

中央大学工学部都市環境学科  
計算力学研究室

研 究 年 報

第 28 号

2021 年 3 月

# 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 深層学習に基づく物体判別	博士後期課程 2 年	大川 博史	1
高速多重極境界要素法による遮音壁周辺の 3次元非定常音場解析とその可聴化	博士前期課程 2 年	庄子 諒	5
地下埋設物に対する MR 可視化システムの構築	博士前期課程 2 年	滕 飛	9
IGAによるポテンシャル流れ解析の メッシュ依存性に関する研究	博士前期課程 1 年	吉田 也真都	13
Space-Time 有限要素法による浅水長波流れ解析の精度検証	博士前期課程 1 年	中村 光太郎	17
吸音モデルを考慮した CIP 法による 三次元音場解析に関する研究	博士前期課程 1 年	堤 蘭	21
道路閉塞を考慮した 津波避難シミュレーションシステムの構築	博士前期課程 1 年	中村 麻菜美	25
構造物周りの三次元気流シミュレーション結果を用いた MR可視化システムの構築	博士前期課程 1 年	川越 健生	29
防災教育のためのインタラクティブな VR 津波体験システムの構築	博士前期課程 1 年	王 博	33
地下埋設物を対象としたAR可視化システムの構築と 描画手法の検討	博士前期課程 1 年	洲崎 文哉	37
点群深層学習を用いた水中物体認識手法の構築	博士前期課程 1 年	八木 笙太	41
弾性体の動的解析における陽解法と陰解法の比較	学部 4 年	石塚 啓起	45
安定化有限要素法による東京湾の流れと水質解析	学部 4 年	家中 萌々子	47
3次元自由表面流れ解析における 解析メッシュの依存性について	学部 4 年	安井 太一	49
幾何音響理論に基づく鉄道騒音評価システムの高精度化	学部 4 年	及川 萌	51



高速多重極境界要素法を用いた音場解析における メッシュ分割幅の検討	学部 4 年	深澤 一志	53
津波避難シミュレーションシステムにおける 多数派同調バイアスの考慮に関する検討	学部 4 年	藤山 麗	55
高精度かつ簡便な都市モデルの作成手法の 構築に関する研究	学部 4 年	須藤 瑞輝	57
ひび割れ画像解析における ニューラルネットワークの適用に関する基礎的研究	学部 4 年	鈴木 雅大	59
WebARを用いた津波のAR可視化システムの構築	学部 6 年	三浦 大知	61

## 小型 AUV による水中マッピングデータ取得と深層学習に基づく物体判別

*Underwater mapping data acquisition by small AUV and object classification based on deep learning*

都市人間環境学専攻 博士課程後期 2 年 大川 博史  
Hiroshi OKAWA

### 1. はじめに

近年の土木・水産業界における ICT の積極的な導入<sup>1)</sup>により、情報化施工や BIM/CIM 活用をはじめとした一連の建設プロセスにおいて様々な取組が行われており、水中マッピング技術の分野においても発展の一途をたどっている。

その一方で、水中マッピングは陸上マッピングとは異なり、水中においては、容易にアクセスできないだけでなく電波や光を通しにくいといった事情から、水中マッピングは非常に難易度が高く、40m 以深では潜水行為自体が危険な作業となっているのが現状である。

近年の計測機器や水中ロボットの発達により分解能の高い音響探査装置を利用した高品質な水中マッピングが実現できるようになった<sup>2)</sup>。これらによって得られる水中マッピングデータは、音の反射の強弱によって表されるため、色彩情報は持たず、これまで獲得したデータから物体判別を行う際、専門技術員による判読に頼ってきた<sup>3)</sup>。

また、ハードウェアのサイズが大きいだけでなく、調査領域の近辺において、オペレータによる操作が必要な機器の利用が主流である。そのため、津波被災海域のような調査員が容易にアクセスできない場所において、水中マッピングデータを取得した後、がれきに代表されるような対象物を直ちに自動的かつ迅速に判別するといった行為は難しく非常に危険を伴う。

これらの問題を解決するために、小型 AUV や ASV を用いることでオペレータが対象エリアに近接することなく水中マッピングデータを取得し、そのデータから水中に存在する物体を自動的に判別することで、迅速かつ正確に水中の現況把握を行う手法の構築を目標とする。本研究では、小型 AUV や ASV に搭載された音響測深装置を使用する。また自動物体判別手段として、筆者らは、これらの作業の自動化を目指し深層学習の 1 つである畳み込みニューラルネットワークによる画像分類タスクの適用を行った結果、物体の局所的な特徴が分類へ影響を与えていることが確認できた<sup>4)</sup>。本論文は、従来手法に入力データの局所的な特徴を際立たせるよう変換を行うことにより、分類結果の更なる精度向上を目指すものである。

### 2. マッピング手法およびデータ

#### (1) マッピング手法

マッピングデータとは、地理的な位置座標に基づき、様々な情報を付加させたデータと定義される。中でも、水中マッピングデータは、水中で獲得した画像や地形、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。また、水中のマッピング手法として、船舶にサイドスキャンソ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<sup>1)</sup>。

本研究では、Autonomous Underwater Vehicle (AUV) とよばれる自律航行型無人潜水ロボットあるいは Autonomous Surface Vehicle (ASV) をプラットフォームとして、各種計測機器を搭載することにより必要なデータを取得している。なお、AUV ではサイドスキャンソナー (スワス測深機能付)、ASV ではマルチビーム測深を採用し、水中マッピングデータを獲得する。使用 AUV、ASV はそれぞれ図-1,2 のとおりである。

#### (2) 水中音響計測技術について

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。直接的手法とは、水中カメラなどの光学技術によって可視画像を撮影する方法である。一方、間接的手法とは、超音波を用いた音響測深技術を用いる方法である。本研究では、間接的手法の 1 つで、前節の AUV 搭載のサイドスキャンソナーによって獲得した音響反射強度画像を主に使用する。サイドスキャンソナー (図-3) は、音響を使った水底の画像探査システムであり、音響探査データを精密に処理・解析を行うことにより、沈船や落下物の搜索、水底地形や地質分布情報を獲得できるものである。

水底面に向かって 10~500kHz の周波数を扇形に発射し、水底で散乱・反射した音波を受信する。この音波の強弱が水底面の地質によって異なるため、この強弱を濃淡表示することにより、白黒画像のように水底面の様子を面として捉えることができる。すなわち、濁った水中や暗い水底、真夜中の水中でも、音響画像を取得することが可能である。また、サイドスキャンソナーによってスキャンした底質・地形により音響的反射率が異なり、一般に岩石や砂利は砂泥よりも反射率が高いとされるほか、地形によっても反射強度に影響が現れる。一方、マルチビーム音響測深機とは、海底に向け船の下から左右放射状に指向性の高い音響ビームを多数配列して、船の進行とともに一度で多数点の水深を測る装置である。マルチビーム音響測深機における計測手法は、クロスファンビーム方式に基づくものである。また、本研究で使用したサイドスキャンソナーはインターフェロメトリソナーであり、スワス測深機能がついているため、取得した白黒画像の各画素点に対し、深度座標を付加することができる。

#### (3) 取得データ

取得されるデータは前節の通り、取得した各画素点に標高データをもつ他、各種水質(水温/塩分/pH(酸・アルカリ)/濁度など)や流速、流向を獲得することができる。本報告では、取得できるデータのうち材質分類に使用する主なデータとして音響反射強度画像を採用する。音響画像は、受振した振幅強度に応じて色付けを行ったものであり、その濃淡

パターンを相対的に判断することによって判読を行う。底質土や地形の判読は、専門判読基準書等から本来専門員の目視によるものであり、白黒あるいはカッパー色によって表示した濃淡パターンから行うのが一般的であり、音響画像イメージに現れる特徴的な形状を利用する<sup>3)</sup>。リップルやデューンといった波型の模様は砂質土に限定された模様であり、そのような模様があれば、砂質土と断定できる。また、人工物や水底からの突起物に関しては、反射強度とその後方に伸びる音響的な影から実体の形状を判断しやすい。濃淡パターンは調査箇所状況により相対的に決定されるため、絶対値は異なるが、一例として濃淡パターンの関係を図-4に示す。

### 3. 深層学習による物体判別

#### (1) 物体判別アルゴリズム

音響画像から材質判別を行うアルゴリズムは大別すると①輝度を特徴量として判別する方法②テクスチャ(模様)に着目して判別する方法の2種類に分類される。①は、平坦



図-1 使用 AUV 諸元



図-2 使用 ASV

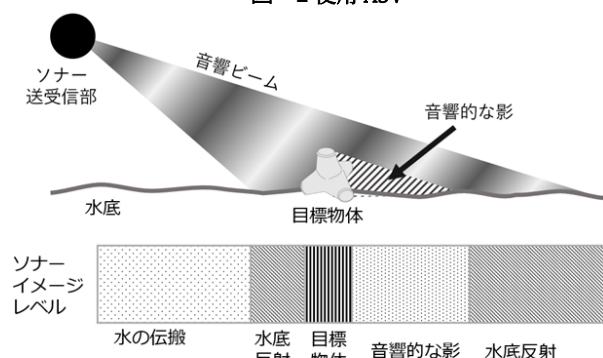


図-3 サイドスキャンソナー (片側) の原理



図-4 サイドスキャンソナーの音響画像例

な地形の中に異なった反射特性をもつ場合に効果を発揮する一方、地形による反射強度の陰影を異なった材質と誤認しやすい。②は、フィルタで抽出した特徴量に基づいて分類を行う。なお、表層堆積物の分類は複数の特徴量の組み合わせによって分類されている。代表的なアルゴリズムの1つとして、グレースケール画像から計算された同時生起行列 (Gray Level Co-occurrence Matrix ; GLCM)<sup>7)</sup> から求められる特徴量を用いる方法が一般的である。実際にこれらのアルゴリズムを利用して画像分類が行える汎用ソフトウェアも存在するものの、分類パターンから材質を直接判断するものはない。

#### (2) 深層学習と畳み込みニューラルネットワーク

深層学習とは、深層学習とは人工ニューロンの層が多段に組み上げられた Neural Network (NN) のことであり、人工ニューロンの各層では複数の抽象化によるデータ表現が獲得され、直下の層が獲得した表現を直上の層が別の独自表現を獲得するように学習が進行するものと定義されている。深層学習は、特に大規模画像解析に優れた性能を発揮しており、すでに深層学習がヒトの認識性能を超えたことが報告されている。

深層学習を用いた画像解析は、現在幅広い分野において実用化されており、「認識 ( Classification )」・「分類 ( Recognition )」・「検出 ( Detection )」・「領域検出 ( Semantic Segmentation )」等に代表される技術が一般的である。なお、本報告に際しては「分類」技術を採用した。

深層学習による画像解析方法は、まず、NN のモデルを選択し、未学習の NN に「正解」のラベル付けをした大量の学習用画像を入力し、NN の結果の認識誤差により各ニューロンの重み係数を微調整する。次に、得られた NN に「正解」のラベル付けした学習用画像とは別に用意されたテスト用画像を与えて、正答率を調べる。これを繰り返すことにより、適切な学習曲線を持つ学習済み NN を得るものである<sup>10)</sup>。

また、深層学習を画像認識の問題に応用する際、多くの場合で用いられるのが畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network; CNN) である。CNN はニューラルネットワークの中でも情報が一方にしか伝達しない順伝播型ニューラルネットワークの一種であり、その中でも一般に畳み込み層とプーリング層によって構成されるネットワークを指す。

CNN では入力層で画素値を入力値として扱い、入力した画素値から畳み込みとプーリングの処理によって特徴抽出し、最終的に識別する。畳み込み層では、画像上にフィルタを埋め込み、フィルタ内でフィルタのもつ重みと画像のもつ画素値の間で積和演算を行うことで画像の特徴を抽出することになる。一方、プーリングとは畳み込み層の出力をもとに画像の解像度を低下させる作業を意味する。

本報告では、畳み込み層で抽出された特徴に対して、適当な大きさの領域を設け、領域内の画像情報に基づいて画像の解像度を低下させる。この作業を行うことで領域内のどこかにパターンの一致する部分があれば領域が全体として反応するため、対象とするオブジェクトの位置が画像内で

ずれた場合でも対象とするオブジェクトを認識することができるようになる。

### (3) 画像分類方法

本研究では、AUV により取得した音響反射強度画像を任意のサイズに分割したものを入力データとし、畳み込みニューラルネットワークによる画像分類タスクを適用した。本システムの流れを以下に示す(図-5 参照)。

画像分類には実際に取得した音響反射強度画像からブランクゾーンを除去・編集の後、GeoTiff 形式にて保存した。また、局所的な特徴を際立たせるために画像の閾値処理後の音響反射強度画像を用いて、画像分割サイズ [pixel] を変更することによる画像分類の正解率を算出した。閾値処理については、次節について記述するものとするが、本報告においては閾値処理方法として①単一閾値処理②大津による判別分析法③適応的閾値処理によって自動的に閾値を設定する方法を取り入れた。詳細に編集した音響反射強度画像を用いて、画像分割サイズ [pixel] を変更することによる画像分類の正解率の変化について考察する。なお、あらかじめ学習データを作成する必要があるが、本研究では「人工構造物・岩石・砂礫」の3クラスに分類を行い、画像分割サイズはそれぞれ20×20、50×50 pixel とした。人工構造物 / 岩石 / 砂礫の物体スケールは概ねそれぞれ、1.0m 以上 / 20cm 以上 / 20cm 未満と定義した(図-6 参照)。

学習データセット作成には、アノテーションツールである LabelMe を用い、物体形状に応じて指定・作成した。これらの画像群を深層学習ライブラリ (Keras および TensorFlow) により、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network : CNN) を用いて学習させた。なお、本研究で使用したネットワークの構成は、畳み込み層を2層、プーリング層1層、ドロップアウト層および全結合層で構成し(表-1 参照)、計算速度向上のため可能な限り単純な構成としている。

なお、計算開発環境について、ハードウェア環境は CPU : AMD Ryzen Threadripper 3970X 3.70GHz / GPU : GeForce RTX 3090 / OS : Ubuntu20.04 / RAM : 64.0 GB であり、ソフトウェア環境は、Anaconda3 上の Python3.8 / Keras / TensorFlow においてプログラムを実行している。

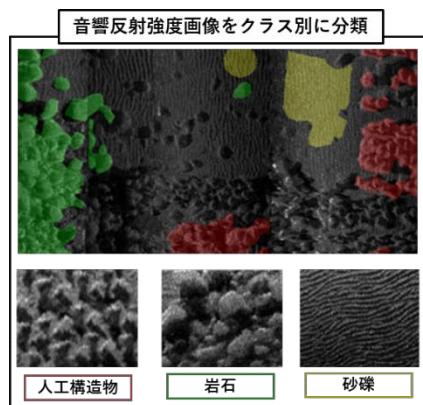


図-5 底質・物体判別のフローチャート

### (4) 入力画像の閾値処理

上質な学習データを取得することが、深層学習を用いた判別精度の向上に繋がることは明確であるが、本報告では、閾値(2値化)処理を行うことにより、人工構造物や岩石の輪郭・境界を明確にし、上質な学習データを獲得することとした。閾値処理として、代表的な以下の5つの処理方法(I.単一閾値処理 II-①.判別分析法-大津による判別分析法 II-②.判別分析法-トライアングル法 III-①.適応的閾値処理-平均化フィルタ III-②.適応的閾値処理-Gaussian フィルタ)を採用した。

I.単一閾値処理は、任意に閾値を決定するものであり、閾値を超えるピクセル255【白】それ以外のピクセルは0【黒】に変換するものである。II-①の大津による判別分析法は、大津の2値化処理<sup>11)</sup>と呼ばれ、画像全体のヒストグラムから分離度Sが最大となる閾値Tを算出するものである。また、II-②トライアングル法による判別分析法<sup>12)</sup>は、入力画像のヒストグラムの最大となるポイントと裾野のポイントを直線で結び、その垂線の長さを最大とする閾値を算出する。



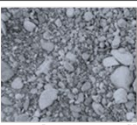
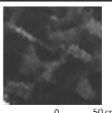
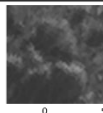
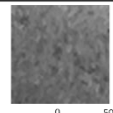
分類	人工構造物	岩石	砂礫
モデル例			
画像例			
サイズ	約1.0m以上	約20cm以上	約20cm未満

図-6 各分類クラスのスケール例

表-1 CNNの構成と出力サイズ

層番号	層種	出力サイズ
1	畳み込み層	64×32
2	畳み込み層	36×64
3	プーリング層	9×64
4	ドロップアウト層	9×64
5	全結合層	128
6	ドロップアウト層	128
7	全結合層	3



Ⅲ-①平均化フィルタを用いた適応的閾値処理とは、全体画像のなから局所領域を定め、各領域の閾値を計算する方法であり、注目画素とその周囲にある画素の画措置の平均値を閾値とし処理する。一方、Ⅲ-②Gaussian フィルタを用いた適応的閾値処理は、Gauss 分布を用いて近傍に重みづけを行う方法である。詳細は参考文献等を参照されたい。

なお、各処理方法によって人工構造物の画像 50[pixel]を処理した例を図-7 に示す。

#### 4. 適用例および分類結果

本論文では、人工構造物・岩石・砂礫を採用し、これらの混在する水域である島根県江の川流域を対象とし、前章の手順により画像分類を行った。画像分類に使用した音響反射強度画像および学習データは図-8 のとおりである。作成したデータからトレーニングデータとバリデーションデータの精度検証からハイパーパラメータを設定し、その検証を行った。

繰り返し学習回数（エポック数）は過学習の影響を鑑みて学習回数 20 回が最適と判断し、画像分類結果を閾値処理別に示す（表-2 参照）。分類結果より、処理方法および解像度また対象の物体スケールによって正解率が変化することが確認できる。また、正解率は変化したものもののその傾向は一定ではないことが確認できた。

#### 5. おわりに

本研究では、サイドスキャンソナーを利用して取得した音響反射強度画像を入力データとして、深層学習による画像分類タスクを適用した。深層学習モデルの判断が水中物体によって異なることが確認でき、物体固有の特徴をより際立たせる処理を行うことで精度の高い物体分類を実現できると考えられる。

今後の課題として、対象物による学習データの最適な画像分割サイズおよび入力データ処理方法による分類精度の検証を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会水中維持管理部会：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 水中維持管理技術の現場検証・評価の結果。平成 28 年 3 月 30 日<<http://www.mlit.go.jp/common/001125345.pdf>>, (入手 2018.6.6)
- 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 巻, pp.29-34, 2019.
- 3) 植木俊明：サイドスキャンソナーによる海底の把握, 写真測量とリモートセンシング, 29 巻 Special 号, pp.84-93, 1990.
- 4) 大川博史, 宮本崇, 樫山和男：小型 AUV による水中マッピングデータ取得と深層学習に基づく物体判別, 土木情報学シンポジウム講演集, vol.45, pp.217-220, 2020.
- 5) Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G.E.: Imagenet classification with deep convolutional neural networks, Advances in neural information processing systems, pp.1097-1105, 2012
- 6) 海洋調査協会：海洋調査技術マニュアル—海洋地質調査編一, pp.29-30, 2004.
- 7) Haralick RM, Shanmugam K, Dinstein IH. Textural features for image classification, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on Systems, pp.610-21, 1973.
- 8) Wang, Q., Wu, M., Yu, F., Feng, C., Li, K., Zhu, Y., Rigall, E., He,

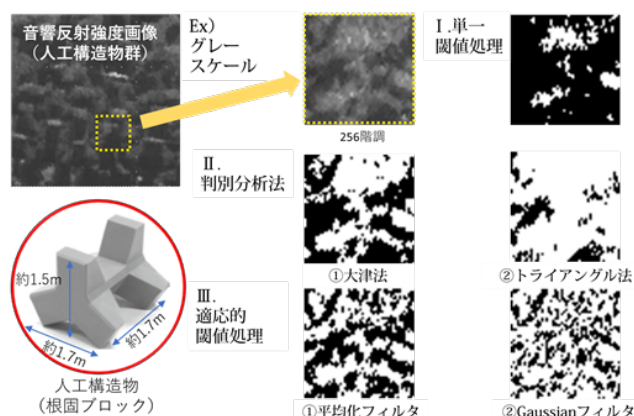


図-7 各閾値処理例（対象人工構造物）

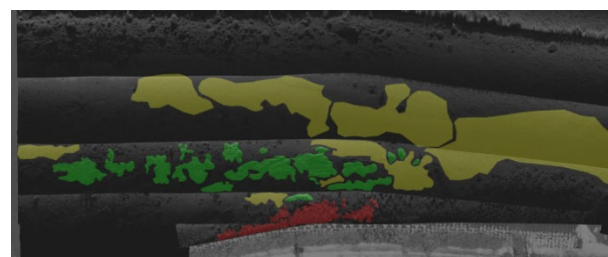


図-8 音響反射強度画像および学習データ例

表-2 閾値処理別の正解率

処理方法	人工構造物	岩石	砂礫
1.単一閾値	39%	86%	100%
2.判別分析法 ①大津	30%	85%	100%
②トライアングル	34%	84%	99%
3.適応的閾値処理 ①平均化	30%	85%	100%
②Gaussian	37%	81%	99%
Ex.処理前	48%	41%	99%
1.単一閾値	64%	98%	99%
2.判別分析法 ①大津	61%	86%	100%
②トライアングル	63%	89%	96%
3.適応的閾値処理 ①平均化	61%	90%	98%
②Gaussian	59%	98%	92%
Ex.処理前	61%	99%	84%
1.単一閾値	91%	53%	95%
2.判別分析法 ①大津	95%	58%	96%
②トライアングル	96%	55%	97%
3.適応的閾値処理 ①平均化	94%	51%	99%
②Gaussian	96%	52%	98%
Ex.処理前	95%	54%	97%

B.: RT-Seg: A Real-Time Semantic Segmentation Network for Side-Scan Sonar Images., Sensors 2019, vol.19 Issue 9, pp.1985, 2019

- 9) 長尾正之, 牟田直樹, 西島渉：海砂海域での反射強度画像による底質判別の課題と深層学習による解決の試み, 土木学会論文集, Vol.74, No.2 pp. I\_1441-1446, 2018.
- 10) Fukushima, K.: Neocognitron: A Self-organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position, Biological Cybernetics, Vol.36, pp.193-202, 1980.
- 11) 大津展之：判別および最小 2 乗規準に基づく自動閾値選定法, 1980 年電子情報通信学会論文誌, Vol.J63-D, No.4, pp.349-356, 1980
- 12) Zack GW, Rogers WE and Latt SA : Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency, J. Histochem. Cytochem, 25 (7) , pp.741-753, 1977.

## 高速多重極境界要素法による遮音壁周辺の3次元非定常音場解析とその可聴化

Three dimensional unsteady sound field analysis around noise barriers  
using fast multipole boundary element method and its auralization

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 庄子 諒  
Makoto SHOJI

## 1. はじめに

騒音問題に関する苦情の件数はここ数年、典型 7 公害の中で最多となっており、騒音対策は喫緊の課題となっている。近年では、騒音の評価手法として幾何音響理論や波動音響理論に基づく数値シミュレーションが広く用いられている。幾何音響理論は、ごく低い計算負荷でシミュレーションが可能だが、複雑な幾何形状を有する問題への適用性には精度面に難点がある。一方、波動音響理論は精度の高い解析が可能であるが、多大な計算時間と計算容量を必要とする。本研究では、高精度であるという点に着目し、波動音響理論に基づく音場解析を行う。

既往の研究では、外部問題に適する境界要素法に着目し、時間域高速多重極境界要素法を用いた音場解析手法の構築が進められてきた<sup>1)</sup>。しかし、波動音響理論や境界要素法の長所を活かした複雑な幾何形状を有する問題への適用性や、移動音源の取り扱い手法に関しては、検討が不十分であった。また、解析結果の直感的な理解・把握の促進を目的として、バーチャルリアリティ（以下 VR）技術を用いて可聴化結果と立体映像を同時に提示する騒音評価システムの構築<sup>1) 2)</sup>が行われてきた。本システムは主に没入型の VR 装置を用いて開発が進められており、複数人での同時体験が可能である一方、装置が大型であり持ち運びが不可能という欠点があった。

そこで本研究では、複雑な幾何形状を有する大規模な音場解析を行い、複数の遮音壁モデルを用いて遮音効果を比較する。また、その解析結果を元に、時変量み込み演算<sup>3)</sup>を用いて音源の移動を考慮した可聴化を行う。さらに、VR 技術を用いた騒音評価システムの適用性向上のため、従来の没入型 VR 装置に加え、可搬性に優れるヘッドマウントディスプレイ（以下 HMD）による騒音評価システムの構築を行う。

## 2. 数値解析手法

## 2.1 境界要素法による音場解析

本研究で取り扱う 3 次元非定常波動問題の外部問題の支配方程式である 3 次元の波動方程式、放射条件、初期条件を以下に示す。

支配方程式：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(\mathbf{x}, t) = c^2 \Delta u(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \text{ in } D \quad (1)$$

放射条件：

$$u(\mathbf{x}, t) \rightarrow u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (2)$$

初期条件：

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad \mathbf{x} \text{ in } D \quad (3)$$

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

ここに、 $D$  は解析領域、 $u$  は音圧、 $c$  は音速、 $n$  は解析領域からの外向き法線ベクトル、 $u_{\text{in}}$  は入射波を示す。また、初期条件は初期ステップにおける無音状態を表す。

境界条件としては以下の二つの式を用いる。式 (5) は完全反射の条件式、式 (6) は音響インピーダンスに基づき吸音を再現するインピーダンス境界条件式である。

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad \mathbf{x} \text{ on } \partial D \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\cos \theta}{c} \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \text{ on } \partial D \quad (6)$$

ここに、 $\gamma$  は音圧反射率を、 $\partial D$  は解析領域の境界を示す。また、 $\theta$  は解析境界に対する音波の入射角を示し、本研究では入射波は境界面に対して垂直に入射する ( $\theta = 0$ ) と仮定する。

式 (1) より導かれる以下の境界積分方程式を解くことによって音場解析を行う。

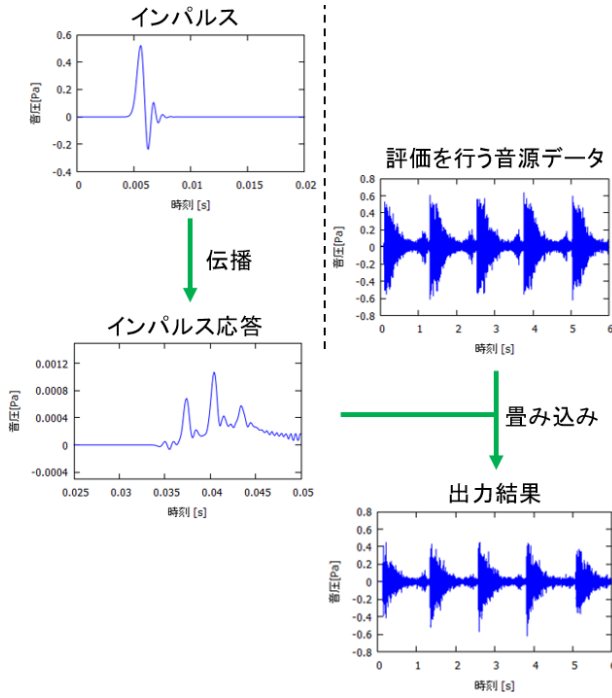
$$\begin{aligned} \frac{1}{2} u(\mathbf{x}, t) = & \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) \bar{q}(\mathbf{y}, t_0) dS dt_0 \\ & - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) u(\mathbf{y}, t_0) dS dt_0 \\ & + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \quad (7) \end{aligned}$$

式 (7) 中の  $\Gamma$  は 3 次元波動方程式の基本解を示す。

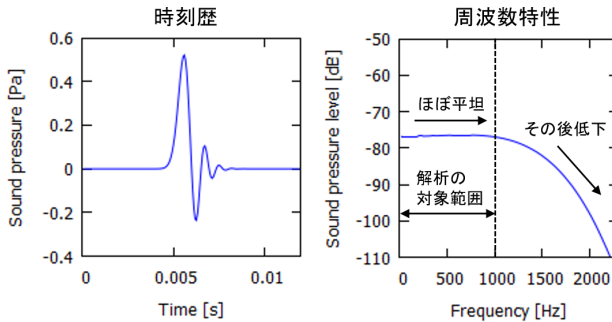
## 2.2 インパルス応答解析

本研究では、インパルス応答解析手法<sup>4)</sup>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（図 - 1）。本研究では、インパルス波として畳み込み積分の近似解法である Lubich の CQM(Convolution Quadrature Method)<sup>5)</sup>で提案された以下の式をもとに生成した波を使用する。

$$\omega_n(\Delta t) = \frac{R^{-n}}{L} \sum_{L=0}^{L-1} \left( \frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{s}{c} r} \right) e^{(-2\pi i \frac{nL}{L})} \quad (8)$$



図－１ インパルス応答解析

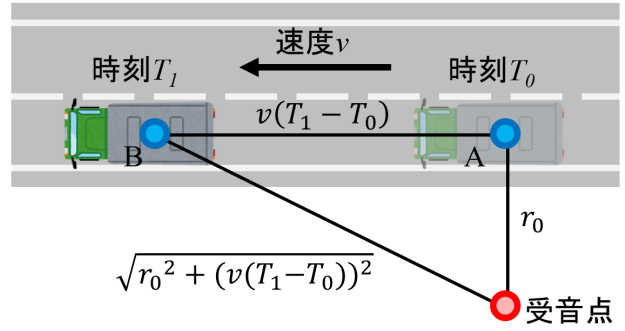


図－２ 擬似インパルス

式 (8) において  $L = 2000$ ,  $r = 1.8$ ,  $\Delta t = 0.0667\text{ms}$  として生成した波形とその周波数特性を図 - 2 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, ある周波数までは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フラットな周波数特性であるとみなし, 1.0kHz 付近までを解析の対象とする。

### 2.3 畳み込み演算

本研究では, 工事騒音を対象とした固定音源の可聴化と, 道路交通騒音を対象とした移動音源の可聴化を行う。解析により求めたインパルス応答から可聴化結果を得る際, 固定音源の可聴化には通常の畳み込みを用いる。一方, 移動音源の可聴化には時変畳み込み演算<sup>3)</sup>により, 畳み込みに用いるインパルス応答を刻一刻と変化させることで音源の移動の再現を行う。時変畳み込み演



