

調査編

調査編

第1章 総論	2-1
第1節 総説	2-1
第2章 水文・水理観測	2-1
第1節 総説	2-1
第2節 降水量等観測	2-4
第3節 水位観測	2-8
第4節 流量観測	2-19
第3章 水文解析	2-49
第1節 水文統計解析	2-49
第2節 流出解析	2-64
第4章 河道特性調査	2-85
第1節 総説	2-85
第2節 河道特性調査に際しての基本的捉え方	2-88
第5章 河川における洪水流の水理解析	2-97
第1節 総説	2-97
第2節 洪水流解析の目的	2-97
第3節 目的に応じた洪水流解析手法の選定	2-99
第4節 計算手法の説明	2-102
第5節 パラメータの設定	2-110
第6章 氾濫解析	2-115
第1節 総説	2-115
第2節 氾濫域調査	2-115
第3節 外水氾濫解析	2-117
第4節 内水氾濫解析	2-122
第5節 氾濫解析結果の活用	2-124

第1章 総論

第1節 総説

＜考え方＞

本手引きの調査編は、河川の計画、設計及び維持管理等の適正な実施に資することを目的として、現状の技術水準に照らし合わせて基準となる調査手法等を規定したものである。

第2章 水文・水理観測

第1節 総説

＜考え方＞

本章は、河川に関わる計画と管理等のためのデータを得ることを目的とした、降水量、水位、流量、地下水及び関連水文気象要素等の観測と、結果の整理・分析に必要な技術的事項を定めるものである。

本章で扱う水文・水理観測については、以下の3つのカテゴリーに分けることができる。本章各節とこれら3つのカテゴリー（サブカテゴリーまで含めると4つ）との関係については、2)で述べる。

- ・ カテゴリー1：基盤・汎用観測
- ・ カテゴリー2：特定目的観測
- ・ カテゴリー3：総合観測
 - 3.1 河川の流れの総合的把握
 - 3.2 河川・流域の水循環把握

なお、調査編において、このカテゴリー分けは観測に対してのものであり、1つの観測所において複数のカテゴリーにまたがる観測が行われる場合もあり、観測所を無理に1つのカテゴリーに当てはめる必要はない。

1) 3つのカテゴリーの説明

a) カテゴリー1：基盤・汎用観測

水文・水理量に関する基盤的な情報を汎用目的に蓄積するための観測である。その特徴は次のとおりである。

- ・ 降水量、水位、流量など、個々の水文・水理量を対象とし、それ自体の把握が観測の第一の目的となる。
- ・ 当該水文・水理量に対応した観測法単独で所要の精度を確保することが基本となる。
- ・ 基盤的情報として、汎用的に活用できるように蓄積される。
- ・ 代表的な活用として統計資料用のデータ蓄積があることなどから、長期にわたる継続的な実施、手法の一貫性、全国的な網羅性が重視される。
- ・ 精度や信頼性について一定の条件を満足する均質な情報が蓄積されるよう、一律な精度管理がなされることが基本となる。
- ・ 観測法については信頼性・確実性・堅牢性が重視される。
- ・ 観測手法の技術的改良は、慎重な検証を伴い、段階的な改善を通じて逐次行われることが基本となる。
- ・ 観測の実施方法等に関して、法律や業務規程（国土調査法、気象業務法、水文観測業務規程等）により定められる部分が多い。

b) カテゴリー 2：特定目的観測

特定の目的のために水文・水理量を把握する観測である。目的としては、「ある個別の技術判断を行うこと」や「ある個別の技術情報を得ること」などがある。たとえば、水防活動等において、的確な予警報や早期避難などの実施に役立てるため、特定の場所の降水量や流速、洪水位、氾濫水位などを把握すること、河道内の洪水流や洪水氾濫流、浸水、津波等の痕跡高の空間分布を測定することなどがある。その特徴は次のとおりである。

- ・ 汎用的な活用が主目的ではないことから、目的に応じて行うことが基本になる。
- ・ 個々の目的に応じて、最適な観測手法を柔軟に採用し、観測の実施方法についても機動的となることがある。
- ・ 観測手法あるいは観測結果の利用方法について、先導的取組となる場合がある。
- ・ 観測データの蓄積方法については、個々の目的に応じて適宜行うことになる。

c) カテゴリー 3：総合観測

単一箇所の一種類の水文・水理量ではなく、一定期間、一定範囲において多点かつ複数種類の水文・水理量を対象として、水理現象等の全体状況やシステム、相互関係等を明らかにすることを目的として、総合的あるいは統合的な観点から組み立てられた観測である。本章で扱う水文・水理観測については、以下の 2 つのサブカテゴリーがある。

① カテゴリー 3.1：河川の流れの総合的把握

観測データと水理的考察に基づく解析等を行うことにより、一定範囲の河川の流れを水理システムとして把握することを主たる目的とするものである。水位、流速、流量を一括して観測対象とすることが一般的である。その特徴は次のとおりである。

- ・ 水位や流量という一種類の水文・水理量を観測するのではなく、対象とする流れを特徴づける複数種類の水文・水理量を複数地点で同時に観測し、更にこれを一定時間内の多時点で行い、得られた水文・水理量データの相互関係を把握できるようにすることが基本となる。
- ・ 観測対象となる水理量は、対象とする流れ及びそれを支配する水理システムから決められる。
- ・ 観測及び解析等の結果として、個々の水理量を、カテゴリー 1 などにより直接観測するよりも高い頻度で求める場合がある。
- ・ カテゴリー 3.1 は、観測と水理解析を一体的あるいは双方向的に捉えるものである。カテゴリー 3.1 の観測が適用される場については、多くの場合、総合的な流れの特徴の把握を必要とする課題を有する河川区間という観点から決められることになる。
- ・ 水位や流量との水理システムを介しての相互作用関係がない降水量は、通常、カテゴリー 3.1 の観測対象とはならない。
- ・ 水理システムの構成要素に河床変動や流砂量まで組み込み、観測をデザインするという方法もある。

② カテゴリー 3.2：河川・流域の水循環把握

カテゴリー 3.2 の観測は、降水、蒸発散、地中への浸透、地下水流動、流域から河川への降雨流出、河川における流れ、河川水と地下水との出入り、といった自然系の水循

環を基本に、必要に応じて上水道、工業用水道、下水道、農業用排水路等を経由して流れる人工系の水循環を組み込み、対象とする河川流域内に存在するこれらの水循環過程を総体的に把握することを主眼に行われるものである。把握対象には、必要に応じ、適切な時間スケールでの水収支の観点も含める。カテゴリ 3.1 の観測と同様に、個々の水文・水理量の観測は、水循環の状況を把握するという全体目的の中で位置付けられ、相互の関係把握が重視される。ここで、カテゴリ 3.1 では対象河川区間の水理システムが観測をデザインする際の基軸になるのに対し、カテゴリ 3.2 では、対象河川流域の水循環が基軸になる。

2) 水文・水理観測における各カテゴリの位置付け及び相互関係

水文・水理観測において、カテゴリ 1 は、国土管理全般に資する基盤的数据を整備するために、カテゴリ 2 は特定の目的を達成するために、カテゴリ 3.1 と 3.2 はそれぞれ対象エリアにおける水理システムあるいは水循環状況を把握するために用いる。ただし、これらのカテゴリは、図 2-1-1 に示すように、互いに重複する部分を持ち、また、相互補完的な関係をなす。たとえば、カテゴリ 1 の観測結果が、カテゴリ 2、3.1、3.2 の観測に活用されることがあり、また、カテゴリ 2 の観測を通じて得られた新しい観測手法がカテゴリ 1 の観測手法の改善に最終的に反映されることもある。カテゴリ 2 の結果がカテゴリ 3.1 や 3.2 の観測に組み込まれることもあろう。さらに、カテゴリ 3.1 の観測結果がカテゴリ 1 のそれを補完する情報として役立てられることも考えられる。こうしたことから、水文・水理観測に当たっては、当該観測がどのカテゴリに属するかを意識し、カテゴリの違いによる基本的な性格の差異を踏まえ、更にカテゴリ間の相互補完関係に留意して他カテゴリへの活用を考慮することで、当該観測の位置付けについての理解を高め、もって観測とその結果の活用がより適切かつ効率的で有効なものとなるよう工夫することが重要である。

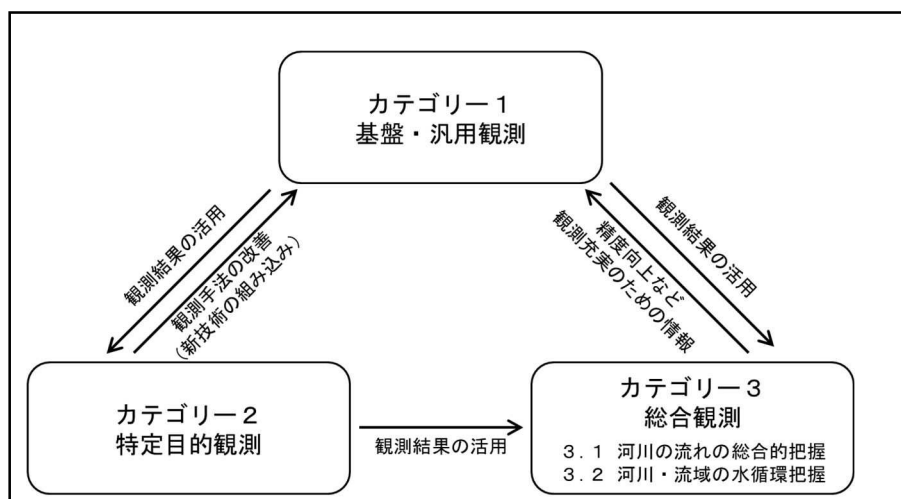


図 2-1-1 3つのカテゴリ間の相互関係

<標準>

水文・水理観測は、その目的等に応じ、カテゴリ 1（基盤・汎用観測）、カテゴリ 2（特定目的観測）、カテゴリ 3（総合観測）のカテゴリに分けることができる。

なお、カテゴリ分けは観測に対してのものであり、観測所を 1つのカテゴリに当てはめる必要はない。

第2節 降水量等観測

2. 1 総説

<考え方>

本節は、降水量及び関連気象水文要素の観測を実施するために必要な技術的事項を定めるものである。

降水は、大気から地面に降下する水のことであり、一般に、降雨と降雪に大別される。

降水量は、ある時間内に地表の水平面（又は地表の水平投影面）に達した降水の量であり、降水が平面上にたまったと仮定した場合の深さで表す。測定単位は mm である。

降雨強度は、ある定められた時刻間に測定された降水量を 1 時間あたりに換算したものであり、単位は mm/h である。

降水量観測は、河川・砂防に関する計画の立案、工事の実施、施設の維持管理、環境の整備及び保全、洪水や渇水等による水災害への対応等を実施するための最も基本的な調査項目の一つである。

関連気象水文要素は、降雪深、積雪量、気温、湿度等をいい、河川流域の水循環や水資源の調査のため観測が行われる。

これらの観測により得られるデータは、近年、地球温暖化の進行に伴う気候変化による洪水や渇水等に与える影響が懸念されており、温暖化に伴う様々な影響への「適応策」を講じるためにも、長期にわたる同一品質の観測データの確保が必要である。

そのため、本節で主に扱うのは、本章 第 1 節 総説 で説明した 3 つのカテゴリーのうちのカテゴリー 1 である。

2. 2 降水量等観測の方法

<標準>

降水量観測は、自記雨量計（自動記録装置を備えた雨量計）を用いた地上雨量観測を標準とする。

レーダ雨量計による観測は、空間的な網羅性等、面的な降水量分布を的確に評価するために必要であり、自記雨量計による観測に加えて実施する。

また、関連気象水文要素観測は、対象観測要素に対応した計器により実施する。

2. 3 自記雨量計による観測

<考え方>

降水量観測は、河川に関する計画の立案、工事の実施、施設の維持管理、環境の整備及び保全、洪水や渇水等による水災害への対応等を実施するため重要である。また、地上雨量計観測は、面的な降水量分布の把握を補完するレーダ雨量観測の精度管理を行う観点からも重要である。

そのため、適切に配置、必要な機能を備え、適切に維持管理された自記雨量計等からなる地上雨量観測所により適切に観測を行う必要がある。

また、降水量観測結果が既往の河川計画の基本資料として利用され、今後も継続して用いられることが想定される観測所については、優先して観測を継続することが重要である。

なお、降水量観測は、気象業務法に基づき実施しなければならない。

2. 3. 1 地上雨量観測所の配置

<必須>

自記雨量計を設置する地上雨量観測所は、河川等の計画・管理上、適正な観測網となるように配置しなければならない。

<標準>

自記雨量計は、以下の基準に従い、設置することを標準とする。

- 1) 観測対象区域をおおむね均一の降水状況を示す地域に区分して、各地域に1観測所を配置するものとする。
- 2) ただし、おおむね均一の降水状況を示す地域に区分することが困難であるときは、観測対象区域をおおむね50km²ごとの地域に区分して、各地域に1観測所を設置するものとする。
- 3) 河川構造物等の管理のための降水量観測については、上記基準に捉われず、必要に応じて個別に自記雨量観測所を設置することとする。
- 4) 気象庁による観測データ等、河川計画・管理上の目的に適合した属性・品質の降水量観測データが別途得られる場合には、それも考慮に入れた上で観測網を検討するものとする。

<例示>

流出解析を行う観点から、その計算単位となる流域の平均降水量（面積雨量）を精度よく把握することが重要である。当該流域の面的な降水量分布特性をレーダや密な地上雨量計による観測等から把握し、流域平均としての降水量を精度よく把握できる観測網を設定することが望ましい。面的降水量分布特性が把握できる資料が存在しない場合、ある流域面積と地上雨量計設置密度に対して、把握できる面積雨量としての観測精度を簡易的に推定する手法として、橋本(1977)の研究事例がある。

それによると、面積雨量としての降水量観測の誤差は、次式で表される。

$$E_s = \frac{e_s}{\mu} = \frac{\sigma}{\mu} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \quad (2-2-1)$$

ここに、 σ : n 個の観測所で得られた観測値の標準偏差

μ : " 平均値

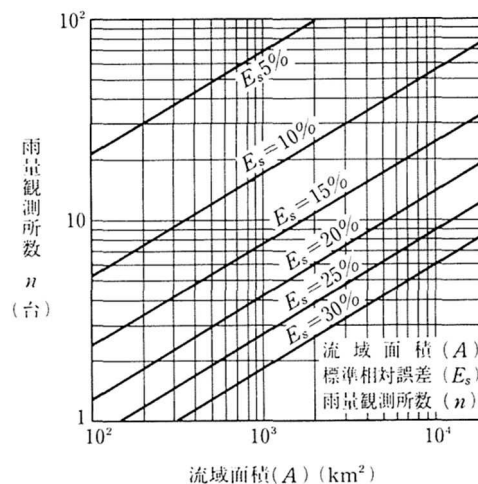
e_s : 標準誤差 ($= \sigma / \sqrt{n}$)

C_v : 変動係数 ($= \sigma / \mu$)

E_s : 標準相対誤差

変動係数 C_v は、降雨特性や流域特性（大きさ、地形）によって異なる。

上式と利根川流域等における一雨連続雨量での C_v の実測値から、雨量観測所数と観測誤差の関係を図2-2-1に示す。この図から、50km²に1台程度の雨量計の設置密度で一雨連続雨量の面積雨量誤差を10%程度以内に抑えることができるのは、流域面積が1,000km²程度以上の場合であることが読み取れる。流域内の降水分布に関する知見がなく雨量計をおおむね均一に配置しているなどの前提条件の下での結果であるが、支川や中小河川の河川管理におけるレーダ雨量による補完の必要性を示唆している。



出典：橋本健，佐藤一郎：面積雨量の精度と雨量観測所数，土木技術資料，Vol. 16，No. 12，pp. 631-637，1974.

図 2-2-1 雨量観測所数と観測誤差精度の関係

2. 3. 2 地上雨量観測所の設置場所の選定

<標準>

地上雨量観測所は、その観測所が代表することを期待される当該地点並びにその周辺領域の降水量を適正に計測できる場所に設置することを基本とする。

原則として、以下の事項に掲げる条件に適合することを基本とする。

- 1) 地形の狭窄や急変等により気流や降水が特殊な値を示すようなことがない地点であること。
- 2) おおむね 10m 四方以上の広さの開放された土地であって、局所的な気流の変化が少ないこと。
- 3) 豪雨時に浸水や崖崩れのおそれがないこと。
- 4) 観測や巡回点検に便利であること。

2. 3. 3 地上雨量観測所が備えるべき設備

(1) 自記雨量計

<必須>

降水量観測用の自記雨量計は、求められる時間の降水量を的確に無人・自動で観測でき、「気象業務法」及びこれに基づく「気象測器検定規則」に適合したものでなければならない。

また、雨量計は、以下の事項に対応しなければならない。

- 1) 雨量計の受水口は水平に設置するとともに、風の影響が著しいと思われる観測所では、受水口に風よけを付けること。
- 2) 凍結が生じるおそれのある地点では、凍結防止機能の付いた雨量計（たとえば、温水式雨量計、ヒータ付雨量計等）を用いること。
- 3) 降雪による降水量を観測する観測所では、温水式雨量計若しくは溢水式雨量計を用いるとともに、常に積雪面上に受水口が出ているように設置すること。

<標準>

雨量計の受水口の直径は 20cm を標準とする。

設置地点の制約により観測局舎の屋上等に雨量計を設置する場合には、たとえば屋上の中央部に雨量計を設置するなど、局所的な気流の影響を受けないように配慮するものとする。

(2) 自動記録装置

<標準>

地上雨量観測所には、自記紙やデータロガー等の自記記録装置を設置することを標準とする。

自動記録装置は、無人・自動での確実な観測データ記録と定期的なデータ収集に支障のないように設置することを標準とする。

(3) 自動データ伝送装置

<必須>

河川管理・施設管理上、リアルタイム観測が必要な自動雨量観測所は、求められる時間の降水量を的確に伝送できる自動データ伝送装置（テレメータ等）を備えなければならない。

<標準>

自動データ伝送装置は、10 分以下の観測間隔の機能を有するものを標準とする。

自動データ伝送装置は、「電気通信施設設計要領（案）（通信編）」に基づき設計されたものを標準とする。

(4) 標識

<必須>

地上雨量観測所には、標識を設置しなければならない。

標識には、観測所名、水系・河川名、設置者名、設置年月日、観測所所在地、緯度・経度（世界測地系）、標高、観測所記号を記載する。

(5) 観測小屋

<必須>

地上雨量観測所には、観測小屋、柵を設置することとし、観測小屋は雨量計による観測の障害物とならないように設置しなければならない。ただし、設備の特性や設置条件等により、不要と判断できる場合は設置しなくてもよい。

<標準>

観測小屋は、地震等の自然災害時や停電時における機能確保を考慮して設計し、非常用発電設備など必要な設備を設置することを標準とする。

2. 3. 4 観測所台帳

<必須>

地上雨量観測所を設置した場合には、雨量観測所台帳及び付図を作成しなければならない。

台帳には、雨量観測所の位置や施設構造等に関する諸元を記載する。雨量計等の移設や交換等の変更が生じた場合には、気象業務法上の届け出とともに、台帳への記載加筆を速やかに実施しなければならない。

様式については「水文観測業務規程細則」に従わなければならない。

地上雨量観測所には、雨量観測所台帳及び付図の写しを備え付けなければならない。ただし、観測小屋を設置していない場合はその限りではない。

雨量観測所を新設・変更・廃止する場合は、気象業務法上の届け出を行う。

<標準>

観測所台帳及び付図は電子的に保管、編集が可能なものとし、電子的方法により管理することを標準とする。

2.3.5 観測の実施と観測所の維持管理

(1) 観測の実施

<必須>

降水量の観測の実施に当たっては、「水文観測業務規程」及び「水文観測業務規程細則」の定めに従わなければならない。

(2) 地上雨量観測所の維持及び管理

<必須>

地上雨量観測所の維持及び管理の実施に際しては、「水文観測業務規程」第8章 観測所の維持及び管理、「水文観測業務規程細則」第8章 観測所の維持管理等の定めに従わなければならない。自動データ伝送装置は、「電気通信施設点検基準（案）」に基づき点検を実施しなければならない。

また、観測所ごとに維持管理上必要な事項を記入した点検記録簿を備えなければならない。

<標準>

観測所の点検は、観測所の維持管理において最も重要である。点検については、以下に示す総合点検及び定期点検を組み合わせることを基本とする。

- 1) 総合点検は、年1回以上（出水期前等。必要に応じて回数を増やす。）とし、対象とする施設・設備において特に器械類の内部に対して詳細点検を実施し、擬似テスト等による点検を含めた総合的な保守及び校正を行う。この点検は、測定部（受水部）、記録部、器械類の故障の有無を確認し、観測データの精度向上を図ることを主たる目的としている。
- 2) 定期点検は、月1回以上（総合点検を除いた月）とし、対象とする施設・設備において特に器械類の外部に対して目視による点検を中心に行う。この点検は、測定部（受水部）、記録部、器械類の機能障害等の異常を早期に発見し、観測データの欠測や異常値を生じさせないことを主たる目的とする。

第3節 水位観測

3.1 総説

<考え方>

本節は、水位観測を実施するために必要な技術的事項を定めるものである。

水位とは、ある基準面からの水面の高さであり、河川、湖沼、貯水池、遊水地、内水、河口及び地下水等の水文・水理現象を把握することを目的として観測を行う。その観測結果は、当該地点における水位の把握のほか、個別地点の水深やほかの地点との関係の中での水位差・水面形・水面勾配に換算したり、本章 第4節 流量観測 で記述する流量や流速に変換し

たりすることで活用される。

水位観測は、河川に関する計画の立案、工事の実施、施設の維持管理、環境の整備及び保全、洪水や渇水等の水災害への対応等を実施するための、最も基本的な調査項目の一つである。

本節で主に扱うのは、本章第1節 総説 で説明した3つのカテゴリーのうちのカテゴリー1である。ただし本節3.9では、実務上の重要性に鑑み、カテゴリー2に属する簡易観測や洪水痕跡水位調査を記載している。

<標準>

水位観測は、河川、湖沼、貯水池等における、ある基準面からの水面の高さの観測であり、これらは関連通知等に従い実施する。

3.2 水位の基準面の取り方

<考え方>

水位の測定表示単位は、mとし、読み取り最小単位は、1/100 mとする。

水位の基準面の取り方には、主に以下の3種類がある。

- 1) 水位観測地点において、当該地点独自の基準面を設定し、そこからの水面の高さとする方法。
- 2) ある水系内の上流から下流に至る観測所間での水位の相互関係を明らかにするため、当該水系独自の基準面を設定し、そこからの水面の高さとする方法。
- 3) 東京湾平均海面（T.P.）を基準面とし、そこからの水面の高さとする方法。

上記 1) の基準面の取り方は、水位観測の目的（水防活動の基準等）や河川断面・堤内地標高等の特性を考慮して最も適切な基準面（零点高）を地先ごとに定める方法である。

しかし、それだけでは、複数地点の水位を比較することができないことから、水系一貫の河川計画・管理を行う場合には、上記 2)、3) のように当該水系における統一基準面を設定した上での基準面の取り方が有効となる。上記 3) の基準面の取り方は、水面の標高表示といえるものであり、水系をまたがる全国統一基準面での水位となる。

また、水位は、河川・湖沼等における流れ、貯留量等を把握するための基本量であることから、一般には波浪の影響を受けない平均的な水面の高さを測定する必要がある。このことから、水位は、波浪の影響を受ける瞬時値ではなく、当該地点の水理特性を表す時間平均値として計測することが必要である。

<標準>

水位の測定表示単位は、mとし、読み取り最小単位は、1/100 mとする。

水位の基準面の取り方は、以下の3種類を基本とする。

- 1) 水位観測地点において、当該地点独自の基準面を設定し、そこからの水面の高さとする方法。
- 2) ある水系内の上流から下流に至る観測所間での水位の相互関係を明らかにするため、当該水系独自の基準面を設定し、そこからの水面の高さとする方法。
- 3) 東京湾平均海面（T.P.）を基準面とし、そこからの水面の高さとする方法。

3. 3 水位観測の方法

<考え方>

水位観測は自記水位計または水位標によって実施する。通常の観測は、自記水位計により実施し、自記水位計の故障や水位計の校正のため、近傍の水位標を用いる。

また、水位計には接触型、非接触型とも様々な種類があり、観測目的や環境に応じて選定する。

<標準>

水位観測は自記水位計または水位標を用いた観測を標準とする。なお、自記水位計による水位観測値は、同一横断面内に設置した水位標による水位観測値と一致していることが原則であり、必要に応じて水位標による観測によって校正もしくは補完するものとする。

<例示>

河川等の調査でよく使われている水位計には次のようなものがある。

表 2-3-1 主な水位計の種類

検出方式	機 器 名 称	説 明
接触型 フロート式	フロート式水位計	水面に浮かべたフロートと錘とをワイヤーで結び、そのワイヤーを滑車にかけて、回転量を記録する。設置については観測井が必要である。
	リードスイッチ式水位計	水中に測定柱を立て、その中に磁石の付いたフロートと一定間隔に並んだリードスイッチを配置し、フロートの上下によるスイッチの ON/OFF により水位を測定する。設置のために H 鋼杭などの支柱が必要である。
接触型 圧力式	気泡式水位計	水深と水圧が比例することから、水中に開口した管から気泡を出すときに必要な圧力を測定し、機械的または電氣的な変換により水位を測定する。気泡管を水中に固定するだけで設置は簡易である。気泡発生装置が必要である。
	水圧式水位計	水中に設置された圧力センサーの信号を電氣的に変換して水位を測定する。センサーには半導体式や水晶式などの種類がある。電池で長時間作動し、データを記録するロガー付きの小型タイプのものであれば、現場に機器を取り付けるだけで、比較的簡単に水位の時間変化測定を行うことができる。
非接触型	超音波式水位計 電波式水位計	超音波又は電波送受波器を水面の鉛直上方に取り付け、超音波または電波が水面に当たって戻ってくるまでの時間を測定することにより、水位を測定する。非接触型であるため、流路の変動時に対処しやすい。
	CCTVカメラ	水位標または橋脚や護岸など水面輝度の違いを認識できる場所を利用して、CCTV カメラから水面位置を認識し、水位標や事前測量データと組み合わせることで水位を観測する。CCTV カメラによる水位標等を利用した水位観測は、状況によっては自記水位計による水位観測値の校正もしくは補完に利用できる。一般に継続的な観測には適していない。

3. 4 水位観測所の配置と設置

3. 4. 1 水位観測所の配置

<必須>

水位観測所あるいは観測地点は、観測の目的に応じて、河川等の計画、管理上などの重要な地点にその配置を検討しなければならない。

<推 奨>

水系全体から見た適正な観測網を構成する重要な地点としては、以下の地点を選定することが望ましい。

- 1) 重要支派川の分合流前後、堰・水門等の上下流
- 2) 流量を観測する地点
- 3) 狭窄部、遊水地、湖沼、貯水池、内水及び河口等の水理状況を知るために必要な地点

なお、洪水時に水位流量曲線がループを描く流量観測所では、近隣の水位観測所との水位差（水面勾配）を考慮に入れた水位流量曲線を導入することにより、流量観測精度が高くなる場合がある。その場合は、当該観測所の上下流地点にも水位観測所を別途設置することが望ましい。

一方、近年、中小河川や河川上流部・支川における水害発生が顕著となっており、従来よりもきめ細かな観測網による水位予測の精度の向上をとおして早期避難や的確な水防活動を実施するなどの危機管理体制の強化が必要となってきた。このような場合は、3.9に示す簡易観測等を実施することが望ましい。

3. 4. 2 水位観測所の設置場所の選定

<標 準>

水位観測所は次の各項に掲げる条件を考慮し、要求される精度の観測が行える場所に設置することを標準とする。

- 1) 水流の乱れが少なく、流心が安定している場所
- 2) 流路や河床の変動が少ない場所
- 3) 観測所の維持管理が容易な場所
- 4) 観測所に設置すべき自記水位計のデータ表示・記録等を担う自動記録装置や自動データ転送装置等に関しては、洪水時を含めてその設置場所へのアクセスが可能であり、観測作業を実施するに当たって危険が少なく安全である場所

<推 奨>

水位観測所の具体的な位置設定に当たっては、上記のほか、以下のような事項にも留意することが望ましい。

- 1) 湖沼・貯水池、場合によっては河川においても水面の振動現象（セイシュ）が発生して水位観測の精度が低下する場合がある。そのため、事前に調査を実施し、水面の振動現象が発生しない場所に設置する、又は振動の静止点（節ともよぶ）に観測所を設置するなどの対応が必要である。
- 2) 内水水位観測の場合には付近の地形・地物を考慮して代表性のある所を選ぶ必要がある。
- 3) 感潮河川の感潮区間上流で、感潮区間内ではないとされている地点においても、近時の河床低下等で潮汐の影響を受けていることがあるので、非感潮区間で観測する場合には、特に満水期の大潮時に調査を行っておく必要がある。

3. 5 水位観測所が備えるべき設備

3. 5. 1 総説

<標準>

水位観測所は、以下の設備等を備えることを標準とする。

- 1) 自記水位計（自動記録装置、自動データ転送装置を含む。）
- 2) 水位標（量水標）及び水準基標
- 3) 標識
- 4) 電源装置（非常用発電設備含む）

河川における自記水位計および水位標については、以下に示す水位の範囲を精度良く計測できるように設置することを標準とする。

計測下限：水位標については、既往の最低水位より 1m 以上低い水位。自記水位計については、既往の最低水位より 0.5m 以上低い水位または、現況河床高。

計測上限：無堤区間の場合、計画高水位又は既往最高水位より 1m 以上高い水位。有堤区間では、堤防天端より 0.5m 以上高い水位。

河川以外に設置する水位計についても、その目的に照らして計測しておくべき範囲の水位を欠測しないように設置するものとする。

目的を低水計画・管理若しくは、高水計画・管理に明確に区別して絞り込むことができる場合は、いずれかの目的に対応する水位範囲のみを観測する設備としてもよい。

なお、カテゴリー 2 やカテゴリー 3 等で行う観測の設備は、観測目的に応じ、水位標・水準基標・標識を設置しなくてもよい。

3. 5. 2 自記水位計

(1) 自記水位計が満たすべき要件

<必須>

自記水位計は、水位の時間平均値を記録・出力することができなければならない。ただし、自動記録装置として自記紙のみを採用し、かつ、自動データ伝送装置を備える必要のない自記水位計については、その限りではない。

データ表示・記録等を担う自動記録装置や自動データ転送装置等に関しては、堅固な基礎の上に、洪水時にも冠水しない高さに据え付けなければならない。

水位の最小読み取り単位は 1/100 m を原則とする。高い精度を要求される場合には、必要に応じて最小読取単位を小さくするものとする。

<標準>

データ表示・記録等を担う自動記録装置や自動データ転送装置等に関しては、洪水時を含めてその設置場所へのアクセスが可能な場所に設置することを標準とする。

また、水位計としての必要な性能を満たすことを証明する試験成績書が添付された水位計を使用することを標準とする。

(2) 自記水位計の選定・設置

<標準>

自記水位計の機種を選定及び設置に当たっては、水位計設置場所の水理特性や地形等に適

合していること、目的に応じ洪水や渇水のような異常時も含めて計測すべき最低水位から最高水位まで継続的に安定したデータが取れること、必要精度を満足すること、設置地点の条件下において維持管理が容易であり、設置も含めた経費が適正であること等を総合的に判断して、機種と設置位置を選定するものとする。

