

◆ 流域水管理特集 ◆

確率論的な利水モデルと気候変動による影響評価への応用

吉谷純一* 鈴木正規** 金木 誠***

1. はじめに

本稿は、流域管理のための利水モデル研究の中間報告である。流域管理とは、マネジメント行為を、制約条件下で流域全体で便益が最適化されるような行為を計画し、実行することと言える。流域管理は、本来は、マネジメントのみの代替案を考慮するものだが、これを拡大して、開発案を代替案に加えることもできる。

水供給を安定化させる利水に限った代替案でも、水資源開発に加え、貯水池の運用方法の変更、節水、排水再利用、需要調整、水利権の調整等の多くのマネジメント・オプションが考えられる。しかし、これらは場合により地球環境への負荷(温暖化ガスの排出)、生態系への悪影響の可能性等の好ましくない影響を伴い、大なり小なり費用を必要とする。従って、問題解決の現実的な代替案は多くの場合トレードオフの関係にあると言える。流域管理のためのモデリング研究の最終目標は、各種代替案のトレードオフの関係を分析できるよう、水利用、水質、洪水、経済(必要費用や被害額)、環境への付加(二酸化炭素排出、エネルギー消費等)、生態系を解析できる図-1に示すような流域管理支援のツールセットを開発することを目的としている。

利水に関する代替案の評価で、最も一般的な評価指標は利水安全度である。研究の第一段階と

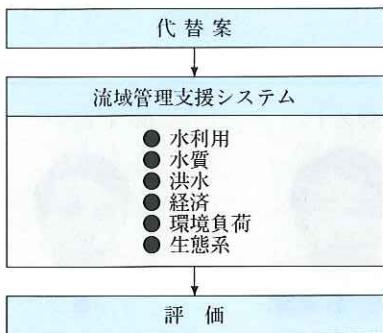


図-1 流域管理支援システムの概念

A Stochastic Water Use Model and Application to Assessment of Climate Change Effects

して行った、利水安全度を確率論的にできる限り正確に評価する方法の検討結果と、これと同じ技術を応用した気候変動の影響評価の検討結果を以下に述べる。

2. 確率論的な利水安全度の考え方

利水安全度は一般的に河川水の供給不足の発生頻度で表す。このような状態がどの程度の頻度で発生するかを表す利水安全度は、計算条件さえ決められれば比較的簡単に計算することができる。利水安全度を計算するとき問題点はいくつかある^{1),2)}が、そのひとつは、計算に用いる統計年数により違った安全度が計算されることである。例えば、同じ過去10年間の計算による水不足回数でも、70年代と80年代のデータでは違った結果が得られるし、70-80年代の20年間で発生する水不足の確率も異なる。この問題は、平均値がゼロである乱数列の任意10個から平均値を推定するとき、どの10個を抽出するかによって推定平均値が変動するのと同種の問題であり、気候変動のような平均値が変化する問題とは異なる。

この問題は、先の乱数列で抽出するサンプル数を10個ではなく50個、100個と増やしたとき、推定平均値が次第に真の平均値であるゼロに近づくことと同様に、安全度の計算のためにサンプル数を増すことで解決できる。しかし、実際の観測データは高々数十年程度しかない。これを補うため、データ・ジェネレーションと呼ばれる人工的に流況を発生させる技術³⁾を用いて、何百年、何千年分の人工的に発生させた流量(以下、合成流量または発生流量と呼ぶ)を用いて、利水安全度を計算することができる。

日本の実務でデータ・ジェネレーションを使うことはまれであるが、海外では古くから使われている。Ven Te Chow⁴⁾は、人工的な水文量の利用は以下の場合に有効としている。それらは、(1)システムが経済的、社会的、物理的な理由により複雑であるとき、あるいは、(2)データ取得期間に比べてより長期的な便益を最大化しようとする

ときである。今まで、日本の水資源はこれらにあてはまらなかったかもしれないが、現状のシステムではデータ・ジェネレーションを行う意味は大きいはずである。さらに、日本では利水安全度という確率値を指標として水資源開発を推進してきたため、より正確に評価する必要性は高いと思われる。