図－３ インパルス応答の推定

算を行う際, 音源が代表位置にあるときに得られるインパルス応答を基準とし, それ以外のインパルス応答は距離減衰を考慮して近似により求める。図 - 3 に示すように, 音源が受信点に最も近づいた状態である点 A を代表位置とし, その時の音源と受信点との距離を  $r_0$ , 受信点で得られるインパルス応答を  $S_0$  とする。音源が任意の点 B にある時のインパルス応答  $S_1$  を  $S_0$  を用いて推定する場合, 音源が点 A, B を通過する時刻をそれぞれ  $T_0, T_1$  とし, 音源の移動速度を  $v$  として,  $S_1$  は距離減衰を考慮した以下の式で推定する。

$$S_1 = \frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + v^2(T_1 - T_0)^2}} \cdot S_0 \quad (9)$$

同様に, 音源が取りうるすべての位置においてインパルス応答の推定を行い, これを 1 ステップごとにずらして時変畳み込み行列とする。最後に, 任意の音源データと時変畳み込み行列との畳み込み演算を行い, 移動音源の可聴化音を得る。

## 3. 数値解析例

### 3.1 解析条件

図 - 4 に解析に用いるモデルを示す。各モデルの壁面上の要素分割幅は 0.022m である。音速, 時間増分はそれぞれ, 340m/s, 0.0667ms とし, 壁面の境界条件は完全反射とする。それぞれの解析モデルに対して, 反射率 1.0 (完全反射) と 0.5 の 2 種類の境界条件を与え, 解析を行う。

### 3.2 解析結果

遮音壁と直交する断面上での音圧分布を図 - 5 に示す。また, 図 - 6 に遮音壁のない場合と比較した, 各遮音壁モデルによる減音量の分布図を示す。ただし, この図において, 青色に近いほど音が低減されていることを表す。これらの図より, 遮音壁形状の違いにより遮音壁後方へ進行する音波の強さが変化しており, 特にこの中では Y 字型で反射率が 0.5 の場合が大きな減音効果を持っていることが確認できる。また, 図 - 7 は遮音壁の後方 5.0m の地点における, 受信点の高さと音圧レベルの関係を示している。この図は各受信点で得られたインパルス応答に音源データを畳み込み, その二乗平均平方

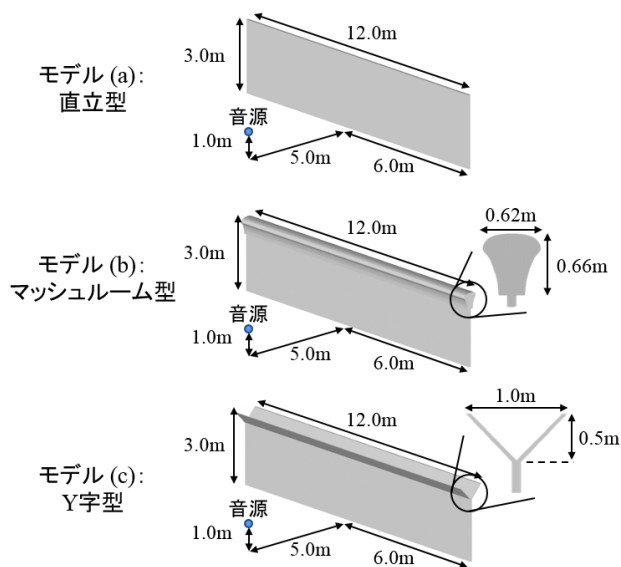


図-4 解析モデル

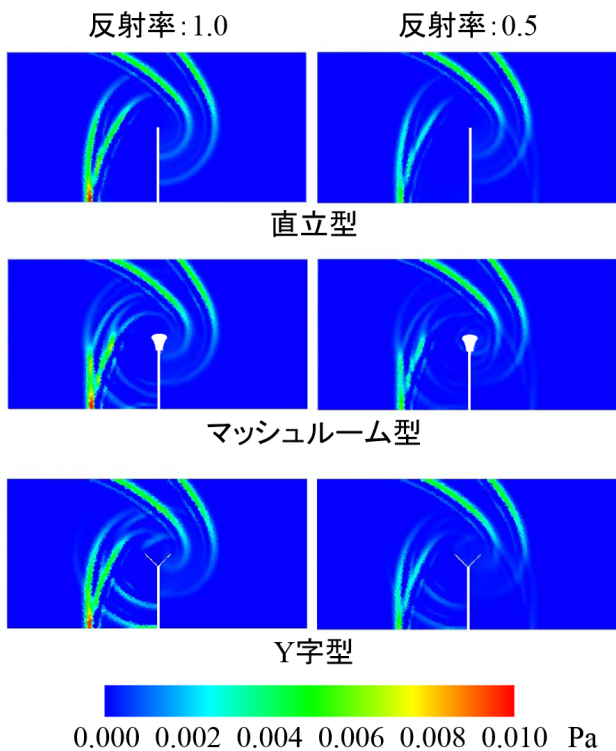


図-5 遮音壁と直交する断面上の音圧分布

根の値を dB に変換しグラフ化したものである。この図からも Y 字型の遮音壁モデルが最も音波を低減している様子が確認でき、直立型の完全反射の遮音壁と比べて約 4dB ほど音を低減していることがわかる。

#### 4. VR 装置を用いた可聴化

第 3 節で示した 6 種類の解析結果に遮音壁のない場合を加えた計 7 種類の結果を用いて、遮音壁の背後 5.0m、高さ 1.0m の地点に受音点を設け、得られた可聴化音を用いて VR 技術を用いた都市騒音体験システムの作成

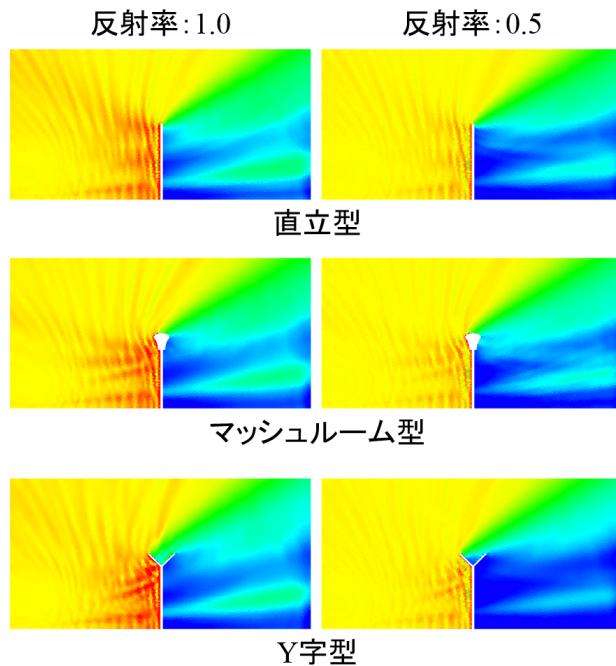


図-6 音圧レベルの比較

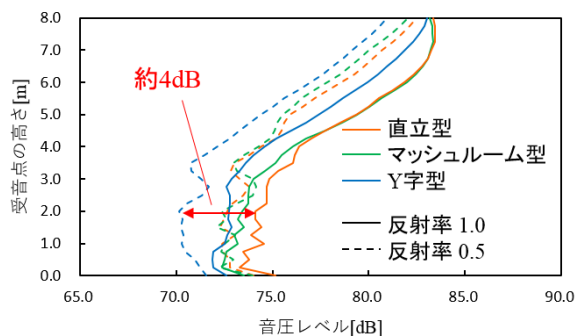


図-7 受音点の高さと音圧レベルの関係

を行った。可聴化に用いたデバイスは図-8に示す、没入型の VR 装置である HoloStage と HMD の Oculus Quest 2 である。可聴化の対象としては、固定音源として杭打機の騒音を、移動音源として大型車の走行音を用いた。大型車は 80km/h の速度で 150m 走行するものとし、音源には録音した大型車の走行音を定常音化したデータ<sup>6)</sup>を使用した。システム利用中の様子を図-9に示す。VR 空間内で CG とともに可聴化音を聞くことで、音のみを聞く場合に比べて騒音の発生源との距離や遮音壁の高さ等を直感的に理解することができ、可聴化の効果をより高められることが期待できる。

また、図-10および図-11は没入型の VR 装置において、装置から発せられる音を騒音計により計測し、計算結果通りの音場が再現されているかどうかの検証を行った結果である。示している図は、固定音源と移動



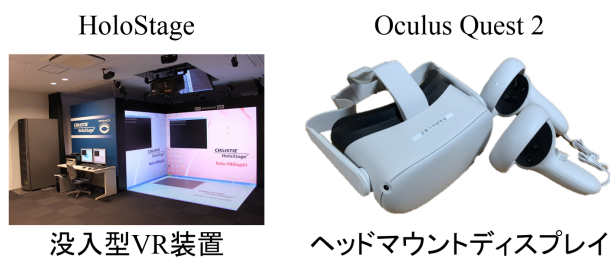
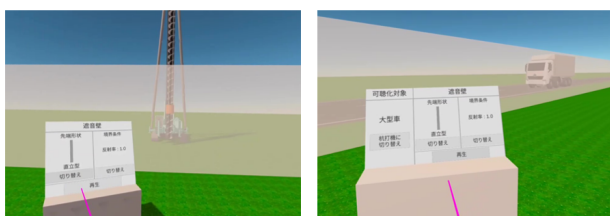


図-8 使用する VR 装置



HoloStage



Oculus Quest 2

図-9 騒音体験システム

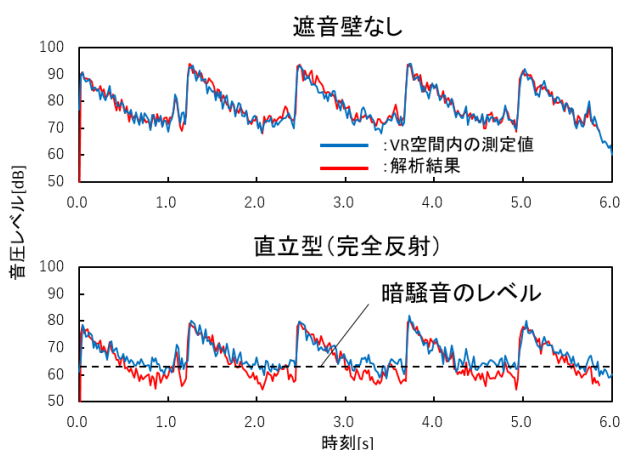


図-10 解析結果と VR 空間内の側定値との比較 (固定音源: 杭打機)

音源それぞれについて、遮音壁のない場合と直立型の遮音壁がある場合の比較結果である。VR 装置内では、プロジェクターの駆動音に起因する 63dB 程度の暗騒音が常に存在しているため、解析結果がそれを下回る場合には VR 空間内での測定値との間に乖離がみられるが、それ以上の音圧レベルでは両者は良い一致を示しており、VR 空間内においてほぼ計算結果どおりの音場が再現されていることが確認できる。

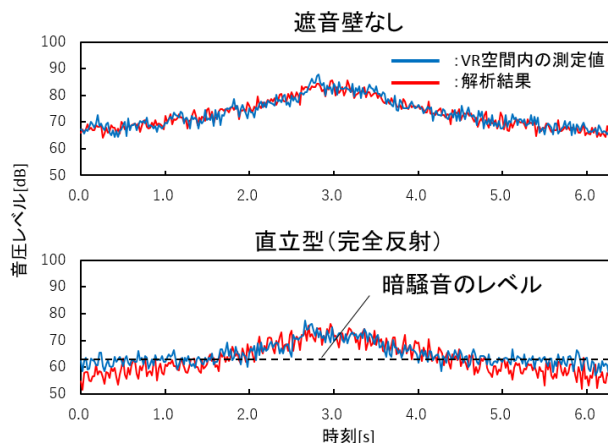


図-11 解析結果と VR 空間内の側定値との比較 (移動音源: 大型車)

## 5. おわりに

本研究では、高速多重極境界要素法による大規模音場解析と、その結果を元に VR 技術を用いた騒音評価システムの構築を行い、以下の結論を得た。

- 複雑な幾何形状を有する大規模音場解析を行い、遮音壁の形状や境界条件の差異による影響を定量的に示した。
- 時変量み込み演算を用いた可聴化を行い、音源の移動を簡便に再現することが可能となった。
- HMD による騒音評価システムの構築を行い、大型の設備を用いることなく解析結果を音と映像により体験することが可能となった。

今後の課題として、より実際の遮音壁に近い、低い反射率の境界条件での解析の実行、実測値との比較による時変量み込み演算の妥当性の検証が挙げられる。

## 参考文献

- 1) 岡村理一郎, 吉川仁, 高橋徹, 高木貴弘, 榎山和男: 安定化手法を用いた時間域多重極境界要素法に基づく道路交通騒音解析とその可聴化システム, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.72, No.2, pp.I.257-I.264, 2016.
- 2) 今井啓太, 吉町徹, 榎山和男: 吸音モデルを考慮したインパルス応答解析手法の構築と VR 技術を用いた可聴化, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.75, No.2, pp.I.259-I.267, 2019.
- 3) 中島弘史, 中臺一博, 長谷川雄二, 辻野広司: 時変拡張ビームフォーミングによる移動音源の抽出, 人工知能学会全国大会論文集, Vol.21, 3C8-4, 2007.
- 4) 吉町徹, 谷川将規, 榎山和男: 擬似インパルス応答解析に基づく騒音予測手法の構築と VR 技術を用いた可聴化, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.72, No.2, pp.I.207-I.216, 2016.
- 5) C. Lubich: Convolution quadrature and discretized operational calculus. I, Numerische Mathematik, Vol.52, pp.129-145, 1988.
- 6) 谷川将規, 江嶋孝, 榎山和男, 志村正幸: 混合交通を考慮した VR 技術に基づく道路交通騒音評価システムの構築, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.70, No.2, pp.I.195-I.202, 2014.

# 地下埋設物に対する MR 可視化システムの構築

Development of MR visualization system  
for underground buried objects

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 藤 飛  
Fei TENG

## 1. はじめに

近年, AR(Augmented Reality・拡張現実), MR(Mixed Reality・複合現実) 技術は建設分野における様々な分野・用途に対して適用が試みられている。中でも, 地上から埋設物・構造物を直接確認することができない地下構造物・埋設物の可視化は施工や維持管理等における諸作業を安全かつ効率的に行う上で有効であるといえる<sup>3)</sup>。

筆者は, 既往の研究において空間の三次元形状の認識と自己位置の推定を同時に行う SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 技術を搭載したスマートフォンに着目し, 空間の三次元的な特徴点マッチングが可能な SLAM 技術を用いた AR 可視化システムの構築を行い, 施工現場における地下構造物・埋設物の可視化に適用し, 施工・維持管理等における支援システムとしてその妥当性と有効性を示した<sup>1)</sup>。しかしスマートフォンによる AR 可視化は, 画面が小さく, 操作が困難となり, また施工現場で可視化を行う際に手が塞がってしまう, という使用上の問題点がある。

一方, 近年同じく SLAM 技術を有する装着型 MR デバイスとして, Microsoft 社の HoloLens 2 が注目されている。HoloLens 2 は視界を覆う事なく, 目視しているリアルな景色にそのまま CG やデジタル情報が合成表示される。利用者自身の視界の上に CG のみが重畳されるため描画の遅延等による違和感が少ない<sup>2) 6)</sup>, また両手が自由となるため建設現場での安全性にも優れるという利点が挙げられている。

そこで本報告では, 装着型の MR デバイスに着目し, 地下埋設物 3D モデルを紙媒体設計図面に重畳させるシステムおよび現地において CAD モデルを重畳させるシステムの構築を行った。なお, 本システムの重畳の精度を向上させる手法および有効な可視化表示に関する提案を行い, 地下埋設構造物等の施工・維持管理等における支援システムとしての有用性を検討する。

## 2. 開発環境

本研究では, Microsoft Mixed Reality Toolkit (MRTK) v2.5.0 ライブラリを用いた MR 可視化システムの構築を行う。開発環境は Unity 2019.4.11f1(64-bit) を使用し, プログラミング言語は C#を用いた。

Microsoft Mixed Reality Toolkit (MRTK) とは, Mixed Reality アプリケーション向けのオープンソースのクロスプラットフォーム開発キットである。MRTK を Unity プロジェクトにインポートし, Unity 上で Mixed Reality エクスペリエンスを構築するための基本的なコンポーネントや, 共通のインタラクションや, UI コントロールを提供している。

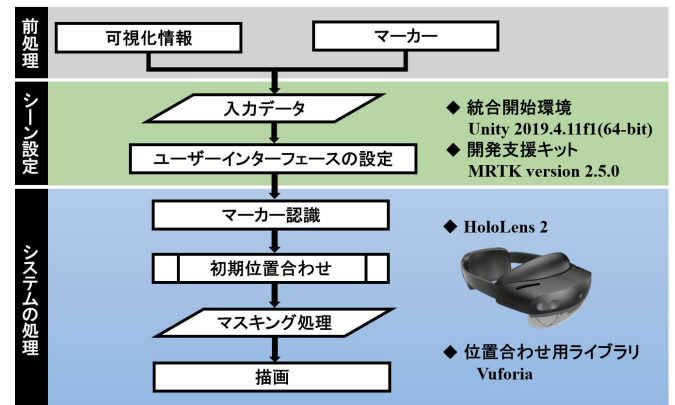


図-1 本システムのフローチャート

## 3. 本システムの概要

本研究で構築した HoloLens 2 を用いた MR 可視化システムのフローチャートを図-1 に示す。本システムでは前処理, シーン設定とシステムの処理に分かれている。各工程について以下に示す。

### (1) 入力データ

可視化モデルである 3D の CAD モデルを図-2 に示すような平面直角座標系における座標と形状情報を持つ地下埋設物の CAD で作成した 3 次元モデルを用いる。全てのモデルを統合開発環境 Unity に対応した FBX 形式に変換し入力データとして与える。

設計図面に対する CAD モデルの MR 可視化では, 図-3 に示すような位置関係を考慮し, 地下埋設物の地上部分にあたる市販の 3D 都市モデルを用いた。

また, 現地での CAD モデルの MR 可視化では, 図-6 に示す目盛り付き開口部モデルを用いた。開口部モデルは地面に四方形領域を設置し, 四方形領域以外の CAD モデルを非表示とするマスキング処理をして, 可視化したい地下埋設構造物の範囲を限定する“覗き窓”である。

### (2) ユーザーインターフェースの設定

モデルの切り替え, モデルの配置などのデジタルコンテンツを実現するため, 本システムでは MRTK の UX ビルディングブロックのボタンなどの UI 部品を用いて図-4 に示すような操作盤を作成した。これについては適用例において詳しく説明する。

### (3) マーカー認識・初期位置合わせ

本システムでは, コンテンツの開始位置が原点 (0,0,0) になるため, 重畳するモデルのデジタルの座標系に現実空間の座標系を合わせる必要がある。

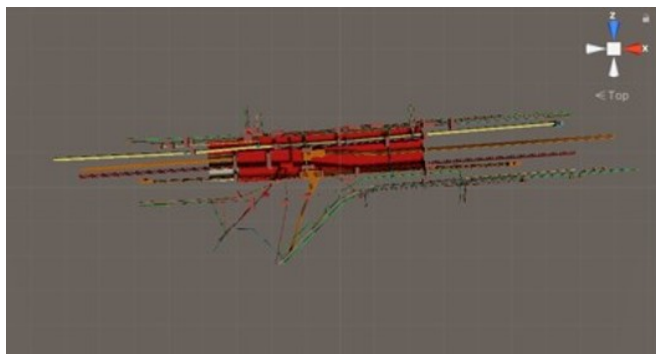


図-2 CAD データから作成されたモデル

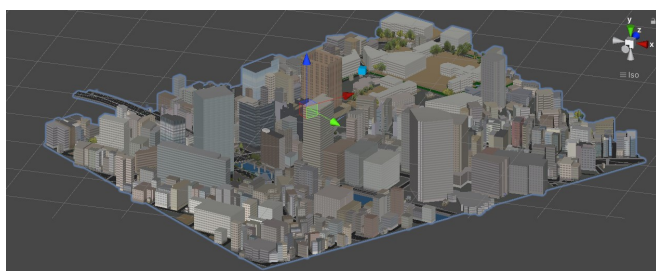
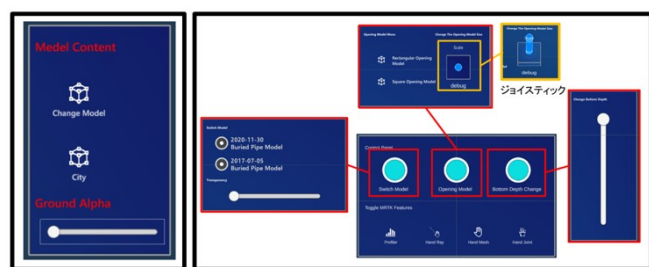


図-3 都市モデル



(1) 設計図面用  
操作盤

(2) 現場用操作盤

図-4 操作盤

そこで本研究では、初期位置合わせに Vuforia の機能である画像認識を用いる<sup>4)</sup>。画像認識は、あらかじめマーカーとして設定した任意画像の特徴点を検出する機能である。図-5 に初期位置合わせ手法を示す。具体的には、マーカーとして設定した任意画像を HoloLens 2 が検出すると、マーカーの座標系となるその画像の中心点の座標と角度を取得し、現実空間のワールド座標系に置き換える。そして、モデルの重畳させたい位置とマーカー設置地点との距離をあらかじめ設定しておくことで、CAD モデルの座標系をマーカー座標系に合わせ、ワールド座標系における重畳位置を決定する。

設計図面に対する CAD モデルの MR 可視化では、初期位置合わせにおいて、図-7 のように設計図面の右下にマーカー画像を貼り付ける。

また、現地での CAD モデルの MR 可視化については、既往のシステムでは図-9 (1) のように、三脚を用いてマーカーを設置していたが、この方法では、人の手でマーカーの

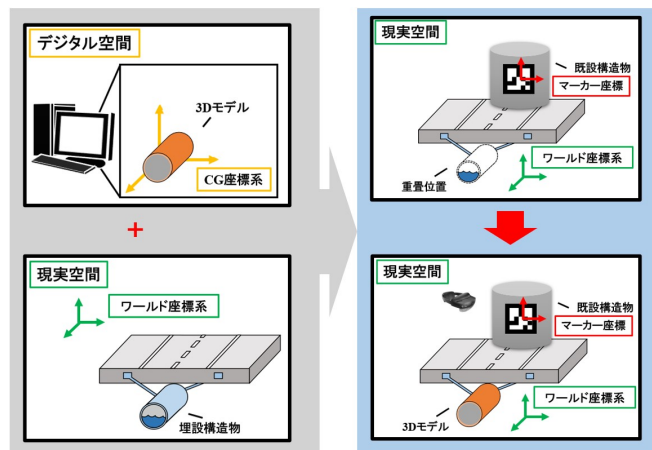


図-5 初期位置合わせ

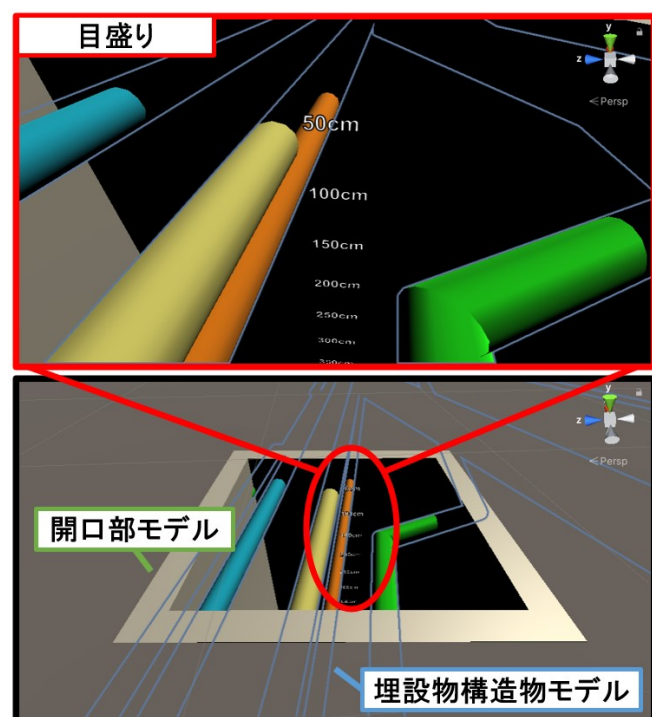


図-6 開口部モデル

位置・角度を決定するため、正しく重畳するのに、三脚の位置・角度・地表面からの高さといった項目を調整する必要があった。そこで本研究では、現地における CAD モデルの重畳の精度を向上させるために、図-9 (2) のような平面直角座標系における座標が分かる既設構造物に対してマーカー設置を行う。

#### (4) マスキング処理・描画

MR コンテンツにおいては、一般に重畳された埋設構造物の CAD モデルは現実空間の物体との上下関係を正しく表現することが困難なため、地下埋設物を表示すると地上に浮いているように見えるという問題点が挙げられる。そのため、本システムでは、前叙した開口部モデルを用いたマスキング処理を行うことで、オクルージョン処理を行う。図-6 に示すように、開口部以外の平面領域においては見え



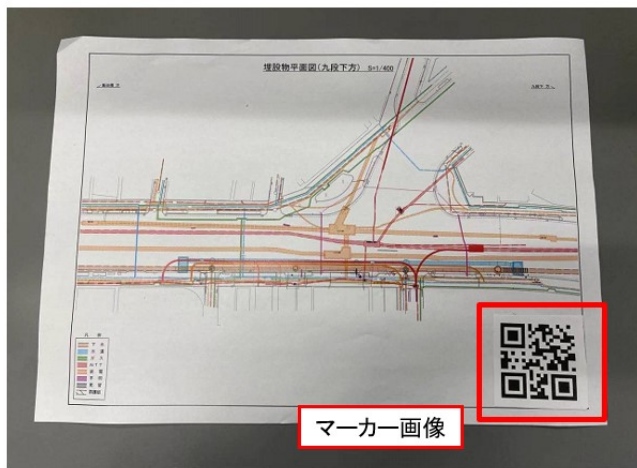


図-7 マーカー画像を貼り付けた設計図面

る範囲を検定する板を設置し、マスキング処理を行う。そうすることで、MR 可視化の際に、開口部モデルの以外の CAD モデルを見えないようにできる。

#### 4. 図面に対する CAD モデルの MR 可視化

設計図面に対する地下埋設物の CAD モデルを重畳させる MR 可視化システムの適用について述べる。

##### (1) 可視化情報

可視化情報としては、図-2 に示すように、CAD データから作成された 3 次元座標を持つ地下埋設物の 3D モデル二つを室内空間に合わせて縮尺補正したものと、図-3 に示した地下埋設物の地上部分にあたる 3 次元都市モデルを用いる。都市モデルと地下埋設物の 3D モデルが重なる位置・角度を事前に考慮し、重畳位置を決定している。

##### (2) 可視化結果

本システムの重畳結果を図-8 に示す、システムのアプリケーションを起動後、図-7 のように紙媒体の設計図面に貼り付けたマーカー画像を認識させることで、CAD モデルの重畳位置を決定する。その後、図-8 (1) の示すように、操作盤上のボタン操作で、都市モデルを埋設物構造物の上に表示させることが可能となる。そして、図-8 (2) の示すように、操作盤スライダー操作で都市モデルの地面部分を透明化することができる。

#### 5. 現地での CAD モデルの MR 可視化

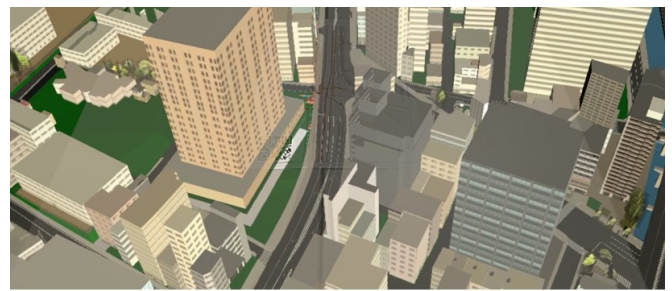
現地で地下埋設物の CAD モデルを重畳させる MR 可視化システムの適用について述べる。

##### (1) 可視化情報

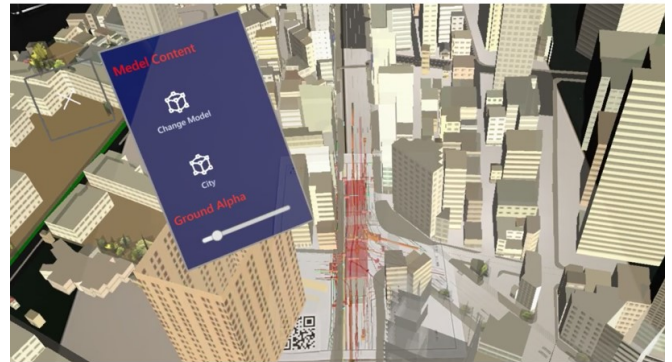
可視化情報としては、図-2 に示すように、CAD データから作成された実寸大の 3 次元座標を持つ地下埋設物の CAD モデルと図-6 に示した地表面の開口部モデルを用いる。

##### (2) 重畳の高精度化の検討

従来のシステムでは、三脚によるマーカー設置を行ってきたが、三脚を座標が既知の基準点上に正しく据え付けた上で、マーカーを地表面に対して垂直に設置するとともに向きの調整の必要がある、そのため、手調整による時間が



(1) 都市モデルの重畳



(2) 道路の透明化

図-8 設計図面に対する CAD モデルの MR 可視化



(1) 三脚による位置合わせ

(2) 既設構造物による位置合わせ

図-9 現地での位置合わせ手法

かかってしまうという問題点があった。

本研究は、この問題を解決するために、図-9 に示すように、既設構造物にマーカーの設置を行った。マーカー画像を設置する既設構造物は、可視化する CAD モデルに合わせ、平面直角座標系で測量した座標を用いることで、重畳精度の向上を図る。マーカー画像を設置する際、地表面からの高さ 1m のところに配置することを Unity 内で指定する。既設構造物に対しマーカーを設置することで、従来の三脚によるマーカー設置よりも設置時にかかる工程が減り、マーカー設置が容易になった。また、図-10 は位置合わせより現場にあるマンホール位置近を示したものである。図の示すように、マンホールとその CG モデルが正しい位置に

