

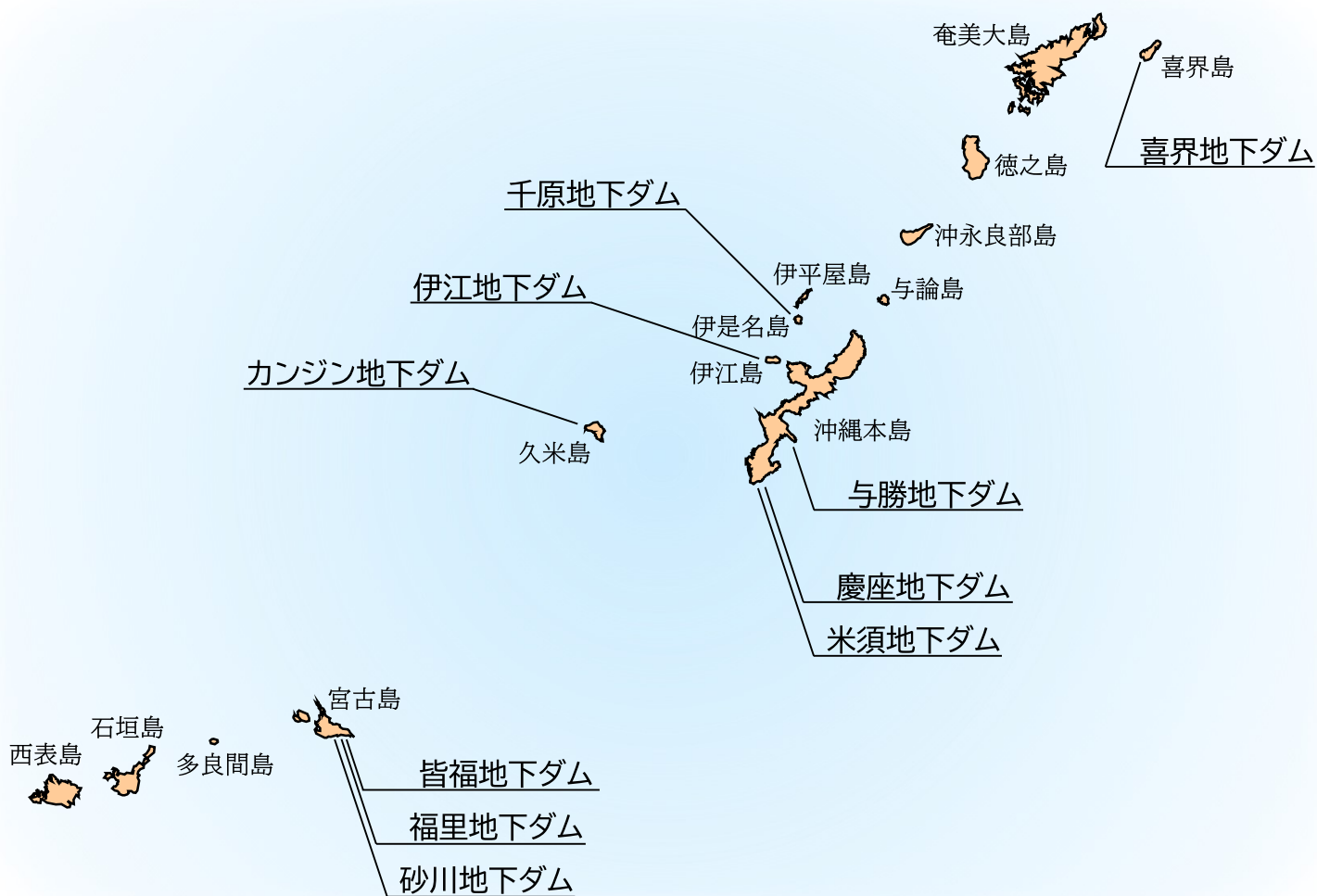
水位観測と水質分析による
地下ダム止水壁の機能評価・診断の手引き(案)

—潮汐応答と地下水年代の利用—

2023年2月

イノベ事業02012Bコンソーシアム

沖縄・奄美の農業用地下ダム



はじめに

本資料は、地中にある止水壁の機能(止水機能)を評価・診断する手法をとりまとめたものである。沖縄や奄美などの島嶼地域では、貯水量数十万トンから数百万トン級の大規模な地下ダムが貴重な農業用水源として利用されている。そのうち初期の地下ダムの完成からおよそ30年が経過し、地下ダムの止水壁の機能の監視は今後より重要になっていくと考えられる。