データ・ジェネレーションによる長期間の発生流量利用の有効性は、流況と貯水池の運用結果の関係を考えると容易に理解できるであろう。ある時点の貯留量は過去の貯水池への流入と放流の差がある期間経過した結果であるので、たとえ同じ年降水量の年が数年続いているもその期間内での流況、即ちハイドログラフの形が違えば、水不足が起こる頻度は年により違うはずである。流況は年により千差万別であり、利水安全度の確率を求めるときは、これらすべての流況発生の可能性を考慮すべきである。

発生させた流況はもっともらしい形、即ち、当該流域の流出特性をそのまま保持しなければならない。日本では一般的に、冬期には小流量となり洪水期には大きな流出が時々あり、年間をとおして流出量が多いこともあれば少ないこともあるといった特性を持ち、これが再現されなければならない。また、流量は流域の大きさ等の特性に応じた低減速度で滑らかに低減する。このような流況を発生させる手順は図-2のとおりである。

ここでは、乱数を用いて何千年もの流量を合成し、あるシステム(利水モデル)に入力し、計算するという言わば力ずくの計算にたよっている。しかし、水文現象を決定論的な成分と完全に独立でランダムな成分に分離できるまで分解し、その変換過程を確率偏微分方程式で記述し、これを解くことができれば、数値計算に頼らない解析解を得ることができる。これが理想的な「確率論的(stochastic)」なアプローチであるが、ここでは



図-2 流量を人工的に合成する手順

基礎式への適用にとどまっていることを断つておく。

3. 発生流量の計算方法

流量はランダムな値であり、一定な値となる平均値(正確には、決定論的に決まる成分)と、前の時刻の流量値に影響を受けない(独立の)ランダムな値に分解することができる。これらの2成分に分解する手順は、下式で表される。

$$z_t = \frac{Q_t - \mu_t}{\sigma_t} \quad (1)$$

$$Z_{t+1} = AZ_t + B\varepsilon_{t+1} \quad (2)$$

ここで、 z_t : 基準化された自然流量行列、 ε_t : ランダム数、 A, B : 係数行列、 Q_t : 自然流量、 μ_t : 季節 t における Q_t の平均値、 σ_t : 季節 t における Q_t の標準偏差

例として、図-3の概念図で月流量の変動を解説する。式(1)は、季節により異なる平均値と変動幅を取り除く基準化を意味する。図-3のとおり、各月の流量は平均値を中心に変動し、年により平均値より大きいことも小さいこともある。変動幅も季節により異なる。式(1)はこのような季節性を除去し基準化する変換式である。この基準化により z_t は季節によらず一定の平均値と変動幅を持つようになる。

次に式(2)は、季節性が除去された基準化流量を右辺第一項の決定論的項と第二項の独立なランダム項に分解する自己回帰(AR)モデルと呼ばれる式である。流量値は滑らかに低減するので、通常の時間ステップで見ると時間に関する自己相関を持っている。流量値を前時刻の流量値の関数として分解することにより、これを表現することができ、右辺第2項が独立とみなせるようになる。

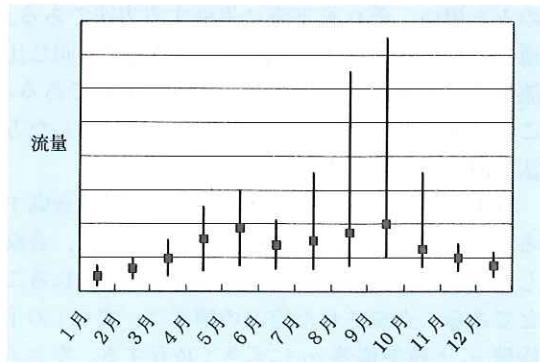


図-3 月流量の変動の模式図

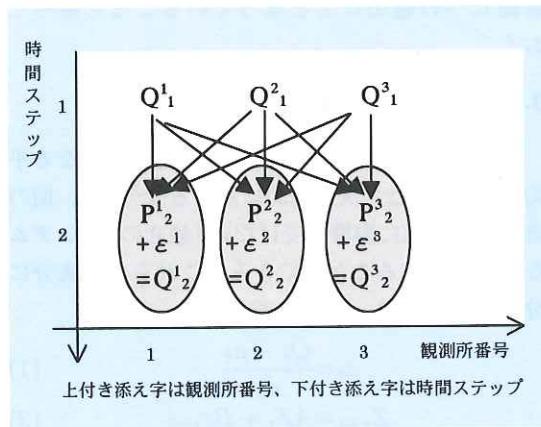


図-4 多変数 AR モデルの計算スキーム (その 1)

