

第3章 水文解析 第1節 水文統計解析

目次

第1節	水文統計解析	1
1.1	総説	1
1.2	資料の収集及び解析手法の前提条件の検討	1
1.2.1	水文資料の周期性の検討	2
1.2.2	水文資料のジャンプの検討	2
1.2.3	水文資料のトレンドの検討	3
1.3	定常な水文量の頻度解析	4
1.3.1	候補確率分布モデルの列挙	4
1.3.2	確率分布モデルの母数推定	6
1.3.3	候補確率分布モデルのスクリーニング	9
1.3.4	確率水文量のバイアス補正と安定性の評価	10
1.3.5	確率分布モデルの決定	11
1.3.6	確率分布モデルの決定に関する補足事項	13
1.4	非定常な水文量の頻度解析	13
1.5	時系列変化特性の解析	14

平成24年6月 版

第3章 水文解析

第1節 水文統計解析

1.1 総説

<考え方>

本節は、第2章 水文・水理観測 第2節 降水量観測、第3節 水位観測、第4節 流量観測で規定されている方法等により得られ、第5節 水文資料の整理・保存と品質管理で規定されている方法により蓄積・管理された水文資料等の統計的解析についての技術的事項を定める。

一般に河川計画及びそれを実現するための河川管理施設等の設計や管理のよりどころとなる目標としては、既往の事象の中で厳しいもの又は既往の事象の頻度解析によって計画規模若しくは目標とする規模の値を推定したものが選ばれる。本節で規定する水文頻度解析手法は、計画規模の頻度で生起すると想定される事象を既往の水文資料から推定する際に用いられ、また、あわせて、任意の事象の発生頻度を既往の水文資料から推定する際にも用いられる。

従来、水文頻度解析においては、水文資料の定常性等を仮定することが多かったが、地球温暖化に伴う気候変化が予測されており、その吟味も重要となってきたので解析の前提条件の確認手法について述べる。

水文統計解析には、資料の収集及び解析手法の前提条件の検討、水文頻度解析、時系列変化特性の解析等が含まれる。

資料の収集及び解析手法の前提条件の検討では、水文統計解析を行うに当たり基本的な事項を述べるとともに、水文頻度解析の前提条件を満たしているかどうかの検討の方法について述べる。また、水文頻度解析において、次に述べる定常解析又は非定常解析のどちらを適用すべきかを選択する際のよりどころとなる水文資料の定常性の検討の方法について述べる。

水文頻度解析は、水文諸量の規模とその発生頻度の関係を統計的な方法により推定するものであり、前述の定常性の検討結果に応じて、定常な水文学量の頻度解析又は非定常な水文学量の頻度解析を適用する方法について述べる。

時系列変化特性の解析において、周期性等の時間変化特性の解析を行う方法について述べる。

1.2 資料の収集及び解析手法の前提条件の検討

<考え方>

水文統計解析の基となる水文資料は、解析の目的、解析方法、資料収集・整理の難易等を考慮して選定する。水文資料の選定、収集に当たっては次の各項目について調査・検討を行う。

- 1) 水文資料の存在状態
- 2) 観測又は記録の方法、水文資料の精度、代表性等の特性
- 3) 水文資料収集に関する時間、費用等の作業の程度
- 4) 他の調査成果資料

年最大値資料はその変動が大きいので水文資料の特性から吟味することは容易ではないが、平均値に比べ異常に大きいものや小さいもの等を見つけた場合は、その年の気象条件を吟味し、水文資料の妥当性を調べ、測定時の野帳等に戻って観測値の徹底的な吟味を行う。

また、水文資料を水文頻度解析に用いる際の検討項目として、1) ランダム性、2) 独立性、3) 均質性、4) 定常性が考えられる。

1) ランダム性(Randomness)

ランダムとは、標本の変動が自然由来であることである。例えば、人為的に調節された流量データはランダムとはみなされないので調節効果を除去する必要がある。

2) 独立性(Independence)

独立とは、標本の各データがそれぞれ他のデータの影響を受けていないことである。例えば、本日の流量は昨日の流量の影響を受けている（昨日の流量が大きければ、本日の流量も大きい）ので独立とはいえず、双方を水文資料に含めることはできない。通常、データのサンプリング間隔を大きくすれば独立とみなせる。

3) 均質性(Homogeneity)

均質とは、標本が一つの母集団からのものとみなせることである。

4) 定常性(Stationarity)

定常とは、標本からランダムな変動を除いた後の成分が時間的に変化していないことである。非定常なデータは、トレンド（長期的傾向変化）、ジャンプ（急激な変化）又は周期を持つ。例えば、トレンドは徐々に進む流域の改変等、ジャンプは自然的、人為的な条件の急変等と関係する。

定常性が満たされない場合は、水文資料から周期成分やジャンプの影響を排除した資料についてトレンドの有意性について検討し、有意と認められない場合は周期成分やジャンプの影響を排除した資料について定常性を前提とした水文頻度解析を適用する。そうでない場合は水文頻度解析にトレンド成分を内包する非定常な水文量の頻度解析を行う方法が考えられる。

1. 2. 1 水文資料の周期性の検討

<例 示>

水文資料の周期性の有無は、標本自己相関係数を用いたコレログラム（時系列相関図）で評価することができる。水文資料が独立同一分布からの標本かどうかを検定する手法として、有意水準を5%とするとき、標本 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ の自己相関係数が信頼限界 $\pm 1.96/\sqrt{n}$ の範囲に入るかどうかで判断できる。もし、想定される周期の2~3倍程度（または40タイムステップ程度）までの標本自己相関係数を求めて、そのうち2、3個以上が信頼限界外となるか、1個が信頼限界のはるか外になれば、独立同一分布であるという仮説を棄却する。棄却された場合、調和解析等により周期成分を除去して水文頻度解析を行う必要がある。

1. 2. 2 水文資料のジャンプの検討

<例 示>

水文時系列資料がジャンプを有するかどうかの判断には、t-検定やMann-Whitney検定を用いることができる。なお、ジャンプは観測期間の長さにより検出されなかったり、検出されたりするので、水文資料が十分な観測期間を有しているかどうかをも併せて検討する必要がある。十分な観測期間の長さについては、水文資料の特性により異なる。水文資料が十分な観測期間を有していない場合は、ジャンプを有していないとみなす。また、ジャンプの原因が明確な場合、観測期間を分けた検討が必要である。

例えば、年降水量、洪水期降水量、月降水量、年最大日雨量、年最大時間雨量等の水文時系列資料を収集した場合、これらのうち最も安定的と考えられるのは年降水量である。日降水量や時間降水量等の年最大値は変動が激しく、ジャンプを検出することが難しい。このため、たとえ年最大値の解析が目的とするところであっても年降水量等の平均的特性を表すものによる検討を行うことが望ましく、そこで有意なジャンプが検出されれば、観測期間を分けた検討を行う。

1. 2. 3 水文資料のトレンドの検討

<例 示>

水文時系列資料がトレンドを有するかどうかの判断に使える手法として、Mann-Kendall 検定や新記録数検定等がある。ただし、検出力がそれぞれ異なり、必ずしも水文資料が単調なトレンドを有していることは少ないことから、複数の方法や対象期間等により評価する必要がある。

1) Mann-Kendall 検定

Mann-Kendall 検定は、トレンドが線形か非線形かを問わずに水文時系列資料のトレンドを検定するノンパラメトリックな手法である。本検定の帰無仮説 H_0 と、対立仮説 H_1 は、以下に示すとおりである。

H_0 : n 個のデータ $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ が独立で同一の確率分布に従う。

H_1 : n 個のデータ $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ が同一の確率分布に従わない。

Mann-Kendall 検定においては、式 (3-1-4) で与えられる統計量 Z を定義する。

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(X_j - X_k) \quad (3-1-1)$$

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (3-1-2)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left(n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n e_i(e_i-1)(2e_i+5) \right) \quad (3-1-3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3-1-4)$$

ここに、 e_i はデータ $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ を昇順に並べたとき、同じ値が連続して出現する個数を表し、 n はその組数を表す。ここで、有意水準を α としたとき、標準正規変量 Z が $|Z| > z_{1-\alpha/2}$ のとき仮説 H_0 は棄却される。ここに、 $z_{1-\alpha/2}$ は標準正規分布の超過確率 $\alpha/2$ に相当するクォンタイルである。また、 $S > 0$ のとき、水文時系列資料 X_i は上昇傾向であることを示し、 $S < 0$ のときは下降傾向であることを示す。

2) 新記録数検定

水文時系列資料が定常で独立同一分布に従う場合、最初の記録を新記録として、以降この新記録が更新される回数を数える。この数は理論的に次式で表されるので、観測値から得られる新記録の回数と比較することにより定常性を評価できる。

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \approx \log n + \gamma \quad (3-1-5)$$

ここに n は観測回数（年最大値を対象とする場合観測年数）、 γ はオイラ一定数であり、約 0.577216 である。時系列が増加傾向であれば、観測値から得られる新記録の数は理論値を上回り、減少傾向であれば逆に下回ることになる。例えば、有意水準 5% のとき、 $n=25, 50, 100$ に対する新記録の個数の上限値はそれぞれ 7, 8, 9 である。

<参考となる資料>

水文時系列資料の定常性の解析の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 徐 宗学, 竹内邦良, 石平 博: 日本の平均気温・降水量時系列におけるジャンプ及びトレンドに関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 121-126, 2002.
- 2) Salas, Jose R.: Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series, Chap. 19, *Handbook of Hydrology*, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York, pp. 19.1-19.72, 1993.
- 3) 飯山由利子, 西村和夫, 渋谷政昭: 新記録数検定の検出力, 応用統計学, Vol. 24, No. 1, pp. 13-26, 1995.
- 4) 関 静香, 加藤琢朗, 志村光一, 山田 正: 荒川水系における大雨の新記録出現理論に基づいた発生頻度に関する研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会, II-155, 2000.
- 5) 竹内 啓, 藤野和建: スポーツの数理科学-もっと楽しむための数字の読み方-, 応用統計数学シリーズ, 共立出版株式会社, p. 181, 1988.
- 6) P. J. Blockwell and R. A. Davis (著), 逸見 功, 田中 稔, 宇佐美嘉弘, 渡辺則生 (訳): 入門 時系列解析と予測, シーエーピー出版, p. 431, 2004.

1. 3 定常な水文量の頻度解析

<標準>

定常性を前提とした水文量の生起頻度の解析は以下の手順による。

- 1) 候補確率分布モデルの列举
- 2) 確率分布モデルの母数推定
- 3) 候補モデルのスクリーニング
- 4) 確率水文量のバイアス補正と安定性の評価
- 5) 確率分布モデルの決定

1. 3. 1 候補確率分布モデルの列举

<例示>

水文頻度解析に用いるモデルの候補を解析対象水文資料に応じて列举する方法がある。

<例示>

1) 水文時系列資料を一定の区間に分割し、それぞれの区間に含まれる最大値を収集した水文資料を区分最大値という。一般に極値資料とも呼ばれる。極値資料は 3 つの型の極値分布で表されることが証明されており、これらを一つの式で表したものが一般極値分布 (GEV) である。一般極値分布の形状母数が 0 の場合が Gumbel 分布であり、 x を変量とするときそれぞれ確率密度関数 $f(x)$ 、確率分布関数 $F(x)$ は次のように表される。

a) Gumbel 分布

$$f(x) = \frac{\exp\left\{-\frac{x-\xi}{\alpha}\right\}}{\alpha} \exp\left[-\exp\left\{-\frac{x-\xi}{\alpha}\right\}\right] \quad (3-1-6)$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left\{-\frac{x-\xi}{\alpha}\right\}\right] \quad (3-1-7)$$

b) 一般極値分布

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left\{ 1 - \frac{k(x - \xi)}{\alpha} \right\}^{\frac{1}{k}-1} \exp \left[- \left\{ 1 - \frac{k(x - \xi)}{\alpha} \right\}^{1/k} \right] \quad (3-1-8)$$

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - k \frac{x - \xi}{\alpha} \right)^{1/k} \right] \quad (3-1-9)$$

ここに ξ : 位置母数、 α : 尺度母数、 k : 形状母数であり、 $k=0$ の場合が Gumbel 分布である。
 なお、一般極値分布は $k > 0$ の場合、上限値を有する。

$$x \leq \xi + \alpha/k \quad (3-1-10)$$

2) 閾値超過資料 (POT : peaks over threshold) は、閾値を超過する独立なピーク値を全て取り出した資料である。年最大値資料が他の年の年最大値より大きな年間第 2 位や 3 位などのデータを使わず、また、年によっては洪水とみなせないような事象を含むのに対し、適切に閾値を選べばこのように特性の異なる水文資料を含むことを回避できる利点がある。閾値の選定によく用いられる手法としては、標本平均超過関数を用いる手法がある。以下に指数分布、一般 Pareto 分布を例示する。

一般 Pareto 分布の形状母数が 0 の場合が指数分布であり、 x を変数とするとき、それぞれ確率密度関数 $f(x)$ 、確率分布関数 $F(x)$ は次のように表される。

a) 指数分布

$$f(x) = \frac{\exp \left\{ - \frac{x - \xi}{\alpha} \right\}}{\alpha} \quad (3-1-11)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \frac{x - \xi}{\alpha} \right\} \quad (3-1-12)$$

b) 一般 Pareto 分布

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left\{ 1 - k \frac{x - \xi}{\alpha} \right\}^{\frac{1}{k}-1} \quad (3-1-13)$$

$$F(x) = 1 - \left(1 - k \frac{x - \xi}{\alpha} \right)^{1/k} \quad (3-1-14)$$

ここに、 ξ : 位置母数、 α : 尺度母数、 k : 形状母数であり、 $k=0$ の場合が指数分布である。
 なお、一般 Pareto 分布は $k > 0$ の場合、上限値を有する。

$$x \leq \xi + \alpha/k \quad (3-1-15)$$

3) よく知られているように、誤差は正規分布に従う。また、一定期間内の日降水量等の短時間降水量は指数分布で表される場合が多い。指数分布に従う二つの変数の和はガンマ分布で表される。このように各分布の特徴や既往の事例などを踏まえ、対象とする水文資料の解析においては適切と考えられる分布を列挙する。以下に正規分布、Pearson III 型分布の確率密度関数 $f(x)$ 、確率分布関数 $F(x)$ を例示する。

a) 正規分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (3-1-16)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dt \quad (3-1-17)$$

ここに μ : 平均、 σ : 標準偏差である。特に、 $\mu=0$ 、 $\sigma=1$ の場合を標準正規分布と呼び、これに対する確率分布関数の数表が用意されている。

b) Pearson III型分布

形状母数 γ が 0 でなければ次の変数変換を行うと、

$$\alpha = \frac{4}{\gamma^2}, \quad \beta = \frac{1}{2}\sigma|\gamma|, \quad \xi = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma}, \quad \gamma \neq 0 \quad (3-1-18)$$

γ の正負ごとに x の分布範囲、確率密度関数 $f(x)$ 及び確率分布関数 $F(x)$ が以下のように表される。

$\gamma > 0$ の場合、 x の分布範囲 : $\xi \leq x < \infty$

$$f(x) = \frac{(x-\xi)^{\alpha-1} \exp\{-(x-\xi)/\beta\}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (3-1-19)$$

$$F(x) = G\left(\alpha, \frac{x-\xi}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha) \quad (3-1-20)$$

$\gamma < 0$ の場合、 x の分布範囲 : $-\infty < x < \xi$

$$f(x) = \frac{(\xi-x)^{\alpha-1} \exp\{-(\xi-x)/\beta\}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (3-1-21)$$

$$F(x) = 1 - G\left(\alpha, \frac{\xi-x}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha) \quad (3-1-22)$$

ここに、 $G(\alpha, z)$ は不完全ガンマ関数

$$G(\alpha, z) = \int_0^z t^{\alpha-1} \exp(-t) dt \quad (3-1-23)$$

である。

Pearson III型分布は γ が 0 に近づくと、正規分布に漸近し、 $\gamma=2$ の場合、指数分布となる。

1. 3. 2 確率分布モデルの母数推定

<例 示>

解析対象水文資料を用いて候補モデルの母数を求める際には、標本の大きさに応じて適切な推定法を用いるなどの手法があり、積率法、L積率法、最尤法等の手法が用いられている。なお、小標本（標本サイズ<30）については、L積率法がよく用いられている。

1) 積率法

従来、確率分布モデルの母数推定に当たってはその原点及び平均値まわりの積率、すなわち、平均値、分散、歪みをそれぞれ標本から得られる標本平均、不偏分散、不偏歪み等に等しいとおいて分布モデルの母数を推定する積率法を用いて、分布モデルの母数を求めてきた。

