

# 3D モデルリング技術を利用した 橋梁管理データベースの構築に関する事業

中村 文則<sup>1</sup>

<sup>1</sup>長岡技術科学大学准教授 工学研究科環境社会基盤系

本事業では、3Dモデリング技術を利用し、橋梁の劣化状況を3次元空間で管理できる橋梁管理データベースの構築を行った。さらに、それを維持管理に拡張した橋梁の維持管理システムの開発を行った。もし、この事業が成功すれば、最終的に橋梁の劣化状況を時空間的に管理できるようになり、現場の点検作業等の効率化が期待される。さらに、補修・補強工事の効果を事前に確認でき、効果的な塩害対策の立案が可能となる。研究結果から、実橋梁の画像から維持管理に適用可能な3Dモデルが構築できることが明らかになった。さらに、構築した3次元空間に、環境作用の予測シミュレーションを導入することで、橋梁に作用する飛来塩分を時空間的に把握できることが示された。

**キーワード:** 塩害、コンクリート構造物、仮想数値空間、数値シミュレーション

## 1. はじめに

新潟県は、日本海沿岸部に位置しており、その海岸線延長距離が330.8km(離島を含めると634.7km)と長く、沿岸部に社会基盤構造物が多数設置されている。これらの構造物は、冬季の激しい気象・波浪作用により、海域から発生した飛来塩分による塩害被害を受けるため、維持管理上において問題となっている。

これらの問題を解決するために、橋梁に作用する飛来塩分やコンクリート内部の鋼材の腐食調査などが盛んに実施されてきた。例えば、佐伯ら<sup>1)</sup>は、橋梁に作用する塩化物イオン量の現地調査を実施し、コンクリートの表面塩化物イオン濃度を定量化している。細井ら<sup>2)</sup>は、新潟県沿岸部に暴露試験場を構築し、飛来塩分の現地観測を実施している。研究代表者<sup>3)</sup>ら、風や波浪作用を含めて飛来塩分を予測できる数値シミュレーションモデルの開発を行い、飛来塩分を予測できることを明らかにしている。田中ら<sup>4)</sup>は、新潟県沿岸部に供用されたコンクリート橋梁の調査を実施し、内部鋼材の腐食状況および耐力について実験を行い、その結果を報告している。研究代表者ら<sup>5)</sup>は、新潟県沿岸部に約50年間供用されたコンクリート橋梁の外部表面の損傷状況、浸透塩化物イオン量の調査を実施するとともに、作用する飛来塩分量の予測を実施している。これらの成果により、新潟県沿岸部のような厳しい塩害環境下に設置された橋梁の塩害劣化現象および飛来塩分作用を予測できるようになりつつある。

その一方で、構造物の維持管理の効率化の方法の一つとして、デジタル技術を建設分野に導入した建設DX(Digital Transformation)が注目され、急速に導入が進んでいる。例えば、構造物の設計および施工計画の段階で3次元モデルを構築し、建設現場の生産性を向上させるCIMの導入や建設機械の自動運転などの施工現場の自動化が挙げられる。さらに、構造物の定期点検結果などをタブレット端末を利用して管理する技術も確立され、構造物の維持管理の効率化が進んでいる。このようなデジタル技術を利用して、新潟県において問題となっている構造物の塩害劣化を予測する技術を確立することができれば、社会基盤構造物の維持管理において有用性の高い技術となる。

本事業では、3Dモデリング技術を利用し、橋梁の劣化状況を3次元空間で管理できる橋梁管理データベースの構築を行った。さらに、それを維持管理に拡張するために、橋梁に作用する飛来塩分を予測できる維持管理システムの開発を行った。

## 2. 橋梁管理データベースの構築

実構造物の劣化状況を3次元の仮想数値空間で管理することが可能な橋梁管理データベースの構築を行った。このデータベースは、3Dモデルリング技術を利用して構築した実構造物の3Dモデルと点検・補修結果などの複数のデータを統合して仮想数値空間内で保管し、それを操作・確認できるようにしたものである。

