

地質と調査

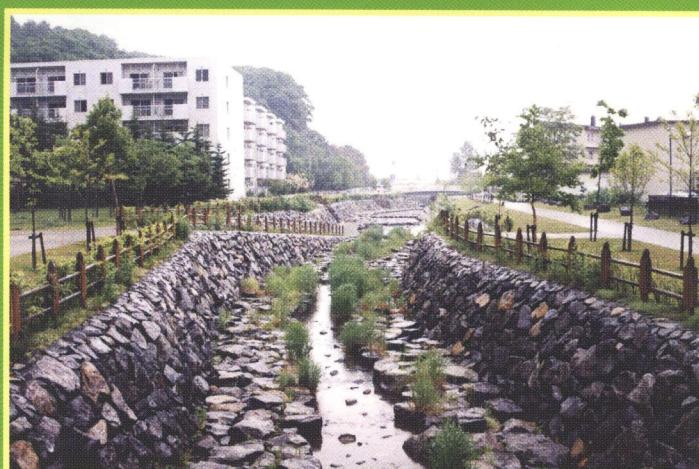
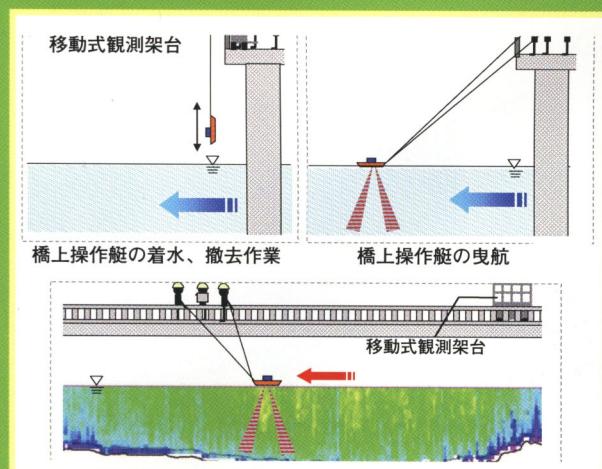
'12 第1号
(通巻131号)

編集／社団法人全国地質調査業協会連合会

巻頭言 持続可能な水循環と水文調査 京都大学防災研究所 審 馨

総 論 健全な水循環系の構築に向けた取り組みと課題

国土交通省国土技術政策総合研究所 吉谷純一



橋上操作艇搭載ADCPによる洪水流量観測概念図

石張り護岸の多自然型河川改修

小特集 水文調査とその最前線

トンネルにおける渴水問題と水文調査 大島洋志・藤原幹之

地下水環境保全に向けた取り組みと調査のポイント 中村裕昭

洪水時の流量観測手法における新しい動向 深見和彦

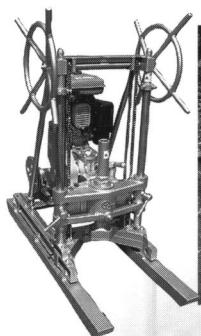
河川生態系の変貌と生物多様性—劣化プロセスと再生への新たな視点— 中村太士

水循環の可視化ツールとしての数値シミュレーション技術の活用 登坂博行

教養読本 I CHARM(アイチャーム) 竹内邦良

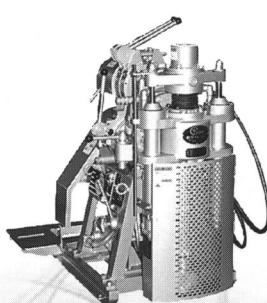
やさしい知識 統合的水資源管理 田島正廣

YHP-1

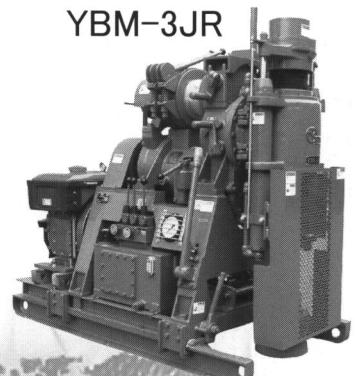


(ニッケル鉱調査 フィリピン)

YBM-05DA-2



YBM-3JR

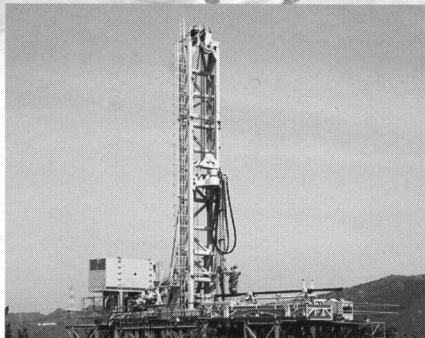


資源探査、環境調査、土木建設の基礎調査 世界で活躍するYBMのボーリングマシンとツールス

大口径ボーリングマシンから、超軽量ボーリングマシンまで、
幅広いニーズを満たす製品を取り揃えております。



ワイヤーライン工法用削孔機
TYW-50



地熱開発用コンパクトリグ
HC-2000R

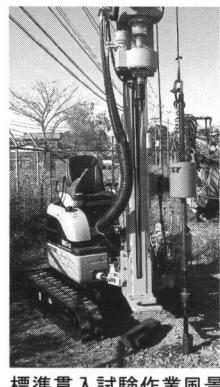


トラックマウントドリリングリグ
YSD-500BV



ワイヤーライン
工法調査機
YWL-200

スピンドル回転数
2速切換の為、
低速回転での口元
ケーシング掘削も
可能。



標準貫入試験作業風景



バイブロドリル
ECO-1VIII
土壤・地下水汚染調査など

バイブロ機能を活
かして回転せずに
土中に貫入可能。



ポータブル
表層土壤調査機
ハンディECO
表層土壤汚染調査など

ybm 株式会社 ワイビーエム

本 社／〒847-0031 佐賀県唐津市原1534 TEL (0955) 77-1121

<http://www.ybm.jp/>

東京支社 〒104-0032 東京都中央区八丁堀3丁目22-11八重洲第三長岡ビル2F TEL (03) 6280-4789
東京支店 〒342-0005 埼玉県吉川市川藤3062 TEL (048) 982-7558
大阪支店 〒578-0964 大阪府東大阪市新庄西5-4 TEL (06) 4309-2921

名古屋営業所 〒468-0043 愛知県名古屋市天白区菅田1丁目1208 TEL (052) 804-4841
広島営業所 〒732-0802 広島県広島市南区大州1丁目1-25第一ふじビル1F TEL (082) 285-3824
バリセブ営業所 Room No. 343 3F, PPHUI, JL. HR. Rasuna Said Kav. C-22 Jakarta Selatan 12940 TEL (+62) 21-52921131

卷頭言	持続可能な水循環と水文調査	京都大学防災研究所 寶 馨	1
総 論	健全な水循環系の構築に向けた取り組みと課題 国土交通省国土技術政策総合研究所 吉谷 純一		2
小特集	水文調査とその最前線		
	トンネルにおける渴水問題と水分調査 大島 洋志・藤原 幹之		6
	地下水環境保全に向けた取り組みと調査のポイント 中村 裕昭		14
	洪水時の流量観測手法における新しい動向 深見 和彦		22
	河川生態系の変貌と生物多様性 —劣化プロセスと再生への新たな視点— 中村 太士		29
	水循環の可視化ツールとしての 数値シミュレーション技術の活用 登坂 博行		37
教養読本	ICHARM（アイチャーム） 竹内 邦良		42
やさしい知識	統合的水資源管理 田島 正廣		46
基礎技術講座	若手技術者のための「ボーリングコア観察技術」 フィールドの達人 編集委員会		48
私の経験した現場	新潟県豪雨災害(H23.7.27~7.30)における砂防施設災への対応 石井 伸和		55
大地の恵み	愛媛県砥部町・伊予砥と砥部焼き 曾我部 潤		59
各地の残すべき地形・地質	周氷河期地形と高山植物の島（礼文島） 石丸 聰		61
各地の博物館巡り	神奈川県立 生命の星・地球博物館 笠間 友博		63
会 告	地質情報管理士資格検定試験 62名が合格 全地連受注動向調査（平成23年度4月～12月） 平成23年度「地質調査技士」登録更新講習会 2,317名が 更新完了 応用地形判読士資格検定試験制度の創設について 平成24年度地質調査技士資格検定試験実施概要 「地質リスク学会」第3回地質リスクマネジメント 事例研究発表会・事例研究発表募集 全地連「技術フォーラム2012」新潟 技術発表募集について		65 67 68 68 69 69 70

小特集テーマ 「資源」

- ・メタンハイドレート
- ・地熱資源
- ・「レアメタル」と「レアアース」
- ・海底熱水鉱床
- ・排他的経済水域・大陸棚の資源探査

教養読本 地下生命（生物）圏
地中熱利用と地質情報

基礎技術講座 ボーリング掘削技術
私の経験した現場
各地の博物館巡り
大地の恵み
各地の残すべき地形・地質

持続可能な水循環と水文調査

【Key Word】

観測、モデリング、流域一貫、人材育成、産官学連携

京都大学防災研究所 たから 寶 かおる 馨

地球は「水の惑星」と言われる。それは海洋が地表の70.8%を覆っているからであり、地球上の全水量の97%が海洋に存在することが知られている。この水は太陽エネルギーによって駆動され、地球上の水循環(water cycle)を形成する。水文循環(hydrological cycle)ともいう。陸域の水は、全水量の3%程度であり、氷河や氷山として存在するものがかなりの割合を占め、人類が利用可能な水は1%未満である。

地球全体の水循環は、太陽エネルギーが供給され続ける限り持続可能である。問題は、人と土地と水の関わりのある陸域(あるいは河川流域)において、人為的な影響が水循環を攪乱し、徐々に都合の悪い方に向かっていって、同じ河川流域の中で快適に住み続けられなくなるのではないか、ということである。

水循環が悪い方向に向かっていないかどうかを調べるために水文調査を行う。それは、河川の水位、流量、土砂、水質、水温などの水文観測、雨量や大気の気象観測、生態系の種類や個体数の観測といった物理的、化学的、生態学的な観測手法が用いられる。2011年3月11日の東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故以来、放射性物質の観測も新しい重要な要素となってきた。このような様々な観測に加えて、住民からの聞き取りやアンケート調査も水文調査に含まれる。日々そこで暮らす地元の住民でしか分からない事象、観測データだけでは把握できない事項を抽出することもきわめて重要である。

以前は、家庭からの生活排水、工場からの工業排水が河川に直接流出し、いわゆる公害が大きな社会問題となっていたが、1970年の水質汚濁防止法の制定などにより、河川や湾域などの公共用水域への汚水の流出はかなり抑制された。汚水処理人口普及率という指標で見ると、全国1600市町村のうち、人口100万人以上の都市(11市)では99%に達し、農業従事者の割合が高い人口10万人未満の1342市町村でも70%を超えている(平

成22年度)ということはあまり知られていない。ともあれ、我が国では、生活や産業で使った水はかなり処理・浄化されてから河川や海に排出されている。このような努力に加えて、人工構造物による水循環や生態系への悪影響を軽減・排除するいわゆる自然再生の取り組みもなされており、生態系や景観に配慮している。開発途上国では、このような対策はまだまだ不十分であり、河川や沿岸域の水質や景観は悪化する一方である。

河川流域全体の水循環を総体として取り扱う、いわゆる流域一貫の考え方はもう30年来提唱されてきた。従来は洪水流出を中心に流域全体の流出解析法が考案され実用化されてきたが、近年は、コンピュータの発達、各種の地理情報(空間情報)システムの整備、水文観測技術の進歩とデータの蓄積などにより、土砂、水質、低水流量、地下水なども含む水循環の広域的・長期的なシミュレーションが可能となってきた。これにより、流域一貫した水循環の解析・予測・管理(防災も含む)を実現できる環境がようやく整ってきたといえる。他方、国も地方も財政難であり、定期的なモニタリング(観測データの収集)ができにくく、ひょっとしたら打ち切られてしまうような状況が発生している。モデリングやモニタリングの技術が発達しても、それを検証してさらに有効なものにしていくことができない事態に陥る可能性がでできている。

水文調査によって得られる各種のデータを系統的に整理し、共有すること、それを広い範囲で長期的に整備し続けることが必要である。また、これまで活躍してきたベテランの調査員、研究員の仕事を引き継ぐ次世代の若い人材を育てるこもろきわめて重要である。科学技術に優れた国としての立場を維持し、グローバル社会で生き残っていくためにも、まさにこれらは、あらゆる意味での「持続可能性」を問われるものであって、産・官・学のさらなる協力なしにはなし得ない重い課題であるといえるのである。

健全な水循環系の構築に向けた取り組みと課題

【Key Word】

流域管理、意思決定プロセス、観測、解析、技術情報

よし たに じゅん いち
吉 谷 純 一*

1. はじめに

筆者が建設省に入省し、土木研究所水文研究室に配属になった昭和50年代後半は、研究室の主要な研究課題である地下水利用と都市化の影響評価が終了しつつあった。筆者は若輩の立場で両テーマに関する研究プロジェクトの幕引きを任せられた。

地下水研究に関しては、地下水涵養量に応じた利用ならば障害も起きない、地下水人工涵養でさらに利用できることを水収支から理解した上で、地下水管理計画を策定して管理すべきという理念から、個別の研究を行っていた。具体的には、東海三県の地下水・地盤沈下シミュレーション¹⁾、地下浸透トレーニング開発²⁾、筑波万博会場（現、筑波西部工業団地）の開発前から地下水位観測と解析³⁾を行っていて、筆者はこれらの最終報告書を土木研究所資料として取りまとめた。また、建設省は全国の主要な地下水盆地で地下水管理計画の元となる水収支解析を行っており、地下水利用可能量の算定調査を実施していた。その成果は書籍⁴⁾にまとめられている。かつて地下水研究を精力的に行なったのは、地下水も河川水と一体としてマネジメントすべきという理想、今で言う水循環健全化に向かって、真向から取り組んでいたため感じる。しかし、その後、その実現性が薄れるにつれ、研究所での地下水研究もほとんどなされなくなった。

都市化影響研究に関しては、高度成長期の急速な都市化による洪水流量増大の実態観測を主眼とし、ユネスコ国際水文学十年計画（IHD：現 IHP の前身プログラム）の一環として裏筑波と開発前の多摩ニュータウンに流出試験地を設置し水文観

測を行っていた。また、建設省は全国に流出試験地を設置し、洪水増大の観測を実施していた。昭和60年頃、都市化域での観測は終了させ、筆者は観測資料と知見のまとめの幹事役を務め、報告書を作成した^{5), 6), 7)}。都市化問題への対処は、当時の関係者は、鶴見川のような急激な都市化域を除き、流出増は原則、河道改修で対応するという考えであり、そのための流出変化量を知ることが研究の目的だった。現在は、自然環境等の治水以外の目的を含め、流域対策も含めた幅広い代替案から対応策を決め、利害関係者の意見も聞くといういう、当時から見ると非常に複雑な計画が求められている。

本稿は、このような昭和の終わり頃と現在の計画の違いをもたらした技術的、社会的背景を述べることとする。なお、本稿は筆者の経験に基づく私見であることを断つておく。

2. 健全な水循環系の構築

水循環健全化の必要性は、平成10年の河川審議会水循環小委員会⁸⁾や平成11年の健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議⁹⁾に述べられている。後者は健全な水循環系を「流域を中心とした一連の水の流れの過程において、人間社会の営みと環境の保全に果たす水の機能が、適切なバランスの下にともに確保されている状態」と定義している。水循環という用語は、最近は水文循環と同義に用いられるようになったが、自然科学用語ではなく、利害を調整する対象としての意味を込めた用語である。健全性の判断は人や社会の価値観に依存することから分かるとおり、適切なバランスとは実務的には各部門が独自に策定していた諸計画の総合調整のことである。調整自体は、先述の地盤沈下問題等、昔から行われていることであるが、水循環系健全化のような新しいネーミ

* 國土交通省國土技術政策総合研究所 河川研究部 流域管理研究官

ングをした理由は、調整不在こそが最も重要な問題であり、今までよりはるかに広範囲の調整が必要との意思の表れだと考える。広範囲とは、治水単目的でなく、自然環境、水文化、緊急時の利用等、複数の目的に広げる意味と、土地利用や法制度等、代替案を事実上の制約を取り扱って広げる2つの意味がある。これを計画・実行するためには、ある計画の悪影響も考慮するという方法ではなく、関連部局が同時並行で計画を調整しながら進めが必要となる。数値計算になぞらえると、大気と地表面、あるいは河道水位と氾濫原水位の間の相互作用を、それぞれの数値モデルで境界条件を与えて計算するのでは不十分で、両数値モデルを一体として同時に解くことに相当する。相互作用の計算は格段に長い計算時間を必要とするように、意思決定で適切なバランスを見出すまでには相当長い時間をする。場合によっては、収束しないこともあるはずである。

平成11年頃、土木研究所は米国発の流域管理(watershed management)を手本として、河川、水資源、下水道、水資源、砂防の研究部が集まり日本での流域管理のための研究計画を検討していた。土木研究所は、科学者集団である米国地質調査所と交流を行っていたので、米国の流域管理の詳細な調査を申し出たところ、かつて米国西部のダム建設を行う組織だったが水管管理を主務とする組織に移行した開拓局に会議参加を要請することになり、つくばで流域管理に必要な技術と意思決定の問題を議論するワークショップを開催した¹⁰⁾。ここで知ったことは、米国も日本とほとんど同じ問題を抱えていること、その課題は複数目的の公正なバランス(equitable balance)を見つけることであり、その具体の方策は、(1)法的・政治的制約の変更も代替案とし、(2)その効果やリスクを技術情報として提示し、(3)一般を巻き込み合意を図ろうとすることだった。複数目的の公正なバランスの達成は、費用や地球環境への負荷を考えなければ、開発により解決できるが、限られた資源の制約下では、上記のマネジメントを行う必要があると言う楠田哲也教授の基調講演も印象的であった。

このとき、開拓局は激しく利害が対立する事業計画の合意形成を扱う社会学者を雇用し、そのガイドブックを作成していることを知り、この社会学者の協力を得てガイドブックを翻訳した¹¹⁾。ガイドブック筆者の説明の中で強く印象に残っているは、合意形成という用語は既定の結論を説得するように聞こえるので意思決定プロセスと呼んで

いること、目標は全員が心底賛同する合意(consensus)ではなく積極的に反対する人がいなくなる同意(consent)であること、目標に至る道のりはいわば螺旋階段状でその中の現在位置を常に知ることが重要であること等である。

国際社会では、統合水資源管理(Integrated Water Resources Management; IWRM)という用語が使われる場合が多い。これは、欧州発の用語で、基本的には流域管理や水循環健全化と同じコンセプトである。筆者は鶴見川水マスター・プランの意思決定プロセス事例を国際応用システム分析研究所での国際会議¹²⁾で紹介したとき、参加していたリスク専門家から、特に100名を超す全体会議を何回も開催し計画づくりを進めるプロセスは先進的事例とコメントをもらったことや、IWRM ToolBoxを見ても、筆者らが投稿した鶴見川や印旛沼流域の例を除き、これほど大がかりで、なおかつ実行を伴う取組を見たことがないことから、日本の取組みは先行していると思っている。

しかし、手を替え品を替え正論を訴えても、利害が激しく対立する場合、互いに不信感を抱いている場合、同意には程遠い場所で足踏みが続くのは万国共通である。万能の処方箋がないのも同様である。

3. 技術情報の発展

水循環系健全化の決め手である、幅広の代替案、技術情報、意思決定プロセスの中で、科学・技術が大いに必要とされるのは技術情報である。

水循環健全化の意思決定支援に求められる技術情報は、第一に水循環の実態である。これは、通常、観測値だけはわからず、解析により観測値を補問して初めて理解できる。

分布型モデルは水循環を理解するだけでなく、過去の推測や浸透施設設置等の効果評価を可能にする便利なツールである。このような解析技術は昭和の終わりには実用化されていなかった。当時の数値解析と言えば、表流水に関しては、合理式、貯留関数法、タンクモデルの概念モデルの他は、雨水流法しか普及していなかった。地下水に関しては主要な帶水層と加圧層に集約して2次元で計算するのが主流だった。これらの手法では地表面の舗装による不浸透域の拡大や対策としての浸透施設設置のような面的に不均一な情報を扱うことができない。現在では、分布型モデルで計算領域を細かく分割して計算する技術が普及し、水循環への影響予測が可能になっている。また、最近は地表水と地下水を同じ計算式でシームレスに計算

することにより相互作用を適切に評価できる方法も開発・実用化されている。

もう一方の観測技術は、大きく進歩した分野とあまり変わっていない分野があるように思える。まず、あまり変わっていないは急峻で流下物等も多い河川での洪水流量観測で、相変わらず浮子以外に実用に供する手法はない。一方、大きく進歩したのは、微量化学物質や同位体の分析で、昔は不可能だった微量有害物質の検知が可能になり、環境同位体の分析技術向上により地下水流动も良くわかるようになっている。

レーダによる降雨観測、非接触型の流量観測、微気象観測、水生生物や生息域環境の観測も大きく進展した。これらの観測は昔もなされてはいたが、現在は規模が拡大、あるいは精度が大幅に向うしている。これは、新たな観測原理による観測機器が開発・導入されたのではなく、継続的な研究やニーズが増大することにより、観測機器の地道な改良と普及が進んだからと考えている。雨水浸透施設も、昭和の終わり頃は、目詰まりしにくい浸透トレーニングで行こうと判断した直後であったが、その後の継続的なニーズに支えられ、浸透施設を設計できるまでに実用化されている。

また、観測は、解析と組み合わせなくても、意思決定プロセスの第一歩として、事実の共通認識を積み重ねる意味を持つこともある。ある生物の保全が問題になるとき、予測・憶測ではなく、観測事実により、意思決定が進むのも同じである。また、海外では、例えばユーフラテス川流域国のように水争いを続ける国との間で、流量や流域面積といった誰もが疑いようもない事実を共有することから対話を始める¹³⁾という利用もされている。

観測技術の進歩や実用化に加え、観測値を利用しやすくする取組み、いわば情報の流通の発展は大きな影響力を持つ。昔は観測値の一部を年表にして発行するだけだったが、現在はウェブ上でどこからでも、即座に、非常に簡単に利用できるようになった。さらに、リアルタイムでも入手できる雨量、水位もある。これは情報通信技術の恩恵であることは間違いないが、国土交通省の「水に関するあらゆる情報を収集整備し、国民がそれを共有し、活用することによって実現された、安全で多様な文化を持つ国」を目指す水情報国土¹⁴⁾の推進が大きく貢献している。この方針に基づき公表されるすべての情報は、水管理・国土保全局のトップページにある水情報国土データ管理センターから見ることができる。

観測データの流通だけでなく、近年は、解析ツ

ールの流通の改善の取組みもなされている。国土技術政策総合研究所は水計算モデルの第三者利用を促進するためCommonMPと呼ばれる水・物質循環解析プラットフォームを開発し、ホームページ上で無償公開している¹⁴⁾。CommonMPは、水計算モデルが必要とする入力、出力、グラフ化などの機能を規格化してまとめて装着した、いわば水計算のウインドウズのようなオペレーション・システムで、モデル著作権者の利用許諾条件に制約を課さずに、あらゆる水計算モデルの自由な組み合わせ利用を誰もが容易にできるようになるためのシステムである。CommonMPの普及により、入出力の処理等の煩わしい作業を大幅に軽減し、技術者が本来行うべき意思決定支援のための諸解析を十分行うことができるようになることが期待できる。

4. 技術情報に基づく意思決定

観測や解析の技術、さらには情報提供が進展し、大きな恩恵をもたらした一方で、意思決定上新たな課題も発生している。その典型的な例は、次々と水域から検出される数多くの微量有害物質である。これらは人間の健康や生態系へのリスクが不明な中で、どのレベルなら安全と言えるかという難しい判断を迫られるようになっている。子供のために可能な範囲で安全性を徹底的に追求すべきという考えの人人がいる一方で、大問題でなければ、あれこれ心配するより、知らない方が良いと考える人もいる。技術が進展し、実態がわかれればわかるほど、判断が困難になる事例である。

解析技術の発展も課題を有している。解析モデルは、ほとんどの場合、依然としてキャリブレーションが必要であり、これがいい加減であれば、予測結果は信頼できない。これは、匙加減で予測結果をある程度操作することができる意味する。数値解析の専門家でなくとも、このことはかなり理解していて、ときには専門家が意図的に結果を操作していると疑うことも生じるようになっている。本当の専門家は決してそのようなことはしないが、その一方で、一般的誤解を生みかねない脇の甘さがあったと反省している。研究論文で、自ら開発したモデルの再現性を強調したいがため、好都合な限られた検証事例のみしか論文に掲載しないことは良くあることである。これを利用者の立場から見ると、新製品開発の度に漠然と前より良く汚れが落ちるようになったと繰返し宣伝するだけの洗剤と同じで、本当なのかと疑いたくなってしまう。専門家あるいは学界の信用がな

くなるような事態が発生すれば、信頼できる第三者機関による評価といった仕組みが必要になるかもしれません。

5. おわりに

仕事柄、海外との接点が多いいため、健全とは到底思えない極端な事例を見聞きしてきた。クアランプールの河川内に建設された巨大な橋脚、バンコク上流の自治体が下流の水害リスク増を無視し独自に建設した輪中堤¹⁶⁾、長江の分洪区（遊水地）であるはずの洞庭湖の開発¹³⁾、従来統合運用されていた流域内の複数ダムがソ連崩壊により独立運用となった結果、洪水調整や水供給が非常に困難になった例¹³⁾等である。程度の差こそあれ、水循環健全化と同じ問題の構図である。これらは、行政組織・法制度が自分の領域だけの便益を考える仕組みに起因する問題とも言えるが、自分の領域の便益を第一に優先するのは当然であり、コミュニケーションだけでそれを超えた判断を求めるのは限界があるようと思える。より広い領域での便益を考える仕組みが必要だと思うと共に、本当に問題を解決するためにはマネジメントではなく、関係者皆が便益を享受できる開発の手段を講じるのが最善の場合もあるということも感じている。

科学・技術分野においては、この問題に貢献するのであれば、他者の信頼を確保することを第一とし、その上で意思決定の支援の位置づけを徹底させ、観測資料と解析により問題の構図と代替案の効果・リスクをわかりやすく提示することが求められる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川部水文研究室（1985）：地下埋管からの浸透機構とその応用に関する研究、土木研究所資料第 2246 号、1985 年 6 月
- 2) 建設省土木研究所河川部水文研究室（1988）：地下水シミュレーションの手引と濃尾平野への適用、土木研究所資料第 2576 号、1988 年 3 月
- 3) 建設省土木研究所河川部水文研究室（1986）：谷田部試験地における水文調査報告書（その 2）、土木研究所資料第 2368 号、1986 年 2 月
- 4) 地下水要覧編集委員会（編集）（1989）：地下水要覧、山海堂、1989 年
- 5) 建設省土木研究所河川部水文研究室（1985）：多摩ニュータウン試験地水文観測資料その 1～3、土木研究所資料第 2225 号、1985 年 3 月
- 6) 都市水文学研究会（1986）：多摩ニュータウンにおける流出変化に関する研究報告、土木学会論文集 375/II-6, 28-42, 1986 年 11 月
- 7) 吉野文雄、吉谷純一、堀内輝亮（1985）：都市流出モデルのパラメータ標準化と評価、第 29 回水理講演会論文集、土木学会、1985 年 2 月
- 8) 建設省河川局（1998）：流域における水循環はいかにあるべきか中間報告、平成 10 年 7 月、http://www.mlit.go.jp/river/trash_box/singi/to9808.html
- 9) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議（1999）：健全な水循環系構築に向けて（中間とりまとめ）、平成 11 年 10 月 6 日、<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/junkan/>
- 10) 建設省土木研究所河川部水文研究室（2000）：日米流域管理ワークショップ—今後の方向性に関する徹底した議論—報告書、土木研究所資料第 3682 号、2000 年 3 月
- 11) 建設省土木研究所河川部都市河川研究室・建設マネジメント技術研究センター建設マネジメント技術研究室：意思決定作業の進め方 米国内務省開拓局意思決定のためのガイドブック（訳）、土木研究所資料第 3779 号、2001 年 9 月
- 12) First Annual IIASA-DPRI Meeting on Integrated Disaster Risk Management: Reducing Socio-Economic Vulnerability, IIASA, Laxenburg, Austria, 1-4 August 2001, <http://www.iiasa.ac.at/Research/RMS/dpri2001/?sb=20>
- 13) 砂田憲吾・CREST アジア流域水政策シナリオ研究チーム（2008）：アジアの流域水問題、技報堂出版、2008 年 2 月
- 14) 佐藤宏明（2002）：特集・水情報国土の構築に向けて水情報国土の構築に向けて、河川 666 号、日本河川協会、平成 14 年 1 月
- 15) 国土技術政策総合研究所：水・物質循環解析プラットフォーム CommonMP, <http://framework.nilim.go.jp/>
- 16) 吉谷純一（2007）：タイ王国チャオプラヤ川 2006 年洪水で浮上した治水の課題、土木技術資料 49-19、土木研究センター、平成 19 年 10 月

トンネルにおける渴水問題と水文調査

【Key Word】

山岳, 地下水, 水環境, 酸性水, 利水

おお しま ひろ し ふじ はら まさ ゆき
大島 洋志*・藤原 幹之**

1. はじめに

丹那盆地の西南縁に渴水碑と呼ばれる石碑がある（図1）。これは昭和8（1933）年に地元民が建立したものである。

吉村昭の『闇を裂く道』は1916年の着工から1933年の竣工まで16年余の年月を要した東海道本線丹那トンネル難工事の様子を教えてくれる良い教材であるが、この石碑建立の原因ともなった大量の坑内湧水に伴う地表部の渴水問題に対してもかなりのページを割いている¹⁾。

戦前に刊行された渡邊貫の大著『地質工学』のp.284には、「丹那盆地内の泉の浸出線上に分布する山葵畠の枯渇を始めとし、盆地内70余町歩水田の灌漑用水が欠乏。貯水池の建設、水道の敷設等を行ったが、結局賠償金約150万円を支出。恐らくこのような例は隧道工事史上世界一のものであろう。」といった記述もある²⁾。同書には呉・紀勢・土讃の各線でも同様な渴水問題が起きているとの紹介もある。



図1 丹那盆地西南縁部にある渴水碑（中央）

トンネル施工に伴う渴水問題は戦前の頃から現在に至るまで避けられない重大な環境問題の一つとしてあり続けているといえる。

さらに、近年のトンネル施工の傾向や渴水問題の対象が拡大していることなどのため、渴水対策とそのための水文調査の重要性が低下することはない。

本稿では、掘さくズリの水質や周辺の生態系環境など、配慮すべき対象が拡大しつつある近年の新たな課題も含め、トンネル渴水問題に関わる課題とその解決に向けた技術的な取り組みについて紹介する。

2. 近年のトンネル施工の特徴

渴水問題に関わる近年のトンネル施工の特徴として以下の2点を取り上げる。

①都市部での大深度化

東京など大都市部での鉄道（都営地下鉄大江戸線など）や道路（首都高速新宿線・品川線など）で、大深度のトンネル施工の事例が増えている。

今後も、東京外郭環状道路や中央新幹線など大深度地下使用法の適用を想定した大深度トンネル施工が計画されており、都市部では大深度化が進むと想定される。

②山岳部での長大トンネル施工と施工対策

東北・北海道・北陸などの整備新幹線や高速道路などの山岳区間において長大トンネル事例が増えている。長大化とともに土かぶりも大きくなる傾向にあることから、施工の影響が広範囲に及ぶ事例が増えている。

また都市近郊では渴水対策を目的とした止水工法が採用される事例、その他自然由来の重金属や酸性水・汚水対策の事例など、新たな施工対策の取り組みが見られるようになっている。

* 国際航業(株)技術センター フェロー

** 国際航業(株)東日本事業本部 第四技術部 防災グループ

3. 水文調査に関する課題

古くからの課題である「利水への影響」だけでなく、近年の特徴も踏まえ、水文調査に関する重要な課題について事例を交えて紹介する^{3)～5)}。

(1) やはり重要な利水への影響

湧水・沢水・河川水・地下水などの利水に対する影響は古くからの問題ではあるが、山岳トンネルでは今でも重要な問題である。

都市部や平野部では水道施設が整備され、小規模な利水施設は姿を消しつつあるが、山間部ではまだ自然の湧水や沢水を水道用水・生活用水などに利用している地区は多数存在し、そのため地元住民にとっては深刻な問題になる場合がある。

また、農業用水や養魚用水を沢水・井戸水に依存している水利用や、温泉・鉱泉などがあると大きな問題になり、現在でも重要な課題となる。

事例1：九州新幹線筑紫トンネル

背振山地の地質は花崗岩で、周辺自治体の水瓶的役割をもっている。いろいろな路線が考えられたが、真っ直ぐに大きな土被りで貫くという当初の案を避け、東側の山裾沿いに小さな土被りで迂回する案と西側迂回案とを比較検討した。比較の手段としては自ら開発した水収支シミュレーション

手法（大島の方法、後述）を用いた。

最終的に、西側に迂回しながら施工基面を上げて地下水頭を小さくできるようすれば、水環境問題への影響の度合いを少なくできる西側案が良いと最終判断し、この案を採用してもらった。

工事は決して楽だったわけではなかったが、孫子の兵法よろしく十分に情報を入手しながら進めたため、大きな渇水問題に発展することなく、無事に竣工し、工事関係者から感謝された⁶⁾。

