

# 目 次

研究課題名	学年	氏名	頁
小型 AUV による水中マッピングデータ取得と マルチモーダル深層学習に基づく物体分類	博士後期課程 3 年	大川 博史	1
マルチパッチ解析手法に基づく Isogeometric Analysis 流体解析手法の構築	博士前期課程 1 年	坂井 祐仁	5
有限要素法による道路交通騒音評価システムの構築	博士前期課程 1 年	宮内 暖季	9
航空写真を用いた Semantic Segmentation による 土地利用分類モデルの構築とその性能評価	博士前期課程 1 年	羽物 裕人	13
GNSS データを用いた ロケーションベース MR 可視化システムの構築	博士前期課程 1 年	中祖 諒大	17
安定化有限要素法による 津波解析の移動境界手法に関する研究	学部 4 年	三宅 智大	21
波動音響理論に基づく有限要素解析による 遮音壁の遮音効果に関する研究	学部 4 年	泉 勝人	23
VR 技術を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムの 適用性の向上	学部 4 年	西 航平	25
Neural Networks に基づく氾濫浸水深予測モデルの構築	学部 4 年	中山 龍也	27
水中構造物 AR 可視化システムの構築	学部 4 年	足立 陽紀	29
GNSS 受信機を用いた AR 可視化システムの移植性向上に 関する研究	学部 4 年	小川 祐生	31

# CGソフト活用による点群深層学習のための 高精度トレーニングデータ生成手法の構築

*Development of High-Precision Training Data Generation Methods  
for Point Cloud Deep Learning Utilizing CG Software*

都市人間環境学専攻 博士課程後期5年 大川 博史  
Hiroshi OKAWA

## 1. はじめに

近年、三次元データの取得技術が大きく進展し、陸上ではレーザ光を用いた点群計測技術が、水中では音響ビームを利用した技術が発展している。その一方で、港湾施設の点検においては、潜水士による目視点検が主流であるが、潜水士不足が問題となっている。これに対し、自律航行型無人ロボットを利用した水中音響計測技術<sup>1)</sup>が新たな解決策として注目されている。この技術により、安全に高精細なデータを広範囲に取得できる一方で、取得データの膨大さや色彩情報の欠如が課題となっている。これまで、著者らは水中の物体分類にマルチモーダル深層学習を用いてきたが、適用性に限界があった。そこで、水中点群データにPointNet++を適用し、高品質なトレーニングデータの自動生成手法を提案し、その有効性を検証した。本論文では、水中構造物の分類を高精度かつ効率的に行う点群深層学習の適用方法について記述する。

## 2. 水中点群データおよびデータ取得方法

### (1) 使用機材

水中マッピングデータは、水中で取得した画像や地形、水質や時間などのデータと位置座標を付加したデータである。これらの水中マッピングデータ<sup>2)</sup>の取得方法として、船舶にサイドスキャナーやマルチビームエコーサウンダーなどの音響探査装置を搭載し、計測するのが一般的である。本研究では、ASV（図-1参照）をプラットフォームとして、ナローマルチビーム音響測深機（表-1参照）を艦装し、水中点群データを取得する。

### (2) 水中点群データについて

水底面を把握する手法には、直接的手法と間接的手法があるが、本研究では、間接的手法の1つで、マルチビーム深浅測量はミルズクロス方式により計測されている。この方式はソナーから扇状の送波ビームを横方向に発振し、水底に反射して戻ってくる受波を縦方向のスリットで受信するものである<sup>3)</sup>。この送波と受波がクロスした部分が計測する各点となり、受信部の複数のスリットにより、1回の発振で多数の点群を同時取得している。このマルチビーム測深機をASVに搭載することによって点群データを取得しており、実際に取得した点群データ例を図-2に示す。なお、水中の点群データは色彩情報を持たないため、三次元の座標値のみを取り扱うこととし、深層学習モデルに点群データを用いる際は、これらの特性に注意する必要がある。



図-1 使用機材 (ASV)

表-1 使用データ

機器名	型式	仕様
ナローマルチビーム	Norbit社製 iWBMSh	スワス幅: 7~210° 周波数帯域: 80/400 kHz 測深レンジ: 0.2~275 m 分解能: 1.0 cm 未満 ビーム数: 256~512

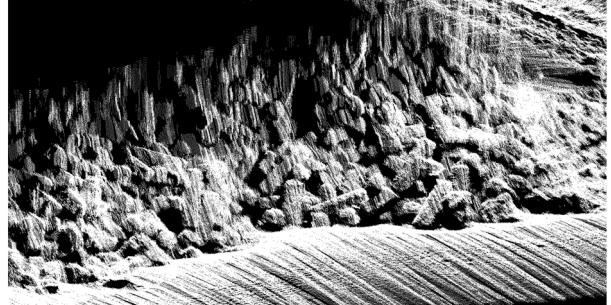


図-2 取得データ

## 3. 三次元点群深層学習による物体認識

### (1) 三次元点群深層学習について

三次元点群は多数の点によって三次元モデルを形成し、これらの点には順序がなく、点の密度も一定ではない。従来は三次元データを二次元に変換し、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network : CNN) で学習を行うという画像ベースの手法<sup>4)</sup>が一般的だったが、本来の詳細な幾何学的・空間的情報が失われたり、変化したりする。そのため近年では、三次元点群を画像化せずに直接入力・学習させる三次元点群ベースの手法が主流となっている。

### (2) 使用ネットワークについて

三次元点群を直接入力データとして扱うためには、前節で述べた三次元点群の特性を考慮した処理をどのように行うかが課題であった。PointNet<sup>5)</sup>は、三次元点群の点に順

序がないという性質を考慮し、三次元点群データを直接入力可能にするニューラルネットワークである。PointNetは、入力の順番が変わっても出力が変わらないという性質を持つ対称関数に着目し、対称関数の1つであるMax poolingを取り入れることで点の順序不同性に対処している。PointNetでは、局所的な特徴抽出が弱点であったがこの点を進化させた三次元点群を直接扱うニューラルネットワークであるPointNet++(図-3参照)を採用した。このネットワークは、サンプリング層で大局的な特徴を抽出し、グルーピング層で局所的な特徴を捉えることができる。特に、サンプリング層ではFarthest Point Sampling(FPS)を用いたダウンサンプリングを行い、グルーピング層ではMulti Scale Grouping(MSG)を採用して局所的な特徴を抽出する。PointNet++<sup>6)</sup>は、セマンティックセグメンテーションモデルと分類モデルの両方に適用可能であり、前者は点群の各点にカテゴリラベルを割り当てることで物体や領域を識別し、後者は点群全体が属するカテゴリを識別するタスクを実行する。セマンティックセグメンテーションモデルでは、点群データの空間的配置と近傍関係を用いてカテゴリ識別を行い、分類モデルでは抽出された特徴量を全結合層でスコア化して物体のクラスを特定する。これにより、PointNet++は点群データの識別において高い精度と効率を実現している。

#### 4. トレーニングデータ作成手法

本研究では、教師あり学習の手法に基づき、データセットの作成を行う。トレーニングデータとテストデータの作成を行い、点群深層学習モデルとしてPointNet++を使用し、分類およびセマンティックセグメンテーションにより学習結果を評価する。なお、トレーニングモデルの作成方法、テストデータの取得方法および学習結果について次節に記述する。

##### (1) CAD モデルについて

河川や海岸などの水中における代表的な既設構造物として、消波根固めブロックが挙げられる。これらの構造物は既製品であるため、その形状を忠実に再現可能である。本研究では、実際に沿岸で使用されている消波根固めブロックの二次元平面図から三次元 CAD モデルを作成した。また、点

群情報はモデル表面のみを必要とし、内部情報を必要としないため、サーフェスモデル(図-4参照)を作成した。

##### (2) 点群データ作成方法

前節において作成したモデル表面に点群を生成後、トレーニングデータとして利用する。なお、CAD モデルの表面に点群を発生させ学習させるといった方法のみでは分類モデルの精度を確保することは極めて困難である。この問題を解決するために、本論文では水中音響機器を用いた計測のプロセス、すなわち ASV から発射される音波のある光源から物体表面への照射とほぼ同一であると見なし、水中にて計測された点群データを再現する手法を構築した。

具体的なデータ生成手法と生成されたデータのイメージを図-5 に示す。データ生成手法としては、三次元 CG モデ

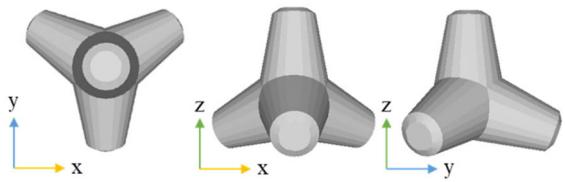


図-4 CAD モデル(サーフェスモデル)

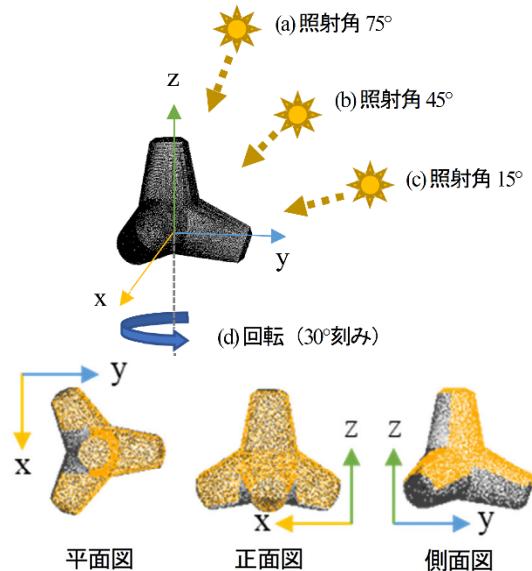


図-5 ライティングモデル生成手法

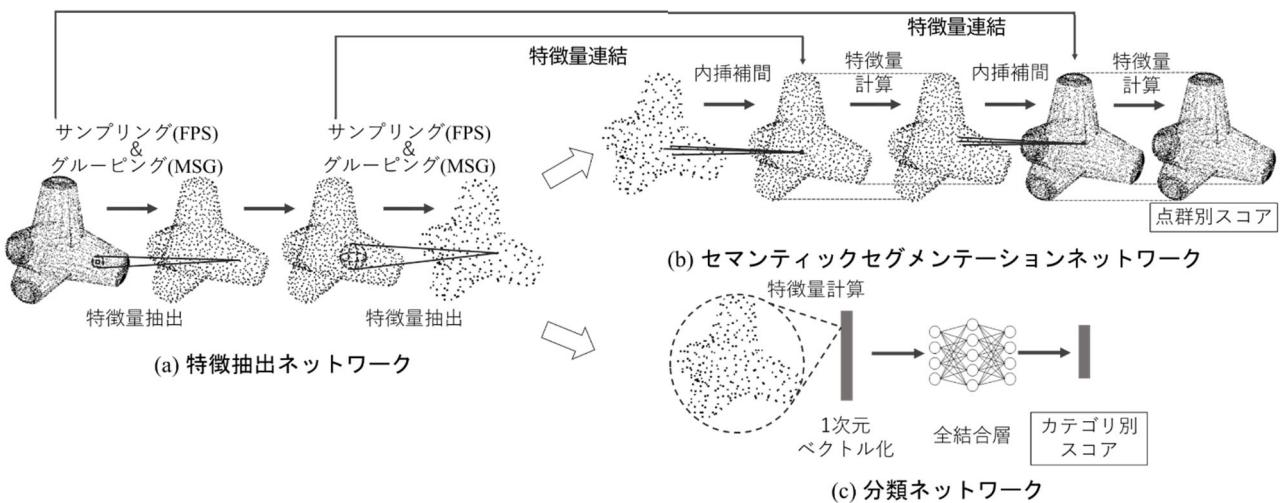


図-3 使用ネットワーク (PointNet++) 構成図

リングソフトウェアを用いて、三次元 CG 空内に CAD モデルと強力な光源を、CAD モデルから一定の距離から照射し、その照射された箇所のみをトレーニングデータとして採用するという手法である。この手法を用いることにより、CAD モデル表面において光が照射された箇所は明るく、逆に光が当たらない箇所には陰影を生じるという情報を獲得することが可能である。本論文では、図-5 のように、照射角度をサーフェスモデルの中心に対して  $15^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $75^\circ$  と設定し、それぞれの照射角度において回転間隔を  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $30^\circ$  刻みに変化させて、ライティングモデルを生成した。

### (3) トレーニングデータセットの作成

本研究では、PointNet++ のネットワークを用いて分類およびセマンティックセグメンテーションを行うが、それぞれに対しトレーニングデータセットを準備する必要がある。セマンティックセグメンテーション用のトレーニングデータ作成については、分類用データを再利用する手法を取っていた。本論文では、更なる精度向上を目指し、トレーニングデータに関してもライティング手法を採用することとした。各データの詳細を次項に記述する。

#### a) 分類用データセット

前項にて作成された点群モデルは分類モデルにおけるトレーニングデータとして用いられる。前述の通り、これらのデータは CAD モデルの表面に点群を生成され、切断・回転処理を施されたものである。

各モデルは約 5,000 点以上で構成されるが、PointNet++ の特徴抽出ネットワークにおけるサンプリング層並びにグルーピング層にて点数制御が行われる。

#### b) セマンティックセグメンテーション用データセット

セマンティックセグメンテーション用のデータセットはルールに基づいて分類用のトレーニングデータを任意に選択・配置することにより作成していた。なお、従来手法により、作成した領域データの一例を図-6 に示す。

### (4) 落下シミュレーションを用いたトレーニングデータの作成

本論文では、セマンティックセグメンテーション用のトレーニングデータ作成を行う際、従来の分類用トレーニングデータの再利用に代わる新たな手法を提案する。具体的には、CG ソフトウェアの落下シミュレーション機能を活用し、消波ブロックが積み重ねられた現実的なシナリオを再

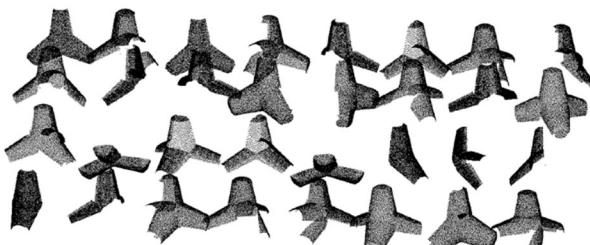


図-6 従来作成手法によるトレーニングデータ  
(セマンティックセグメンテーション用)

現する。このプロセスを通じて生成されたモデルから、セマンティックセグメンテーションのための高品質なトレーニングデータを抽出する。このアプローチにより、深層学習ネットワークが現実世界の形状をより正確に理解し、分析する能力が飛躍的に向上することが期待される。実際の流れに沿って、本手法を次項に示す。

#### a) 落下シミュレーションによる設置状況再現

本研究では、CG ソフトウェアの 1 つである Blender の落下シミュレーション機能を活用して、消波ブロックの積層状況を高度に再現する手法を採用している。立体型ブロックは高層かつランダムな配列で、平型ブロックは密集した配置を目指す。具体的には、ブロック A は基底のみ三列に四から八個を配し、これらの初期条件下でシミュレーションを実施した。一方、ブロック B および C については基底から四列に四から六個、次いで三列、更に四段目は二列に配置した。これにより得られた形状データを前章の CG ライティング手法に適用する。各ブロック 10 回ずつシミュレーションを行い、その結果をライティングの次項の入力データとして使用する。実際に設置状況の再現落下シミュレーションを行った結果を図-7 に示す。また、より正解精度が向上するようテストデータとトレーニングデータ間でサイズ調整を行った。

#### b) 再現モデルを使った CG ライティング

図-8 には、分類モデルと同様 CG ライティング技術を用い再現モデルから生成した点群を示す。XY 軸を中心とした上方 60 度の角度から光を投射し、照明が到達した領域に点群を形成する。本手法により、各ブロック型に対して 10 モ

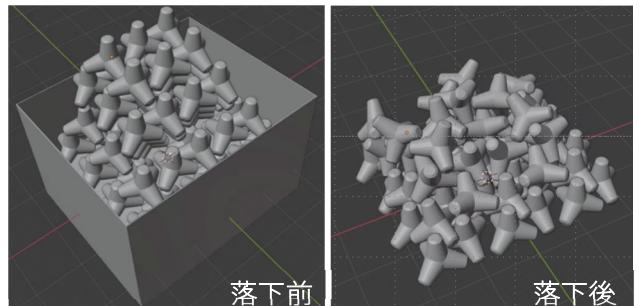


図-7 落下シミュレーションによる状況再現

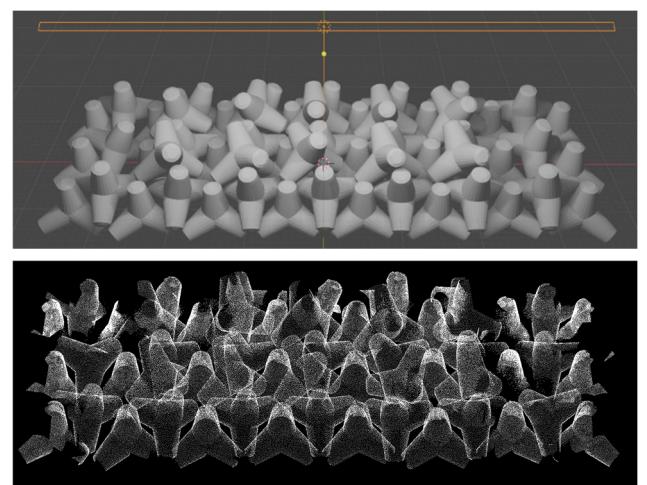


図-8 再現モデル(上段)とライティングによる点群(下段)

デルずつ、計 40 種のデータセットを構築し、セマンティックセグメンテーションモデルのトレーニングデータとした。

## 5. 適用例

### (1) 解析対象：ブロック A・B・C

本研究の解析対象として、消波根固ブロックが点在する水深 10m 以浅の海域（島根県浜田市浜田港周辺・島根県隱岐郡来居港周辺・高知県幡多郡黒潮町佐賀港周辺）にて実測した点群データを採用した。

### (2) トレーニングデータ・テストデータ

分類モデルにおけるテストデータには、データの取得領域から抽出した点群データを用いる。一方、セマンティックセグメンテーションモデルにおけるテストデータには取得した領域データを直接使用している。

各ブロックモデルを構成する総点数は約 5,000 点とし、代表的なパラメータは、点数制御 1,024 点、学習回数 500 回とした。

### (3) 解析結果

上記のトレーニングモデルを用いて学習したトレーニング誤差の推移を図-9 に学習回数による推移を損失および mean-IoU についてそれぞれ示す。なお mean-IoU 値は平均で 0.77 程度であり、概ね良好な数値であるといえる。また図-10 にセマンティックセグメンテーションにより着色した結果を示す。誤答した箇所を抽出すると、ブロック B-C 間での誤答割合が高かった。

### (4) 考察

CG ソフトウェアを使用した現況再現モデルとライティング技術を用いることで PointNet++ の特徴抽出層における点数制御に加え、サイズの調整や水中点群の特徴を適切に処理することが、本報告の高精度なセマンティックセグメンテーションを実現につながったものと考えられる。また、トレーニングデータに対する誤差は低下傾向にある一方、テストデータに対する誤差は学習を重ねるごとに増加しており、過学習気味な状態下にある。

クラス数を増やすことにより正解率の低下がみられたほか、正規化を行うことで精度が上がったため改良および検討の余地があると考える。

## 6. おわりに

本論文では、ASV により自動取得された水中点群データを利用し、構造物の分類と現況把握を自動的かつ迅速・正確に行う手法の構築を目的とし、3DCAD モデルを用いて CG ライティング効果・積み上げシミュレーションを点群深層学習のトレーニングデータへの適用を行った。

PointNet++ の特徴抽出層における点数制御に加え、サイズの調整や水中点群の特徴を適切に処理することで、高精度なセマンティックセグメンテーションを実現した。

今後は、分類クラスの細分化および転移学習を用いた水中構造物の分類について検討を行う予定である。

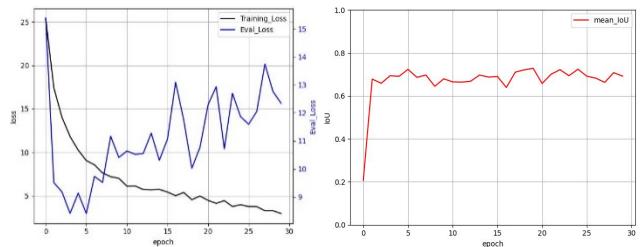


図-9 学習回数による推移  
左：損失の推移 右：mean-IoU の推移

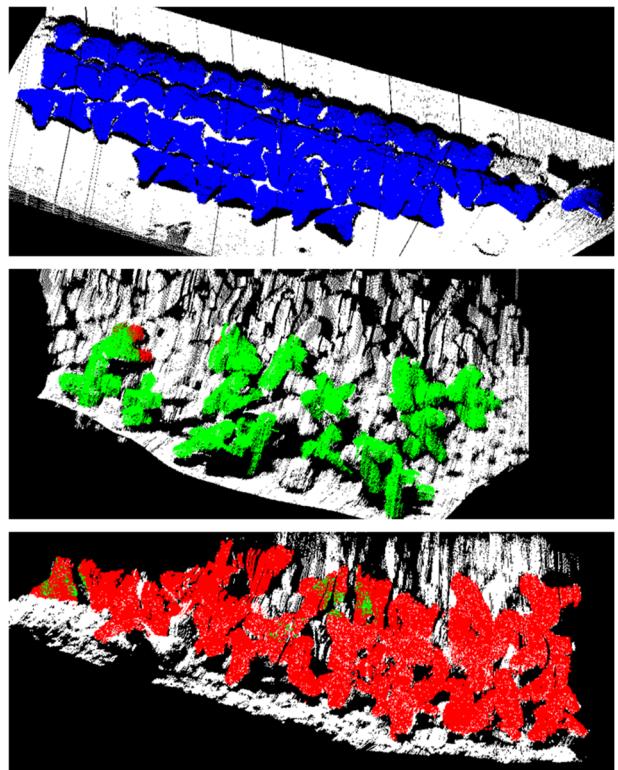


図-10 セグメンテーション結果  
(上：ブロック A 中：ブロック B 下：ブロック C)

## 参考文献

- 1) 杉山史典, 清成研二, 飯田知靖, 小宮山翔子, 鈴木孝洋, 山本和朋: 河川点検を効率化・高度化するフロートロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 第 36 卷 2 号, pp.168-174, 2018.
- 2) 澤隆雄, 大木健: 海底マッピングにおける海洋音響技術, 日本音響学会誌, 第 75 号 1 卷, pp.29-34, 2019.
- 3) 浅田昭: マルチビームソナーによる海底地形の可視化, 日本音響学会誌, 第 10 号 55 卷, pp. 717-722, 1999.
- 4) Maturana, C. and Scherer, S.: Voxnet: A 3d convolutional neural network for real-time object recognition, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 922-928, 2015.
- 5) Qi, C. R., Su, H., Mo, K., and Guibas, L. J.: PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, pp. 652-660, 2017.
- 6) Qi, C.R., Yi, L., Su, H. and Guibas, L.J. : PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space, Advances in neural information processing systems, pp. 5099-5108, 2017.

