

論文の内容の要旨

論文題目 地圏水・熱循環系の統合モデリングに関する研究

氏 名 稲葉 薫

水の循環系は主に太陽からの日射と地球の重力を駆動力とする、質量としての水の移動とそれに伴うエネルギーの移動現象から成り、地表面領域では降雨雪、表面流出（河川、湖）、地下浸透/流出、蒸発散の各物理現象から構成される。

近年、人間活動の大規模化により地球温暖化が懸念されると同時に、森林などの自然生態系の減少、都市への人口集中・都市域の拡大による雨水の不浸透域の拡大、河川・湖沼の汚濁、地下水位低下、湧水の枯渇、地下水汚染などが顕在化し、さらにヒートアイランドや都市型水害などが発生する状況がある。

このような状況から、都市域から郊外・山間部までの流域総合管理が必要であることが指摘されている。流域総合管理を実施する場合、流域内の自然環境や人間活動、市民の利害を総合的に判断し合意を得ることが重要となるが、流域全体の観測を密に精度良く行うことは不可能であり、人間の経験・知識のみでも全体系の把握は容易ではない。そこで、科学的・工学的観点からは、数理的手法により流域の水・熱循環プロセスを適切にモデル化し、様々な時間・空間スケールにおけるプロセス間の相互作用などを考慮しながら評価する手法の開発が非常に重要になるものと考えられる。

本研究では、このような観点に立ち、物質としての水や溶質の動きを扱う既存の水循環モデルの発展形として、地圏における熱輸送に関わる物理過程を包含した地圏水・熱循環モデルの開発を行った。

本研究の内容は以下のようにまとめられる。

- (1) 地圏水・熱循環モデルには、降雨、降雪による水・熱の入力、地表面熱収支、表面流出および表面流出に伴う熱の移流・拡散、地下流体流動および地下流体流動に伴う熱の移流・拡散、地表および地下水中の溶存物質の移流・拡散、気・液・固相温度の非平衡状態および相間熱交換、積雪および融雪といった様々な物理過程を考慮して行った。
- (2) これらの物理過程を表現するための状態量は、①気圧（地上の気圧／地下の気相圧力）、②水飽和度（地上での水深／は地下水飽和度）、③溶存物質濃度、④積雪深、⑤水温、⑥気温（気温／地下気相温度）、⑦固相温度（雪温度／地下固相温度）である。
- (3) 上記7変数を用い、①水相の物質収支式、②気相の物質収支式、③溶存物質の物質収支式、④雪の物質収支式、⑤水相の熱収支式、⑥気相の熱収支式、⑦雪／地下固相の熱収支式、の7つの方程式を構成し、同時陰的差分法により解くシミュレータを開発した。
- (4) 開発したシミュレータの動作確認および算出値の妥当性を検討するため、種々の数値実験を行い、モデルや計算結果の妥当性の検討を行った。簡単な条件下の理論解と数値解の一致を確認すると共に、フィールド条件を模した簡易次元モデルに、地表面の気象変動や地下に飽和流動・不飽和流動が生じる場合まで多数のケーススタディを行った結果、報告されている観測値や水文学的知見と定量的あるいは定性的に合致する出力が得られ、定式化の適切性が確認された。また、地表熱収支と地下不飽和状態を含むモデルによ

り気・液・固相の温度を分離した効果に関し検討した結果、相間熱交換係数の導入により各相温度が一致する場合から各相が独立した温度を持つ場合まで柔軟に対応できることが示された。

- (5) 地表面における降雨浸透過程を模擬した一次元室内実験を行い計測データを得る共に、シミュレータによる実験値再現性の検討を行った。実験では、一次元鉛直不飽和浸透時の水の流動・熱移動の様子を計測するため、発泡スチロール断熱カラム内に砂、或いは砂と礫を充填し、上部から降雨状に一定温度の注水、および冷水・温水を交互に供給して、試料内部の多数の点の温度変化、および底部流出量経時変化を計測した。計測結果を再現するため、2次元円筒座標系モデルを作成し上下および周辺の境界条件、試料等の水理・熱物性を全て反映させて解析を行ったところ、①透水試験時の累積流出量曲線を良好に再現する水理特性（絶対浸透率、相対浸透率、毛管圧力）が同定可能であり、②多点温度計測値を砂試料、礫混じり砂試料ともに良好な再現が可能であり、③礫混じり砂試料の場合には、相間熱交換係数が砂試料の場合より小さめの値が良い再現性を有すること、が判明した。このことから、本モデルの実験スケールでの定量的な再現性が確認され、温度分離型モデルの有効性も認められた。
- (6) フィールドスケールでの鉛直2次元モデルおよび3次元モデルによる解の妥当性評価、パフォーマンスチェックを行った。その結果、東濃地域を対象とした小断面鉛直2次元モデル、流域スケール鉛直2次元断面モデルの計算結果は、既存観測値と整合的であり、地表から地下の温度分布の季節変動の様子も妥当な結果を得た。また、河川を含む3次元モデルの試行計算では、地表面温度分布や顕熱・潜熱移動量分布なども、一般的知見と整合的な結果が得られることが確認された。

以上から、本研究で開発したモデリング手法は地圏の水・熱循環の全体系を追跡する上で有用な技術となる可能性が示された。今後さらに実用性を高めるためには、様々な実測値との比較を通してモデルの妥当性確認や改良を行う必要があるが、都市熱環境や地中熱利用評価など比較的局所の解析であれば現在でも適用可能と考えられる。

さらに適用性を高めるためには以下の検討事項が考えられる。

- ・ 積雪/融雪過程にかかわる数理モデルの検証を、基礎的な実験およびフィールドデータを用いて行うこと。
- ・ 河川流量変化や河川水温のモニタリング等の観測結果を用いた適用性検討を行い、温度をトレーサーとして地下水理構造を推定する手法の確立に資する。また、溶質循環、土壤汚染、地下水汚染の解明に対し、温度を考慮した解析の有効性を検討すること。
- ・ 大規模フィールドシミュレーションでは計算負荷の低減を図る必要がある。未知量の見直しや並列化など、ソフト面、ハード面での改良を行うこと。