<例 示>

主要な自記水位計について、選定に当たっての参考事項を以下に例示する。

表 2-3-2 主な自記水位計の比較選定時における参考事項

水位計の種類	選定における参考事項
(1) フロート式水位計	センサ本体には電子部品がないため、電源異常や中断時の対応が容易であり、長期にわたる水位観測データの収集・蓄積において歴史的に大きな役割を果たしてきた実績がある。しかし、観測井・導水路（導水管）を伴う施設整備が必要であり、河床変動・土砂輸送が激しい河川では、導水路（導水管）の水流からの隔絶や土砂堆積による閉塞への対策が必要である。
(2) リードスイッチ式水位計	観測井が不要で H 型鋼を利用して比較的容易に設置ができ、中下流部での観測に多く用いられる。低水から高水までの観測を確保するために、一般に同一横断面に複数のセンサを設置する必要がある。流下物の影響を小さくするゴミよけ等の対策が必要である。
(3) 気泡式水位計	気泡が送気管から出るときの圧力を測る水位計である。以前に比べてシステム全体が小型化されており、海外では、適用事例は少なくない。動水圧や、水温・濁度等による水の密度変化の影響には注意が必要である。
(4) 水圧式水位計	水中にセンサ部を固定すればよく、設置が容易である。しかし、動水圧の影響や、高速流・転石等によるセンサ流出・ケーブル破断、および、水温・濁度等による水の密度変化の影響には注意が必要である。センサ部が大気圧との差圧検知型でない場合は、大気圧補正が必要である。
(5) 超音波式水位計、電波式水位計	水面と全く接触せずに計測でき、観測断面内におけるセンサの設置位置の自由度が高いことから、高流速の地点や河床変動が激しく川筋が大きく変動する場所での設置に適している。センサ本体を空中に設置することから、風による振動や、設置土台の振動を抑制する必要がある。また、超音波式の場合、気温補正が必要である。
(6) CCTV カメラ	CCTV を活用して水位標または、橋脚等での水面を抽出することにより、水位の計測が可能であり、危機管理目的やより高度な河道管理への情報収集等を目的とした水位計測に用いることができる。橋脚を水面抽出の対象とする場合、橋脚による水位の乱れ（せき上げ等）の影響に注意が必要である。

(3) 自動記録装置

<必 須>

水位観測所には、自記紙やデータロガー等の自動記録装置を設置しなければならない。

自動記録装置は、関連機材を収納することのできる観測小屋又は観測ボックス等の内部に設置し、無人・自動での確実な観測データ記録と定期的なデータ収集に支障のないようにしなければならない。

ただし、カテゴリー 2 やカテゴリー 3 等の観測を目的とした水位計の場合はその限りではない。

<標 準>

自記水位計のうち、デジタル的に水位を表示・記録する装置の場合は、1 秒以下の時間間隔

で水位の瞬時計測値を得ることができ、それらのある一定時間内で平均した値（波浪等の影響を除いた水位の観測値）について、10 分以下の時間間隔で表示・記録できる機能を有していることを標準とする。

なお、水位瞬時計測値を水位観測値とするためのサンプリング間隔（瞬時計測の時間間隔）とその平均時間については、本節 3.7.1 自記水位計による観測によるものとする。

（４） 自動データ転送装置

＜必 須＞

リアルタイム観測が必要な水位観測所は、自動データ伝送装置（テレメータ等）を備えなければならない。

＜標 準＞

自動データ伝送装置は、10 分以下の時間間隔でデータを転送できる機能を有するものを標準とする。

自動データ伝送装置は、「電気通信施設設計要領（案）（通信編）」に基づき設計されたものを標準とする。

3. 5. 3 水位標

＜必 須＞

水位標は、量水板を用いて水位を目視観測するための設備であり、自記水位計の水位観測値を校正もしくは補完するためにも用いられる。

量水板の最小目盛の単位は原則として 1/100 m としなければならない。

ただし、高い精度が要求される場合には、必要に応じて最小読取単位を小さくするものとする。

水位標の零点の標高（零点高）は、水準基標を基準として測量しておかなければならない。これにより、本節 3.2 に述べた各種の水位表示法について、目的に応じていつでも相互に変換できるようにしておくものとする。

水位標の零点高は原則として既往最低水位以下としなければならない。ただし、上下流の近接する既設水位標の零点高との関連も考慮して定めるものとする。また、河床掘削計画等がある場合には、その影響を見込んで設定するものとする。

夜間や出水時の場合でも、目盛を正確に読み取ることができる箇所に水位標を設置しなければならない。

水位計測範囲を大きくとる必要がある川では、2m 程度の支柱を護岸や堤防のり面に複数本設置し、水位上昇時においても、順次上位の水位標に読取を安全に引き継げるようにしなければならない。

その際、上位・下位の水位標目盛の重複は 0.5m 以上とする。

水位標の設置後においても、その零点高は少なくとも年 1 回は測定しなければならない。その場合、水準器の読取の単位は 1mm を用いる。

＜標 準＞

零点高の変化が見られた場合、零点高の変化時点（洪水、地震等）が分かる場合にはその時点より、分からない場合は前年の測定時点より、水位観測値を補正することを原則とする。ただし、補正の単位は 1/100 m とする。

3. 5. 4 水準基標

<必 須>

水準基標（水準拠標）は、水位観測所（水位標）の零点高と東京湾平均海面（T.P.）及び当該水系における独自の統一基準面がある場合にはその基準面との関係を定義するために、水位観測の近くに水準点に準じて必ず設置するものとする。やむを得ず距離標等で代用する場合は堅固な構造としなければならない。

定期的な水準測量により、その標高を常に明らかにしておかなければならない。

地盤沈下・隆起のある地域では、地盤変動していないと推定される水準点を基準として水準測量しなければならない。

<標 準>

水準基標の測量精度は、2 級水準測量とする。

3. 5. 5 標識

<必 須>

水位観測所には、標識を設置し、必要に応じ観測小屋、柵を設置しなければならない。

標識には、観測所名、水系・河川名、設置者名、設置年月日、観測所所在地、緯度・経度、標高（水位標零点高）、河口又は合流点からの距離、水防団待機水位、氾濫注意水位を記載する。

また、必要に応じて、既往最高水位、計画高水位、観測所番号等、参考となる事項を記載するものとする。

3. 6 観測所台帳

<必 須>

水位観測所を設置し水位観測を行う者は、水位観測所台帳及び付図を作成しなければならない。

台帳には、観測所の位置や施設構造等に関する諸元のほか、水防団待機水位、氾濫注意水位及び氾濫危険水位並びに水位標位置、零点高及び観測機器の変化等を記載し、観測条件の変遷を明らかにしておかなければならない。

水位観測所には、水位観測所台帳及び付図の写しを備え付けなければならない。

様式については「水文観測業務規程細則」に従わなければならない。

<愛知県基準>

愛知県では、上記の台帳及び付図は、所管する建設事務所で備え付けるものとする。

3. 7 水位観測

3. 7. 1 自記水位計による観測

<標 準>

自記水位計により計測した水位は、波浪の影響を排除するために、ある一定時間にサンプリングされた水位瞬時計測値群を対象として、その一定時間で平均した値を水位観測値として記録するものとする。

3. 7. 2 水位観測システムの二重化等

<標準>

水位観測所は、地震等の自然災害時や停電時における機能確保を考慮して設計し、非常用発電設備など必要な設備を設置することを標準とする。

<推奨>

河川計画・管理、洪水予報河川及び水位周知河川の基準局などの危機管理上重要な水位観測所においては、データの欠測を極力防止し、整合性のあるデータを極力継続して取得するため、必要に応じて観測システム（センサ及び記録部）の二重化を図ることが望ましい。

センサの二重化を図る場合には、設置地点は、同一地点、少なくとも同一横断面内を原則とする。やむを得ず、縦断方向に位置がずれる場合には、相互の水位関係を把握し、水位の相関を確認しておくこととする。

また、自記水位計の機種は異機種とすることが望ましい。

なお、主水位計と副水位計の切り替えは遠隔で可能とし、切り替えを行う場合には、切り替えの基準を明確にしておくこととする。

3. 8 水位観測所の維持及び管理

<必須>

観測設備の維持及び管理の実施に際しては、「水文観測業務規程」第8章 観測所の維持及び管理、「水文観測業務規程細則」の第8章 観測所の維持管理等 の定めに従わなければならない。

また、観測設備ごとに点検や維持管理上必要な事項を記入した点検記録簿を備えなければならない。

<標準>

観測設備の点検は、観測設備の維持管理において最も重要である。点検は、以下に示す総合点検及び定期点検を組み合わせることを基本とする。それぞれにおいて点検すべき主要な事項は以下を標準とする。なお、これらの点検においては、水位標による水位観測値と自記水位計による水位観測値を必ず記録・比較し、自記水位計の校正をその都度図ることを原則とする。

- 1) 総合点検は、年1回以上（出水期前等。必要に応じて回数を増やす。）とし、対象とする施設・設備において特に器械類の内部に対して詳細点検を実施し、擬似テスト等による点検を含めた総合的な保守及び校正を行う。この点検は、測定部（センサ）、記録部、器械類の故障の有無を確認し、観測データの精度向上が図られるよう保守及び校正を行うことを主たる目的とする。
- 2) 定期点検は、月1回以上（総合点検を除いた月）とし、対象とする施設・設備において特に器械類の外部（表示値を含む）から判断できる点検を中心に行う。この点検は、測定部（センサ）、記録部、器械類の機能障害等の異常を早期に発見し、観測データの欠測や異常値を生じさせないことを主たる目的とする。なお、これらの点検においては、水位標読取值と自記水位計記録値を必ず記録・比較し、自記水位計の校正をその都度図ることを原則とする。

3. 9 簡易観測等

3. 9. 1 洪水痕跡水位調査

<考え方>

洪水痕跡とは、堤防のり面等に繁茂する植生に付着した泥やゴミ等、当該洪水時に冠水したことを示す跡である。洪水痕跡水位は、任意の河道横断測線上において洪水痕跡が認められる最高地点の標高として測定するものである。多数の河道横断測線において痕跡水位を得ることで、当該出水時の左右岸に沿った最高水位の詳細な縦断分布を知ることができ、洪水流下のネック部（せき上げ）、河道の湾曲や砂州による左右岸の水位差、粗度係数等といった洪水の流下特性を調査するための基礎的データとして活用する。

本調査で得られる水位の精度は、本節 3. 9. 2 に後述するように、カテゴリー1 の水位観測に比較して低いことが一般的である。また、痕跡であることから、その地点の最高水位を表すものであり、その生起時刻や水位の時間変化に関する情報は得られない。洪水痕跡水位調査にはこのような短所がある一方、縦断方向に密な測定が可能で、縦断的な水位分布に関する詳細な情報を得られる可能性が高く、洪水時の観測の困難さから考えて、洪水痕跡調査を行うことが洪水流の特性を知る上で非常に重要と認識され、実施されてきたところである。こうした観点から、カテゴリー2 の具体例として記載する。

なお、水位の時間変化を測定することが技術的にもコスト面でも容易になってきたことから、縦断方向に密で、かつ時間変化の情報まで得られる水位測定が可能となってきた。したがって、こうした水位測定方法を洪水痕跡水位測定の代わりに採用する、あるいは併用するという選択肢があることを考慮しておくことが望ましい。

<推奨>

痕跡水位の測定については、以下により実施することが望ましい。

- 1) ピーク水位発生後、なるべく早く痕跡の位置を測定すること。又は杭・マーカー等で印を付けて、後日測定すること。
- 2) 痕跡の判定は、河岸・高水敷・堤防のり面の植生に付着する泥によるものを基本とする。ただし、樹木や茎の固い草本植物では、洪水流中では倒伏していたものが出水後に立ち上がり、そのため痕跡による水位が実際より高い位置になる場合があるため、その採用に当たっては、他の植物種の痕跡と比較するなど注意を要する。また、高水護岸上では一般に泥の付着による痕跡の判定が困難であり、確実な痕跡水位を得ることができない。そうした区間が左右岸とも連続する河道区間では、最高水位のみを記録する簡易な水位計等を設置すること。
- 3) 泥が見られずゴミで判定する場合には、測定対象地点周辺の痕跡をできるだけ多く観察し、低いものを除外し、高さがおおむね一致するほぼ直線上に位置する痕跡群を採用すること。ただし、護岸の設置された堤防や河岸のり面上には、最高水位の位置にゴミが残らず、小段等平坦面上に集積する場合がある。それらのゴミも上記のように観察した結果、痕跡群として採用される場合がある。このような護岸上（特に小段等平坦面上）における痕跡は精度が低い可能性があるため、測定する際にその旨を記録しておくこと。また、そうした区間が左右岸とも連続する河道区間では、最高水位のみを記録する簡易な水位計等を設置すること。
- 4) 以上に基づき、左右岸で洪水痕跡水位を得る。洪水痕跡水位は少なくとも定期横断測線上で測定することとするが、低水路幅に比較して定期横断測線の間隔が大きい河川では、低水路幅と同程度の縦断間隔で少なくとも 1 個以上の洪水痕跡水位が得られるように測定すること。

洪水痕跡水位は、流量データと並んで粗度係数の逆算等、出水に関する水理検討の結果を大きく左右するので、その水位の精度についてより精度の高い水位測定値との比較から確認することを推奨する。

図 2-3-1 は、全国の河川を対象に、洪水痕跡水位に含まれる誤差と河床勾配との関係を示したものである。なお、誤差は、洪水痕跡水位の測定を行った断面（地点）内に設置してある自記水位計、普通水位計等により得られた水位を真値と仮定し次式により求めた。

$$\text{誤差} = (\text{洪水痕跡水位}) - (\text{水位計、普通水位計等により測定した水位}) \quad (2-3-1)$$

図 2-3-1 によると、河床勾配が大きいほどばらつきが大きく、またほぼ同一勾配の河川の誤差の分布特性に注目すると、零を中心にして、正負同様にばらつく傾向となった。ただし、誤差の原因についてはまだ十分には把握されていないことから、図 2-3-1 はあくまで参考とされたい。

上記を踏まえて、急勾配河川等痕跡のばらつきが大きい河川では、縦断間隔を短く、多地点で洪水痕跡水位を測定することが望ましい。

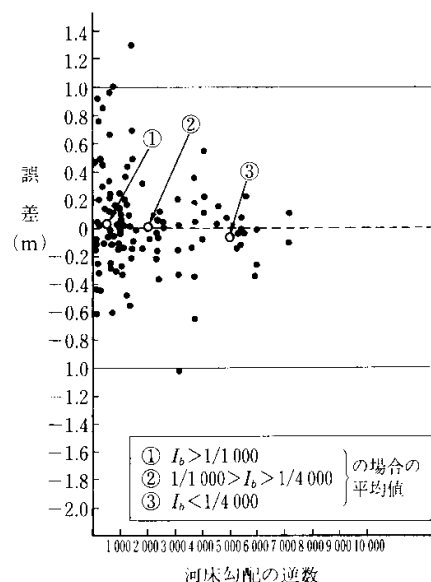


図 2-3-1 洪水痕跡水位に含まれる誤差と河床勾配との関係

出典：河道特性に関する研究，建設省河川局治水課・土木研究所，第 42 回建設省技術研究会報告，1988.

3. 9. 2 簡易水位観測

<考え方>

簡易水位観測は、精度を確保した長期的な統計資料として活用することを主目的とせず、概略的、緊急的、若しくは臨時的に、洪水時の特定の水理・水文状況等について個別具体的に設定し、それに適した簡易的な方法・センサ等で観測することを指す。本章の第 1 節 総論 カテゴリー 2 や カテゴリー 3 の観測において有効となる。洪水時の避難判断等のために設置する危機管理型水位計や重要区間等で水位を密に把握するために設置するデータ発信機能付きのアドホック型水位計による観測は、その具体例である。

<推奨>

河川における水位等の水文観測は、従来は主に カテゴリー 1 の用途で実施されてきた。

これに対し、例えば危機管理型水位計は、警戒避難体制の確保等の危機管理にも有効な洪水時の的確な予警報や早期避難に役立てることを目的とした カテゴリー 2 に属する水位観測

であり、またその観測結果はカテゴリー3の観測に組み込むことも可能である。

カテゴリー2や3の観測によって得られた水文資料については、出水を捉えたデータなど各種検討解析の必要に応じて、保存することが望ましい。

<愛知県基準>

<危機管理型水位計の設置箇所の考え方>

設置箇所の選定にあたっては、下記の要件に該当する箇所で検討を行うこと

①水位周知河川の水位計の二重化

②市町村が避難判断等のために必要と判断する要望箇所の内

- ・浸水実績が確認されている箇所
- ・急激な水位上昇が確認されている箇所
- ・水位上昇のしやすい支川合流部
- ・付近に学校、病院、公民館及び要配慮者利用施設等がある箇所
- ・遊水地流入部、狭窄部及び氾濫危険箇所等の施設管理をするうえで水位監視が必要とされる箇所
- ・市街化が進む河川で水位計が設置されておらず、水位監視が必要とされる箇所

第4節 流量観測

4.1 総説

<考え方>

本節は、河川での流量観測を実施するために必要な技術的事項を定めるものである。

河川流量は単位時間に河川のある横断面を通過する水の量である。

流量観測は、河川の計画・管理を適切に行うために、流域から河道への流出過程及び河道内の流下過程を把握することを目的としており、河川・砂防に関する計画の立案、工事の実施、施設の維持管理、環境の整備及び保全、洪水や渇水等による水災害への対応等を実施するための最も基本的な調査項目の一つである。

流量観測データの具体的な活用事例としては以下が挙げられる。

- 1) 流域の主要な地点の流量の時間的变化を正確に把握し、実現象を精度よく再現できる水文流出モデル、並びに河道流下モデルの構築に活用する。
- 2) 河道内の流れの状況を把握し、河床変動の傾向を把握し、河床の局所洗掘や堆積を予測し、被災予防等効率的な河川管理に活用する。
- 3) 水利権の見直し、正常流量の設定に活用する。
- 4) ダム・堰等の流水制御施設の計画、施設の運用管理に活用する。

本節で主に扱うのは、本章の第1節 総説 で説明した3つのカテゴリーのうちのカテゴリー1であり、特に断らない限り、本節ではカテゴリー1の流量観測について述べている。このことから、本節で記述する基準は、特に断らない限り、水文観測業務規程に基づき定常業務として実施する観測を前提としている。

また流量は、カテゴリー3.1、3.2にとって基本となる量であり、カテゴリー2においても対象となる可能性が高い。本節の内容は、それらのカテゴリーの観測手法の検討にも役立つ情報を含むので、カテゴリー1に限定せず適宜参考にすると良い。

<標準>

河川・砂防に関する計画の立案、工事の実施、施設の維持管理、環境の整備及び保全、洪水や渇水等の水災害への対応等を実施するため、流量を観測することを基本とする。

4. 2 流量観測の方法

4. 2. 1 流量観測手法の分類

<考え方>

流量観測手法は、次の3つの方法に大別される。

- 1) 河川横断面において、流速計測値と、水位観測等により求めた断面積値から、（流速）×（面積）の計算を行って流量を算出する方法（流速断面積法）。
- 2) 堰等の水理構造物において、適切な位置において水深を計測（若しくは水位観測結果より算定）し、越流公式等から流量を求める方法（水理構造物法）
- 3) 洪水痕跡水位等を含む水位観測結果を利用し、開水路流れとしての水理学的知見に基づき流量を算出する方法（間接計測法）

本節では、主に、上記のうち、1) と2) による観測法を取り上げる。

3) の水位観測結果を利用した流量を求める方法は、本章 第1節 総説で説明したカテゴリー3.1の観測から流量の解析を行う方法に属する。

なお、洪水時の流量観測は1) の手法のうち人力による浮子測法を用いる事が一般的だが、大規模洪水時等には様々な制約により観測できない場合があることから、センサや非接触型を用いた無人観測や、3) の間接計測法の活用に向けた取組を進めることが重要である。

表 2-4-1 主要な流量観測手法の種類

分類			名称	直接の 測定対象	説明	
流速断面積法	トレーサによる流速計測法		浮子測法	吃水部 平均 流速	直線上に一定の区間を定め、浮子をその区間の上流から流し、その下流までの距離を流下時間で除して流速を求める方法である。	
			色素投入法・希釈法等	ある 代表的 な流速	水深が浅く表面浮子が使用できない場合等に、フルオレッセン等の色素や化学物質を投入して代表的な流速を測定する方法である。	
	流水にセンサを接触させる流速計測法	可搬式流速計	回転式流速計測法	横断面 内点流 速分布	回転する測定部を流水中に水没させ、その回転数から流速を測定する方法である。水車やプロペラを回転部に持つ横軸型(広井式流速計等)と円すい型のカップを回転部に持つ縦軸型(プライス流速計)に分類される。	
			可搬式電磁流速計測法		水中に電磁式の測定部を持つ流速計で、人工的に発生させた磁界の中の水が動くときに生じる起電圧から流速を測定する。	
		船搭載	ADCP(超音波ドップラー流向流速計)計測法	横断面 内流速 分布	超音波のドップラー効果を応用することによって、断面内の三次元流向・流速分布を測定する機器である。この測定器を橋上係留船等に搭載し、移動しながら測定することによって大水面、大水深領域の通過断面内流量を短時間で測定できる。また、河床等に固定した場合は、流速分布の時間変化を測定できる。	
	水中固定	連続観測可能	超音波流速計測法(パルス伝播時間差法)	代表深 さにお ける平 均流速	超音波の伝播速度が流れの方向では増加し、流れと逆方向には減少することを利用して、その差を測定して流速を求めるものである。送受信装置を測定箇所の両岸に設置し、水中に送波して測定する。	
			H-ADCP 法		ADCP を水平方向に設置し、横断方向の流速分布を超音波の反射波におけるドップラー効果から測定する。中小河川であれば、片岸のセンサだけで測定システムを構成することが可能。	
			開水路電磁流量計測法	断面平 均流速	両岸に設置した電極間に生じる起電力が断面平均流速に比例する原理により流量を算出するシステムである。	
	非接触型流速計測法		ドップラー型(電波式、超音波式)	表面 流速	流れの表面に橋桁等に設置したセンサから電波もしくは超音波をある俯角をもって水面に向けて発射し、その反射波の周波数変化から表面流速を測定するシステムである。現状では、流速が約 0.5m/s 以上の流量観測のみに利用可能	
			画像処理型(PIV 法、STIV 法等)		洪水時に流況をビデオカメラ等で撮影した映像を用いて、画像解析手法により流速を計測する手法である。流下するゴミ、波紋等を河岸から撮影、画像解析する PIV 法や、動画から得られる連続した静止画を用いて輝度値等を時間軸方向に積み重ねた時空間画像に生じる縞パターンから水表面流速を求める STIV 法等がある。	
水理構造物法			堰測法等	水深	三角堰や台形堰を自由越流する際の越流水深を測定し、実験等により求められた流量公式により流量換算する方法である。	
間接計測法			水面勾配断面積法	水位	河川断面の粗度を仮定し、洪水痕跡等から推定される水位、水面勾配から流量を算出する方法である。洪水痕跡水位については本章 第3節 水位観測 3.9 が参考になる。	

※ 観測中や観測現場への移動中の観測員の安全確保など、浮子測法の適用に課題を抱えた観測所で、改善のために非接触型流速計測法が用いられた例がある。

- ※ 非接触型流速計測法は、センサを橋桁等に固定設置することで固定式流量観測法として利用するのが一般的であるが、可搬型の非接触型センサ（小型電波流速計やビデオカメラ）を橋上等に仮設置して用いる場合は、非固定式流量観測法として利用することも可能である。
- ※ 表 2-4-1 に記載していない水位流量曲線法は、様々な水位における上記の手法による流量観測値を収集することで、流量の連続評価を行うための関係式を作成するものであり、上記に挙げた流量観測法（特に非固定式観測法）に依存して成立する方法である。このことから、流量観測法としては挙げていない。
- ※ 間接計測法の一つである「水面勾配断面積法」は、最も単純な手法として例示している。なお、本章 第 1 節 総説 で説明したカテゴリー 3. 1 の観測の中で、多地点の水位連続観測による対象河川区間の水理システムの把握により、流量の他、河床の変動等の洪水時の河道の諸元など、より多くの情報を得ることも行われる。
- ※ 各点の流速計測値に代表させる区分断面ごとの区分流量を単純にそのまま足し合わせるのではなく、それらの計測値群が満足すべき水理学的条件を同時に考慮して流量を算出する方法も近年提案されている。
- ※ 表面流速を測定対象とする手法として、洪水時航空測量により、計測原理としてカメロン効果を用いるなどしてスナップショット的に表面流速を計測する技術がある。洪水流の特性を面的に広域に把握する上で有用である。

4. 2. 2 流量観測手法の選定

<必 須>

流量観測手法を選定するに当たっては、流量観測所の設置目的、設置条件、流量規模、必要精度、観測頻度を勘案して、前項に挙げた各種方法の現時点での精度・信頼性・適用範囲・労力やコスト等の特性を踏まえ適切な手法を選択若しくは組み合わせることで流量観測を実施するものとする（本章 第 4 節 流量観測 4. 5～4. 10 も参照）。

4. 3 流量観測所の配置と設置

4. 3. 1 流量観測所の配置

<必 須>

河川等の計画・管理上重要な地点に、必要に応じて、カテゴリー1 の流量観測のための流量観測所を設けなければならない。

<標 準>

流量観測所は、低水から高水に至るまで連続的に流量を把握できる地点に設置することを標準とする。

しかし、流量観測所の設置目的を低水計画・管理又は高水計画・管理に特化する場合は、その限りではない。

<例 示>

流量観測を行う地点には、以下に示すような地点が考えられる。

- 1) 管理区間最上流端付近（本川・支川）
- 2) 重要支川の合流後及び同支川の下流端（背水区間を除く）
- 3) 重要派川の分流前後
- 4) 遊水地、湖沼、貯水池の流出口、若しくはその下流地点
- 5) 流水制御施設の上下流、伏没・還元、適正な取水の把握、正常流量の設定等、水収支を把握する必要のある地点
- 6) 水面勾配や河道幅・セグメント等の河道条件が変化する地点の前後

4. 3. 2 流量観測所の設置場所の選定

<標準>

観測所は、次の 1) ～ 5) の条件を満足する場所に設置することを標準とする。

- 1) 水位観測施設が設置できる場所
- 2) 流量観測を安定して行うことができる以下の場所
 - a) 流路や河床の変動が少ない場所
 - b) 流れに瀬や淵の部分がなく、みお筋が安定している場所
 - c) 対岸及び観測断面周辺の見通しが良い場所
 - d) 低水流量観測及び高水流量観測が同一場所若しくはなるべく近い場所で行える場所（低水又は高水のいずれかの観測目的に特化した観測所を除く）

浮子測法を用いる観測所では、更に以下の e) ～h) の条件を満たす場所とする。

- e) 浮子の流下時間を測定する直線区間が必要な距離以上確保できる場所
- f) 洪水時の水平方向・鉛直方向の流速分布に大きな変化がない場所
- g) 浮子投下施設を設置できる場所。又は、浮子を必要な測線に安全・確実に投下できる橋がある場所
- h) 流れを阻害する立木・構造物等がない場所

電波流速計を用いる観測所では、以下の i) ～l) の条件を満たす場所とする。

- i) センサ面からの対水面間距離、対象洪水時の水表面流速等が機器の仕様、計測範囲内であり、水面が波立つ等電波が確実にセンサに反射され測定できること。
- j) 電波流速計の電波照射範囲に護岸、岩、河床、樹木やその枝葉等、流水以外がないこと。
- k) 河道の湾曲や橋脚などの影響により大きく流速が異なる水域や渦を巻くような流れ等にならない場所であること。
- l) 流速計測箇所の横断形状と当該箇所の水位観測値を得られること。

画像処理型流速測定法を用いる観測所では、以下 m) から o) の条件を満たす場所とする。

- m) 流速計測箇所近傍の水位（洪水時）や横断測量（洪水前後）成果が取得しやすいこと。
- n) 流速計測範囲において画像解析に必要な情報（STIV 法における水表面の波紋、Float-PTV 法におけるトレーサの視認、標定点など）を撮影できる画角が設定可能な撮影箇所であること。
- o) 渦を巻くような流れや偏流、橋脚等の構造物の影響がない位置であること。

- 3) 観測所の維持管理がしやすい場所

- 4) 観測作業を実施するに当たって危険が少なく安全である場所

- 5) その他

- a) 水位流量曲線法により流量の連続評価を行う観測所の場合は、大河川との合流点や堰等の水位制御施設の直上流点や感潮区間等、下流水位の影響を受ける地点は避けるべきである。

- b) 固定式観測法（水理構造物による方法を除く）を採用する観測所においては、非固定式観測法による観測値との同時刻流量の比較を実施することによる校正・検証作業が一般に必要となることから、固定式観測法（水理構造物による方法を除く）を採用する場所は、原則として、校正用に観測する非固定式観測法が適用可能な場所とする。

4. 3. 3 観測施設が備えるべき設備

（１） 総説

<必 須>

流量観測所には以下の設備を設置しなければならない。

- 1) 水位観測施設
- 2) 観測断面を指定する流量観測所横断線拠標
- 3) 標識
- 4) 流量観測に必要な観測装置及び付帯設備

<必 須>

流量観測に影響を与える河川区間内では、整正な水流を確保することを目的として、立木伐採、除草、障害物の除去、断面の保全等、必要な維持管理に努めなければならない。

浮子測法による場合、上記の区間は浮子投下断面より 50m 程度上流から、第 2 見通し断面より 50m 程度下流までの範囲とする。

（２） 各観測方法における留意事項

<必 須>

観測方法によっては、以下の事項について、留意して設置しなければならない。

- 1) 水位観測施設については、本章 第 3 節 水位観測 3.5 水位観測所が備えるべき設備 に記載されている設備を設置しなければならない。
- 2) 流量観測所横断線拠標については、浮子測法による計測において、夜間でも照明等により見通すことのできる見通し杭として設置しなければならない。
- 3) 固定式観測法を用いる場合には、観測装置を現地に設置する。恒久設置をする場合だけでなく、観測期間中のみの一時的な暫定設置をする場合もある。
- 4) 非接触型流速計測法の場合には、付帯設備として、風向風速計も設置しなければならない。

（３） 流量観測所横断線

<必 須>

流量観測所には、流心に直角の方向に流量観測所横断線を設定し、当該横断線の位置を示すために横断線拠標を設置しなければならない。

<標準>

横断線の数及び間隔は、観測の方法に応じて、次の表 2-4-2 によることを標準とする。

表 2-4-2 横断線の数及び間隔と観測の方法

方 法	横断線設置箇所数	備 考
浮子測法	2 箇所	浮子測法の 2 箇所の横断線拠標（第 1 及び第 2 見通し杭）間の距離については、流下時間計測における誤差を抑制する観点から、最大流速×10 秒～15 秒程度の距離（概ね 50m 以上が目安）をとることを標準とする。 ただし、その直線区間内においても高水敷・植生等による大規模な乱流や渦の存在等により適正に浮子が流下しないケースがある場合は、確保すべき直線区間の距離を短縮してもよい。その場合は、流下時間計測等による誤差を減らすため、同一測線での浮子投下・計測回数の増加等の工夫を行わなければならない。
上記以外	1 箇所	流量観測を実施する断面に設定する。

<標準>

流量観測所に設置する水位観測施設は、流量観測所横断線（2 箇所の場合は、流心に直角方向の測線のうちいずれか 1 箇所の横断線）上に設置することを標準とする。

（４） 流量観測所横断線の横断測量

<必須>

流量観測所横断線については、横断線ごとに横断測量を行い、流量観測所横断図面を作成しておかなければならない。

<標準>

流量観測所の横断図面は、出水期の前に行う横断測量により修正することを標準とする。
洪水等によって河床が変化したと認められる場合には、その都度速やかに横断測量を行い、同様に修正するものとする。
水理構造物を用いる方法の場合には、構造物の変形や堆砂がない限り測量し直す必要はない。ただし、可動ゲートが設置された堰については、ゲートの開度を常に記録しておくことが必要である。