紹介する二つの手法では、近年地下水研究において簡単に適用する方法が開発された地下水位の潮汐応答分析と、近年普及し始めた水質分析による地下水年代測定法を利用する。ここで説明している手法にはさらに工夫の余地があるが、それは今後のさらなる技術開発・発展が期待されるところでもある。地下ダムの管理に関わる方々の参考となれば幸いである。

2023年(令和5年) 2月

イノベ事業02012Bコンソーシアム

〔 農研機構 農村工学研究部門
千葉大学大学院 園芸学研究院
日本工営株式会社 中央研究所
坂田電機株式会社 〕

内 容

1. 地下水位の潮汐応答分析による地下ダムの止水機能評価手法 P1
手法の原理と概要／地下水位の連続観測／地下水位の潮汐応答の分析／止水壁の透水性係数の計算／正常時の止水壁との比較・評価／参考情報
2. 水質分析による地下ダムの止水機能診断手法 P5
手法の原理と概要／地下水試料の採取／六フッ化硫黄(SF₆)濃度分析／正常時の止水壁との比較・評価

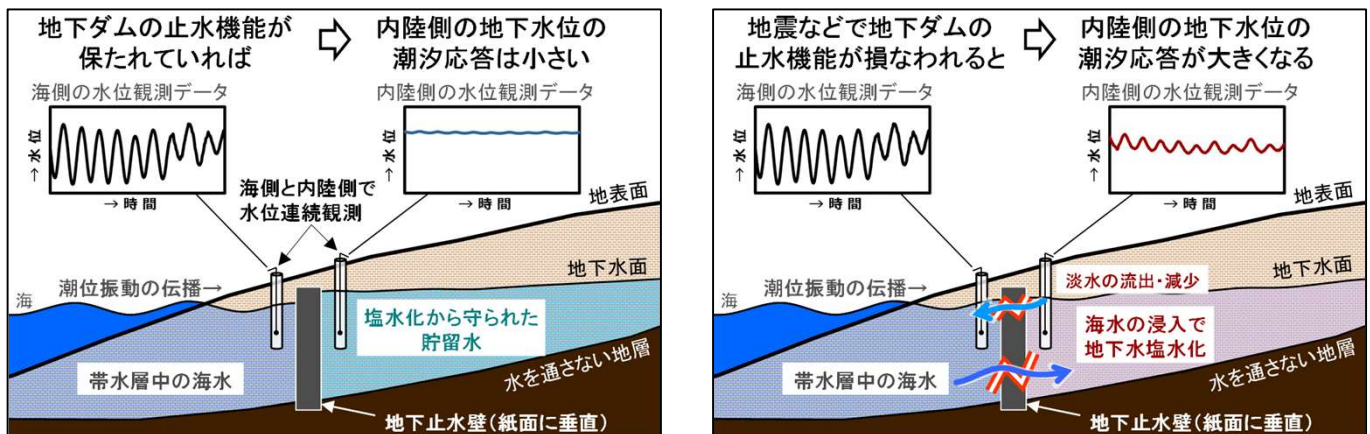
1. 地下水位の潮汐応答分析による地下ダム止水機能評価手法

■手法の原理と概要

海に接する帯水層では潮位変動が内陸に向かって減衰しながら伝播して、地下水位が周期的に振動する(地下水位の潮汐応答)。潮位変動や地下水位の潮汐応答は特定周期の正弦振動で表すことができる。水位の振動の伝播経路の透水性が低いほど、同じ距離を伝播する間に大きく減衰する。

