

学位論文題名

Development of downscaling schemes of coarse climate information to regional-scale hydrologic information and applications to climate change impact projection and real-time flood forecasting

(粗い気候情報を地域スケール水文情報へダウンスケーリングするスキームの開発と地球温暖化影響及び洪水実時間予測への応用)

学位論文内容の要旨

河川の土工施設の根拠となる洪水防御や水供給の計画は、設定した安全度に相当する計画降雨を水文モデルで変換した河川流量を元に決定される。また、土工施設の日々の管理は実時間の流量予測を元に行われる。このように河川流量の予測は河川の計画及び管理にとって最も基礎的で重要な項目と言える。さらに、将来の気候変化は計画の前提である計画降雨を変化させるため、これを計画に反映させる場合には、将来の河川流域スケールでの降雨変化の予測が必要になる。その一手法は、全球の将来気候を予測する全球気候モデル (GCM) による粗い計算メッシュでの降雨量変化予測値を、流域雨量が計算できる程度の細かいメッシュから成る地域スケールの気象モデルでダウンスケールする手法であるが、計画で必要とされる程度の精度で降雨を再現できないなどの欠点を有していた。また、洪水到達時間が短い小流域での洪水流出量の実時間予測には降雨予測が不可欠である一方、気象庁の約 20km メッシュの降雨予測は小流域の洪水流出予測利用には粗すぎる、さらに、現状の降雨予測技術では 1 時間先の予測が限界でありという問題を有している。

本論文は、利用できる気象情報のスケールより小さなスケールでの情報が必要である課題を解決するために、ダウンスケーリング技術を開発し応用した研究成果である。その構成はモデル開発の第一部とその応用の第二部から成る。第一部は、1 計算メッシュ内の地表面パラメタの多様性を考慮できる空間平均化された地表面スキームの開発 (第 2 章) と、これを地域 (河川流域) スケールの気象モデルの最下層に統合し、長期間でも安定的に計算可能な「地域スケール水文気象統合モデル (IRSHAM)」の開発 (第 3 章) から成る。

第二部は、日本モデルによる地球温暖化の降雨等の水文過程への影響予測のため、60km 計算メッシュである外領域の中に 20km 計算メッシュである内領域を入れ子にした日本モデルを構築し、過去の気象の再現による日本モデルの再現性を検証し、400-500km スケールの GCM による大気中の二酸化炭素濃度が倍増した GCM 実験結果をダウンスケーリングした (第 6 章)。さらに、ダウンスケーリング技術を関東北部の塩原ダム流域を含む領域に適用し、気象庁 Grid Point Value (GPV) のダウンスケールを行う気象モデルと別途開発された環境水文モデル (WEHY) との結合による実時間洪水予測を行った (第 7 章)。各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、ダウンスケーリングおよび実時間降雨予測に用いられる技術の概観を述べ、本論文の目的と構成を述べた。

第2章では、まず、1計算メッシュ内で飽和透水係数に応じて地表面から降雨が鉛直浸透し、地表面の土壌が飽和したとき表面流が発生する現象、及び、無降雨時に土中の水分が上方から蒸発し土中水分量が減少するモデル化を行った。飽和透水係数は場所ごとに多様な値をとり、それゆえ計算メッシュ内の土中水分量も様々な値となるが、1計算メッシュ全体を一様な飽和透水係数と仮定し計算する手法、すなわち、地点で成立する式をそのままの式で空間に適用する方法では、土中水分量などは実際にはあり得ない極端な値となってしまう、これが原因で大気と地表面間で非現実的な量の水及び熱フラックスを与える結果となると考えられる。この問題を解決するため、地点で成立する鉛直方向の浸透式である Green-Ampt 式を計算メッシュ内で空間積分した式を導き、飽和透水係数の1計算メッシュ内での確率分布式として対数正規分布を与え、平均化した土中水分量や地表面流量を陽的に計算できるスキームを開発した。

第3章では、地域スケール大気モデルの最下層と先述の地表面水文過程スキームのモデル変数を連立させ同時に変数を解くことにより、大気と地表面間の水分及び熱フラックスの相互依存を忠実にモデル化した。