確率分布モデルの確率密度関数を $f(x)$ とするとき、この平均 μ 、分散 σ^2 及び歪み γ はそれぞれ、

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (3-1-24)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2f(x)dx - \mu^2 \quad (3-1-25)$$

$$\gamma = \int_{-\infty}^{\infty} x^3f(x)dx/\sigma^3 \quad (3-1-26)$$

と表される。一方、標本 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ から得られる標本平均 $\hat{\mu}_x$ 、不偏分散 $\hat{\sigma}_x^2$ 、不偏歪み $\hat{\gamma}_x$ は、

$$\hat{\mu}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3-1-27)$$

$$\hat{\sigma}_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (3-1-28)$$

$$\hat{\gamma}_x = \frac{n}{(n-1)(n-2)\hat{\sigma}_x^3} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3 \quad (3-1-29)$$

と表される。 $f(x)$ が2母数の場合、(3-1-24)と(3-1-25)の左辺を(3-1-27)と(3-1-28)に置き換えて連立方程式を解くことにより、母数を求めることができる。3母数の場合、(3-1-24)、(3-1-25)及び(3-1-26)の左辺を(3-1-27)、(3-1-28)及び(3-1-29)に置き換えて連立方程式を解くことにより、母数を求めることができる。なお、3母数の場合、種々の歪みの補正が提案されている。

2) L積率法

大きく外れたデータが含まれ歪んだ水文資料に対処するために考案された手法がPWM(probability-weighted moments)やL積率(L Moments)を用いる手法である。L積率は順序統計量の線形和で表される特徴を持つ(Lはlinear combinationsに由来する)。

$X_j(j=1, 2, \dots, n)$ を標本から得られた順序統計量($X_1 \geq X_2 \geq X_3, \dots, \geq X_n$)とすると、PWMは次式で定義される。

$$\beta_r = E\{X[F(X)]^r\} = \int_0^1 xF^r dt \quad (3-1-30)$$

PWMの標本推定値を算定するには2つの方法がある。最も単純な方法は確率分布関数 $F(x)$ にプロットイング・ポジションを使う方法である。

$$\hat{\beta}_r = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_j \left[1 - \frac{j-0.35}{n} \right]^r \quad (3-1-31)$$

もう一つの方法は不偏推定値を求める方法であり、次式で表される。

$$\hat{\beta}_r = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-r} \frac{\binom{n-j}{r} X_j}{\binom{n-1}{r}} = \frac{1}{r+1} \sum_{j=1}^{n-r} \frac{\binom{n-j}{r} X_j}{\binom{n}{r+1}} \quad (3-1-32)$$

この式を $r=0, 1, 2, 3$ について具体的に書くと次のようになる。

$$\hat{\beta}_0 = \bar{X} \quad (3-1-33)$$

$$\hat{\beta}_1 = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(n-j)X_j}{n(n-1)} \quad (3-1-34)$$

$$\hat{\beta}_2 = \sum_{j=1}^{n-2} \frac{(n-j)(n-j-1)X_j}{n(n-1)(n-2)} \quad (3-1-35)$$

$$\hat{\beta}_3 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(n-j)(n-j-1)(n-j-2)X_j}{n(n-1)(n-2)(n-3)} \quad (3-1-36)$$

このようにして求めた PWM を用いて L 積率は、次式で求めることができる。

$$\lambda_1 = \beta_0 \quad (3-1-37)$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (3-1-38)$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (3-1-39)$$

$$\lambda_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (3-1-40)$$

$$\tau_2 = \lambda_2/\lambda_1 \quad (\text{L-CV}) \quad (3-1-41)$$

$$\tau_3 = \lambda_3/\lambda_2 \quad (\text{L-skewness}) \quad (3-1-42)$$

$$\tau_4 = \lambda_4/\lambda_2 \quad (\text{L-kurtosis}) \quad (3-1-43)$$

これらの L 積率を各確率分布モデルの母数と L 積率の関係を表す連立方程式に代入することにより各確率分布モデルの母数を求めることができる。

a) Gumbel 分布

$$\alpha = \lambda_2/\log 2, \quad \xi = \lambda_1 - \alpha \gamma \quad (3-1-44)$$

ここに γ : オイラーの定数であり、約 0.577216 である。

b) 一般極値分布 (GEV)

$$k \approx 7.8590c + 2.9554c^2, \quad c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\log 2}{\log 3} \quad (3-1-45)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k}{(1 - 2^{-k})\Gamma(1 + k)} \quad (3-1-46)$$

$$\xi = \lambda_1 - \alpha \{1 - \Gamma(1 + k)\}/k \quad (3-1-47)$$

c) 指数分布

$$\alpha = 2\lambda_2, \quad \xi = \lambda_1 - \alpha \quad (3-1-48)$$

下限値 ξ が既知の場合

$$\alpha = \lambda_1 - \xi \quad (3-1-49)$$

d) 一般 Pareto 分布

$$k = \frac{1 - 3\tau_3}{1 + \tau_3} \quad (3-1-50)$$

$$\alpha = (1 + k)(2 + k)\lambda_2 \quad (3-1-51)$$

$$\xi = \lambda_1 - (2 + k)\lambda_2 \quad (3-1-52)$$

下限値 ξ が既知の場合

$$k = \frac{(\lambda_1 - \xi)}{\lambda_2} - 2 \quad (3-1-53)$$

$$\alpha = (1 + k)(\lambda_1 - \xi) \quad (3-1-54)$$

e) 正規分布

$$\mu = \lambda_1, \quad \sigma = \sqrt{\pi}\lambda_2 \quad (3-1-55)$$

f) Pearson III型分布

$$\alpha \approx \frac{1 + 0.2906z}{z + 0.1882z^2 + 0.0442z^3}, \quad z = 3\pi\tau_3^2, \text{ for } 0 < |\tau_3| < \frac{1}{3} \quad (3-1-56)$$

$$\alpha \approx \frac{0.36067z - 0.59567z^2 + 0.25361z^3}{1 - 2.78861z + 2.56096z^2 - 0.77045z^3}, \quad z = 1 - |\tau_3|, \text{ for } \frac{1}{3} < |\tau_3| < 1 \quad (3-1-57)$$

α が与えられる場合には次式の方がよい。

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\alpha}} \text{sign}(\tau_3)\lambda_1, \quad \sigma = \lambda_2\sqrt{\alpha\pi}\Gamma\left(\alpha + \frac{1}{2}\right), \quad \mu = \lambda_1 \quad (3-1-58)$$

3) 最尤法

確率密度関数が $f(x) = f(x; \theta)$ で与えられ、母数ベクトルを θ とすると、次式で表される尤度関数

$$L(\theta) = L(\theta, X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{j=1}^n f(X_j, \theta) \quad (3-1-59)$$

を最大にする母数ベクトル

$$L(\hat{\theta}) = \max_{\theta} L(\theta) \quad (3-1-60)$$

を推定値とする手法が最尤法である。通常は尤度関数の自然対数をとった対数尤度関数を最大にすることにより最尤推定量を求める。

1. 3. 3 候補確率分布モデルのスクリーニング

<例 示>

候補モデルの解析対象水文資料への適合度を評価する手法として SLSC (Standard Least Square Criterion) が用いられてきている。SLSC は次式で定義される。

$$\text{SLSC} = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|S_{99} - S_{01}|}, \quad \xi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - s_i^*)^2 \quad (3-1-61)$$

ここに、 s_{99} 及び s_{01} はそれぞれ非超過確率 0.99 と 0.01 に対する当該確率分布の標準変量、 n : 標本の大きさ、 s_i : 順序統計量を推定母数で変換した標準変量、 s_i^* : 確率分布モデルで求めたブ

ロットィング・ポジションに対応するクォンタイルを推定母数によって変換した標準変量である。

SLSC は値が小さいほど適合度が良いと判断される規準であり、これが一定の水準を満たすことによりスクリーニングを行なう。SLSC は 0.04 以下であれば適合度を満足するとして用いられてきている場合が多い。

プロットィング・ポジションとしてはこれまでにいろいろな式が提案されている。水文資料から得られた順序統計量($X_1 \geq X_2 \geq X_3, \dots, \geq X_n$)の i 番目の値の超過確率 p_i は次式により、統一的に表すことができる。

$$p_i = \frac{i - \alpha}{n - 2\alpha + 1} \quad (3-1-62)$$

ここに、 n : 標本サイズ、 α : プロットィング・ポジションを決める定数であり、提案者により異なる。Weibull:0、Blom:0.375、Cunnane:0.4、Gringorten:0.44、Hazen:0.5 等がある。

SLSC を求める際にはプロットィング・ポジションとして多くの分布によく適合する Cunnane プロットがよく用いられている。なお、小標本の場合は、Weibull プロットを用いる手法がある。

なお、SLSC による適合度の評価と併せて適切な確率紙にプロットしてモデルの適合度を確認する手法が用いられている。

<例 示>

確率分布モデルの適合度を確認する手法として、Gumbel 確率紙及び指数確率紙を用いた例を示す。

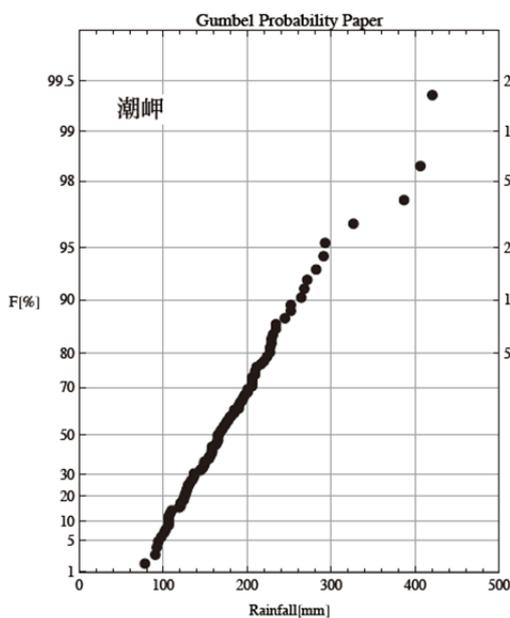


図3-1-1 Gumbel 確率紙の事例
(極値資料)

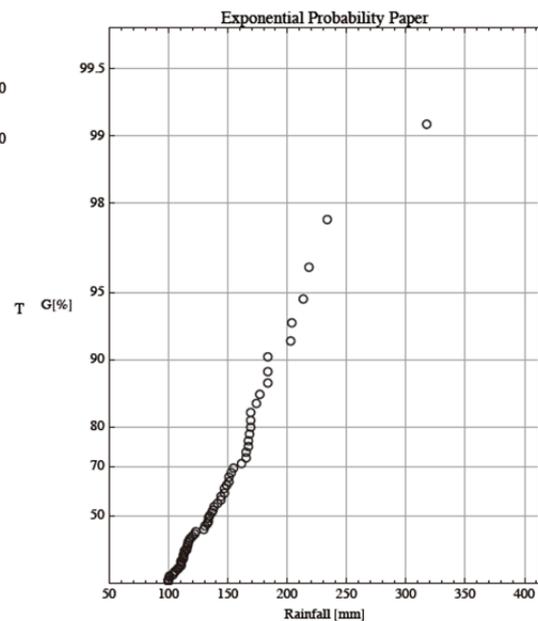


図3-1-2 指数確率紙の事例
(POT 資料)

1. 3. 4 確率水文量のバイアス補正と安定性の評価

<例 示>

一定レベルの適合度を満足する確率分布モデルを対象に、必要に応じてリサンプリング手法を用いることにより、確率分布モデルの確率水文量のバイアスを補正するとともにその安定性

を評価する手法として jackknife 法や bootstrap 法がある。

jackknife 法は大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n - 1$ 個の標本を全ての i について作成し (n セット作成することになる)、これらの標本から求めた統計量をもとに不偏推定値及びそのまわりの推定誤差を算定する手法である。

一方、bootstrap 法は大きさ n 個の標本から重複を許して任意に n 個取り出した標本を複数作成し、これらの標本から求めた統計量を基に不偏推定値及びそのまわりの推定誤差を算定する手法である。

jackknife 法は計算回数が少なく、作成する標本数、不偏推定値及び推定誤差が一意的に定まるのに対し、bootstrap 法は作成する標本数が任意に設定でき、作成する標本数によって不偏推定値や推定誤差が異なる。両手法によるバイアス (偏倚) 補正量は、bootstrap 法のバイアス補正量が jackknife 法のバイアス補正量の $(n - 1)/n$ となるが、 n が極端に小さくなければこの差は小さい。

jackknife 法の具体的手順は以下のとおりである。大きさ n の標本の各データを X_1, X_2, \dots, X_n とする。これを用いて求める母集団の特性を推定する統計量を

$$\hat{\psi} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3-1-63)$$

とする。大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n - 1$ 個の標本を用いた統計量を

$$\hat{\psi}_{(i)} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n) \quad (3-1-64)$$

とする。 $\hat{\psi}_{(i)}$ は $i = 1, 2, \dots, n$ に対して求まるので n 個求まることになる。

$\hat{\psi}_{(i)}$ の平均値を

$$\hat{\psi}_{(c)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\psi}_{(i)} \quad (3-1-65)$$

により求める。バイアス推定値は次式で与えられる。

$$\widehat{\text{BIAS}} = (n - 1)(\hat{\psi}_{(c)} - \hat{\psi}) \quad (3-1-66)$$

これを用いて統計量のバイアスを補正した jackknife 推定値は次式で与えられる。

$$\tilde{\psi} = \hat{\psi} - \widehat{\text{BIAS}} = n\hat{\psi} - (n - 1)\hat{\psi}_{(c)} \quad (3-1-67)$$

また、jackknife 法による推定誤差分散は、

$$\widehat{\text{VAR}} = \frac{n - 1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\psi}_{(i)} - \hat{\psi}_{(c)})^2 \quad (3-1-68)$$

で求められる。

jackknife 法を適用しない場合の統計量が $1/n$ のオーダーのバイアスを有しているのに対し、(3-1-67) で示される jackknife 推定値のバイアスは $1/n^2$ のオーダーであり、jackknife 法によるバイアスの補正が有効である。

1. 3. 5 確率分布モデルの決定

<例 示>

適合度の基準を満足する確率分布モデルを用いる方法がある。

確率分布モデルを選択する場合には、適合度の基準を満足するものの中から安定性の良好な

確率分布モデルを採用する方法がある。この場合、本節の 1.3.4 で求められた確率水文量の推定誤差分散の平方根である推定誤差を指標とし、相対的にこれが小さい確率分布モデルを選択する方法が考えられる。

超過確率若しくは非超過確率に対応する確率水文量又は任意の規模の変量に対応する超過確率若しくは非超過確率は、用いることとした確率分布モデルから推定する。

任意の規模の変量 x に対応する非超過確率 F を求めるには確率分布関数 $F(x)$ の x に単に代入すればよい。超過確率は $1 - F$ で求めることができる。超過確率の逆数が再現期間 (return period) である。

$$\text{Return Period} = \frac{1}{1 - F} \quad (3-1-69)$$

確率水文量を求めるには、用いることとした分布の確率分布関数 $F(x)$ を変量 x について解いた式に、非超過確率 F を代入して確率水文量を求める。年最大値等の極値資料を対象とする分布の確率水文量を求めるための例を以下に示す。

1) Gumbel 分布

$$x(F) = \xi - \alpha \cdot \log(-\log(F)) \quad (3-1-70)$$

2) 一般極値分布

$$x(F) = \xi + \alpha \{1 - (-\log(F))^k\} / k \quad (k \neq 0) \quad (3-1-71)$$

POT の閾値を超える変量、その非超過確率を表す確率分布関数 $G(x)$ 及び年最大値資料の確率分布関数 $F(x)$ の間には次式の関係がある。

$$F(x) = \exp\{-\lambda(1 - G(x))\} \quad (3-1-72)$$

ここに、 λ は閾値を超える事象の年間発生率である。この式を $G(x)$ について解き、年最大値資料の非超過確率 F に対応する非超過確率 G を次式で求め、これを(3-1-12)や(3-1-14)の $F(x)$ の代わりに置き換えて x について解けば、(3-1-74)や(3-1-75)になり、年最大値資料を対象とした再現期間に対応する確率水文量を求めることができる。

$$G = 1 + \frac{\log(F)}{\lambda} \quad (3-1-73)$$

3) 指数分布

$$x(F) = \xi - \alpha \cdot \log\left(-\frac{\log(F)}{\lambda}\right) \quad (3-1-74)$$

4) 一般 Pareto 分布

$$x(F) = \xi + \alpha \left\{1 - \left(-\frac{\log(F)}{\lambda}\right)^k\right\} / k \quad (k \neq 0) \quad (3-1-75)$$

5) 正規分布

正規分布の確率分布関数の逆関数は陽には表せないので、標準正規分布表を用いるか、誤差関数の逆関数を用いるなどして確率水文量を求める。

1. 3. 6 確率分布モデルの決定に関する補足事項

<例 示>

本節の 1. 3. 5 の確率分布モデル選定において判断が難しい場合は、赤池の情報量基準(AIC)による評価も併せて用いる手法が考えられる。

AIC は次式で定義される。

$$AIC = 2m - 2MLL \quad (3-1-76)$$

ここに m は母数ベクトルの次元数 (母数の数) である。MLL は最大対数尤度

$$MLL = \sum_{i=1}^n \log[f(X_i, \hat{\theta})] \quad (3-1-77)$$

であり、母数ベクトル $\hat{\theta}$ は最尤推定量であるが、L 積率を用いて母数推定した場合にはその母数ベクトルを代わりに用いる。

一般に母数の数が多くなると分布の適合度はよくなる。AIC は母数の数を考慮していることが適合度のみを評価する他の規準とは異なる。AIC の値が小さいほどよいモデルであると判断される。

<参考となる資料>

本基準に従い水文頻度解析を実施する際には、下記の資料が参考となる。

- 1) 岩井重久, 石黒政儀: 応用水文統計学, 森北出版, 1970.
- 2) 角屋 睦: 水文統計論, 水工学シリーズ, 土木学会水理委員会, 64-02, p. 59, 1964.
- 3) 高橋倫也: 極値統計学, 統計数理研究所, 公開講座資料, p. 57, 2008.
- 4) 宝 馨: 水文頻度解析の進歩と将来展望, 水文・水資源学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 740-756, 1998.
- 5) 星 清: 水文頻度解析, 水文・水資源ハンドブック, 7. 3, 水文・水資源学会編, 朝倉書店, pp. 238-248, 1997.
- 6) Stedinger, J.R., R.M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou: Frequency Analysis of Extreme Events, Chap. 18, *Handbook of Hydrology*, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York, pp. 18.1-18.66, 1993.
- 7) 林敬大, 立川康人, 椎葉充晴, 萬和明, Kim Sunmin: SLSC による水文頻度解析モデル適合度評価への統計的仮説検定の導入, 土木学会論文集, Vol. 68, No. 4, pp. 1381-1386, 2012.
- 8) 葛葉泰久: 治水計画策定における統計的手法—SLSC 及び費用便益分析に関する考察—, 土木学会論文集, Vol. 66, No. 1, pp. 66-75, 2010.