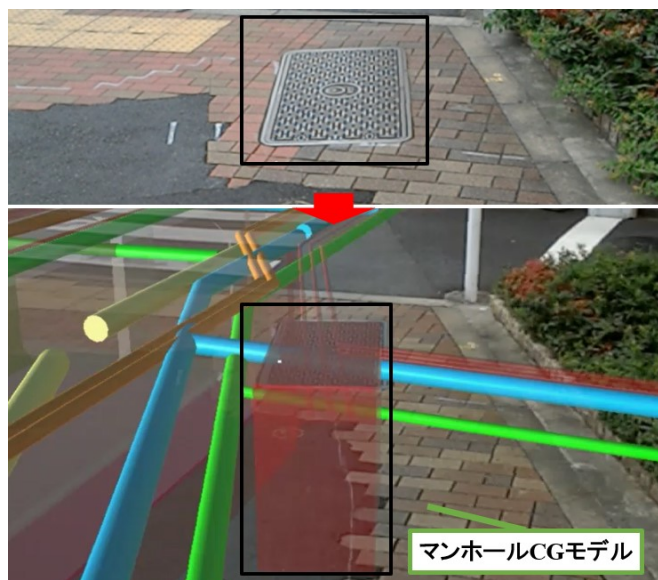


図-10 重畳位置が正しい様子

重畳されていることが確認できた。

### (3) 可視化結果

図-11に示すように、図-11(1)は埋設物構造物モデル全体表示の重畳結果となる。また、本システムでは複雑な現場状況に応じてモデルの透過率変更できる機能を追加した。操作盤上のモデルの透過率を管理しているスライダーで、モデルの色の透過率を変えて表示させることができる。しかし、一般に地下埋設物をマスキング処理することなく表示すると地上に浮いているように見えるという問題点が挙げられる。

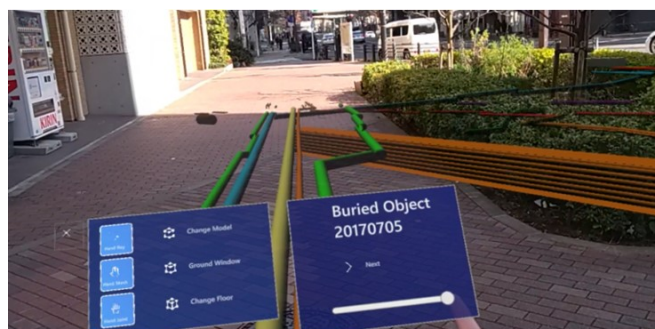
そこで開口部モデルを用いたマスキング処理を行った、開口部モデルの重畳結果は図-11(2)。本システムでは、開口部モデルが2種類を用意したため、操作盤上でのボタン操作で切り替えて重畳することができる。

また、使用上の向上のために、ジョイスティックを用いて開口部モデルの大きさ変更するような機能を追加した、また開口部モデル底面の深さを変更できる機能を追加した。底面の深さの変更を行うことで、鉛直方向に対する理解と全体表示で確認できなかった埋設物の埋まっている深さの理解が容易となる。これより、システムの操作性の向上ができ、現場において複雑な状況に応じて対応できるようになった。

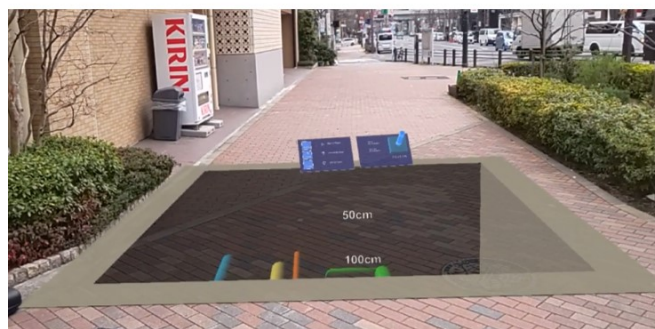
## 6. おわりに

本論文では、地下埋設物の設計・施工・維持管理を支援する可視化システムの構築を行った。具体的には、地下埋設物 3D モデルを紙媒体の設計図面に重畳させるシステムの構築と現地において CAD モデルを簡便にかつ正確に重畳させる MR 可視化システムの構築を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 設計図面に対する MR 可視化システムでは、形状や上下関係の理解が容易になるとともに、都市モデル



(1) 全体表示



(2) 開口部モデルの重畳

図-11 現場での MR 可視化結果

を併せて重畳させることで、位置把握を行うことが可能となった。

- 現場における MR 可視化システムでは、既設構造物に対しマーカーを設置することで、重畳が簡便にかつ高精度に行えることが可能となった。また、開口部モデルを用いることで、現実感を損なわない MR 可視化が可能となった。

以上より、本システムは地下埋設物構造物の設計・施工・維持管理に有効なシステムとなり得る。

今後の課題として、移動によって地下埋設物構造物モデル重畳のずれについてその定量化と改善方法について検討を行う。

### 参考文献

- 池田直旺, 花立麻衣子, 檜山和男, 車谷麻緒, 吉永崇, 前田勇司: SLAM 技術に基づく空間情報を用いた AR 可視化システムの構築とその適用性の検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.73, No2, pp.I.48-I.54, 2017.
- 吉永崇: 次世代 AR デバイスの紹介—Microsoft HoloLens と Google Tango の概要と利用事例—, 可視化情報学会誌, Vol.37, No.146, pp.128-133, 2017.
- 羽鳥文雄, 矢吹信喜, 小森絵未, 福田知弘: 複数マーカーを用いた拡張現実感技術の施工現場への応用, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.69, No.2, pp.I.24-I.33, 2013.
- Vuforia Developer Portal: <https://developer.vuforia.com>, 2020/11/15 閲覧.
- MixedRealityToolkit-Unity: <https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity/releases>, 2021/01/15 閲覧.
- Mixed Reality Technology: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality>, 2020/03/05 閲覧.



## IGA によるポテンシャル流れ解析のメッシュ依存性に関する研究

Study on mesh dependence of Isogeometric Analysis in potential flow problem

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 吉田 也真都  
Yamato YOSHIDA

## 1. はじめに

土木, 建築, 精密機械など様々な分野において, CAD による設計が一般的に行われている. しかし従来の有限要素法では, CAD で描かれた形状を解析する際, メッシュ生成ソフトで CAD 形状を表現した解析メッシュを生成し, そのメッシュをもとに解析を行っていた. そのため, CAD 形状が有限要素法で用いる関数によって近似的に表現されることや, メッシュ生成ソフトを用いる手間が生じるなどの問題があった. そこで近年, T.J.R Hughes らによって提案された IGA(Isogeometric Analysis)<sup>1) 2)</sup> が注目を浴びている. この手法では CAD の形状表現に用いられる Spline 関数を形状関数に用いることで, CAD で描かれた形状モデルを解析領域として完全に表現して解析を行える. また, IGA では CAD データから解析メッシュが生成されるため, CAD における設計から解析メッシュの生成, そして有限要素解析までをシームレスに行うことができる.

本研究では, IGA の基礎研究として, 二次元及び三次元ポテンシャル流れ解析において IGA を適用し, 従来の有限要素法による解析結果と比較をすることで, IGA の有効性の検証を行った. さらに, IGA における解析メッシュの依存性について検討するため, IGA の要素の細分化手法であるノット挿入において, ノットを挿入する方向の違いによる解析結果の比較を行ったことに加え, 解析に使用する NURBS 基底関数の次数の違いによる解析結果の比較を行った.

## 2. 数値解析手法

二次元ポテンシャル流れ解析における数値解析手法について記す.

## (1) NURBS

本研究では形状関数に用いる Spline 関数として, 制御点に付与される重みによって, 少ない要素数で様々な形状を表現することができる NURBS 関数を用いた. 二次元の NURBS 関数は二方向の B-Spline 基底関数と制御点に付与される重みによって表現される. B-Spline 基底関数とは式 (1) の Cox de Boor の漸化式によって定義される関数である.

$$N_{i,0}(\xi) = \begin{cases} 1 & \xi_i \leq \xi < \xi_{i+1} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (p=0)$$

$$N_{i,p}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} N_{i,p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\xi) \quad (p=1, 2, 3, \dots)$$
(1)

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,  $\xi_i$  はノットと呼ばれるパラメータ空間の座標である. このノットの並び,  $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1}\}$  をノットベクトルといい, IGA ではこのノットベクトルによって要素が決定される. また, 制御点とは CAD 形状を決定づける物理空間上の点である. 式 (1) に示した B-Spline 基底関数を用いて NURBS 関数は式 (2) のように表される.

$$R_{i,j}^{p,q}(\xi, \eta) = \frac{N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) w_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) w_{i,j}} \quad (2)$$

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,  $w_{i,j}$  は制御点に付与される重みである.

## (2) 定式化

定式化の流れは従来の有限要素法と同様である. 支配方程式である Laplace 方程式 (3) に対して, 重み付き残差法を適用し, 離散化を施すことで各要素における弱形式 (4) を得る.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

$$\int_{\Omega_e} \left( \frac{\partial \phi_e^*}{\partial x} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} + \frac{\partial \phi_e^*}{\partial y} \frac{\partial \phi_e}{\partial y} \right) d\Omega = - \int_{\Gamma_e} \phi_e^* q d\Gamma \quad (4)$$

ここで,  $\phi_e^*$  は各要素での重み関数,  $\Omega_e$  は要素領域,  $\Gamma_e$  は要素境界,  $q$  は要素境界に対する外向き法線方向の流速である. 式 (4) において, 各要素のポテンシャルと重み関数の補間をする際, IGA では形状関数に Spline 関数が用いられるが, 本研究では式 (2) に示した NURBS 関数を用いたので, 各要素でのポテンシャルと重み関数は式 (5), (6) のように表現される.

$$\phi_e(\xi, \eta) = \sum_{I=1}^{n_{en}} R_{eI}(\xi, \eta) \phi_I \quad (5)$$

$$\phi_e^*(\xi, \eta) = \sum_{I=1}^{n_{en}} R_{eI}(\xi, \eta) \phi_I^* \quad (6)$$

ここで,  $n_{en}$  は要素を構成している制御点の数である. 式 (5), (6) を式 (4) に代入し, 重み関数の任意性を考慮することで, 式 (7) が得られる.

$$\int_{\Omega_e} \left( \frac{\partial R_{eI}}{\partial x} \frac{\partial R_{eJ}}{\partial x} + \frac{\partial R_{eI}}{\partial y} \frac{\partial R_{eJ}}{\partial y} \right) d\Omega \phi_{eJ} = - \int_{\Gamma_e} R_{eI} q d\Gamma \quad (7)$$

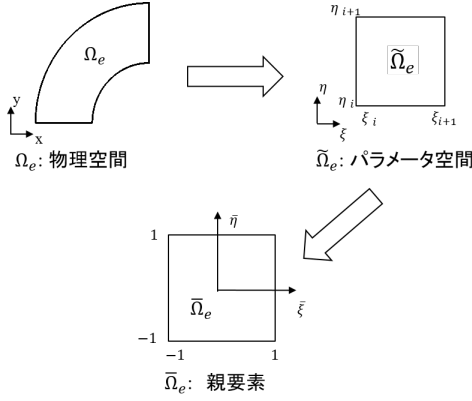


図-1 IGA における変数変換

ここで、形状関数となる Spline 関数は物理空間の関数ではなく、パラメータ空間上のノットによって定義される関数であるため、まず、物理空間  $\Omega_e(x, y)$  からパラメータ空間  $\tilde{\Omega}_e(\tilde{\xi}, \tilde{\eta})$  に変数変換を行う必要がある。そして、各要素での積分を行う際、解析的な積分が困難となるためにパラメータ空間  $\tilde{\Omega}_e(\tilde{\xi}, \tilde{\eta})$  から親要素  $\bar{\Omega}_e(\bar{\xi}, \bar{\eta})$  に変数変換を行い、数値積分によって左辺行列と右辺ベクトルを求める。このように IGA では変数変換を二度施す必要がある(図-1)。二度の変数変換を施すことによって式 (7) は式 (8) のようになる。

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{K} |J_1 J_2| d\bar{\xi} d\bar{\eta} \\ = \int_{-1}^1 \mathbf{q}_\xi |J_1 J_2| d\bar{\xi} + \int_{-1}^1 \mathbf{q}_\eta |J_1 J_2| d\bar{\eta} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{K}$  は Spline 関数の微分値のマトリックス、 $\mathbf{q}_\xi, \mathbf{q}_\eta$  はそれぞれ  $\xi, \eta$  方向に対して外向き法線方向の流速ベクトルである。また、 $J_1$  は物理空間とパラメータ空間の変数変換のヤコビ行列、 $J_2$  はパラメータ空間と親要素の変数変換のヤコビ行列でそれぞれ式 (9), (10) のようになる。

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial \bar{\xi}} & \frac{\partial \eta}{\partial \bar{\xi}} \\ \frac{\partial \xi}{\partial \bar{\eta}} & \frac{\partial \eta}{\partial \bar{\eta}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

そして、式 (8) を数値積分によって求め、左辺行列、右辺ベクトルの作成を行い、連立一次方程式を解くことによって未知数であるポテンシャルを求める。なお、本研究では式 (8) の数値積分として式 (11) に示す Gauss 求積法を用いた。

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(\bar{\xi}, \bar{\eta}) d\bar{\xi} d\bar{\eta} = \sum_{i=1}^{gn} \sum_{j=1}^{gn} F(\bar{\xi}_i, \bar{\eta}_j) W_i W_j \quad (11)$$

ここで、 $gn$  は積分点数、 $\bar{\xi}_i, \bar{\eta}_j$  は積分点の座標、 $W_i, W_j$  は積分点の重みである。

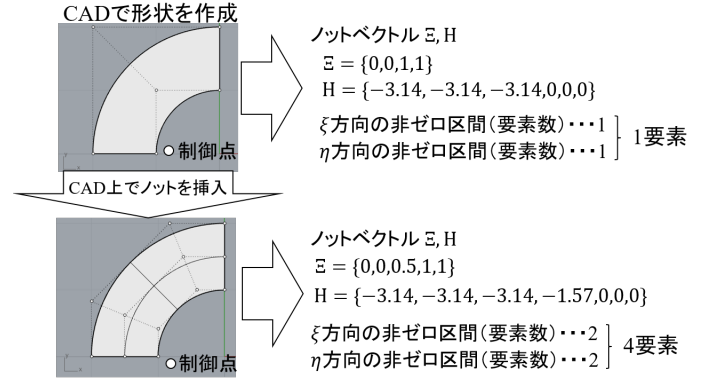


図-2 IGA における要素とノット挿入

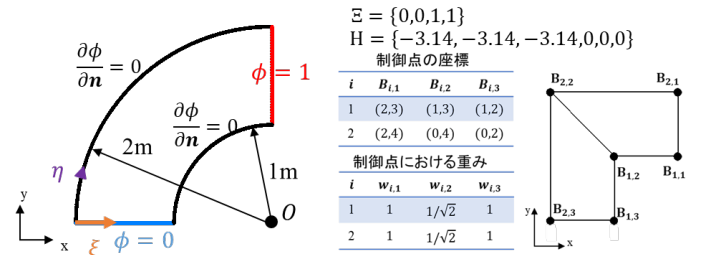


図-3 解析モデルと CAD データ

### (3) ノット挿入

IGA における要素の細分化手法であるノット挿入について記す。IGA では、CAD 形状を表現するパラメータであるノットベクトルの非ゼロ区間によって解析メッシュが定義される。そのため、CAD 上で描いた形状に対して、ノット挿入を行い、ノットベクトルの非ゼロ区間を増やすことで、要素を細分化することができる。ここで図-2 に IGA における要素の説明とノット挿入の例を示す。図-2 に示す扇形の形状はノット挿入を行う前は  $\Xi = \{0, 0, 1, 1\}$ ,  $H = \{-3.14, -3.14, -3.14, 0, 0, 0\}$  というノットベクトルで表現されている。この時、非ゼロ区間は  $\Xi$  が 1,  $H$  も 1, であるので、要素数は  $1 \times 1$  で 1 となる。この状態のノットベクトルに対して、CAD 上の操作で  $\Xi, H$  それぞれの中間にノット挿入を施す。これにより、 $\Xi$  に 0.5,  $H$  に -1.57 というノットが挿入され、非ゼロ区間が  $\Xi$  が 2,  $H$  も 2 となり要素数は  $2 \times 2$  で 4 要素となる。このように、IGA では CAD 上でノット挿入の操作を行うことにより、元の形状を保ったまま要素を細分化することができる。

## 3. 数値解析例 1

二次元ポテンシャル流れ解析における数値解析例を示す。

### (1) 解析条件

解析領域は図-3 に示す扇形の形状で、この形状の CAD データを図-3 の右側に示す。ここで、B-Spline 基底関数の次数は  $\xi$  方向が一次、 $\eta$  方向が二次である。また、ノットベクトル  $\Xi, H$  の方向、 $\xi, \eta$  を解析領域に示している。

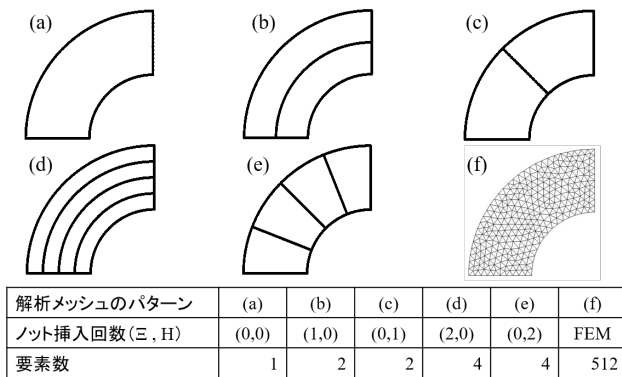


図-4 解析メッシュ

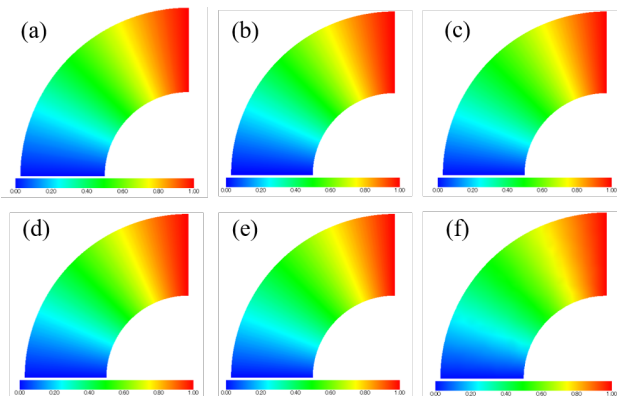


図-5 図-4 の各メッシュにおける解析結果

#### (a) ノット挿入の方向の違いによる検証

本検証では図-4 に示すようなノット挿入を施した解析メッシュを用いて結果の比較を行う。ノット挿入を行う前のメッシュ (a), ノットの挿入を行ったメッシュ (b)~(e), 比較対象として三角形一次の有限要素メッシュ (f) (要素幅約 0.1m) で解析を行う。なお、ノット挿入についてはノットの間隔が等間隔になるように施した。

#### (b) NURBS 関数の次数の違いによる検証

本検証では、図-4 のメッシュ (a) において  $\xi$  方向、 $\eta$  方向の B-Spline 基底関数の次数をそれぞれ一次ずつ上げた、 $\xi$  方向二次、 $\eta$  方向二次のメッシュと  $\xi$  方向一次、 $\eta$  方向三次のメッシュで解析し、結果の比較を行う。なお、基底関数の次数はノット挿入と同様に、CAD 上の操作で高次化させることができる。

### (2) 解析結果

#### (a) ノット挿入の方向の違いによる検証

図-5 に図-4 の各メッシュにおける解析結果を示す。図-5 に示す結果から、IGA では 1 要素や 2 要素といった非常に少ない要素数でも定性的に良い結果が得られていることが確認できる。そして、図-6 に定量的な評価として、円の中心から半径 1.5m 上 ( $\xi = 0.5$ ) におけるポテンシャルの値をプロットしたグラフと、厳密解との相対誤差を示す。ノット挿入を行っていないメッシュ (a) では図-5 で定性的に良い結果が得られていたものの、厳密解と約 3% の相対誤差が生じていた。また、 $\xi$  方向のノットベクトルにノット挿入

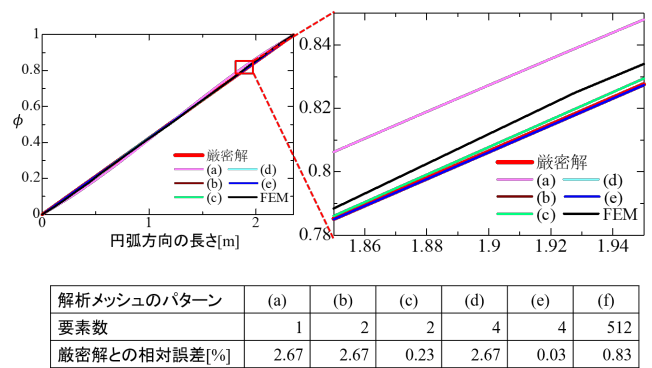


図-6 円の中心から 1.5m ( $\xi=0.5$ ) 上のポテンシャル

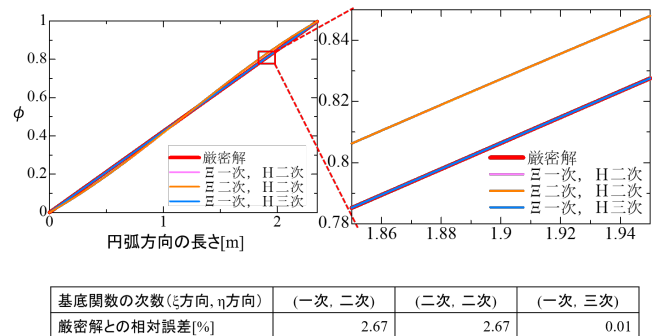


図-7 NURBS 関数の次数の違いによる解析結果

を行ったメッシュ (b), (d) に関しては、メッシュ (a) と結果が一致していた。一方、 $\eta$  方向のノットベクトルにノット挿入を行ったメッシュ (c) と (e) による解析では、相対誤差を 1% 以下に抑えることができ、メッシュ (f) の有限要素法の解析結果よりも精度の良い結果となった。このことから、解析領域を厳密に表現できる IGA でも、高精度な解を得るには要素の細分化を行う必要があり、ノット挿入は適切な方向に施す必要があるといえる。また、ノット挿入を適切な方向に施すことによって、従来の有限要素法よりも少ない要素数で、高精度な解を得られるといえる。

#### (b) NURBS 関数の次数の違いによる検証

メッシュ (a) での解析結果と、メッシュ (a) において  $\xi$  方向と  $\eta$  方向の B-Spline 基底関数の次数をそれぞれ一次ずつ上げた解析結果において図-6 と同様に円の中心から半径 1.5m 上の円周におけるポテンシャルをプロットしたものと、それらの相対誤差を図-7 に示す。次数を上げる前の結果と  $\xi$  方向の基底関数の次数のみを一次上げたメッシュでの解析結果は一致していたが、 $\eta$  方向の B-Spline 基底関数の次数を一次上げたメッシュにおける解析では、厳密解との相対誤差を 0.01% まで抑えることができた。この結果から、基底関数の高次化においても、ポテンシャルの流れに沿った方向の B-Spline 基底関数を高次化することで高精度な解が得られるということが確認された。

## 4. 数値解析例 2

次に三次元解析に拡張した数値解析例を示す。



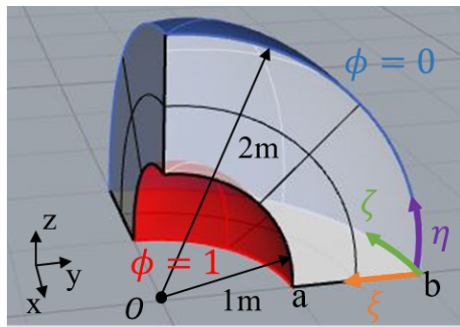


図-8 解析領域

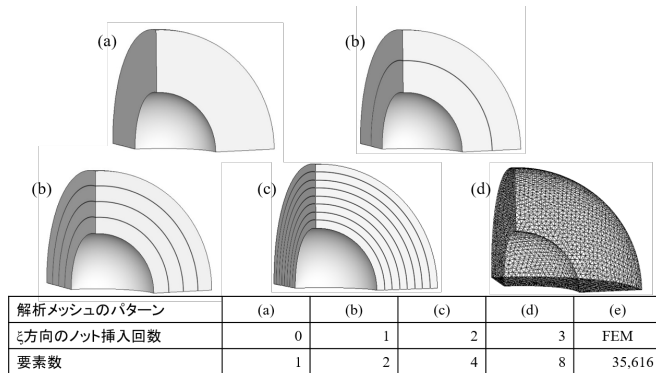


図-9 解析メッシュ

### (1) 解析条件

解析条件は図-8 に示す通りで、内側と外側の球面に Dirichlet 境界条件を図のように与え、その他の面には Neumann 境界条件で 0 を与える。なお、 $\xi, \eta, \zeta$  方向の B-Spline 関数の次数はそれぞれ一次、二次、二次である。解析メッシュは図-9 に示す通りで、二次元解析の結果を踏まえ、ポテンシャルの流れに沿った方向である  $\xi$  方向のノットベクトルに対してのみノット挿入を施し、参照解と比較を行う。なお、参照解はメッシュ (e) (要素幅約 0.05m の四面体一次要素) での解析結果とする。

### (2) 解析結果

図-10 に図-9 での解析結果を示す。この図から、二次元の時と同様、少ない要素数でも定性的に良い結果を得られていることが確認できる。また、図-11 に図-8 の辺 ab 上 ( $\xi$  軸上) におけるポテンシャルのプロットと各メッシュでの参照解との相対誤差、並びに解析に要した時間を示す。この図から、わずか 8 要素という要素数で相対誤差 1% 未満の精度で解析を得られていることが確認できた。また、IGA では少ない要素数で高精度に解析できることから、解析時間を抑えることができ、本解析では IGA による解析はいずれもメッシュも、倍精度実数の範囲で計測できないほど短い解析時間となった。

## 5. おわりに

本研究では、ポテンシャル流れ解析を取り上げ、有限要素法による解析結果と比較することで IGA の有効性を検証した。また、解析メッシュの依存性について検討するため、

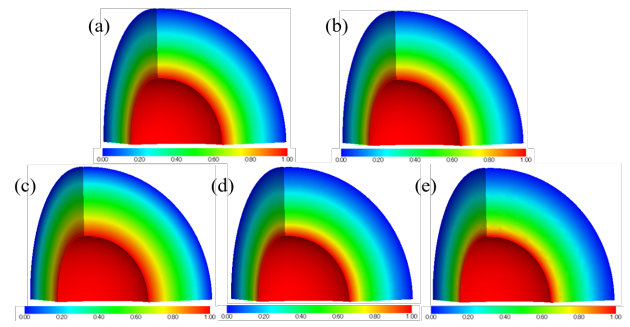
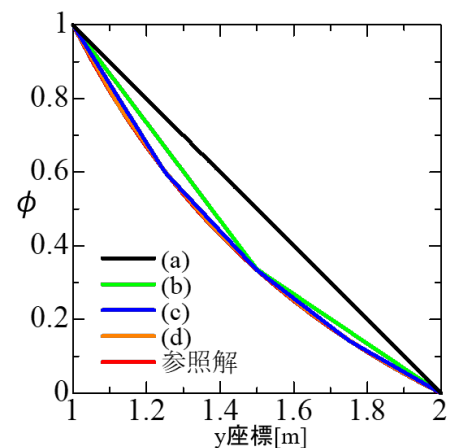


図-10 解析結果



	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
参照解との相対誤差[%]	49.7	11.1	3.1	0.5	
解析時間[s]	いずれも $10^{-15}$ 未満				1,364

図-11 辺 ab 上におけるポテンシャルのプロット

ノット挿入を施す方向の違いと、NURBS 基底関数の次数の違いによる解析結果の比較を行い、以下の結論を得た。

- CAD 形状を近似することなく解析できる IGA でも要素の細分化や基底関数の高次化を施す必要がある。
- IGA では適切な方向にノット挿入を行う、もしくは基底関数の次数を一次上げることにより、要素数が一桁でも、相対誤差が 1% 未満となる高精度な解が得られた。
- IGA では少ない要素数で高精度な解析ができることから、計算コストも小さくなり、非常に短い解析時間で解析を行うことができる。

今後の課題として、より複雑な形状での解析、高次要素を用いた有限要素法との比較があげられる。

### 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, 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.

## Space-Time 有限要素法による浅水長波流れ解析の精度検証

Accuracy verification of shallow water flow analysis using Space-Time finite element method

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 中村 光太郎  
Kotaro NAKAMURA

## 1. はじめに

流体運動は多くの場合、境界、あるいは界面の運動を伴った問題となる。この場合、境界の位置は時間とともに変化し、移動する境界、すなわち移動境界問題としての取り扱いが必要となる。このような移動境界を有する問題の取り扱い手法として、大きく二種類の方法に分類することができる。一つは、固定メッシュを用いて境界または界面を間接的に表現する Euler 的手法、もう一つは、移動メッシュを用いて直接的に表現する Lagrange 的手法である。Euler 的手法は、複雑形状に対して適応しやすく、計算時間、計算記憶容量などにおいて有利であるが、計算アルゴリズムが容易である反面、移動境界上の条件が厳密でないなどの問題点がある。そこで、移動境界の位置及びその周辺の物理量に対して高精度な解析が可能である Lagrange 的手法であり、その中でも、時間・空間領域に対し、有限要素法の離散化を行う Space-Time 有限要素法<sup>1)</sup>に着目した。

著者の研究グループでは、Space-Time 有限要素法を、これまで浅水長波方程式に対する適用を行ってきたが、<sup>2) 3)</sup> 本研究では、Space-Time 有限要素法を浅水長波方程式に適用し、ダム破壊問題での解析を行った。また、時間方向に差分法を用いる手法との比較により、Space-Time 有限要素法の精度を検証した。

