

平板の打撃振動制御と床衝撃音対策への活用

都市社会工学専攻・都市耐水分野（防災研究所協力講座）・教授

五十嵐 晃

はじめに

集合住宅やプレハブ住宅などで、床面上での人間の歩行や物を落とす等の衝撃により発生する騒音を「床衝撃音」と呼びます。上階で発生した床衝撃音が下階に響くことで居住環境の快適性が損なわれ、それが住宅の環境の質ひいては住宅の価値に影響する等の事情から、床衝撃音の低減は一つの課題となっています。JISで規定されているL値(遮音等級)に基づいて評価される遮音性能が十分に高い床構造を採用することで要求性能を満たすのが基本的な方策ですが、住宅の付加価値をより高めるといった観点や、既設住宅の居住環境のグレードアップを達成する手段として、いわゆる振動制御技術を利用した技術開発を行っています。振動制御は、土木工学や建築の分野では構造物の風振動・交通振動の制御や、中小地震時の動的応答あるいは大地震による損傷の低減(制震)などを主な対象として研究あるいは検討されてきた分野ですが、この知見を適用して先進的な床衝撃音の低減対策を実現しようという試みです。

問題設定

床衝撃音は、衝撃等により床面に屈曲運動(曲げ振動)が生じ、それが空気を励振することで発生すると考えられます。現実には床材と壁や柱材など他の部材との特定の難しい相互作用があり、モデル化に相当な困難を伴う現象ではありますが、床衝撃音の低減という問題の第一段階は、床を振動する平板でモデル化し、その平板に生じる曲げ振動そのものを抑える問題であると考えられます。

次に、この問題において想定される外力は、床材への打撃であり時間的にきわめて短い衝撃加振力となります。その結果として、床材に生じる振動は調和振動のような持続的な応答ではなく非定常性が極端に強いことと、入力に含まれる振動数成分が非常に広いこと、の2つの特性を持つ問題になります。

そして、衝撃音レベルと衝撃加振の作用の直後に現れる床振動の応答値がほぼ対応することが調べられています。そこで、平板の振動を制御する上での目標として、最大ピーク応答値を小さくすることと、後続振動の速やかな抑制することの2つを考えます。

一般に構造振動の低減のための手法の一つとして、TMD(同調質量ダンパー)が知られています。床材に複数のTMDを設置し振動を低減する装置も製品化されていますが、床衝撃音対策としてはTMDで実現されるよりもなお大きな振動低減性能(例えば-10dBを超えるレベル)の性能が望まれます。そうした性能を実現するために有望と考えられるのは、センサ、アクチュエータ、コントローラを用いたアクティブ制御システムの適用です。アクティブ制御

は、TMDのようなパッシブ制御と比べて同じサイズ・重量でより高い制御性能の実現が可能と期待されること、原理的に複数種類の周波数に対応でき自由度が高いこと、また装置を小型化しつつ効率的で大制御パワーが扱える制御系とすれば、既存の構造物に対しての追加的な設置も容易となる等、様々な優位性が期待されます。

解決すべき課題

平板の打撃による振動では複数の振動モードが同時に励起されますが、人間の体感に基づく重量床衝撃音の騒音評価において影響が最も大きくなるのは63Hzのオクターブバンド付近の振動となる場合がしばしば見られます。この時、打撃加振による応答の開始から着目する最大応答が生じるまで数msからせいぜい数十msオーダーの時間しかありません。そのため、このような問題で効果的なアクティブ振動制御システムとするためには、センサによる振動の検出から短時間で制御効果が発揮できる即応性が求められます。一方で、センサで計測された対象構造物の振動の計測に基づき制御信号を算出するフィードバック系の考え方と、高次数の特性を持つコントローラを用いたアクティブ制御が、振動制御の分野において継続的な構造振動の抑制に効果的に対応できるシステムとして用いられますが、打撃入力による振動の場合は制御効果の立ち上がりに遅延が生じ、必ずしも有効ではありません。

ここで扱おうとする平板の応答は、平板上のある1点での打撃加振の直後、その加振点を起点にした曲げたわみ波の波動伝播が生じている状況での過渡応答によるもので、その後には波動が境界に到達し反射を繰り返して定在波が生じて起こる、継続的な後続振動の状況とは異なっていることも本質的であると考えられます。

制御システムの概念例

図1のように平板上に複数のセンサを配置しておきます。この波動がセンサ設置点へ到達した場合は、計測により検出されます。平板の曲げたわみ波の波速と、センサとアクチュエータ設置点(制御点)までの距離を基に、波動のセンサでの検出から制御点への到達までの時間差が計算できます。このことを利用し、波動の到達を検知したとき、こ

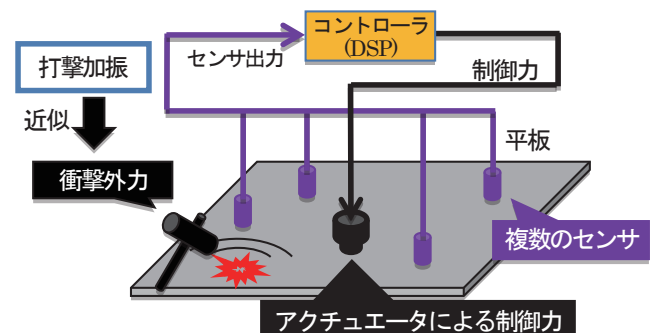


図1 平板のアクティブ振動制御システム

の時間差分だけ後の時刻に制御力を与えることによって、到達した波動による応答速度のピークを予測し、それに対応する加振力を与えることで波動伝搬そのものの低減が図れます。このように、立ち上がり直後の冒頭のピークの低減を1波目制御と呼んでいます(図2)。

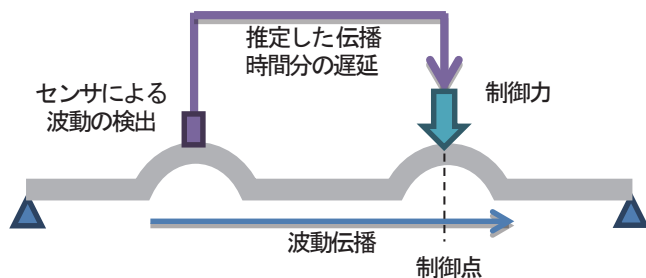


図2 波動伝搬に基づく1波目制御の例

1波目制御で解消されなかった波動が平板境界に到達した後は、反射を繰り返して定在波による後続振動に移行します。後続振動については、平板上の複数センサの情報を有効に用いることで高い即応性を発揮するモーダルフィルタによるフィードバック制御で対応することが有効と考えられます。これらをまとめると、図3のような制御システムが考えられます。

