

学位論文題名

Evaluation of demand-supply relation of water in
agriculture under changing climate using
continental-scale water cycle model

(広域水循環モデルを使用した変動する気候条件下における
農業水需給関係の評価)

学位論文内容の要旨

近年、地球温暖化の進行とともに、変動する気候条件下における水資源量の評価、とりわけ農業用水の需給関係評価に対する関心が高まっている。現在、利用可能な水資源の約 70%が農業に利用されており、また農作物の約 40%は灌漑により栽培されている。そのため、過剰灌漑による地下水位の低下や河川の断流が各地で発生しており、作物生産や人間生活に深刻な影響をもたらしている地域もある。水資源については、気候変化によりその量と分布が変化し、需要量はさらに増大すると予測されるため、農業への水利用が逼迫する可能性がある。しかし、農業における広域的な水需給関係はまだ正確に評価されておらず、その現在と将来の評価が重要な課題になっている。このような問題に対処するためには、グローバルスケールの水循環モデルを利用したアプローチが効果的であるが、その有効な手法はまだ確立されていない。

そこで本研究では、農業の水需給を広域的にかつより正確に評価することを目的に、農業における水利用過程を考慮した流域ベース型の「流域流出サブモデル」と「河道流下サブモデル」を考案し、それらを組み合わせて大陸スケールの水循環モデルを構築した。またそのモデルを使用して、ユーラシア大陸東部における農業水需給関係の時空間分布を明らかにし、評価した。

1. モデルの概要と使用したデータ

一般に、広域を対象とした水循環モデルには、領域を格子で区切るグリッドベース型と、流域境界で区切る流域ベース型の 2 種類に大別される。気候モデルとの結合を前提とした例ではグリッドベース型が主流であるが、水循環は本来地形に依存するため、水循環過程の再現を重視する場合は流域ベース型が望ましい。そのため、本研究では流域ベース型を採用した。本モデルは、小流域内の鉛直方向の水移動を計算する「流域流出サブモデル」と、流域間の水平方向の水移動を計算する「河道流下サブモデル」の 2 つにより構成される。農耕地での作物の水利用と、そのための河道からの取水という一連の農耕地水利用の過程が、このモデルの中に組み込まれている。これにより、広域での水循環とその過程での農耕地水利用の相互作用の再現が可能になる。

モデルのフレームワークを構成する流域境界および河道網データは、USGS-HYDRO1K より入手した。モデルへの入力値となる日別気象データ、植生指数データ、土壌データは、オリジナルのグリッド形式から流域単位 of データセットとして再構築した。気象データは、流域流出モデル検証用の ISLSCP-I データ(1987-1988)と、農業水需給関係のシミュレーション用の CRU-TS2.0 データ(1901-2000)の 2 種類を整備して使用した。

2. 流域流出サブモデルの構築と検証

流域流出サブモデルは、HYDRO-1K の小流域に基づき土地利用毎の鉛直方向の水収支を計算するモデルである。すなわち降水量を入力として、蒸発散量、流出量、貯留変化量を日単位で計算する。地表面は、積雪層、植生層、土壌層(6層)、地下水層で構成され、各層間あるいは層内の水移動は物理的プロセスにより計算される。蒸発散量は、FAO の蒸発散係数と植生指数(NDVI)を組み合わせた新しい手法で計算した。その際、植物の蒸散量は、水循環プロセスの中で作物生産に直接関わる水として明確にするため、地表面からの蒸発量と区別して産出した。

モデルの検証は、出力値である流出量を既存のモデルの計算値および河川流量実測値と比較して行った。既存のモデルの計算値は、GSWP-I で実施された11の陸面過程モデルの結果を使用した。本モデルは上記モデルと同一条件で計算し、1987 年をスピニングアップ期間として 1988 年の計算値と比較した。その結果、本モデルの再現性は十分優れていることが判明し、水循環を適切に表現できることが確認された。また、流域ベースで計算していることにより、グリッドベース型と比較して各流量観測地点の集水域をより正確に定義できることも確認できた。

3. 作物水分不足量 CWD の定義とその広域推定結果の検討

作物の生育に必要な水分量のうち、自然降水だけでは不足する量を作物水分不足量 CWD (Crop Water Deficit)とし、2種類の CWD を新たな指標として定義した。ひとつは、可能蒸散量と実蒸散量の差を水分不足量とした CWDt(Theoretical Crop Water Deficit)で、もうひとつは、圃場容水量を基準に土壌水分から計算した水分不足量 CWDp(Practical Crop Water Deficit: CWDp)である。これらは、流域流出サブモデルの中で算出される。なおここで定義した CWD は作物生育に使用される水分のみを考慮しているため、水損失量等を考慮した従来の指標(灌漑用水量など)よりも、より理論的な水需要量を表している。

1901 年から 2000 年までモデルを実行し、年間および月別の CWDt の空間分布特性を調べた結果、乾燥地、半乾燥地である中央アジア、パキスタン、インド西部、中国華北等で高い値が算出された。また流域内の流出量合計値(RO)を供給可能な水資源量として、CWDtの RO に対する比を水需給関係の指標として算出し、その分布を調べた結果、上記の一部の地域でこの比が 1 を越え、流域全体の水資源を全て使用しても CWD を満たすことが出来ないことが判明した。

理論的な指標である CWD を実測値との比較で検証するのは困難であるため、既往の研究結果や統計資料との比較により CWD による水需要量の評価の妥当性を検証した。その結果、本モデルで計算した CWD はこれらと矛盾せず、水需要量を適切に評価していることが確認された。