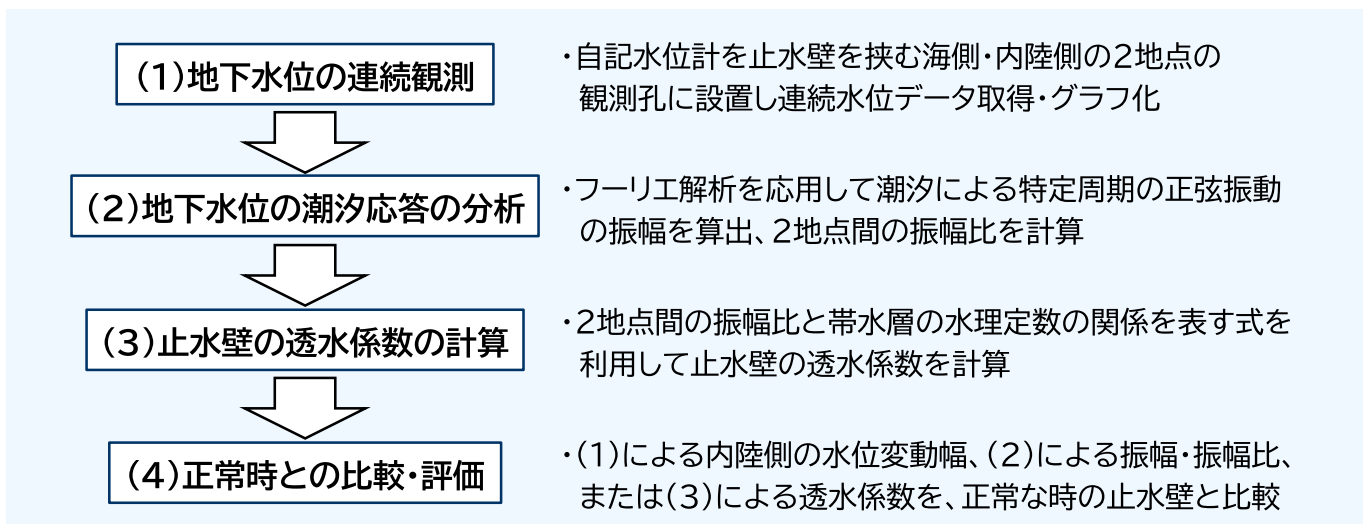
地下水位に潮汐応答がみられる帯水層に造られた地下ダムの内陸側(貯留域)の水位の潮汐応答の振幅が通常時より明らかに大きいなどの場合、止水壁に亀裂や穴が生じたなど止水機能低下の可能性を示唆する。これを利用する本手法は、貯留域の水位が止水壁天端より低く海側との水位差が小さい場合に特に適し、主に塩水浸入阻止型地下ダムの機能監視に利用しやすい方法である。

地下水位の潮汐応答分析による止水壁の機能監視



観測を含めた手法全体の流れは、(1)地下水位観測、(2)潮汐応答分析、(3)透水係数計算、(4)正常時との比較による評価である。海岸からの距離や止水壁透水係数などの条件次第で、(1)~(2)のみ、あるいは(1)のみの結果で止水機能の異常が分かる可能性もある。

手法全体の流れ



■地下水位の連続観測

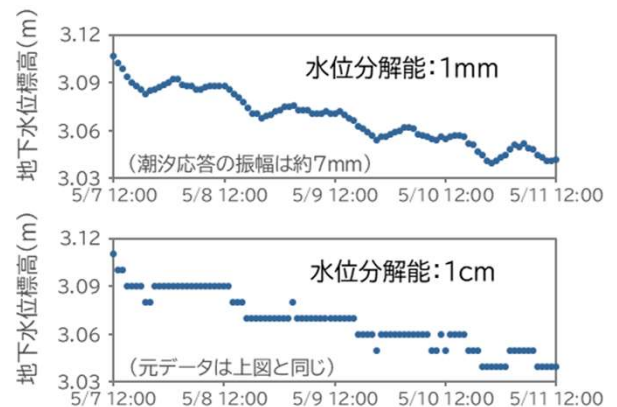
地下水位の連続観測には市販の圧力式自記水位計を用いることができる。

観測機器の水位分解能が小さいほど、より軽微な異常を発見しやすく分析精度も向上する。現地実証調査地区の例では、止水機能が保たれた通常の止水壁の内陸側の潮汐応答の振幅は1mm以下のことが多い。このため少なくとも内陸側の観測地点では水位分解能1mm程度以下の観測機器を用いることを推奨する。