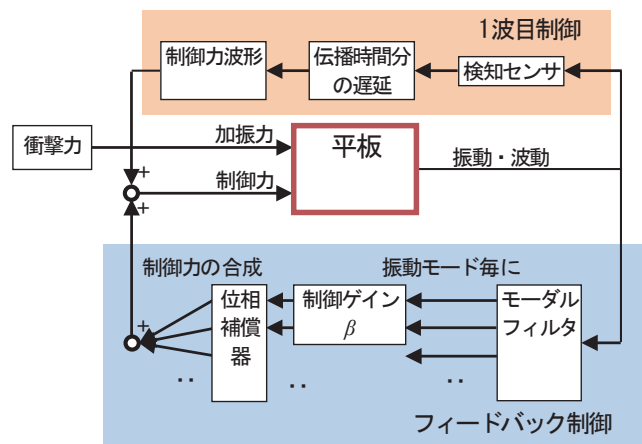


図3 平板打撃振動のアクティブ制御システム

実験的検証

プレハブ住宅の床材として広く用いられるALC(軽量気泡コンクリート)床材の現物を用いて、アクティブ制御システムの効果の検証を行いました(図4)。ALC板の寸法は1750mm×500mm、厚さ100mmで、厚さ15mmのパーティクルボードが上面に接着されているものです。実際の設置状況を模擬しH鋼へのボルト固定で支持しています。加速度センサ5ヶ、動電型アクチュエータ1ヶのDSPベースの制御システムをセットしました。実験結果を図5に示します。1波目制御とモーダルフィルタによるフィードバック制御の両者を同時に用いた場合に、その相乗効果で音圧低減

が得られていることがわかります。

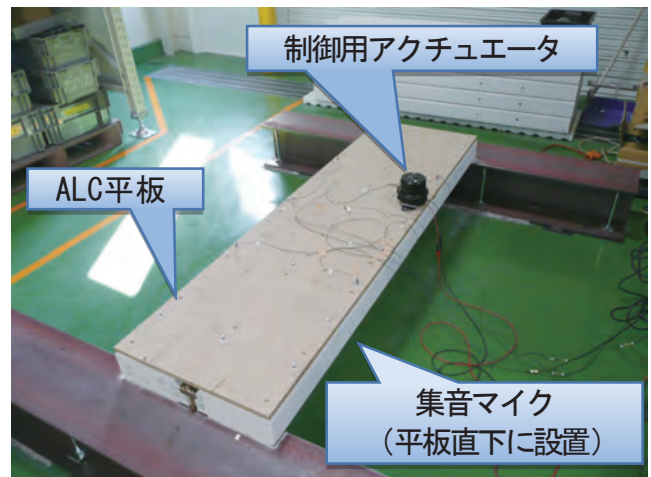


図4 ALC床材を用いた衝撃音低減実験

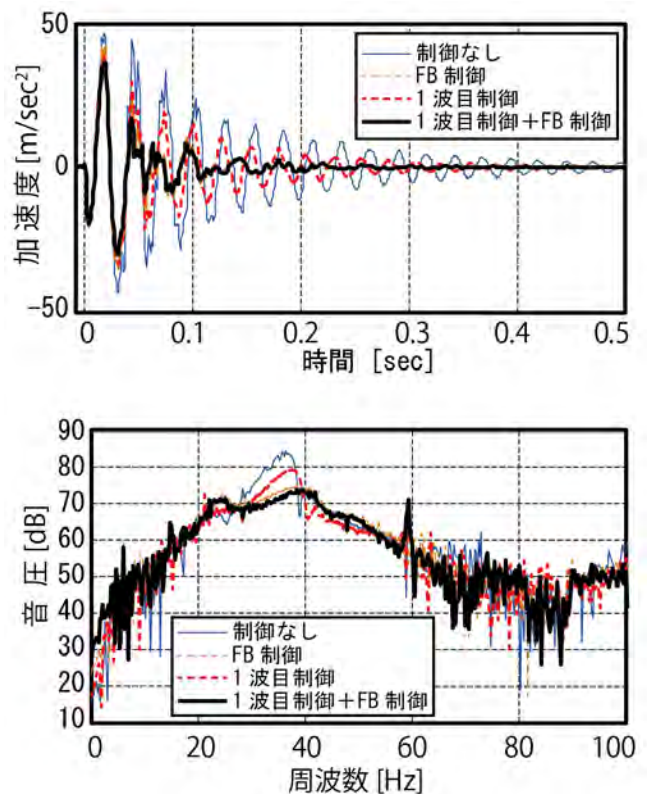


図5 実験結果(床応答と音圧の低減)

本研究開発は民間企業との共同研究で行ってきたもので、最終的な産業化を目標としています。ここで述べた以外にも多くの課題が存在しますが、性能および汎用性をより高めるため、理論研究とシステムの開発改良を続けています。

数値移動床による流砂・漂砂の数値シミュレーション技術

社会基盤工学・沿岸都市設計学分野・准教授 原田 英治

はじめに

沿岸都市設計学分野・後藤研究室で実施している研究テーマの一つに数値流砂水理学があり、混相流（固相と液相の混在した流れ）と粒状体（粒子の集合体）の力学を基礎とした数理モデルの開発とそれに基づいた流砂・漂砂現象のシミュレーションを行っています。流砂・漂砂の移動機構を詳細に理解するには、移動床を個々の砂粒子運動の集合体としてとらえるのが合理的であり、筆者らはそのような観点から開発した個別要素法（Discrete Element Method：DEM）型の数値移動床を、計算力学的に砂の移動機構を考察する数値流砂・漂砂水理学の主要ツールとして使用してきました。ここでは、数値移動床をベースに近年研究を進めている粒子流のLES（Large Eddy Simulation）とMPS法（Moving Particle Semi-implicit）を用いた激流（violent flow）下での移動床のシミュレーション例を紹介します。

