

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	Koch Michael Conrad
論文題目	Inverse analysis in geomechanical problems using Hamiltonian Monte Carlo (Hamiltonian Monte Carloを用いた地盤力学問題における逆解析)		
(論文内容の要旨)			
<p>ダムやため池など土で構成される農業水利施設の材料物性を同定することによる内部診断は、農業基盤を支える施設の維持管理に必要不可欠であり、農業工学のみならず、土木工学、機械工学、地球科学などの幅広い関連分野においても必要とされる逆解析法である。本論文では、Hamiltonian Monte Carlo (HMC) を発展させ、上記の逆問題に対して有効な解析法を提案する。HMCはマルコフ連鎖モンテカルロ (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) の一種であり、マルコフ連鎖により事後確率分布に従う実現値を数値的に発生させ、サンプリングを行う手法である。従来の方法では、サンプリング機構にランダムウォーク型のアルゴリズムを採用することが一般的である。これらの手法は実装が容易であるものの、非効率的なサンプリングアルゴリズムであるため、求解が困難となる逆問題が数多く存在した。特に未知数が多いなどの理由から、複雑な事後確率分布を有する問題においては、ランダムウォーク型のアルゴリズムが実質的に機能しないことがあった。一方、HMCは非ランダムウォーク型のサンプリングアルゴリズムによって、効率的に高速かつ大域的なサンプリングを可能にした比較的新しい手法である。これにより、従来では求解が困難であった逆問題に対応できる可能性が期待されるが、HMCでは高いサンプリング性能を実現するため、その計算過程において確率分布関数の導関数を必要とする。この点が計算負荷の増大を招くため、実際に直面する逆問題では導関数の計算可能性を改善する必要がある。つまり、HMCを応用するには、計算負荷の削減と確率分布関数の導関数をいかに計算するかが重要なポイントとなる。本論文では、こうした困難を克服する新しいアルゴリズムを提案する。</p> <p>本論文は全7章で構成され、構造物の物性値やその内部構造を同定する逆問題に対して、上述した応用上の問題点を解決する独創的な方法論を展開する。第1章では研究背景と目的を示し、既往研究についてレビューを行い、関連分野における解析法の現況と問題点を指摘した。第2章では、HMCの特徴が整理され、その詳細が述べられる。第3章から第6章にわたり、従来のMCMCでは求解が困難であった問題に対して、HMCを適用した解析方法とその結果が示される。第7章では研究全体の結論と展望が記述される。本論文で示された研究結果の要点は次の通りである。</p> <p>第3章では、構造物内部における弾性係数分布の推定法を提案した。地盤や土構造物の内部に分布する物性値を同定する手法は、施設設計や維持管理を行う上で必要となる。具体的には、弾性波の伝播を観測することで、地盤および堤体内部の弾性係数分布を推定する逆問題を対象とする。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する。この問題における未知数は、全要素の弾性係数となる。HMCを適用するには、この事後確率分布を弾性係数で微分した導関数が必要となる。本章の成果は、この導関数計算にかかる負荷を大幅に低減するため、アジョイント法を組み込んだHMCを提案した点にある。この問題を通じて、提案法が数多くの未知数を推定できることを示しただけでなく、アジョイント法の導入により未知数の数に依らない計算効率を実現した。その適用性は、順解析に利用する離散化方程式の形に制限を</p>			

受けず、以後の章において用いられる基本手法となる。

第4章では、空洞および亀裂の形状推定を行った。弾性波の伝播を観測することで、地中及び構造物の空洞や亀裂の形状を同定する問題を解析する。亀裂箇所の推定技術は、構造物や地盤の内部診断において重要な役割を果たす。これは幾何学形状を推定する逆問題となるが、従来のモンテカルロ法に基づく手法では求解が困難であった。本章では、このような形状推定問題に対してHMCによって精度ある解を求める方法とその結果を提示した。具体的には空洞や亀裂の形状を、長さや幅といった互いに独立な形状パラメータによって記述し、そのパラメータの値を同定する問題へと変換する。形状パラメータの変化によって、弾性波伝播の解析領域が変化する点がこの問題の特徴であり、HMCの適用にあたっては、事後確率分布を形状パラメータについて微分した導関数が必要となる。解析領域の変化に伴って滑らかに有限要素メッシュを変化させる移動メッシュによって導関数計算を実現するとともに、HMCの必要条件でもある可逆なメッシュ更新アルゴリズムを提案した。これにより、HMCに基づく形状推定問題の求解を実現した。