## 2. 数値解析手法

## (1) 基礎方程式

基礎方程式として、以下のような浅水長波方程式を用いる。

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

各ベクトル、各マトリックスは以下ようになる。

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} H \\ u_1 H \\ u_2 H \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ -c^2 \frac{\partial z}{\partial x_1} - \frac{u_1 H C_f \sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{H} \\ -c^2 \frac{\partial z}{\partial x_2} - \frac{u_2 H C_f \sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{H} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c^2 - u_1^2 & 2u_1 & 0 \\ -u_1 u_2 & u_2 & u_1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -u_1 u_2 & u_2 & u_1 \\ c^2 - u_2^2 & 0 & 2u_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{11} = \nu \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -2u_1 & 2 & 0 \\ -u_2 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{12} = \nu \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -u_1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{21} = \nu \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -u_2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{22} = \nu \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -u_1 & 1 & 0 \\ -2u_2 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$C_f = \frac{gn^2}{H^{\frac{1}{3}}}$$

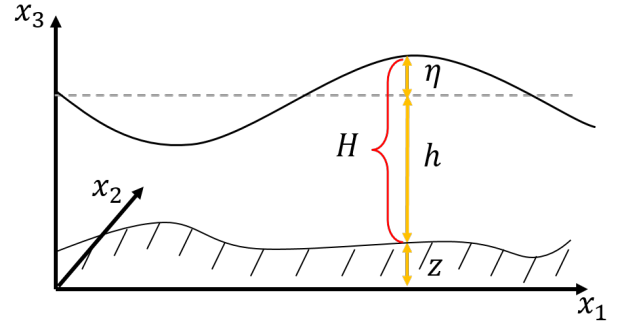


図-1 座標系と各変数

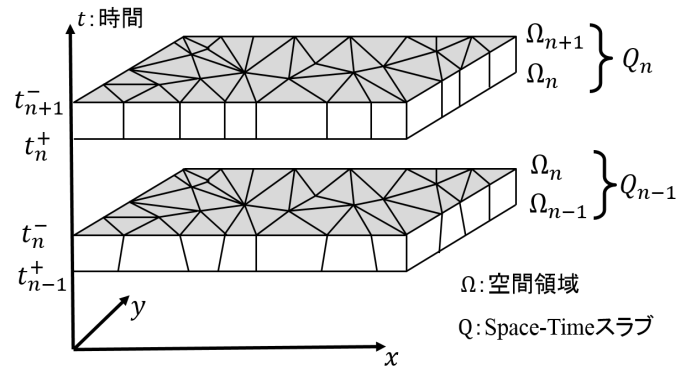


図-2 Space-Time slab

図-1 に示すような座標系を与えており、 $H$  は全水深、 $h$  は静水深、 $\eta$  は水位変動量、 $c$  は波速、 $z$  は河床高さである。また、 $\mathbf{U}$  は未知ベクトル、 $\mathbf{R}$  は勾配、摩擦ベクトル、 $\mathbf{A}_i$  は移流マトリックス、 $\mathbf{K}_{ij}$  は拡散マトリックス、 $u_i$  は各方向の流速、 $g$  は重力加速度、 $\nu$  は渦動粘性係数、 $n$  はマンニングの粗度係数である。

## (2) Space-Time 有限要素法

Space-Time 法は、空間と時間の双方に対して有限要素法を適用する手法であり、時間・空間領域 (Space-Time slab) 毎に独立に離散化を行う。Space-Time slab とは、図-2 に示すように、時刻  $t_n$  での空間領域  $\Omega_n$  と時刻  $t_{n+1}$  での空間領域  $\Omega_{n+1}$  を連結したものであり、ここで  $t_n^+$  と  $t_{n+1}^-$  の  $\pm$  は slab 内での上下を表している。その後、各々一つ前の Space-Time slab の情報をもとに slab 内での節点における未知量を求め、解き進んでいく方法である。このため時間刻み毎のメッシュ同士が幾何学的に連続である必要はない。

### (3) 定式化

式 (1) に対して、まず式 (1) に通常の有限要素法での定式化を示す。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \mathbf{U}^* \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \mathbf{R} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \left( \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left( N_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \tau (\mathbf{A}_i)^T \left( \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \mathbf{R} \right) d\Omega_e \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \delta \left( \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} \right) d\Omega_e = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

第一行目と第二行目の項は Galerkin 項で、第三行目の要素毎の積分の総和項は SUPG 法による安定化項であり、第四行目の要素毎の積分の総和項は Shock-Capturing 項で、不連続面での数値不安定性を回避するものである。また、 $\tau$ 、 $\delta$  は安定化パラメータであり、以下のように示される。

$$\tau_{SUPG} = \left( \frac{1}{(\tau_{SUGN1})^2} + \frac{1}{(\tau_{SUGN2})^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\tau_{SUGN1} = \left( \sum_{\alpha=1}^{n_{en}} (c|\mathbf{j} \cdot \nabla N_{\alpha}| + |\mathbf{u} \cdot \nabla N_{\alpha}|) \right)^{-1}$$

$$\tau_{SUGN2} = \frac{\Delta t}{2}$$

$$\delta = \tau_{SHOC} (||\mathbf{u}_{int}||)^2, \tau_{SHOC} = \left( \sum_{\alpha=1}^{n_{en}} |\mathbf{u} \cdot \nabla N_{\alpha}| \right)^{-1}$$

$$||\mathbf{u}_{int}|| = ||\mathbf{u}||$$

ここで、 $\Delta t$  は時間増分量、 $N_{\alpha}$  は形状関数である。次に、Space-Time 法により、 $t_n^+$  と  $t_{n+1}^-$  に囲まれた領域に着目して、時間方向の不連続量を含む形を考えると次式のようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega} \mathbf{U}^* \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} \right) + \left( \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) d\Omega dt \\ & + \int_{\Omega} (\mathbf{U}^*)_n^+ ((\mathbf{U})_n^+ - (\mathbf{U})_n^-) d\Omega \\ & = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_e} \mathbf{U}^* \cdot \mathbf{R} d\Omega_e dt \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、左辺第 1 項は通常の Galerkin 項、第 2 項は時刻  $t = t_n$  における解の連続性を弱く要求するものである。時刻  $n$  での物理量の不連続面は、

$$(\phi^h)_n^{\pm} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \phi(t_n \pm \varepsilon) \quad (4)$$

で表され、初期条件は以下のように定義する。

$$(\phi^h)_0^- = \phi_0 \quad (5)$$

ここで、 $\phi_0$  は物理量  $\phi$  の初期値である。

また、時間・空間共に一次で補間を行うと、未知関数、重み関数は以下ようになる。

$$\mathbf{U}(x_i, t) = \sum_{j=1}^{n_{np}} N_j(x_i) [\Theta_1(t) \mathbf{U}_j^{n+1} + \Theta_2(t) \mathbf{U}_j^n] \quad (6)$$

$$\mathbf{U}^*(x_i, t) = \sum_{j=1}^{n_{np}} N_j(x_i) [\Theta_1(t) (\mathbf{U}^*)_j^{n+1} + \Theta_2(t) (\mathbf{U}^*)_j^n] \quad (7)$$

ここで、 $N_j(x_i)$  は空間方向の補関数、 $np$  は Space-Time slab における節点数であり、この場合、二次元問題での Slab 要素は三角柱の形状となるため、 $np$  は 6 ということになる。また、 $\Theta_1$ 、 $\Theta_2$  は時間方向の補関数であり、以下のようになる。

$$\Theta_1(t) = \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n} = \frac{t - t_n}{\Delta t} \quad (8)$$

$$\Theta_2(t) = \frac{t_{n+1} - t}{t_{n+1} - t_n} = \frac{t_{n+1} - t}{\Delta t} \quad (9)$$

ここで上記の補関数での各項の定式化におけるマトリックスを考える。

#### (a) 時間微分項

$$\mathbf{M} = \int_{\Omega} N_{\alpha} N_{\beta} d\Omega = \frac{\Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \begin{bmatrix} \frac{t-t_n}{\Delta t^2} & -\frac{t-t_n}{\Delta t^2} \\ \frac{t_{n+1}-t}{\Delta t^2} & -\frac{t_{n+1}-t}{\Delta t^2} \end{bmatrix} dt = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega} \mathbf{U}^* \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} d\Omega dt \\ & = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{M} \\ \mathbf{M} & -\mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}(t_{n-1}^-) \\ \mathbf{U}(t_n^+) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

#### (b) 移流項

$$\mathbf{S} = \int_{\Omega} N_{\alpha} N_{\beta} \frac{\partial N_{\gamma}}{\partial x} d\Omega = \frac{\Delta}{12} \begin{bmatrix} 2b_1 & 1b_2 & 1b_3 \\ 1b_1 & 2b_2 & 1b_3 \\ 1b_1 & 1b_2 & 2b_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
I &= \frac{(t-t_n)^3}{\Delta t^3} \mathbf{A}(t_{n-1}^-) + \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{A}(t_n^+) \\
II &= \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{A}(t_{n-1}^-) + \frac{(t-t_n)(t_{n+1}-t)^2}{\Delta t^3} \mathbf{A}(t_n^+) \\
III &= \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{A}(t_{n-1}^-) + \frac{(t-t_n)(t_{n+1}-t)^2}{\Delta t^3} \mathbf{A}(t_n^+) \\
IV &= \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{A}(t_{n-1}^-) + \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{A}(t_n^+)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{t_n}^{t_{n+1}} \begin{bmatrix} I & II \\ III & IV \end{bmatrix} dt \\
&= \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \mathbf{A}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{A}(t_n^+) & \frac{1}{12} \mathbf{A}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{A}(t_n^+) \\ \frac{1}{12} \mathbf{A}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{A}(t_n^+) & \frac{1}{12} \mathbf{A}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{4} \mathbf{A}(t_n^+) \end{bmatrix} \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega} \mathbf{U}^* \cdot \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} d\Omega dt \\
&= \mathbf{S}_i \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \mathbf{A}_i(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{A}_i(t_n^+) & \frac{1}{12} \mathbf{A}_i(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{A}_i(t_n^+) \\ \frac{1}{12} \mathbf{A}_i(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{A}_i(t_n^+) & \frac{1}{12} \mathbf{A}_i(t_{n-1}^-) + \frac{1}{4} \mathbf{A}_i(t_n^+) \end{bmatrix} \\
&\begin{bmatrix} \mathbf{U}(t_{n-1}^-) \\ \mathbf{U}(t_n^+) \end{bmatrix} \quad (15)
\end{aligned}$$

### (c) 拡散項

$$\mathbf{D} = \int_{\Omega} N_{\alpha} \frac{\partial N_{\beta}}{\partial x} \frac{\partial N_{\gamma}}{\partial x} d\Omega = \frac{\Delta}{12} \begin{bmatrix} 2b_1b_1 & 1b_1b_2 & 1b_1b_3 \\ 1b_2b_1 & 2b_2b_2 & 1b_2b_3 \\ 1b_3b_1 & 1b_3b_2 & 2b_3b_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
I &= \frac{(t-t_n)^3}{\Delta t^3} \mathbf{K}(t_{n-1}^-) + \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{K}(t_n^+) \\
II &= \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{K}(t_{n-1}^-) + \frac{(t-t_n)(t_{n+1}-t)^2}{\Delta t^3} \mathbf{K}(t_n^+) \\
III &= \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{K}(t_{n-1}^-) + \frac{(t-t_n)(t_{n+1}-t)^2}{\Delta t^3} \mathbf{K}(t_n^+) \\
IV &= \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{K}(t_{n-1}^-) + \frac{(t-t_n)^2(t_{n+1}-t)}{\Delta t^3} \mathbf{K}(t_n^+)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{t_n}^{t_{n+1}} \begin{bmatrix} I & II \\ III & IV \end{bmatrix} dt \\
&= \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \mathbf{K}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{K}(t_n^+) & \frac{1}{12} \mathbf{K}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{K}(t_n^+) \\ \frac{1}{12} \mathbf{K}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{K}(t_n^+) & \frac{1}{12} \mathbf{K}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{4} \mathbf{K}(t_n^+) \end{bmatrix} \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \cdot \mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} d\Omega dt \\
&= \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \mathbf{K}_{ij}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{K}_{ij}(t_n^+) & \frac{1}{12} \mathbf{K}_{ij}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{K}_{ij}(t_n^+) \\ \frac{1}{12} \mathbf{K}_{ij}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{12} \mathbf{K}_{ij}(t_n^+) & \frac{1}{12} \mathbf{K}_{ij}(t_{n-1}^-) + \frac{1}{4} \mathbf{K}_{ij}(t_n^+) \end{bmatrix} \\
&\mathbf{D}_{ij} \begin{bmatrix} \mathbf{U}(t_{n-1}^-) \\ \mathbf{U}(t_n^+) \end{bmatrix} \quad (18)
\end{aligned}$$

### (d) 勾配，摩擦項

$$\begin{aligned}
&\int_{t_n}^{t_{n+1}} \left[ \frac{(t-t_n)^2}{\Delta t^2} + -\frac{(t-t_n)(t_{n+1}-t)}{\Delta t^2} \right] dt \\
&= \left[ \frac{\Delta t}{6} + \frac{\Delta t}{6} - \frac{\Delta t}{3} \right] \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ -c^2 \frac{\partial z}{\partial x_1} - \frac{u_1 H C_F \sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{H} \\ -c^2 \frac{\partial z}{\partial x_2} - \frac{u_2 H C_F \sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
&\int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega} \mathbf{R} d\Omega dt \\
&= \begin{bmatrix} R_1 \\ \frac{\Delta t}{3} \mathbf{R}_2(t_{n-1}^-) + \frac{\Delta t}{6} \mathbf{R}_2(t_n^+) \\ \frac{\Delta t}{3} \mathbf{R}_3(t_{n-1}^-) + \frac{\Delta t}{6} \mathbf{R}_3(t_n^+) \\ R_1 \\ \frac{\Delta t}{6} \mathbf{R}_2(t_{n-1}^-) + \frac{\Delta t}{3} \mathbf{R}_2(t_n^+) \\ \frac{\Delta t}{6} \mathbf{R}_3(t_{n-1}^-) + \frac{\Delta t}{3} \mathbf{R}_3(t_n^+) \end{bmatrix} \quad (21)
\end{aligned}$$

## 3. 数値解析例

数値解析例としてダム破壊問題を取り上げ，空間方向の離散化に SUPG 法を用いた安定化有限要素法，時間方向の離散化に差分法 (Crank-Nicolson 法) を用いた場合と Space-Time 法を用いた場合とを，時間増分  $\Delta t$  を変化させて比較を行う。

### (1) 解析条件

初期条件として，図-3 で表されるような矩形水路に，2m の段波を与えた．解析メッシュは，分割幅 0.05 のユニオンジャックの構造格子メッシュである．時間増分  $\Delta t$  はそれぞれ，0.001，0.01，0.1 の 3 パターンで比較を行う．また，境界条件は，境界の法線方向の流量が 0 になるような Slip 条件を与えた．

### (2) 解析結果

時間増分  $\Delta t$  はそれぞれ，0.001s，0.01s，0.1s の 3 パターンで 1s 後の波形を定量的に厳密解と両手法の比較を行った．

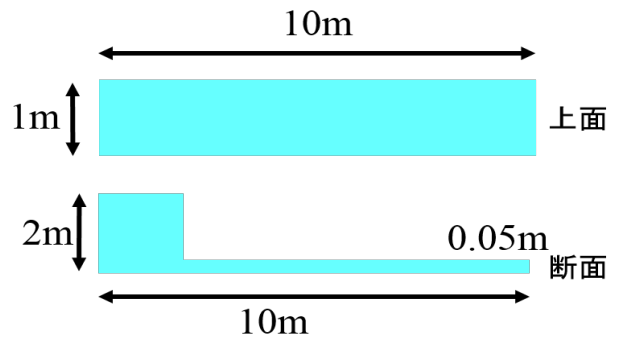


図-3 初期条件

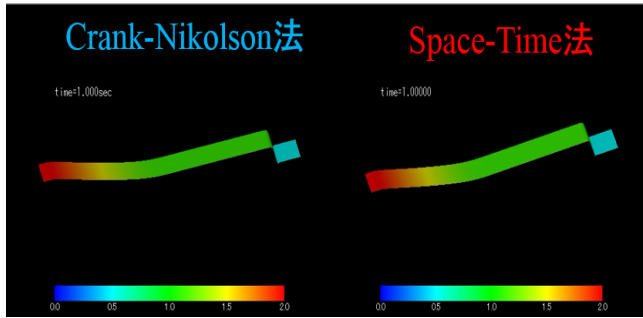


図-4  $\Delta t = 0.001$  での波形

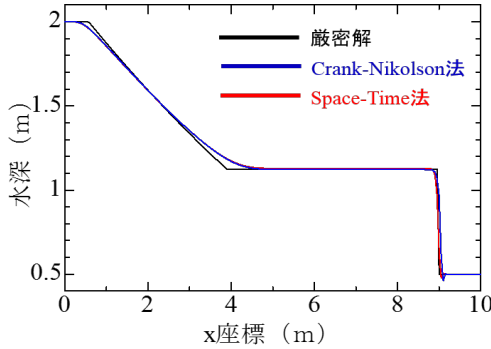


図-5  $\Delta t = 0.001$  での定量的比較

(a) 時間増分  $\Delta t = 0.001$

解析結果を図-4, 図-5 に示す。図-4 より, 時間方向に Crank-Nicolson 法を用いた手法, Space-Time 法共に, 定性的に波形が一致していることが確認できる。また, 図-5 より, 定量的にも両手法, 厳密解とより一致をしていることが確認できる。

(b) 時間増分  $\Delta t = 0.01$

解析結果を図-6, 図-7 に示す。図-6 より, 時間方向に Crank-Nicolson 法を用いた手法, Space-Time 法共に, 時間増分  $\Delta t = 0.001$  での結果と同様に定性的に波形が一致していることが確認できる。また, 図-7 より, 定量的に比較を行うと, 厳密解よりも若干波高の増加はあるものの, 両手法とも概ね一致していることが確認できる。

(c) 時間増分  $\Delta t = 0.1$

解析結果を図-8, 図-9 に示す。図-8 より, 時間方向に Crank-Nicolson 法を用いた手法は激しく数値振動が生じているのに対し, Space-Time 法は波形を保って解析を行っている。また, 図-7 より, 定量的に比較を行うと, 同様に時間方向に Crank-Nicolson 法を用いた手法は激しく数値振動が生じているが, Space-Time 法は厳密解よりも波高の増加はあるものの振動せずに解析を行っている。

#### 4. おわりに

本研究では, Space-Time 有限要素法を浅水長波方程式に適用し, 以下の結論を得た。

Space-Time 有限要素法は時間方向の安定性が高い手法であり, 時間方向に Crank-Nicolson 法を用いる手法に比べて大きい時間増分量を用いても精度よく解析が行えることを確認した。

今後の課題として, SUPG 法の適用や移動境界を考慮し

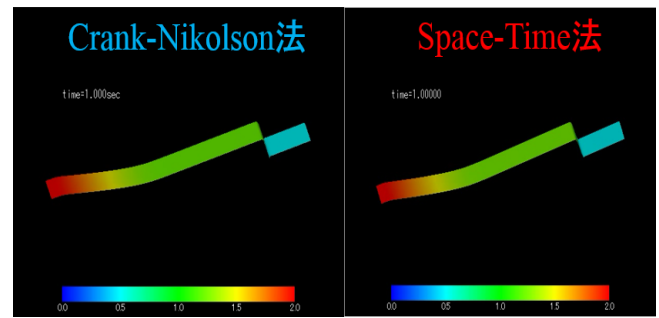


図-6  $\Delta t = 0.01$  での波形

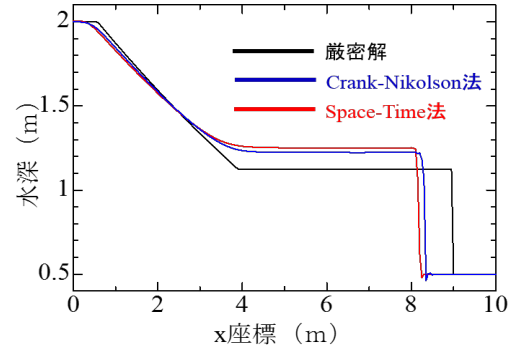


図-7  $\Delta t = 0.01$  での定量的比較

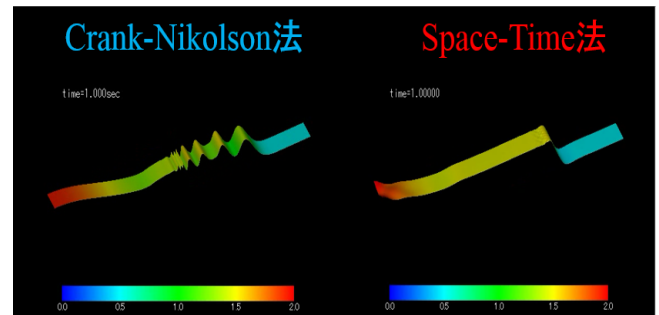


図-8  $\Delta t = 0.1$  での波形

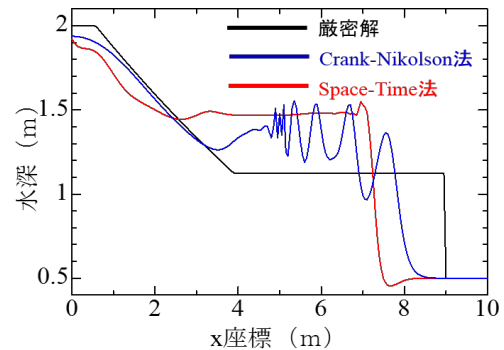


図-9  $\Delta t = 0.1$  での定量的比較

た浅水長波流れ解析への適用などが挙げられる。

#### 参考文献

- 1) Thomas J.R.Hughes, Gregory M.Hulbert, Space-time finite element methods for elastodynamics: Formulations and error estimates, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 66, Issue 3, February 1988, Pages 339-363
- 2) 桜庭雅明, 櫻山和男, 菅野諭, 移動境界を考慮した Space-Time 有限要素法による浅水長波流れ解析, 応用力学論文集, 第 3 巻, pp.255-262, 2000.
- 3) 高瀬慎介, 田中聖三, 櫻山和男, AMR 法を用いた Space-Time 有限要素法による移動境界を有する浅水長波流れ解析, 応用力学論文集, 第 11 巻, pp.79-87, 2008.

# 吸音モデルを考慮した CIP 法による三次元音場解析に関する研究

Sound field analysis by CIP method considering sound absorption mode

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 堤 蘭  
Ran TSUTSUMI

## 1. はじめに

騒音とは典型七公害の 1 つであり、人の健康及び生活環境に影響を及ぼす音のことを言う。近年、工場や工事現場からの騒音によって健康被害を受けるなど、この問題が深刻化してきている。著者らの既往の研究<sup>1)</sup>においては騒音影響評価を行うため、CIP 法と AMR 法を用いた、AMR 法は計算解の勾配等を指標にし、メッシュの粗密付けを時刻毎に必要な応じて部分的に行う方法である。この手法を用いることで室内外を対象とした広域の波動伝播を効率よく解くことが可能である。インパルス応答解析手法による数値シミュレーションが行われてきた。また境界条件として完全反射のみならず、吸音効果の考慮が行える Rayleigh モデルの導入が行われてきた。さらに、著者らの従来<sup>1)</sup>では、地表面に対しては完全反射条件が用いられていたが、実際の道路舗装では排水性舗装などがされており、そのような舗装には吸音効果がある。

本報告では、吸音効果の考慮に関して、Rayleigh モデルの境界条件処理についての検討、及び地表面に対して吸音効果の考慮をした解析を行った。

## 2. 数値解析手法

### 2.1 支配方程式と特性曲線法

空気中の波動伝播は運動方程式 (1)、と連続式 (2) で表され、1 次元の場合は以下ようになる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $p$  は音圧 [Pa]、 $u$  は粒子速度 [m/s]、 $\rho$  は空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>] である。式 (1) に音速  $c$  [m/s] を掛け、式 (2) との和と差を作ると

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u + p) + c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u + p) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u - p) - c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u - p) = 0 \quad (4)$$

ここで、

$$f_x^+ = \rho c u + p \quad (5)$$

$$f_x^- = \rho c u - p \quad (6)$$

とおくと、式 (3)、(4) は  $f_x^+$ 、 $f_x^-$  という物理量がそれぞれ、+、- 方向に速度  $c$  で移流する、移流方程式である。

## 2.2 CIP 法

CIP 法は特性曲線に沿って物理量を移流させる移流方程式の差分を用いた高精度の解法である。特性曲線法では  $f_x^+$ 、 $f_x^-$  を特性曲線に沿って移流させることで次の step の値を求める。CIP 法は格子点での物理量と微分値を考慮し、3 次多項式を用いることで厳密解のプロファイルを高い精度で維持できる。本論文では三次元伝播問題に対しより高精度な解析が可能な C 型 CIP 法を用いている。詳細は参考文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

## 3. 多孔質型吸音材

防音対策のための設計・計画では、吸音機構の材料特性を考慮することが重要である。本研究では多孔質タイプの吸音材に注目し、その中でも最も簡便で広く用いられている Rayleigh モデルを適用する。このモデルは吸音機構として空気の粘性による粘性減衰を利用した解析モデルであり、例えばグラスウールやロックウールなどの繊維材料に対して内部伝播を考慮して解析を行うことが可能である。

Rayleigh モデルの定式化については、式 (1)、(2) の支配方程式に  $\sigma$  を用いた減衰項を加える形で、次のように表される。

$$\frac{k}{\phi} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\sigma u \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho c^2}{\phi} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

ここで、Rayleigh モデルは図-1 に示すように、多孔質材料を非常に薄い音響管に近似するモデルであり、ポアズイユの法則がこの音響管に適用され管の両端に作用する単位長さ当たりの圧力差は、流動抵抗  $\sigma$  を仮定して次の式で表せる。

$$\sigma = \frac{8\eta k}{R^2 \phi} \quad (9)$$

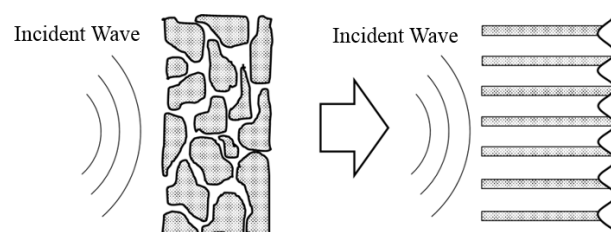


図-1 Rayleigh モデル



2.(1)と同様に移流方程式を導くと式(10),(11)のように書ける.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cu + p) + c \frac{\partial}{\partial x}(\rho cu + p) = -\sigma cu \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cu - p) - c \frac{\partial}{\partial x}(\rho cu - p) = -\sigma cu \quad (11)$$

なお、音響管内の抵抗を表す流動抵抗  $\sigma$  の値として、吸音材としてグラスウールを想定した場合  $8000 \sim 15000 \text{kgm}^{-3} \text{s}^{-1}$  を適用することが示されている.

式(10), (11)の左辺に関しては空気中の波動伝搬と同様にCIP法を用いて解くこととする. 外力項(非移流項)である右辺に関しては、この外力値を一定とみなし一次元の運動方程式として差分法を用いて解く. すなわち二つのステップに分けて解くこととなり、

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cu + p)^n + c \frac{\partial}{\partial x}(\rho cu + p)^n = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cu - p)^n - c \frac{\partial}{\partial x}(\rho cu - p)^n = 0 \quad (13)$$

をCIP法で解いた後、中間値である  $(\rho cu + p)^*$ ,  $(\rho cu - p)^*$  に関して、

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cu + p)^* = -\sigma cu \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho cu - p)^* = -\sigma cu \quad (15)$$

と表した運動方程式(14),(15)を時間積分して差分法を用いて解くと式(16),(17)のようになる.

$$(\rho cu + p)^{n+1} = (\rho cu + p)^* + \Delta t \sigma cu \quad (16)$$

$$(\rho cu - p)^{n+1} = (\rho cu - p)^* - \Delta t \sigma cu \quad (17)$$

すなわち、図-2に示す様に、 $n$  ステップからの外力の影響を考慮した移流  $a$  を表すために、黒丸の点からまっすぐ星印の点まで移流  $(a')$  させたのち、水平方向に白丸の点へ移動  $(b')$  させ  $n+1$  ステップの値を求めている. なお流動抵抗を考慮する際には微分値の計算は行っていない.

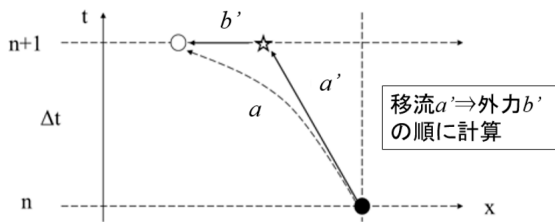


図-2 解析順序

ここで、各パラメータは、 $\sigma$ : 空気の粘性抵抗 [ $\text{kg/m}^3\text{s}$ ],  $k$ : 構造係数,  $\phi$ : 多孔度である. 構造係数  $k$  は、空隙が空気の流れに寄与できるのかを表すパラメータ, 多孔度は空隙が占める割合を示すパラメータである. 本研究では簡単のため  $k$  と  $\phi$  の両方を 1 としている.

## 4. インパルス応答解析

### 4.1 インパルス応答

インパルス応答とはインパルスと呼ばれる非常に短い波を入力した時の受音点で得られる応答のことである. 音源での入力波形とインパルス応答の畳み込みを行うことによって受音点での出力波形を得ることができる. 畳み込みを行うことで解析が困難な波形に対しても、事前に解析し得られたインパルス応答を用いることで容易に出力結果を得ることができる. 厳密なインパルス応答解析を行う上ではディラックのデルタ関数を用いるのが理想ではあるが、厳密なインパルスは形が急峻なため、離散化を行い精度よく扱うことは困難である. そこで解析するうえでは、離散化を容易に行うために擬似インパルスを用いる.

### 4.2 擬似インパルスの生成

今回は擬似インパルスとして、畳み込み積分の離散近似手法であるLubichのConvolution Quadrature Method(CQM)で提案された次式を擬似インパルスの式として用いる.