粒子流LES

河床変動や海浜変形の移動床計算では、流砂量や漂砂量の評価が必要ですが、それらは、実験や観測に基づいた経験式（流砂量式や漂砂量式）から与えられます。また、流砂量式や漂砂量式は底面せん断力の関数として記述されていますが、所与の底面せん断力に対する移動層の流動機構は十分に理解されておらず、既存の流砂量式や漂砂量式には力学的に曖昧な箇所が認められます。数値流砂水理学の最終目標は、流砂・漂砂量式に替わる数値シミュレーションコードの標準化ですが、現時点では計算機性能が不足しています。そこで、物理的に裏付けられた流動則の提案を中間目標に掲げ、LESによる乱流解析とDEM型数値移動床のカップリング（粒子流LES）による数値シミュレーションを通じて、計算力学的観点から固液混相流の内部構造の理解に向けた検討を進めています。なお、流動層は粒子と流体が混在した固液混相流ですので、清水流とは異なり粒子運動に起因した複雑な混相乱流場を呈します。DNS（Direct Numerical Simulation）は、このような粒子混入による乱流変動を高精細に記述できます。しかしながら、計算資源の制約や計算負荷を考慮すると、DNSの実行可能性は、低Reynolds数の現象に限られ、工学的に興味のある高Reynolds数での流砂・漂砂を対象にしたDNSの実行は困難です。したがって、現在進めている粒子流LESは、混相流に対する格子スケール以下の乱れに対するモデル化、すなわち混相流のSub-Grid Scale（SGS）モデルに課題が残されていますが、現時点で粒子流の流動機構の検討に対して合理的かつ現実的な選択肢であると考えられます。

振動流下での混合粒径漂砂における鉛直分級過程の計算例を示します。図1は、移動床中央断面における乱れエネルギーの生成率の分布です。鉛直分級の進行が顕在化する

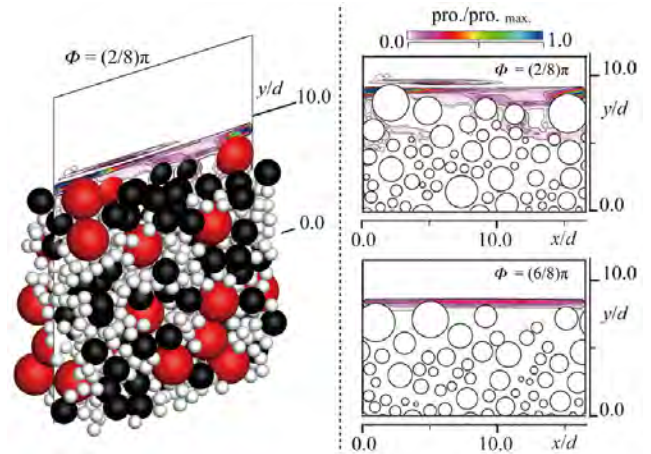


図1 乱れエネルギーの生成率分布

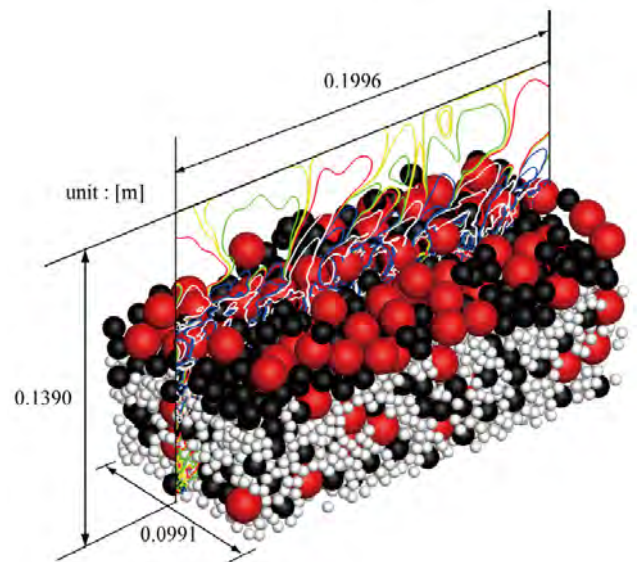


図2 流速の等値線図

振動加速度のピーク位相付近では、乱れエネルギーの生成率がシートフロー層の内部にまで分布（図1, $\phi = 2/8\pi$ 参照）しますが、分級の進行が弱まる位相では粒子運動不活性化し、乱れエネルギー生成率の分布は移動床表層付近の薄層内に限定されます（図1, $\phi = 6/8\pi$ 参照）。また、図2は、ある位相における流速分布の等値線ですが、粒子流動層では多数の小さな渦が存在し、エネルギー散逸に強く関与することが推察されます。この種の数値シミュレーションから得られる多くの数値情報は、流動層内部構造の理解の深化に繋がり、構成則の提案の一助になると期待しています。

粒子法を用いた移動床計算

山地溪流河川、碎波帯や波打ち帯では跳水や碎波を伴う violent flow が観察されます。顕著な自由水面の変動を伴う跳水や碎波は、特に水深が浅い場合は底質の土砂輸送に強く影響をおよぼします。非定常性の強い violent flow 下での

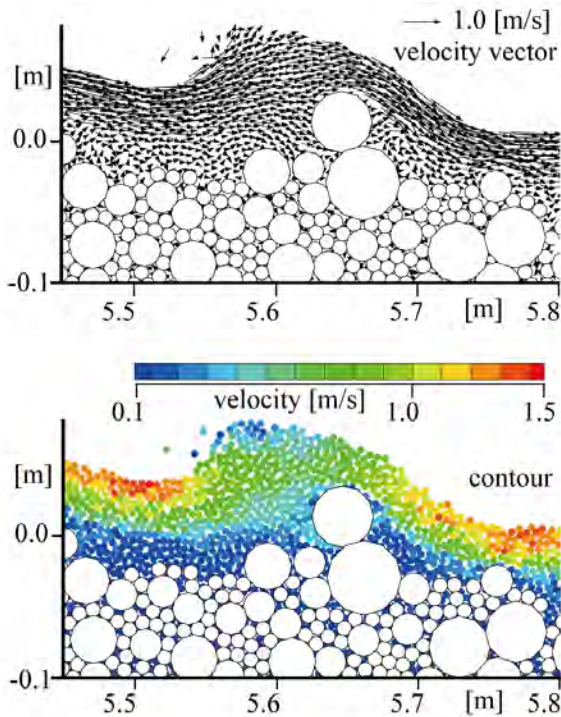


図3 step崩壊過程

土砂輸送機構は、乱流や土砂輸送の直接計測が困難であり、十分に解明されていない領域の一つです。物理量をEuler観測する格子法と異なりLagrange観測するMPS法は、移流項による数値拡散が無く、violent flow下で生じる水塊の合体や分裂などの自由表面をシャープに捉えることができます。一方、MPS法は計算点(粒子)の相互作用によって基礎式が離散化されるので、格子法と比較して粒子間の斥力に起因した圧力擾乱が生じ、これがMPS法の混相乱流計算への適用の妨げになっていました。近年、筆者の所属する研究室の別の研究グループによって、高精度粒子法の開発が精力的に推進され、大幅な圧力擾乱の低減に成功しています。このようなviolent flowに対する高精度流体解析手法の整備を受けて、筆者らは、Lagrange型の流体解析手法(高精度MPS法)とLagrange型の粒子追跡手法(DEM)のカップリングによる数値シミュレーションから、violent flow下での移動床機構の検討に着手し始めています。以下にその例を2つ示します。