1. 4 非定常な水文量の頻度解析

<例 示>

定常とみなせない場合の水文量の頻度解析として、以下の手順による方法が考えられる。

- 1) 水文資料の周期性やジャンプの有無を検討し、これらを含まない水文資料とする。
- 2) 水文時系列資料の統計特性の時間的変化がモデルの中に組み込まれた確率分布モデルの母数を推定し、確率評価を行う。例えば、年最大値等の極値資料を扱う一般極値分布の場合や POT 資料を扱う一般 Pareto 分布の場合、位置母数、尺度母数及び形状母数の 3 母数で表されるが、そのうち、位置母数及び尺度母数が時間的に変化するモデルを考える。

$$\xi(t) = \beta_0 + \beta_1 t \quad \text{又は} \quad \xi(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (3-1-78)$$

$$\alpha(t) = \exp(\beta_3 + \beta_4 t) \quad (3-1-79)$$

このような母数の中のパラメータを最尤法で解くことにより、時系列変化を表す確率分布モ

デルを推定する。

<参考となる資料>

時系列資料の統計特性の時間的変化をモデルの中に組み込んだ確率分布モデルの詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) Coles, S.: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer, p. 208, 2001.
- 2) 高橋倫也：極値統計学，統計数理研究所，公開講座資料，p. 57，2008.

1. 5 時系列変化特性の解析

<考え方>

水文現象には時間的にある程度規則性を持ちつつ徐々に平均や分散等の統計的特性が変化すると考えられるものが多い。時系列解析はこの時間変化の特性を定量的に明らかにすることを目的とした解析法を総称したものであり、以下の方法が考えられる。

時系列現象の変化状態を大別すると、一般に長期的傾向変化（トレンド）、周期性変化、持続性変化及び偶然性の変化に分けられる。これらの特性を定量的に明らかにする場合には、それぞれに対応した解析方法が必要である。

気候変化等の影響を受け解析対象水文資料の統計的特性が経年的に変化していると判断される場合の水文頻度解析には、本節の 1. 4 の非定常性を考慮した検討を行う。

なお、水文資料の統計的特性は観測期間により経年的な変化の有意性が異なるため、観測期間の取り方を変えた評価を行うなど慎重な検討が必要である。

<例 示>

水文時系列資料の時間経過に対する状態の傾向を把握する方法として、次に示す事項のいずれかの方法又はこれらを組み合わせた方法が考えられる。

- 1) 経過時間と、対応する水文資料の値を図化整理（時系列図）して、直接その変化状態を見る。
- 2) 資料の値について移動平均値を求め、その時間的な変化傾向を見る。
- 3) 任意の時間区分によって資料を数群に分け、それぞれの群についての観測値の平均値、分散、系列相関係数等の統計量を求め、それから推定される母集団の特性値について、各群の値を比較する。
- 4) コレログラム（時系列相関図）を作成して、周期性変化及び持続性変化の傾向の有無を見る。

図 3-1-3 に 1876 年から 2010 年までの東京の年降水量とこれを 11 年で移動平均したものを示す。

この事例について全期間を対象に Mann-Kendall 検定を行うと $Z = -0.36$ となり、定常であるという仮説は有意水準 5% で判断すると棄却されないの有意な減少傾向とはいえない。

図 3-1-4 は同期間の年最大日雨量の推移を示したものである。

図 3-1-4 の水文資料について観測開始から 25 年経過した 1900 年から 2010 年までを対象に Mann-Kendall 検定を行った結果を図 3-1-5 に示す。

この図から横軸が 1950 年付近に $Z > 1.96$ となっている部分が見られる。この部分は 1876 年から 1950 年ごろまでのデータで判断すると有意水準 5% で判断すると定常であるという仮説は

棄却されることを示している。しかし、その後のデータの蓄積で、2010年までの全てのデータを用いると $Z=1.18$ となり、同仮説は棄却されない。

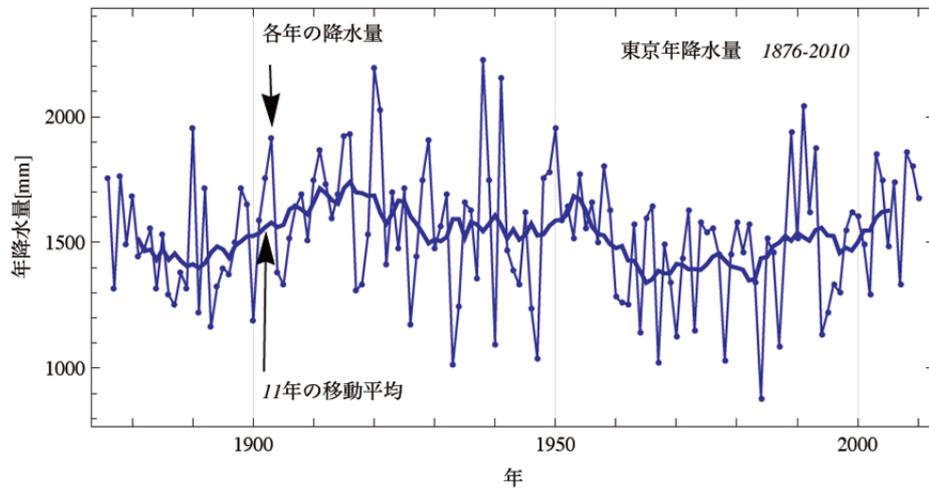


図3-1-3 東京の1876-2010の年降水量と11年の移動平均（太線）

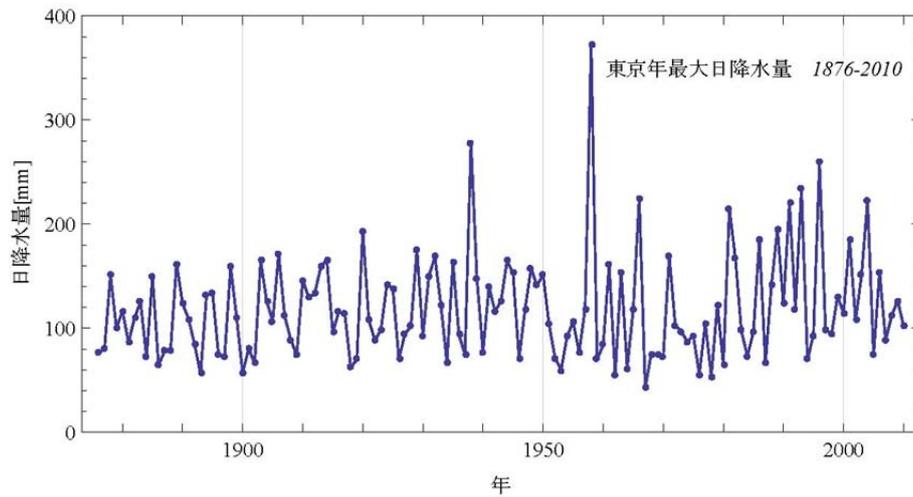


図3-1-4 東京の1876-2010の年最大日降水量

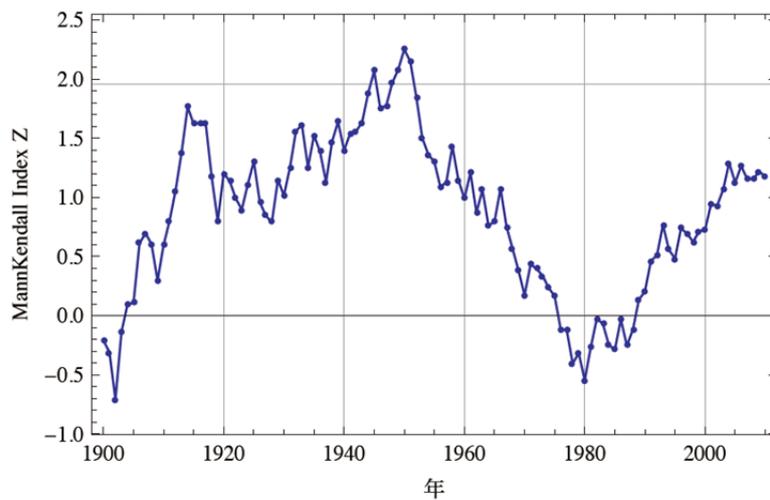


図3-1-5 東京の1876-2010の年最大日降水量のトレンド評価

図 3-1-6 は東京の1876年から2010年までの月降水量のコログラムを示したものであり、

12 か月の周期性がはっきり現れているのが分かる。

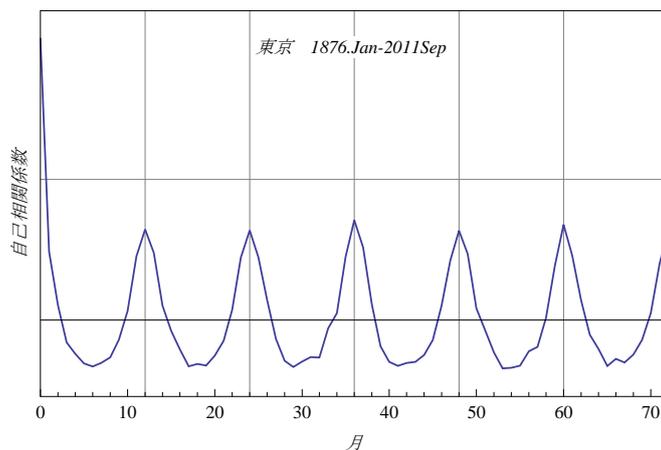


図3-1-6 東京の1876-2010の月降水量のコレログラム

コレログラムのパターン形状の特徴、すなわち時系列変化の特徴はおおよそ図 3-1-7 のように分類することができる。

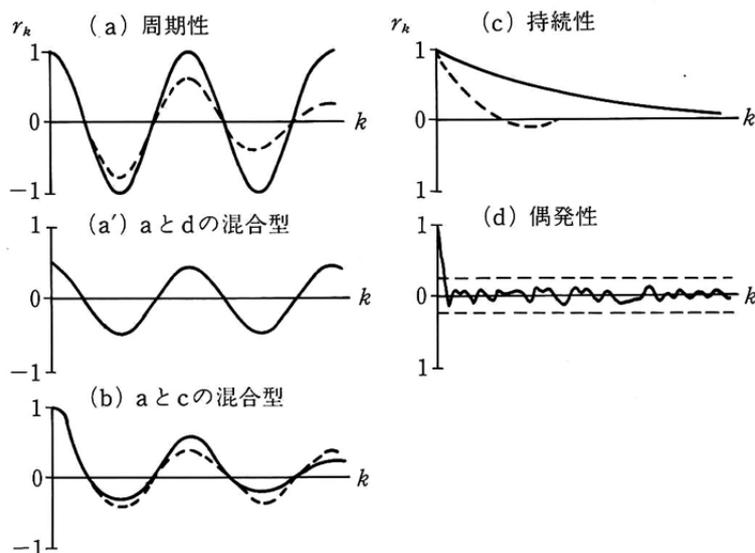


図3-1-7 時系列変化のパターン

- ① ほとんど完全な周期性 (a) ② 持続性 (減衰傾向) (c)
 周期性と偶発性の混合型 (a') ③ 純偶発性 (d)
 周期性と持続性の混合型 (b)

なお、周期性の理由が明確でない場合、コレログラムによる完全な周期性の判断基準としては、水文資料全期間の中に数サイクル以上周期が含まれていること等が考えられる。

更に、詳細に時系列変化の特性を求める場合には、おおよそ以下に示す方法の 1 つ又はそれらを組み合わせた方法によって基本的な解析を行ってもよい。

- 1) 時間に関する 1 次式又は多次式をあてはめた回帰分析によって傾向変化曲線 (トレンド) を推定する。
- 2) 周期解析 (又はピリオドグラム解析) 等の方法によって、周期変化成分の特性を求める。

- 3) コレログラム解析その他の方法によって、周期成分の変化及び持続性変化の特性を求める。
- 4) もとの時系列変化を上記1)ないし3)で求められる規則的変化成分と残りの不確定な変化成分に分ける。後者についてはその分布特性及び生起特性についての解析を行う。

第3章 水文解析 第2節 流出解析

目次

第2節	流出解析	1
2.1	総説	1
2.1.1	流出解析の目的	1
2.1.2	流出モデルの種類と特徴	1
2.2	洪水流出計算	2
2.2.1	総説	2
2.2.2	洪水流出モデルの選定	3
2.2.3	水文資料及び流域特性資料の収集と整理	3
2.2.4	洪水流出モデル構造の決定と入力する降雨の算出	4
2.2.5	洪水流出モデルの定数解析と検証	6
2.2.6	洪水流量の計算	7
2.3	低水流出計算	7
2.3.1	総説	7
2.3.2	蒸発散量の計算	7
2.3.3	取水・還元量等の推定	8
2.3.4	積雪・融雪量の推定	9
2.4	主要な流出モデルの事例	10

第3章 水文解析

第2節 流出解析

<考え方>

本節は、河川等の調査で行う流出解析に必要な技術的事項を定めるものである。

流出解析に用いる流出モデルは多種多様であり、また、次々と新たな流出モデルや解析手法が考案されている。そのため、本節は、河川等の調査で行う流出解析に共通する技術的事項について記載するとともに、河川等の調査で適用実績のある代表的な流出モデルを例示する。

2. 1 総説

2. 1. 1 流出解析の目的

<考え方>

河川等の調査で行う流出解析の目的は、一般に、以下のように大別できる。

- 1) 河川等の計画や河川管理施設等の設計のための河川流量の計算
- 2) 実時間での河川流量（特に洪水時の流量）の予測
- 3) 長期の河川流量の計算
- 4) 流域や気候の変化に伴う水循環の変化の予測
- 5) 水文観測が十分でない流域の長期又は洪水時の河川流量の計算
- 6) 流出現象のより深い理解のための解析

本節では、特に断りのない限り、1) 河川等の計画や河川管理施設等の設計のための河川流量の計算、又は3) 長期の河川流量の計算の目的での流出解析について記述する。

<参考となる資料>

流出解析の目的分類とその解説の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 池淵周一，椎葉充晴，宝馨，立川康人：エース 水文学（エース土木工学シリーズ），朝倉書店，pp.125-126，2006.
- 2) 日本学術会議：回答 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価，p. 3，平成23年9月1日.

