

# 流域水循環特性の定量化—阿武隈川流域の事例—

福島大学 共生システム理工学類 准教授 木内 豪

## 1. はじめに

流域の水循環は、気候・地質・地形・植生が変動・変化しながら永年にわたって営まれてきた自然の現象である。人間は水をため、利用するために自然の水循環を直接変え、また、土地利用の改変、汚濁物質の排出、人為起源の気候変化などによる影響を及ぼしてきている。

自然の変動や人為要因がもたらす流域環境の変化に対して、水循環システムがどのように応答し、治水・利水・水環境・生態系にどのような影響を及ぼすのかについて、データや理論に基づき総合的な理解を深めることは水管理上の重要事項である。本稿では過去の長期的水文・気象データ分析や将来予測解析によって水循環特性を定量化する手法について、阿武隈川流域をケーススタディに紹介する。

## 2. 阿武隈川流域の概要

阿武隈川流域（面積約5,400km<sup>2</sup>、図1）は福島県中通り地方から宮城県南部に至る地域の都市活動や地

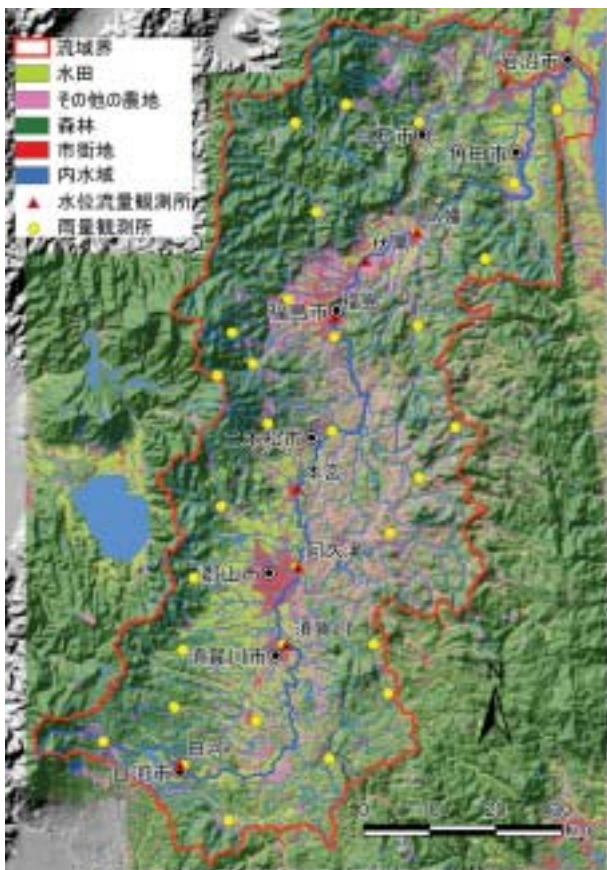


図1 阿武隈川流域の概要  
(地形、土地利用、河川、気象・水文観測地点)

域文化、自然環境の基盤を為し、流域内には約140万人が居住している。本流域の西側は奥羽山脈が南北に走っており地形が急峻で、地質は火山噴出物からなるため、支川が多量の土砂を流出して山麓地帯に扇状地を形成し、洪積層、沖積層が発達している。また、阿武隈川本川の東側は花崗岩質の阿武隈山地丘陵からなり、比較的緩勾配の支川が本川に流れ込んでいる。奥羽山脈と阿武隈山地にはさまれるように阿武隈川本川沿いに平野があり、様々な都市基盤と水田・畑地等が広がる。

流域の土地利用は森林56%、水田16%、畑14%、建物用地・幹線交通用地7%、荒地・内水地・その他6%、ゴルフ場1%（いずれも国土数値情報1994年から算出した値）となっている。流域の平均降水量はおおよそ1,100~1,500mmと比較的少ないため、中流域平野部の灌漑農業は猪苗代湖からの取水（安積疏水）等によって支えられている。1998年の大洪水により甚大な被害が生じたため平成の大改修と呼ばれる河川整備が行われたが、2002年にも大きな洪水が発生し、浸水被害を生じている。他方、1994年、1997年等には渇水により様々な被害が生じた。また、本川沿いには郡山市、福島市、白河市、須賀川市、二本松市などの都市が連続的に位置するため、本川は汚濁物質を集めながら流下することとなり、BODを指標にした水質が東北で最も悪い一級河川のひとつである。