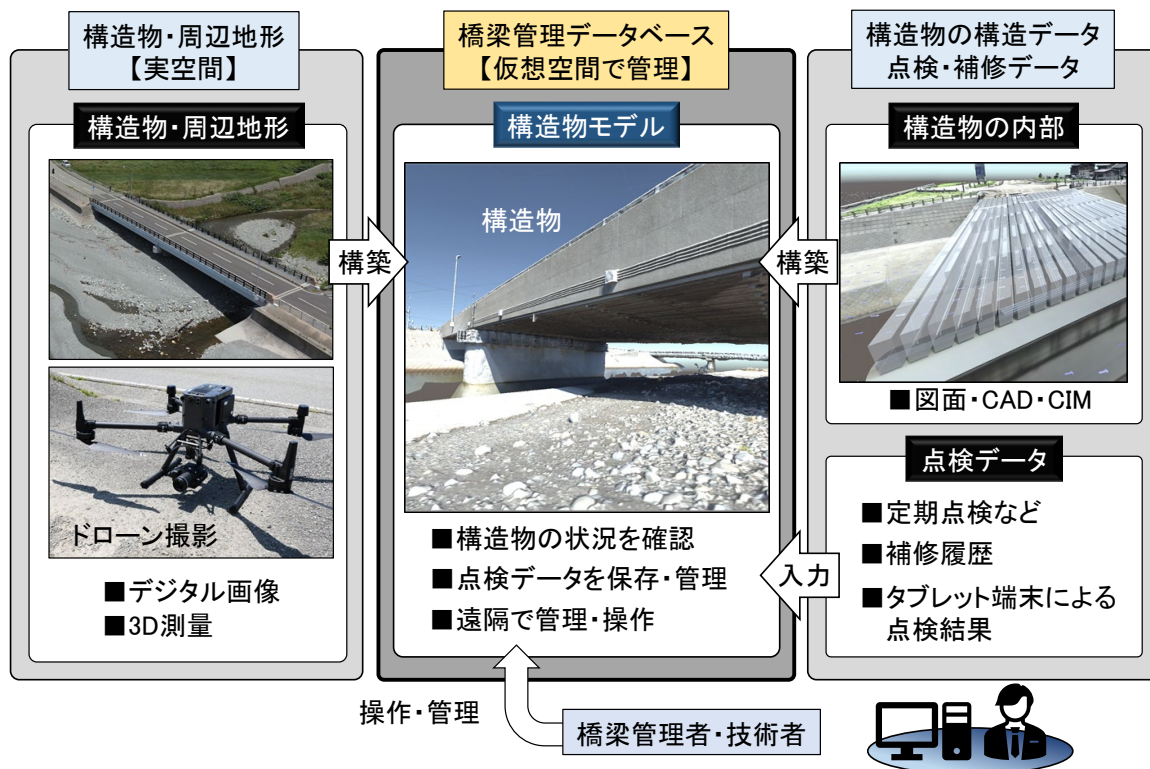


図-1 橋梁管理データベースの全体概要

(1) 橋梁管理データベースの全体概要

橋梁管理データベースの全体概要を図-1 に示す。橋梁管理データベースは、図中央に示すような仮想数値空間に実構造物を正確に再現した 3D モデルを構築し、それを利用して構造物を管理するものである。構造物の 3D モデルは、左図のようにドローンを使用して構造物および周辺地形の画像を取得し、その結果から構築した。構造物内部の鋼材やプレキャストブロックなどの 3D モデルは、図右上のような図面・CAD・CIM データを利用して構築を行った。さらに、定期点検結果、補修・補強の履歴などのデータを追加できる仕組みとした。今回の研究開発では、実構造物の形状と外部表面を正確に再現する部分を中心にデータベースの開発を行った。

(2) 橋梁管理データベースの構築方法

橋梁管理データベースは、1)画像データの取得、2)画像の選定、3)3D モデルの構築、4)仮想数値空間の構築の主に 1)~4)の方法を組み合わせる構築した。各方法の詳細は、次のようなものである。

1) 実構造物の画像データの取得

橋梁管理データベース内に再現する実構造物の 3D モデルは、画像データを使用して構築を行った。画像データは、GPS が内蔵されているドローンとデジタルカメラを使用して取得した。表-1 は、画像データの取得に使用したドローンとデジタルカメラを整理したもの

表-1 使用した画像取得機器

機器・型番		搭載カメラ画素数
DJI Matrice 300 RTK	UAV	45MP (Zenmuse P1)
DJI Phantom4 Pro	UAV	20MP (1インチCMOS)
DJI Mavic Mini	UAV	12MP (1/2.3インチCMOS)
RICOH WG-7	デジタルカメラ	20MP (1/2.3インチCMOS)

である。ドローンは、DJI Matrice300(搭載カメラ Zenmuse P1)、DJI Phantom4、DJI Mavic を使用して画像の取得を行った。周辺に植栽が大量にあるような場所では、ドローンの飛行が一部困難であったため、デジタルカメラを使用して画像の取得を行った。橋梁の下部面は、デジタルカメラとドローンの両方を使用して、画像の取得を行った。画像の撮影範囲は、対象とした構造物を中心に水平方向に約 200m×200m の範囲が含まれるように設定した。画像は、オーバーラップするように撮影を行うとともに、ズーム機能は使用しないようにした。

2) 取得した画像の選定

現地で取得した画像は、様々な位置と角度、画質が異なる画像となり、高精度で 3D モデルを構築するためには、適切な画像の選定が必要である。今回は次のような条件に当てはまる画像を除外することにした。

- ・画像内に波や車などの動きがあるものが大きく写っているもの
- ・逆光などによって画像や構造物部分の色が実際より白または黒くなっているもの
- ・水面やガラス面などの透明または反射によって見え方が異なるもの
- ・画像が鮮明でないもの
- ・3Dモデルを構築した際に誤差の値が大きいもの

### 3) 画像を利用した3Dモデルの構築

画像データから構造物の3Dモデルの構築は、フォトグラメトリーの技術を利用した。フォトグラメトリーは、三角測量の原理を利用して、オーバーラップしたデジタル画像データから3次元座標(点群データ)を構築する方法である。この方法は、点群レーザー測量などのような直接距離を測定する方法とは異なり、画像データから3次元座標を算出するものである。

この方法の特徴としては、構築したモデルの表面に画像データを配置することが容易となり、構造物の表面状態などを詳細に確認することができる利点がある。構造物の維持管理では、その外観状況を詳細に記録し、それを保管しておくことが重要となるため、今回はフォトグラメトリーの技術を利用した。

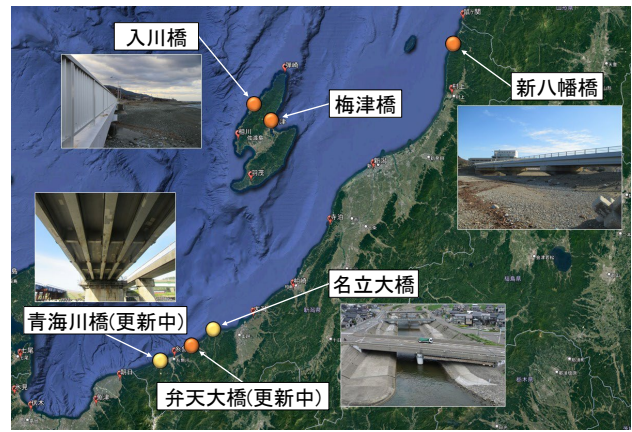
また、フォトグラメトリーによって3Dモデルを構築する場合に、画像データの質と使用する解析ソフトの性能により、算出される3次元座標の精度が異なる。そのため、フォトグラメトリーによる3Dモデルの構築には、3つの解析ソフト(Meshroom, DJI TERRA, Agisoft Metashape)を使用し、その結果の比較を行った。その結果、詳細な設定が可能で構築精度が高かった Agisoft Metashape を使用することにした。

その後、解析ソフトに取得・選定した画像を入力することにより、指定範囲の3次元点群座標、オブジェクト形式のメッシュデータ、3Dモデル表面に配置するテキストチャター(画像データ)の構築を行った。画像から構築することができない構造物内部の鉄筋の配置やプレキャストセグメント・ブロックなどは、CADまたは紙媒体の図面を電子化して作成した。