# マルチパッチ解析手法に基づく Isogeometric Analysis 流体解析手法の構築

## Development of Isogeometric Analysis Fluid Analysis Method Based on Multi-Patch Technique

都市人間環境学専攻 博士前期課程1年 坂井祐仁  
Yuto Sakai

### 1. はじめに

近年、土木分野では、3D プリンターや CAD を代表とするデジタルファブリケーション技術が注目されており、3D プリンターは、自由度の高い形状を CAD から制作できる特徴を併せ持つ。以上の理由より、任意曲面を有する解析に優位性を持つ Isogeometric Analysis(IGA)<sup>1)2)</sup>が注目されている。IGA は Computer-Aided Design(CAD) の形状表現に用いられる Spline 関数を基底関数として使用するため、CAD で描いた形状モデルから直接解析メッシュを作成可能である。

著者らは土木分野への IGA の適用として、IGA を用いた複雑形状を有する流体構造連成解析手法の構築を最終的な目標とし、IGA の土木分野への適用を行ってきた。<sup>3)</sup>しかし、単一パッチで複雑な幾何形状を表現することが困難であった。そこで、本研究では、IGA を用いた複雑形状を有する流体解析手法の構築を目的とし、本報告では、パッチ間に連続条件を適用した IGA マルチパッチ手法を構築し、その妥当性と有効性の検討を実験結果および従来の有限要素法との比較のもとに行った。

### 2. 数値解析手法

#### 2.1 定式化

2 次元非圧縮性粘性流体の支配方程式には、以下に示す無次元化した Navier-Stokes の運動方程式と連続式を用いる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

ここで、 $\Omega$  は境界  $\Gamma$  で囲まれた解析領域であり、 $u_i$  は流速、 $p$  は圧力、 $Re$  はレイノルズ数である。

Dirichlet 境界条件、Neumann 境界条件はそれぞれ以下のように表される。

$$u_i = g_i \quad \text{in } \Gamma_g \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( -p \delta_{ij} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) n_j = h_i \quad \text{in } \Gamma_h \quad (4)$$

ここで、 $\Gamma_g$ 、 $\Gamma_h$  は、Dirichlet 境界条件、Neumann 境界条件を表し、 $g_i$ 、 $h_i$  はそれぞれの境界上で規定される

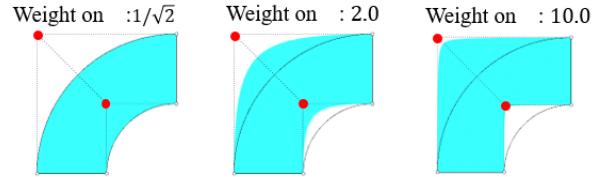


図-1 NURBS における重み

流速とトラクションである。また  $\delta_{ij}$  は Kronecker のデルタ、 $n_i$  は外向き単位法線ベクトルである。

支配方程式 (1)、(2) に対し、空間方向の離散化に SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法を用い、時間方向の離散化手法として、流速に対して 2 次精度である Crank-Nicolson 法を適用し、連続項の流速と圧力に関しては陰的に取り扱う。また、移流速度  $\bar{\mathbf{u}}_i$  は、式 (5) に示す 2 次精度の Adams-Basforth 法により陽的に近似を行い、線形化する。

$$\bar{\mathbf{u}}_i = \frac{3}{2} \mathbf{u}_i^n - \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^{n-1} \quad (5)$$

以上により式 (6) に示すような有限要素方程式を得る。

$$\begin{aligned} & (\mathbf{M} + \mathbf{M}_S) \frac{\mathbf{u}_i^{n+1} - \mathbf{u}_i^n}{\Delta t} + (\mathbf{A} + \mathbf{A}_S) \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) \\ & - (\mathbf{G}_i - \mathbf{G}_{Si}) \mathbf{p}^{n+1} + \mathbf{D}_{ij} \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) \\ & + \mathbf{C}_j \mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{M}_{Pj} \frac{\mathbf{u}_j^{n+1} - \mathbf{u}_j^n}{\Delta t} \\ & + \mathbf{A}_{Pj} \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) + \mathbf{G}_P \mathbf{p}^{n+1} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{C}$  はそれぞれ時間微分項、移流項、圧力項、粘性項、連続項の係数行列を表す。添字  $S$ 、 $P$  は SUPG 項、PSPG 項に起因する行列である。有限要素方程式の解法としては反復解法である GPBi-CG 法を用いる。

#### 2.2 NURBS

本研究では形状関数に付近の曲線の曲率を制御することが可能な NURBS 関数を用いた。この特徴により円柱形状を正確に再現することが可能となる。NURBS 関数は、B-Spline 基底関数と制御点に付与される重み、制御点の位置ベクトルによって表現される。B-Spline 基底関数とは、式 (7) の Cox de Boor の漸化式によって定義される関数である。

$p = 0$  の場合 :

$$\begin{aligned} N_{i,0}(\xi) &= 1 && \text{if } \xi_i \leq \xi \leq \xi_{i+1} \\ N_{i,0}(\xi) &= 0 && \text{otherwise} \end{aligned}$$

$p = 1, 2, 3, \dots$  の場合 :

$$N_{i,p}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} N_{i,p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\xi) \quad (7)$$

ここで、 $N$  は  $\xi$  方向の B-Spline 基底関数、 $i$  は制御点番号、 $p$  は B-Spline 基底関数の次数、 $\xi_i$  はパラメータ空間の座標であるノットであり、以下に示すようなノットベクトルと呼ばれる一様増加する数列によって与えられる。

$$\Xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1}) \quad (8)$$

ノットベクトルは、CAD で描いた形状モデルから得られる数列で、B-Spline 基底関数と IGA における要素を定義するパラメータである。式(7)で表される B-Spline 基底関数を用ると、NURBS 関数の基底関数  $R_{i,j}^{p,q}(\xi, \eta)$  と NURBS 曲面  $S(\xi, \eta)$  は式(9), (10) のように表される。

$$R_{i,j}^{p,q}(\xi, \eta) = \frac{N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) w_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) w_{i,j}} \quad (9)$$

$$S(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,j}^{p,q}(\xi, \eta) B_{i,j} \quad (10)$$

ここで、 $M$  は  $\eta$  方向の B-Spline 基底関数、 $j$  は  $\eta$  方向の B-Spline 基底関数の制御点番号、 $q$  は  $\eta$  方向の B-Spline 基底関数の次数、 $w_{i,j}$  は物理空間の座標である制御点に付与される重み、 $B_{i,j}$  は制御点の位置ベクトルである。

### 2.3 IGA における変数変換

Spline 関数を定義するノットはパラメータ空間の関数であり、数値計算はパラメータ空間において行われる。そのため、物理空間  $\Omega_e(x, y)$  とパラメータ空間  $\Omega_e(\xi, \eta)$  で変数変換を行う必要がある。また、数値積分の手法として、式(11)に示す Legendre-Gauss の積分公式を用いるため、パラメータ空間  $\Omega_e(\xi, \eta)$  から親要素  $\hat{\Omega}_e(\hat{\xi}, \hat{\eta})$  にさらに変数変換を行う。

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(\hat{\xi}, \hat{\eta}, \hat{\zeta}) d\hat{\xi} d\hat{\eta} d\hat{\zeta} = \sum_{i=1}^{ngp} \sum_{j=1}^{ngp} \sum_{k=1}^{ngp} F(\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_j, \hat{\zeta}_k) w_i w_j w_k \quad (11)$$

ここで、 $ngp$  は積分点数、 $\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_j, \hat{\zeta}_k$  は親要素における積分点の座標、 $w_i, w_j, w_k$  は積分点に付与される重みである。また、積分点数については本研究では NURBS 関数

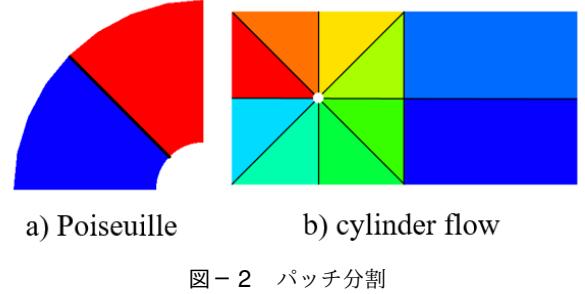


図-2 パッチ分割

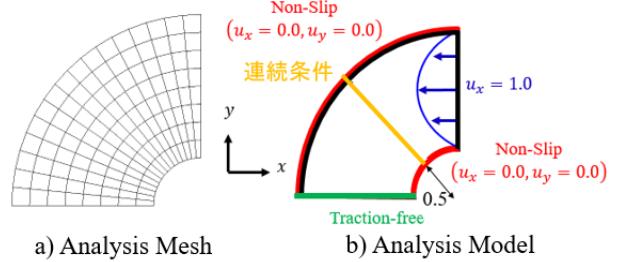


図-3 解析条件

の次数 +1 とした。

IGA では二度の変数変換を行う必要がある。ここで、物理空間とパラメータ空間の写像関係式、パラメータ空間と親要素の写像関係式は式(12), 式(13)に示す通りである。

$$x = \sum_{i=1}^{n_{np}} R_i^e(\xi, \eta) B_{x_i} \quad (12)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \left[ (\xi_{i+1} - \xi_i) \hat{\xi} + (\xi_{i+1} + \xi_i) \right] \quad (13)$$

ここで、 $n_{np}$  は領域内の制御点の総数、 $B_{x_i}$  は  $i$  番目の制御点の座標である。

### 2.4 マルチパッチ解析手法

本研究にて構築したマルチパッチ手法について述べる。マルチパッチ手法では、形状を複数の NURBS 面により表現することで、各々のパッチが独自の形状や幾何学的特性を持ち、形状表現の自由度の向上やそれに伴う解析精度の向上が期待される。今回は、パッチ間で Matrix-Vector の重ね合わせによる連続条件を与え、マルチパッチ解析を行っている。数値解析例で示す Poiseuille 流れ解析、円柱まわり流れ解析においては、図-2 に示すとおりそれぞれ 2 パッチ、10 パッチでの計算を行う。

### 3. 数値解析例 1

数値解析例の一つ目として、曲がりを有する Poiseuille 流れ問題を示す。

#### 3.1 解析条件

解析領域および解析メッシュは、図-3 に示す通りである。境界条件として、壁面にはすべりなし条件 (no-slip)

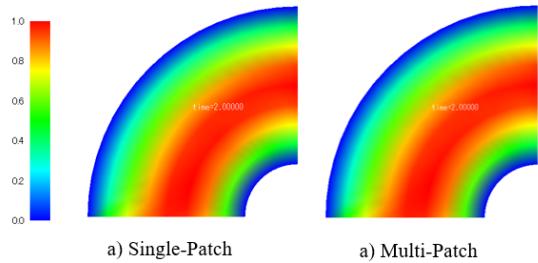


図-4 解析結果

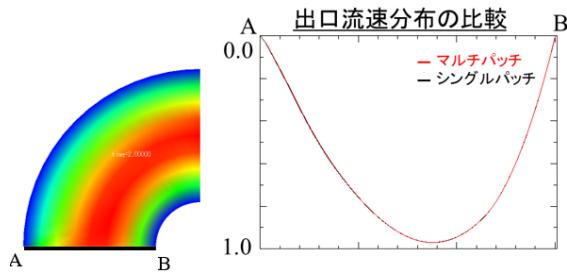


図-5 流出流速の比較

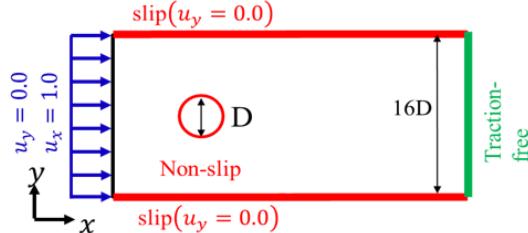


図-6 解析モデル

条件), パッチ間では、連続条件を与えていた。流入条件として,  $x$  方向に最大値 1.0 の放物状に初期流速を与えていた。下流側流出境界では、トラクションフリー (Traction-Free) 条件とした。

また、解析条件として、時間増分量  $\delta t$  は 0.01, Reynolds 数は 1.0 の層流状態での解析を行っている。

### 3.2 解析結果

解析結果として、マルチパッチとシングルパッチ両手法における無次元時間  $T=2.0$  での流れ方向流速可視化結果を図-4 に示す。解析結果より、定性的ではあるものの、正しく解析できていることを確認した。

次に、定量的評価として、流出部における流れ方向流速分布の比較を図-5 に示す。この結果より、マルチパッチとシングルパッチの両手法における流れ方向流速が定量的に良い一致を示すことを確認し、マルチパッチ解析手法を用いた解析結果の妥当性を確認した。

## 4. 数値解析例 2

次に、円柱まわり流れ問題に取り組んだ。

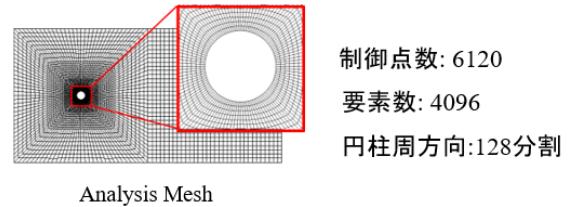


図-7 解析メッシュ

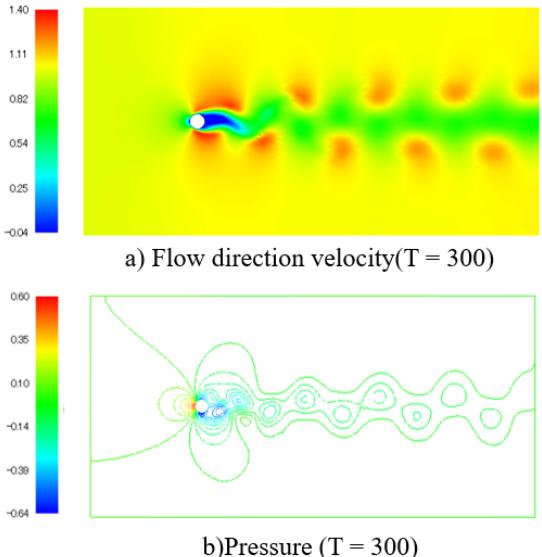


図-8 流れ方向流速、圧力可視化結果 ( $T=300$ )

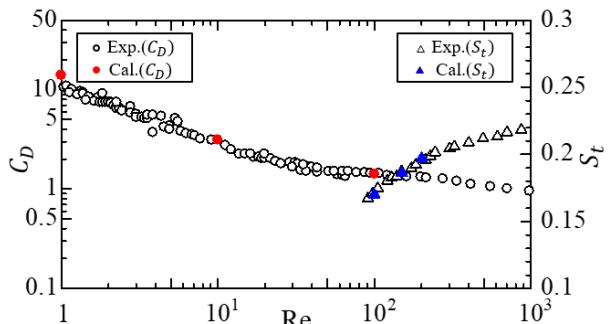


図-9 IGA 解析結果と実験結果との比較

### 4.1 妥当性の確認

#### 4.1.1 解析条件

解析モデル、解析メッシュを図-6、図-7 に示す。境界条件として、円柱上ですべりなし条件 (no-slip 条件), 側壁ではすべり条件 (slip 条件), 下流側流出境界ではトラクションフリー (traction-free) 条件を与える。

解析メッシュには総制御点数 6120, 総要素数 4096, 総パッチ数 10 のもと、閉塞率 6.67% での解析を行った。

#### 4.1.2 解析結果

結果の一例として、Reynolds 数 100 における流れ方向流速および圧力の可視化結果を図-8 に示す (無次元時刻  $T=300$ )。この結果より、IGA を用いて円柱まわりの流れを解析できること、周期的なカルマン渦列の発生を

確認した。

次に、各 Reynolds 数における抗力係数の平均値および Strouhal 数と実験結果との比較を図-9 に示す ( $T=200 \sim 300$ )。図より、解析結果が実験結果と良い一致を示しており、マルチパッチ手法に基づく IGA を用いた解析における結果の妥当性を確認した。

#### 4.2 IGA 有効性の検討

流速が急激に変化する壁面境界付近の境界層メッシュに対して、NURBS 関数を用いた高次補間を適用し、線形補間による従来の有限要素法との比較により、構築した本手法の有効性を検討した。

##### 4.2.1 解析条件

解析メッシュを図-10 に示す。今回は、円柱の  $1/4$  径の厚さを境界層とし、それぞれ 16, 8, 4, 2 分割した 4 通りのメッシュを用いた。また、比較対象として用いる有限要素法では、IGA 解析メッシュの要素端点を節点にもつ三角形一次要素を用いて解析を行う。

##### 4.2.2 解析結果

解析結果として、流れ方向流速の可視化結果 ( $T=200$ ) を示す。また、IGA, FEM 両手法でのそれぞれの分割幅における抗力係数算出結果を図-12 に、両手法における 16 分割解析結果（収束解）との相対誤差を図-13 に示す。これらの結果より、IGA ではカルマン渦列の発生を早く確認できることに加えて、IGA と FEM で同様の境界層分割数のもと解析を行う場合には、IGA を用いることで収束解に近い結果を得られることが確認できる。また、IGA を用いることで、境界層に 2 分割程度のメッシュを適用しても、収束解と比べ 2% 程度の相対誤差で解析を行うことが可能であり、10% 程度の相対誤差が見られる従来の有限要素法に比べて優位性が確認できた。

## 5. おわりに

本発表では、IGA を用いたマルチパッチ解析手法の構築を行い、Poiseuille 流れ問題および円柱周りまわり流れ問題に適用し、その妥当性と有効性の検討を行った。

- IGA を用いたマルチパッチ手法を構築し、結果の妥当性を確認した。
- IGA を適用することで、FEM に比べ早くカルマン渦列を確認した。
- 境界層に対して NURBS 補間に基づく IGA を適用することで、三角形一次要素を用いた有限要素法に比べ少ない境界層分割数のもと収束解に近い結果を得る。

今後は、さらに高次の NURBS 関数を用いた比較や計算時間に関する検討を行う。

## 参考文献

- 1) T.J.R.Hughes, J.A.Cottrell and Y.Bazilevs: Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement,

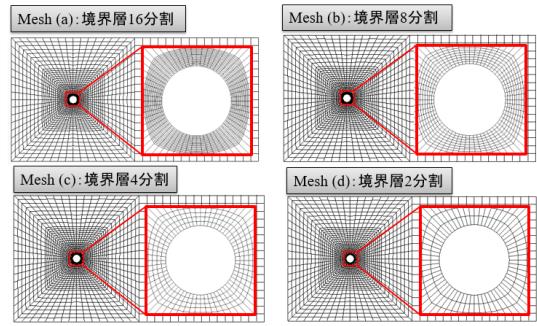


図-10 解析メッシュ

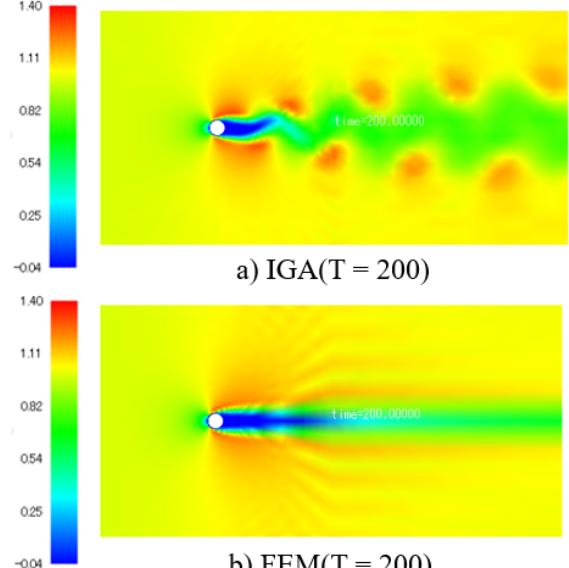


図-11 抗力係数の比較

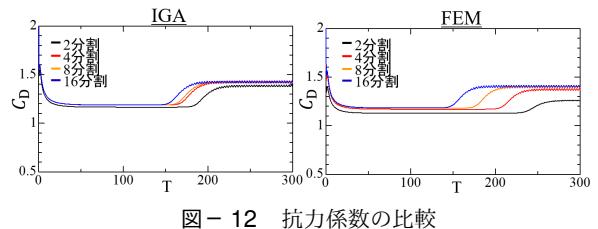


図-12 抗力係数の比較

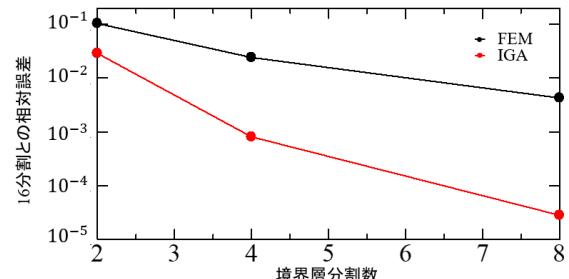


図-13 16 分割（収束値）との相対誤差

*Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.194, pp.4135-4195, 2005.