<必須>

流出解析の方法・手順は、流出解析の目的や利用可能な資料等に応じて適切に設定しなければならない。

2. 1. 2 流出モデルの種類と特徴

<例示>

流出モデルは視点ごとにさまざまな分類が可能である。代表的な分類例とそれぞれの特徴を以下に示す。

- 1) 予測期間からみた分類
 - ・ 短期流出モデル
 - ・ 長期流出モデル

短期流出モデルは、洪水流出モデルとも呼ばれ、数時間から数日の流出現象を計算するモデルである。数日の河川流量を1時間単位又はそれよりも短い時間単位で計算する。この場合の

流出モデルは、斜面流出過程と河道網での流れのモデル化が流出モデルの主要部分となり、蒸発散過程は短期流出モデルに導入しないことが多い。一方、長期流出モデルでは、積雪・融雪や蒸発散の過程を適切にモデルに反映させることが重要となる。

2) 降雨一流出の応答の考え方からみた分類

- ・ 応答モデル
- ・ 概念モデル
- ・ 物理モデル

応答モデルは、入出力の応答関係から降雨流出の関係式を構成するモデルである。

概念モデルは、現象を概念的に捉え降雨流出の関係式を構成するモデルである。過去の長期間の降雨と河川流量の水文資料が存在し適切にモデルの定数を設定できれば、比較的精度よく河川流量を予測できる。また、計算負荷が小さいという特徴を有する。

物理モデルは、物理的な法則性に基づいた基礎式から降雨流出の関係式を構成するモデルである。土地利用や流域環境の変化をモデルに表現することができる。

3) モデルの空間的な構成方法からみた分類

- ・ 集中定数系モデル（集中型モデル）
- ・ 分布定数系モデル（分布型モデル）

集中定数系モデルは、ある対象地点の流量の計算を行うとき、対象地点上流の流域を単位としての流出過程を流域全体で平均化するモデルである。

分布定数系モデルは、降雨時の時空間観測データを取り込み、地形・地質・地被等の地域情報の分布を考慮し、水文量の時空間分布を計算できるような構造のモデルである。

<参考となる資料>

流出モデルの分類と特徴の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 池淵周一，椎葉充晴，宝馨，立川康人：エース 水文学（エース土木工学シリーズ），朝倉書店，pp.188-191，2006.
- 2) 日本学術会議：回答 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的評価，p.3，平成23年9月1日.

2.2 洪水流出計算

2.2.1 総説

<考え方>

洪水流出計算は、一般的に以下の手順で実施される。

- 1) 流出モデルの選定
- 2) 水文資料及び流域特性資料の収集と整理
- 3) 流出モデル構造の決定及び入力する降雨の算出
- 4) 流出モデルの定数解析と検証
- 5) 流量の計算

ただし、洪水流出解析の目的や利用できる水文観測資料の制約、用いる流出モデル等により、この手順は簡略化される場合もある。例えば、合理式を用いる場合は、3)、4)が省略されることがある。

2. 2. 2 洪水流出モデルの選定

<標準>

洪水流出モデルは、洪水流出解析の目的や必要とされる水文資料の有無等に応じて、適切な流出モデルを選定し、必要に応じて改良を加えることを標準とする。

例えば、水循環健全化の検討で流域の都市化が流量に与える影響の予測が必要となる場合、流域変化前後の流出特性を表現できる流出モデルを選定する。

<例示>

洪水流出モデルの選定に当たり、モデルの頑健性（異なる洪水事象におけるモデルの適用性）や十分な適用実績を考慮している例が多い。

合理式は、土地利用に応じた定数の標準値の調査事例が豊富であり、過去の流量資料がない小さな流域での洪水のピーク流量の計算手法として長年の適用実績を有する。

貯留関数法は、我が国における洪水流出に対し高い再現性を有し、広く利用されている。

タンクモデルは、世界の多様な気候条件や流域特性を持つ流域での流出予測に適用された実績を有する一方、多くの定数を過去の水文資料から試行錯誤で求めなければならない。

一般的に、モデル定数の数が多いと再現性は高まる一方で、頑健性が低下する。数多く開発されている分布定数系モデルは、運動方程式に物理式を適用することにより頑健性を損なわない工夫がなされている。

2. 2. 3 水文資料及び流域特性資料の収集と整理

<考え方>

洪水を対象とする水文資料及び流域特性資料は、流出解析の精度を高める観点から、できる限り収集する。また、収集した資料の整理は、用いる流出モデルの構造に適合するように行う。

<標準>

解析対象地域内とその近傍の雨量、水位、流量観測記録をできる限り収集し、洪水ごとに資料の存否を整理することを基本とする。

雨量資料については、対象河川流域内の雨量資料だけでは雨量の時空間分布を適切に再現できない場合もあり得ることから、その周辺近傍地域において得られる全ての雨量資料を降雨原因を含めて収集することを基本とする。

流量資料については、流量の観測方法を明示するものとする。

<標準>

観測流量が貯水池での調節等の人為的影響や洪水時の外水氾濫等の偶発的影響を受ける場合、流出解析の目的に応じた適切な方法でこれらの影響を考慮することを標準とする。

<例示>

流域平均雨量と観測流出高の時系列変化図を作成することで、洪水事象ごとの降雨と流出の関係の特徴を把握する方法がある。

<推奨>

必要に応じ、水文資料の照査に利用可能な関連資料を整理する。

天気図等の気象情報、レーダ雨量、浸水被害や土砂災害等の災害記録は雨量資料の精度の把握に、また、観測所以外の地点で特定の期間に調査された水位、流量、水位痕跡等は観測所で

の流量資料の精度の把握に役立つことが多い。

<推 奨>

必要に応じ、当該流域の地形、地質、土地利用、土地被覆等の資料を収集、整理し、流域分割の妥当性の検討や流出モデルの定数解析、流出計算結果の分析等に活用することを推奨する。

2. 2. 4 洪水流出モデル構造の決定と入力する降雨の算出

<標 準>

洪水流出計算では、当該河川流域を流出計算の基本単位（小流域や小区画など）に分割し、河道モデルにより連結し計算することを基本とする。その際には、洪水流の伝播や河道貯留の影響等の取扱いに留意しなければならない。

<標 準>

洪水流出計算における河道の洪水波を追跡する場合の河道計算方法は、流域の基本単位の流出モデルの精度と整合のとれた手法を、河川における洪水波の伝播に伴う水量の変化を知ることが目的とした次元の解析手法から選定することを標準とする。

<例 示>

洪水流出計算における河道計算方法は、水理的追跡法と水文学的追跡法に大別できる。

水理的追跡法は、次元開水路流れの運動方程式を、差分法や特性曲線法などの数値計算法により数値解を得る手法であり、河川の断面の水理学的特性に関する情報が必要となる。開水路流れの運動方程式においてどの項まで考慮するかによって、いわゆる不定流計算であるダイナミック・ウェーブモデルから、拡散波モデル、キネマティック・ウェーブモデルまでの選択肢がある。

水文学的追跡方法は、河道区間への流入と流出の応答関係を数式化する手法であり、更に以下のように分類できる。

- 1) ある河道区間内の水体の連続方程式と運動方程式（貯留関数）を用いる方法
- 2) 洪水波の伝播速度（遅れ時間）を設定する方法
- 3) 洪水流の水位の相関を利用する方法

1)の方法としては、貯留関数法、Muskingum 法等がある。貯水池内の洪水追跡法として、河道区間の水体の水面が一様に昇降する場合の貯留関数法に相当する貯水池モデルがある。これらの定数は、河道区間の横断面形状等の水理学的情報から求めることができる。

2)の方法としては、Manning 式や Chezy 式といった等流式を用いる方法、合理式の洪水到達時間を求める式を用いる方法、貯水池などにおける長波の伝播速度を用いる方法がある。水理・水文学的情報が限定された条件下において簡易的に計算を行いたい場合に有用である。

3)は、洪水流出計算の対象地点以外の地点で水位予測を行う場合や、実時間洪水予測等で用いられる方法である。

<参考となる資料>

集中定数系モデルによる洪水流出計算での河道計算方法は、下記の資料が参考となる。

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，pp. 119-125，社団法人土木学会，1999。

貯留関数法及び Muskingum 法による河道計算における定数の水理学的推定法は、下記の資料が参考となる。

- 2) 橋本宏、藤田光一：洪水追跡法（その2）—洪水追跡モデルの適用限界と未知パラメータの推定法—，土木技術資料 28-8，pp. 442-448，1986.

河道計算方法の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 3) 池淵周一，椎葉充晴，宝馨，立川康人：エース 水文学（エース土木工学シリーズ），朝倉書店，pp.125-126，2006.

< 必 須 >

流出モデルに入力する雨量は、流出モデルの流域の基本単位ごとの面積平均雨量とする。面積平均雨量の算出に当たっては、流域内の地形性降雨の地域分布特性、年代により異なる降雨観測所網、欠測状況等を考慮し、最も適切と考えられる方法により行うものとする。

< 例 示 >

面積平均雨量を算出する方法としては、等雨量線法、ティーセン法、算術平均法、支配圏法、高度法、代表係数法等がある。

< 参考となる資料 >

等雨量線法、ティーセン法、算術平均法、支配圏法、高度法については、下記の資料が参考となる。

- 1) 日本学術会議：回答 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的評価，pp. 27-28，平成 23 年 9 月 1 日.

代表係数法については、下記の資料が参考となる。

- 2) 木村俊晃：相関関係の解析を基礎とした流域平均雨量の算定法，土木技術資料 2-5，pp. 173-179，1960.

< 例 示 >

レーダ雨量計解析処理データが地上雨量計による観測雨量から算出される雨量より高精度と判断できる場合、これを幾何補正して入力値とする方法がある。

また、過去観測された気象情報と気象数値モデルを用いて過去の気象を詳しく解析する同化解析の結果である「再解析データ」から降雨量を抽出し利用する方法も研究されている。

< 例 示 >

実時間洪水予測において流出モデルに入力する予測雨量が必要な場合、地点での降雨予測値から面積平均雨量を算出し入力する方法や気象数値予測結果を入力する方法がある。

< 参考となる資料 >

実時間洪水予測については、下記の資料が参考となる。

- 1) 財団法人河川情報センター：中小河川における洪水予測の手引き，2012.

< 標 準 >

洪水流出計算では、流域での雨水の損失・保留機能を内蔵するものは別として、直接流出（表

面流出＋中間流出)成分を計算対象とすることを標準とする。一つの洪水事象での総有効降雨量は、直接流出成分の総量に等しくなる。直接流出成分は、観測ハイドログラフの基底流出成分の分離により求めることを標準とする。流出成分の分離方法として、洪水立ち上り点で水平に分離する方法、ハイドログラフ逓減部の折曲点と洪水立ち上り点を結んだ線で分離する方法等がある。

<参考となる資料>

流出成分の分離の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，p. 36，社団法人土木学会，1999.

<例 示>

有効降雨に関する定数は、観測資料から得られる洪水期間の水収支に基づき求めることができる。

また、降雨の初期に凹地等に貯留される効果が水収支等から認められる場合、これを有効降雨の算出に組み入れた計算法を用いることができる。

<参考となる資料>

有効降雨の算出手順の考え方については、下記の資料が参考となる。

- 1) 日本学術会議：回答 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的評価，pp. 5-6，平成 23 年 9 月 1 日。

2. 2. 5 洪水流出モデルの定数解析と検証

<考え方>

洪水流出モデルの定数解析、検証のための洪水事象は、過去の記録を超える洪水のピーク流量の予測、大洪水から中小洪水までのハイドログラフの再現等の流出計算の目的や利用できる観測資料等を勘案して選定する。

定数解析が適切に行われたことは、観測流量と計算流量を比較することで確認する。

検証用の洪水事象は、定数解析用と異なる洪水事象を選定することが望ましいが、大洪水等の事象数が限られる場合、当該流出モデルが様々な流域で検証された実績を有することをもって検証を省略し、より多くの洪水事象を定数解析に用いることによりその精度を向上させるものとする。

<必 須>

洪水流出モデルの定数解析は、観測資料の精度に大きく依存するので、流域平均雨量等の入力値又は観測流量の精度が著しく低いと判断される場合、定数解析対象から除外するものとする。

<標 準>

洪水流出モデルの定数解析に当たっては、例えば大洪水のピーク流量の再現といった流出計算で再現しようとする事象について、複数の洪水事象のピーク流量を適切に再現できるよう対象洪水を選定することを標準とする。ただし、個別の洪水事象の現象の理解など特定の目的の場合はその限りではない。

<推 奨>

洪水流出モデルの定数解析に当たっては、できるだけ多くの洪水事象を対象とすることが望ましい。

<例 示>

計算流量と観測流量との適合度を定量的に示す数値指標としては、ピーク流量付近の誤差に重みをおく評価基準、相対基準、相対2乗基準、Nash-Sutcliffe 効率等がある。

<参考となる資料>

適合度を示す各数値指標については、下記の資料が参考となる。

- 1) 望月邦夫：淀川の治水計画とそのシステム工学的研究，1971.
- 2) 角屋睦, 永井明博：流出解析法（その11），農業土木学会誌 44(11)，pp.851-856，1980.
- 3) Nash J. E. and Sutcliffe, J. V. : River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles, Journal of Hydrology, 10, pp. 282-290, 1970.

2. 2. 6 洪水流量の計算

<考え方>

流量の計算は、同定された流出モデルに降雨を入力して行う。

2. 3 低水流出計算

2. 3. 1 総説

<考え方>

低水流出解析の一般的手順は、基本的に洪水流出解析の手順と同じである。以下、洪水流出解析とは異なる項目について記述する。

<考え方>

流量は1950年代以降の記録が多いが、雨量の記録は相当長期にわたって存在する。低水流出計算は、流量未観測期間の流量資料の補完（復元）の目的で利用されることが多い。

<標 準>

低水流出解析は、通常、日単位あるいは半旬単位で行うことを標準とする。

<標 準>

日平均流量(m^3/s)を流出高(mm/day)に変換する際、日雨量、日流量の日界を把握し、流出計算時の留意事項として記録する。例えば、日流量は、自記水位記録の観測所の場合は1時から24時までの毎正時の流量の平均、水位標の観測所の場合は通常6時及び18時の流量の平均である。

2. 3. 2 蒸発散量の計算

<標 準>

低水流出計算では、降雨及び融雪を入力し、これから損失を差し引いた量が時間をかけて流出すると考え、これを追跡計算するのが一般的である。損失は、蒸発散による大気への水移動、流域貯留量変化、深層地下水帯水層を通した流域外への流失である。河川流域を対象とする場合は、通常、最後の流失は無視できると考えるのが一般的である。また、1水文年の始まりと終

りでは、流域貯留量変化は無視できると考え、この間の損失はすべて蒸発散であるとし、1 水文年の水収支に合うように蒸発散量を推定する方法を基本とする。

<標準>

蒸発散量は、可能蒸発散量又は観測蒸発量に水収支から求めた係数を掛けて算出することを基本とする。

水収支が不明な場合は、過去の調査事例から、当該流域への適用が妥当と考えられる係数を適用する。

ただし、上記より精度が高いと考えられる観測が行われている場合は、これも利用する。

<例示>

地表への水分の供給が十分になされると仮定した場合の可能蒸発散量を推定する方法として、多くの式が提案されている。気温と緯度で決まる日照量から推定する Hamon 公式、Thornthwaite 公式といった経験的な公式や、より詳しい微気象観測情報を必要とする Penman 公式、Penman-Monteith 公式などが提案されている。

観測蒸発量は、気象庁等が観測するパン蒸発量が利用できる。

<参考となる資料>

可能蒸発散量の推定法の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，pp. 16-18，社団法人土木学会，1999。

<例示>

河川流域の水収支から求めた日本の平均的な年降雨損失量は、全国平均で約 500mm、北海道で約 400mm、瀬戸内・九州で約 600mm 程度という調査結果が得られた事例がある。

<参考となる資料>

河川流域の水収支から求めた全国の平均的な年降雨損失量の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 建設省技術研究会（編集）：利水計画における流況把握の研究，第 23 回建設省技術研究会報告(昭和 44 年度)，p. 4，1970。

2. 3. 3 取水・還元量等の推定

<考え方>

利水計算目的での低水流出計算を行う際には、貯水池による調節や上流での取水・還元等の人為的影響がない場合の自然流量をあらかじめ算出し、この自然流量を予測する流出モデルを構築する。

<標準>

貯水池による調節、取水・還元量は観測値を利用することを基本とする。

観測資料がない場合は、許可水利権量や河川区域での水収支等の情報から推定するものとする。その情報も利用できない場合は、他河川での調査事例の準用等を行う。

<推奨>

農業用水の取水量の実測値がない場合、以下に挙げる方法等で取水量を推定することが望ま

しい。

1) 水収支法

農業用水取水がないと仮定し計算した河川流量と同一地点での観測流量の差を正味の農業用水取水量（＝農業用水取水量－還元水量）として求める方法。

2) 減水深法

水田その他の農耕地の減水深にその面積を乗じて農業用水量を求め、これを取水量とする方法。

<参考となる資料>

土地改良事業における減水深の計画値に関しては、下記の資料が参考となる。

- 1) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準「計画 農業用水(水田)」, pp. 33-56, 社団法人農業土木学会, 1993.

2. 3. 4 積雪・融雪量の推定

<考え方>

融雪流出が認められる河川流域では、降雪・積雪・融雪量を推定し、融雪が降雨に加算されると考え、流出計算を行うのが一般的である。

<標準>

降水観測は、一般には、降雪・降雨を区別せずに観測されているため、降水時の地上気温観測値から当該地点での地上気温を推定し、降雪・降雨の判別を行うことを基本とする。

積雪量は、降雪量から融雪量を差し引いた量を積算して求める。

融雪量は、気温のみから融雪量を推定する簡易的な方法である積算暖度法（degree-day 法）で求める。より精度を求める場合は、積雪量の熱収支から求める方法等がある。

<参考となる資料>

積算暖度法の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版], p. 27, 社団法人土木学会, 1999.

