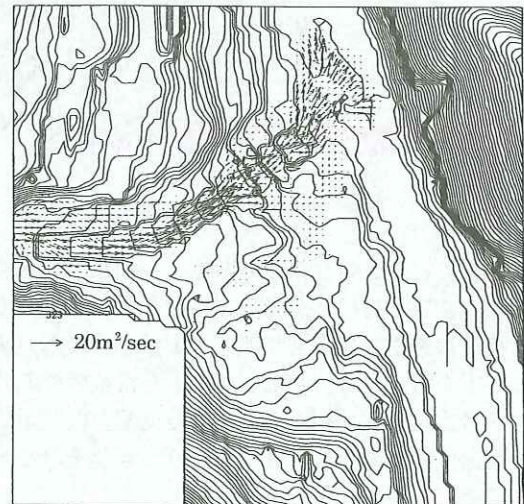


図7 堆積土砂の分布

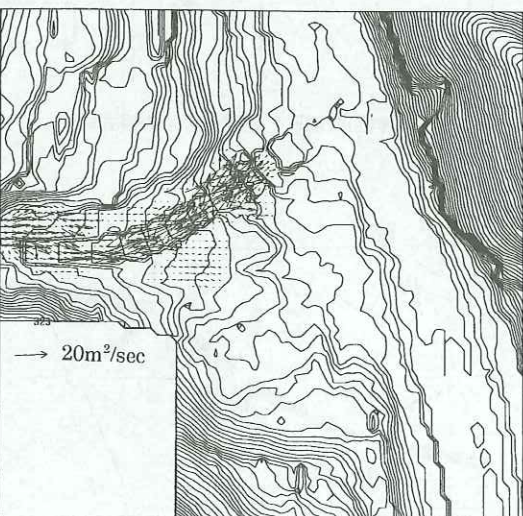
30sec 後



120sec 後



60sec 後



final

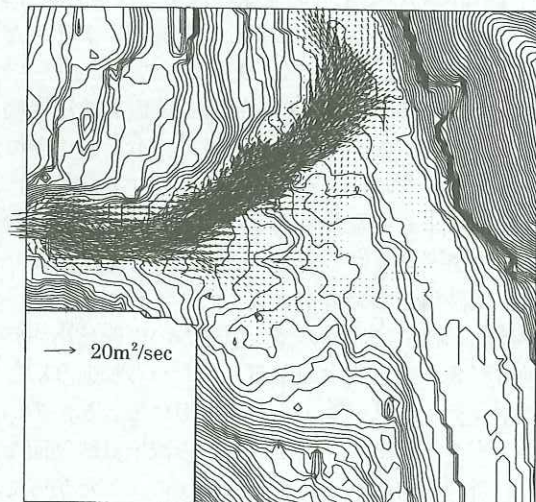


図6 フラックスの空間分布



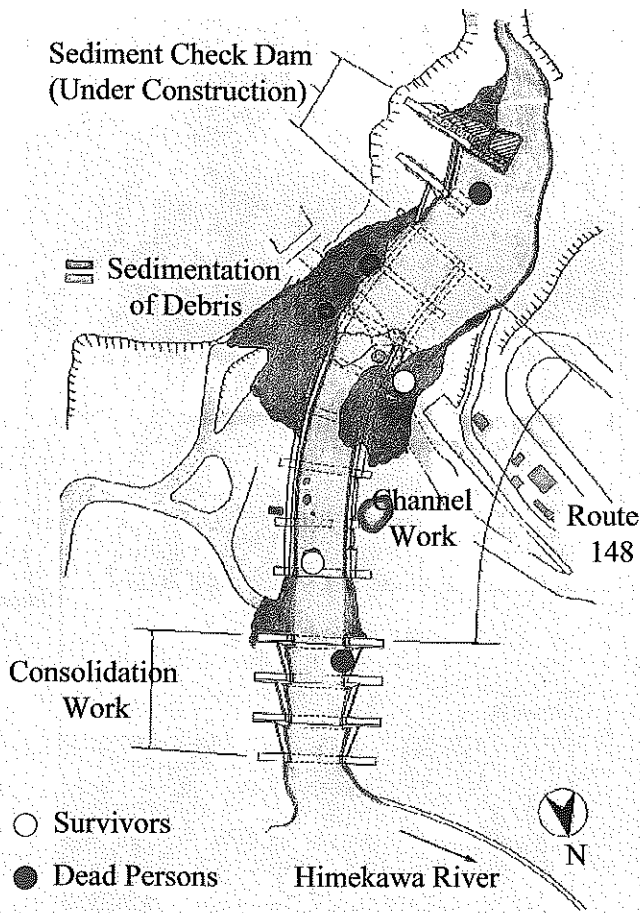


図8 実績の土砂堆積範囲

を満たさなくなるということである。これは、もし侵食・堆積過程（非定常過程）が式(21)に従うとすると、その時の応力構造は厳密には定常状態（平衡状態）の応力構造と異なることを意味する。したがって、定常状態の応力状態に関する考察をもとに組み立てられた支配方程式系に基づいて侵食速度式を導入して計算を行うときはそのことを考慮する必要がある<sup>11)</sup>。

#### 4.3 流域における土砂の生産・輸送シミュレーション

流域における土砂生産はまずは斜面崩壊によりもたらされる。斜面崩壊は降雨が地下に浸透することにより生じる。したがって、土砂の生産・輸送過程は降雨の流出過程と組み合わせて評価する必要がある。流域における土砂の生産・輸送シミュレーションにおいて特に重要な評価項目は降雨の表面流出による流量時系列（ハイドログラフ）に対する崩壊発生タイミングである。このタイミングにより流域における土砂輸送のレスポンスが大きく異なる。

降雨流出過程では流れの持つ慣性力の影響は小さいとして運動方程式、式(12)中の左辺、すなわち加速度項を省略したキネマティック・ウェーブ法を用いることが多い。キネマティック・ウェーブ法では降水の流出は地表面などの境界の局所的な勾配ベクトルに依存する。したがって、地形的な条件が重要となる。そのため、2次元の地表面を任意形状の3角形（elementと呼んでいる）で覆い、さらに地下の水文環境を決定する地層構造を導入する。図9はこのようにして作成される斜面の地形・地層モデルの模式図であ

る。この斜面の地形・地層モデルに図10に示すように1次元の河道モデルを組み合わせる<sup>12)</sup>。図10に示されるように河道モデルは斜面モデルの3角形の辺を連ねたものとして表わされる。このモデルとキネマティック・ウェーブ法を組み合わせることにより流域における降雨流出過程を評価することが可能となる。なお、地下水の流出にはダルシー則を、表面流の流出には Manning 則を用いている。

斜面崩壊は地下の各層の境界をすべり面として発生する。したがって、境界面（すべり面）上で土質強度を与えておけば崩壊の発生タイミングとその時の崩壊の深さ、すなわち崩壊土砂量を知ることができる。一方、河道の最上流端としては、飽和土塊が移動可能な最小勾配（約22°）となる点を設定する<sup>13)</sup>。

以下、実際の計算例を紹介する<sup>14)</sup>。図11は計算の対象として選んだ流域の地形図と斜面と河道の地形モデルである。地層は4層設定し、上から3層は表層土層で4層目は基岩層としている。透水係数は下層へ行くほど小さくなるように設定し、各層の境界に地下水流が生じるようにしている。4層目に浸透してゆく降水は検討対象流域外へと流出してゆく。各層の層厚、透水係数は表1に示すように常識的な値を用いている。なお、各層の境界での土質強度は同じ値を用いている。この地形に図12に示すような、降雨のピークが先に現われるケース（ケース1）と後に現われるケース（ケース2）の2ケースの雨を降らせ、土砂の生産と輸送のレスポンスを見る。なお、この雨に先立ち、あらかじめ河川に表面流を発生させるため1.5 mm/hの降雨を2000時間降らせている。崩壊のタイミングによる土砂輸送

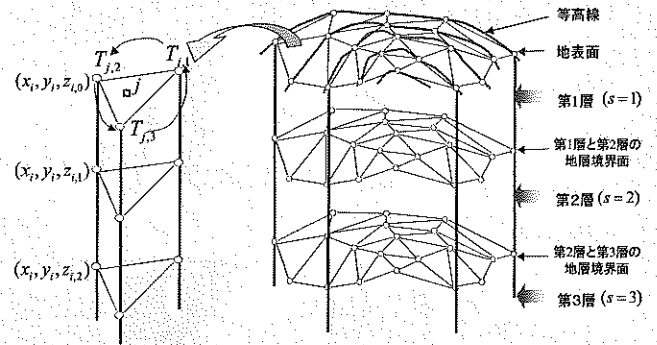


図9 斜面の地形・地層モデルの模式図

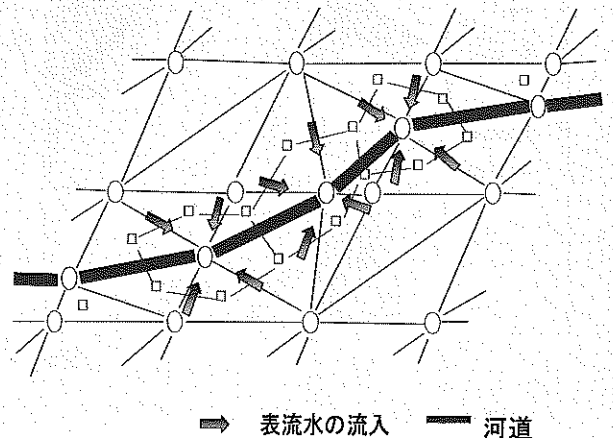


図10 斜面モデルと河道モデルとの結合



のレスポンスの違いを見るため、初期条件として河道堆積土砂はないとしている。

図13, 14は両ケースの崩壊発生地点を示したものである。また、図15, 16は両ケースの計算領域下流端からの流出流量と流出土砂量の時間変化を示している。図13, 14から、両ケースいずれも急勾配地点から崩壊が発生しており、その空間分布はほとんど一致している。その一方で、図15, 16から流出土砂量は両ケースで大きく異なっていることがわかる。これは、降雨流出のタイミングと土砂生産のタイミングの違いによって生じている。図17, 18は崩壊により生産される土砂量の時系列的变化を見たものである。両図の比較から土砂生産のタイミングや時系列がかなり異なっていることがわかる。図17によると、ケース1では土砂生産のピークは降り始めから12時間後（計算ははじめから2012時間後）あたりと18時間後（同2018時間後）あたりであって、図15からこのときには降雨流出に伴う洪水はほぼ終了していることがわかる。一方、図18によるとケース2では崩壊による土砂の生産は降り始めから18時間後（2018時間後）から24時間後（2024時間後）あたりにあり、図16によるとそのころやっと洪水のピークを過ぎた頃で、

表1 地層モデルの層厚と透水係数

	層厚 (m)	透水係数 (cm/s)
第1層	0.5	$5.0 \times 10^{-3}$
第2層	0.5	$2.0 \times 10^{-3}$
第3層	1.0	$1.0 \times 10^{-3}$
第4層	$\infty$	$1.0 \times 10^{-4}$