Lubich は次のような畳み込み積分

$$f(t) * g(t) = \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau, \quad t \geq 0 \quad (18)$$

を時間増分  $\Delta t$  を用いて  $N$  ステップに分解し

$$f(n\Delta t) * g(n\Delta t) \simeq \sum_{j=0}^n \omega_{n-j}(\Delta t)g(j\Delta t) \quad (19)$$

のように離散化近似することにより求める手法を提案した. ここで  $\omega_n(\Delta t)$  は離散化された畳み込み積分の重みであり、ラプラス変換域における三次元波動方程式の基本解を用いると

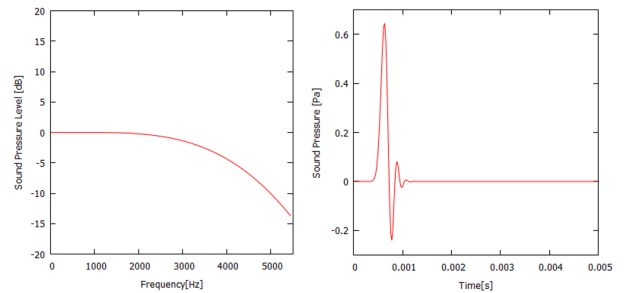


図-3 用いた疑似インパルスとその周波数特性

$$\omega_n(\Delta t) \cong \frac{R^{-n}}{L} \sum_{L=0}^{L-1} \left( \frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{sr}{c}} \right) e^{(-2\pi i \frac{nL}{L})} \quad (20)$$

と表せ、式 (20) が Lubich の擬似インパルスである。ここで、 $\omega_n(\Delta t)$  は離散化された畳み込み積分の重み、 $R$  は目標とする精度、 $L$  は積分区間の分割数、 $n$  は時間ステップ数、 $r$  は周波数特性を決めるパラメータである。式 (9) において  $R=0.9988$ ,  $\Delta t=0.020525\text{ms}$ ,  $L=2000$ ,  $r=0.2\text{m}$  として、約 2500Hz 付近までフラットとなる周波数特性をもつ疑似インパルスを作成した (図-3 参照)。詳細は参考文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

## 5. 数値解析例

Rayleigh モデルを適用した遮音壁において背後に完全反射面を設置することによって、透過波の発生を防ぐ解析を行った。また地表面に対して吸音効果の考慮を行い、排水性舗装の適用を行った。

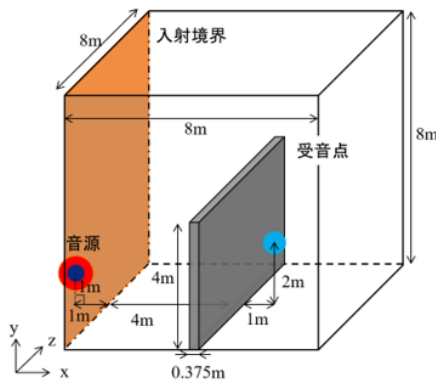


図-4 解析領域

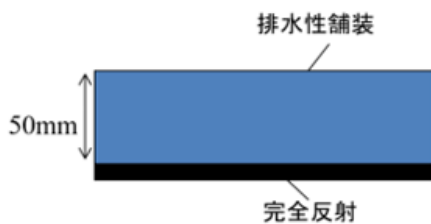


図-5 排水性舗装の構造

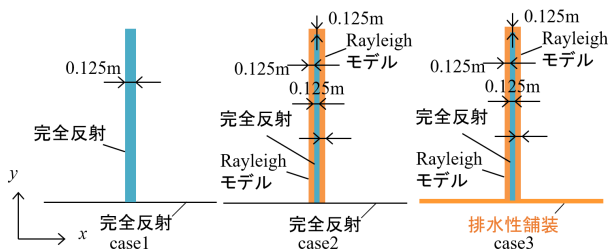


図-6 遮音壁のと地表面の詳細図

## 5.1 解析条件

解析領域は図-4 に示すとおりであり、入射境界から 1m の位置に仮想音源を設定し、遮音壁を領域の中央に設置し、受音点を遮音壁の裏に配置する。媒質を空気とし、媒質密度は  $1.205\text{kg/m}^3$ 、時間離散化幅は  $\text{CFL}=0.45$  に基づいて求められる。最小空間離散化幅  $1.5625\text{cm}$ 、時間離散化幅  $0.020525\text{ms}$  の条件において計算を行った。また、case1(遮音壁：完全反射、地表面：完全反射)、case2(遮音壁：完全反射と Rayleigh モデル、地表面：完全反射) の case3(遮音壁：完全反射と Rayleigh モデル、地表面：排水性舗装) の 3 通りで解析を行った。それぞれの case における詳細図は図-6 に示す。排水性舗装の詳細な構造は図-5 に示す。吸音面の厚さを 50mm とし、その下に完全反射面を設置した。さらに、遮音壁に用いられている多孔質吸音材と排水性舗装の吸音率は異なるため、流動抵抗も異なるものを用いた。遮音壁の多孔質吸音材の流動抵抗は  $\sigma=15000\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$ 、排水性舗装の流動抵抗は  $\sigma=8000\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$  とした。詳細は参考文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

## 5.2 解析結果

結果の時刻歴を図-7 に、可視化結果を図-8 に示す。遮音壁における球面波の回折、反射、また完全反射面を設けることにより透過波の発生を防いでいることが確認できる。また、図-8 より地表面における排水性舗装の吸音効果による、反射波の音圧値低減効果が確認できる。しかし、図-7 より、case2 と case3 を比較すると、排水性舗装による低減効果は、球面波の遮音壁上での回折、吸音効果に比べると騒音低減効果が少ないことが分かる。

## 5.3 実音源との畳み込み及び可聴化

先に求めた受音点における時刻歴、インパルス応答を用いて実音源との畳み込みを行った。またインパルス応答解析を行った音響データを用いて可聴化を行った。本報告では固定音源である、工事騒音の杭打機の音源データを用いてインパルス応答解析を行った。

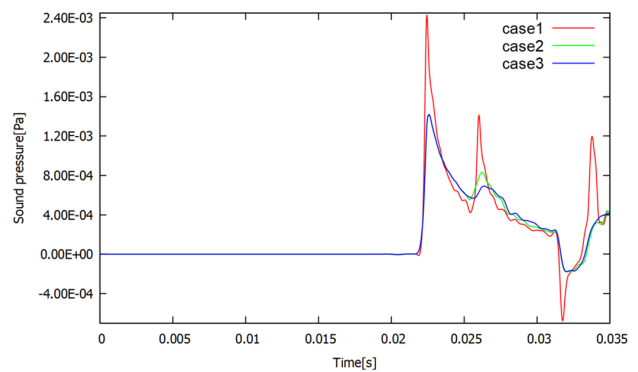


図-7 受音点での時刻歴



## 5.4 実音源との畳み込み結果

結果の時刻歴を図-10 に、周波数分析の結果を周波数特性として図-11 に示す。また、可聴化を行った結果を聞いても、case1 に比べて case2, case3 は音圧値及び、高周波成分の低減が確認できた。遮音壁の Rayleigh モデルと、排水性舗装の吸音効果により、受音点での音圧値の低減、高周波成分における音圧レベルの低減が確認できた。

## 6. おわりに

本研究では完全反射面と Rayleigh モデルを組み合わせた遮音壁による透過波を防いだ解析、及び地表面に対して排水性舗装を用いた解析を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 各条件におけるインパルス応答と固定音源との畳み込みを行い、結果を出力し周波数特性を示した
- 遮音壁の Rayleigh モデルと、排水性舗装の吸音

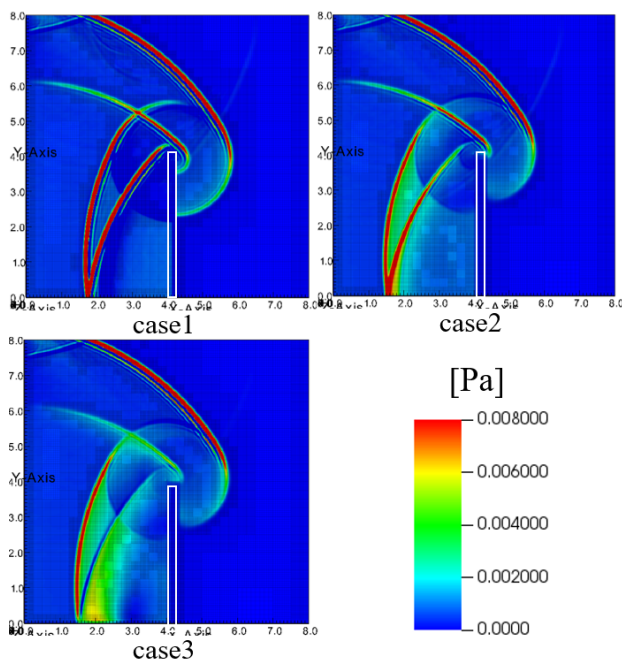


図-8 可視化結果

効果により、受音点での音圧値の低減、高周波成分における音圧レベルの低減が確認できた。

- 遮音壁を Rayleigh モデルで覆うと、完全反射の場合と比べて畳み込み結果において約 4dB の低減が確認できた
- 排水性舗装による吸音は行われているが、遮音壁上の吸音、回折の影響が大きく、地表面が完全反射の場合と比べると、約 0.4dB 程度の低減効果になることを示した

今後の予定として、解析結果と実測値との定量的な比較、遮音壁の遮音性能に着目した解析、時変畳み込みを用いた移動音源問題への適用を検討している。

## 参考文献

- 1) 今井啓太, 吉町徹, 樫山和男: 吸音モデルを考慮したインパルス応答解析手法の構築と VR 技術を用いた可聴化, 応用力学論文集, vol.75, No.2, pp.259-267, 2019.
- 2) H.Takewaki, A.Nishiguchi and T.Yabe: Cubic interpolated pseudo-particle method (CIP) for solving hyperbolic-type equations, J. Comput.Phys., vol.61, pp. 261-268, 1985.
- 3) C. Lubich: Convolution Quadrature and Discretized Operational Calculus.I, Numer.Math.52, pp.129-145, 1988.
- 4) 鹿野洋, 横山栄, 坂本慎一, 笹岡岳陽, 波頭伸哉: 3次元 FDTD 法による車内音場解析—拡張作用境界モデルの適用, 生産研究, vol.63, No.2, pp. 235-240, 2011.

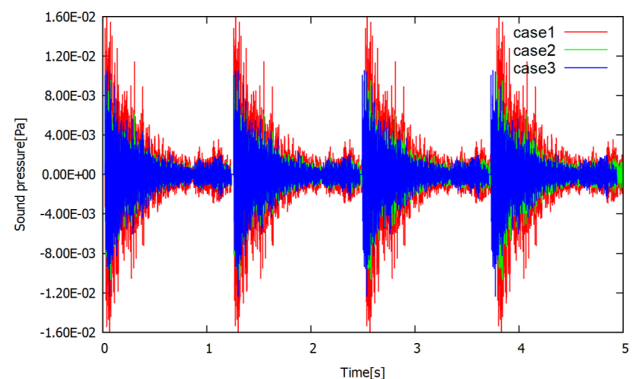


図-10 畳み込み結果の時刻歴

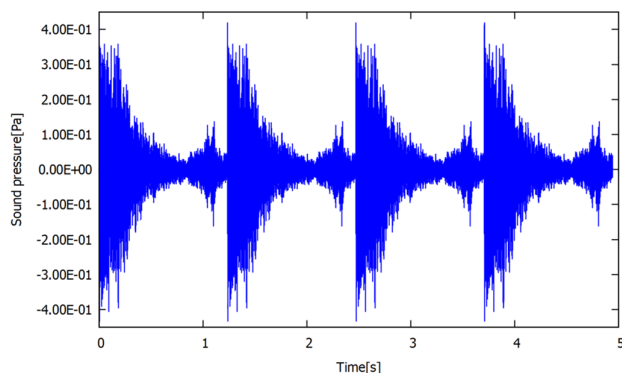


図-9 畳み込む音源

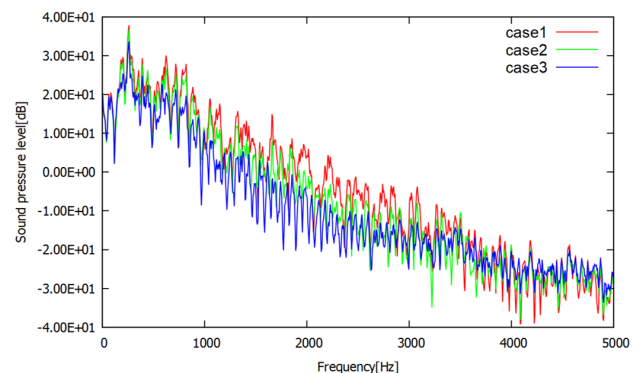


図-11 畳み込み結果の周波数特性

# 道路閉塞を考慮した津波避難シミュレーションシステムの構築

Construction of tsunami evacuation simulation system considering road blockage

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 中村 麻菜美  
Manami NAKAMURA

## 1. はじめに

我が国は地震や台風を始めとする自然災害の発生率が非常に高く、世界有数の災害大国である。2011 年に発生した東日本大震災を機に、想定外の規模の災害において、ハード面での対策だけでは限界があるとされ、ハード面の対策とともにソフト面の対策の重要性が確認された。ソフト面の対策において、防災・減災対策の評価・検討の手法の一つとして避難シミュレーションの必要性が高まり、著者らの既往の研究<sup>1)</sup>ではマルチエージェントモデルを用いて様々な要素を考慮した避難シミュレーションが行われた。

本報告では、建物種別情報（木造又は非木造）及び建物倒壊による道路閉塞を考慮した水害避難シミュレーションを行い、その効果を確認した。

## 2. シミュレーション手法

シミュレーションに必要な地形や建物、避難路等のデータを、国土地理院が提供しているデータを基に ArcGIS を用いて作成した。対象地域である高知県中土佐町久礼地区での作成例の一部を図-1 に示す。シミュレーションにはマルチエージェントモデルを扱うことが可能な NetLogo を用いた。

避難者は初期位置から最短距離にあるノードに移動後、隣接している各ノードに対し次式で表される重力モデルを用いて効用  $S$  を算出し、 $S$  が最大となるノードを選択し、その方向に移動する。

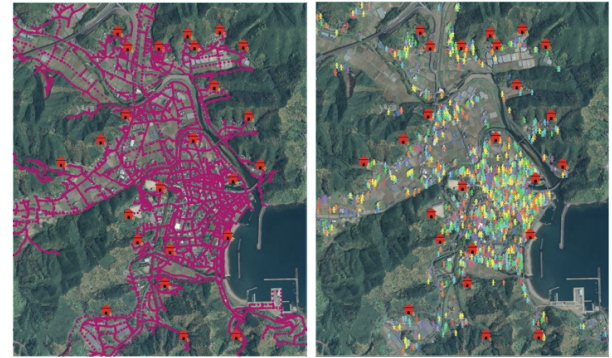
$$S = \frac{a}{s^\alpha} - \frac{b}{z^\beta} - \frac{c}{w^\gamma} - \frac{d}{t^\delta} - \frac{e}{p^\epsilon} \quad (1)$$

ここで、 $s$  は避難所までの距離、 $z$  は標高、 $w$  は水際線からの距離、 $t$  は人数、 $p$  は道路閉塞確率である。 $a, b, c, d, e$  は変数に対する重みであり、値が大きいほど効用に占める割合が大きくなる。 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$  は変数に対する空間距離の影響度であり、値が小さくなるほど影響度が高い。

## 3. 建物倒壊による道路閉塞

地震により建物の損壊が生じることで、避難経路への影響が懸念される。2015 年に東京消防庁が提示した手法<sup>2)</sup>を参考に、建物倒壊による道路閉塞を考慮する。道路閉塞確率の算出にあたり、前提条件を図-2 を参照して以下に示す。

- 建物は必ず道路を挟んで向かい合っているものとする。
- 建物が層破壊した時の瓦礫幅に関する確率密度関数は正規分布とする。
- 建物の倒壊は互いに影響を及ぼさず独立して発生する。
- 確率は作成したノード毎に算出する。



ノード作成

避難者初期位置

図-1 データ作成の例

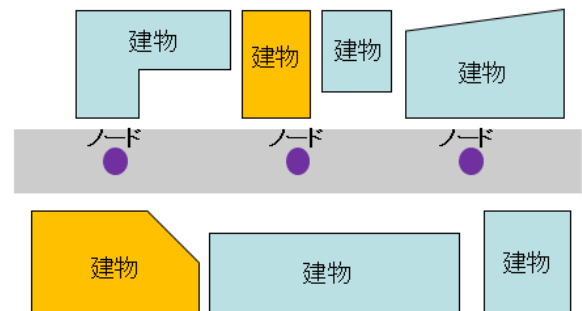


図-2 前提条件

ノード毎の道路閉塞確率  $p$  は次式で表される。

$$p = 1 - \{ (1 - x_w)^{\alpha_w} \cdot (1 - x_m)^{\alpha_m} \cdot (1 - x_p)^{\alpha_p} \cdot (1 - y_w)^{\beta_w} \cdot (1 - y_m)^{\beta_m} \cdot (1 - y_p)^{\beta_p} \} \quad (2)$$

ここで、各変数は以下の通りになる。

- $x_w$ ：一対の正面で向かい合う木造建物間で道路が閉塞する確率
- $x_m$ ：一対の正面で向かい合う木造・非木造建物間で道路が閉塞する確率
- $x_p$ ：一対の正面で向かい合う非木造建物間で道路が閉塞する確率
- $y_w$ ：一対の斜めで向かい合う木造建物間で道路が閉塞する確率
- $y_m$ ：一対の斜めで向かい合う木造・非木造建物間で道路が閉塞する確率
- $y_p$ ：一対の斜めで向かい合う非木造建物間で道路が閉塞する確率
- $\alpha_w, \alpha_m, \alpha_p, \beta_w, \beta_m, \beta_p$ ：出現期待値 (3-(4) 参照)

また、各変数は以下の式を用いて算出される。

$$x_w = P_{Rw}^2 A_w^2 B_2 + 2P_{Rw} A_w (1 - P_{Rw} A_w) B_1 \quad (3)$$

$$x_m = P_{Rw} A_w P_{Rp} A_p B_2 + P_{Rw} A_w (1 - P_{Rp} A_p) B_1 + (1 - P_{Rw} A_w) P_{Rp} A_p B_1 \quad (4)$$

$$x_p = P_{Rp}^2 A_p^2 B_2 + 2P_{Rp} A_p (1 - P_{Rp} A_p) B_1 \quad (5)$$

$$y_w = P_{Rw}^2 A_w^2 B_2 \quad (6)$$

$$y_m = P_{Rw} A_w P_{Rp} A_p B_2 \quad (7)$$

$$y_p = P_{Rp}^2 A_p^2 B_2 \quad (8)$$

ここで、 $P_{Rw}$ 、 $P_{Rp}$  は震度別層破壊確率 (式 (9))、 $A_w$ 、 $A_p$  は建物倒壊による瓦礫流出確率、 $B_1$ 、 $B_2$  は車両通行幅が確保できない確率であり (式 (11)、式 (12))、ここでの車両通行幅はポンプ車の通行できる幅員 3m とする。これらの確率の算出方法を以下に示すが、詳細については参考文献 4) 5) 6) を参照されたい。

#### (1) 震度別層破壊確率

震度別層破壊確率の算出には次式を用いる。

$$P_R(x) = \phi \left\{ \frac{\log_e(x) - \lambda}{\xi} \right\} \quad (9)$$

$$m = 2.002 + 2.603 \cdot \log_{10}(PGV) - 0.213 \cdot \log_{10}(PGV)^2 \quad (10)$$

ここで、 $\phi(x)$  は標準正規分布の累積確率分布関数、 $m$  は計測震度、 $PGV$  は地表速度、 $\lambda$ 、 $\xi$  は構造別回帰係数である。なお、地表速度  $PGV$  を算出する際に用いる計測震度  $m$  は南海トラフ地震の断層モデルケース 4<sup>3)</sup>において、対象地域で観測が予想される計測震度 6.4(震度 6 強)を用いた。

#### (2) 瓦礫の流出確率

建物が倒壊した際に瓦礫が道路側に向かって流出する確率を用いる。兵庫県南部地震の事後調査で得られた木造建物の倒壊率及び道路内倒壊率に関する数値データより、倒壊に占める道路内倒壊の割合の平均値 0.482(木造)、0.143(非木造)を用いる<sup>6)</sup>。

#### (3) 車両通行幅が確保できない確率

前述の調査で得られた瓦礫幅の分布<sup>6)</sup>を各平均  $\mu$  [m]、分散  $\sigma^2$  [m] における正規分布の確率密度関数  $f(x)$  とみなし、次式により車両通行幅が確保できない確率  $B_1$ 、 $B_2$  を算出する。

$$B_1 = \int_{w+s-3}^{\infty} f(x) dx \quad (11)$$

$$B_2 = \int_{w+2s-3}^{\infty} f(x) dx \quad (12)$$

ここで、 $B_1$  は向かい合う建物の片側のみが倒壊する場合の確率、 $B_2$  は向かい合う建物の両側が倒壊する場合の確率、 $w$  は道路幅員、 $s$  は道路から建物までの距離である。

#### (4) 建物パターン別の組合せ出現確率

本手法では、ノード周辺において向かい合う建物が少なくとも 1 箇所以上で倒壊することを想定し、道路閉塞確率

を算出している。そのため、建物構造 (木造、非木造) とどのように向かい合っているのか (正面、斜め) を考える必要がある。組合せ毎の出現期待値を以下の式によりノード毎に算出し、道路閉塞算出時に乗算することで考慮する。

##### 1. 一对の正面で向かい合う木造建物間

$$\frac{N}{2} \left( \frac{m}{N} \cdot \frac{m-1}{N-1} \right) \quad (13)$$

##### 2. 一对の正面で向かい合う木造・非木造建物間

$$\frac{N}{2} \cdot 2 \left( \frac{m}{N} \cdot \frac{N-m}{N-1} \right) \quad (14)$$

##### 3. 一对の正面で向かい合う非木造建物間

$$\frac{N}{2} \left( \frac{m-1}{N} \cdot \frac{N-m-1}{N-1} \right) \quad (15)$$

##### 4. 一对の斜めで向かい合う木造建物間

$$2 \left( \frac{N}{2} - 1 \right) \left( \frac{m}{N} \cdot \frac{m-1}{N-1} \right) \quad (16)$$

##### 5. 一对の斜めで向かい合う木造・非木造建物間

$$2 \left( \frac{N}{2} - 1 \right) \left( \frac{m}{N} \cdot \frac{N-m}{N-1} \right) \quad (17)$$

##### 6. 一对の斜めで向かい合う非木造建物間

$$2 \left( \frac{N}{2} - 1 \right) \left( \frac{m-1}{N} \cdot \frac{N-m-1}{N-1} \right) \quad (18)$$

### 4. 簡易モデルによるシミュレーション

建物倒壊による道路閉塞が考慮されていることを確認するため標高を 0 とした二つの簡易モデルを作成した。作成したモデルを図-3 に示す。

モデル 1 では、A ルートの道路閉塞確率を高く、避難所までの距離を短く設定し、B ルートの道路閉塞確率を低く、避難所までの距離を長く設定してシミュレーションを行った。シミュレーションの様子を図-4 に示す。既往の手法を用いると、避難所までの距離が短い A ルートを選択するが、道路閉塞を考慮させることで、閉塞確率の低い安全な B ルートを選択するという結果が得られた。

次にモデル 2 では、ノード BE 間とノード BC 間の閉塞確率を高く設定し、シミュレーションを行った。シミュレーションの様子を図-5 に示す。最短経路を選択せず、また同一条件下にあるノードの選択においても閉塞確率の低い安全な経路を選択するという結果が得られた。

以上により、道路閉塞確率が正しく考慮されていることが確認できた。

### 5. 適用例

建物倒壊による道路閉塞を考慮した場合の効果を見るため、既往のシステム<sup>1)</sup>を基に、対象地域を高知県中土佐町久礼地区、避難者を歩行避難者に限定し 3002 人とした。避難者の年齢と性別は対象地域の年齢別人口に従い設定した。想定した震災は内閣府が発表している南海トラフ地震断層モデルケース 4 である<sup>2)</sup>。これらを用いて本システムと既往のシステムとで避難開始時刻の変化による犠牲者数の比較を行った。



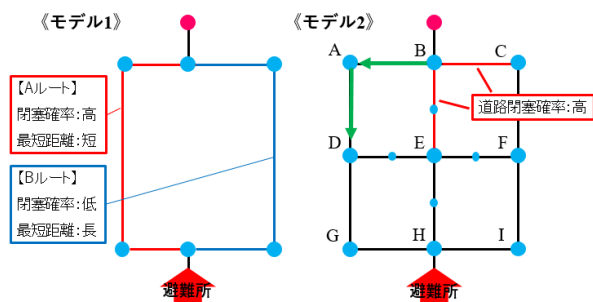


図-3 作成した簡易モデル

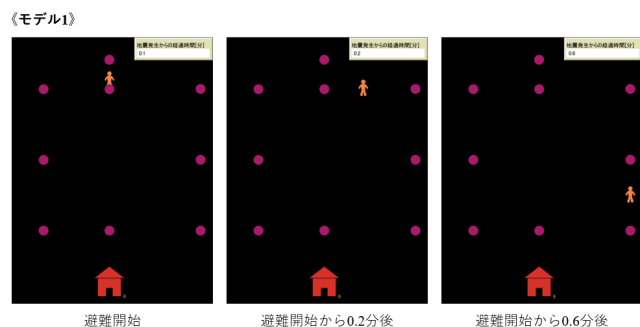


図-4 モデル1：シミュレーション中の様子

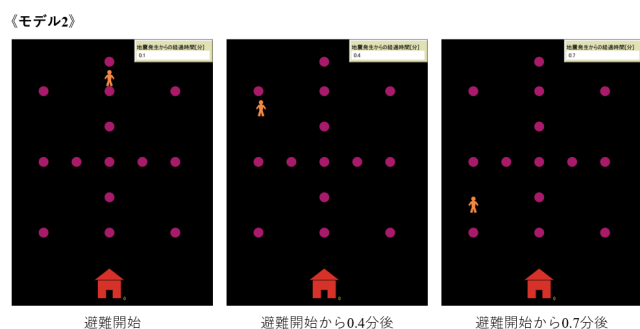


図-5 モデル2：シミュレーション中の様子

### (1) 避難行動

歩行避難者の避難行動において考慮している要素を以下に示す。

- 年齢及び性別毎の歩行速度<sup>7)</sup>
- 群衆速度<sup>8)</sup>
- 勾配速度<sup>9)</sup>
- 年齢及び性別毎の体重<sup>10)</sup>
- 歩行疲労割引率<sup>11)</sup>
- 浸水済み避難経路の回避
- 避難所の収容制限と区分け

なお、各項目における詳細な算出手法については参考文献を参照されたい。

### (2) 建物種別情報

本研究で用いた対象領域内における建物総数は3609棟であり、内訳は木造建物3551棟、非木造建物58棟である。なお、建物種別ごとの棟数は2018年に著者らが目視で判定した棟数である。分布を図-6に示す。

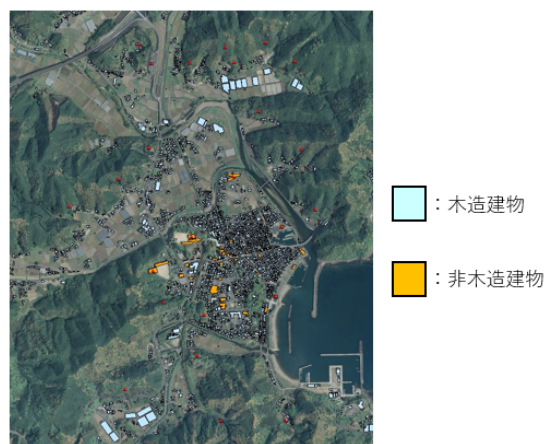


図-6 対象地域における建物種別情報分布

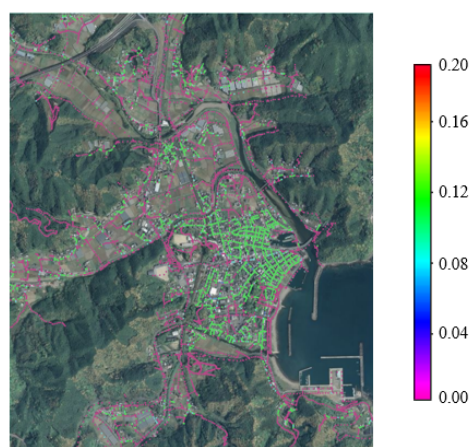


図-7 道路閉塞確率分布

### (3) シミュレーション結果

各シミュレーションは地震発生直後から60分後まで行った。シミュレーション中の様子を図-8に示す。また、犠牲者数を比較した結果を図-9に、地震発生から26分後に避難を開始した場合の犠牲者数の比較結果を図-10に、算出した道路閉塞確率分布を図-7に示す。

津波到達点の基準を久礼川河口部とした時の第一波到達時刻は約29分後、第二波到達時刻は約42分後であった。図-9より、建物倒壊による道路閉塞を考慮したことで、犠牲者数が増える結果が得られた。犠牲者が増加した原因として二つのことが考えられる。まず、道路閉塞を考慮することによって図-11に示すような箇所での避難者が通行出来なくなる箇所が発生する。これにより、閉鎖空間が発生し、避難所までの避難が不可能な避難者が多数存在したことが考えられる。また、対象地域の特徴として沿岸付近に木造の建物密集地が存在している。図-7にも示す通り、沿岸付近の住宅地だけでなく住宅の集まる場所では道路閉塞確率が高くなっていることから、避難時により安全な経路を選択することで避難に要する時間が増加したことが原因として考えられる。津波到達後の避難による犠牲者数については、全条件において増加し、その傾向も酷似していた。これは、地震発生から26分後に避難を開始した場合の犠牲

