鋼部材の疲労き裂進展抑制

都市社会工学・構造物マネジメント工学講座・助教　松　本　理　佐

はじめに

我が国では，高度経済成長期に多くの道路橋が建設され，その中の約4割が鋼橋です．鋼橋では，図2に示すように，異なる部材同士が溶接によって接合されますが，溶接部に何回も荷重が作用すると，溶接部からの疲労き裂の発生が懸念されます．しかし，2002年以前は鋼橋の疲労設計が義務付けられておりませんでした．現存する橋梁の9割が2002年以前に建設されているため，図1に示すように，現在鋼橋の溶接部から多数の疲労き裂が報告されており，道路橋の維持管理上の課題となっています．

疲労損傷した橋梁を完全に回復させるには，損傷した断面を補うために，鋼板を高力ボルトで接合する補修（恒久的な補修）を実施することが最も望ましいですが，限られた財政の中ですべての損傷に恒久的な処置を施すことが困難であるのが現状です．

そこで，当研究室では，鋼橋の溶接部からの疲労き裂を簡易に防止する技術や，溶接部から発生する疲労き裂の進展を簡易に抑制する技術を開発しています．以下では，当研究室で開発している疲労き裂の簡易な補修技術のいくつかを紹介したいと思います．

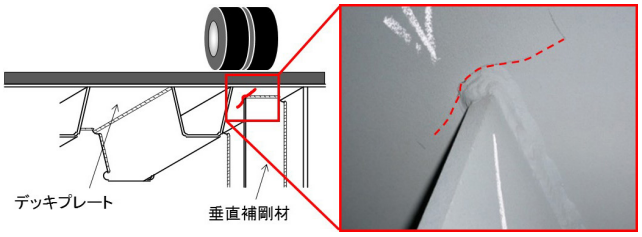


図1　鋼道路橋に発生している疲労損傷

疲労き裂の発生防止技術に関する研究

溶接部から疲労き裂が発生しやすい原因の一つに，製作過程上，溶接部には引張応力が残留する点が挙げられます．通常，疲労き裂は圧縮応力の作用下では発生せず，引張応力の作用下でのみ発生します．溶接部には初めから高い引張応力が生じているので，疲労き裂が発生しやすくなります．

溶接部からの疲労き裂の発生を予防する方法として，溶接部に圧縮応力を付加するピーニング処理工法があります．この工法は，溶接部をエアツールで直接打撃して，溶接部に圧縮応力を付加し，付加された圧縮応力によって溶接部からの疲労き裂の発生を予防する技術です．しかし，通常のピーニング処理工法は，溶接部に直接施工する必要があるため，板組によって溶接部に直接アクセスすることができない箇所や，閉断面内に存在する箇所へ施工することはできないため，施工可能な範囲が限定的であるという課題があります．

そこで，著者らの研究室では，溶接部の遠方からの施工によって，疲労き裂の発生を予防するピーニング技術を開発しています．開発しているピーニング技術では，打撃ツールとして，タガネの先端が平らに加工されたエアツール（図2）を用います．タガネの先端が平らになっているため，広い範囲に圧縮残留応力が導入できるという特徴があります．新たに開発したツールを用いると，図3に示すように，広範囲に圧縮応力を付加することができます．つまり，開発したツールを用いると，溶接部から離れた位置しか施工できなくとも，溶接部に圧縮残留応力が導入できます．このように，打撃部から離れた位置に導入される圧縮応力を利用することで，図4に示すように，き裂発生位置から離れた位置からのピーニングの施工によって，疲労き裂の発生

図2　開発したツール

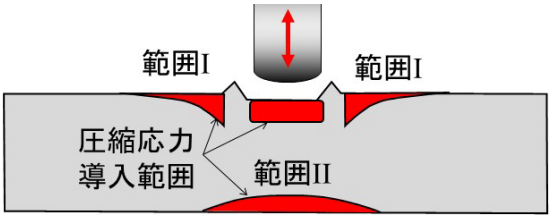
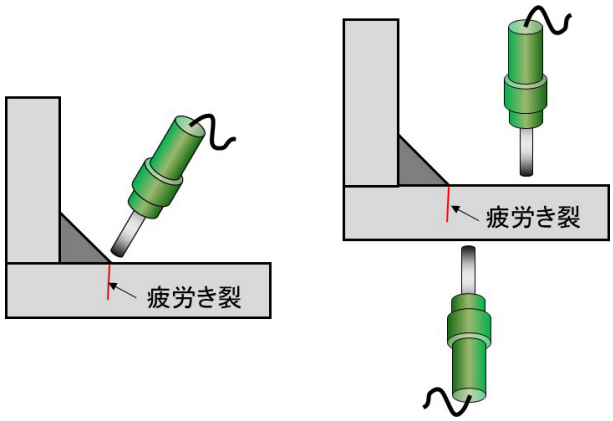


図3　開発ツールを用いたピーニング処理によって付加される圧縮応力



(a) 通常のピーニング　　(b) 溶接部から離れた位置からのピーニング

図4　ピーニング処理技術

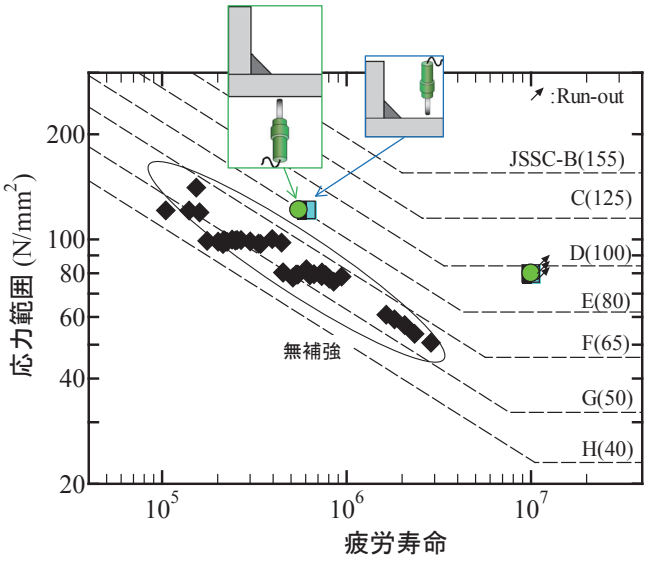


図5　開発したピーニング処理による疲労強度向上効果

を予防できると考え，溶接止端から離れた位置からのピーニングによる補強効果を，疲労試験によって検証しました．その結果を図5に示します．作用荷重の大きさにもよりますが，溶接止端から離れて施工したピーニング処理でも疲労強度が改善されることがわかりました．