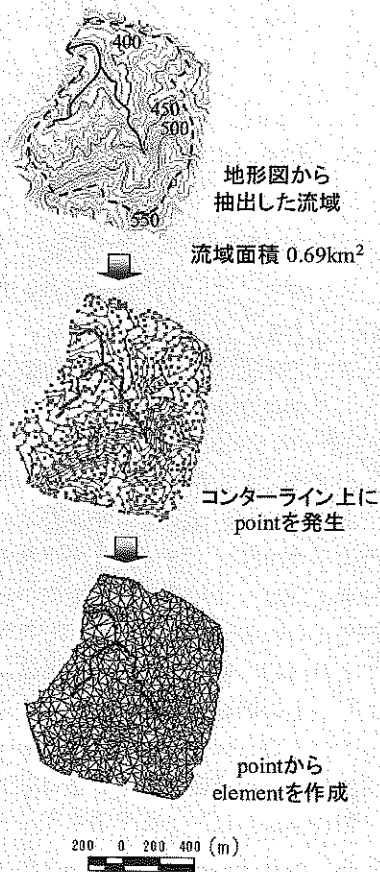


図11 流域モデル

ケース1に比べると土砂の輸送能が大きいことが示されている。また、面白いことに、ケース1では18時間(2018時間)あたりの強い崩壊土砂量のピークに対応して洪水波形に小さなピークが現われている。

## 5. おわりに—今後の課題

山地流域における土砂輸送の数値シミュレーションでの課題はなんといっても密度に差がある土砂（固体粒子）と

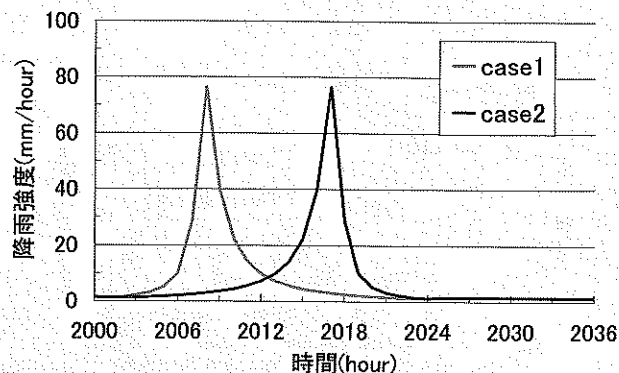


図12 降雨ハイトグラフ

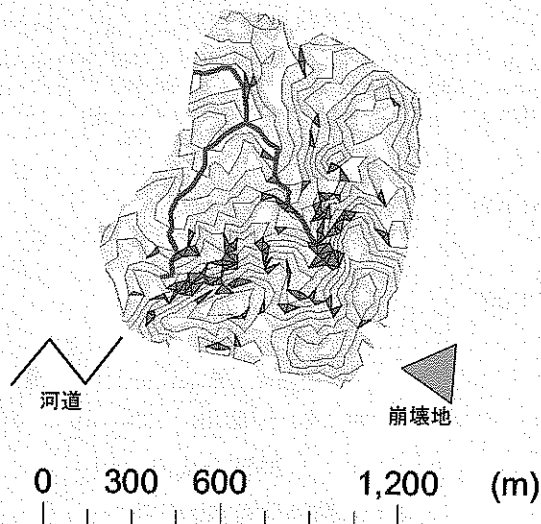


図13 崩壊箇所 (ケース1)

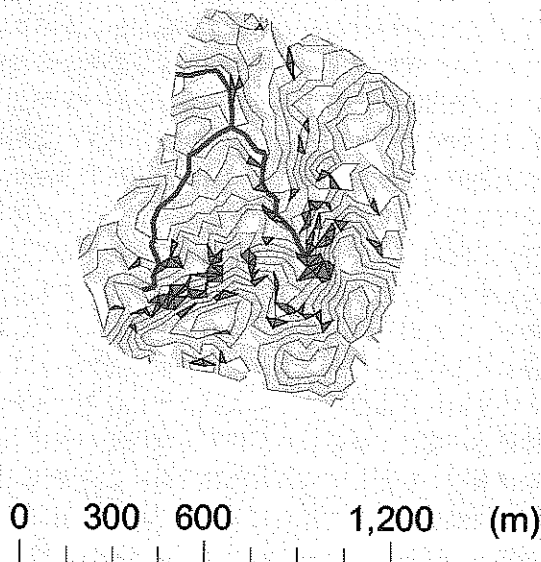
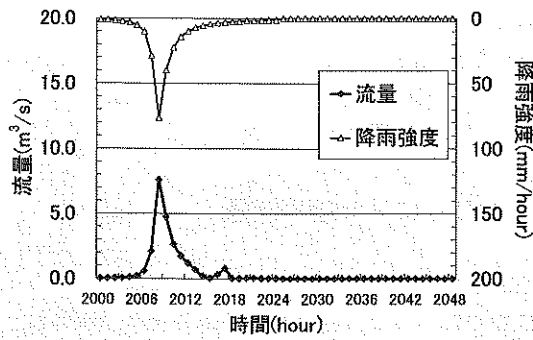
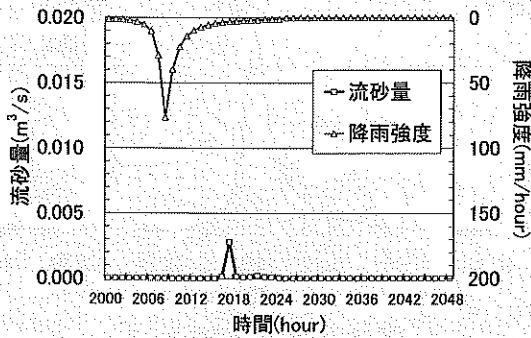


図14 崩壊箇所 (ケース2)



(a) 流量の時系列変化



(b) 流砂量の時系列変化

図15 下流端でのハイドログラフと流出土砂量 (ケース1)

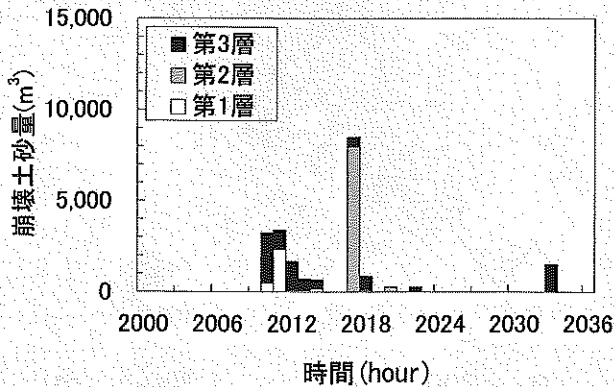
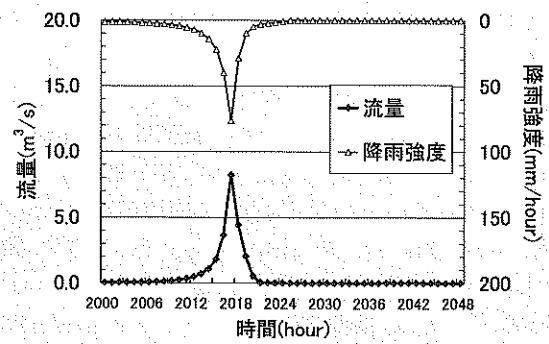
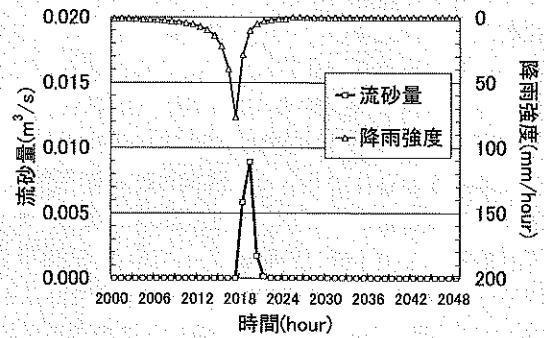


図17 崩壊土砂量 (ケース1)

水(液体)の混合物からなる流れの流動メカニズムに関する理解が不十分ということにある。現在土石流から比較的掃流力の大きい流れ場における掃流砂流まで単一の構成則を用いて、実用的な数値シミュレーションが一応可能な状態にある。数値シミュレーションに用いられている構成則は定常(平衡)な流れに対する理論的・実験的考察から得られている。その意味するところのものは、流れ全体は非圧縮性で、固相(粒子相)と液相は同じ運動をしているということであり、土砂の濃度変化がない条件下におけるものである。したがって、侵食・堆積を生じるような、固相に着目すると圧縮性を示すような流れ場に対する力学的評価はこの考察からは得られていないことになる。また、流れ全体は非圧縮性であるから、たとえば固相が圧縮を示すときには液相は膨張していることになる。この場合、固相と液相の流線は交差することになりその相互作用に関する検討が必要となる。これらのことは、たとえば、粒子間圧力の分配、式(18)、や、侵食速度式、式(21)、の問題と密



(a) 流量の時系列変化



(b) 流砂量の時系列変化

図16 下流端でのハイドログラフと流出土砂量 (ケース2)

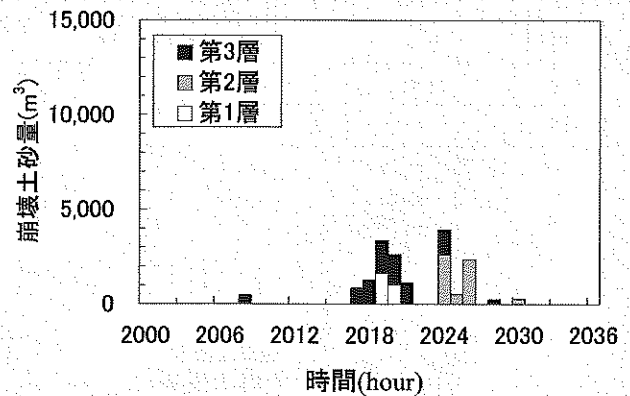


図18 崩壊土砂量 (ケース2)

接に関わっており数値シミュレーションの支配方程式系の本質的な問題でもある。

また、これまでの議論は土砂の粒度分布についてはあえて注意を払ってこなかった。実際には土砂は非常に幅広い粒度分布(数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\text{cm}$ , 場合によっては数 $\text{m}$ )を持っており、流れのメカニズムを考察する際の重要なファクターのひとつである。たとえば、粒子間圧力は混合粒径であれば、分圧のように粒径によって受け持たれる圧力が異なることが十分考えられ、せん断力の構造についても異なってくる事が考えられる<sup>15)</sup>。この問題も先の構成則の問題と関連づけてより詳細に検討する必要がある。

このような手法上の問題の他、これはどのような数値シミュレーションにもいえることであるが、数値シミュレーションに必要なデータの計測・推定手法に関する問題がある。これまでの経験からは、ここでの数値シミュレーション例に示したように基本的に現地における観察や観測資料などから常識的な値を用いれば概略現象の説明が可能であ

るといえるが、その判断には数値シミュレーションモデルの基礎となっている支配方程式に対する理解と、何よりある程度の経験が必要とされる。この経験を如何に理論的に説明するかがもう一つの大きな課題であろうと思っている。