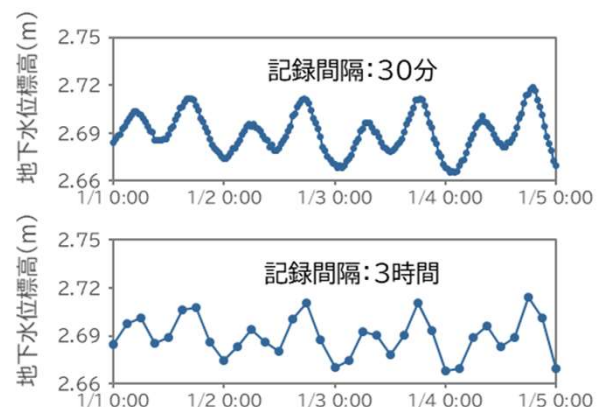
潮汐による主要な振動の周期は約12.4時間である。グラフの外観だけでも潮汐応答の変動幅が分かりやすいようデータ記録間隔は1時間以下が望ましく、可能であれば30分以下(30分、10分など)を推奨する。

止水壁の海側と内陸側の地下水観測孔にそれぞれ観測機器を設置し、同時に観測する。予想される地下水位変動範囲と機器の測定可能範囲を考慮し、適切な深度に設置する。機器の吊り下げには、伸縮の少ないロープ等の上端に孔内に落下しない大きさの金具等を取り付けたものを用いる。観測開始後は定期的に、自記計が水位を記録するタイミングに合わせて携帯用ロープ式手測り水位計により水位を測定し、後に自記計から回収されたデータを検証・補正できるようにする。

水位分解能が違う観測データ



水位記録間隔が違う観測データ



自記水位計の設置方法と観測配置の例



■地下水位の潮汐応答の分析

海側と内陸側の地下水位データそれぞれで、データに含まれる主要潮汐による正弦振動(約12.4時間周期)の振幅を算出し、2地点間の振幅比を計算する。

この潮汐応答分析は、帯水層の透水性を推定するための既往手法^{1),2)}と同様に表計算ソフト上でフーリエ解析の原理に基づく式を入力すれば可能で、関連文献³⁾の付録2では入力式の具体例が説明されている。

フーリエ解析で潮汐応答の振幅を正確に算出するための留意点は、次の2点である。

- ・適する決まった長さ(期間長)の欠測が無い時系列データで解析する必要がある
- ・データに含まれる直線的に上昇/下降するトレンド成分をあらかじめ除去するほうがよい

主要潮汐による約12.4時間周期の振動の振幅算出に適するデータの長さは、29日、59日などである。トレンド成分の除去は重み付き移動平均により可能で、その適用のためには25時間から10日間程度の追加データ長が必要になる⁴⁾。

地下水位の潮汐応答分析の手順と参考文献

重み付き移動平均

1),2),4)

フーリエ解析

1),2),3)

振幅比の計算

1) 地盤工学会誌, 65(9), 24-25(2017) …潮汐応答分析手順の概要

2) 農業農村工学会論文集, 87(1), I_51-I_60(2019) …潮汐応答分析の具体例

3) 農村工学研究所技報, 215, 141-154(2014) …フーリエ解析の原理に基づく入力計算式

4) 応用地質, 59(4), 201-212(2018) …潮汐応答分析に適した重み付き移動平均(デジタルフィルタ)

※2)~4)はWEB上で入手可能(2023年1月時点)。3):「地下水位の潮汐応答の分析による淡水レンズ帯水層の水理定数推定手法」

■止水壁の透水係数の計算

伝播する地下水位振動の振幅比と帯水層の水理定数の関係を表す簡易式を用いて、止水壁の透水係数を計算する。実際には潮汐応答分析から透水係数計算までの式が入力済みの計算シートを準備または入手し、それに2地点の地下水位観測データと、観測地点間の距離や帯水層の厚さ・水理定数などのパラメータを入力すれば計算できる。簡易式に基づくため、計算される透水係数は見かけ上のものであり実際の透水係数とは異なる(「見かけ透水係数」)。

潮汐応答の振幅比からの止水壁透水係数の計算⁵⁾

$$D = (\pi/P) \cdot X^2 / [\ln(h_B/h_A)]^2,$$

$$K_W = X_W^2 / \left(\frac{X}{\sqrt{D}} \cdot \frac{X - X_W}{\sqrt{D_Q}} \right)^2 \cdot S_W / b$$

h_B/h_A : 正弦振動の振幅比(内陸側÷海側)