4. 河道流下サブモデルと大陸スケールの水循環

河道流下サブモデルは、既存のモデルを参照して構築し、流域流出サブモデルと結合した。この結合モデルを、CRU データを入力値として、河川から取水を行う場合と行わない場合の 2 つの条件で実行した。その結果、CWD の河川流量への影響は、季節により特定の地域で非常に大きくなることが判明した。また、河川流量の供給のみでは水不足になる地域があることが明らかになった。さらに、農耕地を(1)降水のみで水需要が充足、(2)取水することで供給が充足、取水しても不足、の 3 地域に分類した。(2)、(3)の地域は、中国華北やインド西部からパキスタン、中央アジアに分布しており、流量の比較的多い河川に沿った一部の地域では河川からの取水により充足が可能であることが判明した。また、中国において(2)、(3)に分類された地域の集計を、既存の統計資料による干害を受けた面積と比較した結果、年々変動がほぼ一致し、本手法により、渇水による作物生産への影響が適切に評価できることが示唆された。

以上より、本モデルにより、ユーラシア大陸東部の作物生育における水需給関係の時空間的特性が定量的に評価することができた。また本モデルは、将来予測される気候変化に対しても適用可能で、農業水需給関係の予測と評価に大きく貢献できると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 浦 野 慎 一
副 査 教 授 長 澤 徹 明
副 査 教 授 長 谷 川 周 一
副 査 教 授 平 野 高 司

学 位 論 文 題 名

Evaluation of demand-supply relation of water in agriculture under changing climate using continental-scale water cycle model

(広域水循環モデルを使用した変動する気候条件下における
農業水需給関係の評価)

本論文は6章からなり、図43、表4、引用文献85を含む129頁の英文論文で、他に参考論文4編が添えられている。

近年、水資源の需要量が増大するなかで、地球温暖化の進行とともに、変動する気候条件下における農業用水の需給関係評価に対する関心が高まっている。しかし、農業における広域的な水需給関係はまだ正確に評価されておらず、現在と将来の評価が重要な課題になっている。このような問題に対処するためには、グローバルスケールの水循環モデルを利用したアプローチが効果的であるが、その有効な手法はまだ確立されていない。本研究では、農業の水需給を広域的にかつ正確に評価することを目的に、農業における水利用過程を考慮した流域ベース型の「流域流出サブモデル」と「河道流下サブモデル」を考案し、それらを組み合わせて大陸スケールの水循環モデルを構築した。またそのモデルを使用して、ユーラシア大陸東部における農業水需給関係の時空間的分布を明らかにし、評価した。

1. モデルの概要と使用したデータ

気候モデルと結合した水循環モデルは、グリッドベース型が主流であるが、本研究では水循環過程の再現を重視した流域ベース型を採用した。本モデルは「流域流出サブモデル」と「河道流下サブモデル」の2つで構成され、農地での作物の水利用と河道からの取水という一連の水利用過程をモデルに組み込んだ。これにより、広域での水循環とその過程での農地水利用の相互作用の再現が可能になる。流域界および河道網データは、USGS-HYDRO1Kより入手し、気

象、植生、土壌等のデータは、ISLSCP-I データ(1987-1988)と CRU-TS2.0 データ(1901-2000)を流域単位のデータセットに再構築して使用した。

2. 流域流出サブモデルの構築と検証

流域流出サブモデルは、降水量を入力して土地利用毎の蒸発散量、流出量等を計算し、小流域の水収支を計算するモデルである。地表面は積雪層、植生層、土壌層(6 層)、地下水層に区分され、各層間の水移動を物理的プロセスにより計算した。蒸発散量は、FAO の蒸発散係数と植生指数 (NDVI) を組み合わせた新しい手法を開発し、作物の蒸散量と地表面からの蒸発量を区別して計算した。モデルの検証は、流出量を既存の 11 のモデルの計算値および河川流量実測値と比較して行った。その結果、本モデルの再現性は十分優れており、水循環を流域ベースで適切に表現できることが確認された。

3. 作物水分不足量 CWD の定義とその広域分布

灌漑要水量などより理論的な水需要量を求めるため、作物の生育において降水量だけでは不足する水分量を作物水分不足量 CWD (Crop Water Deficit) とし、可能蒸散量と実蒸散量の差である CWDt (Theoretical Crop Water Deficit) と圃場容水量と土壌水分量の差である CWDp (Practical Crop Water Deficit) の二つの CWD を定義した。これらは、流域流出サブモデルの中で算出される。1901 年から 2000 年までモデルを実行し、ユーラシア大陸東部の CWDt の空間分布特性を調べた結果、中央アジア、パキスタン、インド西部、中国華北等で高い値が算出された。また流出量合計値 (RO) を水資源量として、CWDt の RO に対する比を水需給関係の指標として評価した結果、上記の一部の地域で水資源を全て使用しても CWDt を満たすことが出来ないことがわかった。CWD による水需要量の評価の妥当性を既往の研究結果等との比較により検証した結果、本モデルの CWD は水需要量を適切に評価していることが確認された。

4. 河道流下サブモデルと大陸スケールの水循環

河道流下サブモデルは、既存のモデルを参照して構築し、流域流出サブモデルと結合した。この結合モデルを、CRU-TS2.0 データを入力値として、河川から取水を行う場合と行わない場合の 2 つの条件で実行した結果、中央アジア、パキスタン、インド西部、中国華北等の地域では、CWD に対して河川からの取水のみでは水不足になることがわかった。この結果を中国における干害面積の統計資料と比較した結果、年々変動がほぼ一致することが確認され、本手法により、渇水による作物生産への影響が適切に評価できることが示唆された。

以上のように本研究は、広域水循環モデルを構築し、ユーラシア大陸東部の作物生育における水需給関係の時空間的特性を評価したものである。また本モデルは、将来予測される気候変化に対しても適用可能で、その成果は学術上、応用上高く評価される。よって審査員一同は、石郷岡康史が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があると認めた。