- 2) J.A.Cottrell, T.J.R.Hughes and Y.Bazilevs, *Isogeometric analysis:Toward integration of CAD and FEA*, Wiley Publishing, 335p, 2009.
- 3) 吉田也真都, 車谷麻緒, 長谷部寛, 横山和男 : Isogeometric Analysis による構造物の損傷を考慮した流体-構造連成解析手法の構築, 第 49 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2022.

# 有限要素法による道路交通騒音評価システムの構築

## Development of Road Traffic Noise Evaluation System using Finite Element Method

都市人間環境学専攻1年 宮内 暖季  
Haruki MIYAUCHI

### 1. はじめに

著者らは既往研究において、道路交通騒音を対象として波動音響理論に基づき、任意形状への適合性に優れる有限要素法を用いた音場解析手法の構築を行ってきた。

<sup>1)</sup>しかし、移動音源問題において、一方通行でかつ単一の車種のみの事例にしか適用できず適用性に課題があった。

そこで本研究では、対面通行でかつ複数車種が混在する場合の解析を可能とするために、インパルス応答解析と各種実音源との時変置み込み演算の重ね合わせにより行う手法を構築した。また、解析結果をHMD(Head Mounted Display)を用いて提示するシステムを構築した。

### 2. 数値解析手法

交通騒音問題のような開空間を対象とした問題を扱う場合、有限な領域で計算を行うFEMでは、仮想的に設定した開境界上にて適切な処理を行う必要がある。本研究では高精度な開境界処理が可能なPML法を用いた解析を行う。

#### 2.1 支配方程式

本研究で取り扱う3次元非定常波動問題の支配方程式である修正波動方程式と、補助変数を求めるための移流方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \beta p - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_j^2} - c^2 \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{in } D, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \Phi_i + \mathbf{B} \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } D_{\text{pml}}, \quad (2)$$

ここで、 $D$ は解析領域を、 $D_{\text{pml}}$ はPML領域、 $x_i, x_j$ は3次元空間の座標、 $t$ は時間、 $c$ は音速、 $p$ は音圧、 $\Phi_i$ はPMLを適用するための補助変数を表す。また、それぞれの変数と行列を以下に示す。

$$\begin{aligned} \alpha &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z, \\ \beta &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x, \end{aligned}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_y - \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y - \sigma_z - \sigma_x & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \end{bmatrix},$$

ここで、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は各方向の減衰パラーメータを表し、PML領域では非0、非PML領域では0となり音波を吸収する役割をもつ。また、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は次式により求

まる。

$$\sigma_{x_i}(d_i) = \begin{cases} 0 & |d_i| < a_i, \\ -\frac{3c \ln R}{2L_i} \left( \frac{d_i - a_i}{L_i} \right)^2 & a_i \leq |d_i| \leq a_i + L_i, \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $L_i, a_i$ は各方向におけるPML層の厚さ、PML領域と非PML領域の境界座標値、 $d_i$ は任意の位置座標、 $R$ は反射の理論係数を表す。また、計算領域内 $D$ では $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 及び $\Phi_i$ が0となるので通常の波動方程式を解くことに等しい。

#### 2.2 初期条件と境界条件

初期条件としては、以下の無音状態を仮定する。

$$p = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad \text{in } D, \quad (4)$$

一方、境界条件は次式を用いる。

Dirichlet境界条件：

$$p = \hat{p} \quad \text{on } \partial D_p, \quad (5)$$

Neumann境界条件：

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \partial D_q, \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{on } \partial D_q, \quad (7)$$

ここで、 $\partial D_p, \partial D_q$ はそれぞれDirichlet境界条件、Neumann境界条件を表し、 $\hat{p}$ は既知の音圧、 $n$ は外向き単位法線ベクトルである。式(6)は完全反射の境界条件、式(7)はMurの吸収境界条件である。

#### 2.3 有限要素法に基づく数値解析

式(1), (2)に対してGalerkin法に基づく重み付き残差法を適用し、Green-Gaussの定理を用いて得られる弱形式に対して、有限要素として四面体1次要素を用いると、各要素における時間に関する常微分方程式は以下のようになる。

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial t^2} + \alpha \mathbf{M}_e \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \beta \mathbf{M}_e \mathbf{p} + \mathbf{K}_e \mathbf{p} - \mathbf{S}_e \Phi_j = \mathbf{F}_e, \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \mathbf{M}_e \Phi_i + \mathbf{B} \mathbf{S}_e \mathbf{p} = 0, \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{M}_e, \mathbf{K}_e, \mathbf{S}_e, \mathbf{F}_e$ はそれぞれ各要素の質量行列、拡散行列、移流行列、境界積分項を表す。そして、

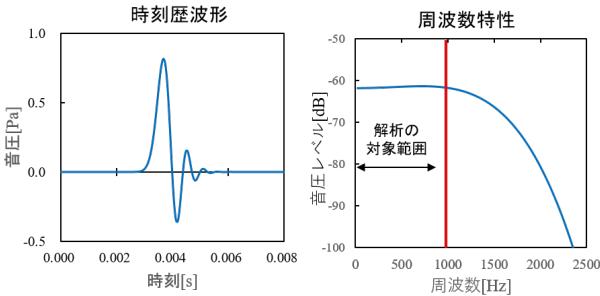


図-1 Lubich の擬似インパルス

式(8)および式(9)をすべての要素について重ね合わせると、全体系に対する有限要素方程式が得られる。時間方向の離散化には中心差分を用い、陽解法を適用するために質量行列に集中化を施すと、次式のような離散化方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}\mathbf{p}^{n+1} &= \bar{\mathbf{M}}(2\mathbf{p}^n - \mathbf{p}^{n-1}) \\ &+ (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{p}^n - \mathbf{p}^{n-1}\Delta t) \\ &+ (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x)\bar{\mathbf{M}}\mathbf{p}^n\Delta t^2 - \mathbf{K}\mathbf{p}^n\Delta t^2 \\ &+ \mathbf{S}_x\Phi_x^n\Delta t^2 - \mathbf{S}_y\Phi_y^n\Delta t^2 - \mathbf{S}_z\Phi_z^n\Delta t^2 + \mathbf{F}\Delta t^2, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\bar{\mathbf{M}}\Phi_x^{n+1} = (1 - \sigma_x\Delta t)\bar{\mathbf{M}}\Phi_x^n - (\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z)\mathbf{S}_x\mathbf{p}^n\Delta t, \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{M}}\Phi_y^{n+1} = (1 - \sigma_y\Delta t)\bar{\mathbf{M}}\Phi_y^n - (\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x)\mathbf{S}_y\mathbf{p}^n\Delta t, \quad (12)$$

$$\bar{\mathbf{M}}\Phi_z^{n+1} = (1 - \sigma_z\Delta t)\bar{\mathbf{M}}\Phi_z^n - (\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y)\mathbf{S}_z\mathbf{p}^n\Delta t, \quad (13)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{M}}$  は集中質量行列である。

#### 2.4 インパルス応答解析

本研究では、インパルス応答解析手法を用いて可聴化音を作成し、遮音効果の比較や騒音体験システムの構築を行う。インパルス応答解析における入力波としては、一定の周波数特性を持つ Dirac のデルタ関数を用いることが望ましいが、波形が急峻であることから安定した伝播計算は困難である。そこで本研究では、畳み込み積分の近似解法である Lubich の CQM(Convolution Quadrature Method)<sup>7)</sup>で提案された畳み込み積分を離散近似することで求める手法における離散化された畳み込み積分の重み  $\omega_n(\Delta t)$  を入力波として使用する。

$$\omega_n(\Delta t) = \frac{R^{-n}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \left( \frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{s}{c}r} \right) e^{(-2\pi i \frac{nl}{L})}, \quad (14)$$

ここで、 $r$  は音源からの距離、 $n$  は時間ステップ、 $L$  は積分区間の分割数、 $R$  は目標とする精度  $\epsilon$  を用いて  $R = \epsilon^{1/2L}$ 、 $s$  は  $s = \gamma(\zeta)/\Delta t$  と表される。 $\gamma(\zeta)$  は線形マルチステップ法(差分法)における生成多項式の商である。詳しくは文献<sup>7)</sup>を参照されたい。本研究では、 $L = 500$ 、 $r = 1.2m$ 、 $\Delta t = 6.67 \times 10^{-5}s$  としてインパ

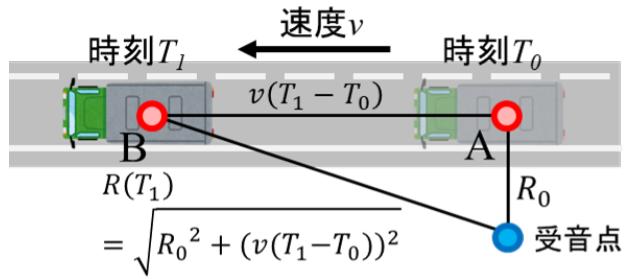


図-2 距離減衰式を用いたインパルス応答の推定

ルスを生成した。生成したインパルスの時刻歴波形とその周波数特性を図-1 に示す。図に示すように、Lubich の擬似インパルスの周波数特性は、ある周波数までほぼ平坦に推移しその後急激に低下するという特徴を持つ。周波数特性が平坦な領域の上限の周波数は、式中のパラメータに連動して変更することができる。本研究ではピーク値から 3dB 減少する周波数までを一定の周波数特性であるとし、1.0kHz 付近まではほぼフラットな特性を持つ擬似インパルスを使用する。

#### 2.5 時変畳み込み演算

移動音源の各位置を  $x(t)$ 、位置  $x(t)$  での固定音源から受音点位置までのインパルス応答を  $h(t, x(t))$ 、音源信号を  $s(t)$  とすると、各位置、各時間における受音点での音圧  $p(t)$  は移動音源の波動方程式より次式で与えられ、近似的に式(15)で表せることが示されている<sup>7)</sup>。

$$p(k) = \sum_{k_s=0}^{\infty} s(k_s)h(k - k_s, x(k_s)), \quad (15)$$

また、式(15)は行列の演算の形で次式で表せる<sup>7)</sup>。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{s}, \quad (16)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h(1, \mathbf{x}(1)) & 0 & \cdots & 0 \\ h(2, \mathbf{x}(1)) & h(1, \mathbf{x}(2)) & \ddots & \vdots \\ \vdots & h(2, \mathbf{x}(2)) & \ddots & 0 \\ h(L_h, \mathbf{x}(1)) & \vdots & \ddots & h(1, \mathbf{x}(L_s)) \\ 0 & h(L_h, \mathbf{x}(2)) & \ddots & h(2, \mathbf{x}(L_s)) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h(L_h, \mathbf{x}(L_s)) \end{bmatrix},$$

ここで、 $\mathbf{s}$  は音源信号ベクトル、 $\mathbf{p}$  が受音信号ベクトル、 $\mathbf{H}$  は時変畳み込み行列、 $L_s$  は音源信号長、 $L_h$  はインパルス応答長である。時変畳み込み行列の作成にあたっては、すべての音源位置からのインパルス応答を求める必要があるが、求められるインパルス応答にも限界があるため、図-2 に示す方法で基準点からの距離減衰によって各位置でのインパルス応答を求めた。ここで、図-2 内の  $v$  は音源の想定速度、 $T_0$  は基準の時刻、 $T_1$  は任意の時刻、 $R_0$  は基準の時刻における音源と受音点の距離を表す。基準の時刻  $T_0$  におけるインパルス応答を

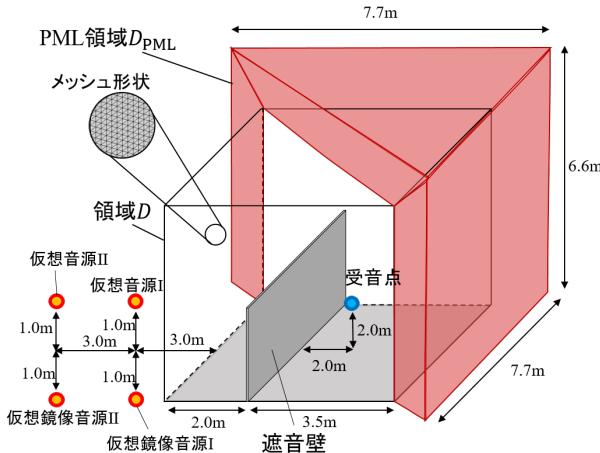


図-3 解析モデル

$S(T_0)$  とし、 $S_0(T_0)$  を便宜的に音源のインパルス強さと定義すると、以下のように表せる。

$$S_0(T_0) = R_0 \times S(T_0) \quad (17)$$

また、インパルス強さは時刻によらず一定として、時刻  $T_1$  におけるインパルス強さは以下のようになる。

$$S_0(T_1) = S_0(T_0) \quad (18)$$

距離減衰の関係より、時刻  $T_1$  における音源位置からのインパルス応答  $S(T_1)$  は直達距離  $R(T_1)$  を用いて、以下のように表される。

$$S(T_1) = \frac{1}{R(T_1)} S_0(T_1) \quad (19)$$

$R(T_1)$  は音源の想定速度  $v$  を用いて、以下のように表せる。

$$R(T_1) = \sqrt{R_0^2 + (v(T_1 - T_0))^2} \quad (20)$$

これにより、推定されたインパルス応答を時変畳み込み行列に代入するが、その際に到達距離の差による到達時間差も考慮して代入する<sup>?)</sup>。そして、時変畳み込み行列と、音源データとの演算により移動音源の可聴化音を再現する。なお、畳み込みを行う時間幅は、解析における時間幅と同様の値を用いる。

### 3. 数値解析例

#### 3.1 解析条件

図-3 に解析モデルを示す。音速、要素分割幅、時間増分量はそれぞれ、340.0m/s, 0.022m, 0.00667ms している。入射波には Lubich の擬似インパルスを使用した。なお、自由度数は約 8200 万である。境界条件は、壁面、地面部ともに完全反射とし、PML のパラメータは  $L_i = 1.1\text{m}$ ,  $R = 10^{-6}$  としている。音源位置につい

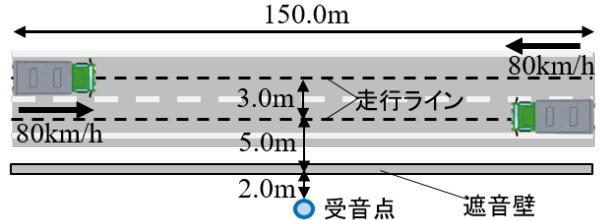


図-4 車両の走行条件

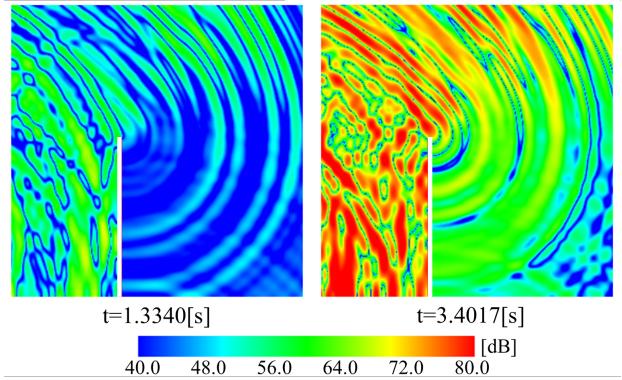


図-5 音圧レベル分布

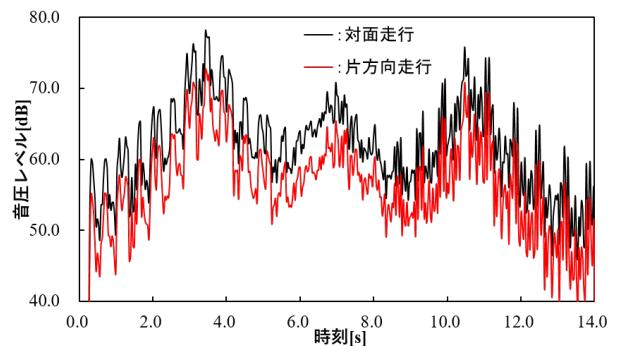


図-6 受音点における可聴化結果

て、遮音壁中心から直交方向に 3.0m 離れた位置に仮想音源 I を設置し、遮音壁中心から直交方向に 6.0m 離れた位置に仮想音源 II を設置し、音源位置 I を遮音壁側を走行する車両、音源位置 II をそれに対する対向車両の音源位置とする。また、可聴化に使用した音源は、大型車、中型車、バイクの走行音を定常音化したものである。

#### 3.2 解析結果

受音点で得られるインパルス応答に対して、時変畳み込み演算を行い、可聴化を行った。車両の走行条件を図-4 に示す。150m の区間を時速 80km/h で走行するこ

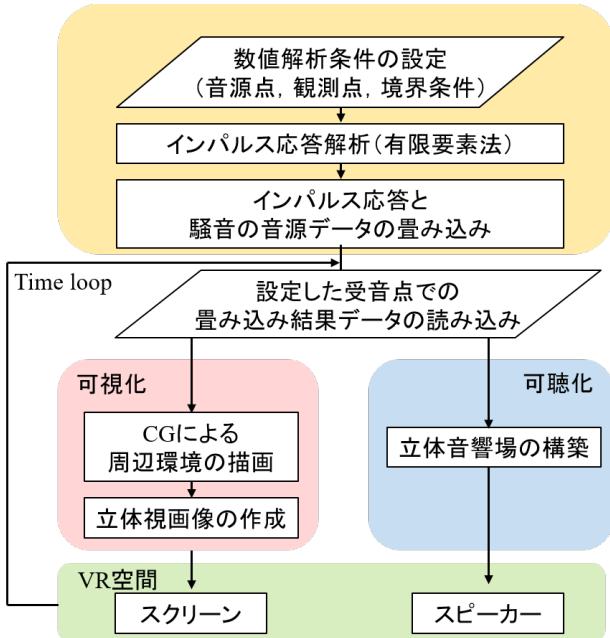


図-7 フローチャート

とを仮定している。遮音壁と直交する鉛直中心断面における遮音壁側の音源位置からのインパルス応答と大型車の音源との時変置み込み演算結果の可視化を図-5に示す。なお、 $t = 1.3340[s]$  は音源が走行開始から約 30m 地点、 $t = 3.4017[s]$  は音源が可視化断面に最接近した約 75m 地点を示している。遮音壁の影響により遮音壁後方で音圧レベルが低減できていることを確認できる。使用した音源は、大型車、中型車、バイクの走行音を定常音化したものであり、両車線ともに中型車、大型車、バイクの順に車間距離 80m で走行することを仮定している。各車線が同時に受音点の前を走行した場合と片方向のみ走行した場合の計算結果の時刻歴波形を図-6 に示す。音源が遠方から近づくにつれ、次第に音が大きくなり、遠ざかると小さくなるという移動音源の特徴を表していることを確認でき、双方向の走行により音圧レベルも大きくなっていることが確認できる。

#### 4. HMD に基づく VR システム

時変置み込み演算によって得られた受音点における計算結果を用いて、VR 技術を用いた可視化・可聴化システムの構築を行った。可聴化に用いたデバイスは HMD の Meta Quest 3 である。図-7 に示すフローチャートに沿って騒音評価システムを構築している。数値解析によって得られた受音点での実音源との置み込み結果のデータを読み込み、可視化側では、Unity を用いて、CG による周辺環境の描画及び立体視画像の作成を行い、可聴化側では、Unity の AudioSource 内の 3D sound settings 機能を用いて、立体音響場の構築を行った。また、音の出力におけるブラックボックス化を避けるた



図-8 システム体験の様子

め、可聴化音の音声データ (wav ファイル) を読み込むのではなく、可聴化音の時刻歴のテキストデータを読み込んでいる。これにより、システム内で計算結果を正確に重ね合わせることを可能とし、ランダムでの走行を可能としている。

VR システム内での体験の様子を図-8 に示す。VR システムにおいて、走行車両は、走行台数分の整数乱数を生成し、その乱数の値によって決定している。走行車両が決定したのちに、システム内で時変置み込み演算による計算結果の重ね合わせを行い、その結果を音として出力している。VR システム内で結果の重ね合わせを行うことで、実現象に近い道路交通を再現可能であることを確認した。

#### 5. おわりに

本研究では、有限要素法による道路交通騒音評価システムの構築と解析結果を HMD を用いて提示するシステムを構築した。その結果、以下の結論を得た。

- 対面交通でかつ複数車種が混在する事例に対して適用した結果、時変置み込み演算の重ね合わせにより再現可能であることを確認した。
- VR システム内で計算結果の重ね合わせを行うことにより、実現象に近い道路交通を再現可能であることを確認した。

今後の課題として、実測値との比較及び遮音壁の内部構造の考慮について行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 深澤一志、宮内暖季、樺山和男、吉川仁：有限要素法による音場解析手法の構築とその可聴化、土木学会論文集、土木学会、Vol.80, No.15, 23-15021, 2024.
- 2) Matsumoto, M. Tohyama, M. and Yanagawa, H.: A method of interpolating binaural impulse responses for moving sound images, *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol.24, No.5, pp.284-292, 2003.