山地溪流河床は、しばしば礫集積部(step)とそれに続く土砂の貯留機能を備えたpoolの連なりから成る特徴的な階段状の縦断河床形状を呈し、広い粒度分布の材料から構成されています。さらに、溪流は急勾配かつ流路幅が狭いため流速変動が大きく、特に洪水時の流砂量や粒度分布は大きな変動を伴う複雑な流砂特性を示すことが知られています。図3に階段状河床のstep崩壊過程の一コマを示しますが、流速分布から射流から常流遷移における跳水が確認できます。この種の流れの非線形性は洪水時には一層強まり、step崩壊に強く関係するものと推察しています。

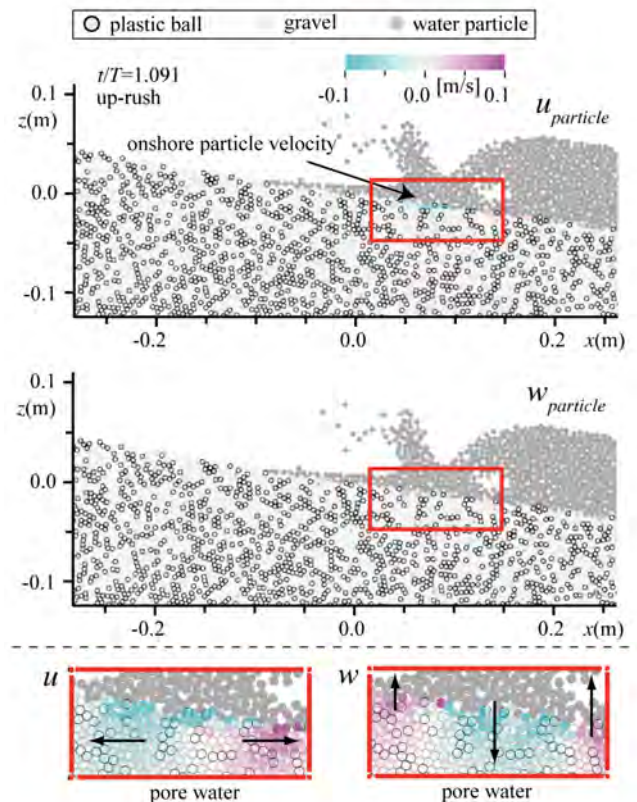


図4 波打ち帯移動床内部の間隙流速分布

波打ち帯では、自由表面には寄せ波と引き波の干渉による碎波が確認され、移動床表層には浸透・滲出流が観察されます。また、ドライベッド上への遡上波の打上げは底面掃流力の急変をもたらします。このように、波打ち帯では複雑かつ多様な境界を形成しますが、時化による汀線変化を精度良く予測するには、上記の境界特性を考慮して得られた流れ場に基づいて岸沖漂砂量を評価することが肝要です。図4は、巻き波の碎波ジェットが移動床に衝突した後のsplash-upをとらえた瞬間画像です。図中の赤線枠中央の移動床内部では、ジェットの衝撃圧による z 軸下向きの浸透流と、その両サイドでは移動床表層に向けた間隙水の滲出流が確認できます。また、粒子の速度分布からは、移動床表層にジェットによる岸向きの掃流粒子が見られます。これらの結果から複雑な移動境界を容易に取り扱える手法としてMPS-DEMの潜在能力を垣間見ることができます。

おわりに

沿岸都市設計学分野・後藤研究室で実施されている数値流砂水理学に関連した最新技術・最新研究の紹介として、粒子流のLESおよびMPS-DEMによる数値シミュレーション例を示しました。ここで紹介した数値シミュレーション手法は、計算機性能の発達とともに、今後の流砂・漂砂力学の進展に大きく貢献するものと考えています。

地盤震動に関する新しい技術とその展望

防災研究所・耐震基礎研究分野・准教授 後藤 浩之

はじめに

地震動の作用によって地盤が振動する現象は古くからよく研究されており、サイト毎に地盤震動特性が異なることを設計に反映させることは、地盤種別に代表されるように実務においても現在広く行われています。特定の地点に着目すれば地盤震動そのものは地震によらず固有である、と解釈されることから、信頼性の高い評価ができるものとして各地の地盤震動特性を統合的に評価する試みも進められています。

地盤震動特性は様々な地盤情報に基づいて評価されますが、N値から換算した評価等、間接的なものも多くあります。一方、直接評価しようとするれば、地震観測を行い、地震記録に基づいて評価することとなるため、対象によっては現実的でない場合もあります。この問題を解決するため、我々のグループではこれまでとは異なるアプローチで地盤震動特性に関連する研究を進めているところです。完成した技術ではないものもありますが、この場を借りて報告します。

Normalized Energy Density

地盤震動特性を1次元波動論によって論じることは、半世紀ほど前には既に確立していました。基盤に入射する地震動（実体波）が表層内の層境界で反射・透過を繰り返すことで、結果として地盤の増幅特性（固有周期等）が表れるというものです。我々のグループは、この単純な1次元波動論において今まで指摘されていなかった保存量があることを見出し、Normalized Energy Density (NED) と名付けました。

NEDは、インピーダンス（密度×速度）と入射波で正規化した上昇波振幅（伝達関数）の周波数平均との積で定義

されます。地表（自由表面）と半無限の基盤とをもつ系において、NEDは地表と基盤との間の層構造に依らず、どの地点においても等しい値となります(図1)。一見、エネルギー保存則のようですが、入射波のエネルギーはその全てが表層に透過しないので、エネルギー保存則では説明できません。なお、2層系の場合にNEDの保存性を証明することは容易ですが、3層系以上の場合の証明は困難です。数値実験の結果から「ほぼ間違いなく」保存されると予想されますので、この予想がいつの日か証明されることが楽しみです。

NEDを利用すれば、平均的にどの程度増幅するのかという値が層のインピーダンスのみで特徴付けられます。すなわち、地盤の層構造が具体的に分からなくとも、地表のインピーダンスのみが分かれば、増幅の程度を評価できます。また、NEDが保存されるのは地盤が非減衰の場合ですので、NEDが減少する程度によって地盤の減衰量を直接推定することもできます。