疲労き裂の進展遅延技術に関する研究

他方，当研究室は，開発したツール（図2）を用いて，疲労き裂の進展を遅延させる技術（ICR処理工法）も開発しています．この技術は，図6に示すように，市販のエアツールを用いて開口したき裂のすぐ横の母材を叩くことで，周辺の母材を塑性変形させ，き裂の表面を閉口させる工法です．この工法は，大きな重機や反力を必要としないので，簡易な工法であり，エアツールが入る空間さえ確保できれば，施工することができます．閉口するき裂深さは表面の1～3mm程度ですが，き裂の表面がわずかに閉じることで，断面二次モーメントが回復するので，き裂の進展を大幅に遅延させることができます．図7に，ICR処理工法による補修効果を疲労試験によって検証した結果を示します．ICR処理によって疲労寿命を大幅に向上させることができました．

その他にも，腐食しない材料である，炭素繊維強化樹脂成形板（以下，CFRP板）を接着することにより，疲労き裂

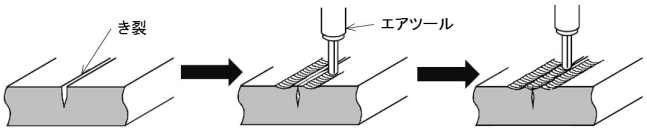


図6　開発したツールを用いたき裂の補修（ICR処理工法）

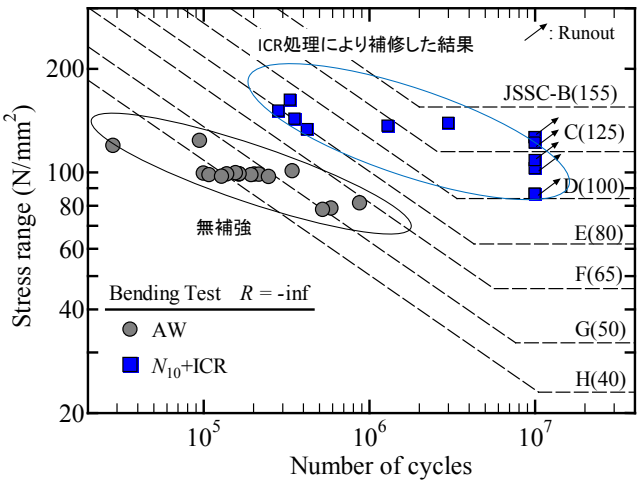


図7　ICR処理工法による補修効果

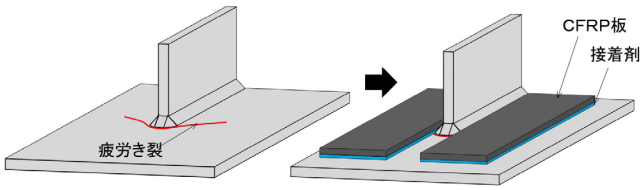


図8　CFRP板を接着することによる疲労き裂の簡易補修

の進展を遅延させる工法の開発も行っています．この補修法は，図8に示すように，疲労き裂の上にCFRP板を接着するだけの簡易な補修法ですが，接着剤の耐久性やはく離の問題，また，CFRP板を接着したときの補修効果を定量的に評価する手法がないため，普及に至っていないという現状があります．そこで，線形破壊力学を用いた数値解析によって，CFRP板接着による疲労寿命延命効果の定量的な評価手法の開発を行っています．

当研究室では，このような現場を意識した技術開発を行い，簡易で安価な補修工法をキーワードとして，鋼橋の維持管理技術に対して意義のある技術開発を行っています．

ICTによる災害情報の共有を想定したリアルタイム浸水ハザードマッピング技術の展望

社会基盤工学・防災技術政策分野・准教授　佐　山　敬　洋

はじめに

洪水が発生した際に，どこで・どの程度の浸水が起きているかという情報は，自治体による災害対応や，住民の安全な避難にとって基本的な情報です．しかし，現行の洪水予測は河川の水位を予測することに主眼が置かれており，内水・外水氾濫が発生した場合に，浸水の広がりを把握したり予測したりすることは，一部の例外を除いて実現できていません．住民に配布されるハザードマップの浸水想定範囲は，事前に想定したシナリオに基づく氾濫シミュレーションの結果を包含するものです．現実に発生している浸水の状況を時々刻々と把握するためには，断片的に入手される現場からの情報を頼りに，自治体などが経験的に推定することになります．近年では，災害情報システムの導入によって，被災情報を効率的に収集・共有できる自治体も多くなっています．しかし，浸水に関連する情報は特定の地点における情報に限られており，浸水深の空間分布をリアルタイムで俯瞰的に把握する技術は確立できていないのが現状です．

リアルタイム浸水ハザードマッピングの要素技術

筆者の所属する防災技術政策分野では，**図1**に示すようなリアルタイム浸水ハザードマッピングに関連する要素技術の研究を進めています．モデル予測に関する内容を図の左側に，情報通信技術（ICT）の活用も念頭に置いた現地情報の収集に関する内容を図の右側に，それを結び付ける技術としてデータ同化技術を中心に図示しています．