# 航空写真を用いた Semantic Segmentation による 土地利用分類モデルの構築とその性能評価

Development of a Land Use Classification Model Based on Semantic Segmentation  
Using Aerial Photographs and Its Evaluation of Performance

都市人間環境学専修士1年 羽物 裕人  
Yuto HABUTSU

## 1. はじめに

著者らはこれまで津波、高潮、洪水氾濫等の数値解析<sup>1)</sup>を行ってきたが、土地利用区分毎に粗度係数<sup>2)</sup>を与える際には、半自動で行っており労力のかかるものであった。

そこで本研究では、深層学習に基づく画像分類手法により、航空写真の土地利用分類モデルを構築し、データ拡張の違いによる精度比較を行った。また、構築したモデルに対して一般に公開されている航空写真に転移学習させ、深層学習モデルの妥当性の検証を行った。

## 2. 画像分類手法

### 2.1 データの取得・作成

本研究は、教師あり学習の手法に基づき、分類モデルの構築を行う。本研究では、国土地理院が公開している数値地図5000とGISソフトを用い、オリジナル画像とアノテーション画像を作成する。トレーニングデータの作成地域は最新(2008年)の数値地図5000が公開されている近畿圏で作成し、テストデータの作成地域は既往研究の対象地域である高知県中土佐町久礼地区とした。具体的なデータセットの作成方法を図-1, 2に示す。トレーニングデータは図-1のように航空写真<sup>3)</sup>と100mメッシュ、数値地図5000と100mメッシュをGISソフト上で重ね合わせてデータ処理することにより、オリジナル画像とアノテーション画像をペアになるように作成している。テストデータも同様の手順でデータを作成するが、対象地域では数値地図5000が発行されてないため、手作業で数値地図5000の代わりになる土地利用図を作成する。作成した画像データ例を図-3に示す。ラベル項目は、国土地理院が公開している細密数値情報に基づき、建物、田・畑、山林、海・河川、道路の5クラスとした。

### 2.2 データの前処理

データの前処理として図-4に示すようにデータのランダム拡張処理を行っている。これにより最適な分類モデルの構築を検討している。

### 2.3 深層学習モデルについて

深層学習とは、人間の脳神経細部を模倣したニューラルネットワークを用いて学習する機械学習手法の一つである。本研究では、深層学習に基づく画像分類手法による土地利用分類を行う。

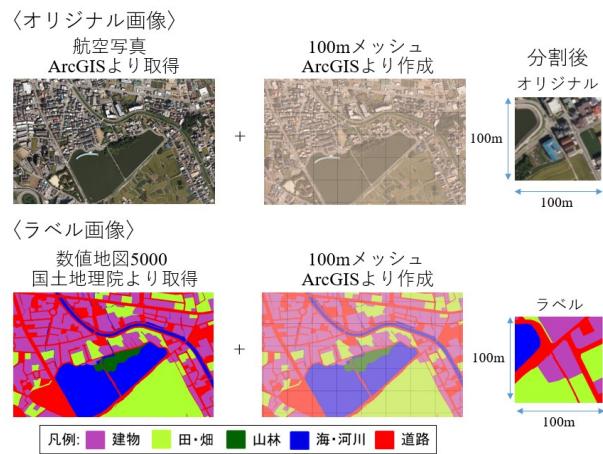


図-1 トレーニングデータ作成方法

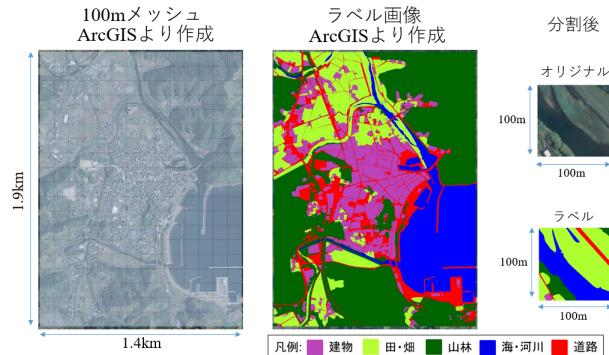


図-2 テストデータ作成方法

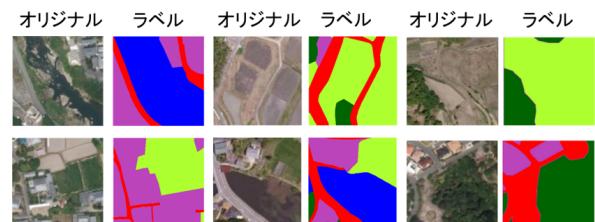


図-3 画像データの例



図-4 データ拡張例

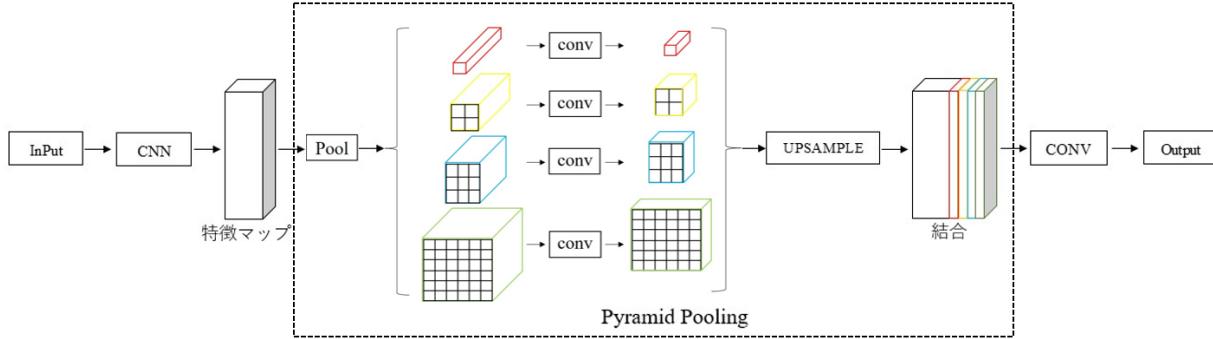


図-5 分類に使用したネットワークモデル図

表-1 学習条件

	条件1	条件2	条件3	条件4
バッチサイズ	32		64	
水平反転	○		○	
-20度~20度(5度ずつ回転)	○		○	
60度ずつ回転		○		○
トレーニングデータ	24,024ペア			
検証用データ	6,006ペア			
テストデータ	266ペア			

本研究で採用した PSPNET(Pyramid Scene Parsing Network)<sup>5)</sup>のネットワークモデルの概要を図-5に示す。通常 FCN(Fully Convolution Networks)<sup>4)</sup>では、Encoder によって入力画像から抽出された特徴マップのサイズはダウンサンプリングされ、元の入力画像より小さいサイズとなる。しかし、PSPNET では、Encoder で得られる画像サイズの小さい特徴マップに対して複数の解像度で Max Pooling を用いる Pyramid Pooling により、それぞれのスケールで捉えた複数の特徴マップが得られる。得られた異なるスケールの各特徴マップを元の特徴マップと同じスケールにアップサンプリングする。アップサンプリングされた各特徴マップを元の特徴マップにチャンネルを追加する方法で連結を行う。これにより、大域的に特徴を捉えられることに加え、局所的な細かい情報を得ることが可能になる。この連結した特徴マップに対してフィルターサイズ  $1 \times 1$  の畠み込み処理を行い、Semantic Segmentation の結果を得る。

## 2.4 学習環境・条件

### 2.4.1 学習環境

開発環境について述べる。ハードウェア環境は、CPU: Xeon W-2225, GPU: GeforceRTX3090, OS: Ubuntu20.4, RAM: 32GB である。ソフトウェア環境は、Anaconda3 上で Python3.9, Pytorch2.0.1 を用い、環境を構築している。

### 2.4.2 学習条件

学習条件を表-1 に示し、4 つの条件で深層学習モデルを構築する。本研究ではデータの拡張の違い・バッチサイズの違いにより、学習精度の比較を行う。その

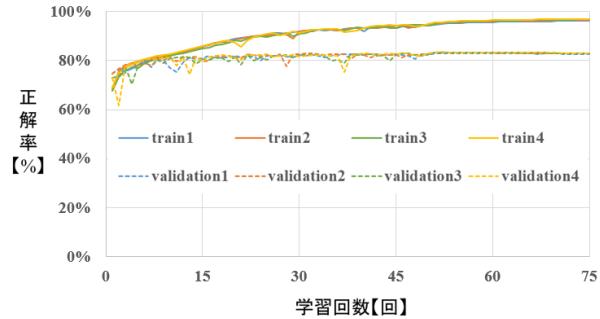


図-6 分類モデルの学習推移

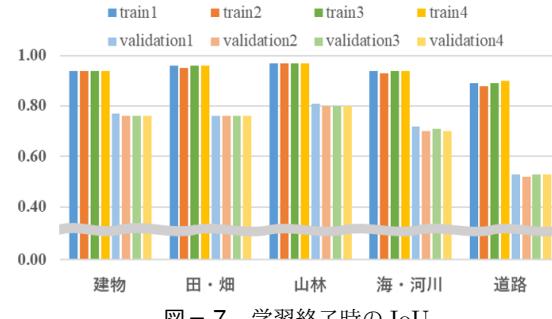


図-7 学習終了時の IoU

他学習条件は、学習回数を 100 回、損失関数を Cross Entropy、最適化アルゴリズムを Adam とした。活性化関数は ReLU 関数を使用した。ただし、出力前の活性化関数ではソフトマックス関数を使用した。学習結果は Pixel Accuracy, F1 Score, IoU(Intersection over Union) の 3 つの評価指標を用いて構築した深層学習モデルの精度比較及び妥当性の検証を行う。

## 3. 学習結果

### 3.1 モデルの学習結果

学習結果、学習終了時の IoU を図-6,12 に示す。図-6 に示したグラフより、4 つの学習精度はどちらも高い精度で収束したことがわかる。全ての条件において過学習の傾向が見られるため、学習回数の調整が必要だと考える。また、図-12 の各 IoU を比較すると、差異がないことがわかる。全ての条件で検証時の道路の精度が他の項目と比べて、低い精度となった。

表-2 検証時の混同行列

条件1		正解					
		建物	田畠	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	169,493,752	3,016,474	2,103,415	889,869	17,132,473	88.0%
	田畠	3,867,127	78,110,635	3,684,135	582,759	4,263,250	86.3%
	山林	1,754,668	1,864,159	89,146,587	743,990	3,154,134	92.2%
	海・河川	1,486,204	1,071,045	1,278,231	30,435,420	3,140,924	81.4%
	道路	21,777,661	5,724,571	6,471,774	2,555,316	72,483,123	66.5%
	再現率	85.4%	87.0%	86.8%	86.4%	72.4%	F1:0.83

条件2		正解					
		建物	田畠	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	167,581,927	3,358,834	2,290,649	1,000,509	17,686,160	87.3%
	田畠	4,059,473	81,033,121	3,729,660	801,390	4,720,505	85.9%
	山林	1,641,012	2,066,331	84,178,152	1,073,702	3,448,371	91.1%
	海・河川	1,385,020	1,100,714	1,149,996	31,211,574	3,379,171	81.6%
	道路	21,941,974	5,756,449	5,963,314	3,177,807	72,485,881	66.3%
	再現率	85.2%	86.8%	86.5%	83.8%	71.3%	F1:0.82

条件3		正解					
		建物	田畠	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	167,828,010	3,429,116	2,279,857	1,042,160	17,402,103	87.4%
	田畠	4,072,984	80,235,022	3,741,358	633,249	4,140,972	86.4%
	山林	1,557,493	2,067,586	85,547,427	740,090	3,157,242	91.9%
	海・河川	1,414,883	1,023,094	1,431,280	30,178,613	3,104,592	81.2%
	道路	23,163,887	6,349,523	5,838,759	2,820,282	73,022,114	65.7%
	再現率	84.7%	86.2%	86.6%	85.2%	72.4%	F1:0.82

条件4		正解					
		建物	田畠	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	169,129,592	3,304,125	2,195,392	901,508	17,671,815	87.5%
	田畠	4,104,919	79,616,162	4,217,152	913,199	4,569,432	85.2%
	山林	1,636,379	1,889,234	85,932,903	743,031	2,978,674	92.2%
	海・河川	1,369,921	1,082,440	1,255,903	28,115,280	2,918,354	80.9%
	道路	21,938,280	5,676,575	6,662,687	3,037,900	74,360,839	66.6%
	再現率	85.3%	86.9%	85.7%	83.4%	72.5%	F1:0.82

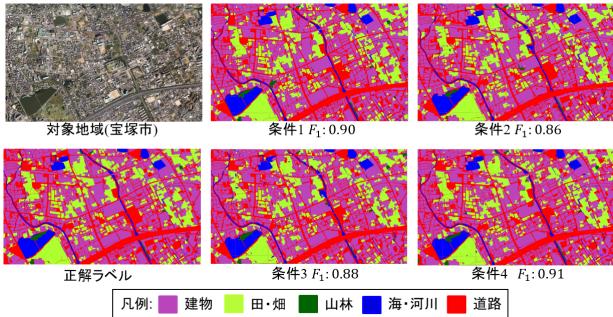


図-8 検証時の可視化結果

表-2, 図-8 に示した F1 Score と可視化結果から、4つの条件においてモデルの検証段階では高い精度で土地利用の領域を分類できていることがわかる。図-8 の可視化では、検証用データに使用したある領域の予測結果を可視化している。それぞれの条件で F1 Score が約 0.90 の値となっており、高精度で予測ができている。しかし、可視化結果を確認すると境界線部分の精度が低いことがわかる。今後、より良い深層学習モデルを構築するためには境界線部分に対し、特徴を協調できる画像処理を施しさらなる精度向上を図る。

### 3.2 転移学習 1 の結果

前節で結果を示した4つのモデルに対し、テストデータ1を用い転移学習を行った。その結果を表-3、図-9、10に示す。図-9の各 IoU を比較すると、検証段階の精度に比べて分類精度が落ちていることが確認できる。

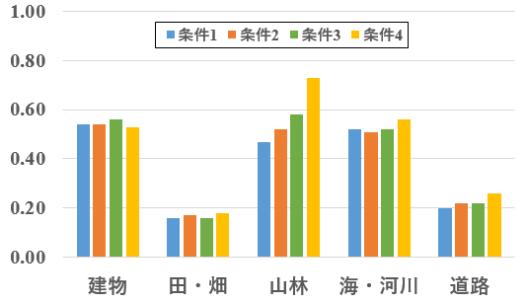


図-9 転移学習 1 の IoU

表-3 転移学習 1 の混同行列

条件1		正解					
		建物	田畠	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	3,229,281	20,917	45,184	36,134	58,152	82.5%
	田畠	566,518	866,672	588,832	522,266	1,197,950	23.2%
	山林	169,085	4,244	4,789,836	348,361	3,852,569	52.3%
	海・河川	134,451	105	59,808	3,229,701	51,921	92.9%
	道路	857,966	44,653	162,882	293,582	1,651,412	54.9%
	再現率	65.1%	92.5%	84.8%	72.9%	22.5%	F1:0.58

条件2		正解					
		建物	田畠	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	3,223,148	16,537	38,797	43,179	591,381	82.4%
	田畠	552,390	787,867	460,663	625,214	1,316,104	21.1%
	山林	212,535	8,334	5,012,681	583,882	3,346,663	54.7%
	海・河川	96,489	134	11,822	3,274,952	92,589	94.2%
	道路	780,270	32,574	83,345	342,418	1,771,888	58.9%
	再現率	66.3%	93.2%	89.4%	67.3%	24.9%	F1:0.58

条件3		正解					
		建物	田畠	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	3,268,098	11,142	45,391	42,442	545,969	83.5%
	田畠	503,239	823,972	585,645	721,972	1,107,410	22.0%
	山林	177,127	532	5,799,508	475,695	2,711,233	63.3%
	海・河川	118,476	37	43,192	3,280,994	33,287	94.4%
	道路	867,633	29,558	128,254	427,770	1,557,280	51.7%
	再現率	66.2%	95.2%	87.8%	66.3%	26.2%	F1:0.59

条件4		正解					
		建物	田畠	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	3,071,760	20,541	121,105	33,529	666,107	78.5%
	田畠	477,445	885,874	656,930	586,963	1,135,026	23.7%
	山林	161,126	2,621	7,508,209	200,063	1,292,076	81.9%
	海・河川	172,324	17	53,256	3,203,674	46,715	92.2%
	道路	842,091	27,163	290,489	303,943	1,546,809	51.4%
	再現率	65.0%	94.6%	87.0%	74.0%	33.0%	F1:0.63

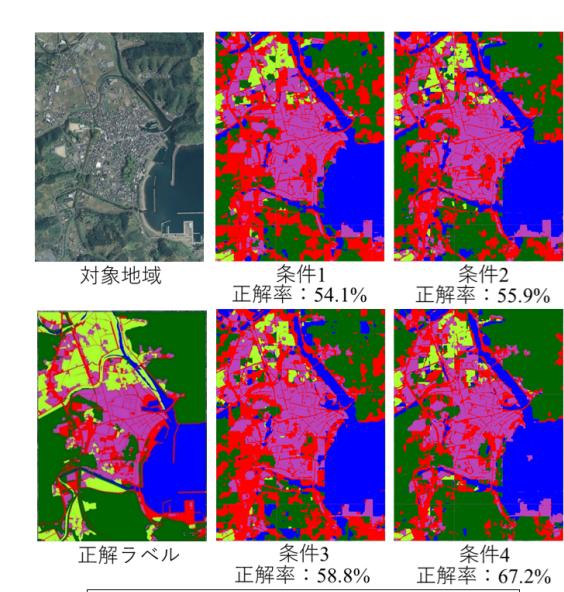


図-10 転移学習 1 の可視化結果

また、表-3 の混同行列と図-10 の可視化結果から、構築した 4 つのモデルに汎用性が検証時に比べて低いことが定性的にわかる。

### 3.3 転移学習 2 の結果

前々節で結果を示した 4 つのモデルに対しテストデータ 2 を用いて転移学習を行った。その結果を表-4、図-11、12 に示す。図-11 の各 IoU を比較すると、転移学習 1 の結果と同じように検証段階の精度は全体的に精度が落ちていることが確認できる。また、表-4 の混同行列と図-12 の可視化結果からも、構築した 2 つのモデルに汎用性が検証時に比べて低いことがわかる。転移学習 2 の結果でも、転移学習 1 と同様に、田・畑の分類精度が検証時に比べて精度が著しく低下した。今後、モデルの汎用性をより高めるためには、精度が著しく低下した田・畑に対して、学習用データの改善あるいは田・畑の特徴を強調できる画像処理をデータ拡張で施す必要がある。

転移学習結果の比較から、ラベル画像の分類項目のラベリング基準が異なる場合でも転移学習の精度は大きく変わらないことが確認できた。

## 4. おわりに

本研究では、Semantic Segmentation を用いて航空写真の土地利用分類モデルの構築を行い、構築した分類モデルの精度比較及び妥当性の検証を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 4 つの条件において大域的に精度良く分類できたが、境界部分の精度を改善する必要がある。
- 季節によって特徴が大きく異なる田・畑に対して、学習用データの質改善やデータ拡張を施す必要がある。
- ラベル画像の分類項目のラベリング基準が異なる場合でも転移学習の精度は大きく変わらないことが確認できた。

今後は、深層学習モデルのさらなる汎化性能向上に向けて、田・畑に対し有効なデータ拡張の検討及び深層学習モデルをより正確に評価するためにクロスバリデーションの導入を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 利根川大介、櫻山和男、安定化有限要素法による津波遡上及び流体力の解析手法の構築、応用力学論文集（土木学会）、Vol.12, pp.127-134, 2009.
- 2) 小谷美佐、今村文彦、首藤伸夫、GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法、海岸工学論文集、Vol.45, 1998.
- 3) 電子国土基本図（オルソ画像）: <https://www.gsi.go.jp/gazochosa/gazochosa40001>, (参照 2022-8-25).
- 4) J.Long, E.Shelhamer and T.Darrell: Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation, CVPR, 2015.
- 5) Hengshuang Zhao et al. Pyramid Scene Parsing Network, CVPR, 2017.