以上、著者のこれまでの研究や経験に基づいて山地流域における数値シミュレーションについて、現状および課題と思われることについて述べてきたが、さまざまな意味で、これらは個人的な見解であることを最後に述べておきたい。

恩師や先輩から指導を受けながら、研究仲間と日頃のディスカッションを通して理解を深めているつもりではあるが、どうもおしかりを受けそうな気がしてならない。是非とも関連する書物や論文に目を通されることをお勧めしたい。読者の皆様にとってこの小文が山地流域における土石流輸送に関する力学や数値シミュレーションの多様な世界への入り口となれば、著者にとってこれ以上の喜びはない。

#### 参考文献

- 1) 宮本邦明・伊藤隆郭：支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション，砂防学会誌，Vol. 55, No. 2, pp. 24-35, 2002.
- 2) 宮本邦明：土石流流動のメカニズム(1)，砂防学会誌，Vol. 45, No. 4, pp. 40-45, 1992.
- 3) 宮本邦明：土石流流動のメカニズム(2)，砂防学会誌，Vol. 45, No. 5, pp. 22-27, 1992.
- 4) 宮本邦明：土石流流動のメカニズム(3)，砂防学会誌，Vol. 45, No. 6, pp. 42-49, 1993.
- 5) Egashira, S., Miyamoto, K., and Itoh, T.: Constitutive Equations of Debris Flow and Their Applicability, Proc. of 1st Int. Conf. W. R. E. D./ASCE, pp. 340-349, 1997.
- 6) 道上正規・宮本邦明・片嶋啓介・植村慎：土塊の運動機構と1次元数値計算法，水工学論文集，第42巻，pp. 925-930, 1998.
- 7) 宮本邦明：崩壊土塊の運動の2次元数値シミュレーション，砂防学会誌，Vol. 55, No. 2, pp. 5-13, 2002.
- 8) Miyamoto, K., Masanori Michiue, M., and Kubota, T.: Study on Mayuyama Landslide in 1792, Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millenium, Proceedings of 28th IAHR Congress, CD-ROM, IAHR 99/pdf/d 140. pdf.
- 9) Michiue, M., Hinokidani, O. and Miyamoto, K.: Study on the Mayuyama Tsunami Disaster in 1792, Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millennium, Proceedings of 28th IAHR Congress, CD-ROM, IAHR 99/pdf/d 141. pdf, 1999.
- 10) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム，砂防学会誌，Vol. 47, No. 2, pp. 51-56, 1993.
- 11) 土木学会蒲原沢土石流災害調査特別委員会：姫川支川蒲原沢土石流災害と危機管理に関する調査研究報告，土木学会，45-66, 1998.
- 12) 井戸俊介・道上正規・宮本邦明・檜谷治：任意3角形平面スキームを用いた地下水・地表水の流出解析，水工学論文集，第46巻，pp. 157-162, 2002.
- 13) 宮本邦明：豪雨時の土砂生産，水工学シリーズ01-A-4，2001年度(第37回)水工学に関する夏期研修会講義集Aコース，土木学会水理委員会・海岸工学委員会，2001.
- 14) 宮本邦明・井戸俊介：任意3角形平面スキームを用いた土砂流出解析法，砂防学会誌，Vol. 55, No. 6, pp. 33-39, 2003.
- 15) 山野(宮本)邦明・大同淳之：2粒径からなる混合粒径粒子流の流動機構，土木学会論文集，第357号II-3, pp. 25-34, 1985.

# 有限要素解析による進行性破壊の 数値シミュレーションの試み

ちょう  
張

ほう  
鋒\*

## 1. まえがき

地山の不安定性をもたらす外的要因は地震、豪雨、風化による強度の劣化など自然の力によるものと人間の活動によるものが挙げられる。地山の安定性に関する研究が盛んに行われてきたが、地山の強度と変形特性を同時に考慮する研究はまだまだ足りない。地山の強度を残留強度（安全側の設計）もしくはピーク強度（危険側の設計）で評価する場合、不安定領域の大きさは全く異なる。従来の設計法は地山の極限状態のみに着目し、地山の変形特性および強度の劣化・低下化していくことを考慮していないため、進行性破壊による不安定区域の発展とその抑止工のメカニズムが不明確である。その結果、地すべり抑止工と地山の一体系の長期安定性を評価する手法はいまだに確立されていない。地山の変形特性および強度を同時に考慮できないため、地すべり抑止工が対象とする不安定領域の大きさを正確に計算もできない。その結果、経済的かつ安全性のある抑止工の設計ができないため、安全率を大きく取らざるを得ない。

一方、土（岩盤も含め）の力学特性の複雑性により、地山の強度と変形特性を同時に正確的に評価するのは望ましいが、高度な解析技術、地盤調査手法および室内試験の手段が求められる。土の力学特性をモデル化する場合は、以下に示すいくつかの問題を解決しなければならない。

- 土のクリープ特性
- 土の強度劣化特性
- 不飽和土の浸水破壊特性

また、境界値問題を解くのに1自由度の構成式を使うのは限界があり、一般応力状態にも室内試験でその妥当性が検証された構成式が必要とされる。簡単に言うと、テンソルの構成式が大前提となる。さらに、不飽和土の力学特性をきちんと評価するために、数値解析には土・水・空気の3相混合体理論に基づいた理論が望まれる。土のクリープ特性に対して二つの見方がある。すなわち、クリープ特性があくまでも材料の本来の特性であり、それを表現するのに粘塑性理論が必要とする考え方と、クリープ特性が単な

る土・水連成作用によるもので、塑性理論と土・水連成作用を考慮する数値解析により説明できる考え方である。著者はこの二つの考え方がどちらも間違っていないが、どちらももう一方の考え方を完全にカバーすることができないと思う。なぜなら、土のクリープはこの2重特性を同時に持っているからである。土・水・空気の3相混合体理論に基づいた数値解析がまだ開発されていないが、飽和土を相手にした土・水2相混合体理論に基づいた数値解析手法に関する研究が最近盛んに行われるようになった。また、不飽和土の弾塑性理論の研究 (Azevedo et al, 2005)<sup>2)</sup> も多く見られるようになり、近い将来その境界値問題への応用も実用化されるだろう。

ここでは二つの斜面崩壊の事例を通じて、土のクリープ特性に起因する進行性破壊のメカニズムを有限要素法により解析し、FEMによる進行性破壊の数値シミュレーション (Adachi et al, 1994; Zhang et al, 2003 a; Ye et al, 2005)<sup>1),4),3)</sup> の可能性と限界を探る。簡単のため、乾燥土と飽和土の2ケースのみを考慮する。

## 2. 豪雨による斜面の進行性破壊

平成11年9月22日に東海北陸自動車道美濃IC～美並ICの間に大規模な斜面災害が発生した(写真1)。災害当時は、熱帯低気圧の停滞や台風の影響による異常降雨があり、この区間の9月7日～22日の間の総雨量は1000mmを超



写真1 東海北陸自動車道の斜面崩壊 (Photo by JH)

\* 名古屋工業大学 都市社会工学科 教授



えていた。

岩盤斜面の崩壊には、掘削後数年を経た斜面が突然崩壊に至る事例や、豪雨時などに発生した崩壊が数時間をかけて斜面上方へ拡大していく事例が少なくない。このような岩盤斜面崩壊は、進行性破壊によるものと考えられる。今回の解析では、このような進行性破壊の原因となる地盤の応力-ひずみ関係の時間依存性を、岩盤内部の間隙水圧の経時変化に伴う有効応力状態の変化として捉え、軟岩のひずみ軟化およびダイレイタンス特性を記述できるひずみ軟化型弾塑性構成式を2相混合体理論に組み込んだ土・水連成有限要素解析により、岩盤斜面の進行性破壊のシミュレーションを行った。

この岩盤斜面では、豪雨後に、斜面下部に構築された切土法面部分で幅40m、長さ50mの1次崩壊が発生した。その後、崩壊が段階的に拡大し、1次崩壊発生から約3時間後に崩壊崖が斜面頂部に達した。崩壊の最終形は幅120m、長さ125mに及んだ。この斜面の地質は、強風化～風化を被ったチャートを主体とし、砂岩や泥岩を伴う。ボーリング調査と弾性波探査結果を基に想定された崩壊前の地質断面を図1に示す。

解析 (Ye et al, 2005)<sup>3)</sup>では、崩壊の中軸部を通る断面において平面ひずみ状態を想定し、二次元有限要素解析を実施した。解析モデル：斜面形状と地質断面を考慮し、図2に示す解析モデルを構築した。接点数は1520、要素数は1422であり、要素は風化岩盤、強風化岩盤、コンクリートブロック擁壁付き強風化岩盤の3種からなる。風化岩盤の透水係数は現位置透水試験の値を使用した。境界条件は、

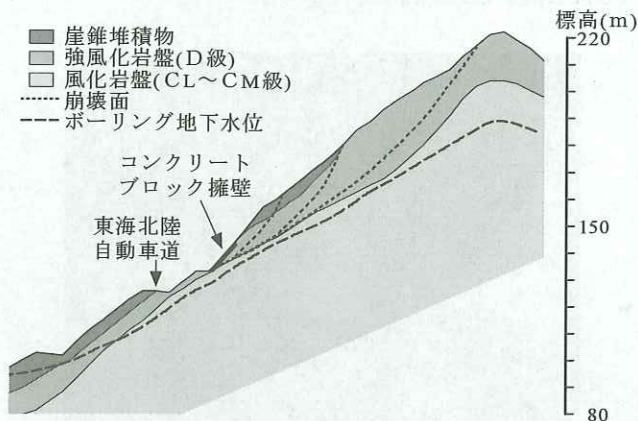


図1 解析対象斜面の地質断面

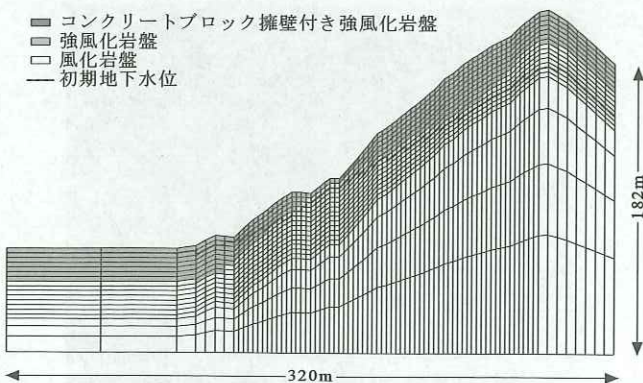


図2 解析モデル

モデルの両側面は水平方向のみ変位を拘束し、底面は水平、鉛直方向とも変位を拘束した。また、モデル両側面と底面を非排水境界とし、地表面を排水境界とした。

地下水条件について、初期地下水位は、ボーリングで確認された地下水位のモデル底面からの高さを全水頭として、そのコラムの全要素に与えた。この条件は、解析対象斜面内が初期から完全飽和状態にあることを仮定している。しかし、通常の斜面では、地下水位以上の地盤は不飽和状態にある。したがって、解析における経過時間は、降雨開始からの時間ではなく、降雨が継続し岩盤斜面内が飽和状態となった時点からの経過時間を表すことになる。また、降雨時の岩盤斜面内の間隙水圧状態は、初期地下水位線がとおる要素に、地表からの深度分の正の圧力水頭を与えることによって変化させた。これは、後背山地から供給された地下水が、斜面内の地下水位を全体的に押し上げることを想定している。