なお、通常、係数行列 A, B を、ランダム数を表す ε が標準正規分布になるよう決定できるが、 ε の分布の歪みが大きい場合、式(1)の基準化の前に Q_t を対数変換するなどの前処理が必要となる。合成流量は、式(2)の ε に乱数を代入して z_t を計算し、式(1)により Q_t に変換することで発生させることができる。

以上の計算スキームを図-4 の 3 観測所の例で解説する。時間ステップ 1 におけるすべての観測所の流量値から、式(2)を用いて次の時間ステップの 3 観測所の流量の期待値 P が計算される。これらに独立なランダムな成分を加えたものが流量となる。以下、同じ要領で計算することができる。この方法で、観測所番号 2 と 3 の間に大きな支川が合流する場合も、この AR モデル上考慮されているので、合成流量の上下流の整合もとれている。支川から時差をもって合流する傾向も、観測所間の相関で表現される。

多地点で整合のとれた流量を合成する別の方法は、図-5 のように最上流端の観測所での発生流量のみを用い、それを下流に追跡する方法である。通常の利水計算では、上流からの比流量と同じ比流量を残流域から流入させるのが一般的である。これは単純化したモデルであり、図-4 に示した方法と同種の方法と言える。

以上のプロセスで、任意の年数の流況を合成することができる。ここで注意すべきことは、合成した流況の特性は、用いたデータで決定されることである。合成された流況の精度は、式(1)の平均値 μ_t と標準偏差 σ_t に大きく依存する。たとえ任意の年数の流況を合成できても、その基礎情

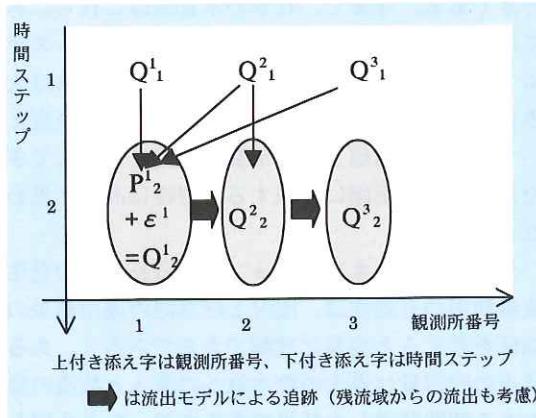


図-5 多変数 AR モデルの計算スキーム (その 2)

報となる統計値を正確に推定するために十分に長期間の観測データは不可欠である。

4. 水収支の不整合の確率論的処理

河道の水収支は、同時に精密流量観測を行っても、収支がプラス、マイナスとなる不整合となり、場所に関しても季節に関しても何の傾向もみられないことがある。流量観測の不備、不適切な水位流量曲線、地下水との交流がある場合には、水収支に季節性などの一定の傾向が見られるので、傾向のないランダムな不整合となる原因是不明である。通常の利水計算では、このような原因不明の変動を伴う流量値を使わず、上流からの水の追跡計算結果を用いる。しかし、各観測所の流量値を正しいとして、確率論的にこの変動を計算に取り込むことができる。以下に方法のみを記述する。