S波インピーダンス測定法

NEDを利用するため、地盤のインピーダンスを測定する方法論を構築しました。地震工学的に重要となる実体波はS波であるため、ここで対象とするのはS波インピーダンスです。通常、地盤のS波インピーダンスは、個々に測定されたS波速度と密度とを乗じて求めますが、直接測定できるのであれば、測定誤差を軽減する意味でも望ましいと思われま

す。我々のアイデアは、地盤上に置いた剛性の高い円盤を鉛直に加振し、その応答からS波インピーダンスを測定しようとするものです。このような問題は、地盤と構造物の動的相互作用 (SSI) として古くから盛んに研究されてきたものですが、主に地震時の動的な挙動を把握する目的であって、地盤の物性を求めるために利用するという発想は珍しいものです。

数値実験によって検討したところ、円盤が地盤から受ける反力の位相と、円盤の鉛直速度との位相が揃うような周波数に着目すれば、反力と鉛直速度との比がS波インピーダンスに比例することがわかりました(図2)。この比例関係は、興味深いことに地盤の密度やS波速度、ポアソン比によらず一定の比例係数によって表せるため（ただし、ポアソン比の下限はありそうです）、S波インピーダンスを測定値から直接抽出することができます。地盤条件を様々に変化させても、この関係が成り立つことから、地盤構成がわからない場合でも、この理論に基づいて表層のS波インピーダンスを測定できると考えています。

現在は、小型模型による実証実験や、実サイズの測定装置を試作したフィールドでの性能試験を進めています。将来、可搬型の測定装置が開発できれば、任意の地点で地盤を傷つけることなくS波インピーダンスを測定でき、地盤震動特性を容易に評価できるようになるかもしれません。

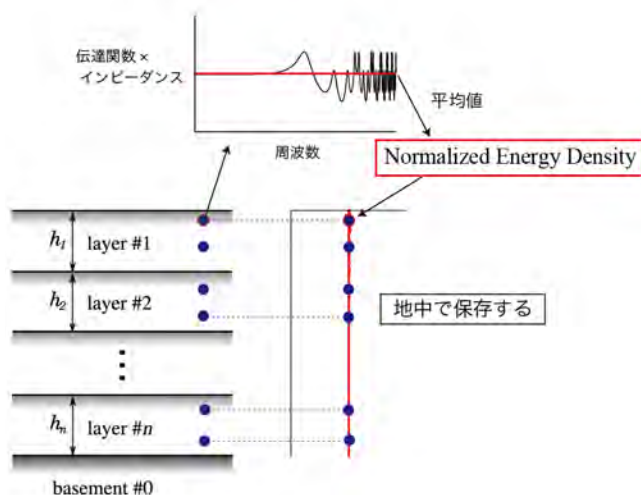


図1 NEDの概念

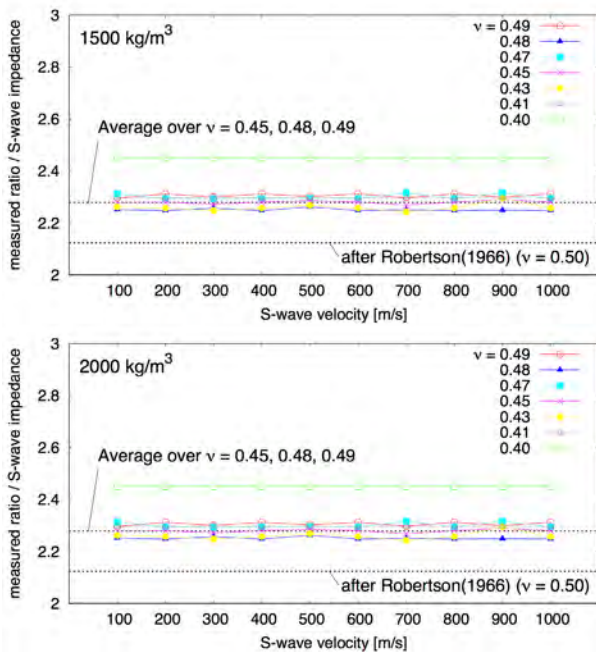


図2 S波インピーダンス測定法の根拠となる、S波インピーダンスと地盤反力/円盤速度との関係

地盤震動に関するその他の技術

地盤震動特性を評価する際に、当該地点の基盤をどの層に設定すべきか悩ましい場合があります。旧来の設計体系では、設計入力地震動に応じて基盤が定義されることが多いですが、実地震記録や予測地震動の利用が進められる中で、基盤の設定が重要となる場面も増えています。実際の地盤震動特性は、3次元的な形状を持つ地震基盤以浅の複雑な構造を全て反映していると考えられますから、単純な1次元の基盤—表層系でモデル化することも難しいかもしれません。

そこで、何らかの情報に基づいて地盤増幅を表す周波数特性が与えられた場合に、これを単純な(仮想的な)1次元基盤—表層モデルの和で表現できないか、と考えました。ある地点の地盤震動特性を、地震基盤面による影響がX割、工学的基盤面による影響がY割、という形で影響度を分離できないか、という発想です。任意の周波数関数を1次元基盤—表層系を表す伝達関数の列によって級数展開できれば良いのですが、この級数展開が存在するか自明ではありませんでした。試行錯誤した結果、ある規則に従った(伝達)関数列であれば、級数展開が存在し、一意に分解できることがわかりました。伝達関数に与えられる制約がやや厳しいため、まだ当初の目的は達成できていませんが、将来的には解決したいと考えています。

さて、地盤震動特性が地点に固有のものである、としてここまで述べてきましたが、本当に固有なのでしょう。地盤震動特性が固有であると、基盤における地震動の空間相関が等方的であれば、地表の空間相関も等方的であることが理論的に導かれます。ところが、ある地域で実施して

いる高密度地震観測の記録を利用して地震動の空間相関を調べると、等方的ではなく「偏り」が表れました。これを説明するためには、表層地盤の伝達関数を確定量ではなく、確率変数としなければなりません。これまでは、距離のある地点間で地盤震動特性の差異を論じることが多かったため顕在化しませんでした。高精密なマップを作成しようと距離の近い地点間で論じようとする場合に問題となる可能性が考えられます。地盤震動特性にばらつきが表れるメカニズムを理解すること、またこれを定量的に把握するための技術は今後進めるべき重要な課題だと考えています。

参考文献

- Goto, H., Sawada, S., and Hirai, T., Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D SH case -Normalized Energy Density-, *Wave Motion*, 48(7), 603-613, 2011.
- Goto, H., Morikawa, H., Inatani, M., Ogura, Y., Tokue, S., Zhang, X.R., Iwasaki, M., Araki, M., Sawada, S., and Zerva, A., Very dense seismic array observations in Furukawa district, Japan, *Seism. Res. Lett.*, 83(5), 765-774, 2012.
- Goto, H., Kawamura, Y., Sawada, S., and Akazawa, T., Direct estimation of near-surface damping based on normalized energy density, *Geophys. J. Int.*, 194(1), 488-498, 2013.
- Goto, H., Series expansion of complex ground amplifications with a sequence of simple transfer functions, *Earth. Eng. Struct. Dyn.*, 43(13), 1975-1997, 2014.
- Goto, H., Tanaka, N., Sawada, S., and Inatani, H., S-wave impedance measurements of the uppermost material in surface ground layers: vertical load excitation on a circular disk, *Soils and Foundations*, in press.

