

氏名	よこ お よし ゆき 横 尾 善 之
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成14年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)土木工学専攻
学位論文題目	流域の地理情報を用いた分布型流出モデルと 集中型流出モデルの構築法に関する研究
指導教官	東北大学教授 澤本 正樹
論文審査委員	主査 東北大学教授 澤本 正樹 東北大学教授 真野 明 東北大学助教授 風間 聡

論文内容要旨

本研究は、河川流量データが得られない流域において流出モデルを構築する手法を提案することにより、河川流量データが得られない流域における流量予測および水資源計画を可能とすることを目的とした。まず、数値地図情報から求めた流域の地理的特性と最適化手法を用いて決定したタンクモデル定数の統計的関係を求めた(第2章)。次に、3次元分布型流出モデルを構築し(第3章, 第4章)、地理的特性値とタンクモデル定数の関係についての数値実験を行い、両者の物理的関係を検証した(第5章)。最後に、統計的関係と物理的関係を利用して地理情報に基づくタンクモデル構築法を4種類提案し、各手法の優劣を検討した(第6章)。本論文は、7章構成であり、各章の要旨は以下の通りである。

第1章は序論であり、研究の背景、既往の研究、研究目的を説明した。

本研究の特色は、流量データを用いずに流域の地理情報に基づいて流出モデルを構築する方法を提案しようとする点にある。この方法の有効性が確かめられれば、流量データが入手できない流域において地理情報および降水量のみを用いて河川流量の予測が可能になる。同様の研究は数多くの研究者により行われているが、そのほとんどは流出モデル定数と流域の地理的特性値の統計的関係を調べた結果に基づいており、両者の物理的関係を調べるには至っていない。本研究は流出モデル定数と流域の地理的特性の統計的関係に加えて、物理的関係関係も整理しており、その点において新規性がある。

河川流量の予測に用いる流出モデルの問題点は、降水量と河川流量の実測値が必要不可欠である点にあった。今日まで、河川流量の予測は、まず流出モデルを作成し、次にそのモデル定数を試行錯誤や最適化手法を用いて決定し、モデルを運用させることによって行われてきた。この試行錯誤や最適化手法などの作業において、降水量と河川流量の実測値が不可欠なのである。日本の河川には数多くの流量観測点が設置されているが、ほとんどが平坦地に設置されており河川流量の増減の激しい山間部の流域では流量計は設置されていない。実際に流量計が設置されていても、計器の故障や気象条件などの理由によりデータが欠測になる例が数多くある。国外に目を向けると、経済的理由により流量データの無い流域や政治的理由により入手できない流域は数多く存在する。本研究の成果は、この様な場面に活躍の場がある。また、流出モデルのパラメータを同定するには数年分の流量データを蓄積しなければならないが、本手法によれば数値地図の利用やリモートセンシングによる地理情報の入手期間のみでモデル構築が可能であり、モデル構築に要する時間が大幅に短縮されると期待される。以上のような背景を考慮すると、本研究の実用性と社会的貢献度が高く評価される。

第2章では、流域の地形、土地利用、土壌、表層地質に関する地理的特性と集中型流出モデルの定数との統計的関係を重回帰分析法によって検討し、流域の地理的特性に基づいて集中型流出モデルができることを示した。

対象とした集中型流出モデルは、図1に示す菅原(1972)の直列4段型タンクモデルである。タンクモデルを用いる際の最大の問題であるモデル定数の決定には、最適化手法の一種である基準化パウエル法を採用した。この方法を用いて日本国内の12個のダム流域を対象としてタンクモデルを構築した。

解析対象の12のダム流域の地理的特性は、数値地図情報から数値的に求めた。地形に関する特性として、流域面積および流域代表勾配を用いた。流域代表勾配は、流域界上の最大標高点とダム天端の2点に関する水平距離と標高差の比である。土壌に関する特性として、中野(1976)の「地下流出量涵養に対する貢献度による土壌型の類別」に基づいて土壌型を3つに大別し、それぞれの流域内面積率を算出したものを用いた。表層地質に関しても同様に、中野(1976)の「基底流量涵養に対する貢献度による表層地質の類別」に基づいて表層地質型を3つに大別し、それぞれの流域内面積率を算出したものを用いた。土地利用に関する特性は、数値地図情報内の分類名によって9つに分類し、その面積率を求めたものである。

