

確率論的災害リスク評価 – サロゲートモデルのカーネル化

九州大学 学生会員 ◦出口 翔大
九州大学 正会員 浅井 光輝
ハイドロ総合技術研究所 植木 裕人
ハイドロ総合技術研究所 竹内 友紀
ハイドロ総合技術研究所 川崎 浩司

1. 目的

2011 年東北地方太平洋沖地震はマグニチュード 9.0 を記録し、同地震により引き起こされた津波は東日本を中心に広域的かつ甚大な被害をもたらした．近年では南海トラフ巨大地震の発生とそれに伴った津波被害が危惧されており、その被害予測が急務の課題である．一般に自然災害は多くの不確実性を有しており、正確な予測を与えることは困難を極める．また、2011 年東北地方太平洋沖地震を受け、昨今の災害被害予測はシナリオ型から確率論ハザード評価へとシフトする傾向にあるが、確率論的な議論を行うためには数値解析を 10,000 回からそれ以上の試行回数に渡り繰り返すことが必要とされる．これは特に解析 1 回当たりの計算コストが高い場合に現実的でなく、実用性が非常に低い．

そこで本研究では、大規模な数値解析を精度よく近似し大量の乱数計算を短時間の内に行うため、サロゲートモデルを導入することで計算コストを大幅に低減させた確率論的リスク評価手法を提案し、その有用性を確認した．特にサロゲートモデルの構築に当たっては、機械学習やパターン認識の分野で広く応用されているカーネル法を導入することで、最終的なリスク評価に至るまでのプロセスのほとんどを自動化した．

2. 提案するリスク評価スキーム

本研究は一般の自然災害に対するリスク評価手法を提言する．著者らが提案するスキームのフローチャートを図 1 に示す．これは、大竹らが液状化地盤上水路の耐震設計¹⁾に提案する信頼設計の枠組みを基礎とする．

2. 1. 対象現象に関するデータ行列の定義

まずは対象となる現象を定め、定量的に評価する目的変数、及び目的変数に強い関連性を持つ基本変数を定義する．自然災害の決定論的予測が困難であること

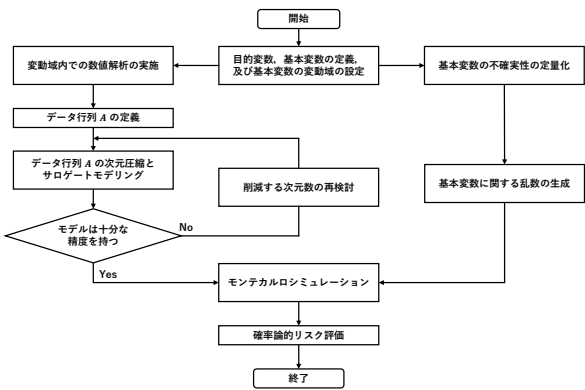


図 1 提案スキームにおけるフローチャート

の主要因は、その本質とも言うべき不確かさにありその全てを定量化することは不可能であるため、事象に対して強い説明力を持つ変量を選択する．次に、現象の物理的特徴などから基本変数の定義域を定め、後に得るサロゲートモデルが保証する入力パラメータのばらつきの範囲を決定する．最後に、定めた変動域の内部で数十ケース程度の数値解析を行い、その計算結果を要素に持つ行列（データ行列 A と呼ぶ）を得る． A は任意の型 $(m \times n)$ 型と階数 r を有することができる．

2. 2. 次元圧縮とサロゲートモデリング

前節に得たデータセットを特異値分解により分解・圧縮し、 A に対する近似行列 A_k を得る．すなわち、

$$A = U \Sigma V^T \approx \sum_i^k \sigma_i u_i v_i^T := A_k \tag{1}$$

ここで U, V はそれぞれ u_i, v_i から為る列空間、行空間に対応する正規直交基底であり、 Σ は A の特異値 σ_i を要素に持つ対角行列、 k は A_k の階数である．このとき $r \geq k$ であり、この操作により $r - k$ の次元を削除する．ここで式(1)において、 m だけの解析ケースと n だけの観測点があるとき、基本変数の変動と計算結果とを関連付ける

のは列ベクトル $\mathbf{u}_i$ である. そのため $\mathbf{u}_i$ を被説明関数として回帰分析を行えば $\mathbf{u}_i$ の応答曲面が得られ, 従って, 以下のように数値解析を代理表現するサロゲートモデル($\hat{\mathbf{A}}$ と書く)を定義することができる.