（５） 標 識

<必須>

流量観測所の付近には観測所名、水系・河川名、設置者名、設置年月日、観測所所在地、標高（水位標・零点高）、河口からの距離又は支川においては合流点よりの距離及び観測所番号を記した標識を立て、必要な場合には周囲に防護のための柵等を設けるものとする。
標識は水位流量観測所とし、水位観測所と分ける必要はない。
本章 第 3 節 水位観測 3.5.5 標識 を併せて参照するものとする。

(6) 台 帳

<必 須>

流量観測所を設置し流量観測を行う者は、流量観測所台帳及び付図（流量観測所横断線の断面における横断測量図を含む）を作成しなければならない。

流量観測所台帳には観測所の位置や施設構造等に関する諸元を記載しなければならない。

既存の流量観測所に流量観測を委嘱した場合にも同様とする。

流量観測所には、流量観測所台帳及び付図の写しを備えつけないといけない。

本章 第3節 水位観測 3.6 観測所台帳 を併せて参照するものとする。

4. 3. 4 観測所の維持及び管理

<必 須>

河川管理者は、観測所の維持及び管理の実施に際して「水文観測業務規程」第8章 観測所の維持及び管理、「水文観測業務規程細則」第8章 観測所の維持管理等 に従わなければならない。

また、観測所ごとに点検や維持管理上必要な事項を記入した点検記録簿を備えなければならない。

4. 4 観測

4. 4. 1 総説

<考え方>

本節 4.4 では、カテゴリー1の流量観測の実施について共通となる事項について述べる。

4. 4. 2 観測回数

<必 須>

低水流量観測は、種々の水位に対してできるだけ数多く観測しなければならない。

高水流量観測は、観測値の流量規模に偏りがないように大規模のみならず、中規模の洪水も含めて、できるだけ数多くの洪水を観測しなければならない。

<標 準>

低水流量観測は、年間36回以上実施することを標準とする。

流量の連続評価が可能な固定式観測法については、観測が可能な流況の範囲において、低水時には毎正時、高水時には10分以下の間隔で連続観測を実施し、これを保存することを標準とする。

<愛知県基準>

愛知県では、低水流量観測の回数は、河川管理上必要な回数を実施することを標準とする。

<標 準>

高水流量観測は、洪水の上昇期のみならず下降期にも行うことを標準とする。

洪水ピーク流量を水位流量曲線を介した外挿で推定する必要があるように、適切なタイミングで観測するように努力しなければならない。

非固定式観測法では、ピーク流量観測以外の観測間隔は、毎時実施することを標準とするが、観測所の出水特性、出水状況により判断する。

<推 奨>

非固定式観測法により急激な増減水を伴う洪水の観測を行う場合は、1時間ごとより短い観測間隔で観測することが望ましい。

<推 奨>

渇水時に、前年度の水位流量曲線の適用外（外挿）となるところまで水位が低下した場合は、観測頻度の確保や精密流量観測の実施等により観測精度の確保に努めることが望ましい。

4. 4. 3 器材の管理

<必 須>

流量観測に使用する器材は、求められる所定の機能が常に発揮・保持できるように適切に管理しなければならない。

4. 4. 4 流速計の検定

<必 須>

流速計は、流速計が必要とする精度を確保しているかを確認するための検定（係数試験）又はそれに準じる精度検証を行い、必要な精度の確保が確認できた流速範囲のみにおいて、流速計測に使用しなければならない。検定（係数試験）結果の有効期間は1年を超えないものとする。

回転式流速計や電磁流速計等の可搬式流速計は、流速計検定所（係数試験所）において検定（係数試験）を行わなければならない。

なお、ADCP や電波流速計等のドップラー効果を原理とする流速計については、超音波や電波の送受信性能の確認をもって、上記の精度検証に代えてもよい。

流速センサが必要とする精度は、河川流量観測の目的を踏まえ、測定対象とする流速範囲において、少なくとも5%以内を確保しなければならない。

<標 準>

流速計の計測特性に変化が生じたおそれのある場合は、その都度速やかに検定（係数試験）若しくはそれに準じる精度検証を受けることを標準とする。

4. 4. 5 観測心得の交付

<必 須>

流量観測責任者は、現地で流量観測作業に従事する観測員に対して、観測心得を定め、これを観測員に交付しなければならない。

<標 準>

観測心得には次に掲げる事項を定めることとする。

- 1) 観測の目的と意義
- 2) 観測施設の使用方法
- 3) 観測機器の取扱方法
- 4) 観測記録の整理方法
- 5) 観測の実施に際して必要な注意事項
- 6) 臨時観測の基準
- 7) その他必要な事項

なお、５）観測の実施に際して必要な注意事項 には、器材の故障時の対処方法と連絡先、異常値が観測された場合の通報先等が含まれる。

また、７）その他必要な事項として、作業の安全対策を含めて記述する。

4. 4. 6 精度確保のための留意事項

<必須>

カテゴリー1の主要な流量観測法については、観測地点の水理・水文特性を十分把握した上で、断面全体での流量観測値の精度を確保する必要がある。したがって、それぞれの流量観測法の原理と運用実態、並びに、観測地点の水理・水文現象の実態の両者を踏まえ、観測精度が低下するおそれのある条件下においては、基準を柔軟に運用するなどにより流量観測値の精度を確保するように努めなければならない。

特に、洪水時に実施する高水流量観測では、急激な増減水を伴う中で、緊急かつ迅速に流量観測を行わなければならないことから、急激な水位上昇等により一連の観測作業が間に合わない等の理由で必要な流速測線数を確保することが困難と判断される場合がある。このような条件下においては、観測作業の迅速性に配慮しつつ、流量観測の時系列データをより多く取得することを優先して流量観測を実施するものとする。

また、観測地点の水理・水文特性及び周辺状況の変化により非固定式流量観測手法で観測できなくなる事態が想定される場合は、固定式流量観測機器の併設を行うなど、欠測の防止に努めなければならない。

4. 4. 7 安全確保のための留意事項

<必須>

現地観測員は、救命具を着用するほか、低水路満杯付近から高水敷に流水が乗る状況へ急速に変化する場合を想定し、水位の急激な上昇に備えた観測・退避体制の確保に万全を期するなど、観測時に発生する危険な状況を事前に想定し、観測員が現地で実施する作業の安全確保のための対策に万全を期さなければならない。

4. 4. 8 野帳への記録と保管

<必須>

現地観測員は、観測の都度、観測年月日、時刻、観測流量、観測の方法、当該流量の算出方法等を野帳に記録しなければならない。野帳の様式は、各観測手法ごとに定めておくものとする。

これらの現地での計測データ等を記録した野帳は確実に保管しなければならない。野帳の保存期間等の詳細については、「水文観測業務規程細則」に従わなければならない。

4. 5 可搬式流速計による流量計測法

4. 5. 1 総説

<考え方>

可搬式流速計による流量計測法は、河川の水面幅及び水深に応じて事前に設定した測点において流速を計測し、その流速とそれが代表する区分断面積を乗じて、区分断面ごとの流量を算定し、それらを全断面で加算することにより流量を求めるものである。したがって、1回の観測において水深測定と流速測定を組み合わせる実施する。

4. 5. 2 水理条件に対応した流速計の選定に当たっての留意事項

<標準>

感潮河川、河口付近、河川の分合流部付近での観測や、低水位時に河床地形等に起因した廻り込み流れが無視できない場合等、逆流・斜流が生じたり、水流が乱れるなどして、流速の方向が横断線に対して垂直にならない場合がある。このような条件下において観測しなければならないときは、横断線に対して水流の流向のなす角（方位角）を測定できる流速計を用いることを標準とする。

また、可搬式流速計は、一般に、必要な精度を確保できる水深範囲（表面からの深さ及び河床からの距離）に関する制約があることに注意が必要である。計測すべき測点での計測に対応できる流速計を選定することを標準とする。

4. 5. 3 測定回数、測線と測点（標準法）

（１）測定回数

<標準>

水深測定については、同一横断線上を往路と復路で1回ずつ計2回実施するものとする。

流速測定については、上記の水深測定のいずれかの観測に合わせて、水深測定と同じ横断線上の各測点において実施するものとする。ただし、出水時のように、水位、流速の変化が大きいときはこの限りではない。

（２）測線

<標準>

水深測線及び流速測線は、横断方向に以下の表に示す間隔になるように設定することを標準とする。

表 2-4-3 水面幅と水深測線間隔、流速測線間隔

水面幅（B）m	水深測線間隔（M）m	流速測線間隔（N）m
10 以下	水面幅の 10～15%	N=M
10～20	1	2
20～40	2	4
40～60	3	6
60～80	4	8
80～100	5	10
100～150	6	12
150～200	10	20
200 以上	15	30

<標準>

水深測線は、横断線を含む鉛直面内で流速測線上及び互いに隣り合う流速測線の中央に設けることを標準とする（図 2-4-1）。なお、両岸側においては、流速測線の外側の死水域との境界にもそれぞれ1つの水深測線を設けるものとする。

<推奨>

横断面の形状や流速分布が複雑なときは、測線間隔を短縮し、より密に設定することが望ましい。

(3) 測点

<標準>

流速測点は、流速測線上鉛直方向に水深の2割、8割の位置の流速を測定する2点法を採用することを標準とする。

なお、流速計（及び錘）のサイズによっては、水深が小さい場合に2割水深において流速計感部が水面上にはみ出す、8割水深で必要位置に測点を設定できない等により2点法をとることが困難な場合がある。2点法をとるために必要となる水深は以下により算定できることから、その必要水深以下の場合には水深6割における1点法を基本とする。

1) ロッドにより測定を行う場合

2点法の必要水深＝（ロッドの最下端と流速計の中心の間の距離）×5

2) 流速計に錘をつけて測定する場合

2点法の必要水深＝（錘の最下端と流速計の中心の間の距離）×5

(4) 各測点における流速計測

<必須>

流速計測に当たっては、流速計感部が所定の器深に正しく保持されていることを確認の上、計測を開始しなければならない。

各測点では、20秒以上の有効測定時間を確保した計測を少なくとも2回繰り返さなければならない。両者に著しい相違(10%以上を目安)があった場合は、計測を1回追加し、相違の少ない2回の計測値を確保した上で、それらの平均値を算出し、当該測点における流速値とする。

なお、所定の器深とは、本節4.5.3(3)測点に定める深さをいう。正しく保持するとは、流速計の方向が流速方向に合致していること、ワイヤが傾いていても器深が正しい測点位置に達していることをいう。

<標準>

流量観測値を算出するのに必要な各測点での流速は、測線に鉛直方向の流速成分である。したがって、流向が観測断面に対する垂直方向から大きくずれる場合は、垂直方向からずれた角度を同時に計測した上で、鉛直方向に通過する流速成分に換算することを標準とする。

4.5.4 測定回数、測線と測点（精密法）

<必須>

流速分布の不規則な乱れ等の観測地点の水利条件により、標準法では必要な精度が確保できない場合には、精密法による測定を行い、測定の精度を保持するように努めなければならない。

特に感潮区間、河口付近等で塩水浸入等の密度成層の見られる地点や、低水位時等の河床地形による廻り込み等による流速分布の不規則な乱れが無視できない条件下での流量観測は、精密法によらなければならない。

精密法による流量観測と同時に行った他の観測法による流量値との差異は、野帳、観測流量表及び水位流量曲線図にそれぞれ記入しておかなければならない。

<標準>

精密法による測定は、以下のとおり実施することを標準とする。

1) 測線

水深測線・流速測線の間隔について、ともに標準法の 1/2 とする。

2) 測点

水面から河床までの間に等間隔に 10 点の測点をとることとする。

なお、水深 2m 未満の条件下で精密測定を実施する場合は、測定間隔を 20cm とした上で、可能な範囲で測点数を確保することとする（鉛直方向の測点数は 10 点以下となる。）。

3) 各測点における流速計測

各測点において、60 秒以上の有効測定時間を確保した計測を少なくとも 2 回繰り返すものとする。両者に著しい相違(10%以上を目安)があった場合は、計測を 1 回追加し、相違の少ない 2 回の計測値を確保した上で、それらの平均値を算出し、当該測点における流速値とする。

<推奨>

誤差の原因が流速分布の乱れによるものと想定され、精密法を実施する場合は、以下の測点の設定で計測を行うことが望ましい。

- 1) 水深 2m 以上の条件下では、20cm の測定間隔を下限值として、10 点以上の測点を確保すること。
- 2) 水深 2m 未満の条件下では、小型の流速計を活用するなどして、10 点以内を目安としてできるかぎり多くの測点を確保すること。

4. 5. 5 流量算出の手順

<標準>

可搬式流速計による流速計測値から流量を算出する作業は、次の各項に従って行うことを標準とする。

1) 流量観測の開始時に、水位を測定する。

2) 水深は、各水深測線において往復 2 回測定した値を平均する。

3) 水深の往路（もしくは復路）測定時に、各流速測線において、水深値に応じて鉛直方向の測点を決め、各測点毎に 2 回ずつ流速を測定する。鉛直方向の平均流速値は、同一測点で 2 回ずつ測定した流速を平均して求め、これを用いて各流速測線ごとに次のいずれかにより求める。

a) 2 点法にあってはそれぞれの測点の平均流速値を平均した値

b) 1 点法にあっては 1 点での測点の平均流速値

c) 精密法にあっては、各測点の流速を直線で結んだ鉛直方向の流速分布曲線を描き、曲線内の面積を台形の面積計算法により計算した上で、水深値で除した値（図 2-4-2 参照）。水面の流速は水面に最も近い測点での流速値、河床の流速はゼロとおいてもよい。

4) 流量観測の終了時に再度水位を測定し、開始時の水位との平均値を、流量観測時の水位とする。

5) 横断面中において 1 つの流速測線の鉛直方向の平均流速値が代表する区分断面積は、こ

れと互いに隣り合う流速測線の中央までとする。互いに隣り合う水深測線間の区分断面積は、台形近似により求めてもよい（図 2-4-1 参照）。なお、水面幅 10m 以下にあっては、水深測線と流速測線が一致している（表 2-4-3 参照）ことから、隣り合う 2 つの水深（流速）測線の間中点に仮想的な水深測線を配置し、両隣の水深測線における水深値の平均水深を与えることで、当該流速測線に対応する区分断面積を求める。

- 6) 流量は、1 つの流速測線における鉛直方向の平均流速値と、対応する区分断面積との積を全測線（全区断面）について合計することによって求める。
- 7) なお、両岸に死水域があれば、その区分断面積の流量はゼロとする。
- 8) 算出した流量値は直ちに前年の最終の水位流量曲線図に記入し、水位流量関係に変化があるかを確認する。固定式流量観測法によるリアルタイムの流量観測値がある場合は、その値との比較も行う。前年の水位流量関係や、固定式流量観測法によるリアルタイムの流量観測値との間に 10% 程度以上の大きな差異がある場合には、原因を究明する。原因が明らかにならない場合には、確認のため再測定を行う。

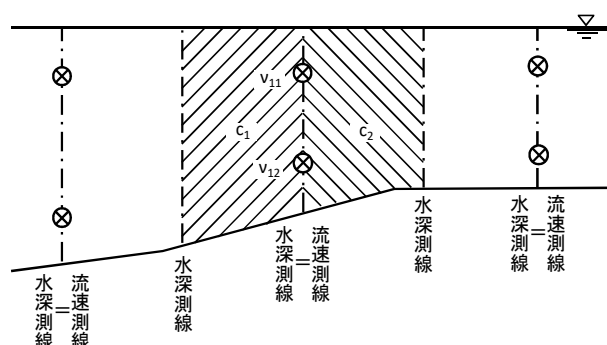


図 2-4-1 標準法（2 点法）における河川横断面内での測線・測点・区分断面の設定

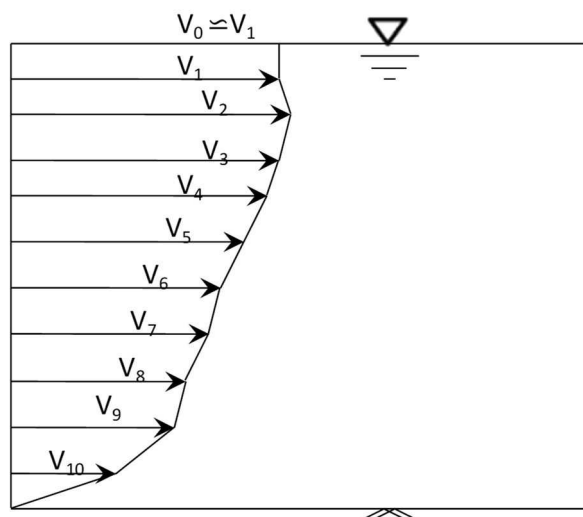


図 2-4-2 精密法における河川鉛直断面内各測点の設定例と鉛直方向平均流速の算出

4. 6 浮子による流速計測法（浮子測法）

4. 6. 1 総説

<考え方>

浮子測法は、浮子を投下して、ある区間を流下する時間を計測し、その区間の平均流速を求める方法である。急峻な日本の河川は、洪水時の流速が速く、ゴミや流木等の流下物も多い。浮子測法は、このような洪水時の厳しい条件下においても河川の流速を確実に計測することができるという特長がある。

本項では浮子測法の標準的な手法を示すが、洪水時の水理条件の変動が特に大きい地点や橋脚やその周辺の構造物等の影響による流れの乱れ（橋脚後流）の影響が無視できないと想定される場合は、浮子の流下状態に注意し、適切な観測値が得られるように実施する必要がある。

4. 6. 2 付帯施設

<必須>

浮子測法による流量観測を行うためには、浮子のほか、次の付帯設備を備えなければならない。本節 4.3.3 観測施設が備えるべき設備 も参照すること。

1) 浮子投下施設

橋梁を利用する場合と、橋梁が利用できないところでは、専用の浮子投下施設を設ける場合がある。

2) 見通し杭

見通し杭（横断線拠標）は、第1見通し横断面及び第2見通し横断面に設置する。併せて、夜間でも照明等で見通すことのできる見通し杭を備えなければならない。

また、浮子投下施設として橋梁を利用する場合は、橋脚後流の影響が及ばないように第1見通し横断面及び第2見通し横断面を設置する必要がある。

3) 水位標

水位標は、第1見通し横断面及び第2見通し横断面に設置する。

4. 6. 3 流速測線

<標準>

流速測線は、第1見通し横断面と第2見通し横断面の間で流れに沿うよう設けるものとする。

測線間隔については、第1見通し横断面の水面幅に応じて、表 2-4-4 に示す測線数以上を確保することを標準とする。

表 2-4-4 水面幅に対応した浮子流速測線の目標数

水面幅	20m 未満	20～100m 未満	100～200m 未満	200m 以上
浮子流速測線数	5	10	15	20

浮子流速測線数の出典：水位及び流量調査作業規程準則（昭和 29 年 10 月 9 日総理府令第 75 号）

一方、急激な増減水を伴う中で、緊急かつ迅速に流量観測を行わなければならない場合には、水面幅に応じて次の表 2-4-5 に示す測線数を下限数とし、表 2-4-4 にある測線数を目標にして、その間の測線数を確保することを標準とする。

表 2-4-5 やむを得ず流量観測を緊急かつ迅速に行わなければならない場合の
水面幅と最小浮子流速測線数の関係

水面幅	50m 未満	50～ 100m 未満	100～ 200m 未満	200～ 400m 未満	400～ 700m 未満	700m 以上
浮子流速測線数	3	4	5	6	7	8

浮子流速測線数の出典：水位及び流量調査作業規程準則（昭和 29 年 10 月 9 日総理府令第 75 号）

<標準>

測線の配置については、観測誤差をできるだけ小さくするため、区分流量が大きい部分に密に配置することを標準とする。

なお、流線が流下方向に平行でないため、各測線上に投下した浮子が流下するにつれて左右にふれる場合においても、第1見通し横断面を基準として測線を設定することを標準とする。

<例示>

測線の具体的な位置について、流速分布が未知の場合は、想定される水深分布を参考として設定する方法がある。

<例示>

測線の位置を適切に設定するために、観測地点付近の洪水流の特性を事前に把握する調査を行う場合がある。そのための方法としては、1) 表2-4-4に示す間隔よりも密に設定した測線において浮子により計測する方法、2) 他の流速分布を密に把握できる観測手法を用いる方法等が考えられる。

4.6.4 浮子の種類

<必須>

浮子測法に使用する浮子は、桿浮子（棒浮子）又は表面浮子とし、水深に応じた浮子を用いなければならない。なお、夜間も確実に浮子の位置を確認できるよう発光体を付けるなど工夫された浮子を用いるものとする。

浮子の流下速度は、水面から浮子の吃水深までの間の平均流速であることから、水面から河床までの間の鉛直方向全体での平均流速に変換するために更正係数を乗じなければならない。

<標準>

観測に用いる浮子は、水深に応じて、水位及び流量調査作業規程準則に与えられている表2-4-6に示すとおり、表面浮子、0.5m吃水の浮子、1.0m吃水の浮子、2.0m吃水の浮子、4.0m吃水の浮子のいずれかを用いることを標準とする。

表 2-4-6 浮子番号と水深、吃水の適用範囲

浮子番号	1	2	3	4	5
水深 (m)	0.7 以下	0.7～1.3	1.3～2.6	2.6～5.2	5.2 以上
吃水 (m)	表面浮子	0.5	1.0	2.0	4.0

出典：水位及び流量調査作業規程準則（昭和29年10月9日総理府令第75号）

<例示>

植生が繁茂している等により、観測に用いる浮子について表2-4-6に依ることが不適切な測線においては、1段階短い浮子を用いることで、当該測線の観測データを確保する手段が有効となる場合がある。

<例 示>

高水敷が冠水した時には、水深に応じた適切な浮子を使用するほか、可搬式流速計を用いて高水敷上の観測を行う場合がある。また、必要に応じて非接触型流量計測法による観測を行う場合がある。

4. 6. 5 浮子による流速の測定

<標 準>

浮子による流速測定作業は、次の各項に従って実施することを標準とする。

- 1) 浮子は、浮子投下施設や橋梁を使って、定められた測線位置において順次投下する。
- 2) 測線ごとに、水位と横断面図とから水深を求め、適切な吃水の浮子を投入する。
- 3) 第1見通し横断面通過から第2見通し横断面通過までの時間 t を測定し、両横断面間の距離 L を t で割って浮子流下速度 v_0 とする。第1、第2見通し横断面間の距離については、本節 4.3.3(3) 流量観測所横断線を参照する。また、浮子が異常流下していないことを後から確認できるように、浮子の流下状況の記録（ポンチ絵、写真、ビデオ等）を残すものとする。
- 4) v_0 に更正係数を掛けて測線ごとの深さ方向平均流速 v を算出する。
- 5) 浮子の更正係数については、次表の値を標準とする。

表 2-4-7 浮子番号と水深、更正係数の関係

浮子番号	1	2	3	4	5
水 深 (m)	0.7 以下	0.7～1.3	1.3～2.6	2.6～5.2	5.2 以上
更 正 係 数	0.85	0.88	0.91	0.94	0.96

出典：水位及び流量調査作業規程準則（昭和 29 年 10 月 9 日総理府令第 75 号）

但し、4.6.4 の例示に基づき、1 段階短い浮子を用いる場合には、水深と浮子の吃水深に応じて更正係数値の修正を行う必要がある。その場合の修正更正係数は、流速分布式に基づき浮子吃水部の平均流速に対する全水深平均流速の比により設定することを基本とする。

- 6) 流速測定の開始時と終了時とにおいて、第1見通し横断面及び第2見通し横断面でそれぞれの水位を観測する。

<推 奨>

水深が 10m 程度を超える場合は、浮子の吃水比が 0.4 以下となり、上表の更正係数の設定条件からのずれが大きくなることから、流速分布式や ADCP による流速分布実測値に基礎を置いた、更正係数の再設定を行うことが望ましい。

4. 6. 6 浮子測法による流量の算出

<標 準>

浮子測法による流量の算出は、次の事項に従って行うことを標準とする。

- 1) 流量算出に用いる断面は、横断面ごとに、洪水前後の横断測量の結果から求められる洪水前及び洪水後の全断面積（洪水期間中の最高水位時）を比較して、いずれか大きい方の断面を用いる。
- 2) 上記の断面積算出に用いる水位は、横断面ごとに、本節 4.6.5 に定めた流速計測の開始時と終了時における水位の平均値とする。

- 3) 1つの流速測線の深さ方向平均流速が代表する区分断面は、これと相隣り合っている流速測線との中央線までの領域とする。
- 4) 第1見通し横断面と第2見通し横断面において、1つの流速測線それぞれに対応した区分断面の面積を求め、両者の算術平均をその流速測線の受け持つ区分断面積とする。
- 5) 流量は、測線ごとの深さ方向平均流速とその平均流速が受け持つ区分断面積との積を全測線について合計して算出する。
- 6) 測定精度のチェックのために、算出した流量値は現場で速やかに前年の水位流量曲線図に記入し、水位流量関係を確認するとともに、固定式観測法による洪水流量観測データが存在する場合には、そのリアルタイム観測データとの比較を行う。水位流量曲線図において、水位～流量の点を時系列的につないで、観測値が反時計回り又は、時計回りのループを描いているかを確認、実況の水理状況に合致しているかどうかを確認する。

4. 7 舟に搭載した ADCP（超音波ドップラー流向流速計）による流速計測法

4. 7. 1 総説

<考え方>

ADCP は水中に発射する超音波が、流水に乗って移動する細粒土砂やプランクトン等に当たって反射する際に生じるドップラー効果を利用して、河道断面内の3次元的な流速分布を計測する測器である。

ADCP を活用した流量計測法としては、舟に搭載して水面から流速分布を計測する非固定式の方法をとる場合、舟が有人か無人にかかわらず、必ず人が現場で舟を操作する必要があるが、舟を水面上で横断方向に移動させながら観測することにより、河川流水断面内の流速分布と断面積を同時に計測できること、観測原理上水面及び川底の付近に一部の観測不能域が生じるものの、流水内の流速分布について他の手法よりも少ない仮定で積分的に流量を計測できることといった特長がある。

水面波浪が大きく、ADCP を搭載した舟の揺動が激しくなる（20度以上が目安）場合や、流木・ゴミの流下が特に多い場合には、安全で安定した計測ができなくなることに注意が必要である。

4. 7. 2 流速分布計測の方法

（1）基本事項

<標準>

洪水時の ADCP による非固定式の流量観測は、橋上操作艇に ADCP を搭載し、橋上からの曳航操作による横断計測を標準とする。

低水時の ADCP による非固定式の流量観測は、有人艇・無人艇（橋上操作艇若しくはラジコン艇）のいずれに搭載する方法でもよい。

いずれの場合においても、観測中は上流からのゴミや流木の監視を行い、それらを迅速に回避する体制をとるものとし、安全管理を十分に行う。

また、ADCP による流量観測については、観測地点において以下のような水理・水文現象が生じている場合には実施しないものとする。

- 1) （波浪の波長が舟の長さよりも十分長い場合を除き）水面の波高が 50cm を超え、舟を浮かべたときに揺動が激しく転覆のおそれがある場合
- 2) 洪水時の流木が舟に頻繁に引っかかるなどにより観測に危険が生じる場合

上記の場合は浮子による観測等を含め、観測方法を別途検討する必要がある。

(2) 使用する計測機器等

<標準>

計測機器等は、下記のものを用いることを標準とする。

- 1) ADCP
- 2) 高精度位置標定装置 (RTK (Real Time Kinematic)-GNSS 等)
- 3) ADCP を搭載する舟
- 4) 遠隔操作装置 (無人艇の場合)
- 5) 橋上から舟を安全に係留操作するための架台 (曳航観測の場合)

<推奨>

- 1) 観測所の状況に応じて下記の機能を有する計測機器を使用又は併用することが望ましい。
 - a) 音響測深器 (高濁度下での観測や河床の凹凸が複雑かつ顕著な場合)
 - b) VTG (進行方向対地移動速度) 情報を取得できる (RTK- GNSS) の使用、又は、トータルステーション
 - c) 磁場の影響を受けない外部コンパス (GNSS コンパス) (観測断面周辺の鋼構造物等による磁場の変化を受けて流向流速ベクトルの算出に影響が及ぶ場合)
- 2) 洪水時の計測に使用する舟は高速流に対応できるトリマラン型 (三胴艇) の橋上操作艇を用いることが望ましい。

(3) 計測機器等の点検準備

<必須>

使用する計測機器等は、舟への固定方法、ケーブル類の配線方法等を検討するとともに、計測前に十分な点検を行わなければならない。

計測時は、ADCP のほかに観測所の状況に応じた計測機器等が必要となる。計測機器等のトラブルは、洪水時の流量観測データを取り逃すことにつながるため、舟への搭載に当たっては、各機器の固定方法やケーブル類の配線方法を検討し、計測時の揺動においても機器の脱落、ケーブルの切断等が生じないようにしなければならない。また、観測時に必要となる発電機等も含め、観測前には十分な点検を行うものとし、特に機器のバッテリーや発電機の燃料等は十分な予備を携帯する必要がある。

(4) 横断計測の範囲

<標準>

横断計測の範囲は、水際部を除き、河道断面内の流速分布 (死水域を含む) について可能な限り計測できる範囲とし、水際部は計測範囲内の流速分布データにより適正な補間処理を行うことを標準とする。

また、横断計測では、水際部に近づくにつれて水深が浅くなるため、近づきすぎると波の影響等で舟が河岸や河床に接触して破損する危険が伴う。このため、水際付近の計測には十分注意するとともに、リアルタイムの計測データにより水深を確認しながら計測を行うこと

を標準とする。

<例 示>

高水敷における計測では、樹木等の影響や地形により、横断計測の途中で橋上操作艇の曳航ができなくなる場合がある。地形により曳航が不可能となった場合は、一度、舟を水面から撤去し、再び観測可能な箇所へ着水させることで、横断計測を継続することが可能となる。

(5) 横断計測の速度

<推 奨>

横断計測の速度については、計測原理上は遅い方が望ましいが、出水時に特に急激な水位変動が見られる場合には、流況の変化に影響がない時間内での観測が望まれる。観測データの精度を安定させるためには両者のバランスが必要となる。

低水流量観測においては、流速が舟の横断速度に比べて極端に遅い場合に、RTK-GNSS 等から得られる横断計測の速度が流速値に与える影響が大きくなるため、計測に使用する舟の制御可能な範囲において、できるだけ舟の横断速度を遅くすることが望ましい。

高水流量観測において橋上操作艇を使用する場合は、横断計測の速度を 1m/s 程度とすることが望ましい。

(6) 計測状況の記録

<必 須>

現地計測の状況に係る下記の項目は、必ず現地において野帳に記録しなければならない。

- 1) 計測年月日
- 2) 観測開始時刻と終了時刻
- 3) 舟と左右岸の水際線までの距離（データ補間処理が必要な距離）
- 4) 計測を開始した河岸（左岸または右岸）
- 5) その他、ADCP 観測時の河道状況等で明記すべき事項（浅瀬の存在等）

4. 7. 3 流量の算出

<標 準>

流量の算出は下記の手順によることを標準とする。

なお、低水路、高水敷を分けて算出するとともに、それぞれ直接計測部と観測不可能領域での補完部の流量も更に分けて算出しておくことを標準とする。

- 1) 各セル（流速分布計測単位）の流速に各セルの面積を乗じて各セルにおける流量を算出する。
- 2) 各セルの流量を合計し、横断計測における各細分化区分断面ごとの計測部流量を算出する。
- 3) 観測不可能領域の流量については、直接計測部より得られる鉛直方向若しくは横断方向の流速分布を適切に活用しながら補完するものとする。
- 4) 各細分化区分断面の流量及び観測不可能領域の全合計値を全断面流量として算出する。
- 5) 全断面平均流速の算出は、全断面流量を全断面積で除して算出する。