## 3. 流域水収支の定量化

流域規模の水循環特性を把握する基本的な枠組みとして水収支法がある。これにより、流域の環境変化が水収支にどの程度の影響を及ぼすかの概略を把握できる。水収支法では流域に対して水収支式(1)をあてはめる。

$$P + I = ET + R + D + \Delta S \quad (1)$$

ここに、 $P$ ：降水量、 $I$ ：流域外からの流入量、 $ET$ ：蒸発散量、 $R$ ：河川流出高、 $D$ ：地下水涵養量、 $\Delta S$ ：貯留量変化である。 $D$ は量的に小さく、長期の水収支を考えるとときには $\Delta S$ を無視できる。自然流域では $I=0$ とおけることから、 $P$ と $R$ の実測値を用いて実蒸発散量の推定が行われる。土地利用が単一でなく、人間活動の影響も加わる一級河川流域

の実蒸発散量推定にあたっては、降雨や蒸発の空間分布についても考慮が必要となる。

阿武隈川流域の水収支算定には (2) 式を用いる。

$$P + I = ET + R \quad (2)$$

実蒸発散量 $ET$ 以外は実測値に基づき推定できる。降水量 $P$ は地上観測値を用いて算出できるが、ここでは山地域における降水の標高依存性を考慮し、流域平均降水量を求める。一部地域の農業用水・上水用に猪苗代湖と羽鳥湖から取水を行っていることから、流域外からの流入 $I$ にはこれらの取水量データを用いる。 $R$ には流域内の水位流量観測地点での観測結果を用いる。20地点以上で降水量の地上観測データが整っている1989年以降を対象に分析を行う。

図2に $R$ と $ET$ の経年変化を示す ( $ET$ は (2) 式より逆算)。図示しないが、流入量 $I$ は福島観測所上流集水域平均で年間60mm程度である。 $ET$ は福島水位流量観測所より上流集水域の平均的実蒸発散量と解釈される。 $ET$ は我が国の森林流域の蒸発散量(500mm~700mm)よりもやや少なめで、分析対象期間では減少傾向にあり、一次式で近似すると15年間でおよそ80mm程度減少している (図3)。一方、標高補正を行ったAMeDASの地上気温データを用いて500m×500mメッシュ毎にHamon式から算出される可能蒸発散量の集水域平均値は若干上昇傾向にある (図3) ことから、流域の土地利用変化 (農地・市街地の拡大) や森林の老齢化あるいは各種推定誤差の影響が原因として考えられる。

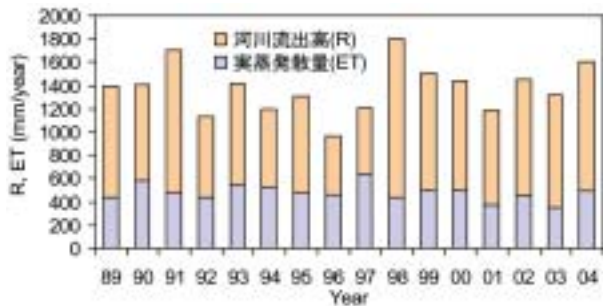


図2 実測の流出高 (福島水位流量観測所) と式 (2) から推定される実蒸発散量の経年変化

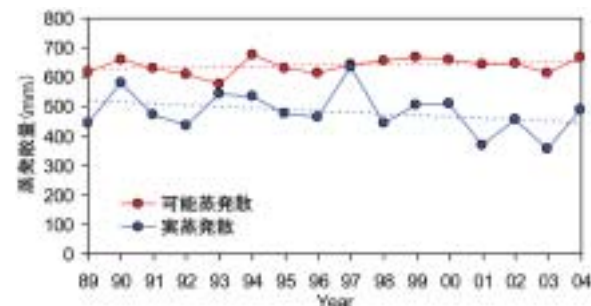


図3 可能蒸発散量と実蒸発散量の経年変化

流域の水管理にとって、流出量の情報は必要不可欠である。とりわけ、今後の気候変動・温暖化によって流出量がどの程度変化するかが水資源・水質の管理や洪水対策立案にとって重要なため、将来の実蒸発散量を推定できれば (2) 式を用いて流出量の概略評価が可能となる。

流域の実蒸発散量を降水量、気象条件、土地利用から算出する手法 ((3) 式) が提案され、世界各地の流域データとの適合性が検証されている<sup>1)</sup>。

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + w \frac{ET_0}{P}}{1 + w \frac{ET_0}{P} + \frac{P}{ET_0}} \quad (3)$$

ここで、 $ET_0$ :可能蒸発散量、 $w$ :植生が利用できる土壌水分に関する係数で、土地利用に依存する。森林流域では $w=2.0$ を、草地流域では $w=0.5$ をとると報告されている。この場合の $ET_0$ はPriestly-Taylor法に基づき算出された値である。

