マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)の導入による最適堤防整備計画モデルの改良

岐阜大学　学生会員　○加藤慎也
岐阜大学　正会員　杉浦聡志
岐阜大学　正会員　髙木朗義

1. はじめに

わが国の堤防整備に関する事業評価は，治水経済調査マニュアル[1)]に基づいて行われている．先行研究[2)]では，この評価手法における洪水被害額の算定において「河川水位が計画高水位に達した場合に破堤する」および「上流で氾濫しても下流で河川流量が減少しない」という 2 つの仮定が実現象と乖離しているとの課題認識の下，この課題解決を試みた評価モデルを開発し，仮想流域におけるシミュレーションにて有効性を確認している．本研究では，実際の河川堤防に適用するために，先行研究の評価モデルを改良することを目的とする．具体的には．先行研究の評価モデルにおける洪水被害額の算出過程で氾濫ブロック数が多くなると膨大な計算量となる点に着目し，より効率的な計算アルゴリズムを適用するものである．

2. 先行研究の評価モデル

堤防整備の経済評価は治水経済調査マニュアルを踏襲し，被害額と発生確率の積により求められる氾濫リスクを比較することにより行う．また，上下流の位置関係による流量変化の影響を考慮するために，上流地点での破堤による下流地点の流量低減を破堤シナリオとして記述する．記述した破堤シナリオの全通りに対して浸水深，生起確率等を求めることにより氾濫リスクを算出する．検討範囲流域全体の堤防整備方法を整備戦略と定義する．整備の with-without における氾濫リスク差分を整備便益とし，それを最大とする整備戦略を求める．超過確率別の流量ハイドログラフを求め，記述した整備戦略および破堤シナリオについて全通り算出した上で，超過確率ごとの累計を比較対象とする．**図 1** に先行研究における整備便益の算定プロセスを示す．最適な整備戦略を求めるためには，堤防整備候補の数と整備方法の組み合わせにより膨大な計算量が生じる．これに対して先行研究は，クロスエントロピー法を用いることで効率的な求解を図っている．しかしながら，破堤シナリオは破堤位置，破堤のタイミングの組み合わせについて浸水による被害額，被害の生起確率を算出する必要がある．氾濫ブロックの氾濫流容量についての考慮が必要であり，対象氾濫ブロックにおける堤内地と堤外地の水位差が生じなくなった場合は氾濫計算を終了とする．なお，堤外地の算定については，連続式とマニングの公式よりニュートン・ラフソン法(NR)を用いることによって近似的に導出する．以上より，一つの整備戦略の便益を求解するためにも大きな計算負荷が生じる．

3. 評価モデルの改良

(1)式は，仮想流域内に N 箇所の氾濫箇所が存在する場合に，最適堤防整備戦略を決定する上で，ある整備戦略における氾濫リスクを求めるために行わなければならない計算の回数を表している．

$$H_i^N \times T_i^N \quad (1)$$

ここで，N：氾濫ブロック数，H_i：堤防高さ別による整備パターンの数，T_i：破堤時間帯別による破堤パターンの数を示す．

先行研究では，堤防高さ別による整備パターン(H_i)の組み合わせによる計算においてクロスエントロピー法(CE)を用いることにより時間短縮を行い，計算負荷軽減を可能にした．例として，氾濫ブロック数を 5 ブロック，堤防高さ別による整備パターン数を 3 パターン，破堤時間帯区分を 5 区分（破堤しないパターンを考慮するためH_iは 6 となる）とした時の$3^5 \times 6^5$=243×7,776=1,889,568 回の計算を適用可能範囲とした．氾濫箇所が増えるに従って$H_i^N \times T_i^N$の計算は膨大となり，CE の適用だけでは対応不可能となる．各堤防整備戦略における氾濫リスクを求める過程(例として，先行研究内では6^5による 7,776 通り)においても，時間短縮することができる効率的な求

解法構築が必要となる．

本研究では，マルコフ連鎖モンテカルロ法（Markov Chain Monte Carlo）により，膨大な破堤シナリオの中から生起しやすい破堤シナリオを統計的に推計して効率的に氾濫リスクを求めることを試みる．X 軸を被害額，Y 軸を生起確率とし，初期点を設定して乱数を与えることにより，サンプリング座標を決定し，より効率的な計算回数での分布収束を目指す．