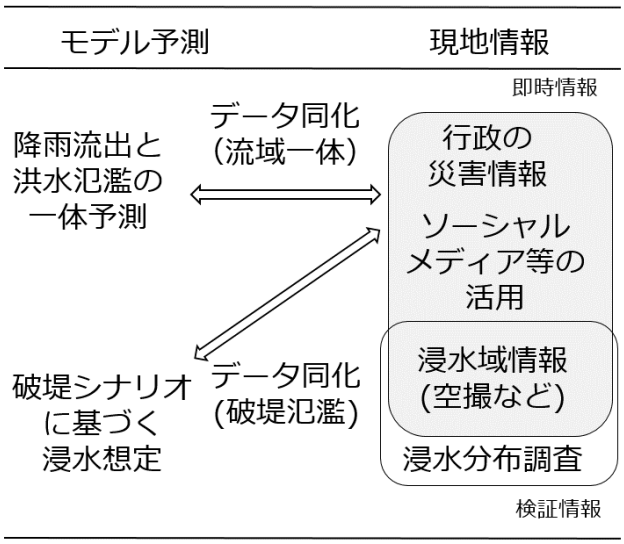


図1　リアルタイム浸水ハザードマッピングの要素技術

モデル予測については，特に従来の分布型流出モデルに端を発するモデルとして，降雨流出と洪水氾濫とを流域スケールで一体的に解析するRRIというモデルを開発してきました．このモデルは前職で筆者が所属していた土木研究所ICHARMにて開発を始めたもので，タイのチャオプラヤ川流域やパキスタンのインダス川流域のように，世界の大規模流域を対象にした洪水予測で実績があります[1)]．従来の分布型流出モデルの多くがKinematic wave理論に基づいて河川の流量を予測するのに対し，RRIモデルはDiffusive wave理論に基づいて，各グリッドセルとその周囲のグリッドセルの水位差によって流下方向や流速を時々刻々変化させながら2次元で流出と氾濫を解析します．Dynamic waveに基づく詳細な氾濫解析モデルに比べると，流速が急激に変化するような構造物周りの氾濫解析等には向きませんが，多くの氾濫モデルが破堤地点からの氾濫量を境界条件に設定する必要があるのに対し，RRIモデルは水文モデルの側面を有していますので，土壌への浸透や蒸発散などの影響も考慮しながら流域一体で降雨を入力して氾濫まで推定できます．特に地理情報の限られた途上国でも容易にモデルが適用できるよう，グラフィカルユーザインターフェースの開発も進め，ソースコードも含めてICHARMのホームページにて公開しています．

また当研究室では，兵庫県の千種川流域を対象にRRIモデルの適用研究も進めています．この研究は兵庫県や民間コンサルタント会社と共同して進めており，詳細な河道断面情報を反映した中小河川の浸水予測を目指しています．千種川の上流域には2009年に甚大な被害が発生した佐用川流域が位置しています．特に谷底平野に集落が点在するような自治体では，幹線道路の浸水やそれに伴う孤立集落の被害状況などを迅速に把握することが大切であり，RRIモデルによる流域一体の浸水シミュレーションが，その状況把握にとって有効なアプローチになればと考えています．

一方で，昨年9月に鬼怒川下流部で発生したような堤防決壊を伴う外水氾濫については，既往の氾濫モデルで様々な破堤シナリオを想定したシミュレーションを事前に実行しておくことが大切であると考えています．そのうえで現地の状況をより正確に把握するため，行政が把握している巡視や通報による浸水関連情報，将来的にはソーシャルメディアによる情報なども利用しながら，**図1**の中心に位置づけたデータ同化技術によってシミュレーション結果から現況に近いものをうまく選択しつつ，より高度に現地情報を活用して浸水深の空間分布を補正する技術が必要と考えています．

またリアルタイム情報とは少し話しが逸れてしまいますが，災害後の現象解明とシミュレーションの検証のためには，最大浸水深の空間分布を災害調査で明らかにし，アーカイブしておくことも大切です．以下では関連する取り組みとして，昨年9月の鬼怒川洪水を対象に実施した浸水深分布の調査方法と，国土地理院による浸水域の空撮画像から浸水深分布を推定する技術についてご紹介します．

鬼怒川洪水を対象にした浸水深の空間分布推定

従来の洪水痕跡調査は，地盤から最大痕跡水位までの深さを計測するのが一般的でした．しかし，この情報はどこを基準にして浸水痕跡の深さを計測するかによって結果がばらつくため，その解釈や情報の統合には注意が必要でした．一方，最近ではネットワーク型のRTK-GPSの利用性が高まり，容易に浸水痕跡の標高を高さ30cm程度の誤差範囲で計測することが可能になっています．水位の絶対標高であれば他の機関で計測された情報と集約するのも容易で，今回の調査では他大学で計測された情報も含めて計133地点の水位情報を収集しました．この水位を空間的に内挿し，レーザプロファイラに基づく地盤高情報を差し引くことで5m空間分解能の最大浸水深分布を推定することが可能です．この情報は防災研究所の調査報告でも公開しています[2)]．

さらにこの情報と上記の国土地理院がヘリコプターの空撮から推定した浸水域の空間分布情報より，浸水深の時間変化を推定する手法を提案しました．手法の概略としては，まず浸水範囲のエッジ部分をGIS上でポイント情報に変換し，各ポイントに標高情報と上述の最大浸水位の情報を付与します．次に各ポイントで，最大浸水位から標高情報を差し引いて当該時刻における最大浸水位からの低減水深を求めます．各ポイントの低減水深をクリギング法によって空間内挿し，上述の最大浸水位から差し引けば浸水位の空間分布が求まります．この方法で推定した浸水深分布の時系列を**図2**に示します．提案手法は上述の浸水痕跡調査の結果も活用する方法です．各ポイントの標高を当該時刻の水位とみなして直接空間内挿する方法に比べて，最大からの低減量を内挿する本手法は，全ての地点で計測に基づいて推定した最大浸水深を上回らないという特性を有します．

さらにこうした洪水の推定結果がローカルな情報とどの程度対応しているかにも着目して分析を進めています．例えば，ツイッターなどのソーシャルメディア上では，鬼怒川洪水時に浸水に関する情報が多くつぶやかれています．特に写真付きで洪水の状況をアップしたツイートも多数あり，道路の冠水や建物内の浸水状況を把握するのにも役立つ可能性があります．当研究室では昨年度より情報通信研究機構とも共同研究を開始し，DISAANAというツイッター分析システムを活用させて頂いています．まだこうした取り組みは緒に就いたばかりですが，将来的には車載センサーや防犯カメラの情報など，多様な情報源を駆使して浸水に関する情報を収集することが大切であると考えています．

おわりに

本稿ではリアルタイムの浸水予測の展望として，現在取り組んでいる研究テーマをご紹介しました．中小河川を含む流域スケールの浸水予測にはRRIモデルのように降雨流出から洪水氾濫までを一体的に解析するモデルの研究を進めたいと思います．また鬼怒川洪水のような主要河川の決壊氾濫については，事前に実施する氾濫シミュレーションを最大限に活用する方法を検討したいと考えています．いずれも現地からの浸水情報をいかに収集し，同化させるかが重要です．その鍵を握るデータ同化手法については，現在開発中で本稿ではご紹介できませんでしたが，これらの要素技術が結びついて現地情報を活用するリアルタイム浸水ハザードマッピングが実現できるよう，引続きこのテーマの研究を進めていきたいと思います．

参考文献

1) Takahiro Sayama, Yuya Tatebe, Yoichi Iwami and Shigenobu Tanaka, Hydrologic sensitivity of flood runoff and inundation: 2011 Thailand floods in the Chao Phraya River basin, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, pp. 1617-1630, doi:10.5194/nhess-15-1617-2015, 2015.

