

論文内容の要旨

論文題目 全球主要河川の極値流量長期変動に関する研究

Global analysis on long term variations of extreme river discharge

氏名 平林 由希子

UNESCO の定義によれば、水文学とは地球上の水の分布・循環構造を明らかにし、かつそれと人間活動との関連をも明確にする科学的分野とされている。水文学の一分野である水文・水資源工学では人間活動に強く影響を及ぼす渇水や洪水などの原因を解明し、予測し、それらによる人間活動への被害を軽減することを第一の目的としてきた。特にこれまでの水文・水資源工学では、降水量や河川流量などの観測値から対象地域における確率統計的な長期的性質(例えば洪水の再帰確率など)を求め、それらをダム計画などの人間活動に役立ててきた。数十年に一度といった確率で生じる大規模な渇水や洪水を算定するためには、対象とする再現期間と同程度の長期間の観測データが必要である。しかし、得られる観測値の長さが不十分な所においてもともかく洪水などの再帰確率流量を求めなければならないという必要上の理由から、求める再帰期間よりもごく短い期間の観測データが極値水文学の統計的性質を推定するために用いられてきた。ところが渇水や洪水の直接の原因となる降水は数年周期のエルニーニョやそれ以上の時間スケールで振動(変動)する気候と共に変動する物理量であるため、観測データの期間が短い場合にはその期間が変動周期のどこに位置するかによって得られる極値の再帰確率が変わってしまう。さらに将来的には地球温暖化の可能性が高いと指摘されており、将来の気候変化によってこれまでに蓄積したデータの統計的性質が将来には適用することができなくなる可能性がある。

そこで考えられる手法として、気候モデルによって物理的に求められる現在及び将来の気候変動の予測結果を入力値として陸面の水熱収支を解く陸面モデル(LSM)と河川モデルを駆動し、それらのモデルから算出される長期間の水文学量から大規模な渇水及び洪水の極値変動を求めることが挙げられる。しかし、温暖化実験などに用いられる数値気候モデルは近年目覚ましい発展をとげてきてはいるもののその精度や誤差はモデルにより、また対象とする領域によってまちまちである。それらを入力値として得られる河川流量の誤差も大きい。一方、気候モデルの出力値のかわりに LSM に与えられるような過去の長期の大気外力はグローバルには月降水量と月平均気温くらいしか無いため、現在の LSM と河川モデルが過去に実際に生じた数十年に一度の渇水や洪水を適切に再現できるかということを示した研究がなかった。

そこで本論文では、将来の渇水・洪水予測の信頼性を示すためにはまずは過去の大規模な渇水・洪水を再現できることを示すことが重要であるという観点から、気候モデルと同じ数

百 km のマクロスケールにおいて検知できる流域面積が 1 万 km² 以上の世界の主要河川を対象とし、温暖化実験などに用いられる現在の LSM と河川モデルの枠組みで数十年に一度生じるような大規模かつ深刻な渇水・洪水がどの程度再現できるのかを明示することを目的とする。

これに対する本論文における成果は以下である。

まず研究の第一段階として、気候モデルの地表面下部境界条件を与えることを目的として開発されてきた既存の LSM の陸域水循環、特に流出過程に着目した検討を行った。その結果以下のことが判明した。

(i) TOPMODEL をマクロスケールに適用するためには、室内実験で求められた土壌の飽和透水係数を地表面から 2m 深さの compacted value と見なし、その値から TOPMODEL の式を逆算して求めた地表面近くの飽和透水係数を用いれば、現実的な地下水流出量が再現できる。TOPMODEL の減衰係数は 3.0 [1/m] 程度がグローバルに適用できる値である。

(ii) 土壌最下層の定義が 4m と深いと地下に貯留できる水の量が多くなるため、タイやアマゾンのように本来土壌の乾燥度が蒸発散を制限するような場所でも蒸発散に制限がかからずに過大な蒸発散とそれに伴う河川流出の減少が生じる。また、土壌が深いと雨季の初めの流出の始まりが遅くなる。これに対し最下層深さを地表面から 2m にしたところ蒸発散の抑制が効き、他の LSM の結果に近づいた。

(iii) 小河川流域を対象とした検証実験では、改良したモデルが元のモデルに比べて日単位の流量のピークや地下水量の変動を比較的良く再現できるようになったことが確認された。

(iv) モデルで表現できる流域面積が 1 万 km² 以上の河川を対象として、改良した LSM による過去の大規模な渇水・洪水の再現を行うことを試みた結果、モデルの河川流量の定量的な誤差は大きく、他の LSM と同程度の再現精度であることが判明した。年水収支では元の降水量の誤差もあり多くの流域で過小評価であった。