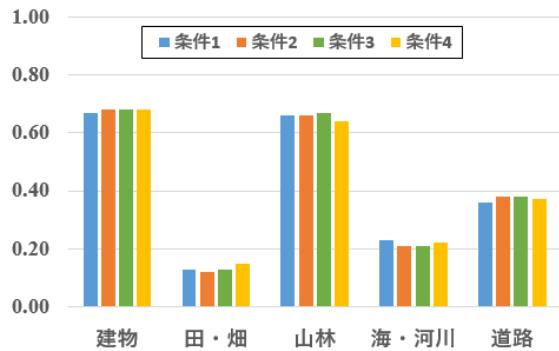


図-11 転移学習 2 の IoU

表-4 転移学習 2 の混同行列

		正解					
		建物	田畑	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	9,265,731	90,372	390,178	277,005	1,358,246	81.4%
	田畑	361,387	666,979	1,192,132	1,332,112	922,213	14.9%
	山林	164,403	21,371	6,583,737	88,163	177,018	93.6%
	海・河川	32,418	7,118	107,013	519,534	82,947	69.4%
	道路	1,837,938	96,275	832,043	180,404	3,027,471	50.7%
	再現率	79.5%	75.6%	72.3%	21.7%	54.4%	F1:0.54
		正解					
		建物	田畑	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	9,287,939	55,534	364,268	304,706	1,369,085	81.6%
	田畑	407,418	624,062	1,016,539	1,779,253	647,551	13.9%
	山林	164,388	11,747	6,515,977	149,919	192,661	92.6%
	海・河川	31,261	6,082	80,734	538,593	92,360	71.9%
	道路	1,801,489	79,395	823,941	232,975	3,036,331	50.8%
	再現率	79.4%	80.3%	74.0%	17.9%	56.9%	F1:0.54
		正解					
		建物	田畑	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	9,316,455	79,993	367,395	370,535	1,247,154	81.9%
	田畑	449,992	624,341	1,082,438	1,661,338	656,714	14.0%
	山林	165,837	33,651	6,554,828	143,386	136,990	93.2%
	海・河川	29,731	6,751	77,756	551,921	82,871	73.7%
	道路	1,795,552	101,714	780,905	251,719	3,044,241	51.0%
	再現率	79.2%	73.8%	74.0%	18.5%	58.9%	F1:0.54
		正解					
		建物	田畑	山林	海・河川	道路	適合率
予測	建物	9,255,652	71,836	579,068	277,482	1,197,494	81.3%
	田畑	354,023	701,844	1,318,957	1,485,619	614,380	15.7%
	山林	143,257	17,114	6,644,986	117,360	111,975	94.5%
	海・河川	30,802	12,757	108,268	518,990	78,213	69.3%
	道路	1,795,430	119,828	939,899	198,665	2,920,309	48.9%
	再現率	79.9%	76.0%	69.3%	20.0%	59.3%	F1:0.54

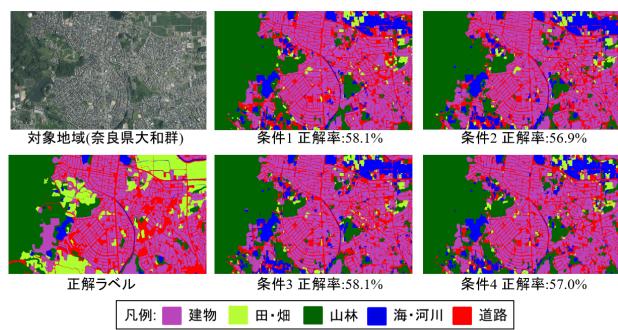


図-12 転移学習 2 の可視化結果

# GNSSデータを用いたロケーションベースMR可視化システムの構築

*Development of a Mixed Reality visualization system  
using location-based method with Global Navigation Satellite Data*

都市人間環境学専攻 博士前期課程1年 中祖 謙大  
Ryoudai NAKASO

## 1. はじめに

近年、複合現実感 (Mixed Reality, 以後 MR)<sup>1)</sup> を用いた可視化は、様々な分野において活用されている。MR技術とは図-1に示す幅のある技術であり、リアルとバーチャルの度合いにより拡張現実感 (Augmented Reality, 以後 AR) や仮想現実感 (Virtual Reality, 以後 VR) に変化する。本技術はデバイスに図-2に示すようなHMDを用いるため、可視化時両手が自由になり安全が確保しやすいという点から、土木分野では工事現場等危険が伴う環境への適用に適しているといえる。

著者らはこれまで、マーカー画像を用いたMR可視化システムの構築及び地下埋設物可視化への適用を行ってきた<sup>2)3)</sup>。本システムはデバイスがマーカーを認識している場合は高精度な重畳が可能であるが、一方でマーカーとデバイスの距離が大きくなると重畳精度が大幅に低下するという問題が確認された。また、海洋等周囲に特徴点がない環境への適用は困難である。そこで、著者らは重畳精度が位置情報精度にのみ依存するロケーションベース手法<sup>4)</sup>に着目した。

本研究は、屋外においてMR(Mixed Reality)可視化を高精度に行うために、ロケーションベース手法を用いた可視化システムの構築を行ったものである。本システムの妥当性の検証として、東京都千代田区九段下の地下埋設物可視化及び埼玉県戸田市彩湖の幸魂大橋橋脚基部可視化への適用を行った。

## 2. MR可視化システム

本システムのフローチャートを図-3に示す。

### (1) 開発環境

本研究では、統合開発環境としてUnityを使用し、開発キットとしてMRTKを使用した。デバイスには、Microsoft社製の頭部装着型コンピューターデバイスであるHololens2を用いた。位置情報を取得するGNSS受信機には、オープンスカイ環境にてネットワーク型RTK測位によりセンチメタ級の精度で位置情報を取得可能なコア社製のQZNEOを用いた。また、受信機からデバイスに位置情報を送信する際の通信プロトコルは、同時に複数の端末と通信が可能でありTCP通信と比較して通信速度が速いUDP通信を用いた。2台のGNSS受信機は後述する角度補正のため、図-4の様にHololens2の上部に離して設置する。

### (2) プリプロセス

可視化情報の入力では、可視化するモデルの3Dデータを入力する。一方、位置情報の入力ではモデルの重畳位置

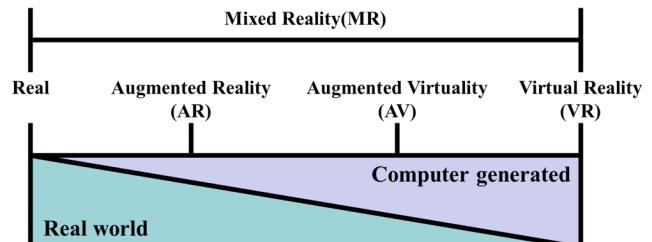


図-1 MR技術



図-2 Hololens2

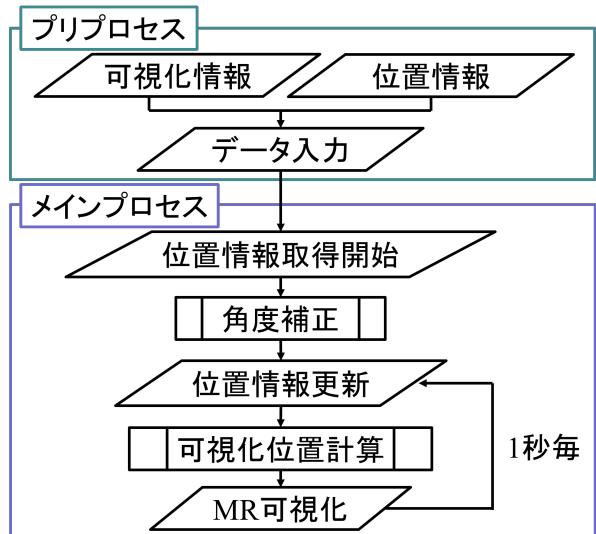


図-3 フローチャート

の緯度、経度、楕円体高を入力する。

### (3) メインプロセス

#### (a) 角度補正

本システムは、位置合わせの際現実世界の経度を仮想空間のx座標、同様に緯度をz座標、楕円体高をy座標とし

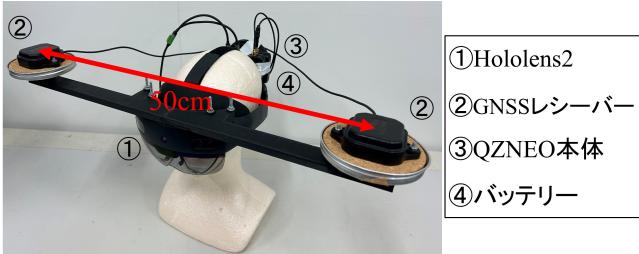


図-4 デバイスの構造

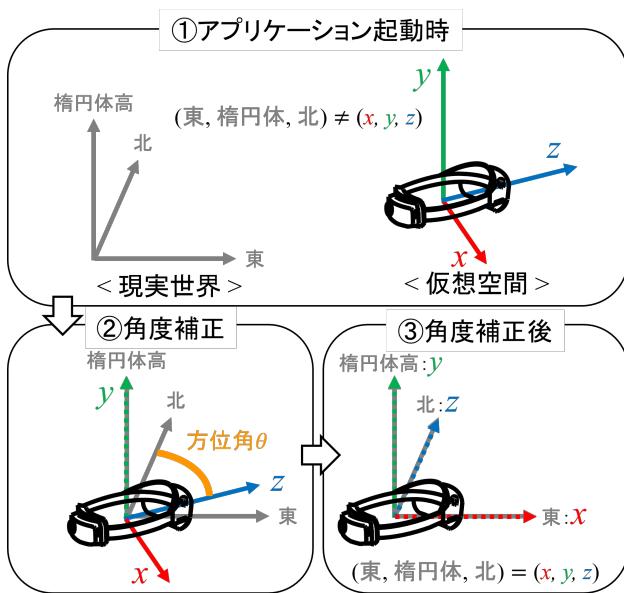
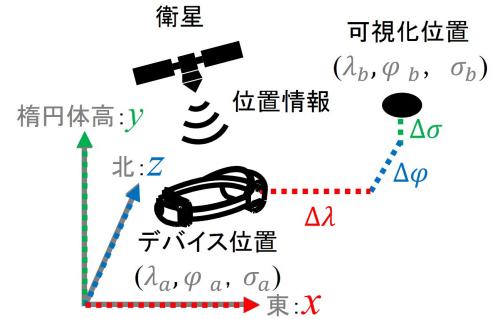


図-5 角度補正

て使用する。しかし、アプリケーション起動時の初期設定では、可視化デバイスの位置を原点とし、鉛直上向きを  $y$  軸の正、デバイスの正面方向を  $z$  軸の正とした左手系の座標系が構築される。よって、正確な位置合わせを行うためには、アプリケーション起動後に図-5 に示す角度補正を行い、現実世界と仮想空間の座標系を一致させる必要がある。ここで、図中のデバイスの正面方向の方位角  $\theta$  は、デバイス上部に設置した 2 台の GNSS 受信機が取得する緯度経度の差から計算する。算出した方位角の大きさ分座標系を回転させることで、 $z$  軸が北と一致し、モデルの可視化位置の計算において緯度が  $z$  軸、経度が  $x$  軸に対応する。既往の研究で、角度補正の精度は 2 台の受信機間の距離に応じて向上することが分かっている。よって、本システムでは 2 台の受信機間の距離は 50cm とした。

#### (b) 位置合わせ

角度補正により補正された仮想空間の座標系において、図-6 に示すようにプリプロセスにて設定した重畠位置の位置情報とアプリケーション起動後に GNSS 受信機が取得する位置情報の差を、3D モデルの可視化位置の座標として与える。位置情報の更新及び可視化位置の再計算は一秒毎に行われるため、デバイスの位置が移動した場合にも正確な可視化が可能である。



座標系 現実空間 = 仮想空間  
位置の補正  
- 移動: 位置情報による計算  
- 回転: デバイスのセンサー

図-6 位置合わせ手法

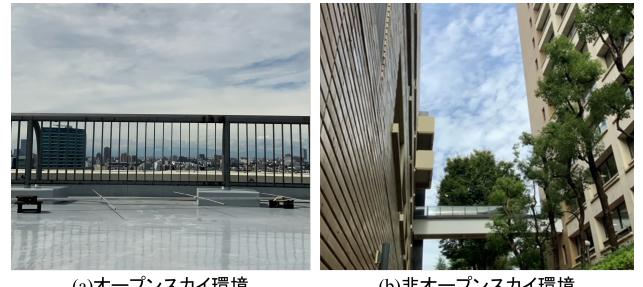


図-7 検証環境

表-1 GNSS 受信機の受信状況の定義

数値表記	受信状況	推定精度
0	受信不可	-
1	単独測位	3.0m
2	相対測位	40cm
5	Float(RTK 測位完了前)	20cm
4	Fixed(RTK 測位完了)	2cm

#### (4) GNSS 受信機位置情報精度

本システムで使用する GNSS 受信機の位置情報精度について、図-7 キャンパス内の (a) オープンスカイ環境と (b) 非オープンスカイ環境にて検証を行った。検証方法は、2 地点で 24 時間位置情報受信した際の受信位置の変動幅の比較である。ここで、本検証ではオープンスカイ環境とは表-1 に示す受信機の定義で位置情報精度が最高となり数値 4 を示す環境、非オープンスカイ環境とは位置情報精度が一段階下がり数値 5 を示す環境とした。

結果を図-8 に示す。結果から、(b) 非オープンスカイ環境では受信位置の変動幅が 15m 程度ある一方で、(a) オープンスカイ環境では変動幅が 5cm 程度に収まっていることが確認できる。よって、本手法はオープンスカイ環境ならば高精度な重畠が可能であるといえる。

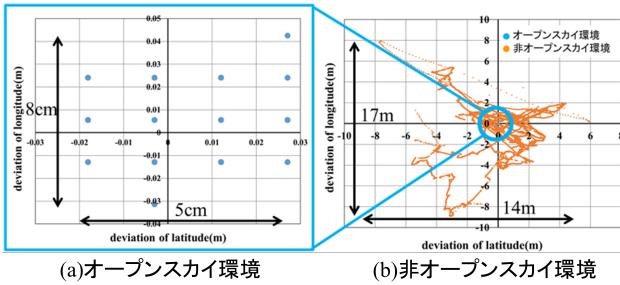


図-8 検証結果

### 3. 地下埋設物可視化への適用

図-9に示すように、毎年工事現場における地下埋設物に関する事故は多発しており、その原因として地下埋設物の位置把握不足があげられる。そこで、本システムを適用し正確に重畠を行うことで、事故の低減及び作業の効率化が期待できる。

#### (1) 実施環境

可視化対象は図-10に示す東京都千代田区九段下の地下埋設物である<sup>5)</sup>。本適用について、有用性と妥当性の検証のため、既往研究であるマーカーベース手法と重畠精度の比較を行った。また、可視化表現として開口部モデルの適用を行った。

#### (2) 重畠精度検証

図-11に示すように、本手法であるロケーションベース手法と既往研究であるマーカーベース手法においてデバイスが移動した際の重畠精度の比較を行った。ここで、図-11中の青色の範囲はGNSS受信機が位置情報を最高精度でとれるオープンスカイ環境を示し、緑色の範囲は位置情報精度が一段階下がる非オープンスカイ環境を示す。地点aでアプリケーション起動後地点b、地点c、再び地点aに戻る過程で各地点で趨勢精度の誤差の大きさの計測を行う。結果から、本手法はオープンスカイ環境においてデバイスの移動距離に関わらず高精度な重畠が可能であり、マーカーベース手法と比較してより有用であることを確認した。一方で、非オープンスカイ環境では大幅に重畠精度が低下しており、マーカーベース手法の方が有用であることを確認した。

#### (3) 開口部モデルの適用

開口部モデルとは、開口部モデルの外側をマスキング処理することで開口部の内側のみを可視化するモデルである。図-12に示すように開口部モデルを適用することで、可視化結果の違和感が軽減されることを確認した。

### 4. 橋脚基部可視化への適用

橋脚基部やテトラポッド等、水没している構造物の確認は水質や水面の反射等により確認は困難である。そこで、本システムを適用し水中の様子を正確に重畠することで、上記問題の解決が可能と考えられる。

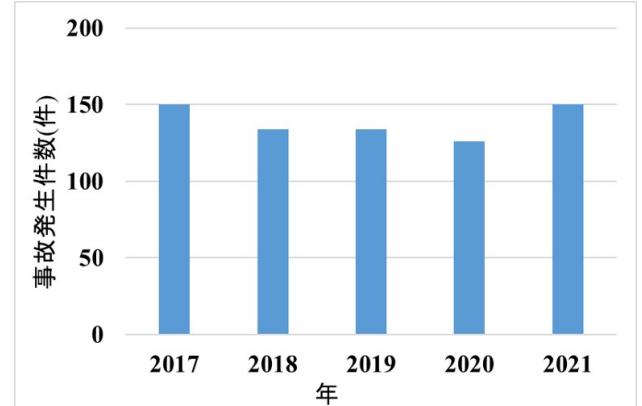


図-9 年別地下埋設物事故発生数

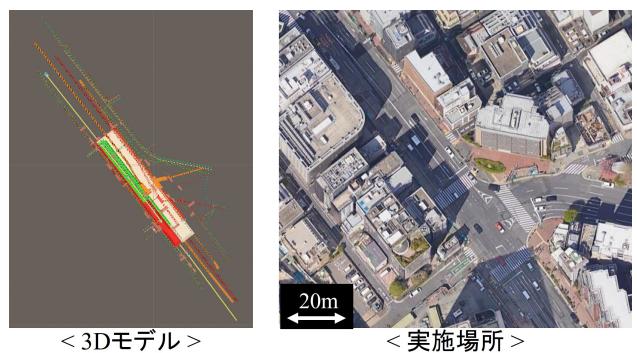


図-10 実施環境

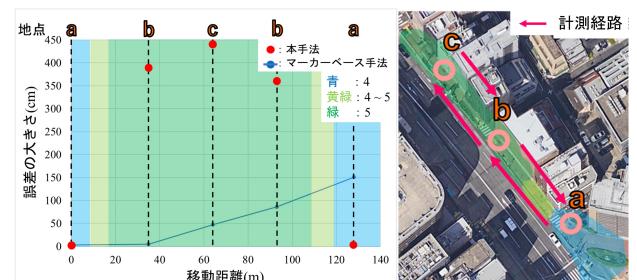


図-11 デバイス移動時の重畠精度の比較

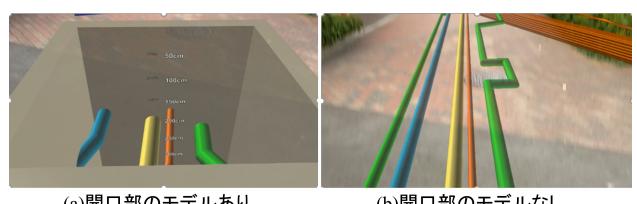


図-12 開口部モデルの適用

#### (1) 実施環境

実施場所は図-13に示す埼玉県戸田市彩湖幸魂大橋である<sup>5)</sup>。橋脚のみを可視化した場合、違和感のある可視化結果となることが考えられる。そこで、本適用例では可視化表現として、半透明のマテリアルを用いた仮想水面と深さ方向に2mずつ目盛りを設けた開口部モデルを用いた。

