360°カメラ搭載ドローンを用いた工場排水管路の無人点検および地上・地下統合 3D 可視化手法の現地適用

大成建設(株)　正会員　　○辻　和也

１．はじめに

供用開始から長期間が経過した工場では，埋設排水管路の劣化状態を把握し，計画的に補修・更新することが重要である．一方，従来の管路点検は，管径，水位，流速等の条件によって作業員の立入りを伴う場合があり，酸素欠乏，有害ガス，流下水，暗所・狭隘空間への対応が課題となる．

SfM（Structure from Motion）は，多視点画像から対象物の三次元形状を復元する手法であり，地形・地質分野をはじめとする三次元計測に広く活用されている[1)]．そこで，360°カメラを搭載した飛行型・舟艇型ドローンによって管内映像を取得し，SfM により管路内部を 3D モデル化する点検手法を開発した．本稿では，三重県四日市市内の化学工場排水管路への適用事例を対象に，管路内への作業員の立入りを伴わない調査（以下，国土交通省の基本的考えに基づき「管内 No Entry」と表記[2)]），管内形状・寸法の 3D 可視化，地上部と地下管路の統合，異常箇所の地上位置へのマッピングに適用した事例について報告する．

２．点検手法および現地適用

(1) 手法の構成

本手法は，管内条件に応じて飛行型または舟艇型ドローンを選定し，搭載した 360°カメラで管内全周を連続撮影するものである．取得映像から管内 3D モデルを作成するとともに，地上部を空撮して作成した 3D モデルと共通基準点で結合する．これにより，異常箇所の管内位置，管路寸法，地表面からの深さおよび地上の直上位置を同一空間で確認できる．本手法の構成を**図-1** に示す．

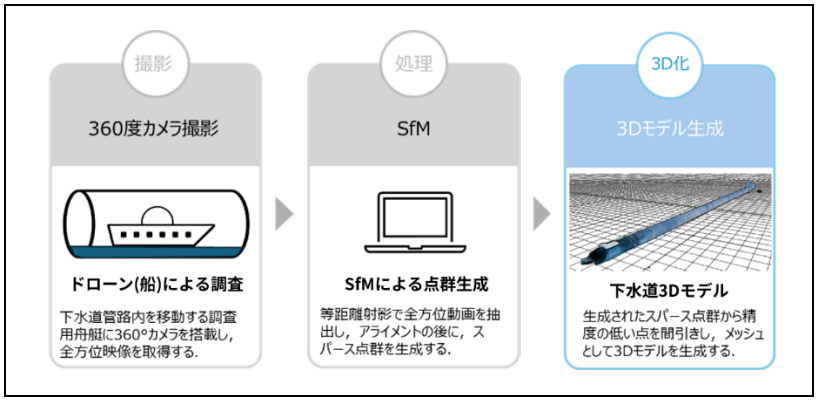


図-1　本手法の構成図（舟艇型の例）

キーワード　管路点検，360°カメラ，ドローン，SfM，3D モデル，維持管理
連絡先　〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1　大成建設技術センター　TEL:090-4583-0419　E-mail:tz-kzy00@pub.taisei.co.jp

(2) 調査対象

主対象は，工場入口付近の人孔 No.15-No.16 間に埋設された内径 φ1,500 mm，延長 11.3 m の排水管路である．当該区間は車両通行が多い道路下に位置するため，異常発生時の影響が大きい．また，連続映像取得の適用性確認として，人孔 No.14-No.15 間の内径 φ1,350 mm，延長約 100 m の区間も飛行型ドローンで調査した．調査は 2026 年 5 月 29 日に実施した．対象区間を**図-2** に示す．