美しく魅力ある公共空間を実現するための発注方式

社会基盤工学・景観設計学分野・准教授 久保田 善 明

はじめに

魅力ある公共空間は、安全、安心、便利、快適、にぎわい、愛着などさまざまな要素から成り立っています。景観はその重要な構成要素のひとつです。景観に関する研究にはさまざまなものがありますが、現実問題として重要なことは、いかにしてより魅力的な公共空間を実現するかということです。そこで特に重要となるのが、公共事業の発注システムの問題です。これは一般土木施設の調達のみならず、土木が生み出す景観に非常に大きな影響力をもっています。以下では、筆者が近年取り組んでいるパブリックセクターにおけるデザインマネジメントに関する研究のうち、より美しく魅力ある公共空間を実現するための発注方式についての取り組みをご紹介します。

品確法とその改正 ～多様な発注方式導入への流れ

まず前提について簡単に触れておきたいと思います。2005年に品確法（公共工事の品質確保の促進に関する法律）が制定され、公共土木の調達に価格以外の要素も考慮することが明確に打ち出されました。この背景には、わが国の公共事業の執行に関わる官民の関係性の歴史が深く関わっていますが、厳しい社会的批判とともに、それまでのビジネスモデルを根本から見直さざるを得なくなり、そのような業界の混乱からくる品質低下を防ぐために制定されたのがこの法律です。

さらにその土木業界の大転換により生じたひずみを是正し、現在と将来のインフラの品質を確保するため、2014年に法律の改正がなされました。改正の重要なポイントのひとつに「多様な入札契約制度の導入・活用」があります。

この10年間、土木界は官民間問わず、非常に大きな痛みを経験してきましたが、このことは結果的に、今後の美しく魅力ある公共空間の実現にとってはプラスの方向に働く大きなポテンシャルも有しています。非公式なやりとりを暗黙の前提としたうえで指名競争入札による価格競争を建て前とすることが盤石だった時代にはなかなか実現できなかったことが、今ようやく実現できる素地が整いつつあるからです。

デザインに競争性を導入することによる切磋琢磨

公共財は単純な市場原理のみを通じては一般に過少供給となるため、行政が主体となって整備や運営のマネジメントを進めていく必要があります。公共空間も立派な公共財ですから、放っておくだけでは美しく魅力ある空間は生まれません。そこにはやはり行政の戦略と行動が必要です。

2003年に国土交通省が制定した『美しい国づくり政策大綱』には、公共事業における“美しさの内部目的化”がうたわれましたが、国土整備におけるこの優れた理念を理念の

レベルにとどめるのではなく、実質的な行動として広く普及させるためには、デザインをただ個々の計画者や設計者自身の哲学や思想、努力に還元すべきような倫理的問題（もちろん、それは大切ですが）としてのみ扱うのではなく、美しさが生まれる仕組みを調達システムの内部に取り込む必要があります。そのひとつの有効な方法として、デザインを競い合うシステムの導入が考えられます。デザインの競争を通じた切磋琢磨は、公共空間の質的改善と土木界全体のデザイン力の向上に大きく貢献するはずで

す。土木分野でも、まだ実績は多くないですが、設計競技（デザインコンペ）によってデザインを選定する先駆的な試みがなされています。図1は、筆者もルールづくりやデザイン審査に関わりましたが、設計競技を通じて選定された、河川沿いの遊歩空間と広場のデザイン事例です。

一方で、デザインの競争といえば、新国立競技場の設計や、オリンピック・パラリンピックのエンブレムの問題などが世間を大いに騒がせています。デザインを競争することにはメリットもありますが、大きなリスクやデメリットもあります。これらのケースは、いずれも設計競技を実施する運営側の詰めの甘さが大きな失敗要因となっていました。土木分野でデザインの競争を行う際には、このような失敗は絶対に避けなければなりません。

そこで今年度より、土木学会の建設マネジメント委員会に「公共デザインへの競争性導入に関する実施ガイドライン研究小委員会（委員長：筆者）」を新たに設置していただき、



図1 設計競技で選定されたデザインの例
（提供：岩瀬諒子設計事務所 [上、左下：完成予想図]，
大阪府都市整備部 [右下：施工状況，2015]）

デザインを競争する上での発注者向けのガイドライン作成を目指して活動を進めています。デザインという定性的なものを評価する際には、ともすれば、不公平で恣意的な審査、不透明な審査プロセス、不十分な結果説明、著作権のあいまいな取り扱い、コストの大幅な上昇など、国民・市民の信頼を損ないかねない要素が入り込んでがちです。しかし、ガイドラインを参考にしながら、これらの要素に前もって対処し、公平性と透明性をしっかり確保したうえで全プロセスを実施すれば、かえって国民・市民の信頼を得やすくなるのではないかと期待しています。また、設計する対象によっては、土木の専門家だけでなく、若手や他分野のデザイナー、一般市民などにも開かれた公募とすることができるとも思われます。人々が土木や公共空間に関心をもつきっかけにもなり得ると思います。もちろん、受注者には良いものをきちんとつくってもらわなければなりませんので、採算性のある価格で発注することも必要です。

プロポーザル方式との違い

デザインのような定性的なものを評価すること自体は、現行のプロポーザル方式でも可能です。ただし、プロポーザル方式では設計する「人」を選定するのに対し、設計競技方式では「デザイン」を選定するところが異なります（デザインを選定した上で、そのデザイン実現のため、その提案者と契約する）。現在は、特に地方自治体が発注する業務において、時折、これらの混同が見受けられます。つまり、プロポーザル方式でありながら、設計競技のように高度で入念なデザイン提案を要求しているケースがあります。受注できるかどうか分からない業務に対してプロポーザル参加者にそこまで求めるのは過剰であるともいえ、社会コストの増大を招いてしまっている可能性があります。

設計競技方式ではデザインを選定し、選定されたデザインにきちんと対価（報奨金）を支払った上で、著作権であるデザイン提案者とその後のプロセスについて契約を結ぶというのが本来の姿であろうと思われます。このような考え方も含め、設計競技の適切な運用のガイドラインをきちんと整備する必要があります。