第5章および第6章では、透水係数と浸透領域の同時推定を行った。堤体の透水性とともに、その内部に発生し得る水みち形状を同定する問題を想定し、透水係数と浸透領域の両方を同時に推定する逆問題を解析する。方法論としては、第3章と第4章でそれぞれ提案した物性値と空間形状を推定する方法を組み合わせることで、このような複雑な逆問題も解くことができることを示した。空間に分布する透水係数の統計的性質を記述する分散共分散が浸透領域の形状（大きさ）の関数になる点について、近似的に扱った結果が第5章に、厳密に扱った結果が第6章にまとめられる。この点に対する厳密な取り扱い、計算負荷の著しい増大を招くが、近似的な取り扱いが十分に機能することを示した。また、室内浸透実験を通して、提案手法による解析結果の検証を行い、解析結果は実際現象と良好な一致を示した。

以上のように、本論文はHMCの高いサンプリング性能に着目し、同法を用いて応用上重要となる物性値の空間分布および亀裂の空間形状を同定する逆問題に対する解法を提案する。物性値の空間分布を推定する問題では、未知数の多さが求解を困難にする原因であるが、このような問題に対してアジョイント法を組み込んだ効率的なアルゴリズムを提案した。これまでモンテカルロ法では求解が困難であった空間形状の推定問題においては、移動メッシュと新たに提案するメッシュ更新アルゴリズムをHMCに導入することで求解を可能とした。さらに、浸透問題について物性値と空間形状の同時推定を行い、提案手法の組み合わせが有効であることを示した。また、室内実験から得られた観測データを用いて解析結果を検証し、解析結果は室内実験と良好な一致を示した。本論文で提案された方法論は、材料物性だけでなく形状を推定する幅広い問題に適用が可能であり、広範な応用性が期待できる。また、室内実験を通して、実験的検証が行われた点は、方法論の提案だけでなく、実際現象への適用性を示した重要な成果である。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、応用上重要な逆問題となる材料物性の推定と内部構造の同定に対して、高いサンプリング性能を有するHMCを利用した新しい解析方法を提案する。提案法は、構造物の内部診断や維持管理に必要な不可欠な技術の基礎となる。本文では上記逆問題に対する方法論が展開され、それを用いた解析結果がまとめられる。この研究成果の評価できる点は次の通りである。

1. 数多くの未知数を求める必要のある材料物性の空間分布推定に対して、HMCを利用することで精度ある解を得ることを可能にした。また、HMCに伴う計算負荷の増大を抑える汎用的な方法としてアジョイント法を組み込んだアルゴリズムを提案した。
2. 従来、モンテカルロ法では求解が困難であった空間形状を推定する問題に対し、HMCの特徴を利用した新規な逆解析アルゴリズムを提案した。その中では、HMCに必要な可逆性と事後確率分布の導関数を計算するため、滑らかにメッシュ形状を変化させながら可逆なメッシュ更新を行う独創的なアルゴリズムを考案した。
3. 土中の水の流れを対象とした浸透問題を通じて、物性値と空間形状の両者を同時に推定できる逆解析手法を提案した。その方法論は、上述した2つの方法を組み合わせたものであり、室内実験を実施し、提案法から得られる解析結果が実際現象と良く一致することを示した。

以上のように、本論文はHamiltonian Monte Carloの高いサンプリング性能を利用して、応用上重要な逆問題に対する新しい解析方法を提案する。提案法は特定の問題に限られるものではなく、幅広い逆問題に適用可能な応用性に富む方法である。また、実際現象を再現した室内実験を通じて解析結果が検証された点は、手法の提案だけでなく、実際現象への適用性を示した重要な成果と言える。この成果は、逆解析方法の開発という学術的意義に加え、高い応用性を有するものであり、施設機能工学並びに水利施設の管理・保全技術の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和 2 年 2 月 13 日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第 1 4 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降 (学位授与日から 3 ヶ月以内)