(2) 湧水や滝など水環境への影響

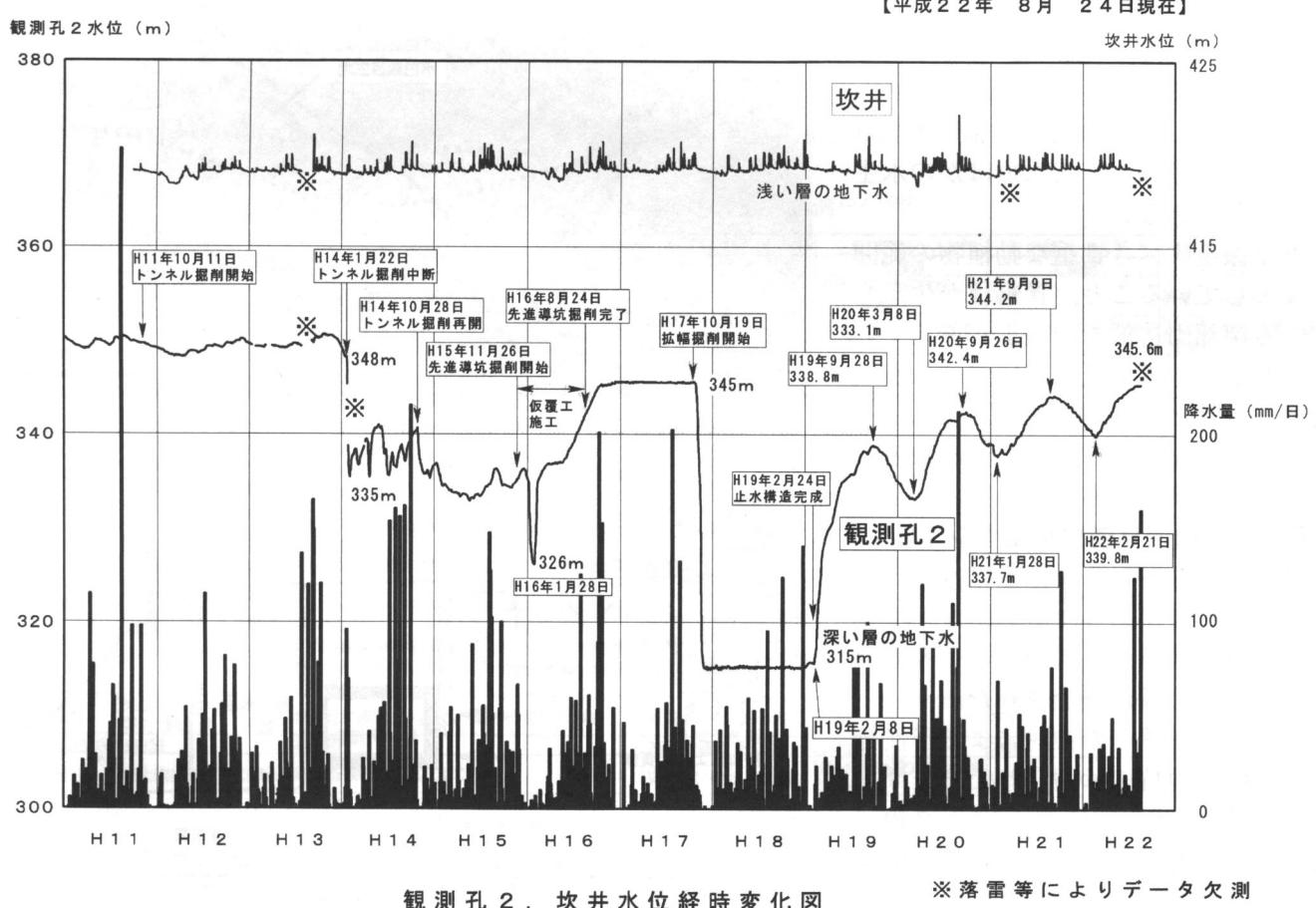
湧水や滝など、利水対象ではなくても、水そのものの存在自体が価値を持つ場合がある。全国的に著名な名水だけではなく、地元で有名な湧水や滝などの減渇水が問題となることが増えている。

特に都市部や都市近郊に位置するトンネルでは、最も重要な課題となるケースが増えている。

水の存在自体（水量や水質）に価値を見出すため、利水のように代替水源により対処するわけにはいかないことがあり、施工対策として対処が必要となる場合がある。

事例2：東京外郭環状道路（練馬区～世田谷区）

大深度地下使用法適用を想定した計画中の都市トンネルである。環境アセスメントにおいて、湧



水・池沼（善福寺池など）などに対する影響が検討されている⁷⁾。

大深度トンネルであっても、インター・ジャンクションや地下駅では浅層部に対する影響が生じるため、広域流動する深層地下水だけでなく、浅層地下水に対する局所的な影響についても調査・対策が必要となる。

事例3：圈央道八王子城跡・高尾山トンネル

御主殿の滝や琵琶滝など滝の保全が特に重要な課題になった。流水の存在自体が問題となつたため、渇水対策として止水注入と止水覆工からなる止水対策が実施された⁸⁾。

すでに供用されている八王子城跡トンネルの場合、施工終了後に地下水位が回復し、御主殿の滝は保全されている（図2）。

高尾山トンネルでは、八王子城跡トンネルでの施工実績も踏まえた対策が実施され、施工期間中も含め琵琶滝に対する影響を防ぐことに成功している。

（3）生態系に与える影響

山地の植生は降水により涵養されている地表面下数メートル程度の土壤水に依存しており、トンネル施工により岩盤中の地下水位が低下したとしても、影響が及ぶ可能性はほとんどない。

地表水の減渇水により影響を受ける可能性があるのは、ワサビなど湧水・沢水に依存している親水性植物や沢・河川などに生息する淡水魚ほかの水生生物などである。

近年保全すべき貴重な動植物の範囲が拡大していること、貴重種が生息している深部山岳部での施工が増えていることから、ますます避けて通れない重要な課題となりつつある。

採用可能な代替方策に限界があることから、対策は容易ではない。

事例4：高山清見道路小鳥トンネル

当初計画のトンネル直上に水芭蕉が群生する湿原があり、トンネルと交差する断層破碎帯からの湧水により湿原への大きな影響が懸念された。

このため、種々の検討による予測評価を行い、両坑口は固定したまま問題箇所を南へ200mほど下げる路線に変更することにより大半の影響を回避することが可能との結論を得た（図3）。

この結論に基づく路線変更が行われ、施工がなされたが、湿原は無事保全された。最も確実な対策は渇水問題を考慮した路線選定といえる好例である⁶⁾。

（4）地下水流动阻害

地下水流动方向に交差するようにトンネルが施工された場合、トンネルが帶水層を遮断し、地下水流动を阻害する場合がある。未固結堆積物が分布する平野部の都市トンネルが主な対象であるが、上流側では地下水がダムアップされ、地下水の湧出や排水不良・湛水現象が生じ、下流側では逆に地下水位が低下（ダムダウン）して井戸や湧水・流水の枯渇や減少が問題となる（図4）。

対策としては、上流側で地下水を取水し、構造物を迂回通水して、下流側で涵養する通水施設を設置することが一般的である。通水のためには、透水性材料や通水管を用いた通水ゾーンを設置することが多い¹⁰⁾。

また、構造物の背面が十分に裏込めされておらず、構造物の地表部への出口が縦断的に低い位置

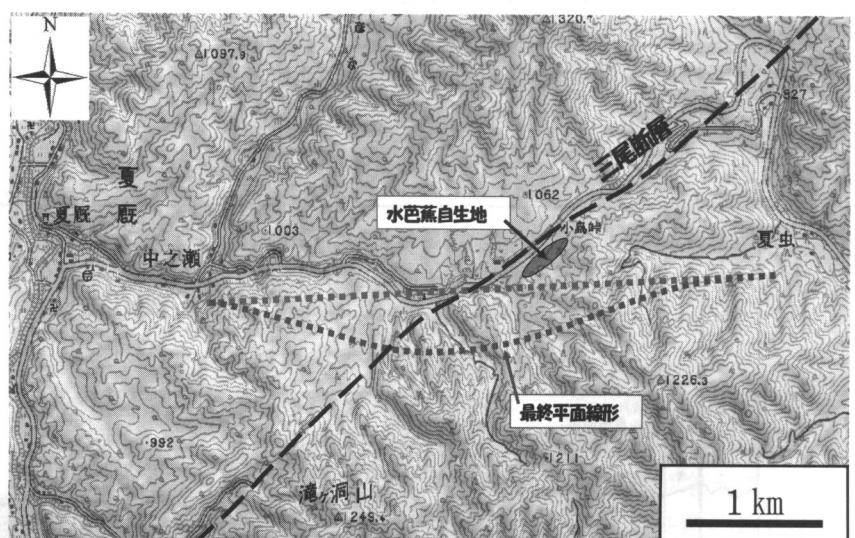


図3 高山清見道路 小鳥トンネル付近地形図⁶⁾より引用

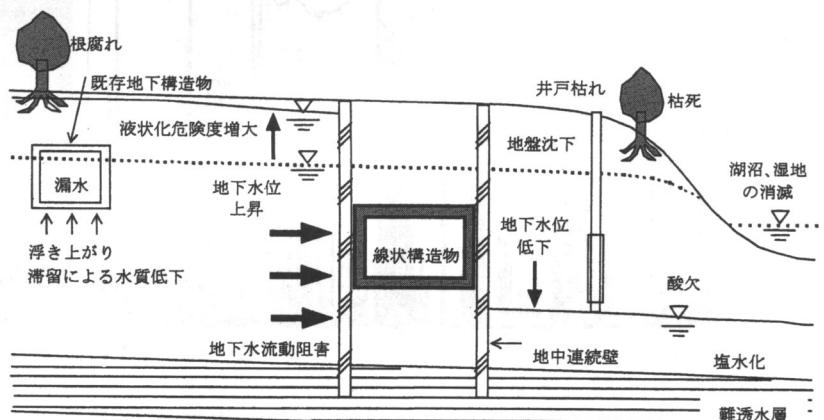


図4 地下水流動阻害による問題¹⁰⁾より引用

にある場合など、背面が水みちとなり、自然の地下水流動系とは全く異なる新たな地下水水流動系が形成され、大きな問題を引き起こす場合がある。

事例5：武蔵野線新小平駅隆起災害

武蔵野線新小平駅は前後を小平・東村山両トンネル間に挟まれた延長118mの地下約12mに設けられた完全止水U字型のコンクリート半地下構造の駅である。

この駅部が、1991年9月から10月の長雨によって地下水位が急激に10m近くも上昇したため、擁壁の伸縮目地部を境にして最大1.3m（縦断方向に見れば、両端トンネル坑口部を固定端とし、伸縮目地部を頂部とするへの字型に）浮き上がり、最大70cmも開口した目地部から土砂を含む大量の地下水が駅構内へ流入し、線路が冠水した。

2ヶ月に及ぶ復旧工事が完了するまでの間、武蔵野線は不通となり、旅客および貨物輸送に多大の影響を及ぼすこととなった³⁾。

その南側の西国分寺駅との間にある恋ヶ窪周辺では高架橋下に建設されていた箱形のトンネルが地下ダムの役割を果たす結果となり、トンネルの上流方に当たる住宅地では一時的に浸水騒ぎが発生した。

(5) 水質汚染・水質変化

トンネル湧水の水温や水質が問題となることがある。ペーハー(pH)が小さい酸性水、水温が著しく低いまたは高い水、重金属など有害物質を含

んだ水などがその例である。

また、地下水位低下や圧気工法を採用した現場付近では、地山が空気にさらされて酸化状態になることにより、水質が変化して問題となることがある。

その他、トンネル湧水を排水することによる水質・水温の変化、止水注入に伴う薬液による地下水汚染、地下水位低下に伴う酸欠空気の発生、酸性地盤化の問題などもある。

(6) 酸性水発生と重金属等の溶出

八甲田トンネル、甲子トンネル、中越トンネル、仙台市地下鉄など多くの事例について報告があり、近年クローズアップされつつある問題である(表1)。

掘削ずりに含まれる硫化鉱物が酸化し、酸性水が発生したり、酸性水が重金属を溶出させたりする。酸性水に寄与する主な鉱物は黄鉄鉱であり、海成泥岩、未固結堆積物、硫化鉱物を含む鉱床などに広く含まれ、多くの地域で潜在的なリスクがある¹¹⁾。

また、酸性水は掘削ずりが埋め立てられて後に遅れて顯在化する場合もあり、施工前の地質調査・水文調査および施工中の迅速判定試験・モニタリングなども含め、長期的な見通しを持った対応が必要となる。

自然由来の重金属は、平成22年改正より土壤汚染対策法の対象となった。ひ素、鉛、ふつ素、ほう素、水銀、カドミウム、セレン、クロムなど

表1 自然由来の重金属等への対応事例¹²⁾より引用

地域	甲子トンネル ^{4), 5)} 福島県	八甲田トンネル ⁶⁾ 青森県	雪沢第二トンネル ⁷⁾ 秋田県	三豊・普葉トンネル ⁸⁾ 北海道	中越トンネル ⁹⁾ 北海道	オロフレトンネル ¹⁰⁾ 北海道	
対象元素	砒素、カドミウム、鉛、セレン	砒素、鉛、セレン、カドミウム	セレン	砒素、鉛、カドミウム、セレン、水銀	砒素	砒素、カドミウム、鉛	
地質	玄武岩質溶岩・火碎岩	泥岩	火山岩、火碎岩類、鉱脈 岩、火山體凝灰岩	新第三系泥岩、凝灰岩、火山體凝灰岩 (変質)	粘板岩、砂岩、変朽安山岩 (変質)	流紋岩、安山岩岩質岩脈 (変質)	
ずりの評価方法	硫黄含有量、pH(3%H ₂ O ₂)による現場判定	肉眼判定、硫黄・カルシウム含有量、帯磁率、pH(H ₂ O)、重金属含有量による現場判定	先進ボーリングによるpH(H ₂ O)、強熱減量、硫黄・カルシウム含有量、18号試験による溶出量	pH(H ₂ O)、pH(30%H ₂ O ₂)、18号試験、H ₂ SO ₄ (pH2)試験による溶出量	先進ボーリング試料の18号試験による溶出量	全量対策	
試験方法	XRF、pH(3%H ₂ O ₂)(粒径5mm以下、固液比1:5、3分振とうのち15分静置)	XRF、単位体積当たり帯磁率(粒径2~4mm)、pH(H ₂ O)(粒径10mm以下、固液比1:5、3分振とうのうち1時間静置)	ICP-AES、強熱減量、pH(H ₂ O)、粒径、固液比1:5、3分振とうのうち7分静置)、強熱減量	pH(H ₂ O)、pH(30%H ₂ O ₂)、18号試験、H ₂ SO ₄ (pH2)溶出試験による判定	18号試験	ポット式溶出試験(詳細不明)	
判定法	S≥1.5% or pH(3%H ₂ O ₂)≤7を要対策	①肉眼判定で鉱脈・鉱石を要対策。 ②pH(H ₂ O)≤6を要対策。 ③S/Ca≥1 or S≥2%を要対策。 ④環境庁提示の含有量参考値を上回るものを見対策。 ⑤環境庁提示の含有量参考値を上回るものを見対策。	①肉眼判定で鉱脈・鉱石を要対策。 ②MS≤50×10 ⁻⁶ emu/cm ³ の火山岩を要対策。 ③pH(H ₂ O)≤6を要対策。 ④S≥2%を要対策。 ⑤環境庁提示の含有量参考値を上回るものを見対策。	①S≥1% or S/Ca≥1は③(詳細試験)へ ②pH(H ₂ O)<5 or pH(H ₂ O)>10、かつ強熱減量>10%は③(詳細調査)へ ④S≥2%を要対策。 ⑤環境庁提示の含有量参考値を上回るものを見対策。	18号試験値を土壤溶出基準と対比。さらにpH(3%H ₂ O ₂)≤3.5の試料についてはH ₂ SO ₄ (pH2)溶出試験値を土壤溶出基準と対比。	18号試験値を土壤溶出基準と対比。	-
分析頻度	先進ボーリング5m毎切羽1回/日	岩相毎に採取、分析(同一岩相の場合8m毎)	先進ボーリング5m毎	不明	不明	-	
分析に要する日数	3時間	24時間	2日(詳細調査10日)	約10日	不明	-	
ずり処理方法	盛土内に遮水封じ込め	処分場(新設)に遮水封じ込め	盛土内に遮水封じ込め	処分場(新設)に遮水封じ込め	盛土内に遮水封じ込め	盛土内に遮水封じ込め	
その他	先進ボーリングの分析は事前把握が目的	S/Ca≥1 or S≥2%を要対策とした根拠として、56日間の溶出試験および10年間の曝露試験の結果がある。 これによるとAsを除く重金属等は酸性条件で溶出が大きくなること、および検液の酸性化と試料のS含有量(泥岩においてはS/Caモル比)に相関がある。また、帯磁率とS含有量には相関がある。 なお、Asの溶出量はAs含有量と弱い相関がある。	アルカリかつ強熱減量大は、砒素溶出の可能性。 1回/日の切羽観察結果と先進ボーリングの結果が異なる場合は試験を再度行う。	各種溶出試験は溶液種以外は18号試験に準拠。	分析の結果、分別の煩雑さから全量対策とした。	-	

が問題となる可能性がある。具体的な対応等についてはすでに多くのマニュアルや文献が公表されている。

事例 6：東北新幹線八甲田トンネル

旧鉱山の分布地域に位置し酸性水や重金属の溶出が懸念されたため、酸性水発生に関する岩石の判定手法を設定し、酸性化が懸念された掘削残土は「管理型土捨場」に埋め立て処理された。

判定は、肉眼、pH、S/Ca 比、硫黄含有量、帶磁率等に基づき、約 2 割が管理型と判定された。判定基準のうち、泥岩では S/Ca 比が、火山岩・火碎岩類では硫黄含有量が有効であったとされている。

また、「管理型」、「一般型」とともに処分地からの浸出水は酸性を示さず、上記判定方法は十分安全側であると評価された¹³⁾。

(7) 地盤沈下

地下水位低下に伴う地盤沈下（圧密収縮）も無視できない。一般には平野部の都市トンネルが対象であるが、山岳トンネルでも地質条件（軟質な堆積物が分布するなど）によっては局所的に地盤沈下が生じる場合があり注意が必要である。

4. 調査実施の留意点

トンネル工事を対象とした調査は一般に表 2 の通り進められる。この中で渴水問題に対する水文

調査を実施する際に留意すべき事項をあげる。

①早期に調査を開始し問題の概要を把握する

できるだけ早い段階で、施工に伴いどのような問題が起こり得るかを把握することが重要である。路線選定段階で検討を行うことができれば、渴水問題も考慮の上、路線を選定することが可能となり最も望ましい。

設計・施工計画段階であっても、あらかじめ対策まで念頭に置いた調査を実施することにより、無駄を省き効率的に調査・対策を行うことが可能となる。

②調査は先を見越して段階的に取り組む

調査から対策までの長期的な見通しを立てて、広域的で概略の調査から、局所的で詳細な調査へ段階的に進めていくことにより、調査の無駄や不足を防ぐことができる。施工前から施工中・施工後までの間に時期を失しないように実施する。

当初の調査範囲はトンネル近傍にとどまらず、流域単位での水収支の考え方も踏まえて設定する必要がある。観測期間や頻度も、水文現象の自然変動・長期変動を踏まえる必要がある。

③地質構造と水文・水利用の実態を把握する

地質構造、特にトンネル湧水を左右する断層・破碎帯の分布や透水性などを把握するとともに、地下水や河川水の水文観測もあわせ水文実態を把握する。また、温泉も含め水利用実態をできるだ

表 2 調査の流れ¹⁴⁾より引用

工事と調査の流れ	比較路線の検討▼	路線選定のための調査	路線の決定▼	設計・施工計画のための調査	工事着手▼	施工中の調査	工事竣工▼	施工後の調査
主な目的	地形・地質、その他の環境条件に適合した路線を選定するために必要な資料と、次の段階の調査立案の基礎資料を得ること	地形・地質調査、環境調査、その他 一般に概括的な調査	地形・地質調査、環境調査、その他 精密な地質調査、具体的な周辺対策を考えた調査、工事関係諸施設などのための調査など	当初設計、工事計画、積算などに必要な基礎資料を得ること	施工中に生じる問題点の予測および確認、設計変更、施工管理 補償および後日のための資料を得ること	施工中に生じる問題点の予測および確認、設計変更、施工管理 補償および後日のための資料を得ること	施工中、施工後に生じた問題点の確認 補償あるいは変状の対策のための資料を得ること	施工中、施工後に生じた問題点の確認 補償あるいは変状の対策のための資料を得ること
調査の内容	地形・地質調査、環境調査、その他 一般に概括的な調査	地形・地質調査、環境調査、その他 精密な地質調査、具体的な周辺対策を考えた調査、工事関係諸施設などのための調査など	地形・地質調査、計測、環境調査、その他 なお、坑内計測は地山状態の観察、支保の挙動に関する計測が主 トンネル周辺の環境調査・計測は工事による影響および対策の効果判定が主	地形・地質調査、計測、環境調査、その他 なお、坑内計測は地山状態の観察、支保の挙動に関する計測が主 トンネル周辺の環境調査・計測は工事による影響および対策の効果判定が主	地形・地質調査、計測、環境調査、その他 なお、坑内計測は地山状態の観察、支保の挙動に関する計測が主 トンネル周辺の環境調査・計測は工事による影響および対策の効果判定が主	地形・地質調査、計測、環境調査、その他 なお、坑内計測は地山状態の観察、支保の挙動に関する計測が主 トンネル周辺の環境調査・計測は工事による影響および対策の効果判定が主	地質調査、計測、環境調査、その他 トンネル周辺の環境調査・計測は工事による影響および対策の効果判定が主	地質調査、計測、環境調査、その他 トンネル周辺の環境調査・計測は工事による影響および対策の効果判定が主
調査範囲	比較路線を含む広範囲	トンネル、これと関係あると推定される箇所およびこれらの周辺	トンネル内および施工により影響を受けるおそれがある範囲	問題箇所を中心とする影響範囲				

け詳しく把握することが重要である。

実態把握が不完全であると、施工中に当初想定しなかった問題が発生し、対策が後手に回り、工期の遅れやコスト増を招くことになる。

④誰にでも納得できる調査結果の表現

渴水問題は地元住民をはじめ関係者の納得を得なければ解決することはできない。調査結果も技術的に正確であるだけではなく、最終的には地域の関係者を納得させる内容でなければならない。

単に調査結果を示すのではなく、誰にでもわかりやすく理解でき、説得力のある表現であることが必要となる。

5. 技術的な取り組み

渴水問題に対処するため、水文地質・水収支・水文環境・事例調査を実施し、その結果に基づき予測評価を行うことになる。その詳細については『わかりやすい土木地質学』など他の書籍・文献に詳述されているため^{14), 15)}、ここでは技術的な取り組みのうち近年の動向事例や取り扱いについて留意すべき事例について紹介する。

(1) 地形判読と地質踏査

トンネル施工時の湧水量は、断層や破碎帯との遭遇により大きく変化する。破碎帯や割れ目が集中するゾーンは、透水性が大きく湧水量が急増する区間となる。逆に断層粘土など透水性の小さな区間があると、粘土層を突破した時に突発的な湧水に遭遇する場合がある。

湧水量の動向は渴水問題に直結することから、透水性を大きく左右する地質条件を把握することが重要となる。断層・破碎帯・割れ目集中帯などの分布を把握するには、地形判読と地質踏査を組み合わせて実施することが最も効果的である。

地形判読により広域的なリニアメントの分布や密度などを把握し、そのうちルートに近い主要なものを対象に断層・破碎帯であるかを現地踏査により確認・判定する。

予測評価のための数値シミュレーションにこの結果を反映することによりトンネル湧水量の精度が向上し、ひいては周辺地域への影響をより的確に予測することが可能となる。

また、施工時にはトンネル切羽での湧水状況を予め予想して対策などを立案することが可能となり、施工をスムーズに進めることができる。

(2) 水平ボーリング

施工に先立って掘削される坑外・坑内の水平ボーリングは、切羽前方の地質を早期に把握するだけでなく、トンネル湧水の水量・水質の事前確認

に利用でき、また水抜き効果も期待できる。

特に最近、高速掘進と方向制御を兼ね備えた先進ボーリング工法が開発されつつあり、水文情報に乏しい山岳部では活用が期待できる技術である。

また、調査技術としてだけではなく、湧水を利水に活用できるといった渴水問題へ対処するための方策としても利用可能である。

事例 7：坑内水平ボーリング

トンネル坑内に作業ヤードを設置し、切羽前方約1000mの水平ボーリングを実施した事例である。掘削開始から完了までの平均掘進速度は20m/日で、掘削期間は48日間である。掘進終了時に約2m³/minの湧水量があり、地山内部で湧水が急増する区間や湧水圧・湧水量など貴重な水文情報が得られた(図5)。

このボーリングは計画トンネル断面の10m程度下方にトンネルと平行して方向制御しつつ実施されている。トンネル掘削に対しては先行水抜きの効果も十分に期待される新しい発想に基づくボーリングである¹⁶⁾。

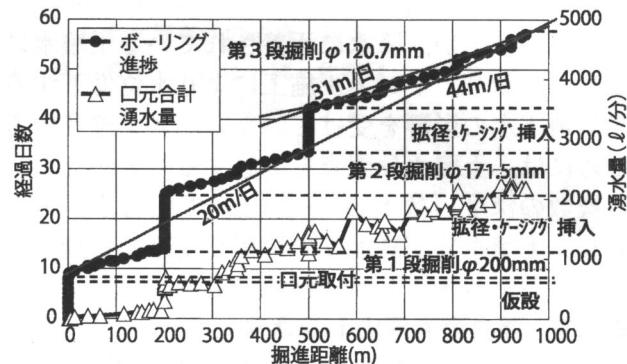


図5 ボーリング掘削実績(B-3孔)¹⁶⁾より引用

(3) トレーサー試験

一般には地下水位分布を把握することが地下水流動系を推定する基本となるが、平野部の未固結堆積物や石灰岩中の地下水など流動速度の速い地質条件下ではトレーサー試験も重要な調査手法となる。

水みちの分布など地下水流動経路を直接に把握できることから、塩化ナトリウム、蛍光染料、アクチバブルトレーサーなどのトレーサー物質を用いて実施してきた。

さらに近年はトレーサー物質が多様化し精度よく安価に利用できるようになりつつあり、調査対象によっては今後さらに重要な技術になっていくと考えられる¹⁷⁾。

事例 8：四国横断自動車道歯長山トンネル

石灰岩層を貫くトンネルで、近傍に名水百選の

観音水など著名な湧水が存在したことから、トンネル施工の影響が及ぶかどうかが重要な課題となつた。

石灰岩層内の空洞中を地下水が高速で流動していることが推定されたため、アクチバブルトレーサーを用いたトレーサー試験が実施された。

この結果、その他の水文調査結果とあわせ、トンネル施工による湧水への影響可能性などについて検討が可能となつた¹⁸⁾。

(4) 水質分析

一般に地下水や河川流量の観測時には電気伝導度やペーハー(pH)など簡易水質項目を現地で測定する。また、主要溶存成分である水質項目を対象に室内水質分析も実施される。

分析結果はパターンダイヤグラムやトリリニアダイヤグラムに整理することにより、水の起源、地下水の寄与の程度や地層中の滞留時間の大小などに関する情報を得ることができる。

また、同位体組成を分析把握することにより、滞留時間や地下浸透した深度などさらに詳しい情報を得ることもできる。

(5) 土壤水分調査

山地の植生が、降水に涵養されている土壤水に依存しており、トンネル施工により水位低下する岩盤地下水の影響を受けていないことを確認するためには、土壤水分調査を実施する必要がある。

複数の深度(数十cm～数m)で圧力水頭を観測し、土壤水分が降水量の影響を受けて変動していることを示すことが一般的である。

事例9：圈央道高尾山トンネル

圈央道高尾山トンネルでは、尾根部で0.25m～6mまでの6深度で圧力水頭を連続観測し、降水量との対比から、土壤水分が降雨に依存していること、トンネル施工の影響を受けていないことを確認するための観測を行っている¹⁹⁾。

(6) 数値シミュレーション

数値シミュレーションは、地下水位低下や河川流量減少など渴水問題の規模を事前に予測するために用いられる。

平野部の都市トンネルでは、地下水浸透流解析により地下水流動阻害などの影響予測を行うことが一般的になっており、すでに多数の適用実績がある。

しかし、山岳トンネルでは浸透流解析のような精緻なシミュレーションを行う上で必要となる地質構造や地下水実態についてのデータを十分に得ることが難しく、これまで「高橋の方法」のような手法により概略予測を行い、影響範囲や恒常湧

水量を予測することが多かった²⁰⁾。

近年、渴水問題を事前にできるだけ詳細に予測することが求められるケースが増え、シミュレーション手法の実績も増えつつある。利水実態から地表水と地下水の両方を扱う必要があるため、実用的に利用できる手法は限られている。事例1で紹介した手法(大島の方法)は筆者が鉄道総研時代に開発したものである²¹⁾。

この手法はトンネル湧水を水収支の1要素として捉え、地下水や地表水など水収支全体の変化を予測するためのモデル解析である。トンネル条件など施工実態にあった柔軟なモデル運用が可能という特徴がある。

局所的な施工への影響を扱う上では限界があるが、渴水問題で必要となる広域の地下水位低下やそれに伴う地表水の減渴水の予測に適しており、すでに多数の適用実績がある。

事例10：丹那トンネル

丹那トンネルの施工実績に基づき、大島の方法によりシミュレーションを実施した事例(図6)によると、解析により算出された地下水位低下域(図7)や河川流量減少域などが、周辺で生じた減渴水被害範囲を概ね再現することができている²²⁾。

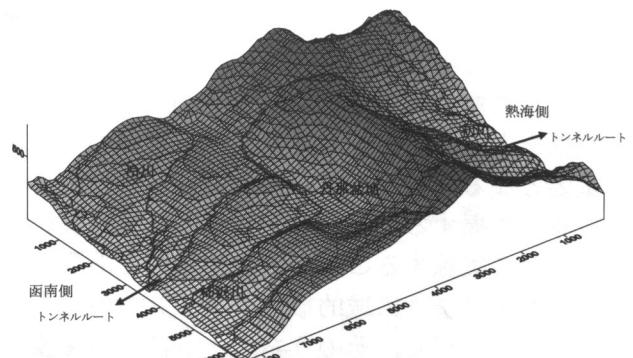


図6 モデル鳥瞰図²²⁾より引用

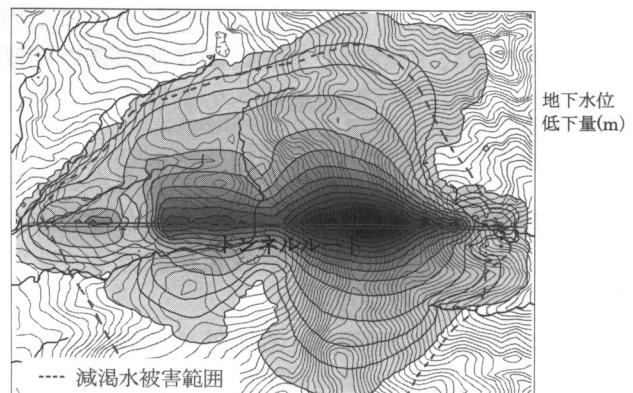


図7 地下水位低下量分布図²²⁾より引用

6. おわりに

東日本大震災の10日後、JR大船渡線気仙沼一鹿折唐桑駅間にある安波トンネルからの湧水を水道が使えなくなった被災者の方々が大事な水源として活用されていることをテレビ報道で知った。地元の女性が「安波山(239m)が授けてくれた神の水だ」と話しておられたのには感動した。

冒頭の「はじめに」で紹介した丹那トンネルにおいても、トンネル開通による湯の町熱海の発展は良く知られるところであるが、その発展には丹那トンネルから湧出する大量の地下水があったればこそということを知る人は少ない。熱海には豊富なお湯はあったが、飲料にできる水はほとんどなかったのである。

この他にも高山線宮トンネル、東海道新幹線南郷山、中央線塩嶺、上越新幹線大清水、長崎本線長崎、山陽新幹線六甲、国道42号蘇武などのトンネルでは坑内から出てくる湧水を貴重な上水道水源として活用している。そういう事例はまだまだ多数あるのではなかろうか。

環境問題への配慮からトンネル施工に伴う渴水問題を負の課題として捉えるだけでなく、「渴水」から「活水」へといったプラスに転化させる発想も必要なのではなかろうか。

気象変動や新たな水質問題の発生などに伴い、安全で安定した良質な水資源が不足する事態も想定される。上述の通りトンネル湧水が地域の重要な水資源となっている事例もあり、トンネル湧水を水資源として積極的に生かす方策が今後さらに必要になってくる。

引用文献・参考文献

- 1) 吉村昭(1990)：闇を裂く道、(株)文藝春秋、文春文庫
- 2) 渡邊貫(1936)：地質工学(増補版)、古今書院(初版本は1935年出版)
- 3) 大島洋志(1999)：建設工事に関わる地下水の様々な問題、平成11年度シンポジウム予稿集、日本応用地質学会
- 4) 大島洋志(2002)：私の地質工学隨想
- 5) 大島洋志(2012)：増補 私の地質工学隨想
- 6) 大島洋志(2004)：私のトンネル路線選定秘伝、応用地質、第45巻第4号
- 7) 東京都(2007)：環境影響評価書—都市高速道路外郭

環状線(世田谷区宇奈根～練馬区大泉町間)事業一

- 8) 足立賢一・千場洋・吉富幸雄・野中良裕(2007)：山岳トンネルにおける高水圧ウォータータイトの施工、トンネルと地下、第38巻11号
- 9) 国土交通省相武国道事務所(2010)：平成22年度第3回トンネル技術検討委員会資料(八王子城跡トンネルの水環境について)、相武国道事務所ホームページ http://www.ktr.mlit.go.jp/sobu/10ir/committee/22_3pdf/1-1.pdf
- 10) 西垣誠監修(2002)：地下構造物と地下水環境、理工図書
- 11) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会(2010)：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壤への対応マニュアル(暫定版)
- 12) 品川俊介(2008)：建設工事における自然由来の重金属汚染への対応の現状と課題、平成20年度特別講演およびシンポジウム予稿集、日本応用地質学会
- 13) 服部修一・太田岳洋・菊池良弘(2007)：八甲田トンネルにおける掘削残土の酸性水溶出に関する判定方法の評価、応用地質、第47巻第6号
- 14) 大島洋志監修(2002)：わかりやすい土木地質学(第3版)、土木工学社
- 15) 大島洋志・西森紳一(1979)：トンネル工事を対象とした水文調査法の研究、鉄道技術研究報告、No.1108
- 16) 萩原博之・三好壯一郎・倉岡研一・田中雅裕(2011)：先進ボーリング技術のブレークスルーを目指して(その2)、トンネルと地下、第42巻12号
- 17) 日本地下水学会原位置トレーサー試験に関するワーキンググループ編(2009)：地下水のトレーサー試験、技報堂出版
- 18) 前田良文・和田信良・近森博・土田淳也(2009)：名水百選など周辺水環境に配慮し中央導坑方式を採用、トンネルと地下、第40巻8号
- 19) 国土交通省相武国道事務所(2011)：平成23年度第1回トンネル技術検討委員会資料(高尾山トンネルの施工状況等について)、相武国道事務所ホームページ http://www.ktr.mlit.go.jp/sobu/10ir/committee/23_1pdf/1-1.pdf
- 20) 大島洋志・藤原幹之(2003)：山岳トンネル工事の環境保全(10)、トンネルと地下、第34巻4号
- 21) 大島洋志(1983)：トンネル掘さくに伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究、鉄道技術研究報告、No.1228
- 22) 大島洋志・藤原幹之(1998)：トンネル掘削に伴う地下水への影響評価、地下水技術、第40巻第8号

