

2024年度（第59回）  
水工学に関する夏期研修会講義集

A コース

Lecture Notes of the  
59<sup>th</sup> Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2024  
Course A

土木学会  
水工学委員会・海岸工学委員会  
Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering,  
Coastal Engineering Committee,  
JSCE

2024年8月  
August 2024

## 2024年度（第59回）

### 水工学に関する夏期研修会講義集

#### Aコース（河川・水文コース）

##### 総合テーマ

##### 水工学に関するモニタリング技術と活用

A-1	環境物理量の計量，計測から学へ至る道～大気中の水の観測を通じて～	神戸大学 教授	大石 哲 Satoru OISHI
A-2	山地河川の土砂流出観測の現状と新しい計測手法	京都大学 准教授	宮田 秀介 Shusuke MIYATA
A-3	氾濫災害調査に関する現状やデータ活用法，将来の方向性	東京理科大学 教授	二瓶 泰雄 Yasuo NIHEI
A-4	環境DNA技術の活用と展開	山口大学 教授	赤松 良久 Yoshihisa AKAMATSU
A-5	洪水時河道のデジタルツイン構築に向けた観測技術と今後の課題	土木研究所 主任研究員	萬矢 敦啓 Atsuhiko YOROZUYA
A-6	ボート型ロボットによる自動水理観測の試み	京都大学 教授	山上 路生 Michio SANJOU
A-7	波崎海洋研究施設における長期地形モニタリングとその活用	港湾空港技術研究所 グループ長	伴野 雅之 Masayuki BANNO
A-8	地下水のモニタリング—地下水の水質と水位	長崎大学 教授	中川 啓 Kei NAKAGAWA

# 環境物理量の計量，計測から科学へ至る道

## ～大気中の水の観測を通じて～

### From Measurement of Environmental Quantities to Science -Through the Observation of Water in the Atmosphere-

大石 哲

Satoru OISHI

#### 1. はじめに

インターネットで検索すれば出てくる情報は，公知の知識であって新規性はない．その逆で，観測研究は「そこに行って測らなければ分からないもの」を計測することで，誰も知らなかった「なにか」を知ることができ，そこには新規性があり，真理に近づくものにたどり着けば科学の発展につながる．

学生や子供達に対して必ず成功する実験を企画して，手順通りにある物理量を計測して「なるほど」と思ってもらうことで，知的好奇心を向上させる効果は否定しないものの，科学がもつ「初めて成し遂げたこと」に対する敬意を考えれば，特殊なところに赴き，これまでの計測精度を格段に向上させた特殊な計測方法で計測したものの価値が大きくなる．

あまりよい例ではないかもしれないが，学生と共に，河原に行って石を拾って「これは赤石岳の赤色チャート」などの分類をすることで「なるほど」と思ってもらうことは，一定程度の効果があるだろうが，それをやりたい人の行列はできないだろうし，科学雑誌に掲載されることもない．しかし，月の石を見るためには行列ができるし，それを分析すれば科学雑誌に掲載されるであろう．それが天文学的な予算を使って行ったプロジェクトの成果ではなくて，ごく簡単に月面アクセスを行うことができるようになったとしても，簡単月面アクセスシリーズの第1号の論文は，月の石の統計的な性質を探り当てたという側面でアポロ計画の時の評価と同程度であろう．

本稿では，観測研究がもつ「そこに行って測らなければ分からないもの」を計測する際の心構え，筆者の体験による困難さ，困難さを克服するための方法をお伝えする．

#### 2. 観測計画について

##### 2.1 自然を拷問にかける

古川(2000)によれば，イギリスの思想家フランシス・ベーコン(1561-1626)はノヴム・オルガヌム(1620)の中で「人間の知識と力とは合一する．原因が知られなければ，結果は生ぜられないからである．というのは，自然は服従することによってでなければ，征服されないのであって，自然の考察において原因と認められるものが，作業において規則の役目をするからである．」と述べている

古川(2000)によれば，この思想は次のように解釈される．

=====

科学は，それまでのスコラ学のように学問に終始する学問ではなく、自然を支配し変革して人間生活の

# 山地河川の土砂流出観測の現状と新しい計測手法

## Current and State of the Art Measurement Techniques of Sediment Transport in Mountainous Rivers

宮田 秀介

Shusuke MIYATA

### 1. はじめに

山地河川では河床形状が複雑で細かい砂から礫や岩まで幅広い粒径の河床材料が存在するという特徴がある。また流量変化が急激に生じること、出水時に幅広い粒径の土砂が輸送され、河床変動が激しいなどの下流の沖積河川と異なる特徴がある。さらに、流砂量は上流域もしくは斜面から河川に供給される土砂の量および質（粒径）の影響を強く受ける。山地での土砂生産は、斜面崩壊や地すべりのように突発的に発生するものだけでなく、裸地斜面での侵食のように恒常的に発生するものもあり、その量と質の時空間的なばらつきが非常に大きい。このため、水理量（水深や流量）のみから山地河川の流砂量を予測することは現時点では困難である。