進行性破壊の進展は、せん断ひずみの卓越領域の発達および残留状態領域の一体化として捉えられる。そこで、斜面全体の進行性破壊の進展状況をせん断ひずみの観点から検討した。図3にせん断ひずみの卓越領域の拡大状況を示す。この図から、斜面内に断片的に生じたせん断ひずみの卓越領域が時間経過とともに拡大し、円弧状のせん断帯に発達していく様子が見える。図1と比較すると、せん断帯と崩壊面位置が良く一致している。本解析により得られた知見を以下に列記する：

- ひずみ軟化弾塑性構成式に基づいた土・水連成解析により、実岩盤斜面の進行性破壊現象を表現できること

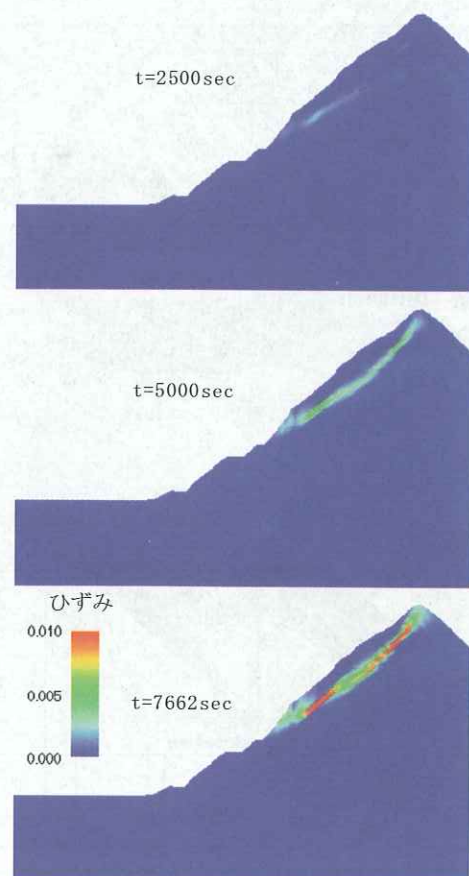


図3 せん断ひずみの卓越する領域の拡大状況



が確認された。

- 岩盤斜面の崩壊は、斜面内部に断片的に形成されたせん断ひずみの卓越領域が互いに連結し、せん断帯を形成することによって進行する。
- 岩盤のせん断帯は、岩盤材料のひずみ軟化現象によって形成される。
- 岩盤斜面内部に形成されたせん断帯が崩壊面となって斜面全体の崩壊に至る。
- 間隙水圧の上昇の程度が進行性破壊の進展状況に大きく影響している。

### 3. 山岳トンネル掘削による斜面の進行性破壊

山岳トンネルを施工する場合には、掘削後の地山は時間がたつと緩むことがあり、適切な措置をとらないと地山崩壊の恐れがある。特に斜面形状とトンネル路線が斜交する坑口を建設する場合、トンネル出口付近の斜面崩壊を防止する目的で、抱き擁壁・押さえ盛土等の保護工を施工して安全性を高める必要がある。斜面崩壊が発生する場合には、崩壊が数時間～数日かけて斜面上方へ拡大していく現象、いわゆる進行性破壊現象がみられる。そのため、トンネル掘削による偏圧や周辺地山への影響を適切に予測し、必要によっては対策工法を講ずることが、山岳トンネル工事の信頼性・安全性の確保、保守コストの節約、さらには耐久年数の長期化につながる。

平成9年に岐阜県吉城郡のAトンネルの終点側でトン

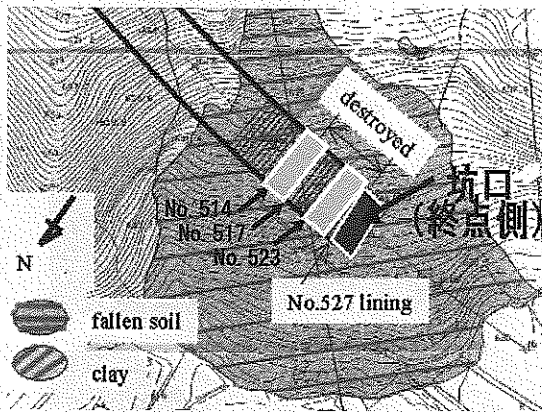


図4 崩壊斜面とトンネル線形

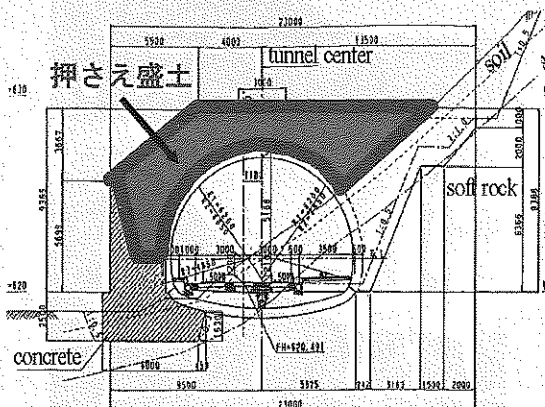


図5 設計当初の坑口断面

ネル掘削による地盤のゆるみにより崩落事故が発生した。この崩落事故が発生した岩盤斜面では、トンネル貫通の数日後、終点側坑口上部斜面が崩壊した。崩壊のひきがねとなる地山の圧力でトンネル支保にクラックが発生し、クラック発生後約2時間の間に段階的にゆるみ域が拡大し崩壊に至った。この現象は進行性破壊と考えられる。図4に崩壊斜面とトンネル線形を示す。

崩壊発生前の地形・地質などの特徴について以下に列記する。

- 崩壊発生した斜面は、下部ほど急斜面となっていた。
- 旧すべり崩壊跡地がトンネル上部斜面に分布していた。
- 基盤地質は崩壊地の最上部に至るまで、船津型のミロナイト化した花崗閃緑岩である。
- 斜面には何層もの粘土化変質帯が差し目に分布して、脆弱化している。
- 風化した岩盤が斜面上方に厚く分布している。
- 粘土化帯が顕著な不連続面となっている。

図5に示すように、Aトンネルの当初設計では、すべり抑止力として効果のある抱き擁壁と人工地山による押さえ盛土を設計していた。しかし実際の施工では、岩質が比較的良好で偏圧はないと判断し、押さえ盛土を施工しなかった。写真2には貫通後の坑口の様子を示す。

崩落事故経緯としては、崩落事故の発生した岩盤斜面は、トンネル貫通の数日後、終点側坑口上部斜面が崩壊した。崩壊土砂圧力でトンネル支保にクラックが発生し、クラック発生後1時間45分で全面崩壊した。写真3に崩壊土砂の除去後に観察した支保工の変形の状況を示す。

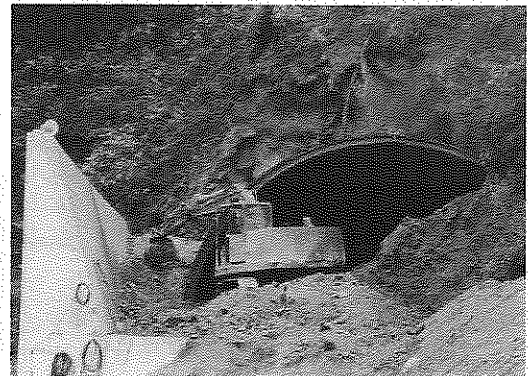


写真2 貫通後の坑口の様子



写真3 鋼製支保工の変形状況

トンネル掘削前の斜面の状態としては、斜面下端部に応力が集中していた状態と考えられ、この応力集中していた部分が、トンネル周辺のゆるみによってひずみが解放されたことが、斜面の全体的なすべりに発展したと考えられる。

崩落事故の素因としては、斜面に何層もの粘土化変質帯が差し目に分布して脆弱化し、風化した岩盤が斜面上方に厚く分布していたことが上げられる。崩壊前の数日以内に雨が降っておらず、崩壊範囲において顕著な湧水などは認められないため、雨・地下水位の上昇が崩壊の誘因になったとは考えられない。

崩壊の直接の誘因は、掘削前後を通じたトンネル周辺地山のゆるみの進行と考えられる。この際、すべり抑止力として効果のある人工地山による押さえ盛土を施工していなかったことが、被害が拡大した大きな原因と考えられる。

FEM 数値解析 (Yashima et al, 2005)<sup>7)</sup> では、押さえ盛土がない場合 (Case-1) と押さえ盛土がある場合 (Case-2) の2ケースについて検討する。トンネル走行方向に直向する断面で斜面の2次元有限要素解析をした。解析では、施工過程を考慮して、掘削率40%のトンネル掘削を実施した。その後支保工を施工して残りの60%を解放し、掘削後

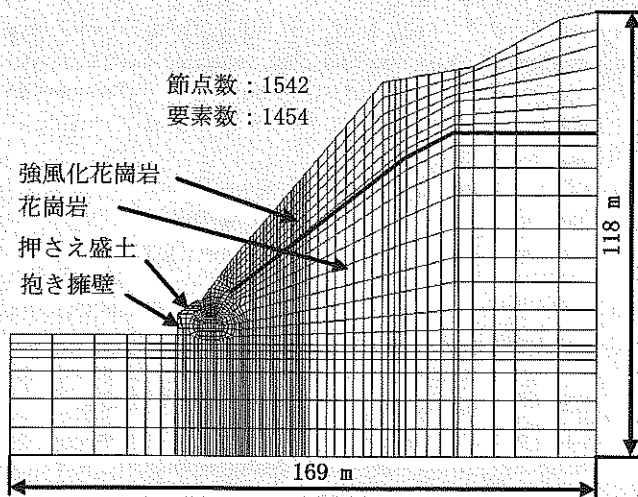


図6 解析モデル

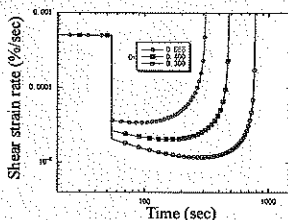
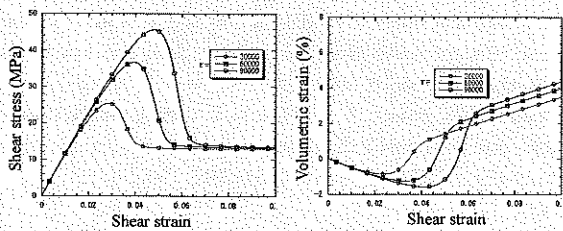