地下水環境保全に向けた取り組みと 調査のポイント

【Key Word】

地下水、育水、環境調査、地下水流域、水収支

なかむらひろあき
中村 裕昭*

1. はじめに

地下水環境保全の基本的枠組みの考え方として『健全な水循環の確保』¹⁾の概念が提起されて久しく、この水循環の概念自体は定着したかに見えるが、このフレーズにおける『健全』の意味については、必ずしも汎用的解釈と実務的評価方法は確立していないようにも見える。図1に流域の水循環のイメージ図を示すが、自然界の水循環と人為的水循環が重なっていることを認識することが重要である。

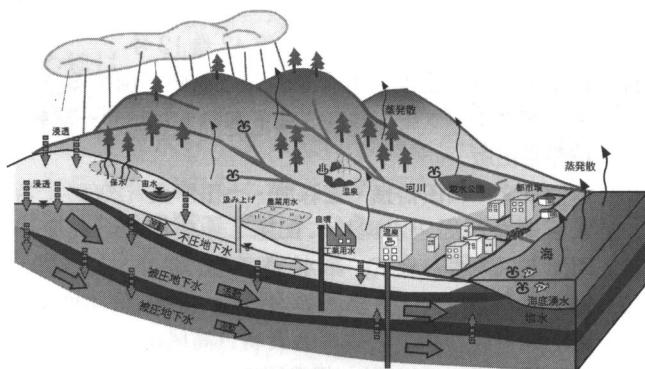


図1 流域の水循環イメージ図

この水循環における健全性評価については、新藤静夫（千葉大学名誉教授）が提唱し、環境アセスメント技術ガイド²⁾に収録された、表1に示す水の環境要素としての機能と資源としての効果・役割²⁾の捉え方が、基本となるものと考えられる。要するに、ここに示した機能と資源の項目ごとに持続可能な形で役割を果たし効果を發揮することが『健全』の主旨であり、この健全性を維持することが地下水環境保全の基本的考え方である。

従来、環境アセスメント等における地下水・地盤環境問題は、過剰揚水や過剰排水、地下水流动

阻害、等による大幅な地下水位低下による地盤沈下に代表され、これらについては多くの苦い経験と実績を踏まえて、評価と対策方法は基本的には確立していると考えられる。ところが水循環の観点で地下水の場と挙動を地下水流动系（涵養域、流动域、流出域）として捉え、表1に示した水の機能と資源の側面で考えると、地下水を揚水したり掘削等の直接的な行為を起こさなくても、土地の植生状況を変えたり、地上に施設を構築したりして、土地利用（土地被覆）状況を変えることで、降水の地表保水量や地下浸透量が減り、地下水の恵みとしての環境機能に障害を起こし、結果、水循環の健全性が損なわれることが容易に理解できる。従って、人間が地球上で利便性を追求しながら文化的に生存を続ける限り、たとえ故意の環境破壊の意図がなくとも、水循環の健全性が悪化傾向にあることを認識することが、地下水環境保全の一歩である。

そこで筆者らの研究会^{3),4)}では、地下水と人間の共生の立場から、地下水環境保全の基本的考え方

表1 水の機能と資源の側面²⁾

分類	機能・資源	機能・資源の効果役割
機能的側面	地象・水象	地象の安定(浸食・運搬・堆積等の安定)、水象の安定(流出の維持と平滑化)
	気象緩和機能	地上気象の安定、都市気候の緩和
	地盤環境維持機能	地盤の維持・安定、海水侵入の防止、地下環境の安定
	物質運搬・収容機能	地下水による物質運搬・収容(良好な水の運搬、汚水物質等の浄化)
	生物生息環境維持機能	湖沼・湿地等の形成、湿地性植物の生育
資源的側面	多種用水資源	農業用水、工業用水、生活用水への利用
	エネルギー資源	冷暖房、消雪、氷室、温泉への利用
	アメニティ空間資源	観光地・親水空間、遺跡・史跡・文化財、温泉地としての利用

* 共生型地下水技術活用研究会/(株)地域環境研究所

方として、従来の『現在の環境に影響を与えない範囲での開発や地下水利用』という考え方から、一歩踏み込んで、『育水策の導入によって、水の保有する機能と資源の役割に支障が生じない好循環の水環境の創出』を提唱^{3)~5)}している。

本編では、この『育水を踏まえた好循環の水環境の創出』のための調査のポイントを示す。

なお、地下水位とは厳密には不圧帶水層に対して用いる用語で、被圧帶水層の場合は、地下水頭高（ピエゾ水頭高）とか地下水圧と表記すべきだが、本編では便宜的に被圧帶水層に対しても地下水位という用語で包括している。

2. 育水を踏まえた地下水環境保全調査のポイント

地下水は流域内で数十年から数千年という極めて長期的スパンの地下水流动系（水循環）のもとに存在する。また、地下水流动特性は自然誘因で常に変動し、人為誘因による変動が更にそれに重なって、全体としての水循環が形成されている。

地下水の容れ物も、その中の地下水の流动特性も、地下水の入口となる降水条件も、地下水流动特性に影響を及ぼす自然誘因の項目も、人為誘因の項目も、地域によって状況が大きく異なることから、地域にあった調査が必要となる。

図2に一般的な地下水調査・解析の流れを示す。

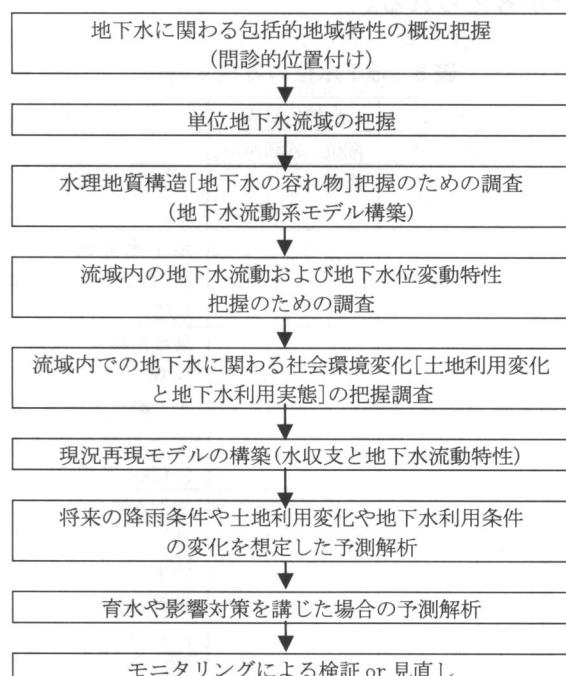


図2 一般的な地下水調査・解析の流れ

地下水が水循環系の一環として地下水流动系（涵養域、流动域、流出域）のものに存在することを踏まえ、水の機能と資源の側面を考慮した地下

水環境保全調査における特徴的な調査項目を以下に列記する。

- (1) 解析領域（地下水の流域）の設定調査
- (2) 地下水位変動パターンの把握調査
- (3) 涵養域調査
- (4) 流動域調査
- (5) 流出域調査
- (6) 水収支検討
- (7) モニタリング

以下、個々に調査のポイントを概説する。

2.1 解析領域（地下水の流域）の設定調査

先ず、検討サイトを含む、水循環の閉じた系としてモデル化できる最小単位の地下水の流域（地下水域）の設定が必要である。この流域の概念は基本的には河川の流域〔分水界（分水嶺）で囲まれた集水地形の範囲〕の考え方順じるが、分水界の扱いが河川流域では地形的分水界（分水嶺）であるのに対して、地下水流域では帶水層基底面の埋没地形に基づく地下水分水界を見極めなければならない。これは周辺一帯の踏査と既往地質資料を駆使しての地質構造解析で求める作業である。

2.2 涵養域調査

『涵養域』で起こっている現象を『降水量』『蒸発散量』『地表面流出量』『地下浸透水量』の関係で図3に示す。これより、地下浸透水量と降水量との関係は下式で表すことができる。

$$\text{地下浸透水量} = (\text{降水量} - \text{蒸発散量}) \times \text{地下浸透能}$$

ここで、地下浸透能 = 1 - 表面流出率

また、降水量 - 蒸発散量 = 可能涵養量

我が国の年間降水量は、800 mm/年（網走）～4,360 mm/年（屋久島）と地域差が大きく、全国

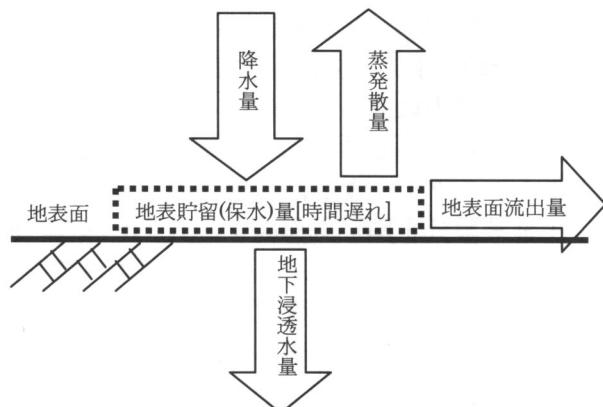


図3 降水量・蒸発散量・地表面流出量・地下浸透水量の関係概念図

平均で 1,700 mm/年程度である。一方、年間蒸発散量は、550 mm/年（南西諸島）～950 mm/年（北海道東縁部）と地域差はあるが、その幅は降水量程ではなく、全国平均で 600 mm/年程度と見られる。降水量は気象庁の観測データで知ることができるが、蒸発散量の実測は難しく、実務上はソーンスウエイトの方法等を用いて推定している。

可能涵養量とは、地域ごとの降水量から蒸発散量を差し引いた地上に残る、降水起源の地表水と地下水を併せた水量である。可能涵養量の内、地表面流出量の割合が『表面流出率』であり、地下浸透量の割合が『地下浸透能』である。従って『表面流出率 + 地下浸透能 = 1』という関係である。

実務的には、表2に例示するように表面流出率と地下浸透能は地目（土地利用条件）ごとに一定値（一般値）を与えて用いることが多いが、実際の現象としては、降水量が多くなれば、地盤は飽和して、地下浸透はできなくなるはずなので、図4のような累加雨量と流域保留量（地下浸透量と地表貯留量との和）との関係を使って、降水量の程度に併せて地表流出量と地下浸透量との割合を変化させて、できるだけ実態に沿った解析も試みられている。

表2 表面流出率の例

土地利用の形態	表面流出率
池沼・水路・ため池	1.00
コンクリートで覆られた土地(法面除く)	0.95
宅地	0.90
道路・鉄道・飛行場	0.90
運動場(排水施設を伴う)	0.80
ゴルフ場	0.50
人工造成植生法面	0.40
山地	0.30
林地、耕地	0.20

注：平成 16 年国土交通省告示第 521 号より抜粋、再構成

地下水環境保全調査のポイントは、地目の配置（割合）が経年に変化することである。過去の経年的土地利用変化を把握することが重要である。但し、過去に遡って年代ごとの土地利用分布図が整備されていることは少ないので、衛星リモートセンシングデータ等から過去の土地利用分布図（土地被覆分布図）を作成する方法もある。衛星リモートセンシングデータは、季節条件等を敏感に反映するので、経年変化を見る場合には季節を統一するとともに、何らかの方法で解析結果を検証する必要がある。

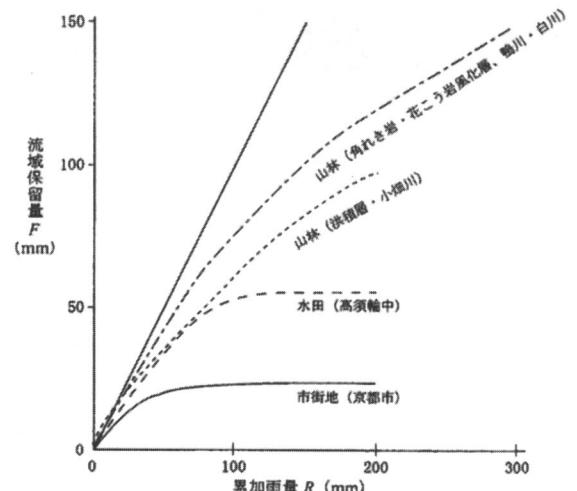


図4 雨水保留量曲線の例⁶⁾

2.3 流動域調査

流動域調査の基本は、地下水の容れ物（水理地質構造）と地下水の実態把握で、帶水層構造および層毎の透水特性の把握と地下水位観測である。

地下水位は、表3に示すように、日変動等の短期的変動もあれば、季節変動等の年間での変動、更に、渴水年や豊水年といった年ごとの状況を反映した経年変動がある。また、変動要因にも降水や台風といった自然的誘因と地下水利用や水田涵養といった人為的誘因がある。これらの組み合わせによって、図5と表4に示すような変動パターンが考えられる。

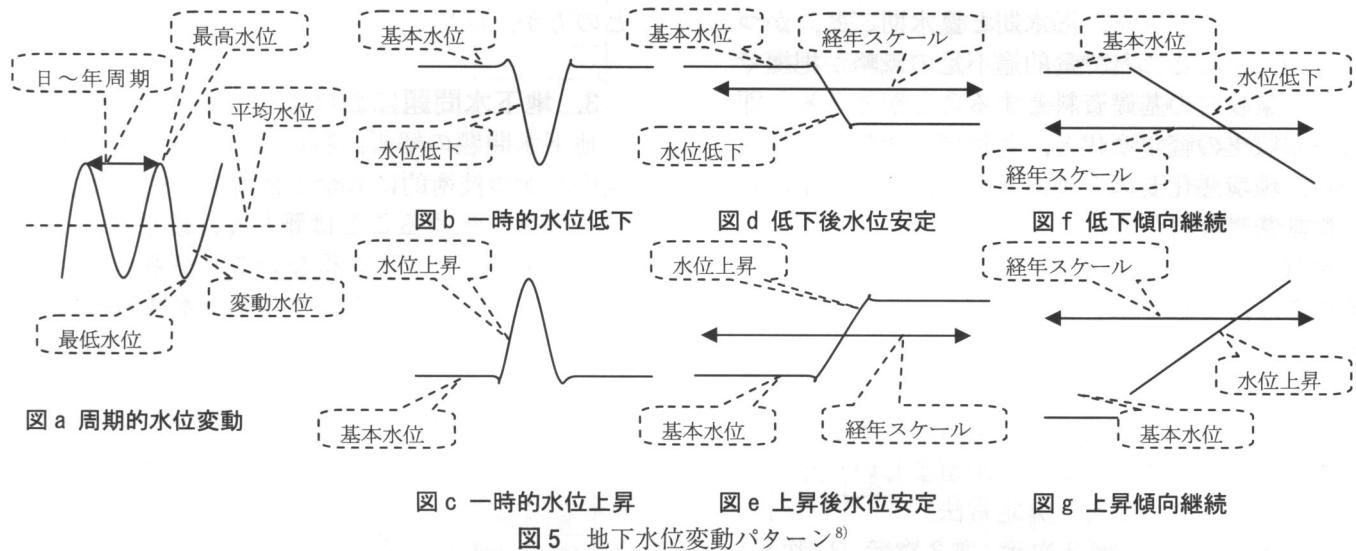
表3 地下水位の各種変動例⁷⁾

変動パターン	自然的誘因		人為的誘因
	周期的変動	日変動	
短期変動	潮位、感潮河川	降雨	生活用水適正揚水
	一日の変動	台風、低気圧、高気圧	地下水位低下工法(数日～数週間規模)
	季節変動	梅雨、秋霖	灌漑用揚水、水田涵養、冷房用揚水、融雪用揚水
年間変動	一時的変動	降雨	地下水位低下工法(数ヶ月規模)
	経年変動	土砂ダム形成、涵養域荒廃(涵養機能低下)、湖沼消滅、地球温暖化(海面上昇)、地球寒冷化(海面低下)	地下水過剰揚水、地下水採取規制効果、地下構造物設置(流動阻害)、河川構造物設置(堰・ダム)
長期変動			

対象地域の想定される地下水位変動パターンが説明できる期間の観測が必要で、観測した観測結果の変動パターンから要因を想定して、その検証

表4 地下水位変動パターンと変動誘因の例⁸⁾

地下水位変動パターン	No.	自然誘因	人為誘因
周期変動	図a	潮位, 感潮河川, 梅雨・秋霖, 積雪	小規模生活用水適正揚水
一時的低下	図b	高気圧	灌漑・冷房用水, 地下水位低下工法(短期)
一時的上昇	図c	降雨, 台風, 洪水, 低気圧	水田涵養
低下後水位安定	図d	涵養域荒廃涵養機能低下, 湖沼消滅	地下埋設物流動阻害下流域, ダム・堰撤去
上昇後水位安定	図e	土砂ダム形成	地下埋設物流動阻害上流域, ダム・堰建設
低下傾向長期継続	図f	地球寒冷化(海面低下)	地下水過剰揚水による地下水位低下
上昇傾向長期継続	図g	地球温暖化(海面上昇)	地下水過剰揚水・地下水位大幅低下後の地下水採取規制効果で地下水位回復(上昇)



データ取得を調査対象とする場合もある。

2.4 流出域調査

地下水は表流水に比べて、目に見えないことと、流速が極端に遅いことに特徴があるが、流出域における湧水は、地下水の出口とも言えるので、湧水の水量と質は、地下水の状況を反映したものである。従って、対象流域内に湧水がある場合には、その湧出水量と水質が、地下水状況評価の貴重な手掛かりとなる。環境基本法に基づく第三次環境基本計画（2006年7月閣議決定）では、環境保全上健全な水循環確保に向けた取組の指標となる参考データの一つに『湧水の把握件数』を挙げている。これは、湧水が地下水環境のモニターであることと、湧水件数を経年的に把握することで、地下水環境の健全性評価の手掛かりになることを期待したものである。

2.6 水収支検討

水循環の観点からは、地下水の流域内に出入りする水の収支把握が極めて重要である。

図6と表5に地下水単位流域内の収支項目の関係を示す。

水収支の基本的評価は

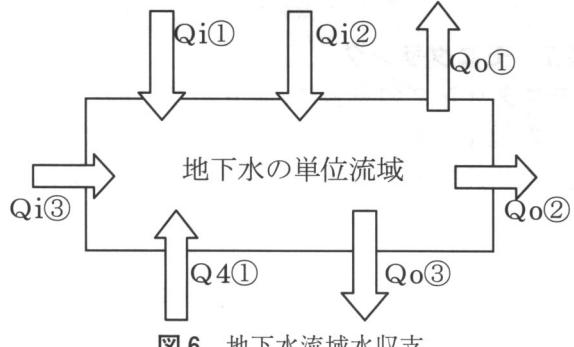


図6 地下水流域水収支

表5 単位地下水流域の水収支項目

区分	記号	水収支項目
流入水	Q_i①	降雨浸透地下水
	Q_i②	人工涵養
	Q_i③	上流側地下からの流入水
	Q_i④	帶水層下位層からの流入水
流出水	Q_o①	地下水揚水
	Q_o②	下流側地下への流出水
	Q_o③	帶水層下位層への流出水

$\sum(\text{流入水}) - \sum(\text{流出水}) = 0 \Rightarrow \text{地下水位一定}$
 $\sum(\text{流入水}) - \sum(\text{流出水}) > 0 \Rightarrow \text{地下水位上昇}$
 $\sum(\text{流入水}) - \sum(\text{流出水}) < 0 \Rightarrow \text{地下水位低下}$
 となる。

ここで、

$$\Sigma (\text{流入水}) = Q_i \textcircled{1} + Q_i \textcircled{2} + Q_i \textcircled{3} + Q_i \textcircled{4}$$

$$\Sigma (\text{流出水}) = Q_o \textcircled{1} + Q_o \textcircled{2} + Q_o \textcircled{3}$$

即ち、単位流域内に入る水よりも外に多く出れば、流域内の水は不足し、地下水位は低下する。逆に、単位流域内に入る水よりも外に出る水量が少なければ、流域内の水の貯留量が増えて、地下水位は上昇する。地下水は水循環のもと、流動するとは言え、有限である所以である。

これらの水収支を、渴水期と豊水期ごと、かつ経年に求めることで量的過不足の概略が把握でき、対策検討の基礎資料とすることができます。即ち、水収支の経年変化と、各種環境変化との相関から、環境悪化要因を抽出したり、各種保全施策の検証基礎資料とすることができます。

水収支計算の方法は下記に例示するように多種多様あり、それぞれ一長一短があるので、目的にあった方法を選択する。

- ① 年間水収支法（水収支項目ごとの年間総水量間の収支）[同じ要領で、渴水期と豊水期の各短期間でも実施することが望ましい]
- ② タンクモデル解析（非定常法）
- ③ 有限要素法（平面2次元、準3次元、3次元）
- ④ 差分法

2.7 モニタリング

モニタリングの意義は、表6にまとめたように、現在の地下水状態（量・質・水温、流動性、等）の把握と各種地下水施策（保全、育水、等）の検証として位置付けることができる。

表6 モニタリングの意義

現在の地下水状態(量・質・水温、流動性、等)の把握	バックグラウンドの把握 異常(環境変化)の検出【環境監視】
各種地下水施策(保全、育水、等)の検証	住民へのアカウンタビリティの基礎情報 次の施策検討への基礎情報

事前調査としてモニタリングを実施していればバックグラウンド値の把握ができ、その後の継続調査によって、異常（環境変化）の検出（環境監視）の役割を果たすことができる。

各種地下水施策を講じていた場合、このモニタリングで得た情報によって効果が検証できれば、住民へのアカウンタビリティの実証的検証情報として使えるし、次の施策検討の貴重な指標となることも期待できる。近年新たに期待されているモニタリングの役割である。

このモニタリングは、地下水位観測井や既設井戸が活用でき、湧水が分布する地域では湧水も活用できる。

モニタリングは、できるだけ多くの観測地点を確保して、できるだけ高頻度で長期間継続することが理想である。極端な言い方をすれば、絶対値としての精度の高い調査を単発で実施するよりも、相対的精度が維持できていれば、ラフなモニタリングでも長期継続してデータが蓄積されるこの方が、環境的視点からは、重要と考える。

3. 地下水問題におけるトレードオフの課題

地下水問題の解析、特に広域地下水問題では、規模的かつ技術的にも全て自前で直接調査して必要な情報を集めることは難しく、既往データ⁹⁾や一般値を活用せざるを得ないことが多い。

目的や立場別に必要とする地下水情報項目を表7に例示する。

表7 地下水情報項目の例示

分野・立場・ニーズ・他	必要な地下水情報項目
地盤沈下地帯	地下水位の経年変動
地下水湧出浸水地帯	地下水位の連続観測
地下水・地盤汚染	地下水の流向と水質
地下横断施設埋設による流動阻害対策	地下水の流向と水位
地中熱利用	地下水温
地下水利用地帯(揚水利用)	地下水位の連続観測、水質
井戸開発	揚水可能量、適正揚水量、水質
環境アセスメント	地下水現況(水位、流向、水質、水温、他)のバックグラウンド
地下水環境モニタリング	地下水位、流向、水質、他
地震モニタリング	地下水位、水質、ラドン濃度、他
地盤解析	設計地下水位(定義はあいまい)

これらの情報には、個々のデータ間で精度と品質の差があったり、誤差や不確実性も伴うことから、データの取りうる範囲で安全側の設定をすることがある。この安全側の考え方と程度が、問題によって異なる場合があり、この認識を持たずに、既往データを活用したり、一般値を使って検討すると、実態に合わない的外れとなることもあります、注意が必要である。地下水問題におけるトレードオフ的課題の代表的事例を参考までに以下に例示する。

- ① 地下水位：表8に一例を示すが、問題によって地下水位を高めに設定した方がよい場合と、低めに設定した方がよい場合がある。

1つのサイトであっても課題ごとに設定地下水位を変えて検討する必要がある。

表8 設計地下水位における安全側設定の選択例

地盤工学的課題	設計地下水位		安全側設定
	最高水位	最低水位	
液状化検討	○		
圧密沈下検討		○	
すべり安定解析	○		
直接基礎支持力	○		
揚圧力	○		
掘削排水計画	○		
木杭導入		○	
周辺への影響		○	
地下水汚染	○		
湿性生態系への影響		○	
乾性生態系への影響	○		
地盤汚染対策	○		

- ② 表面流出率 ($\approx 1 - \text{地下浸透能}$)：総合治水としての河川流出解析や下水排水計画では、表面流出率を取りうる範囲で大きめに評価するが、降雨時の斜面安定解析では表面流出率を取りうる範囲で小さ目〔地下浸透能 ($1 - \text{表面流出率}$) を大き目〕に評価した方がよい場合がある。また、地下水利用計画では、地下浸透能を大き目、小さ目ではなく正確に評価することが求められる。
- ③ 透水係数：同一地域で工事掘削と地下水利用のための井戸掘削がある場合、工事掘削では透水係数を大き目に評価、井戸掘削では透水

係数を小さ目に評価する。

4. 育水を踏まえた地下水利用の考え方

先にも述べたが、人間活動の拡大によって、顕著な開発行為が行われていなくても、徐々に自然環境の悪化を招き、水環境の健全性も損なわれていくことが懸念されている。また、水は人間の生存にとって欠かせない環境要素であり資源である。否応なく水資源の確保は継続的に実施していく。従って、顕著な開発時にだけ保全策を検討実施するのではなく、水環境保全の立場からは、日常的に育水に関わる施策を実施し、水循環健全性の好循環を作り出し、そのような枠組みの中で、必要な水資源を活用していくことが、これからは望まれる。育水を踏まえた地下水利用の枠組みを表9にまとめた。

また、育水を踏まえ地下水利用モデルのII～Vについて、共生の視点、涵養、取水、還水につい

表10 人工的水循環のパターン⁵⁾

モデル	共生の視点	涵養	取水	還水
II	消極的共生	流域単位での積極的涵養域保全	適正な量の範囲内での取水	既往システム
III	積極的育水	上流域で人工涵養	特定サイトで取水	既往システム
IV	ミティゲーション育水	人工涵養リチャージ	特定サイトで取水	近傍浄化還水
V	水循環確保	—	取水還水最小化	

表9 育水を踏まえた地下水利用の基本的考え方

考え方区分	地下水は誰のものか？	地下水利用上の制約	環境思想	地下水利用の基本的考え方
従来の考え方	民法【明治29年[1896年]制定】の規定『第207条 土地の所有権は、法令の制限内において、その土地の上下に及ぶ。』を踏まえ、土地所有者の私権の範囲とされ、右記の制約をクリアすれば、自由に只で利用できると解釈してきた。【私水的位置付け】	地下水規制法令に準拠。環境影響(地盤沈下、塩水化、涸渇、等)を起こさない。	環境配慮型	I 自然界の水循環の許容範囲内で使う
これからの方考え方	水(地下水を含め)は人類および地球生物生存に欠かせない資源であり環境要素である。水循環の一環のもと地下水流动系をなして存在。地下水の量と質は流域全体の保全努力があればこそ、維持されている。上記を踏まえ、水および地下水は流域の有限な共有資源・共有財産と解釈する。【公水的位置付け】従って、地下水は決して只ではないし、個人の都合で独占したり汚したりしてはならない。	上記に加え、流域内での合意形成と応分の負担が必要。新たなルールが必要。	II	流域単位で貯蓄(水質保全)して、その範囲内で使う
			III	サイト単位で貯蓄(水質保全)して、その範囲内で使う
			IV	使ったら、使った分を所定の水質水温に戻して還す
		事業単位で実施可能	V	利用後水の再生水や雨水を利用する

て比較を表10にまとめた。ここで既往システムとは、主にいわゆる下水道とその終末の浄化システムをイメージしている。

5. 育水の概念と地下水保全・制御の要素技術例

『育水』は水と人類との共生を踏まえた『健全な水循環確保』に欠かせない人類の水管理行為で、具体的には水量のコントロールと水質のコントロール技術の両者を指す概念である。

流域の秩序に反した地下水利用を行えば、水環境の悪化（水量低下、水質悪化、地盤沈下）を招き、水循環の健全性が低下・喪失し、地下水利用規制を導入せざるを得ない環境となることは前述した。

一方、流域の秩序に則った地下水利用が行われれば、水環境の保全と健全な水循環の確保が維持され、地下水利用の持続可能性も確保される好循環を創出できる。

ここで言う秩序の1つを『育水』と考えている。

このような概念のもと、水環境全般に共通する施策の概念として図8に示すように『利水』『治水』『育水』を併せて考えることが重要である。

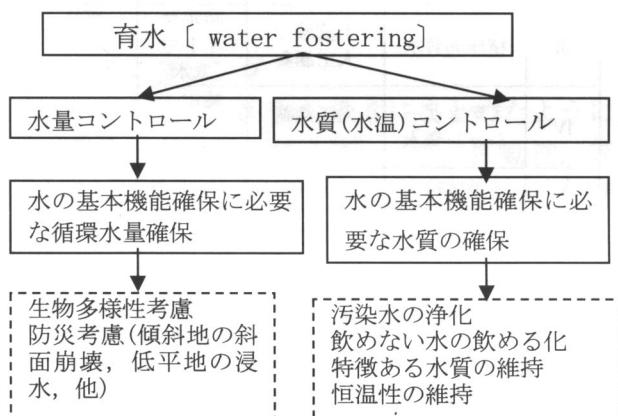


図7 育水による制御の概念

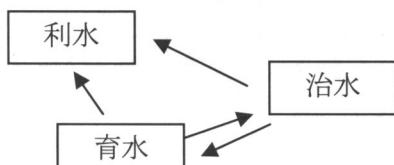


図8 『利水』『治水』『育水』

現在各地で既に実施されている地下水保全・制御技術から、育水に活用可能な要素技術を表11に例示する。

表11 地下水保全・制御の要素技術例

大区分	No.	手法例
涵養域保全	1	土地利用管理(用途保護・制限)
	2	森林保全
	3	水田の涵養機能維持
人工涵養	4	涵養域での人工涵養
	5	流動域での人工涵養
	6	使用後浄化水の還水
	7	工事揚水の覆水(リチャージ)
雨水浸透促進	8	人工施設内への漏水の覆水(リチャージ)
	9	雨水浸透施設設置
河川構造物	10	浸透型の調節池・調整池・遊水地・他
	11	ダム、堰
地下構造物	12	地下ダム、地下水迂回工法
その他	13	湧水保全・復活、統合的水管理

6. 地下水の多様性とコンプライアンス

地下水の流動性と地下水が果たしている機能を踏まえれば、流動地下水は流域の共有資源・共有財産であるとの基本認識と、水環境（水循環）の保全と水利用計画は、健全な水循環確保の観点での開発管理等は、流域単位で管理運用するのが望ましいと考える。但し、この地下水の単位流域は、地表の河川流域と必ずしも一致しないことと、行政機関の管轄が複数に跨ることが多く、施策の策定に当たって制約が多い。

地下水の見方は表12に例示するように極めて多様である。

表12 地下水の多様性

所有権	公水的側面、私水的側面
機能	水(地下水)は人類および地球上の全生物にとって必要不可欠な環境要素(機能・資源)
存在形態	水は循環をなして存在→地下水は水循環の一形態(地下水循環系)
有限性	地下水は有限(量と容れ物)
地域性	水の地域特性

この内、地下水の所有権は現時点では、必ずしも公水と私水とで二者択一とすべきではないと考えている。基本は公水的側面と私水的側面を両立させ、地域の事情に応じて公水的側面と私水的側面の割合が異なるという考え方方が現実的と考えている。

また、地下水は地域特性に基づく以下に示すような有限性を念頭に考える必要がある。

- (1) 量〔流域の気候(降雨、降雪条件)、地形(集水地形)、土地被覆・土地利用(浸透能)〕
- (2) 容れ物としてのキャパシティ

『育水』の概念は、地下水だけを特別扱いするのが主旨でもないし、地下水を大いに使いましょう、という啓発でもない。あくまでも、健全な水循環確保の観点での開発管理も同じ枠組みの中で考え、表流水を含め環境との共生を考慮した各種水資源利用方法のメニューの中に、きちんと地下水を位置づけた上で、総体的に地下水の有効性が検証された時に、効果的に地下水を使えるようにしたいというのが狙いである。

地下水利用は、物理的条件だけではなく、水環境の機能維持の理念と必要な水資源確保の中でのバランス感覚、即ち、地下水利用に関わるコンプライアンスが重要と考える。従って、育水を踏まえた地下水利用や開発と地下水保全対策に当たっては、地下水利用に関わるコンプライアンスを踏まえた市民啓発・連携が重要と考えている。

図9に地下水利用に関わるコンプライアンスのイメージを示す。



図9 地下水利用のコンプライアンス

7. おわりに

地下水流动特性は自然誘因で常に変動し、人為誘因による変動が更にそれに重なっている。従つて、自然界の水循環と人為的水循環とを分けて考え、その変動特性の中で健全性の範囲を見極めていかなければならない。しかも、これは地域ごとに事情が異なるが、『地下水は有限な流域の共有資源・共有財産』の基本理念のもと、『育水』施策を前提とした流域ごとの健全性の評価基準の合意形成を設定していかなければならない。このように地下水の複雑な変動形態と長期的な変動特性を考えると、コンプライアンスなくしては成立し得ない世界である。

最後に地下水環境保全を踏まえた調査のポイントを以下に列記する。

- ① 単位地下水流域（閉じた系としての水循環をモデル化できる最小単位）で考える
- ② 単位流域内での大局的な地下水流动特性（地下水流动系モデル）の把握
- ③ 単位流域内（特に涵養域）における過去から現在に至る長期的な土地利用変化の把握
- ④ 単位流域内における過去から現在に至る長期的な地下水利用実態の把握
- ⑤ 短期・中期・長期それぞれの地下水位変動特性の把握
- ⑥ モニタリングデータの蓄積と検証

引用・参考文献

- 1) 健全な水循環の確保に関する懇談会報告書：健全な水循環の確保に向けて～豊かな恩恵を永続的なものとするために～、環境庁水質保全局企画課地下水・地盤環境室発行、1998.1.
- 2) 環境省総合環境政策局編集・大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会編：環境アセスメント技術ガイド「大気・水・土壤・環境負荷」、(社)日本環境アセスメント協会発行、p. 8, 2006.1.
- 3) 西垣 誠監修・共生型地下水技術活用研究会編：都市における地下水利用の基本的考え方【地下水と上手につきあうために】、共生型地下水技術活用研究会発行小冊子、2007.12.
- 4) 西垣 誠監修・共生型地下水技術活用研究会編：共生型地下水適正利用ガイドライン【地下水と上手につきあうために】、共生型地下水技術活用研究会発行小冊子、2010.3.
- 5) 中村裕昭：地下水を上手に使いながらも健全な水環境を後世に引き継いでいくために—地下水利用コンプライアンスと育水—、地下水地盤環境に関するシンポジウム 2011—水環境の保全と育水—, pp. 1~8, 2011.11.
- 6) 農林水産省農村振興局企画部資源課監修：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説、計画「排水」、基準、基準の運用、基準及び運用の解説、付録・技術書、社団法人農業土木学会発行、p. 218, 2006.3.
- 7) 地下水を知る編集委員会編：地下水を知る、地盤工学会、p. 77, 2008.5.
- 8) 中村裕昭：地下水位に関する考察、第41回地盤工学研究発表会（鹿児島）、論文 No. 577, pp. 1153~1154, 2006.7.
- 9) 中村裕昭：地下水に関するデータベースの現状、基礎工, Vol. 40-2 (463), pp. 23~26, 2012.2.