最適化手法で求めたタンクモデル定数および数値地図情報から求めた流域の地理的特性値の関係について重回帰分析を行い、両者の関係付ける重回帰式を求めた。この重回帰式と数値地図情報を用いて解析対象の12のダム流域および2つの試験流域におけるタンクモデルを構築した結果、流量再現性が高いことが明らかになった。以上より、本研究はこの重回帰式を地理情報に基づくタンクモデル構築法の一つとして提案した。

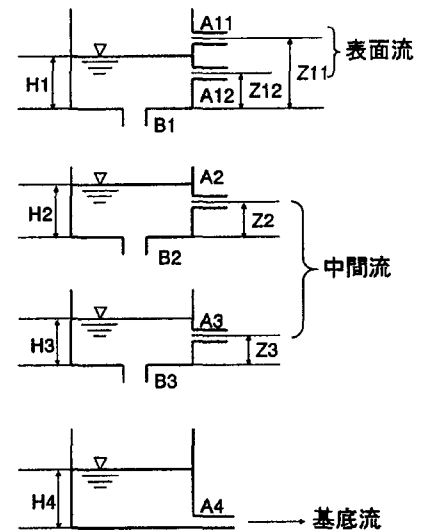


図1 タンクモデル. A, B, Z, H はそれぞれ流出係数, 浸透係数, 流出口高さ, 水深を表すパラメータである。

第3章では、本研究で構築した分布型流出モデルの構成要素モデルである斜面要素モデル(図2)の数値解を求める際の計算安定性および水収支誤差を検討した結果をまとめた。

表面流モデルは連続式と Manning の平均流速公式を、飽和側方流モデルは連続式と Darcy 則を支配方程式とした。両モデルとも1次精度の風上差分を用いて数値的に解いた。安定条件は Courant-Friedrich-Lewy (CFL) 条件で与えられる。

地中流モデルは、Richards 式 (Richards, 1931) を支配方程式とした。鉛直2次元構造を有するこのモデルは解析的に安定条件を得ることはできないことを確認し、数値実験的に安定条件を求める必要性を示した。

計算初期条件として鉛直2次元矩形断面のモデル土壌に静水圧分布を与え、計算開始と同時にモデルを傾斜させた際の数値流出実験を行いその結果に基づいて地中流モデルの計算安定性を議論した。安定・不安定は、流出波形の振動の有無によって判断した。その結果、 x 方向(流下方向)および z 方向(流下方向に垂直な方向)のいずれも、飽和透水係数、時間刻み、空間刻み、ならびに斜面勾配を用いて安定・不安定を調べることができると明らかになった。また、各数値実験の水収支誤差を求めた結果、水収支誤差についても飽和透水係数、時間刻み、空間刻み、ならびに斜面勾配に関係していることが明らかになった。

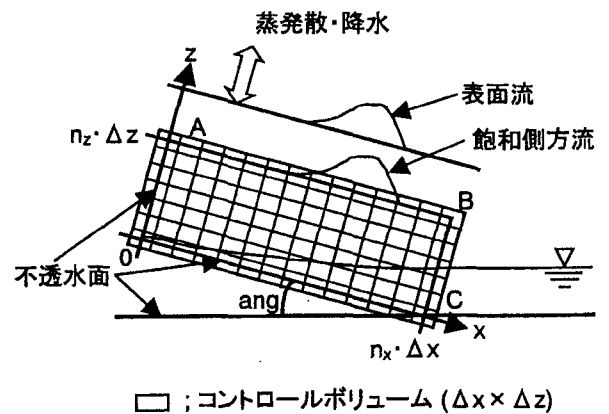


図2 斜面要素モデルの構造。

第4章では、本研究で構築した分布型流出モデルの適用性を茨城県の花貫ダムを対象として検討した結果をまとめた。

分布型流出モデルは、斜面要素モデルと河道モデルで構成した。斜面要素モデルは、図2に示すように、表面流モデル、飽和側方流モデル、地中流モデルの3層構造の鉛直2次元モデルである。この斜面要素モデルを河道モデルの兩岸に配置することにより図3に示すように流域形状を再現した。