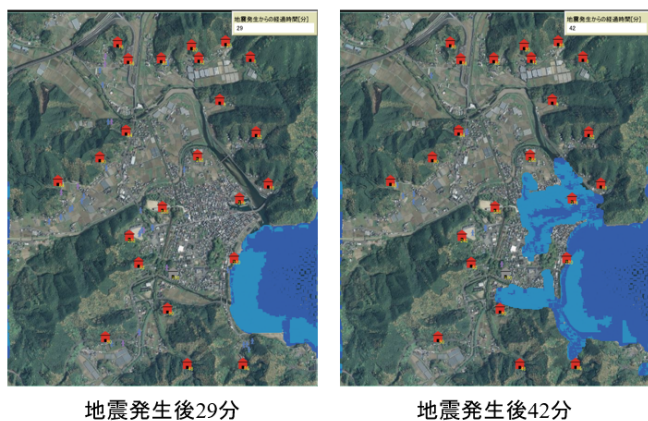


図-8 シミュレーション中の様子

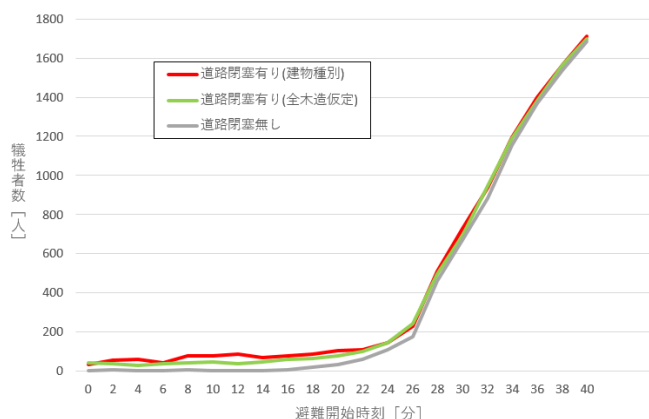


図-9 比較結果 1

者数の比較をした図(図-10)が示す通り、犠牲者数に差はあるが、両条件において津波第一波、第二波到達直後に犠牲者数が急激に増加することが原因であると考えられる。

以上により、大規模な自然災害では早期での避難行動や防災対策が重要であること、道路閉塞を考慮することで閉鎖空間が発生し、避難が不可能となる避難者が存在することが確認できた。

## 6. まとめ

既往のシミュレーション手法に対し、新たに建物倒壊による道路閉塞の考慮を追加し、その効果を確認したことで以下の結論を得た。

- 本手法により道路閉塞が正しく考慮されていることが確認できた。
- 大規模自然災害において、早期の避難行動及び防災対策の重要性を確認することができた。
- 道路閉塞を考慮することにより、避難行動の継続が困難となる閉鎖空間が発生することが確認できた。

また、今後の課題を以下に示す。

- 経路選択式の妥当性の確認
- 経路選択式の各項に係る重みの再検討
- 地震に伴い発生する火災の考慮

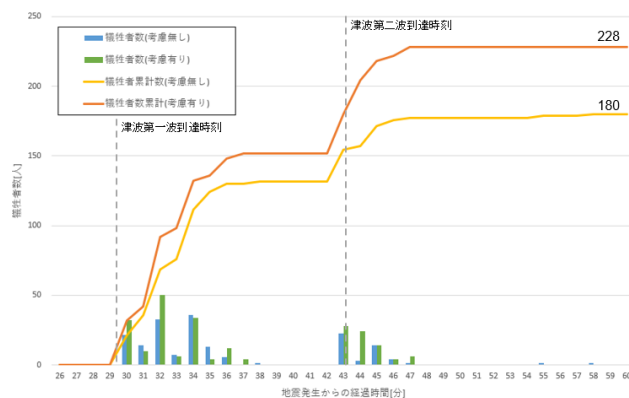


図-10 比較結果 2



図-11 閉鎖空間発生例

## 参考文献

- 1) 近真弥, マルチエージェントモデルを用いた津波避難シミュレーションの適応性向上に関する研究, 第46回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 I-75, 2p., 2018
- 2) 東京消防庁, 地震火災による人的被害の軽減方策 火災予防審議会答申, pp74-91, 2015
- 3) 内閣府中央防災会議, 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 2012
- 4) 堀江啓 等, 木造建物を対象とした層破壊被害関数の適用性に関する考察, 土木学会地震工学論文集 27 巻 1-9 項, 2003
- 5) 藤本一雄, 翠川三郎, 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集 7 巻, pp241-246, 2005
- 6) 土木学会, 沿道建物の倒壊を考慮した道路の横断面構成 土木学会阪神・淡路大震災調査報告, 1998
- 7) 加賀谷俊介, 歩行調査に基づく単独歩行速度推定式の導出と津波避難シミュレーションへの適用 第16回土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集 I-26, 2p., 2010
- 8) 高柳 英明 群集交差流動における歩行領域確保に関する研究 日本建築学会計画系論文集 66 巻 549 号, pp185-191, 2001
- 9) 森本安生, 伊藤譲 坂道における歩行の理論的考察と基礎的な実験 明治鍼灸医学 第34号, pp29-38, 2004
- 10) e-Stat 体力・運動能力調査 <https://www.e-stat.go.jp/> (2021年3月6日閲覧)
- 11) 宇野圭亮, GISを用いたマルチエージェントモデルに基づく災害避難シミュレーションシステムの構築 計算工学講演会論文集 12 巻 2 号, pp449-452, 2007

## 構造物周りの三次元気流シミュレーション結果を用いた MR 可視化システムの構築

*Development of MR visualization system using 3D airflow simulation around the structure*

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 川越 健生  
Takeo KAWAGOE

### 1. はじめに

近年、拡張現実 (Augmented Reality, AR) 技術や、複合現実 (Mixed Reality, MR) 技術を用いた可視化手法は、広告・プロモーションでの利用など産業分野での利用から、景観検討のほかに、安全確認等、建設分野での利用といった様々な分野において注目されている。著者の研究グループではこれまで、スマートデバイスを用いた、屋外における構造物周りの三次元気流シミュレーションの可視化システムの構築が行われてきた。<sup>1)</sup>しかし、スマートデバイスによる AR 可視化は、そのデバイス画面内という小さい範囲であること、可視化体験中はデバイスを持ち続けなければならないというデメリットが挙げられる。

そこで、本研究では、使用デバイスとして、Microsoft HoloLens2 を用いた。HoloLens2 は頭部に装着するタイプのデバイスであり、従来の HoloLens と比較して、視野角・解像度がそれぞれ 2 倍になっている、またパソコンやスマートデバイスへの接続なしで専用のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着するだけで利用が可能である。

本報告では、MR デバイスを用いた構造物周りの三次元気流シミュレーションの可視化に関する検討を行い、複合現実での解析結果可視化の有用性を検討する。

## 2. 複合現実 (MR)・HoloLens2

### 2.1 複合現実 (MR)

複合現実といわれる MR は Mixed Reality の略である。仮想現実である VR でも、同様に頭部にデバイスを装着する、VR ヘッドセットは密閉型であり、仮想の映像だけを立体的に見ることができる。これに対し複合現実 (MR) ヘッドセットは透過型であり、装着者は仮想の立体映像と周りの景色を同時に見ることができる。そして、複合現実ヘッドセットは装着者の視線の向き・姿勢・移動をリアルタイムで把握することができるため、装着者が視線の向きを変えたり、姿勢を変えたり、移動したりしても、仮想の立体映像はまるで現実の空間に「配置されている」ように見える。つまり、複合現実ヘッドセットを装着すると、現実の光景と仮想の映像を合わせて見ることができる。



図-1 HoloLens2

### 2.2 HoloLens2

Microsoft HoloLens とはマイクロソフトが開発しているヘッドマウントディスプレイ (HMD) 方式の拡張現実ウェアラブルコンピュータである。旧型の HoloLens1 では、本体に搭載されている環境認識カメラによって現実世界の形状を把握し自分の位置を推定することにより、現実空間に配置したオブジェクトを設置した場所にとどまらせたり、目の前の現実空間に CG などのデジタル情報を重ね合わせて表示することが可能であった。本研究では、それらの機能に、視野角が 2 倍であり、多様なインタラクション機能が可能になるハンドトラッキング機能等が追加された HoloLens2 を用いた。HoloLens2 を図-1 に示す。このデバイスを用いることで、力学現象の数値シミュレーション結果を現実空間上でより分かりやすく示すことが可能であるといえる。

### 2.3 開発環境

本研究では、Mixed Reality Toolkit v.2.5.0 を用いた可視化を行う。開発環境は、Unity2019.4.11f1(64-bit) を使用し、プログラミング言語は、C#を用いた。使用デバイスは、HoloLens2 である。Mixed Reality Toolkit とは、Mixed Reality アプリケーション向けのオープンソースのクロスプラットフォーム開発キットである。

## 3. 本システムの概要

HoloLens2 を用いた、構造物周りの三次元気流シミュレーション結果の MR 可視化のフローチャートを図-2 に示す。各工程については以下に示す。



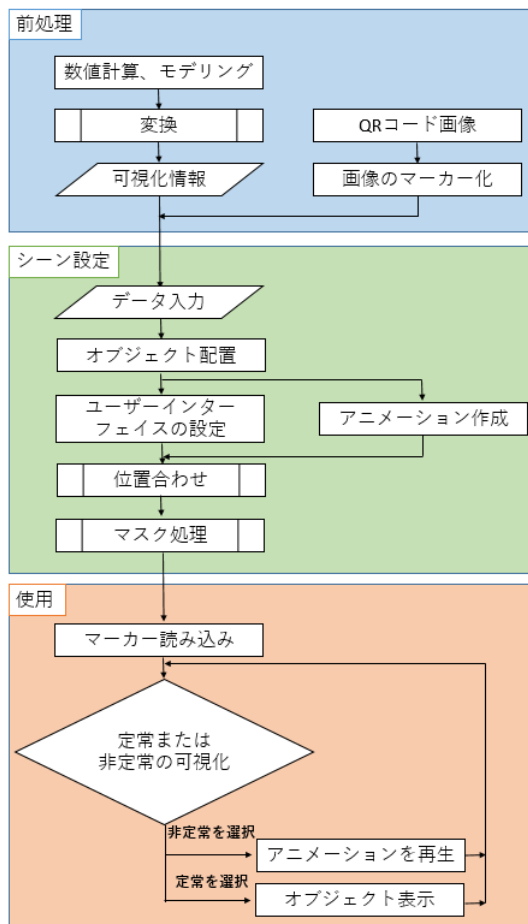


図-2 フローチャート

### 3.1 前処理

前処理パートでは、数値計算、モデリング、マーカージを生成する。

#### 3.1.1 数値計算

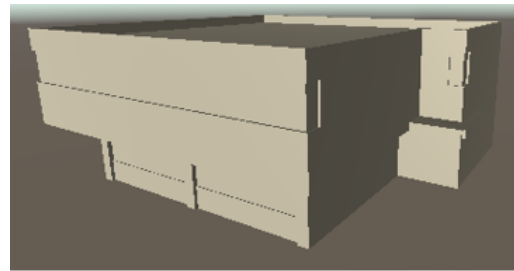
本研究の三次元気流シミュレーションは、有限要素法による等温場流れの三次元 Navier-Stokes 方程式を用いた数値計算を行っている。解析条件として、側面・上端面には slip 条件、底面・構造物壁面には non-slip 条件を用いている。<sup>2)</sup>

#### 3.1.2 モデリング

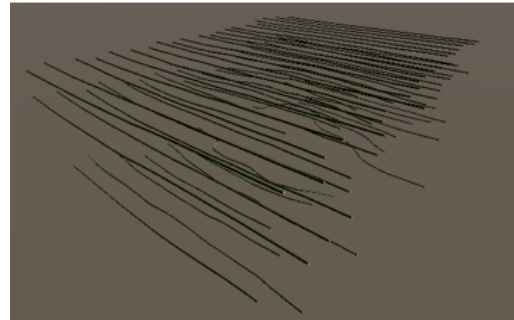
可視化情報であるモデルを図-3に示す。対象構造物モデル、気流シミュレーション結果のモデル及び操作メニューである。対象構造物に関しては、CAD/GIS システムを用いて数値シミュレーションの対象とする構造物周辺の三次元形状モデリングを行い作成されている。<sup>3)</sup> 気流シミュレーション結果に関しては、フリーの可視化ソフトである、paraview を用いてモデルリングを行い、その後 Blender を使用し統合開発環境 Unity に対応した fbx 形式に変換し使用している。

#### 3.1.3 マーカージ

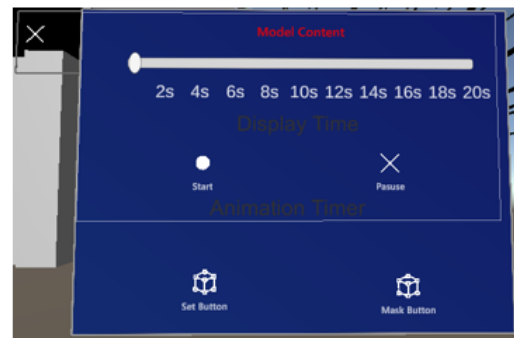
本研究では、位置合わせのために Vuforia のマーカージ認識を使用した。<sup>4)</sup> Vuforia は、様々なデバイスに対応した AR 開発用ライブラリである。これを用いることで



対象構造物



気流シミュレーション結果モデル



操作メニュー

図-3 モデル

オブジェクトの認識を行い、関連したコンテンツを表示させることが可能になる。Vuforia の特徴として、マーカージで正確にターゲットを認識させることが可能であり、Unity に対応しているライブラリである。本研究では、既往研究で使用されている QR コードをマーカージとして Vuforia に登録した。今回用いた QR コードは図-4に示している。

### 3.2 シーン設定

まず初めに、統合開発環境である Unity に全てのモデルを導入する。次に、マーカージのインポートを行い、入力した 3D モデルの設定や表示方法、マーカージと 3D モデル位置関係の設定、ユーザーインターフェイスの設定を Unity 上で行った。

#### 3.2.1 アニメーションの作成

本研究で取り扱った解析結果は、20 秒間の 100 ステップのモデルを取得している。その中から 2 秒毎、10 ステップごとにモデルを取り出し、時間経過によってモデルを表示非表示にさせることで非定常での解析結果の可視化を行った。またアニメーションは、図-3に示した。操作



図-4 対象構造物とマーカー配置



図-5 CG映像と現実の対象構造物

メニューのスタートボタンで0秒から20秒まで再生され、pause ボタンを押すことで任意で再生を止めその時点での結果を見ることが可能である。

### 3.2.2 ユーザーインターフェイスの設定

ユーザーインターフェイスでは、解析を行った20秒までの結果の定常状態を示すためのスライダーを作成した。これを用いることで体験者が指定した時間の気流シミュレーション結果を見ることができる。次に、非定常での可視化を行うためのアニメーションボタンを作成した。これを用いることで気流の動きを時間経過とともに理解することができ、解析結果の理解向上につながるという。これらのユーザーインターフェイス

は、HoloLens2 のハンドメニューを用いたものになっている。このメニューは、HoloLens 2 の最も一般的な UX パターンの1つである。<sup>5)</sup> これにより、ハンドアタッチされた UI をすばやく表示することが可能であり、いつでもアクセスできるため、簡単に表示および非表示にすることが可能になる。

### 3.2.3 位置合わせ

前処理時に、登録したマーカーを用いて CG モデルと実際の構造物のズレを緩和した。今回の使用したマーカー（QR コード）と、マーカー設置位置を図-4に示す。次に、図-5に位置合わせ後の CG 映像の対象構造物と現実の対象構造物を重ね合わせたものを示す。

### 3.2.4 マスク処理

CG 映像と現実空間の物・構造物との前後関係を考慮しマスク処理を施すことで、より違和感なく CG 映像を観察することが可能となる。本研究では、対象構造物の設置後、そのモデルを透明化することで現実空間と CG 映像の前後関係の表現を行った。また、図-3に示した、操作メニューには、SetButton と MaskButton を設置し、マスク処理の有り無しを操作できるようになっている。

## 3.3 使用

本システムの使用方法を示す。システムを立ち上げ後、登録した QR コードを HoloLens2 で読み込み、シーン設定で設置したモデルを表示させる。次に、位置を微調整する。位置調整完了後、定常状態の解析結果を表示する場合は、図-3に示す、操作メニューのスライダーを表示したい秒数まで移動させることで解析結果を表示することができる。次に、非定常状態で解析結果を表示する場合は、Start ボタンを押すことで時間経過とともに変化する解析結果を表示することができる。さらに、QR コードで読み取った対象構造物を非表示にしたい場合は、最下部の MaskButton を押すことでマスク処理を行い、解析結果を表示させることができる。これらの操作は、HoloLens2 のハンドトラッキング技術を用いているため、左の手のひらを HoloLens2 に認識させることでいつでもユーザーインターフェイスを呼び出せる設定になっている。

## 4. 適用性の検討

本研究で構築した MR 技術に基づいた可視化システムを用いて、解析結果の表示を対象構造物前で行った。本システムの MR 技術の適用中の様子を図-6に示し、次に、図-7に体験者の視点画像を示す。このように、MR 技術を力学現象の数値シミュレーション結果の可視化に適用することによって体験者は、現実世界を認識しながら CG モデルによるシミュレーション結果を理解することができる。架空の世界でなく現実で可視化を行っている VR や、スマートデバイスを利用した AR による可視化とは異なり、直感的に解析結果を理解可能になる。





図-6 可視化中の様子

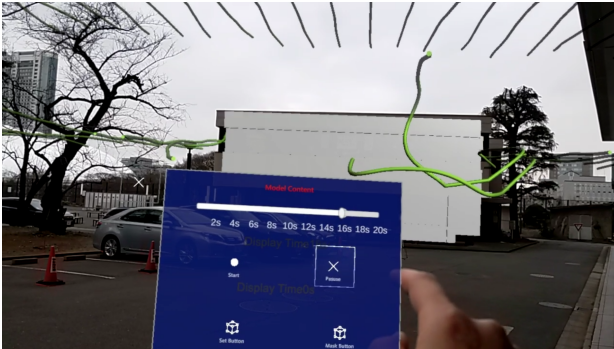


図-7 体験者視点

図-8に対象構造物ありの可視化結果と、マスク処理を行った際の可視化結果を示す。この図のように、マスク処理を行うことで体験者には解析結果のみが見えるようになり、より理解しやすい状態で結果を示すことができると考えられる。また、今回、定常状態の気流のシミュレーション結果とアニメーションによる非定常状態の気流シミュレーション結果の提示によりさらに理解度向上につながるという。

## 5. おわりに

本報告では、MR技術を用いた可視化システムの構築をHMD方式であるHoloLens2を用いて行い、構造物周りの三次元気流シミュレーションの結果を定常と非定常の2種類で示した。その結果、以下に示す結論を得た。

- 解析結果をparaviewやBlenderを用いることで、統合開発環境であるUnityで取り扱い、MR可視化に適用できることを確認した。
- 対象構造物に対してマスク処理を行うことで、対象構造物の背面領域に存在する情報を遮断することで、現実空間とCG映像との前後関係を表現可能であることが分かった
- 本システムを利用することで、力学現象の数値シミュレーション結果を直感的に理解することが可能になると考えられ、解析結果を定常状態、非定常状態の種類で表したことも理解の向上につながると思われる。



(a)対象構造物あり可視化結果



(b)マスク処理後可視化結果

図-8 可視化結果

今後の課題として、今回の位置合わせでは結果の表示の際にずれが生じている箇所があり完全に対象構造物と一致した箇所に結果の表示をすることができていないため、現在の位置合わせの精度を向上させること、また新しい手法による位置合わせを検討する。また今回作成した非定常の解析結果は2秒毎に解析結果のモデルを変更しているがモデル量を増やすことでより細かい時間経過で変更することで解析結果の理解向上が図れると考える。さらに、本デバイスを別の対象の解析結果の可視化に利用することも課題として挙げらる。

## 参考文献

- 1) 池田直旺, 花立麻衣子, 榎山和男, 車谷麻緒, 吉永崇, 前田勇司, SLAM技術に基づく空間情報を用いたAR可視化システムの構築とその適用性の検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.73, No2, pp. II-48-II-54, 2017.
- 2) 池田哲也, 榎山和男: 安定化有限要素法による都市の温熱環境解析手法の構築, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.69, No2, pp. 107-114, 2013.
- 3) 菅田大輔, 榎山和男, 宮地英生, 前田勇司: 環境流れ問題のためのマーカーレスAR可視化システムの構築と適用性の検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.71, No2, pp. I-19-I-203, 2015
- 4) 菅田大輔, 榎山和男, 宮地英生, 前田勇司, 道前武尊, 西畑剛, 井山伊智郎, 横山侑機: スマートデバイスを用いた環境流れ問題のためのAR可視化システムの構築, 土木学会シンポジウム講演集, Vol.41, pp.125-128, 2016.
- 5) Microsoft: <https://docs.microsoft.com/ja-jp/windows/mixed-reality/design/hand-menu>. (2021年3月5日閲覧)

# 防災教育のためのインタラクティブな VR 津波体験システムの構築

*Studies on interactive tsunami experience system using VR technology for disaster mitigation education*

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 王 博  
Bo WANG

## 1. はじめに

地震や津波などの大規模な災害の防災・減災対策として、東日本大震災を契機としてハード対策には限界があることが明らかとなり、防災教育などのソフト対策も重要視されている。

近年、バーチャルリアリティ (VR) 技術が各種の教育・訓練等に活用されており、防災教育において、VR 技術を用いた津波避難体験システムは従来のハザードマップなどの方法より直観的で伝わりやすく、教育効果があることが確認されている<sup>1)</sup>。

しかし、著者の研究室での先行研究システムは、主にスマートフォンで閲覧する全天球動画を用いたため、バーチャル環境とのインタラクション体験による教育効果の向上が期待できないことが課題として挙げられる。

本研究では上述した課題を解決するために、PC 接続型の VR デバイスに着目し、統合開発環境内蔵のゲームエンジン Unity を用いて、津波解析結果、都市・地域モデルとインタラクティブな VR 可視化を統合し、より臨場感のある VR 津波体験システムの構築を行った。

## 2. 開発環境

### 2.1 ハードウェア

本システムでは、図-1 に示すような PC 接続型の VR デバイスを使用した。スマートフォンに広く搭載される 3 自由度センサーに比べて、VR デバイスに搭載される 6 自由度センサーが回転に加えて、変位情報も検出できるため、より臨場感のある VR レンダリングを実現できる。また、モーションコントローラーの操作により、バーチャル空間内での移動や、ドアを開けて避難することなどのインタラクション機能の実装が可能となる。



図-1 PC 接続型の VR デバイス

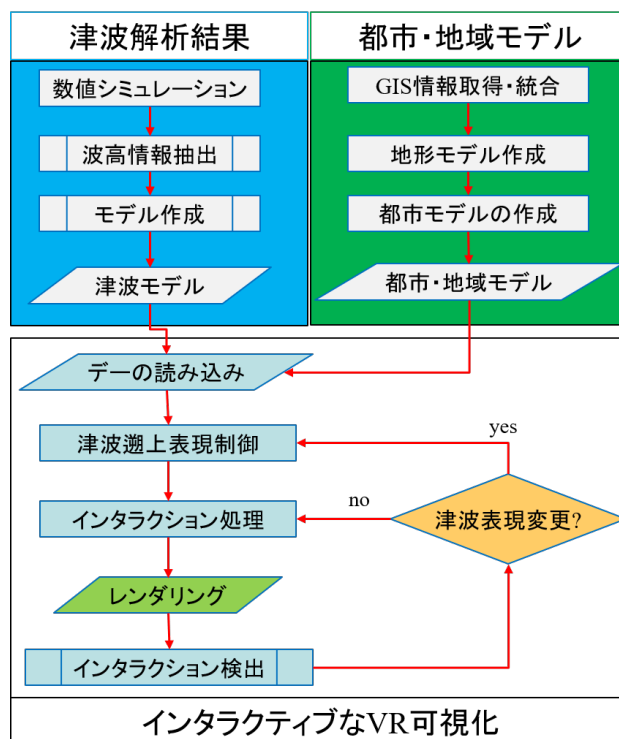


図-2 本システムのフローチャート

### 2.2 ソフトウェア

本研究では統合開発環境内蔵 Unity 2019.4.6f1 を用いてシステムの開発を行った。各プログラムは C# で記述し、津波遡上表現制御プログラムには一部 HLSL で記述した。VR 機能の実装には MR 開発ツールキットである MRTK v2.51 を用いた。なお、各モデリングソフトウェアについては後述する。

## 3. 本システムの概要

図-2 に示すように、本システムは津波解析結果の導入、都市・地域モデルの導入、インタラクティブな VR 可視化から構成されている。津波が何時に、どのぐらいの波高で何処まで遡上することを臨場感のある VR 体験を通じて、対象地域の住民の防災意識向上の促進を目的とする。体験者の体の動きを検出し、リアルタイムに反映されるインタラクティブなレンダリングにより、臨場感のある VR 体験を実現する。

### 3.1 津波解析結果の導入

先行研究<sup>1)</sup>の手法では、任意形状への適合性に優れる三角形要素を用いた有限要素法による津波解析<sup>2)</sup>結果を



FBX 形式に変換して利用した。そして、津波遡上表現においてデータ量の多い FBX データを次第に読み込んで描画する必要があるため、CPU の処理負荷が高まり、それにより描画遅延も高まる。全天球動画作成のためのプリレンダリングには支障がないが、インタラクティブなレンダリングを使用する本システムでは、高い描画遅延が VR 酔いを引き起こす大きな要因となるため、他の導入手法が必要だと考えられる。

本研究では、データの読み込み量を低減させるために、Unity 内の地形機能 (Terrain) を用いて津波モデルを作成して導入を行った。なお、津波モデルの作成手法については後述する。

### 3.2 都市・地域モデルの導入

先行研究の手法<sup>1)</sup>に使用された都市・地域モデル<sup>3)</sup>は本システムに適切ではないのため、新たなモデリング手法が必要となる。適切ではない原因として、まず、大領域に該当する地形モデルのテクスチャーの品質低下や、後述する津波モデルと重ね合わせる際にずれの発生が避けられないため、違和感が生じることが挙げられる。また、中領域に該当する都市モデルが地理空間情報に一部一致しないことにより、将来的に津波避難シミュレーション結果の導入が困難となることが挙げられる。

本研究では、上述した問題を解決した手法を用いて、都市・地域のモデルを作成し、導入を行った。なお、作成手法の詳細については後述する。

### 3.3 インタラクティブな VR 可視化の導入

インタラクティブなレンダリングを実現するために、MRTK の機能で HMD 内蔵センサーで検出された回転・位置情報を用いて、体験者の体の動きに応じた現在視点の映像をリアルタイムに描画する機能の実装を行った。

また、津波避難防災教育を支援するための VR インタラクション機能として、津波遡上表現制御機能及び自由移動機能の導入を行った。各 VR インタラクション機能の詳細については後述する。

### 3.4 アプリケーション作成

Unity 環境がない PC でも実行できるように、システムのアプリケーション化を行った。

## 4. 津波モデルの作成

データの読み込み量を低減させる津波モデルを作成するために、まず、津波解析結果から波高情報の抽出を行う必要となる。科学データ可視化ライブラリー VTK を用いて、解析結果の各時間ステップの波高情報を等間隔に抽出し、画像データに格納する。格納した波高情報は、各位置における波高値と解析結果全体の波高最大値の比である。次に、波高情報、波高最大値を用いて空間充填 (Tessellation) により立体感のある曲面のモデルの作成を行う。最後に、水の質感を表現するために、Unity 内のシェーダー作成可視化ツール (Shader Graph) を用

いて水の表面反射及びフレネル反射を表現できるシェーダーコードを作成し、Terrain シェーダーの該当した部分に入れ替えて津波モデルに適用することで、水表現が可能な津波モデルの作成が可能となる。

この手法で作成した津波モデルの使用により、波高情報のみを更新することで津波遡上表現可能のため、必要となるデータ読み込み量が低減され、描画遅延を軽減できる。また、画像データに格納される波高情報に対する補間を行うことで、よりスムーズな津波遡上表現が可能となる。

## 5. 都市・地域モデルの作成

インタラクティブな VR 可視化に適した地形モデル及び都市モデルを地理空間情報を用いて作成を行った。

### 5.1 GIS 情報の取得・統合

地理空間情報として、国土地理院から取得した基盤地図情報及び数値地図を取得し、農地データとして「筆ポリゴンデータ」(農林水産省)を用いた。なお、本研究では建物の高さを取得するために、マッピングソフトウェア (Pix4D mapper) を用いて、ドローン写真より数値表層モデルを作成して利用した。

図-3 に示すような地理空間情報を各ソフトウェアに効率的に導入するために GIS ソフトウェア (ArcGIS) で統合を行い、ArcGIS Online にアップロードした。なお、数値標高モデル (DEM) 及び数値表層モデル (DSM) に

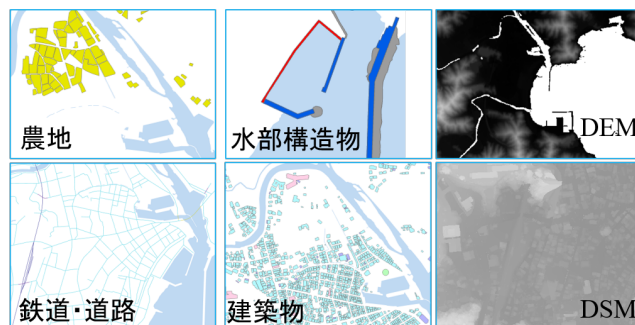


図-3 地理地図情報

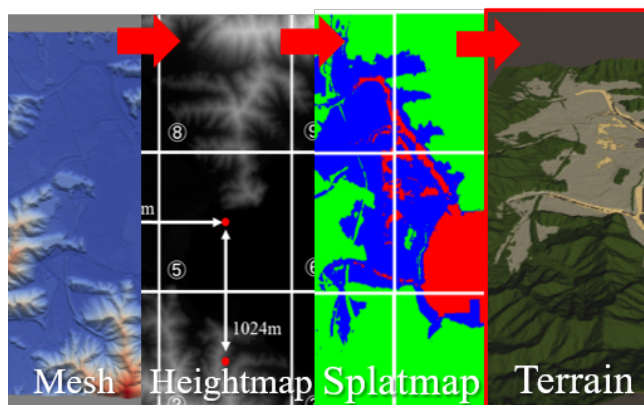


図-4 地形モデルの作成

関しては tiff データに書き出して利用した。

## 5.2 地形モデルの作成

津波モデルと重ね合わせる際のずれの発生を避けるために、図-4 に示すように、VTK を用いて津波解析用地形メッシュから高さ情報 (heightmap) を抽出し、山、都市部、沿岸部用のテクスチャーを自動的に適用させるために、標高に応じて色分けした画像データ (Splatmap) を作成して、津波モデルと同じく Unity の地形機能を用いて地形モデルを作成した。