洪水時の流量観測手法における新しい動向

【Key Word】

浮子測法、橋上操作艇 ADCP 計測法、非接触型流速計、電波流速計、PTV-トレーサ法

ふかみかずひこ*

1. はじめに

将来起こりえる、もしくは、現在起こりつつある洪水に対して的確に備えるために、洪水時の河川流量観測データは最も基礎となるデータであり、河川計画・管理の基盤である。この流量観測に係る現行の各種技術基準^{1), 2)}は、昭和 20~30 年代初頭に確立され、全国規模での長期にわたる一定品質のデータの収集・蓄積に貢献してきた。

しかし、近年では、少子高齢化社会の進展に伴い、省人化・省コスト化を厳しく求められる一方で、観測データの品質を確保しつつ、迅速な情報公開が求められるようになってきており、これらの新しい時代のニーズに対して、従来の手法そのまでの浮子測法のみでは十分に対応できなくなることも懸念されている³⁾。

一方、昭和 30 年代から約半世紀を経て、従来不可能と考えられていた洪水流水中の 3 次元流速分布を計測したり、流水表面の流速を無人で連続的に計測したりできる新世代の計測技術が、今や利用可能となってきている⁴⁾。これらの新しい計測技術の特性・限界を把握した上で適材適所で有効に活用しつつ、国土建設から国土マネジメントへ移行すべき時代において河川管理に対する上述の新しいニーズに対応できる、適切な観測技術の選択肢を早急に準備し確立することが今求められている。

以上の背景の下で、土木研究所では国土交通省および同国土技術政策総合研究所と連携しながら、洪水流量観測技術の高度化に一貫して取り組んできた。そして、今後の洪水流量観測のあり方について提案し確立させるために必要となる具体的なデータが少しずつ蓄積されてきた段階である。

る。本論文では、それらの成果をまとめて俯瞰することで見えてきた、近い将来へ向けて確立すべき洪水流量観測の新しい技術を紹介することとしたい。

2. 従来の洪水流量観測技術の課題

2.1 浮子測法の概要

我が国の河川は、地質的に新しく脆弱な環太平洋変動帯にあり、河川長が短く急勾配という点で欧米などの大陸域の河川と大きく異なっている。また、台風や梅雨期末期の豪雨など、しばしば強い強度の雨に襲われる。このため、河川の洪水も大陸河川の中下流と異なり非常に流速が早く、土砂流出に富み、ごみや流木等も多く流下する。このため、低水時の流量観測に一般に利用される可搬型流速計を流水中に直接投入することで、河川断面内の流速分布を直接計測することは困難であり、危険もある。このことから、我が国では、橋梁や専用投下施設から、川幅に応じて 10~20 本程度の流速測線毎に浮子を投下し、ある助走区間を経た後の 50~100 m 程度の計測区間内の浮子の流下時間を計測することで、その流速測線が代表する区分断面毎の区分流量値を求め、それを積算する浮子測法が、洪水時の流量観測手法として一般に用いられている。時には 10 m/s を超える流速を記録する急流河川も含めて、最も幅広い洪水の流況条件において安全確実に適用できる唯一の実用的手段として、浮子測法は我が国の洪水流量観測を長らく支えてきた。しかし、以下に述べるような課題も抱えている。

2.2 現行の浮子測法が抱える課題

まず、技術基準を遵守して観測していれば本来は避けられるはずの運用上の課題がある。すなわち、浮子測法が人力作業に全面的に依存しているがために、

* (独)土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター

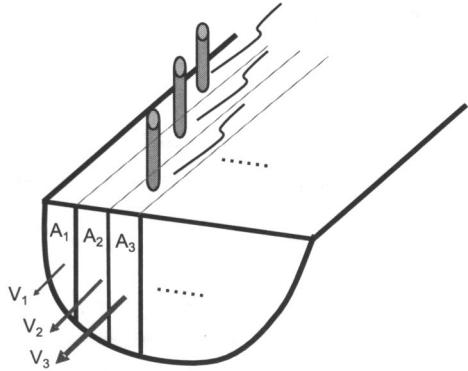


図1 浮子測法の概念図

- a) 不十分な流速測線の設定
- b) 浮子吃水深・更正係数等の不適切な運用
- c) 洪水立ち上がり部や洪水ピークの欠測
- d) 中規模洪水の観測データの不足

といった課題が時折発生する⁵⁾。これらは、観測野帳記録データから流量を算出する段階のみならず、水位流量曲線(HQ式)の作成・照査においても障害となり(特にc), d)), 結果として洪水流量観測データの品質低下を招くことがある。これらの運用上の課題は、必要な観測体制を基準通り確保することで、本来解決できるはずのものであり、浮子測法そのものが有する技術的課題とは区別して考えるべきである。しかし、河川行政を巡る厳しい予算的・人的制約の下で、そのような理想的な体制を確保できないことが少なくない現実は直視する必要がある。

一方、現行の浮子測法が本質的に抱える技術的課題としては、以下が挙げられる。

- e) 橋脚後流や植生繁茂の影響や、二次元的な収束・発散的な流況が存在する場合に、浮子が異常流下する場合があること
- f) 流速分布そのものの乱れの影響を浮子では完全には捉えきれないこと
- g) 浮子の流下速度を深さ方向の平均流速に変換するための更正係数が、流速分布により変化し得ること
- h) 洪水中の河床変化を捉えていないこと

これらの課題の中で現実に精度に大きな影響を与えていているのは、主にa), e)による誤差と考えられ、後述する浮子測法の改良(PTV-トレーサ法)で対応できる可能性がある。一方、f) ~h)の影響は、上記の影響に比べると現実には小さいと想定されるとは言え、浮子測法のみでは対応が難しい。また、浮子測法の場合、様々な水位と流量との関係を図上にプロットし、滑らかな水位流量関係式(HQ曲線)を作成するプロセスが果たす誤差抑止の役割も重要である。このため、十分な洪

水観測データを収集して当該出水期のHQ曲線を確定させた後でないと洪水流量観測値を公表することが難しい。

これらの課題を克服できる新しい方法論を提案すること無しで、これから河川管理への多様なニーズに対応することは容易ではないと想像される。

3. 今後の洪水流量観測技術に求められる方向性

昭和30年代ではなく現在の現場の河川管理事務所の業務体制を前提とすると、省コスト・省人型であると同時に精度を高いレベルで安定させることのできる流量観測手法を今後確立していくことが必要と考える。

流量を算出するためには、流水断面内の「流速分布」と「断面積(河床形状)」を計測する必要がある。その意味で、超音波ドップラーフロー流速計(ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler)を橋上からロープで係留しながら操作(曳航)するボート(橋上操作艇)に搭載することで、流水断面内の3次元流速分布のみならず河床形状も含めて網羅的に把握する手法(橋上操作艇ADCP計測法もしくは曳航型ADCP計測法)は、流水中の流速分布を最も少ない仮定で網羅的かつ精度良く把握できる手法として、最も有力な選択肢である。少なくとも5人を要する浮子測法と異なり、3人での観測が可能であり、省コスト・省人型の手法とも言える。近年のADCPを利用した洪水流量観測はほとんどこの手法に依拠しており、浮子測法ほどの汎用性の確保は難しくとも、幅広い流況条件の範囲において浮子測法を置き換えることができる実用性を有しつつ、同時に現場で計測可能な最も精度の高い流量(基準流量)を観測できる手法として、大いに期待されている。

しかしながら、橋上操作艇ADCP計測法といえども人力での観測作業であることには変わりなく、前述のc), d)の点の克服は容易ではない。また、急流河川等での河川表面が大きく波立つような極めて荒れた流況条件ではこの方法でもADCPを適用することは難しいと想定される。このことから、ある河川水系の重要な観測所や上流部の観測所では、何らかの固定設置型のセンサを活用することで、無人で安全・確実かつ迅速に連続的な流速・流量の変化を自動計測する手法を確保することも同時に必要である。そのような条件を満たす固定設置型のセンサとしては、洪水時でも流水にセンサを接触させることなく、安全・確

実際に高速流の計測ができる非接触型流速計（電波流速計等）の活用が最も有力な選択肢である。

したがって、現地に設置する固定式の非接触型流速計による流量計測法により、無人での自動連続観測を可能としつつ、非接触型流速計で計測される表面流速を全断面の平均流速・流量に変換するために必要となる流速補正係数を適切に校正するために、非固定式の橋上操作艇 ADCP による「基準流量」観測を定期的および非定期的に組み合わせて実施することが、省コスト・省人型であると同時に精度を高いレベルで安定させることのできる流量観測を最も早く確実に実現できる方策と考えられるのである。

なお、橋上操作艇 ADCP 計測法といえども、上述のように厳しい流況条件下で適用ができない状況が想定される。この場合の基準流量計測法としては、橋から投下した浮子をビデオ観測により追尾して流下速度を求める PTV-トレーサ法の利用を考えられる。

以下、これらの手法についてそれぞれ詳しく紹介する。

4. 橋上操作艇（曳航型）ADCP 計測法

4.1 概要

ADCP の計測原理を図 2 に示す。ADCP 本体を流れの主流方向の鉛直方向に向けるように設置し、流れに沿う斜め方向と流れに逆らう斜め方向にそれぞれ超音波パルスを発信する。2 方向の様々な深さからのパルス反射波におけるドップラー効果による周波数変調から、それぞれの深さにおける V_x と V_y の 2 つの流速成分を得る。A, B 点の流速ベクトルは等しいと仮定するが、主流の流下方向（X 方向）の平均流速を議論する限りにおいて、乱れ成分の影響は小さいと考えられる。また、紙面に鉛直な方向にも 2 方向にパルス

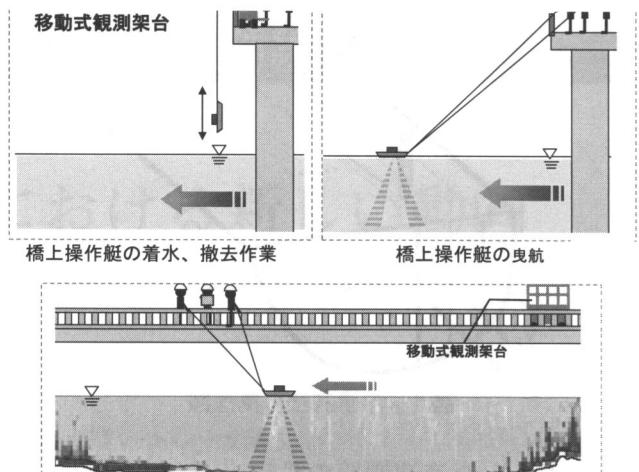


図 3 橋上操作艇搭載 ADCP による洪水流量観測概念図



図 4 ADCP 搭載ボートを係留・曳航するための移動式観測架台の例

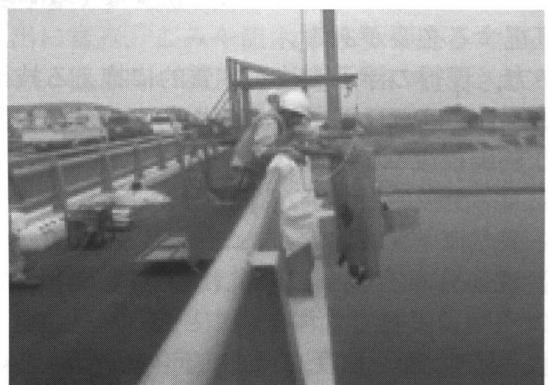


図 5 橋上操作艇の着水・撤去作業

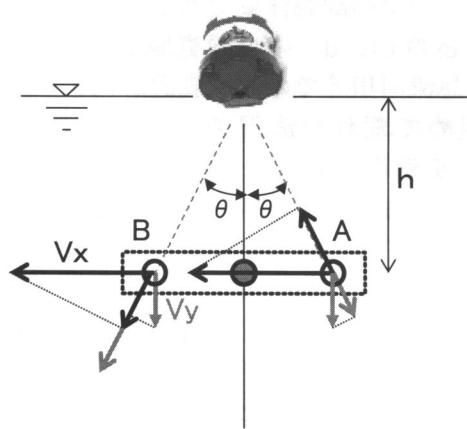


図 2 ADCP の計測原理



図 6 2 人による橋上からの ADCP 搭載ボートの曳航

を発出することにより、3次元流速成分を計測することができる。

我が国におけるADCPの洪水流量観測への適用実験は、ラジコン（RC）ボートにADCPを搭載して観測する研究から始まった⁶⁾。RCボートによる方法は、橋梁の有無に関係なく洪水流量観測に最も適した地点を自由に選定できる利点がある一方、橋上操作艇にADCPを搭載する方法（図3）の場合、橋上から移動式観測架台（図4、5）もしくは人力（図6）でロープで常に曳航することから、より安全で簡便な方法として、幅広く推奨できる。

4.2 洪水時でもADCPにより正確な流速分布を得るための工夫

橋上操作艇ADCP法ではボートを横断方向に移動させながら観測することから、ADCPで計測される速度成分には、対地移動速度成分が含まれる。かつては河床深さ位置におけるドップラー測定値を対地速度と考えるボトムトラッキング法が用いられていたが、洪水時に河床で掃流砂が移動している条件下では、河床深さ位置の流速をゼロと仮定することができない。そこで、現在では、RTK-GPS情報やGPSのVTG（Vector track and Speed over the Ground）情報等により対地速度（数cm/sの精度）と位置情報を同時に得る手法を推奨している⁷⁾。

洪水時の波によるボートの揺れは、流速や水深測定の誤差要因になることが懸念されるが、岡田（2010）⁸⁾は、揺れたときの内部角度センサの時間遅れによる流速誤差と傾きによる水深誤差方向が逆となるため、現実には傾斜角15度でも流量としての誤差は3%程度に止まり、実際にはさほど大きくなっている。

しかしながら、ボートの揺れは、計測を不安定化させしばしば欠測の原因となるため、できるだけ抑制する方が望ましい。萬矢ら（2010）⁹⁾は、洪水のような高速流では、いわゆる単胴型（モノハル）よりも三胴型（トリマラン）のボートの方が揺れが少ないと、かつ、両脇の副船体が適度に小さい方が、逆に波の影響を受けにくくなり安定することを明らかにした（図7）。これにより、ボートの揺れによる欠測を大幅に低減し、典型的な急流河川として知られる姫川山本地点においても、流速6m/s程度までADCPによる観測を可能にする実績を挙げている。

4.3 残されている課題

洪水時の濁度が非常に高い条件（もしくは気泡の発生状況）が欠測の原因となったと見られる事例があり、その原因究明を図り、欠測を極力なくすための方策を検討する必要がある。

またADCPは、計測原理上、センサ近傍および河床近傍に必ず不感域がある。一般に洪水時は水深が大きいためその影響は無視できるが、水深が3m程度以下と浅いときは、その不感域における流速分布をどのように仮定するかによって算出流量への影響が大きくなる場合があり、注意が必要である。

5. 非接触型流速計による無人自動連続流量観測システム

5.1 概要

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センサであることから、表面流速値を適切に深さ方向の平均流速値に変換することで、特に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を構築

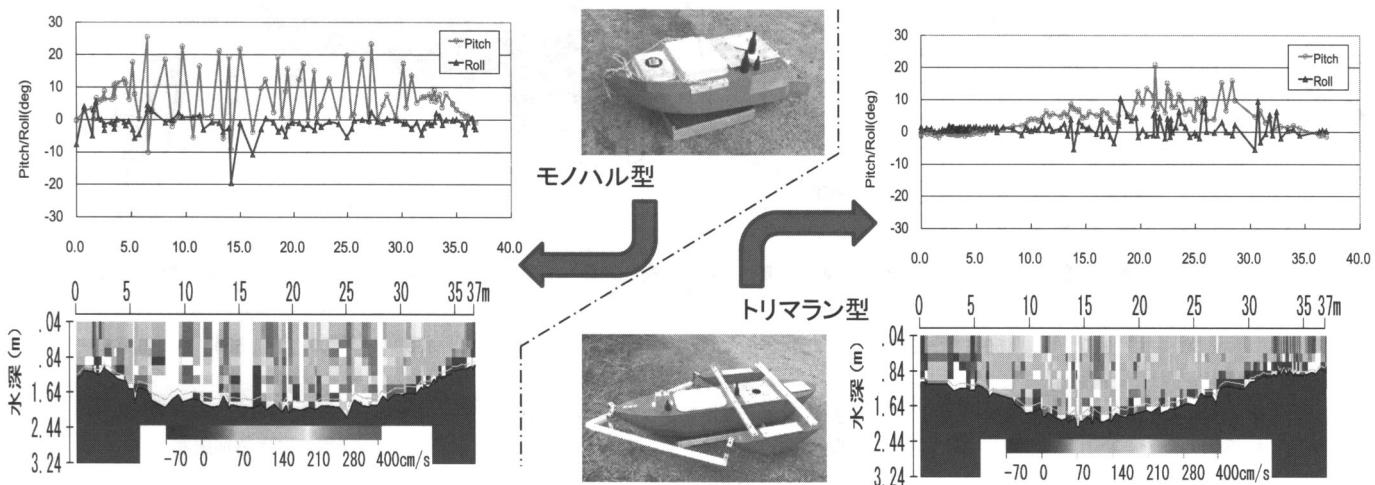


図7 ボートのタイプによる揺れ及び断面内流速分布計測（欠測）状況の違い（左：モノハル型、右：高速流対応トリマラン型）
※流速分布計測図（下側）において、白色部が欠測域を示す。

できる大きな可能性を秘めている。これにより、2.2で述べた浮子測法の運用上の課題の多くを克服できるものと期待される。

非接触型流速計は、大きく分けて、空中から電波や超音波を水面に向けて発射して河川の表面流



図8 橋桁下に固定設置した電波流速計

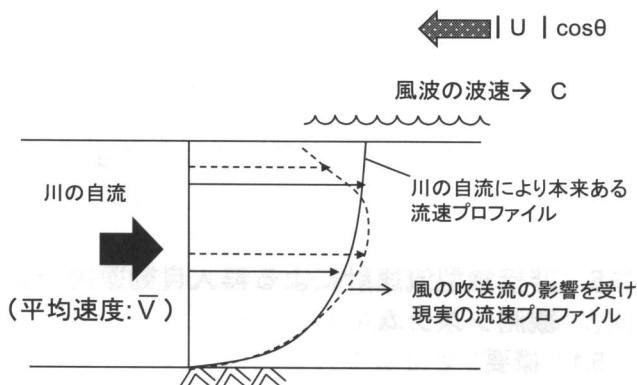


図9 表面流速（波速）への風速（吹送流）の影響概念図

* U : 河川表面上の風速, θ : 風速と河川自流のなす角

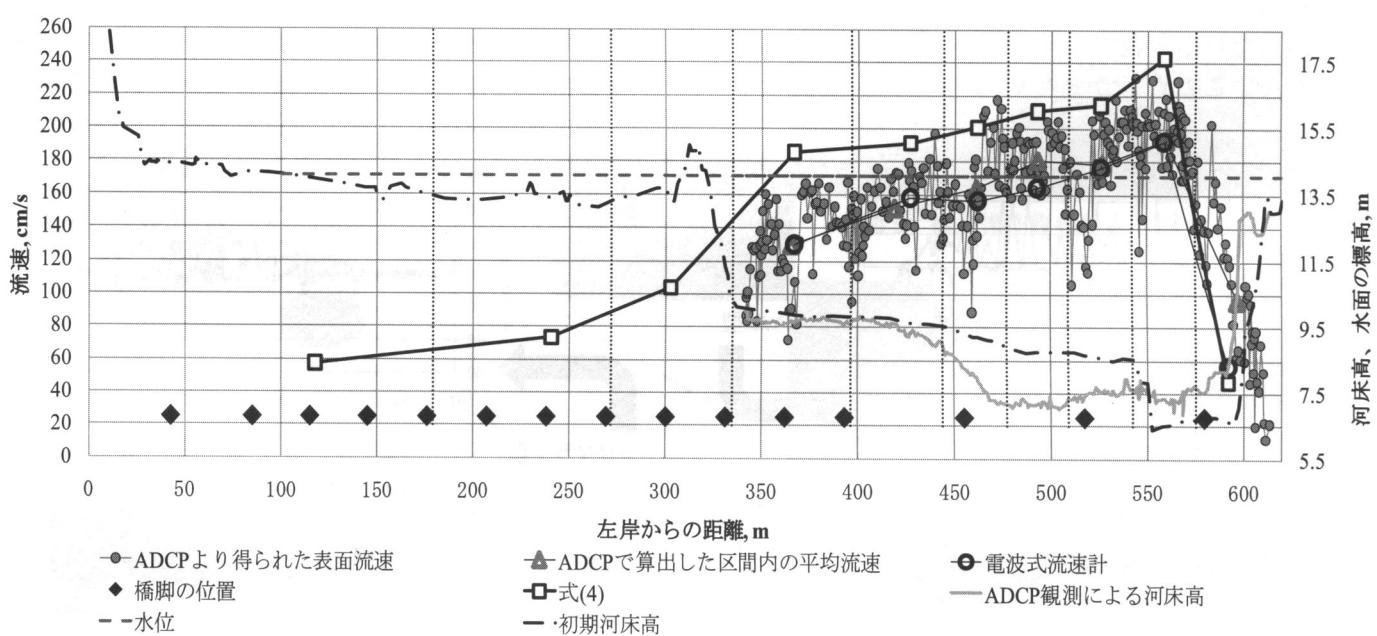


図10 橋上操作艇搭載 ADCP と電波流速計による流速分布計測値の比較

*前者による区分断面平均値（青△）と後者による区分断面平均値（黒丸）が良く一致

速を測るドップラー式流速計と、ビデオ画像から河川表面の波紋や濃淡等の模様の速度を測る画像処理式流速計との2つに分類することができる。その中で、既に最も多くの適用実績を有しているのがドップラー式非接触型流速計、特に電波流速計である。ドップラー式の場合、浮子測法と同様に10本程度の測線（区分断面）を設定し、橋桁下部等にセンサを測線毎に設置する（図8）。

非接触型流速計は、無人で安全かつ迅速に確実に洪水流量観測を行う固定式の観測システムと位置づけられるが、直接得られる計測値が表面流速であり、それを鉛直方向平均流速値に何らかの仮定のもとで変換する必要があること、洪水中の河床地形（計測断面）の変化を直接観測できないこと、の2つの理由から、橋上操作艇ADCP法と異なり、それ自体単独では「基準流量」を観測できるシステムとは言えない。橋上操作艇ADCP法等によりあらかじめ校正しておくことが必要である。

5.2 表面流速値から鉛直方向平均流速値に変換する方法

非接触型流速計により直接計測されるのは、河川表面に存在する波の波速であるが、河川表面上の波はランダムな方向に伝播していることから、結果として計測される最も支配的な流速成分は、河川の表面流速値である。河川表面上に風がある場合には、その吹送流の影響を受けるが、風による吹送流成分は風速に比例することが理論的・経験的に推定されており（図9）、風速影響の補正手法は既に提案されている¹⁰⁾。図10には、電波流

速計による表面流速値（黒○）と ADCP による表面流速評価値（赤○、区分断面平均値は青△）の同時観測例を示すが、両者が極めて良く一致していることが確認できる。しかし、洪水時の河川流量を把握するためには、いくつかの測線における表面流速値を鉛直方向の平均流速値に変換しなければならない。

表面流速計測値を深さ方向の平均流速値に変換するための流速補正係数 α については、表面浮子の更正係数値として世界的にも認められている0.85でほとんどの場合実用上十分であることが経験的には知られている^{11), 12)}が、しかし、あらゆる地点・洪水イベントに対して常に一定である保証はない。特に洪水ピーク前後で河床波が形成される際に α が変化する。このため、洪水イベントの主要なステージ毎に、ADCPによる鉛直方向流速プロファイル観測値から求めておくのが望ましい。橋上操作艇によるADCP計測を適宜実施しておけば、河床断面の変化も同時にモニタリングできるメリットもある。

一方、萬矢ら（2010）¹³⁾は、鉛直方向流速プロファイルを対数則と仮定することにより、水面勾配計測値と併せてことで α を評価するとともに、逆に α を設定することで水面勾配から鉛直方向平均流速を推定する式を提案した。

$$U_{\beta h} = \frac{U}{\alpha} = \frac{(1 + \ln \beta)}{(1/\alpha)k} \sqrt{ghI} \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで α : 流速補正係数, U : 平均流速, β は相対水深位置 ($\beta=1$ のときは表面流速), k : カルマン常数 (=0.4), g : 重力定数, h : 当該測線位置における水深, I : は水面勾配である。この式1は、電

波流速計に異常値や欠測が生じた場合に、流速値を補填する際に利用することを想定しているが、有用である。図11は、X川Y地点の洪水前後における電波流速計による連続観測例である。Case3 ($\alpha=0.85$ 、式1で異常値補填、ADCPによる河床断面情報を活用)において、ADCPによる流量観測値と良く一致するハイドログラフ波形を得ている。

6. ビデオ画像を活用した流量観測法への新たな試み

前述のように、我が国における洪水時の厳しい流況を考慮したとき、橋上操作艇 ADCP 法をもってしても、基準流量を得る手段としての現行の浮子測法を完全に置き換えることは難しいと想定される。すなわち、そのような極端な状況下で基準流量を得る手段として、現時点では浮子測法を引き続き活用し続ける必要があるが、現行の手法そのままでは、最初に述べた様々な課題が残されている。そこで、ビデオカメラにより浮子の流下状況を撮影し、その画像上で浮子を認識し追尾することで、浮子等のトレーサの流下速度を計測し、人為的な誤差要因等を可能な限り排除する手法を工夫すること（PTV-トレーサ法）が考えられる。PTV (Particle Tracking Velocimetry) 法を河川流量観測側に適用するためには様々な技術的課題があることから、土木研究所では、この分野で先進的な研究を行っている神戸大学藤田一郎教授のグループと共同研究を平成 23 年度から開始したところである。

さらに、近年、河川沿いの光ファイバ網の普及

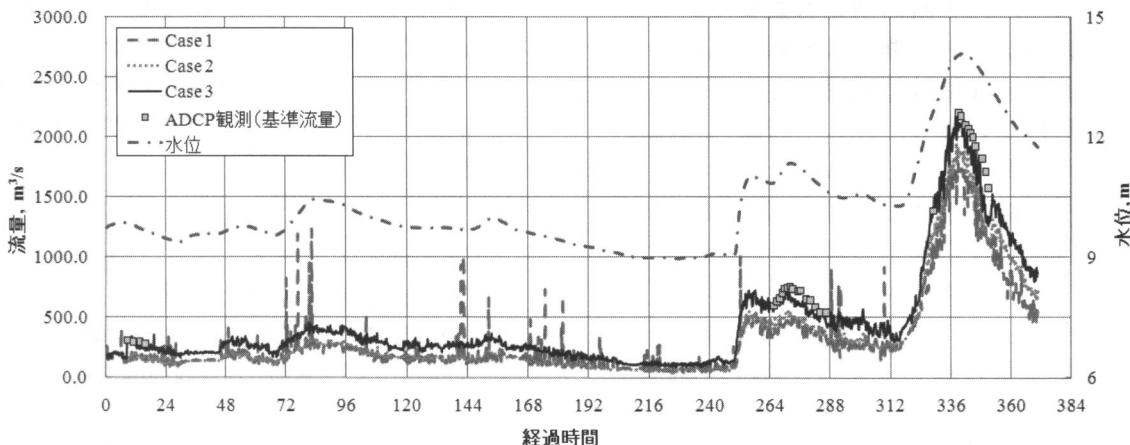


図 11 電波流速計による流量観測値と ADCP による流量観測値との時系列比較

※Case 1：表面流速値として電波流速計測生値を利用、 $\alpha = 0.85$ 、断面は無変化を仮定。

Case 2: 電波流速計異常値を式1で補填, $\alpha=0.85$, 断面は無変化を仮定。

Case 3：電波流速計異常値を式1で補填、 $\alpha=0.85$ 、ADCP計測値により断面情報を修正

※黄色○が、ADCP 観測値を示す。

に合わせて、河川監視用のCCTVカメラが多く設置されている。このCCTVカメラにより河川表面のビデオ撮影を行い、浮子・トレーサを使うことなく、河川表面の渦等による波紋の動きから表面流速分布を簡便に把握する方法も提案されている。従来は、この方法では、日照条件や天候の変化から悪影響を受けるため、連続的な流量観測には向かないと考えられていたが、それらの悪影響を受けにくいSTIV(Space-Time Image Velocimetry)法と呼ばれる方法が提案されたことから¹⁴⁾、基準流量を計測する方法とまでいかなくても、簡易的な洪水流況把握手法として用いることへの期待がある。この方法についても、神戸大学等と連携しながら、活用可能性を検討して参りたい。

7.まとめ

ここ数年の洪水流量の観測技術の高度化に関する調査研究成果を踏まえ、現時点で最も実用段階に近いと考えられる新技術の現時点までの到達点と今後の可能性を解説した。ADCPによる流量観測値は、これまでの浮子測法に代わって基準となるべき流量値を得るための手法であり、非接触型流速計によるシステムは、その基準値をもとに適宜校正を加えながら、無人自動での連続的な高精度の観測値を、迅速かつ安全・確実に得るために手法と位置づけられる。一方、PTV-トレーサ浮子法は、厳しい流況条件等の要因によりADCPを活用できない場合に、ADCPによる基準流量に準ずる流量観測値を得るための手法と位置づけられる。

なお、流量観測精度を高めるためには、流速分布情報だけでなく、河床断面情報も重要であることから、流速分布について無人・自動・連続で得るための手法として非接触型流速計を応用したように、河床地形についても、無人・自動・連続で評価する手法が必要と考えられる。これについても、土木研究所では今後研究開発に取り組む予定である。関係各位のご指導・ご鞭撻をお願いいたします。

謝辞 本報で解説した研究成果は、国土交通省、同国土技術政策総合研究所と連携して土木研究所として一貫して取り組んできた成果をとりまとめたものである。また、近年の成果のとりまとめには、萬矢敦啓氏(土木研究ICHARM)、菅野裕也氏(前土木研究所ICHARM、現北海道開発局)の尽力によるところが大きい。記して関係者一同に

感謝の意を表します。

参考文献

- 建設省河川局監修、社団法人日本河川協会編(1997)改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説・調査編、技報堂出版。
- 国土交通省河川局監修、独立行政法人土木研究所編著(2002)平成14年度版水文観測、(社)全日本建設技術協会。
- 例えば、深見和彦、天羽淳、大手方如、吉谷純一(2003)流量観測に関する技術基準の課題と新しい技術開発への対応、土木技術資料、45-2, pp. 22-29。
- 山田正(2010)CommonMPプロジェクトの進展と今後の河川流量観測の重要性、河川流量観測の新時代、pp.1-6、水文・水資源学会。
- 例えば、倉光大助、大坂誠一、遠藤哲雄、中尾忠彦、栗城稔(2009)水文観測データ品質管理上の課題と今後の展開について、平成21年度河川情報シンポジウム講演集、pp.7-1~7-8。
- 木下良作(1998)河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案、水文・水資源学会誌、vol.11, No.5, pp.460-471。
- 萬矢敦啓、菅野裕也、深見和彦(2010)河川実務者の観点から見たADCPによる流量観測技術開発の論点、河川流量観測の新時代、pp.46-55、水文・水資源学会。
- 岡田将治(2010)ADCPを搭載した橋上操作艇による洪水流観測技術の進展、河川流量観測の新時代、pp.34-45、水文・水資源学会。
- 萬矢敦啓、岡田将治、橋田隆史、菅野裕也、深見和彦(2010)高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案、河川技術論文集、vol.16, pp.59-64。
- 「非接触型流速計を用いた開水路流量観測方法及びその装置」、特許第3762945号、2003年1月。
- 深見和彦、今村仁紀、田代洋一、児玉勇人、中島洋一、後藤啓介(2008)ドップラー式非接触型流速計(電波・超音波)を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～、河川技術論文集、vol.14, pp.307-312。
- 山口高志、中島洋一(2010)H~Vs(地点表面流速)関係の変化から水理現象を読みとる、河川流量観測の新時代、pp.73-80、水文・水資源学会。
- 萬矢敦啓、菅野裕也、深見和彦、葭澤広好、宮本孝行(2010)非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察、河川技術論文集、vol.16, pp.53-58。
- 藤田一郎、原浩気、萬矢敦啓(2011)河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築、水工学論文集、vol.55, pp.1177-1182。

河川生態系の変貌と生物多様性 —劣化プロセスと再生への新たな視点—

【Key Word】

河川構造、生物多様性、流況、流砂系

なかむらふとし*

はじめに

北海道を代表する大河の多くは、かつて大きく蛇行しながら広大な氾濫原を形成した。その結果、扇状地では網状の河道が複雑に発達し、沖積低地では川の周辺に自然堤防が発達した。氾濫原や自然堤防の上にはうっそうとした河畔林や湿地林が生育した。扇状地では伏流水や湧水が湧きあがり、自然堤防背後には、洪水時に雨水が停滞する広大な後背湿地帯が拡がった。大径の河畔林にはシマフクロウが営巣し、蛇行した大河にはイトウやサクラマスが棲み、自然短絡した蛇行河川は三日月湖となり、多くの渡り鳥の中継地となった。

こうした北海道の自然河川は、戦後の復興とともに大きく変貌した。特に、1960年代以降の高度経済成長期における農業開発は、北海道の河川そして周りの氾濫原を激変させた。北海道の大河のすべては、戦後の農地開発とともに捷水路工事が実施され、蛇行河川は直線河道に変化した。大河、石狩川本川も、改修前に364 km程度あった流路延長は、現在268 kmになっており、ショートカットにより約100 kmも短くなったことになる。

我が国は、1993年に生物多様性条約を締結し、1995年から4次にわたり生物多様性国家戦略を策定してきた。また昨年は、生物多様性条約締約国会議（COP10）が名古屋で開催されるなど、生物多様性の保全に向けた取り組みが注目されるようになってきた。2001年～2005年にかけて行われたミレニアム生態系評価（MA）は、1000人を超える専門家の参加のもと、地球規模で生物多様性や生態系を評価した。また、2006年、2010年には、地球規模生物多様性概況第2版、第3版（GBO2, GBO3）が公表された。その中では、

2010年目標「2010年までに生物多様性の損失速度を顕著に減少させる」は達成されなかったと結論している。

2010年、GBOの日本版であるJBO（日本生物多様性総合評価報告）が発表された。筆者も、この作成委員会に参画した。河川については、1997年の河川法改正、2002年の自然再生推進法の制定にともなって、環境や生態系の保全を目的とした事業が実施されるようになってきた。しかし、評価結果は「湖沼を含めた陸水生態系の状態は、1950年代後半から現在に至る評価期間において大きく損なわれており、長期的には悪化する傾向で推移している。」というものであった。その原因としては、砂利採取、河川改修、湖沼や湿原の埋立て等があげられている。これに加えて、外来種問題が深刻化していることが指摘された。