2) 佐山敬洋・寶 馨，平成27年9月関東・東北豪雨に伴う鬼怒川氾濫の浸水深分布推定，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 72, No. 4, I_1171-I_1176, 2016.

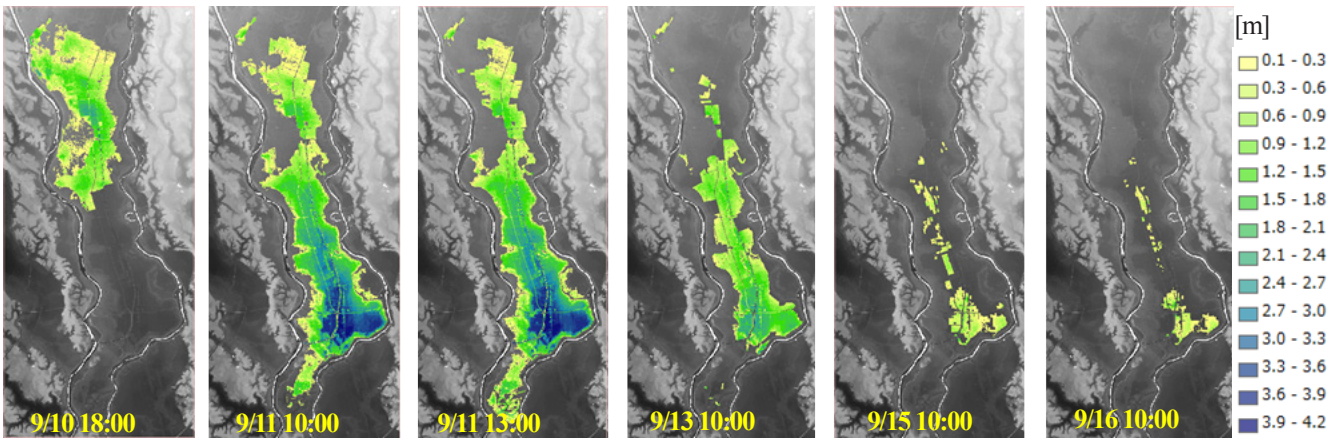


図2　鬼怒川洪水氾濫を対象にした浸水痕跡調査と空撮画像に基づく浸水深分布推定結果

メタンハイドレート資源開発の現状と地盤工学

社会基盤工学・地盤力学分野・准教授　木　元　小百合

メタンハイドレート資源開発の現状

2001年に経済産業省が「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」を発表し，官民学共同の組織として，メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（通称：MH21コンソーシアム）が立ち上げられました．以来，わが国では，メタンハイドレート開発技術の確立とエネルギー資源としての利用を目指して，世界に先駆けて研究開発が進められてきました．以下では，メタンハイドレート資源開発の現状と，筆者が地盤工学の視点から取り組んでいる研究についてご紹介いたします．

MH21コンソーシアムでは，主として東部南海トラフ海域に賦存する「砂層型」のメタンハイドレートを対象として，資源量評価，掘削・生産技術の開発が進められ，2013年3月には，海洋研究開発機構が所有する地球深部探査船「ちきゅう」を活用して，世界初の海洋産出試験が実施されました．この産出試験は愛知県沖約80キロメートルの地点で実施され，海底地層から天然ガス存在形態の一種である「メタンハイドレート」の試験採取の成功が報道されました．以前には，2002年に5カ国（日本・カナダ・米国・インド・ドイツ）の共同プロジェクト，2007～2008年には日本・カナダの共同プロジェクトとして，いずれもカナダのノースウエスト州マリック地域にて陸上産出試験が実施されていますが，海底地盤中のメタンハイドレートからのガス採取としては，世界初の実証試験でした．産出ガス量は1日平均2万m^3，6日間で計12万m^3であり陸上産出試験のおよそ9倍で，非在来型海洋資源としての可能性が示されました．

その後，2014年に策定された政府の「エネルギー基本計画」では，「砂層型」メタンハイドレートについては，2023年から2027年の間に民間企業が主導する商業化のためのプロジェクトが開始されるよう，国際情勢をにらみつつ技術開発を進めるとしています．また，これまで研究開発が進められてきた「砂層型」メタンハイドレートに加えて，主に日本海側において確認されている「表層型」メタンハイドレートが新たに計画に位置付けられました．

非在来型天然ガス：メタンハイドレート

メタンハイドレートは，エネルギー資源としては非在来型天然ガスに分類されます．石油・天然ガス系の非在来型資源の代表的なものに，オイルサンド，オイルシェール，タイトサンドガス，シェールガス，炭層メタンガスなどがあり，これらはすでに商業化に成功しています．在来型資源の場合，通常は坑井から自噴し，圧力の低下した油層ではポンプによる採油で生産しますが，非在来型資源の生産には，より高度な技術が適用されることから，これを開発する事業者は限られ，採取コストも高くなります．以前は，その資源量は在来型にほぼ匹敵すると見られるものの，期待できる生産量は限定的とみられていましたが，石油・ガス開発に関する様々な技術の中でも，特に水平坑井掘削と多段階水圧破砕技術の進歩に加え，2000年から2012年頃まで続いた石油価格の高騰により，経済性と技術の両面で開発対象となる環境が整いました．特にオイルサンドやシェールガスについては米国，カナダを中心に生産を拡大し，世界のエネルギー需給構造の変化をもたらしました[1)]．

メタンハイドレートについては，原資資源量は東部南海トラフ海域において，わが国の天然ガス消費量の約10年分と推定されていますが[2)]，日本海側に賦存する「表層型」のものや，世界の資源量については調査段階であり，今後増大していくことが予想されます．しかし技術的には，主として海底地盤中に賦存すること，未固結地盤を対象とすること，ハイドレート自体が固体であることなどから，後述する出砂問題などの技術的課題があり，生産性を高めるための技術開発が進められています．