阿武隈川流域 (福島集水域) における1989~2004年の $ET/P$ と $ET_0/P$ をプロットし、(3) 式と比較すると図4のようになる。ここで、 $ET_0$ の算定には気温のみに基づくHamon式を用いる。1989~1999年のデータに対しては $w=0.5$ ~ $1.0$ の曲線の適合性が良いことがわかる。集水域の50%程度が森林で35%程度が農地や都市であることからするとほぼ妥当な結果である。一方、2000年以降のデータでは $w=0.1$ ~ $0.5$ の曲線の間データが多く含まれており、以前に比べて、同一の降水量・気象条件でも実蒸発散量が少ないという特徴が見られる。

これから100年後、温暖化によって阿武隈川流域の気温は年間平均で $2.5^{\circ}\text{C}$ 程度上昇すると予想されている。このとき、可能蒸発散量は150mm程度増加し、(3) 式から計算される実蒸発散量 $ET$ は、 $w=0.5$ と設定すると80mm程度増大すると計算されるので、その分、流出量が減少することが予想される。

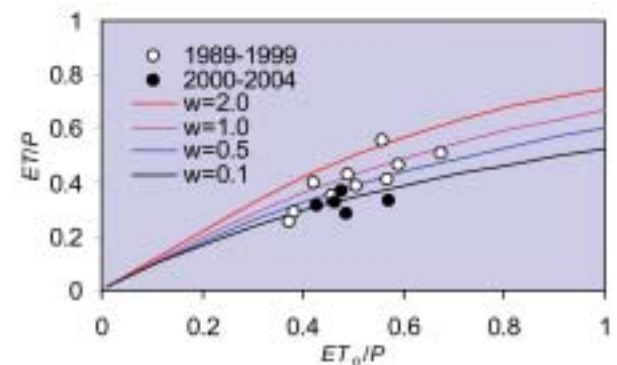


図4 (2)式による実蒸発散量算定結果と(3)式の比較

#### 4. 長期トレンドの定量化

過去に水循環に及ぼしてきた人間活動や気候変化の影響を調べ、将来予測に活用するため、降水量、河川流量、気温の長期トレンドを分析する方法が用いられる。阿武隈川流域の場合、年平均流量は阿久津から下流の各地点で増大傾向が見える(図5)。一方、降水量にも増加傾向が見える(図6)が、白河、須賀川といった上流に位置する地点の流量増大傾向が相対的に小さいことから、降水量増加だけが原因で河川流量が増大傾向にあるとも言い難い。

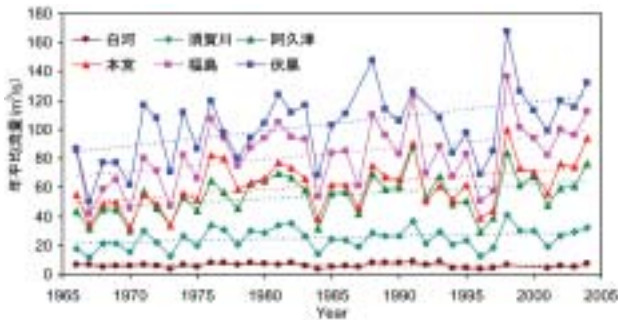


図5 年平均流量の経年変化(1966~2004年)

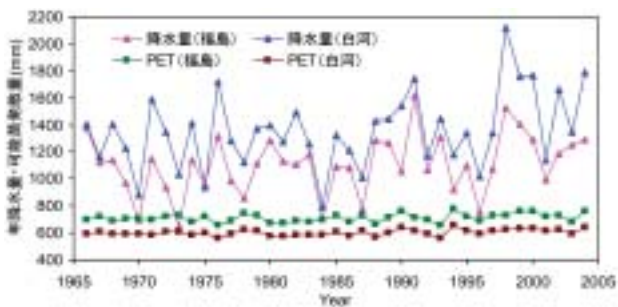


図6 降水量と可能蒸発散量(PET)の経年変化

そこで、Seasonal Kendall Test<sup>2)</sup>によって降水量と河川流量のトレンドを調べる(図7)。この手法では、時系列データ集合の1組のペアの大小関係を数値化し、全てのペアについての数値を積算して得られる値からトレンドの有意性等を判定する。欠測データがある場合にも有効で、水文・水質情報のトレンド解析にしばしば利用される。図7より、月降水量・年降水量に関しては有意な増減傾向がないことがわかる(白河の7月だけは年2%の増加傾向)。月平均河川流量は最も上流の白河で2月と6月に年2%弱の低減傾向(40年で80%弱となる)にある一方、下流に位置する阿久津、本宮、福島、伏黒では、5月、7月、10月ならびに年間で上昇傾向の地点が2~4地点を数える。