こうした背景のもと、本論では、近年顕在化している河川生態系と生物多様性の劣化プロセスを、河川構造、流況、流砂系の変化から検討し、その現状の課題を浮き彫りにしたい。また、劣化しつつある河川の生物多様性を保全するために、将来取り組むべき課題や考え方について持論を述べたい。

1. 河川構造の変化と生物多様性

日本が多くの蛇行河川を失った歴史は、近代的な土木技術が発達した明治時代、明治29年の河川法の制定にさかのぼる。それ以前、明治初期の河川管理方法は、オランダ技術に代表される低水工事と呼ばれるものであった。低水工事とは、舟運による物資輸送を可能にするため、また安定して取水や灌漑ができるようにするため、川の水位が低い時期にも濁筋（みおすじ）が乱れないように調節し、安定した水位や水深を確保するために実施される工事のことである。その後、物資の輸

* 北海道大学大学院農学研究院 森村生態系管理学研究室 教授

送が舟運から鉄道や道路などの経路に変わると、低水工事の重要性が低下し、多発した大河川の氾濫と時期を同じくして、高水工事の必要性が叫ばれるようになった。高水工事とは、洪水時に河川の氾濫をおさえ、河水を一時貯留したり、より早く海まで流したりするように計画された工事のことである。明治29年に制定された最初の河川法は、高水工事による治水に重点を置いた法整備であり、フランスへの海外留学から帰ってきた若い技術者達によって、築堤を中心とした洪水防御工事が実施され、河川は徐々に直線化されていった。

蛇行していた北海道の河川が、捷水路工事と築堤工事によって直線化され、大きな変貌を遂げたのは、戦後の高度経済成長期、1950～1960年代であろう（図1）。北海道におけるこの時代の捷水路工事は、治水目的の他、河川の両側に拡がる泥炭地を乾燥化し田畠として利用する目的もあった。捷水路工事は流路延長を短くし、河床勾配を急にするため、一般的に流速が増大し河床が掘れて低下する。この低下した河床に連動して、周辺地域の地下水位も下がり、農地として利用することが可能になったのである。こうした歴史的背景を経て、日本の蛇行した河川は直線化され、治水の安全度は向上し、周辺地域の集約的な土地利用が可能になった。

一方で、河道の直線化とともに、蛇行河川や氾濫原に依存しながら生育・生息して生物種の多くは姿を消した。かつて、北海道の多くの河川に生息していたと考えられる日本最大の淡水魚イトウは、主に平野部を流れる蛇行河川に生息し産卵もしていたが、直線化とともにほとんどの河川から姿を消した。さまざまな生物種は、蛇行した河川の構造やその水文・水理条件に適応し生存してきた。そのため、直線化によってその環境を失うこと

とは、すなわち絶滅を意味する。

曲がった川と直線の川は何が違うのか。川は曲がることによって、瀬や淵の繰返しを創り出す。多くのサケ科魚類は、淵に生息し、瀬から流されてくる水生昆虫を捕食する。また、淵から瀬に変化する場所では、川の水が一度砂礫に浸透し、伏流水となって再び川に戻る流れが形成される。こうした場所は、サケ科魚類の産卵する場所として機能し、卵が生きていくためには、伏流水によって十分な溶存酸素が供給される必要がある。曲がった川の外側には深い淵が形成され、岸が侵食されることによって川辺の樹木が倒れこむ。倒木の内部には遅い緩やかな流れが形成され、周辺には複雑な速い流れが取り囲み、さまざまな大きさの、そして多くの種類の魚類が生息できるようになる（図2）。倒木がつくる複雑な構造や被陰部は、魚が捕食者から逃れることができるカバーを形成する。カワセミやショウドウツバメなどの鳥類は、蛇行外側の侵食されて切り立った崖に巣穴を掘って生息する。曲がった川の内側には寄り州が形成される。直線部で形成される砂州は、時間と共に



図2 倒流木の周りのサクラマス幼魚



図1 標津川における蛇行河川の直線化



下流へ移動するが、蛇行部の寄り州は内側に安定して維持される。蛇行河川はゆったり流れると想像されがちであるが、流心部の流れはきわめて速い。このため、底質を構成する細かな砂礫は容易に運搬され、底生動物は生息できない。一方、寄り州の水際では水深が浅く、底質も安定する。こうした水域と陸域の移行帯（エコトーン）には多くの底生動物が生息していることが明らかになっている（図3）。

直線の川は、これとは逆に、川の深さや速さが一様で平瀬が続く。単調で速い流れの中では、魚類は定位するためにエネルギーを消費してしまい、ほとんど生息できない。魚類が生息するためには、流速ゼロもしくはゆっくりと渦を巻くような領域が必要になるが、直線河道には形成されない。さらに、直線化されて流速が早まり、底質を構成する砂礫が容易に動くような状況では、底生動物も生きていけない。まっすぐな川には、曲がった川で形成されるようなエコトーン領域はなく、水域と陸域は完全に分離しているのが特徴である。

淵や瀬など、河川内に形成される河川流路単位（Channel unitと呼ぶ）の生息場環境がもつ機能については、魚類や底生動物の研究を通じて明らかにされてきた。一方で、氾濫原の生息場所についての研究数は、まだ限られている。河川と氾濫原のつながりは、河川生態系の生物多様性を保全する上で、最も重要な課題の一つである。各生物種は生活史ステージに応じて異なる複数の生息場環境を使うことが知られており、こうした生息場

所が離れずに連結されている必要がある。また、ある生物種は、氾濫原内にある池やワンドが洪水氾濫により一時的につながることにより、生活環を全うできる。こうした洪水攪乱による季節的、一時的な連結も重要な生態系プロセスである。一方で、これまでの河川改修によって、河川と氾濫原の連結性が失われたのも事実である。捷水路工事と築堤は、堤内にある河跡湖との連結性を遮断した。また、高水敷と低水路固定によって、河川と氾濫原にあった多様な生息場環境は失われた。

こうした状況に歯止めをかけようと、国は1991年「多自然型川づくり」に関する通達を出し、川の生物に配慮した河川管理をめざすことを宣言した。この新たな考え方は、ヨーロッパのスイスやドイツで実施されていた「近自然河川工法」を参考にしながら、日本独自の技術を発展させるものであった。通達には「河川が本来有している生物の良好な生育環境に配慮し、あわせて美しい自然景観を保全あるいは創出する事業の実施をいう」と明記されていたが、この思想・理念を現場で実践することに生物知識のない土木技術者は頭を抱えた。そのため、多自然型護岸に代表されるように、コンクリートで護岸せず石張りにするといった、工種・工法に偏った事例が多く実施された（図4）。総じて言えば、過去の多自然型川づくりの多くは、修景と公園造成の役割を果たしたが、生物に対する機能や効果はきわめて薄かったと言わざるを得ない。

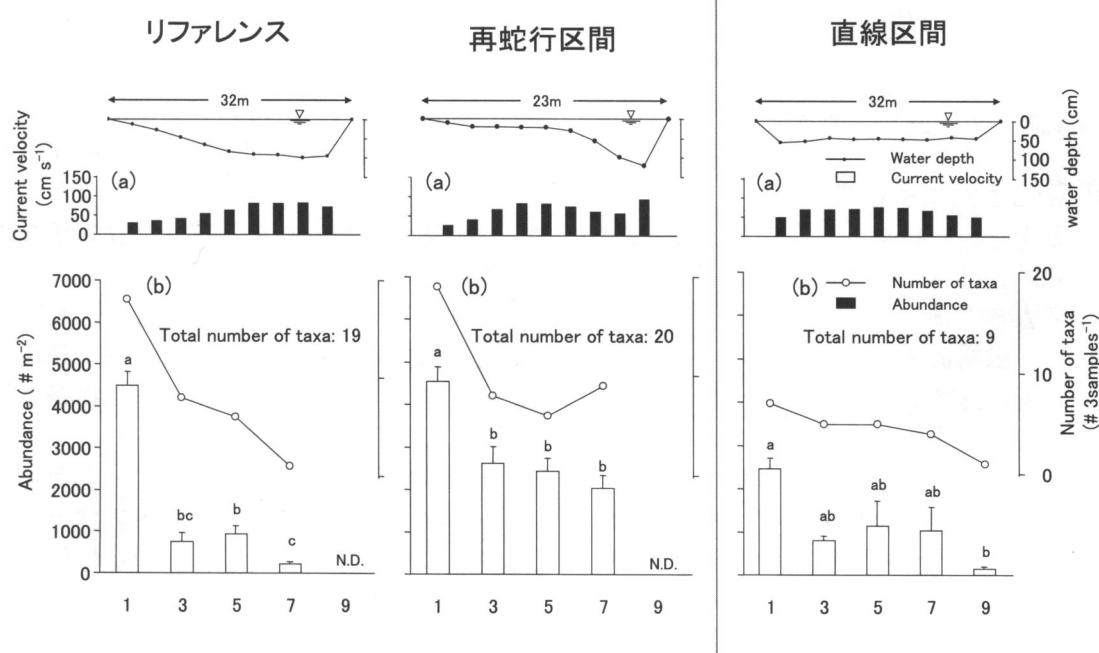


図3 蛇行河川と直線河川の底生動物の密度と種類数



図4 石張り護岸の多自然型河川改修

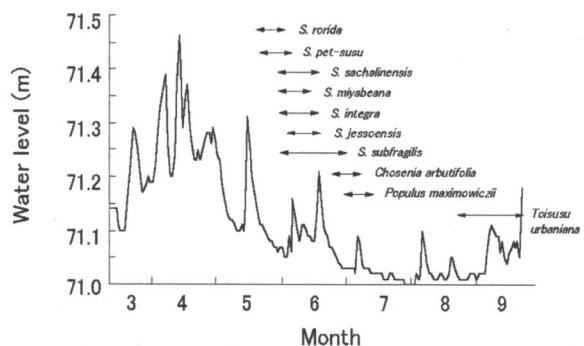


図5 北海道におけるヤナギ科植物の種子散布時期

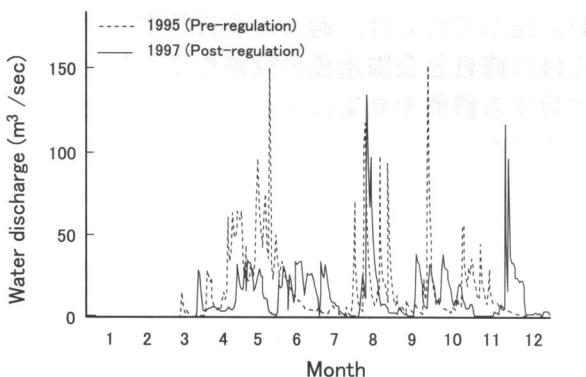


図6 札内川ダム建設前後の流況変化

2. 流況の変化と生物多様性

北海道には冬季、雪が積もり春になると融雪が始まる。このため、北海道の河川流量には、4月～5月にかけて大きな融雪出水のピークがある。年間流量に占める融雪流量の割合は高く、多いところでは半分程度に達する。このため、北海道の河川に生育、生息する生物は、この季節的な擾乱のリズムに合わせるような生活史をもっている。

北海道の水辺には、様々な種類のヤナギ科植物が生育する。これらのヤナギ科植物の種子散布時期は、種ならびに属によって微妙に異なるが、全体としては5月～9月である。これは冷温帯積雪地域では必ず融雪洪水が春先に発生するためで、

その洪水減水期に時期を合わせて種子を散布している（図5）。つまり、融雪洪水という予測可能な擾乱に対しては、散布時期を同調させることによって、新たに形成された裸地（砂州）に侵入・定着できる可能性を最大化していると考えられるのである。

ヤナギ科植物の種子は1000粒で100～600mgときわめて軽く、毎年大量に生産され、風によって容易に運ばれる。発芽定着できる条件は、河川が運搬してきた砂礫で構成される裸地（鉱質土壌）であり、定着には光や水分が良好な立地を必要とする。林床植生下の落葉リター上などでは発芽定着できない。ヤナギ属は5月から6月にかけての融雪出水の減水期に種子を散布しており、出水によって形成された裸地にいち早く侵入することができるが、その反面、小規模な出水ピークによって冠水や流出の被害を受けやすい。一方、ケショウヤナギやドロヤナギ、オオバヤナギなど散布時期の遅い種は、水位がほぼ低水位に収まった7月以降に侵入することから、他のヤナギ属にすでに侵入されている不利な立地か、もしくは流水近くの裸地、融雪後期にまれに発生する大規模出水によってつくられる擾乱裸地などに侵入する。実際、北海道の河畔林において、流水近くに成立する種は、この3種とケヤマハンノキである。

仮にこうした融雪出水が貯水ダムによる流量調節によって抑えられ、5月から6月にかけての砂礫堆の形成と水分の供給が失われた場合、種子が発芽定着できる更新立地は激減し、ヤナギ科植物が水辺域から姿を消すことは容易に想像できる。図6に札内川ダムによる流量調節の流況を示した。融雪洪水のピークがダム建設後大きく減少していることがわかる。

現在、貯水ダムにおいては、ダム下流の水涸れ区間の解消を目的に維持流量が確保されるようになった。しかし、維持流量のみならず、自然河川の流量の季節変動を考慮した放流がなされなければ、北海道の河川生物は生き残ることはできないだろう。植物の開花、結実時期、動物の渡り、休眠、発情時期など、生物が示す季節現象を生物季節（フェノロジー）と呼ぶ。生物多様性に与えるダムの影響は、魚類に認められるような上流域と下流域の移動阻害のみならず、人為によって変えられた流況と生物季節とのミスマッチによって引き起こされており、これをいかに解消していくかは今後の重要な課題である。

3. 流砂系の変化と生物多様性

明治29年の河川法、明治30年の森林法と砂防法と、いわゆる治水三法の成立以降、近代国家日本は、土砂生産ならびに流出をいかに防止し、崩壊地を緑化するかに大きな力を注いできた。事実、大正から昭和の戦後にかけて、日本の山地は禿山が至るところにあり、洪水そして土砂害も頻発した。当然、土砂生産を抑えて、下流河川の河



図7 日本の河川の砂利採取と河床低下

床上昇を防ぎ、治水上の安全を確保することが、国家としての至上命令であったと思う。

しかし、戦後、日本の国土は急激に変化した。高度経済成長とともに、安全な国土を開発するために治山・砂防事業はさかんに実施され、日本では禿山をほとんど見ることはなくなった。一方で、昭和30年代、いわゆる林力増強計画の実施により、奥地天然林はスギやヒノキなどの人工林に置き換わった。しかし、その後の安価な外材輸入により日本の人工林は温存され、国土保全上問題となる皆伐地は減少してきた。日本の国土がこれほどまでに緑で覆われた時代は、これまでなかつたと思われる。

一方で、日本の多くの沖積扇状地河川は、平均して2m程度、河床が下がっている(図7)。河床低下の大きな原因是、河床低下量と砂利採取による系外への持ち出し量の比較から、高度経済成長期の川砂利採取と推定されている。一方、現在砂利採取はほとんど実施されておらず(禁止されており)、貯水ダム、治山・砂防ダムによる土砂流出の防止・貯留が、過去の砂利採取に加わる形で過剰に効きすぎている可能性も高い。その結果、土砂生産・流出レジームは明らかに変化し、下流扇状地河川では河床を構成する土砂が供給されなくなっていると推測される。河床が下がることは、河積が増えることになり、これまで治水上の観点からは歓迎してきた。しかし、侵食が度を超し、

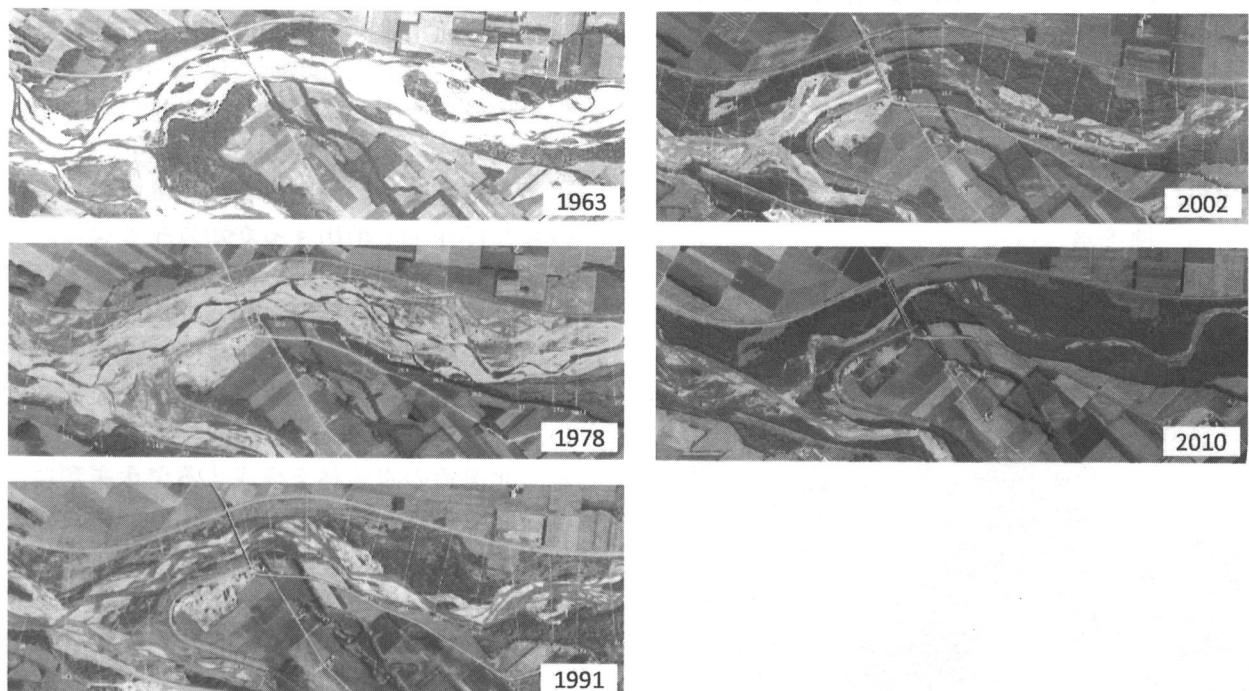


図8 北海道札内川における氾濫原の樹林化

数メートル下がりだと、橋脚や堤防・護岸の根の部分が洗われ、場所によっては構造物の安全性に影響を及ぼす事態になっている。

河床低下に伴う河川生態系の変化として、維持管理上、最も大きな問題になっているのが、氾濫原もしくは高水敷の樹林化である(図8)。樹林化とは、かつて河原として維持されてきた場所に、ヤナギ類、ハンノキ類、外来種のニセアカシアなどの樹木が侵入し、旺盛に繁茂することである。河床低下に伴い、濁筋(みおすじ)が固定化し、氾濫原(高水敷)の洪水攪乱が減ったことに原因がある。川は洪水時に砂礫を運搬する。源流部から土砂が生産され、砂礫が活発に移動する川では、複数の流路が網状に発達し、広い礫床の河原が形成される。こうした活動的な河川では、河床低下が起こることはなく、たとえ樹木が河原に定着してもすぐに流されてしまい、大きな樹林に成長することはない。一方、今の日本の川では、砂利採取やダムによる砂礫捕捉、発電・取水・治水による流量調節によって、水位低下もしくは流況が安定し、低水路護岸によって濁筋が変動しなくなっているのが特徴である。これによって、樹林化が進行し、名前の前に「カワラ」が付くカワラノギク、カワラハハコ、カワラバッタなど、河原特有に見られる生物が日本の川から姿を消している。

河床低下が極度に進むと、生き物にも甚大な影響を及ぼす。まず、河床を構成する礫がアーマリングにより大礫ばかりになり、底生動物が棲めるような小さな石ころがなくなってしまう。サケの産卵床としても適さなくなる。また、さらに侵食が進むと、河床を覆っていた大礫もなくなってしまい、今度は河床に基岩が現れるようになる。岩には昆虫も底生魚類も棲むことはできない。基岩が硬い場合、侵食はゆっくり進むが、軟岩が現れると一気に侵食が進み、滝や渓谷のような様相が



図9 北海道豊平川扇頂部における河床低下

現れる。札幌市を流れる豊平川の扇頂部にある“おいらん淵”では、落差10メートル程度の滝とキャニオンができあがっている(図9)。

かつての豊平川は砂利を運搬することによってエネルギーを消費してきた。その後、砂利採取などで川底の砂利が奪われると、残った砂礫は、河床にステップとプールの段差を作りながらエネルギーを消費した。さらに、ダム等で砂利が山から供給されなくなると、最後に河川は基岩をえぐりエネルギーを消費する。これを英語で hungry water(お腹の減った川)、もしくは sediment starvation(土砂の飢餓状態)と呼ぶ。生物多様性を保全するためにも、流砂系の回復がきわめて重要である。

4. 再生への新たな視点

4.1 河川構造の視点から

これまで、日本の河川管理において重要な課題は、任意の時点における任意の場所の河床高を予測することであり、安定した河道縦断形の維持だったと思われる。確かに縦断形(河床勾配)は、河川を管理する上で最も重要なパラメーターの一つであることに間違いないが、河川における生物多様性は、横断的もしくは平面的な形状に依存していると言っても良い。水生生物の種多様性が下流域で高くなる理由として、生息場所のサイズが大きくなる、安定性が増すなどの要因が挙げられているが、氾濫原を含めた横断方向の生息場多様性が増すことが主要な要因ではないかと考えている。

今後の河川生態系における生物多様性を高めるためには、個別生息場所の保護・保全から、それらを形成する生態系プロセスを維持し、その連結性を高めることが肝要である。そして、それを実現するためには、横断的な生息場所の多様性をどのように保全、創出するかがカギとなる。こうした連結性の確保は、地球温暖化シナリオにおける適応戦略としても重要となるであろう。

植物や動物の棲んでいる場所の環境を調査すると、親と子では生育・生息環境が異なることが多い。たとえばケショウヤナギやオオバヤナギなど、北海道の水辺林を構成するヤナギ類は、稚樹は新しくできた砂礫地に密生するのに対して、タネをつける母樹はそれよりも高く、洪水攪乱を受けない場所に生育する。サクラマスやアメマスなどのサケ科魚類も同様で、稚魚は水深の浅い川岸の水際や二次流路に生息するのに対して、親魚は水深の深い淵に生息する。

生物が生存するためには、親や子など各生活史ステージで必要となる環境が整っていかなければならないが、残念ながら現状は子が育つ環境が整っていない。親は大きくて人目につきやすいが、子は目立たないため、多くの人は親が育っていると、健全な生態系であると誤解する。しかし、絶滅する生物種の多くは、子が生まれたり、子が育つステージがうまく機能していない。

かつて矢作川流域（愛知県）で立派なケヤキ河畔林を見たが、ここでも稚樹を見つけることは難しかった。ケショウヤナギが生育する札内川ダム下流でも同様な現象が起きている。北海道でかろうじて生息が確認されているイトウも、親魚はいっても稚魚が見つからない川が多い。百年生きると言われるカワシンジュガイが標準川（北海道）にも多く生息しているが、2~3 cm 以下の稚貝が見つかっていない。これら長寿の生物は、親がいることによって絶滅の危機を見逃されることが多いが、年齢から考えて、1960 年代の高度経済成長からすでに絶滅のループに入っていたと思われる。すべての生物について、生活史を通じて必要な生息場環境を明らかにすることは不可能に近い。まず、繁殖や子が育つ環境条件を明らかにし、その環境を保全することが急務である。

4.2 流況の視点から

米国における生態系管理の基本的な考え方は、生態系プロセス、特に自然搅乱の模倣にある。たとえば、山火事がその生態系を維持する上で重要な搅乱であるならば、自然状態における山火事の範囲や頻度を調査して、木材生産のための伐採範囲や回数を決定するのである。ただし、多くの山火事跡地では、すべての樹木が焼け焦げてなくなってしまうことはない。このため、一部の立木や枯木、倒木は収穫されずに残され、最後に火入れされる。河川でも natural flow regime（自然の流況）を手本におく考え方が一般的である。先に述べたように、生物はこの自然の流況に適応して生き残ってきたと考えられるからである。

これまでの工学的技術は、洪水防御や電源開発などの単一目的に対しては、大きく機能した。一方、主体である生物とそれを取り巻く環境の関係、さらに種子散布や送粉、被食防衛、食物連鎖など、生物間相互作用の全体システムは、網目のように複雑であり、単一目的で発達した技術は機能しない。理由はともかく、河川の流況を崩さないのが得策である。

こうした観点から、河川生態系を維持するため

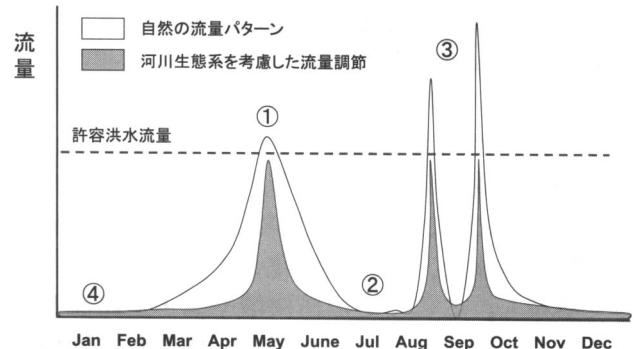


図 10 河川生態系に配慮した流量調節

- ① 生活史の鍵となる春の融雪洪水を保つ。
- ② 低水を維持し、夏の水生生物の生息場所を維持する。
- ③ 夏の豪雨のピークをカットするが、許容洪水流量以下の変動は保つ。
→変動を許容し、河川地形の多様性を維持し、氾濫原を水で満たす。
- ④ 冬季の最低流量を確保し、生物の越冬環境を保つ。

に注目すべき流量の季節変動について述べたい（図 10）。図に示した流況は北海道をイメージしており、濃い部分が生態系を維持するために必要な流量、白い部分が利水のために使う流量である。また、許容洪水流量とは、災害に至らないために設定された計画高水のことである。先に説明した通り、北海道における融雪洪水は、河川生物相の生活史と密接に関連しており、生物多様性を維持する上で必要不可欠である。このため、一部をダムに貯めて利用するにしても（白い部分）、許容洪水流量以下で融雪洪水を維持する必要がある（①）。また、夏期、流量が低下し最も水温が高くなる時に、生存可能な場所に移動するためにも、十分な低水流量を確保する必要がある（②）。さらに、氾濫原と河川との連結性を高め、川の変動（ダイナミズム）を維持し、氾濫原に十分な水分を補給するためにも、夏季の洪水出水は許容されなければならない（③）。また越冬期は、河川性魚類にとって過酷な環境である。越冬期、個体群を維持するためにも、十分な流量を冬期に確保しなければならない（④）。現在のダム維持流量はこうした生活史や生物季節の観点から設定されておらず、今後は生物季節からみた再検討が必要である。

4.3 流砂系の視点から

地先的な崩壊地の緑化は、今後も必要とされるであろう。しかし、河床低下が著しく進行する現在、水系的な土砂生産・流出の防止を検討する必要性は、地殻変動帯などの特殊な流域を除いてないと思われる。今や、崩壊地は下流河床を維持するために必要な土砂を生産するリソース（資源）

であり、崩壊地のまま維持することも検討すべきである。

樹林化は、川に棲む生物相を変えてしまうだけでなく、洪水時にも治水上の大きな問題となる。樹木が川の周りに繁茂すると、洪水時に川の流れに抵抗するため、疎通能力が低下し氾濫する危険性が増す。また、時に流木化して橋脚に引っかかって集積し、ここでも堤防決壊や橋・道路などの構造物を破壊する危険性が増す。伐採して管理するには、多くの労力と費用がかかるだけでなく、伐採された樹木は法律上の廃棄物となり、処理のために、これまた多大な税金がかかる。

急激な河床低下とそれに伴う樹林化の問題は、技術的に対応するにはきわめて難しい課題であり、ある種の閾値（いきち）を越えた状況にあることを想像させる。自然科学で扱う現象は、徐々に変化するのではなく、ある限界値に達すると急

激に変化する場合が多い。生態系も同様である。

生態学で使われる言葉にレジーム・シフトがある。閾値を越えた結果、全く異なる生態系に移行してしまうことを意味する。河川における異常な河床低下、氾濫原の樹林化、海での砂浜の減少、海岸線の後退など、我々が直面する課題の多くは、すでに閾値を超えてしまっており、元に戻すことはほとんど不可能な状態にあるのかもしれない。また、閾値を越えたのは1960年代の高度経済成長期であり、顕在化したのが現在かもしれない。今後、急激に人口が減少する日本では、どこならばまだ閾値を超えておらず再生に向かえるのか、どこは現状の変貌してしまった生態系を認めながら最小限の管理で対応するのか、という仕分けをする必要がある。そのためにも、河川生態系が急激な変貌を遂げる閾値が何によって決定されるのか、科学的知見の集積が必要である。

土木研究所資料 第4176号 土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案)(H22.7)に準拠

土層強度検査棒

現場でC・ ϕ

重量 4kg
計測時間 約1~2分
計測強度値 c, ϕ



(独)土木研究所 材料地盤研究グループ 地質チーム開発

SS試験と併用

Site 02
2011年12月19日14:00~
造成地盛土内の地盤強度計測実施(仙台市)

有限会社太田ジオリサーチ

<http://www.ohta-geo.co.jp>

水循環の可視化ツールとしての 数値シミュレーション技術の活用

【Key Word】

水循環、社会インフラ、統合モデル、数値解析と可視化

と さか ひろ ゆき*
登 坂 博 行*

表1 ここ40年程の自然災害（特に水に関係するもの）

発生年	災害の種類・災害の大きさ・被災者数
1970年前後	アフリカ・大旱魃
	バングラデシュ・サイクロン（死者30万以上）
1971	バングラデシュ・サイクロン（死者14万以上）
1975, 76	中国・海城地震（予知成功）、唐山地震（死者60万人以上？）
1991	イラン・地震（約4万人）
1991	バングラデシュ台風灾害（死者約14万人）
1993. 07	北海道南西沖地震津波（死者200人超）
1995. 01	阪神淡路大震災（死者約6500人）
2002. 07	歐州大洪水
2004. 12	スマトラ沖地震津波（死者約22万人）
2005. 08	ニューオーリンズ・ハリケーン・破堤灾害
2008. 05	中国・四川大地震（死者約7万人）
2010. 01	ハイチ地震（死者約23万人）
2011. 01	オーストラリア・クイーンズランド大洪水
2011. 03	東日本大震災津波（死者・行方不明者2万人弱）
2011. 04, 05, 06	米国竜巻、ミシシッピ洪水、中国南部洪水
2011. 07	韓国・ソウル周辺洪水氾濫
2011	アフリカ・東部大旱魃
2011. 09	日本・台風15号紀伊半島周辺水害
2011. 11	タイ大洪水

(政府機関、報道等の資料をもとに特に水に関係するものを主に著者が抽出)

などの技術も有用な道具となる。

本稿では、地圏（陸域と周辺の大気・沿岸海洋を含む人間の生活圏）の水循環を中心に、水文調査と数値解析の相補的関係や、シミュレーション技術・モデリングに関し概要を紹介する。

2. 地質・水文と数値解析

近年、衛星観測技術の発達により、地形・植生・人工物などの地表状態は極めて鮮明に見えるようになった。しかし依然として、河川は明瞭に見えてもどれだけ流量があるかわかるわけではないし、地下地質や地下水が見えない状況に変わりはない。

陸域の地質の場（岩石圏）は、フィールド調査と物理計測結果から得られる点や面の情報を地質専門家が経験・知識によりつなぎ合わせてマッピ

* 東京大学工学系研究科システム創成学専攻

ングされるが、補間の仕方は大きな個人差がでることも多い。自然にはカオス的な側面（例えば、一塊の物質が壊され、各碎屑片が全く異なる場所に運搬され堆積するような現象）が強く、描かれたマップが実際とどの程度定性的、定量的に似ているかは誰にもわからないと言つてよい。

水文調査では、地質調査以外の様々な“手掛かり”が得られる。それは、例えば観測点の河川や地下水の水深、水位、流速、水温、水質、それらの変化、湧水点の湧水量、水質、水温、その分布、河川の伏流の位置、池・沼・湖などの位置、などである。これらは、時間変化などを伴う動的状態量で、静的な地質場と相補的関係にある。

地質・水文（河川・地下水）に関する数値シミュレーションは、これらの情報の総合化と現象定量化の手段である。人間には予想できない複雑な物理過程の相互作用とその帰結がある問題や、具体的な防災対策設計など多種の情報と整合性のとれた定量評価・予測が求められる問題には、モデル解析が必須となる。

もちろん、問題によっては数値モデルを使わず、人間の経験・知識・想像力で情報をつなぎ合わせ、様々なマップやプロットから評価や予測を導き出すこともできる。また、モデル解析を実施する場合もいろいろレベルがあり、比較的計算の簡単な河川流出の概念モデル（貯留関数法、タンクモデルなど）や地下水の一次元鉛直モデルなどを利用するだけの場合や、地下水の二次元断面モデルを設計などのために用いるレベル、さらに大規模な3次元モデルを使う場合など評価問題に応じて選択する必要がある。

ここでは、特に、流域全体の水文地質システムを表現する数値モデルに関し紹介する。これは、簡単に手に入る数値地形情報・土地利用情報・地質情報などをもとにした水文調査に入る前の計画立案のためのモデリングから、調査後の水文・地質情報を反映した精細モデリングによる防災・水資源管理・環境評価などに利用できるものである。

3. 地圏水循環システムの統合解析

3.1 如何にモデル化するか

地圏は、岩石圈という静的な場〔固相（土壌、岩石、植物、人工物）〕とその周辺および内部に存在し流動する水・空気の流体からなる系（システム）と捉えられる。地表も地下も固相、空気、水が混在する系である。

陸水に関する解析には、従来から河川流出解析と地下水解析の分野がある。前者は、流域の降水

時系列に対する河川流出応答を再現・予測し防災に資するもので、後者は地下水盆地管理、各種人間活動に伴う地下水環境評価などで使われる。従来、これらの解析は、流体系の成分を“水”に限って扱い、空気についてはそれほど影響がないものとして考慮されていない。それに対し、ここで紹介する手法（区別するため統合解析と記す）は、流体系を水と空気の“2相2成分系”と捉え、両者の流れを同時に扱うものである。

「なぜ空気まで考えねばいけないか」との質問を受けることが多いが、実際地表にも地下不飽和帯にも水と空気があり、それらは常に置換しあっている。空気を含めて水の流れを扱うことで、地表付近の大気圏（接地境界層）から地下深部までの水文地質システムを同じ状態量とパラメータの組み合わせを用いて統合化できるのである。また、この手法を基本とすると、地表水、地下水、氾濫水、海水を同時に考慮することも可能となる。