図7 地山の応力・ひずみ関係とクリープ特性

の時間依存性挙動を調べた。

斜面形状と地質モデルを考慮し、図6に有限要素解析に用いた斜面サイズ、メッシュを示す。トンネル安定のため、トンネルの支保工、山側にロックボルト(4mおよび6m)が施工されている。これらはBeam要素としてモデル化した。なお、図7に強風化花崗岩の圧縮試験の弾・粘塑性モデルに基づく要素シミュレーションの結果を示す。モデルの底面を、水平・鉛直方向ともに変位を拘束し、両側面は水平方向のみ拘束した。抱き擁壁は剛体と考え、転倒に対する抵抗モーメントが抑止力として作用するものとする。雨・地下水位の上昇が崩壊の誘因と考えられ難いため、土水連成解析ではなく、弾・粘塑性モデルに基づいた全応力解析を実施した。

図8にせん断ひずみの卓越領域の拡大状況を示す。抑え盛土がない場合には掘削完了直後にトンネル上部斜面でせ

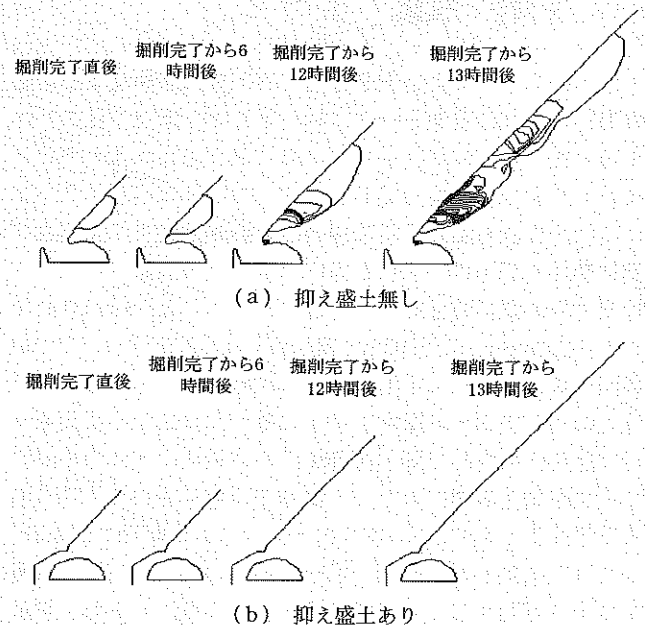


図8 せん断ひずみの卓越領域の進展様子

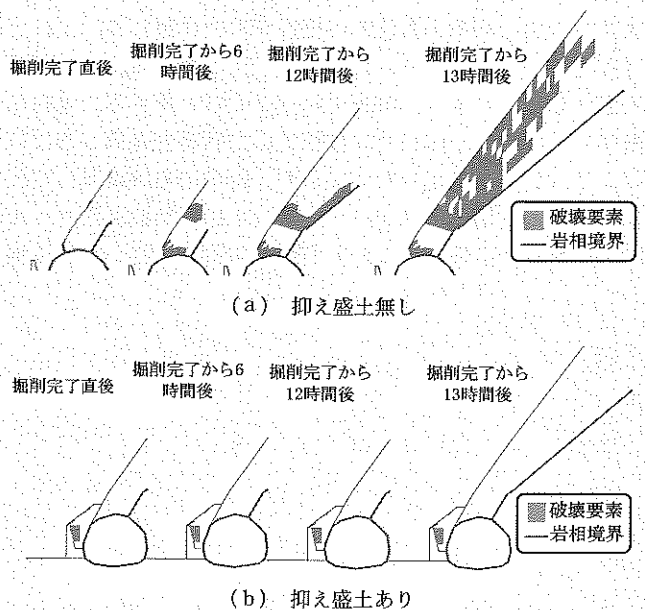


図9 破壊領域の拡大の様子

ん断ひずみが現れる。さらに掘削完了から12時間経過すると、斜め上方に向かって急速に拡大し始める。掘削から13時間後、斜面内にせん断ひずみが顕著に現れるせん断帯が形成されていることがわかる。一方抑え盛土がある場合には、掘削完了から13時間後もあまり変化はみられない。掘削完了直後には掘削によりトンネル上部斜面でせん断ひずみが現れるが、抑え盛土を施工することにより、地山が安定したと考えられ、抑え盛土の効果があることがわかった。もし抑え盛土を施工していれば、崩落があったとしても今回のような大規模な斜面崩壊は起こらず、斜面の安定が保たれていたかもしれないと考えられる。図9に破壊領域の拡大の様子を示す。せん断ひずみの進展様子と同様に、抑え盛土がない場合には破壊領域が斜面の上方まで到達し、斜面崩壊に至る。

#### 4. 斜面の進行性破壊を予測するための有限要素解析の課題

以上の二つの被災事例を通じて有限要素解析による斜面の進行性破壊の現象をシミュレートした。予測手法のレベルから言うと、いずれもレベルCにあたる。すなわち、イベントがすでに発生しており、すべての情報が手に入っている状況にあった。解析に用いられる弾塑性モデルおよび弾粘塑性モデルはいずれも室内試験でその要素レベルでの地盤材料の力学特性を適切に評価できることが確認されている (Zhang et al, 2003 b; Zhang et al, 2005)<sup>5),6)</sup>。二つの斜面崩壊はいずれも地盤のクリープ挙動によるもので、乾燥土に対して弾・粘塑性モデルに基づく全応力有限要素解析、飽和土に対して弾・塑性モデル (構成モデル自身がクリープ挙動を表現できない) に基づく飽和土の土水連成有限要素解析により、その崩壊のメカニズムの解明を試みた。得られた結果から、斜面の進行性破壊の現象を有限要素解析により解明することができると言えよう。しかし、斜面崩壊の予測手段としてすぐ使える段階までにはまだほど遠い。なぜなら、いくつかの問題がまだ解決されていない。まずは地山の初期応力状態の把握が非常に難しく、よほどの努力をしないかぎり、ほとんど不可能である。この問題を解決しないかぎり、解析の精度がぐっと落ちる。現在の解析レベルでは、解析により初期応力状態を逆算しかないが、イベントが発生しないかぎり、把握するのは難しく、レベルAの予測はなり得ない。次は地山材料の要素レベルの力学特性の把握、すなわち有限要素解析に用いられる地

盤定数の把握である。三軸圧縮・クリープ試験を実施すれば理論上土の物性値を知ることができる。しかし、室内試験に用いられるサンプルはコアが取れる部分ばかりで、肝心のクリープ挙動が顕著な地山はほとんど悪い地盤であるため、得られた物性値が役に立たないことが多い。一方、悪い地盤の不攪乱試料を取るのに膨大な人力・金・時間が必要である。したがって、室内試験のみに依存する有限要素解析の大前提がきちんと守られるかどうかは全く保証されていない。解析手法がいくら正確であっても、精度の悪い入力値を使うと、解析の精度が上がることはまずあり得ない。最後に、冒頭にも述べたが、不飽和土の力学特性のモデル化とその数値解析への適用がまだ十分議論されていない。浸水破壊現象が斜面崩壊の重要な外的要因としてよく知られているが、今後の研究課題として大いに力を入れる必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Adachi, T., Oka, F. and Zhang, F.: An elasto-viscoplastic constitutive model with strain softening and its application to the progressive failure of a cut slope, AMD-Vol. 183/MD-Vol. 50, Material Instabilities, Theory and Applications, ASME, 203-217, 1994.
- 2) Azevedo, R. F., Reis, R. M. and Vilar, O. M.: Constitutive Modeling of Saturated and Non-Saturated Soil Behavior, Proc. of 2<sup>nd</sup> International Workshop on New Frontiers in Computational Geotechnics, Fortaleza, Brazil, Zhang et al. (ed.), 33-38, 2005.
- 3) Ye, G. L., Zhang, F., Yashima, A., Sumi, T. and Ikemura, T.: Numerical analyses on progressive failure of slope due to heavy rain with 2D and 3D FEM, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 2, 1-17, 2005.
- 4) Zhang, F., Yashima, A., Osaki, H., Adachi T. and Oka, F.: Numerical simulation of progressive failure in cut slope using a soil-water coupled analysis based on a strain-soften model, Soils and Foundations, Vol. 43, No. 5, 119-131, 2003 a.
- 5) Zhang, F., Yashima, A., Ye, G. L., Adachi, T. and Oka, F.: An elastoplastic strain-softening constitutive model for soft rock considering the influence of intermediate stress, Soils and Foundations, Vol. 43, No. 5, 107-117, 2003 b.
- 6) Zhang, F., Yashima, A., Nakai, T., Ye, G. L. and Aung, H.: An elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock based on tij concept and subloading surface, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 1, 65-73, 2005.
- 7) Yashima, A., Zhang, F. and Ye, G. L.: Progressive failure of slope due to tunnel excavation and its numerical simulation, Proc. 17<sup>th</sup> ICSMGE, Vol. 2, 2611-2615, 2005.

# 都市火災の延焼予測シミュレーションの 現状と課題

樋田 圭佑\*  
もとなか たけよし\*\*

## 1. はじめに

都市部を中心に広範な領域に広がる密集市街地では、建物の隣棟間隔が狭いため、構造的に火災延焼が起りやすくなっている。特に、大規模な地震が発生した場合には、火災の同時多発によって消防機能が分散されるうえ、損傷のために建物の防火性能が低下しているため、容易に火災延焼が起り、被害が大規模化する危険性がある。

こうした火災に対する危険性を評価し、有効な火災安全対策を講じるには、火災の定量的な拡大性状を合理的に予測する手法が必要である。我が国の市街地では、古くから常習的に都市火災が発生してきたため、これに関連する研究は数多くなされてきた。特に、燃焼領域の拡大を時系列に予測するモデル（以降は延焼モデルと呼ぶ）には、浜田式<sup>1)</sup>を先駆とする多くの手法が開発され、広く実用に供されてきた<sup>2)~8)</sup>。

こうした従来のモデルの特徴は、火災の拡大性状を経験的にモデル化し、これに含まれるモデル定数を過去に発生した大火等のデータから決定するアプローチを採る点にある。たとえば、最も代表的な延焼モデルである浜田式では、

市街地が特性の均質な建物の集合からなるものと考え、図1のように出火点から楕円状に火災が拡大するとの予測を行う。たとえば、出火点から風下方向への延焼速度  $V$  を次のように表している。

$$V = \frac{(a'+b')(1-c')}{a'+5b'/3} \cdot \frac{(a+d)(1+0.1U_{\infty}+0.007U_{\infty}^2)}{3+3a/8+8d/1.15\beta(5+0.5U_{\infty})} \quad (1)$$

ここで、 $a$  は建物の代表長さ、 $d$  は隣等間隔、 $a'$  は木造建物の比率、 $b'$  は防火造建物の比率、 $c'$  は耐火造建物の比率、 $U_{\infty}$  は市街地風の風速、 $\beta$  は出火からの経過時間に関連する係数である。