山地流域は流砂系の出発点であり、その土砂流出現象を把握することは、流域の理解に基づいた総合的な土砂管理を行う上で重要である。粒径の大きな掃流砂はその多くが上流域で堆積し、下流域への直接的な影響は少ない。粒径の小さい浮遊砂は上流域では浮遊砂として輸送されるが、勾配が小さい下流では掃流砂として輸送され河川地形の形成に寄与するようになる。河道の形成に関係する侵食・堆積現象は局所的な問題でなく、流砂系全体で考えるべき現象である（仲野・笹原，2001）。そのため、流砂の量と粒径の時空間的な情報を観測に基づいて把握する必要がある。

### 2. 山地河川での土砂輸送形態

山地河川において流水で輸送される土砂（流砂）は輸送形態によりウォッシュロード、浮遊砂、掃流砂と分類することができる（図-1）。ウォッシュロードは、河床材料との交換がなく発生源から海域や止水域まで輸送される流砂をさす。一方、浮遊砂および掃流砂は、河床と流水間で交換されながら輸送される。浮遊砂は、流れの乱れにより輸送される形態であり、河床近傍から水面付近まで分布する。掃流砂の移動がみら

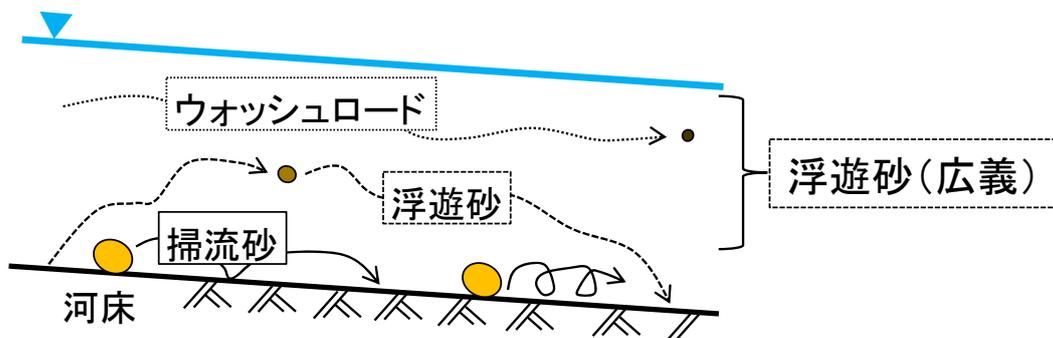


図-1 山地河川における土砂輸送形態

# 水害調査に関する現状やデータ活用法，将来の方向性

## Current status, data utilization and future work for field survey on flood disaster

二 瓶 泰 雄

Yasuo NIHEI

### 1. はじめに

「現地観測（現地調査）」は、「室内・屋外実験」や「数値シミュレーション」と共に、水工学研究の三大ツールとして重要な役割を果たしている。実験は、決められた条件下で繰り返し実施し、詳細に計測することが可能である（大型模型の場合は実施回数に制約があるが）という長所を有する。その一方、実験では、スケールが実物と完全に同等であることはまれであり、相似則の問題が必ず発生するという短所があり、「流れ」以上に「土砂輸送・河床変動」に関しては相似則の問題はより顕在化する。それに対して、数値シミュレーションは、計算機能力の大幅な向上と共に、様々な汎用性の高いオープンコードや商用ソフトウェアの登場により、3つのツールの中で最も有力なものになりつつある。特に、従来の1D、2D解析だけでなく、近年では様々な高精度解析モデルの開発（例、Q3D-FEBS等）<sup>1)</sup>により準3D、3D解析の事例が増えており<sup>2)</sup>、今後は、数値シミュレーションは研究手法の主流を占めると目されている。このように数値シミュレーションも適用範囲は大きく広がっているものの、全ての流況・河床変動解析に適用できるわけではなく、ある程度の限界を有すると共に、今後の発展の余地も大きい。また、解析モデルの性能評価は、各研究者に委ねられており、共通のベンチマークテストの必要性が論じられている。