3.2 地圏水循環系の統合型モデルの概要

基本的な等温状態の水・空気2相系について、数理的取り扱いの概要を紹介する。水や空気の流れの連続の式（質量保存則）は、空間に置かれた任意の格子に対し次式で表わされる。

$$R_p = \sum_{i=x,y,z} \Delta M_{p,i}^{(f)} + M_p^{(ext)} - \frac{1}{\Delta t} (\Delta M_{ac,p}) = 0 \quad (1)$$

ここで、下付き添え字 p は水相か気相を表し、i は xyz の方向を表す。R は残差、M は p 相の質量である。第一項の $\Delta M_{p,i}^{(f)}$ は i 方向 (x, y, z のどれか) の流入と流出の和（流入を正、流出を負）、 Σ は全 6 面の和を表す。 $M_p^{(ext)}$ はソース項（生産や注入）、 $\Delta M_{ac,p}$ は蓄積項で新しい時間と古い時間における格子内の質量の差、である。

一般的な流出解析や地下水解析では慣性効果は無視し運動量保存則を直接解かないことから、この式が基礎式となる。流体の圧縮性、媒体自体の圧縮性、飽和率関数の非線形性のため、残差式は非線形方程式であり、一般に、残差式の値やその微分値を使いながら、毎時間ステップにおいて、残差が 0 になるような解（圧力、飽和率）を反復法によって見出す。この残差式の $M_{p,i}^{(f)}$, $M_p^{(ext)}$, $\Delta M_{ac,p}$ には、地表や地下、流体に応じて異なる速度則や質量計算式が入る。このような取扱いの詳細、地表水と地下水の相互作用、また汚染溶解物質の移流拡散、海岸部の塩水の効果、熱の循環も含めたモデル化に関しては、登坂ら（1996, 1998a, b, 2000, 2002, 2005, 2006）、稻葉ら（2006）、吉岡ら（2010a, b）などを参照されたい。

3.3 統合流域モデルの作成方法

統合解析における、流域モデルの領域境界線・境界面の取り方、内部の離散化、物性の付与は以下のように行われる。

(1) 境界条件

流域全体を含んだモデルでは、境界線として陸域では尾根筋をつないだ分水界をとる。一般的にはそれを地下深部まで延長した面を側面閉境界とする。明瞭な地形分水界であっても必ずしも地下において地下水の分水界とならない場合もあるが、通常はこの設定を認めざるを得ない。もし地層の構造が分かっていればより大きな分水界をすることもできる。流域河口および沿岸部は、沖合数kmまで伸ばして閉境界を設定する。これは河川流出や地下水の海底湧出を表現するためである。

底面境界は常に閉境界となる。その深度は地層の状態にもよるが、最大標高と同じ程度におくか、より深くまで考慮することもある。なお、熱を含むモデルでは下部地熱の流入を一定温度境界として考慮せねばならない。

上面境界は、一般的地下水解析では地表面であるが、統合解析では地表より上に2層をとり、最上部が大気層、2層目が地表流の流れる地表層、3層目以降が地下地層となる。これにより、地表面は格子システムの内部に取り込まれ、表流水と地下水の相互作用が自然に表現される。

(2) 内部の離散化

平面分割は地形、水系、地質などを反映するように変形格子を用いて行う。一次の水系まで表現することは難しいが、大きな流路に沿う格子システムを作成する。河川主流は開水路としてそれに沿う格子に分割する。あまりに変形した格子は好ましくないが、変形による数値誤差は顕著にはならないことが多い。

深度分割は、地表から地下浅部までは、数cm～数mオーダーで層分けし、深部につれ次第に数m～数十m～数百mと大きくなるように、約20層程度の分割を行う。地表層は、河川・湖沼・沿岸海洋の最大水深以上の厚さとして設定し、大気層は薄い(1m程度)が極めて大きな容量をもつ格子とする。

3.4 モデルの初期化と近現在状態の生成

(1) 各領域のパラメータ設定

大気、地表、地下を含んだモデルでは、間隙率、浸透率、飽和率関数をその特性に応じて与える。大気層は間隙率1、浸透率大、毛管圧力0の領域、地表層は間隙率1、浸透率の代わりにマニング粗

度係数、擬似的飽和率関数(登坂、1996)を与える。地下地層(土壤や岩石)の場合には、間隙率、浸透率、飽和率関数は地層に応じた値を入れる。

(2) 初期化と近現在状態の生成

流域モデリングでは、河川や地下水に関わる観測値の再現、および水文条件や人工物建設に伴う水環境変化の予測が目的となるが、それらを実現するためには、まず観測値とのキャリブレーションを始める時点付近の領域内状態量分布が必要となる。しかし、陸域には複雑な地形・地質があり、河川、地下水はそれらと水文条件に従って分布しているはずであるものの、解析者がそれら状態量を入力することは不可能といつても良い。実はこの時点の状態量分布を創り出すことがモデル確立の最初の一歩であり、“近現在生成”的ステップである。著者らは、簡単な“初期化”から出発し整合的な分布を得るために次のようなプロセスを提案し利用している。

- ①まず、はるか過去に流域地形上に地表水がなく、地下は水が飽和し静水圧状態にあったことを仮定する。この数値設定は極めて容易にできる。
- ②この状態から、地表に年平均降雨を与えながら計算を開始すると、時間の経過とともに、地下水は地表の底部や斜面に湧きだし、やがて谷部に水流を形成し始める。地下では尾根部に不飽和帯が発達しはじめ、全域で地下水水面が形成されてゆく。このような計算を、数十年～数十年の長期にわたり実行すると、降雨・地形・地質構造(水理構造)に整合的にバランスした流れ場が現れる。非常に長期の計算を行うのは、低浸透性地層などが十分バランスするには、長い時間がかかるためである。計算の時間ステップは、初期は数分～数時間、後半には1000年以上にまで伸ばすことができる。はるか過去の年平均雨量などは知り得ようがないので、ここ数十年の気象記録の平均値などを与える。
- ③出来上がった状態に、さらに降雨の季節変動(月平均値)を与えながら、数年～数十年程度の計算を行い、内部に季節変動による流動場を作り出す。
- ④引き続き、観測値の出始める時点の数年程度以前からの日降雨記録を与え、最大時間ステップ1日程度で計算を行う。ほぼ観測開始時点にあたる計算値(流量や地下水位)を観測値と比較する。
- ⑤おおよそ妥当な値となっていれば、以降の観測値との試行錯誤によるマッチングでは、観測開始時点付近の計算結果を初期状態としてマッチ

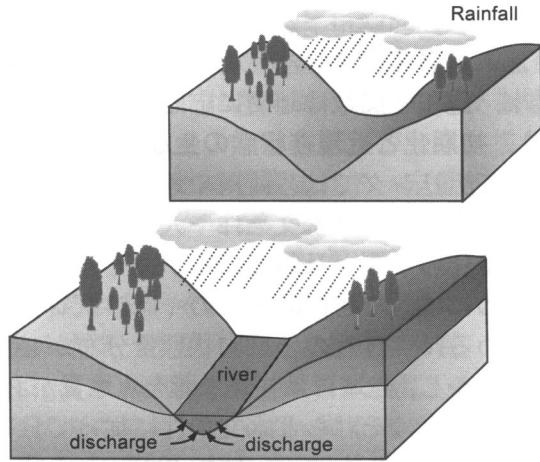


図1 地下完全水飽和状態（上）から地下水水面・河川が形成される様子

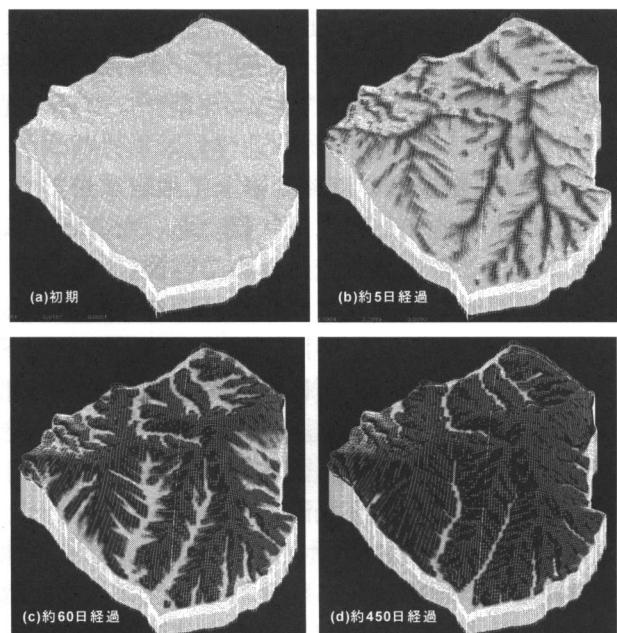


図2 近現在状態生成の様子：左上が初期状態（地下水飽和状態）で、右上、左下、右下に時間が経過するにつれ地表面が現れ、河川が形成される。

ング計算を開始する。

このような、計算過程の簡単な例を図1、図2に示した。図1は最初に地表面まで飽和していた水が次第に抜け、不飽和帯の発達と谷筋の形成を示している。図2は、実際の地形のある場の計算例で、最初の地下完全飽和状態から出発し、時間がたつにつれ不飽和となった地表が発達し、河川も形成されて行く様子を示している。最終的に、河川流量や内部の地下水圧分布は、降雨とバランスし、地質・水理構造と調和した形態となる。

この近現在生成プロセスは、地質時代にわたる海底地層の生成、陸域の隆起、浸食、河谷の形成などの地質的変化を反映したものではないが、現在の地形と水文条件に整合的な状態量分布を与え

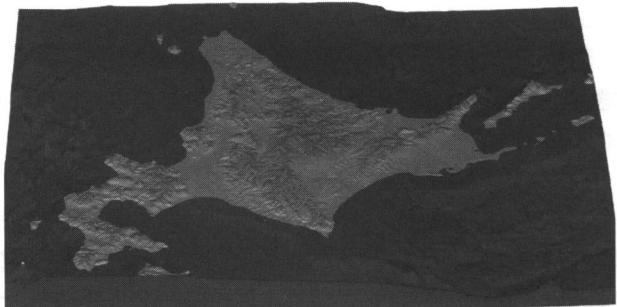


図3 北海道全域モデルの陸域地形および海底地形（森ら、2010）

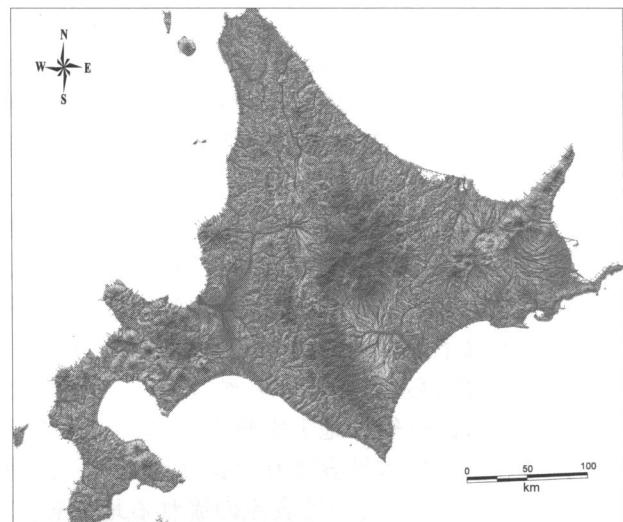


図4 北海道全域モデルの流動場の正射影（森ら、2010）

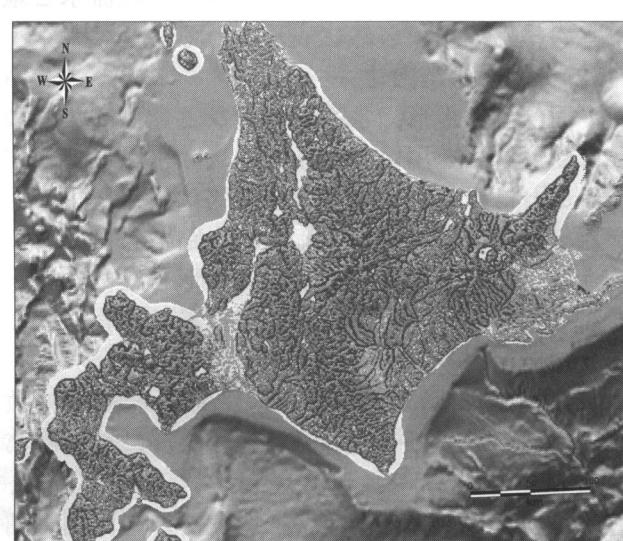


図5 北海道全域モデルの湧出域分布（森ら、2010）：明るい色が湧出域、内陸盆地や沿岸海底に湧出域が見られる。

る有力な方法である。

では、もしこのような計算の結果が、観測開始時点の観測値（河川流量や地下水位など）と大きくずれている場合にはどうしたらよいであろうか。②の段階でおおよそ年平均的な値に落ち着か

なければ、境界条件の見直し、与える降水量の見直し、地下浅部の透水性などを見直し、観測値精度の確認等の調整をする必要がある。

4. 地圏水循環モデルの事例

ここでは、前章までに述べたプロセスを踏んで作成された極めて大きな水循環モデルの事例を示す。図3は、数値地形情報から1kmメッシュで地形を切り出した北海道全域の地形モデルである(森ら, 2010)。このモデルには沿岸域の海底地形も考慮されている。大まかな地質状況は100万分の1地質図により入力され、深度方向に3km程度まで地層が考慮されている。格子サイズが1kmオーダーというのは、河川の表現には大きすぎ、特定の地下水盆の実用解析の格子としても大きすぎる。しかし、大地形による地表・地下の流動系の構造推定、広域の水資源量評価、温暖化による淡水資源量の変化の予測、潜在水力発電ポテンシャルなどの概要評価の目的には有用な情報が得られる可能性があり、より精細な流域モデルの境界条件を与えるためのモデルとしての利用も考えられる。

図4は、前記の遠過去から近現在までの一定降雨下の長期平衡計算を行い得られた流速場を天空からみた正射影として描いたものである。河川に集まる流線は比較的現在の実際の大河川の形に近いものが得られている。部分的に不連続になる部分は離散化の粗さによるものと考えられる。

図5は涵養域と湧出域の分布を色分けして表示したものである。標高の高い地域は浸透域(下向き流速)で、河川の流れる平地などの明色部分は湧出域となっている。海岸部には明色の湧出域が日本海側、襟裳岬付近、知床半島付近に見られ、このような地域では陸側の淡水圧が強く海底地下水湧水の可能性が示唆される結果となっている。

なお、このような大規模モデルは、日本列島全体にわたって作成されている(森ら, 2010)。

4.まとめ

本論では、地圏における水循環モデリングに関し、モデル化の考え方、近現在生成手法、大規模問題の事例などを紹介した。

水文調査・地質調査・数値解析は相補的な関係にあり、情報が統合されることで信頼性のある生活圈設計の手法となる。

自然の実態はまだわからない部分がはるかに多い。自然の恩恵を最大化しつつ、災害の最小化できるような大津波後の新たな社会インフラ設計にむけ、我々は使命感を持って努力をしてゆきたいものである。

参考文献(著者の関係したもの、文中参照のないものも含む)

- 1) 森 康二, 多田和広, 田原康博, 山下紘司, 佐藤壮, 西岡 哲, 登坂博行 (2010) : 日本列島の3次元水循環モデル構築の試み, 日本地下水学会2010年秋季講演会, 238-243.
- 2) 吉岡真弓, 登坂博行, 中川康一 (2010a) : 大気・地下連成一水・熱環境モデルを用いた屋外散水実験の再現性の検討, 日本ヒートアイランド学会論文集, vol. 5, pp 24-32.
- 3) 吉岡真弓, 登坂博行 (2010b) : 都市散水効果の定量評価に向けた大気・地下連成一水・熱環境モデルの開発, 日本ヒートアイランド学会論文集, Vol. 5, pp. 11-23.
- 4) 稲葉 薫, 登坂博行, 平井 卓, 吉岡真弓 (2007) : 熱・水循環系統合モデルの構築—熱・流体移動の定式化と解析的検討—, 土木学会・水工学論文集, 第51巻, 469-474.
- 5) 登坂博行 (2006) : 地圏水循環の数理, 東大出版会, 2006.
- 6) 登坂博行 (2005) : 地圏水循環系プロセス統合型モデルによる流域シミュレーション, 地質と調査, 2005年12月号(106号), 16-22.
- 7) 登坂博行 (2002) : 地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討, その2動的境界条件下における感度解析と一般的議論, 応用地質, 43巻5号, 306-315.
- 8) 登坂博行, 伊藤 彰, 岩井 卓 (1998b) : 自然水理系の流体・熱移動統合モデリングの試み, その2 フィールドシミュレーション, 地下水学会誌, 第41巻第3号, 159-176.
- 9) 登坂博行, 伊藤 彰, 田中将希, 岩井 卓 (1998a) : 自然水理系の流体・熱移動統合モデリングの試み, その1. 流体・熱移動の新しい定式化と実験的検討, 地下水学会誌, 第41巻第3号, 147-158.
- 10) 登坂博行, 小島圭二, 三木章生, 千野剛司 (1996) : 地表流と地下水水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発, 地下水学会誌, 第38巻第4号, 253-267.
- 11) TOSAKA Hiroyuki, ITOH Kazumasa and FURUNO Takashi (2000): Fully Coupled Formulation of Surface flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation, Hydrological Process, 14., 449-464.

ICHARM (アイチャーム)

【Key Word】

ICHARM, 水災害・リスクマネジメント, ユネスコ水センター, 現地主義,
IFAS, 防災修士, 洪水ハザードマップ, RRI モデル

たけうちくによし
竹内邦良*

1. はじめに

ICHARM はすいぶん変わった名であるが, International Centre for Water Hazard and Risk Management (水災害・リスクマネジメント国際センター) under the auspices of UNESCO (UNESCO 後援) の略である。Water の W がないが、わかりやすさを優先している。2006年3月6日、日本政府とユネスコの合意の下、土木研究所がこれをホストして設立された。ユネスコ水センターの一つで、これは、ユネスコ国際水文学計画 (IHP) の枠内で、各国が世界の水の安全保障推進のために設立する組織である。現在世界中に

20ほどある。中でも ICHARM は、全球を対象とした「水災害」分野では国連関係で世界唯一の専門研究機関である。

ICHARM が設立された背景は二つある。一つは世界中の水災害が深刻で、件数は増え続け、経済発展の足かせにもなっていることであり、もう一つは世界一の災害国でありながら経済発展を成し遂げた日本の経験、技術への期待である。災害件数は1980年代から増加が目立ち、特に1990年代後半からいよいよ著しい。人口増、開発、気候変化のトリプル・パンチで、将来の水災害はますますひどくなると予想されている、そんな中での



写真1 ICHARM/GRIPS 修士コース新入生を迎えて 2011.10.7

* (独)土木研究所 ICHARM センター長

設立である。

ICHARMはこの3月で設立満6年になる。現在職員数約45名であるが、政策研究大学院大学(GRIPS)と共同開設している水災害関連のコースには、修士19名、博士4名が在籍し、合計常時約70名、うち外国人約30名の国際小都市を形成している。

2. ICHARMの目標と挑戦

ICHARMは目標を以下のように設定している。

「洪水、渇水、地滑り、土石流、水汚染など、水関連災害のリスクマネジメントのために、地域、国、地方、世界に最も実効ある戦略を提供し、実践支援をするための、世界の先端研究拠点の役割を果たす。」

ただしこまでは、洪水関連のテーマ、すなわち洪水、地滑り、土石流、津波など、多すぎる水による災害に焦点を当てた活動をしてきた。上の目標の中で重要な点は、戦略提供だけではなく、その実践支援をするということである。すなわち現地に入って、現地の真のニーズに合ったリスクマネジメントをデザインし、実践に必要な能力開発や資金確保の手助けをするということである。これをICHARMの挑戦「現地主義(Localism)」と名付け、以下のように定義している。

「現地主義とは、地域や世界の経験、動向を踏まえつつも、現地の自然、社会、文化的多様性を重んじ、現地のニーズ、優先順位、開発水準を踏まえた選択をする原則である。」

水問題、水災害は地域ごとに異なる個別の問題であるから、その解決策もそれぞれに異なる。それらに正面から取り組もうという姿勢である。

3. ICHARMの活動

ICHARMはこのような目標、挑戦を達成するため、研究、研修、情報ネットワークを三本柱に活動している。以下は継続中も含めこの5年間に取り組んできた活動である。

<研究活動>

ICHARMの研究活動の第一は「早期洪水予警報システム(IFAS)」である。衛星観測によるリアルタイム降雨量情報を入力として洪水予測をするもので、多くの途上国の地上観測不足を補う手法として期待されている。

第二は「洪水リスク評価手法」の研究である。これには三つの取り組みがある。一つは現地の洪水リスクの具体的評価で、これが一番難しい。現

地調査や住民との対話が必要で、カンボジア、ネパールなどで実践している。二つ目は文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラムの「気候変動に伴う全球および特定脆弱地域への洪水リスク影響と減災対策の評価(H19-23)」で、気象研究所の20kmメッシュ超高解像度大気循環モデル(MRI-AGCM)を用いて、気候変化が洪水リスクに与える影響について評価している。三つ目は「水災害リスク評価指標」の開発である。これは加害力(ハザード)、暴露、脆弱性、適応力などを洪水リスクに関連した変量の組み合わせで指標化して示し、国や地域の防災の弱点の特定、投資の優先順位の決定に役立てようというもので、間もなくver.1を公表予定である。

ほかに、「非接触型流速計による洪水流量観測手法」の開発、「流域規模水・物質循環モデル(WEP)」の開発なども進めている。

<教育・研修>

ICHARMでは、災害リスク低減の基本は「人間力の強化(human empowerment)」であると考え、能力開発を活動の柱に据えている。中でも政策研究大学院大学(GRIPS)と共同開設の修士課程「防災政策プログラム水災害リスクマネジメントコース」と博士課程「防災学プログラム」に力を入れている。これらの「学位コース」の対象は主として途上国の政府機関や民間企業の実務技術者であり、その再教育が目的である。この点で大学とは大きく異なる。このカリキュラムには、ICHARM内の教員に加え、20名以上の外部教員の支援をいただいている。

【修士課程】GRIPSおよびJICAと連携し、2007年に開設した。修業年限は1年である。開設以来4年間で計41名が「防災修士」の学位を修得し、現在は5期生19名が在籍している。

【博士課程】研究者並びに研究プロジェクトを指導できる研究者の育成を目指して、2010年10月



写真2 修士コースの津波被災地見学 2011.9.9

GRIPS と連携し博士課程を開設した。学生としては官民の実務家のほか、ICHARM の研究に関心のある研究者も受け入れ、半日勤務の給与として奨学金を支給している。修業年限は 3 年で、現在 1 期生 1 名、2 期 3 名が在籍している。

【短期研修】1 週間から 2 か月にわたるものなど、様々な短期研修を実施している。2004 年以来の「洪水ハザードマップ」研修では、研修生の合計は 111 名に上る。彼らの帰国後の活動を支援する現地アフタケアセミナーも毎年開催している。またインド洋津波に対しては、2008 年に「総合的な津波防災対策」を実施した。

<情報ネットワーク>

情報ネットワークは ICHARM が世界のオピニオンリーダとして、防災戦略や水政策の形成に参加する活動である。また ICHARM が必要とされる機会を的確に捉え、効果的に国際貢献を果たす活動でもある。

UNESCO IHP : ユネスコセンターの元締めであるユネスコ国際水文学計画 (IHP) の活動への参加は、ICHARM 活動の中心で、ユネスコセンター間の協力や、ユネスコの要請で、IWRM ガイドライン作成、パキスタンプロジェクトなどを行っている。

世界気象機関 (WMO) : ICHARM の洪水予警報、洪水マネジメントなどの活動に、最も密接に関連している国連機関は WMO であり、親密に連携している。

国際洪水先導 (IFI) : 2005 年ユネスコ、WMO、UNISDR、国連大学が共同で開始した、洪水対策のための協力組織で、洪水対策の国際戦略の実行を促進している。ICHARM はその事務局を務めている。

地域知識拠点 (KnowledgeHub) : 2007 年アジア太平洋水フォーラム (APWF) の下でのネットワークとして、地域の水問題解決のための知識の向上、共有、提供を促す目的で発足したもので、ICHARM は「災害リスク軽減と洪水管理」のハブを務めている。

第 5 回国際洪水管理会議 (ICFM5) : ICFM は洪水管理に特化した実務家中心の国際会議で、第 5 回会議は 2011 年 9 月 27-29 日、東京で ICHARM・国土交通省共催で開催した。「危機から好機へ」をテーマに、41 か国から海外 250 名を含む 450 名が参加した。

このほかにも、水と衛生に関する国連事務総長諮問委員会 (UNSGAB)、水と災害に関する上級専門家会議 (HLEP)、世界水フォーラム (WWF)、

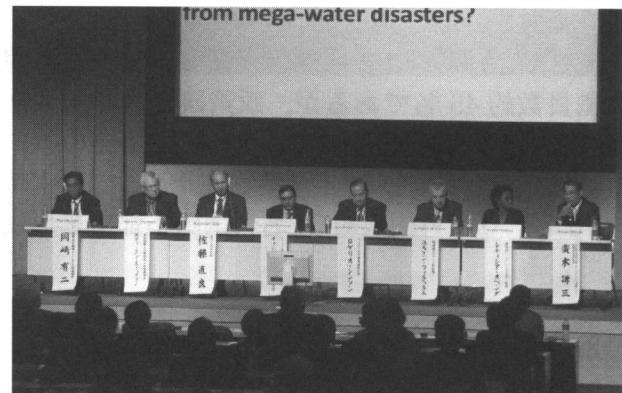


写真 3 「メガ水災害国際フォーラム」でのハイレベルパネルディスカッション 2011.9.27 司会は廣木謙三 ICHARM 国際水防災研究監

アジア太平洋水フォーラム (APWF)、世界科学会議 (ICSU) を中心とした災害リスク統合研究 (IRDR)、台風委員会 (TC)、IPCC、日本学術会議、国内外の各種学会、政府委員会、各種調査団など、多くの水や災害に関する企画に積極的、中心的に参加し、専門家集団としての役割を果たしている。

4. ICHARM の新しい活動：現地主義の実践

ICHARM 活動は最近の水災害の激化に対応して、拡大の一途をたどっている。その代表が、ADB、UNESCO、JICA の支援活動への参加であり、これら機関からの資金を得て、ICHARM の現地主義を実践している。

<アジア開発銀行の「RETA (地域技術支援)>

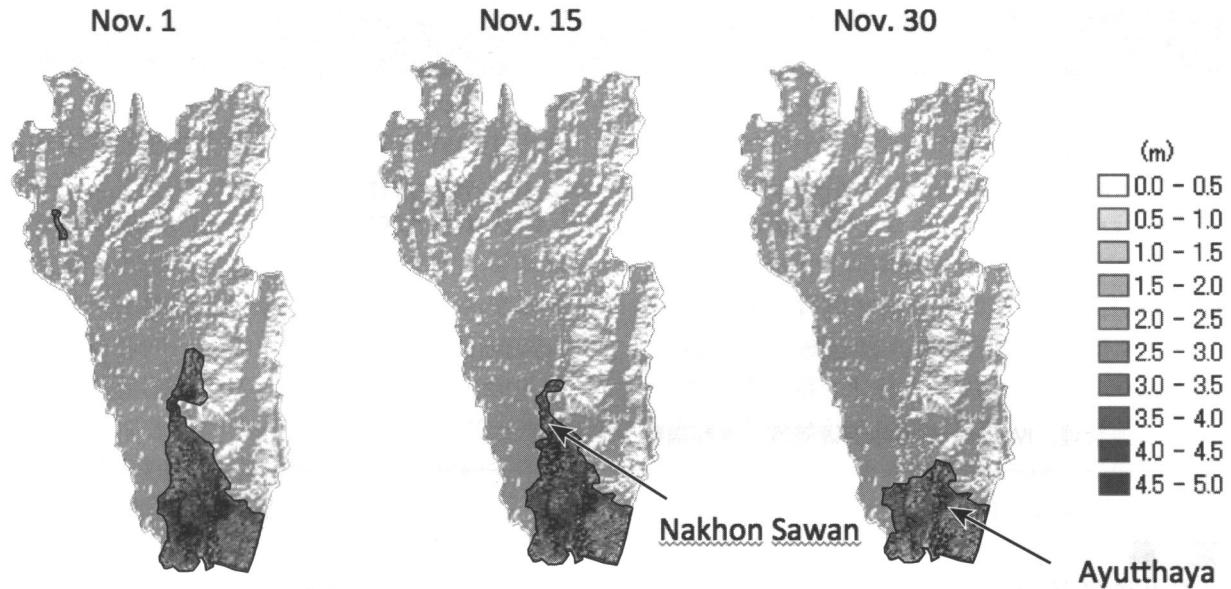
ICHARM は ADB と協力協定を結び、水災害軽減技術の普及を図っている。

- ①バングラデッシュー洪水予警報の導入に向けて関係機関間の協議で数値化による合意形成手法 (AHP-SWOT) を用いて国家方針案を策定
- ②インドネシア (ソロ川) 一衛星を利用した洪水予警報システム (IFAS) の導入、河川管理者の技術力向上、地域コミュニティ防災訓練の連携による総合的防災力強化
- ③メコン川下流域 (カンボジア平原) 一衛星データを活用した洪水脆弱性評価手法の開発

<パキスタン支援>

2010 年 7 月に発生したインダス川の洪水は、2000 万の人々が罹災する未曾有の大災害に発展した。これに対し ICHARM はユネスコの協力要請に応じ、地上観測網の乏しい地域でも利用可能な IFAS および RRI モデルを中心に、技術支援を行う。すでに 6 人の修士学生を受け入れている。

<東日本大地震・津波支援>



- (Case 4)は最も浸水が長く継続するシナリオ。
- 11月1日の時点ではナコンサワン・アユタヤ周辺の浸水は残っている。
- 11月15日頃になるとナコンサワン周辺の水位がようやく低下。
- 11月の末でもアユタヤ周辺の下流部では一部浸水が残る。

図1 2011.10.21 記者発表したタイ国チャオプラヤ川洪水の氾濫予測（佐山のRRIモデルによる）

東日本大震災の津波に対しては、7次にわたり調査チームを派遣し被害の把握を行った。またIRDRのForensic investigation(科学捜査的研究)の一環として(株)建設技術研究所のチームと共にFORIN作業部会を作り、被害発生の原因や影響を解析し、結果の一部を北京で行われたIRDR Conference 2011で発表した。

<タイ洪水支援>

2011年夏から秋にかけてタイのチャオプラヤ川は未曾有の洪水となり、多くのバンコク市民が避難を余儀なくされた。これに対しICHARMでは10月中旬、この洪水による11月末までの流域内の浸水状況や主要地点における水位変化を、当センターの佐山博士の降雨流出氾濫モデル(RRI)で予測したものを記者発表した。これは多くのメディアに取り上げられ、高く評価された。JICAがタイ国政府の要請を受けて立ち上げた「チャオプラヤ川流域洪水対策プロジェクト」でも、RRIモデルで貢献している。

5. おわりに

今後世界中で水災害リスクは高まり、災害影響の大型化・複雑化も避けられない。そんな中でICHARMへの期待は高まる一方である。これに対しICHARMは、以下のような方針で臨もうと

している。

- (1) ICHARMの国際競争力を内部技術の充実によって確保する。
- (2) ICHARMのビジネスモデルは、独自の技術を開発し、それを中心に他の機関と協力して、現地ニーズに応えていくものである。
- (3) 災害リスク低減、持続的開発の究極の手段は「人間力の向上」である。ICHARMは能力開発プログラムに重点を置き、「学位コース」、「ショートコース」の充実を図る。
- (4) 今後とも技術の全面開示を原則に、開発普及を進め、科学格差の解消に貢献する。
- (5) 研究成果を学会、学術誌などを通じて公開し、成果の客観評価を確立する。
- (6) 研究者層の国際化、ジェンダーバランス。

ほかに具体的な目標として、E-ラーニングの提供、IFASの精度向上、ハザードマップを利用した土地利用、準備、緊急対応の一貫システムの開発、渇水リスクマネジメントへの分野の拡大、水災害準備指標の国際標準(ISO)化、国際的水防災戦略の立案・推進への貢献などもある。

防災支援は日本の科学技術外交の柱であり、ICHARMはその先兵として役割を果たしていくたい。各位の一層のご支援をお願いする。

統合的水資源管理

【Key Word】

統合的水資源管理, IWRM, 総合水資源管理, 水利調整

田島まさひろ*

1. 定義

統合的水資源管理は、Integrated Water Resource Management（以下「IWRM」と記す）の和訳であり、国交省では、「総合水資源管理」を用い、また、一般的には、よく「統合的水資源管理」「総合水資源管理」と用いられるがほぼ同意語である。ここでは、統一し「統合的水資源管理」を用いる。

平成20年版日本の水資源白書^{*1)}によれば、「統合的水資源管理は、水資源を開発、管理する上で有効な手法として国際的に認識されており、水に関するMDGs（ミレニアム開発目標）を達成するための有効なプロセスとして、2002年の持続可能な開発に関する世界首脳会議（ヨハネスブルグ・サミット）において、2005年までに各国政府はIWRM計画を作成する」ことが国際合意事項となっている。

世界水パートナーシップ（Global Water Partnership：以下「GWP」と記す）は、IWRMを「水や土地、その他関連資源の調整を図りながら開発・管理していくプロセスのことで、その目的は欠かすことができない生態系の持続発展性を損なうことなく、結果として生じる経済的・社会的福祉を公平な方法で最大限にまで増大させることにある」と定義している。

なお、統合的水資源管理の統合とは、次の①～③を意味している。

- ① 自然界を統合的に考慮する。水資源と土地資源、水量と水質、表流水と地下水など、自然界での水循環における水のあらゆる形態・段階を統合的に考慮する。
- ② 従来別々に管理されていた水に関する様々な部門を統合的に考慮する。〔河川（治水）、上下水道、農業用水、工業用水、環境のための

水、等]

- ③ 様々な利害関係者の関与を図る。中央政府、地方政府、民間セクター、NGO、住民などあらゆるレベルの利害関係者を含む参加型アプローチ（ジェンダーの視点は特に重要）。

すなわち、「統合的水資源管理」とは、水そのものだけでなく、土地その他の関連資源の調整を図りながら、それらを開発・管理していくプロセスであり、その目的は、欠かすことのできない生態系の持続的発展性を損なうことなく、開発・管理の結果として生じる経済的・社会的な福利を公平な方法で最大限にまで増大させることである。このような定義から出発すれば、今後の国際的な議論では、まず、生態系の持続的発展性を保証することが、必須の前提条件となっていくであろう。