D : 観測地点間の見かけ水頭拡散率、 π : 円周率、 P : 正弦振動の周期、

X : 観測地点間の距離、 X_W : 止水壁の水平厚さ、 D_Q : 帯水層の水頭拡散率、

S_W : 止水壁の貯留係数、 b : 帯水層の鉛直厚さ、 K_W : 止水壁の透水係数

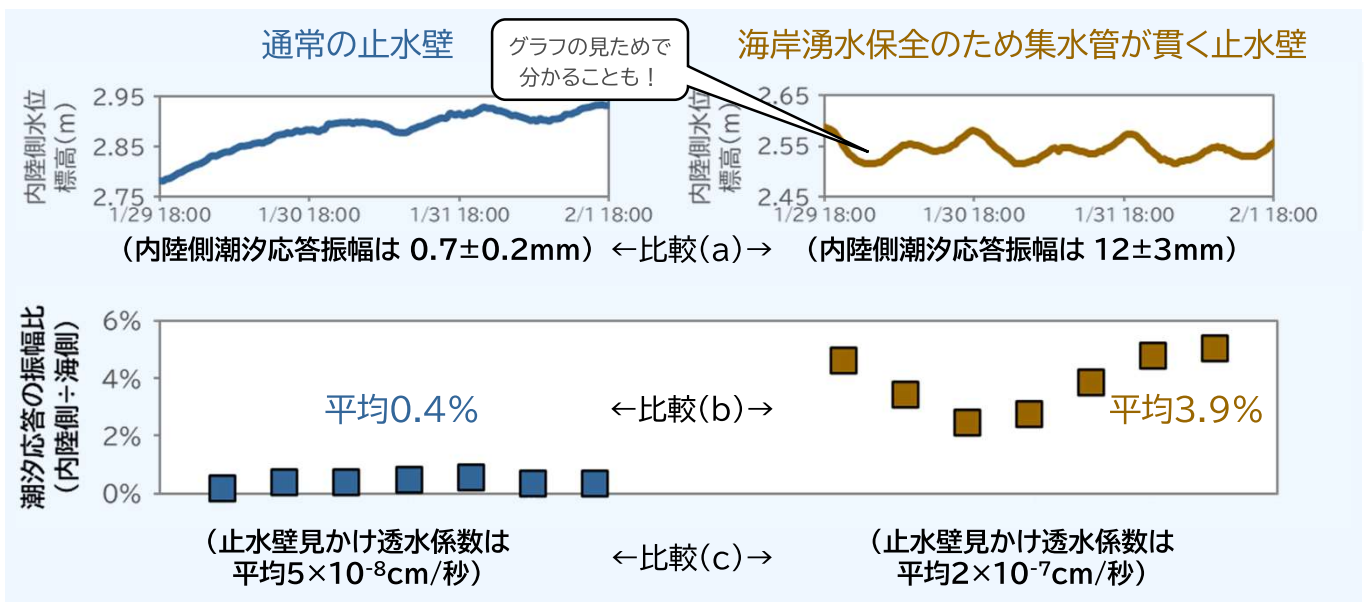
5) Groundwater, 60(6), 774-783(2022)

■正常時の止水壁との比較・評価

観測/分析/計算の結果を正常時の止水壁と比較し、(a)内陸側地点(貯留域)の潮汐応答の振幅(前頁の h_B)、(b)その海側地点の振幅に対する比(h_B/h_A)、または(c)止水壁の見かけ透水係数(K_W)が明らかに大きくなっていれば、止水機能が低下している可能性がある。(a)の変化については水位の時系列グラフの外観の違いで分かる場合もある。

例えば(a)通常1mmの h_B が10倍になった、(b)通常0.5%の h_B/h_A が10倍になった、(c)通常 10^{-8} cm/秒オーダーの K_W が1オーダー大きくなったなどの場合、止水壁の一部に地下水が流れやすい穴や亀裂ができたなどの異常が生じた可能性が考えられる。

現地実証調査における通常止水壁と人工開口部がある止水壁の比較



観測地点によっては、止水壁の機能が正常でも降雨や揚水の影響によるノイズ成分などが原因で潮汐応答の振幅が実際よりも大きく算出されたり、結果がばらついたりする。そのため止水機能の異常が生じる前から観測を行い、その地点の正常時の水位変動を把握しておく必要がある。