<例示>

積雪量分布は、衛星や航空機等からのリモートセンシング情報から積雪域を推定し、推定積雪密度から積雪量を推定方法もある。この方法は、降水量から計算した積雪量分布・融雪量推定の妥当性を検証する手段として用いることができる。

積雪層の熱収支から推定される融雪量は、積雪表面での放射収支、顕熱・潜熱収支、降雨により与えられる熱量、積雪底面での土壌からの熱伝導から算出される。これらを気象庁アメダス等の気象観測値から推定する簡易的な熱収支法である「日射量・気温・降水量を用いた融雪モデル」も提案されている。

<参考となる資料>

「日射量・気温・降水量を用いた融雪モデル」の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版], pp. 27-28, 社団法人土木学会, 1999.

2. 4 主要な流出モデルの事例

<例 示>

流出モデルは利用者により適宜改良されることが多くあり、同一名称の流出モデルであっても異なる計算方法をとることもあるため、ここでは河川等の調査で利用実績のある流出モデルについて例示する。さらに、近年開発が進められ実用例も増えつつある分布定数系モデルの一つを例示する。ここに例示した流出モデル以外にも、国内外で多くの流出モデルが提案されている。

1) 合理式

合理式は洪水のピーク流量を推算するための簡便な方法であって、貯留現象を考慮する必要のない河川でピーク流量のみが必要とされる場合に広く用いられている。ピーク流量を推定する諸公式は、一般に流域面積の関数としたものが多い。比流量法の Creager 曲線もその一つであるが、最大流量はもとより流域面積のみの関数ではないから、他のいろいろな要素、例えば降雨強度や流域の植生、傾斜の度合いなどを考慮した流出計算法が必要とされ、また、洪水頻度をも要因の中に入れられれば河川等の計画に当たって更に有用となる。このような点を考慮した簡単な流出計算式として合理式が提案された。これは流域の形を河道に対して対称な長方形と考え、雨水は流域斜面を一定速度で流下し、河道に入るものとする。そして流域の最遠点に降った雨が流域の出口に達するまでの時間を洪水到達時間と呼び、時間内の降雨強度に流域の土地利用に応じた流出係数を乗じて流出量を計算する。

合理式によるピーク流量は次式で与えられる。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} fRA \quad (3-2-1)$$

ここに、 Q_p はピーク流量 (m^3/s)、 f は流出係数、 R は洪水到達時間内の雨量強度 (mm/h)、 A は流域面積 (km^2) である。

合理式は、次の仮定の上で作成されたものであるので、適用に当たっては、これらの仮定にできるだけ近い流出特性を示す流域に用いるように注意しなければならない。

- a) ある降雨強度 R の降雨による流出量 Q は、その強度の降雨が洪水到達時間かそれ以上の時間継続するとき最大になる。
- b) 降雨の継続時間が洪水到達時間に等しいか、それ以上長い、ある降雨強度 R による最大流出量 Q_p はその降雨強度 R と直線関係にある。
- c) 最大流出量 Q_p の生起確率は、与えられた洪水到達時間に対する降雨強度 R の生起確率に等しい。
- d) 流出係数 f はどの確率の降雨に対しても同じである。
- e) 流出係数 f は与えられた流域に降る全ての降雨に対して同じである。

これまでの試験地などにおける調査結果によれば、これらの前提条件に比較的近い流出特性を示す流域として、降雨の浸透や貯留の少ない市街化された流域が挙げられる。一般に流域面積が大きくなると貯留効果が大きくなり、合理式の線形仮定が成立しなくなるので注意しなければならない。適用すべき流域の大きさは 100km^2 程度以下であることが多い。

当該流域特有の流出係数及び洪水到達時間は、過去の水文観測資料から求めることができる。洪水到達時間は降雨強度が最大となる時刻と流出が最大となる時刻の時間差の2倍として求める場合がある。

過去の水文資料がない流域では、流出係数と洪水到達時間を流域の地被、植生、形状、開発状況などを勘案して決定する必要がある。流出係数と洪水到達時間についてはいろいろな値が提案されているが、その一部を示すと次のようである。なお、計画に用いられる流出係数の値については、計画編 第2章も参照することができる。

a) 物部による日本河川の流出係数(物部、1933)

表3-2-1 日本内地河川の流出係数

地形の状態	Fp
急しゅんな山地	0.75~0.90
三紀層山地	0.70~0.80
起伏のある土地および樹林地	0.50~0.75
平らな耕地	0.45~0.60
灌漑中の水田	0.70~0.80
山地河川	0.75~0.85
平地小河川	0.45~0.75
流域の半ば以上が平地である大河川	0.50~0.75

b) 「下水道施設計画・設計指針と解説」の流出係数

表3-2-2 工種別基礎流出係数の標準値(日本下水道協会、2009)

工種	流出係数
屋根	0.85-0.95
道路	0.80-0.90
その他の不透面	0.75-0.85
水面	1.00
間地	0.10-0.30
芝、樹木の多い公園	0.05-0.25
こう配の緩い山地	0.20-0.40
こう配の急な山地	0.40-0.60

基礎流出係数：細分化された基礎工種ごとの流出係数

表3-2-3 用途別総括流出係数の標準値(日本下水道協会、2009)

用途	総括流出係数
敷地内に間地が非常に少ない商業地域及び類似の住宅地域	0.80
浸透面の屋外作業等の間地を若干もつ工場地域及び若干庭がある住宅地域	0.65
住宅公団団地等の中層住宅団地及び1戸建て住宅の多い地域	0.50
庭園を多くもつ高級住宅地域及び畑地等が割合残っている郊外地域	0.35

総括流出係数：工種ごとの基礎流出係数を工種面積比で重付けして平均した流出係数

c) アメリカ土木学会の流出係数 (ASCE、1993)

表3-2-4 アメリカ土木学会の流出係数

土地利用別の総括流出係数*		流出係数の一般的範囲*	
地域の記述	流出係数	地表面の特徴	流出係数
商業地		舗装	
商業区域	0.70~0.95	アスファルトとコンクリート	0.70~0.95
商業地区の近隣	0.50~0.70	レンガ	0.70~0.85
住居地域		屋根	0.75~0.95
1家族住宅	0.30~0.50	砂質土の芝生	
複合住宅、一戸建て	0.40~0.60	平坦 (2%)	0.05~0.10
複合住宅、連棟	0.60~0.75	標準 (2-7%)	0.10~0.15
住居 (郊外)	0.25~0.40	急こう配 (7%より大)	0.15~0.20
アパート	0.50~0.70	重粘土の芝生	
工業区域		平坦 (2%)	0.13~0.17
准工業地域	0.50~0.80	標準 (2-7%)	0.18~0.22
重工業地域	0.60~0.90	急こう配 (7%より大)	0.25~0.35
公園、墓地	0.10~0.25		
プレイグランド	0.20~0.35		
鉄道駅構内	0.20~0.35		
未改良地域	0.10~0.30		

*ここに示す流出係数の値の範囲は、リターンピリオド 2-10 年に対して典型的である。
大きい側の数値は、より大きな設計降雨に適用される。

d) 特定都市河川浸水被害対策法施行規則で規定する流出雨水量の最大値を算定する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数

表3-2-5 特定都市河川浸水被害対策法 (平成 15 年法律第 77 号。以下「法」という。) 第 2 条第 9 項に規定する「宅地等」に該当する土地 (法第 9 条第 1 号関係)

土地利用の形態	流出係数
宅地	0.90
池沼	1.00
水路	1.00
ため池	1.00
道路 (法面を有しないものに限る。)	0.90
道路 (法面を有するものに限る。)	法面 (コンクリート等の不透水性の材料により覆われた法面の流出係数は 1.00、人工的に造成され植生に覆われた法面の流出係数は 0.40 とする。) 及び法面以外の土地 (流出係数は 0.90 とする。) の面積により加重平均して算出される値
鉄道線路 (法面を有しないものに限る。)	0.90
鉄道線路 (法面を有するものに限る。)	法面 (コンクリート等の不透水性の材料により覆われた法面の流出係数は 1.00、人工的に造成され植生に覆われた法面の流出係数は 0.40 とする。) 及び法面以外の土地 (流出係数は 0.90 とする。) の面積により加重平均して算出される値
飛行場 (法面を有しないものに限る。)	0.90
飛行場 (法面を有するものに限る。)	法面 (コンクリート等の不透水性の材料により覆われた法面の流出係数は 1.00、人工的に造成され植生に覆われた法面の流出係数は 0.40 とする。) 及び法面以外の土地 (流出係数は 0.90 とする。) の面積により加重平均して算出される値

表3-2-6 舗装された土地 (法第 9 条第 2 号関係)

土地利用の形態	流出係数
コンクリート等の不透水性の材料により覆われた土地 (法面を除く。)	0.95
コンクリート等の不透水性の材料により覆われた法面	1.00

表3-2-7 その他土地からの流出雨水量を増加させるおそれのある行為に係る土地
(法第9条第3号関係)

土地利用の形態	流出係数
ゴルフ場(雨水を排除するための排水施設を伴うものに限る。)	0.50
運動場その他これに類する施設(雨水を排除するための排水施設を伴うものに限る。)	0.80
ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められた土地	0.50

表3-2-8 表3-2-5から表3-2-7までに掲げる土地以外の土地

土地利用の形態	流出係数
山地	0.30
人工的に造成され植生に覆われた法面	0.40
林地、耕地、原野その他ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められていない土地	0.20

合理式に用いられる洪水到達時間は、流域の最遠点に降った雨がその流域の出口に達するまでに要する時間として定義される。洪水到達時間は当該流域の特性を調査して決定する定数であるが、通常次の2方法で求められている。

- a) 降雨が水路に入るまでの時間(流入時間)と水路の中を下流端に達するまでに要する時間(流下時間)の和として求める方法

これは、都市下水道の設計に用いられてきた方法で、山地や小河川で準用されることもある。

① 流入時間

流入時間は流路に達するまでの排水区の形状や面積の大小、地表面勾配、地被状態、流下距離、降雨強度など多くの要素に支配される。現在、下水道の設計には一般に表3-2-9のような値が用いられている。

表3-2-9 日本とアメリカの流入時間(土木学会、1968)

我が国で一般に用いられている値		アメリカ土木学会
人口密度大なる地区 : 5分	幹線 : 5分	全舗装下水道完備の密集地区 : 5分
人口密度疎なる地区 : 10分	枝線 : 7~10分	比較的勾配の小さい発展地区 : 10~15分
平均 : 7分		平地な住宅地区 : 20~30分

② 流下時間

雨水が流路上流端に流入し、流量算出地点まで達するに要する時間が流下時間である。河道においては通常 Manning の平均流速公式が流下速度を与えると仮定して計算されている。下水道においては、管内の平均流速が用いられるが、平坦地では0.9~1.0m/s、勾配のとれる地域では1.15~1.26m/s、枝線では0.6~0.9m/sが一応の目安として用いられている(土木学会、1968)。

- b) 経験式を用いる方法

洪水到達時間を求める経験式は、いろいろ提案されてきているが、その多くは流路長と勾配を用いた表現となっている。

- ① 洪水到達時間 T を、流路長 L と洪水流出速度 W から求める方法

$$T=L/W \quad (3-2-2)$$

ここで、

L : 流路長(m)

T : 洪水到達時間 (s)

W :洪水流出速度(m/s)であり、表 3-2-10 や式 (3-2-3) 等から求められる。

- ・河谷を流れ下る水の速度 (井口, 1957)

表3-2-10 河谷を流れ下る水の速度の表

I	1/100 以上	1/100~1/200	1/200 以下
W	3.5m/s	3.0m/s	2.1m/s

ここで、 I は流路勾配である。

- ・バイエルン地方で使い慣らされた式 (井口, 1957)

$$W=20(h/L)^{0.6} \quad (3-2-3)$$

ここで、

h : 落差 (m)

- ② 土木研究所での調査による洪水到達時間の式 (吉野・米田, 1973)
都市流域では、

$$T = 2.40 \times 10^{-4} (L/\sqrt{S})^{0.7} \quad (3-2-4)$$

自然流域では、

$$T = 1.67 \times 10^{-3} (L/\sqrt{S})^{0.7} \quad (3-2-5)$$

で表されると報告されている。ここで、 T : 洪水到達時間(h)、 L : 流域最遠点から流量計算地点までの流路長(m)、 S : 流域最遠点から流量計算地点までの平均勾配である。

この公式の適用範囲は都市流域で流域面積 $A < 10\text{km}^2$ 、 $S > 1/300$ 、自然流域で $A < 50\text{km}^2$ 、 $S > 1/500$ である。

2) 貯留関数法

貯留関数法は流域ないし河道をひとつの貯水池と考え、貯留量と流出量の関係 (貯留関数) を運動方程式とし、これを連続方程式と組み合わせて、流出量を追跡する方法である。我が国では、1961年木村によって提案された、浸透域と流出域に分割し流出計算を行う貯留関数法 (木村, 1961; 木村 1975; 建設省水文研究会編, 1962) が広く利用されている。また、浸透域と流出域に分割せず有効降雨を設定して流出計算を行う貯留関数法も用いられている。以上のとおり、貯留関数法は我が国でこれまで多数の流域で適用実績を持っていて信頼性がある方法である。

まず、木村の貯留関数法を説明する。

流域の貯留関数及び連続方程式は、それぞれ下式で表される。

$$s_{\ell} = kq_{\ell}^p \quad (3-2-6)$$

$$\frac{ds_{\ell}}{dt} = r_{ave} - q_{\ell} \quad (3-2-7)$$

ここで、

- s_{ℓ} : みかけの流域貯留高 (mm)
- q_{ℓ} : 遅滞時間を考慮した流域からの直接流出高 (mm/h)
- r_{ave} : 流域平均降雨強度 (mm/h)
- k, p : 流域による定数

を表す。

河道区間の貯留関数及び連続方程式は、それぞれ下式で表される。

$$S_{\ell} = KQ_{\ell}^P - T_{\ell}Q_{\ell} \quad \text{又は} \quad S_{\ell} = KQ_{\ell}^P \quad (3-2-8)$$

$$\frac{dS_{\ell}}{dt} = \sum_{j=1}^n f_j I_j - Q_{\ell} \quad (3-2-9)$$

ここで、

- S_{ℓ} : みかけの河道貯留量 ((m³/s)h)
- Q_{ℓ} : 遅滞時間を考慮した河道区間下流端流量 (m³/s)
- T_{ℓ} : 遅滞時間 (h)
- I_j : 流入量群 (m³/s)、流域、支川等から対象河道区間に流入する量又は河道区間上流端流量
- K, P : 河道による定数
- f_j : 流入係数

を表す。

式(3-2-7)の貯留高 s と流出高 q との関係は既往の洪水流出資料から求められる。一般に流出ハイドログラフの増水部と減水部では s と q の関係は異なるが、遅滞時間 T_{ℓ} を導入してこれを一価関数に近似できるように修正するところに貯留関数法の特色がある。

貯留関数法では流域に対する一つの貯留関数の適用限界で流域面積が決定される。木村は流域面積 10~1,000km²、流路長で 10~100km 程度ならば十分な精度が得られるとしている。これまでの事例ではおおむね 300km² 以下の小流域に分割して計算を行っている例が多い。小流域が大きすぎると流域内の地形や地質に相違が生じたり、河道が長くなることによる河道流下の影響が現れるので、流域での貯留関数の適用に無理が生じる。したがって、対象とする流域面積としては 100km² 前後のものが望ましい。なお、流量検証地点が多く望めない流域では分割を多くすると変動要素を増やすことになるので、結果の妥当性の検証が難しい場合もあることに注意を要する。

木村の貯留関数法では、 f は降雨量 r_{ave} に係る係数ではなく、流域面積 A に係る係数であるとする。すなわち、降雨初期には $f=f_1$ (1次流出率という) として $f_1 A$ の面積(流出域という)だけで流出が発生するとし、累加雨量が R_{sa} (飽和雨量) を超えると $f=1$ (飽和流出率) となって残りの $(1-f_1)A$ の部分(浸透域)からも流出が発生すると考える。ただし、流出域と浸透域とは洪水

の終わりまで別個に流出計算を行うものとし、流出域からの流出量と浸透域からの流出量の和に基底流量を加えた値をもって流域流出量とする。流域からの計算流出量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ は基底流量を加えて次の式で与えられる。

$$Q = \frac{1}{3.6} f_1 A q_1 + \frac{1}{3.6} (1 - f_1) A q_{sa,1} + Q_i \quad (3-2-10)$$

ここで、

- f_1 : 1次流出率
- A : 流域面積 (km^2)
- q_1 : 全降雨による流出高 (mm/h)
- $q_{sa,1}$: 飽和点以後の降雨による流出高 (mm/h)
- Q_i : 基底流量 (m^3/s)

である。

浸透域と流出域に分割せず有効降雨を設定する貯留関数法の計算式は次のとおりである（角屋・永井、1980）。流域の貯留関数は(3-2-6)と同じ式である一方、流域の連続方程式は下式となる。

$$\frac{ds_\ell}{dt} = r_e - q_\ell \quad (3-2-11)$$

ここで、

- s_ℓ : みかけの流域貯留高 (mm)
- r_e : 流域平均有効降雨強度 (mm/h)
- q_ℓ : 遅滞時間を考慮した流域からの直接流出高 (mm/h)