また、テクスチャー高品質化及び木の導入を行うために、Asset store から取得した CTS(Complete Terrain Shader) 及び Meadow Environment Dynamic Nature のアセットパッケージを利用した。

## 5.3 都市モデルの作成

都市景観モデリングソフトウェア (CityEngine) を建築物モデル用いて作成を行った。CityEngine では、CGA スクリプトに記述された仕様に基づいて、建築物を表す地理空間情報を 3D モデルに変換する機能を持ち、それを用いることで建築物モデルを効率的に作成することが可能となる。CGA スクリプトの作成において、建物の高さ情報として、図-5 (左) に示すように、ArcGIS を用いて各建物の代表点における DSM と DEM の差値を抽出て利用した。建築物面データ及び作成した CGA スクリプトに基づいて、図-5 (右) のような建築物モデルを作成可能となる。

道路・鉄道、海岸構造物、農地のモデルをインフラ設計ソフトウェア (Infraworks) を用いて作成を行った。該当する地理空間情報の各属性区分ごとにスタイルを作成する必要があるため、道路・鉄道については、それぞれ橋部、通常部、トンネル部ごとにスタイルを作成し、水部構造物については透過水制と防波堤のスタイルを個別に作成した。スタイルの適用により図-6 に示すようなモデルが作成可能となる。

## 5.4 各モデルの統合

最後に各モデルの統合を行う。作成された建築物モデル等を fbx 形式で書き出し Unity に導入し、日本平面直角座標原点の座標値を用いて位置合わせを行った。

## 6. VR インタラクション機能

対象地域の住民である体験者に都市・地域モデル内の日常生活に身近な場所から津波の遡上を確認させることや、避難経路を確認させることなどを通じて、早期避難の重要性を確認させ、津波防災意識を向上させることが可能だと考えられる。このような津波防災教育に有意味なインタラクションを実現するために、必要な VR インタラクション機能として、まず、津波の遡上が遅いため、津波モデルの遡上速度を動的に変更させる津波遡上表現制御機能が必要だと考えられる。また、都市・地域モデル内での自由移動機能の実装を行った。

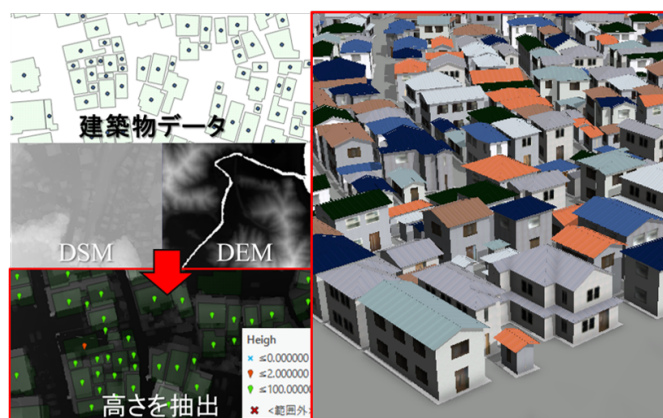


図-5 建築物モデルの作成

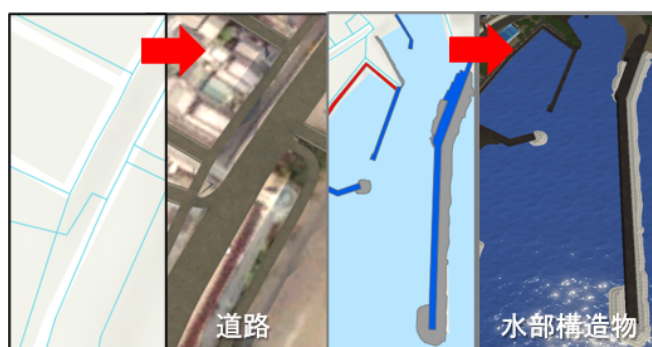


図-6 道路・海岸構造物モデルの作成

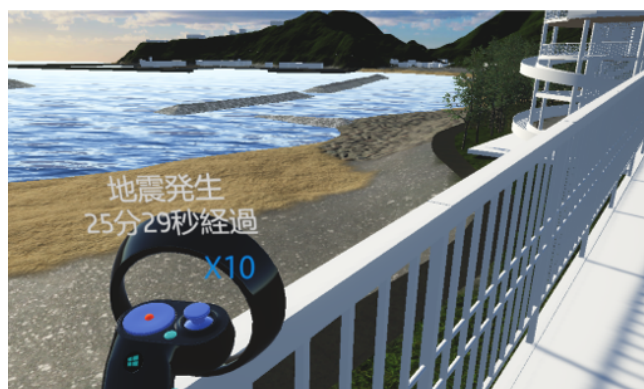


図-7 津波情報の提示

## 6.1 津波遡上表現制御機能

津波遡上表現を随時に変更可能な制御機能の実装について説明する。津波遡上を表現するには、出力デバイスのフレームレートに合わせて、波高情報に対する補間を行い、津波モデルに更新することが必要がある。波高情報の補間を行う際に図-8 に示すように、まず、津波解析結果の各解析ステップと次ステップの波高情報に対する線形補間を行い、フレームごとの変化量 ( $\Delta$  heightmap) を求める。そして、各フレームの波高情報として、現在ステップの波高情報を経過したフレーム数回だけ変化量を足し合わせたものを用いる。CPU の処理負荷を軽減させるために、Compute Shader を用いて GPU による補間計算の並列化を行う必要がある。補間計算で得た各フレームの波高情報を次々と更新していくことで津波



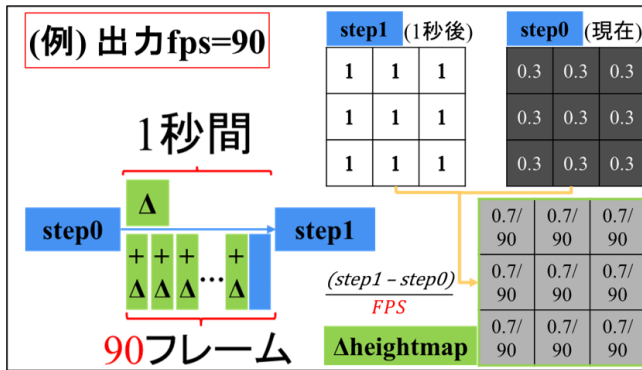


図-8 波高情報の補間・更新

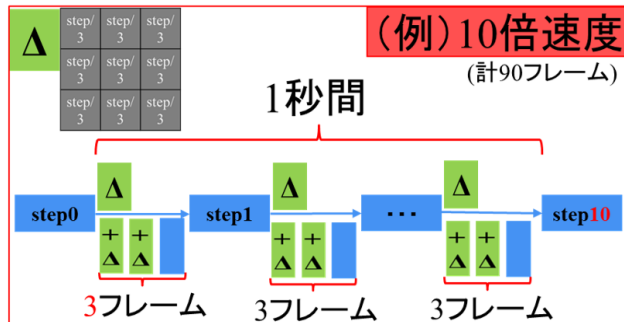


図-9 津波遡上速度変更

の遡上を表現可能となる。図-9に示すように補間する回数を変更することで、フレームレートを保ちながら、津波遡上表現の速度を変更することが可能となる。最後に、図-7に示すような、地震発生後時刻や津波遡上速度などの文字情報を動的に提示する機能を実装した。

## 6.2 自由移動機能

都市・地域モデル内移動可能な領域を設置し、MRTKを用いてVRデバイスのモーションコントローラーの操作で移動できる機能を実装した。

## 7. 適用例

高知県中土佐町を対象地域として、南海トラフ地震による津波を想定した解析結果を用いたVR津波体験システムのアプリケーションを作成した。

### 7.1 各モデルの作成

前述した手法で津波モデルを作成した。使用した津波解析結果は、当該地域の津波被害が最大となる条件である、中央防災会議が提供している断層モデル4から算出された水変動量を用いたものである。また、図-10に示すように、前述した手法でを用いて、対象地域のGIS情報より都市・地域モデルを作成・統合を行った。

### 7.2 VR可視化結果

図-11、図-12に示すように、臨場感のあるVR体験を実現した。

## 8. おわりに

本研究では、防災教育のためのインタラクティブなVR津波体験システム構築を行った。



図-10 各モデルの統合



図-11 VR可視化結果(第2避難タワー視点)

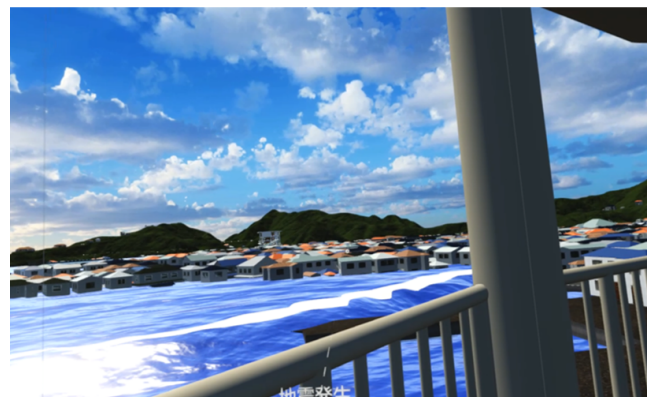


図-12 VR可視化結果(第1避難タワー視点)

今後の課題として、津波避難シミュレーション結果の導入や、防災教育のためのVR体験のシナリオの導入及び本システムによる防災教育効果に対する検証・評価を行うことが挙げられる。

### 参考文献

- 1) 植野雄貴, 金澤功樹, 陳詩凌, 近真弥, 大川博史, 檜山和男: 防災教育のためのVR技術を用いた津波とその避難の疑似体験システムの構築に関する研究, 第46回土木学会関東支部技術研究発表講演概要集, I-76, 2019.
- 2) 利根川大介, 檜山和男: 安定化有限要素法による非線形分散波理論に基づいた津波遡上解析手法の構築研究, 応用力学論文集, Vol.12, pp. 127-134, 2009.
- 3) 陳詩凌, 金澤功樹, 植野雄貴, 大川博史, 檜山和男: GIS/CAD/ドローンを用いた高精度地域モデルの構築手法に関する研究, 第46回土木学会関東支部技術研究発表講演概要集, I-77, 2019.

# 地下埋設物を対象とした AR 可視化システムの構築と描画手法の検討

## AR visualization system for underground structure and examination of drawing method

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 洲崎 文哉  
Fumiya SUSAKI

### 1. はじめに

近年、様々な分野において拡張現実感 (Augmented Reality, 以降 AR) 技術<sup>1)</sup>を用いた可視化の有用性が認識され<sup>2)</sup>, 建設分野においても様々な諸活動において活用事例が報告されている<sup>3) 4) 5) 6)</sup>. AR 可視化が有効な分野の一つに, 地上から見るができない地下埋設物などの地下構造物の可視化がある<sup>7) 8) 9)</sup>.

著者らはこれまで, この点に着目して地下埋設物に対する AR 可視化システムの構築研究<sup>9)</sup>を行ってきた. しかし既往のシステムでは, 機種依存性が高くシステムの移植性の面で課題があった. そこで本研究では, 近年普及が著しく AR 可視化においても注目<sup>10)</sup>されている一般的なスマートフォン・タブレット端末に着目して, iOS に対応した ARKit<sup>11)</sup>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た.

本原稿では, 地下埋設物の CAD データから作成された 3 次元モデル (以降 CAD モデル) を現地において重畳させるシステムの構築を行った. 3 次元 CAD モデルの重畳位置の精度を向上させるための方法として, AR マーカーを平面座標位置が既知の既設構造物に設置する方法を行った. また, 可視化における問題として, 地下埋設物の 3 次元 CAD モデルを地上から AR 可視化すると, 一般に構造物が地上に浮き上がって見える点と重畳させたモデルによって周辺の風景が見えず, 現実空間に対してモデルが強調されすぎており, 周辺環境との位置関係の理解がしづらい点が指摘されているが, これらの問題点を解決するための方法として, 開口部モデルを導入したマスキング処理を行い, 重畳させるモデルの透過率変更を行った. これらの方法の導入

により, 安全な施工・維持管理の支援システムとなることを目指した. 本システムの妥当性と有効性を検証するため, 実際の埋設構造物の事例に対して AR 可視化を行った.

### 2. 本システム概要

本システムのフローチャートを図-1 に示す.

#### (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<sup>12)</sup>を用いる. また, バージョンとしては, 2019.4.12f1 を用いる.

AR システムの開発キットとして, iOS に対応する ARKit3.0 を用いる. ARKit<sup>11)</sup>とは, Apple による iPhone と iPad の単眼カメラを使って動作する開発者向けの AR 開発キットである. ARKit の特徴としては, 特殊な機器を必要とせず, iPhone や iPad 内の標準搭載のセンサーと画像解析から AR を実現していることが挙げられる. また, デバイスは Apple 社が販売しているタブレット端末である iPadPro の 11 インチ (2018 年モデル) を用いた.

#### (2) データ入力

データ入力では, 重畳させる可視化情報とマーカー画像を入力する. 可視化情報としては, 図-2 に示すような平面直角座標系における座標と形状情報を持つ地下埋設物の CAD モデルを用いる. なお, Unity との互換性が高い FBX 形式のデータへ変換を行ったモデルを用いるが, 変換時には, Unity 内の座標軸と揃える必要があり, CAD データにおける座標軸は, X 軸が東, Y 軸が北を向いている. そのため,

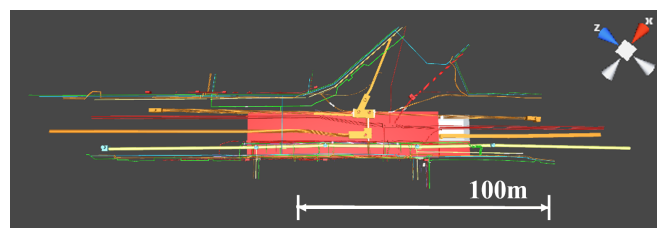


図-2 CAD データから作成されたモデル

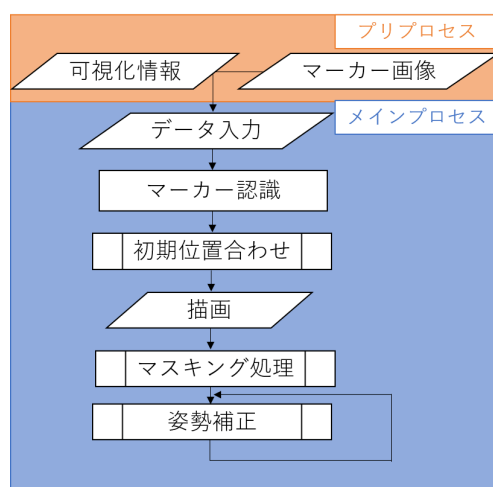


図-1 本システムにおけるフローチャート

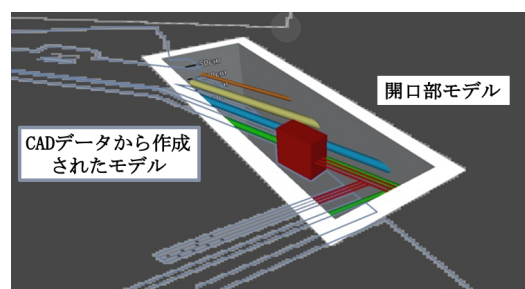


図-3 開口部モデル



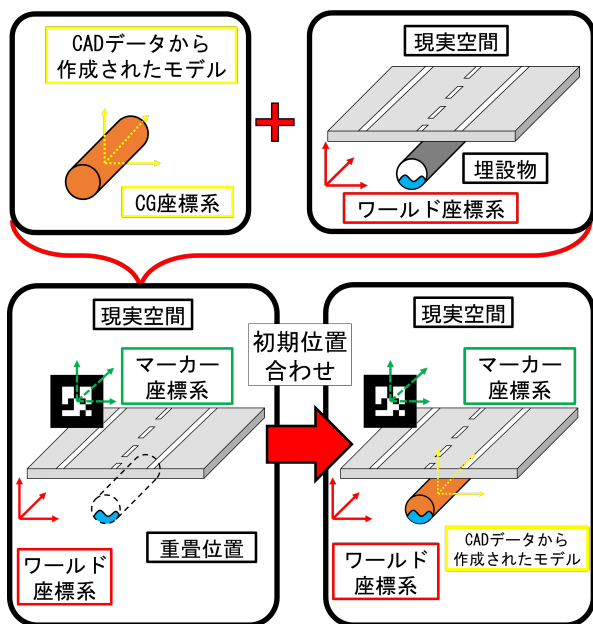


図-4 初期位置合わせ手法



図-5 マーカーの設置方法

Unity 内では、X 軸が東、Z 軸が北を向くようにする必要がある。また、Unity 内の単位は、m 単位を用いる。

現地での CAD モデルの AR 可視化では、図-3 に示す開口部モデル（開口部以外の CAD モデルを非表示とするマスキング処理により物体の前後関係を正しく表現するための開口部の 3 次元モデル）を用いる。開口部モデルを用いたマスキング処理については、2(4) において述べる。

### (3) マーカー認識・初期位置合わせ

本システムでは、アプリケーション起動時のデバイスの位置・向きがそのまま原点として設定される。そのため、可視化するモデルの重畳位置を決定する必要がある。

そこで本研究では、初期位置合わせに ARKit の機能である画像トラッキングを用いる。画像トラッキングは、あらかじめマーカーとして設定した任意画像の特徴点を検出する機能である<sup>11)</sup>。図-4 に初期位置合わせ手法を示す。具体的には、デバイスのカメラ映像がマーカーとして設定した任意画像を検出し、マーカーの座標系（マーカー座標系）と

なるその画像の中心点の座標と角度を取得し、現実空間の座標（ワールド座標系）に置き換える。そして、モデルの重畳させたい位置とマーカー設置地点との距離をあらかじめ設定しておくことで、CAD モデルの座標系（CG 座標系）をマーカー座標系に合わせ、ワールド座標系における重畳位置を決定する。

現地での CAD モデルの AR 可視化では、既往のシステムでは図-5 の (a) のように、三脚を用いて行っていた<sup>9)</sup>。しかし、三脚によるマーカー設置では、人の手で位置・角度を決定するため、正しく重畳するのに、三脚の位置・マーカーの角度・マーカーの中心点の地表面からの高さといった項目を調整する必要がある、手間と時間がかかる問題点があった。そこで本研究では、現地における CAD モデルの重畳の精度を向上させるために、図-5 の (b) のような街灯の支柱などの平面直角座標系における座標が分かる既設構造物に対してマーカー設置を行う。図-5 の (b) のように、既設構造物に対し、マーカー画像を設置することで、マーカーの中心位置の高さ情報を与えるだけで CAD モデルを現地において簡便にかつ高精度に重畳することが可能となる。

### (4) 描画・マスキング処理

AR 可視化する際、可視化するモデルの切り替えや表示非表示の切り替えには、ユーザーインターフェイスとして、ディスプレイ上にボタンを設置し、ディスプレイをタッチすることで、切り替えを行う。そのため、デバイスのディスプレイ上で重畳させながら操作が可能となる。

AR 可視化においては、重畳された埋設構造物の CAD モデルは現実空間の物体の前後関係を正しく表現していないため、手前にある（地面に浮いている）ように見える問題が生じる。このため、それを回避するためのオクルージョンを行う必要がある。本研究では開口部モデルを用いたマスキング処理を施すことで、オクルージョン処理を行う。具体的には、図-3 に示す開口部モデルを用いるが、開口部の外側の平面領域においては透明化するマスキング処理を施すことで、開口部モデルの外側の CAD モデルを非表示にすることができる。また、開口部モデルの縁にグラデーションを入れることにより、現実の映像になじませる工夫を行った。

### (5) 姿勢補正

本研究では、初期位置合わせに画像トラッキングを用いた後、画像トラッキングから ARKit のワールドトラッキングへ切り替える。ワールドトラッキングとは、カメラ映像から得られる特徴点の変化とデバイスに搭載されているモーションセンサーによりデバイスの加速度・傾き・方向などの慣性測定から現実空間とバーチャル空間との対応関係を推定する機能である<sup>11)</sup>。従来のマーカーを用いた AR 可視化では、マーカー画像をカメラ映像内にとらえ続ける必要があったが、ワールドトラッキングを用いることで、マーカー画像を認識していない場合でも、可視化したモデルは与えられた座標位置に重畳され続けるため、マーカー画像をカメラ映像内にとらえ続ける必要がなくなり、自由な視

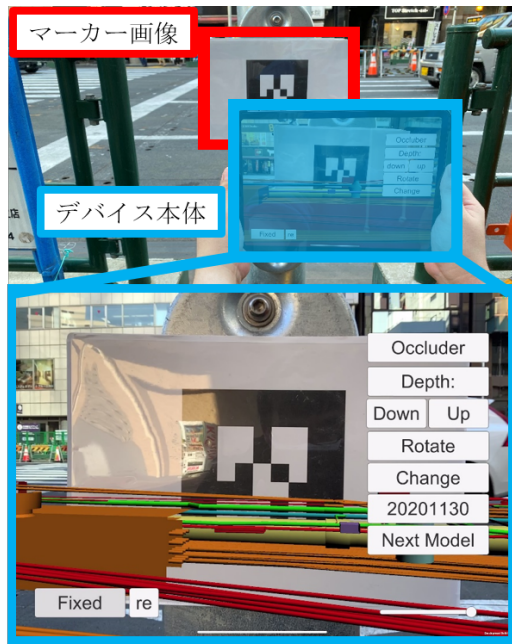


図-6 位置合わせの様子

点での AR 可視化が可能になる。

### 3. 適用例

現地において地下埋設物の CAD モデルを重畳させる AR 可視化システムの適用について述べる。現地で実際に位置合わせを行っている様子を図-6 に示す。

#### (1) 重畳の高精度化

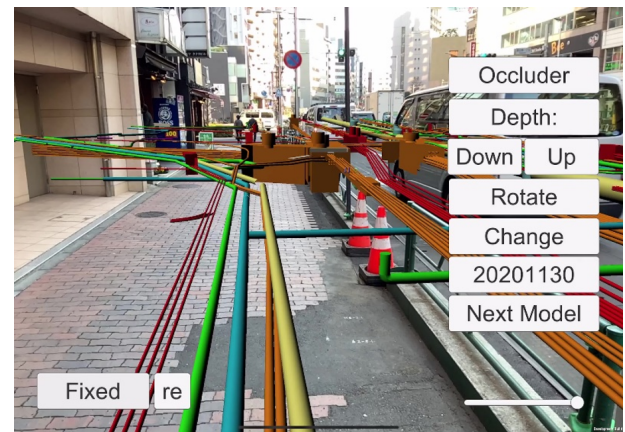
本研究では、従来システムに比べて重畳を簡便に正確に行うため、図-5 の (b) のような既設構造物にマーカーの設置を行った。マーカー画像を設置する既設構造物は、可視化する CAD モデルに合わせ、平面直角座標系で測量した座標を用いることで、重畳精度の向上を図る。そのため、データ入力でも述べた通り、Unity 内の座標軸と単位をあらかじめ揃えておく必要がある。また、マーカー画像を設置する際、あらかじめ地表面からの高さを計測し、設定した高さにマーカー画像を設置する。その際、マーカー画像の座標と角度を取得し、可視化する CAD モデルに与えることで、重畳位置を決定するが、マーカー画像自体が地表面に対して垂直になるよう設置する必要がある。

平面座標が既知の既設構造物が周辺に存在しない場合には、測量により設定する必要があるが、既設構造物に対しマーカーを設置することで、従来の三脚によるマーカー設置よりも設置時にかかる工程が減り、マーカー設置が容易になった。従来の三脚によるマーカー設置では、三脚を座標が既知の基準点上に正しく据え付けた上で、マーカーを地表面に対して垂直に設置するとともに向きの調整の必要があるが、その精度は設置者の技量に依存する。一方、マーカーの設置先を座標位置が既知の既設構造物にすることで、簡便にかつ正確に重畳を行うことが可能となる。

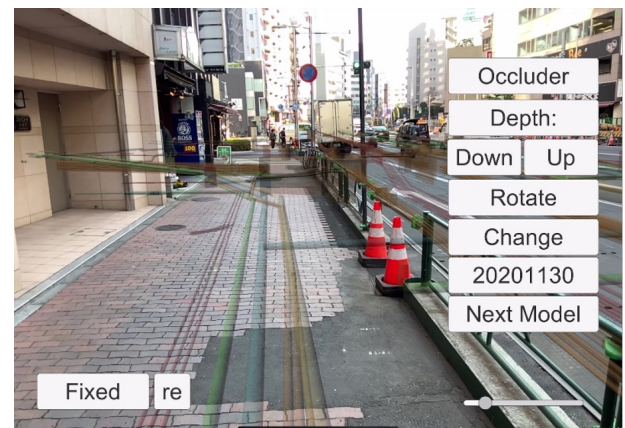
#### (2) 描画手法の検討

屋外での可視化を行った結果を図-7 に示す。

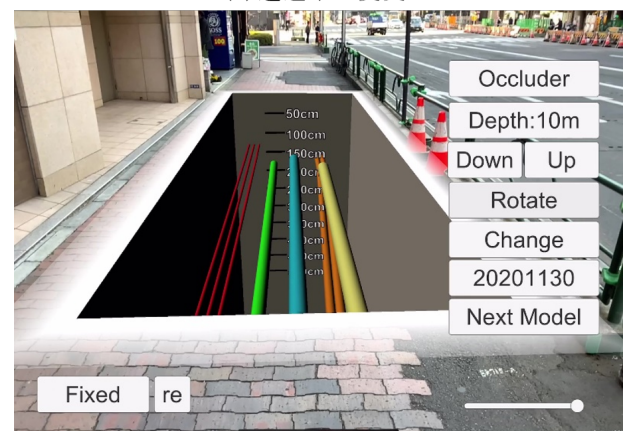
図-7(a) に示すように、重畳させたモデルによって周辺の風景が見えず、現実空間に対してモデルが強調されすぎ



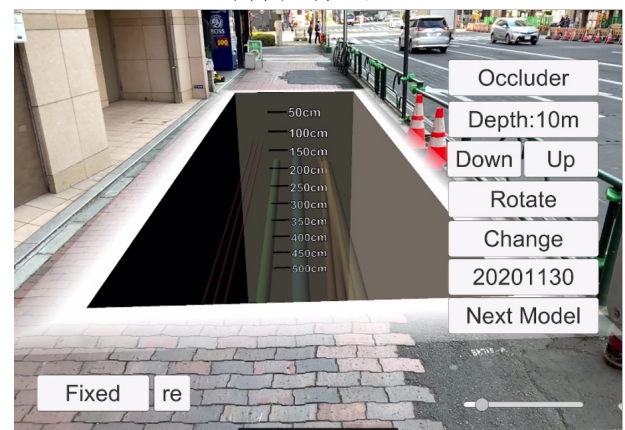
(a) 全体表示



(b) 透過率の変更



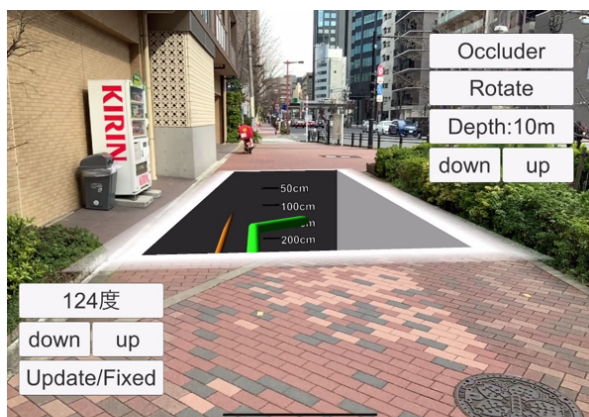
(c) 開口部モデル



(d) 開口部モデルと透過率の変更

図-7 可視化結果





(a) 開口部モデル



(b) 鉛直深さ100cm

(c) 鉛直深さ150cm



(d) 鉛直深さ200cm

(e) 鉛直深さ250cm

図-8 開口部モデルの深さ変更

ており、周辺環境との位置関係の理解がしづらい。そこで CAD モデルの透過率を変更することで、図-7(b) のように、現実空間の風景になじみ、現実空間に溶け込むことができ、違和感の低減と周辺環境との位置関係の理解が容易になったことが分かる。

一般に地下埋設物をマスキング処理することなく表示すると図-7(a) に示すように、CAD モデルが地面より上にあるように見えている。そこで開口部モデルを用いたマスキング処理を行うことで、図-7(b) のように違和感がなく可視化表示されていることが分かる。また、開口部モデルに目盛りを付加することにより、地下埋設物の位置を定量的に把握することができる。透過率の変更と併せて利用することで、目盛りを読み取りやすくなり、より鉛直方向の理解が深まることが分かる。

図-8 に開口部モデルの底面の深さ変更機能を使用した結果を示す。図-8 の (b) から (e) に示すように、底面の高さ変更を用いることで、鉛直・深さ方向に対する位置関係の理解がより容易になることが分かる。

#### 4. おわりに

本研究では、地下埋設物の設計・施工・維持管理を支援する AR 可視化システムの構築を行った。また、地下埋設物の AR 可視化システムにおける表示手法の検討を行った。その結果以下の結論を得た。

- 現場において CAD モデルを重畳させる AR 可視化

システムでは、既設構造物に対しマーカーを設置することで、重畳が簡便にかつ高精度に行えることが可能となった。

- 透過率を変更し、現実空間の風景になじませることで、現実空間に溶け込ませ、違和感の低減と周辺環境との位置関係の理解が容易になった。
- 開口部モデルを用いることで、鉛直方向の表現における課題が解決できた。また、透過率の変更と併せて利用することで、目盛りを読み取りやすくなり、より鉛直方向の理解が深まることができ、底面の深さ変更によって、鉛直・深さ方向に対する位置関係の理解が深まる。

適用例を通して、本 AR 可視化システムは、設計・施工・維持管理の支援に有用なツールとなることが確認できた。

今後は、移動によって発生する重畳のずれについてその定量化と改善方法について検討を行うとともに、一定の光量が確保されている日中においては正しく重畳されることは確認できたが、重畳の安定性の確保に必要な光量等について検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) Sutherland, I. E. :A head-mounted three dimensional display, The AFIPS Fall Joint Computer Conference, pp.757-764, 1968.
- 2) Caudell,T.P.and Mizell,D.W.:Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes,IEEE Hawaii International Conference on System Sciences,pp.659-669,1992.
- 3) 矢吹信喜:土木建設分野における VR/AR の活用に関する研究と実務への適用, 計測と制御, Vol. 55, No6, pp. 483-488, 2016.
- 4) 菅田大輔, 榎山和男, 宮地英生, 前田勇司, 道前武尊, 西畑剛, 厚山伊智朗, 横山侑機:Extended Tracking 技術に基づく環境流れ問題のためのマーカーレス AR 可視化システムの構築, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.72, No.2, pp.I.148-I.155, 2016.
- 5) 池田 直旺, 花立 麻衣子, 榎山 和男, 車谷 麻緒, 吉永 崇, 前田 勇司, SLAM 技術に基づく空間情報をを用いた AR 可視化システムの構築とその適用性の検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 73, No2, pp. II.48-II.54, 2017.
- 6) 花立麻衣子, 池田直旺, 凌国明, 榎山和男, 宮地英生, 前田勇司, 西畑剛:水環境・防災シュミレーションのためのマーカーレス AR システムとその適用性について, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.I.234-I.241, 2017.
- 7) 三木浩, 岡本修, 西原邦治, :GNSS を活用した AR 技術「地下埋設物可視化システム」, アーバンインフラ・テクノロジー推進会議技術研究発表会, Vol.29, No.B8, 2017.
- 8) vGIS: <https://www.vgis.io/>, (入手 2021.2.27).
- 9) 池田直旺, 榎山和男, 吉永崇, 琴浦毅, 石田仁:施工現場における地下構造物の AR 可視化システムの構築, 計算工学講演会論文集, Vol .24, C-13-01, 2019.
- 10) 田上 慎, 飛澤 健太:AR (拡張現実) は, 人間が手にした新たな未来:AR の変遷と展望, 情報管理, Vol.59, No.8, pp.526-534, 2016.
- 11) AppleDeveloper, <https://developer.apple.com/jp/augmented-reality/>, (入手 2021.2.27).
- 12) Unity:<https://unity.com/ja>, (入手 2021.2.27).