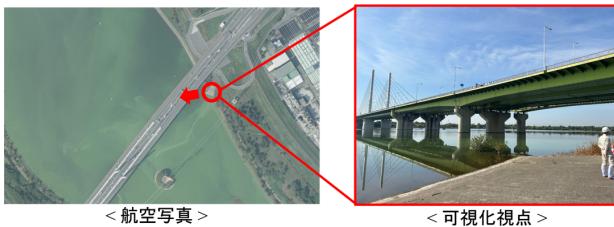


図-13 埼玉県戸田市幸魂大橋

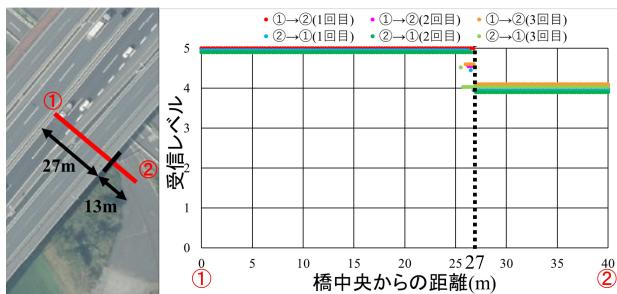


図-14 橋梁付近位置情報受信レベル

## (2) 位置情報精度検証

重畳に先立ち実施環境周辺にて位置情報精度の検証を行った。図-14に示すように、橋中央の地点①と橋の端から13m離れたオープンスカイ環境である地点②までの直線上を、各方向3回ずつ0.25mずつ移動しながら位置情報の受信状況を確認した。ここで受信レベルとは表-1に示すGNSS受信機が定義するものである。図-14より、橋の中央から27m地点で受信レベルが変化することが分かる。すなわち、受信機の上空の半分以上が橋に覆われない橋の中央から27m以上離れた地点では、オープンスカイ環境としてロケーションベース手法にて高精度な重畳が可能であることが分かる。この結果をもとに、初めにオープンスカイ環境において橋脚の重畳を行った。

## (3) 重畳結果

### (a) 陸上での可視化

図-15の陸上からの重畳より、橋脚が正しい位置に重畳できていることが分かる。また、橋脚と湖底のみの可視化では違和感のある結果となることを確認した一方で、仮想水面と開口部モデルを適用することで違和感を軽減すると共に、深さ方向の情報を確認しやすくなることを確認した。しかし、陸上から確認するために開口部モデルの手前の面を削除したため、開口部モデルが多少浮き出て見えるという問題を確認した。

### (b) 水上での重畳

図-16は、水上にてボートで橋脚まで近づいた際の重畳結果である。結果より、陸上からの重畳と比較してより違和感がなくなると共に、上から覗き込むことで開口部モデル内の水中部分を確認できることを確認した。また、陸上からの重畳と同様に、水上においてもオープンスカイ環境ならば正しい位置に重畳されていることを確認した。

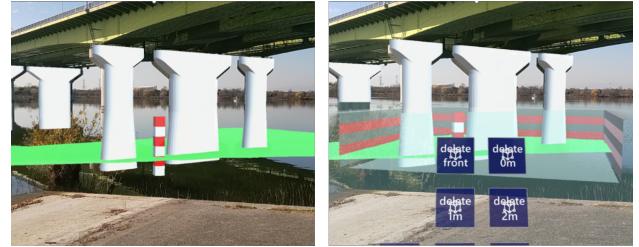


図-15 陸上での重畳

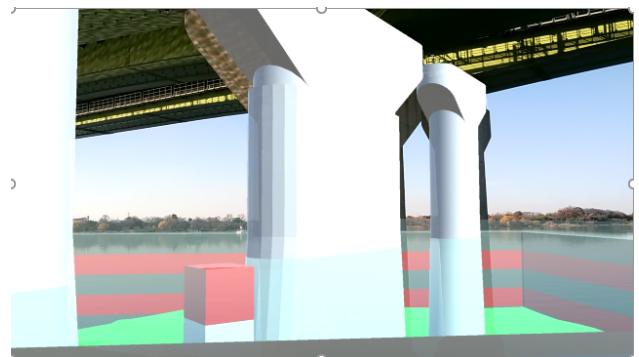


図-16 水上での重畳

## 5. おわりに

本報告では、屋外においてMR(Mixed Reality)可視化を高精度に行うために、ロケーションベース手法を用いた可視化システムの構築として、システムの構築及び埼玉県戸田市彩湖の幸魂大橋橋脚基部可視化への適用を行い、以下の結論を得た。

- オープンスカイ環境にて、高精度な重畳が可能なことを確認した。
- 開口部モデルの地下埋設物、橋脚基部への適用が有用であることを確認した。一方で、遠方からの可視化には課題があることを確認した。

今後は、開口部モデル等可視化表現の検討、ロケーションベース手法とマーカーベース手法のハイブリッド手法の構築を行う予定である。

## 参考文献

- 1) Milgram,P. and Kishino,F. : A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, *IEICET Transactions on Information Systems*, Vol.77, No.2, pp.1321-1329, 1994.
- 2) 川越健生, 滕飛, 横山和男, 吉永崇, 琴浦毅, 石田仁: MR技術を用いた地下埋設構造物の可視化システムの構築, 土木学会論文集F3, Vol.78, No.2, pp.I73-I81, 2022.
- 3) 洲崎文哉, 横山和男, 琴浦毅, 石田仁, 吉永崇: ARKitを用いた地下埋設物のAR可視化システムの構築と重畳の高精度化の検討, 土木学会論文集F3, Vol.77, No.2, pp.I131-I139, 2021.
- 4) 鈴木雅大, 大川博史, 中祖諒大, 横山和男: 小型GNSS受信機を用いた水域環境におけるAR可視化システムの構築, 土木学会論文集F3, Vol.79, No.22, pp.22-22013, 2023.
- 5) <https://maps.gsi.go.jp/> (入手 2024.3.22)

# 有限要素法による津波解析における遡上域の精度向上に関する研究

*A Study on the Moving Boundary Method of Tsunami Analysis  
using the Stabilized Finite Element Method*

都市環境学科4年 三宅 智大  
Tomohiro MIYAKE

## 1. はじめに

有限要素法に基づく2次元津波遡上解析では、水域と陸域の境界線である水際線の移動を要素単位で判定して行う固定メッシュを用いた手法が一般的になっている。その際、適切な要素分割を行うことと、水際線における要素の節点において、流速と水位を適切に与えることが重要となる。

そこで本研究では、非構造格子への適用を目的とした手法を提案し、構造格子と非構造格子で浸水域の比較を行った。

## 2. 数値解析手法

### 2.1 支配方程式

鉛直方向の運動を微小と仮定する浅水長波流れの支配方程式として、浅水長波方程式を用いる。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mathbf{N}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) + \mathbf{GU} = \mathbf{R} \quad (1)$$

$\mathbf{U}$  は未知ベクトル、 $\mathbf{R}$  は勾配ベクトル、 $\mathbf{A}_i$  は移流マトリックス、 $\mathbf{N}_{ij}$  は拡散マトリックス、 $\mathbf{G}$  は摩擦マトリックス、 $\mathbf{K}$  は摩擦マトリックスである。

### 2.2 支配方程式の離散化

離散化手法としては、空間方向の離散化に SUPG 法に基づく安定化有限要素法<sup>1)</sup>を用いる。時間方向の離散化には、Crank-Nicolson 法を用いる。連立一次方程式の解法には、Element-By-Element Bi-CGSTAB 法を用いている。

### 2.3 移動境界手法

津波の遡上挙動を表現するため、固定メッシュを用いた Euler 的手法に基づく移動境界条件（図-1）を適用する。解析領域のメッシュ分割を行った後、水域判定を行う。

各要素における3節点のうち、1つもしくは2つの全水深  $H$  が  $\varepsilon$  以上であれば、その要素は水際要素とみなし、計算領域に含める。

微小水深  $\varepsilon$  は、小さくとることで水際先端における計算精度向上につながるが、計算の安定性は悪くなる。

水際要素の陸域節点に対し、従来は流速  $\tilde{u}_i^e = 0$  を与えていた（手法 A と呼ぶ）。しかし、計算を進めた次のステップにおいて水際線上で流速が減少するという問題がある。この問題を解決するため、以下の式 (2) のように流速を与える手法<sup>2)</sup>（手法 B と呼ぶ）が提案されている。左側は水際要素の水域節点 1 個の場合、右側は水

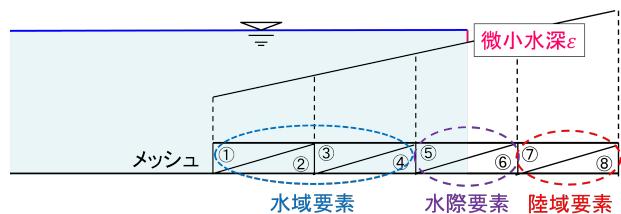


図-1 移動境界手法

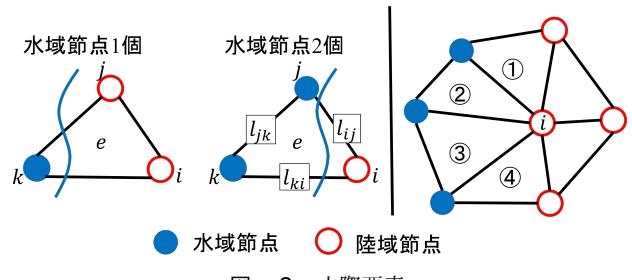


図-2 水際要素

域節点 2 個の場合である。（図-2 左）

$$\tilde{u}_i^e = \tilde{u}_j^e = u_k, \quad \tilde{u}_i^e = \frac{u_j + u_k}{2} \quad (2)$$

ここに、 $\tilde{u}_i^e$  は水際要素  $e$  の陸域節点  $i$  における仮想の流速を表し、 $u_k$  は水域節点  $k$  の流速を表す。

この手法では、水域節点が 2 個の場合は 2 個の流速の平均を陸域節点に与えている。しかし、格子の節点間の距離の重みが考慮されていないため、本研究では式 (3) のように距離の重み付き平均により流速を求める手法を提案する。（図-2 左）

$$\tilde{u}_i^e = \tilde{u}_j^e = u_k, \quad \tilde{u}_i^e = \frac{l_{ki}u_j + l_{ij}u_k}{l_{ij} + l_{ki}} \quad (3)$$

ここに、 $l_{ij}, l_{jk}, l_{ki}$  はそれぞれ水際要素の節点  $i, j, k$  の節点間の距離を表す。

この計算をすべての水際要素に対して行った後、次の操作を行う。図-2 の右で示すように陸域節点  $i$  が複数の水際要素に含まれている場合があるため、式 (3) のように要素の面積による重み付き平均により陸域節点の流速を求める。（手法 C と呼ぶ）

$$\tilde{u}_i = \frac{\sum_{e=1}^m (A - A_e) \tilde{u}_i^e}{(m-1)A}, \quad \left( A = \sum_{e=1}^m A_e \right) \quad (4)$$

ここに、 $\tilde{u}_i$  は陸域節点  $i$  に与える流速、 $m$  は陸域節点  $i$  を含む水際要素の数、 $A_e$  は要素  $e$  の面積である。

今回は手法 C で解析を行った。

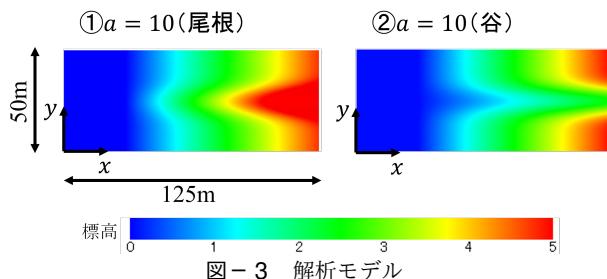


図-3 解析モデル

### 3. 数値解析例

海底地形勾配の関数による解析モデルを用いた孤立波遇上問題を行った。

#### 3.1 解析モデル

次式を用いて海底地形を与える。

$$z = m(x - b)[1 + a \exp\{-3(\frac{x - b}{20})^{-\frac{1}{3}}\} \sin^{|\alpha|}(\frac{\pi y}{\lambda})] + h_0 \quad (5)$$

ここに、 $a$  は変化の度合いを表す係数、 $m$  は  $x$  方向の海底勾配、 $b$  は勾配開始地点の  $x$  の値 [m]、 $\lambda$  は周期的变化の波長 [m]、 $h_0$  は勾配開始地点の  $z$  の値 [m] である。解析モデルを図-3 に示す。式(5)において、 $a = 10$  (尾根地形) と  $a = -10$  (谷地形) の 2 パターンを取り上げ、 $m = 0.05$ 、 $b = 30m$ 、 $\lambda = 50m$ 、 $h_0 = 0m$ とした。

#### 3.2 解析条件

式(6)で表される孤立波を、坂の先端から式(7)で表される孤立波の半波長分の位置に発生させ、坂に向かって伝播させる。

$$\eta = \frac{\zeta}{h} \left( \operatorname{sech} \sqrt{\frac{3\zeta}{4h^3}} (x - X_0) \right)^2 \quad (6)$$

$$L = \sqrt{\frac{4h^3}{3\zeta}} \operatorname{arccosh} \sqrt{\frac{1}{0.05}} \quad (7)$$

ここに、 $h$  は静水深、 $\zeta$  は孤立波の最大波高、 $X_0$  は孤立波の波峰の  $x$  座標であり、 $h = 1.0m$ 、 $\zeta = 0.3m$  とした。境界条件は図-4 に示すように開境界条件と slip 条件（境界の法線方向に流速 0）を与えている。解析メッシュは図-5 に示すような構造格子と非構造格子とし、いずれもメッシュサイズは約 0.5m と同程度の疎密度にしている。非構造格子は 1m ごとの等高線に沿うようにメッシュを作成している。微小時間増分量  $\Delta t$  は 0.005s、Manning の粗度係数  $n$  は 0.02 とした。

#### 3.3 解析結果

図-6 に  $t = 150s$  における水域節点の分布と水際線を示した。等高線と比較してみると、尾根地形では非構造格子の水際線が等高線と良い一致を示している。谷地形では構造格子の解析で、移動境界の微小水深  $\varepsilon$  が 5.0mm と非構造格子の 0.05mm に比べてかなり大きくとらざるを得なかつたため、等高線の形状とは大きく異なる水際線となった。微小水深が大きいため隣の要素に浸水し

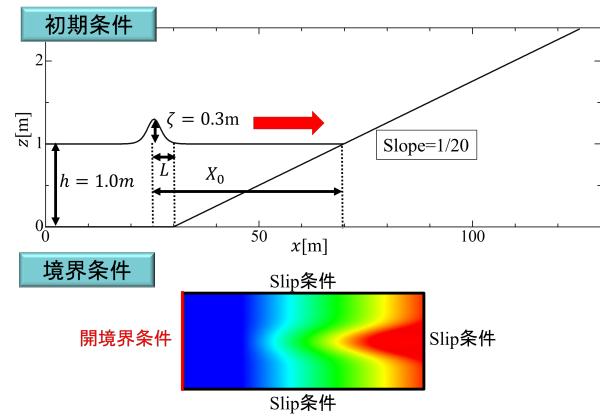


図-4 初期条件・境界条件

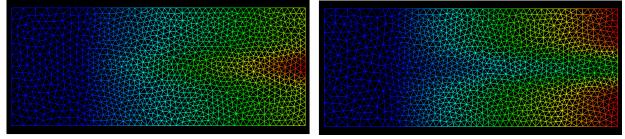
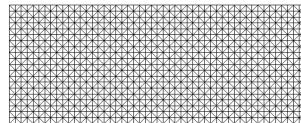


図-5 解析メッシュ

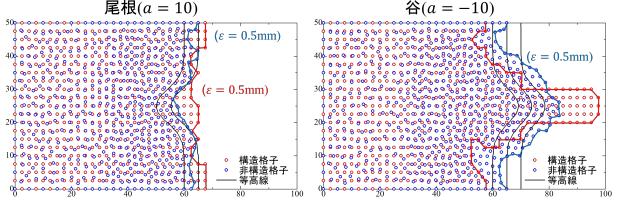


図-6  $t = 150$  における水域節点・水際線

にくくなり、水が谷部分に集中したためにこのような形状になったと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、構造格子と非構造格子で浸水域の比較を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 構造格子に比べて非構造格子による結果が等高線の形状に近いことから、非構造格子のほうが精度が良いと考えられる。
- 構造格子による谷の地形の解析では微小水深を大きくとらざるを得なかつたことから、メッシュの切り方によって解析の精度が悪くなる。

今後は、移動境界手法の妥当性を従来法との比較により検証し、高知県中土佐町のメッシュ分割を行い、解析を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 日本計算工学会有限要素法研究委員会：統・有限要素法による流れのシミュレーション、シュプリンガー・ジャパン株式会社、2008.
- 2) 松本純一、梅津剛、川原睦人：陰的有限要素法による浅水長波流れと河床変動解析、応用力学論文集、Vol.1, pp263-272, 1998. Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.

# 波動音響理論に基づく有限要素解析による遮音壁の遮音効果に関する研究

Study on Sound Insulation Effect of Sound Barriers based on Acoustic Wave Theory using Finite Element Analysis

都市環境学科4年 泉 勝人  
Katsuto IZUMI

## 1. はじめに

近年、交通騒音や工事騒音の対策として遮音壁が用いられることが一般的であり、その効果を高めるために遮音壁の先端形状を改良した各種の遮音壁が提案されている。本研究では、各種遮音壁の遮音効果について検討を行うために、任意形状への適合性に優れる有限要素法を用いたインパルス応答解析に基づく音場解析手法<sup>1)</sup>を用いて検討を行った。

## 2. 数値解析手法

本研究では、開境界処理として、PML(Perfectly Matched Layer)法を用いる。

### 2.1 支配方程式

3次元非定常波動問題の支配方程式である修正波動方程式と、補助変数を求めるための移流方程式以下に示す。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \beta p - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_j^2} - c^2 \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A}\Phi_i + \mathbf{B}\frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega_{\text{pml}} \quad (2)$$

ここで、 $p$  は音圧、 $c$  は音速、 $t$  は時間、 $x_i, x_j$  は3次元空間の座標、 $\Omega$  は解析領域、 $\Omega_{\text{pml}}$  は PML 領域、 $\Phi_i$  は各方向に対する補助変数を表す。また、それぞれの変数および行列は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \alpha &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z, \\ \beta &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x, \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_y - \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y - \sigma_z - \sigma_x & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

ここで、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  は各方向の減衰パラメータである。また、解析領域内では  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  及び  $\Phi_i$  が 0 となるので、通常の非定常波動方程式を解くことに等しい。

### 2.2 有限要素法に基づく数値解析

式 (1), (2) に対して Galerkin 法に基づく重み付き残差法および Green-Gauss の定理を用いて得られる弱形式に対して、四面体 1 次要素を用いて空間方向の離散化を行うと、各要素における時間に関する常微分方程式は

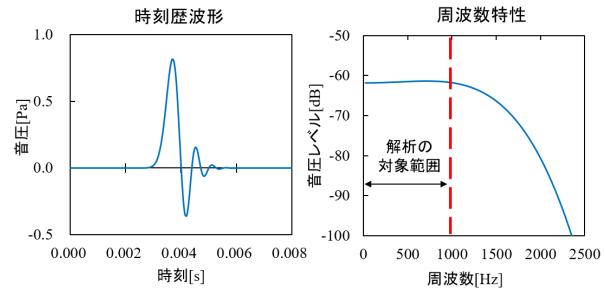


図-1 Lubich の擬似インパルス

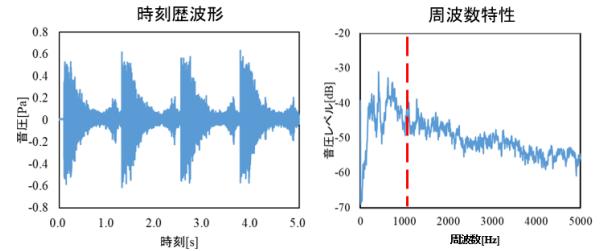


図-2 杭打ち音

以下のようになる。

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \mathbf{M}_e \frac{\partial p}{\partial t} + \beta \mathbf{M}_e p + \mathbf{K}_e p - \mathbf{S}_e \Phi_j = \mathbf{F}_e, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \mathbf{M}_e \Phi_i + \mathbf{B} \mathbf{S}_e p = 0, \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{M}_e$ ,  $\mathbf{K}_e$ ,  $\mathbf{S}_e$ ,  $\mathbf{F}_e$  はそれぞれ各要素の質量行列、拡散行列、移流行列、境界積分項を表す。式 (3), (4) を全ての要素について重ね合わせて得られる全体系の常微分方程式に対して、中心差分を用いた時間方向の離散化を行い、陽解法を適用するために質量行列に集中化を施す。

### 2.3 インパルス応答解析

インパルス応答解析とは、インパルス波を伝播させて得られたインパルス応答に対して任意の音源データを畳み込むことにより、その音源データを直接伝播させた時と同様の結果を得る手法である。本研究では、畳み込み積分の近似解法である Lubich の CQM(Convolution Quadrature Method)<sup>2)</sup>で提案された式をもとに生成した波(図-1)を入力波として使用する。図-1に示すように、1000Hz程度まではほぼ平坦に推移し、その後急激に低下するという周波数特性を持つ。また、インパルス応答に畳み込む実音源として、図-2に示す杭打ち音を用いる。