4. 8 非接触型流速計測法

4. 8. 1 総説

<考え方>

非接触型流速計は、流水に直接触れることなく河川の表面流速を計測する器械である。このことから、非接触型流速計を活用することで、洪水時の河川の流量を無人で安全かつ自動的に連続観測するシステムの構築が可能である。

ここでは、非接触型流速計の中でも適用事例の多いドップラー型の電波流速計と画像処理型流速測定法を対象として、適用手法を記述する。

4. 8. 2 流速計の設置及び付帯施設

(1) 電波流速計

<標準>

電波流速計は、可搬型流速計による流速計測法や浮子測法と同様に、複数測線（複数区分断面）を設定し、その区分断面ごとの表面流速代表値を計測できるように、電波流速計を橋桁等に設置する。測線の設定に当たっては、橋上操作艇に搭載した ADCP や浮子測法等による現地観測結果等により、洪水時の横断方向流速分布を事前に把握した上で、それぞれの区分流量がほぼ均一になるように設定する。必要測線数は、浮子測法の基準に準じる（4. 6. 3 参照）。ただし、急激な増減水や固定式電波流速計の適用時の経済性、機器同士の電波の干渉などやむを得ない場合は、最小浮子流速測線数を適用できる（4. 6. 3 参照）。

横断方向流速分布から流量演算処理を行うためには、事前に区分断面ごとの水深－断面積（ $H-A$ ）の関係を算出しておく必要がある。このため、流速観測を開始する前に電波照射域を設定し、その中に流量観測断面を設定する。電波流速計は、その流量観測断面に垂直な方向に向けて計測を実施するものとし、同断面における水位も流速と同時に計測するものとする。また、流量観測断面の横断測量を実施して、区分断面ごとの水深－断面積（ $H-A$ ）の関係を事前に把握しておくことを標準とする。

また、出水時には河床が変化する場合があることから、流量観測断面の横断測量を洪水前後に実施し、流量演算処理に反映させることを標準とする。

電波流速計が計測する表面流速は、風による吹送流の影響を受けるため、観測所の近傍に併せて設置する風向風速計のデータを用いて吹送流の影響を除去することを標準とする。

固定式電波流速計では安定性や保守点検を考慮し、設置場所の状況に応じて、保守点検足場、観測局舎、振動対策設備等の周辺設備を設置することを標準とする。

(2) 画像処理型流速測定法

<考え方>

画像処理型流速測定法とは、洪水流を撮影した映像を解析することで流速を計測する手法である。主に LSPIV（あるいは PIV）（Large-Scale Particle Image Velocimetry）、STIV（Space-Time Image Velocimetry）、Float-PTV（Particle Tracking Velocimetry）の 3 手法がある。LSPIV は平面 2 次元的な流況を捉えるには有効な手法であるが、高水流量観測事例は少ない。一方、STIV と Float-PTV は観測事例が比較的多く高水流量観測に適している。

STIV :

- ・STIV 法は水面の波紋の移動速度から水表面流速を計測する手法である。
- ・STIV で得られるのは、（検査線上の）水表面流速の 1 方向成分のみである。

Float-PTV :

- ・Float-PTV は、原則、浮子の流下速度の計測や流下軌跡を追跡する手法である。

- ・浮子以外にも、浮子の替わりになるような“Float（流木等）”の流下状況を追跡することで流速等を把握することが可能である。

<標準>

画像処理型流速測定法を用いた高水流量観測では、録画画像を用いた画像解析手法に適した撮影機材を用いて観測、記録を行うことを基本とする。

STIV や Float-PTV といった画像処理型流速測定法を実施する上での画角設定方法は以下を標準とする。

- ・計測範囲及び兩岸の標定点や標定点として使用可能な既設構造物等をカメラ画角内に収める
- ・ズーム機能も用いて、空やその他の流速・流量算出に係わらない部分はできるだけ画角内に入れない

カメラ映像を用いるにあたり、画像上での位置の移動を実空間での位置の移動に変換するため、必要に応じ標定点を設置することを標準とする。

画像処理型流速測定法のうち STIV を採用する場合、その検査線の位置、長さ、時間は以下を標準とする。

1) 検査線の位置と検査線の本数

検査線の位置は、検査線の中心が流量を算出する横断面上になり、かつ、流量を算出する横断面に対し直交するように配置する。検査線の本数は、浮子測法における標準法（表 2-4-4）以上とする。

2) 検査線の長さ

検査時間は検査線の長さと流速に依存する。可能な限り、検査線の長さと検査時間は STI がほぼ正方形になるように設定する。検査線の長さは、現地の河道特性・流況に合わせて設定する。

3) 解析時間

解析時間は検査線の長さと流速に依存する。可能な限り、検査線の長さと解析時間は STI がほぼ正方形になるように設定することが望ましい。解析時間は、現地の稼働特性・流況に合わせて設定する。

また、出水時には河床が変化する場合があることから、流量観測断面の横断測量を洪水前後に実施し、流量演算処理に反映させることを標準とする。

表面流速は、風による吹送流の影響を受けるため、観測所の近傍に併せて設置する風向風速計のデータを用いて吹送流の影響を除去することを標準とする。

<例示>

STIV により流速を算出する場合、検査線の設定する位置、検査線の長さ、時間は流速の算出精度の影響を及ぼす。

1) 検査線の本数

検査線の本数が増えることで、詳細な水表面流速の横断分布が把握可能となり、流量算出精度の向上が期待できる。

2) 検査線の長さ

できる限り STI 画像自体が正方形であることが望ましい。なお、10～15m 程度が適切であるという実証例がある。併せて、STI 中に現れる波紋の縞模様の傾きが 30～60 度以内になるようにし、40～45 度程度が最適である。

3) 解析時間

可能な限り、検査線の長さや解析時間は STI がほぼ正方形になるように設定することが望ましい。なお、特に大きな流況の変化等がない場合、15 秒程度で問題ないという実証例がある。併せて、STI 中に現れる波紋の縞模様の傾きが 30～60 度以内になるようにし、40～45 度程度が最適である。

検査線長が 10m の場合、解析時間が 15 秒程度で STI 画像が正方形に近い形になる。

4. 8. 3 流量の算出

<標準>

流量は、区分断面ごとの平均流速を算定し、それに区分断面積を乗じて区分断面ごとの流量を算出し、全断面での総和により算出する。

区分断面の平均流速は、区分断面ごとの風補正をした水表面流速に流速補正係数を乗じることで算出する。

流速補正係数は、各観測所における適切な値を使用することを基本とする。

非接触型流速計測法による流量の算出は、次の事項に従って行うことを標準とする。

- 1) 流量算出に用いる断面は、横断面ごとに、洪水前後の横断測量の結果から求められる洪水前及び洪水後の全断面積（洪水期間中の最高水位時）を比較して、いずれか大きい方の断面を用いる。
- 2) 上記の断面積算出に用いる水位は、流速計測の開始時と終了時における対象横断面の水位の平均値とする。
- 3) 1つの流速測線の深さ方向平均流速が代表する区分断面は、これと相隣り合っている流速測線との中央線までの領域とする。
- 4) 非接触型流速計測法により流量を算出する断面において、1つの流速測線それぞれに対応した区分断面の面積を求める。
- 5) 測線ごとの深さ方向平均流速は、非接触型流速計測法で得られた水表面流速に対し、風の影響による補正をし、その補正された水表面流速に流速補正係数を乗じる。
- 6) 流量は、測線ごとの深さ方向平均流速とその平均流速が受け持つ区分断面積との積を全測線について合計して算出する。
- 7) 測定精度のチェックのために、算出した流量値は現場で速やかに前年の水位流量曲線図に記入し、水位流量関係を確認する。

<例示>

流速補正係数は、各観測所における適切な値を使用することが望ましいが、検証が出来ない場合、暫定的に 0.85 を使用しても良い。

今後、ADCP による様々な規模の洪水時の鉛直方向の流速分布に関する観測結果から係数の妥当性を検証し、必要に応じて更新・修正を行う。

4. 8. 4 維持管理

<必須>

非接触型流速計測の計測断面では、流下断面の変化を反映させて計測精度を確保するため、設置後においても出水期前に横断測量を実施しなければならない。

<標準>

電波流速計は、現地への設置の前に、流速検定施設において検定を行い、設置後は現地に

において観測精度を確認することを標準とする。

設置後、観測機器の劣化や不備による欠測を未然に防ぐため、定期的に保守管理を行うことを標準とする。

<標準>

非接触型流速計測の計測断面に H-A 関係、H-V 関係に影響を与えるような変化が生じた場合には、計測結果を ADCP 等による観測結果と比較し、演算処理装置内の係数（流速補正係数）を更新することを標準とする。

4. 9 超音波流速計測法（パルス伝播時間差法）

4. 9. 1 総説

<考え方>

超音波流速計測法（パルス伝播時間差法）は、対となる超音波送受波器を河川の水の中兩岸に斜めに対向して設置し、上流側から下流側へ超音波が伝播するのに要する時間と、反対に下流側から上流側へ伝播するのに要する時間の差が、超音波伝播線上の平均流速に比例することを利用した流速計測法である。

4. 9. 2 超音波流速計測法による流速の測定

<標準>

超音波流速計測法による流速の測定は、次の各項に従って行うことを標準とする。

- 1) 適切な観測位置とシステムを選定する。
- 2) 流量を観測する位置に、流向に対して斜めにかつ水平に流速測線を設け、その両端（水中）に対向させて超音波送受波器を設置する。あわせて断面積算定のための水位計も設置する。
- 3) 送受波器は、流速測線上にある堅固な杭又は護岸等の水中部に取り付ける。
- 4) 横断面の形状・河川の水理・水質特性に応じて、流速測線は 1 本又は複数設置し、それに応じた超音波制御・処理システムを選定する。
- 5) 測定・演算等のため超音波機器設備は陸上に局舎を設け、設置する。

なお、観測位置については本節 4.3 流量観測所の配置と設置に従うものとするが、位置の選定とシステムの選定は相互関連があるので、下記の点にも留意して位置を設定する必要がある。

- 1) 川幅：標準的には、100～200m 程度まで対応が可能であり、それより川幅が広い場合、断面を分割して計測する方法をとるなどの工夫が必要である。
- 2) 水深：水深が浅いと、超音波が水面・底面に当たり多重反射を起こす場合があるので注意が必要である。中州がある地点は避ける。
- 3) 流速：高流速時の気泡、乱流等によるノイズや、洪水時の濁度上昇による減衰の影響を受けることに注意する必要がある。
- 4) 流向：流向の変化の影響は、送受波器を V 字型に配置することで解決できるが、著しい流況の変化があるところは避ける必要がある。
- 5) 水温・塩分の鉛直分布：躍層は、超音波屈折の原因となるので、多層での計測や断面分割等の対策が必要となる場合がある。
- 6) 水温・塩分の時間変動：速い変動により流速計測に影響を与える場合には、上流方向と下流方向の超音波の同時送波が必要である。

<推 奨>

水温変化や塩分変化が流速計測に影響を与えていると想定される場合には、水温計・塩分計を設置することで水温・塩分の鉛直分布を監視することが望ましい。

4. 9. 3 超音波流速計測法による流量の算出

<標 準>

複数の流速測線を持つ場合の流量の算出は、次の各項に従って行うことを標準とする。

- 1) 流量を測定する横断面において1つの流速測線の受け持つ区分横断面積は、上下の流速測線との中間までとする（流速測線が一つの場合は、全横断面を受け持つことになる。）。なお、横断面は、超音波送受波器の方向にかかわらず、流水に直角方向の横断面を用いる。
- 2) 最上段及び最下段に設定された流速測線の受け持つ区分横断面の最上限及び最下限は、それぞれ水面及び底面とする。
- 3) 流量は、平均流速とその受け持つ区分横断面積との積を全測線について合計して求める。

なお、非固定式観測法や ADCP の計測結果との比較により、流速補正係数を用いる必要が明らかになれば、その流速補正係数を用いることを標準とする。

3 測線の場合を数式に表わすと、

$$Q = a_1 \cdot v_1 + a_2 \cdot v_2 + a_3(H) \cdot v_3 \quad (2-4-1)$$

Q : 求められる流量
 v_1, v_2, v_3 : 超音波による平均流速（3 測線）
 a_1, a_2 : 断面積（一定）
 $a_3(H)$: 断面積（水位の関数）

である。

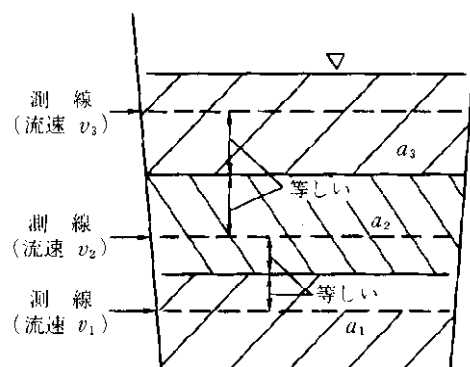


図 2-4-3 パルス伝播時間差法における測線・区間横断断面積の考え方

- 4) 超音波機器設備としては、この流量観測システムに要求される目標、たとえば流量管理に適した情報が表示されるように測定・演算・表示することを標準とする。

<推 奨>

観測データについては、水位流量曲線を介さずに直ちに流量を算出・表示できるメリットを最大限生かすため、テレメータ設備を用いて、事務所、管理所等で即時利用できる自動演算処理・表示システムを導入することが望ましい。

4. 9. 4 維持管理

<必 須>

超音波の伝播経路となる斜め横断面内に、超音波伝播の障害物が生じないように、河道の維持管理に努めるものとする。

4. 10 水理構造物を用いる方法

4. 10. 1 総説

<考え方>

堰や限界流フリュームは、常流から射流に遷移する流れを発生させることにより支配断面を形成することで、水位（越流水深）と流量との間に1対1の関係をつくり、水位から流量を換算することのできる水理構造物である。比較的小流量の河川（小規模な溪流等）における流量観測に用いられる。また、ダムや水門等の構造物についても、流れを拘束するなどして水位と流量との関係を単純化し、水理実験によって通過流量を把握するための流量換算式を作成することが行われる。

本節では、流量観測を目的とした水理構造物として代表的な堰を活用した流量計測法（堰測法）を中心に記載する。

4. 10. 2 堰測法の種類と配慮事項

<考え方>

流量観測が可能な堰は、堰の形状によって次の3種に分類される。

- 1) 刃型堰：精度が良い。小規模な河川で一般に利用される。
- 2) 越流頂：ダムの余水吐等で自由ナップの形状が採り入れてあれば、大流量でも利用できる。
- 3) 広頂堰：一般の落差工等を利用した流量観測所に見られる。ただし、流量係数は複雑である。

<必 須>

堰によって流量を観測する場合には、堰上流の堆砂及び堰下流の洗掘に対して十分な対策を立てておかなければならない。

また、特に刃型堰では、流木、ゴミ等により観測の精度が著しく低下することがあるので、これに対する対策を講じなければならない。

堰測法においては、いずれも越流深を測定するのであるが、堰上流側の堆砂は、上流側の堆砂ポケットの大きいダム等を除いては問題となる。堆砂は堰測法の精度に影響するため、堆砂が問題となる場所に設置した場合には、排砂装置をつけて精度確保に努めておかなければならない。

また、下流側の洗掘に対しては、河床保護工を行うなど対策を立てておかなければならない。

<例 示>

一般の落差工を用いる堰測法では、低水時には越流水深が極めて小さくなることもあるので、精度を上げるために複断面の堰とする例がある。

4. 10. 3 可動ゲートを有する堰における要件

<必 須>

可動ゲートを有する堰に流量観測所を設ける場合には、ゲートの開度を水位と同時に記録しておかなければならない。

4. 10. 4 越流水深の測定

<標 準>

堰測法によって流量を観測する場合には、堰に近く、流速の小さい位置に水位観測施設を設置し、これにより越流水深を観測することを標準とする。

水位観測については、本章 第3節 水位観測 によるものとする。

4. 10. 5 堰測法による流量の算出

<標 準>

堰測法において、完全越流の矩形堰の場合には、次の公式を用いて流量を算出することを標準とする。

$$Q = CBH^{3/2} \quad (2-4-2)$$

Q : 流 量 (m³/s)

C : 堰の越流係数

B : 堰 幅 (m)

H : 越流水深 (m) である。

越流係数については、堰形状・適用範囲が、堰に関する公式（石原・井田の式、板谷・手島の式等）の適用条件を満たすものであれば、それらの公式をそのまま用いることができる。そうでない場合は、模型実験による越流水深と流量の関係式を求める必要がある。

その他の形状の堰、不完全越流又は、潜り越流の堰及び可動ゲートを有する堰については、その形状等に最も適した公式を用いるか、又は観測、模型実験等により水位と流量との関係を求めることを標準とする。

4. 11 流量の連続データの算出

4. 11. 1 総説

<考え方>

観測された水位(H)と流量(Q)との関係を示す曲線を水位流量曲線(H-Q曲線)と呼ぶ。連続的に得られている水位観測値から365日24時間の連続した流量を算出できることから、長年にわたり、流量を連続的に算出する手法として幅広く用いられてきている。

ここで、水位から流量が1対1に求まる条件は、エネルギー勾配（又は河床勾配）に対して水面勾配の変化の影響を無視できる場合であり、ある程度以上の河床勾配を有し、かつ、ゆっくりとした水位変動の場合には、水位と流量はほぼ1対1に対応する。ただし、当該流量観測地点を含む河道区間が、河積や粗度（特に樹木群の繁茂状況）の縦断方向の急変等により、河床勾配が急な割に一ハイドログラフ内での水面勾配の変化の影響が出やすい条件を有している場合にはこの限りではない。ここでは、流量観測所が本節4.3.2に示された条件を満足することが標準であり、また本節4.3.3(1)に記した維持管理が流量観測所においてな

されていることを前提に、水位と流量がほぼ1対1に対応するための条件を広めに記述している。こうしたことから、当該流量観測所が、河積や粗度の縦断方向の急変等の特性を有していないかをチェックすることは、水位と流量がほぼ1対1の関係を持つことを前提にデータの処理を行って良いかを確認する上で重要である。

本節では、この原理を活用した水位流量曲線による連続的な流量データの算出手法について規定する。

なお、本節 4.8～4.10 で解説した固定式流量観測手法を用いることにより、水面勾配の変化にかかわらず、ある範囲の河川流量において、流量の連続データの算出を行うこともできる。

<必須>

本節で用いる流量の観測資料は、「河川砂防技術基準」（国土交通省）の調査編第2章水文・水理観測 第5節 水文資料の整理・保存と品質管理 5.3 照査 5.3.2 異常値補正 に基づき現地補正を済ませた後の観測資料を用いなければならない。

<推奨>

緩流河川においては、下流側における潮汐や合流、堰操作等による背水の影響による水面勾配の変化の影響が無視できないため、水位流量曲線を水位のみの一価関数として表現することはできない。したがって、このような地点においては水位流量曲線法を用いないことが望ましい。緩流河川でなくとも、上述のように、河積や粗度（特に樹木群の繁茂状況）の縦断方向の急変が見られる場合も、水位流量曲線法の採用を再検討することが望ましい。

このような地点で流量の連続評価を行う場合は、こういった水理条件下でも利用可能な固定式流量観測手法を活用することが望ましい。

<例示>

河川の合流点付近の流量観測所では、近傍の流量観測所のデータに基づく水収支より連続評価を行う事例もある。

4. 11. 2 水位流量曲線の作成手法の基本

<標準>

水位流量曲線式の作成は、水位を縦軸として流量を横軸とする座標上に、水位及び流量の値をプロットし、最小二乗法等によって関係式を求めることを標準とする。

水位流量曲線式には、2次式を用いることを標準とする。2次式の場合、曲線式は、水位を $H(m)$ 、流量を $Q(m^3/s)$ として、以下のようになる。

$$Q = a(H + b)^2 \quad (2-4-3)$$

a, b : 観測断面、作成対象となる期間・水位範囲によって決まる定数

水位流量曲線を用いて流量の算出を行う場合、当該期間中の流量観測値の範囲内において流量を算出することとし、当該期間中の流量観測範囲を超えた外挿領域への曲線式の適用は行わないことを標準とする。

また、水位流量曲線式の定数を求める際には、低水位部分で流量値がマイナスとならない制限を設けて同定することを標準とする。

縦断勾配が緩やかな河川では、水位流量曲線は、洪水時（特にハイドログラフが急激に変化し非定常効果が大きくなる洪水時）に水面勾配の変化等の影響を受けて、単純な一価関数とならずに、時系列的に反時計回りのループを描く場合がある。緩流河川でなくとも、縦断

方向の河積の急変等により、場合によっては同様の特性が出現する可能性がある。この場合、近隣の水位観測所との水位差（水面勾配）を考慮した水位流量曲線の導入を検討することを標準とする。これは、表 2-4-1 に示した水面勾配断面積法の原理を応用するものである。

<推 奨>

水位及び水面勾配から流量を得ようとしても、必要な精度が満足されない場合も考えられる。その原因としては、当該河川区間の流れが、水位流量曲線はもちろん水面勾配断面積法を採用しても適切に再現できない水理的特性を本来的に有していることが考えられる。そうした状況においては、流量と相関の高い水理量の組合せを形式上見いだそうと、更に作業を進めるのではなく、本章の第 1 節 総論 に述べたカテゴリー 3. 1 の観測を通じて、当該区間の流れの総合的把握を行い、そこでの流れを支配する水理システムを理解し、流量を算出する合理的な方法を個々に見いだしていくことが望ましい。

<推 奨>

自記水位計の記録から得られる当該地点での最高水位・最低水位において、現地での流量観測が行われていなかったり、前年の H-Q 式をベースにした洪水予測等の日々の河川管理の目的のために、水位流量曲線をその流量観測範囲を超えて左下方（渇水）と右上方（洪水）にやむを得ず外挿して適用しなければならない場合も想定される。その場合は、観測範囲の水位流量曲線を単純に延長するのではなく、マニング式等を活用し断面特性を加味した水理学的な水位流量曲線とする方法をとることが望ましい。

<例 示>

水位流量曲線式として 2 次式により精度を確保できない場合は、べき乗値を 2 と固定しない一般の n 次式を用いてもよい。この場合、未知定数が 3 つとなるが、特に n の同定値について、一般に見られる開水路の断面形状においてマニング式から理論的に想定される 1～3 の範囲を超えるような不合理な値をとることのないように注意する必要がある。

4. 11. 3 水位流量曲線の更新

<標 準>

水位流量曲線は一水文年をひとつの有効期間として曲線式を作成するのが一般的であるが、洪水による河床変動等を契機として水位流量関係が変化した場合は、その変化時を区切りとして曲線式を更新する。

一つの水位流量曲線について有効な期間から、別の異なる水位流量曲線について有効な期間に移行する境界（有効期間を一水文年とする場合は、年界）において、同じ水位に対する流量算出値が極力不連続にならないようにすることを標準とする。

4. 11. 4 曲線分離

<標 準>

複断面等の複雑な断面形状を有する河川では、低水から高水までを一つの曲線式で表すことができないことが多い。この場合、一つの曲線式で回帰できる水位区間群に分割し、水位区間ごとの水位流量曲線式を求めることを標準とする（曲線分離）。

これらの曲線分離においては、分離して同定された水位流量曲線同士の境界周辺の日時若しくは水位において、流量が不連続にならないようにするものとする。

<推 奨>

水位流量曲線の作成に当たっては、以下のことに注意することが望ましい。

- 1) 高水部分を曲線分離する水位は、断面形状（又は $H-A$ 関係）の変曲点等を参照しながら設定する。
- 2) 高水流量観測においては、一連の観測値を時刻順に結ぶことによって、水面勾配等の影響による水深－流量関係のループ効果を $H-Q$ 関係のばらつきや観測誤差と区別しながら水位流量曲線の検討を行う。

4. 12 特殊な場所における流量観測

<考え方>

流量観測手法に関する事項は、上流から下流に向かって全断面で常に順流状態で流水が流れる地点での流量観測手法を基本に記述したものである。このため、河口感潮域等の全断面で順流状態が確保されるとは限らない地点での流量観測においては、別途留意が必要となる。

4. 12. 1 河口感潮域における留意事項

<考え方>

河口感潮域における低水時の調査については、本節 4.5 以下に詳述した流量観測手法が原則的に用いられる。しかし、潮汐の影響で時々刻々水位と流量が変動するので、特に可搬式流速計による流速計測法の適用に当たっては、特別な配慮が必要となる。また、本節 4.11 に記述するような、水位から一意的に流量を連続的に評価する水位流量曲線法が使えないことに注意が必要である。さらに、複雑な流動を示すことが多い河口感潮域において、流動に関わるどのような水理量の継続観測が必要か、それと流量との関係はどうかに留意し、目的と当該区間の流動の特徴を踏まえた上で観測内容を定めていくことが重要である。

<標 準>

河口感潮域での低水時の流量観測は、以下の事項に留意して実施することを標準とする。

- 1) 潮汐等対象区間の流動特性をよく考慮して観測計画を立てる。
- 2) 水位・流速の変動があるため、観測の同時性確保の必要性に応じて、迅速に計測作業を行う。
- 3) 順流・逆流が入れ替わる前後の時間帯等、流水内の流速分布が複雑となるため、代表的な流速値を適切に把握できるように流速計測を行う。可搬式流速計による流速計測法においては、流向を測定できる流速計を用いるとともに、必要に応じて、精密法等により多くの測点での流速計測を行うことを標準とする。

<推 奨>

流況が時々刻々変動するため、固定式観測法を採用することで、流速・流量を連続的に観測できる手法を導入することが望ましい。

<例 示>

可搬式流速計による流速計測法の適用に当たっては、代表的な潮汐条件のときに精密法で流速分布を把握しておき、いかなる深さでその測線上の平均流速を把握できるかを事前に調べておくことで、一般的な方法からの流速測点数の増加を抑制することができる場合がある。

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 降水量等観測、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、定常な水文量の頻度解析又は非定常な水文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短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 はオイラー一定数であり、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。

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挙
- 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挙

<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挙する方法がある。

<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) 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量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に近づくとき、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、この平均 μ 、分散 σ^2 及び歪み γ はそれぞれ、

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

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

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

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。

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

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。

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

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 とするとき、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プロットイング・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。

プロットイング・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 ：プロットイング・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イング・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。

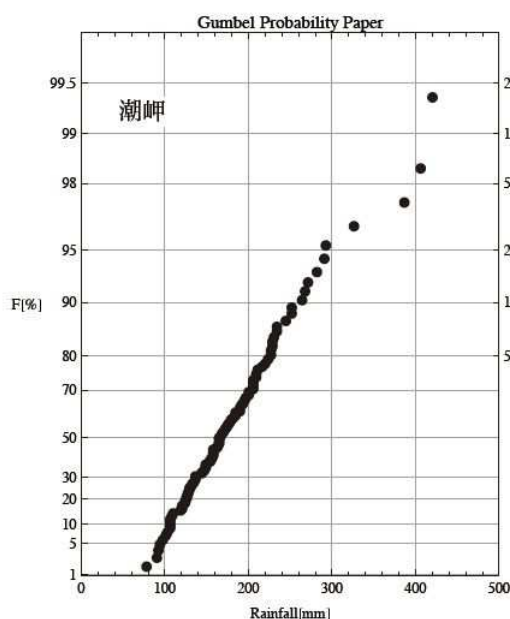


図 3-1-1 Gumbel 確率紙の事例
(極値資料)

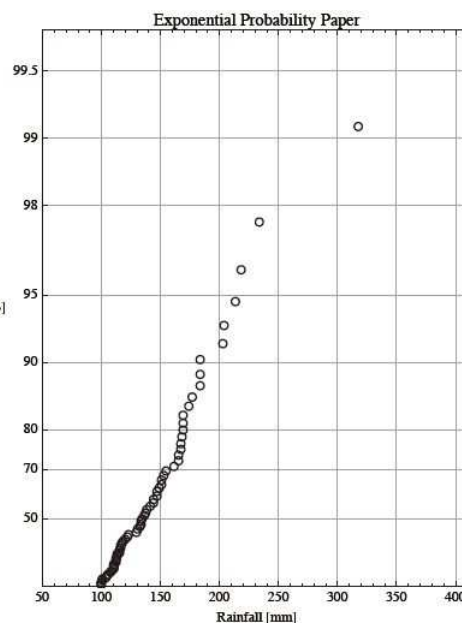


図 3-1-2 指数確率紙の事例
(POT 資料)

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

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

により求める。バイアス推定値は次式で与えられる。

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

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。

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

また、jackknife 法による推定誤差分散は、

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

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。

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。

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か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もので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。

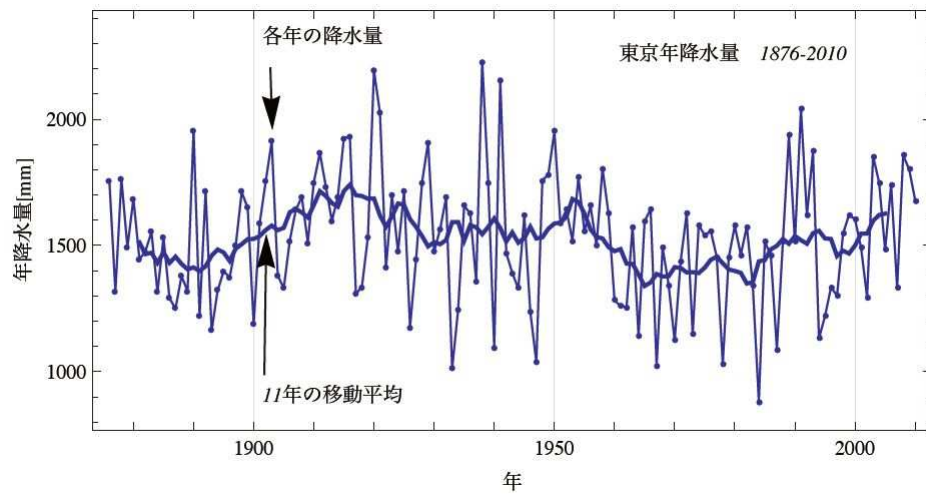


図 3-1-3 東京の 1876-2010 の年降水量と 11 年の移動平均（太線）

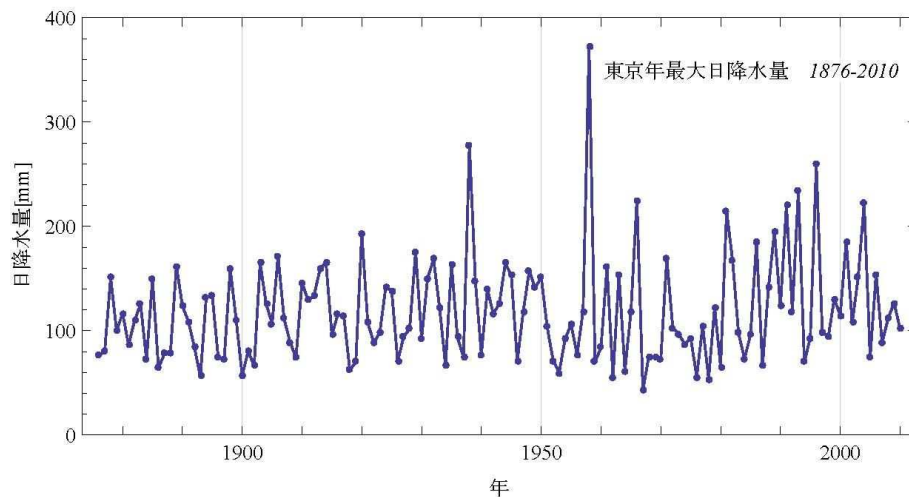


図 3-1-4 東京の 1876-2010 の年最大日降水量

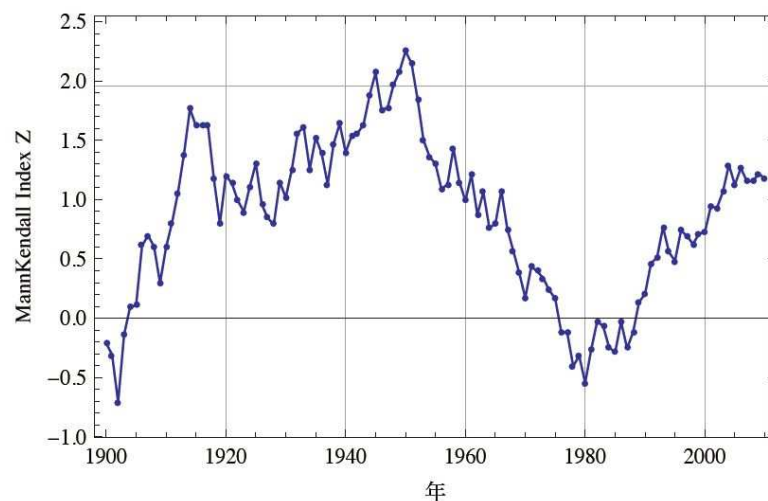


図 3-1-5 東京の 1876-2010 の年最大日降水量のトレンド評価

図 3-1-6 は東京の 1876 年から 2010 年までの月降水量のコレ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。