### 4) 3Dモデルを操作するための仮想数値空間の構築

構築した構造物の3Dモデルのデータだけでは、構造物内部の状況や点検・補修データなどを同時に確認・管理することが困難である。そのため、新たに仮想数値空間を構築し、その中に複数のデータ(3Dモデル、点検データ、補修・補強履歴など)を保管することで、様々なデータを統合して管理できるようにした。この方法により、構造物の外部形状と内部のコンクリート・鋼材を合わせた管理、点検結果などの追加が可能となる。

仮想数値空間は、メタバースなどの構築で利用され



橋梁名	竣工年	設置地域	構造形式
入川大橋	1984年	佐渡市	コンクリート橋 (PC工法)
梅津橋	1960年	佐渡市	コンクリート橋
名立大橋	2002年	上越市	コンクリート橋 (PC構造)

図-2 対象とした橋梁

ているオープンソフト Unity(Ver.2021)で構築した。このソフトは、プログラム言語 C#が実装されており、ユーザーがプログラムコードを追加することで、仮想空間の機能を追加できる特徴がある。

Unity を使用して仮想数値空間の構築を行い、その中に画像から構築した周辺地形と構造物の3Dモデル、CADまたはCIMから構築した鉄筋の3Dモデル、構造物の劣化・損傷データ(テキスト形式、表面損傷部の画像などの画像形式)を入力した。さらに、仮想数値空間内で入力した各データを操作・確認できるように機能の追加を行った。

その後、構築した仮想数値空間を Unity の機能によってアプリケーション化し、(Web 上での遠隔操作を含めて)各自のパソコンで操作・確認できるようにした。構築したアプリケーションは、Unity などの特別なソフトをインストールしていないパソコンでも、仮想数値空間内の操作・確認が可能である。

### (3) 対象とした実橋梁

#### 1) 対象とした橋梁と選定条件

対象とした橋梁は、海岸からの距離が 100m 以内の海岸近傍に設置されているコンクリート構造物から選定した。選定した構造物は図-2 に示すような6橋である。これらの中から更新中の橋梁(弁天大橋、青海川橋)などを除いて、新潟県上越地方に位置する名立大橋、新潟県佐渡地方北西側に位置する入川橋、新潟県佐渡地方北東側に位置する梅津橋の3橋を選定し、モデル化を行った。各橋梁における画像の取得と3Dモデルの構築は、次のように実施した。

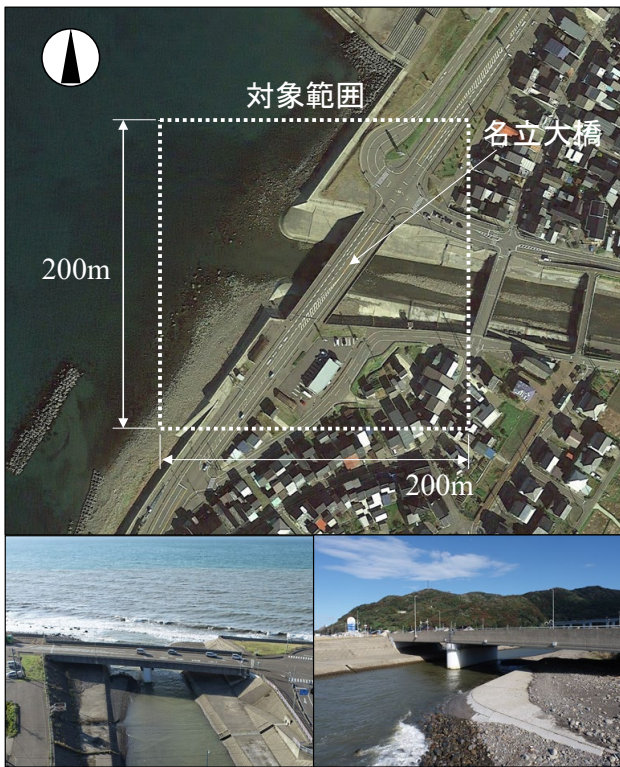


図-3 名立大橋(新潟県上越地方)

## 2) 名立大橋(新潟県上越地方)

名立大橋は、新潟県上越市名立区に位置しているコンクリート橋梁である。この地域は、冬季に激しい気象・波浪条件となり、海域から発生した飛来塩分が大量に作用する特徴がある。橋桁の寸法は、橋長 75.3m、桁幅 21.9mである。構造形式はポストテンションPC構造であり、供用開始は 2002 年である。橋桁は、海岸の汀線から 50m 程度の位置に設置されている。

名立大橋の 3D モデリングの範囲は、図-3 のように橋桁を中心に約 200m×200m の範囲とした。画像データの取得日は 2023 年 10 月 18 日である。画像データは、ドローンとデジタルカメラを使用して、橋桁周辺を含めた画像を撮影することで取得した。ただし、この日は撮影時の天候が悪天候であり、ドローン(DJI M300, Zenmuse P1)の一部の飛行を制限した。撮影した画像は約 1500 枚である。これらの画像から、選定条件を合格しない画像を除外し、最終的に画像 800 枚を選定した。それらの画像データから周辺地形を含めた構造物の 3D モデルの構築を行った。橋桁内部のコンクリート部や鉄筋は、構造物図面を参考に CAD データから 3D モデルを構築した。

名立大橋の橋梁管理データベースの構築結果を図-4 に示す。図に示すように、名立大橋を中心に周辺地形を含めた 3D モデルが構築できている。モデルの表面には、画像から生成したテクスチャ画像が配置されており、撮影した時の状況を確認できることがわかる。今回作成した 3D モデルでは、コンクリートの剥離箇所や錆汁など