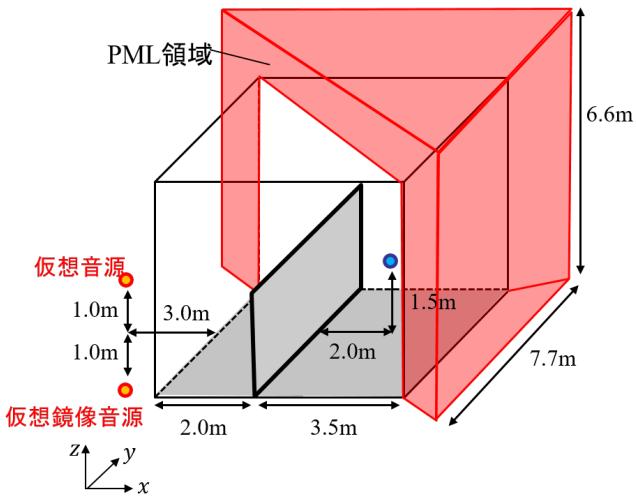


図-3 解析モデル

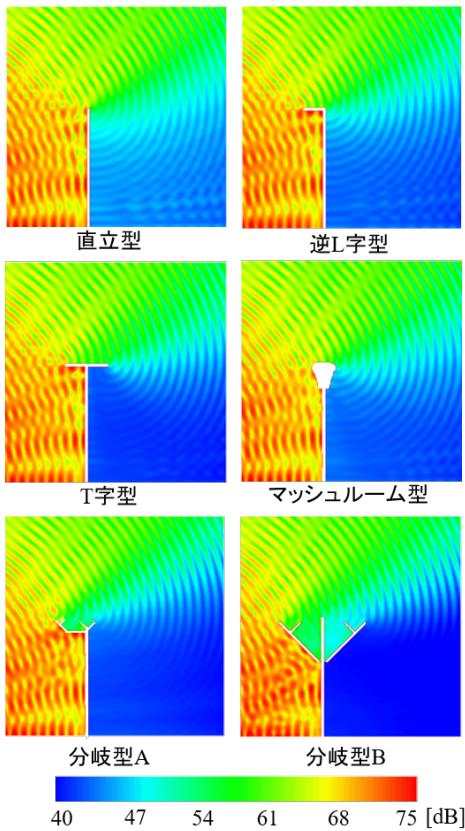


図-4 各種遮音壁における音圧レベルの可視化結果

### 3. 数値解析例

#### 3.1 解析条件

図-3に解析モデルを示す。微小時間増分量は0.0067ms、要素分割幅は0.022m(最大波長に対し約23分割)とし、入射波および実音源は前述したLubichの擬似インパルスおよび杭打ち音である。また、PMLの層厚を1.1m、反射の理論係数を $10^{-6}$ とし、遮音壁面および地表面は完全反射とする。遮音壁は直立型、逆L字型、T字型と設計書に基づく3つの形状計6つの遮音壁モデルを用いて解析を行った。

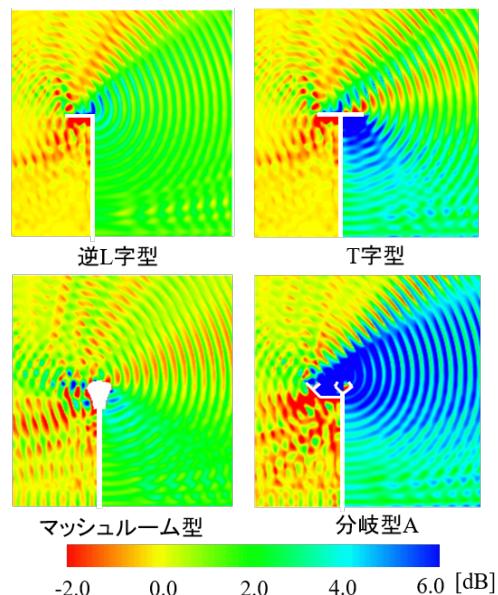


図-5 各先端形状における遮音効果の可視化結果

#### 3.2 解析結果

図-4に直立型遮音壁を設けた際のy方向の中心断面での音圧レベルの分布を示す。また、図-5は先端形状による遮音効果の違いを可視化したものである。直立型の場合との音圧レベルの差を定性的に表したものである。青色に近いほど音を低減していることを表し、どの先端形状でも遮音壁後方の音圧レベルを低減できていることが確認できる。先端形状による遮音効果の比較を行うと、分岐型は他の遮音壁形状と比べて遮音効果が高いことが分かる。また、遮音壁高さよりも高い位置に着目すると、特に分岐型が他の遮音壁形状と比べて遮音効果が高いことが確認できる。

### 4. おわりに

本研究では、有限要素法による遮音壁周りの音場解析を行い、杭打ち音を畳み込んだ際の遮音壁の先端形状による遮音効果の違いを比較した。結論を以下に示す。

- 先端形状を改良した5つの遮音壁全てにおいて直立型よりも遮音効果が高く、逆L字型、マッシュルーム型、T字型、分岐型A、分岐型Bの順に遮音効果が高くなっていくことを確認した。
- 分岐型Bの遮音壁は他の遮音壁に比べて広範囲の高さで遮音効果があり、最大10dB程度音圧レベルが低減できることを確認した。

今後は、より複雑かつ大規模な解析と、遮音壁の最適設計理論の実装を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 深澤一志、宮内暖季、櫻山和男、吉川仁：有限要素法による音場解析手法の構築とその可視化、土木学会論文集、土木学会、Vol.80, 2024(印刷中).
- 2) C. Lubich : Convolution quadrature and discretized operational calculus. I, Numerische Mathematik, Vol.52, pp.129-145, 1988.

# VR技術を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムの適用性の向上

*Improving the Applicability of the Floating High-Speed Railway Noise Evaluation System using Virtual Reality Technology*

都市環境学科4年 西 航平  
Kohei Nishi

## 1. はじめに

既往研究では、VR(Virtual Reality)技術を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムの構築<sup>1)</sup>を行ってきた。しかし、構造物音の考慮がされていなかったため、高架構造物などの走行時の騒音評価に適用できなかった。そこで本研究では、従来の浮上式高速鉄道騒音評価システムの適用性の向上を図るために構造物音の考慮を行うとともに、音源の設定位置の検討と指向性の考慮についての検討を行った。

## 2. 鉄道騒音評価システム

### 2.1 VR環境

本研究では、VR装置として没入型VR装置Holostageを用いる。この装置は、3面の大型スクリーンとそれに対応した高性能プロジェクター、VR空間内の利用者の動きを捉えるためのワイヤレストラッキング装置及びそれらを制御する並列計算機から構成される。また、天井には7.1チャンネルの音響機器を備えており、立体音響場を構築することが可能である。

### 2.2 システム概要

本システムのフローチャートを図-1に示す。入力データとしては、車両の走行条件、音源の音響パワーレベル、構造物や軌道の幾何形状を設定する。時間ループ内において、車両の音源位置、VR空間内の利用者(受音点)の位置情報をトラッキング装置より取得する。そして、それらの情報を用いて幾何音響理論に基づくモデル(ASJ RTN Model2018<sup>2)</sup>、以下ASJモデル)により、利用者の位置情報における騒音レベルを計算する。

可視化部では、CAVEライブラリとOpenGLを用いて車両及び対象地域の立体CGを各スクリーンに描画する。可聴化部では、ASJモデルにより観測者位置における騒音レベルを計算し、その結果を音響プログラミングソフトMaxを用いたプログラムによって計算結果に基づく立体音響信号をスピーカーに出力する。なお、可視化と可聴化情報の共有は、OSC(Open Sound Control)プロトコルを用いたUDP/IP通信によって行っている。

## 3. 音響計算手法

### 3.1 幾何音響理論を用いた音響計算

本研究では、日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会より示されているASJモデルを用いて計算を行う。

ASJモデルにおいて、音源の音圧レベル $L_W$ (dB)から受音点での音圧レベル $L_p$ (dB)を算出する式は次式で

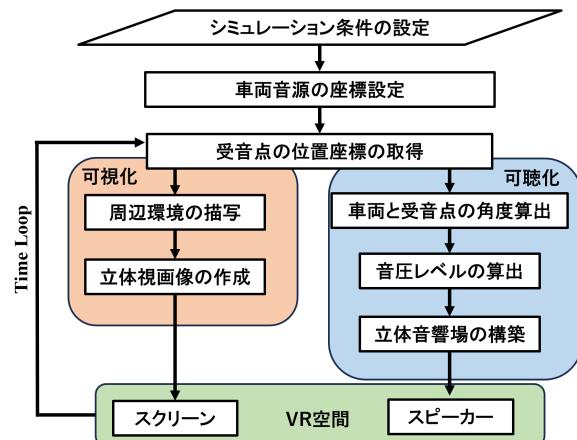


図-1 本システムの構成

表される。

$$L_p = L_W - 20\log_{10}r - 8 + \Delta L_{cor} \quad (1)$$

ここに、 $r(m)$ は音源から受音点の直線距離、 $\Delta L_{cor}(dB)$ は回折を伴う減衰や指向性による減衰に関する補正量である。

### 3.2 高架構造物音による補正

浮上式高速鉄道の走行音は、空気の圧力変動によって生じる空力音と、車両が高架橋を走行する際に構造物自体が振動することにより生じる構造物音が車外騒音に影響を与える。本研究では、車両の走行に連動して移動する無指向性の仮想点音源として高架構造物音を与える。仮想点音源から受音点へ伝播する音圧レベル $L_{str}(dB)$ は次式で表される。

$$L_{str} = L_{W,str} - 20\log_{10}r' - 8 + \Delta L_{dif} \quad (2)$$

ここに、 $r'(m)$ は仮想点音源から受音点の直線距離、 $\Delta L_{dif}(dB)$ は高架床版等による回折補正量である。

### 3.3 指向性による補正

鉄道の走行音は走行ライン及び上方よりも側面方向に伝播しやすい双指向性の特徴を持つことが知られている。本研究では、音源を指向性を有する点音源として扱い、以下に示す指向性モデルを適用する。

$$L_{dir} = 10\log_{10}(\cos^n\theta \cdot (0.1 + 0.9\varphi)) \quad (3)$$

ここで、 $\theta$ は受音点から見た音源への角度、 $\varphi$ は音源から見た受音点への仰角、nは指向性係数である。音源と

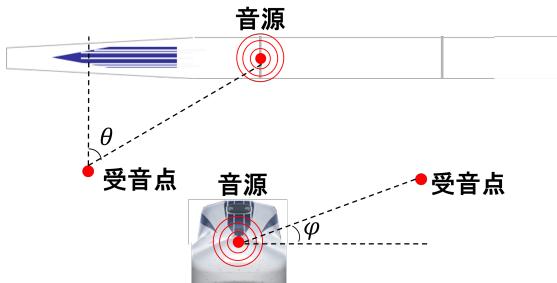


図-2 音源と受音点の角度

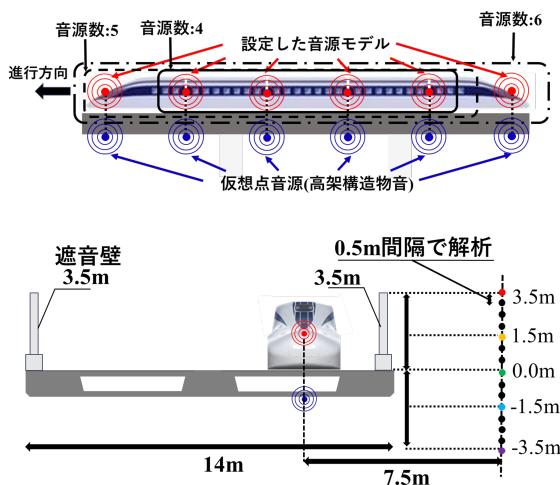


図-3 解析概要

受音点の角度の定義を図-2に示す。なお、 $\theta$ 及び $\varphi$ の値は音源と受音点の位置座標から算出する。

#### 4. 適応例

騒音評価システムの適用性の向上のため、構造物音の考慮を行うとともに、音源の設定位置の検討と指向性の考慮についての検討を行った。

##### 4.1 解析条件

解析概要を図-3に示す。車両の走行速度は500km/hとし、音源の音圧レベルは120dBとした。CADデータは旧型試験車両であるMLX01系を用いており、5両編成としている。音源は、車両連結部分の断面中心に4つ、5つ、6つの3パターンで設定し、それに対応するように音源直下の桁下端に仮想点音源を設定した。測定位置は、車両中心部から車両方向に対して垂直方向に7.5m離れた位置で、走行床の高さを0.0mとし、上下方向に3.5mの位置まで0.5m間隔で解析を行った。なお、遮音壁は車両と測定位置の間に高さ3.5mのものを設置している。また、指向性係数に関しては、先頭と最後尾の車両のnの値を変更して解析した。

##### 4.2 解析結果

0.0m地点での比較を図-4に示す。構造物音の考慮により、音圧レベル差が約9dB発生しており、車両通過

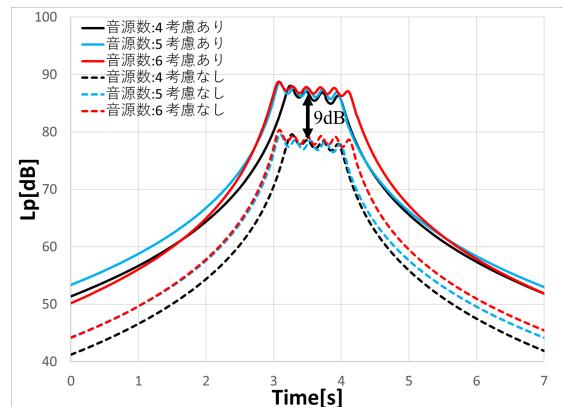


図-4 0.0m 地点での比較

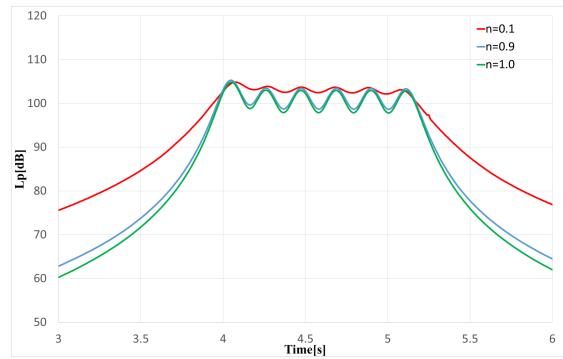


図-5 指向性係数に関する比較

時の波形は、設定した音源数に応じた波が確認できる。また、指向性係数を変更した場合の波形を図-5に示す。指向性係数の変更により、車両通過前後の波形が緩やかに増減していることが確認できる。

#### 5. おわりに

本研究では、従来のシステムの適用性の向上を図るために構造物音の考慮を行うとともに、音源の設定位置の検討と指向性の考慮についての検討を行った。その結果以下の結論を得た。

- 構造物音の考慮により音圧レベルが増加しており、車両通過時の波形は音源数に応じた波が発生していることを確認できた。
- 指向性の考慮に関しては、指向性係数を小さい値にするほど、車両通過前後の波形が緩やかに増減していることが確認できた。

今後の課題として、指向性係数の検討や音源モデルの検討、構造物音の採集・実装が挙げられる。

#### 参考文献

- 田丸ゆめ乃、江口大智、樺山和男：VR技術を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムの構築、第50回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、VII-15、2023。
- 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-Model 2018”，日本音響学会誌、2018。

# 深層学習を用いた氾濫浸水深予測モデルの構築

## Development of Flood Depth Prediction Model using Deep Learning

都市環境学科4年 中山 龍也  
Ryuya NAKAYAMA

### 1. はじめに

気象事象の予測は、数値解析手法<sup>1) 2)</sup>の代替モデルとして、深層学習を用いた高速化が期待されている。本研究では、第1段階として洪水氾濫予測モデルを構築し、そのモデルの精度検証及び評価を行った。

### 2. 深層学習による洪水氾濫予測

モデル構築のフローチャートを図-1に示す。

#### 2.1 学習データについて

本研究で使用する学習データは、ある破堤地点の1から12時間の1時間ごとの越流水深と氾濫計算プログラムによって計算された浸水深である。入力データは越流水深はランダム性を持たせて正弦波にノイズを与えた。1時間ごとの越流水深を12個の説明変数、目的変数を浸水深に設定する。対象地域とその標高の分布を図-2に示す。荒川下流のデルタ地帯としている。標高データ、土地利用データには国土地理院の国土数値情報を使用した。解析には25mメッシュを用い、標高・土地利用は最近隣内挿法で設定した。図-3には、破堤地点A、Bが同時に破堤した際の時間による浸水域の変化の一例を示している。

#### 2.2 浸水解析モデル

氾濫浸水解析には、氾濫水の挙動を精密に表現可能なDynamic Wave法を適用した。Dynamic Wave法では、以下のx, y方向の運動量保存式と、質量保存式により構成される。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial x} = -gh \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial y} = -gh \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + gh \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $M = uh$ はx方向の単位幅流量、 $N = vh$ はy方向の単位幅流量、 $u$ はx方向の流速、 $v$ はy方向の流速、 $h$ は水深、 $H$ は基準面からの水位、 $R$ は径深、 $g$ は重力加速度、 $n$ はマニングの粗度係数である。

#### 2.3 深層学習手法

本研究では、ディープニューラルネットワーク(Deep Neural Network; DNN)を採用し、1から12時間の1時間ごとの12個の越流水深を説明変数、各ケースごとの浸水深を目的変数とした深層学習モデルを構築する。

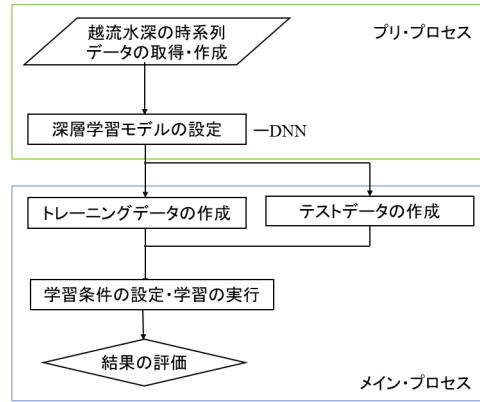


図-1 フローチャート

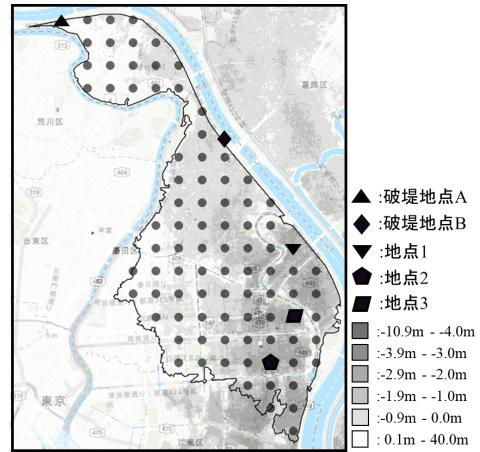


図-2 対象地域とその標高

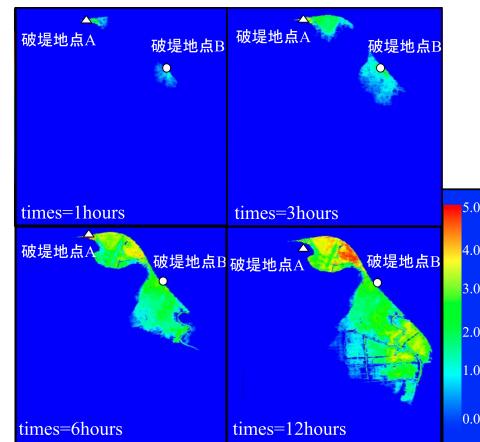


図-3 浸水域最大の場合

#### 2.4 Neural Architecture Search

NASは機械学習において、最適なNNのアーキテクチャを自動的に探索する手法である。これにより、機械学習の経験が少ない人でも最適なアーキテクチャの決定を行うことが可能になる。

表-1 構成された深層学習モデル

	中間層(ノード数)
Model1	2層(16-8)
Model2	5層(128-64-32-16-8)
Model3	8層(512-256-128-64-32-16-8-4)
NAS	5層(104-32-104-80-56)

表-2 同時破堤の平均 RMSE について

	Model1	Model2	Model3	NAS
RMSE	0.078	0.061	0.062	0.032

表-3 同時破堤の相関係数について

	Model1	Model2	Model3
地点 1	0.971	0.997	0.994
地点 2	0.998	0.999	0.998
地点 3	0.989	0.999	0.999

## 2.5 開発環境と学習条件

本発表では、学習回数は最大 500 回としたが、過学習を防ぐために early stopping を組み込んだ。バッチサイズは 32 で、パラメータ数が及ぼす影響を確認するため複数の深層学習モデルを構築した。検証方法は交差検証、評価指標は、RMSE と相関係数を用い対象地域を面的に可視化して評価を行う。

## 3. 学習結果

同時破堤の浸水深の予測値の結果を図-5 に RMSE による可視化結果、図-5、図-6、図-7 に相関係数による可視化結果、構成した深層学習モデルを表-1、表-2 に平均 RMSE、表-3 に各地点の相関係数を示す。図-4、表-2 の結果から、NAS のモデルが最も精度が高く、NAS の次に中間層 5 層のモデルが高い。表-2 から NAS が構成したノード数は自身で構成したモデルと規則がかなり異なっていることがわかる。図-5、図-6、図-7、表-3 の結果から総じて相関が非常に強い。したがって、構築した氾濫浸水深予測モデルは精度が高いと考える。

## 4. おわりに

本研究では深層学習を用いた氾濫域の予測を行うための第一段階として DNN を用い、地点の浸水深の予測を行った。異なる条件による実行結果の比較からモデルの精度検証及び評価を行い、以下の結論を得た。

- 中間層 5 層のモデルが最も精度が高い
- 破堤地点からの距離が近く、標高が低い地点では浸水するケースが多いことから高精度になる
- NAS の最適なノード数の決定には多くの試行回数が必要になる

今後、次元圧縮を用いた浸水域の予測を行う。

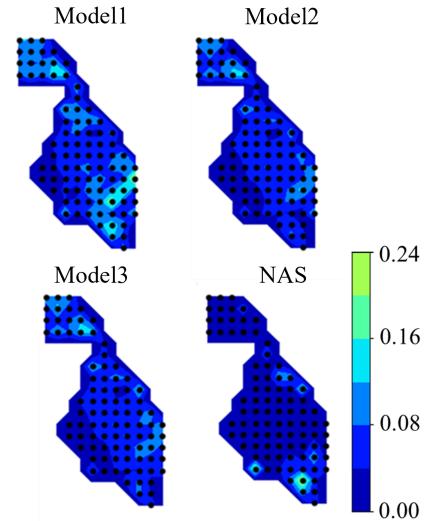


図-4 RMSE による可視化結果

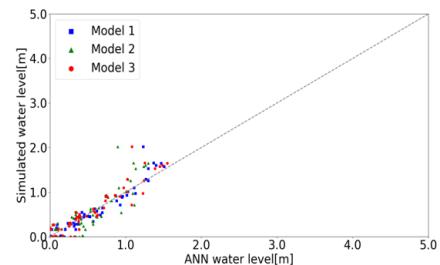


図-5 相関係数による可視化結果(地点 1)

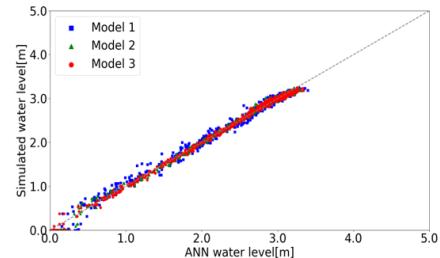


図-6 相関係数による可視化結果(地点 2)

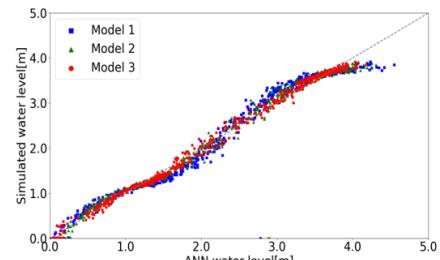


図-7 相関係数による可視化結果(地点 3)

## 参考文献

- 木村 延明、皆川 祐樹、福重 雄大、馬場 大地: 転移学習を用いた洪水イベント AI 事前学習モデルの構築、河川技術論文集、29巻、pp.79-84 2023.
- 一言 正之、荒木 健、箱石 健太、遠藤 優斗: 深層学習を用いたダム流入予測における学習データ拡張の適用性検証、河川技術論文集、28巻、pp.67-72 2022.