有効降雨の算出はいかなる手法の適用も可能であるが、木村の貯留関数法における一次流出率と飽和雨量の考え方を踏襲し、累加雨量が $R_{sa}(\text{mm})$ に達するまでは流出率を f_1 として、それを超えると流出率は 1 として、 r_e を算出する計算方法をとる場合が多い。流域からの計算流出量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ は基底流量を加えて次の式で与えられる。

$$Q = \frac{1}{3.6} A q + Q_i \quad (3-2-12)$$

ここで、

- q : 計算流出高 (mm/h)
- Q_i : 基底流量 (m^3/s)

3) 等価粗度法 (Kinematic Wave 法)

Kinematic Wave 法 (キネマティック・ウェーブモデル) (末石、1955) とは、河川流路における洪水流下現象を水流の運動法則と連続の関係を用いて水理学的に追跡するものである。この手法を流域斜面における雨水流下現象にも適用したものが、ここで説明する等価粗度法である。すなわち、流域をいくつかの矩形斜面と流路が組み合わされたものとみなし、これらの斜面か

らの流出現象を Manning 型の平均流速公式で表現し、この斜面と流路を組み合わせた流域からの流出ハイドログラフが実測ハイドログラフに近づくように粗度係数を決定する。このことから、流域に適用した Kinematic Wave 法は等価粗度法とも呼ばれる。

複雑な流域斜面からの流出現象はモデル化して取り扱えるが、等価粗度法(Kinematic Wave 法)を実河川に適用するには、対象とする河川が比較的急勾配で、かつ、降雨強度が大きく流出現象が洪水流出により生じていることが必要である。中間流や地下水流出が支配的な洪水では、逓減特性を近似することが難しく、妥当な結果を得られない場合がある。また、支川の合流点その他で河道をある区間ごとに分割したとき、その区間内では横断面、勾配、粗度、横からの流入量などが流路に沿って一様に近いものと仮定できる必要がある。

以下、等価粗度法による流出計算の基本式について簡単に紹介しておく。

山腹斜面に降った雨の一部は浸透し、一部は地表を流れて小さな水路からやがては大きな水路へと集められていく。この過程を模式的に図示したものが図 3-2-1 である。流出計算は有効降雨による斜面からの流出量 q を求め、これを横流入量とする河道内の流量 Q を計算することにより行われる。考えている流域外から水路上流端へ供給される水量、あるいは降雨の始まる前から河道に既に流れていた流量などがある場合には、それぞれ境界条件及び初期条件として考慮に入れる。

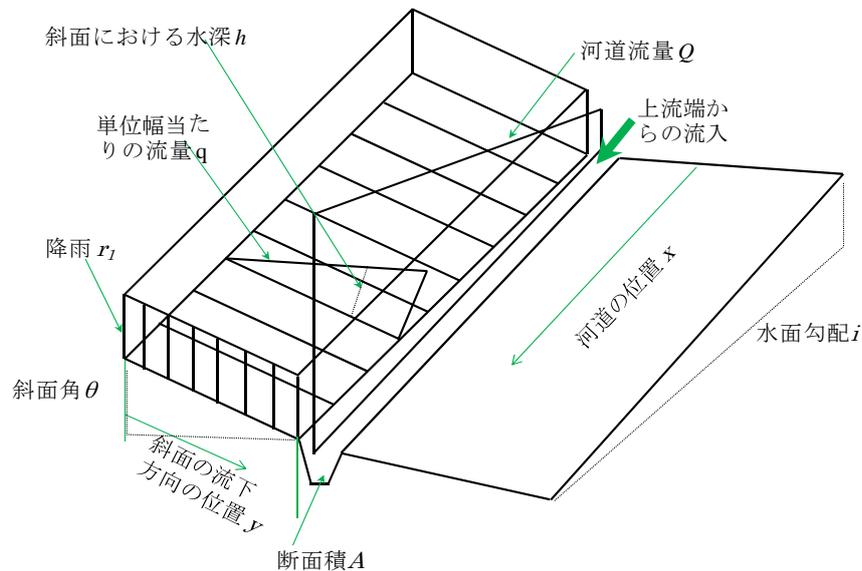


図3-2-1 等価粗度法における流域斜面及び河道のモデル

いま、図 3-2-1 のように斜面から河道へ時間的に変動する横流入量 $q(t)$ がある場合、流れが定常に近いものと仮定すれば、河道内の運動方程式と連続方程式はそれぞれ次のように表現される。

$$i - i_f = 0 \tag{3-2-13}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(t) \tag{3-2-14}$$

ここで、 i は水面勾配、 i_f は摩擦勾配、 A は流水断面積、 Q は断面平均流量、 x は河道の流下方向の位置である。運動方程式の解として定常等流における抵抗法則、例えば Manning の式を代入すれば式(3-2-13)から、

$$Q = Av = AR^{2/3}i^{1/2} / n \quad (3-2-15)$$

が得られる。

流路における径深 R と断面積 A との関係が、 K' 、 Z を定数として、

$$R = K'A^Z \quad (3-2-16)$$

と表されると仮定すれば、式(3-2-15)は次のように書き換えられる。

$$A = KQ^p \quad (3-2-17)$$

ここに、

$$p = 3/(2Z + 3)、K = (n/i^{1/2}K'^{2/3})^p \quad (3-2-18)$$

である。

このように河道内の流れをモデル化すれば、式(3-2-14)と式(3-2-17)を適当な境界条件、初期条件の下に解けばよいことになる。

これと同様な考えをモデル化された流域斜面にも適用すれば、その流れは次式で表現できることになる。

$$h = kq^p \quad (3-2-19)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial y} = ar_1 \quad (3-2-20)$$

ここに、 h は水深、 q は単位幅当たりの流量、 y は斜面の流下方向の位置、 r_1 は有効降雨強度、 a は単位変換定数で r_1 を mm/h、 q を m^2/s とすると、 $a = (1/3.6) \times 10^{-6}$ 、 p と k は定数で、流れに対して Manning 則が成立するときは、

$$k = (N/\sin\theta)^p、p=3/5 \quad (3-2-21)$$

ここに、 N は等価粗度、 θ は斜面傾斜角である。式(3-2-19)、式(3-2-20)は式(3-2-17)、式(3-2-14)と同じ式形であって、これをこのままの形で差分化して数値計算するか、特性方程式上で数値積分すれば解が得られる。

実際の計算に際しては、斜面の粗度係数 N を変化させて計算を行い、実測と計算値がよく一致するとみなされるときに N 値をその流域の等価粗度係数とする。等価粗度係数は流域の分割の仕方によるが $10^0 \sim 10^{-2}$ の値 ($m^{-1/3}s$) をとるものが多い。流域の特性による等価粗度の値としては表 3-2-11 の値が挙げられている。

表3-2-11 流域特性と等価粗度（田岡・日野、1965）

流域の状態	等価粗度 N ($m^{-1/3} s$)
階段状に宅地造成を行った丘陵地帯	0.05
流域の一部(15%)に宅地を含む丘陵地帯	0.1~0.2
階段状田畑主体流域	0.2~0.4
上流山地、中下流に市街地を含む階段状田畑主体流域	0.3~0.5
主として林相のかなりよい山地流域	0.4~0.8
上流丘陵地50%、中流市街地20%、下流低平水田30%の流域	0.6~1.1
排水改良の行なわれていない水田地帯	1~3

等価粗度法は、流域を複数の矩形斜面に区分することから、斜面要素型の分布モデルとみなすことができる。また、上記のとおり、降雨時に生じる表面流出又は早い中間流出を含む直接流出の流れを追跡することが基本である。しかしながら、最近では、山地森林土壌中への浸透に起因した降雨損失や、中間流出や基底流出を含む、様々な遅い流出成分を考慮できるように改良したキネマティック・ウェーブモデルが開発されてきている。

4) 準線形貯留型モデル（土研、1979）

都市化等による土地利用の変化が流出にどのような変化をもたらすかという観点から検討された初期の流出モデルとして準線形貯留型モデルがある。準線形貯留型モデルは、有効降雨モデル、斜面モデル(準線形貯留型モデル)及び河道モデル(貯留関数法等)の3つより構成されている。

有効降雨モデルとしては、1次流出率 (f_l) ~飽和雨量 (R_{sa}) ~飽和流出率 (f_{sa}) モデル等がある。有効降雨モデルでは、損失雨量が土地利用状況ごと(山林、水田、畑、市街地)に異なることを想定し、それぞれ対象流域においてあらかじめ最適化しておく必要がある。

斜面モデルの基本式は、次のように表される。

$$S = Kq \quad (3-2-22)$$

$$r_e - q = \frac{dS}{dt} \quad (3-2-23)$$

$$\text{ただし、} K = \frac{t_c}{2} \quad (3-2-24)$$

ここで、 S : 貯留高(mm)、 q : 流出高(mm/h)、 t_c : 洪水到達時間(h)である。 t_c は、角屋らによる洪水到達時間の経験式と実績の有効降雨強度曲線から決定される。

$$t_p = CA^{0.22} r_e^{-0.35} \quad (3-2-25)$$

ここで、 t_p :式(3-2-24)の t_c を分で表示した洪水到達時間、 r_e : 降雨継続時間内の最大平均有効降雨強度(mm/h)、 A : 流域面積(km²)、 C : 土地利用形態によって定まる定数である。

このようなモデル構成により、1) t_c を通じて斜面上の流れの非線形性が表現できる、2) 土地利用形態の差異による流出の差異を表現できる、3) 当該河川流域内の他の排水計画(下水道、中

小河川等)に使われるモデル(合理式)と共通性がある、という特徴がある。ただし、土地利用形態の差異による流出の差異をよりよくしていくためには、土地利用別の有効降雨及び洪水到達時間の評価に係わる資料を蓄積し、それぞれのモデルを改良していく必要がある。

5) タンクモデル

タンクモデルは図 3-2-2 に示すように、流域を側面にいくつかの流出孔を持つ容器で置き換えて考える流出計算法である(菅原、1972; 菅原、1979)。世界気象機関の概念モデルの比較プロジェクトで、世界の多様な気候下でも高い適用性がある流出モデルと評価され、世界的に多く用いられている(木下、2001)。



図3-2-2 一般的なタンクモデルの構造

雨はタンクモデルの最上段の容器に注入される。2 段目以下の容器は、1 段上の容器の底面の孔から水を受ける。各容器内の一部の水は側面の孔から外部に流出し、一部は底面の孔から直下の容器に移行する。各段の容器の側面の孔からの流出の和が河川の流量となる。

一般的なタンクモデルの構造は直列 4 段の容器から成り、各段の容器からの流出は、最上段が洪水の表面流出、第 2 段が表層浸透流出、第 3~4 段が地下水流出に対応すると概念的に考えられている。融雪がある又は乾季が続くといった地域特性を、容器を増やしたりその配置を変更することにより、高い再現性を有する(WMO、1975)

しかし、斜面や河道を通して水が集水する過程を、横方向に一つの容器の構造を持ち、河道モデルを有しないタンクモデルでは表現できないので、各流出孔の定数は、河道における洪水の伝播を含めた当該流域の集中過程等の様々な影響を含んだ定数で、物理モデルと異なり流域の物理特性と関連付けられるものではない。

したがって、タンクモデルの定数(各孔の大きさ及び側面の孔の高さ)は、過去の水文資料を用いて、試行錯誤で求めることが必要となる。

タンクモデル法の特徴を要約すると次のとおりである。

- a) 初期損失とその損失雨量が降雨履歴によって変化する現象を自動的にモデル中に含んでいること。
- b) 大洪水と小洪水とで、流出の仕方が自動的に切り換わる構造(非線形性をモデル中に含んでいる構造)であること。
- c) 洪水と小洪水とで、流出率が自動的に切り換わる構造であること。

- d) 各段のタンクからの流出は、それぞれ固有の逓減曲線を示すので、流出量が固有の逓減を持ついくつかの流出成分の和で表されること。
- e) 水がタンクを通過して下方に移行する間に自動的に時間遅れが与えられること。
- f) 洪水流出にも低水流出にも用いることができること。ただし、一般には、それぞれの目的に最適化したモデル構造と定数により使い分けられることが多い。

6) 土研分布モデル

1980年代にヨーロッパでSHEモデルやIHDMモデルといった分布定数系モデルが相次いで開発されたが、当時はモデル化の手間や計算時間の制約から流域面積10km²程度までの適用が限界とされ、またヨーロッパ特有の流域以外への適用性に疑問が持たれていた。このことから、我が国の河川流域で主要な流出の水文過程を組み込み、それ以外をある程度簡略化し、大流域にも適用できる実用的なグリッド型の分布定数系モデルである「土研分布モデル」を土木研究所が開発した。長期・短期流出解析両用のVer. 1、短期流出解析用にモデルを簡略化したVer. 2、長期流出解析用に蒸発散等の地表面水文過程を高度化したVer. 3の3種類がある。以下、最も広く用いられているVer. 2について解説する（鈴木ら、1996）。

土研分布モデルVer. 2の河川流域での基本構成は図3-2-3のとおりであり、流域をグリッドで分割し、それぞれの小区画からの流出を連結する構造としている。

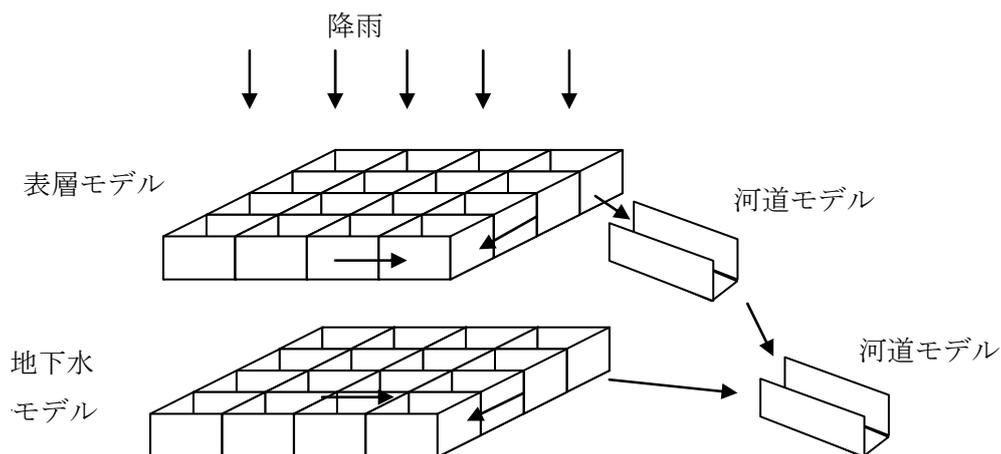


図3-2-3 土研分布モデル Ver. 2 の構成図

それぞれの小区画に2段のタンク（表層モデル、地下水モデル）を設定し、それぞれからの流出を、その小区画における土壌の透水係数等の物理特性を考慮して計算する。各小区画からの流出は、落水線網に従って、隣接する小区画に流入させる。

表層モデルの構造を図3-2-4に示す。

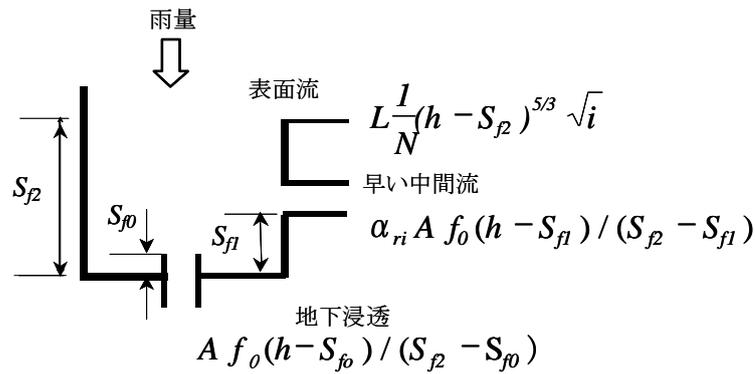


図3-2-4 各小区画の表層モデルの構造

ここに、 S_{f2} : 表面流の発生する高さ (m)、 S_{f1} : 中間流の発生する高さ (m)、 S_{f0} : 地下浸透の発生する高さ (m)、 h : 貯留高 (m)、 L : グリッド長 (m)、 N : 粗度係数 ($m^{-1/3}/s$)、 i : 落水線勾配 (無次元)、 α_{ri} : 地下浸透に対する横方向浸透能の比 (無次元)、 A : 小区画の面積 (m^2)、 f_0 : 最終浸透能 (cm/s) である。地形、土地利用、土壌の違いや土壌水分量の多寡による表面流や浸透、中間流、降水浸透の発生の変化を物理定数や内部貯留高を通して表現できるようにしている。

地下水モデルの構造は、図 3-2-5 のとおりである。

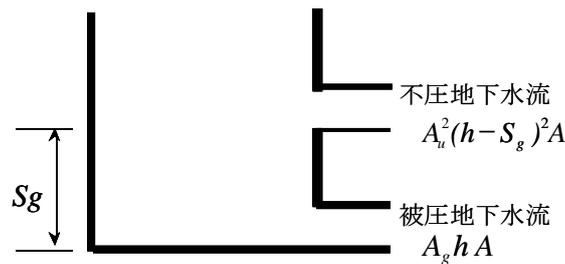


図3-2-5 各小区画の地下水モデルの構造

ここに、 S_g : 不圧地下水流出が発生する高さ (m)、 A_u : 不圧地下水位流出量に係る係数 ($(1/mm/day)^{1/2}$)、 A_g : 被圧地下水位流出量に係る係数 (1/day) である。

表面流、早い中間流、不圧地下水流、被圧地下水流の合計が斜面からの流出量であり、河道モデルに入力される。

河道モデルは、ある閾値 (上流側の小区画数) を超えて真に河道が形成されていると考えられる小区画から下流に設定し、キネマティック・ウェーブモデルにより洪水追跡を行う。下流部の緩流河道区間のために不定流モジュールも準備されている。

本モデルは、CommonMP に標準搭載されている。また、発展途上国での水文資料が乏しい河川流域での洪水予測への適用を主目的として開発された、グラフィカルなユーザーインターフェースを搭載する総合洪水解析システム (Integrated Flood Analysis System: IFAS) のコアとなる流出モデルとしても活用されている (土研、2009)。

<関連通知等>

- 1) 中小河川における洪水予測の手引き, 財団法人河川情報センター, 2002.
- 2) 流出雨水量の最大値を算定する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数を定める告示, 平成 16 年国土交通省告示第 521 号.