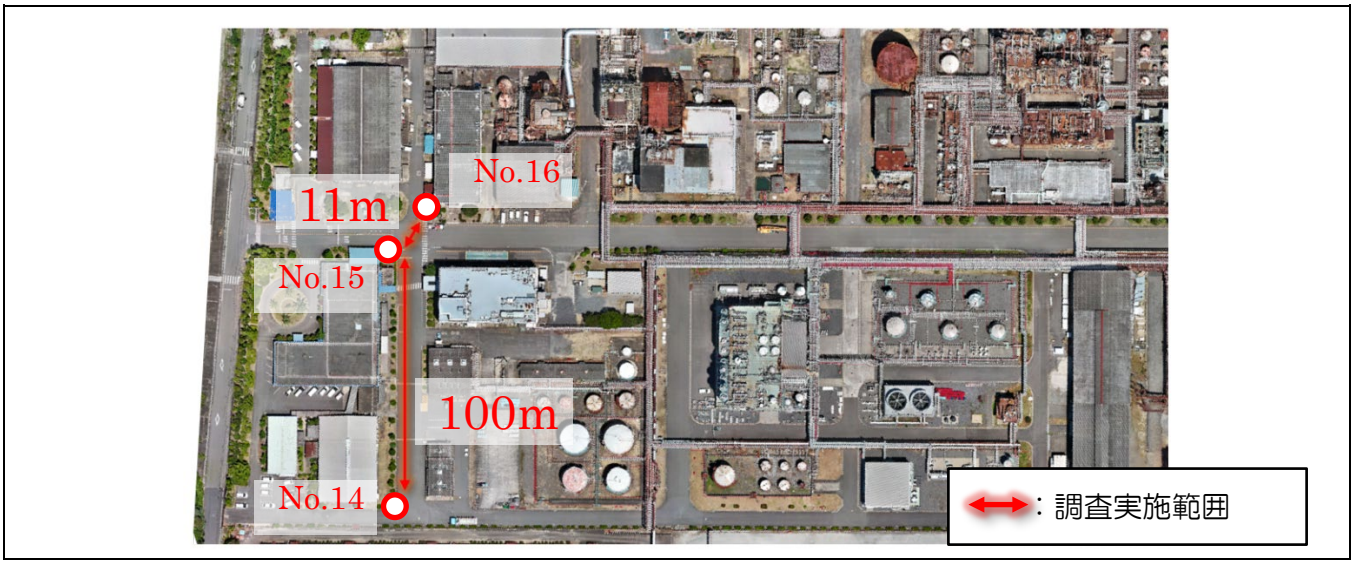


図-2　調査対象管路および調査区間

(3) 使用機器および調査方法

管内調査には，360°カメラを搭載した飛行型ドローンおよび舟艇型ドローンを使用した．飛行型は，管内に十分な飛行空間を確保できる低水位区間に適用し，主として長距離区間の連続映像取得に用いた．舟艇型は，走航可能な水深を有する区間に適用し，飛行型と比較して機体の揺動が小さいことから，SfM による 3D モデル作成用の映像取得に用いた．管内通信を確保するため無線通信エクステンダーを設置し，機体は人孔上部から籠を用いて投入・回収した．操縦者 1 名，補助員 2 名の計 3 名で運用し，作業員は管内に立ち入っていない．

主対象区間では，内径 φ1,500 mm に対して 1,200 mm 以上の飛行空間を確保することを本実証における飛行条件とし，水深 30 cm 以下を飛行開始の目安とした．排水後の水深が 29 cm であることを確認した後，飛行型および舟艇型の順に調査を実施した．各機体の主要諸元および適用条件を**表-1** に、使用機体を**図-3** に示す．

表-1　飛行型・舟艇型ドローンの適用条件および特徴

種別	機体寸法 （幅×長さ×高さ）	主な適用条件	特徴
飛行型	230×210×40 mm	飛行空間（気相域 800mm 以上）を確保できること、通信を確保できること	移動速度が速く、長距離の連続映像取得に適する
舟艇型	300×450×350 mm	走航可能な水深（50mm 以上）を確保できること、管径 500 mm 以上	映像の揺動が比較的小さく、SfM 用映像の取得に適する



図-3　360°カメラ搭載飛行型（左）・舟艇型ドローン（右）（JP Drone 株式会社開発機体）

３．適用結果

(1) 調査結果

各調査区間における適用機体，機体移動時間および主な取得成果を**表-2** に示す．No.15-No.16 間では，360°映像を用いた SfM による 3D モデル作成を目的として，画像の揺動やモーションブラーを抑えるため，比較的低速で調査を実施し，平均移動速度は飛行型で 0.25m/s，舟艇型で 0.15m/s であった．

一方，No.14-No.15 間の延長約 100 m 区間では，SfM 処理を前提とせず 360°映像を取得する場合の調査速度を確認することを目的として，高速で飛行させた．その結果，約 1 分 45 秒で約 100 m の連続 360°映像を取得でき，平均移動速度は約 0.95 m/s であった．