MCMC 法は，事後分布からのサンプリングが不可能な場合に，事後分布からのサンプリングを可能にするために，サンプリングが容易な分布を提案分布と設定し，事後分布と提案分布の違いをつり合い条件が満たされるように修正する操作を利用したアルゴリズムである．

ある 1 つの整備組み合わせにおける期待被害額から，乱数を用いてランダムに破堤シナリオを 1 つ選択し，被害額（x_1）と生起確率（y_1）を求める．次に，直前に求めたx_1とy_1から，それぞれ乱数を用いてランダムに選択した別の破堤シナリオにおける被害額（x_2）と生起確率（y_2）を求め，遷移先候補とする．また，提案分布であるガンマ分布 g(x)と採択棄却法 $f(x_{n+1})$≦c・$f(x_n)$における正の定数 c を決めておく．なお，提案分布 g(x)は可能な限り目標分布 f(x)に近いものを採用する．遷移先候補は提案分布からの乱数を用いて発生させているので，目標分布における確率密度を考慮するために，採択棄却の比較対象は目標分布における確率密度を用いて考察する．c が大きいほど目標分布 $f(x)$の中央にプロットされることとなる．以降，$g(x)$の分布形状と c はすべて同じ値を用いることとする．遷移先候補の c の値が設定した c の値より大きいかについて考察をする．c の値が小さかった場合，遷移先候補を取り消して遷移先候補を選択し直す．c の値が大きかった場合，遷移先に決定し，次はこの遷移した点を基準に遷移先候補点を同様に決めていき，提案分布からの候補を採用しながら，サンプリングを行う．散布図が収束に向かっているのかについても同時に考察をする．収束をしない，又は収束に時間がかかる場合，目標分布 $f(z)$が適さないか，設定しておいた c が小さいことが考えられる．よって，$f(x)$または c を設定し直して，初期点を設定した後の 1 つ目の遷移先候補点を選ぶ段階から

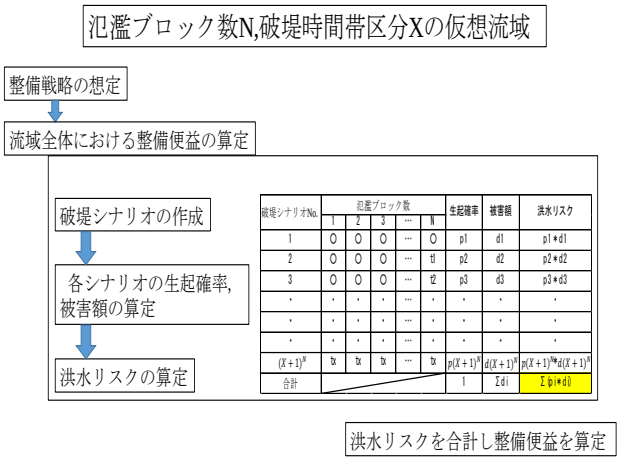

図 1　整備便益の算定プロセス

ら考察し直す．以上のような手順を行うことにより，事後確率密度関数からのサンプリングを行う．散布図が収束している場合，プロットをした最初の 20%を取り除いた上で分布密度からリスクカーブを推計し，期待被害額を計算する．しかし，初期点の位置によって得られる散布図が異なる場合が考えられるため，初期点の位置を変更して同様のフローで計算し，数通りのリスクカーブを考察する．

4. おわりに

今後は MCMC を適用したモデルの検証のため，組み合わせ全通りを算出した場合と比較し，計算の整合性を確認する．また実河川を想定した氾濫ブロック数で適用する．適用した事例については発表時に報告する．

謝辞

本研究は，文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology）」 の支援により実施された．ここに記して，感謝の意を表する．

参考文献

1) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル(案) 2005.
2) 大野峻，杉浦聡志，髙木朗義：破堤確率と上下流の関係を考慮したリスク評価に基づく流域治水計画策定方法，土木学会論文集 D3・特集号，Vol.67, No.5，2016（印刷中）．