<参考となる資料>

下記の資料が参考となる。

- 1) 物部長穂：水理学，p.350，岩波書店，1933.
- 2) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 前編 -2009 年度版-，p.71，社団法人日本下水道協会，2009.
- 3) Task Committee of the Urban Water Resources Research Council of ASCE: Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems (ASCE), ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 77 (MOP77), pp. 91-92, 1993.
- 4) 土木学会：下水道雨水流出量に関する研究・報告書（昭和 42 年度）」，p.84，社団法人土木学会，1968.
- 5) 井口昌平：コウ水の到達速度に関するいわゆる Rziha の公式と Kraven の表の由来について，土木学会誌 42-1，pp.25-27，1957.
- 6) 吉野文雄・米田耕蔵：合理式の洪水到達時間と流出係数，土木技術資料，第 15 巻，第 8 巻，pp. 3-6，1973.
- 7) 木村俊晃：貯留関数法による洪水流出追跡法，建設省土木研究所，1961.
- 8) 木村俊晃：貯留関数法，河鍋書店，1975.
- 9) 建設省水文研究会編：流出計算例題集 II，社団法人全日本建設技術協会，1962.
- 10) 角屋睦・永井明博：流出解析手法（その 10）--- 4. 貯留法—貯留関数法による洪水流出解析，農業土木学会誌，第 48 巻第 10 号，1980.
- 11) 日本学術会議：回答 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価，p. 11，平成 23 年 9 月 1 日.
- 12) 末石富太郎：特性曲線法による出水解析について，土木学会論文集 29 号，pp. 74-87，1955.
- 13) 田岡穰，日野峻栄：特性曲線法による山科川内水調査について，第 19 回建設省技術研究会報告，pp. 585-588，1965.
- 14) 建設省土木研究所(土研)：土地利用を評価する流出モデル，土木研究所資料第 1499 号，1979.
- 15) 菅原正巳：水文学講座 7 流出解析法，共立出版，1972.
- 16) 菅原正巳：水文学講座 別巻 続・流出解析法，共立出版，1979.
- 17) 木下武雄：水害の日本で生まれ世界に広まったタンクモデル，土木学会誌 86(5)，pp. 69-73，2001.
- 18) World Meteorological Organization (WMO): Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting, WMO-No. 429, 1975.
- 19) 鈴木俊朗・寺川 陽・松浦達郎：実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発（特集 水は巡る），土木技術資料 38-10，1996.
- 20) 独立行政法人土木研究所(土研)：統合洪水解析システム（IFAS version1.2）ユーザーズマニュアル」，土木研究所資料 第 4149 号，2009.

第 3 章 水文解析 第 3 節 地下水解析

目 次

第 3 節	地下水解析	1
3. 1	総説	1
3. 2	水収支解析	1
3. 3	地下水流動解析	3
3. 4	地下水汚染解析	8
3. 5	地盤沈下解析	9

平成 24 年 6 月 版

第3章 水文解析

第3節 地下水解析

3.1 総説

<考え方>

地下水解析は、対象地域における地下水の状態や予測を、調査・観測データを用いた数値解析等により行うものである。

数値解析の一般的な手法は、目的や取り扱う検討項目によって、①水収支解析、②地下水流動解析、③地下水汚染解析、④地盤沈下解析に区分される。

<必須>

地下水解析は、目的や取り扱う検討項目に応じた解析手法により、実施しなければならない。

<標準>

低水流出解析、河川と地下水の関係解析する場合については、第3章 第2節 2.3 低水流出計算 によることを標準とする。

<参考となる資料>

地下水解析の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 地下水調査および観測指針(案)，(財)国土開発技術研究センター編，pp. 257-289，1993.
- 2) 日本地下水学会 地下水流動解析基礎理論のとりまとめに関する研究グループ編：地下水シミュレーション，技報堂出版(株)，2010.

3.2 水収支解析

<考え方>

水収支解析は、広域における水循環の主として地下水に関わる問題を、検討することを目的として実施する。

<必須>

対象領域、対象期間は、対象地域の特性、利用可能なデータ等を考慮して、所期の目的が達成できるように、それぞれ適切に選定しなければならない。

<標準>

水収支解析は、水収支モデルによる解析方法と、タンクモデルによる解析方法を標準とする。

<例示>

1) 水収支モデルによる解析

地下水の水収支式は、不圧地下水と被圧地下水の別等により異なる。以下に不圧地下水の水収支式の例を示す。

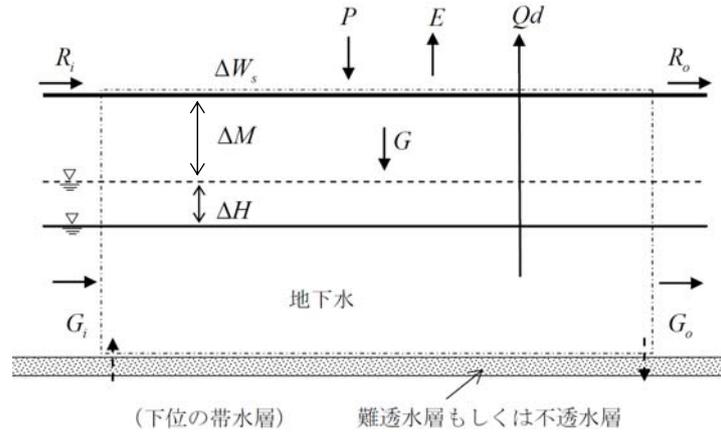


図3-3-1 不圧地下水の水収支概念図
 (「地下水調査及び観測指針(案)」に加筆)

・水収支式

地表水 $\Delta W_s = P - E + R_i - R_o - G$ (3-3-1)

地下水 $\Delta H + \Delta M = G + G_i - G_o - Q_d$ (3-3-2)

ここに、

- P : 降雨量
- R_i : 表流水流入量 (上流域からの地表水、かんがい水等の流入量)
- R_o : 表流水流出量 (下流域への地表水、かんがい水等の流出量)
- G_i : 地下水流入量 (上流域からの地下水、異なる帯水層等からの流入量)
- G_o : 地下水流出量 (下流域への地下水、異なる帯水層等への流出量)
- E : 蒸発散量
- ΔW_s : 地表における貯留量変化 (表流水の水位変化等)
- Q_d : 地下水揚水量・地下水湧水量
- ΔM : 不飽和帯の土壌水分量変化
(地表から帯水層上端までの土壌中の水分量の変化)
- ΔH : 地下水位変化量 (対象領域の面積×貯留係数×地下水位変化)
- G : 地下水かん養量 (地表から浸透する水量)

である。

対象期間を長期 (たとえば1水文年) とすることにより、地表における貯留量変化や、不飽和帯の土壌水分量変化をゼロとみなせる場合がある。短い時間単位や対象領域を細分化した水収支解析は多くのデータを要し、水収支解析は困難になることが多い。その場合、地下水流動解析を行い、その計算結果を集約し水収支を推定することが可能である。

2) タンクモデルによる方法

地下水涵養量の算出や中小河川流域を対象とする水収支の検討のため、河川の流出解析法として開発されたタンクモデルを地下水に適用する。全域を1か所のタンクモデルで表現する場合や、流出特性に応じてタンクを連結する場合などがある。

3. 3 地下水流動解析

<考え方>

地下水流動解析は、広域的又は局所的な地下水流動状況の把握あるいは予測を目的として実施する。

<必須>

地下水流動解析の手法は、目的、対象地域の特性、利用可能なデータ等を考慮して適切に選定しなければならない。

<標準>

解析結果は、調査対象域の地下水状況が把握できるように、調査目的に応じてデータの整理を行い、地下水位等高線図、地下水位変動図等、適切な図表等を用いてわかりやすく表現することを基本とする。

<例示>

地下水流動解析の一般的な手順としては、図 3-3-2 に示すように、目的に応じた解析対象地域を設定し、解析モデルを作成する。モデルは、各種条件の下で検証を行い、妥当性を検討した上で、将来計画の条件による予測計算を行う。

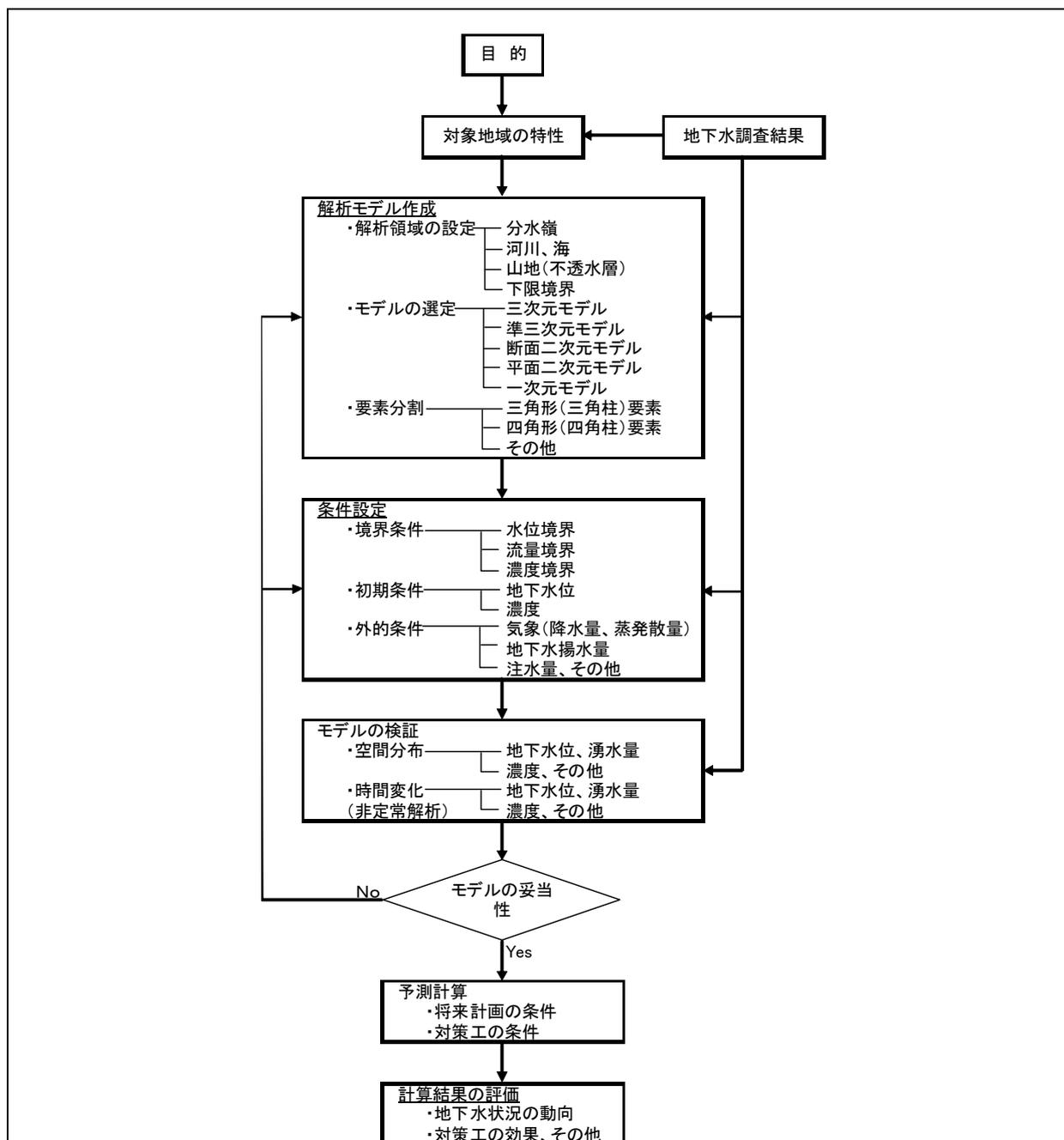


図3-3-2 地下水流動解析の流れ

(「地下水調査及び観測指針(案)」に加筆)

飽和層中の地下水の流動は、ダルシー則と連続式を組み合わせ、次の地下水流動方程式で示される。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ii} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) - q = Ss \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3-3-3)$$

ここに、

i, j : x, y , 又は z 方向 ($i=1, 2, 3$)

K_{ii} : x_i 方向の透水係数 [L/T]

h : 水頭 [L]

Ss : 比貯留係数 [1/L]
 q : 単位体積あたりの吸い込み、注水 [1/T]
 x : 空間座標 [L]
 t : 時間 [T]

