

地震国における橋梁の用強美

社会基盤工学専攻・構造ダイナミクス分野・教授 高橋 良和

はじめに

構造設計の授業において、良い構造を表すキーワードとして教える言葉が「用強美」である。使用性や強さはもちろんのこと、美しさを兼ね備えてこそ良い構造である。大学院の構造デザイン講義では、「構造設計者は、構造形態を構造芸術に昇華させなければならない。構造芸術は単に効率性や経済性という科学的、社会的基準のみに基づいて設計することのみでは実現できない。工学的優美さを絶えず追求しようとする構造設計者の個性も含めた表現が加わることで、構造芸術へと昇華できる。」と教えている。では、過去の地震被害や耐震工学は、橋梁の用強美にどのようなインパクトを与えたか。

私は大学4年生時、耐震工学研究室に配属され、大学院修士1年生の冬、1995年兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災が発生した。1月22日より土木学会調査団の手伝いを命じられ、地震被害調査を行った。これが私にとって初めての地震被害調査である。その中で、倒壊した高速道路高架橋を目の当たりにしたことは、二度とこのような被害を発生させない、という耐震工学者としての根幹を形成した。図1の上側が倒壊した高架橋の在りし日の姿であり、下側が当時の耐震工学の総力を挙げて再建された高架橋である。「倒壊前の高架橋は、重いコンクリート桁が細い橋脚で支えられたトップヘビーな構造であり、耐震的には不利であった。」、「新しい高架橋は、軽い鋼桁が太い柱で支持され、また免震化されたために耐震性が高い。」そのような説明に納得し、満足していた。准教授時代、構造デザインの観点で改めてこれら高架橋を比較した時、現在の高架橋は、柱幅が太く、視覚的に高架橋の両側を分断しているところが不満であり、「用強」は認めるものの、「美」を兼ね備えているように感じなかった。オリジナルの構造の方に美しさを感じたのである。何故、このような太い柱にせざるを得なかったか、当時の担当者に話を伺った。そこで教えていただいたのは、「倒壊した高架橋を設計、管理していた技術者として、もとの形で復旧仕様を満足させることは可能であり、その形で再建を希望していた。しかし、沿線住民が見た目での安定感を求めたため、現在の太い柱の形に決定した。」という事実である。被害の記憶が強いが故に、住民の希望が強く反映された構造形式が採用されたのである。橋梁は公共構造物であり、設計者・デザイナーが希望しても、国民・市民が納得できなければ成立しない。橋梁デザインの難しさを学んだ事例であったが、とはいえ、耐震技術を向上させることによって、現在の耐震設計、あるいは設計想定と異なる地震動に対し、ピルツ構造で実現したような

構造デザインをもつ橋梁を実現できないかを考えることは重要である。防災対策をするのだから、ある程度何かが犠牲になることはやむを得ないと思うことは、設計者のエゴである。地震国の日本で暮らす私たちにとって、単に地震に強ければよいと満足するのではなく、耐震対策をすることにより橋の魅力が増した、美しさも向上させる技術を開発しなければならないという思いで研究を行っている。

耐震性能の新陳代謝が可能なメタボリズム構造の開発

日本の耐震補強された橋梁は、エネルギー吸収用のダンパーや落橋防止用のケーブルの設置、巻き立て補強による橋脚断面の増大などの「後付け」の耐震補強により、設計当時の構造造形が改悪されているケースが多く見受けられる。最近の研究では、耐震基準改訂による橋脚への要求性能引き上げに対し、上述したような後付けの耐震補強ではなく、橋脚の部材を取り換えることで、橋脚の耐震性能を



図1 阪神高速道路東灘地区の阪神・淡路大震災以前・以後の高架橋

新陳代謝（メタボリズム）させることができる「メタボリズム柱構造」の開発を行っている。常時機能は、将来大きく変化することは少ないが、耐震性能は大きく変わらう（図2）。そのため、供用・常時機能を継続しながら、耐震性能を改善するための技術開発である。後付けの耐震性能向上ではなく、あらかじめ将来の要求性能変化に追随するために仕込んでおくのである。

橋脚・柱構造は上部構造の重量を支持するという常時機能を有しているため、その機能を維持させながら部材を取り換えることは容易ではない。メタボリズム柱構造では、橋脚断面のコア部に常時の上部重量の支持機能を、外殻部に地震時のエネルギー吸収機能を与え、コア部と外殻部に期待する機能を明確に分離させている。そのため、地震力に抵抗する外殻部を取り替えることで、コア部で上部重量を支持しながら橋脚の耐震性能を新陳代謝させることができる。図3に研究室で行った、上部重量にあたる鉛直力を作用させた状態での外殻部の取り替え実験について示す。図3のように、橋脚に鉛直力を作用させた状態での外殻部の取り替えに成功しており、それにより橋脚の耐震性能が向上していることが確認できる。メタボリズム柱構造のように、将来起こり得る耐震基準改訂に対応するための策を組み込んだ構造はこれまでに提案されていない。そのため、メタボリズム柱構造は、不確定性の高い地震動に先手を打つ積極策であるとともに、耐震対策によって建設当時の構造造形を改悪してきた歴史にも終止符を打ち、より良い土木景観を維持することにもつながることが期待できる。

まとめ

耐震技術は震災の教訓を学びながら進展してきたが、大震災を受け、既存技術の延長ではなく、耐震設計哲学を変更しなければならない事態となっている。阪神・淡路大震災以降も、2011年東日本大震災では、想定と異なる地震が発生したとしても、社会が危機的な状態に陥らないよう、構造物の構造計画・設計で配慮すべきという危機耐性の考え方が新しい耐震設計哲学として広まってきた。この耐震設計哲学を構造技術として実現するための様々な研究が進められている。

災害大国であることは必ずしもマイナスばかりではない。これを新しいチャレンジとして正面から受け止め、災害対策を単なる安全性の向上（義務感）ではなく、耐震工学者が新しい構造芸術を生み出す時代となったことを強く意識し、ワクワクして取り組みたい。そして、阪神・淡路大震災以前に感じていた、人・技術者がワクワクできる積極的な科学技術として、耐震工学が復活することを目指し、これからも研究・教育に取り組んでいきたい。