構築した分布型流出モデルを花貫ダムに適用することにより、斜面要素モデルにおいて飽和側方流モデルは不可欠であることが理解された。本モデルは、長期流出が卓越する流域では再現性が低くなるが、短期流出が卓越する流域では再現性が高くなる可能性が示された。

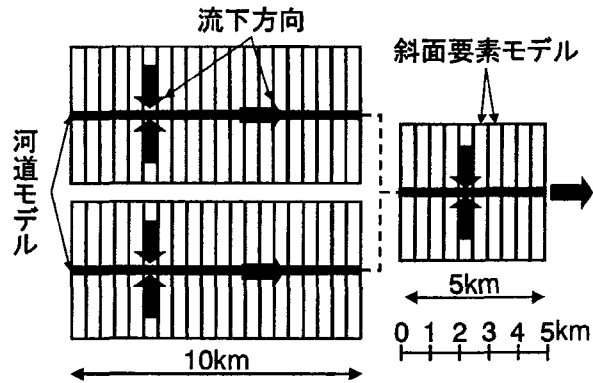


図3 分布型流出モデルの構造。

第5章では、分布型流出モデルのパラメータが流出波形に与える影響および流域の地理的特性と集中型流出モデルの定数との関係を数値実験的に検証した結果をまとめた。

モデルパラメータが流出波形に与える影響は、分布型流出モデルのパラメータを1つだけ変化させた際の流出波形の変化を調べるにより評価した。得られた知見は次のようにまとめられる。

- (1) 斜面長の増加と共に表面流および地中流の流出成分は減少し、飽和側方流成分は増加する。
- (2) ピーク流出高の周辺の減衰部を形成している飽和側方流の減衰率が斜面勾配の増大によって大きくなる。
- (3) Manningの粗度係数が増大するにしたがい、表面流成分が浸透して飽和側方流成分に寄与する。
- (4) 地表面付近の流下方向透水係数が大きいときには飽和側方流成分がピーク流出の周辺に集中し、時間的変動の大きい流出波形を形成する。
- (5) 地表面付近の鉛直方向透水係数の増加と共に表面流が減少し、飽和側方流が増加する。
- (6) 地中流モデルの流下方向透水係数は、小さいときばかりでなく大きいときにも地中流モデルからの流出量を小さくする傾向がある。
- (7) 地中流モデルの鉛直方向透水係数の変化は流出量に影響を与えない。

分布型流出モデルの個々のパラメータが流出波形に与える影響を評価するために行った数値実験の流出波形をタンクモデルで再現し、分布型流出モデルのパラメータとそれを再現するタンクモデルパラメータの相関を調べた。第5章において相関があり、さらに第2章において統計的関係があると判明した。物理的にも統計的にも有意であると考えられる関係をまとめると次のようになった。

- (1) タンクモデル定数 A11 と流域面積は負の相関がある。
- (2) タンクモデル定数 B1 と地表面付近の鉛直方向透水係数は負の相関がある。
- (3) タンクモデル定数 A2 と地表面付近の鉛直方向透水係数は正の相関がある。
- (4) タンクモデル定数 A3 と流域面積は負の相関がある。
- (5) タンクモデル定数 Z11 と地表面粗度係数は正の相関がある。
- (6) タンクモデル定数 Z12 と地表面粗度係数は正の相関がある。

第6章では、流域の地理的特性に基づくタンクモデルの構築法を4種類提案し、その有効性を検討した。第1の方法は、第2章で求めた重回帰式を用いる方法である。その他の方法は、第2章で得た12個の重回帰式の一部を第5章で求めた物理的関係式で置き換えたものである。なお、第2, 3, 4の方法は12個のモデル定数推定式のうちそれぞれ第5章の物理的関係式をそれぞれ10個、3個、6個まで使用している。