こうした手法では、式(1)からも明らかのように、市街地の巨視的な指標を構成変数としていることで、比較的簡便な計算式で延焼の予測が可能である。特に、膨大な数の建物が集積する市街地では、こうした特徴が大きな利点となる。しかし一方で、火災拡大のメカニズムが陽には定式化されていないため、多様な市街地特性を反映させた延焼予測計算を行えないことや、各種防火対策の効果を評価することが困難であるなどの問題点が指摘されてきた<sup>9)</sup>。たとえば、防火対策の中には、樹木の並びを連続させることで延焼遮断帯を形成し、火災拡大の阻止を図るものがある。しかし、これが実際に整備された場合に、どの程度の延焼抑止効果を持つのか、経験的モデルで定量的に評価することはできなかった。

これまでに、こうした経験的なアプローチの下に延焼モデルが開発されてきた背景には、火災拡大性状に関する知見の不足や、膨大な市街地情報を処理するための計算環境が不十分であったことなどが挙げられる。しかし、近年の火災安全工学の発展や、阪神・淡路大震災を契機とした市街地の火災安全性能向上を目指した動きを受け、いくつかの新しい延焼モデルの開発の試みが始まっているたとえば<sup>10),11)</sup>。本稿では、このうち筆者らが開発している延焼モデルを紹介し、延焼モデルを利用した今後の展開について考えてみる。

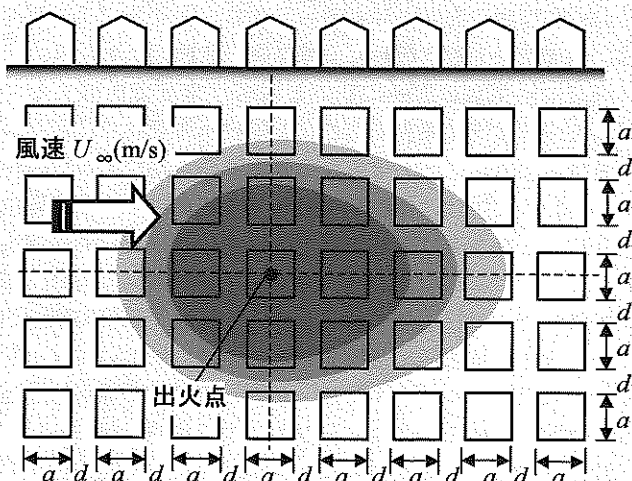


図1 浜田式による火災拡大の概念図

## 2. 新しい延焼モデルの概要<sup>11)</sup>

これまでに開発されてきた延焼モデルでは、過去に発生

\* 京都大学防災研究所 特別研究員

\*\* 京都大学防災研究所 教授



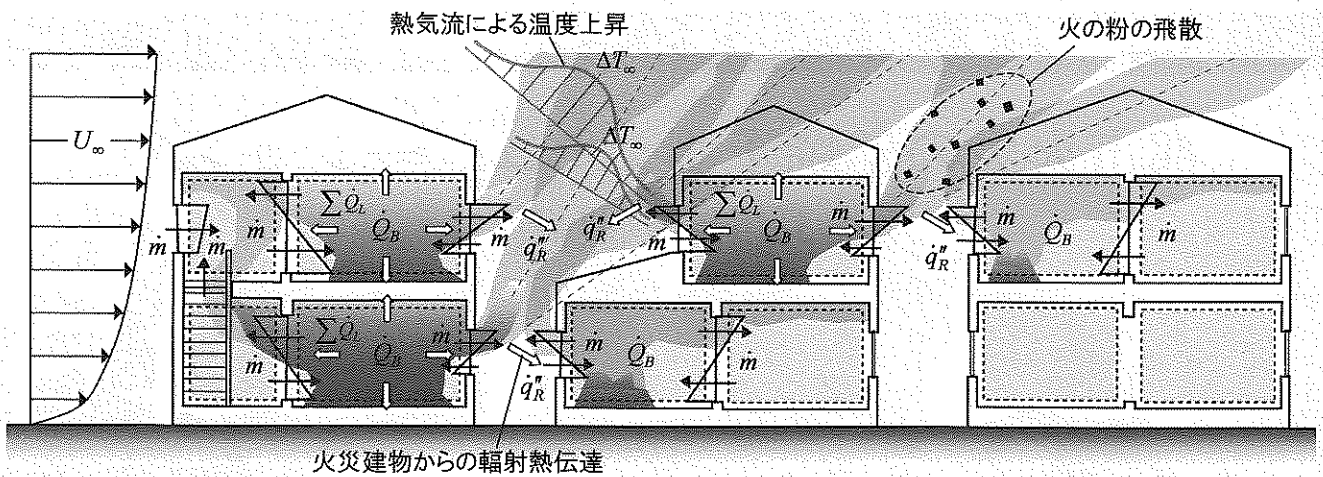


図2 新しい延焼モデルの概念図

した大火等のデータに一致するように、経験的に火災の拡大速度を定式化してきた。これに対して、新しい延焼モデルでは、市街地における火災拡大現象をいくつかの特徴的な現象に分解し、それぞれを物理的知見に基づいて定式化するアプローチを採っている。

図2は本延焼モデルの概念を示したものである。ここでは、都市火災を複数の建物火災の集合と捉え、他の建物火災の熱的な影響下における個々の建物火災の燃焼性状を予測することが、すなわち市街地全体の火災性状の予測につながるものと考えている。

## 2.1 建物内部の火災性状

一般に建物内のある室で発生した火災は、徐々に火勢を増す火災成長期を経た後に、盛期火災と呼ばれる最も激しい燃焼状況を示し、最終的に減衰期に入って可燃物が燃え尽きる。このように遷移する火災状況のうち、盛期火災時の火災発熱が隣接する建物へ延焼を引き起こすきっかけとなることが多い。この間、室内の高温ガスは攪拌され、温度分布はおおむね一様となることが知られている。そこで、まず建物内部の火災性状を予測するにあたっては、建物を構成する各室(図2の点線で囲われた領域)を検査体積とみなし、検査体積ごとに定式化される火災性状の支配方程式を連立して解くことで、時々刻々の火災性状予測を行う。支配方程式は次に示す質量、エネルギー、化学種(酸素  $O$  と可燃性ガス  $F$ ) の各保存式から構成される。

$$\frac{d}{dt}(\rho_i v_i) = \dot{m}_{F, j} - \sum_j (\dot{m}_{ij} + \dot{m}_{ji}) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(c_p \rho_i T_i V_i) = \dot{Q}_{B, j} + c_p \dot{m}_{F, j} T_F - \{ \sum_j \dot{Q}_{L, j} + \sum_j (c_p \dot{m}_{ij} T_i - c_p \dot{m}_{ji} T_j) \} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_i v_i Y_{X, j}) = \Gamma_{X, j} - \sum_j (\dot{m}_{ij} Y_{X, j} - \dot{m}_{ji} Y_{X, j}) \quad (4)$$

$(X = O, F)$

また、気体の状態方程式は、

$$\rho T = 353 \quad (5)$$

これらを連立させて解くことで、各室内部に充満する気

体の温度、密度、化学種濃度等の時間変化を予測する。ただし、上式(2)~(5)において、 $c_p$ は気体の定圧比熱、 $\rho$ は気体密度、 $T$ は気体温度、 $T_F$ は可燃物の熱分解温度、 $V$ は区画容積、 $Y_X$ は化学種の質量分率、 $\dot{m}_F$ は可燃物の熱分解に伴う可燃性ガスの供給速度、 $\dot{m}$ は開口流量、 $\dot{Q}_B$ は可燃性ガスの発熱速度、 $\sum \dot{Q}_L$ は区画内ガスからの開口、壁を經由した失熱速度、 $\Gamma_X$ は化学種の生成速度を表している。なお、下付き文字の  $ij$  および  $ji$  は区画  $i$  に開口を隔てて隣接する区画  $j$  との間を生じる流れの方向を示している。また、 $\Delta$  は区画を隔てる全ての境界について和を取ることを表わしている。

## 2.2 建物間の火災拡大

さて、火災室内で生成された高温ガス(燃焼反応を伴う場合は火炎、伴わない場合は熱気流となる)は、開口部や壁の破損部などを通じて屋外へと噴出される。ここからの輻射熱伝達や対流熱伝達によって周辺の建物が加熱され、何らかの可燃物に着火することで延焼が引き起こされる。なお、屋外へ放出された高温ガスの気流は市街地風によって吹き倒されることにより、風下側の広範な領域、およびその中の建物の温度上昇を著しくする。ちなみにこの気流は、消火活動や避難行動に支障を来す原因ともなる。

火災や熱気流は周囲の空気と混ざり合って拡散するので、その危険性は熱源である火災建物から離れるにしたがって低下する。これとは異なる延焼形態を持つのが火の粉である。火の粉は、建物構造材などの可燃物の一部が高温ガス中へと巻き上げられ、燃焼を継続したまま屋外へ放出されたものである。火災建物から放出された火の粉は、市街地風によって風下側へ流され、その後、上昇流の影響が小さくなると地表面に落下する。この時点において火の粉が十分な熱エネルギーを有し、かつ、着地した場所が適当な可燃物であった場合に、飛び火による延焼が起こる。

以上を考慮し、本延焼モデルでは、(i)火災建物からの輻射による熱伝達、(ii)火災建物の風下に形成される熱気流による温度上昇、(iii)飛び火、を建物間の延焼要因として個別にモデル化し、いずれも既往の模型実験等によりその精度を検証している。建物間の延焼は、これらの要



因が作用した結果、(a) 開口を經由して入射する熱流束が、火災時において最も一般的な可燃物となる木材の着火限界熱流束  $15 \text{ kW/m}^2$  を超えた場合、(b) 木質系の外装材温度が着火温度  $300^\circ\text{C}$  ( $573 \text{ K}$ ) を超えた場合、(c) 十分な熱エネルギーを有する火の粉が飛散した場合、に発生するものとみなしている。

### 3. 酒田市大火の延焼性状シミュレーション

それでは、新しい延焼モデルによってどの程度の予測が現時点で可能なのかを確認してみる。この延焼モデルでは、都市火災を個別の建物火災の集合と捉えていることから、まず、単体建物の火災シミュレーションを行い、この結果を過去に実大スケールで実施された火災実験<sup>12)</sup>の結果との比較した。次に、過去に発生した代表的な都市火災である酒田市大火の再現シミュレーションを行い、この結果を当時の観測結果<sup>13)</sup>と比較した。本稿では、このうち後者の酒田市大火の検証事例を紹介する。なお、前者の検討により、個別の建物の火災性状についてはおおむね妥当な予測が行えることを確認している<sup>11)</sup>。

#### 3.1 酒田市大火の概要

1976年(昭和51年)10月29日に山形県酒田市で発生した火災は、風雨波浪注意報発令中の雨まじりの強風にあおられて拡大し、市街地の広範な領域を巻き込む大火へと発展した。繁華街にある映画館での火災に端を発した大火は、酒田市はもちろん、周辺市町村の消防隊、さらには自衛隊まで駆けつけて消火にあたったにもかかわらず、夕方17:40頃の発生から翌早朝5:00頃の鎮火に至るまで約11時間燃え続け、焼失面積  $22.5 \text{ ha}$ 、焼失棟数  $1,774$  棟におよぶ大きな被害をもたらした。