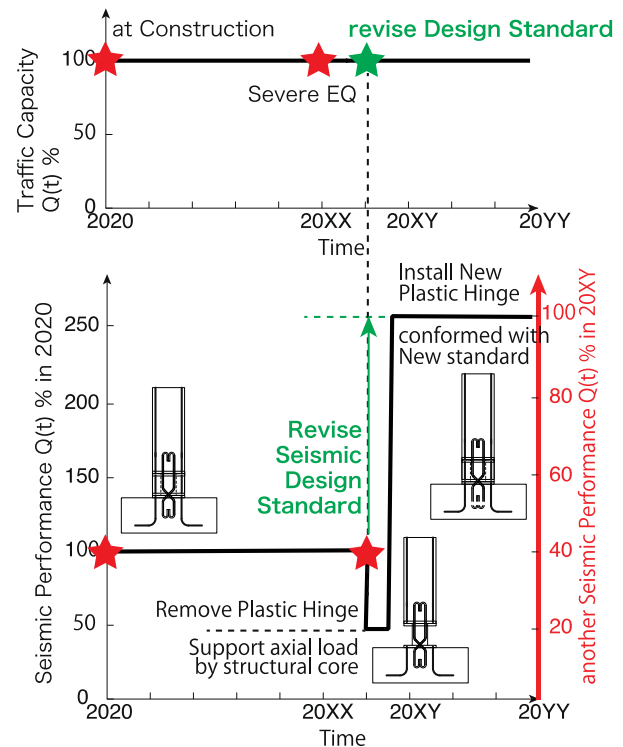


図2 常時機能と耐震性能の将来予測



図3 鉛直荷重支持下での外殻部取替実験と耐震性能向上の把握

土石流・泥流の数値シミュレーションソフトウェアの開発

社会基盤工学・防災工学分野・准教授 竹 林 洋 史

はじめに

2014年の広島、2018年の広島・愛媛、2019年の宮城など、高強度の降雨によって発生した表層崩壊に起因した土石流による土砂災害が近年頻発しています。IPCCのレポートによると、地球温暖化に伴い気象特性が極端化することが予想されており、平均降水量が変化しなくても高強度の降雨の発生回数は増加することが予想されています。表層崩壊に起因した土石流は、総降水量が少なくても降雨強度が高いと発生しやすい特徴があります。そのため、地球温暖化による気象特性の極端化によって表層崩壊に起因した土石流の発生回数が増加することが予想され、土石流動態の数値シミュレーション結果にもとづいた効率的・効果的な土石流対策が求められています。

土石流対策の一つとして、土砂災害警戒区域の設定が都道府県によって実施されています。土石流の土砂災害警戒区域の設定に用いられる土石流の氾濫域は、土石流扇状地のの上流端である土石流堆積開始地点を起点とした扇形の堆積域を想定し、地盤勾配が緩やかになる地点（過去の実績に基づいて、地盤勾配2度の地点）を土石流氾濫範囲の下端としています。このように、建物や微地形などを考慮しない簡便な方法が用いられているのは、土石流危険渓流が非常に多いためです。しかし、実際の土石流は、氾濫域の建物や微地形の影響を受け、より複雑な形状で氾濫します。また、2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流は、本川源頭部での発生から宅地に到達するまでの時間が100秒程度と短く、土石流（表層崩壊）発生後に避難をする場合は、土砂災害警戒区域の中で安全な場所を探す必要があります。このように、土石流の土砂災害警戒区域内の住民にとっては、より詳細な土石流氾濫域の情報が必要です。土石流の数値シミュレーションでは、このような詳細な土石流氾濫域の情報を提供することが可能です。

一方、土石流の数値シミュレーションによる氾濫域や流動深、流速の解析は、従来の土石流の土砂災害警戒区域の計算方法に比べると時間がかかるとわれています。しかし、我々が開発している無料の解析インターフェースiRICに導入している土石流数値シミュレーションモデルを使うと、非常に短時間で土石流氾濫域の解析が可能です。例えば、本稿で紹介するような解析の場合、細かい点の検討や修正を除けば1～2日で初期条件の設定から解析結果の動画作成まで実施可能であり、解析時間の問題も解決しつつあります。

本稿では、2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流の平面二次元数値シミュレーションの結果を例にして、土石流の数値シミュレーションによる解析技術と土石流対策を紹介します。また、最後にiRICの特徴について紹介します。

広島市安佐南区八木三丁目の土石流の数値シミュレーション

広島市安佐南区八木三丁目では、本川で3箇所、支川で2箇所の斜面崩壊が発生しました。対象渓流には、広島花崗岩と呼ばれる風化しやすい岩と花崗岩が風化した真砂土が分布しています。広島花崗岩は風化しやすいため、節理も多く入っており、比較的透水性が高い岩です。そのため、真砂土となった不安定土砂に加えて、土石流の通過によって花崗岩が破壊されて土石流に取り込まれ、土石流の規模をさらに大きくしたと考えられました。

図1に数値シミュレーションで再現された流域全体の土石流の深さの時間的な変化を示します。土石流発生直後は土石流の規模は非常に小さいですが、時間とともに大きくなり、宅地に流れ込んだ時点では非常に大きくなっていることがわかります。つまり、土石流氾濫域に流入する土石流の規模の予測においては、土石流の発達プロセスの評価が重要であることがわかります。また、このような発達プロセスを考慮すると、砂防ダムの規模と建設場所の関係が容易にわかります。例えば、上流域に砂防ダムを建設する