同様に気温の長期変化をKendall Testにより調べると、5~8月と11月(白河では1月も)を除き、有意な上昇トレンドが確認される(図8)。なお、可能蒸発散量についても同じ月で有意な上昇トレンドを示した。

表1 阿武隈川流域の過去の水循環変化傾向

| 項目               | 月間値                 | 年間値           |
|------------------|---------------------|---------------|
| 降水量(1966~2004)   | ±<br>(白河7月は+)       | ±             |
| 気温(1966~2004)    | +(夏期は±)             | +             |
| 可能蒸発散(1966~2004) | +(夏期は±)             | +             |
| 実蒸発散(1989~2004)  | 未検討                 | -             |
| 河川流量(1966~2004)  | 5,7,10月は<br>2地点以上で+ | 阿久津から<br>下流で+ |

+: 有意な上昇傾向, -: 有意な減少傾向, ±: 有意な傾向は確認されない。

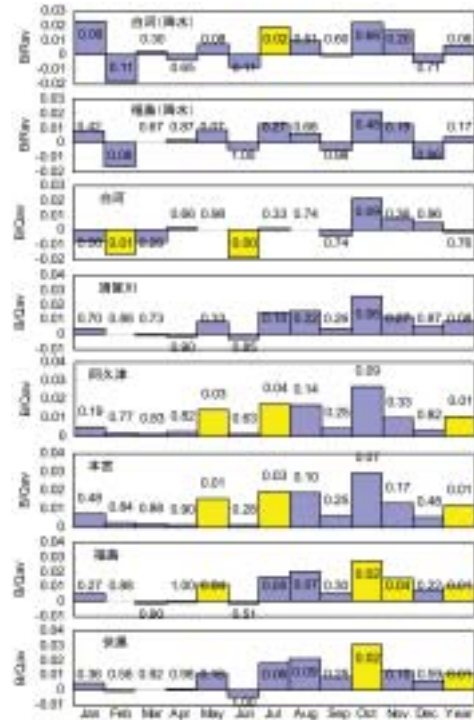


図7 月及び年の降水量と流量の変化トレンド(1966~2004年)。図中の数字は有意水準p(0.05以下を黄で表示)。縦軸は変動の傾き(B)を対象期間(1966~2004年)平均の降水量(Rav)と流量(Qav)で除した値。例えば  $B/Qav=0.01$  の場合、年あたりQavの1%の割合で流量が増大傾向にあることを意味する。

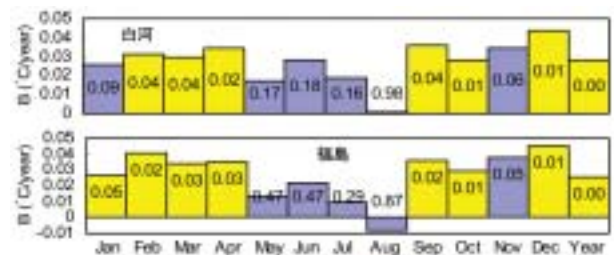


図8 月平均及び年平均の日平均気温の変化トレンド(1966~2004年)。図中の数字は有意水準p(0.05以下を黄で表示)。

以上の増減傾向を表1にまとめる。これらの分析結果から推測するに、河川流量の長期トレンドには降水量変化のほか、冬期の気温上昇や土地利用の変化(水田から畑や市街地への転換、耕作放棄された水田の増大)など、複数の要因が関連していることが伺われる。

## 5. 分布物理型モデルを用いた水循環の定量化

流域の水循環システムを物理過程に基づいて表現する分布物理型モデルを阿武隈川流域へ適用し、流域を取り巻く環境変化（地球温暖化の進行、河道改修や森林変化など）の影響や水循環健全化方策（雨水浸透促進など）の効果などについて検討を行っている。ここではその結果の一部を紹介する。

本研究では地質・土壌・土地利用・気象条件等の時空間分布を考慮できる分布物理型モデルとしてWEP MODEL<sup>3)</sup>を用い、阿武隈川流域への適用性について検討を行った。WEPモデルは土壌の不飽和浸透、表面流、地下水流動、水田の灌漑排水、浸透施設・調節池などの解析機能を有し、都市、農地、森林流域への適用性が確認されてきている。

水循環シミュレーションでは表2に示すデータを既存情報より収集し、500mメッシュデータを作成・利用する。これにより、流域の任意地点における河川流量（図9、10）、地下水位の時間変化を解析できる。温暖化により流域の気温が一律2℃及び4℃上昇したと仮定して、水循環の各要素が現状からどの程度変化するのか試算したところ（図11）、気温2℃上昇で蒸発散量が5%程度増大し、その分、地下水涵養量が減少するとともに、河川への流出も減少した。