これらの結果をふまえ、ピーク期間のずれや定量的な問題は残るにしろ改良した LSM と河川モデルでは降水に伴う流出の増減は再現できていると判断し、これらを用いた過去の極値流量シミュレーションを行った。

数十年に一度生じるような再帰確率の低い極値流量を再現するためには、まず過去の数十年以上の大気外力が必要となる。そこで LSM で算出される河川流出量がどの大気外力に大きく影響を受けているかを調べるために、月平均値や異なる年の大気外力を LSM に与えた感度実験を行い、LSM から算定される河川流出量の変化を調べた。その結果以下が判明した。

1. LSM により算定される流出量の算定結果にはモデルに与える降水強度の頻度分布と降水日数が特に大きく影響を与える。
2. この影響は植物の遮断蒸発過程が原因であるため、植生の葉面積指数(LAI)がある程

度(2以上)大きい場所で降水データに対する河川流出量の感度が大きい。また、植物が遮断できる最大量は2mmであり雨季の降水日数が約10数日の地点が多いことから、月降水量が100mm前後の場所で最も感度が高い。月降水量がそれ以上でもそれ以下でも感度が下がる。

3. そのように降水の頻度分布に対するモデルの感度が高い地域においても、月降水量からガンマ分布法を使って作成した日降水量をLSMに与えて算出される蒸発や流出量などの水収支は、降水量の観測値をLSMに与えた時の水収支とほぼ同じになる。

4. 降水以外の大気外力のうち、地表気圧及び気温に対するLSMの水収支への影響はあまり大きくなかった。比湿と放射については年50mm程度の流出の変化がみられた。風速は月平均を与えた場合と6時間値を与えた場合の年流出量の差は熱帯域などで約300mmとなるなどLSMの水収支への影響が大きかったが、異なる年の6時間値を与えた場合との差はあまり小さくなく、年流出量は風速の平均値よりも標準偏差に大きく影響を受けていることが判明した。つまり風速データがない場合に他の年の風速データを用いたとしても、LSMで算定される流出量の変化はあまり大きくない。

これらの結果は、過去に月降水量しか得られない場合でも、ガンマ分布法を用いることによってその場所の統計的な河川流量の特徴を算出することができる可能性を示唆している。

以上の知見をもとに、全球範囲で利用可能なデータセットとして存在する月平均降水量と月降水日数、月平均の最大気温・最小気温のみから、統計手法と経験式を用いて過去百年分の大気外力データを作成することを試みた。まず、月降水量をガンマ分布法で日降水量に分解し、1次マルコフ連鎖モデルを用いて月内に配置した。次に、統計的に大気外力を作成するStochastic Weather Generatorを構築し、月平均の最大気温、最小気温、日降水量と、既存のデータセットから抽出した気象データの統計的性質を組み合わせることによって日単位の最大気温、最小気温、下向き短波放射を作成した。次に日平均の最大気温と最小気温から、緯度情報と三角関数を用いて3時間単位の気温を求めた。さらに放射量と水蒸気圧の関係などいくつかの経験式や統計手法を用いることによって、過去百年間(1901-2000)の月降水量と月平均の最大・最小気温のデータセットのみから過去百年の降水量、気温、下向き短波放射、下向き長波放射、地表気圧、比湿などの大気外力データセットを全球1度格子で作成した。さらに過去百年の耕作地面積率のデータを用いて、現在の土地利用分類を基礎として耕作地面積のみが過去に向かって減少する百年間の土地利用データを作成した。

最後にこれらを用いた過去百年の全球河川流量シミュレーションを行って渇水と洪水の指標を作成し、流量観測値から求めた渇水・洪水及び過去の災害データとの比較を行った。その結果以下が示された。

- (i) 現在の LSM と河川モデルの枠組みで現実の大規模な渇水や洪水の分布がグローバルに再現できることが確認された。しかし観測値とモデルの百年洪水の流量の誤差は大きいため、定量的な極値シミュレーションのためには LSM と河川モデルのさらなる改良が必要である。
- (ii) 30 年洪水の過去のトレンド解析では、南北アメリカと東ヨーロッパで増加トレンド、アフリカでは減少トレンドが示された。また中国では降水量が増加トレンドであるにもかかわらず洪水は減少トレンドであった。

このような過去の現実の渇水・洪水と全球を対象とした LSM の結果とを対応付けて示した研究は世界でもこれまでになく、河川流量の平均や極値流量の比較のみならず、現実の渇水・洪水との比較から LSM の検証を行う新たな手法が本論文によって提示された。

結論として、本論文により温暖化実験に使われるような現在のマクロ陸面モデルでは過去に対応した渇水や洪水が再現できることが示されるとともに、将来の水資源計画に陸面モデルを用いることの有用性が示された。