参考情報

- ◆本手法の実証調査で用いた欠測無く連続した時系列水位データを取得するための観測方法を中心とした、より詳しい別冊マニュアルを別途公表予定である。
- ◆狭小な地下水観測孔の地表面下に設置でき欠測が無い時系列水位データ取得が容易にできる、超小型ワイヤレス水位計をあわせて開発している(2023年4月頃販売開始予定)。
- ◆フーリエ解析で振幅とともに分かる位相の海側と内陸側の差から、止水壁の透水係数を計算する方法もある。観測孔が無くても地下水位の潮汐応答の位相を調べる方法として、時系列電気探査データを用いる手法が考案されている⁶⁾。

6) 日本応用地質学会令和4年度研究発表会講演論文集, 63-64(2022)

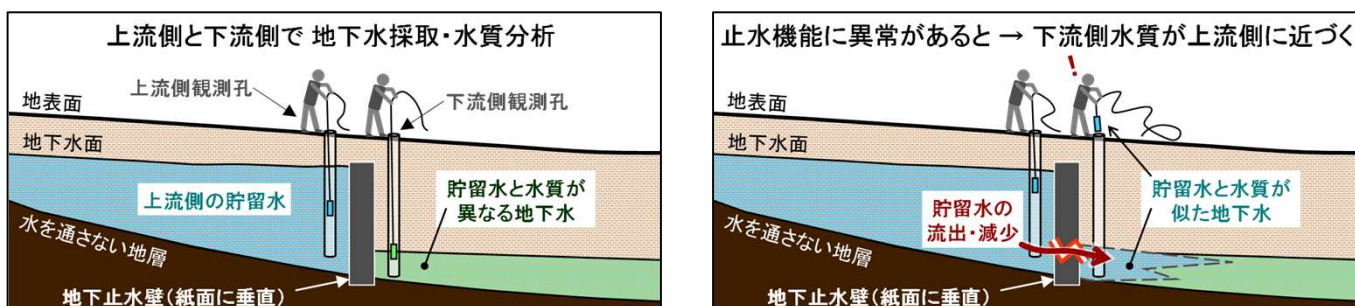
2. 水質分析による地下ダムの止水機能診断手法

■手法の原理と概要

帯水層中に地下水の流れを遮る止水壁があると、止水壁を通した地下水の交流はあったとしても極端に遅く、また止水壁の上流側(貯留域)と下流側では地下水の現在に至るまでの履歴が異なることで、特に地下水年代(降水が地下に浸透し地下水になってからの年月)に関する水質は上下流間で異なることが期待される。

通常時に上下流の地下水の水質が異なっている地下ダムの下流側の地下水の水質が、上流側(貯留域)の水質に近づくことがあれば、止水壁に亀裂や穴が生じたなど止水機能の異常の可能性を示唆する。このことを利用する本手法は、上流側の地下水位が(止水壁天端を超えない範囲で)下流側より高い場合に適し、主に貯留型地下ダムの機能の異常の検知に利用しやすい方法である。

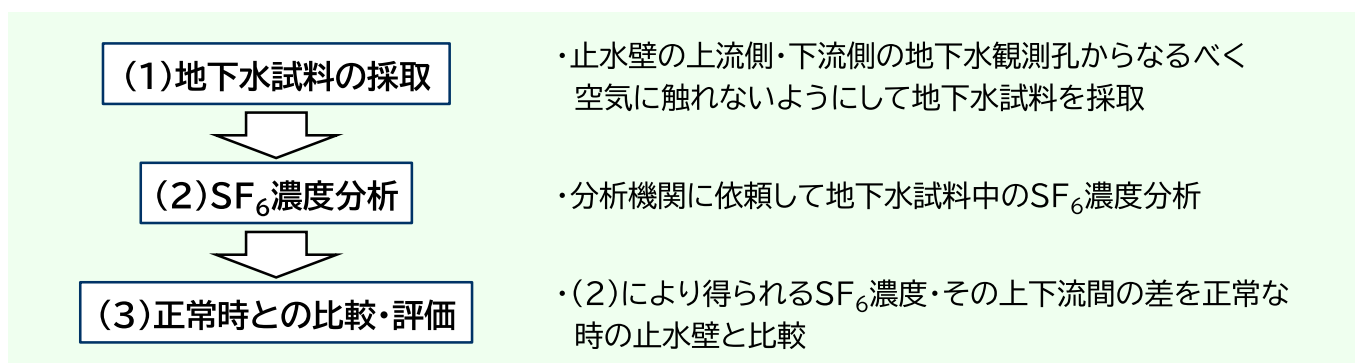
地下水の水質分析による止水壁の機能診断



地下水年代に関する水質として、地下水に含まれる六フッ化硫黄(SF_6)の濃度がある。 SF_6 は主に工業用途で使われる化学物質で、1970年代から大気中濃度が単調に増加していることから降水中の SF_6 濃度は現在に近いほど高く、それが浸透した地下水でも同様と考えられている。 SF_6 濃度は地下水年代が古いほど低く新しいほど高く、止水壁の上下流間で異なることが期待される。