以上より，本現場条件では，SfM による 3D モデル作成を目的とした調査では 0.15～0.25 m/s 程度の低速移動，管内状況の映像確認を主目的とした調査では約 0.95 m/s での高速移動が可能であることを確認した．ただし，SfM が成立する移動速度は，撮影条件，照明，映像のフレームレート，機体の揺動および管壁のテクスチャ等に影響されるため，今後，移動速度と 3D モデル品質の関係を定量的に検証する必要がある．

表-2　調査区間別の適用機体，調査時間および取得成果

区間	管径・延長	使用機体	調査時間※	平均移動速度	主な取得成果
No.15 -No.16	φ1,500 mm 11.3 m	飛行型・ 舟艇型	飛行型：約 1 分 30 秒（往復） 舟艇型：約 2 分 30 秒（往復）	飛行型：0.25m/s 舟艇型：0.15m/s	360°映像 管内 3D モデル 地上・地下統合 3D モデル
No.14 -No.15	φ1,350 mm 約 100 m	飛行型	約 1 分 45 秒（片道）	約 0.95m/s	全区間の連続 360°映像

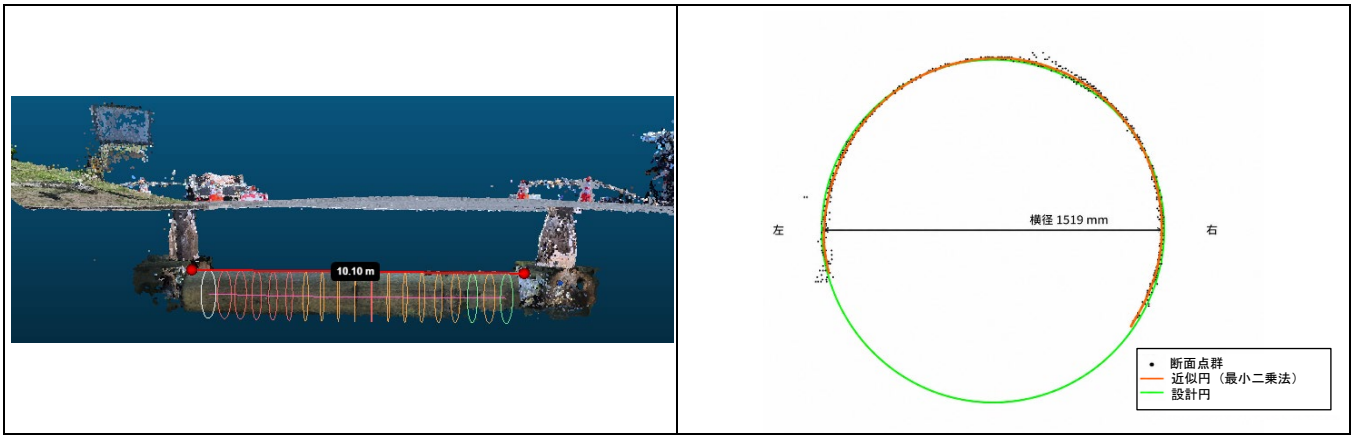
※調査時間は機体の移動時間のみであり，SfM 処理時間，排水，機器準備，投入・回収等は含まない．

(2) 管内 3D モデルの断面評価方法

本検討では，360°映像から作成した SfM モデルについて，管路断面形状をどの程度連続的かつ定量的に取得できるかを確認するため，管路長手方向に概ね 0.5 m 間隔で 19 断面を抽出し，断面形状，管径および管芯位置の評価を行った．断面抽出位置および断面評価例を**図-4** に示す．

各断面では，抽出した管壁点群を断面平面上に投影し，管路が円形断面であることを前提として，点群と円周との距離の二乗和が最小となる円を近似円として算出した．この近似円の中心を各断面における管芯位置とした．また，管芯を通る水平方向の直線と近似円との左右交点間距離を横径として算出した．

なお，管底部は水面下となり点群が十分に取得されていないため，縦径は近似円から推定される値となる．このため，本検討では点群が比較的連続して取得されている左右方向の横径を用いて管径の定量評価を行った．