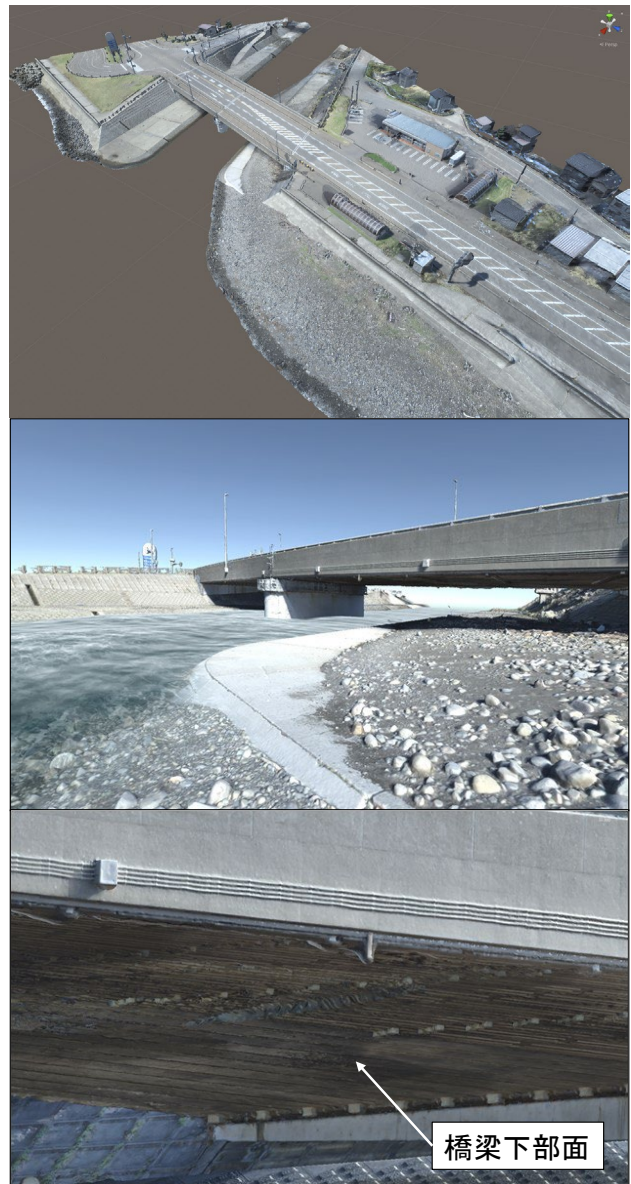


図-4 3D モデルの構築結果(名立大橋)

状況を確認できることが示されたが、軽微なひび割れについては十分に再現できていない結果であった。そのため、ひび割れ部などは、詳細な画像を追加で仮想数値空間に保存する方法が適切であると考えられる。

下図は、橋桁下部面の状況を示したものであるが、一部で形状の再現性が低下する傾向が見られた。これは、撮影した画像の枚数が不足していたことが要因である。橋桁の下部のような形状が複雑かつ特徴が少ないような箇所では、部分的なレーザー測量の実施や取得する画像の枚数を増加させることが、3D モデルの構築精度を向上させる方法の 1 つになると考えられる。今後、橋桁下部においては、使用する画像データの枚数を追加して、3D モデルを再構築する予定である。

以上より、画像から構築した 3D モデルを仮想数値空間内に入力することで、3次元空間で構造物が管理でき

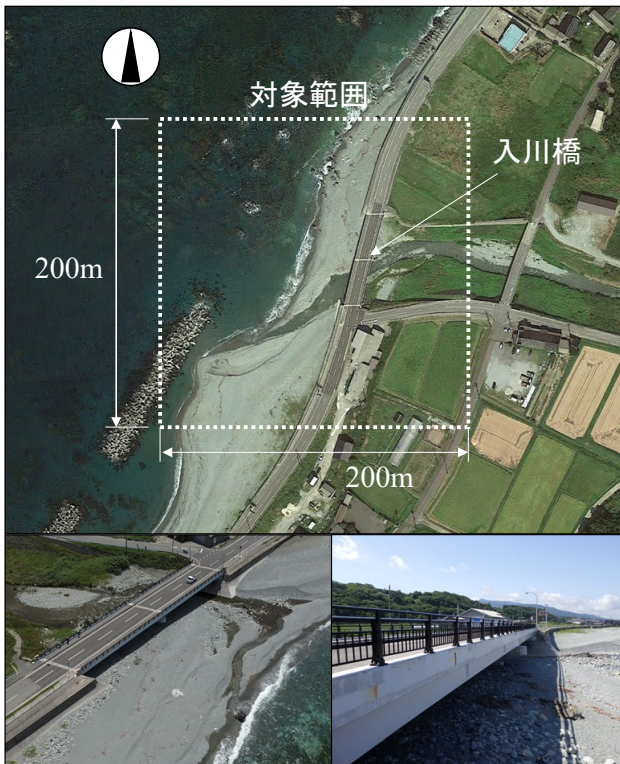


図-5 入川橋(新潟県佐渡地方)

ることがわかった。さらに、構造物の外部表面の軽微なひび割れの確認は困難であるが、錆汁・汚れやコンクリート剥離箇所については確認できることが示された。

### 3) 入川橋(新潟県佐渡地方北西側)

入川橋は、新潟県佐渡市北西部に位置するコンクリート橋梁である。橋桁の寸法は、桁長約 60m、桁幅約 10.5m である。構造形式は PC 構造であり、共用開始は 1984 年である。橋桁のコンクリート表面部は表面被覆工法が実施されている。橋桁は、海岸の汀線から 100m 程度の位置に設置されている。この橋梁が設置されている佐渡島の北西部では、北西方向の季節風の作用により、冬季に風が強く、波浪が激しい条件となる。

入川橋の 3D モデリングの範囲を図-5 に示す。図のように、入川橋を中心に約 200m×200m の範囲で画像データの取得を行い、3D モデルの構築を行った。画像データの取得日は、2023 年 6 月 16 日と 9 月 23 日である。画像データは、橋桁上部・側面および周辺地形を大型・中型のドローン(DJI M300, DJI Phantom, DJI Mavic)を使用し、橋桁下部の画像はドローンとデジタルカメラの両方を使用して取得した。取得した画像データは、約 2800 枚である。これらの画像から、最終的に画像約 600 枚を選定して、3D モデルの構築を行った。

入川橋の橋梁管理データベースの構築結果を図-6 に示す。上図は、仮想数値空間全体を示したものであり、入川橋を中心に周辺地形を含めた 3D モデルが構築できていることがわかる。橋梁上面では、3D モデルの構築



図-6 3D モデルの構築結果(入川橋)

結果は、実橋梁の外観と形状を精度よく再現できており、周辺地形を含めた橋梁の状態を 3 次元空間で保存できている。下図は、橋桁の側面部を示した結果である。図の橋梁側面部では、一部で再現性が低い部分が見られた。また、橋桁下部のフランジ部においても、形状が十分に再現できていない結果であった。この点については、