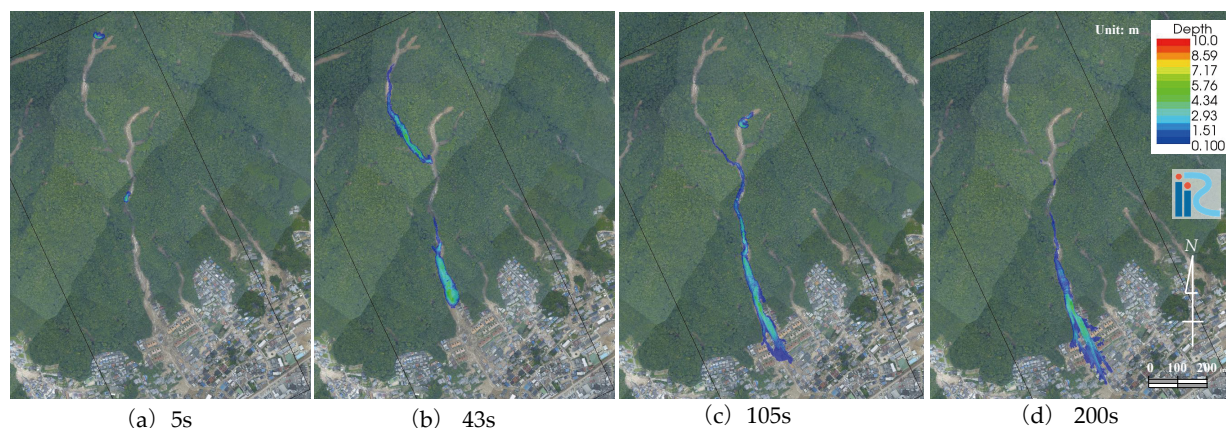
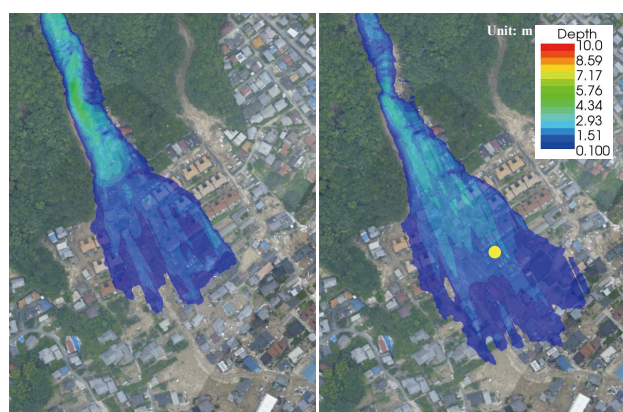


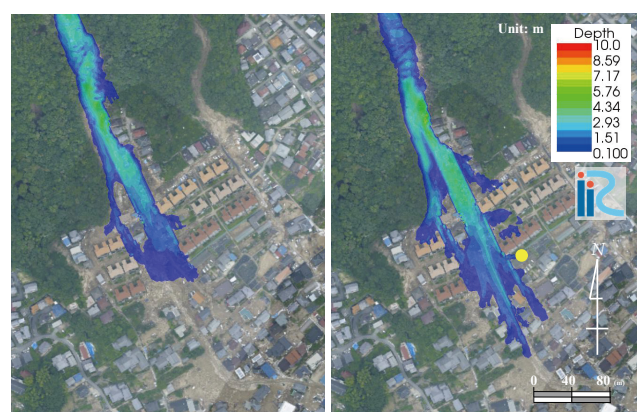
図1 流域全体の土石流の深さの時間的な変化



(c) 105s

(d) 200s

図2 土石流の深さの時間的な変化（建物・道路非考慮）



(c) 105s

(d) 200s

図3 土石流の深さの時間的な変化（建物・道路考慮）

場合は小規模の砂防ダムで土石流を停止させることができます。よって、数値シミュレーションを実施することによって、建設の容易さや建設予算に見合った最適な砂防ダム建設場所の決定が可能となります。

数値シミュレーションでは、土石流の流速、深さ、土石流の到達時間の計算結果も得られます。図1に示した土石流の溪流での平均速度は約9m/sであり、宅地に流れ込んだ時点では約8m/sでした。本川源頭部で発生した土石流は、100秒程度で宅地に到達しています。土石流の発生した時刻が午前3時～4時であり、就寝時刻であることと、屋外で高強度の雨が降っていたことを考え合わせると、土石流発生直後に土石流センサーなどで土石流の発生を確認できたとしても遠方の避難所への避難は困難であることがわかります。

図2に建物を考慮していない場合の住宅地での土石流の深さの時間的な変化を示します。土石流は扇形に広く薄く流れており、典型的な土石流扇状地を形成しています。図3に建物を考慮した場合の住宅地での土石流の深さの時間的な変化を示します。土石流は家屋の上流側に土砂を堆積させるため、家屋に土石流が衝突しても横に大きく広がることはなく、斜面下方に伸びている道路や家屋と家屋の間を比較的直線的に下流に流下していることがわかります。そのため、建物を考慮しない場合と異なり、黄色の丸で示されたような建物の下流側など、土石流が流動してこない安全な領域が存在することがわかります。なお、家屋を考慮していない場合は、黄色の丸の地点にも土石流が流れてきています。土石流は非常に破壊力が強く、本地域でも多くの木造家屋が破壊されました。しかし、鉄筋コンクリート造りの建物は、土石流が衝突しているにもかかわらず倒壊していません。つまり、避難所への避難が困難な場合は、直ぐ近くの鉄筋コンクリート構造物の下流側などへの避難が非常に有効であることがわかります。このように、各家屋の形状や強度を考慮した土石流氾濫域の予測が出来ることも本数値シミュレーションモデルの特徴となっています。

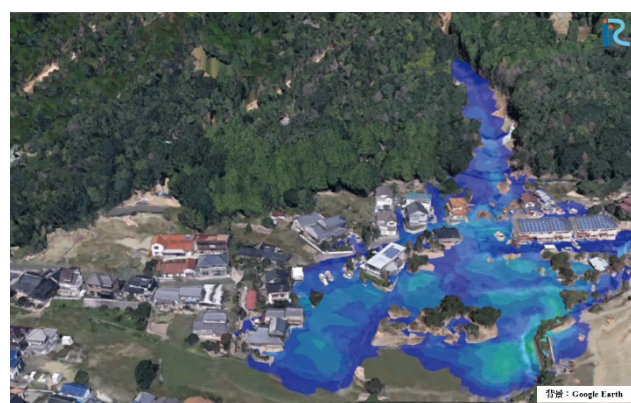


図4 Google Earthに出力した土石流の流動深

iRICの特徴

iRICはアメリカのUGSGと京大・北大などが共同で開発している河川流や河川地形の時空間的な変化を数値シミュレーションで表現できる無料のソフトウェアです。iRICは国内外の多くの研究者・技術者に利用されており、iRICのダウンロード数は40000を超えています。地形データは、国土地理院やUSGSがweb上で公開しているDEMデータをiRICインターフェースを通して取得可能です。また、国土交通省などが実施している定期横断測量のデータもそのままのフォーマットで読み込み可能です。背景画像も国土地理院やGoogle Earthなどが公開しているwebタイルをiRICインターフェースを通して取得可能です。数値シミュレーション結果は、mp4形式の動画として出力可能であるとともに、KML形式でも出力可能であり、図4に示すように、シミュレーション結果をGoogle Earth上に表示して3次元的にシミュレーション結果を可視化することが可能です。これらの機能により、数値シミュレーションの前処理と後処理の時間が大きく短縮されます。これらの機能は、今後の3Dリアルタイムハザードマップなどへの応用が可能になるものと考えられます。