著作権の帰属先

土木分野でデザインの競争を行う場合、著作権（著作財産権）の問題を改めて考え直す必要があると思われます。公共建築の分野では、設計成果物またはそれを利用して完成した建築物が著作権法で定める著作物（思想または感情を創作的に表現したもの）に該当する場合、著作権は受注者または受注者と発注者の共有に帰属することが基本とされています。一方、土木分野では、著作権を発注者に無償で譲渡することが標準契約約款に書かれています。しかし、優れたデザインを実現するためには、そのデザインを考えた者が、設計段階のみならず、工事完了まで一貫して関与することが非常に重要です。土木分野においては、その一貫性が制度的に保証されていません。設計者の一貫性を確保

するには、一括で発注するか、あるいは随意契約の締結が必要となりますが、随意契約を行う正当性を著作権の帰属に求めるのが最も理に適っているのではないかと考えられます。つまり、デザインを競争する際には、選定されたデザインの提案者（受注者）に著作権を帰属（または受注者と発注者の共有に帰属）させる旨を特記仕様書などに明記することです。これは本来の著作権者は誰であるべきかというそもそも論に加えて、施工時のデザイン監理も含めた連続一貫した契約の保証という意味においても、発注者と受注者の双方にとってメリットがあります。

美しく魅力ある公共空間への投資価値

「美しく魅力ある公共空間」という付加価値の高い整備についても、さまざまなコスト削減の工夫をすることはもちろん可能です。長期的波及効果を考えれば、最初は少々割高に見えても将来的には大きな公共価値のリターンとなることも十分期待できると思います。しかし、最も安価な案に比べれば、初期費用は高くなることが多いでしょう。そのとき、説明責任が問われる行政の事業として、どの程度の追加費用までを妥当と見なせるのかは難しい問題です。

昨年、当研究室にて、京都市民を対象としたアンケート調査を実施しました。世代ごとにランダムに抽出した1,000人の有効なサンプルのうち、実に半数以上の市民が、京都市内の公共事業における景観整備の必要性について「自らは支払い意志をもたない」という結果が得られました。一方、人数では半数をやや下回りますが、支払い意志をもつ人の支払い意志額は比較的高く、公共事業における景観整備への価値認識が市民で二極化している傾向が示唆されました。ちなみに、支払い意志額の集計額は相当な額になりましたので、価値としては十分ありそうだという感触は得られています。今後、さらにデータを蓄積していくとともに、価値評価をどう考えるかという点について、より具体的かつ多角的に検討を進めていく必要があると考えています。

森林生態系内の放射性物質の動態解析に関する研究

都市環境工学・環境リスク工学分野・准教授 島田 洋子

はじめに

環境リスク工学分野は、昭和33年（1958年）に開設された京都大学工学部衛生工学科放射線衛生工学講座としてスタートし、平成8年（1996年）に名前が「環境リスク工学」に変更になり今に至ります。元々の研究室名が「放射線衛生工学」であったことからわかるように、当研究室では、以前から、第二次世界大戦後1945～1980年の間に世界各地で実施された大気圏内核実験によって大気圏に放出された¹³⁷Csや⁹⁰Srなどの放射性核種の地球規模に拡散し放射性降下物（フォールアウト）として地球表面に降下することによる食品や健康のリスク評価を行ってきました。また、有害物質による土壌・地下水汚染のメカニズムを実験とモデルシミュレーションにより解明する研究も継続して行っています。これらの研究成果の積み重ねをベースに、現在、当研究室では、福島第一原発事故による環境リスク評価に関連した様々な研究に取り組んでいます。その中から、本稿では、森林生態系内の放射性物質の動態解析に関する研究を紹介します。

福島原発事故後の森林をめぐる状況

福島第一原子力発電所事故によって大量に放出された¹³⁷Csは物理的半減期が長く（30.167年）、かつ、土壌に強く吸着するため、周辺地域の土壌表層付近に長期的に留まることとなります。今回の事故により放出された¹³⁷Csの約22%が陸地に降下したと推定され、被災地域における森林面積の割合は約7割に上ることから、大量の¹³⁷Csが森林地域に拡散して長期にわたり森林生態系中に滞留することが予想されます。森林地域から生活圏へ流出する放射性物質は非常に少ないと考えられますが、森林生態系内の動植物や林業に大きな影響を及ぼす可能性があります。森林の除染については、環境省・環境回復検討会による『今後の森林除染の在り方に関する当面の整理について』における森林の3つの分類（「エリアA：住居近隣の森林」、「エリアB：作業者等が日常的に立ち入る森林およびキャンプ場などのレクリエーションのための場」、「エリアC：その他の森林」）のうち、現在除染対象となっているのはエリアAとBで、エリアCについては、放射性物質の流失、拡散や森林除染の方法等の知見が現時点で十分ではないことから、今後の調査・研究の結果を踏まえた上で判断することが適当であるとされています。森林地域を除染するにあたって全面的な地表面の削り取りは不可能であるため、出来るだけ狭い範囲で効果的な除染を行う必要があります。汚染地域の住民が帰還し元の生活を営むためにも、森林地域での効果的な除染計画の策定が早急に求められています。そのためには、森林生態系内での放射性物質の動態を把握する必要があります。そこで、本研究では、森林土壌内の放射性Csと

Srの挙動を推測できるモデルの構築を、平成25年（2013年）10月に実施したフィールドでのサンプリング実験および室内でのカラム実験による分析結果をもとに試みました。

フィールドおよびカラム実験

図1に示す装置を、岩手県滝沢村の岩手大学滝沢演習林に設置して森林土壌に安定同位体Cs、Srを添加し、降雨による土壌からの溶出量を測定しました。その結果、Cs、Sr共に初期の溶出が多いことが明らかになりました。これは、土壌中にCs、Srが固定にされる前に浸透してきた初期の急流水の影響が大きいことが考えられます。また、土壌中の鉛直分布と分配係数を測定した結果、土壌中の分布の傾向はCs、Sr共にほぼ同じで、Csの分配係数はほぼ1～1000cm³/gの範囲で表層より深層の方が大きく、Srの分配係数は深度によって変化せず10～100cm³/gの範囲で一定でした。この結果から、安定同位体CsおよびSrの初期の森林土壌中の鉛直方向の浸透は、土壌間隙水の遅い成分である緩流水中の核種の動きにのみ依存していると考えられます。