最初に、横流入量 q を考慮した水収支式から推定される流量 \hat{Q} を算出し、実際の流量との差 D を求める。

$$D = Q_2 - \hat{Q}_2, \quad \hat{Q}_2 = f(Q_1, q) \quad (3)$$

ここで、 Q_1 は河道区間上流端からの流入量、 Q_2 : 下流端からの流出量、 q : 横流入量、 f : 過去の水収支から算出した関数、である。

水収支の不整合を表す D の発生頻度分布は、 Q_1 と相関が認められる成分と、独立でランダムな成分に分解できる。相関が認められる成分は、河床等をとおして地下水との交流があるか、流量観測や水位・流量曲線に傾向を持つ誤差がある等の原因が考えられる。独立でランダムな成分は、流量観測の独立でランダムな誤差や原因不明の要

因に起因する。

このような水収支の不整合は、式(2)をそのまま利用することにより、発生させることができる。

$$D_t = AQ_{1,t} + B\varepsilon_t \quad (4)$$

D が流量と無相関であれば、式(4)の第一項の係数はゼロ行列となり、独立でランダムな値をとることになる。

式(4)を用いて、水収支の不整合を発生させ、水収支上過大なこともあれば過小なこともある流量で利水計算を行えば、安全度等の指標はある値に収束し、理論上は不確実さが確率に組み込まれたことになる。

すべての取排水を観測できない、あるいは、観測精度の限界に起因する水収支の不整合のような不確実性は、流量は年により違った値を取りうるという変動とは異なるが、確率論的にはどちらもランダムな値であり、両者を同じ数式で処理することができる。

ただし、この方法を以下紹介する荒川流域に適用したが、最終的には採用しなかった。それは、データ不足のため Q_1 と D の独立性や頻度分布を把握することができなかつたためである。 D に正規分布をあてはめ利水計算を行うと、時に D は Q_1 に比べて非常に小さな値となり、水不足と判断されることが多く発生してしまったためである。十分なデータがあれば、 D の確率分布を正しく評価することができたはずである。

5. 荒川流域への適用

このモデルに基づく利水モデルを荒川流域に適用した。図-6に対象とした流域の模式図を示す。計算上、ダムは既設の二瀬ダムのみを対象とし、図に矢印で示した大口の取排水のみを取り入れた。武藏水路等の利根川からの流入水は、利根川が渴水の影響を受けずに常に水利権量を導水している場合を想定し、荒川上流域単独の評価をするようにした。