海底地すべりによって津波は発生するのか？

都市社会工学専攻・ジオフロントシステム工学分野・准教授
岩 井 裕 正

はじめに

2022年4月より、都市社会工学専攻・ジオフロントシステム工学分野の准教授に着任致しました。岩井裕正と申します。私は、2006年4月に地球工学科に入学し、2010年3月に同学科を卒業しました。その後、大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士課程に進学し、2012年3月修士課程修了、2015年3月に博士の学位を取得致しました。その後2015年から2022年までの7年間名古屋工業大学に勤務しておりましたが、この度ご縁により母校である京都大学に戻ってまいりました。京都大学土木教室の一員として教育・研究に従事できますことを大変光栄に感じますとともに、連綿と続く土木教室の歴史と伝統を紡いでいくことの重責も同時に感じております。しっかりと責務を果たしてまいりますので、何卒ご指導よろしくお願い申し上げます。

海底地盤災害を考えることの重要性

わが国は、国土の陸地面積はさほど広大とは言えないが、海洋を含めた国土面積は世界でも有数の広さを誇る「海洋大国」であります。豊富な海洋資源、多様な海洋生物に囲まれており、人々はその恩恵を享受している一方で、ひとたび自然が牙を向けばそれは我々の生命や財産を脅かすこととなります。2011年東北地方太平洋沖地震によって発生した巨大津波は、震災から10年以上経過した今でも記憶に深く刻まれております。この地震によって発生した津波の規模は地震断層変位から予想される津波規模を大きく上回る“想定外”の大きさであったため、地震により海底斜面での地すべり、すなわち“海底地すべり”が同時に発生しこれが断層変位によって励起された津波の規模を増大させた可能性が指摘されるようになりました。また、世界中を見渡せば海底地すべりによって津波が励起された事例は数多く存在しております。例えば、北海のノルウェー沖で発生したStoregga Slide（ストレッガ海底地すべり）では、長さ約800 km、幅約300 kmの地すべり跡が見つかっており、現在分かっている範囲では世界最大の海底地すべりです。このStoregga Slideは波高10 m以上の津波を励起し、遡上高20 mを超える津波が沿岸地域を襲ったと推算されています。

30年以内に高確率で発生することが危惧されている南海トラフ巨大地震においても、沿岸地域に到達する津波規模の予測は、防災計画上の最重要課題となっておりますが、海底地すべりによってどのように津波規模が増幅されるのかは未だに予測困難であるという状況です。その最たる理

由は、やはり海底地盤で何が起きているのかを観察・観測することが極めて難しいということです。海底地盤は空気よりも800倍も密度が高い電解質で囲まれており、光が届かない環境では実際の現象を観察することが困難であります。

海底地すべりー津波励起現象に関する室内模型実験

海底地すべりによって励起される津波の規模は、地すべり運動と強い相関があると考えられていますが、地すべり土塊の運動と津波の関係について体系的に取り扱った研究例は少ないのが現状です。既往の海底地すべりに関する研究は、主に地質学や海洋物理学の枠組みの中で海底地形を調査し、そこから海底地すべりが発生した年代を推定する研究が主であります。しかしながら海底地形の変化から、地すべり土塊の総容積やすべり距離などは推定されているものの、それがどの程度の津波振幅を引き起こしたかについては依然として議論の最中にあります。これは、どれほどの規模の土砂が崩壊したか総量は分かっても、それが一度に崩壊したのかあるいは、後退地すべりのように複数回にわたって土塊が滑落したのかまでは海底地形の変化からは分からないためであります。つまり、海底地すべり前後における海底地形の変化だけでなく、どのような質量の地すべり土塊が、どの程度の速度や加速度を持って斜面を移動していったのかという運動学的・力学的な考察が極めて重要になります。

そこで、従来の海底地すべり性津波の研究で語られてきた「大規模な海底地形の変化が津波を引き起こす」という考え方から大きく発想を転換し、「海底地すべり土塊の運動の変化が津波規模に大きな影響を持つ」という点に着眼し、海底地すべりの運動およびそれに伴い発生する津波規模との関係について室内模型実験による検討を行っています。

図1は実験に用いた土槽の写真を示しております。実験



図1 海底地すべり模型実験装置写真

は図1に示すような傾斜10°の斜面模型を設置したアクリル製の土槽を用いております。斜面模型表面には水圧計を6点設置しており、地すべり発生過程における地盤内の過剰間隙水圧分布を計測しています。また、地すべり運動を計測するために斜面上に3点の標点を設置し、水位変動を撮影するために浮型標点を水面に浮かべ、これらの標点を高速度カメラで撮影し、PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析を用いて、地すべり変位・速度、およびそれに伴う水位変動(津波)を同時計測するという機構になっております。

室内模型実験結果の紹介

模型実験の結果を簡単にご紹介致します。図2は2台の高速度カメラで撮影した動画のキャプチャ画像です。上段の2枚の写真は地すべりの運動を撮影しているカメラ画像で、下段の2枚が水面変動を撮影したカメラ映像です。それぞれ左の写真が地すべり発生前の初期状態で、右の写真が、地すべりが進行している過程の写真を示しております。

図2上段写真より、地すべり土塊の法肩端が斜面中腹まで移動してきており、その上方(後方)には滑落ドメインと呼ばれる、滑落崖および側方崖によって囲まれた窪地地形が観察することができます。図2下段に示す、側方から撮影した画像からも滑落ドメインの様子を確認することができます。この滑落崖は、実際に発生した海底地すべり跡の地形調査からも分かっている地形です。縮約模型を用いた実験ではあるが、典型的な海底地すべりを再現することができております。

さて、本研究では海底地すべりと励起される津波振幅にフォーカスしておりました。図2下段の写真は水面変動を観察したのですが、画像から水面変位を目視で確認することは難しいです。そこで、動画データから浮型標点の変