第4章では、まず、IRSHAM を地球温暖化影響予測のため日本域に適用した方法を説明した。計算領域は 60km 計算メッシュとし(外領域)、その中に 20km 計算メッシュの内領域を入れ子にし、全球気候モデルの出力は外領域の境界条件として与えることで、安定しかつ高速の計算を可能にした。次に、日本域に適用した IRSHAM で過去の気象の再現計算を行い、その再現性を地上観測気象データと比較し、IRSHAM が日々の天候変化をほぼ忠実に再現できる予測精度を有することを示した。さらに、年あるいは月降雨量の地域分布も日本の気候値地域分布とほぼ同じ分布となることを確認した。さらに、日本域に適用した IRSHAM を大気中の CO₂ 濃度現状及び倍増の2種の平衡状態における数値実験を行った気象研究所 GCM-I 出力結果のダウンスケーリングを行い、降雨や地上気温などに与える影響を評価した。その結果、年平均気温はほぼ一律に 2℃程度上昇すること、年降雨量は内領域内全般で減少傾向にあり、山岳地帯の多雨域では降雨量が大幅に減少し、少雨地域が拡大する傾向にあること等が明らかになり、GCM 情報の河川流域スケールへの翻訳が可能になった。

第5章では、気象庁が4次元同化により12時間毎に公開する GPV のダウンスケールによる降雨予測を水文モデルに入力し洪水流量を予測するモデルを構築し、流域面積 123km² の塩原ダム流域に適用した。大気モデルは一般公開している非静力学モデルである MM5 を利用し、その計算メッシュは 6km 四方と 2km 四方の2領域を入れ子にした。水文モデルは流域の地形や土壌などの流域情報のみからモデル構築可能である別途開発された WEHY モデルを適用した。1998 年 8 月洪水の 12 時間先の予測に適用した結果は、豪雨域の発生や移動が計算領域内で再現されたが、地上観測雨量との比較から判断して予測雨量が過小傾向にあったため、これを補正係数で補正し、WEHY モデルに入力させ、流量ハイドログラフを予測した。12 時間という長時間の洪水予測の可能性を示すことができた。

第6章は本論文の総括である。

このように、地表面パラメタの多様性を考慮できる空間平均化された地表面水面過程スキームの開発により、相互依存する大気最下層部と地表面の水及び熱フラックスの現実的な計算が可能になり、長期間でも安定的かつ高速に計算可能な「地域スケール水文気象統合モデル」の開発に成功した。洪水防御及び水利用に関する計画のための地球温暖化影響予測を安定してダウンスケールする

ことができるようになり、また、現状では実用的には 1 時間程度先までしか予測できない実時間洪水予測を 12 時間程度先まで延長できる可能性を示した。これらの成果は、河川流域での水の計画と管理を高度化する基礎となりうる技術であり、今後の検証と改良が必要であるものの実用性が高いものと言える。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 船 水 尚 行

副 査 教 授 高 橋 正 宏

副 査 教 授 清 水 康 行

学 位 論 文 題 名

Development of downscaling schemes of coarse climate information to regional-scale hydrologic information and applications to climate change impact projection and real-time flood forecasting

(粗い気候情報を地域スケール水文情報へダウンスケーリングするスキームの開発と地球温暖化影響及び洪水実時間予測への応用)

河川の水工施設の根拠となる洪水防御や水供給の計画は、設定した安全度に相当する計画降雨を水文モデルで変換した河川流量を元に決定される。また、水工施設の日々の管理は実時間の流量予測を元に行われる。このように河川流量の予測は河川の計画及び管理にとって最も基礎的で重要な項目と言える。さらに、将来の気候変化は計画の前提である計画降雨を変化させるため、これを計画に反映させる場合には、将来の河川流域スケールでの降雨変化の予測が必要になる。その手法、全球の将来気候を予測する全球気候モデル (GCM) による粗い計算メッシュでの降雨量変化予測値を、流域雨量が計算できる程度の細かいメッシュから成る地域スケールの気象モデルでダウンスケールする手法であるが、計画で必要とされる程度の精度で降雨を再現できないなどの欠点を有していた。また、洪水到達時間が短い小流域での洪水流出量の実時間予測には降雨予測が不可欠である一方、気象庁の約 20km メッシュの降雨予測は小流域の洪水流出予測利用には粗すぎる、さらに、現状の降雨予測技術では 1 時間先の予測が限界でありという問題を有している。

本論文は、利用できる気象情報のスケールより小さなスケールでの情報が必要である課題を解決するために、ダウンスケーリング技術を開発し応用した研究成果である。その構成はモデル開発の第一部とその応用の第二部から成る。第一部は、1 計算メッシュ内の地表面パラメタの多様性を考慮できる空間平均化された地表面スキームの開発 (第 2 章) と、これを地域 (河川流域) スケールの気象モデルの最下層に統合し、長期間でも安定的に計算可能な「地域スケール水文気象統合モデル (IRSHAM)」の開発 (第 3 章) から成る。