※JP Drone 株式会社開発点群ビューワーソフト使用

図-4　管路 3D モデルにおける断面抽出位置および近似円による管径評価例（距離 0.5m の例）

(3) 管内 3D モデルの形状・位置精度の評価

前節で設定した 19 断面を対象に，SfM モデルから取得した管径および管芯位置の定量評価を行った．各断面の計測結果を**表-3** に示す．各断面における管壁点群と近似円との残差 RMS は 6.0～7.1 mm，平均約 6.5 mm であり，断面ごとに概ね同程度のばらつきで近似円を算出できた．

19 断面から算出した管径は 1,501～1,565 mm, 平均約 1,535 mm, 標準偏差約 17.6 mm であり, 設計管径 1,500 mm に対して平均約 35 mm 大きい値を示した．また，距離程と推定管径の関係を**図-5** に示す．推定管径は下流方向に進むほど増加する傾向を示し，線形近似では 1 m 当たり約 6.2 mm 増加し，決定係数は R^2=0.945 であった．このことから，推定管径には断面ごとのばらつきだけでなく，距離程に応じた系統的な変化が含まれていることが確認された．

以上より, SfM モデルから管路の断面寸法および縦断的な形状を連続的に把握できることを確認した. 一方, 推定管径には距離程に応じた増加傾向が認められたことから, 絶対寸法の評価に向けては長手方向のスケール誤差について検証する必要がある．

表-3　調査区間別の適用機体，調査時間および取得成果

No.	距離程 (m)	推定管径 (mm)	設計値との差 (mm)	近似円残差 RMS (mm)
1	0	1,501	1	6.4
2	0.51	1,519	19	6.0
3	1.01	1,512	12	6.2
4	1.52	1,519	19	6.1
5	2.02	1,519	19	6.7
6	2.53	1,522	22	6.1
7	3.03	1,525	25	6.3
8	3.54	1,531	31	6.3
9	4.04	1,535	35	6.1
10	4.55	1,530	30	6.9
11	5.05	1,534	34	6.6
12	5.56	1,539	39	6.2
13	6.06	1,539	39	6.0
14	6.57	1,543	43	6.9
15	7.07	1,545	45	6.1
16	7.58	1,558	58	6.9
17	8.08	1,562	62	7.1
18	8.59	1,563	63	6.9
19	9.09	1,565	65	7.0
19	9.09	1,565	65	7.0
平均	—	**1,535**	**35**	**6.5**
標準偏差	—	**17.6**	**17.6**	—
最小－最大	—	**1,501－1,565**	**1－65**	**6.0－7.1**

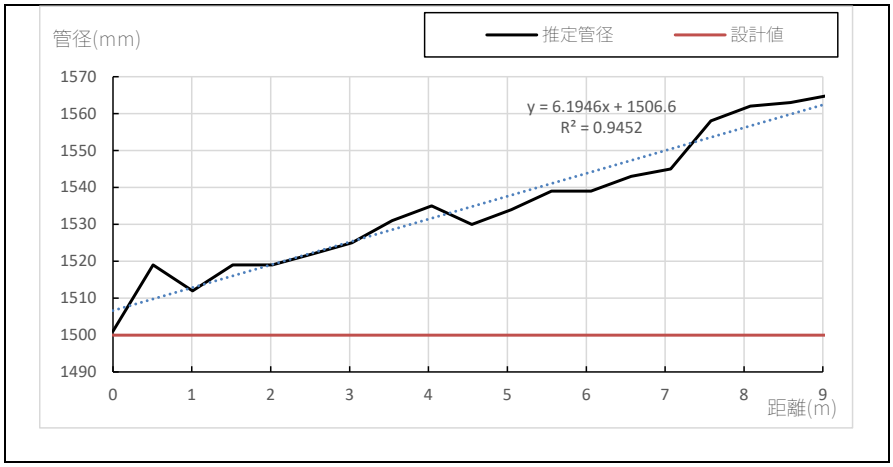


図-5　管路 3D モデルにおける断面抽出位置

(4) テクスチャ付き 3D モデルによる異常箇所の把握

SfM により作成した管路 3D モデルは，管路形状に加えて撮影画像に基づくテクスチャ情報を保持しているため，管壁表面の状態を 3D 空間上で確認できる．本調査では，管路継手部を中心に，周辺と比較して濡れた状態が確認される箇所を 4 箇所抽出し，漏水が疑われる箇所として整理した．代表例を**図-6** に示す．