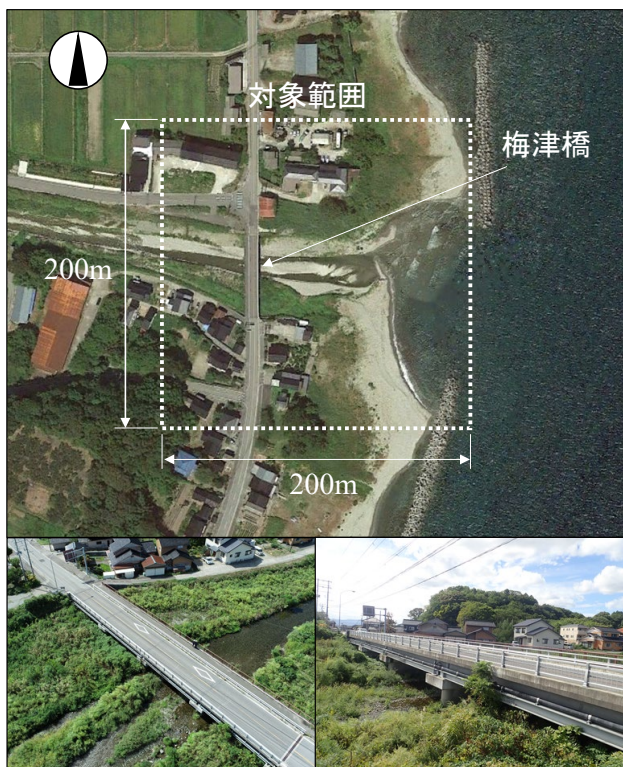


図-7 梅津橋(新潟県佐渡地方)

橋桁に隣接するコンクリート製の堤防の再現性が高かった点から、使用した画像の枚数不足が原因ではないと考えられる。橋桁側面と下下面が表面被覆で覆われており、その被覆によって橋桁表面の状態が白色かつ若干反射していたことが影響している可能性があるが、明確な理由は明らかにできなかった。

また、図の橋桁上の柵が精度よく再現できていないが、これは画像から 3D モデルを構築する方法では柵やポール、網のような形状を再現することが難しいためである。

#### 4) 梅津橋(新潟県佐渡地方北東部)

梅津橋は、新潟県佐渡市北東部に位置するコンクリート橋梁である。橋梁の寸法は、橋長 53.0m、桁幅 15m、2 径間の橋梁である。橋梁は供用開始が 1960 年である。橋梁が設置されている佐渡島東側では、北西からの季節風が作用する条件で風が陸風となる特徴がある。そのため、この橋梁は、飛来塩分の作用が少量となり、佐渡島西側の入川橋と大きく環境作用が異なる。

梅津橋の 3D モデリングの範囲を図-7 に示す。図のように、3D モデリングは約 200m×200m の範囲を対象に実施した。画像データの取得は、2023 年 6 月 16 日と 9 月 23 日である。画像の取得は、入川橋と同様にドローンとデジタルカメラを使用して行った。図のように、この橋梁周辺は、植栽が大量に分布しており、橋桁下部の撮影が実施できなかった。そのため、植栽が減少する冬季の 12 月 14 日に追加で調査を実施した。取得した画像の総数は約 3000 枚であり、これらの画像から約 900 枚を選

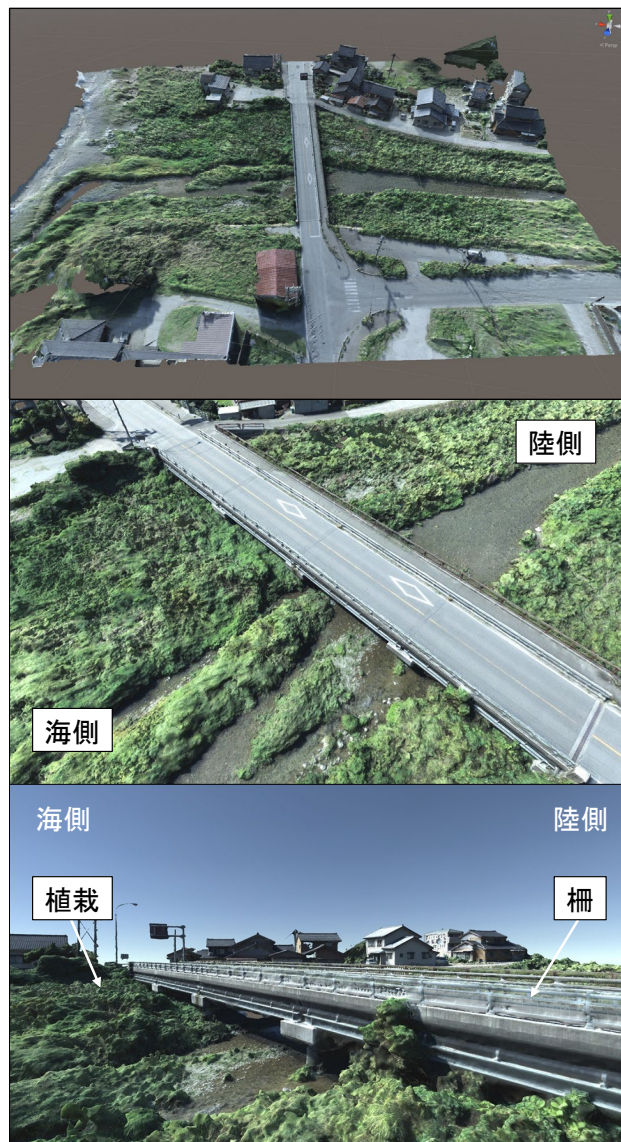


図-8 3D モデルの構築結果(梅津橋)

