

論文の内容の要旨

論文題目 統合的な都市水管理のための
地表・地下・管路網流れ連成モデルの研究

氏 名 蛭原 雅之

昨今、集中豪雨（ゲリラ豪雨）やヒートアイランド現象などの都市問題等を背景に「水循環健全化」の必要性が改めて認識されている。都市域を含む水循環系全体における地域主体の流域づくりや問題解決の糸口を示すものとして平成 15 年に『健全健全な水循環系構築のための計画づくりに向けて』（健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議）が公表され、また、平成 18 年には『第三次環境基本計画』の重点分野政策プログラム(10 分野)の一つとして『環境保全上健全な水循環の確保に向けた取組』が位置づけられた。

また、平成 19 年には『健全な地下水の保全・利用に向けて』（今後の地下水利用のあり方に関する懇談会）により、公水として位置づけられていない地下水についても適正な利用・保全のあり方が示され、更に近年は「水循環基本法」に関する議論が活発化するなど、水循環に関わる様々な議論がなされている。

本研究で対象とする都市域の水循環は「自然的な水の流れ」と「人工的な水の流れ」に分けて捉えられており、観測・調査・解析あるいは事業計画等の行政上の対応についても、自然系と人工系を切り離し、更には行政分野毎に分けて議論されてきた。このため、水制御・水管理に関する数理モデリング技術も、河川・下水道・地下水環境・水循環等の各分野ごと、また検討目的ごとに開発され、数理的検討において分野間の相互作用やトレードオフを十分考慮せずに部分最適の施策が展開されてきた結果、水循環全体としてのバランスの悪化や不整合を招き、近年、統合的な水マネジメントの必要性が指摘されている。

しかし、統合的な水マネジメントが広く理解されつつある一方、具体的な施策や事業への反映を議論するための、「水循環全体を一体的・統合的に解析できる技術」は未整備である。例えば、流域や都市域における水収支を捉えるための水循環モデルは幾つか提案されているが、それらは、「自然系水循環を物理モデル（地表地下水モデル等）として解きつつも人工系の水は境界条件（流出入境界等）」としたり、逆に「人工系水循環を物理モデル（下水管路網モデル等）として解きつつも自然系の水の挙動を境界条件（水位境界等）」とするなど、時間スケールや空間スケールの解像度の異なる自然系流動と人工系流動の相互作用は必ずしも実態通りに考慮されていない。

そこで本研究では、自然系流動と人工系流動の非定常現象を統合的に取り扱い、より合理的な都市の水制御・水管理に資するための数理モデルを開発することを目的として、自然系水循環を構成する地表水・地下水流動と、都市域の人工系水循環を構成する主要要素である管路網流動を、同一の方程式系・離散化格子系で一体的に取り扱う統合モデルの開発を行った。また、開発モデルの妥当性を検証するため、三次元格子化モデルとして離散化した本開発コードの管路網モデルと実務における汎用モデルとの比較計算、人孔蓋密閉箇所の封入空気圧変動の算出機能確認、及び管路網流動と自然系流動との相互作用や実スケール問題への適用に関する検討を行っている。

