

構造物の内部状態を推定できる解析手法を提案

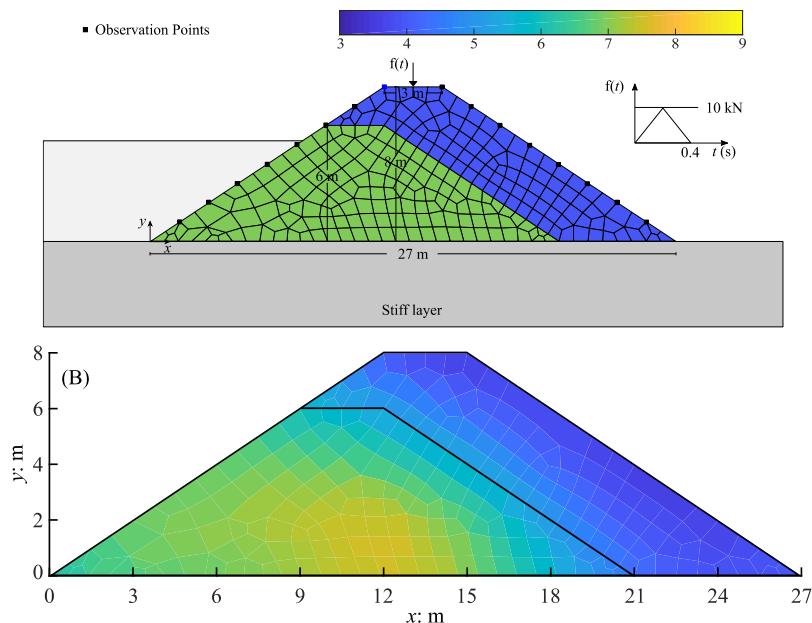
—データ駆動型アルゴリズムにより堤体内部の弾性係数を推定—

概要

京都大学大学院農学研究科 Michael C. Koch 研究員、藤澤和謙 同准教授、村上章 同教授らの研究グループは、アジョイント・ハミルトニアン・モンテカルロ (Adjoint Hamiltonian Monte Carlo) 法と呼ぶ解析手法を提案し、幅広い問題に対して、空間的に分布する物性値を推定することを可能にしました。本手法は、ベイズ推定に基づき、結果から原因を推定する逆問題を解析するものです。本研究グループはまた、その具体的な応用例として、物体を伝わる弾性波をその表面において観測することで、物体内部の弾性係数の空間分布を首尾よく推定できることを示しました。

この問題は、構造物の表面をハンマーで叩いて劣化状態を調べる打音検査、地面の表面を重錘などで打撃することで地中内部の固さや健全性を調査する弾性波探査といった応用に直結します。しかし、空間的に分布する(場所毎に異なる)物性値を推定対象とし、非常に多くの未知数を解く必要が生じるために、従来のモンテカルロ法では解を求めることが困難でした。そこで本提案手法は、ハミルトニアン・モンテカルロ法にアジョイント法を組み込むことで、未知数の数に依存しない効率的な計算を実現しました。構造物の内部や地下に分布する物性値を可視化できる本手法は、社会的要請の高い技術と考えられます。本提案手法が、土木分野のみならず、機械工学分野や地球科学分野など、応用上重要な多くの問題に対して適用されることが期待されます。

本研究成果は、2019年10月23日に国際学術誌「International Journal for Numerical Methods in Engineering」にオンライン掲載されました。



図：本手法によって堤体内部に分布する弾性係数を推定し可視化した

1. 背景

日本政府が推進する防災・減災、国土強靱化を背景として、インフラ施設の安全性を評価することが求められています。そこでは、構造物や地盤の内部状態を非破壊で把握する技術が重要な役割を果たします。このような技術には、基礎的な解析手法として、構造物や地面を伝わる弾性波をその表面で観測することで、地中及び堤体（ダムや堤防の本体部分）内部の弾性係数分布を推定する逆問題が直結します。しかし、観測値から空間的に分布する物性値を推定するこの問題は、推定対象とする未知数が多いため、従来のモンテカルロ (Monte Carlo) 法では解を求めることが困難でした。