メタンハイドレートを内包する地盤材料

メタンハイドレートは，メタンを中心にして周囲を水分子が囲んだ形になっている水和物の一種です．低温かつ高圧の条件下で水分子が立体の網状構造を作り，その隙間にメタン分子が入り込み結晶構造を形成しています．**図1**はバイカル湖の湖底で採取されたガスハイドレート含有試料です．バイカル湖の場合，湖底面から1メートルほどの表層地盤内に脈状で存在しています．南海トラフの砂層型の場合，このような塊状ではなく，砂粒子同士を固結するか間隙中に浮遊する形で，砂粒子の間隙中に存在していることが分かっています．

図1　バイカル湖の湖底で採取された試料
（白い層の部分が天然ガスハイドレート）

ガスハイドレート含有試料の力学試験

メタンハイドレート単体の密度は0.92 g/cm^3であり，氷に近く，力学的物性についても，ヤング率やポアソン比はおおむね氷と類似しており，氷と同様にクリープ特性を示

図2　温度制御型高圧三軸試験装置

すことが報告されています．

図2は，当研究室でハイドレート含有砂試料の力学試験に用いている温度制御型三軸試験装置です．もとは軟岩などの三軸試験装置として使用していた装置を，供試体内にガスを注入し循環水の温度を制御してハイドレートを生成できるように改良したものです．この装置を用いて砂供試体内にハイドレートを生成させて人工的にガスハイドレート含有試料を作成し，その含有率による変形強度特性の変化や分解時の挙動などを調べています．

出砂現象と地盤の内部浸食のモデル化

石油の生産時には，地盤を構成する岩石の断片である砂分が原油や天然ガスとともに運ばれて，生産坑井の中に流れ込み，油田の寿命と経済性を決める重要な要因になっています．この現象は出砂（サンドプロダクション）と呼ばれ，出砂により井戸の坑内が砂で埋まったり，生産設備の配管内部を摩耗するなどして生産を継続できなることがあります．メタンハイドレートの場合，通常の重油等の貯留層よりも浅い，地表面からせいぜい数百メートルの未固結地盤を対象としているため，出砂問題への対策が重要な課題となっています．2013年3月の海洋産出試験では，出砂現象により，減圧用のポンプに不具合が生じたことが報告されました．

出砂への対策は，1）土粒子の流動化（内部浸食）が生じにくいよう固結する，2）砂が坑内に流れ込まないよう水際で止める，3）坑内への出砂は許容し，流れ込んだ砂を処理する，が考えられます．このうち1）については，化学物質や微生物による固化が検討されていますが，ガスの生産を止めてしまわないよう，透水性を保ったまま固化することがポイントになります．2）についても同様で，フィルターを設置して坑井周囲で細砂を完全に止めてしまうと，ガス生産を阻害してしまうため，出砂防止と生産性の維持を両立させることが課題です．

図3はメタンハイドレート生産時の出砂現象の模式図で

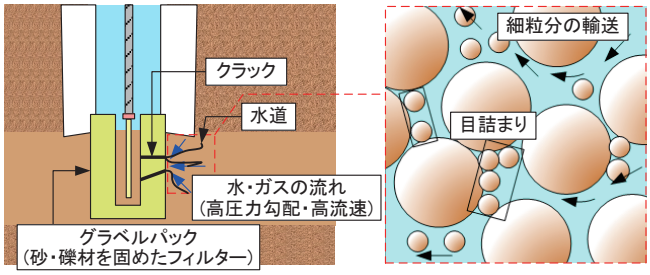


図3　メタンハイドレート生産時の出砂現象

す．この現象は，地盤内部で浸透流により土粒子が剥離し移動する現象で，近年，地盤工学の分野では「内部浸食」（Internal erosion）と呼ばれ注目されています．内部浸食に起因する地盤の破壊現象として，出砂のほかに例えば河川堤防や護岸構造物周辺の浸透破壊，吸出しによる陥没，下水管などの埋設管損傷に起因する空洞化などが挙げられます．表面侵食が水と地盤の境界面で生じるのに対し，内部浸食は地盤内部で起こるため，そのメカニズムは複雑であり，まだ十分に解明されていません．筆者らは，内部浸食の発展則をモデル化し，水-土連成解析手法に土粒子の剥離・移動を取り入れた計算手法の開発を進めています．本手法の開発により，地盤の浸透流による不安定化問題やメタンハイドレート開発時の出砂問題など，これまで数値解析で取り扱われてこなかった飽和土および不飽和土の内部浸食を伴う種々の問題の解明に寄与すると考えています．

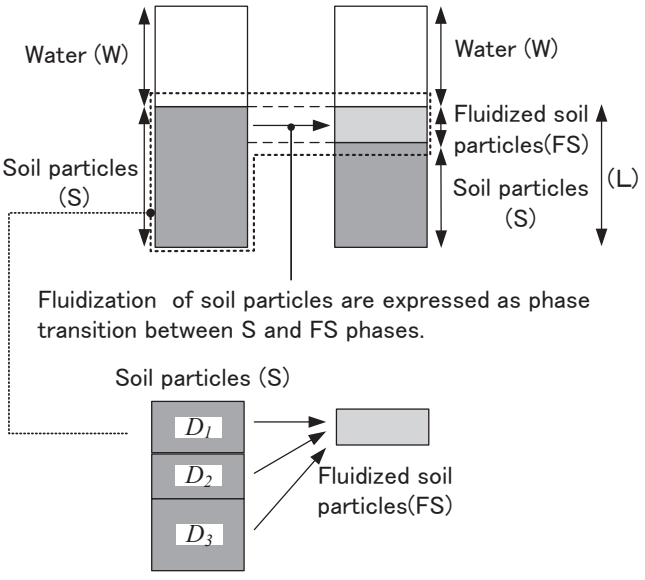


図4　多相混合体理論における浸食のモデル化

参考文献
1）本村眞澄，非在来型化石燃料の現状と展望，JOGMEC石油・天然ガス資源情報，Vol.63, No.10, 2012.
2）エネルギー基本計画，経済産業省，平成26年4月，2014.