表2 主な入力データ

| データ項目           | データソース            |
|-----------------|-------------------|
| 流域界・支流境界        | 国土数値情報            |
| 標高              | 数値地図 250m メッシュ標高  |
| 土地利用            | 国土数値情報            |
| 表層土壌            | 国土数値情報            |
| 表層地質            | 国土数値情報            |
| 河川流路            | 国土数値情報、数値地図 25000 |
| 河川諸元            | 国土交通省、福島県提供データ    |
| 人口              | 地域メッシュ統計(国勢調査)    |
| 利水情報            | 国土交通省             |
| 気温・日照時間・風速(12点) | AMeDAS            |
| 雨量(31点)         | 国土交通省、AMeDAS      |
| 相対湿度(3点)        | 管区気象台データ等         |

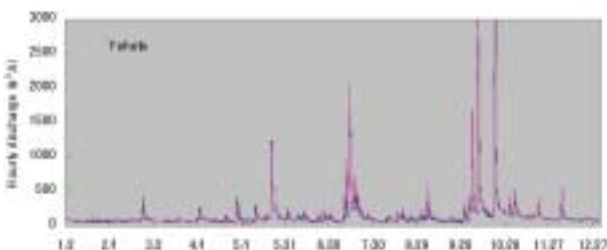


図9 2004年の流量実測値と計算値の比較（八幡）

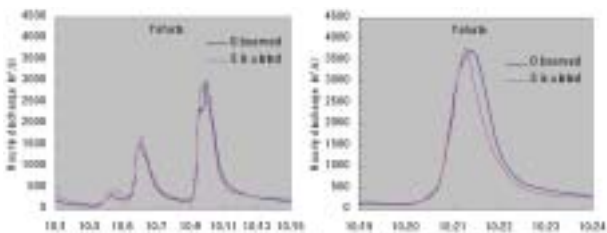


図10 2004年洪水の実測値と計算値（八幡）

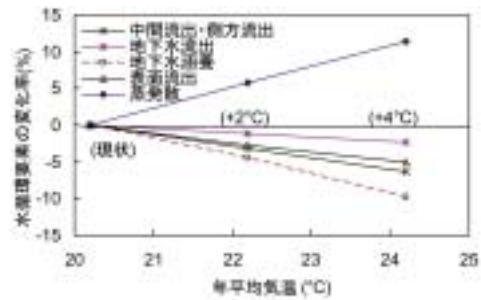


図11 温暖化に伴う水循環要素の変化

## 6. 水循環システムにおける水質の定量化

筆者らは阿武隈川の水質改善を目的とした物質収支や水質浄化についても調査を行っている<sup>4)</sup>。有機汚濁は過去30年以上の間、改善傾向だが、農地系や生活系等からの汚濁物質が阿武隈川の高い栄養塩濃度と富栄養化・濁りをもたらししている可能性が明らかになりつつあり、今後、水温上昇の影響が懸念される。一方、一部の支川の流水には本川と合流して大量の溶存態リンを水中から除去する自然の浄化能力を有することがわかってきた。流域の水質管理においては、関係自治体による水質改善の取り組みと同時に、自然の浄化機能の保全も重要であることから、流域レベルでの浄化機能定量化も今後の課題である。

## 7. まとめ

流域水循環特性の定量化手法として、水収支法による流域水収支の概略評価、水循環要素の長期トレンドの把握、分布物理型モデルによる水循環解析などについて、阿武隈川流域の実例を紹介した。水収支法は簡便ながらも、気候変動や土地利用変化による水循環への影響評価に活用できることから、長期トレンド分析とともに多くの流域に適用し知見の蓄積を図ることが有益であろう。また、詳細な時空間スケールで将来予測や実時間予測を行うには、分布物理型モデルなどに代表される洗練された解析が必要である。目的に応じて適切な手法が利用できるようモデル・データ整備を進めることが重要である。

## 参考文献

- 1) Zhang, L. et al., Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale, *Water Res. Research*, Vol. 37, No. 3, 701-708, 2001.
- 2) Hirsh, R. M. et al., Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Res. Research*, Vol. 18, No. 1, 107-121, 1982.
- 3) Jia, Y. et al., Development of WEP model and its application to an urban watershed, *Hydrological Processes*, Vol. 15, No. 11, 2175-2194, 2001.
- 4) 木内豪, 虫明功臣:阿武隈川流域における平常時の水質と栄養塩負荷の実態, *水工学論文集*, Vol. 51, 1177-1182, 2007. 2.