2. 研究手法・成果

本研究グループはこの問題に対して、ベイズ推定に基づき、マルコフ連鎖モンテカルロ法の一つであるハミルトニアン・モンテカルロ (Hamiltonian Monte Carlo) 法を応用した手法を提案しました。まず弾性波の伝播を有限要素法によって数値的に解き、その解析結果と観測値との誤差が正規分布に従うことを仮定して、弾性係数の事後確率分布を構成します（この過程がベイズ推定に対応します）。その後、ハミルトニアン・モンテカルロ法によってサンプリングし、得られた事後確率分布に従う実現値を発生させます。この実現値の集合が解となります。ハミルトニアン・モンテカルロ法は、高いサンプリング性能により解を求めることができますが、事後確率分布の導関数を必要とするため、計算負荷の増大が顕在化します。そこで本研究では、アジョイント法を組み込んだ方法（Adjoint Hamiltonian Monte Carlo 法）を提案し、導関数計算にかかる負荷の大幅な削減を実現しました。これにより本提案手法は、未知数の数に依らない効率的な計算を実現し、多くの未知数を推定しなければならない逆問題に適用できます。また、本研究では本手法の具体的な応用例として、物体の表面における弾性波を観測することで、物体内部の弾性係数の空間分布を推定できることを示しました（参考図）。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では堤体内部の弾性波を観測する問題に焦点を当て、その伝播を数値的に解析する手法を提案しました。観測する対象によって、数値的に解く問題が変化しますが、本提案手法は解く問題に制約を受けない方法論です。したがって、応用性に富む手法として、土木分野だけでなく、機械工学分野、地球科学分野への波及効果が期待できます。また、観測から内部状態を推定する手法は、観測情報から未知情報を引き出すことでデータ駆動型社会の実現に貢献するツールとなります。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科研費・基盤研究 (A)「豪雨／地震災害リスク予測・評価による農業水利施設（群）の動的マネジメント」（代表：村上章）の支援を受けて行われました。

<用語解説>

ベイズ推定：観測された事象から原因となった事象を確率的に推定すること

弾性波：弾性体を伝播する波動のことであり、弾性係数の大きさによって伝播速度が異なる

モンテカルロ法：ある確率分布に従う実現値（例えば、乱数）を利用して数値解析を行う方法

マルコフ連鎖モンテカルロ法：乱数の発生にマルコフ過程（現在の乱数の値は一つ前のその値のみに依存する確率過程）を利用した乱数の発生方法

ハミルトニアン・モンテカルロ法：マルコフ連鎖モンテカルロ法の一つであり、乱数の発生機構に運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの関係性と類似した考え方を利用した方法

有限要素法：微分方程式の数値解法の一つ

事後確率分布：観測した事象が起きたとき、その原因となった事象の確率分布

アジョイント法：導関数を効率的に計算するための方法の一つ

<研究者のコメント>

本研究成果は、「目に見えない内部の状態を把握する」という社会的な需要の高い技術に直結するものです。現段階では基礎的な研究成果ではありますが、社会的な需要に応える成果を発信していくことが、研究者の役割だと認識しています。