SF_6 濃度分析を利用する本手法は、地下水試料採取に工夫を要するなどの制約は多いが、地下水位に潮汐応答が無い地下ダムの現場でも利用できる新たな手法として、あわせて紹介する。

手法全体の流れ



手法全体の流れは、(1)地下水試料採取、(2)SF₆濃度分析、(3)正常時との濃度の比較による評価である。(2)の分析は専門機関に依頼して行う。試料採取と評価には、地下水調査にかかる技術者や研究者の参画または協力があることが望ましい。

■地下水試料の採取

地下水用の採水器具を用いて、止水壁の上流と下流の観測孔から地下水試料を採取する。

SF₆濃度分析用の採水では、試料水を専用容器に密閉するまで出来る限り空気に触れないようにしなければならない。そのための特種な採水器具と方法があり、採水器具から密閉容器に試料水を移す際にもなるべく空気に触れないような配慮・工夫が求められる。試料水を容器に密閉後に容器内に気泡が無いことを確認し、気泡がある場合は採水をやり直す必要がある。

本手法の開発のための現地調査では、特定深度の地下水を空気に触れずに採取できる専用器具を用いた。ただし地下水年代測定法に関する既往文献⁷⁾では、入手しやすい一般的な観測孔用採水器具を用いた省力的な採水方法も紹介されている。

7) 農研機構技術紹介パンフレット「省力的な採水法による六フッ化硫黄を指標とした地下水の年代測定」(2019)

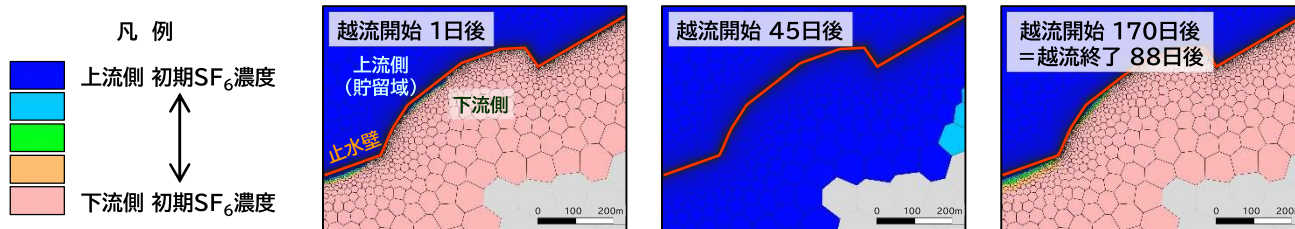
SF₆濃度分析のための地下水試料採取作業



貯留域の水位が止水壁天端より高く越流していると、止水壁の機能が正常であっても下流側の地下水が上流側の水質の影響を受けるため、本手法は適用できない。現地調査地区の地下ダムを模擬した地下水解析の一例では、越流終了から3ヶ月程度、下流側の水質に影響が残る。地下水の流れが遅い条件では、さらに長く影響が残る可能性がある。

越流期間および越流終了後3ヶ月程度は、本手法適用のための採水は避けるほうがよい。対象地下ダムの止水壁上流側(貯留域)の水位の状況(越流しているかどうか)については、1ヶ月に1回以上の頻度で定期的に把握されていることが望ましい。

止水壁下流側の地下水水質への越流の影響(地下水解析結果)



■六フッ化硫黄(SF₆)濃度分析

採取した地下水試料を分析機関に送り、SF₆濃度分析に供する。

分析装置は、水試料からSF₆を分離・抽出する前処理装置とガスクロマトグラフから構成される。水試料のSF₆濃度分析が可能な国内の機関は少ないが、一部の大学で可能なほか、分析を受注して行う民間事業者がある※。本手法開発のための調査では、千葉大学内に構築した分析装置を用いたほか、一部を民間事業者に依頼した。