研究の具体的な内容・成果については以下のようにまとめられる。

- (1) 統合モデルの開発にあたり、既存モデルのレビュー及び実務で用いられる主要モデルの比較を行い、開発モデルに求められるニーズと開発仕様の整理を行った。

本開発モデルは以下の水循環プロセスを統合的に連成して解くことが可能である。

- ・ 地表水及び地下水の流動
- ・ 地盤中の間隙空気の流動

- ・管路網（又は空洞）内の水及び空気の流動
- ・管路網（又は空洞）内外の水及び空気の流出入

また、以下の流動系／媒体を同一モデル内で構築することが可能である。

- ・地表水、地下水流動系／地形・地質構成
- ・管路網流動／人孔・管路の形状・配置等
- ・上記流動系間の相互流動

- (2) 上記プロセスにおける水の挙動を統合的に取り扱うため、①気相圧力、②水相飽和度を解析対象とし、地表水流動及び管路網流動における水深・水深勾配を圧力・圧力勾配に置き換えた形式で開水路運動方程式を導入し、一般化ダルシー式と同形式の陰的差分展開による離散化を行った。
開水路運動方程式の圧力単位系への変換及び導入に当たっては、水深勾配を圧力勾配に反映するための擬似毛管圧力、空間格子（自由水面格子）から周辺地盤格子への流動において非現実的な水の挙動（上部地盤格子への水の吸い上げ）等の不具合を回避するための調整係数の導入等を行っている。
- (3) 統合モデルは、自然系流動を取り扱う「①地表・地下水流動気液 2 相系・3 次元モデル」、人工系流動を取り扱う「②管路網流動・気液 2 相・三次元モデル」、及び②を①に統合できる三次元格子構造モデルに変換するための「③管路網離散化手法」と出力用の「④ポストプログラム」から構成される。
- (4) 特に、管路網離散化手法による管路網情報の三次元格子化は、「地表水・地下水流動モデル」や「水循環モデル」等との統合解析を可能とすることにより、下記の応用分野への適用性を高めるものである。
- ・豪雨時の「下水管路網流れ」「溢水の地表流動、湛水、浸透」「人孔再集水」等を一体的に解析することにより、内水氾濫状況の解析精度を向上させる。
 - ・浸水対策や流出負荷対策として雨水を地下浸透処理する際の実質的効果量の予測精度を高めるとともに、地下水流動や地下水汚染への副次的影響も評価できる。
 - ・浸透由来の下水道不明水や豪雨時の下水道管路網から周辺地盤への流出入について定量的に評価し、要因箇所の逆解析評価、対策や流出汚濁物質の挙動解析を可能とする。
 - ・都市域の水循環システムにおける水収支分析精度を向上させる
- (5) 開発したシミュレーションモデルの「管路網解析」機能の動作確認のため、「汎用ソフトとの比較による管路網三次元化モデルの検証」及び「管路内水位上昇時の人孔内空気圧の算出」を行い、流動状況全体としては妥当な計算結果（水位変化・圧力変化）が得られることを確認した。ただし、流出入境界条件の設定等、実用化に向けて改善すべき点も明らかとなった。
また、「地下空洞内流動解析」機能の検証として、ダルシー式のみによる従来型の浸透流解析計算との数値実験による比較、および室内模型実験結果との比較検討を行った。
- (6) 自然系と人工系の連成計算（カップリング）の動作確認のため「平常時における管路内への地下水浸透（不明水）」及び「豪雨時における管路から周辺地盤への流出入」の試算を行い、管路網流動量・地盤透水性・地下水位等の条件組合せにより流出入水量が変化するなど、異なる流動系を一体モデル上で解析できることを確認した。
- (7) 実スケール問題への適用検討として、「河川堤防内構造物周辺の空洞化問題への適用」及び「豪雨時における管路網及び地表水・地下水流動の一体解析」を行っている。

前者の検討では、河川堤防の樋門下部空洞を数値シミュレーションモデルに考慮することにより、河川水位上昇時に空洞がバイパス管となって河川水が流入する状況、及び遮水対策工により樋門上下流隣接堤防内の浸潤面を上昇させる状況を試算した。

後者においては、豪雨時に人孔から溢水した水の地表流出挙動および下流側人孔における再流入の状況について、地盤の湿潤状況・透水性やその分布に応じた地下浸透流動・地下水流動等を考慮した一体解析を行った。

- (8) 最後に、工学部4号館屋上への降雨を対象に雨水採水・水質試験を行い、都心部における雨水水質に関する基礎調査、及び事前晴天日数に応じた負荷流出累積量の考察を行った。これは、本研究で開発したシミュレーションモデルに、将来的に物質移動解析の機能を付加することを念頭に置き、物質循環を考慮した汚染解析や水利用解析における境界条件設定のための基礎データを取得したものである。

以上により、本研究で開発した地表・地下・管路網流れ連成モデルの基本的機能の妥当性と有用性が示されたと考えられる。対象領域が局所的であれば現段階でも現場への適用が可能であるが、より広域（例えば河川流域規模）あるいは起伏の大きな地域への適用性や管路網モデルの精度向上を図るため、実運用の中で以下の改善を図りたい。

- ・管路網モデルにおける人孔内鉛直流動の定式化、流出入口境界条件の自由度向上
- ・複雑な管路網モデル化への対応、管路網計算結果の空間的な表現など、入出力プログラムの機能向上
- ・一般座標系の導入による格子構造の自由度向上 など

また、今後の展望としては、以下のような問題への適用を目指していきたい。

- ・雨水、地下水、再生水等を量的及び質的に考慮した都市水利用・水制御マネジメント
- ・空洞化問題（特に空洞拡大プロセス等の数理モデル化）への応用
- ・アジア、東北復興等における水インフラ統合管理への寄与