タンクモデル構築4法を比較した結果は次のようにまとめられる。

- (1) タンクモデル定数と流域の地理的特性値の統計的關係式に基づいたタンクモデル構築法(構築法①)は、タンクモデル定数 B_2 , Z_{11} , Z_{12} , Z_2 , ならびに Z_3 の推定精度が悪いが流量再現性は高い。よって、流出波形はこれら 5 個のモデル定数に対して敏感ではない。
- (2) 第 2 章で得た統計的關係式に第 5 章で求めた物理的に有意な關係式を最大限の 10 個まで採用した場合(構築法②), 流量再現性が低下した。よって、本手法は物理的有意性を部分的に有するがモデル定数の推定精度が低い手法である。
- (3) 第 2 章で得た統計的關係式の中で特に推定精度の悪かった 3 個の關係式に第 5 章で求めた物理的に有意な關係式を採用した場合(構築法③), 流量再現性は統計的手法と変わらなかった。よって、本構築法は物理的有意性および統計的有意性があると考えられる。
- (4) 第 2 章で得た統計的關係式のうち第 5 章でその式の物理的有意性が示されなかった關係式に、第 5 章で得た別の物理的關係式を採用した場合(構築法④), 流量再現性が低下した。よって、本手法は物理的有意性を部分的に有するがモデル定数の推定精度の低い手法である。
- (5) 4 段目のタンクの計算開始時の水深 H_4 は、400mm にすべきである。
- (6) 本研究で提案した地理情報に基づくタンクモデル構築四法の中では、構築法①あるいは構築法②が有効である可能性が高い。ただし、構築法①は 1000 km^2 以下、構築法②は 100 km^2 以下の流域にその適用範囲が限定される。

第 7 章は結論である。本研究で得られた知見をまとめた。

引用文献

菅原正巳 (1972) : 流出解析法, 共立出版。

角屋陸・永井明博 (1980) : 流出解析手法 (その 12) 一タンクモデルと SP 法による最適同一, 農業土木学会誌, 第 48 巻, 第 12 号, pp.935-943。

中野秀章 (1976) : 森林水文学, 共立出版。

Richards, L.A. (1931): Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums, *Physics*, Vol.1, 318-333.

論文審査結果の要旨

将来の水資源の枯渇が憂慮されているが、多くの国や地域では河川流量の観測は行われておらず、水資源利用計画の立案に大きな障害をもたらしている。既存の流出モデルは、長期の流量データによるパラメータの同定によって構築されるため、流量計が未整備な地域の流出予測は不可能であった。この問題を解決するため、本論文は現在整備されつつある地球数値地図に着目して、標高、土地利用、地質等のデータを用いて流出モデルパラメータの推定手法を開発し、その成果を取りまとめたものであり、7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、統計的手法によって数値地図情報とタンクモデルのパラメータの関係を調べた。12流域において、流量データとの比較からタンクモデルのパラメータを標準化パウエル法によって推定した。その結果、パラメータへの数値地図情報の明確な寄与が確認され、12個のタンクモデルパラメータの推定式が構築された。また、タンクモデルパラメータによって表現される表面流、中間流、基底流成分への数値地図情報の影響を定量的に評価した。これは、降雨流出物理過程を解明する重要な成果である。

第3章から第5章では、第2章で取り扱えなかった流域条件を評価するため、分布型流出モデルを作成し、数値実験によるタンクモデルパラメータの推定式の提案を試みた。第3章では斜面要素モデルを構築し、その問題点の原因究明と解決法を数値実験により考察している。従来、100km²以上の流域では土壌水の不飽和領域の計算は困難とされていた。著者は、この問題について鉛直方向と水平方向の差分スケールについて言及し、より大きな流域についての適切な差分スキームを提案した。これによって、土壌中の水分変動を物理分布型流出モデルに組み込むことに成功した。

第4章では、3章の結果を実流域に適用して、提案された分布型物理モデルの検証を行っている。ここでは、提案された斜面要素モデルの最適な構造と問題点を示した。

第5章は、分布型物理流出モデルによって仮想流域に多様な条件を与えて流出データを求め、タンクモデルのパラメータとの比較を行った。その結果、2章において統計的な結果から推定された手法に対し、物理的な根拠を与えた。また、集中型モデルと分布型モデルの比較によって各タンクモデルパラメータの物理的解釈について、新しい知見を得ている。

第6章では、5章の結果を踏まえて、最適なタンクモデルパラメータの推定手法を提案した。これにより、流量観測の未整備な地域の流出モデルが数値地図によって簡易に構築できることとなり、実用上極めて重要な結果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、流量データの入手困難な地域の流量予測モデルを数値地図から構築することに成功した。本手法により極めて短時間の調査によって途上国や山岳域の流量を知ることが可能になり、水資源計画や災害予測に大きく貢献できるものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。