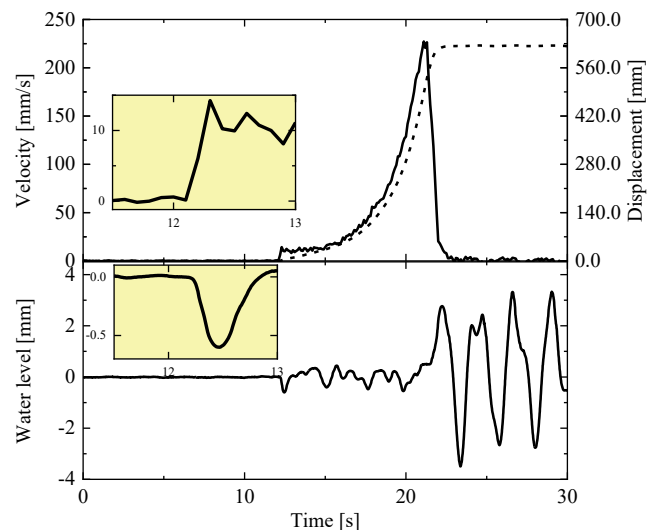


図3 地すべり速度・変位と励起される津波振幅との関係
(上) 地すべり速度および変位, (下) 水面変動

動をグラフ化しました。その結果を図3に示します。図3の上段は地すべり速度(実線)・変位(破線)の時刻歴であり、図3下段が水面変動をとらえた図です。

図3より、地すべりの初期速度が観測された瞬間、つまり地すべりが発生した瞬間に、水面が低下していることが分かりました。これは引波が発生していることを表しています。その後、地すべり土塊は速度一定の定常状態に入りますが、時間の経過とともに少しずつ加速していき、最終的には指数関数的に速度が増加し大規模な地すべりに進展し停止しました。この時の水面変動を見ますと、地すべりが停止する瞬間にもさらに大きな津波振幅が発生しているのが分かります。地すべりが発生する瞬間だけでなく、地すべり土塊が停止する瞬間にも大きな津波が発生する可能性が示唆されました。

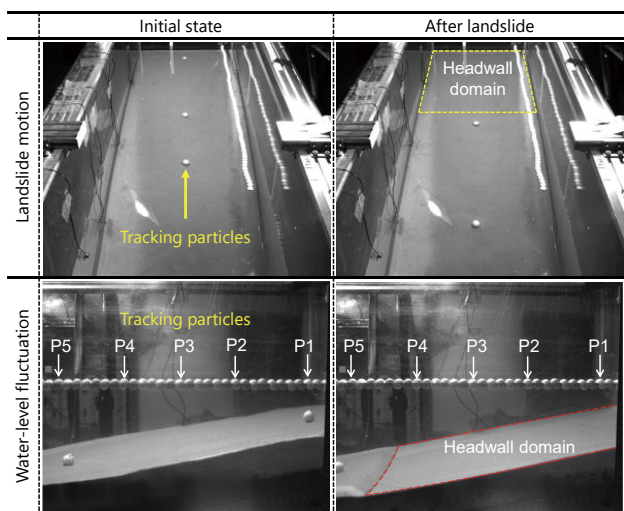


図2 高速度カメラの画像

おわりに

海底地すべり-津波励起現象のメカニズムを明らかにすることで、津波防災計画策定の一助になればと考えております。海洋国家であるからこそ抱える課題に対して、これからの多角的な視点から研究を遂行していきたいと思えます。

最後に本研究結果が前職場の名古屋工業大学で実施してきた内容です。研究の遂行にあたりご理解と多大なご支援を賜りました、名古屋工業大学の張 鋒 教授、当時の張研究室の学生で、大変な実験を遂行して頂きました、木村 真郷氏(現:清水建設)、安井 俊平氏(現:五洋建設)に厚く感謝申し上げます。

無意識プロセスを考慮した防災・減災行動の促進政策

防災研究所・社会防災研究部門・准教授 藤 見 俊 夫

はじめに

適度な運動や健康的な食事、規則正しい生活、老後に向けた貯蓄など、やったほうがいいと思っても実際にはやらないことは多くあります。防災・減災においても、そうした意図－行動ギャップは顕著にみられます。例えば、ハザードマップの確認は重要で簡単だと思っている人でも実際には見ていないことが多いです。自分の意図したとおりに行動しないことがあるという事実は、人の判断・行動における無意識プロセスの重要性を示しています。かつて、「無意識」は科学的に扱うことが難しかったために敬遠されていましたが、しかし近年、神経科学の発展により無意識も科学的に解明されつつあります。特に、カール・フリストンにより2006年に提唱された自由エネルギー原理¹は、無意識プロセスを含む脳の多様な機能を単一の原理で説明できるものとして大きな注目を集めています。このような背景のもと、防災・減災行動を促すために、無意識プロセスを考慮した政策について研究を行っています。

自由エネルギー原理

人は物を知覚するとき、ビデオカメラのようにありのまま見るではありません。知覚対象となる物は、線分や傾き、色、肌理などの要素に一旦分解され、脳内でそれらが再統合されます。自由エネルギー原理では、その再統合が変分自由エネルギーを最小化するように行われると考えます。もう少し具体的に説明しますと、人はこれまでの経験の蓄積から構成された無意識の事前信念を階層的にもっており、外部からの情報は事前信念の予測と比較され、それらの誤差（ $\approx$ 変分自由エネルギー）が最小となるように事前信念が更新されることで知覚します（図1）。例えば、図2のドレスは青地に黒縞に見える人と、白地に金縞に見える人に分かれます。これは、見る人のこれまでの経験で構成された無意識の事前信念の違いが原因だと考えられています。

現在主流の行動モデルは、外部からの情報を意識的に理解し、その理解をもとに判断・行動するという枠組みに基づいています。そのため、意図－行動ギャップを説明することが原理的に不可能です。一方、自由エネルギー原理の枠組みでは、無意識の事前信念も人の判断・行動に影響を及ぼすため、意図－行動ギャップの説明が可能になります。また、無意識の事前信念を更新するには、数値・言語情報や地図情報など意識的解釈を必要とする情報より、環境・身体を通じた1人称視点の情報が効果的であることが予想されます。