# 水中構造物 AR 可視化システムの構築

## Development of AR visualization system for underwater structures

都市環境学科4年 足立 陽紀  
Haruki ADACHI

### 1. はじめに

著者らはこれまで、マーカーベースの AR(Augmented Reality) 手法を用いて地下埋設物に対する AR 可視化システムの構築を行ってきた<sup>1)</sup>。しかし、地下構造物を可視化するための表現手法をそのまま水中構造物に適用すると、大きな違和感があるという問題が発生した。

そこで本研究では、水中構造物を違和感なく可視化するための可視化表現手法についての検討と、作成した可視化補助表現を用いた水中構造物 AR 可視化システムの構築を行った。なお、本システムでは海上などのオープンスカイ環境下において使用することを前提として、ロケーションベース AR 手法を採用した。

### 2. AR 可視化システム

本システムの動作の過程を表すフローチャートを図-1 に示す。

#### 2.1 開発環境

本研究では、デバイスとして GNSS 受信機 QZNEO を 2 セット取り付けた iPad Pro 11-inch (第 1 世代) を用いる。既往の研究<sup>2)</sup>での精度検証結果を参考に、本システムでは受信機間の距離は 58cm とした。

次に、統合開発環境としてゲーム開発プラットフォーム Unity(2020.3.24f1) を用いる。Unity にはパッケージとして ARFoundation および ARKit を用いる。

#### 2.2 可視化モデル

本適用例では、水中構造物可視化モデルとして 20.0 トン型消波ブロックを用いた。また、可視化補助モデルとして開口部、仮想水面、深さ方向に 1.0m ずつ目盛りを付けたメジャーを用いた。

##### 2.2.1 開口部

開口部は、底面が一辺 15m の正方形、深さは 3m である。開口部の役割は、システム利用者に現場の位置関係を正しく把握させることである。

##### 2.2.2 仮想水面

仮想水面とは、システム使用時に図-2 のようにスライダーで水位を調節できる平面のモデルである。仮想水面は開口部上の描画されない現実空間の水面の代わりとして存在し、利用者が手で操作することでその位置を参考に開口部内の高さ情報を読み取ることもできる。

本適用例では可視化中にリアルタイム映像が仮想水面に反映され、透明度の変更も可能である。図-3 に示すように映像取得位置と描画位置をずらすことによって仮想水面の上下移動を可能にしている。

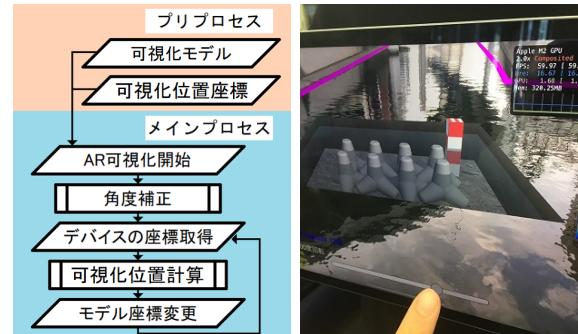


図-1 フローチャート 図-2 仮想水面の操作

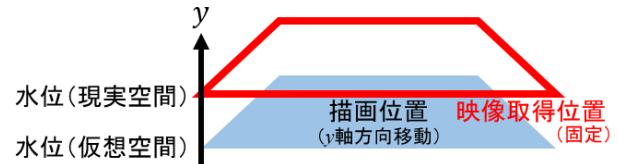


図-3 仮想水面の y 軸方向移動について

#### 2.3 プリプロセス

##### 2.3.1 可視化表示位置

可視化位置座標の入力では可視化座標系の原点の緯度、経度、楕円体高を入力する。本システムは、北を z 軸方向、東を x 軸方向、鉛直上向きを y 軸方向とし、それぞれ緯度、経度、楕円体高を対応させている。

仮想空間上の各 3D モデルは事前に可視化座標系での座標と向きの情報が与えられており、可視化座標系の設定により適切な位置に描画される。

##### 2.3.2 可視化情報

可視化情報の入力では、可視化モデルの項で記した各物体の 3D データを入力する。

#### 2.4 メインプロセス

##### 2.4.1 角度補正

可視化モデルを正しい位置に表示するため、可視化座標系の角度補正を行う。補正方法は参考文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

##### 2.4.2 位置合わせ

現実空間における可視化座標系の位置と向きを固定するため、デバイスの位置や向きの変化に応じてデバイスに対する可視化座標系の新しい位置と向きを繰り返し算出し反映する。位置と向きの変化量はそれぞれ GNSS データと iPad のジャイロセンサで計測する。

### 3. 適用例

本システムの有効性を検討するために、適用例として神田川の海底に 20.0 トン型テトラポッドが存在していると仮定して可視化モデルを適用する。本研究では図-4 に示す東京都文京区小石川橋を可視化位置とする。図-5 に示すように可視化位置でデバイスを手に持って可視化を行う。本稿では、図-6 に示す消波ブロックモデルのみを用いた可視化結果と、図-7 に示す可視化補助表現を用いた可視化結果を定性的に比較する。

#### 3.1 開口部とメジャーによる比較

図-6 に示す消波ブロックモデルのみ用いた可視化結果の場合、消波ブロックモデルが水面より上に浮いて存在しているように見えるほか、消波ブロックモデルのスケールや高さ情報を比較できる対象が存在しないなどの問題点があった。開口部とメジャーのモデルを用いることにより背景のカメラ映像と可視化部分の視覚的な親和性が高まったほか、構造物モデルの位置している高さを感じ的に正しく把握できる見た目になった。

開口部の改善点としては、メジャーと構造物が離れているため構造物の高さ情報が読み取りにくい点が挙げられる。次に、開口部の深さによっては開口部内が観察しづらくなる点が挙げられる。

#### 3.2 仮想水面の有無による比較

図-7 に示す可視化補助表現を加えた可視化結果では、仮想水面をスライダーで動かしてメジャーと構造物との位置関係を見比べたり画面端の仮想水面深度を確認したりすることにより消波ブロックモデルの位置している深さを利用者が定量的に分かるようになった。また、仮想水面はリアルタイム映像を反映していることから全体の調和が天候や日の向きに影響されず、違和感の少ない可視化結果が得られるようになった。最後に、仮想水面は半透明であるため仮想水面が現実世界の水面と同じ高さにあっても開口部内を確認でき、水中構造物の沈んだ様子がイメージしやすくなった。

### 4. おわりに

本研究では、水中構造物を違和感なく可視化するための可視化表現手法について検討を行い、作成した可視化補助表現を用いた水中構造物 AR 可視化システムの構築を行った。また、本発表では本可視化補助表現手法の妥当性と有効性を検討するために、水底に消波ブロックがあると仮定したモデルの可視化を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 本発表で報告した可視化補助表現手法の有用性が確認できた
- 開口部の深さが可視化結果に与える影響について十分に考慮できておらず改善の余地があることがわかった

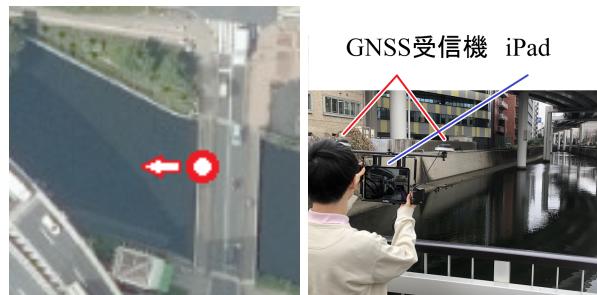


図-4 可視化位置<sup>3)</sup>

図-5 可視化時の様子

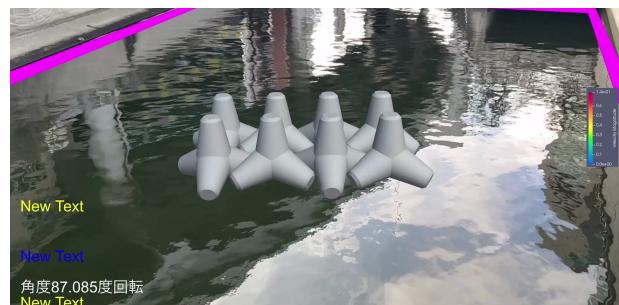


図-6 消波ブロックモデルのみ用いた可視化結果

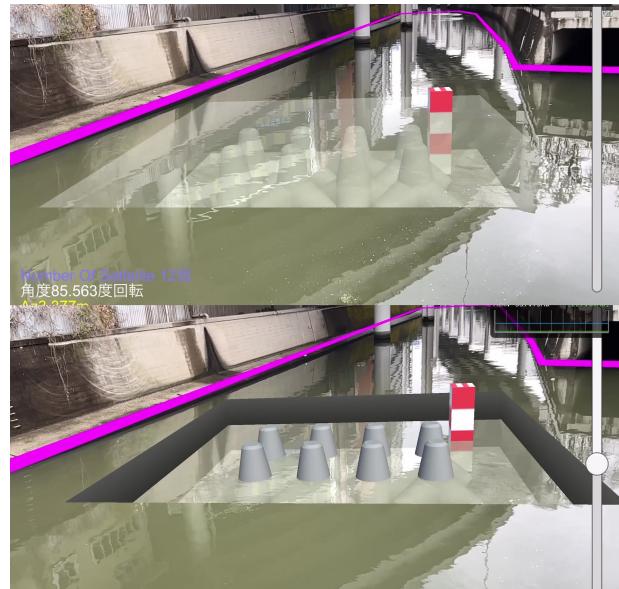


図-7 可視化補助表現を加えた可視化結果(透明度: 30%)

### 参考文献

- 1) 洲崎文哉, 横山和男, 琴浦毅, 石田仁, 吉永崇: ARKit を用いた地下埋設物の AR 可視化システムの構築と重畠の高精度化の検討, 土木学会論文集 F3, Vol.77, No.2, pp.I131-I139, 2021.
- 2) 鈴木雅大, 大川博史, 中祖諒大, 横山和男: 小型 GNSS 受信機を用いた水域環境における AR 可視化システムの構築, 土木学会論文集, Vol.79, No.22, 22-22013, 2023.
- 3) 国土地理院 <https://maps.gsi.go.jp/> (入手 2024.1.6)

# GNSS受信機を用いたAR可視化システムの移植性向上に関する研究

Basic research on AR visualization system using GNSS location information

都市環境学科4年 小川祐生  
Yusei OGAWA

## 1. はじめに

著者らはこれまでGNSS受信機を用いたAR可視化システムの構築<sup>1)</sup>を行ってきたが、既往システムでは角度補正をGNSS受信機からのデータで一度行った後はデバイス搭載のセンサーによって補正を行っていた。

本研究ではデバイスのセンサーに依存せず水平方向の角度補正をGNSS受信機からのデータを基にして補正を行うことでシステムの使用性と移植性の向上を実現した。

## 2. GNSS受信機を用いたAR可視化

システム構築のフローチャートを図-1に示す。

### 2.1 開発環境

本研究では、総合開発環境としてゲーム開発プラットフォームであるUnityを使用する。また、AR可視化システムの開発キットとして、iOSに対応するARKit XR Plugin 4.1.13とAR Foundation 4.2.9及びAR Subsystems 4.2.9を使用する。

### 2.2 データ入力

データ入力では、重畠させる可視化情報と角度補正に用いる神田川流れオブジェクトの緯度経度標高及びジオイド高を入力する。可視化情報では、図-2に示す地点から流れの有限要素法により解析したベクトルデータを可視化対象として設定する。

### 2.3 可視化デバイスとGNSS受信機

本システムにて使用するデバイスと機器を図-3に示す。可視化デバイスとしてiPad Pro 11inchを利用し、左右にサブメーター級高精度GNSS受信機であるCore社製のCohac QZNEOを2台搭載している。

後述する角度補正是、2台の受信機の距離に応じて精度が向上することが考えられる。そこで、完全に静止した状態で各100回、28cm間隔、78cm間隔、98cm間隔での計測を行い、精度の比較を行った。図-4に結果を示す。図に示す通り、受信機間の間隔を28cmとしたときは補正後の角度にブレがみられた。一方で78cm、98cmでは大きな差は見られなかったため、本研究では扱いやすさとの兼ね合いから受信機間の距離は78cmに設定した。

### 2.4 重畠手法

本システムではGNSS受信機から受信したNMEAデータを用いて仮想空間内で重畠を行う。<sup>1)</sup>

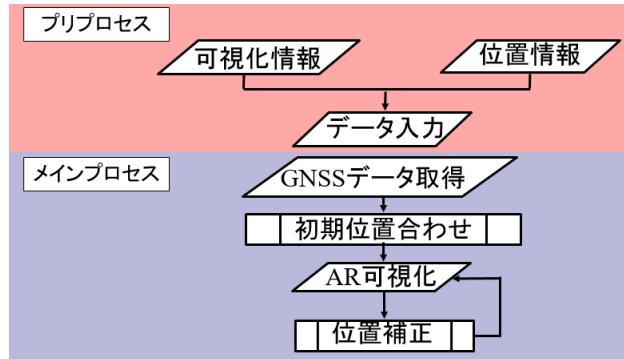


図-1 フローチャート



図-2 可視化場所(オープンスカイ環境)



図-3 可視化デバイスとGNSS受信機

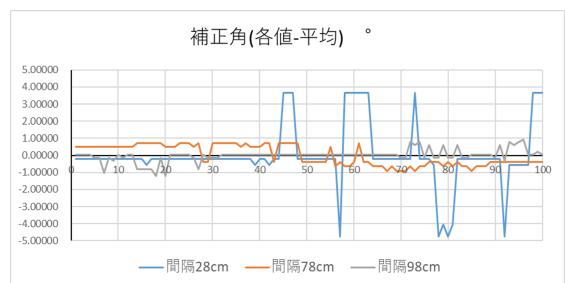


図-4 受信機間隔ごとの補正角の遷移

#### 2.4.1 角度補正

Unity で開発されている本システムでは、アプリケーション起動時にデバイスが向いている方向を  $z$  軸と定め鉛直上向きが  $y$  軸となる左手系の座標が構築される。そのため、デバイスの中で仮想空間の  $z$  軸と現実空間の北を一致させるために角度の補正を行う。ここで行う角度補正の手法に関しては参考文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

#### 2.4.2 仮想空間内の位置合わせ

角度補正には緯度方向が  $z$  軸、経度方向が  $x$  軸に一致させた座標系の中で、左右の受信機の経緯度の平均を取得し、プリプロセスで設定した重畳対象のオブジェクトの原点からの差から仮想空間内での可視化位置を計算する。位置情報の更新及び、可視化位置の計算は毎秒 1 回行われ、デバイスの移動にも対応する。

仰俯角方向においても同様に、左右の受信機の高さの差を平常時を 40cm 差であるとし、俯いたときには受信機の高さの差が小さくなることを利用し補正を行った。

#### 2.4.3 AR 機能のセンサーの停止

Unity にて開発している本 AR システムは、コンポーネントとして AR Foundation パッケージ内に AR Input Manager が搭載されている。このコンポーネントはデバイスのセンサーを利用して、端末が回転した際に合わせて仮想空間に回転を与えることで違和感のない重畳を行う AR Camera に付帯するコンポーネントである。

既往のシステムではアプリケーション起動時に GNSS 受信機からの位置情報データを用いて現実空間と仮想空間の座標系の一致を行い、以降の回転は AR Input Manager のコンポーネントにより利用できるデバイスのセンサーで初期方向からの相対的なデバイスの回転を補正していた。

しかし、上記の手法では補正の精度がデバイスのセンサーに依存してしまうという問題があった。そこで本研究では AR Input Manager による端末の回転の反映を行わずに GNSS 受信機からのデータで毎秒 1 回の角度の補正を行うことで、デバイスのセンサーの精度に依存しないシステムの構築を行った。

### 3. 重畳結果

重畳結果を図-5 に示す。ここに示す通り可視化の際に基準としている縁が合っているのが確認できる。これにより、正常に角度補正が繰り返し行われ、正しく重畳が行われていることが確認できた。

しかし、仰俯角の補正に関しては、俯くような傾きを付けた際に正しく角度補正が行われなかった。原因は現在使用している受信機が高さ方向に関して 0.1m 単位の精度の受信となっていて、受信機間の高さの差が 40cm, 30cm, 20cm とかなり極端な値を示してしまって

いるため現状計算自体は正しく行われていることが確認できたが、入力元となる GNSS 受信機からの受信データの精度の都合上これ以上の補正是行うことができない。

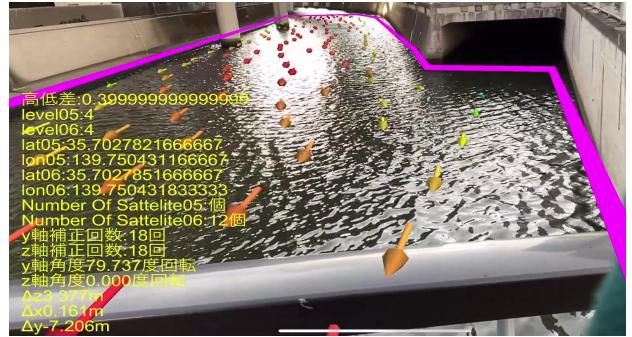


図-5 重畳結果 1



図-6 重畳結果 2

### 4. おわりに

本研究では水平方向の角度補正を GNSS 受信機からのデータから補正を行う方法を提案した。本システムの妥当性と有効性について、河川流れのシミュレーション結果の可視化を例に検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 重畳の位置および角度補正を GNSS 受信機からのデータにより行うことによってシステムの使用性と移植性が向上した。
- 重畳精度については、従来システムと同等であることを確認した。

今後は、水平方向の角度補正の定量的評価を行うとともに鉛直方向の角度補正法の検討を行う予定である。

### 参考文献

- 洲崎文哉, 榎山和男, 琴浦毅, 石田仁, 吉永崇, ARKit を用いた地下埋設物の AR 可視化システムの構築と重畳の高精度化の検討, 土木学会論文集 F3, Vol.77 No.2 p.I\_131-I\_139, 2021.
- 鈴木 雅大, 大川 博史, 中祖 謙大, 榎山和男:小型 GNSS 受信機を用いた水域環境における AR 可視化システムの構築, 特集号論文, 2023 年 79 卷 22 号, 2023.