当時の延焼の様子が撮影されたものを写真1に、被災前の酒田市を上空から撮影したものを写真2に示す。写真2では被災した範囲を点線で囲ってあるが、火災は出火建物を起点にして東南東の方角に拡大し、800 mほど離れた新井田川(幅約50 m)まで及んだ後ようやく焼け止まっている。

火災当日の気象状況は、出火建物から1 kmほど離れた測候所で観測されている<sup>13)</sup>。図3は観測データを整理したものである。これによると、火災の継続した29日18時から翌30日5時までの間の、外気温の平均値は  $9.2^\circ\text{C}$ 、風速は  $11.0 \text{ m/s}$ であった。また、降雨も観測されており、1h当たりの降水量は最大で2 mm、火災が継続している間の総降水量は12 mmとなっている。

#### 3.2 火災拡大性状の比較

延焼予測計算を行うにあたり、被災範囲とその周辺に立つ建物の形状、階数、構造に関する情報は、当時の都市計画図から読み取った。このとき、建物構造の内訳は木造、モルタル木造、鉄骨造、RC造、土蔵の5種類となっている。また、全ての建物の開口部はガラス窓または戸であるものとし、その大きさは隣接する建物との距離の関数として表

わした<sup>11)</sup>。なお、酒田市大火では、飛び火によって延焼が起こった例がいくつか確認されている。本延焼モデルにおいても飛び火の発生予測は可能であるが、飛散性状を確率論的に定式化してあるため、得られる計算結果は一意ではなくなる。そこで、被災調査で確認された飛び火の発生地点と時刻を計算条件として入力することで予測に代えることにした。

出火から200分、300分、400分が経過した時点での火災延焼シミュレーションの結果を示したものが図4になる。ただし、燃焼中の建物は赤色で、燃え尽きた建物は黒色で表示してある。なお、この延焼計算では、図4に示す以外にも、各建物の温度や気流の温度上昇などの予測を行っている。

出火点から発生した火災が隣接する建物へ次々に延焼を起こし、燃焼範囲を拡大していく様子が捉えられた。ただし、火災建物は出火点付近から順に燃え尽きたため、火災



写真1 酒田市大火での延焼の様子

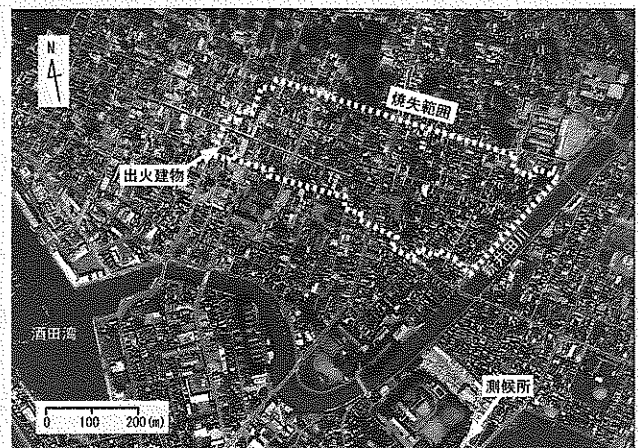


写真2 被災前の酒田市の航空写真

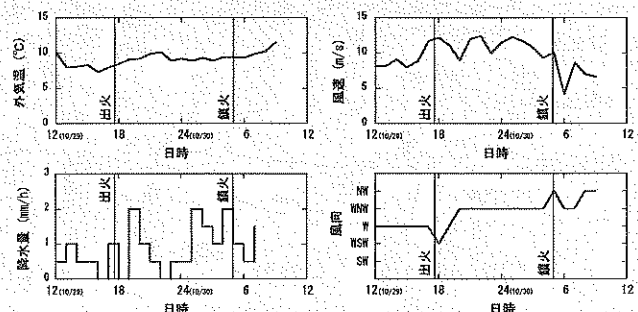


図3 火災時に観測された酒田市の気象条件





図4 酒田市大火の延焼シミュレーション結果

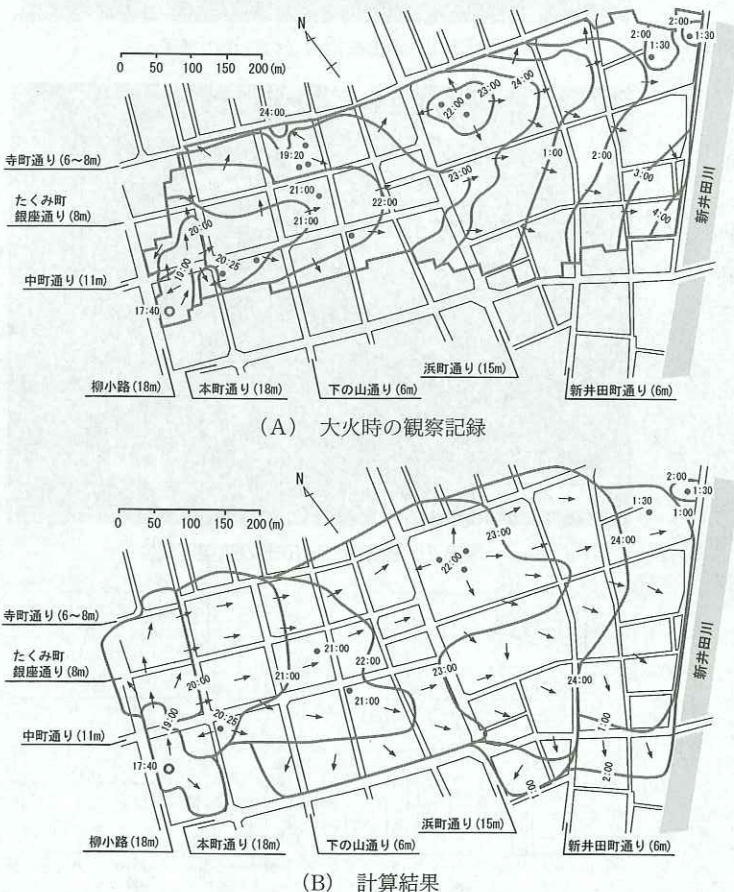


図5 火災前線の移動

前線の近くには帯状の燃焼領域が形成された。燃焼帯の全体的な進行方向は風向に一致しており、熱気流が吹き倒されることでより強い加熱を受けたことや、飛び火により風下方向への延焼が促進されたことがわかる。

延焼シミュレーションにより得られた火災前線の移動を、聞き取り調査により調べられた大火時の火災前線の移動と比較したものが図5になる。ただし、出火点を○印、飛び火による延焼が発生した地点を●印で示してある。火災時における市街地風はおおむね西から東に向かって流れており、火災前線の移動もこれに対応するように風下方向に大きくなっている。

これによると、計算により求められた等時延焼線の間隔が実際に比べて長く、火災の拡大速度が過大に算出されたことがわかる。こうした不一致の最も大きな原因には、降雨や消火活動の影響を考慮に入れていなかったことが挙げられる。このため、本来であれば水分の蒸発に伴って消費されたはずの潜熱分だけ、火災発熱を過大に見積もっていたものと考えられる。特に消火活動を考慮していなかった影響の大きさについては、図5からもうかがうことができる。これによると、大火時には風上、ならびに風横方向への延焼が、風下方向への延焼に比べて大幅に抑制されている。つまり、市街地風によって熱気流が吹き倒されことで、高温となった燃焼域風下側での消火活動が困難となり、結果的に風下側での火災の拡大を許してしまったが、風上・風横方向に関しては消火活動が功を奏していたものと考えられる。

このように、現時点での本延焼モデルの予測は傾向としてはおおむね酒田市大火を再現していると考えられる。しかし、精度については必ずしも満足のいくものではなく、いくつかの課題を残している。これは、すでに焼失してしまっている市街地について正確な情報の入手が困難であるため、止むを得ない部分もある。また、一部の定式化されていない要因も誤差に関係していると考えられ、今後モデルを改良していくことで、問題を解決していく必要がある。

#### 4. 伝統的木造密集市街地の火災安全

物理的な延焼モデルの最も大きな特長は、その名の通り、火災の延焼メカニズムが物理的に明確な形で定式化されている点にある。こうすることで、従来の経験的モデルに比べて、より合理的な火災拡大性状の予測が可能となっており、たとえば、何らかの防火対策が採られた場合にも、その効果を定量的に評価することができる。ここでは、こうしたモデルの特長を活かした利用例として、伝統的木造密集



市街地の火災安全性能向上の検討を行った事例について紹介したい。

#### 4.1 高山市三町伝建地区の防火対策

高山市は天正年間に城下町として建設されて以来、飛騨の商業経済活動の中心地として発展し、数多くの歴史的文化資産を現在に残している(写真3)。昭和54年には、高山市三町地区が重要伝統的建造物群保存地区(伝建地区)に選定されており、文化的価値の高い美しい街並みが形成されている。しかしその反面、市街地を構成する建物の大半が伝統的な木造工法で建てられているため、火災安全上の課題が残されていることも否定できない。一般的な伝統的木造市街地の例にもれず、高山は古くから火災の被害に見舞われてきた。明治8年には、焼失家屋が千件を越す大火災も発生している<sup>15)</sup>。



写真3 高山市三町地区の様子<sup>14)</sup>

火災安全上の課題を抱える一般の市街地においては、老朽化した建物の建て替えや、道路の拡幅による隣棟間隔の確保などによって、火災安全性能の向上が図られる場合が多い。ただし、このような市街地構造の大規模な改変を伴う対策を、三町地区のような伝統的市街地に適用した場合、現有する市街地の文化的特性が損なわれかねず、伝統的街並みを保全する観点からは望ましくない。

伝統的町並みと矛盾しない防火対策を講じるにあたり、まず、高山市における町家の火災安全上の弱点を整理すると次のようになる<sup>15)</sup>。

- ・主屋の多くが木造真壁造りであり、可燃材料である木材が露出した造りになっているために、外部からの加熱で容易に延焼が起こる。
- ・建物内部は木戸や襖などの間仕切りで複数の空間に分けられているが、これらの防災性能が低いために容易に燃え抜け、延焼の経路となる。

こうした点を踏まえ、ここでは、伝統的な外観の改変を伴わない方法として、既存の扉や壁の防火補強を行うことによって火災安全性能を確保することを考える。こうした建物部材単位の比較的小規模な対策を積み重ねることで、火災建物から隣接する建物への延焼に要する時間が引き延ばされれば、消火活動や避難行動のための時間を確保することができ、被害の軽減が期待できる。

#### 4.2 防火対策の効果

対策の内容を表1に整理する。ここでは、全ての建物の開口部はガラス窓または戸であるものとし、壁については文献15)を参考にしてA(木造)、B(モルタル木造)、C(RC造)、D(土蔵)の4種類を想定した。これらが標準的な加熱(ISO 834に規定される加熱)を受けた際に延焼のきっかけとなる重大な損傷を起こすまでの時間を燃え抜け時間と定義する。ここでは補強の具体的な内容については検討しないが、補強される前の条件①に示す部材に対して何らかの補強が施された結果、条件②~⑤に示すように燃え抜けに対する性能が向上したものとする。たとえば、通常のプロートガラスを網入りガラスに変えることで、もとは10分であった燃え抜け時間が、条件②、③に示すように15分、20分に伸びた状況を考える。