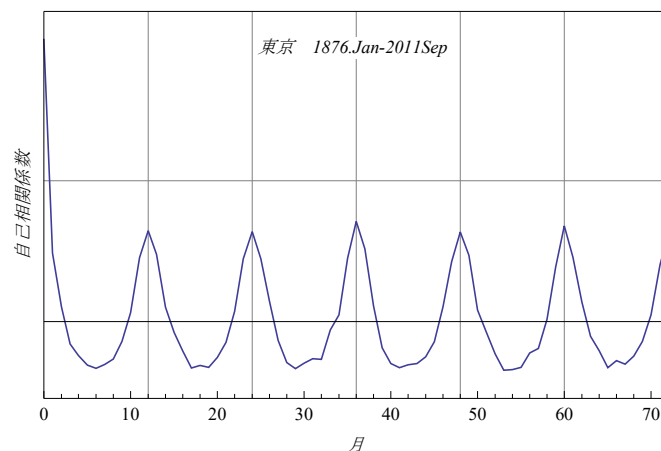


図 3-1-6 東京の 1876–2010 の月降水量のコレログラム

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。

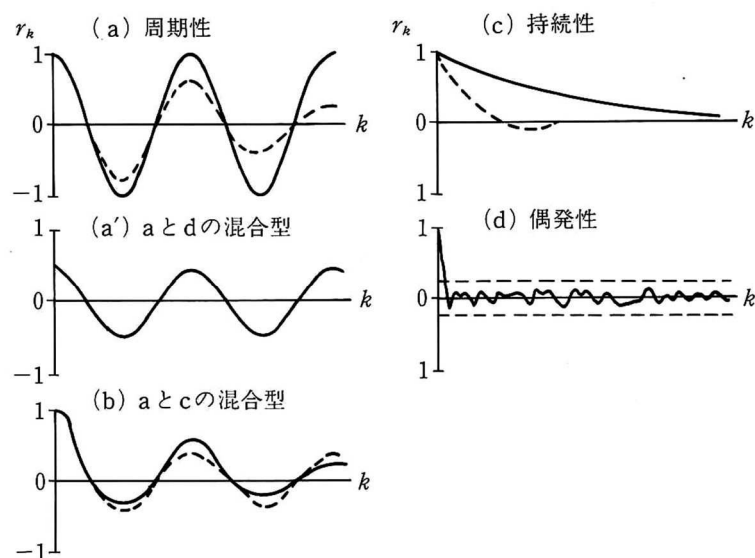


図 3-1-7 時系列変化のパターン

- 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。

<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。

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一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、水理学的追跡法と水文学的追跡法に大別できる。

水理学的追跡法は、一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。

<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。

<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。

<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。

<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。

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。

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。

<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。

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。

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、次の仮定の上に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1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水の速度 (井口, 1957)

表3-2-10 河谷を流れ下る水の水の速度の表

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。

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

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

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。

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

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

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徴がある。

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 $f=f_i$ (1 次流出率という) として $f_i A$ 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。

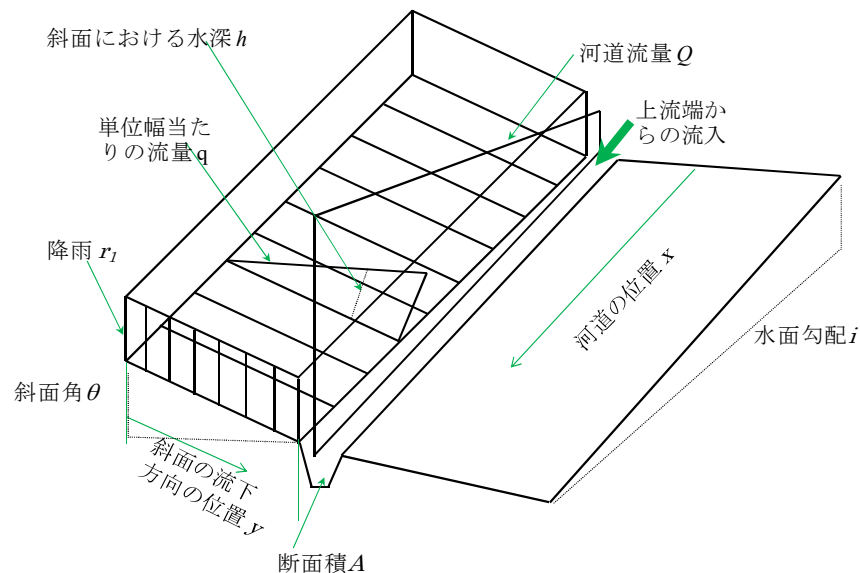


図3-2-1 等価粗度法における流域斜面及び河道のモデル

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。

$$i - i_f = 0 \quad (3-2-13)$$

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

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 の式を代用すれば式 (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。

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

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。

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

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

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_l は有効降雨強度、 a は単位変換定数で r_l 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 ($\text{m}^{-1/3} \text{ s}$)
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(km^2)、 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。

- 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。
- 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。
- 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。
- 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。

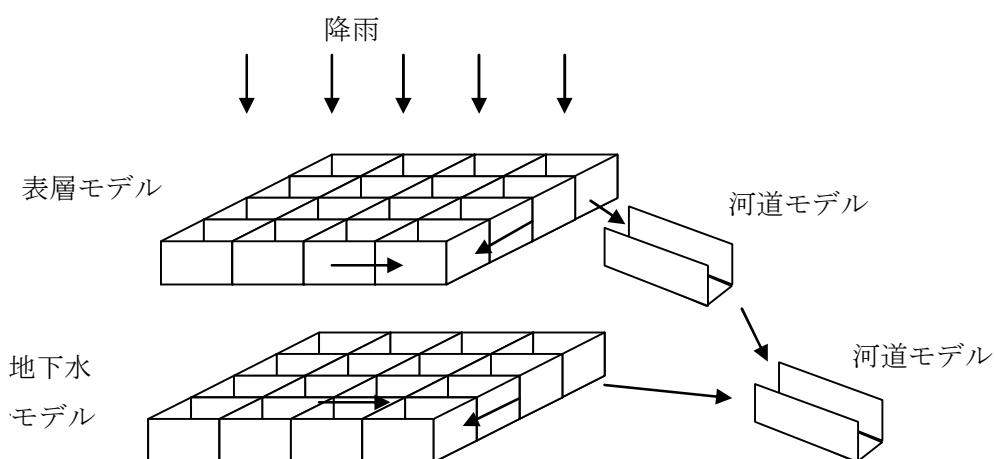


図3-2-3 土研分布モデル Ver. 2 の構成図

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壤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。

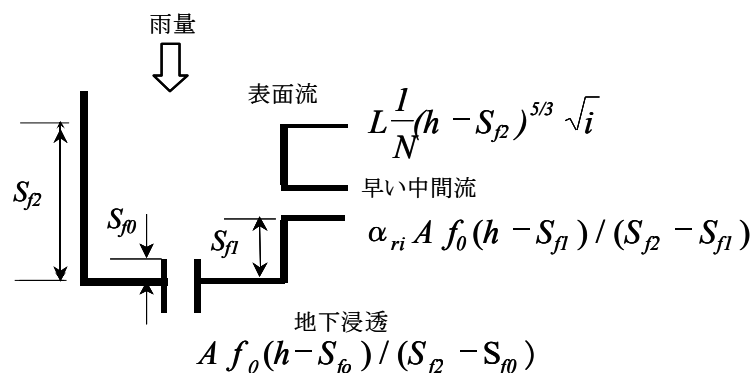


図3-2-4 各小区画の表層モデルの構造

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($\text{m}^{-1/3}/\text{s}$)、 i ：落水線勾配(無次元)、 a_{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、降下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。

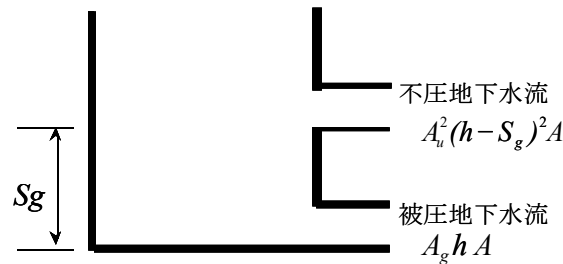


図3-2-5 各小区画の地下水モデルの構造

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($(1/\text{mm}/\text{day})^{1/2}$)、 A_g ：被圧地下水位流出量に係る係数($1/\text{day}$)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）。

2. 5 参考 流出計算手法の比較

愛知県では、以下に示す資料も参考としている。

表3-2-1 中小河川に適用される流出計算手法の比較

手 法	適用と特色	長 所	短 所
線形モデル	合理式 合理式の特色は流域の最遠点から考慮地点まで雨水が流下集中した時に最大流量が生ずると考え、その時間を洪水到達時間と呼んでいる。 洪水流を全て河道で処理する河川で適用可能である。 中小河川でよく用いられている。	ピーク流量算出が最も簡便である。	ハイドログラフを求めることができないので、洪水調節施設の計画には用いることができない。また、実測値との検証についても困難である。 流域面積が大きくなると適用が困難である(50km ² 未満を目安)。 内水処理区域や下水道区域が占める割合が大きい場合や低平地河川等で河道貯留が見込める場合には、適用困難である。
	合成合理式 合理式のピーク流量を重ねて結合したものであり、ハイドログラフが作成できる。	簡易にハイドログラフが作成できる。	ハイドログラフの項以外、同上。
非線形モデル	貯留関数法 貯留高と流出高との間に比較的簡易な式で非線形性を表現した手法で、日本の殆どの一級河川で使用されている。 10km ² ～数100km ² 程度の流域で適用(単流域として)されている。 土地利用の変化を考慮した方法も提案されている。	山地流域が卓越し、流域の貯留効果が顕著な場合での適合度が良い。 定数検証は主にK、T1の修正で済み、比較的容易である。また、流域分割、流出系統作成の巧拙があまり問題にならない方法である。	実用的であるが、定数について水理学的裏付けが弱い。 小出水の際の定数を用いた場合、大出水の再現性に問題がある。 一般に平地や都市域での適合度に劣る。
	準線形貯留型モデル 合理式の到達時間内降雨強度の考え方を取り入れ、非線形性を表現した各地目毎の指数単位図である。 降雨流出の非線形性が扱え、流域の開発等の地目変更に伴う流出変化が扱えることから、開発が著しい流域で適用例が多くなっている。	地目毎の流出計算結果を合成しており、地目の改変や地目毎の貯留、浸透対策等の効果を扱うことが可能である。流域治水を扱う河川に適用性が高い。 流域分割や流出系統の作成の巧拙は特性曲線法ほど精度に影響しない。	計画論的に有効なモデルであるが、反面実績の再現性に難点がある場合がある。地目別定数Cについての総合化の程度に問題を残す。 山地部のように貯留効果が大きいところでは、特に低減部の再現性に難点がある。
	特性曲線法(等価粗度法) 流域を幾つかの矩形斜面と流路が組み合わせられたものと見なし、雨水流を水理学的に追跡した計算手法である。	流域の性状を等価粗度で表すところの特徴的で、流域開発の変化を反映させることができる。 比較的表面流が卓越する都市域について適合度が高い。	定数の構成要素が多く、かつそれぞれの要素を比較的高い精度で求める必要がある。 流域分割や流出系統作成の巧拙により精度が問題となる。

出典：「洪水防御計画を中心とした中小河川計画の手引き 基本方針編」(財国土技術研究センター) より

第4章 河道特性調査

第1節 総説

1. 1 河道特性調査の目的と位置付け

<考え方>

本章は、河道特性を構成する個々の要素の調査法と、それらの調査結果を組み合わせる対象河道の特性を総体的に理解するための枠組みについて述べる。ここで河道特性とは、河川等の計画、設計及び維持管理等の適正な実施を図る上で把握しておくべき「沖積河川の種々の姿の全体像」を指す。河道特性調査の全体構成とその活用については本節の1.2に示している。

沖積河川の姿には多くの側面があり、河道特性を構成する諸要素は、個々にばらばらに存在しているのではなく、相互に密接に関連し合って河道という1つのシステムを形成している。このため、計画、設計、維持管理等の検討を通じて河川へ様々な働きかけを行う際には、当該目的に直接関係する機能や特性、場所に限定して河川を調べることに加えて、あらかじめ対象河川の河道特性を把握し理解しておくことが重要である。

通常、河道特性の構成要素としては、河道自体及びそれと直接的関わりを持つ事象等が対象となる。本章においては、河道特性調査を幅広く捉え、流域や水系環境など沖積河川を取り巻く諸状況とその変遷も調査対象に含めて考えていく。また、河道形状や河床材料など河道に関する基本事項の調査手法についても本章で一体的に説明する。

1. 2 河道特性調査の意義と活用

<考え方>

河道特性調査は、河道の基本的な性質と特性を様々な側面について総体的に把握するものであり、

- 1) 流下能力確保などのための河道計画
- 2) 洪水流に対する氾濫の危険性や堤防の安全性の評価
- 3) 洪水を受けた際の河道の挙動と安定性の評価
- 4) 種々の河道変化を見据えた河道管理の検討
- 5) 河道の動きや土砂流送と関わりの深い河川構造物の設計とその維持管理
- 6) 河道の物理環境や土砂流送の制御を基軸にした河川環境の保全と管理
- 7) 流域・水系環境の変化を踏まえた河道管理
- 8) これらの検討を包括した治水・利水・環境保全・維持管理にわたる統合的視点からの河道の在り方の検討

など、河川等の計画、設計及び維持管理等の適正な実施を図るための種々の技術検討を行う際に用意しておくべき共通的、基盤的な情報を提供するものである。

1. 3 河道を構成する河川堤防に関わる各調査の相互関係

<考え方>

河川堤防は、河川に関わる多くの事象に関わりを有しており、調査編における位置付けを理解しておくことは重要である。そこで、河川堤防に関わる各調査の相互関係についてここでまとめて記載する。

- 1) 河川堤防に関わる諸調査間の相互関係を理解することの重要性

河川堤防は河道を構成する主構成要素の1つではあるものの、原則として盛土により築造され、通常、維持管理が高頻度でなされる構造物であり、営力により変動することが常態である

河床や河岸とは性質を異にする。しかし、河川堤防は、河道を構成し、洪水氾濫からの堤内地防御において直接的な役割を担う河川構造物であり、その本来的成り立ちから、河川に関わる多くの事象に関わりを有している。

このような河川堤防の技術的特徴を踏まえると、河川堤防に関係する個々の、あるいは各分野（地盤工学、水工学、地形学など）の調査結果の活用を図ることはもちろん、各調査の位置付けや相互関係をよく理解し、それらを有機的につなげ、河川堤防の本来的、総体的役割に立脚した総合技術判断に結び付けるという基本スタンスが重要となる。

調査編は、「河川等の計画、設計及び維持管理等の適正な実施」のために、他編（計画編、設計編、維持管理編）を介して、あるいは直接的に生じる必要性に応じて、適切な技術手法等を提供する役割を負っており、河川堤防に関係する多様な内容を含む。

こうしたことから、河川堤防に関して、ここで、調査内容の相互関係について述べておくものである。

2) 河川堤防に関わる諸事象

河川堤防は、堤体と基盤を主構成要素とし、堤防近くの河道、堤防と一体的に設置される構造物（護岸、水制、水門、樋門・樋管など）も構成要素となる。また、基盤と空間的に連続する堤内地も、必要に応じて関連要素に含めて考える。

河川堤防は、場合によっては堤体－基盤－河道の相互作用も内包しつつ、種々の機構及びプロセスの下、所定の機能を発揮し、また変化・変状を起こし、更に過度の外力を受けた場合に破壊に至ることもある。機構及びプロセスの代表的類型としては、地盤工学、水工学それぞれにより分析されるものがあり、一般に、浸透や地震動による変化・変状・破壊は前者により、浸食による変化・変状・破壊は後者により扱われる。ただし、このような類型ごとのアプローチだけでは実現象を十分には分析できず、学際的なアプローチの充実が望まれる境界領域的現象が重要となる場合も考えられる。

河川堤防の機能発揮にしても、変化・変状・破壊にしても、それらは堤防自体の状況と堤防に対する諸作用等との関わりの中で決まってくる。したがって、調査の主なターゲットもそれに対応したものとなる。堤防の状況は諸元、特性、構造、状態（表面、内部）などで表される。堤防の状況に加えて、河道（堤外地）や周辺の堤内地の状況が関係してくる場合がある。一方、堤防に関わる作用や事象等には、以下に示すように様々な種類のものがあり、中には堤防と双方向作用の関係を持つものもある。

a) 洪水

洪水は、水位、流速、流水によるせん断力、水圧などの形で、堤防に対する外力として作用し、作用継続時間と相まって、場合によっては変更、更には破壊の原因となる。所定の洪水の作用に耐えることが、堤防が持つべき最も重要な機能である（河川管理施設等構造令第18条参照）。

一方、堤防は、堤内地を洪水氾濫から防ぐという本来的機能ゆえに、堤防がない場合に比較して洪水流を制御する。この制御の強さが大きくなれば、一般に、堤防に作用する洪水の作用も大きくなる。この点において、洪水と堤防は双方向的に作用し合う関係にある。このことは、たとえば、堤間幅と洪水時の水理量との関係という「川幅」の切り口から、更には堤防法線と洪水流との関係という「平面形」の切り口からの検討につながっていく。

b) 地下水の流れ

周辺の地下水の流れが、堤防の水分条件を規定する1要素になる可能性がある。逆に、地盤対策などが施された場合、対策工法によっては堤防が地下水の流れに影響を与えることもある。

c) 地震動、地殻変動

外的作用として堤防に影響する。地震動に対する安全性は、条件によって、堤防が持つべき重要な機能の1つとなる。

d) 河床変動

洪水流や氾濫流を介して土砂流送が起こり、それがしばしば地形変化を生じさせる。その地形変化が堤防の近傍に生じる場合には、堤防に対する外的作用となる。上記 a) と合わせると、ここにおいて、堤防→洪水流→土砂流送→地形変化→堤防への外的作用という一連の相互作用系という視点の必要性が示唆される。そして、この視点は、河川堤防が洪水の作用を介して河道形成を一定程度支配し、そのことがひいては、物理環境形成を通じて河川環境形成とも関わりを持つという捉え方につながり得る。

e) 時間の経過

外的作用には当たらないが、種々の堤防に内包されている変化・変状等の機構のうち、多くのものは、時間の経過に従って発揮される。代表的な事例として、堤体の荷重による沈下及びそれに付随する事象が挙げられる。

f) 生物的作用

堤防表面に生育する植物は、葉茎や根毛による被覆作用により降雨や流水による表面浸食からの防護機能をもたらす一方、時間経過とともに増大すると考えられる根毛層の状態によっては、堤防機能の減耗につながるとの懸念も考えられる。動物については、モグラが代表的な考慮対象となる。これら生物的作用は、逆に、堤体の土質等の影響を受けると考えられ、この点で、生物的作用と堤防は双方向的関係にあると考えられる。

g) 気象など

降水、日射、気温などの気象条件、河口近くの堤防には影響する潮位などの海象条件、平水位の状況、更に広域地盤沈下などは、堤防に対しての外的作用あるいは環境条件と捉えることができる。このうち、たとえば、降水や平水位、潮位は通常時の堤防内の水分状況を規定し、洪水発生と同期した降雨は、浸透に起因する堤防破壊や変状を引き起こす外力を規定する有力なファクターとなる。日射の状況は f) における植物の生育に影響する。

h) 堤内地の状況

堤内地の内水や流下してきた洪水氾濫流が、たとえば支川や本川の堤防に遮られる状況となり、堤内地側からの浸透や浸食作用が生じることも考えられる。そのような場合には、堤内地に生じる浸水、氾濫の状況は堤防の安定に直接関連する検討事項になる。また、堤内地の土地利用の状況は、パイピングや浸透に直接的に影響を及ぼすことがある。堤内地の状況は、堤防の機能の様々な面に関係を持つので留意が必要である。

i) 人間活動、社会的インパクト

河川の利用は、その形態によっては堤防に影響を及ぼすことがある。

これらの作用等は互いに独立しているとは限らず、d) について a) との関連を説明したように、相互に関連しながら作用することがあり、更には堤防との相互作用も交えつつ、堤防の機能発揮や変化・変状・破壊に関わる様々な現象が生じることがある。

堤防は、堤防の強化、補修、維持管理等によっても直接改変を受け、河川改修等の堤防周辺の改変からも影響を受ける。これらは、河川等の計画、設計及び維持管理等の適正な実施という目的に従って必要な技術的検討を経て実施されるものであり、上記の a) ～ i) とは「作用」の性格が根本的に異なるが、その履歴を把握しておくべきことについては同様である。

第2節 河道特性調査に際しての基本的捉え方

2. 1 河道の階層構造と類型区分

2. 1. 1 河道の階層構造

<考え方>

河道は、以下の階層構造を持つとする考え方がある。

- ・ 河道を空間的スケール及び形成・変化に要する時間スケールが異なる種々の構成要素（たとえば表 4-2-1 の類型）の集合体として捉える。
- ・ その集合体は代表スケールがオーダー単位で異なる階層に区分される。
- ・ 下位階層の構成要素群の形成・変化に対して、上位階層は所与の条件として取り扱える。

調査編では、この考えに基づいて、種々の類型をこの階層構造の下に設定する。

河川に関する調査の中でも、「場」に着目した調査を行う際には、様々な調査結果を共通的に活用できるようにするため、あるいは当該調査の位置付けが容易に理解されるように、対象とする場の類型を明確にしておくことが有用である。

一般に場の類型は、階層が異なれば、また、それが属する 1 つ上位の階層の類型によって、類型区分の構成も異なってくる。このことから、場の類型区分に際しては、河道の階層構造をあらかじめ考慮しておくことが必要である。

なお、同一階層の場であっても、着目した代表的事象により類型の呼称が異なる場合がある（たとえば、本節 2. 1. 2 に後述する河口域と汽水域）。同様に、着目した事象によってそれを捉えるのに適した代表長が異なるため、同一階層内でも異なる類型区分が採用される場合がある（たとえば、本節 2. 1. 2 に後述する沖積河道区間とセグメント区分）。

表 4-2-1 河道の階層構造の説明

階層	スケール		類型の例	当該階層・スケールの類型出現に関わる代表的事象
	種別	代表長 ※nの目安は1～10		
上位	大規模 (セグメント)	平野幅 流域幅	地形区分, セグメント区分	河道縦断形形成, 地殻変動, 海水面変動
	中規模 (リーチ)	川幅 × n	砂州に伴う瀬・淵	砂州形成, 蛇行
	小規模 (ユニット)	出水時水深ある いは河岸高 × n	階段状河床に伴う瀬・淵, 構造物等の周りの淵, 河岸・水際・水域, 溪畔林, 河畔林, ワンド, たまり, 潮上帯・潮間帯・潮下帯	階段状河床の形成, 障害物周りの局所洗掘, 河岸・高水敷形成, 砂州・分岐流路の形成, 潮位変動
下位	微小規模 (マイクロ)	数cm～数十cm	浮き石・沈み石, 表層礫の空隙構造や細粒土砂充填度に関するもの, 小規模河床波が規定するもの	小規模河床波の消長, 混合粒径土砂の流送

2. 1. 2 河道の類型区分

<標準>

調査編では、河道の階層（表 4-2-1 参照）のうち大規模スケールについて、以下の類型区分を設定し、これを共通して用いることを標準とする。

- 1) 溪流区間
- 2) 山地河道区間

3) 沖積河道区間（更にセグメント区分を行う）

4) 河口域

5) 汽水域

なお3)の沖積河道区間については、同一階層の区分との位置付けで、さらにセグメント区分を行う。セグメント区分については 本節 2.1.3 に記載する。1)～5)の定義等は次のとおりである。

1) 溪流区間

山地部を流下する河川で、生産され当該区間に供給された土砂が土石流など高濃度・集合的な形態で移動が生じ得る河床縦断勾配が大きい区間である。あるいは、土石流区域と、掃流区域のうち山腹・沢からの土砂供給の影響が卓越する区間の河川である。

2) 山地河道区間

山地部を流下する河川で、生産され当該区間に供給された土砂が、土石流など高濃度・集合的な移動によってではなく、出水時に掃流・浮遊形態で流送される場であり、それが河床に堆積する状況となる。河岸の一定割合が山体を構成する岩により、又は支溪流や斜面崩壊により供給された巨岩によって構成され、それによって河岸位置や川幅が規定されている区間である。本節 2.1.3 で述べるように、山地河道区間と溪流区間とを併せてセグメント分類 M と総称する。

3) 沖積河道区間

沖積平野、谷底平野、盆地を貫流する河道区間である。ここで、谷底平野とは、河川の流路幅に比べて数倍以上の幅を有する谷間に河川の運搬した砂礫で形成された低地である。これらの河道区間は、堤防や谷壁による洪水流の流下幅の制約や狭窄部での水位せき上げによる湛水など洪水流の流下特性には差異があるが、河岸が河成の堆積物で構成されており、河岸位置や川幅がその浸食・堆積作用のバランスの下で変動・調節される区間である。本節 2.1.3 で述べるように、セグメント区分に応じて、河床勾配、河床材料、川幅などの河道諸量が同様の幾つかのグループに分けることができる。

4) 河口域

地形形成に波浪、潮位、河川流の相互作用が卓越する河道～海岸領域である。河口域のうち河道側は、河口砂州のフラッシュ又は潮位変動に応じて出水時の河川水位にせき上げ・低下背水が現れる区間まで、海岸側は、岸沖方向では河口テラスの舌状に伸びた最遠点（移動限界水深に相当する等高線が目安）まで、汀線方向には河口テラスの幅、また、河口砂州がある場合には砂州のフラッシュ後、砂州再形成のための底質供給源となる範囲を目安とする。

5) 汽水域

潮位変動による塩水浸入によって塩分濃度の変化が生じる河道区間、及び河口からの淡水の流出によって塩分濃度の変化が顕在化している海岸側の領域である。4)の河口域や感潮区間と範囲が重なる場合が多いが、平時における水位変動、主に塩分濃度などの水質及び生物生態環境の観点を重視した区分である。

本章では、これらのうち主として3)、4)を扱い、一部2)もカバーする。5)は3)、4)に含まれ、本章では汽水環境を取り上げることはしないので、5)を直接の対象とはしていない。

<推 奨>

以上に示した大規模スケールで区分されたそれぞれの類型の下に、中規模、更には小規模、微小規模の類型区分がなされることになる。

河道に関わる調査を行う際には、河川環境が主対象となる場合も含め、表 4-2-1 に示す階層構造を考慮しつつ、中規模以下の類型区分についても必要な共通化を図れるよう、場のタイプの記述を適切に行い、蓄積する情報に一貫した方法で表記していくことが望ましい。

2. 1. 3 沖積河道のセグメント区分とセグメントの類型

<標 準>

河道特性調査に際しては、本節の 2. 1. 2 に示した沖積河道区間について、

- 1) 河床勾配がほぼ同じで、似たような特徴を持つ区間ごとに河道を縦断的に区分すること、
- 2) この区分をセグメント区分と呼び、区分された各河道区間に「セグメントー◎△」のようにセグメントを冠した識別のための呼称を与えること
- 3) この区分を整理・分析において活用すること

を標準とする。

なお、セグメント区分は、地形区分のために行うのではなく、あくまで、河川等の計画・設計・維持管理等を目的とした河道特性把握のための合理的な整理法として行うものである。

<推 奨>

複数の河川を横断する視点から吟味するため、河川ごとに区分された各セグメントについて類型化を行い、各セグメントが有する一般的特徴と個別性を整理しておくことが望ましい。

<例 示>

区分された各セグメントの類型化については、以下に示す代表的手法がある。

河川におけるセグメントの数は、河川によって、また、河川をセグメント区分する目的（河道特性の違いを細かく見れば見るほどセグメントの数は多くなる）によって異なるが、比較的単純な河川の場合（山間部から堆積空間に出て、そのまま海に流れる河川で、大きな支川が入り込まない河川）には、山間部を出てからは、次の 3 つのタイプのセグメントに分かれることが多い。

扇状地を持つ河川の場合は、扇状地を流下する河道区間に当たるセグメント類型 1、その下流で粗砂あるいは中砂を河床材料に持つ自然堤防帯あるいはデルタに相当するセグメント類型 2-2、その下流で細砂～シルトを河床材料に持つセグメント 3 類型に分かれる。

扇状地を持たない河川では、山間部から出た河川は、直接自然堤防帯に入るが、河床材料が砂利であるセグメント類型 2-1、その下流で粗砂・中砂を河床材料に持つセグメント類型 2-2、その下流で細砂～シルトを河床材料に持つセグメント類型 3 に分かれる。

なお、扇状地を持たない河川の中には、粒径が 1cm 以下の河床材料からなるセグメントが優占的に存在する場合がある（風化花崗岩を流域に持つ河川など）。これはセグメント類型 2-2 の中に含まれるものとする。

また、下流における堆積空間の有無や大きさによって、セグメント類型 1 で終わる（海に到達する）、セグメント類型 2-1 で終わる河川もあることに留意する。

表 4-2-2 には上記のセグメント類型と地形区分との関係、また各セグメント類型と河床材料、

河岸の構成材料、勾配、蛇行速度、河岸侵食程度、水路の深さとの概略の関係を示す。なお、本表では、セグメント類型 1、2-1、2-2、3 に加えて、溪流区間と山地河道区間を包含する区間をセグメント類型Mと総称し、河川水系全体を俯瞰できるようにしている。

対象とする河川についてセグメント区分を行った結果、得られた各セグメントが上記のタイプのいずれかに当てはまる場合は、類型名をそのまま当該セグメントの呼称に用い、セグメント区分とその類型化の結果が一括して把握できる方式としてもよい。たとえば、あるセグメントがセグメント類型 2-2 に属すると判断できる場合、そのセグメントを「セグメント 2-2」と呼称するという方式である。

区分されたセグメントは、表 4-2-2 に示すように、地形区分と良い対応を示す場合が多い。ただし、セグメント区分は、前述のように、地形区分のために行うのではなく、あくまで、河川整備や管理を目的とした河道特性把握のための合理的な整理法として行うことが本旨である。このことから、必要に応じて、地形区分にこだわらず、適切な区分を行う。たとえば、扇状地河川において、セグメント 1 の類型を持つセグメントを 2 つあるいは 3 つの小セグメントに分けることが必要な場合もある。また、セグメントMについては、その中を複数のセグメントに区分すべき場合がほとんどである。