※(株)地球科学研究所(2023年2月時点)

SF₆濃度分析装置

なお地下水試料の採取時には分析機関が指定する仕様の密閉容器を用いるため、分析を依頼する機関に事前に確認して準備する必要がある。

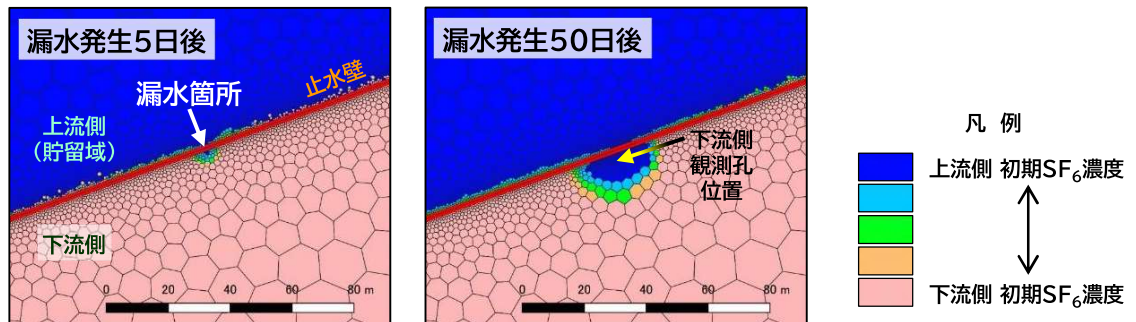


■正常時の止水壁との比較・評価

SF₆濃度分析の結果から止水壁の上下流間の濃度差を正常時の止水壁と比較して、明らかに小さくなっていれば、止水機能に異常が生じた可能性が考えられる。

現地調査地区の地下ダムを模擬した地下水解析では、携帯用手測り水位計による止水壁上流側の水位測定では検知できない程度の漏水部が止水壁に生じた場合でも、地下水のSF₆濃度分析によって検知できる可能性があることが示されている。

止水壁に漏水が生じた仮想条件での地下水水質への影響(地下水解析結果)



一般的な貯留型地下ダムの理想の状況では、止水壁の下流側では新しく地表から浸透した水が多くSF₆濃度が高く、上流側(貯留域)では新しい地下水と貯留されている古い地下水の混合によりSF₆濃度がある程度低いことが想定される。この場合、下流側のSF₆濃度が正常時より低くなり上流側の水質に近づくことが止水機能の異常の可能性を示唆する。

本手法の開発のための現地調査地区の地下ダムでは、難透水性基盤の複雑な形状などのため、理想的な状況とは逆に上流側に比べて下流側の地下水のSF₆濃度が低い場合があった。この場合には、下流側のSF₆濃度が高くなることが止水機能の異常の可能性を示す。また貯留域内の水質が必ずしも一定ではないことも明らかとなっている。いずれにしても、対象とする地下ダムにおいて止水機能の異常が生じる前から止水壁上下流の地下水の分析データを蓄積し、正常時のSF₆濃度の分布や変化を把握しておくことが重要である。

地下ダム止水壁上下流の地下水SF₆濃度分布の例



水位観測と水質分析による地下ダム止水壁の 機能評価・診断の手引き(案)

2023年2月 イノベ事業02012Bコンソーシアム

本資料で紹介した技術は、生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」(JPJ007097)の支援を受けて次の研究課題により開発したものです。

課 題 名	地下水位の潮汐応答解析と地下水年代測定による地下ダム止水壁の機能評価技術の開発
課 題 番 号	02012B
研究代表機関	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構(農村工学研究部門)

○技術に関するお問い合わせ(農研機構メールフォーム):

<https://prd.form.naro.go.jp/form/pub/naro01/gijutsu>

※「お問い合わせ内容」欄に、上記研究代表機関の括弧内の部門名称を含めて記入してください。

○知的財産(特許)に関するお問い合わせ(農研機構メールフォーム):

<https://prd.form.naro.go.jp/form/pub/naro01/patent>

※本資料で紹介した技術には、次の特許等が関連するか、その可能性があります。

- ・特許第6368014号(地下埋設壁材の評価方法)
- ・特開2020-187119(地下ダム止水壁の透水性評価方法)
- ・特開2022-114126(地下水位変動の検知方法)