2. 問題点

しかし、この国際目標は多くの国で未達成となっている。その大きな理由は、IWRMの考え方方が理念としては理解できるが、実際に具体的な計画を立てる際にどこに着目し、どのような手順で進めばよいのか分からぬという点である。

Asit K Biswas博士^{*2)}（国際水資源学会元会長）は、「IWRMの概念は、誕生からおよそ60年を経て、1990年代に再発見された。IWRMの概念は、一見すると魅力的だが、より深く分析すると、多くの問題が存在する。IWRMの定義はいまだに一定していないうえ、どのような要素をどのような方法で誰が統合すべきなのか、さらに、こうした統合が広い意味で可能であるかといった基本的な問題点についての考え方があつた。この概念が今人気を集めている理由について分析をすると、現実世界においてIWRMの概念の運用は極めて困難であろう」と指摘している。また、「IWRMは、近年になって人気の概念となったと

* (株) 帝国建設コンサルタント 技術担当理事

言われているが、大規模・中規模の水関連政策、計画、プロジェクトの管理効率を高めるための適用はほとんど成功していない。概念そのものに魅力があるとしても、それだけでは十分ではない」と指摘している。

そこで UNESCO は、IWRM を考える際の単位を河川流域レベルとし、その中で IWRM を具体的にどのように推進していくべきかについて取りまとめた実務者向けの手引きとなる「河川流域における総合水資源管理のためのガイドライン」を策定し、2009 年 3 月のトルコのイスタンブールで開催された第 5 回世界水フォーラムにおいて本ガイドラインを発表している。

3. IWRM の必要性

最近（2007 年）の IPCC 第 4 次評価報告書によれば、人口増大や経済成長に伴う水需要の増加は、地球の水循環に大きな変化をもたらしており、洪水や干ばつなど、水に関わる災害も気候変動の影響下において、ますます深刻になることが予想されている。こうした中で、IWRM は、地球環境の喫緊の課題となっているが、これまでのところ、十分には展開されていない。特に具体的な管理の実効を評価する手法が遅れており、このためには、流域や広域的な水資源管理の根幹であり、かつ様々な水利用の現場である地域レベルの水管理のあり方を見直し、整えて行くことが求められている。

IWRM の概念は、歴史的には水資源を統合的に管理しようという技術思想であるが、この IWRM の世界的な勧進元である国連や UNESCO が最も重視している概念を単純化すれば、まず「国際河川における国家間の水資源の分配」であり、また具体的な技術レベルでは、細かい具体的な技術を取り上げて先進国の経験を途上国などに技術移転することである。これは、歴史的・社会的にみて、顕在的潜在的に紛争を抱えたメコン河等の国際河川群はもとより、日本国内でも、利根川等のような事例による水利調整からも、国際河川の水資源配分問題が、IWRM という手法が確立して普及すれば解決できるとは容易に信じられない。

もう一つの懸念は、IWRM という思想には、合理的とか公平とかいうスローガンが、誰にとって合理的なのか、どのような状態が公平なのか、といった一義的には定義できない状況のなかでは、実態として、風土や歴史や社会の特性を軽視した措置（解決方法）は、結局は失敗に終わったということが今までの歴史的経験であった。

4. 今後の課題

各河川流域における現実の水資源に関する問題を実際に解決、あるいは改善するには、理念や法制度などの枠組みだけでなく、個々の流域や地域の具体的な技術課題、固有の歴史的社会的な経緯や制約を解きほぐすプロセスが欠かせない。これは広い意味での「水利調整」ということができる。実際の水資源の管理と流域環境の保全に役立つようにするには、「統合的水資源管理」を「水利調整」のレベルにまで落とし込む実践的調整作業が求められる。その実現のためには、異なる行政部門や利害関係者間の調整と合意の基に求心力と実効力のある協議機関（流域委員会）を作り上げることが鍵であるが淀川水系流域委員会のように中々うまく行っていない。IWRM が議論される場合には、必ずといって良いほど、水資源管理をめぐるガバナンス様式転換の必要性が強調される。それは、従来型統治の下では、現代の水管理から要求される多様な環境的、経済的、社会的ニーズをバランスよく満たすことがありますます困難になってきているからである。

現代では、農業用水、工業用水、生活用水の間でのバランスの取れた水資源利用や、上下流の連携、水量管理と水質管理の統合、生態系の維持とアメニティの向上といった、より多様化した政策目的の実現が求められている。さらに、最近の IWRM の議論の中で政府機関であれ、非政府機関であれ、特定の組織がそれを担うことを想定して議論が進むことを願うものである。しかしながら、IWRM の事例については、先行取水者優先主義の許可水利権制度を探る国々の中で、水質は別として水量に関しては、日本は最先進国の一いつといつてよい^{③)}。新沢嘉芽著（1963）『河川水利調整論』は、まさしく河川水資源の管理を、統合的に行うための制度的施設的な諸問題を解明し、日本の水利調整手法を重要河川に適用したものであり、利根川などにおける異常渇水時の統合的水管理のロジスティクスの基礎を確立したものである。参照されたい。

参考文献

- 1) 國土交通省土地・水資源局水資源部編（2008）：平成 20 年版 日本の水資源—総合的水資源マネジメントへの転換 pp 47-48
- 2) Asit K. Biswas (2004) : Integrated Water Resources Management: A Reassessment, Water International Vol. 29, No. 2
- 3) 岡本雅美(2009) : 田島正廣編, 世界の統合的水資源管理(水資源・環境学会叢書 7), (株)みらい pp vii-x

若手技術者のための「ボーリングコア観察技術」

【Key Word】

地質(工学)情報, 割れ目の観察, ボーリング柱状図, コア写真, 岩石試験試料, 電子化技術

フィールドの達人 編集委員会

1. はじめに

ボーリングコアは、地盤内の情報を直接得ることができる貴重なサンプルである。ボーリングコアから調査の目的に応じた地質（工学）情報をいかに多く、かつ正確に読み取ることができるかが調査のカギとなる。ただし、ボーリングコアは地盤から得られたサンプルであるが、地盤そのものではない。つまりボーリングコアの評価は必ずしも地盤の評価そのものとはならない。したがって、コアを得た地盤全体の三次元的な状態をサンプルとしてのボーリングコアから読み取る作業が必要となる。

一方、最近のコア採取技術の進歩はめざましく、コアパックチューブの登場で、コアの採取率が飛躍的に向上し、さらに気泡ボーリング等の掘削流体の改良によって、従来は採取が難しかった硬軟混じり合う地山、破碎帶や地すべり土塊などにおいても良好なコアが採取されるようになってきた。それでもなお、コアの採取率や品質はボーリングオペレータの腕に左右される場合もあることや、腕が良くても採取できない地山もある。ボーリングコアを観察する際には、これらの点を十分念頭に置いて、地山内部の状態を想定しながら観察する必要がある^{1), 2)}。

2. コア観察

(1) コア観察の目的

コア観察は、地質学的な考察や解釈、力学特性や透水特性など工学的な評価をするために行う。

また、掘進作業に並行して行う観察、ボーリング掘進作業終了後の1孔分全体の観察、さらに地質解析でのコアの見直し観察などがある。

1つ目は、掘進作業に平行して行い、ボーリング調査を円滑に進めるための観察で、掘進前方の地質状況の予測や、掘進中に当初予測と異なる地

質（破碎帶、熱水変質など脆弱部、高透水ゾーンなど）の出現による掘進長の増減検討の判断などの目的がある。

2つ目は、1孔分のコア全体の観察で、記載と柱状図作成、工学的評価などボーリング調査報告書の作成を目的とし、コア写真撮影を合わせて実施する。

3つめはコア見直し観察で、ボーリング調査や横坑調査、その他のデータを総合的に解析する際に実施する。見直しによって、全体の地質や岩盤の判定基準の調整や判定結果の整合性が図られる。

(2) コア観察の準備

コア観察の準備として、まず既往資料の確認が必要である。コア観察では、地形・地質学的な特徴と形成過程、基礎岩盤の三次元的な物性分布や評価など工学的観点を考慮する。そのためにはコア観察前に、文献、地形判読、地質踏査などの結果や既往ボーリング結果や解析結果などを確認しておく必要がある。

次に、ボーリング掘進状況を十分把握しておく必要がある。孔内水位、湧水、逸水、孔壁崩壊、保孔対策などの情報は、地質性状や地下水状況を把握、評価する上で重要な資料となる。

(3) 岩石の分類と岩種区分

岩石は成因によって、堆積岩、火成岩、変成岩に大別される。

堆積岩は、①粘土、シルト、砂、礫の碎屑物が固結した碎屑岩、②生物の遺骸からなる生物岩、③化学的な沈殿による化学岩、④火山灰や火山礫などマグマ起源の碎屑物が固結した火山碎屑岩に区分される。

火成岩は、マグマが固結までの時間や場所によって、粒度や火山ガラスの生成などに違いがあり、完晶質粗粒の深成岩、細粒で基質と斑晶がみられ

る火山岩、その中間の半深成岩があり、構成する造岩鉱物の組み合わせにより区分される。

変成岩は当初生成された岩石が異なった温度・圧力・化学的条件下で固体のまま、鉱物構成や岩石組織が変化したもので、温度と圧力の条件変化によって形成された広域変成岩と熱変成を受けたホルンフェルスなどがある。

岩石は、構成粒子の種類や大きさ、組合せ、生成条件、生成後の経緯などによってさまざまな名称が付けられる。コア観察にあたっては、通常は公刊されている地質図に使用されている名称を使うことを基本とするが、対象となる構造物やサイトに適合する名称を選択すべきである。むやみに細分化する、逆に、相互の貫入関係があり特定の貫入面に変質がみられる数種類の花崗岩質岩石のすべてを「花崗岩」とすることや、硬軟の差が大きい砂岩、泥岩の繰り返し層の構造物基礎の岩石名を「砂岩泥岩互層」と一括したりするのは避けるべきである。

(4) コア観察上の留意点

a) 岩石の硬さの判定

コアによる岩石の硬さはハンマーの打撃音などによって定性的に区分され、硬岩と軟岩の境界はおおむね一軸圧縮強度で 20~25 MN/m² 程度に対応している。硬さは岩種のほか、風化、変質の程度に関連することを念頭におくことが重要で、目的に応じて適切な区分を行う必要がある。また、硬さは点載荷試験、エコーチップ硬さ試験、針貫入試験などによる定量的な判定で決める方法もある。

b) 割れ目の観察

(割れ目の頻度) 岩盤の割れ目頻度をコアから評価する場合、割れ目間隔を間接的に示すコアの長さを測る必要がある。孔軸（コアの長さ方向）と割れ目面の角度は様々であり、採取後のコアは回転しており、割れ目間隔はコア上面の中心線で測る。なお、一定方向に規則的な割れ目が存在する場合、ボーリングの掘削方向によって割れ目間隔は異なることになる。

(開口性) 地中における節理や劈開など地質構造面の剥離や開口の有無について、割れ目の密着性や挟在物などによって判定する。

(割れ目の性状) 割れ目の色調、石英や方解石、ゲーサイトなど析出鉱物の存在は、割れ目の開口性や開口時期、地下水や大気など流体の浸入や移動を把握するうえで重要な手がかりとなる。面の凹凸と粗滑さ、密着性や間隙、結晶の晶出や付着物の有無、色や材質などを記載する。

(挟在物) 割れ目の間隙に挟在物が生成あるいは流入していることがある。挟在物の成因としては、割れ目周囲の岩盤を起源とする①岩片や破碎物、②変質物、③風化物がある。また、熱水や地下水などの浸潤・流入によってできた④石英や方解石など鉱物細脈あるいはその破碎物、変質細脈、さらに、開口割れ目における⑤流入粘土など碎屑物、⑥落下充填物などがある。挟在物の厚さや性状、硬軟、色調、固結度について記載する。

c) 断層

①地盤中の面構造を境としたずれによる不連続、②不連続面に刻された鏡肌や条線、③断層ガウジ、断層角礫などなどの存在によって認識できる。

(断層の幅) 一般的には、断層の幅は、断層角礫や断層ガウジなどを含む幅となる。

(断層面の性状) 周囲の岩盤との境界面が明瞭か、平滑か、鏡肌や条線を持つか、などについて記載する。

(断層の方向性) 周囲の岩盤との境界面、断層や周辺の破碎帶の礫の配列やガウジの構造、鏡肌や条線などの面構造や線構造を計測する。

(周囲の性状) 断層の周囲では、断層面に平行する節理が発達したり、層理面や劈開面が曲がったり、開口したり、様々な影響がみられることがある。このため破碎帶を含む断層と周囲の岩盤との境界は漸移的で明瞭でないこともあるが、コア状態から予想される周辺破碎帶の範囲は記載しておく。後々断面図で断層による岩級低下ゾーンを表現する際に必要となる。

d) 風化

風化の記載は、岩石と割れ目に区分して行う。

岩石の風化については、構成鉱物の変質状態、色調、硬軟、強度などを記載する。色調は基本的には酸化による褐色化と脱色である。割れ目の風化の記載は、割れ目面の構造や性状、挟在物、開口性などとの組合せで行う。

e) 熱水変質

热水変質による性状は、热水変質作用のタイプや岩種、地下環境によって異なる。また、热水変質は一様ではないので地質性状と硬軟など工学的性質によって区分し、分布状況を把握する必要がある。热水変質の性状区分は、色調、鉱物組成、岩石組織、ハンマー打診による硬軟などに基づいて行う。热水変質の分布は均質、一様ではなく、分带構造が認められる場合があり、それについて観察する。また、断層など地質構造面に沿って分布するか、網目状か、スポット的なのか、風化の

影響を受けて深度とともに変化するかなどについて観察する。

f) 岩級区分

岩級区分は、岩盤の力学性質に影響を及ぼす主として、岩石の硬さ、割れ目の頻度と性状、風化・変質の程度などとそれらが関連する地質要素の状況を把握し、一定の区分基準に従って岩盤の良否を判定する。詳細に区分することは大切であるが、そのデータを図化するときの境界を何処にするかを必ず記載しておく。あまりに細分すると机上の作業時点では境界がわからなくなることがある。

g) その他の留意点

自然状態では回りの地盤や地下水に封じられており、物理的、化学的に安定した状態にあるものが、コアとして採取された時から乾燥や応力解放を受け、酸化によるコアの褐色化、スレーキングやスウェーリング（膨潤）など、コアの劣化・変質が始まる。そのため、採取直後速やかにコア観察やコア写真撮影を行うなど、できるだけ自然状態に近い記録を残すことが重要である。

コア箱の保管が屋外の場合、箱が老朽化しこアが散逸してしまったり、コア箱の搬送時に人為的な乱れなどを起こすことがある。コアの丁寧な扱いが望まれる。

採取直後のコアは、表面に被膜状のマッドケーキが付着して、コア観察や写真撮影に不適当なことがある。丁寧な水洗いを行う必要がある。しかし、軟質なシルト岩、熱水変質などでは、水洗いによってコアが崩壊するおそれがあるので、マッドケーキを部分的に削り取って観察を行うこともある。スレーキングを生じやすい地質では、乾燥したコアへの散水は禁物である。

3. 柱状図の作成

ボーリング柱状図はボーリングによって得られた情報を簡潔に、しかも客観的な言葉や数字で表現した地盤情報であり、後続する地質解析あるいは地盤の数値解析等を行う上で最も基本的なデータとなるものである。以下に、岩盤ボーリング柱状図と土質ボーリング柱状図に分けて、柱状図作成における注意点・留意点等を紹介する。なお、具体的な記載内容及び記載区分等は、「ボーリング柱状図作成要領（案）解説書（改訂版）」³⁾に詳述されているので、まず同書を熟読して頂きたい。

(1) ボーリング柱状図の種類

岩盤ボーリング柱状図と土質ボーリング柱状図の書式（JACIC 様式）を図 3.1 及び図 3.2 に示す。

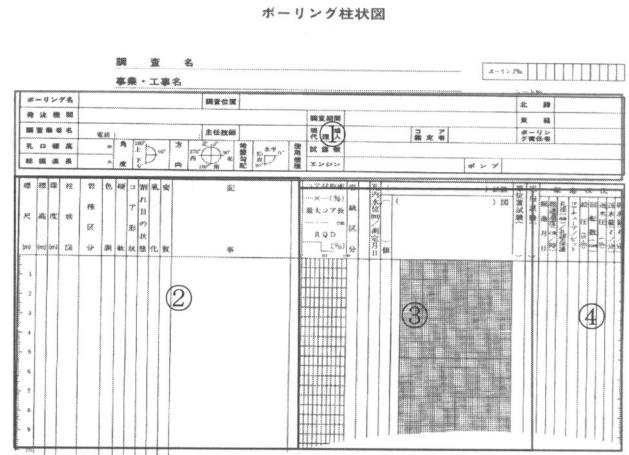


図 3.1 岩盤ボーリング柱状図に記載すべき情報^{3),4)}

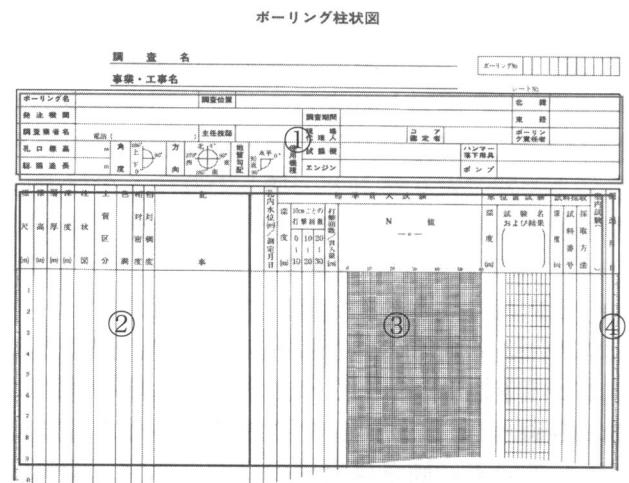


図 3.2 土質ボーリング柱状図に記載すべき情報^{3),4)}

ボーリング柱状図は、岩盤・土質を掘削したボーリングコアの観察時に作成するが、記載項目は大きく4つに分けられる。

- ①ボーリングの諸元情報
- ②ボーリングコア観察情報
- ③孔内試験情報
- ④ボーリング掘進時の情報

2種の柱状図を見て判るように、①、②では岩盤と土質柱状図に大きな違いはないが、③と④で異なっている。特に④は岩盤柱状図では各種の掘削時のデータを盛り込んでいるのに対して、土質では掘進月日を記載するのみとなっている。これは、岩盤柱状図が採取されたコア状態から各種の判定を行うためであり、掘削時の条件によりコア性状が影響されることを念頭に置いているためである。一方、土質ボーリングは通常ノンコアであり、コア判定というよりは原位置試験の整理図としての意味が強いことによる。

(2) 岩盤ボーリング柱状図

2種の柱状図の基本的な違いを理解した上で、まず岩盤ボーリング柱状図作成上の注意点・留意

点を紹介する。主に記事の書き方である。

a) 用語の統一

使用する用語は、JIS 規格あるいは地質基準に示されているものとし、特に複数孔を数人で見るような場合はコアの目合せ時に使用する用語を確認しておく。

b) 客観的な表現

岩盤中に弱い部分があった時などは、ハンマー やカッターあるいはその他で触診したときの状況を正確に記載する。「比較的弱い」等の表現は後日他者が追認できないため使用しない。

c) 推測は入れない

柱状図は事実の記録であり、推測情報は入れてはならない。ただし、コア状態が悪い時に、その原因が掘削方法によるのが明らかな場合、コアロス区間の原因がわかっている場合等は、但し書きで記載する。

d) コア状態の正確な表現

断層、破碎、変質等を受けた岩盤はコア観察だけでは正確に判断できない場合がある。柱状図で求められているのは、これらの地質現象を決め付けて表記することではなく、鏡肌がある、条線がある、粘土が固結している、礫、砂が円磨している、割れ目の角度が30度というような最も基礎的・客観的な情報を記録することにある。

e) 各種原位置試験結果との照合

原位置試験結果を見ずにコアだけを見て記載しては、コア性状を総合的に捉えることは出来ない。例えば、ダムの調査では5m毎にルジオンテストを行うため、記載は5m単位で試験結果と照らし合わせながら行い、高透水の理由、低透水の理由等を見つけ出すという側面から、コアを観察する必要がある。

(3) 土質ボーリング柱状図

土質ボーリングでは、ノンコア掘削が基本であり、土質判定は標準貫入試験試料等から行うため、掘削後に連続的なコア判定は難しい。そのため、現場で掘削進行に合わせて適宜観察するか、あるいは可能な範囲で、暫定的に採取コアを仮のコア箱に収納し、コア観察を行うことが望ましい。土質ボーリング柱状図の記事欄は岩盤に比べてスペースが狭いため、多くの情報を盛り込むことは難しいが、特に以下の点には留意する必要がある。

a) 色調

土質材料の中には空気と触れるとき酸化が進み色調が変化することが珍しくない。速やかに色調を記録するのは当然としても、「標準土色帖」等で個人差のない色調記録を行うことが望ましい。

b) 粒度記載

記事には、「シルト質の細粒砂」、「礫混じり粗粒砂」というような粒径に関する記載が多くなる。そのため、標準的な粒径の名称と現場観察における触感、判定方法等のノウハウをあらかじめ取得しておく必要がある。これに関しては、本で読んで判るものではないので、先輩技術者などからの指導を含む多くの実経験が不可欠となる。

(4) 柱状図の電子化

柱状図の電子化は既に数社から市販の作成ソフトが販売されているほか、独自に作成ソフトを開発・運用している会社もあり、電子納品対応としての作成環境は整っている。作成した柱状図データから断面図用の簡易柱状図を作成することもできる²⁾。

(5) その他

ボーリングコア採取技術の発展、費用対効果の向上を求めるという意味で、ボーリングコア情報の付加価値を高めることが重要な意味を持つつある。ボーリング柱状図も例外ではない。そのため、一部では、縮尺1/10あるいは1/5程度のボーリングコア詳細スケッチを作成し、柱状図に盛りきれない情報を視覚的に表現することが行われている。図3.3はその例である。記載方法は必ずしも統一されていないが、さらに詳細な原寸のスケッチと併用して、コア性状の正確な記載が求められている。

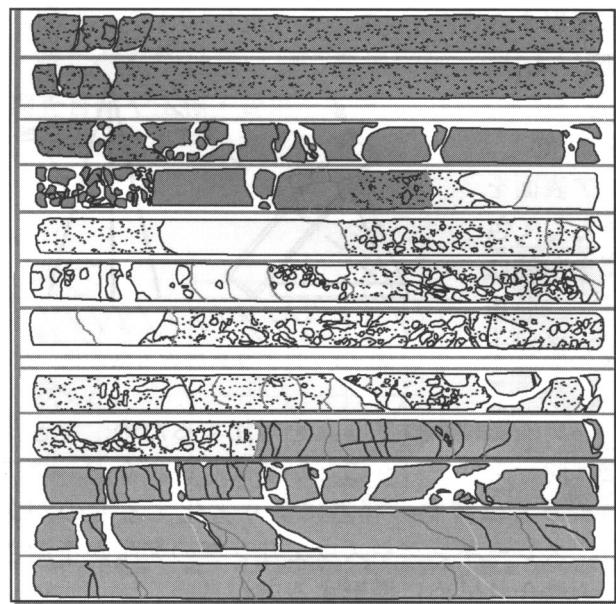


図3.3 コア詳細スケッチの例

4. 写真撮影

(1) 撮影準備

ボーリングコア写真の撮影前には、下記のような準備が必要である。

a) コア箱の準備

ボーリングコアは、割れ目などによって実掘進長よりも長くなることがあり、一般に内寸 103 cm 以上のコア箱が使用される。コア箱には 10 cm 毎に目盛りを記入し、空洞部等には仕切り板（木片）を入れる。コア写真の撮影時には、「ボーリング孔番」、「区間深度（標高）」、「コア箱番号」等をコア箱に明記する。

b) ボーリングコアの整理

ボーリングコアは、コアカッターを用いて 1 m ごとにコア箱に整理し、コア表面に付着したスライムや掘削時の泥質材、汚れ等を除去する。ボーリングコアは、層理面や片理面の最大傾斜方向がわかるようにコア箱に整理する。また、スライム部分やコアの空洞部分がわかるように整理する。

c) 撮影日時の天候

コア写真は、撮影時の影が入らないように撮影時の天候や撮影時間帯に留意する。晴天時が推奨されており、雨天時や朝夕方の時間帯は避けた方が無難である。

(2) 撮影方法

コア写真は、三脚等を利用してカメラの向きとコア箱が直角になるように設置し、歪みがないように正面から撮影する（図 4.1）。「色見本」を設置し、コア表面を濡らして色調を明確にして、1 箱毎に撮影する。

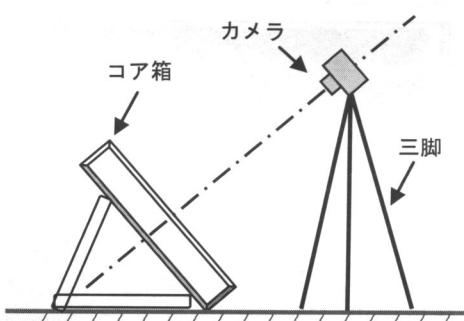


図 4.1 コア写真撮影方法の例

写真撮影は、コア写真を対比するため、できるだけ同一条件で行うことが望ましい。なお、コアによっては時間の経過により劣化するものがある。スレーキングやスウェリングの発生が予測される場合は早めに撮影する方が良い。

(3) コア写真の整理

コア写真は、ボーリングコアの色、粒子などを判読するため、拡大して使用されることを想定し、コア部分の横幅は、1,280 画素以上を確保する必要がある。有効画素数が約 200 万画素を超える撮

影機材等を使用することが原則とされる。

コア写真は、コア箱 1 箱を 1 枚に収めた写真と、それらの写真を編集して 1 枚に繋ぎ合わせたデジタル画像がある。印刷を考慮して、1 つの画像ファイルには、コア箱 5~6 箱程度を納め、A4 縦サイズに収めるのが一般的である。掘進長が長く、1 つの画像ファイルに収まらない場合は、複数の画像ファイルを作成する。各画像ファイルの先頭には、業務名称等の標題を明記する。

写真ごとの大きさの違いや歪みについては、コア写真撮影時に極端な違いがでないよう注意する。やむを得ず写真に大きさや歪みがでた場合は、必要に応じて補正することが望ましいが、補正は最低限に留める。

5. 岩石試験試料採取

(1) 岩石試験の種類と目的

ボーリングコアは、原位置から直接得られた地盤の一部であり、多くの情報を持っている。この情報を取得するための手法のひとつとしてボーリングコアを用いた各種の岩石試験が実施される。岩石試験はその目的から①地質・鉱物学試験、②物理試験、③力学試験、④透水試験、⑤化学試験、⑥その他の試験に大別される（表 5.1）。

表 5.1 ボーリングコア（岩石）を用いた室内試験の主な項目

地質・鉱物学試験	偏光顕微鏡観察、X線分析（回折・蛍光）、微化石、交換性陽イオン（CEC）、年代測定
物理試験	比重、密度、吸水率、含水量、有効空隙率、超音波速度、熱的性質（熱伝導率・比熱など）
力学試験	一軸圧縮強度、三軸圧縮強度、引張強度（圧裂）、せん断強度、破壊韌性、クリープ、動的変形・強度、硬度、摩耗、AE測定
透水試験	定水位、変水位、トランジェントパルス、フローポンプ、オシレーション
化学試験	水素イオン濃度指数（pH）、電気伝導率（EC）、溶出量、含有量、全含有量
その他の試験	浸水崩壊度、スレーキング、吸水膨張、膨潤圧、pF、凍結融解、安定性、初期応力測定など

また、室内で実施する試験以外に、針貫入試験（一軸圧縮強度の推定）、点載荷試験（引張強度の推定）などのように現場において実施する簡易的な岩石試験もある。これらの試験を行う場合は、多くのデータを取得し統計的にデータを扱う必要がある。

(2) 試料採取の方法と留意点

岩石試験のための試料をボーリングコアから採取する際には、以下のような留意点が挙げられる。

a) 試験目的の確認

まず、第一に試験の目的を明確にしておく必要がある。これによって、試料の採取方針が決まる。

また、試験結果の評価者が自ら試料を採取することが重要である。データを解釈する上で試験試料がどのような状態のコアであったのかを的確に捉えておく必要がある。なお、評価者は、少なくとも試験方法について知識を得ておくことは言うまでもない。

ここで、ボーリングコアの削孔方法も確認しておく必要がある。透水試験や化学試験では、ボーリング削孔水の種類によっては試験結果に影響を及ぼすものもある。

b) 岩相の観察

試料採取位置を選定する際には、地質（岩相）を細かく観察することが必要である。また、一般的には、地層（岩相）境界を含んだ試料の採取は行わない。なお、試料の採取方向も重要であり、必要によっては定方位のコアが採取されることもあるが、少なくとも上下のみでも記載しておくことが好ましい。

c) 割れ目等の観察

特に力学試験や透水試験を実施する試料については、弱線となる潜在的な亀裂や鉱物脈、層理（片理）などの有無、角度等を考慮して採取する必要がある。また、コア全周を確認し、極力原位置の岩盤状況を代表できると判断される試料を採取する必要がある。

d) 試料の採取

岩石試料の採取にあたっては、ダイヤモンドカッター等で試料（コア）に過度の力をかけないようにする。特に力学試験や透水試験の試料については、両端をハンマーでたたき割ることは避けるべきである。また、試料を採取した部分については、試験試料を採取したこと（コア採取できなかった場所との区別）、コアが移動してしまうことの防止として採取区間を発泡スチロール等で詰めておく必要がある。試料採取日・深度・目的等を書き込んでおく。試験終了後、試料はコア箱に戻しておくことが望ましい。

e) コアの経時変化

ボーリングコアは、生ものである。時間が経つとスレーキングやスウェーリングが発生するものもあるし、化学変化により変色を起こすこともある。また、目に見えない程度にコアが劣化する場合があるのでコア採取時から極力速やかに試験試料を採取することがよい。

6. コア観察における電子化技術の利用

次回紹介予定の「ボーリング技術の変遷」に詳述するが、従前のボーリング掘削、あるいは解析・

評価技術では、孔内の状況が詳細に分かりにくいところがあり、これらを克服するために以下の様々な電子化や最新のITを駆使した画像化技術の利用が行われている。

(1) ボーリング孔の孔壁展開画像撮影

ボーリングは掘削時の回転により、採取されたコアからは地質構造要素の方向はわからない。また、水を使用した区間では、割れ目の挿在物などが流失してしまい、採取されたコアは地山の状態、すなわち密着か開口か、あるいは挿在物の有無などは殆ど不明となる。

これらの課題解決法として、孔壁展開画像の撮影技術がある。写真画像や超音波を利用するなど撮影方法の違いにより、ボアホール・イメージプロセッサーシステム（BIPS）、同スキヤナ（BSS）、同ラインカメラ（BLC）、同テレビビュアなどの商品名の装置が利用されている。また、撮影費用の低減や効率化を目指して、市販のカメラやPCを利用した「汎用型」や「超簡易型」と称する孔壁撮影装置が開発されてきている。

何れも原理としては、図6.1に示すような孔壁写真と展開図により、孔内における地山状態の割れ目や断層の走向・傾斜と状態、開口幅、挿在物の有無などを把握する。そして結果を、走向・傾斜を整理したコンタダイアグラムやローズダイアグラムにまとめる。これにより、例え調査対象が斜面であれば、卓越する割れ目が斜面に対して流れ盤か受け盤か、あるいは緩んだ岩盤が何メートルまで分布するかがわかる。

最近の装置は扱い易く廉価になってきており、調査目的や工程・費用を考慮し、展開画像の取得活用を図るとその利用価値は高い。

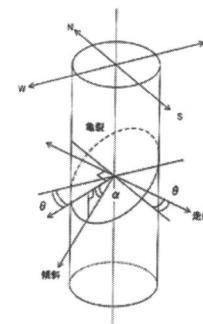


図.1 ボアホールと亀裂の関係

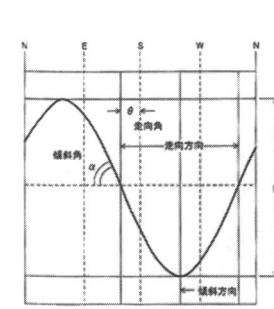


図.2 孔壁展開画像と孔内亀裂の関係

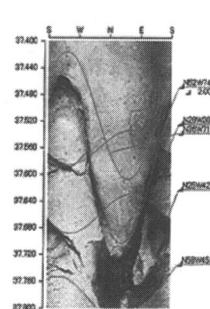


図.3 走向傾斜、開口幅などの計測

図.6.1 孔壁展開画像例⁵⁾

(2) 撮影画像の電子化

撮影画像については、深度別の展開画像だけでは三次元的な広がりあるいは構造物との関係など

が分かりにくい。

そこで、展開画像を柱状図に挿入添付して、コアの観察結果と対比して表示することや、透水性や地下水位、割れ目の頻度と特徴との相関表示などが行われる(図6.2)。画像については、例えば3D-CADなどを活用しコア形状に復元して、地山可視化の試みなどが行なわれている。

(3) 柱状図の電子化とデータベース(DB)化

ボーリング柱状図について、既に電子納品などにより、その位置情報や地質の記載、試験結果などが電子化され、納品が行なわれている。

また、これらを一元的に集約・管理しDB化がされてきており、受注者にとっては時間のかかるところであるが、国土交通省Kunijibanや産総研ほかのDBが充実することにより、今後の調査の成果向上や迅速化に向けた体制作りが整備されてきている。今後、電子化やDB化は体系的な資料の活用、汎用性、簡便性などから重要さを増していくものと思われる。

(4) その他、最新技術の活用について

コア観察と平行して、これまで行なわれている土質試験や岩石試験を対象とした試料採取のほか、化学分析やX線回折、微化石分析などが行なわれる。

最新の技術としては、各研究機関により、ICP

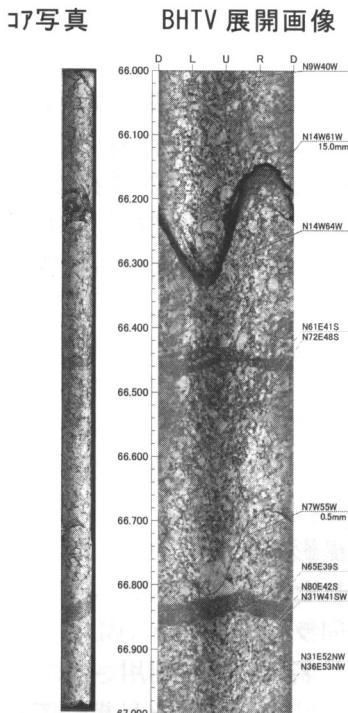


図6.2 撮影画像とコア写真的表示例

質量分析装置による微量元素・X線CTスキャナによるコアの内部構造・赤外線カメラによる表面温度などの各種測定が試行されており、様々な方法によってコア分析の高精度化により詳細な解析が行われている。