このように，本手法では管路の三次元形状だけでなく，360°映像由来のテクスチャ情報を同一モデル上で確認できるため，形状情報のみでは把握しにくい管壁表面の状態変化についても，その位置と関連付けて記録できる．

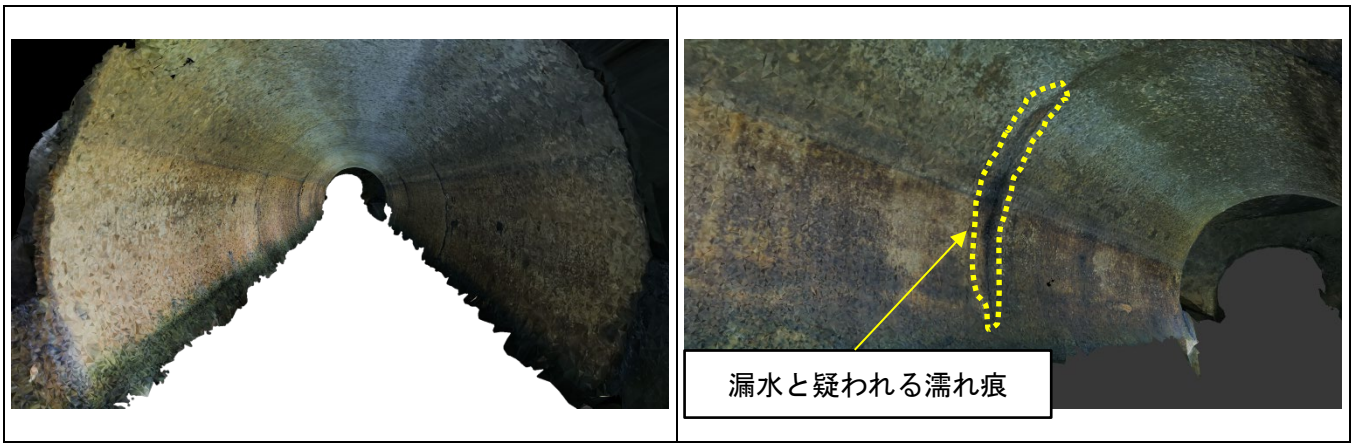


図-6　テクスチャ付き管路 3D モデルによる漏水懸念箇所の把握

(5) 異常箇所の把握と補修計画への活用

前節で抽出した漏水懸念箇所について，管路 3D モデル上の位置を地上部 3D モデルへ投影した．その結果，4 箇所の漏水懸念箇所は人孔 No.15 から約 2.9 m および約 5.4 m 付近に分布し，地上位置では片側車線側に集中していることを確認した．マッピング結果を**図-7** に示す．

管内で確認した異常箇所を地上道路上の位置と対応付けることで，補修時に必要となる掘削位置，掘削範囲および管路深度を事前に把握できる．さらに，工事車両の配置や交通規制範囲の検討にも活用できるため，点検結果を補修計画へ直接反映できる可能性がある．