定して 3D モデルの構築を行った。

梅津橋の橋梁管理データベースの構築結果を図-8 に示す。図より、梅津橋を中心とした 200m×200m の範囲で、3D モデルの全体が構築できていることがわかる。中段の図は、構築した 3D モデルを上空から表示したものであるが、3D モデルはドローンで取得した画像(図-7 左下)と大きく差がないことがわかる。下段の図は橋桁の陸側側面の状況を示した結果であるが、橋桁上の柵と植栽の部分は正確にモデル化できていない傾向が見られる。橋桁側面においても、画像の枚数が不足しており、形状の再現と表面に配置したテクスチャ(画像)が詳細に作成できていない部分が多い傾向であった。この結果より、梅津橋のような橋桁の高さが低く、植栽などの障害物が大量にある橋梁では、ドローンによる画像の取得が難しく、高精度なモデル化ができない場合があることがわかった。このような場合では、ほかの方法を組み合わせさせてモデルを構築する方法が適切であると考えられる。

#### 4. 橋梁の維持管理システムの開発

橋梁管理データベースは、橋桁の劣化・損傷状況および点検データを3次元空間で管理するものである。橋梁管理データベースの仮想数値空間に、構造物の劣化現象の要因となる自然環境作用の予測機能を追加し、仮想空間内で構造物の過去・現在・将来の状況を予測できるシステムに拡張できれば、橋梁の維持管理の高度化につながる。

本研究では、橋梁管理データベースに構造物の塩害劣化の要因となる海域からの飛来塩分を予測できる機能を追加した維持管理システムの開発を行った。最終的には、構造物内部の鉄筋腐食現象までを予測できるようにすることを想定している。

##### (1) 環境作用(飛来塩分)の予測方法

環境作用の数値シミュレーションモデルは、研究代表者ら<sup>3)</sup>を参考に構築を行った。数値シミュレーションは、橋桁周辺の風況、海域の波浪現象、飛来塩分の発生・輸送である。各数値シミュレーションは、**図-9**のような構成で計算を実施した。各数値シミュレーションモデルの説明を以下に示す。

##### 1) 橋梁周辺の風況の3次元モデル

橋梁周辺の風況の計算は、大気中の空気を非圧縮性流体と考え、式(1)および(2)に示す3次元の連続式とナビエ・ストークス方程式により計算を実施した。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

ここで、 $t$ は時間(sec)、 $x, y, z$ は3次元座標(m)、 $u, v, w$ は $x, y, z$ 方向の風速(m/s)、 $p$ は圧力(Pa)、 $g$ は重力加速

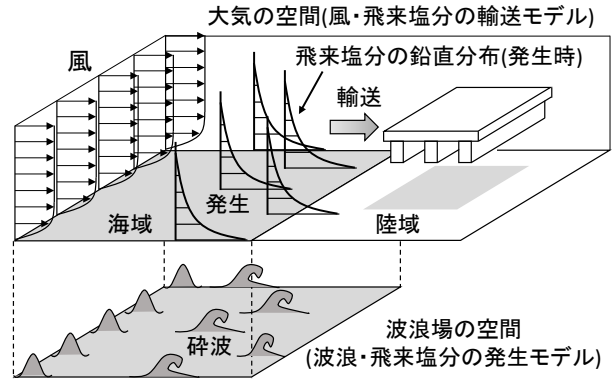


図-9 波浪場と大気空間の計算領域

度(m/s<sup>2</sup>)、 $\nu_t$ は風の乱流拡散係数(m<sup>2</sup>/s)である。

風況の乱流モデルは、流体計算で幅広く使用されている $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた。乱れエネルギーの輸送方程式と粘性散逸率の輸送方程式は式(3)と(4)である。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \nu_t \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

ここで、 $k$ は乱れエネルギー量、 $\varepsilon$ は粘性散逸率、 $\sigma_k (=1.0)$ 、 $\sigma_\varepsilon (=1.3)$ 、 $C_1 (=1.44)$ 、 $C_2 (=1.92)$ はそれぞれ格子乱流やチャンネル乱流の基礎実験データをもとに求められた係数、添え字 $i, j, k$ は $x, y, z$ に対応した座標である。これらの計算から求められた値を用いて、乱流粘性係数 $\nu_t$ は式(5)により算出した。

$$\nu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

ここで、 $C_\mu (=0.09)$ は係数、 $\rho$ は大気密度(kg/m<sup>3</sup>)である。計算境界部は自由流出境界として式(6)とした。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_a \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

ここで、 $u_a$ は断面での主流方向速度の平均値(m/s)である。

## 2) 橋梁の周辺海域の波浪と飛来塩分の発生モデル

飛来塩分の発生源となる海域の波は、海岸工学分野で利用されている修正ブシネスク方程式で計算を実施した。このモデルは、海域の地形と波浪条件に応じて1波1波を計算するモデルである。修正ブシネスク方程式モデルの基礎方程式を式(7)~(8)に示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + M_{Dx} \\ & = \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + M_{Dy} \\ & = \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} \right) \end{aligned}$$

ここで、 $\eta$ は水位変動(m)、 $Q_x$ 、 $Q_y$ は線流量(m<sup>2</sup>/s)、 $h$ は静水時の水深(m)、 $D(=h+\eta)$ は全水深(m)、 $B$ はブシネスク方程式の形に応じた定数( $B=1/21$ )、 $M_{Dx}$ 、 $M_{Dy}$ は碎波による運動量減衰量(m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)である。

海域の波から発生する飛来塩分は、碎波によって生成された波のエネルギーが海水面の乱れに変換され、その乱れエネルギーに関係していることが報告されている。この結果を参考に、海水面の乱れによって発生する飛来塩分量は、波の碎波による運動エネルギー量  $M_D(=M_{Dx}+M_{Dy})$  に比例するとして式(9)で算出した。

$$c_i = a_g \cdot M_D \quad (9)$$

ここで、 $a_i$ は海水面から発生する飛来塩分の総発生量(mg/m<sup>2</sup>/s)である。定数 $a_g$ は比例定数(mg.s/m<sup>4</sup>)であり、観測結果に一致するように設定した。