表 4-2-2 沖積河道区間についての代表的なセグメント類型とその特徴

	セグメントM	セグメント1	セグメント2		セグメント3
			2-1	2-2	
地形区分	←山間地→←扇状地→ ←谷底平野→ ←自然堤防帯→ ←デルタ→				
河床材料の 代表粒径 d_R	多種多様	2cm 以上	3cm～1cm	1cm～0.3mm	0.3mm 以下
河岸の 構成材料	河床河岸に岩 が出ているこ とが多い	表層に砂、シル トが乗ること があるが、薄 く、河床材料と 同一物質が占 める	細砂、シルト、粘土の混合材料。 ただし下部では河床材料と同一		シルト、粘土
勾配の目安	多種多様	1/60～1/400	1/400～1/5,000		1/5,000～水平
蛇行程度	多種多様	曲がりが多い	蛇行が激しいが、川幅水深比が大 きいところでは8字蛇行又は島の 発生		蛇行が大きい ものもあるが、 小さいものも ある
河岸浸食程度	非常に激しい	非常に激しい	中 (河床材料が大きいほうが、水路 がよく動く)		弱 (ほとんどの 水路の位置は 動かない)
低水路の 平均深さ	多種多様	0.5～3m	2～8m		3～8m

※セグメントMは、沖積河道区間には当たらず、溪流区間と山地河道区間を包含するものであるが、河川水系全の状況を俯瞰するため、付け加えている。

2. 2 河道構成材料の粒径分類と呼称

<標準>

調査編においては、河道構成材料の粒径分類と呼称については、表 4-2-3 に従うことを標準とする。

表中で、左から二列目における中礫と細礫の境界（4mm）と三列目における中礫と小礫の境界（16mm）だけがずれている。このため、中礫の定義を厳密にする必要がある場合は、どちらに従った中礫の定義かが判別できるように「中礫（□mm～）」と記すことを、標準とする。

また、幾つかの粒径分類を束ねて表現する呼称のうち、表 4-2-3 にないものについては、以下に従うことを標準とする。

「礫」：粒径が 2mm 以上の材料の総称。したがって、「礫」という場合、細礫あるいは小礫から巨礫までを含み得る。

「石礫」：上記に定義される「礫」の範疇にあり、かつ、大礫以上の粒径分類を有意に含む幅広い粒径で構成される材料。特に、大礫以上の粒径範囲の存在が河床変動に支配的な影響を及ぼし得る粒径分類であることを明示する場合に用いられる呼称である。

「砂礫」：上記に定義される「礫」と砂からなる材料。ただし実質上、砂から中礫までを含む材料の総称に使われることが多い。

表 4-2-3 粒径の分類と呼称

日本で使用されている名称*		Udden-wentworth scale**	AGUの分類		粒径範囲(mm)		φ 尺度***
巨 礫	巨 礫	巨 礫	boulders	very large boulders large boulders medium boulders small boulders		4096~2048 2048~1024 1024~512 512~256	-11 -10 -9 -8
五 石	大 礫	大 礫	cobbles	large cobbles small cobbles		256~128 128~64	-7 -6
砂 利	中 礫 (pebbles)	中 礫 (pebble)	gravel	very coarse gravel coarse gravel medium gravel fine gravel very fine gravel		64~32 32~16 16~8 8~4 4~2	-5 -4 -3 -2 -1
	細 礫	小 礫 (gravel)					
砂	極 粗 砂	極 粗 砂	sand	very coarse sand	2~1	2~1	0
	粗 砂	粗 砂		coarse sand	1~1/2	1~0.5	1
	中 砂	中 砂		medium sand	1/2~1/4	0.5~0.25	2
	細 砂	細 砂		fine sand	1/4~1/8	0.25~0.125	3
	微 細 砂	微 細 砂		very fine sand	1/8~1/16	0.125~0.062	4
シ ル ト	粗 粒 シ ル ト	シ ル ト	silt	coarse silt	1/16~1/32	0.062~0.031	5
	中 粒 シ ル ト			medium silt	1/32~1/64	0.031~0.016	6
	細 粒 シ ル ト			fine silt	1/64~1/128	0.016~0.008	7
	微 細 粒 シ ル ト			very fine silt	1/128~1/256	0.008~0.004	8
粘 土	粗 粒 粘 土	粘 土	clay	coarse clay	1/256~1/512	0.004~0.002	9
	中 粒 粘 土			medium clay	1/512~1/1024	0.002~0.001	10
	細 粒 粘 土			fine clay	1/1024~1/2048	0.001~0.0005	11
	微 細 粒 粘 土			very fine clay	1/2048~1/4096	0.0005~0.00024	

* 主として河川工学の分野で使用されている。土質工学の分野では、礫(2.0mm以上)、粗砂(2.0~0.42mm)、細砂(0.42~0.074mm)、シルト(0.074~0.005mm)、粘土(0.005~0.001mm)、コロイド(0.001mm以下)として分類している。

** 元々は地質学の分野で使用されていたが、Cummins(1962)が河川生態学の分野に採用した。

*** φ 尺度 $\phi = -\log_2 d$ (d: 土砂粒子の大きさ(mm))

<推奨>

河道を、河川工学的視点から調査する場合と、生物の生息・生育場の物理環境という視点から調べる場合とで、異なる粒径分類・呼称が用いられてしまうと、同じ河道を調査したにもかかわらず、互いの結果の比較や統合が困難になり、河道特性の解釈や分析に不効率を招くおそれがあるので、極力同じ粒径分類・呼称を採用することが望ましい。

2. 3 粒径集団に着目した土砂動態の捉え方

<推 奨>

河道特性調査においては、広域的に土砂動態を捉えるための技術的枠組みの1つである「粒径集団」、「有効粒径集団」、「混合型」、「通過型」の概念を必要に応じて具体化して用いることが望ましい。

2. 4 沖積河川の河床材料の捉え方

2. 4. 1 河道構成材料の大局的分類

<推 奨>

河道構成材料の調査や整理・分析は、対象とする河道を構成する材料の大局的分類である材料 m、s、t のいずれに当たるかを明確にした上で行うことを推奨する。

それぞれの定義は以下のとおりである。併せて、図 4-2-1 が参考となる。

1) 材料 m (main)

洪水営力を頻繁に受ける、主流路で相対的に低い河床領域を構成する材料である。通常、低水路の河床材料がこれに当たり、特に断りなく「河床材料」と言うときは一般に材料 m を指す。材料 m は、本節 2. 4. 2、2. 4. 3 に述べるように粒度範囲を大きく 3 つに区分 (A, B, C 集団) して、移動しやすさや流送形態について分析することができる。

2) 材料 s (sub)

材料 m が存在する主流路の脇の高い河床部分に存在する材料であり、その粒径範囲は材料 m の粒径範囲と重なる部分がないか又は小さく、材料 m の平均粒径より 1 オーダー以上小さい成分を多く含む。主流路内では浮遊形態で流送されるのが一般的である。

材料 s は、本節の 2. 1. 3 で述べたセグメント類型 2 と 3 では高水敷の本体を構成する。その材料がシルト・粘土を含み粘着力を発揮する場合には、河床材料とは異なる流送特性を示す。そのため材料 s に関する情報は、低水路河岸の浸食形態・速度の予測や護岸の必要性の判断、低水路川幅拡張後の土砂堆積による川幅縮小の推定などに必要となる。

セグメント類型 1 での材料 s の堆積は、あっても一般に薄い。しかしそこでは、材料 m である礫が露出している場所に比べ植物がより生育しやすいので、植物の状況などを分析する際にも材料 s に関する情報が重要となる。

3) 材料 t (transient)

平水時に水面下となる河床部分 (材料 m) の上に (多くの場合薄く) 乗った材料であり、その粒径範囲は材料 s 程度あるいは更に細かい成分を含むことさえある。材料 t は、一時的で不安定なことが多く、ごく小規模の出水があるとフラッシュされ、あるいは増減する性質を持つ。

材料 m が一時的にせよ部分的にせよ材料 t に覆われることは、微小規模のハビタット構造の変化として重要となる場合があり、平水状況が長く続くときの物質循環にも影響を与え得る。粒状有機物の堆積も材料 t に分類される。

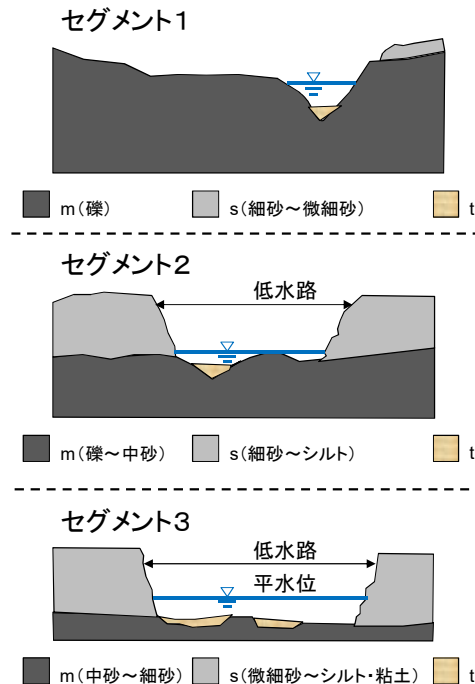


図 4-2-1 各セグメント類型における材料 m、s、t の典型的な存在状況

以上のように、材料 m、s、t の基本的性格や河道特性との関わりは大きく異なるので、調査や整理・分析の対象が、これらのうちどれに分類されるかを把握することが望ましい。

2. 4. 2 代表粒径の設定

<標準>

河道特性の整理・分析においては、材料 m を対象とした河床材料調査の結果に基づき、河床材料の動きやすさや流送される量を規定する河床材料粒径の代表値として、代表粒径 d_R をセグメントごとに設定することを標準とする。

<例示>

代表粒径 d_R は、以下の手法により設定することができる。

材料 m が砂主体であるセグメントの場合には、代表粒径に河床材料の d_{60} を用いることができる。

材料 m が砂礫や石礫であるセグメントの場合には、河床材料を以下の手順により A、B、C 集団に区分した上で、代表粒径を設定することができる。河床材料の区分については、図 4-2-2 が参考となる。

- 1) 容積法による河床材料の調査によって得た当該セグメントの粒径分布を、横軸に粒径を対数表示し、縦軸に通過重量又は体積百分率を取った図面に、粒径加積曲線として描く（図 4-2-2 参照）。
- 2) 粒径 2mm を区分粒径とし、粒径 2mm 以下の砂成分を B 集団とする。ただし、この付近の粒径加積曲線上に勾配の急変点が生じていれば（通常 1.0～2.0mm 辺り）、それを区分粒径とする。
- 3) 粒径加積曲線上で、もっとも大粒径よりの直線状（勾配一定）部分を C 集団とする。
- 4) B 集団と C 集団の間を A' 集団と仮置きする。B 集団と A' 集団、A' 集団と C 集団は、

通常、粒径加積曲線の勾配急変点を隔てて接続することになる。

- 5) A' 集団の粒径加積曲線の中に勾配急変点が存在する場合には、仮置きしたA' 集団を、そこでA' 集団とA'' 集団に分割する。場合によっては、この勾配急変点が明確でないことがある。この場合は、当該セグメントの滞筋部の表層材料の粒度分布（C集団とA' 集団からなることが多い）により判断するか、C集団とA' 集団の区分粒径の8分の1程度の粒径をA' 集団とA'' 集団の区分粒径として、仮置きしたA' 集団をA' 集団とA'' 集団に分割する。更に、新設したA'' 集団の最大・最小粒径比が15を超える場合は、下流のセグメントの粒度分布形も参考にしながら、B集団と隣接するA''' 集団を新たに挿入し、粒径の大きな順にA'、A''、A''' 集団とする。
- 6) 最後に対象河川の各小セグメントの区分粒径が、上下流で一致するように区分粒径を微調整する。
- 7) こうして得られた河床材料区分に基づき、C集団とA' 集団のみから成る粒径加積曲線を新たに作成し、その60%通過粒径 d_{60} を求め、これを代表粒径 d_R とする。

A'' 集団以下の含有率が20～30%以下の場合には、河床材料調査によって得た粒度分布の d_{60} とその粒度分布に上記手順を適用してA'、C集団から求めた代表粒径との差が一般に小さい。そのため、A'' 集団以下の含有率が20～30%以下の場合には、河床材料調査によって得た粒度分布の d_{60} を代表粒径とすることができる（すなわち、材料 m が砂主体であるセグメントの場合と同様に代表粒径の設定を行うこととなる）。

線格子法・面格子法による河床材料の調査を行った場合には、A'' 集団以下の含有率が20～30%以下となる場合が多く、そのため上記手順を踏まずに河床材料の調査によって得た粒度分布の d_{60} として代表粒径を求めてよい。

なお、河口や堰の上流等の中小出水では掃流力が相対的に小さい箇所では、A'、C集団より細粒の材料が多く堆積し、その箇所を含むセグメント内の他箇所に比べて細粒化している場合がある。そうした箇所を含むセグメントの代表粒径の設定においては、細粒化した箇所における河床材料の調査のデータは参考程度にとどめ、他箇所でのデータをより重視する。

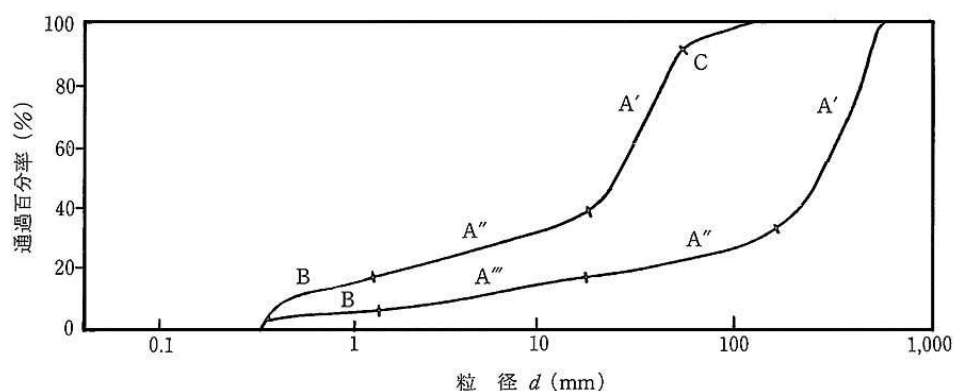


図 4-2-2 粒径加積曲線に基づく河床材料の区分の例

2. 4. 3 混合粒径河床材料の整理・分析について

<考え方>

本節の2.4.2に示した代表粒径の設定手順で用いている材料 m のA、B、C集団への区分という手法は、以下に示すように、混合粒径河床材料の捉え方にも資するものである。すなわち、A' 集団は河床材料の主モード（主構成材料）であり、それより粒径の大きいC集団は、A' 集団に比べ移動速度が遅く、河床に取り残されているような状況を呈するものである。河床変動

に関係するのは主にCとA' 集団であり、材料 m 全体の動きやすさを規定する主材料であることが一般的である。一方、B 集団やA'''、A'' 集団は、大粒径間に存在するマトリクス集団で、河床変動にはあまり寄与しないことが一般的である。

以上から、本節の2.4.2において代表粒径 d_R をCとA' 集団から算出することとしている。

各集団は、それぞれ異なる流送形態又は移動速度を持っている可能性が高く、したがって、集団ごとに移動性や移動量を評価することを通じて、当該セグメントの土砂動態や河床変動の特性についての理解を深めることにつながると期待される。代表粒径 d_R 設定の手順もこの考え方の一環である。

また、近年は、比較的粒径分布の狭い十分混合された混合粒径材料に対して、砂礫から石礫までを含む材料で構成される河川については、掃流力によって流砂や河床変動を記述する従来の枠組みを修正・改良する必要があるという観点からの知見の蓄積が活発になっている。粒径分布の幅が広い、更には、その平面的不均一性も高いような河床材料については、従来の整理・分析・解析法の有効性が、比較的粒径分布の幅が狭い十分混合された材料を対象にする場合と異なり得ることに配慮しておくことが望まれる。

第5章 河川における洪水流の水理解析

第1節 総説

＜考え方＞

洪水流の水理解析は、所定の流下能力や侵食・洗掘に対する安全性を確保するための河道設計、流下能力を維持するための樹木群管理や河積の確保等の維持管理、遊水地の施設計画等、河川等の計画・設計・維持管理のために実施するものである。

洪水流の水理解析とは、ある形状及び粗度状況を持つ河道に、上流端において流量又は水位を、下流端において水位を設定し、その河道内で生じる水位・流量・流速などの水理量の空間的な分布及びその時間変化を算定するものである。ここで、粗度状況は、河床表層の凹凸の状態のことであり、高水敷の地被状況、低水路の河床材料の粒径、河床波の形状等がその一例である。なお、背の高い植物の倒伏や河床波の消長などに見られるように、流水の作用を受けて粗度状況が変化することもあり、検討対象とする流量時の粗度状況を的確に表現することが重要である。

解析手法の選定に当たっては、各種解析手法の原理と特徴、その適用限界などを理解した上で、目的を達成するための適切な解析手法を選択する。また、計算を実施するに当たって、必要となる各種パラメータ、初期条件及び境界条件を設定する。

なお、洪水流の水理解析は、実河川で生じる現象を対象としているため、一般的に以下のような制約の下で行われる。

- 1) 計算に用いる初期条件及び境界条件が必要な時空間解像度及び精度で得られていない場合がある。
- 2) 洪水流の発生頻度が高くないため、解析結果を検証する機会が限られる。
- 3) 洪水流の作用により粗度状況（河床波、植生の倒伏・破壊状況等）や河道形状が変化し、またその影響が洪水流に及ぶことについて、今後とも知見を拡充し、解析の信頼性をより高めていくことが必要である。

本章では、洪水流解析の目的及び目的に応じた洪水流解析手法の選定、各解析手法、及びパラメータの設定手法について標準的な方法を示す。

第2節 洪水流解析の目的

＜考え方＞

河川計画・設計・維持管理における洪水流の解析の主な目的は、以下のように整理される。

- 1) 所与の出水条件の下での最高水位等の洪水位の算定
- 2) 構造物等（河岸や樹木を含む）に作用する外力の算定
- 3) 水防関係水位の算定
- 4) 河道特性の把握・河川環境管理・河川利用空間管理のための水理量・水理環境の算定
- 5) 氾濫計算のための外水氾濫条件の算定
- 6) 水位・流量の伝播特性の把握
- 7) 河道変化予測のための水理量の算定

- 1) 所与の出水条件の下での最高水位等の洪水位の算定

堤防又は河岸（掘込河道の場合）近傍の最高水位は、流下能力に直接に関わるため重要である。

最高水位は、一般に流出解析や流量観測等によって得た最大流量を与えた定常流解析により算定する。ただし、対象河川の洪水伝播に関わる本来的特性や、下流端水位の時間変化特性、分合流あるいは遊水地等による対象河道区間での流量の出入りの状況等によっては、最高水位に与える非定常的特性の影響が無視できなくなる場合がある。このような場合には、非定常流解析を用いる。その具体的な判断法については本章 第 3 節 目的に応じた洪水流解析手法の選定 3.2 を参照のこと。

2) 構造物等（河岸や樹木を含む）に作用する外力の算定

流れによって生じる抗力・揚力・せん断力といった外力の算定に当たっては、構造物の表面に作用する応力分布を定常流解析によって算定し、その分布を構造物表面にわたって積分することにより求める方法や抗力係数又は揚力係数を用いた経験式を用いて構造物近傍の代表流速から求める方法等を用いる。この定常流解析から得られる外力は、流れ場の時間変動を均した平均値である。目的によっては外力の時間変動（又は変動の最大値）が必要であり、その場合には非定常流解析を用いる。

3) 水防関係水位の算定

水防関係水位とは、氾濫危険水位、避難判断水位、氾濫注意水位、水防団待機水位の総称とする。これらの水位は、築堤状況や堤内地盤高と計画高水位の関係等によって地先ごとに設定される値である。水防関係水位の算定とは、地先で設定された値と洪水予報観測所での水位を対応付けることであり、具体的方法は「危険水位の設定要領について」、「特別警戒水位の設定要領について」による。

水防関係水位の算定のためには等流計算、不等流計算、不定流計算等、各河川の状況に応じた適正な計算手法により行う。

4) 河道特性の把握、河川環境管理、河川空間管理のための水理量・水理環境の算定

河道特性の把握のための水理量として、河道地形の形成・変化特性を考察する上で重要な指標である摩擦速度、川幅水深比など水理量の縦断分布を算定する。

河川環境管理、河川空間管理のための水理環境として、たとえば動植物にとってのハビタット、景観等の形成、変化に関わる水理量を算定する。

たとえば植物群落の冠水頻度や河床の攪乱頻度については、生起確率が異なる複数の流量に対する水位や掃流力等が挙げられる。

5) 氾濫計算のための外水氾濫条件（氾濫の生じる流量）の算定

氾濫計算のための外水氾濫条件として、越流地点や堤防の決壊点における氾濫流量の算定に用いる河道内水位等を算定する。その際、第 6 章 氾濫解析における堤内地の氾濫解析と連動させて洪水流の解析を行うことで、氾濫に伴う河川流量の増減を考慮できる。ここで、氾濫解析に必要とされる水理量は氾濫解析の手法によって異なるため、洪水流の解析手法の選定に当たっては第 6 章 氾濫解析 を参照のこと。

6) 水位・流量の伝播特性の把握

水位・流量の伝播特性の把握とは、河道の上流端で与えられた水位ハイドロや流量ハイドロが洪水流の流下に伴って変形する過程を再現するものである。洪水流は、河道内に存在する狭窄部、樹木群などの影響を受けて、流量に比べて水位の伝播が遅れる場合がある。このような水位と流量の伝播特性の違いを表現するためには、非定常流解析を用いる。

7) 河道変化予測のための水理量の算定

流砂量の算定に必要な掃流力など水理量を算定するものである。

第3節 目的に応じた洪水流解析手法の選定

3.1 目的に応じた選定

<考え方>

洪水流解析として、表 5-3-1 に示す計算手法を用いる。

一次元解析[1DF]とは、河道横断面内で平均した水理量（水深、流速、河床せん断力など）の縦断分布を算定するものである。

準二次元解析[2DF']とは、河道横断面を粗度状況や水深等が同一と見なせる区間ごとに分割して等流近似の下で横断方向流速分布を算定し、この分布を反映した運動量補正係数とせん断力の算定式を一次元解析に組み込んで断面平均流速や水位等の縦断分布を算定するものである。

二次元解析[2DF]とは、水深方向に平均した水理量を対象として、水理量の平面分布を算定するものである。

準三次元解析[3DF']とは、二次元解析を拡張して水深方向に平均した水理量のほか、静水圧分布の仮定の下で二次流を含めた水深方向の流速分布を算定するものである。

三次元解析[3DF]とは、非静水圧分布となる流れ場にも適用でき、流水中の任意の位置における水理量を対象として、その平面及び水深方向の分布を算定するものである。

各解析には、流れ場の空間的分布を算定する定常計算とさらにその時間変化も計算対象とする非定常計算がある。

洪水流解析の目的 1) ～ 6) に応じて、表 5-3-2 に従って計算手法を選定する。

表 5-3-2 において<推奨>とした計算手法は、<標準>として示す手法では解析対象とした事象を十分に再現することができず、<推奨>として示す高度な手法を採用する必要がある場合に選定する。また<例示>とした計算手法は、<標準>として示す手法より流れ場の記述レベルが低い手法でも目的を十分に満たす再現性が得られ、<例示>として示す比較的簡便な手法を採用することができる場合に選定する。

計算手法の選定に当たっては、計算に必要とされる情報の取得可能性についても併せて検討することが重要である。なお、目的 1) ～ 7) 以外の目的で洪水流解析を活用する場合でも、表 5-3-2 の「目的に対して必要となる物理量」を参考にして適切な解析手法を目的に合わせて選定する。

表 5-3-1 洪水流解析に用いる計算手法の一覧（記号は表 5-3-2 の凡例参照）

解析レベル	記号	H	Δh	U	u_{ave}	v_{ave}	u	v	w	Δp
一次元解析	1DF	○		○						
準二次元解析	2DF'	○		○	Δ^*					
二次元解析	2DF	○	○	○	○	○				
準三次元解析	3DF'	○	○	○	○	○	Δ	Δ	Δ	
三次元解析	3DF	○	○	○	○	○	○	○	○	○

凡例 ○: 計算できる項目

Δ : 近似的に計算できる項目

Δ^* : 近似的に計算できる項目（断面区分単位の流速分布）

表 5-3-2 目的に対して必要となる物理量と洪水流解析手法の選定

目的		非定常性考慮の有無		目的に対して必要となる物理量 (計算で扱う物理量はこれよりも多いことが一般的)											計算方法		
		定常	非定常	H	Δh	U	U_{ave}	V_{ave}	u	v	w	Δp	時間変動	標準	推奨	例示	
所与の出水条件の下での最高水位等の洪水位の算定	下記以外の河道区間	●	○	●	●※1	—	—	—	—	—	—	—	—	2DF不等流	2DF 3DF'	1DF不等流※	
	流量が出入りする地点を含まず、最大流量と最高水位時の流量に有意な差(ズレ)が生じる、または最大流量が河川沿いに有意に変化する区間	○	●	●	●※1	—	—	—	—	—	—	—	—	1DF不定流 2DF不定流	2DF 3DF'	—	
	流量が出入りする地点を含み、出入りする流量を予め与えることができない、または流量の出入りにより最大流量と最高水位の発生タイミングに有意な差(ズレ)が生じる区間	○	●	●	●※1	—	—	—	—	—	—	—	—	1DF不定流 2DF不定流	2DF 3DF'	—	
構造物等(河岸や樹木を含む)に作用する外力の算定※2		●	○	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	2DF不等流 2DF	2DF不定流 2DF 3DF' 3DF	1DF不等流	
水防関係水位の算定		●	○	●	●※1	—	—	—	—	—	—	—	—	2DF不等流	1DF不定流 2DF不定流	1DF不等流	
河道特性の把握のための水理環境・水量の算定		●	—	●	—	●	—	—	—	—	—	—	—	2DF不等流	2DF	1DF不等流※	
河川環境管理・河川利用空間管理のための水理環境・水量の算定		●	—	●	—	●	—	—	—	—	—	—	—	2DF不等流	2DF	1DF不等流※	
氾濫計算のための外水氾濫条件の算定※3		—	●	●	●※1	○	○	○	—	—	—	—	—	1DF不定流 2DF不定流	2DF	—	
水位・流量の伝播特性の把握		—	●	●	—	●	—	—	—	—	—	—	—	2DF不定流	2DF	1DF不定流	

凡例 H : 横断方向平均水深 u : 流下方向流速
 Δh : Hからの横断方向偏差 v : 横断方向流速
 U : 断面平均流速 w : 水深方向流速
 u_{ave} : 水深平均流速 Δp : 静水圧分布からの偏差
 v_{ave} : 水深平均流速(横断方向) 時間変動 : 流速・水深・圧力の時間的変動成分
 ● : 目的に対して必須の物理量 ○ : 条件によっては必要となる物理量
 ※1 堤防もしくは河岸近傍(堀込河道の場合)における水位
 ※2 構造物周辺における河床変動については第6章 河床変動、河床材料変化および土砂流送の解析を参照
 ※3 第7章 浸水解析の第3節において標準とした外水浸水解析モデルとの組み合わせを前提としている
 ※4 目的を十分に満たす場合には、計算に用いる情報の取得状況に鑑みて等流計算を採用することができる

3. 2 最高水位の算定における定常・非定常流解析の使い分け

<考え方>

下記1)～4)のいずれにも当たらない場合には、流出解析や流量観測等により得た最大流量をあらかじめ与えた定常流解析を用いることが基本となる。下記1)～4)のいずれかに該当する場合は、非定常流的特性を解析において考慮する必要性が高まるので、非定常流解析を用いることが基本となる。

- 1) 分合流や遊水地等による流量の出入りの影響がないとできる河道区間において、最大流量と最高水位時の流量に有意な差(ズレ)が生じる。
- 2) 分合流や遊水地等による流量の出入りの影響がないとできる河道区間において、各地点の最大流量が河川沿いに有意に変化し、それをあらかじめ与えることが難しい。
- 3) 対象とする河道に、分合流や遊水地等による流量の出入りが存在する区間が含まれ、その出入りの量をあらかじめ与えることができず、非定常流解析によって一体的に計算する必要がある。
- 4) 対象とする河道に、分合流や遊水地等による流量の出入りが存在する区間が含まれ、その出入りの流量をあらかじめ与えることができる場合において、その流量の出入りが、最大流量と最高水位発生タイミングに有意な差(ズレ)を生じさせる。

1)については、河口付近での潮位変化、支川を対象とする場合の本川との合流点付近での水位変化、水門操作による水位制御の影響を受ける場合など、解析の境界条件である下流端水位の時間変化に起因する場合と、対象河川の洪水伝播に関わる本来的特性による場合がある。このうち後者に該当するかどうかを判別する考え方について及び2)(これも洪水伝播にかかわる本来的特性に起因する)に該当するかどうかを判別する考え方について以下に述べる。

一様の川幅、勾配の単断面河道を対象とした一波の洪水波の流下に伴う水位・流量変化に関する水理特性（非定常性）の要点は、下記のとおりである。

- ・ 流下距離の増加に伴って最大水深は低減するが、水深の増大が生じている期間は長くなる（洪水波形の偏平化）。
- ・ 最大水深の低減は、流下距離が大きくなるほど、水深の時間変化を表す曲線のピーク部形状が尖鋭であるほど、また、河床勾配及び断面平均流速（又は洪水波の伝播速度）が小さいほど顕著となる。

実河川では、上記特性に河道横断形状（複断面）や粗度・河積の縦断的な変化（たとえば樹木群や狭窄部等）等の影響が加わる。非定常性が顕在化すると、任意の河道断面においては、流量と水深の関係が図 5-3-1a) に一例を示すように明瞭なループを描くようになり、流量と水深のピークが現れる時間差が大きくなる。また、流下方向には、図 5-3-2 に示すように、洪水流の流下に伴って水深・流量の低減が顕著となる。こうした特性を踏まえて、洪水伝播にかかわる本来の特性のために非定常流解析を使う必要があるかどうかの判断の材料は、以下の 2 点に集約される。

- ① 最大流量と最高水位時の流量との差（ズレ）の大きさ（図 5-3-1(a), (b) 参照）
- ② 河道内流量の出入りのない一連区間の上下流端での最大流量の差（ズレ）の大きさ（図 5-3-2 参照）

流量の差（ズレ）は第 2 章 水文・水理観測に基づく水位・流量観測結果（カテゴリー1 の観測等）を用いて評価することができる。①②のいずれかに有意な差（ズレ）がある場合には、最大流量を与えた定常流解析による最高水位の算定に一定の誤差が含まれる。その場合、同一の粗度係数を用いた非定常流解析に比べて最高水位が大きめに算定される傾向を示す。こうした傾向を加味した上で、解析の目的を満たす精度で最高水位を得るため、非定常流解析の適用の必要性について検討する。なお、②の差（ズレ）については、図 5-3-2 に示すように一連区間を更に細分し、各区分ごとに最大流量を適切に与えることで小さくすることができる。こうした区間割と最大流量の再設定が可能な場合には、①の観点から非定常流解析の適用の必要性について検討することによい。