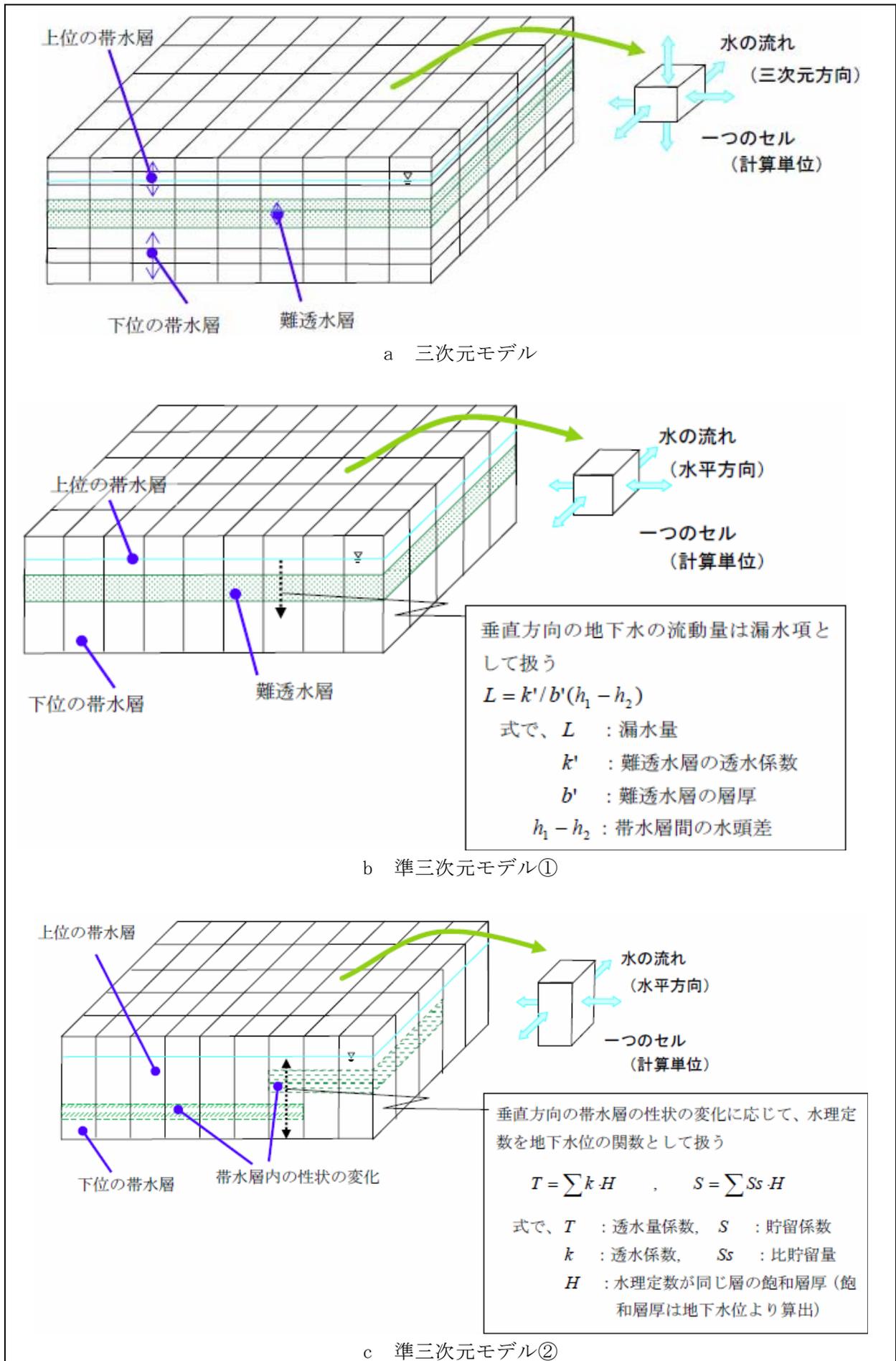
である。

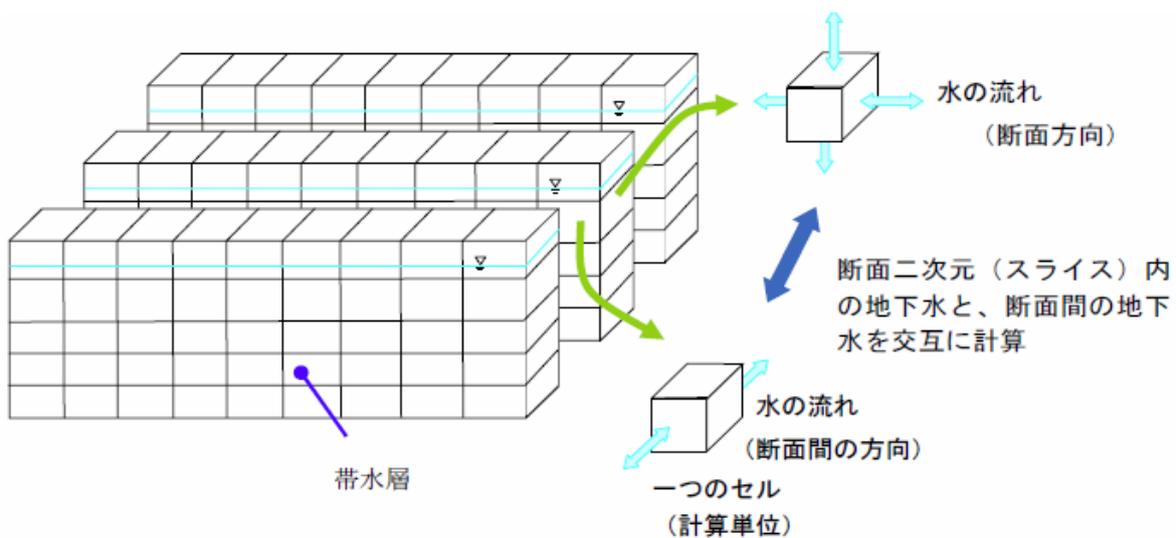
上記で示した地下水流動方程式は三次元であるが、対象とする流域の特性や目的によって次元を下げるのが可能である。地下水流動解析の手法には、表 3-3-1 に示されるものがある。

表3-3-1 地下水流動解析モデルの特性と適用条件

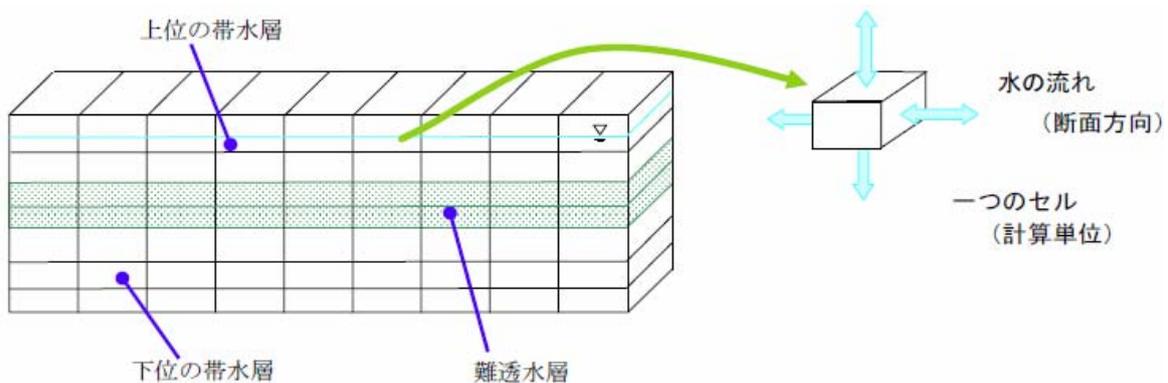
(「地下水調査及び観測指針(案)」に加筆)

モデル	特性と適用条件
三次元モデル	<p>三次元方向の地下水の流動を計算するものである。多くの情報を必要とするが、透水層と難透水層の複雑な地層の形状や、透水係数等の水理定数が方向によって異なる異方性を反映できるなど、他のモデルに比べて地下水流動を正確に取り扱うことができる。</p> <p>飽和のみを扱うモデルだけでなく、地下水位に応じた被圧条件と不圧条件の変化、飽和一不飽和を解析するモデルなどがある。また、地下水の流動に加えて、溶解した物質や密度の異なる液体や空気、熱などの移動を組み合わせたモデルも開発されている。狭い範囲から広域にわたる様々な問題に適用できる。</p>
準三次元モデル① 半透水性の加圧層を考慮した多層構造を取り扱う方法	<p>複数の帯水層と半透水性の難透水層からなる地盤構成の地下水の流動を解析するときに用いられる。水平方向の地下水の流動を計算し、鉛直方向への流動量は、帯水層間の漏水量として、帯水層間の水頭差と帯水層間に挟在する難透水層の透水係数及び層厚より算出する。三次元モデルに比べて計算量が少なく、擬似的に三次元の地下水流動を取り扱うことができる。地下水位が大きく低下せず、帯水層が被圧状態での地盤沈下や、地下水揚水時の影響を検討する場合等に適用される。</p>
準三次元モデル② 地盤水理定数を地下水位の関数として多層構造を取り扱う方法	<p>複数の透水層の水理定数(透水量係数、貯留係数)を地下水位の関数として求め、解析を行う方法であり、準三次元モデル①に比べて多層構造の水理定数を考慮する点で優れている。広域の地下水流動を平面的に捉え、しかも地下水位の変動量が大きい場合、たとえば地下水位が低下し、被圧帯水層から不圧帯水層になったり、基盤まで地下水位が低下したりする場合に適している。</p>
準三次元モデル③ 鉛直スライス法	<p>三次元の領域を断面二次元で鉛直に分割し、それぞれ独立に飽和一不飽和断面二次元解析法により解析を行う方法である。断面間はダルシー則に従った二次元要素を用いて流量を求め、その流動を用いて断面二次元解析に反映させ、交互に計算を繰り返す。</p> <p>断面二次元モデルに比べて、三次元的に地下水流動を考慮する点で優れており、岩盤の割れ目が卓越している場合や断層破砕帯が存在する場合での地下水流動を取り扱う場合にこのモデルの特徴が生かされる。トンネル掘削や開削に伴う影響範囲や工法の検討等に適用される。</p>
断面二次元モデル	<p>断面方向の地下水の流動を二次元で計算するものである。岩盤の割れ目が少ない、あるいは、断層破砕帯が存在しないなど、断面を直行する方向に地下水は流動しないものと仮定できる場合に適用する。複雑な地質構造の中で、鉛直方向の地下水流動や地層の圧密収縮等を解析することに適している。トンネル掘削や開削に伴う影響範囲や工法の検討等に適用される。</p>
平面二次元モデル	<p>水平方向の地下水の流動が卓越し、鉛直方向の流動は微小である場合に用いられる。帯水層が1層の地域において、地下水揚水の影響範囲の検討を行う場合に適用される。</p>
一次元モデル	<p>1方向のみの地下水の流動を計算するものである。鉛直方向に物性が異なる粘土層内の水頭変化や圧密収縮(地盤沈下)、あるいは、実験室での流れの検討等に適用される。平面的な不均質性を検討する場合には、複数の地点に一次元モデルを適用する。</p>

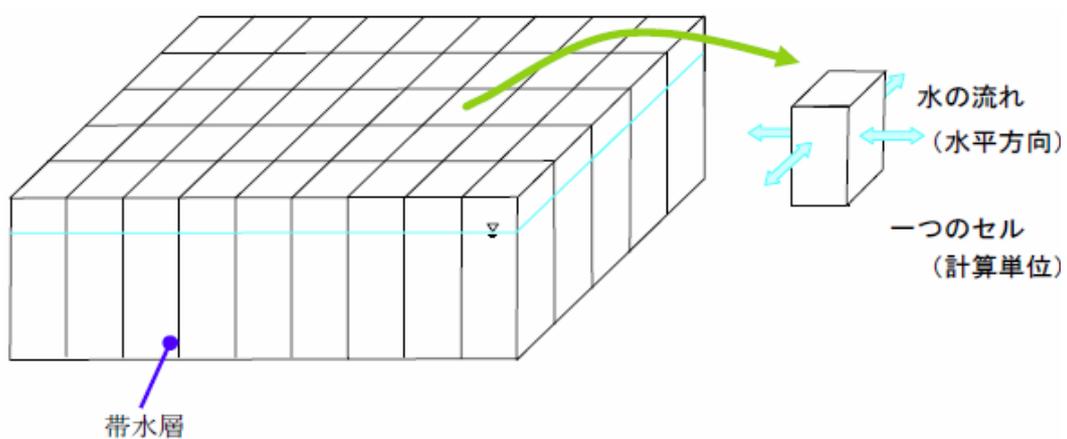




d 準三次元モデル③



e 断面二次元モデル



f 平面二次元モデル

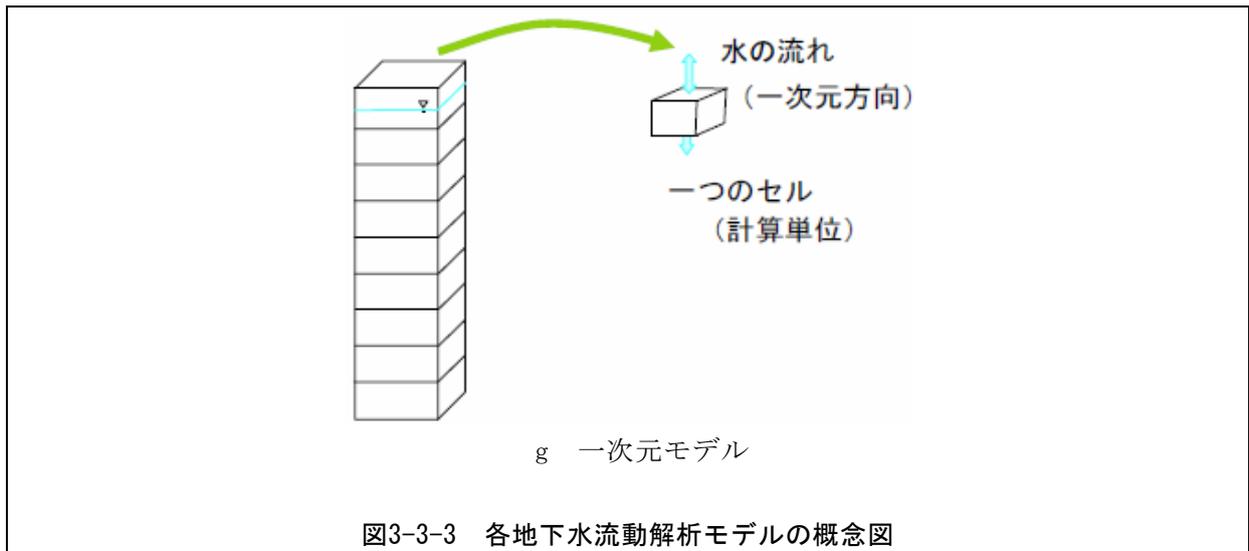


図3-3-3 各地下水流動解析モデルの概念図

<例 示>

近年は、地下水流動や地下水汚染の問題を解析するためのプログラムが多く公表されている。解析に用いるプログラムの選定に当たっては、対象とする地域あるいは目的に合致するかどうかはもちろんのこと、経済性、解析に要する時間効率等も勘案することが重要である。以下に公開されている主なプログラムの一部を参考として示す。

表3-3-2 地下水解析プログラムの事例

プログラム名※	次元	解析対象	開発機関
GWAP	準三次元	飽和浸透流	岡山地下水研究会
UNSAF	三次元	飽和・不飽和浸透流	岡山地下水研究会
Dtransu	三次元	飽和・不飽和浸透流、物質輸送	岡山大学、他
MODFLOW	三次元	飽和浸透流、物質輸送 (MT3Dとの組合せ)	アメリカ合衆国地質調査所

※ ソースコードがインターネット等で公開され、比較的、適用事例の多いもの

<参考となる資料>

各プログラムについては、下記のサイトが参考となる。

1) GWAP, UNSAF, Dtransu.

http://gw.civil.okayama-u.ac.jp/gel_home/download/index.html

2) MODFLOW.

<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow.html>

3. 4 地下水汚染解析

<標準>

地下水汚染解析については、第12章 水質・底質調査 第2節 水質調査 2.13によることを標準とする。

3.5 地盤沈下解析

<考え方>

地盤沈下解析は、地盤沈下が進行するあるいは予想される地域において、地盤沈下量の予測及び沈下量と揚水量との関係の把握のために実施する。

地下水の揚水に伴う広域的な地盤沈下は、粘性土の圧縮により発生するものと、砂層や礫層などの弾性変形によって生じるものがあり、前者の方が沈下量は大きい。帯水層中の水圧が低下すると、粘性土中の水圧も徐々に低下し、土粒子構造が収縮する、いわゆる脱水压密現象が生じる。各地層の収縮量が地表に累積され、地盤沈下となって現れる。

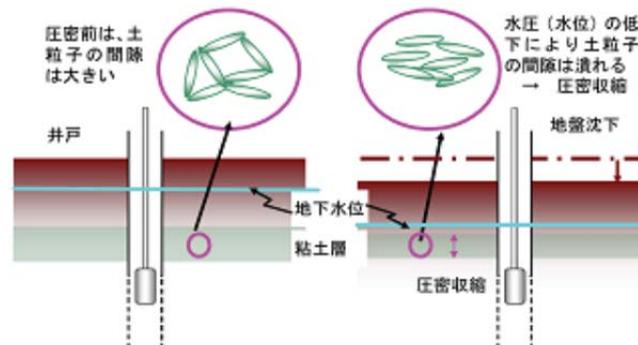


図3-3-4 粘土層の圧密収縮

(佐藤、岩佐「地下水理学」(2002)、丸善による)

地盤沈下解析の手法には、時系列的な予測手法、圧密理論による予測手法及び地盤沈下シミュレーション等が用いられている。

<必須>

解析の手法は、目的、対象地域の特性などを考慮して適切に選定しなければならない。

<例示>

1) 時系列的な予測手法

1 地点における地盤沈下の観測結果を時系列に整理し、直線あるいは曲線で近似させて、沈下量及び沈下時間を予測する方法である。

2) 圧密理論による予測手法

盛土の载荷によって生じる地盤の形状変化にともなう沈下及びゆるい砂層に生じる沈下を無視し、盛土中央下の軟弱層の一次元圧密沈下のみを求めて全沈下量とする。

すなわち、層区分された圧密層ごとに次式から一次圧密沈下量 S_c [cm] を求めた後、軟弱層全体について合計して全沈下量とする。

$$S_c = \frac{e_0 - e_i}{1 + e_0} \cdot H \quad (3-3-4)$$

ここに、

S_c : 一次圧密沈下量 [cm]

e_0 : 圧密層の初期間隙比

e_i : 圧密層の圧密後間隙比で、 e - $\log P$ 曲線に層中央深度の $P_0 + \Delta P$ を適用して求める。
この場合、現場における e - $\log P$ 曲線の推定は一般に困難なので、試験による e - $\log P$ 曲線から求めた値を用いてもよい。

H : 圧密層の層厚 [cm]

である。

なお、正規圧密土からなる軟弱層の場合で、区分された圧密層ごとに圧縮指数 C_c 又は体積圧縮係数 m_v [m^2/kN] が求められている場合には、それぞれ次式によって圧密層毎の一次元圧密沈下量を求めることができる。

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \cdot H \quad (3-3-5)$$

$$S_c = m_v \cdot \Delta P \cdot H \quad (3-3-6)$$

ここに、

S_c : 一次元圧密沈下量 [cm]

P_0 : 盛土前土かぶり応力 [kN/m^2]

ΔP : 盛土荷重による増加応力 [kN/m^2]

H : 圧密層の層厚 [cm]

である。

3) 地盤沈下シミュレーション

平面的な地盤沈下量の分布、あるいは、断面線上の地盤沈下量を予測する方法である。地下水流動解析モデルでは帯水層内の地下水頭変化量が算出される。また、断面二次元モデルあるいは三次元モデルを用いることで、粘土層内の水圧が計算される。帯水層の水頭変化量、あるいは、粘土層内の水圧（間隙水圧）変化量より、圧密理論により地盤沈下量を解析することができる。