海水面から発生した飛来塩分は、発生と同時に波の碎波による慣性力と大気中の風によって舞い上がる。実海域において波の碎波帯上の飛来塩分量の鉛直分布を測定結果を参考に式(10)で定式化を行った。

$$c_a(z) = c_0 \exp(-A_w \cdot z) \quad (10)$$

表-2 計算の入出力パラメータ

分類	入力パラメータ	単位	設定値	出力パラメータ	
風況モデル	流入風速 (x成分)	$u_0$	m/s	10.1	風速 (x,y,z成分)
	流入風速 (y成分)	$v_0$	m/s	4.1	
	重力加速度	$g$	m/s <sup>2</sup>	9.81	乱流拡散係数
	大気密度	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1.18	
	大気粘性係数	$\nu_0$	m <sup>2</sup> /s	$1.5 \times 10^{-5}$	
	乱流計算係数	$\sigma_k$		1.0	
$\sigma_\epsilon$			1.3		
$C_1$		-	1.44		
$C_2$			1.92		
$C_\mu$			0.09		
境界風速鉛直減衰係数	$\alpha$	1/m	0.15		
波浪モデル	境界波高	$H_b$	m	2.5	碎波による運動量減衰量
	境界周期	$T_b$	s	6.3	
	方程式の係数	$B$	-	0.048	$M_D$
	スペクトル周波数分割数	$n$	個	512	
	潮位	$T_i$	m	0.1	
	流速・波速比	$\gamma_c$	-	0.4	
飛来塩分発生過程	碎波による運動量減衰量	$M_D$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	-	飛来塩分の発生量
	発生量の比例定数	$a_g$	mg.s/m <sup>4</sup>	0.174	
	発生点の飛来塩分鉛直減衰係数	$A_w$	1/m	0.2	
飛来塩分輸送過程	飛来塩分の発生量	$c_a$	mg/m <sup>3</sup> /s	-	飛来塩分濃度
	風速 (x,y,z成分)	$u$ $v$ $w$	m/s	-	
	乱流拡散係数	$\nu_t$	m <sup>2</sup> /s	-	$c$
	塩分粒子の距離の沈降速度減少率	$B_d$	1/m	0.0	
	海上の塩分粒子の沈降速度 (粒径)	$w_0$ ( $D_p$ )	m/s ( $\mu$ m)	0.34 (50~120)	

$$c_0 = \frac{-A_w \cdot c_i}{\exp(-A_w \cdot z_{\max}) - 1.0}$$

ここで、 $c_{ai}$ は鉛直方向の飛来塩分の発生量(mg/m<sup>3</sup>/s)、 $c_0$ は海面上での飛来塩分の発生量(mg/m<sup>3</sup>/s)、 $z_{\max}$ は鉛直方向の塩分量が十分に減少する高さ(m)、 $z$ は鉛直高さ(m)、 $A_w$ は鉛直方向の塩分量の減衰率(1/m)である。本計算では、波の碎波帯上で観測された海水飛沫量の観測結果を参考に係数 $A_w$ を0.2とした。

## 3) 大気中の飛来塩分の輸送モデル

海水面から大気中に放出された飛来塩分の粒子は、地表面および海面に沈降しながら、風によって内陸部へ輸送される。そのため、飛来塩分の輸送モデルには、飛来



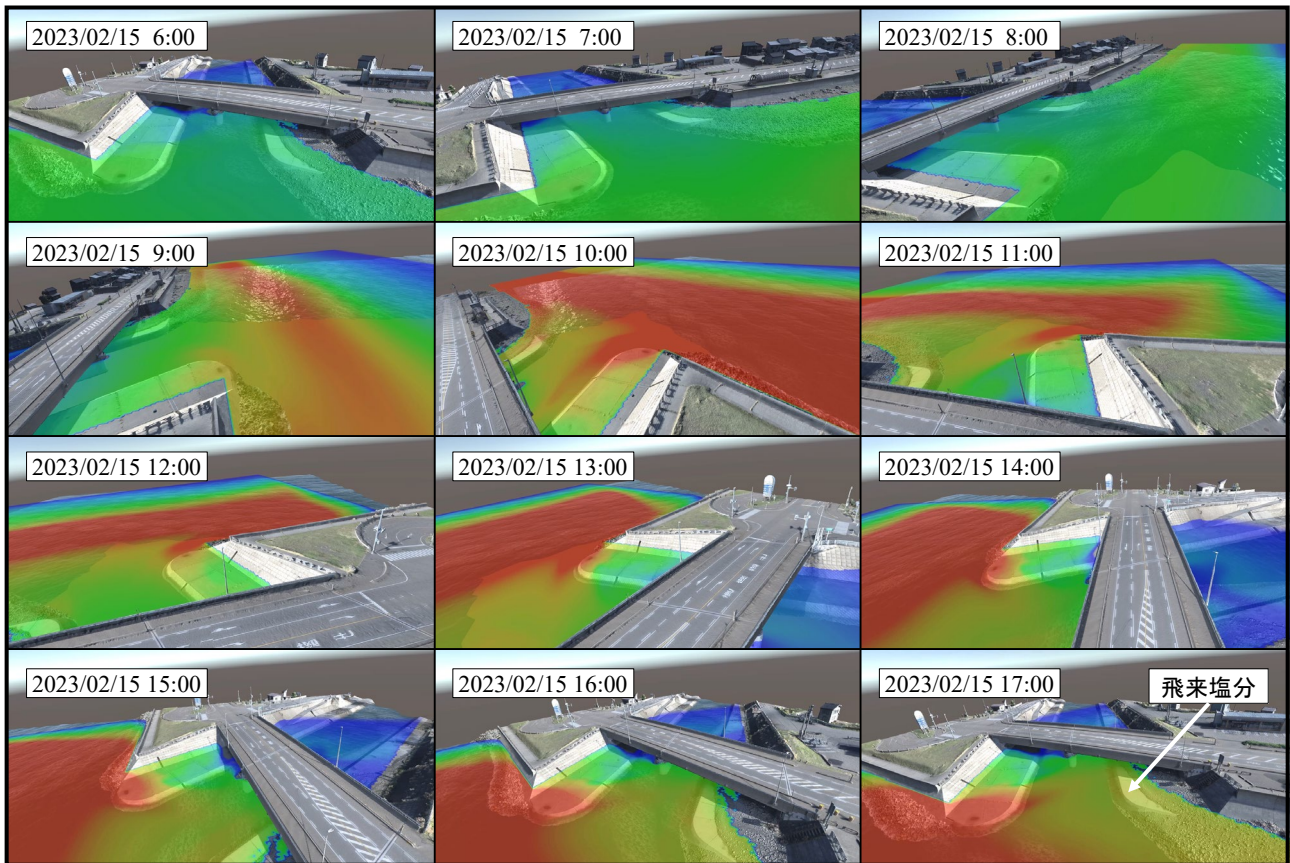


図-10 橋梁の維持管理システムの構築結果(新潟県上越地方名立大橋)