以上のような長所・短所を有する室内実験や数値シミュレーションでは得られない“fact”を現地観測では取得することが最大の特徴である。特に、発生頻度が少なく、大きな被害をもたらす洪水氾濫災害調査に関しては、実験や数値シミュレーションでは得られない流況や河床変動、各種構造物の被害状況を取得できる貴重な機会となると共に、今後へ備える教訓や防災・減災対策の一助となる。「室内・屋外実験」や「数値シミュレーション」、「現地観測」は三つとも大事な研究ツールであり、連携して利活用するものであるが、2024年度水工学における夏期研修会のテーマは「水工学に関するモニタリング技術」であるため、本報では「現地観測」に主に着目する。

水害が頻発する我が国では、豪雨災害発生直後から、洪水氾濫状況（浸水位、浸水深）や家屋被害、堤防等の河川構造物被害、避難状況などに関する災害調査が行われており、土木学会などの学協会ではこのような災害に係る調査団を結成して調査に当たることが多い。また、大学や研究所、河川管理者（国交省）、関係行政機関（県や市町村）などもこれらの災害調査を独自に行っている。このように数多くの災害調査が行われているが、必ずしも確立された統一的な調査方法は存在しなかった。津波調査に関しては、調査マニュアルは東日本大震災の前から作成・公開されており（例えば、今村<sup>3)</sup>）、それと比べると河川洪水氾濫の水害調査に関しては大幅に遅れていた。これに加え、洪水氾濫の調査データに関しては、調査者が個別に保存し、論文等で公表する程度であり、調査結果のデータベースは不十分である。このような状況を鑑みて、土木学会水工学委員会・水害対策小委員会では水害調査WGを2014年に立ち上げ、上記の課題解決に当たった。このWGは、水害時における調査方法の共通化・標準化を図ると共に、得られる調査結果のデータベース基盤を作ることを目的として、水害調査ガイドライン（案）<sup>4)</sup>を2016年に作成・公表した。これにより、津波調査よりも大幅に遅れている水害調査方法やそのデータベース化が確立・統一化され、これまで十分なされてこなかった個々の水害の比較・検討を行うことができ、将来的な水害対策へ極めて有用な基礎データ

# 環境DNA技術の活用と展開

## Utilization and Deployment of Environmental DNA Technologies

赤松 良久

Yoshihisa AKAMATSU

### 1. はじめに

環境DNAとは海や川、土壌、大気などの環境中に存在する微量な生物由来のDNAの総称であり、主に生物の体表から剥離した細胞や排泄物が由来であると考えられている。近年、水を汲んでその中のDNAを分析するだけで、水域における生物の生息の有無や密度を明らかにすることが可能な環境DNA分析法が開発された。環境DNA分析は図-1に示すように水域であれば水を採水し、ろ過とDNAの抽出を行った後に、大きく分けて二つの評価方法で分析を実施する。定量評価方法では特定の種を対象として在・不在だけでなく、密度も把握することができる。一方で網羅的評価法では特定の分類群（例えば魚類等）を対象としてその場に存在する種の在/不在を網羅的に評価することができる。これらの手法を用いることで、希少種や外来種の探索、生物多様性のモニタリングなどが可能となりつつあり、特に水域を対象とした生態学や保全生物学において革新的な技術として注目されている。

ここでは、近年の主流となっている環境DNA分析法について説明するとともに、特に水域における環境DNA調査で重要となるDNAを含む水サンプルの採取法について著者が開発した手法を中心に概説する。また、環境DNAを活用した河川・流域環境評価に関する最新の研究成果と今後の環境DNA技術の展開について述べる。