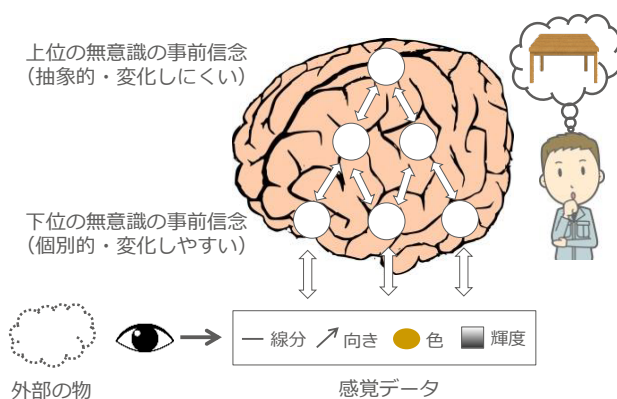


図1 自由エネルギー原理における知覚プロセス



図2 人によって色が違って見えるドレス写真

無意識を考慮した防災・減災政策

防災・減災対策の必要性を、頭では理解しても実際の行動に移さない問題の解決には、無意識においても災害の危険性を感じさせることが重要です。そのためには、災害危険性について、ハザード地図など意識的解釈を必要とする情報だけでなく、災害状況の映像など1人称視点で無意識的にも危険性が伝わる情報が効果的であると考えられます。この方針に沿って、以下の二つの研究に取り組んでいます。

一つは、意識的解釈の必要なハザード地図情報と1人称視点の災害動画で危険性を伝えた場合、脳の活性化する場所が異なるか、さらには防災・減災行動が促進されるかを検証する研究です。まだ、プレテストの段階で5名の被験者の結果ですが、災害動画のほうが楔前部（Precuneus）や海馬傍回（Para-hippocampal gyrus）の反応が大きく、災害の危険を「我が事」と捉えていることを示唆する結果が得られました（図3）。

もう一つは、環境の変化を通じて危険性を伝える方法が効果的であるかを検証した研究²です。河川の水位が氾濫危険レベルに到達すると川幅が広がって見えるように河川形状（高水敷）を設計することで、より適切な避難決定を促せるかについて仮想現実（VR）を使って実験しました（図4）。

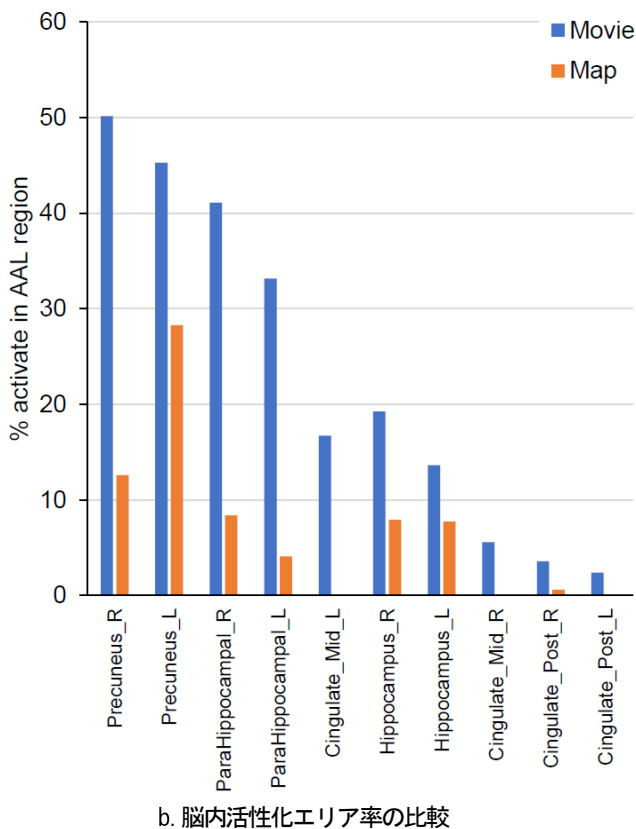
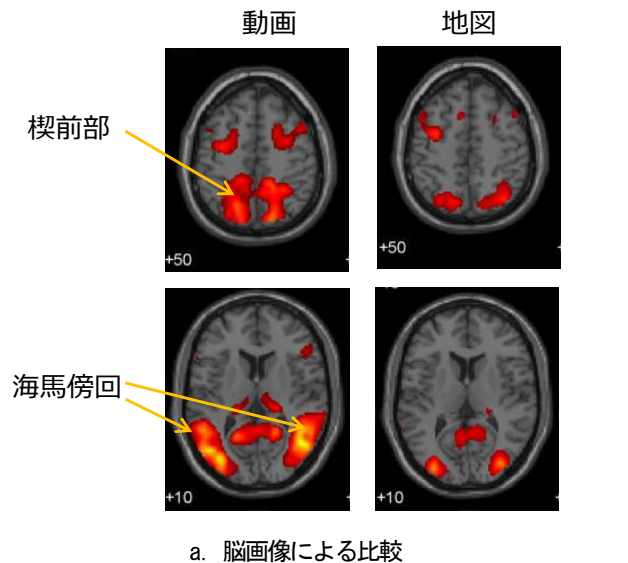
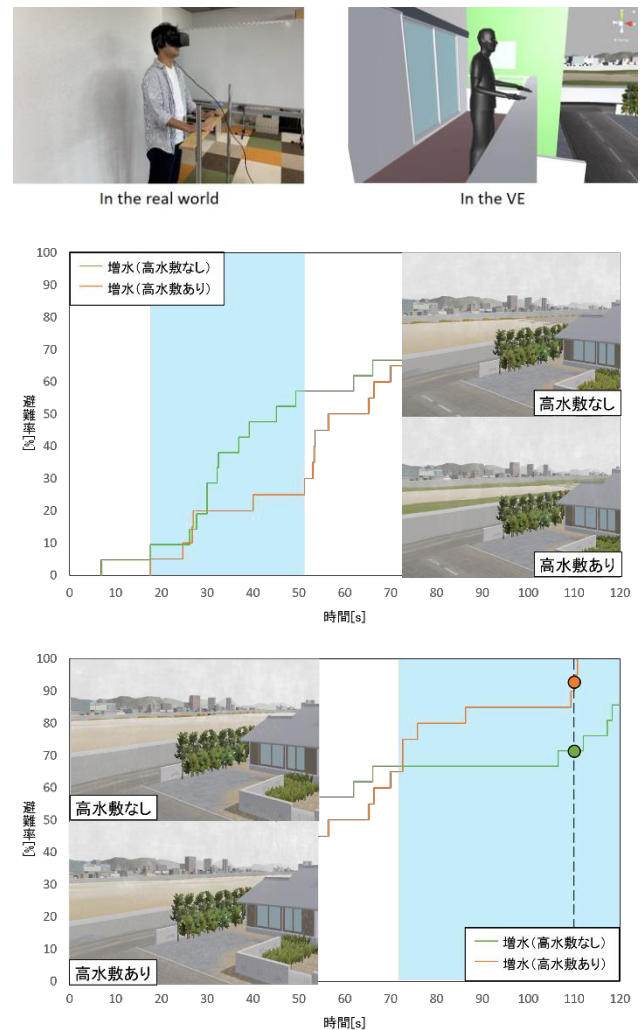