また、事故初期のCs、Srの挙動を把握するために、安定同位体では測定できない微量の放射性同位体Cs、Srを用いてカラム実験を行いました。その結果、土壌中の放射性Cs、Srの分布傾向はほぼ同じで、また、Srの溶出量がCsの溶出量よりも約2倍多いことがわかりました。つまりSrはCsよりも約2倍の速さで動いており、にもかかわらず土壌中の分布はCs、Sr間で同様であったことから、Cs、Srの溶出には土壌間隙水の速い成分である急流水が、土壌中分布には土壌間隙水の遅い成分である緩流水が、大きく影響している可能性が考えられました。

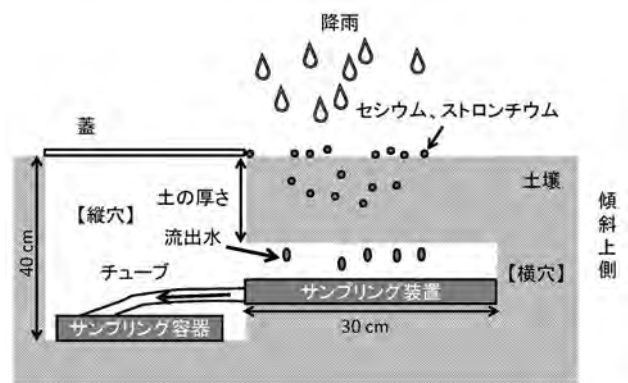


図1 フィールド実験装置

森林土壌中のCs、Srの浸透を評価するモデル

フィールドおよびカラム実験の結果をもとに図2に示すモデルを構築し、土壌中鉛直分布と溶出量を計算した結果、パラメータの変動は大きいもののCs、Srともに土壌中分布、溶出曲線を実測値とほぼ一致させることができました。ここで、安定土壌とはCsやSrが土壌中の粘土鉱物の構造の中

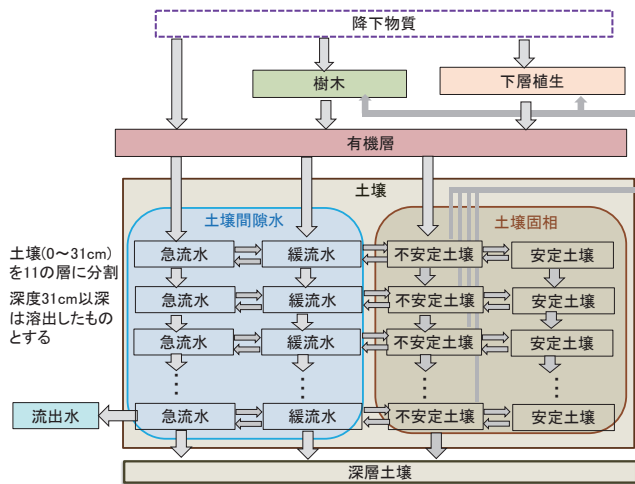


図2 モデルの概要

に入り込んでほとんど動かなくなっている層、不安定土壌とはCsやSrがイオン吸着等で土壤吸着しており、土壤水とは分配係数による平衡関係にあるため、経根吸収、浸出による下部への浸透がある層を表しています。

図3、図4に針葉樹林土壤における安定同位体Cs, Srについて計算した結果を示します。本研究で構築したモデルは、森林土壤中のCs, Srの短期的な移行を表現することが可能であることを示しています。今後、本研究で開発したモデルが数十年単位での長期シミュレーションに使用可能か検証するとともに、土壤特性とパラメータの関係を今後明らかにしていく予定です。

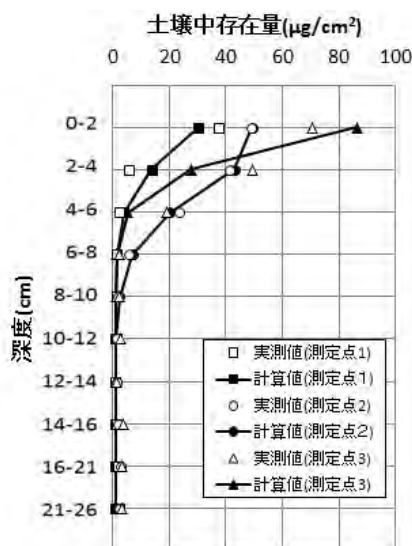


図3 土壤中安定同位体Cs存在量分布の測定値と計算値の比較 (針葉樹林)

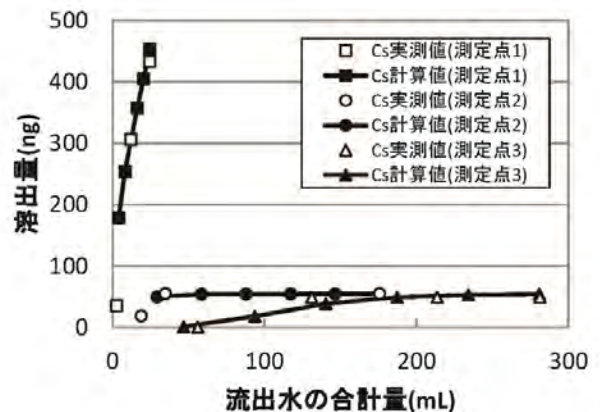


図4 Cs溶出量の測定値と計算値の比較 (針葉樹林)

まとめ

福島第一原子力発電所事故の発生から4年半以上が経過した現在においても、多くの方が避難生活を強いられています。現在、避難している人がかつて住んでいた地域は、帰還困難地域、居住制限区域、避難指示解除準備区域の3区域に分類され、そのうち、避難指示解除準備区域は、年間積算線量20mSv以下となることが確実であると確認された地域であり、住民の一日も早い帰還をめざし、現在、除染やインフラ復旧等の対策が実施されています。国は、空間線量率で推定された年間積算線量が20mSv以下になることが確実であり、インフラ等の住民の生活基盤が概ね復旧し、子どもの生活環境を中心とする除染作業が十分に進捗した後、県、市町村、住民との十分な協議を踏まえて、避難指示を解除するとしています。復旧の調査では、住民が帰還を判断するための情報として、「インフラの復旧時期の目途」に次いで「放射線量の低下の目途、除染成果の状況」が求められていることが報告されています。このような状況を踏まえて、今後、本稿で紹介した研究を発展させて、森林生態系における放射性物質の動態を長期的に将来予測できるモデルを完成させ、このモデルによる評価と費用分析とを組み合わせることで除染効果を総合的に評価する手法を開発する予定です。本研究が、今後の最適な除染計画立案に有用な知見を提供するだけでなく、住民の帰還に際してのリスクコミュニケーションにおいても貢献できることが最終目標です。