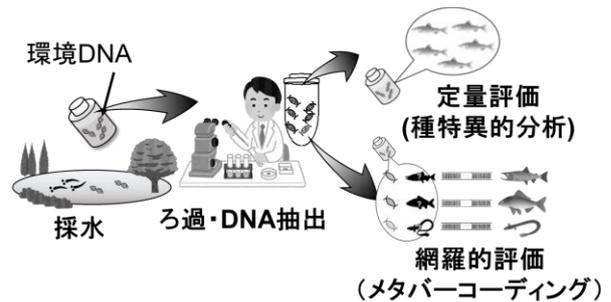


図-1 環境DNA分析の概要

### 2. 環境DNA分析

#### 2. 1. 種特異的検出法

種特異的検出法は、検出対象を特定の種だけに絞って環境試料から検出したい場合に有効な手法である。種特異的検出における分析手法では、主に(1)PCR法、(2)リアルタイムPCR法、(3)デジタルPCR法に分けられる (図2)。以降では、これらの分析手法について簡易的に解説する。PCR法では、サーマルサイクラーを用いて試料中のDNAを増幅し、ゲル電気泳動に供することで、電気泳動図のバンドの有無から対象生物を検出/非検出を判別することができる。また、シーケンス解析による増幅産物の塩基配列の決定によって、対象種に由来するDNAかどうかを判別することもある。古典的な手法であるPCR法は、使用する試薬や消耗品が安価であることから、リアルタイムPCR法やデジタルPCR法に比べて安価に実施できる利点がある。しかし、対象生物の検出を電気泳動で判別するため、量的な評価を正確に行うことは難しく、他の手法に比べて対象生物の在/不在の判別しかできないという難点がある。

次に、リアルタイムPCR法では、種特異的なプライマーによって増幅されたDNA断片との作用によって生じる

# 洪水時河道のデジタルツイン構築に向けた観測技術と今後の課題

## Observation Technique for Construction of Digital Twin of River Channel During Flooding

萬 矢 敦 啓

Atsuhiko YOROZUYA

### 1. はじめに

日本の河川は多くが急流河川であり、近年においても洪水による水害が頻発している。これらの水害の一つは、河床洗堀による橋脚の倒壊や、河岸浸食による堤防の破堤といった、河道の水面下で発生する現象が原因で引き起こされる。これらの現象は、これまで水理実験や数値計算を用いて再現を試みているが、これらには多くの仮定が必要となる。このような仮定を少なくするための観測は精度の高い再現性を担保するために大きく貢献することが期待される。著者はこのような高い再現性を追求した結果の最終形が河道のデジタルツインと呼ぶにふさわしいと考えているが、これを構築することは河川工学的にも、河川行政的にも重要なことである。

我が国における自然河川のモニタリングは、国土交通省によるものが大部分を占める。それらは浮子観測や観測地点における水位計測に代表される。これらは流量観測という観点からすれば、水位-流量関係の構築や、流量年表の作成に貢献してきた<sup>1)</sup>。また大規模出水時には痕跡水位調査等も実施され、ピーク流量を算出することで、河道計画の検証や見直し等が実施されてきた。一方で近年の電波<sup>2),3)</sup>、画像<sup>4)</sup>等の新技術を活用した非接触型流速計が開発され、実証試験を経て、実用に資する技術として認知されてきた。これらは無人・自動計測であることが特徴であり、極近年にはこれらの手法が従来手法の代替手法として移行が進められている。また近年ではUnmanned Aerial Vehicle (UAV)の技術向上により、ペイロードの増加・飛行性能の向上・搭載カメラの高精度化が目覚ましく、公共測量にも採用されている。さらにUAV運用自動化のための周辺機器も開発され、他分野においてはそのような事例が紹介され始めている。河川計測に関してもUAVに搭載したカメラを用いた流速<sup>5)</sup>や水面に関するモニタリング手法も提案されてきている<sup>6)</sup>。これにより計測者の意図に応じて橋梁等の河川構造物によらず任意地点における水位・流速の面的な分布の計測が可能となった<sup>7)</sup>。他方、水面下の現象に対しては、ボートに搭載したAcoustic Doppler Current Profiler (ADCP)を用いた観測を実施することで、河川水流速の鉛直分布や河床高<sup>8)</sup>、さらには流砂の計測手法も提案されてきている<sup>9)</sup>。これらを組み合わせることで河道における土砂水理現象の多くは把握できるようになると著者は考えている。

著者が構想しているデジタルツインは、河川の流速、水位、濁度に代表される表面情報をもとに、数値計算を介して河道内部の物理現象を再現し、ADCPを用いてデジタルツインの検証を実施することである。本テキストにおいては、これらの計測方法と得られた結果の一例を概説する。

# ボート型ロボットによる自動水理観測の試み

## Challenge of Automatic Hydraulic Observation using Boat-type Robot

山 上 路 生

Michio SANJOU

### 1. はじめに

河川流速・流量は川の状態を示す基本的かつ重要な指標で、河川流域の治水環境管理や水工計画において不可欠な情報である。今日最も普及している河川流量の観測法は浮子法である。これは一定時間におけるフロートの流下距離より流速を評価する方法で計測原理がシンプルという長所をもつ。一方でデータの信頼性や計測作業の機動性においては課題があるため、これを解決するため様々な手法が提案されている。