流量データは、貯水池による調整と取排水の影響を取り除いた各流量観測所及びダムへの流入量の自然流量 7 年分を用いた。

計算条件は以下のとおり設定した。取水量は水利権量を常に取水し、灌漑区域からの還元量は、灌漑面積を荒川に排水される面積と利根川流域へ

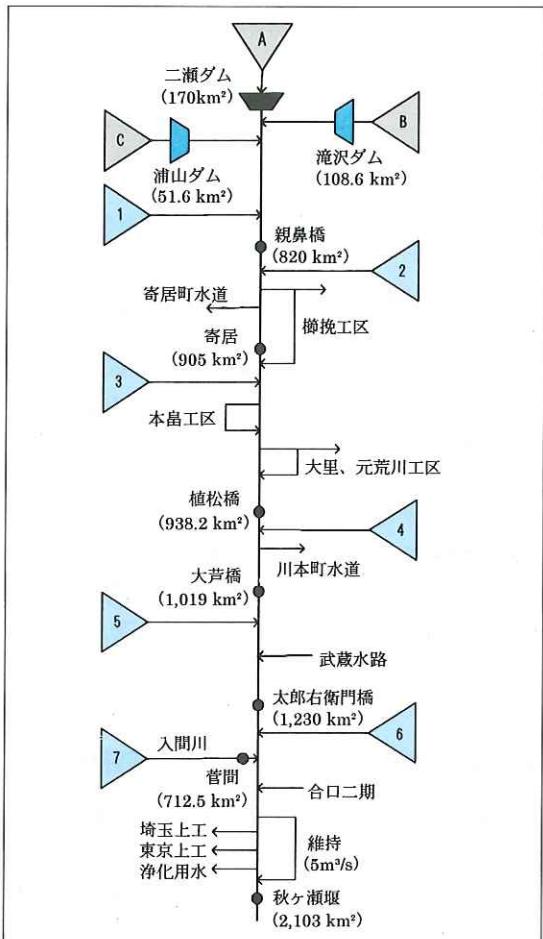


図-6 荒川模式図

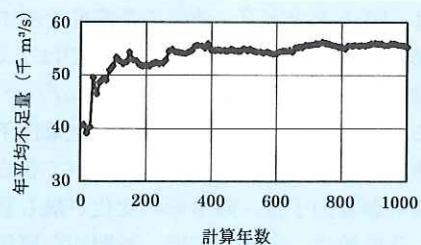


図-7 計算年数による平均不足量の収束
排水される面積比から算出した。櫛引工区、大里・元荒川工区の取水・還元を表す図中の矢印は、荒川に戻らない矢印が利根川流域への排水量に相当する。灌漑区域からの還元率は 0.5 とした。計算時間間隔は半旬とした。

これらの計算条件は、あくまで今回の計算用に設定した条件であり、実際の水利用形態や利水計画をシミュレートするものではない。

自然流量を 1000 年分の乱数列を用いて発生させ、このモデルで計算したときの年平均不足量を

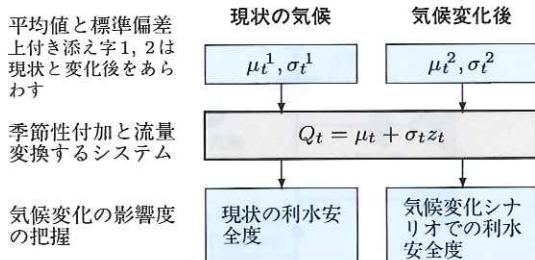


図-8 現状と気候変化時の合成流量作成手順

図-7に示す。この計算例では、計算年数が増えるにつれ不足量が大きくなり、400年程度の年数ではほぼ55,000m³/sに収束している。これは、数十年程度の流況では確率論的には正確ではなく、偶然性が強く影響することを意味する。なお、今回用いた乱数列では不足量が約40,000m³/sから始まり、年数とともに増加しながら約55,000m³/sに収束したが、乱数列によっては、例えば70,000m³/sから減少しながら55,000m³/sに収束することもある。

6. 気候変動が水利用に及ぼす影響評価

利水計画に限らず、ほぼすべての水に関する計画は過去の観測期間から将来にわたり変化がないものとして計画している。気候変動が水利用に与える影響は、図-2に示した人工的に流量を合成する手順を利用して評価することができる。その方法は、図-8のとおり、流量の季節性を戻す過程で、現状の平均値と標準偏差 μ_t^1, σ_t^1 ではなく、気候変動を想定した平均値と標準偏差 μ_t^2, σ_t^2 を用いることである。これにより気候変化条件下的流況を作成し、利水計算に用いることができる。気候変動の影響因子は、降水量の変化が最も重要であり、その他に、気温、湿度、長期的な植生変化等も影響因子である。この方法は、その総合的結果として、流量の平均値と変動幅の変化で気候変動の影響を表現している。

7. 年降水量の変化傾向

エルニーニョや地球温暖化の影響研究に関する多くの研究にもかかわらず、地球規模の変動に伴う地域的な降雨変化については確かな結論は得られていない。従って、それぞれの変化予測結果は可能性のひとつとして考えるべきである。つまり、いくつかの気候変動の可能性を想定し、その影響

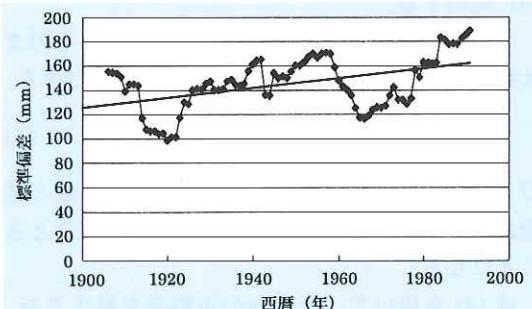


図-9 年降水量の標準偏差

度をあらかじめ把握し、最悪の事態にならないような対策をとることが重要となる。

影響度を調べることは感度分析を実施することであり、平均値 μ と標準偏差 σ の変化シナリオを作成する必要がある。その参考として年降水量の過去の変化傾向を見るところにする。国土庁⁵⁾は、全国平均の年降水量が100年で約6%程度の割合で減少傾向にあると報告している。さらに、近年は小雨と多雨の開きが大きくなっていると指摘している。これを標準偏差の変化で把握するため、全国59地点の年降水量⁶⁾を分析した。図-9は20年毎にみた年降水量の標準偏差であり、100年で40mm程度の割合で増加する傾向にある。1887～1991年の86年間で標準偏差は27%増加している。これを以下の感度分析のシナリオとして用いることにする。今後、あらゆる気候変動の可能性を考慮したシナリオで感度分析を行う必要がある。