塩分の粒子自体の沈降および風による輸送、風の乱れによる塩分の拡散を再現することが必要である。計算では、それらの物理過程を汎用的に考慮できる飛来塩分の輸送モデルとして、流体力学分野で幅広く利用されている式(11)のような3次元の移流・拡散方程式モデルを構築した。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_x) \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - Q_c \quad (11)$$

ここで、 $c$ は大気中の飛来塩分濃度( $\text{mg}/\text{m}^3$ )であり、 $w_x$ は海岸からの距離に応じた飛来塩分粒子の沈降速度( $\text{m}/\text{s}$ )、 $Q_c$ は飛来塩分の発生量( $\text{mg}/\text{m}^3/\text{s}$ )である。

## (2) 太陽の軌道による日射の予測

飛来塩分の予測に加えて、橋梁に作用する日射現象を予測できるモデルの導入を行った。このモデルは、太陽の軌道による日射現象を予測するものであり、構造物の緯度経度と太陽の位置の関係から、日射方向を算出するものである。実際には、増田ら<sup>9)</sup>を参考に、Unityで構築

した仮想数値空間で使用できるライト機能(Direction Light)を使用して予測を行った。この方法は、構造物と太陽の位置(緯度・経度)から、日射による光の方向を計算することで、日当たりと影の範囲を予測するものである。

## (3) 環境作用の計算条件および計算ケース

環境作用の数値シミュレーションは、新潟県上越地方に位置する名立大橋を対象に実施した。計算領域は、陸域と海域に分かれており、陸域が構造物を中心とした岸沖方向 300m、沿岸方向 300m、高さ 20mである。計算格子間隔は、水平方向 0.5m、鉛直方向 0.25mの等間隔格子である。海域の領域は、岸沖方向 1067m、沿岸方向 300mである。計算格子間隔は、岸沖方向 1.0m、沿岸方向 1.0mの等間隔格子である。

計算は、名立大橋周辺で発生する気象・波浪条件の範囲を想定し、予測解析を事前に実施することにした。事前に実施した予測解析の設定条件は、海風となる気象条件を基準に風向が北北西～西南西(16方位)、風速 0.0～30m/s、波高 0.0～4.5mとした。風速は 1.0m/s 間隔(風速 20m/s 以上は 5.0m/s 間隔)、波高は 0.5m 間隔であり、総計算ケース数は約 990 ケースである。各計算モデルに設定したパラメータを表-2に整理した。



図-11 日射作用の予測結果（名立大橋）

#### (4) 維持管理システムを利用した橋梁の予測結果

橋梁の維持管理システムを利用して橋桁周辺の飛来塩分を予測した結果を図-10に示す。2023年2月15日6:00～17:00までの飛来塩分を予測した結果である。図は、飛来塩分量の3次元分布の計算結果を平面で抽出し、1時間間隔で視点を30度ずつ回転させたものである。図に示すように、3次元仮想数値空間を利用することで360度の範囲を確認できることがわかる。図の赤色の部分が飛来塩分濃度が高い箇所であり、飛来塩分が風況と波浪条件に応じて変化している状況を確認できる。さらに、2月15日10:00頃から、飛来塩分濃度が高くなっていく傾向があり、時間的な飛来塩分量の変化を予測できている。

図-11は、維持管理システム内で、2023年10月17日11時と15時の日射作用を再現した結果である。図に示すように、日射と影の範囲は、11時と15時の予測結果

で異っており、時間の経過による日射作用が予測できている。中段と下段の図は、維持管理システムで予測した日射と現地で同時刻(2023年10月17日15時)に撮影した写真である。図より、維持管理システムによる予測結果は、現地(実空間)の橋桁下に形成された影の形状をほぼ再現できていることがわかる。

## 6. まとめ

本事業では、3Dモデリング技術を利用した橋梁の状況を3次元空間で管理できる橋梁管理データベースの構築を行った。さらに、構築した橋梁管理データベースを拡張し、橋桁周辺の環境作用を再現できる橋梁の維持管理システムの開発を行った。その結果、ドローンによって取得した画像を利用することで、橋梁周辺状況を含めた3次元空間を構築できるとともに、ひび割れなどの外部表面の劣化状況を保存・管理できることが示された。さらに、構築した3次元空間に、環境作用の予測シミュレーションを実装することで、橋梁周辺の環境作用を時空間的に把握できることが明らかになった。

今後は、数年間隔で定期的の実構造物の3次元モデルを更新するとともに、構築した3次元空間内で構造物の劣化状況を再現できるように拡張していく予定である。

## 参考文献

- 1) 佐伯竜彦, 富山 潤, 中村文則, 中村亮太, 花岡大伸, 安 琳, 佐々木徹, 遠藤裕丈: 飛来塩分環境下にあるコンクリートの表面塩化物イオン濃度評価式の検討, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.76, No.2, pp.98-108, 2020.
- 2) 細井雄介, Rungrawee Wattanapomprom, 石田哲也, 高橋佑弥: 2つの手法を用いた27か月間の現地飛来塩分測定と測定結果に基づく飛来塩分発生・輸送モデルの検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.733-738, 2017.
- 3) 中村文則, 下村 匠, 大原涼平, 細山田得三: 飛来塩分の予測シミュレーション技術の開発と構造物の長期的な塩害環境作用の評価への適用, 土木学会論文集 E2, Vol. 75, No. 2, pp. 60-79, 2019.
- 4) 田中泰司, 山口貴幸, 下村 匠: 塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の耐荷試験と数値解析による評価, 土木学会論文集, Vol.66, No.4, pp.466-482, 2010.
- 5) 中村文則, 小川晴希, 山口貴幸, 下村 匠: 塩害環境下に設置されたPC桁の損傷・内部劣化促進物質量の調査と外部環境予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.490-495, 2023.
- 6) 増田 健, 中村文則, 山口貴幸, 下村 匠: 3次元仮想空間技術を利用した構造物の維持管理システムの提案とその検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.907-912, 2021.