特に水表面の流況を撮影する画像解析法<sup>1,2)</sup>や電波流速計<sup>3)</sup>は、正確な流量算定に必要な水面流速の横断プロファイルを得ることができる。ただし風波が生じたりトレーサーとなる漂流物や特徴的な水面模様が少ないと適用が難しい。超音波を用いるADCP法<sup>4)</sup>は水面下の流速分布を得ることができるメリットがあるが、センサを搭載する浮体を橋脚等に係留したり、水中に設置する必要があるため、計測地点の制約や管理面での問題がある。このようにいずれも課題をもつため、鋭意研究が続けられている。

本稿でとりあげるボート型ロボットは既存の方法とは全く異なる切り口から開発を進められてきた<sup>5)</sup>。大きな特徴は、計測地点で静止するようにメインスクリューを制御し、対向流速によってスクリュー回転数が変化することを利用して流速を評価することである。図-1.1は自位置をカメラ画像から得るタイプのボートロボットを用いた河川流速計測のイメージである。

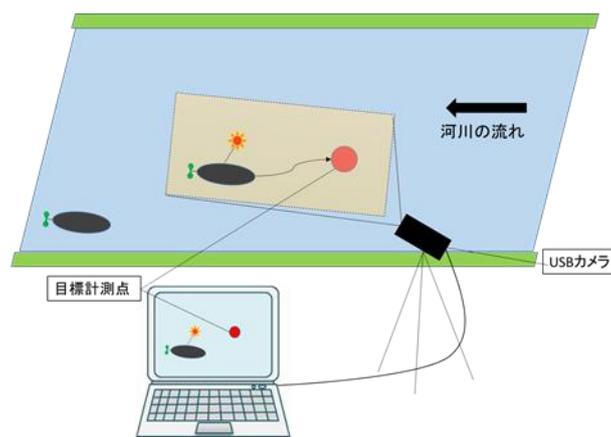


図-1.1 画像追跡によるボートロボットの制御と流速計測

### 2. 試作機の製作

本稿のボートロボットによる計測システムには、位置情報取得及び自律制御のためワンボードマイコンであるArduino及びArduino用統合開発環境とオープンソースソフトのProcessingを用いている。小規模なサイズのものであれば、マイコンとオープンソフトを使って安価に製作が可能である。

# 波崎海洋研究施設における長期地形モニタリングとその活用

## Long-term Beach Monitoring and the Use of Data for Research: A Case of Hasaki Oceanographical Research Station

伴 野 雅 之

Masayuki BANNO

### 1. はじめに

我々は様々な方法によって海底地形を取得する。なぜ我々は海底地形を何年にもわたって何度も繰り返し測り続けるのだろうか。その答えの一つは、海底の地形が変わり続けるからである。沿岸域に作用する波や流れによる土砂移動によって、海底の地盤高は常に変化する。はたまた河口から供給される土砂の堆積、深海域への土砂の流出によっても沿岸域の土砂量が増減し、海底の地形は変化する。海面下の目に見えないところで、常に土砂は移動、堆積を繰り返し、地形が時々刻々と変化している。このような土砂の移動は、ある場所では過度に土砂が堆積することで航路や泊地の埋没や河口閉塞といった問題を引き起こしたり、ある場所では過度に土砂が失われることで海岸侵食や構造物周りで洗掘を引き起こし問題となったりする。土砂が邪魔になる場所もあれば、土砂が無くなると困る場所もある。人間はこのような一筋縄ではいかない海底の土砂移動との闘いに際し、その片鱗となる情報を掴むために海底地形を取得し続けている。

さて、海浜は前浜（低潮位時の汀線～波の遡上端）と後浜（暴浪時にのみ波が遡上する範囲）を合わせた陸上地形を「Beach」と呼ぶが、一般的には低潮位時の汀線よりもやや沖側の領域を含めて呼ばれることが多い。海浜の地形は波浪、流れ、風といった外力で時々刻々と変化している。海浜は、地球物理学的視点においては地形形成や沿岸環境場としての重要な役割を果たし、沿岸防災の視点においても消波機能やそれによる越波防止機能といった重要な役割を果たす。このような点からも、海浜を安定させ、十分な浜幅を維持することが管理上求められ、その管理のためにも高精度な地形変化予測は重要な必要技術の一つである。しかしながら、シミュレーションによる海浜地形変化の再現計算や予測計算は、短期的変動や長期的変動に関わらず、十分な精度を有しているとは言い難い。これらの一因は海浜地形のモニタリング（観測）が時間的に断片的で、限られた量のデータしか得られていないことが多く、十分なデータに基づいた海浜地形変化プロセスの詳細な検討が難しいことにあるように思われる。海浜の地形変化プロセスを理解する目的と海岸管理の目的の両方において、現地における海浜地形のモニタリングデータを取得することは必要不可欠なものである。