想定外リスクを想定する減災計画論の確立に向けて

防災研究所・巨大災害研究センター・准教授　大　西　正　光

はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は，わが国の防災対策に係る意思決定の規範的概念が未だ確立していないことを露呈する契機となりました．岩手県宮古市の田老地区にあった「万里の長城」と呼ばれた巨大防潮堤がいかなる大津波も防いでくれるという安心感を与えたことは間違いありません．しかし，その安全神話は脆くも崩れ去り，結果的に多くの犠牲者を生む結果となりました．また，東京電力の福島第一原子力発電所の事故では，当時の東京電力社長が記者会見において繰り返し用いた「想定外」という言葉に対して，世論からの批判が少なからず巻き起こりました．2011年3月23日には，同震災を受けて，土木学会，地盤工学会及び都市計画学会は共同緊急声明という形で，「想定外という言葉を使うとき，専門家としての言い訳や弁解であってはならない」とする声明が発表されました．こうしたことから，そもそも，想定外の事象を想定するとはどういうことか？想定外を合理的に想定する計画論とはいかなるものか？という問題を考えるきっかけとなりました．

想定の必要性

災害対策，災害対応において行政が果たす役割は小さくありません．多くの大規模な防災施設は，多くの人々の生命，財産を護る公共財であり，税金を財源として実施されます．また，災害情報も多くの人々が利用する一方，その収集には大規模な観測態勢が必要となります．また，その情報解析及び避難に係る判断においては，専門的知識が求められます．

災害が発生した際に，避難勧告や避難指示発令に係る妥当性を巡って，市町村長が説明を求められる光景をよく見かけることと思います．行政による災害対策，災害対応の実施は，広く人々に影響を及ぼします．市民はこれらの意思決定を行政に委ねる一方で，行政は「なぜ当該対策を実施すべきなのか？」という意思決定の妥当性について市民に説明する責務を負います．ここで，何をもって人々が妥当であると判断するかという問題が生じます．妥当性を説明するために，近代では，科学的根拠を示すことが求められます．こうした考え方を近代合理主義と呼びます．近代合理主義では，「○○のときに（前提条件），××すれば（方法），△△になる（結果）」といったように，因果関係に関する知識に依拠しながら，望ましい結果を得るための方法を検討するという手続きを経ます．ここで重要なことは，当たり前の話のようですが，ある代替案がいかなる条件の下でも望ましい結果をもたらす保証はないということです．因果関係を考える際に，「○○のときに」という前提条件が必ず必要となります．災害対策，災害対応の合理的検討の際も同様です．災害に係る意思決定では，この前提条件を「想定」と呼びます．ここでの想定とは，起こりうる災害シナリオのことです．例えば，ハザードマップでは，災害の種類ごとに予想される被災範囲が示されていますが，被災範囲を計算するためには，例えば火山の場合には，噴火口の位置や噴火規模といった入力条件が必要となります．

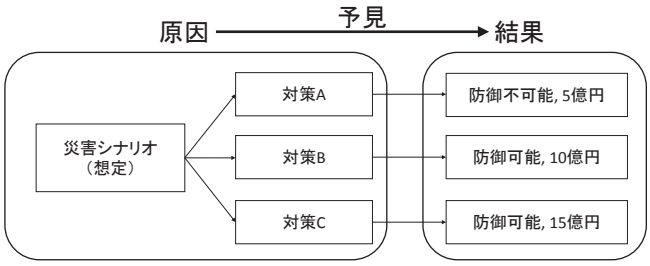


図1　予見に基づく合理的対策の検討

災害対策／対応に係る代替案の選択のためには，前提条件すなわち想定が必要であると述べました．これは，科学的推論の予見（prospect）と呼ばれる考え方に基づいていることを意味します．

図1は予見に基づく推論手続きを示しています．予見とは，原因から結果を推論する手続きのことです．ここで，原因は，前提条件（想定）と代替案であり，結果はどの程度被害を防げるのか，あるいはどの程度の費用がかかるのかといったことに対応します．最も望ましい結果をもたらす代替案が最適な意思決定であるということになります．**図1**の例では，想定した災害シナリオに対して防御可能な代替案のうち，最も費用が少ない対策Bが最適ということになるでしょう．意思決定の妥当性を主張するためには，こうした予見という推論過程に基づいた説明が必要となります．そのため，繰り返しになりますが，合理的な意思決定のためには想定が不可欠です．

予見に基づいて合理性を説明する場合，次に想定として，どのような災害シナリオが妥当であるのかという問題に直面します．想定は公共的な意思決定の判断根拠となるため，選択された想定が社会的合意となる必要があります．災害現象の理解には専門的知識が不可欠であり，社会的合意の形成において，専門家が関与すべきであることはいうまでもありません．しかし，想定が社会的合意となるためには，専門家の見解だけではなく，社会的に受容可能なものでなければなりません．例えば，これまでに起こったことがないような事象を想定に含めば，過剰な対策を実施するための恣意的な想定だといった意見も出てきます．そのため，想定としては，「既往最大レベル」といったように，社会が想定とする災害シナリオが生じる蓋然性を信じられることが求められます．

想定外リスクと減災計画論

結局，想定とは災害対策／対応の合理的検討を目的とした人為的な構築物に過ぎないということです．「防災」という言葉は，災害という外力から社会を「防」御することを目的としていました．想定はひとが勝手に構築した人工物であるにもかかわらず，想定の外のシナリオは起こらないとする考え方は「安全神話」と呼ばれます．安全神話が，まさに事実とは異なる神話であることは，阪神大震災や東日本大震災の経験からも学んだことです．こうした経緯から，完全防御を前提とする防災から，完全防御ができないことを前提として，災害による被害を減じる計画論，すなわち減災計画論の必要性が認識されることとなりました．

想定外リスクは，選択された基本的対策では対応できないような災害シナリオが発生した場合に顕在化します．減災計画論では，想定外リスクが生じた場合に，完全には防御できないとしても，致命的な被害を回避できるように重層的な対応を具備しておくことが重要となります．言い換えれば，想定外リスクを想定するとは，結局，予見に基づく合理的対策の検討を行う際に用いられる想定を敢えて拡げることにより，選択された対策で対応できない災害シナリオを認識し，重層的な対策を検討するということです．

重層的な対策を検討するためには，基本的対策で対応できる災害シナリオとできない災害シナリオを見極めることが重要です．このとき，図2に示す「遡見（retrodiction）」と呼ばれる推論を行います．遡見とは，結果から原因を推論する行為のことを言います．図2では，ある対策Xの下で防御可能あるいは不可能であるとすれば，どのような災害シナリオが生じた場合かを推論するということになります．遡見を通じて基本的対策で対応できる守備範囲を明らかにしておけば，守備範囲外のシナリオを非常事態として，非常時用の対策を検討することが可能となります．

