

博士論文（要約）

フエ旧市街地における水系感染リスク評価に向けた
氾濫水質解析モデルの開発

永野 雄一

研究背景

東南アジアの多くの都市では、豪雨時に都市の規模に対して十分でない排水システムに起因する浸水が頻発している。ベトナムのフエ旧市街の排水システムは、下水管渠のみでなくフエ旧市街地の中心と周囲を流れる運河、そして点在する多数の池を含んでいるが、これらの運河と池には未処理の家庭汚水が流入しており、著しい糞便汚染が懸念される。浸水時にはこれらの運河と池が水系感染症を引き起こす病原微生物の流出源となり、氾濫水を汚染している可能性が考えられる。

このため、浸水時の水系感染リスクの定量的な評価が必要と考えられるが、浸水発生の日時と場所の予測は難しく、採水調査のみで氾濫水中の糞便汚染指標細菌の挙動を正確に把握することは困難である。氾濫水の採水調査結果を基に住民の感染リスクの評価を行った研究はいくつか存在するが、そのほとんどが数点の採水調査結果に依存したものとなっており、糞便汚染指標細菌の時空間的な分布を十分に考慮できておらず、実際のリスクを適切に評価できていないと考えられる。また、住民の行動パターンは浸水深の時空間分布によって大きく変化するため、糞便汚染指標細菌数のみでなく、浸水深も正確に把握する必要がある。このことから、氾濫水とともに糞便汚染指標細菌数の挙動も解析可能なモデルを作成することは、正確な水系感染リスクの評価に有効であると考えられる。

研究目的

本研究では、ベトナムのフエ旧市街地を研究対象地域として、氾濫水質解析モデルを開発して糞便汚染指標細菌である大腸菌を考慮した浸水解析を行い、行動調査データと組み合わせることで感染リスクの評価を行う手順を提案することを目的とした。糞便汚染指標細菌の管内と地表面での挙動を一体的に解析した例はなく、また行動調査データとモデル解析結果を組み合わせることで感染リスクの評価を行った例も存在しない。下水管渠のみでなく池や運河を含む複雑な排水ネットワークを有するフエ旧市街地における氾濫水質解析モデル開発と感染リスク評価手順は、他の発展途上国の都市にも容易に適用することが出来ると考えられる。

具体的には、下記3点を研究目的とした。

1. **氾濫水質解析モデルの構築**：効率的に必要な入力データを取得し、大腸菌の管内と地表面での挙動を一体的に解析可能な氾濫水質解析モデルを作成すること
2. **フエ旧市街地の水理水質特性の評価**：モデルの計算条件及び検定用データの取得のために、フエ旧市街地における池と運河の水理水質特性を採水調査とセンサによる連続観測を組み合わせることで把握すること
3. **氾濫水質解析モデルを用いた感染リスク評価手順の検討**：行動調査データと、氾濫水質解析モデルを用いて感染リスクの評価を行う手順を検討するとともに、シナリオ解析によってフエ旧市街地において感染リスクに影響を及ぼす因子について考察を行うこと

研究結果

1. 氾濫水質解析モデルの構築

第4章：

フェ旧市街地における氾濫水の水利水質解析にあたって、地表面流れを2次元で、管渠内流れを1次元で解く1D2Dモデルを採用した。地表面における水理解析では構造格子における浅水方程式を、管内における水理解析ではサンブナン式を、それぞれ共に有限差分法によって解く。また、水質解析については地表面でも管渠内でもBox法を用いて行った。標高データはJICA提供のデータに、測量データを追加することによって、軍事基地等を除くフェ旧市街地内全域を対象に解析を行えるようにした。氾濫水質解析モデルによる水利水質解析において、計算期間終了時において系内に存在する全水量及び全物質質量が、計算期間中において降雨量や池の初期水量及び初期水質、汚水量及び汚水水質として入力した累積水量及び累積物質質量と等しくなり、水物質収支が保たれることを確認した。

2. フェ旧市街地の水利水質特性の評価

第5章：

氾濫水の糞便汚染源と考えられる池において降雨前後で採水調査を行った結果、大腸菌数が全池で降雨後の値が降雨前の値を上回り、降雨時に糞便汚染された雨水流出水が池に流入している可能性が示唆された。また、全30サンプル中25サンプルで大腸菌数はベトナムの水質環境基準であるQCVNのB2類型基準値（荷運用など水質の要求水準が低い水域に適用）を超過し、池における顕著な糞便汚染が確認された。また、氾濫水質解析モデルのキャリブレーションデータの取得のために、フェ旧市街地内の10の池に水位センサを設置して連続観測を行った。さらに、降雨後の水位低下が十分に緩やかになった時点における水位を池の接続管渠の接続高さとすることによって、不足している管渠吐口データの補間を行った。