第二部は、日本モデルによる地球温暖化の降雨等の水文過程への影響予測のため、60km 計算メッシュである外領域の中に 20km 計算メッシュである内領域を入れ子にした日本モデルを構築し、過去の気象の再現による日本モデルの再現性を検証し、400-500km スケールの GCM による大気中の二酸化炭素濃度が倍増した GCM 実験結果をダウンスケーリングした (第 6 章)。さらに、ダウンスケーリング技術を関東北部の塩原ダム流域を含む領域に適用し、気象庁 Grid Point Value (GPV) のダウンスケールを行う気象モデルと別途開発された環境水文モデル (WEHY) との結合に

よる実時間洪水予測を行った(第7章)。各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、ダウンスケーリングおよび実時間降雨予測に用いられる技術の概観を述べ、本論文の目的と構成を述べた。

第2章では、まず、1計算メッシュ内で飽和透水係数に応じて地表面から降雨が鉛直浸透し、地表面の土壌が飽和したとき表面流が発生する現象、及び、無降雨時に土中の水分が上方から蒸発し土中水分量が減少するモデル化を行った。飽和透水係数は場所ごとに多様な値をとり、それゆえ計算メッシュ内の土中水分量も様々な値となるが、1計算メッシュ全体を一様な飽和透水係数と仮定し計算する手法、すなわち、地点で成立する式をそのままの式で空間に適用する方法では、土中水分量などは実際にはあり得ない極端な値となってしまう、これが原因で大気と地表面間で非現実的な量の水及び熱フラックスを与える結果となると考えられる。この問題を解決するため、地点で成立する鉛直方向の浸透式である Green-Ampt 式を計算メッシュ内で空間積分した式を導き、飽和透水係数の1計算メッシュ内での確率分布式として対数正規分布を与え、平均化した土中水分量や地表面流量を陽的に計算できるスキームを開発した。

第3章では、地域スケール大気モデルの最下層と先述の地表面水文過程スキームのモデル変数を連立させ同時に変数を解くことにより、大気と地表面間の水分及び熱フラックスの相互依存を忠実にモデル化した。

第4章では、まず、IRSHAM を地球温暖化影響予測のため日本域に適用した方法を説明した。計算領域は 60km 計算メッシュとし(外領域)、その中に 20km 計算メッシュの内領域を入れ子にし、全球気候モデルの出力は外領域の境界条件として与えることで、安定しかつ高速の計算を可能にした。次に、日本域に適用した IRSHAM で過去の気象の再現計算を行い、その再現性を地上観測気象データと比較し、IRSHAM が日々の天候変化をほぼ忠実に再現できる予測精度を有することを示した。さらに、年あるいは月降雨量の地域分布も日本の気候値地域分布とほぼ同じ分布となることを確認した。さらに、日本域に適用した IRSHAM を大気中の CO₂ 濃度現状及び倍増の2種の平衡状態における数値実験を行った気象研究所 GCM-I 出力結果のダウンスケーリングを行い、降雨や地上気温などに与える影響を評価した。その結果、年平均気温はほぼ一律に 2℃程度上昇すること、年降雨量は内領域内全般で減少傾向にあり、山岳地帯の多雨域では降雨量が大幅に減少し、少雨地域が拡大する傾向にあること等が明らかになり、GCM 情報の河川流域スケールへの翻訳が可能になった。

第5章では、気象庁が4次元同化により12時間毎に公開する GPV のダウンスケールによる降雨予測を水文モデルに入力し洪水流量を予測するモデルを構築し、流域面積 123km² の塩原ダム流域に適用した。大気モデルは一般公開している非静力学モデルである MM5 を利用し、その計算メッシュは 6km 四方と 2km 四方の2領域を入れ子にした。水文モデルは流域の地形や土壌などの流域情報のみからモデル構築可能である別途開発された WEHY モデルを適用した。1998 年 8 月洪水の 12 時間先の予測に適用した結果は、豪雨域の発生や移動が計算領域内で再現されたが、地上観測雨量との比較から判断して予測雨量が過小傾向にあったため、これを補正係数で補正し、WEHY モデルに入力させ、流量ハイドログラフを予測した。12 時間という長時間の洪水予測の可能性を示すことができた。

第6章は本論文の総括である。

これを要するに、著者はダウンスケーリング手法として、計算メッシュ内のパラメタの空間的多様性を考慮できる空間平均化手法と、これを河川流域スケールの気象モデルとの統合法を開発し、長期間、安定的に計算可能な方法へと結実させた。また、本技術をダム流域に適用し、気象モデルと環境水文モデルとの結合による実時間洪水予測を可能とした。これらの成果は、河川流域での水の計画と管理を高度化する基礎となりうるものであり、水資源工学、河川工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。