ここで，想定の概念を整理するために，第1次想定と第2次想定という用語を導入します．第1次想定とは，基本的対策を検討するための予見手続きに用いられる災害シナリオの想定であり，例えばハザードマップ上の災害リスクに対応します．一方，第2次想定という概念は，第1次想定をより拡げた災害シナリオを含みます．したがって，これまでに起こったことがないような事象も想定に含めます．第2次想定は，基本的対策だけではなく，非常時用の対策の検討のために用いられます．従来の防災計画では，第1次想定に基づく予見までしか行ってこなかったと言わざるを得ません．第2次想定まで含めた遡見により重層的対策を検討しておくことは減災計画論の第1歩と言えるでしょう．

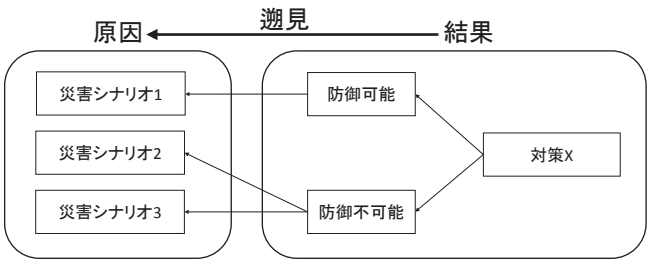


図2　遡見に基づく基本的対策の守備範囲の検討

火山災害への適用例

2000年に北海道の有珠山が噴火した際には，当初火口が発生すると予想していたエリアのちょうど境界上から噴火しました．幸いにして人的被害は出ませんでしたが，これは偶然であったと言えます．上述したような計画論に基づき，有珠山の避難指示に係る意思決定の規範的方法論を分析しました．図3は有珠山において火口の発生が予想される区域を示しています．内側の太線で囲まれた範囲が第1次想定の区域，その外側は第2次想定の区域を示しています．黒く塗りつぶされたメッシュから噴火した場合には，第1次想定に基づいて策定された避難指示ルールでは，火砕流が通過する可能性のあるエリアを経由して避難せざるを得ず，安全な避難ができないことを示しています．仮に，黒いメッシュに火口が発生すると判明すれば，避難先を変更したり，別の手段で避難を行ったりと非常時対応を施すべきであることを示しています．詳細は，参考文献に譲りますが，私の研究では，敢えて社会的に受け入れられている想定を超えて対策を合理的に検討していくための考え方を提示しました．火山災害以外の災害にも，減災計画論に基づいた災害対応／対策を検討していきたいと思います．

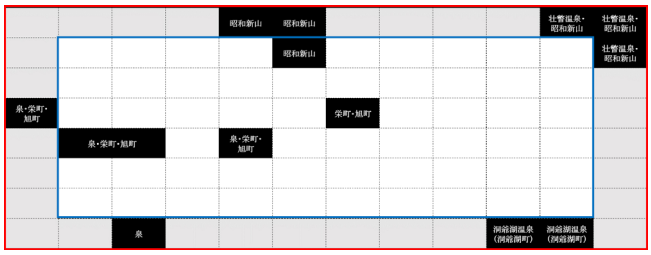


図3　遡見に基づく合理的対策の検討

参考文献

大西正光・関克己・小林潔司・湧川勝己：火山災害における避難指示と想定外リスク，土木学会論文集，投稿中．

土壌や植物による水質浄化技術の途上国への展開

都市環境工学・環境調和型産業論分野・准教授　田　中　周　平

はじめに

日本の上水道普及率は1950年には26％でしたが，以降急速に普及し，1960年で53％，1970年で81％，1980年で92％となり，2015年では97.8％にまで達しました．“蛇口を捻ればきれいな水を得ることができる．”そんな当たり前に慣れた世代は40代を迎えています．下水道普及率は1970年で16％，1980年で30％，1990年で44％，2000年で62％に上昇し，2015年では77.6％にまで達しました．特に都市部での普及率は高く，最近の学生達は，水洗トイレを当たり前と思っているようです．1975年生まれの私は，子供のころ，夏に祖父母の家に帰省すると，“トイレが違う”ことに違和感を覚えたのですが，最近の学生達は，こういう経験もあまりないのかなぁと思っています．

2008年からベトナム国中部にあるダナン市の水環境に関する研究を始めました．4回生や大学院生が3か月間，現地の大学の研究室にインターン生として所属し，現地の先生，学生と協力しながら，研究活動を進めていきます．卒業研究でダナン市の水環境中の糞便汚染を研究した学生を，その後，琵琶湖流入河川調査に連れて行ったとき，学生は河川水の清純さに驚いていました．最初に研究対象としたのがダナン市であったため，彼の中での河川水のデフォルトが途上国仕様になっていたようです．昨年から全学共通科目の国際交流科目を担当し，大学の1・2回生を引率しベトナム縦断の臨地研修を行っています．1990年代後半に生まれた学生達の目には，初めて訪れるアジアの汚れた川や，使い方の違うトイレ，ガタガタの道を走るバス等はどのように映るのか，きっと40代の私とは，全然違う景色がみえているのかなぁと感じながら，“wifiの繋ぎ方とか聞かれたら，すっと答えなきゃ．”などと気を引き締めておりました．

インドシナ東西経済回廊の開通により，ミャンマーからベトナムまで陸路によって輸送することが可能になり，その東の玄関口であるダナン市では急激に経済が発展しています．その結果，水質汚濁，大気汚染，廃棄物問題などの問題が起こっています．“これらは日本が高度経済成長時代に経験したことだから，こうやって解決したらいい．”みたいなことは一概には言えません．8年間，多くの学生とともにベトナムの水環境を研究してきたところ，どうも日本の経験した環境問題とは異なる部分もあることが分かってきました．本報告では，ベトナム国ダナン市の水環境問題を紹介するとともに，現在，学生といっしょに取り組んでいる研究事例と分かってきたことの一部を紹介いたします．