ボーリングコアの観察においては、まず掘削されたボーリングコアについて詳細な肉眼観察を行い、観察した結果あるいは採取されたコアを適切に柱状図や写真などとして記録を残すことが重要である。

さらにコア観察はミクロな作業であり、マストとしての地盤や岩盤状況の把握には、対象となる調査箇所周辺の地形や地質条件、同時に行われる物理探査や孔内試験結果などを理解することが重要である。建設計画中の構造物の配置や荷重、その他諸条件を勘案した上で、地質工学情報を総合的に評価できるよう観察結果をとりまとめ、設計に有益なマクロな情報を提供することができる。これにより、計画構造物に対し必要で十分な、かつ条件に適合した建設が行なわれる基本データとなる。この点で、ボーリングコア観察技術は地質調査結果の質を左右する重要な基礎技術の一つであるといえる。

〈参考文献〉

- 1) 土木地質達人の知恵、土木地質の達人編集委員会、2009, p. 160-167
- 2) 土木地質の秘伝めざせフィールドの達人、フィールドの達人編集委員会、2011, p. 90-98
- 3) ボーリング柱状図作成要領(案)解説書H11.5、(財)日本建設情報総合センター、2005
- 4) 地質・土質調査成果電子納品要領(案)H20.12、国土交通省、2008, p. 2-1-2-14
- 5) 現場技術者のための地質調査技術マニュアル、関東地質調査業協会、2005, p. 25-71
- 6) 岩石の透水係数の各種室内測定手法および測定結果の比較に関するレビュー、林ほか、2003、資源と素材、vol. 119, p. 519-522

新潟県豪雨災害（H23.7.27～7.30）における砂防施設災への対応

いし い のぶ かず
石井伸和*

1. はじめに

平成23年7月27～30日にかけて、新潟県では中越地方を中心とした広い範囲で猛烈な降雨を記録し、その被害見込額が1630億円にもなる大きな灾害となった。今回の調査地である十日町地域においても1時間に100mmを越える記録的な降雨が記録され、公共土木施設も甚大な被害を被った。ここでは、私が砂防施設災の査定資料作成に携わった経緯から、豪雨による砂防施設の被害状況とその復旧方法について紹介する。

2. 調査の概要

調査位置は新潟県十日町市の市街地の西方、信濃川の左岸側に当たり、信濃川の支川となる樽沢川、北沢川、貝喰川の三つの河川である。対象となるのは、それぞれの河川に位置する年月の経過した床固工及び砂防堰堤であり、箇所によって定期的な施設調査は行っているものの、既存の施設

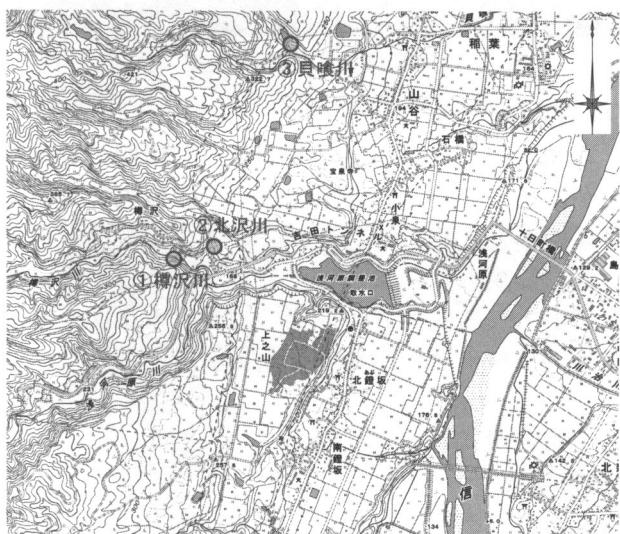


図1 調査位置図

台帳や測量成果がほとんどないため、豪雨による被害状況を把握するとともに、場合によって被災前の状況を推定し、原形復旧を基本とする復旧方法を検討することが必要とされた。

3. 地質状況

調査地付近では、第三紀鮮新世～第四紀更新世

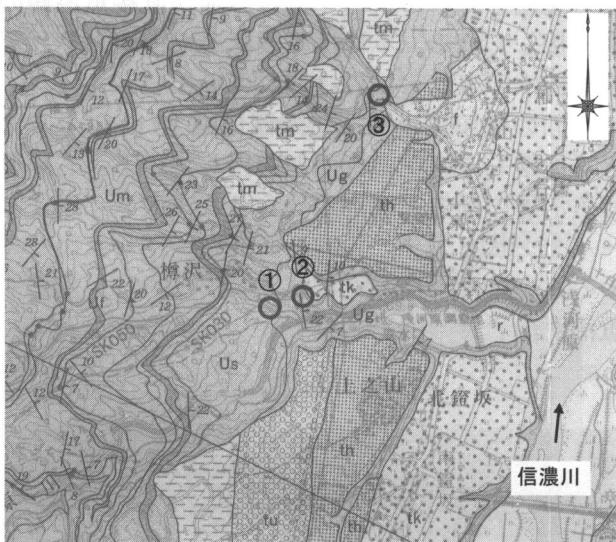


図2 調査地周辺の位置図



写真1 魚沼層の露頭

* 旭調査設計株式会社 地質調査部

の魚沼層が広く分布しており、層相によって Um (シルト、砂及び礫), Ug (礫及び砂), Us (中礫、シルト及び砂) に区分されるが、調査地では砂やシルトが主体となっている。写真に示すように、よく締まっていて自立性が高く、露頭面は砂岩やシルト岩状となっているが、風化すると層理面にそって剥離状に崩れやすいほか、雨水の侵食を受けやすいという特徴がある。

4. 被害状況と復旧方法

ここでは、箇所毎にその被害状況と復旧方法についてとりまとめる。

① 樽沢川

〈被害状況〉

ここは施設調査の結果や既存資料がないため、詳細は明らかではないが、少なくとも数10年は経過しているであろう単独床固工であり、変則的な形状をしている。副堤ではなく、本堤のみで、左岸側は薄い直壁となっており、旧耕作地と直壁上面で連続している。右岸側は本堤が直接魚沼層の崖に接している。本堤は階段状となっており、下流部に水叩きなどは設けられていない。

今回の豪雨により、左岸側は幅10m以上で大きく崩壊し、直壁の背面が露出している。右岸側は魚沼層の崖の末端部が侵食され、大きくオーバーハング状を呈し、本堤の側面の一部が露出している。また、本堤根元の河床も侵食され、本堤が魚沼層の岩盤の上に乗ったような状態となっている。



写真2 樽沢川床固工全景

〈原因と想定される現象〉

豪雨による異常出水によって、上流側でオーバーフローした流水が、水通しの外側から回りこんで流れたため、左岸側では魚沼層上位の軟質な土

砂が飽和状態となり、斜面が崩壊したものと考えられる。また、河床部及び右岸斜面は長年の流水の作用によって、ある程度侵食が進んでいたものと思われるが、今回の豪雨により増えた流水によって、河床部が大きく洗掘され、それに伴って、魚沼層で構成される右岸斜面の末端侵食と崩壊が進んだものと考えられる。

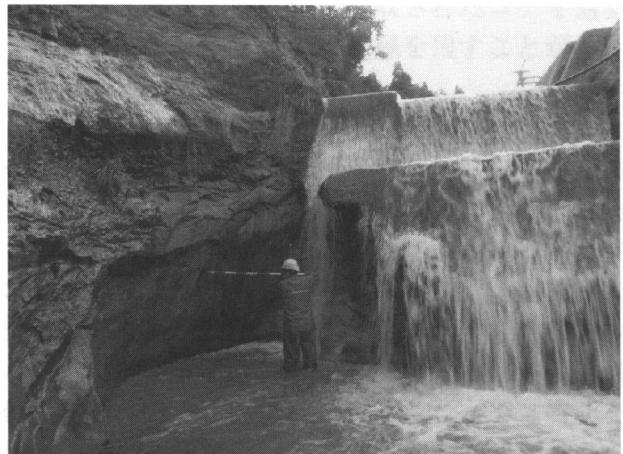


写真3 右岸側の侵食状況



写真4 左岸側の崩壊

〈復旧方法〉

本堤の根入れが不足しており、右岸側の堤体側面が露出していること、今後の侵食拡大によって堤体の不安定化が懸念されること、また、左岸側の地形を復旧することが必要となることから、本堤の根入れの確保と右岸側の侵食拡大を防止するための根継工と左岸側の法面復旧を計画した。

② 北沢川

〈被害状況〉

北沢川と次に紹介する貝喰川の床固工については、施設調査の結果が残っており、被災前の写真と被災後の写真を比較して示している。

施設は床固工であり、本堤、側壁護岸、垂直壁、

その下流側の取り付け護岸から構成される。写真を見ると、被災前も石積の取り付け護岸は部分的に破損していたことが分かる。右岸側は自然斜面で、左岸側には県道が走っており、幅員が広くなっている避難所と接している。今回の豪雨による被災箇所は取り付け護岸であり、床固工自体には全く影響は無かった。左右岸ともに石積護岸は跡形も無く壊れてしまっており、左岸側の崩壊は道路の避難所の一部にまで達し、側溝が川側に落下している。



写真5 復旧方法のイメージ図

〈原因と想定される現象〉

豪雨による増水によって、本堤及び垂直壁の水通し部分で流水がオーバーフローし、河川水位が左岸の道路面付近まで上昇した。護岸付近の河床と背面を構成するのは侵食されやすい土砂であったため、擁壁の根元と背面部の侵食が進んで擁壁が不安定になり、さらに流水の勢いによって擁壁が倒壊したものと思われる。また、長年に渡る河床侵食によって、擁壁の根入れが元々小さくなっていたことも要因の一つと考えられる。

〈復旧方法〉

基本的に原形復旧とし、石積擁壁構造として元の線形に合わせて復旧するが、擁壁の高さは被災時の水位 (DWHL) を参考とし、その高さ付近に

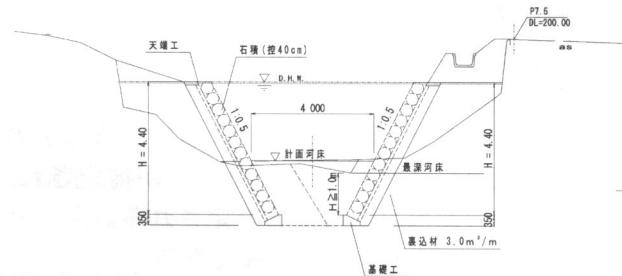
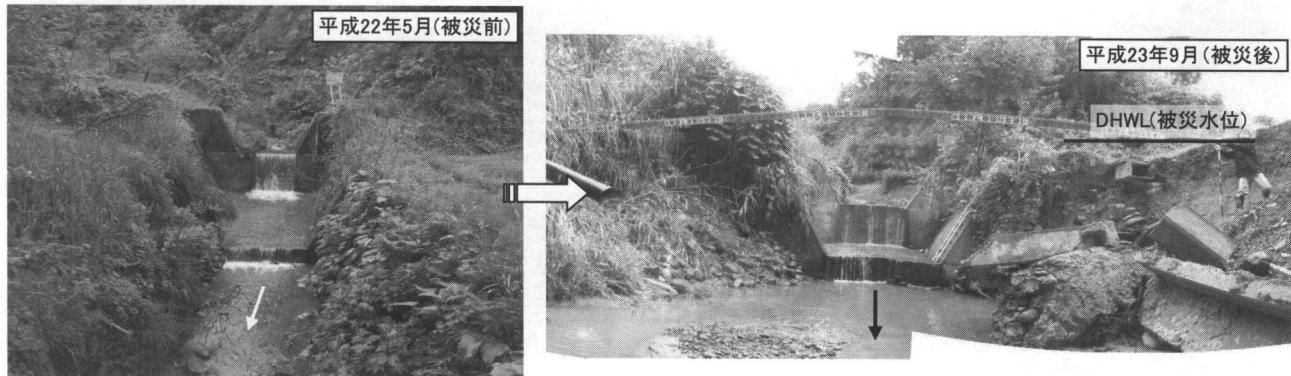
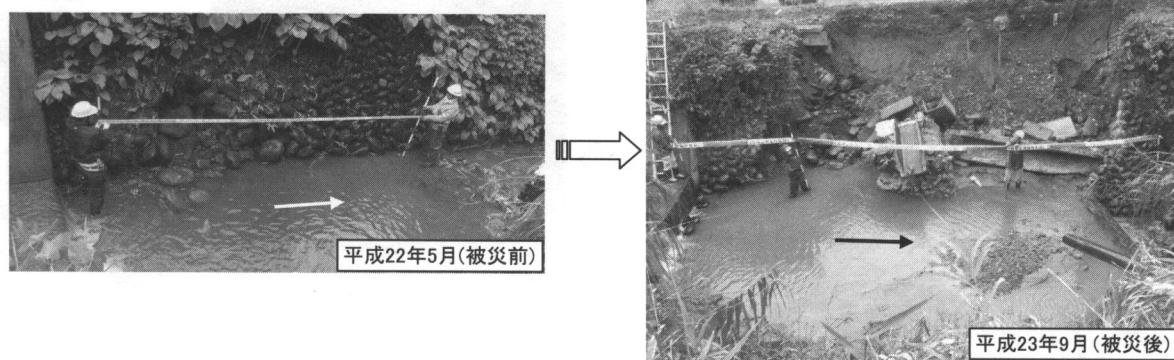


図3 計画断面図 (北沢川)



床固工全景



左岸側の状況

写真6 被災前と被災後の状況写真 (北沢川)

設定した。

③ 貝喰川

〈被害状況〉

砂防堰堤の垂直壁下流側の両岸にブロック積構造の護岸工があり、そのうち、左岸側の取り付け護岸全体が、護岸背面の水田の一部を巻き込んで倒壊した。砂防堰堤と右岸側の護岸工に被害は無かった。

〈原因と想定される現象〉

左岸側は、流路が湾曲していることから水衝部となっており、豪雨による増水によって、護岸工天端付近まで水位が上昇した。それによって、護岸背面の軟質な水田側の土砂や護岸の根元が侵食され、護岸が不安定化した。更に倒壊した護岸の下流側にも湾曲部は連続しているが未対策であり、その部分が侵食されることで上流側の護岸工が不安定となり、倒壊したものと想定される。また、写真を見ると、河床低下によって、護岸工の根入れが元々小さくなっていたことが推定され、これも一つの原因であったと推定される。

〈復旧方法〉

原形復旧を基本とし、線形や擁壁高は元のままとするが、侵食防止の観点から、擁壁の設置範囲を湾曲部の終わり付近まで延長した。また、右岸側の擁壁の根入れが不足していることから、護岸工の設置範囲に捨石工及び護床工を計画した。

5. おわりに

今回、豪雨による砂防施設の被害状況の一部を紹介した。これらは、記録的な豪雨が大きな要因ではあるが、一方で、施設自体が持つ、破損や侵食等の不安定要素も少なからずその要因の一つとなつたと言える。今後は砂防施設に限らず、現在ある対策施設をどのように評価し、維持管理を含めた自然災害対策を進めていくのかが、今後の大課題となるものと改めて感じている。

最後に、新潟県十日町地域振興局地域整備部砂防課の皆様には、お忙しい中、資料の引用について御了承を頂き、この場を借りましてお礼申し上げます。ありがとうございました。



下流側から全景を望む



取り付け護岸の状況

写真7 被災前と被災後の状況写真（貝喰川）

愛媛県砥部町・伊予磁と 砥部焼き

1. はじめに

愛媛県砥部町といえば、日本最大の断層である中央構造線の露頭である「砥部衝上（しょうじょう）断層」が有名です（写真1）。



写真1 天然記念物砥部衝上断層。衝上断層公園として整備されている。

砥部衝上断層は南側の久万層群の礫岩に、北側に分布する和泉層群の砂岩が乗り上げている逆断層（古い地層が新しい地層の上に重なった断層）です。1938年（昭和13年）に国の天然記念物に指定されています。現在は、衝上（つきあげ）断層公園として整備され、気軽に観察することができます。

衝上断層の南側に分布する久万層群には、第三紀安山岩類が貫入しており、その大部分が熱水変質作用を受け、陶石化しています。砥部町ではこの陶石を利用し、特産品として砥部焼き（磁器）が生産されています。

安山岩を使用した砥部焼きの誕生には、苦難の歴史があり、それについてご紹介します。

2. 砥部焼き

砥部焼きは、約230年の歴史があり、国の伝統的工芸品（昭和51年）や県の無形文化財（平成17年）に指定されており、現在は約100軒の窯元があります。また、砥部焼伝統産業会館が平成元年に開館され、砥部町の重要な産業として発展しています。

砥部焼きの主な原料は、粗面岩質安山岩が陶石化（火成岩などで、熱水溶液によって長石などのアルミニノ珪酸塩鉱物がカオリיןに変質する作用）したもので

砥部焼は、白磁に青い顔料で文様を絵付けされているのが特徴で、日常に使用する器として、愛媛の家庭には、必ずといっていいほど、砥部焼きの食器があります（写真2）。

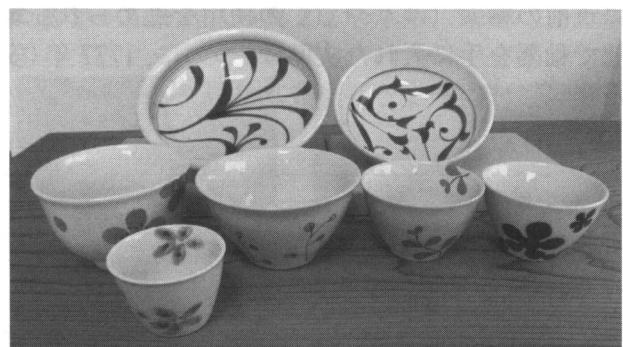


写真2 我が家の砥部焼き。奥が昔からある大皿、手前は最近購入したどんぶり等。

私が特におすすめなのは、砥部焼きの器でうどんを食べることです。器はやや厚みがあり、口当たりが良く、砥部焼きの特徴である藍の絵模様と白いうどん、ネギの緑が鮮やかで、より食欲をそそります。つゆは、讃岐うどん系の色の薄いつゆがおすすめです。

3. 砥部焼きの誕生

砥部町には、奈良・平安時代から砥石（刃物や石材などを研ぎ磨く石）の産地として有名であった「砥石山」という山があります。“砥”石が取れる場所という意味で、砥部（とべ）と呼ばれるようになったという説もあります。

砥石山でとれる砥石は「伊予砥」と呼ばれ、特産品として、全国に名を知られていました。江戸時代には、大洲藩が採掘を行い、大洲藩の御用商人である和泉屋治兵衛により「伊予砥」は全国的に販売されていました。しかしながら、大洲藩は干ばつによる農作物の不作や江戸藩邸の火事などで財政不足に陥っていました。

そこで、和泉屋治兵衛の助言により、伊予砥の屑石を利用し、磁器を作ることにしました。砥石屑の捨て場に困っていた藩にとって、それは有効利用となりました。

砥石屑を利用した磁器づくりは、1775年（安永4年）砥部町五本松の上原窯で行われました。

大洲藩の命を受けた奉行・加藤三郎兵衛が、地元の豪農である門田金治に出資させ、後に砥部焼きの陶祖と呼ばれる杉野丈助を現場監督にしました。

最初は肥前から陶工5人を招いて磁器づくりを始めましたが、器にヒビが入る失敗を繰り返し、招いた陶工達は砥部を去りました。丈助はその後も失敗を繰り返しながら、磁器づくりを続けました。その時、筑前から砥部にきていた陶工・新吉に筑前の釉薬（ゆうやく）の使用を進められ、筑前で釉薬を手に入れた丈助は、ついに、1777年（安永6年）に磁器づくりを成功させました。

4. 砥石山

砥石、砥部焼きの発祥地である「砥石山」は、現在ではその採掘跡が外山（とやま）運動公園として整備されています。採掘坑が見られる砥石山遺跡は、高さ約10～15mの突出した急崖部に見られ、見事な安山岩の柱状節理が観察できます。採掘坑は風化により落盤が多発しており、進入は非常に危険です（当然、立入禁止ですが）（写真3、4）。

現地の案内板には伊予砥について、「正倉院文書には觀世音菩薩像を作るときの材料として使われていたこと、また、平安時代の「延喜式」にはこれを政府に納めたことが記載されている」とあり、古くから産出されていることが伺えました。

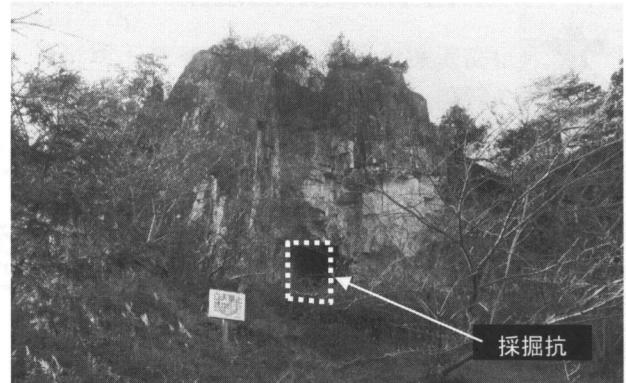


写真3 砥石山の採掘跡。中央の四角い穴が採掘坑である。



写真4 採掘坑の拡大写真。安山岩の柱状節理が見られる。

5. おわりに

砥石山と砥部焼きの歴史から、砥部町の人々が、砥石の切り出しや運搬による過酷な労働で、地域の産業を支えてきましたことが伺われました。また、産業廃棄物である砥石屑を有効に利用する発想と砥部焼きを誕生させた実行力に感銘を受けました。私たちも、苦難から生まれる発想と実行力で、何事も乗り越えていきたいと思いました。

砥部町では、春・秋に砥部焼きまつりが行われています。また、砥部町には西日本屈指の規模を誇る県立「とべ動物園」や遊びと創造のシンボル「えひめこどもの城」などがあり、子供からお年寄りまで楽しめる町であります。是非、地質技術者には訪れてほしい町です。

・引用参考文献、ホームページ

- 1) 「伊予砥ものがたり」著者山本典男
 - 2) 「砥部焼きのしおり」愛媛県砥部町教育委員会
 - 3) 「マンガ砥部焼の歴史」発行砥部町とべの館
 - 4) 砥部町HP—砥部焼きの歴史
- 〔(株)アースコンサルタント 技術部 曽我部 潤〕

各地の残すべき地形・地質

周氷河地形と高山植物の島 (礼文島)

周氷河地形とは

テレビや雑誌等で北海道北部や東部のなだらかな丘の連なる風景をよく目にすると。これは寒冷地特有の地形で、周氷河地形と呼ばれるもの一種である。周氷河とは“氷河に覆われた地域の周辺”的ことで、周氷河地形は凍結や融解作用の卓越した地域に形成される。

周氷河地域の斜面上の物質移動は、凍結融解による“ソリフラクション”(図1)や凍土上を面状に流れる地表流“ウォッシュ”が主営力となる。ソリフラクションは霜柱等により地表付近の物質を斜面の垂直方向に持ち上げ、重力方向に落ちることを繰り返し、少しづつ斜面下方へ移動する緩速度のマスムーヴメントである。

国内の一般的な山地斜面は、流水による浸食が卓越しているため線的な浸食・物質移動が盛んとなるが、凍結融解の卓越する斜面では面的な浸食・物質移動が活発となる。そのため、流水による下刻作用が相対的に弱まり、谷が埋積されて丸みを帯びた波状の緩斜面が発達するのである。

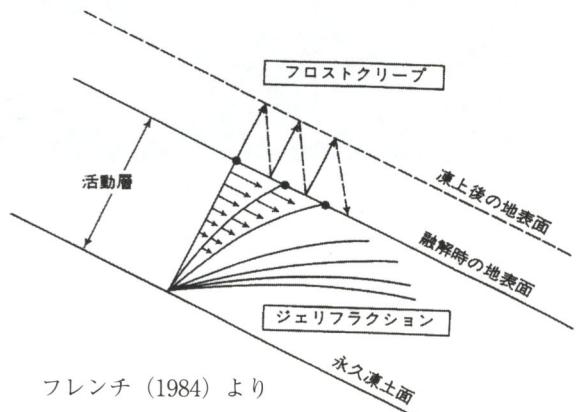


図1 ソリフラクションの物質移動（縦断面）

礼文島の周氷河斜面

周氷河地形は国内では主として高山地域に分布するが、北海道や北上山地では低標高地域にも広

がる。特に北海道北端に位置する礼文島や宗谷丘陵では、丸みを帯びたみごとな周氷河斜面が海拔高度付近まで発達する。これらは主として約1万年前までの氷期に凍結融解の卓越した環境下で形成され、それ以降の温暖な時代においても流水による線的な浸食を受けることの少ない寒冷乾燥気候の地域で特に見ることができる。

礼文島は高緯度で霧も多いため寒冷なうえ、日本海の強風にさらされることから、標高の低い島ながらも高山同様の気候環境となる。そのため、高山植物やハイマツが海岸付近にも見られ、周氷河地形もよく保存されているのである。礼文島は樹木が少なく眺望が開けているため、地形をよく観察することができる。丘陵の頂部や尾根筋は丸みを帯びた凸型斜面、谷の周囲はなめらかな凹型斜面が連続的につながっており、海面のうねりのような波状の地形が広がる(写真1)。

また、礼文島北東部に発達する海成段丘上にはエプロン状のみごとな山麓緩斜面地形が海岸沿いに連なっている(写真2)。



写真1 波状丘陵



写真2 段丘上の山麓緩斜面

礼文島を歩く

礼文島には西海岸の8時間コースと、南の桃岩展望台コースという人気の散策路がある。両者ともに樹木がほとんど無く、周氷河地形とお花畠と日本海の広大な景観を満喫できるお薦めの散策路である(図2)。

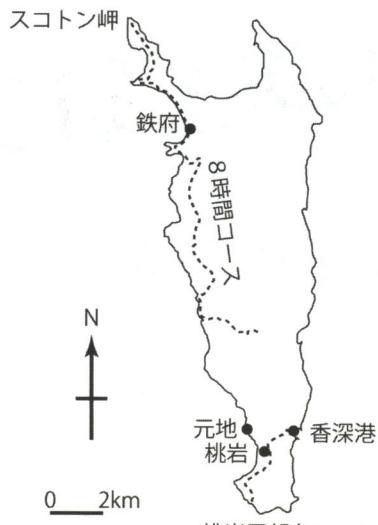


図2 礼文島の散策コース

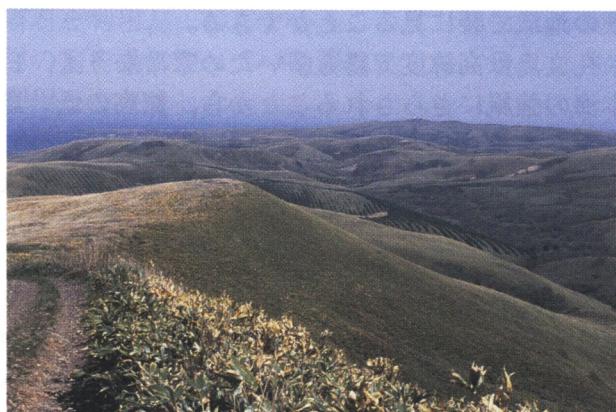


写真3 8時間コースから眺める波状丘陵

8時間コースは礼文島最北端のスコトン岬が出発点で、しばらくはなだらかな波状丘陵（写真3）が続く。その先の鉄府では日本海からの強風に乗り、海浜の砂粒が急斜面を駆けのぼって標高50～80mの丘陵地に砂丘地形を形成する。それは周氷河地形ではないが、礼文島の寒冷かつ強風地域ならではの特異な地形といえる。その砂地には礼文島の固有種レブンアツモリソウが生息する



写真4 砂地に咲くレブンアツモリソウ

(写真4)。

さらにその先の丘陵地を進むと、コース沿いに高さ1～2mの高まり、凍結坊主（谷地坊主）を見ることがある（写真5）。凍結坊主は北海道の湿地によく見られるが、ここではササ地斜面のササの無い芝生の箇所に限って分布している。



写真5 凍結坊主（スケールは1m）

一方の桃岩展望台コースでは、なだらかな波状丘陵とその周囲をえぐる地すべり地形を望むことができる（写真6）。初夏には、このコース周辺の波状丘陵に様々な高山植物が点在し、丘陵の向こうに雪をたたえる利尻富士を望む絶景が見られる。



写真6 桃岩（右端）とその直下の元地地すべり
その奥には丸みを帯びた周氷河斜面が続く

北の最果て礼文島は、四方を海に囲まれた、高山植物の咲く周氷河地形の広がる日本唯一の島なのである。

引用文献

フレンチ（1984）：周氷河環境，古今書院

[北海道立総合研究機構 地質研究所 石丸 聰]

各地の博物館巡り

神奈川県立 生命の星・地球博物館



生命の星・地球博物館のエントランス

はじめに

神奈川県立生命の星・地球博物館は、箱根の玄関ともいえる箱根登山線「箱根湯本」駅の1つ手前「入生田」駅にある大型自然史博物館です。前身である神奈川県立博物館（横浜；現在は歴史博物館）から自然系分野が別れ、1995年3月に当地で開館しました。この年は1月に兵庫県南部地震があり、オープン前に吊り物展示などが強化されました。来館者の多くは箱根観光を兼ねていて、学校団体も林間学校、修学旅行で利用される割合が多いのが特徴です。したがって、箱根の天候が悪くなってしまうと多くの方が来館されます。年間利用者数は約30万人、中学生以下の方が50%近くを占めます。詳しくはホームページ <http://nh.kanagawa-museum.jp/>（年間アクセス数約22万）を是非ご覧ください。

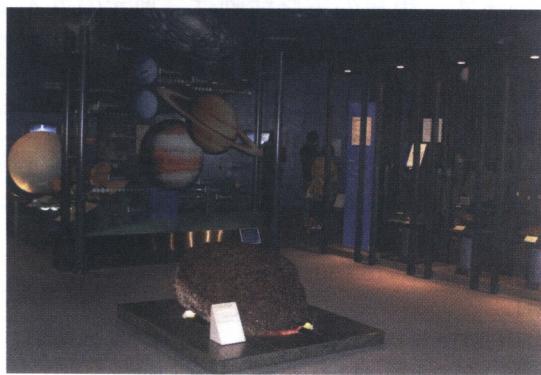


写真1

展示方法の特徴

「手で触れる展示」が大きな特徴です。外国の博物館では、手で触れる（いわゆるハンズオン）展示はしばしばみられますが、日本の博物館としては、先進的な展示方法として注目を浴びました。開館から17年経っていますが、毎日触られてい

る標本達は現在も健在です。写真撮影も、個人で楽しむ分にはすべて自由です。

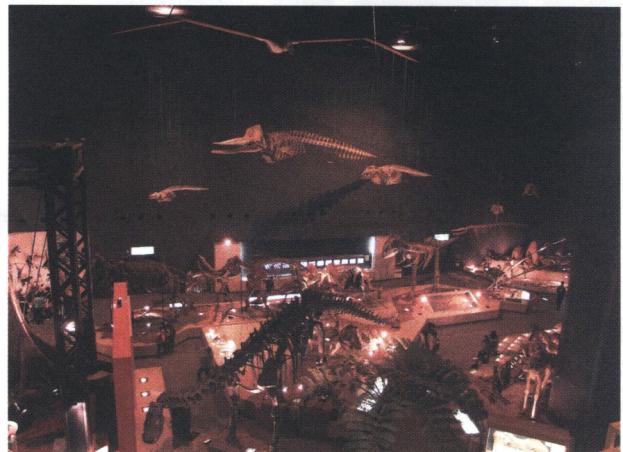


写真2

おすすめの展示

学校の先生、特に高校の地学の先生から高い評価を頂いているのが、隕石から最古級の岩石、ストマトライト、縞状鉄鉱層に至る地球創世記の充実した展示です（写真1）。生命の星の舞台が整う（写真2）までの重要なストーリー展示で、他館に



写真3

はあまり例のないものと自負しています。

また、3F ジャンボブックコーナーに、日本地質学会国立公園地質リーフレット1「箱根火山」に基づいた大型石膏製立体地質図があります（写真4）。博物館ボランティアの方々が作製した世界で唯一のものです。箱根にお出かけの際には、是非ご覧ください。

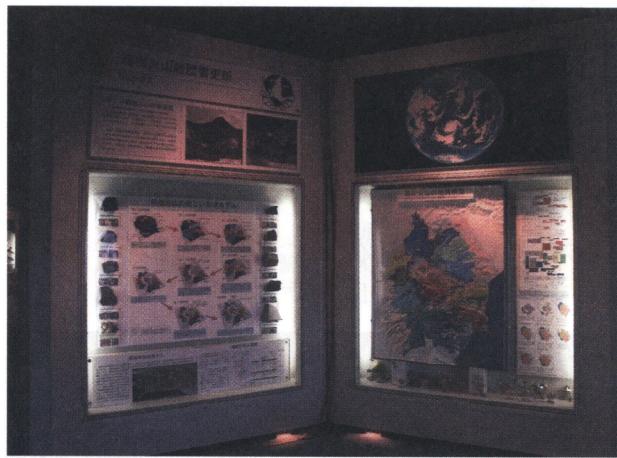


写真4

収蔵品

収蔵品は約50万点です。学芸員の専門分野（地質、古生物、動物、植物、菌類）に対応した多くの収蔵品があり、研究活動を行っています。地質関係では鉱物、岩石、化石、隕石がありますが、



写真5

他館にはあまりない収蔵品として「地層の剥ぎ取り標本」のコレクションがあります。主に貝化石（貝塚を含む）に関するものとテフラに関するものを継続的計画的に収集しています。これらは特別展や企画展で順次公開しています（写真5）。

ジオパークへの取り組み

現在、地質分野では「箱根ジオパーク」（平成24年度に日本ジオパーク認定をめざす）の支援活動を行っています（平成23年12月10日～平成24年2月26日まで企画展「箱根ジオパークをめざして—箱根・小田原・真鶴・湯河原の再発見！—」を開催（写真6）。同年9月17日まで各市・町で



写真6

巡回展を開催）。箱根は世界的な観光地ですが、火山の魅力をもっと楽しんで頂きたいとジオパーク推進協議会のメンバーと共に環境整備に取り組んでいます。現在の主な活動は、地元のガイドさんへの教育研修です。皆さん非常に熱心に取り組んでいます。

常設展料金

20歳以上 65歳未満（学生を除く）510円

15歳以上 20歳未満（中高生を除く）300円

高校生・65歳以上 100円、中学生以下無料。

開館時間：9:00～16:30（入館 16:00）

休館日

月曜日（祝日・振替休日は翌平日）、奇数月の第2火曜日（館内整理）、年末年始（12月29日～1月3日）

所在地

〒250-0031 神奈川県小田原市入生田499

電話：0465-21-1515

ファックス：0465-23-8846

（生命の星・地球博物館 笠間友博）