表1 区画境界部材の燃え抜け時間の設定(単位:分)

計算条件	開口	壁			
	A	A	B	C	D
①(補強なし)	10 (ガラス)	20 (木造)	30 (モルタル木造)	燃え抜けなし(RC)	燃え抜けなし(土蔵)
②(開口補強)	15	20	30	燃え抜けなし	燃え抜けなし
③(開口補強)	20	20	30		
④(壁補強)	10	30	40		
⑤(壁補強)	10	40	50		

各対策の効果は、対策前後の火災リスク  $R$  を比較することで判断する。ただし火災リスク  $R$  とは、損失の発生確率を  $P$ 、損失を  $L$  (火災による焼失棟数) とした場合の損失期待値として次式のように定義する。

$$R = \sum_{i=1}^N (P_i L_i) \quad (6)$$

ここでは、出火時間や市街地風の風速や風向といった不確定要因を考慮したモンテカルロシミュレーションを行い、火災リスク  $R$  を計算する。図6は計算結果の一例であり、北西の風が3.0 m/sで吹いた場合の出火から150分後の火災の様子を表わしている。

モンテカルロシミュレーションの結果得られた、焼失棟数と発生頻度の関係を図7に示す。図は補強を行った条件②~⑤の結果を示しており、各条件について求められた焼失棟数の期待値(実線)を、防火補強を行う以前の条件①の期待値(点線)と比較している。これによると、対策の

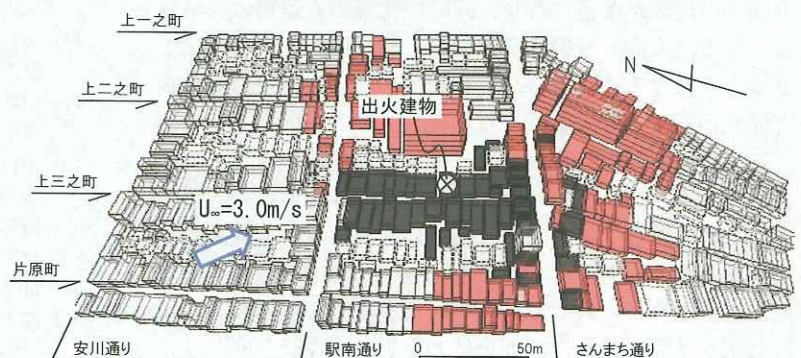


図6 高山市の延焼シミュレーション結果(出火後150分)



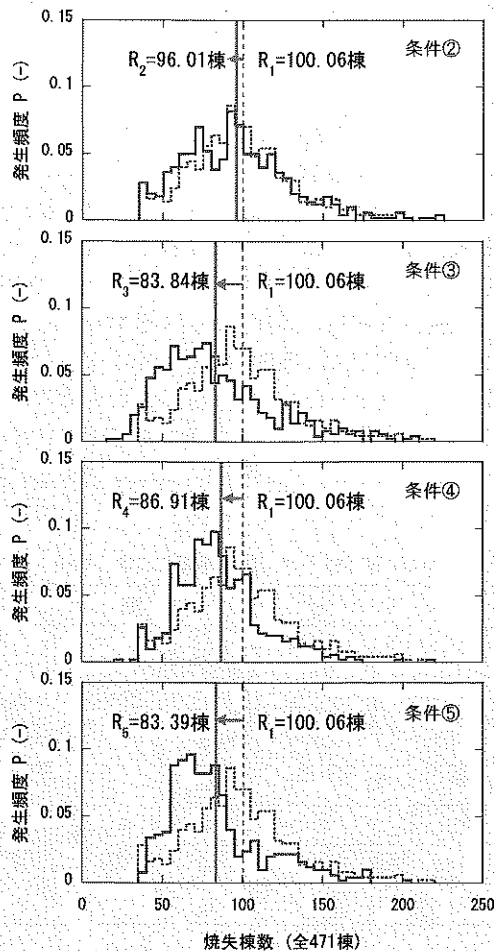


図7 対策前後の火災リスクの比較  
(点線：対策前，実線：対策後)

採られる前の火災リスク  $R_1$  が 100.06 棟であったのに対し、条件②～⑤の火災リスクは、それぞれ 96.01 棟、83.84 棟、86.91 棟、83.39 棟となっている。部材の補強を行った場合の火災リスクが軒並み低減されており、対策の効果が表われている。これは、間仕切りが燃え抜け難くなることで建物外へ放出される熱量が抑制されると同時に、建物内に積載される可燃物への伝熱経路が断たれたことによるものと考えられる。

建物単体の扉や壁の防火性能を向上させること自体は、例えば広幅員の道路を設けた延焼遮断帯の形成に比べるとその効果が小さく、必ずしも一般の放任火災の延焼を食い止めることができるとは限らない。しかし、普通、火災が発生した場合には消火活動が行われることを考慮すれば、市街地の燃焼が緩慢になり、同時に燃焼する建物の数が減ることで、人的・設備的資源を集中的に投入することができるようになることから、被害を最小限に食い止められる可能性が高まるものと考えられる。

こうした対策は、今回のように市街地構造に対して大きく手を加えることが難しい伝統的な木造市街地への適用が可能であるだけでなく、道路の拡幅などに比べて経済的な負担を小さく抑えられることも利点として挙げられる。また、市街地全域に対して一時に対策を施す必要はなく、状況に応じて段階的に市街地全体の火災安全性能を向上させることができる点で現実的な対策となる得るものと考えら

れる。

## 5. 今後の課題と方向性

ここまでに見てきたように、物理的延焼モデルの開発は途に就いたばかりであり、解決すべき課題は多い。より合理的な火災安全設計を行うには、たとえば消火活動による火災発熱の抑制効果など、新たな予測機能を追加して延焼モデルの信頼性を向上させる必要がある。

一方で、高山市の事例で見たように、従来は定量的評価が行えなかった防火対策の可能性についても幅広い検討が可能となったことは大きな変化であると考えている。たとえば、伝統的な木造密集市街地に対して道路の拡幅や老朽建物の建て替えなどといった、一般の密集市街地に適用される防火対策を採用することは好ましくない。しかし、現在の市街地防火対策の枠組みにおいて、伝統的な木造建築物を維持もしくは新築するには、火災安全の観点から非常に高いハードルが設定されているのが現状である。このために、これまでに多くの個性的で良好な市街地環境が破壊されてきた面があることは否定できない。延焼モデルを利用することで、こうした地域においても、地域特性と火災安全性能を両立させた防火対策が可能であることを証明することができれば、魅力的な市街地環境の形成に大きく寄与することができる。今後は、こうした観点から具体的にどういった選択肢が提供されるのか検討を進めていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 浜田稔：火災の延焼速度について，火災の研究I，1951.
- 2) 日本火災学会編：火災便覧 第3版，共立出版，1997.
- 3) 堀内三郎：建築防火，朝倉出版，1972.
- 4) 藤田隆史：火災の延焼モデルとシミュレーション，災害の研究VII，1975.
- 5) 都市防火対策手法の開発，建設省総合技術開発プロジェクト，1982.
- 6) 保野健治郎・高井広行・難波義郎：ロジスティック曲線による建物火災の延焼速度式に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，No. 311，pp. 137-144，1982.
- 7) 直下の地震を踏まえた新たな出火要因及び延焼性状の解明と対策，東京消防庁報告書，1997.
- 8) 糸井川栄一・塚越功：飛び火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル，第23回日本都市計画学会学術研究論文集，pp. 137-144，1988.
- 9) 糸井川栄一：都市防火対策・研究の変遷とこれからの課題，火災，Vol. 50，No. 3，pp. 6-11，2000.
- 10) まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発，国土交通省総合技術開発プロジェクト，2003.
- 11) 榎本圭佑：都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発，京都大学学位論文，2005.
- 12) 中村賢一：鉄鋼系プレハブ住宅の火災実験，建築研究資料，No. 40，1983.
- 13) 消防研究所：酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書，消防研究所技術資料，第11号，1977.
- 14) <http://www.bunka.go.jp/>
- 15) 高山市三町防災計画策定委員会編：高山市三町防災計画策定書，1996



# 新シリーズへの移行にあたり

社団法人 全国地質調査業協会連合会  
編集委員長 小野 日出男

「地質と調査」は、全地連の技術機関誌であるため、地質・環境・調査・探査・防災・保全などの多岐にわたる技術領域のなかから、小特集のほか、シリーズもの、やさしい知識、教養読本などにふさわしい時宜を得た話題を中心に編集しています。

毎号の企画は、編集委員会委員が持ち回りでを行い、年5回程度開催する編集委員会で決定しますが、小特集やシリーズもののテーマは、各地区協会の委員も参加する拡大編集委員会で絞込んでいます。

このうち、これまでシリーズとして継続していた「日本の地盤」と「天然記念物に指定されている地質環境」が前号の2005年第3号（通巻第105号）で終了しました。

「日本の地盤」は、日本列島の地盤を北から南まで解説する体系的なもので、1991年第2号（通巻第48号）の「愛知県の地盤」で始まり、「沖縄県の地盤」で終了する15年に及ぶ長い連載になりました。

また、「天然記念物に指定されている地質環境」は、2000年第3号（通巻第85号）の北海道の「昭和新山・根室車石」で始まり、最後は九州の「平尾台カルスト台地、長垂の含紅雲母ペグマタイト岩脈、屋形石の七ツ釜」で終了しました。

これらの話題は、いずれも地区協会の持ち回りで提供していただいたものです。改めて、企画に携わった方や、執筆していただいた方に、この場をお借りしてお礼を申し上げる次第です。

本号から、新シリーズとして、「各地の博物館巡り」「大地の恵み」「車窓から見た地形・地質」の3テーマがスタートすることになりました。

「各地の博物館巡り」は、地質に関連した内容を主な出展テーマにしている博物館を紹介するものです。日本各地には、行政や大学・研究機関、個人が設立した博物館が多く存在していますので、楽しい企画です。

「大地の恵み」は、日本各地にある名水、銘酒、有名ワイン、野菜、樹木など、私たちの日々の生活に恵みをもたらしている大地を、地形・地質・地下水の観点から紹介するものです。地域地質に密着した地質調査業ならではの企画です。

「車窓から見た地形・地質」は、列車などの車窓から見ることができ特徴ある地形・地質（露頭、断層地形、段丘、特異な海岸地形など）を紹介するものです。これも日本各地に多く見受けられるので、楽しい企画です。

いずれにしても、今まで同様、新シリーズの話題は各地区協会から提供していただくことを予定しています。

ただし、紙面の都合上、毎号3つのテーマを掲載するとは限りませんが、これらのテーマは広く全世界に見受けられるものですので、テーマに該当する海外の事例を途中で紹介することも予定しています。読者のなかで、3つのテーマに関する話題・情報を提供して下さる方がいらっしゃれば、遠慮なく巻末にある地区協会の事務局に連絡していただければ幸いです。