水利用量と利用方法

水利用実態ヒアリング調査と水利用調査を行った結果，一人一日あたりの水道水利用量は102 Lでした．入浴方法はシャワーのみを利用する世帯が全体の53.2％を占め，バスタブを利用する世帯は1.6％でした．また，桶のような容器に湯を入れ体を洗う世帯が全体の24.4％を占め，シャワーと桶を併用する世帯が20.8％を占めました．シャワーのみ利用者と桶のみ利用者の水道水利用量と年間家庭収入を**図1**に示します．シャワーのみ利用者は中央値42.0 L/人/日の水道水を使用し，桶のみ利用者は中央値32.1 L/人/日の使用量であり，9.9 L/人/日の差がありました．両群での水道水利用量を危険率5％としてt検定により比較した結果，有意差が認められました（p = 0.030）．また，年間家庭収入を比較した結果，シャワーのみ世帯で中央値270,000円/年，桶のみ世帯で中央値210,000円/年となり，60,000円/年の差がありました（p = 0.002）．ダナン市では各世帯の収入が増加傾向にあることから，今後，入浴用の水利用方法が桶からシャワーに移行する傾向にあると示唆されました．また，それに伴い，一人一日あたりの水道水利用量が増加することが示唆されました．同様の傾向はトイレの使用にも見られ，注水式から流水式に移行する傾向にあることが示唆されました．また，家族人数の減少による一人一日あたりの料理，皿洗い等の水量の増加なども，水道水利用量増加の主な要因であることが分かりました．さらに，農業用水や工業用水，蒸発散や降水量データなどを収集し，ダナン市における水循環フローを計算したところ，2025年には水不足に陥ることが推測されました．そこで，いろいろな方法による水再生について研究を進めています．

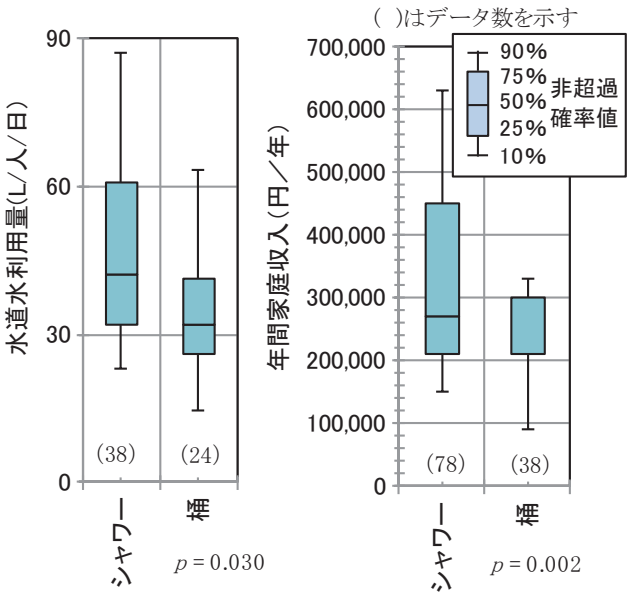


図1　ダナン市におけるシャワー利用と桶利用の一人一日あたり水道水利用量と年間家庭収入

病原微生物による汚染

2014年にダナン市全域で水質調査を行った結果，河川では13地点中10地点で環境基準値（表流水A2基準）を超過

していました．大腸菌は河川で最大10^3 CFU/mL，沿岸部で最大10^4 CFU/mLのオーダーで検出され，さらに地下水からも最大25 CFU/mLの大腸菌が検出されました．地下水の環境基準の達成率は1割であり，広範囲において地下水の糞便汚染が進行していることが示唆されました．さらに病原ウイルスであるノロウイルスGIIも都市河川のPhu Loc川で10^5 copies/Lオーダーで検出されました．

ベトナムでは野菜を生食する文化があります．複数の市場で購入した生野菜の表面から最大2,800 CFU/g-wetの大腸菌が検出されました．また，飲食店で生食用に供された生野菜表面からも最大220 CFU/g-wetの大腸菌が検出されました．これらから，野菜の生食が病原微生物の曝露経路のひとつである可能性が示されました．

ダナン市の25地点で水道水を採取し，残留塩素濃度を分析した結果，8地点で残留塩素が不検出となりました．浄水場では処理されていても，水道管からの漏水によって水道水が汚染されている可能性が示されました．現在は，さらに海産物への病原微生物の濃縮，蓄積について調査を行っています．都市の急速な発展に下水処理場の整備などが伴っておらず，水環境の汚染が顕著に進んでいることが分かってきました．

潜在的に進んでいる化学物質汚染

ダナン市では，自動二輪車，自動車の交通量が著しく増加しています．その結果，多くの女性はマスクを着用してバイクを運転しています．発がん性物質である多環芳香族炭化水素類（PAHs）は，燃焼系由来の微量化学物質であり，排気ガス等により非意図的に環境中に放出される物質です．ダナン市の路面塵埃から，最大1,863 ng/g-dryのPAHsを検出しました．これはハノイやバンコクなどのアジア大都市と同程度の値でした．また，湖沼水，河川水，地下水からPAHsを検出しました．

米，イモ，果物，野菜，落花生等99試料中67試料から，11種類の農薬（Buprofezin, Chlorothalonil, Cyhalothrin, Cypermethrin, Difenoconazole, Hexaconazole, Isoprothiolene, Metalaxyl, Profenofos, Pyrimethanil, Tricyclazole）を検出しました．うち31試料で基準値を超過していることが分かりました．さらに，ダナン市民の体重あたり農薬成人一日摂取量を推定したところ，5種類の農薬（Buprofezin, Cyhalothrin, Cypermethrin, Difenoconazole, Profenofos）でベトナムや日本の一日摂取許容量を超えていることが分かりました．

土壌や植物による水質浄化技術の適用

路面塵埃中のPAHs等は，雨水によって洗い流され，湖沼底質などに蓄積し，貝類などに移行することが考えられます．一方で途上国ではエネルギー不足等の問題もあります．そこで，ファイトレメディエーション等の低環境負荷型の水質浄化技術がダナン市では有効であると考えました．土壌を利用したライシメータを作成し，ダナン市においてPAHsの低分子化を検討したところ，発がん性が強く疑われるベンゾ（a）ピレンの半減期が48日でした．また，土壌に植物（カンナ）を加えたライシメータ試験では，ベンゾ（a）ピレンの半減期が41日であることが分かりました．植物の根圏にさまざまな微生物が生息することで，これら微量化学物質の低分子化を促進する可能性が示されました．共同研究を継続しているダナン工科大学のQuang准教授は，ダナン市と協力し，**図2**のような植生浄化試験を市内の複数個所で実施しています．京都大学の大学生，大学院生とともに実施した研究成果の一部が，今後，ダナン市の水環境改善に役立つことを祈念するとともに，このような研究・教育活動に携われる幸せを日々かみしめております．

図2　ダナン市における土壌や植物を利用した水質浄化施設