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{A}} &:= [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_k] \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \sigma_2 & \\ & & \ddots \\ & & & \sigma_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \\ \vdots \\ v_k^T \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^k \sigma_i f_i v_i^T \\ &= [\hat{A}_1 \ \hat{A}_2 \ \cdots \ \hat{A}_n]\end{aligned}\quad (2)$$

ここで, f_i はそれぞれ $\mathbf{u}_i$ に対応する何らかの回帰式であり($i = 1, 2, \dots, k$), その説明変数は上記スキームで初めに設定した基本変数と一致する. 回帰式の定義・選択はこれまで人間に委ねられてきた. これはデータに非線形的な挙動がみられる場合に多項式の次数の決定が困難となることが問題として挙げられる. そこで著者らは, パターン認識の分野で発展したカーネル法の導入した回帰分析を提案する. これは再生性を持つカーネル関数を用いて元データを無限次元の特徴空間(ヒルベルト空間)へと写像し, 特徴空間内で線形モデルを定義する手法であり, ハイパーパラメータの数を大きく減少させる. 本論文では, カーネル法と L^2 ノルムによる正則化を与えるリッジ回帰を組み合わせたカーネルリッジ法を適用する. Lasso 回帰や Elastic-Net 回帰が解のスパース化により過学習を避ける傾向にある一方, サンプルデータに対して高い表現力を持つリッジ法が本研究においては適当であるためである. これにより, 実空間で非線形挙動が存在する場合に従来法(例えば, 小谷ら²⁾の手法)が避けられなかった課題を解消する.

2. 3. モンテカルロシミュレーション

以上までに得られたサロゲートモデルを用い, 基本変数に対して特定の確率密度関数を与え乱数の生成と代入計算を繰り返せば, 対象事象の被害を低計算コストで確率論的に評価することができる.

3. 数値計算への応用例

3. 1. 津波被害評価

南海トラフ巨大地震を対象に, 提案手法を適用する. 数値解析には, 馬場らの JAGURS を用い, 地震の想定シナリオとしては内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会の「断層パラメータ_ケース 03」を採用した. 目的変数として最大波高を, 基本変数としてすべり量, すべり角を選び, 25 の解析ケースと 25 の観測点を定めて

数値解析を行った. その結果として, 図 2 に示すような確率分布を得ることができた. ここで, モンテカルロ法におけるサンプル数は 100,000 である.

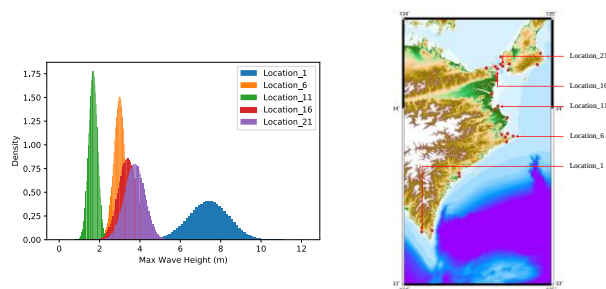


図 2(a) 確率分布

図 2(b) 観測点

3. 2. 都市型水害被害評価

同様に, 過去の水害に対して提案手法を応用する. 1999 年 6 月に福岡市で発生した都市型降雨水害を対象とし, 数値解析には InfoWorks ICM を用いた. 目的変数は最大浸水深, 基本変数は降雨量及び越流量とした. 16 の解析ケースと 19 の観測点を定めて解析を行った結果を図 3 に示す. ここでもサンプル数は 100,000 とした.

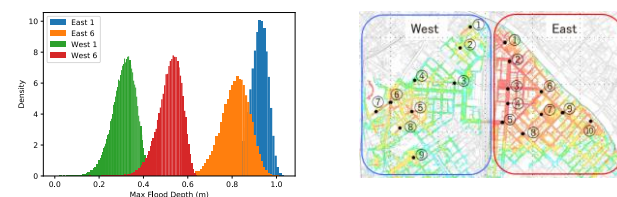


図 3(a) 確率分布

図 3(b) 観測点

4. 結論

自然現象の不確実性を入力パラメータの変動により表現し, サロゲートモデルを構築することで, 低計算コスト・短時間で災害リスク評価を確率論的に与えた. また, 本研究ではカーネル法を導入することで, 従来法では対応しきれなかった非線形問題に取り組むことができるようになった. 今後は, 災害の継続時間や事象の時間発展が被害に与える影響について検討する.

参考文献

- 1) 大竹雄, 本城勇介: 応答曲面を用いた実用的な地盤構造の信頼設計法: 液状化地盤上水路の耐震設計への適用, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 68, No. 1, pp. 68-83, 2012.
- 2) 小谷拓磨, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 福谷陽, 大竹雄, 野島和也, 桜庭雅明: 応答曲面を用いた数値解析援用確率論的津波ハザード評価, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 72, No. 1, pp. 58-69, 2016.