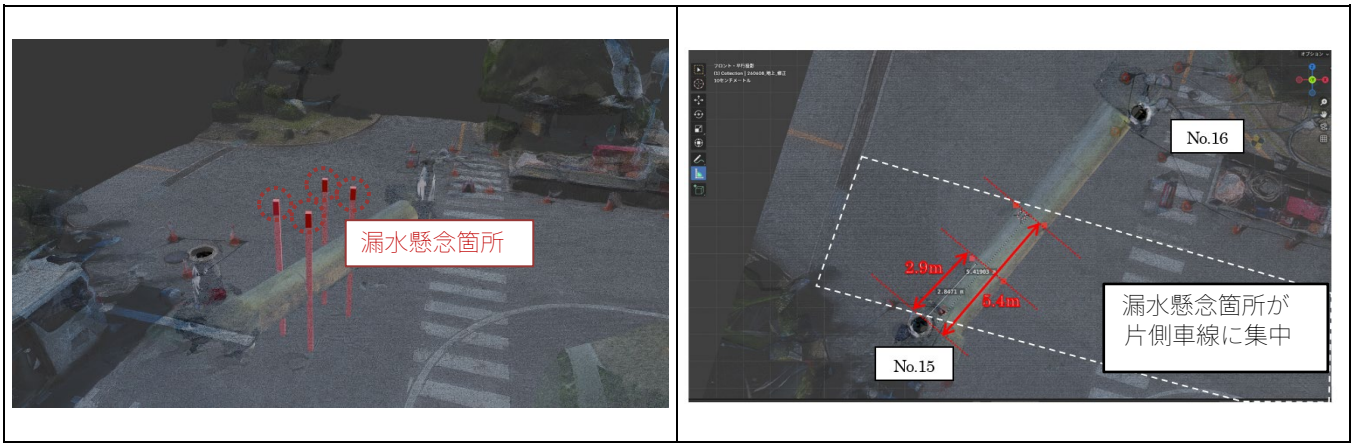


図-7 漏水懸念箇所の地上位置へのマッピング

４．考察

(1) 調査速度と取得データの用途

本調査では，SfM による 3D モデル作成を目的とした No.15-No.16 間では，飛行型約 0.25 m/s，舟艇型約 0.15 m/s の比較的低速で調査を行った．一方，連続 360°映像の取得を目的とした No.14-No.15 間では，飛行型ドローンにより約 0.95 m/s で約 100 m 区間を調査できた．このことから，管内状況の映像確認を主目的とする場合には高速移動が可能である一方，SfM 用データを取得する場合には，モーションブラーや画像間の重複率を確保するため，低速で安定した撮影が必要となる．今後は，移動速度と 3D モデルの成立率，点群密度および計測精度の関係を整理し，用途に応じた適正な調査速度を定量的に設定する必要がある．

(2) SfM モデルの寸法再現性とスケール誤差

19 断面から算出した横径は平均約 1,535 mm であり，設計管径 1,500 mm に対して平均約 35 mm 大きい値を示した．また，距離程と推定管径の関係を線形近似した結果，下流方向に 1 m 進むごとに約 6.2 mm 増加する傾向が認められた．この増加率を単純に 100 m まで外挿すると約 620 mm の増加となり，実管の形状変化のみで説明することは困難である．このことから，SfM モデルには長手方向にスケール誤差が累積している可能性が高いと考えられる．

(3) 実用化に向けた課題

360°映像と SfM を組み合わせることで，管路断面，管芯位置，縦断形状およびテクスチャ情報を同一の 3D モデル上で把握できることを確認した．一方，高解像度 360°映像はデータ容量が大きく，SfM 処理には画像抽出や処理条件の設定など作業者の経験を要する．また，濡れ面の反射，低テクスチャ部，水面下の点群欠損等もモデル品質に影響する．実用化に向けては，撮影速度，画像抽出条件，スケール補正および精度確認までを一連の処理として標準化し，管内調査から 3D モデル生成までを効率的に実施できる仕組みを構築する必要がある．

５．結論

本稿では，360°カメラ搭載ドローンと SfM を組み合わせた工場排水管路の点検手法を現地適用した．その結果，作業員が管内に立ち入ることなく 360°映像を取得し，管路内部の 3D モデルを作成できることを確認した．また，SfM モデルから管路断面，管芯位置および縦断形状を取得するとともに，テクスチャ情報から漏水懸念箇所を把握し，地上位置へマッピングできることを示した．

以上より，本手法は，「管内 No Entry」による安全な調査と，点検結果の三次元・位置情報化を一体的に実現し，補修計画まで活用可能な手法であることを示した．一方，長距離区間における絶対寸法評価についてはスケール誤差が課題であり，今後，補正手法および処理の自動化を進める必要がある．

６．今後の展開

今後は，曲線管路，長距離区間，流速の大きい区間等への適用性を検証するとともに，機体回収方法および通信系を改良する．また，同一区間を定期的に撮影し，時系列 3D モデルの差分から変状進行を把握する手法を検討する．

さらに，CIM や施設台帳と連携し，点検映像，異常位置，補修履歴および維持管理属性を一元管理することで，修繕・更新計画の精度向上を目指す．

７．参考文献

1) Westoby, M. J. et al.: Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, Geomorphology, Vol.179, pp.300-314, 2012.

2) 国土交通省：「管内 No Entry」の実現に向けた下水道管路点検の推進に関する基本的考え方について，国官参水第 5 号・国水企第 5 号・国水下マ第 1 号，2026.