8. 利水モデルによる気候変化の感度分析

上記の降水量変化傾向から、気候変化による約100年後の自然流量変化シナリオとして、表-1に示すシナリオを設定した。

水不足は、不足量(=Σ(水利権量 - 取水地点流量); 正のみ集計)の年平均で表した。各シナリオ間での相対的な比較結果を表-2示す。

この結果から、自然流量の平均値が減少するとき、あるいは流量の変動幅が増加するとき、この検討範囲の中では、水不足は1.5～2倍程度までは線型的に増加する。これに対し両変化が同時に起ったシナリオ5の場合、不足量は急に10倍以上となった。ここでの計算条件では、頻繁に水不足が発生している。このような条件下では、流量の均値が減少し、さらに変動幅が大きくなると、

表-1 気候変動シナリオ

| | 平均値変化 | 標準偏差変化 |
|-------|-------|--------|
| シナリオ1 | 10%増 | 不变 |
| シナリオ2 | 10%減 | 不变 |
| シナリオ3 | 不变 | 10%増 |
| シナリオ4 | 不变 | 25%増 |
| シナリオ5 | 10%減 | 25%増 |

表-2 気候変化シナリオ別の水不足量

| 自然流量の 設定条件 | 年平均不足量 (千m ³ /年) | 現況を100 とした比較 |
|---------------|--------------------------------|-----------------|
| 現況 | 11,159 | 100 |
| シナリオ1 | 6,037 | 54 |
| シナリオ2 | 21,826 | 196 |
| シナリオ3 | 13,315 | 119 |
| シナリオ4 | 17,010 | 152 |
| シナリオ5 | 116,954 | 1048 |

水利用に多大な影響を及ぼすことがわかる。

この結果は、この流域での結果であり、流出特性と水利用形態により異なるはずである。今回の検討範囲では、平均値の減少と変動幅の増加が同時に発生した場合に水不足が急増する結果となつたが、流域により特有の応答特性があることが考えられる。

利水計画は気候が変化しない前提で策定されているが、もし仮に、ある気候変動が起こったら水利用にどのような影響があるか、このような感度分析を行っておくことが必要であろう。

また、流域管理の代替案を考えるときに、貯水池の運用方法、節水プログラム、水利権、正常流量の設定等の変更が、流域全体の水利用に与える影響の感度を、このようなモデルで解析し把握することが今後必要であると考える。

参考文献

- 1) 大内忠臣他：利水安全度問題に関する2,3の分析と考察、土木技術資料 24-1, pp.21-26, 1982.
- 2) 多々納勇一：水利用の新たな展開（水文・水資源学会（編集）, 水文・水資源ハンドブック 12.6 節), 朝倉書店, 1997.
- 3) 土木学会：水理公式集 -昭和60年度版-, 土木学会, 1985.
- 4) Ven Te Chow, Section 8-IV Statistical and probability analysis of hydrologic data in "Applied Hydrology", 1964.
- 5) 国土庁長官官房水資源部：平成10年度版 日本の水資源、大蔵省印刷局、平成10年8月
- 6) 柏井条介、角哲也、安達孝実、宮井貴大：地球温暖化が水資源に及ぼす影響に関する考察、土木研究所資料第3478号、平成9年3月

吉谷純一*



建設省土木研究所河川部
水文研究室主任研究員
Junichi YOSHITANI

鈴木正規**



(前 水文研究室交流研究員)
Masanori SUZUKI

金木 誠***



同 水文研究室長
Makoto KANEKI