データの多少を問わなければ、世界中で多くの海浜地形のモニタリングが実施されている。定期的な海浜地形変化モニタリングにおいて、測量対象とされるのは、陸側から順に後浜、前浜、上部外浜（低潮位～土砂の移動限界水深：depth of closure）が中心である（図-1）。上部外浜と下部外浜（上部外浜～波浪の作用限界水深：wave base）の間の土砂輸送と堆積プロセスは、長期的な海浜地形変化を考える上では無視できないものではあるが（Anthony and Aagaard, 2020; Harley et al., 2022）、下部外浜の時間的な地形変化量は必ずしも大きくないことから、下部外浜までを対象とした海浜地形のモニタリングキャン

# 地下水のモニタリング-地下水の水質と水位

## Groundwater Monitoring – groundwater quality and level

中 川 啓  
Kei NAKAGAWA

### 1. はじめに

地下水は、人間にとって重要な水資源の一つであり、その管理は農業、工業、生活といったあらゆる面で必要不可欠です。地下水のモニタリングによる地下水データの取得は、地下水の水質と地下水資源そのものの利用可能性の両面において、効果的に管理するための前提条件となります。地表面から見るができない地下水システムは、複雑であるため、その特性を捉えて、適切に管理するためのモニタリングが必要であるといえます。モニタリングがうまくいけば、地下水資源の状態を正確に把握し、適切な管理策を講じることが可能となります。こうした地下水のモニタリングは、その目的が明確に定められるべきです。すなわち、最初に管理上の問題を定義した上で、それに基づいてモニタリングを設計することが重要でしょう。したがって地下水モニタリングは、(1) 問題の定義と管理目標の設定、(2) 必要な情報の抽出、(3) データ取得・収集、(4) データの保存と分析・共有、(5) 地下水管理の実行といった各段階を経て達成されますが、これらのステップは、必要に応じて、(1)や(2)が見直され、継続的に行われます (図 1, AGW-Net et al., 2015)。問題の定義と管理目標の設定とは、モニタリングの目的が何かということですが、これがはっきりしていれば必要な情報が見えてきます。では、地下水モニタリングの目的とはどういったもののでしょうか。アフリカの統合的地下水管理についてのテキスト (AGW-Net et al., 2015)によると、**①** 地下水資源モニタリング、**②** コンプライアンスモニタリング、**③** 地下水保護モニタリング、**④** 地下水汚染モニタリングの4つの目的に分類できるとされています。**①** 地下水資源モニタリングは、涵養や流出、表流水との相互作用、水質や水量の変化といった対象とする地下水系を理解するためのものと定義されます。**②** コンプライアンスモニタリングは、主に2種類あります。それらは、(1) 井戸の数や間隔、揚水量など、地下水位がある水位以下に低下しないようにするための規制を設定するために必要な情報を収集することを目的とした、地下水の利用とそれに対する帯水層の応答についてのモニタリングと、(2) 揚水された地下水の水質が許容最大値を超えないことを確認するためのモニタリングになります。**③** 地下水保護モニタリングは、地下水そのものや地下水の関係する対象への潜在的な影響に対する保護のためのモニタリングのことで、典型的なものとしては、地下水枯渇や地下水汚染から飲料水源井戸や湧水の保護、地盤沈下から都市インフラの保護、地下水位上昇からの考古学的遺跡の保護、地下水の量と質の望ましくない変化から地下水に依存している生態系の保護といったものが挙げられます。**④** 地下水汚染モニタリングは、潜在的な地下水汚染の危険性に対する早期警告情報を提供するためのモニタリングのことで、集約的な農用地、特定産業の工業用地、廃棄物埋立処分場、干拓地、採石場や鉱山といった場所におけるモニタリングのことで

こうした地下水のモニタリングの手順の中で、(4) データの保存と分析・共有、において、“データの分析”に関しては、地下水モデルによる数値シミュレーションを用いた解析・評価が行われることが多いと考えられます。そうした観点からは、地下水のモニタリングは、地下水モデルに必要なパラメータやモデルの妥当性を検証するためのデータなどを得るためのものとも言えます。また、例えば、神野 (1990)は、**④** 地下水汚染モニタリングに