図3 災害動画とハザード地図提示のfMRI実験結果

その結果、上記の河川形状において川幅が広がるときに避難率が急上昇し、最終的な避難成功率が高まることが明らかになりました。これらの結果は、災害の危険性を伝えるにあたり、意識的な解釈が必要な情報だけでなく、環境・身体を通じた1人称視点の情報をを用いることが効果的であることを示唆しています。



おわりに

防災・減災に限らず、多くの社会問題において合理的な人間を前提とした政策では上手く機能しない場合があることが知られています。無意識プロセスの研究が進めば、そうした問題に対して思いつきのアドホックな対策ではなく、科学的に適切な設計することが可能になります。無意識を考慮した政策は、その有効性だけでなく副作用や倫理的問題も含めて、今後重要なテーマになりそうです。

参考文献

1. Friston, K, Kilner, J., Harrison, L.: A free energy principle for the brain. *Journal of Physiology*, Vol.100, pp.70-87, 2006
2. Fujimi, T., Fujimura, K.: Testing public interventions for flash flood evacuation through environmental and social cues: the merit of virtual reality experiments. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol.50, 101690, 2020

私の技術開発

複合原子力科学研究所・原子力基礎工学研究部門・准教授
藤 川 陽 子

1. 原子力の利用に伴う廃棄物の問題について

原子力の利用に伴い様々な放射性核種を含む発電所廃棄物が発生してきた。また、福島第一原発事故に伴い発生した、放射性セシウムを含む様々な廃棄物の最終処分も問題になっている。特に事故由来の放射性セシウムを含む一般・産業廃棄物の焼却灰は放射性セシウムの溶解性が高く、最終処分後の安全性に懸念がある。なお、これらの廃棄物と除去土壌の一部は、2045年までに福島県外で最終処分されることになっている（中間貯蔵・環境安全事業株式会社法第3条）が、実際の処分先は定まっていない。廃棄物の処分方策は、地中埋設が基本方策である。特に原子力発電に伴い発生した、長半減期の核種を高濃度に含む高レベル放射性廃棄物については地下300メートルよりも深い地層に処分することが決まっているが、実際の処分地は未決定で、これも大きな社会問題である。

(1) 廃棄物焼却灰の除染試験

2011年の福島第一原発事故を受け、事故由来の放射性セシウムを含む焼却灰の除染と減容の研究を、東北の現地自治体等と協力しての現場試験除染試験として七次にわたり行ってきた。除去のスキームと現場試験の手順を図1、2に

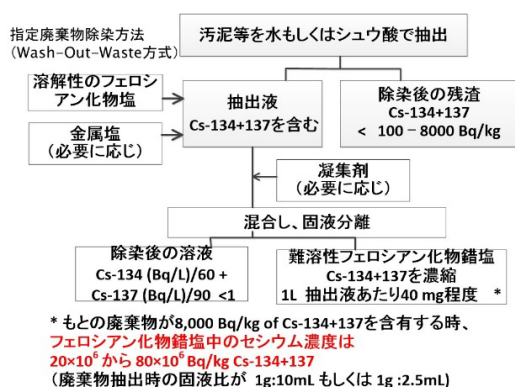


図1 焼却灰中の放射性セシウム除去スキーム



図2 現場試験の手順

示す。

本試験の除去法は、フェロシアン化物共沈法である。低めのpH、低めのフェロシアン化物濃度で減容率が向上すること、凝集剤の選択においても最適化が必要であることなどが明らかになった。一方長く課題として残ったのは、試料によって予定していた除去率が現場試験時にえられないことであったが、最終的に試料中のリン酸の妨害が原因と判明した。

(2) 地圏における放射性セシウムの移行調査

さて、高レベル放射性廃棄物、指定廃棄物、除去土壌等の埋設処分地の立地のめどはたっていない。いわゆる福島県外最終処分についても、前途は不明確である。そこで放射性物質を日本の地下環境に埋設しても安全が確保できることを実フィールドで示すことが必要と考え、2018年度からは、福島第一原発事故以来、低濃度ながら放射性セシウムを含有するようになったゴミ焼却灰を実際に受け入れている最終処分場の浸出水及び周辺地下水の本格的な研究に着手した。

この研究の端緒になったのは、福島第一原発事故からまもなく福島県下で行った地下水調査であった。事故から数年経過してから放射性セシウムの濃度が井戸水中で上昇し、再び低下する事象を観測した。図3中に示す井戸（GおよびT）の中でいわゆる段丘上あるいは砂岩上の井戸が速く放射性セシウム濃度が上昇し、沖積平野の井戸のほうが濃度上昇のタイミングは遅かった。このことから、地下水中の放射性セシウムの起源は、沖積平野の河川あるいは河川周辺の砂礫層から地下水層への水の侵入ではないと考えられた。筆者は以前から放射性セシウムを含む地層処分の重要核種について基礎的な研究を行ってきたが、その結果として放射性セシウムは我が国の地層中で極めて動きにくく、地下水汚染の懸念はないと結論していた。この現地調査の結果は上記の結論とは異なっており、その後の研究においても問題になった。