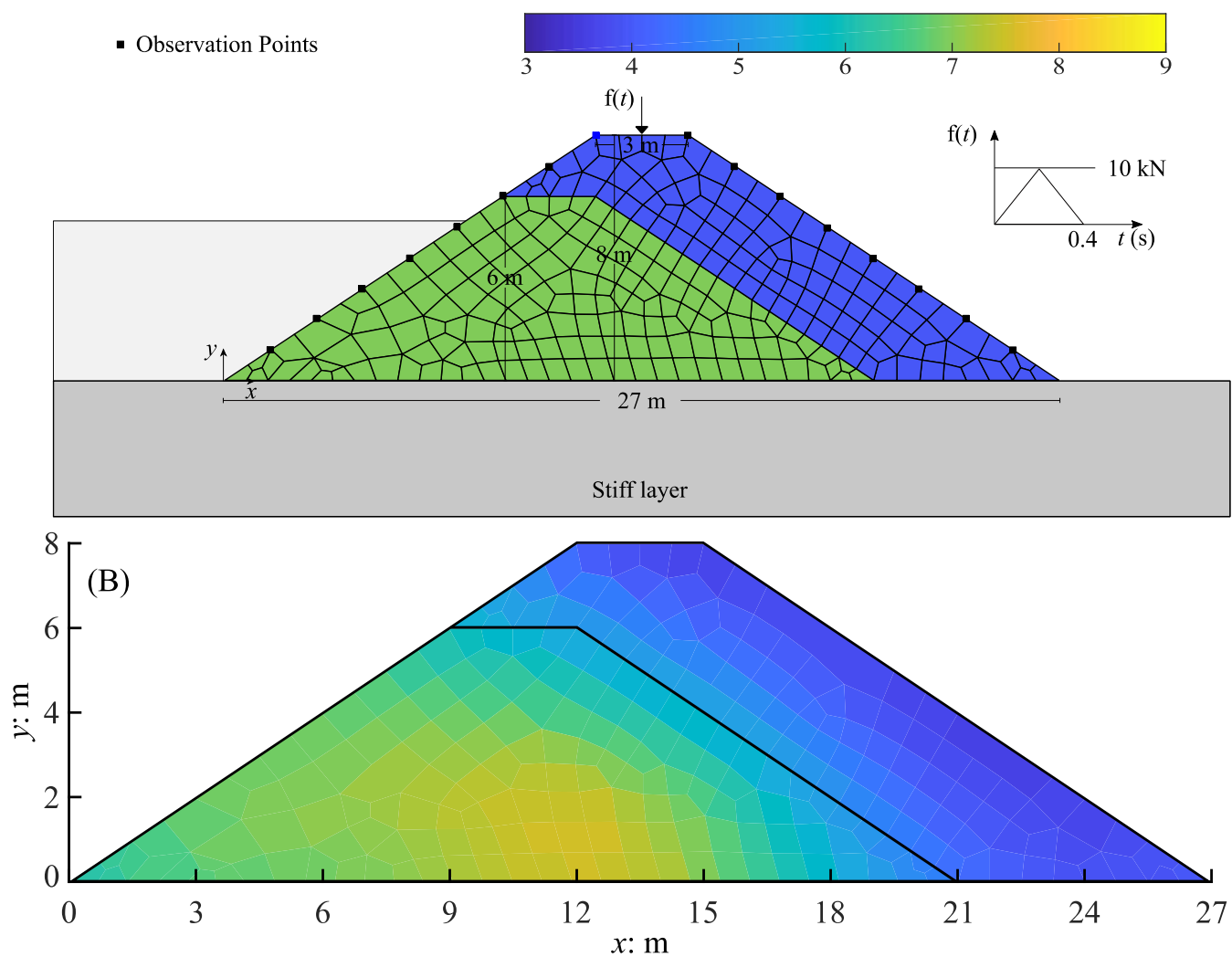
<論文タイトルと著者>

タイトル：Adjoint Hamiltonian Monte Carlo algorithm for the estimation of elastic modulus through the inversion of elastic wave propagation data (弾性波伝播インバージョンを通して弾性係数を予測する Adjoint Hamiltonian Monte Carlo 法)

著者：Michael Koch Conrad, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami

掲載誌：International Journal for Numerical Methods in Engineering DOI : 10.1002/nme.6256

< 参考図 >



図：本手法によって堤体内部に分布する弾性係数を推定し可視化した結果

(A)：弾性係数の異なる堤体の内部構造を示し、その上部に衝撃力 $f(t)$ を与え、表面の観測点（Observation Points）で地表面の変形速度や加速度を計測する様子。図中の Stiff layer は変形を無視できる固い地層を意味する。

(B)：観測データから堤体内部の弾性係数分布を推定した結果を示す。