

審査の結果の要旨

論文提出者 稲葉 薫

近年、人間活動に伴うと考えられる地球温暖化の懸念と共に、それにより引き起こされる世界的スケールから生活圏流域スケールの水問題（水資源の不足、水災害の増加、水汚染・水環境の悪化）の深刻化が指摘されている。実際にわが国においても、集中豪雨による洪水氾濫の増大傾向や、夏の高温化、都市域ヒートアイランド現象などが報じられ、その対策が始められている。

このような状況を踏まえ、稲葉氏は地圏（生活圏陸域）における流域を単位とする水管理（ウォーターマネジメント）の重要性を指摘し、流域現象を科学的・工学的観点から評価・予測し行政の対策や市民の判断に供するための先進的数理手法の開発を行っている。

具体的には、物質としての水の動きを追跡する従来型水循環系シミュレーションモデル（河川流出モデルや地下水流動を含んだモデル）の発展形として、太陽輻射・大気環境の変動を含めて物質およびエネルギーの3次元移動現象を追跡する「地圏水・熱循環モデル」の開発がテーマとなっている。これは、温度情報を追跡し利用することで、多様な流域熱環境問題の評価に役立てようとするものである。

論文では、まず地圏における水・熱循環系に起きる現象の包括的な定式化方法が提案されている。筆者のモデルには、①輻射による熱の入力（太陽輻射、長波放射）、②降雨・降雪による水・熱の入力、③地表面での熱収支（長波放射、顕熱・潜熱移動）、④河川流出およびそれに伴う熱の移流・拡散、⑤地下2相流体流動およびそれに伴う熱の移流・拡散、⑥溶存物質の移流・拡散、などが考慮されている。定式化においては、地表上面の植被層を考慮した2層モデルの導入、気・液・固相の熱的非平衡状態を前提とした各相温度分離モデルの導入を行い、状態量として、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）を採用している。これら7変数を用いて、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を構成し、全体を同時に解く新しいシミュレータの開発を行っている。

次に、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が種々の数値実験から検討されている。具体的には、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鉛直一次元モデルに地表面の気象変動や地下に飽和流動・不和流動が生じる場合まで多数の設定を行い、計算結果と既存観測値や水文学的知見とを比較している。その結果、開発したモデルが全てにおいて定量的あるいは定性的に適切な結果を算出でき、また、気・液・固相温度分離モデルが地表及び地下の流れの表現に置いて幅広い適用性を有することを示している。

筆者はさらに室内実験を行い、その結果とシミュレータの再現性の比較を行っている。実験では、鉛直円筒カラムを用い、地表への降雨入力と地下浸透過程を模した冷・温水浸透実験を行い、媒体各点の温度変化、下方流出量の時間変化を計測している。再現計算では、用いた装置の形状や境界条件を忠実に表現する円筒座標系の2次元離散モデルを作成し、砂礫・水・空気・断熱材などの一般的物性値を組み合わせて計算が行われている。その結果、①入力に対応した流出量計測値の経時

変化が良く再現され、②相流動が適切にモデル化されていること、②試料複数点の温度変化計測値の十分良い再現性が得られること、③試料が砂と砂礫の場合に相間熱交換係数が異なり、温度分離モデルが適切な表現性を有すること、が結論されている。

最後に、フィールドスケールの鉛直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、およびパフォーマンスチェックが行われている。水文観測値のある地域における2次元鉛直小断面、および流域スケール断面モデルの計算結果は、既存の観測結果と定性的に整合し、また河川を含む3次元モデルの試行計算でも地表や地下の水分分布、温度分布、熱移動量の分布などに妥当な結果が得られることが確認されている。

以上のように、本研究では水循環システムにおける複雑な水・熱移動の定式化が行われ、開発された統合モデリング手法の適用性が数値実験、室内実験、フィールドスケール計算の各段階で検証されている。既に都市熱環境や地中熱利用評価など比較的局所の解析には適用可能と考えられているが、今後、現象再現性のさらなる確認や計算の高速化などの実用性を高めることにより、流域全体の水管理行政などの先進的評価技術として活用されるものと大いに期待される所である。

以上の内容から、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。