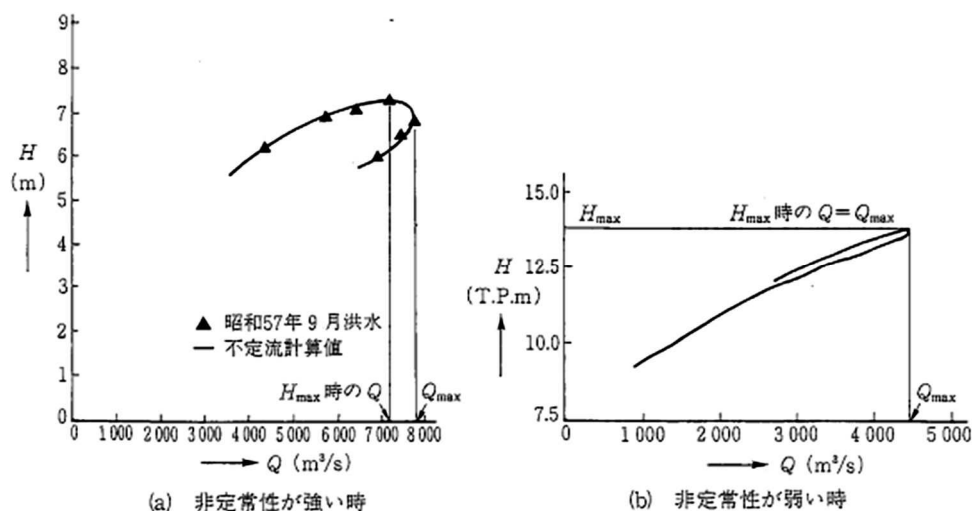


図 5-3-1 水位流量曲線図の例

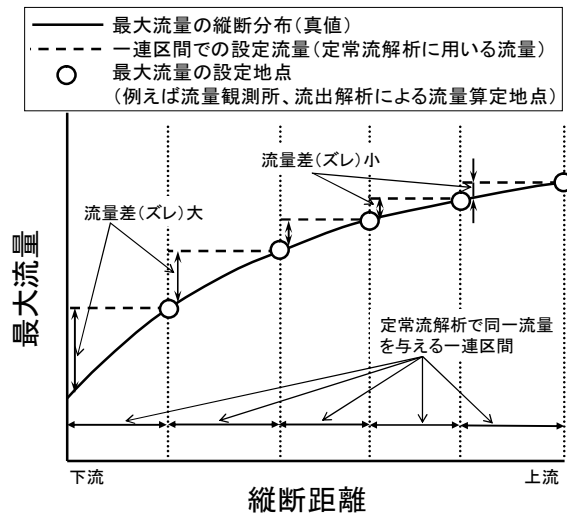


図 5-3-2 流下方向への最大流量の低減と区間別の最大流量設定例

第4節 計算手法の説明

4. 1 一次元不等流計算

4. 1. 1 定義

<考え方>

一次元不等流計算[1DF 不等流]は、流量 Q を一定とし、基礎式として運動方程式に基づく漸変開水路流れを対象とした式(5-4-1)を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\int u^2 dA \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{T_r}{\rho} = 0 \quad (5-4-1)$$

ここで、 A は流れの断面積、 x は流下方向に沿った座標、 H は水位、 T_r は単位長さの河道の河床に作用する力、 u はある点での流速、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。ここで、左辺第1項の括弧内は運動量補正係数 β を用いて式(5-4-2)のように置き換えられる。

$$\int u^2 dA = \beta U^2 A \quad (5-4-2)$$

ここで、 U は断面平均流速である。

一次元不等流計算は、断面内の粗度状況が一様及び変化する単断面河道に適用するのを標準とする。この場合、 β は一定値（1.0～1.1 程度）とする近似的な取扱いを行う。

T_r の算定に当たっては、式(5-4-3)に示す Manning の平均流速公式を適用するのを標準とする。

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I_b^{1/2} \quad (5-4-3)$$

ここで、 I_b は河床勾配、 $R (=A/S)$ は径深である。平均流速公式とは、縦断方向に一様な河道断面における等流を想定し、河道断面形と河床勾配が与えられたときに、平均流速を粗度係数及び径深と関係づける式である。

断面内の粗度状況が一様又は図 5-4-1 に示すように変化する場合、 T_r は式(5-4-4)、(5-4-5)により算定する。

$$\frac{T_r}{\rho} = \frac{gAn^2U^2}{R^{4/3}} \quad (5-4-4)$$

$$\frac{T_r}{\rho} = \frac{gU^2}{A^{1/3}} \cdot \left(\sum S_i \cdot n_i^{3/2} \right)^{4/3} \quad (5-4-5)$$

ここで、 S_i は同一の粗度を有する i 番目の潤辺部の長さ、 n_i はその潤辺部での粗度係数である。

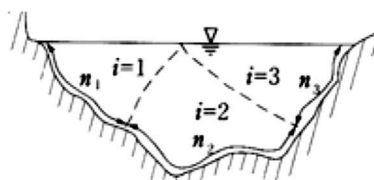


図 5-4-1 複数の粗度係数を有する河道横断面

4. 1. 2 計算方法

<標準>

式(5-4-1)を差分化し、河道形状、粗度係数、境界条件を適切に与え、標準逐次計算法により数値計算を行うのを標準とする。

計算断面については、距離標ごとに設定するのを標準とする。

支配断面が現れる断面の近傍あるいは大きなエネルギー勾配が現れる断面の近傍では、必要に応じて内挿断面を挿入するのを標準とする。

河道形状、河川構造物や樹木群繁茂領域等については、河川定期横断測量、河道平面図、航空写真、植生図、樹木群調査の結果を用いて設定するのを標準とする。

樹木群、河道の急拡・急縮等により死水域が形成される場合には、該当する計算断面において死水域に相当する部分を河積から除く。以上の設定手法については、河道計画の検討の手引き、及び河川における樹木管理の手引きによる。

粗度係数については、本章 第 5 節 に基づいて適切に設定する。

分合流点、跳水発生地点、段落ち部及び橋脚設置地点を含む河道区間においては、式(5-4-1)に代えて、これら地点を間に挟む上下流の計算断面間をコントロールボリュームとしてこれら事象に即した運動量式（又はエネルギー方程式）に基づいて水位を算定する。

また、河道湾曲区間や砂州の発達する区間における左右岸水際部の水位は、河道形状や水量等に基づいて横断方向偏差 ΔH の算定式を別途用意し、これにより算定した ΔH を式(5-4-1)により算定した平均水位に付加することにより得る。

以上の算定手法については、水理公式集[平成 11 年版]及び河道計画検討の手引きによる。

河口部において下流端境界条件を与える場合には、潮位、河川水と塩水との密度差、河口砂州などを考慮し、下流端水位を設定する。

<推 奨>

解析の精度・解像度の向上の観点から、航空レーザ測量やサイドスキャンソナーを用いた音響測深等による高解像度の連続的な河道地形測量成果を用いて河道形状を設定するのを推奨する。

常流と射流が混在した流れ場を対象とする場合には、本節 4.2.2<推奨>に記載する一次元不定流計算を流量及び水位一定の境界条件の下で実施し、水位や流速等の水理量が時間的に安定した定常状態の解を得るのが望ましい。

<例 示>

標準逐次計算法により常流と射流が混在した流れ場の計算を行う場合には、支配断面の位置を予測して常流と射流の発生区間を判別する方法が適用できる。

また、河川水と海水の密度差を考慮した下流端水位の簡易的な設定法として、潮位から求めた河口部水深 h_0 と $(\rho_2/\rho_1 - 1)$ (ここで ρ_2 、 ρ_1 は海水と河川水の密度) の積として求めた値を河口部の潮位に加える方法を用いることができる。

4. 2 一次元不定流計算

4. 2. 1 定義

<考え方>

一次元不定流計算[1DF 不定流]は、基礎方程式として連続方程式及び運動方程式に基づく漸変開水路流れを対象とした式(5-4-6)、式(5-4-7)を用いる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5-4-6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int u^2 dA \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{T_r}{\rho} = 0 \quad (5-4-7)$$

ここで、 t は時間である。一次元不定流計算は、断面内の粗度状況が一様及び変化する単断面河道に適用することを標準とする。式(5-4-7)の左辺第2項及び第4項は、本節 4.1.1 に示した一次元不等流計算と同様に式(5-4-2)、(5-4-4)、(5-4-5)により算定する。

4. 2. 2 計算方法

<標 準>

式(5-4-6)、式(5-4-7)を差分化し、河道形状、粗度係数、境界条件を適切に与え、数値計算を行うのを標準とする。

計算時間間隔については、計算が安定的に進められ、かつ所定の精度及び解像度が得られるように設定するのを標準とする。

計算断面、河道形状、粗度係数、樹木群や死水域、河口部における下流端境界条件等については、本節 4.1.2 と同様に設定する。

河道湾曲部、砂州の発達する区間における左右岸水際部の水位は、本節 4.1.2 と同様に算定する。

<推 奨>

常流と射流が混在する流れ場を対象とする場合には、跳水や段波などの不連続的な流れや常流から射流への遷移流れといった急変流に適応した計算手法を用いることが望ましい。

4. 2. 3 一次元不定流計算の近似解法

<考え方>

一次元不定流計算の近似解法とは、運動方程式の運動量の時間変化に関する項、運動量や水深の縦断方向変化に関する項の全て又は一部を省略した近似式を用いて解析を行うものである。このような近似解法として、Kinematic wave モデル、Diffusion wave モデル等があり、本節 4. 2. 1 に示した計算法と併せて水理学的追跡法と呼ばれる（第 3 章 水文解析 2. 2. 4 参照）。計算法については、本節 4. 2. 2 に準ずる。

4. 3 準二次元不等流計算

4. 3. 1 定義

<考え方>

準二次元不等流計算[2DF'不等流]は、流量 Q を一定とし、基礎式として式(5-4-1)と β 及び T_r の算定式である式(5-4-8)～(5-4-13)を用いる。

$$\beta = \frac{\int u^2 dA}{U^2 A} = \frac{\beta_1 \sum_i (U_i^2 A_i)}{U^2 A} \quad (5-4-8)$$

$$\frac{T_r}{\rho} = \sum_i \left\{ \frac{g n_i^2 U_i^2 S_{bi}}{R_i^{1/3}} + \sum_{ji} (f U_i^2 S_{wji}) \right\} \quad (5-4-9)$$

$$\frac{n_i^2 U_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} + \frac{\sum_{ji} (\tau'_{ji} S'_{wji})}{\rho g} + \frac{\sum_{ji} (\tau_{ji} S_{wji})}{\rho g} = A_i \cdot I_b \quad (5-4-10)$$

$$\tau_{ji} = \rho f U_i^2 \quad (5-4-11)$$

$$\tau'_{ji} = \rho f (\Delta U_{ji}) |\Delta U_{ji}| \quad (5-4-12)$$

$$Q = \sum_i (A_i U_i) \quad (5-4-13)$$

ここで、 S_b は壁面せん断力が働く潤辺長、 S_w は樹木群境界の潤辺長、 S'_w は分割断面境界の潤辺長、 τ と τ' は樹木群境界及び分割断面境界に作用するせん断力、 ΔU_j は境界面を介して隣り合う分割断面間での断面平均流速差、 f は境界混合係数、 β_1 は各分割断面内の運動量補正係数（1.1 又は 1 が標準）である。なお、添え字 i は i 番目の分割断面についての量であることを、添え字 j は j 番目の分割断面境界あるいは樹木群境界についての量であることを表す（ただし、 i 番目の分割断面に関わる境界のみが対象）。

準二次元不等流計算は、断面内の粗度状況が一樣又は変化する複断面河道に適用することを標準とする。

式(5-4-8)～(5-4-13)は、 f を導入して隣り合う断面間での干渉効果を考慮したものである。ここで、干渉効果とは河道横断方向に急な流速変化が生じ、そこで生じる横断方向の組織的流体混合・運動量輸送により流れ全体の抵抗が増大する効果のことである。

断面分割と境界混合係数の設定に当たっては、一般に急な流速変化をもたらす地形・粗度状況の条件に基づいて行う。河道断面形状及び粗度状況（一般的には樹木群境界）の急変点にお

いて分割断面境界を設定する。また、境界混合係数についても、断面急変部と樹木群境界に分けて設定手法を使い分ける。

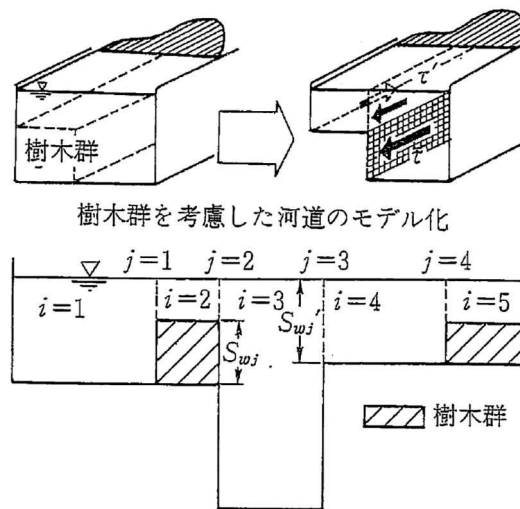


図 5-4-2 準二次元不等流計算での断面分割の一例

4. 3. 2 計算方法

<標準>

本節 4. 1. 2 と同様に式(5-4-1)を差分化し、数値計算を行うのを標準とする。

境界混合係数については、水理公式集[平成 11 年版]、河道計画の検討の手引き及び河川における樹木管理の手引きを参考にして適切に設定する。

計算断面、河道形状、粗度係数、樹木群や死水域、河口部における下流端境界条件等については、本節 4. 1. 2 と同様に設定する。

分合流点、跳水発生地点、段落ち部、橋脚設置地点、河道湾曲部、砂州の発達する区間における水位変化については、本節 4. 1. 2 と同様に算定する。

4. 4 準二次元不定流計算

4. 4. 1 定義

<考え方>

準二次元不定流計算[2DF'不定流]は、基礎式として式(5-4-6)、(5-4-7)を用い、 β 及び T_r は本節 4. 3. 1 に示した準二次元不等流計算と同様に式(5-4-8)～(5-4-13)により算定する。

準二次元不定流計算は、断面内の粗度状況が一樣又は変化する複断面河道に適用するのを標準とする。

4. 4. 2 計算方法

<標準>

本節 4. 2. 2 と同様に式(5-4-6)、式(5-4-7)について数値計算を行うことを標準とする。

計算断面、断面分割、河道形状、粗度係数、樹木群や死水域の配置、境界混合係数、河口部における下流端境界条件等については、本節 4. 3. 2 と同様に設定する。

また、河道湾曲部、砂州の発達する区間における水位変化については、本節 4. 1. 2 と同様に算定する。

4. 5 平面二次元流解析

4. 5. 1 定義

<考え方>

平面二次元流解析[2DF]は、基礎式として連続方程式及び運動方程式に基づく漸変開水路流れを対象とした式(5-4-14)～(5-4-17)を用いる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [h\bar{u}] + \frac{\partial}{\partial y} [h\bar{v}] = 0 \quad (5-4-14)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = F_x - g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left[-h\overline{u'^2} \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(-h\overline{u'v'} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \quad (5-4-15)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = F_y - g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left[-h\overline{u'v'} \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(-h\overline{v'^2} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} \quad (5-4-16)$$

$$\begin{pmatrix} -\overline{u'^2} & -\overline{u'v'} \\ -\overline{u'v'} & -\overline{v'^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\nu_{txx} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3}K & \nu_{txy} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ \nu_{tyx} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) & 2\nu_{tyy} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3}K \end{pmatrix} \quad (5-4-17)$$

ここで、 x, y は水平面又は河床面に平行な直交座標軸、 u, v はある点での各座標軸方向の流速（乱れ成分を平均化したもの）、 F_x, F_y は外力（質量力）、 H は水位、 \bar{u}, \bar{v} は水深平均の u, v 、 h は水深、 τ_b は河床せん断力、 ν_t は渦動粘性係数、 K は乱れエネルギーである。添え字 x, y はそれぞれ作用方向の座標軸を表す。

平面二次元流解析は、静水圧分布の近似が成り立つ流れ場に適用するのを標準とする。ただし、曲率半径の小さい湾曲流れ、構造物近傍の局所的な流れ等といった二次流による運動量輸送が卓越する場合や非静水圧分布となる場合には、本節 4.6、4.7 に示す準三次元流解析、三次元流解析を適用する。

4. 5. 2 計算方法

<標準>

式(5-4-14)～式(5-4-17)を差分化し、河道形状、粗度状況、境界条件を適切に設定し、数値計算を行うのを標準とする。

計算格子の設定に当たっては一般座標系を用い、河岸法線形状、堤防法線形状、定期横断測線の位置を考慮して座標を設定するのを標準とする。

河道形状、河川構造物や樹木群繁茂領域等については本節 4.1.2 に示した資料に基づいて設定する。

計算時間間隔については、計算が安定的に進められることはもちろんのこと、所定の精度及び空間解像度が得られるように設定する。

河床せん断力については、Manning の式若しくは対数則などを用いて算定するのを標準とする。粗度係数については、本章 第5 節に基づいて適切に設定する。

式(5.4.17)には、式(5.4.18)に示す渦動粘性モデルを適用するのを標準とする。

$$\begin{aligned} \nu_t &= au_* h \\ K &= 0 \end{aligned} \quad (5-4-18)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 a は定数である。

式(5-4-18)は、水深スケールの乱れが卓越する流れ場での平面的な流体混合のモデルであり、水深や粗度が空間的に漸変する河道の場合、 a は0.13～0.15程度の値をとる。

<推 奨>

高水敷・低水路間等での河道横断形状の急変部や樹木群等の植物群落を含む流れ場であり、かつ平面せん断流に伴う大規模平面渦など組織的流体混合による河道平面方向の運動量輸送が卓越して発生する場合には、以下の二通りのアプローチで解析を行うことが望ましい。

- 1) 平面せん断流の平均的な効果を渦動粘性係数により評価するアプローチ
- 2) 平面スケールの組織的流体混合現象を平面二次元流解析の直接の対象とするアプローチ
(本アプローチでは、渦の動きを表す流速の時空間的な変化を計算結果として得る。実務上は、こうした流速の変動を直接必要とすることは少なく、渦による混合の効果を受けた平均的な流速(例えば断面平均流速、横断方向流速分布等)に関する情報を用いるのが一般的である。平均的な流速は、本アプローチで得た流速の変動を時空間的に平均することで得られる。)

1) のアプローチでは、平面せん断流に関する水理量、河道形状、植物群落の粗度・形状等に基づいて、組織的流体混合現象に即した渦動粘性係数を設定する。2) では、解析によって平面渦に伴う流れが直接計算されるので、渦動粘性係数については、大規模平面渦よりスケールが小さく、直接の解析対象外となる流体混合に即した値を設定する。そのような設定の一例として、水深スケール以下の流体混合を式(5-4-18)と同様に摩擦速度と水深の関数として与えることが挙げられる。

また、解析の精度及び空間解像度の向上の観点から、航空レーザ測量やサイドスキャンソナーを用いた音響測深等による高解像度の連続的な河道地形測量成果を用いて河道形状を設定することを推奨する。

<例 示>

渦動粘性係数 ν_t と乱れエネルギー K の算定方法として、 $k-\epsilon$ モデル等の乱流モデルの方程式に基づいて計算する方法を用いることができる。

4. 6 準三次元流解析

4. 6. 1 定義

<考え方>

準三次元流解析[3DF']は、基礎式として連続方程式及び運動方程式に基づく漸変開水路流れを対象とした式(5-4-19)～(5-4-23)を用いる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^H u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^H v dz = 0 \quad (5-4-19)$$

$$w = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^z u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^z v dz \quad (5-4-20)$$

$$\frac{Du}{Dt} = F_x - g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'v'} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{u'w'} \quad (5-4-21)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = F_y - g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'v'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'^2} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{v'w'} \quad (5-4-22)$$

$$\begin{pmatrix} -\overline{u'^2} & -\overline{u'v'} & -\overline{u'w'} \\ -\overline{u'v'} & -\overline{v'^2} & -\overline{v'w'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\nu_{txx} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}K & \nu_{txy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \nu_{txz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \nu_{tyx} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 2\nu_{tyy} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}K & \nu_{tyz} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{pmatrix} \quad (5-4-23)$$

ここで、 z は xy 平面に対して垂直上向きの直交座標軸、 w はある点での z 座標軸方向の流速（乱れ成分を平均化したもの）、 z_b は河床面の z 座標である。

準三次元流解析は、 $w \ll \overline{u}, \overline{v}$ であり静水圧分布の近似が成立する場合に適用するのを標準とする。

4. 6. 2 計算方法

<例 示>

式(5-4-19)～(5-4-23)を差分化し、河道形状、粗度係数、境界条件を適切に設定し、数値計算を行う。

計算格子、河道形状、粗度係数、河川構造物や樹木群繁茂領域等や河床せん断力については、本節 4.5.2 と同様に設定できる。

4. 7 三次元流解析

4. 7. 1 定義

<考え方>

三次元流解析[3DF]は、基礎式として式(5-4-24)～(5-4-28)を用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5-4-24)$$

$$\frac{Du}{Dt} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'v'} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{u'w'} \quad (5-4-25)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'v'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'^2} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{v'w'} \quad (5-4-26)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'w'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'w'} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'^2} \quad (5-4-27)$$

$$\begin{pmatrix} -\overline{u'^2} & -\overline{u'v'} & -\overline{u'w'} \\ -\overline{u'v'} & -\overline{v'^2} & -\overline{v'w'} \\ -\overline{u'w'} & -\overline{v'w'} & -\overline{w'^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\nu_{txx} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}K & \nu_{txy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \nu_{txz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \nu_{tyx} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 2\nu_{tyy} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}K & \nu_{tyz} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \nu_{txz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \nu_{tzy} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & 2\nu_{tzz} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}K \end{pmatrix} \quad (5-4-28)$$

ここで、 F_z は外力（質量力）である。添え字 z は作用方向の座標軸を表す。

三次元流解析は計算負荷が大きく、そのため広範囲にわたる実河川での適用事例が少ない。三次元流解析の適用に当たっては、水制等の構造物周辺の流況を再現する場合など局所的かつ非静水圧分布となる流れ場であるか、かつ解析の目的に照らし合わせて三次元流解析の必要性が高いか、前もって十分に吟味することが重要である。

4. 7. 2 計算方法

<例 示>

式(5-4-24)～式(5-4-28)を差分化し、河道形状、粗度係数、境界条件を適切に設定し、数値計算を行うことを標準とする。

河道形状、粗度係数、河川構造物や樹木群繁茂領域等や河床せん断力については、本節 4. 5. 2と同様に設定できる。

第5節 パラメータの設定

5. 1 パラメータの種類と設定の基本的な考え方

<考え方>

水理解析におけるパラメータとしては、各解析法に内在したパラメータと河道の粗度状況に依存したパラメータが存在する。

前者は、準二次元流解析の境界混合係数、平面二次元流解析の渦動粘性係数等である。一方、後者の粗度状況に依存したパラメータとは基本的に粗度係数を指す。

計算手法に内在したパラメータは、既往の知見から水理条件等に応じて設定されることが多く、その設定方法を本章 第4節 計算手法の説明 に記載している。したがって、本節では粗度係数の設定法について述べる。

なお、計算手法に内在したパラメータについては、実洪水の観測結果から逆算等によって検証されることが少なからず行われてきたが、観測技術の進歩に伴ってデータの空間分解能や時間分解能が向上してきたことも考慮して、今後とも積極的に検証を試みることを重要である。

5. 2 粗度係数の設定

<考え方>

粗度係数の設定方法としては、逆算によって粗度係数を同定する方法、河道の粗度状況から物理的に粗度係数を推定する方法の大きく分けて二つが存在する。

粗度係数の逆算による同定法とは、適切な平均流速公式を用いた洪水流の計算手法に実測の河道形状、水位、流量あるいは流速を与えて、粗度係数を算定することである。逆算粗度係数には、その洪水発生時の種々の情報が集約されており、実績と言う意味で重みがある。設定対象とする粗度状況、河道形状、洪水規模が、粗度係数逆算対象のそれらと余り変わらない場合には、妥当な設定を行うことができる。逆にそうでない場合、この設定が妥当ではなくなる可能性がある。質が良く十分な数の粗度係数逆算が行われていることが前提となり、また、設定

結果の成否が洪水データの精度に依存する。

物理的な推定による方法とは、推定法の原理、特徴、適用範囲を理解した上で、対象となる場の特性を踏まえた適切な推定法に基づき粗度係数を算定するものである。粗度状況による粗度係数の推定は、一般性、応用性が高く、原理的には任意の断面形状、洪水規模及び粗度状況に適用できる。したがって、任意の粗度状況、河道形状、洪水規模を想定した粗度係数設定を行うことができる。その一方で、粗度係数の物理性が保たれるような平均流速公式の使用が前提となる。また、粗度係数の推定精度や推定法の適用範囲に限界や不確定要素が残る。

粗度係数の設定に当たっては、逆算による同定法と粗度状況による推定法の弱点を補完するように、両方の設定法を併用することが現実的な選択である。すなわち、河道の粗度状況から物理的に粗度係数を設定し、その一方で、その設定により既往代表洪水の逆算粗度係数あるいは洪水位を再現できるかを確認し、必要に応じて、逆算粗度係数値を踏まえて粗度係数を修正するというものである。あるいは、逆算粗度係数に基づき粗度係数を設定することを試み、その一方で、逆算対象の洪水規模・河道状況と粗度係数設定対象のそれらとの違いを踏まえ、物理的な粗度係数推定法を加味して、最終的に粗度係数を設定するというものである。

なお、物理的な粗度係数推定法の適用が難しい河道については、粗度係数逆算結果を重視した粗度係数設定を行うこととなる。この例として、岩河道、土丹が露出した河道などが挙げられる。逆に、逆算のためのデータが存在しないまま設定せざるを得ない場合は、物理的な推定法のみ適用や、それが難しい場合には、類似の河川の粗度係数を十分に吟味した上で適用することも現実的な選択肢となる。

粗度係数を支配する要因とその影響度が複雑で、精度の良い洪水観測が必ずしも容易でない実河川を対象としていることから、適切な粗度係数設定を行った場合でも、種々の誤差、不明確な要素を粗度係数から完全に除去することは困難と考えるべきであり、一般的には粗度係数の有効数字は2桁が限度である。粗度係数の設定や設定した流れ場の解析結果の解釈と利用においては、粗度係数を含みうるこのような誤差、不確実性を十分考慮しなければならない。

5. 3 逆算による同定の方法

5. 3. 1 逆算に用いるデータセットの種類

<考え方>

粗度係数の逆算に用いるデータセットとして、以下の3種類を用いる。データセット1)、2)は、第2章 水文・水理観測 第1節 総説 で述べたカテゴリ1, 2による観測データ群であり、3)はカテゴリ3. 1の河川の流れの総合的把握のための観測データ群である。

1) 時間的には疎であるが、空間的に密に計測された水位データ

代表的なデータとしては、第2章 水文・水理観測 第3節 水位観測 3.9に示す洪水痕跡水位が挙げられる。

2) 空間的には疎であるが、時間的には密に計測された水位データ

代表的なデータとしては、第2章 水文・水理観測 第3節 水位観測 3.4に示す水位観測所の水位データが挙げられる。

3) 時間的・空間的に密に計測された水位データ

代表的なデータとしては、水位時間変化の縦断方向多点観測結果が挙げられる。

5. 3. 2 データセットに応じた同定

<標準>

1) 共通事項

1 断面内に複数の粗度係数（低水路と高水敷など）を設定する場合には、1 回の逆算で 1 断面内の全ての粗度係数を逆算することはできない。そのような場合には、次のように算定するのを標準とする。

種々の規模の洪水について逆算を行い、実測値に合う粗度係数の組合せを見いだす。たとえば、低水路満杯時の洪水で低水路粗度係数を逆算し、それよりも高い水位の洪水から高水敷上の樹木や草本植物の粗度係数を求める。この場合は、洪水規模による粗度係数の変化、対象とした各洪水発生時の粗度状況の違いを無視できることが適用条件となる。

また、水位に対する影響が支配的でなく、粗度状況からの物理的推定の信頼性が比較的高い粗度係数の値を逆算時に既知として与え、この条件に該当せず逆算する必要性が高い 1 つの粗度係数だけを対象に逆算を行う。たとえば、高水敷の粗度係数値を植生地被からの推定により与え、低水路粗度係数だけを逆算の対象とする場合等がこれに当たる。この場合は、既知として与える粗度係数値の誤差によって、逆算した粗度係数の精度が決まる。

2) データセット 1 を用いた同定法

この同定法では、河道の長い区間の平均的な粗度係数が得られる。「河道の長い区間」の一つの目安としては河道特性が同一と見なせる単位であるセグメント区間が挙げられる。逆算においては、平均的な粗度係数を算定する本同定法が用いられることが多いが、これは対象区間の平均的な粗度係数を設定することにより、河道計画の策定などに使用できる精度で水位計算を行うことができるからである。

長い河道区間の平均的な粗度係数を逆算する場合、河道及び洪水流の特徴に応じて、本章 第 3 節 3.2 に述べたように不定流計算と不等流計算を使い分ける。なお、一次元・準二次元流解析によって逆算する場合には、左右岸の痕跡水位の平均値と水位計算値を比較する。

3) データセット 2 を用いた同定法

この同定法では、水位観測所の水位データを用いるのが一般的であり、その場合、水位観測所地点間の平均的な粗度係数が得られる。

河道の長い区間内に多地点の水位観測所が設置されている場合には、各観測所の最高水位に対して、上記 2) で述べた痕跡水位に対する手法によって粗度係数の逆算を行う。

また、同一のセグメント区間内に近接した 2 地点で水位観測所等により水位データが得られる場合には、等流計算又は不等流計算によって粗度係数を逆算できる。「近接した 2 地点」の一つの目安としては 2 地点間の流量が同一と見なせることが挙げられる。この場合、最高水位のみならず水位の時間変化にも適用できるため、粗度係数の時間変化が把握できる。

この逆算において、大きな誤差をもたらす可能性が高いのは水面勾配である。水位測定精度（又は誤差）に比べて 2 地点間の水位差を十分に大きくとれない場合には、水面勾配の精度を確保することが難しく、逆算粗度係数の誤差が大きくなる。

上記の観点からは、水位差を大きくするためにより離れた水位観測所間で粗度係数の逆算を行うことが望ましい。ただし、2 地点間の距離を増すと粗度状況や河道形状の一様性が保ち難くなり、等流計算では逆算粗度係数の精度が低下する場合がある。その際には、不等流計算を適用することで原理的には精度低下が抑えられるが、距離を増すことで 2 地点間の流量が同一とはみなせなくなった場合には、その限りではない。

一般に上記した要件を全て満たすのは、特に河床勾配の緩い河道区間において困難であり、そのため一定の誤差が含まれ得る。

なお、本手法で同定した粗度係数をより長い区間の平均的な粗度係数として用いる場合、上下流の長い区間をも代表し得るか十分に吟味し、その適用を慎重に行う必要がある。

＜例 示＞

4) データセット3を用いた同定法

この同定法では、解析の対象とする洪水時の水面形を不定流計算によって再現計算し、水面形の時空間的な変化を多地点かつ高頻度の水位観測結果とできるだけ一致するように粗度係数を逆算することで、粗度状況別に粗度係数の同定を行うことができる。

5. 4 粗度状況による推定の方法

5. 4. 1 推定の基本的な考え方

＜考え方＞

移動床に洪水が作用すると、小規模河床波の消長により粗度係数が大きく変化することがある。この傾向は砂床河川で顕著であるが、礫床河川でも無視できない場合がある。以下では、出水中の河床変化が顕著でない場合の粗度係数の推定法と小規模河床波の発生を伴う場合の粗度係数の推定法に分けて記述する。また、河川構造物の抵抗の推定法についても併せて記載する。

5. 4. 2 出水中の河床変化が顕著でない場合の粗度係数の推定法

＜標準＞

1) 河床等の裸地面における粗度係数

河床材料の移動が生じず平坦な固定床として取り扱える場合には、河床材料の粒径、水深等に基づいて粗度係数を推定するのを標準とする。固定床として扱える場合の粗度係数の推定は「水理公式集[平成11年版]」による。