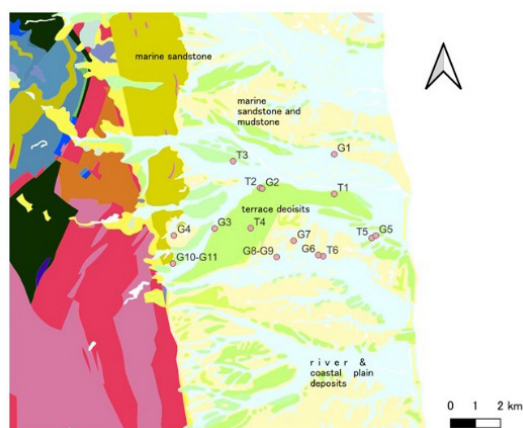


図3 福島第一原発事故後の地下水現地調査地点の地図

最終処分場周辺の地下水調査では実際の現地での地下水水位や地下水水質の調査に加えて、得られた現地の情報を基に地下水流動シミュレーションを行った（図4）。その結果、処分場周辺地下水の水質の特徴の妥当な説明が可能になった。

さらに複数の処分場の浸出水の水質を4年間にわたり観測し、データサイエンスに基づく解析を行った（図5）。特に生成モデルアプローチによるデータ解析は有効であった。

上記と並行してウクライナのChernobyl原発周辺地域において廃棄物トレンチ（図6）からの放射性セシウムの移行を調査解析中である。

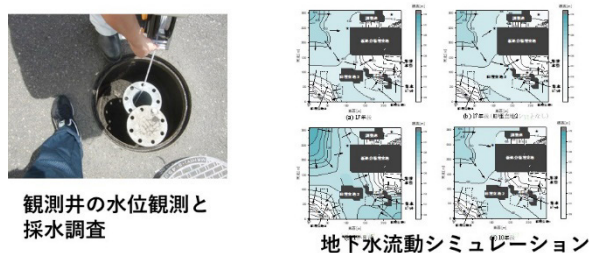


図4 最終処分場周辺での地下水調査

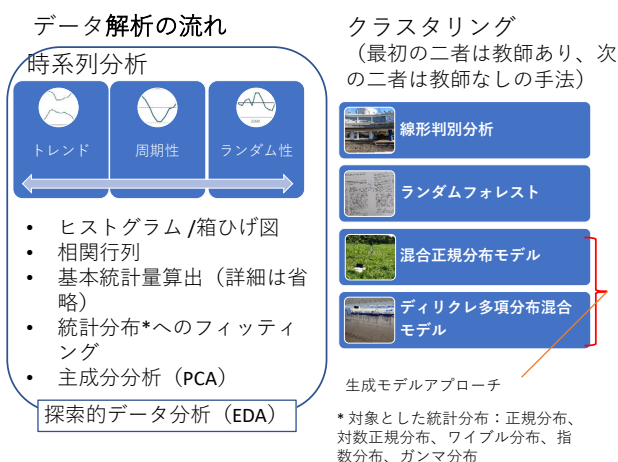


図5 処分場の水質データの解析手順

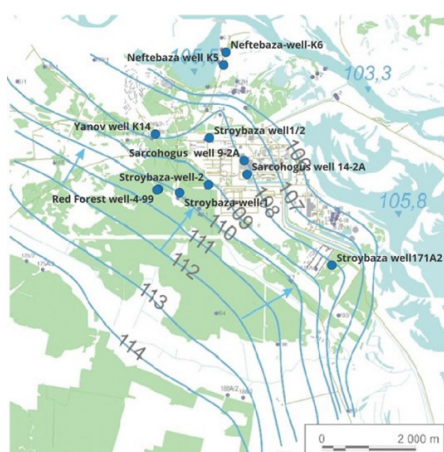


図6 Chernobyl原発周辺地域における我々の調査井戸

2. 持続可能な地下水処理手法の開発

アジアの大河流域で地下水中に多く存在し、何百万人もの人々に健康被害をもたらしている砒素を鉄バクテリア生物濾過法により除去する技術開発を実施してきた。同法は、アジア地域の砒素含有地下水が多量の鉄を含むことを利用した技術で、処理用薬剤や交換の必要な消耗品がなく、開発途上国でも適用可能である。ベトナム現地での長期現場試験の結果、鉄及び砒素除去の実プラントを現地で稼働させることに成功した（三井物産環境基金の援助による）。また、やはりアジア地域の地下水に多いアンモニアのアナモックス法による処理のため、ベトナムでの処理試験を実施した。鉄バクテリア法処理の後段にアナモックス法の処理装置を設置することにより（図7）、良好な処理成績を得た。しかもpH制御は行わずに実施できた。さらに次世代シーケンサー解析により鉄バクテリア法処理した地下水のアナモックス処理という独自の系での微生物の菌叢を解明することができた。具体的にはもともと地下水中に存在するアナモックス菌（この場合 Brocadia 属）が鉄バクテリア法の生物ろ過塔において繁殖し、後段のアナモックス処理装置に流入することで全体のシステムの性能が維持できていると考えられた。

なお、本研究のサイトの地下水には処理の困難な亜ヒ酸が多かったがX線吸収分光法（XAFS）による観測の結果、亜ヒ酸が鉄バクテリアの形成するフロックに効率的に吸着されることが除去機構であることが判っている。

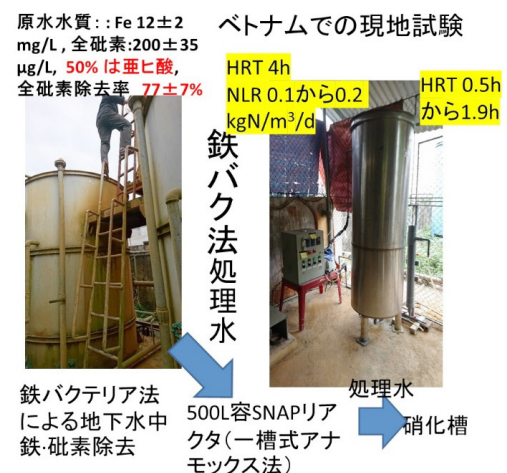


図7 鉄バクテリア法及び後段の処理としてのアナモックス法

3. 今後の研究の展開について

ここには記していないが著者は有機フッ素化合物の中でも特に分解し難いPFOSおよびPFOAについても研究してきた。現在の研究先であるウクライナでこれら化合物を含む消火剤が多量に使われており、今後有機フッ素化合物による地下水汚染の監視と除去が問題になると考え、現地の戦後復興プロジェクトを構想している。戦争の早期終結を祈る。