氾濫水についても、採水調査を2012年、2013年、2014年の3回実施し、大腸菌数では全15サンプル中13サンプルがQCVNのB2類型基準値を超過し、顕著な糞便汚染が確認された。また、雨水流出水の採水調査を行った結果、大腸菌数は全9サンプル中7サンプルがQCVNのB2類型基準値を超過し、管渠や池からの溢水がなくとも、顕著に糞便汚染されていることが分かった。糞便汚染源として、フェ旧市街地では、メンテナンスが十分でない腐敗槽等が考えられ、今後これらの設置状況の調査を行うことで、雨水流出水中の糞便汚染の起源を明らかにすることが出来ると考えられる。

運河における採水調査結果より、深刻な糞便汚染が確認されたほか、外周運河よりも中央運河において電気伝導度（EC）とNH₄-Nが有意に高いことが明らかとなり、深刻な水質汚濁が確認された。センサによる連続観測を行った結果、中央運河の中心付近では汚染水塊の存在によってECが高い値で一定のまま推移していることが確認され、中央運河の下流端では満潮時にECが下がり、干潮時にはECが上がることを明らかとなった。

第6章：

中央運河における汚染水塊の挙動を再現するために1次元サンブナン式による水理解析とBox法による水質解析を行うことが可能な運河水質解析モデルを作成した。運河水質解析モデルの構築に必要な運河形状データは現地での測量によって取得し、境界条件に関しては、外周運河とフォン川の境界地点における水位連続観測データを利用した。計算を行うにあたって、境界地点間における水位の差異をより正確に把握する必要があるが、水位差決定に境界地点での連続観測結果におけるEC変動傾向を利用する方法の提案を行った。晴天時においてフォン川のECと比べて、運河内のECは高いために運河から水が流出する際にはECが上昇し、逆の場合はECが低下すると考えられるため、このことを利用して得た推定流向が運河水質解析モデルによって再現されるように境界地点間の水位差を決定した。

また、運河水質解析モデルにおいて、トレーサー物質を中央運河に等間隔で複数の地点から継続して投入して水質解析を行ったところ、中央運河の中心付近でトレーサー濃度が高い状態で保たれること、また中央運河の下流端において満潮時に濃度が下がり、干潮時に上がることが分かった。この傾向は採水調査結果及びECの連続観測結果における晴天時のEC分布及び変動傾向と合致した。また、中央運河の上流端は下流端に比べて、運河幅が顕著に狭くなっており、河川水の流入量が制限されることが汚染水塊形成の原因の一つであると考えられるため、運河水質解析モデルにおいて上流端の幅を下流端の幅と等しくして、トレーサー濃度分布の計算を行った。その結果、上流端が狭窄した状態と比べて、中央運河中心付近における汚染水塊のトレーサー濃度は低くなり、運河の拡幅が水質汚濁の低減策として有効であることが示された。

3. 氾濫水質解析モデルを用いた感染リスク評価手順の検討

第7章：

浸水時における水系感染リスクの評価に向けて大腸菌の管内と地表面での挙動を一体的に解析可能な氾濫水質解析モデルを作成した。モデルの水理解析結果の妥当性の検証のために、10の池における水位連続観測結果と計算結果の比較を行った。管渠データ等のモデル構築データの精度が不十分であったため、実際よりも排水能力を過小評価してしまい、計算結果はほとんどの池で観測結果を大きく上回った。しかし、管渠径を変更して排水能力を上昇させることで、計算水位は観測水位により近くなり、今後より詳細な管渠データの入手によってモデルの計算精度を向上させられることが示唆された。採水調査結果を基に池と汚水の大腸菌数を設定して、降雨条件と運河水位条件を様々に変更して大腸菌挙動の解析を行った。その結果、運河水位が1m上昇すると、運河自体は氾濫していなくても、管渠の排水能力の低下によって浸水範囲、大腸菌分布範囲が大きく拡大することが示唆された。また、過去の住民の行動調査データを用いて、氾濫水への直接暴露での大腸菌摂取による感染リスクを計算し、モデルによる計算結果と行動調査データを組み合わせた感染

リスク計算手順の提案を行った。行動調査では詳細な通勤経路や通勤時間、水遊びをする場所及び時間は調査されておらず、各区域の住民は近傍の氾濫水にのみ暴露するとして計算を行ったが、実際はこれらの情報を考慮することによって、感染リスクは大きく異なることが考えられる。本研究で作成した氾濫水質解析モデルでは任意の場所と時間における大腸菌数を出力できるため、今後スマートフォンなどを利用した行動調査を実施することでより詳細で正確な水系感染リスクの評価が行えるようになると期待される。