2) 人工水路等の粗度係数

人工水路においては、固定床面の凹凸等の粗度状況に応じて粗度係数を推定するのを標準とする。推定に当たっては、「水理公式集[平成11年版]」による。

3) 草本植物・樹木の粗度係数

河床や高水敷が草本植物・樹木により覆われている場合、草丈等の繁茂状況と水深等の水理量に基づいて粗度係数を推定するのを標準とする。推定に当たっては、「河道計画の検討の手引き」及び「河川における樹木管理の手引き」による。

4) 護岸等の粗度係数

のり覆工、根固工の主構成材料（ブロック、礫等）の相当粗度等の粗度状況に基づいて、粗度係数を推定するのを標準とする。推定に当たっては、「護岸の力学設計法」による。

5. 4. 3 小規模河床波の発生を伴う場合の粗度係数の推定法

＜標準＞

小規模河床波（平坦河床を含む）を伴う河床の粗度係数の推定には、実用的な観点からは、次元解析や土砂水理学の知見を用いつつ、実験や観測結果から何らかの法則性を導き出すというアプローチが主流である。これには主として実験結果に基づき小規模河床形態の領域区分ごとに抵抗則を示した方法、実験結果に河川の観測データを加え、河川に生じ得る幅広い水理条

件、河床材料の粒径範囲について流速係数、無次元掃流力、水深粒径比の関係を示した方法がある。小規模河床波を伴う河床の粗度係数の推定は、これら方法を用いるのを標準とする。

5. 4. 4 河川構造物の流体力の推定法

<標準>

水制や橋脚等の河川構造物が河道縦横断方向の水位・流速分布に与える影響を評価する場合、洪水流の解析においては河川構造物の具体の形状は与えずに流体力としてのみ反映する手法を用いる（たとえば、式(5-4-15)、(5-4-16)、(5-4-21)、(5-4-22)の F_x 、 F_y がこれに該当）。その際、各種構造物の諸元に応じた適切な抗力係数、揚力係数を用いた経験則に基づいて推定するのを標準とする。推定に当たっては、水理公式集[平成 11 年版]による。

第6章 氾濫解析

第1節 総説

<考え方>

本章では、氾濫解析に必要な技術的事項を定める。

氾濫解析は、河川からの氾濫水や降雨・流出水等により生じる氾濫現象（氾濫範囲や浸水深・氾濫流速等）を再現・予測することにより、被害の想定や水害対策、避難方法、盛土構造等流域内地形の氾濫流制御効果等の検討に資することを目的とするものである。

従来より、氾濫現象は、堤防の決壊や越流により生じた河川氾濫水が地形等の影響を受けながら流下・拡散する現象と、堤内地に集まった雨水や下水等が排水機能を上回り湛水する現象に分類され、前者を「外水氾濫」、後者を「内水氾濫」とする。

氾濫解析は、河川からの氾濫水（外水）や降雨・流出水等（内水）により生じる氾濫範囲や浸水深・氾濫流速等を再現・予測するものであり、以下の項目より構成される。

- 1) 氾濫域調査
- 2) 外水氾濫解析
- 3) 内水氾濫解析

<標準>

氾濫解析に当たっては、氾濫現象の特徴や検討目的に適した解析モデルの選定及び計算条件の設定を行うとともに、解析モデルの検定や設定した計算条件による再現性に関する検証を行い、精度を確認した上で、解析を実施することを標準とする。

解析モデルの検定としては、理論解との比較や水収支の確認等から、また、再現性に関しては既往の研究や過去の浸水実績との比較から検証する。

<推奨>

実際の浸水現象においては、外水氾濫と内水氾濫、降雨流出、下水道排水等の現象が複合しているのが一般的である。このため、氾濫解析においては、解析対象とする実現象の本質的特徴を捉えるという方向で解析モデル（要素モデル）を組み合わせることにより、実務上可能な限り実現象に忠実な解析を行うことを推奨する。

氾濫を含め降雨流出、河川内洪水流、下水道管路内の水理現象等は、近年要素モデルとして開発が進むとともに、オブジェクト指向のプログラム言語やそれらを利用したプラットフォームの普及により、これら要素モデルを組み合わせた統合化モデルの構築が比較的容易になってきている。

第2節 氾濫域調査

<考え方>

氾濫域調査は、氾濫解析モデルの選定、計算条件の設定、再現性の検証等に必要なデータの収集を目的としたものである。

<標準>

氾濫域調査では、河川における洪水の水理解析に用いる資料（水文資料を含む）のほか、主に地盤高（線的地形、構造物）、土地利用、下水道・排水路、地下空間・流域貯留施設、浸水実績等について、検討目的に応じて調査項目、調査範囲、調査方法を適切に設定するとともに、必要に応じて施設管理者の協力を得ることにより効率的に実施することを標準とする。

なお、河川における洪水の水理解析に用いる資料は、第3章 水理解析 第2節 流出解析 及び第5章 河川における洪水流の水理解析 に従うものとする。

<推 奨>

氾濫解析の精度向上を図るためには、氾濫域や浸水深・流速の時間変化についても再現性を検証できることが望ましい。このため、浸水深計の設置による浸水深の時間変化の計測、画像解析による流速の計測、衛星データ等を利用した氾濫域の時間変化の把握等、検証データの収集についても検討することを推奨する。

<例 示>

主な調査項目について、調査方法を以下に例示する。

1) 地盤高

地盤高データは氾濫水の挙動を的確に予測・再現できるよう、想定される氾濫域全体を包含する範囲においてデータを読み取る。地盤高は、基盤地図情報数値標高モデル（DEM5A 等）、都市計画図、国土基本図や活用できる場合はLP（航空レーザ測量）データを利用して、計算格子点の地盤高として設定する。また、道路や鉄道、二線堤等連続した盛土地形や、これらに設けられたボックスカルバートやアンダーパス等通路も氾濫水の挙動に大きく影響するため、連続盛土地形の線形や地盤高さ、ボックスカルバート等の位置、諸元（幅、高さ）について把握する。

2) 土地利用

土地利用データは、氾濫解析における底面粗度や氾濫水の透過率等を設定する上で必要なデータであり、「数値地図 2500（空間データ基盤）」等信頼性の高い資料を活用する。また、近年の土地利用に関する資料が得られない場合は空中写真や現地調査により把握する。

3) 下水道・排水路

下水道・排水路は、氾濫水や内水を排除するものであり、特に内水氾濫においては、これらが氾濫現象に大きく影響する。下水道・排水路の施設特性や排水能力を把握するためには、マンホールの位置・諸元、管路や側溝等の諸元・敷設位置、排水ポンプの諸元・操作規則・排水先河川等の諸元等について調査し、排水系統として総合的に把握する。

4) 地下空間・流域貯留施設

氾濫区域内に地下空間や流域貯留施設等があり、これら施設への流出入を考慮する場合は、氾濫区域内に存在する地下空間等の規模、出入口等氾濫水の流出入位置や流出入口の諸元を把握する。

5) 浸水実績

浸水実績の調査では、痕跡調査や聞き取り調査から過去に生じた氾濫の範囲や浸水深等の把握を行う。なお、調査結果は、当該浸水を再現するための発生時の地形、降雨、河川水位等のデータを併せて整理しておく。

6) 河川における洪水の水理解析に用いる資料

河川における洪水の水理解析に用いる資料は、「第5章 河川における洪水流の水理解析」に従うものとするが、中小河川については、河道縦横断測量データを取得していない場合が

あることから、その場合には、航空レーザ測量データを収集して河道断面データを作成する。なお、通常時の水深が比較的大きい河川において、水面下の計測データが無いものを使用すると、河道断面積が著しく過小評価になるおそれがあることから、その場合には、グリーン・レーザ測量等により補正する。

第3節 外水氾濫解析

3. 1 総説

<考え方>

外水氾濫は、堤防の決壊や越流等により生じた氾濫水が地形等の影響を受けながら流下する現象であり、氾濫水の運動方程式を解くことが氾濫解析の主要な課題となる。このため、解析に当たっては、解析目的や対象とする氾濫現象の特徴を踏まえて基礎方程式、離散化手法を選定するとともに、氾濫域特性に応じた計算条件を設定することが重要である。また、氾濫解析においては、河道内の流況計算と氾濫解析を並行して行うことにより、河道と堤内地において氾濫流量をやり取りし、互いに整合性を確保する。

計算の精度は空間メッシュのサイズの細かさや計算時間間隔に依存するが、これらは計算時間とトレードオフの関係になるため、解析目的に必要な精度や利用できる計算機の能力等を踏まえた上で適切な組合せを設定することが重要である。

3. 2 外水氾濫解析モデルの選定

<標準>

外水氾濫解析モデルの選定においては、以下を標準とする。

1) 基礎方程式

外水氾濫は基本的に運動量を有する氾濫水が二次元的に流下・拡散していく現象であり、また浸水深とともに流速ベクトルも重要な情報となるため、基礎方程式には移流項を含む2次元不定流方程式(7-3-1)を用いることを標準とする。この方程式は、浅海域における高潮や津波の解析と同じ基礎方程式であり、海面のせん断力や海底地形変化を設定することにより、高潮や津波の解析に使用することができる。

ただし、谷底平野における河川氾濫による一次元性の強い氾濫の場合に一次元方程式を用いること、氾濫形態が窪地への貯留等で流速が問題にならない場合に移流項を含まない線形方程式を用いること、河川水位が堤防天端を越え河川水位と堤内地の水位が同程度となって相互に干渉しながら流下する氾濫形態の場合には、河道と堤内地を一体で解析する手法を採用すること等、氾濫の形態に応じて他の基礎方程式を用いることを妨げない。

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{h} \right) + gh \frac{\partial(h+z)}{\partial x} + gn_x^2 \frac{\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h^{7/3}} Q_x &= 0 \\ \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{h} \right) + gh \frac{\partial(h+z)}{\partial y} + gn_y^2 \frac{\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h^{7/3}} Q_y &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} &= q_{in} - q_{out} \end{aligned} \quad (7-3-1)$$

Q_x, Q_y : x 方向及び y 方向の単位幅流量、 h : 浸水深、 z : 地盤高、 n_x, n_y : x 方向及び y 方向の底面粗度、 q_{in} : 降雨、マンホールからの逆流等、 q_{out} : 下水道・排水路への排水等、 g : 重力加速度

2) 離散化手法

差分法、有限体積法、有限要素法等を使用することを標準とする。特に複雑な地形や家屋・構造物の配置等を反映する必要がある場合には、非構造格子による離散化手法（有限体積法、有限要素法等）を使用するか、地形等に応じて十分小さく設定した空間メッシュにより差分法を使用することとする。

<推 奨>

- I. 河川水位が堤防天端を越え河川水位と堤内地の水位が同程度となって相互に干渉しながら流下する氾濫形態の場合には、河道と堤内地を一体で解析する手法を採用することが望ましい。
- II. 谷底平野における一次元性の強い流下型氾濫の形態を呈する中小河川については、一次元不等流計算による手法を採用することができる。

3. 3 外水氾濫の計算条件の設定

<標 準>

計算条件の設定においては、検討目的や対象とする氾濫現象の特徴に応じてモデル定数や流入条件等を設定することを標準とする。

<例 示>

計算条件の設定方法を以下に例示する。

I. 堤防の決壊や越流等により生じた氾濫水が水位差をもって拡散氾濫する場合の氾濫解析の計算条件

1) 流入条件

流入条件は、越流・堤防決壊による流入地点、流入幅を設定するとともに、河川流況条件から流入流量や流向を設定する。河川流況は、河道と氾濫域との流量のやり取りを考慮した一次元不定流解析もしくは準二次元不定流解析により行う方法や、二次元不定流解析等による氾濫域との一体的解析による手法がある。前者の場合は下記等により a)～d)を設定し、後者の場合は、d)流量ベクトルは一連の解析の過程で求められるが、それ以外の条件は下記等に従い、適切に設定することができる。河川流況の具体的計算方法は第5章 河川における洪水流の水理解析 を参照されたい。

a) 越流・決壊地点

決壊箇所は、発生可能性が高い箇所、危機管理上重要な箇所等検討目的に応じて設定する。なお、発生可能性の高い地点の設定においては、決壊実績から設定するほか、重要水防箇所のうち危険性が高い箇所、地形特性等から見て越流・決壊の危険性が高い箇所（流下能力が低い、旧川締切り箇所、落堀、旧扇状地面と現扇状地面が交差する箇所など）を設定する。また、越流地点は検討対象の洪水水位と堤防高を比較し、水位が堤防高を越える箇所及び越流範囲を特定する。

b) 決壊幅・越流幅

決壊幅は過去の実績等から設定するが、実績等がない場合は式(7-3-2)の方法で設定することができる。また、越流幅は、河川水位と堤防天端高の関係から設定する。

<合流点の場合> $B_b = 2.0 (\log_{10} B)^{3.8} + 77$
 <合流点以外の場合> $B_b = 1.6 (\log_{10} B)^{3.8} + 62$ (7-3-2)
 ここで、 B_b ：最終決壊幅(m)、 B ：川幅(m)である。

決壊幅の時間的变化についても実績等を参考として設定することを基本とするが、データがない場合は、以下の式(7-3-3)を使用することができる。

$$\begin{aligned}
 t=0 & \quad B_b' = 0.5B_b \\
 0 < t \leq 60 \text{ 分} & \quad B_b' = 0.5 (1 + t/60) B_b \\
 t > 60 \text{ 分} & \quad B_b' = B_b
 \end{aligned}
 \quad (7-3-3)$$

ここで、 t ：決壊後の経過時間(分)、 B_b' ：ある時刻 t における決壊幅(m)、 B_b ：最終決壊幅(m)である。

c) 決壊部の敷高

堤防決壊部の敷高は実績に従うことを基本とするが、実績値がない場合はその地点の高水敷高若しくは背後地盤高の高い方の値とすることができる。また、決壊後瞬時にその敷高まで決壊するものとして設定できる。

d) 流入地点の流量ベクトル

流入地点の流量ベクトルは、河道内洪水モデルと氾濫解析モデルを二次元不定流による一体的な解析の過程の中で求める方法のほか、河道内水位と堤内地の浸水位との関係から、本間公式(7-3-4)や河道の平均河床勾配(I)を考慮した式(7-3-5)を用いて流入量(Q)及び流向(θ)を設定することができる。

流入量(Q)：越流堰における越流量 Q_0 は本間公式(7-3-4)により与えられるが、栗城等はさらに河床勾配がある場合の横越流量を本間公式を補正する形で与えている。この場合、式(7-3-4)の h_1 、 h_2 は盛土地盤高からの水位とし、 h_1 の方が高いものとする。

$$\begin{aligned}
 h_2 / h_1 < 2/3 \text{ のとき} & \quad Q_0 = 0.35 h_1 B_b \sqrt{2gh_1} & : & \text{完全越流} \\
 h_2 / h_1 \geq 2/3 \text{ のとき} & \quad Q_0 = 0.91 h_2 B_b \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & : & \text{潜り越流}
 \end{aligned}
 \quad (7-3-4)$$

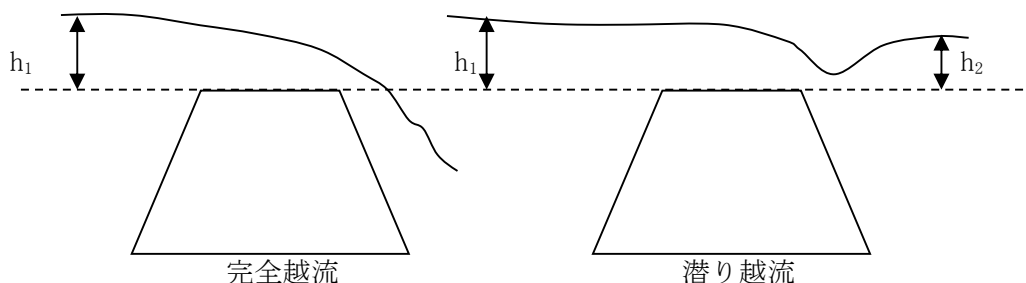


図 7-3-1 越流と本間公式の諸元の関係

堤防決壊に伴う氾濫流量

$$\begin{aligned} I > 1/33600 \quad \text{の場合} \quad Q &= \{0.14 + 0.19 \log_{10}(1/I)\} Q_0 \\ 1/33600 \geq I \quad \text{の場合} \quad Q &= Q_0 \end{aligned} \quad (7-3-5)$$

$$\text{越流に伴う越流量} \quad Q = Q_0 \quad (7-3-6)$$

また、横越流堰の越流量は、多くの研究者が実験と理論から越流量式を提案しており、たとえば、鬼束等(2007)は、堤防を考慮した台形断面水路での実験結果から以下の式を提案している。ここで、 q ：単位幅越流量、 C_M ：流量係数、 h ：堰上流河川水位、 S ：堰高、 T ：水面幅、 L ：堰長、 m ：側壁勾配、 Fr_1 ：上流側フルード数、 g ：重力加速度である。

$$q = \frac{2}{3} C_M \sqrt{2g(h-S)^3}, \quad C_M = 0.479 - 0.351m - 0.36Fr_1 + 0.089 \frac{L}{T} + 0.12 \frac{h}{L}$$

$$0.2 \leq Fr_1 \leq 0.8, \quad 0.45 \leq \frac{L}{T} \leq 1.74, \quad 0.125 \leq \frac{h}{L} \leq 0.905, \quad 0 \leq m \leq 0.7$$

流向(θ)：流向は、栗城等(1996)、末次(1998)が式(7-3-7)、(7-3-8)のとおり河床勾配から設定する方法を提案している。

$$\begin{aligned} I > 1/1580 \quad \text{の場合} \quad \theta &= 48^\circ - 15 \log_{10}(1/I) \\ 1/1580 \geq I \quad \text{の場合} \quad \theta &= 0^\circ \end{aligned} \quad (7-3-7)$$

越流に伴う越流量と流向

$$\begin{aligned} I > 1/12000 \quad \text{の場合} \quad \theta &= 155^\circ - 38 \log_{10}(1/I) \\ 12000 \geq I \quad \text{の場合} \quad \theta &= 0^\circ \end{aligned} \quad (7-3-8)$$

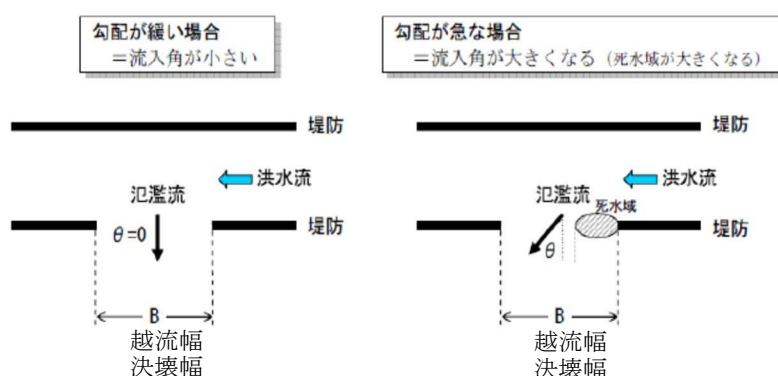


図 7-3-2 河床勾配と越流量、流向の関係

2) 粗度係数・透過係数

避難経路の氾濫状況のように、比較的狭い範囲の氾濫現象を詳細に解析する場合は、地表の性状に応じて粗度係数を設定するとともに、家屋や構造物等については領域内の境界条件として扱う。一方、広域的な氾濫現象の把握においては、家屋占有率を粗度に換算する、若

しくは透過率で表現するなどのほか、計算格子内の異なる土地利用を合成粗度で代表させるなどの簡略化を行うことができる。家屋占有率の粗度換算及び合成粗度の考え方としては式(7-3-9)がある。

なお、土地利用に応じた粗度係数は、モデルの特性を踏まえた上で設定する。

$$n_o^2 = \frac{n_1^2 A_1 + n_2^2 A_2 + n_3^2 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad , \quad n^2 = n_o^2 + 0.02 \left(\frac{\theta}{100 - \theta} \right) h^{4/3} \quad (7-3-9)$$

n_o ：合成粗度、 $A_1, A_2, A_3, n_1, n_2, n_3$ ：メッシュ内の占有面積率とそのエリアの粗度

n ：建物占有率を考慮した合成粗度、 θ ：建物占有率（％）

3) 連続盛土地形条件

道路や鉄道、二線堤等の連続的な盛土地形も氾濫水の挙動に大きく影響するため、このような地形は境界条件として計算に反映する。当該地点の水深が盛土地盤高を超えない範囲では不透過境界とし、超えた場合は式(7-3-4)に従い越流が生じるものとする。また、道路盛土等にボックスカルバート等通路が設けられている場合は、そこから氾濫水の流出が可能となるため、境界条件に反映する。ボックスカルバート等からの流出量の算定方法は、式(7-3-10)を用いることができる。ここで、 Q ：流出量(m^3/s)、 B ：樋門・カルバートの幅(m)、 H ：樋門・カルバートの高さ(m)、 h_1 ：高いほうの水位(m)、 h_2 ：低い方の水位(m)、 g ：重力加速度である。

$$\begin{aligned} h_2 \geq H & \quad Q = 0.75BH\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad : \text{潜り流出} \\ h_2 < H \quad h_1/H \geq 3/2 & \quad Q = 0.51BH\sqrt{2gh_1} \quad : \text{中間流出} \\ h_1/H < 3/2 & \quad Q = 0.79Bh_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad : \text{自由流出} \end{aligned} \quad (7-3-10)$$

ただし、 $h_1/h_2 \geq 3/2$ の場合は、 $h_2 = 2/3h_1$ と置き換える。

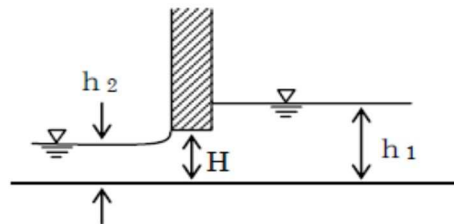


図 7-3-3 樋門等における流出形態と諸元

4) 下水道・ポンプ

比較的小規模な氾濫の場合や、ピーク流量後の氾濫域の縮小に関しては、下水道やそれに接続するポンプ施設が大きく影響する場合がある。

下水道管路のモデルは、汎用的なモデルも普及し、管路の大きさやネットワーク等の現地の条件を取り込み、氾濫計算と接続することも可能であるが、下水道データの収集、モデルへの反映、計算時間等に係るコストに対して、計算結果の精度が有意に向上するとは必ずしも言えないため、検討目的に応じて適宜簡略化（ランピング）する。

また、排水ポンプは、排水先の河川水位等による排水能力の変化、操作ルールにより排水規制を受ける場合があるほか、電気系統や操作室の浸水、燃料切れ等による運転停止等も考えられるため、施設特性や操作規則を把握した上で適宜現実的なシナリオを設定し、計算条

件に反映する。

5) 河川・排水路等

計算対象領域内の主要な河川は、不定流計算モデル等により排水機能を明示的にモデル化する一方、明示的なモデル化が困難な多数の小河川・排水路等の集水域について、堤内排水が正しく表現されないことにより、計算結果において、実現象としてあり得ないような長期間の浸水が続く場合は、氾濫水が適宜主要河川を通じて又は直接に海に排水されるよう仮想的な排水路を設定する。

6) 地下空間・貯留施設

氾濫区域内に貯留施設等が存在する場合は、流入敷高や貯留量等施設特性を把握した上で、貯留効果を氾濫解析に反映する。同様に、地下空間への流入が生じる場合も、その流入規模によっては地表面の氾濫状況に大きく影響する可能性があるため、必要に応じて地下空間への流入等を計算に反映させる。

7) 降雨分布

外水氾濫解析においては、計算対象エリアの降雨量に比べて氾濫流の規模が大きいため、計算対象エリアの降雨を無視する場合が多い。

しかし、避難方法の検討等においては、氾濫流が到達する以前の内水氾濫の状況や避難途中の降雨状況を把握し、避難経路の安全性等を評価することも重要であるため、解析の目的に応じて計算対象エリアの降雨分布を考慮する必要がある。この場合、レーダ雨量計のデータを、精度の確認や補正をした上で適宜活用する。

8) その他

I. 氾濫現象においては、上記以外にも水防活動やポンプ車の稼働等様々な要因が影響するため、検討目的に応じて考慮すべき要因を抽出し、それらに係るシナリオを作成した上で計算に反映する。

II. 河川水位が堤防天端を越え河川水位と堤内地の水位が同程度となって相互に干渉しながら流下する氾濫形態の場合の氾濫解析の計算条件については、例えば、田端ら（2021）を参考とすることが考えられる。

III. 谷底平野における一次元性の強い流下型氾濫の形態を呈する中小河川の氾濫解析の計算条件については、既存の取得データ等に基づき設定する。なお、河道の粗度係数に関するデータが存在しない場合には、一律 0.033 を採用することが考えられる。また、連続盛土については、数値標高モデル（国土地理院の DEM5A 等）に基づき横断測線上の地表面の凹凸として考慮する。

第4節 内水氾濫解析

4. 1 総説

<考え方>

内水氾濫は、降雨や降雨流出による流入量が排水量を上回るために生じる比較的静的な氾濫現象であり、流入量、排水量の設定が主要な課題となる。このため、流出解析モデル、下水道モデル、河川内洪水モデル等を組み合わせることにより、氾濫と併せて一連の現象を解析の対象とするのが一般的である。

なお、内水氾濫は、①内水の排水元河川（以下、「内水河川」という。）と比べて排水先河川（以下、「外水河川」という。）の水位が高いために生じる排水不良が原因となる場合と、②豪雨によりもたらされた降雨や流出量が下水道施設等による排水機能等を大きく上回ることが原因となる場合とがあり、主に前者①が河川事業の対象とされてきた。しかし、これらは流入量、流出量の設定方法が異なるものの、現象のメカニズムとしては同様であるため、以下では一体的に記述する。

4. 2 内水氾濫解析モデルの選定

<標準>

内水氾濫解析における解析モデルの選定は以下を標準とする。

1) 基礎方程式

内水氾濫解析は、氾濫区域内の流速や水面勾配等が問題とならない場合の解析については、運動方程式を考慮せず池モデルで解析することを標準とする。

式(7-4-1)で示すとおり氾濫現象を一つの氾濫域で表現する場合は1池モデル、また、氾濫域を多数の池で代表させ、湛水状況のある程度細かく表現しようとする場合は多池モデルと呼ばれる。

$$\frac{\partial V(h)}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (7-4-1)$$

V : 浸水ボリューム（浸水深の関数として表される）、 Q_{in} : 流域流出水、降雨、水路氾濫水等、 Q_{out} : 下水道・排水路への流出量

なお、氾濫区域内の流速や流速ベクトルの算定が必要な場合は、運動方程式を導入する必要があり、この場合は、本章 第3節 外水氾濫解析の方法を標準とする。

2) 離散化手法

池モデルを使用する場合は、離散化手法は特に問題とならない。運動方程式を導入する場合は、本章 第3節 外水氾濫解析を標準とする。

4. 3 内水氾濫の計算条件の設定

<標準>

内水氾濫の計算条件の設定においては、検討目的や解析モデルに応じて適切なモデル定数や流入条件を設定することを標準とする。

<例示>

計算条件の設定方法を以下に例示する。

1) 池モデルにおける氾濫域諸元（H-V-A 曲線）

池モデルにおける氾濫域諸元としては、浸水位と湛水量と湛水面積の関係式を適切に与える必要がある。H-V-A 曲線の作成方法については、地形図、測量成果等より等高線を描き、H（浸水位）とV（湛水量）、A（湛水面積）の関係を整理する。

なお、池モデルでなく運動方程式を導入する場合は、外水氾濫の計算条件の設定(3.3)を参照する。

2) 流入条件・流出条件

内水氾濫の計算においては、式(7-4-1)右辺の流入量、流出量を与える必要があるが、氾濫解析モデルと流出モデル、河道モデル、下水道モデル等を組み合わせて、流入条件や流出条件の設定と氾濫解析を一体的に行うことが一般的である。流出モデル、河道モデルの計算条件の設定については、第3章 水文解析 第2節 流出解析、第5章 河川における洪水流の水理解析を参照する。

特に都市域での氾濫解析において重要となる下水道モデルについては、雨水等の流入（又は流出）地点であるマンホールと流下現象の生じる管路、排水ポンプとの組合せとしてモデル化されるが、複雑な管路網にも対応できるモデルが開発されており、これらを利用することができる。

第5節 氾濫解析結果の活用

5.1 総説

＜考え方＞

氾濫解析結果の活用においては、例えば、住民等の円滑な避難や防災・減災のための土地利用促進、企業の事業継続計画に活用できるよう、水害リスク情報として目的に応じて表現方法を工夫するなど、活用がより効果的になるよう適宜加工することが重要である。

5.2 洪水浸水想定区域図

＜例 示＞

洪水浸水想定区域とは、水防法第14条及び同法施行規則第1条から第3条に基づき、洪水時の円滑かつ迅速な避難を確保し、又は浸水を防止することにより、水災による被害の軽減を図るため、当該河川が氾濫した場合に浸水が想定される区域を指すものであり、想定される氾濫区域や浸水深等を着色で示したものを洪水浸水想定区域図と呼ぶ。

洪水浸水想定区域図は、様々な危険性を考慮して複数の堤防決壊地点や越流地点を設定して氾濫解析を行い、算定された氾濫域や浸水深の最大値を包含する区域や浸水深、想定される浸水の継続時間を表す。

市町村長は、洪水浸水想定区域図等をもとに河川堤防の決壊、越流等による浸水情報及び避難に関する情報を住民に分かりやすく提供することにより人的被害を防ぐことを主な目的とした「洪水ハザードマップ」を作成し、住民へ公表・周知を行うこととなっている。

洪水ハザードマップは、住民にとって、平常時には、自分の住んでいる地域の浸水履歴、浸水の可能性について認識を深める、水害に備えて非常持ち出し品の準備等被害軽減の工夫をする、土地の水害危険度に見合った土地利用や建築様式をとる等のほか、災害時には、洪水ハザードマップに盛り込まれた情報と気象情報、市町村からの避難情報を基に的確な避難行動をとるといった活用を期待されるものである。

また、想定最大規模の降雨に対する洪水浸水想定区域図等に加えて、より頻度の高い降雨も含めた多段階の洪水浸水想定を作成し、浸水の発生しやすさを評価することで、場所ごとの水害リスクが評価できるようになり、土地利用や住まい方の工夫、企業の事業継続計画などへの水害リスク情報の活用が考えられる。

5.3 リアルタイム氾濫シミュレーション

＜例 示＞

堤防の決壊等に伴う浸水発生時において、その後の氾濫域の拡大状況等を予測し、避難誘導や危機管理対策に資するものをリアルタイム氾濫シミュレーションと呼ぶ。

氾濫域が広大若しくは地形勾配が緩やか等により、人口や資産の密集地域への浸水到達時間に一定程度以上の時間を要する場合は、浸水の到達域、到達時刻等に関する予測を行うこ

とにより、浸水到達時間を避難等のためのリードタイムとして有効に活用することが可能となる。

5. 4 内水処理計画の策定

＜例 示＞

内水氾濫解析の活用事例としては、治水事業における内水処理計画の策定が挙げられる。内水河川の水位上昇は、内水河川と外水河川のハイドロの規模・波形及びこれらの相対関係によるものであり、内水処理計画とは、内水河川の水位上昇が内水氾濫の直接の原因となる場合の対策を図るものである。対策としては、合流点に水門等を設置し外水位と内水位のピーク時間差を考慮した水門操作を行うことにより外水位の上昇が内水位に及ばないようにするか、若しくは上記による内水位上昇の回避が困難な場合は、ポンプ施設を設置し内水を排水することにより、内水位の低下を図ることが一般的である。

このため、内水処理計画の策定に当たっては外水河川及び内水河川の水利条件と堤内地の氾濫解析モデルを適切に接続することにより、当該内水現象及び対策を講じた場合の効果を、所要の精度で再現できる解析モデルを構築する必要がある。