# 点群深層学習を用いた水中物体認識手法の構築

Development of an underwater object recognition method using point cloud deep learning

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 八木 笙太  
Shota YAGI

## 1. はじめに

近年、国土交通省の推進する BIM/CIM, i-construction といった取り組みがなされており、漁港施設等においてはセンシング技術を活用した点検技術の検討が行われている<sup>1)</sup>。センシング技術の発展は著しく、水中においては ASV(Autonomous Surface Vehicle) や AUV(Autonomous Underwater Vehicle) などに対して音響測探機である SONAR を搭載することによって、簡易で安価かつ高精細に水中構造物の形状や水底の洗堀、土砂体積状況の確認が出来、高品質な水中マッピングデータの作成が従来と比較して格段に容易となっている<sup>2)</sup>。

しかしながら取得された水中マッピングデータは色彩情報を持たない音の反射の強弱によって表される膨大な点群データである。そのため、データ取得後の処理において、例えば水中の底質判別や物体検出等では、専門技術員による判読に頼っており、人員が限られていることや時間と労力がかかること、ヒューマンエラーが起りやすいことといった問題点が挙げられており、高度に利活用する際の障害となっている。

そのため、本研究の目的を、取得した水中マッピングデータに対し、自動化や省力化に大きく貢献できる深層学習を用いて、水中に存在する物体を自動的に迅速かつ正確に判別し、水中の現況把握を補佐する手法の構築とする。本稿では取得した水中マッピングデータから図-1 に示す消波ブロックを対象として、点群深層学習による識別モデルの構築を行い、その学習モデルの評価について報告する。

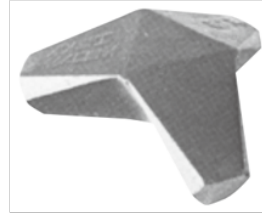
## 2. 深層学習

深層学習とは機械学習手法の一つであるニューラルネットワークモデルの内、中間層を多層に結合させたモデルを指す。深層学習では、一般にビッグデータと呼ばれる膨大なデータから、特徴量と呼ばれる、対象としたデータ全体の構造を示す値をニューラルネットワークモデル自らが学習し、その後作成したモデルを用いて分類や予測問題に活用する。

ニューラルネットワークモデルの学習において、特徴量を効率的に捉えるためにデータ特性に応じた様々なデータ処理の手法や中間層のモデルが提案されている。

次項では、画像データや動画データに対して用いられる中間層の一つである畳み込みニューラルネットワーク (CNN; Convolutional Neural Network) について、また点群データに対して用いられるデータ処理手法と提案されている学習手法について説明する。

三方錐ブロック



テトラポッド



図-1 検出対象の消波ブロック<sup>3)</sup>

### (1) 画像・動画データ

画像や動画データにおける分類・検出タスクには主に畳み込みニューラルネットワーク (CNN) と呼ばれる手法が用いられている。CNN は一般に、畳み込み層とプーリング層を含んでおり、畳み込み層では画像のピクセルに対するフィルタ処理によって、着目したピクセルの近傍点の特徴を抽出する処理が行われ、プーリング層では主に Max プーリング処理によって、一定範囲内のピクセル値の最大値を抽出することで、情報の圧縮や回転に対する頑健性 (ロバスト性) の向上を図っている。

### (2) 点群データ

点群 (Point Cloud) とは、三次元の物体を表現する手法の一つであり、レーザースキャナなどで計測される点の集合体である。その点の一つ一つには計測機器からの三次元の位置情報や、計測機器のカメラ映像のデータから得た色情報 (RGB) を持つことができる。現在点群データにおける分類や検出タスクには主に四つの手法が提案されている<sup>4)</sup>。以下にその 4 つの手法を示す。

- RGBD 画像ベース
- 多視点画像ベース
- 点群ベース
- ボクセルベース

この内、RGBD 画像ベースと多視点画像ベースの手法はそれぞれ取得した点群データを二次元の画像データに変換しているものであり、既存の CNN モデルによって分類・検出タスクを行うことが容易となっている。しかしながら、これらの手法は三次元データである点群としての特性の損失に繋がっている。それに対し、残り二つの手法である点群ベースの手法とボクセルベースの手法では、点群データとしての特性を活用した手法がそれぞれ提案されている。

本稿にて用いた手法は点群ベースの手法であるため、この説明にあたって点群データの特徴に関して次節にて説明をする。

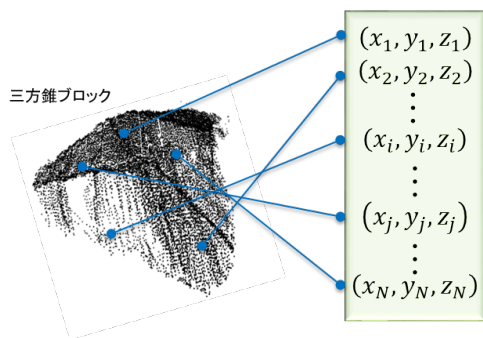


図-2 点群の特性

手法	① 点群ベース	② ボクセルベース
学習方法	点群データ + ニューラルネットワークモデル等	ボクセルデータ + 3次元CNN等
メリット	検出精度が高い	計算速度が早い
デメリット	計算速度が遅い	検出精度が低い

図-3 点群の特性

#### (a) 点群の特性

図-2 に示すように点群データは用いた計測機器から取得した順番によってデータが作成されるため、そのデータには順序がなく、隣接関係が自明ではないといった特性を持っている。また、三次元モデルとしての特性として、物体の移動や回転によってその物体の種類が変化しないといった剛体変換不変性を持ち合わせている。

その点群の特性により、従来の画像データや動画データに用いられてきた CNN による着目点の近傍点の特徴を利用した学習を行うことは困難であり、点群データを直接学習に用いる場合には点群ベースの手法、ボクセルベースの手法が取られている。

#### (b) 点群ベース・ボクセルベース手法

図-3 に点群ベースの手法およびボクセルベースの手法の特徴の比較を示す。点群ベースの手法では、取得した生の点群データに対して、PointNet<sup>5)</sup> といった各手法において提案された新たなニューラルネットワークモデルを適用している。ネットワークモデルの構築は困難であるが、点群データの特性をうまく活かすネットワークが出来るのであれば、検出精度が高いモデルを作成することが可能となっている。ボクセルベースの手法では、VoxelNet<sup>6)</sup> のように点群データをダウンサンプリングすることによって、一定の正規格子で表される大きさに含まれる代表点で構成され、それに対して三次元畳み込みニューラルネットワーク等を適用している。ダウンサンプリングなどによって情報量が削減されるため、計算速度は早いですが、点群ベースの手法と比較して精度は低い傾向になる。本稿では、水中マッピングデータにおける消波ブロックの検出において、検出精度を重視し、点群ベースの手法を用いた。

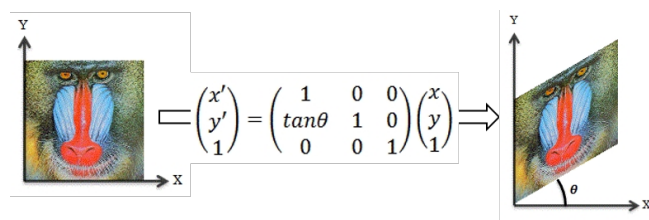


図-4 アフィン変換例

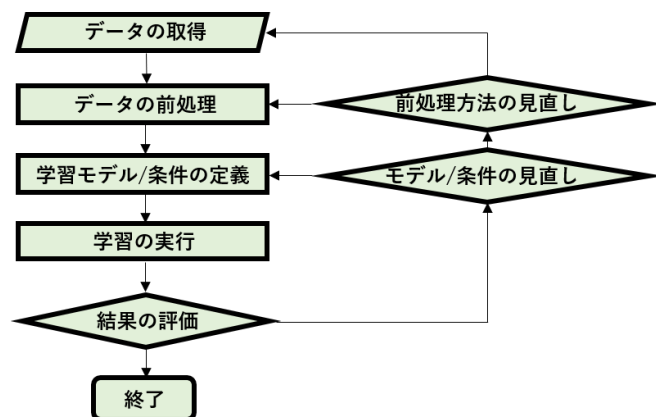


図-5 検出モデル構築のフローチャート

### 3. PointNet

本稿では検出手法は、前述した点群ベースの手法の一つである PointNet を用いる。PointNet は生の点群を入力データとした点群分類、セグメンテーション向けに開発された深層学習フレームワークであり、その後開発された分類や物体検出手法の基本の形とされているため、今回これを採用した。

#### (1) PointNet の特徴

PointNet では生の点群データを処理するため、点群の特性に対してネットワークに主に二つの工夫がなされている。一つは対称関数で構成されたネットワークを用いることである。具体的には PointNet は全結合層と Max プーリング層から構成されており、これらはデータの順序に関係なく処理が同じであるため、これによって順番による影響を無くしている。もう一つは図-4 に示すようなアフィン変換行列による移動と回転に対する影響を補うことである。これはネットワーク上において T-Net と呼ばれる部分にて行われている。

### 4. 適用例

検出モデル構築のフローチャートを図-5 に示す。

計算環境は、ハードウェア環境として、OS:Windows10, RAM:32GB, CPU:Intel Core i9-9900k, GPU:Geforce RTX2080 であり、ソフトウェア環境は、統合開発環境として Anaconda3 を、開発言語は Python3.8 を用いており、主に Pytorch による学習モデルの構築を行った。





図-6 使用した ASV(左) と SONAR(右)<sup>7)</sup>

鳥取県隠岐島来居港

鳥根県浜田市浜田港



図-7 データ取得エリア (GoogleMap より引用)

三方錐ブロック



テトラポッド

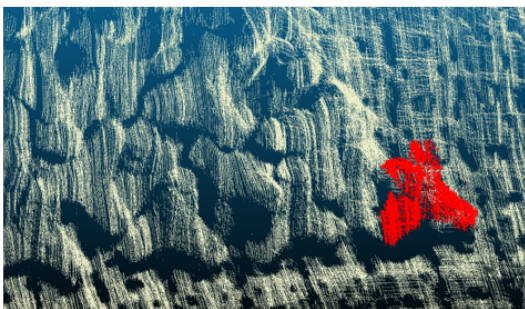


図-8 対象エリアの水中マッピングデータ

## (1) データの取得

学習に用いたデータは同研究室に属する大川さん協力の元、作成を行った。水中マッピングデータの取得にあたって、用いたセンサーを図-6 に示す。

### (a) データ取得エリア

検出対象とした三方錐ブロックとテトラポッドの点群データはそれぞれ図-7 に示すように、三方錐ブロックが鳥取県隠岐島来居港で、テトラポッドは鳥根県浜田市浜田港にて取得した。取得したマッピングデータの一部を図-8 に示す。

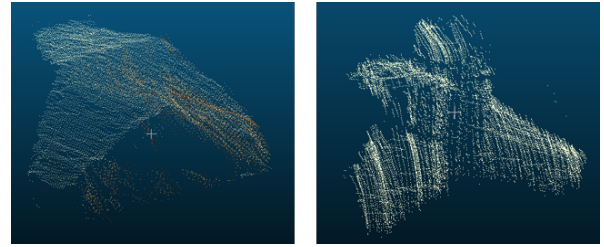


図-9 抽出した検出対象ブロック

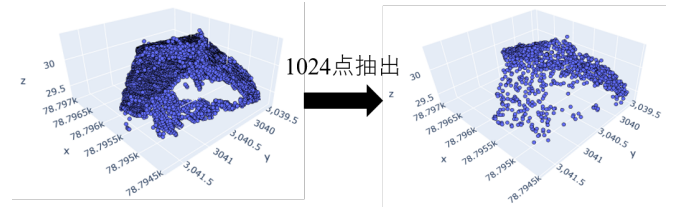


図-10 サンプリング

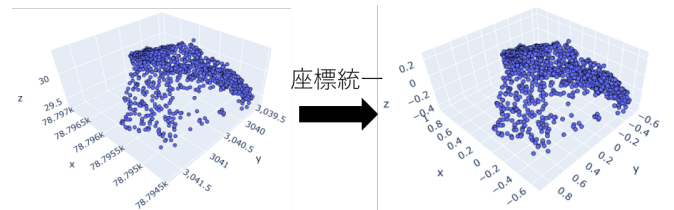


図-11 正規化

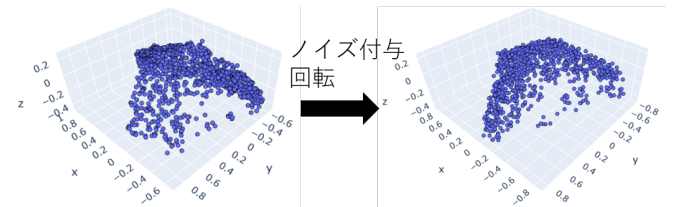


図-12 データの拡張

## (b) 学習データの抽出

取得した水中マッピングデータから学習データに用いる各消波ブロックのデータを点群処理ソフトである CloudCompare<sup>8)</sup> を用いて手作業にて一つずつ抽出を行った。図-8 において赤で示した消波ブロックを抽出したものを図-9 に示す。

今回抽出したブロックの数はそれぞれ三方錐ブロックは 80 個、テトラポッドは 25 個とした。また、各ブロックは 1,000 点から 15,000 点の点群で構成されている。

### (2) データの前処理

次に抽出した各消波ブロックのデータに対して前処理を施した。本モデル構築において行った前処理は、図-10 に示す総点数の統一および軽量化を目的としたサンプリング処理、図-11 に示すデータ形の統一を目的とした正規化、また図-12 に示すデータの多様性や汎可性能の確保を目的としたデータ拡張である。



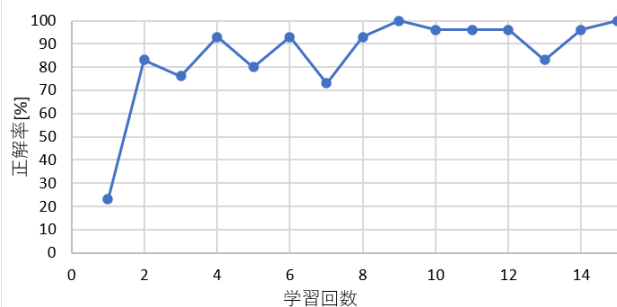


図-13 正解率の推移

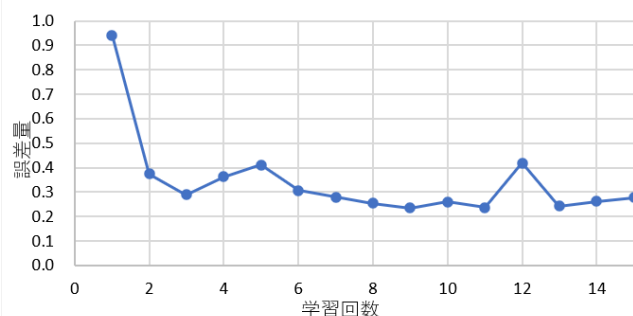


図-14 誤差量の推移

#### (a) 学習データの作成

学習には交差検証法を用いるため、抽出した消波ブロックデータを学習用データ、検証用データに分割した。具体的には、まず三方錐ブロックに対して、抽出した 80 個のデータの内、20 個を検証用データとし、残り 60 個のデータに対してそれぞれ別ファイルで保存したものを用意することによって複製し、学習用データを 120 個用意した。テトラポッドに対しても同様に、抽出した 25 個のデータの内、10 個を検証用データとし、残り 15 個を複製することによって 30 個の学習用データを用意した。合計して 30 個の検証用データ、150 個の学習用データを用いてモデル構築を行った。

#### (3) 学習条件

今回用いたニューラルネットワークは PointNet、学習回数は 15 回とした。また、学習用および検証用データに対するバッチサイズは 5 であり、最適化手法は学習率 0.001 の Adam を用いている。

### 5. 学習結果

図-13 に学習における正解率の推移を、図-14 に誤差量の推移のグラフを示す。

学習時間は 1 分程度であった。学習回数 8 回目を超えたところから値の収束が見られ始め、学習回数 9 回目、15 回目では検証用データに対する正解率が 100% になる点が見られた。

学習終了後、学習回数 15 回目時点の重みを用いて再度検証用データに対する評価を行った。結果を混同行列にて表示したものを図-15 に示す。

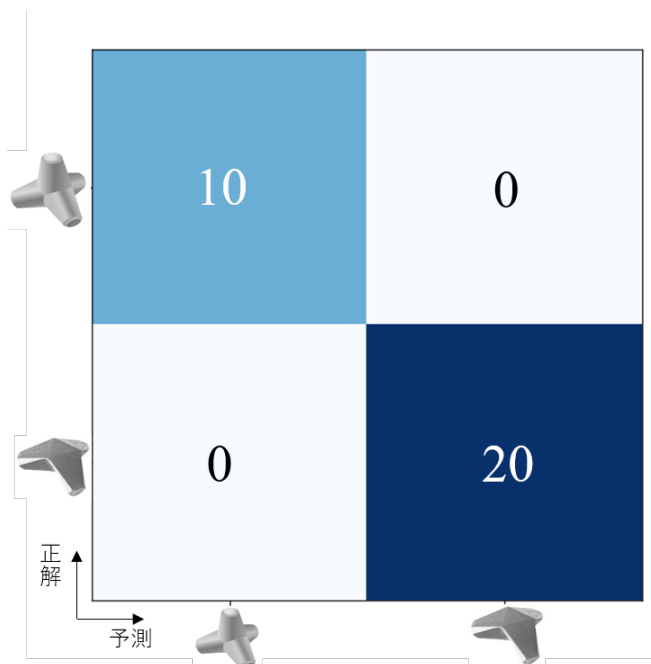


図-15 検証用データにおける混同行列

正解率 100% 時点の重みを適用することで、検証用データに対するよい結果を確認した。また、高い正解率の要因として、個々のブロックに個体差がなく形状が一定であることが影響していると考えられる。

### 6. おわりに

本稿では、水中マッピングデータにおける消波ブロックを対象とした点群深層学習による識別モデルの構築を試みた。結果として、点群深層学習による水中における物体判別が可能であることを確認し、対象とした消波ブロックには形状の個体差が少ないことから、高い正解率に結びついたことを確認した。

今後の予定としては、データ作成における効率化および汎化性能の向上、水中マッピングデータにおける領域検出手法について検討していく。

#### 参考文献

- 1) 三上信雄, 梅津啓史, 松本力, 完山暢, 大西明夫, 不動雅之, 井上真仁, 漁港施設の水中部の点検手法におけるナローマルチビームソナーの適用性検証, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.75, No.2, L91-L96, 2019.
- 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 巻, pp29-34.
- 3) 日本消波根固ブロック協会, <http://www.shouha.jp/products/>, 2021 年 3 月閲覧
- 4) 崎崎朝子, 深層学習を用いた三次元物体認識, 確率場と深層学習に関する第 2 回 CREST シンポジウム, 2018.
- 5) Qi, C.R., Su, H., Mo, K. and Guibas, L.J, PointNet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation, CVPR, 2017.
- 6) Y. Zhou and O. Tuzel, VoxelNet: End-to-end learning for point cloud based 3D object detection, in CVPR, 2018.
- 7) SEA, <https://www.seanet.co.jp/products/detail/iwbms.html>, 2021 年 3 月閲覧
- 8) Cloud Compare: <https://www.cloudcompare.org/>, 2021 年 3 月閲覧

## 弾性体の動的解析における陽解法と陰解法の比較

Comparison of explicit and implicit schemes for dynamic analysis of elastic bodies

都市環境学科 学部4年 石塚 啓起  
Hiroki ISHIZUKA

## 1. はじめに

地震大国である日本にとって、構造物に対する動的解析を行うことは防災の観点から重要である。弾性体の動的解析では、時間の離散化手法として陽解法または陰解法が用いられる。陽解法では、1 ステップあたりの計算量が少なく、大規模な計算に有利となるが、計算を安定的に行うためのクーラン条件が課せられており、時間増分  $\Delta t$  を大きく取ることができない。陰解法では、無条件安定となるため時間増分  $\Delta t$  を大きく取ることができる一方で、連立一次方程式を直接解くため、1 ステップあたりの計算量が多くなる。そこで本報告では、二次元片持ち梁の衝撃問題を取り上げ、陽解法では中心差分法、陰解法ではニューマークの  $\beta$  法でそれぞれ解析を行い、要素幅、時間増分の変更に伴う精度検証並びに計算時間について比較を行う。

## 2. 数値解析手法

## (1) 支配方程式

固体の動的なつり合い問題における支配方程式は、以下に示す応力のつり合い方程式、ひずみ-変位関係式、応力-ひずみ関係式である。

$$\partial^T \sigma - \rho \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\epsilon = \partial \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\sigma = \mathbf{D} \epsilon \quad (3)$$

ここで、式 (1) における  $\sigma$  は応力、 $\rho$  は密度、 $\mathbf{b}$  は単位体積当たりに作用する物体力であり、式 (3) の  $\mathbf{D}$  は弾性係数行列である。また、弾性体の領域  $\Omega$  の境界  $\Gamma$  には以下のように境界条件が与えられる。

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{on} \quad \Gamma_u \quad (4)$$

$$t_i = \sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i \quad \text{on} \quad \Gamma_\sigma \quad (5)$$

式 (1) に仮想仕事の原理を適用し、幾何学的境界条件 (4) および力学的境界条件 (5) を考慮すると、最終的に動的問題に対する支配方程式の弱形式は総和規約表記で以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (\partial \mathbf{u}^*)^T \mathbf{D} (\partial \mathbf{u}^*) dV + \int_{\Omega} \rho \ddot{\mathbf{u}} dV \\ &= \int_{\Omega} \mathbf{u}^{*T} \mathbf{b} dV + \int_{\Gamma_\sigma} \mathbf{u}^{*T} \bar{\mathbf{t}} dS \end{aligned} \quad (6)$$

そして、式 (6) に空間の離散化を行うことで、以下の有限要素方程式を得る。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (7)$$

ここで、式 (7) における  $\mathbf{M}$  は質量行列、 $\mathbf{K}$  は剛性行列である。なお、本報告では減衰は考慮しない。

## (2) 時間の離散化

時間に関する離散化の手法として、陽解法である中心差分法と陰解法であるニューマークの  $\beta$  法を用いる。

## (a) 陽解法 (中心差分法)

テーラー展開を用いて、速度  $\dot{\mathbf{u}}^n$  と加速度  $\ddot{\mathbf{u}}^n$  は以下のよう求めることができる。

$$\dot{\mathbf{u}}^n = \frac{1}{2\Delta t} (\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^{n-1}) \quad (8)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}^n = \frac{1}{\Delta t^2} (\mathbf{u}^{n+1} - 2\mathbf{u}^n + \mathbf{u}^{n-1}) \quad (9)$$

中心差分法により、時間に関して離散化された方程式は以下のように表すことができる

$$\frac{1}{\Delta t^2} \bar{\mathbf{M}} \mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{F}^n - \left( \mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \bar{\mathbf{M}} \right) \mathbf{u}^n - \frac{1}{\Delta t^2} \bar{\mathbf{M}} \mathbf{u}^{n-1} \quad (10)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{M}}$  は集中化質量行列である。また、陽解法の安定条件は CFL 条件より、以下のように与えられる。

$$C_r = \frac{c\Delta t}{h} \leq 1 \quad (11)$$

ここで、 $C_r$  はクーラン数であり、 $\Delta t$  は時間増分、 $c$  は物理量の伝播速度、 $h$  は最小要素幅である。

(b) 陰解法 (ニューマークの  $\beta$  法)

ニューマークの  $\beta$  法では、変位と速度を以下のように仮定している。

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}^n + \Delta t^2 \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{\mathbf{u}}^n + \Delta t \, 2\beta \ddot{\mathbf{u}}^{n+1} \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{u}}^{n+1} = \dot{\mathbf{u}}^n + \Delta t (1 - \gamma) \ddot{\mathbf{u}}^n + \Delta t \gamma \ddot{\mathbf{u}}^{n+1} \quad (13)$$

ここで、 $\gamma$  と  $\beta$  はパラメータであり、通常  $\gamma = \frac{1}{2}$  としている。また、 $\beta$  には以下のような制約がある。

$$0 < \beta < \frac{1}{2}$$

なお、本報告では  $\beta = \frac{1}{4}$ 、 $\gamma = \frac{1}{2}$  を用いる。これらを踏まえて、変位を先に求める場合、時間ステップ  $n+1$  における変位を未知数とする次の代数方程式を解く。

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{\beta \Delta t^2} \mathbf{M} + \mathbf{K} \right) \mathbf{u}^{n+1} \\ &= \mathbf{F}^{n+1} + \mathbf{M} \left\{ \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{u}}^n + \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{u}}^n + \frac{1}{\beta \Delta t^2} \mathbf{u}^n \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

式 (14) を解くことにより、 $\Delta t$  時間後の時間ステップ  $n+1$  における変位が求められる。

### 3. 数値解析例

数値解析例として二次元片持ち梁の衝撃問題を取り上げる。片持ち梁の先端から速度関数  $\dot{u} = A \sin(\frac{2\pi}{T}t)$  で与え、固定端における応力の伝播を求め、両手法の解析結果を比較する。ここで、速度関数における  $A$  は速度で  $0.1m/s$  とし、 $t$  はステップにおける時間、 $T$  は周期を与える時間を表す。周期は  $0.001s$  まで与える。また、応力の伝播速度は理論式より  $10^3m/s$  となり、固定端における応力値の厳密解は、 $\sigma_{max} = 2.0 \times 10^7 N/m^2$  である。

#### (1) 解析条件

解析条件は図-1 に示す通りである。メッシュ 1,2,3,4 は半波長 (1m) をそれぞれ 2 分割, 4 分割, 8 分割, 16 分割したものである。また、ヤング率は  $1.0 \times 10^{11} N/m^2$ , ポアソン比は 0.3, 密度は  $1.0 \times 10^5 kg/m^3$  で解析を行う。

#### (2) 解析結果

時間増分  $\Delta t = 10^{-6}$  に固定して、メッシュ 1~4 で解析を行った場合の応力の伝播の様子を図-2 に示す。図より、要素分割が粗くなると陽解法、陰解法ともに数値振動が生じ、振幅は減衰することが分かる。また、同じメッシュでの比較では、陽解法に比べて陰解法の方が高精度であり、数値振動も小さい。陽解法で陰解法と同程度の精度を得るためにはメッシュ幅を半分以下にする必要がある。

次に、メッシュ 4 を用いて、時間増分を変化させた結果を図-3 に示す。図より、陰解法および陽解法ともに、安定な微小時間増分を用いた場合には、計算結果に有意な差異が生じないことが分かる。また、陽解法は  $\Delta t = 10^{-4}$  の場合は、安定な解は得られなかった。両手法において、各メッシュごとに取り得る最大の時間増分とそのときのクーラン数をまとめたものを図-4 に示す。図より、陽解法は、メッシュサイズに比例して安定な時間増分は小さくなるが、陰解法はメッシュサイズの影響を受けずにほぼ一定となる結果となった。

### 4. おわりに

本報告では、二次元片持ち梁の衝撃問題を取り上げ、陽解法と陰解法を比較することで以下の結論を得た。

- 陽解法と陰解法の比較では、同じメッシュを分割の場合には、陰解法の方が高精度である。また、陽解法で陰解法と同程度の精度を得るためにはメッシュ幅を半分以下にする必要がある。
- 陽解法の安定条件はメッシュサイズに依存し、 $C_r \leq 0.670$  で安定となった。一方、陰解法ではメッシュサイズの影響を受けず、 $\Delta t < T$  で安定となった。

今後の課題として、計算時間や記憶容量について比較を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 日本計算工学会編： 竹内則雄, 樫山和男, 寺田賢二郎, 計算力学 第2版 有限要素法の基礎, 森本出版株式会社, 234p, 2017 年。
- 2) 土木学会： いまさら聞けない計算力学の常識, 丸善株式会社, 359p, 2008 年。

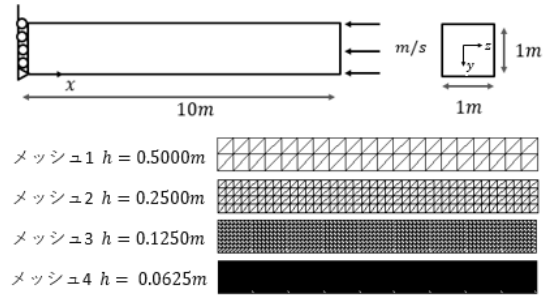


図-1 解析条件と解析メッシュ

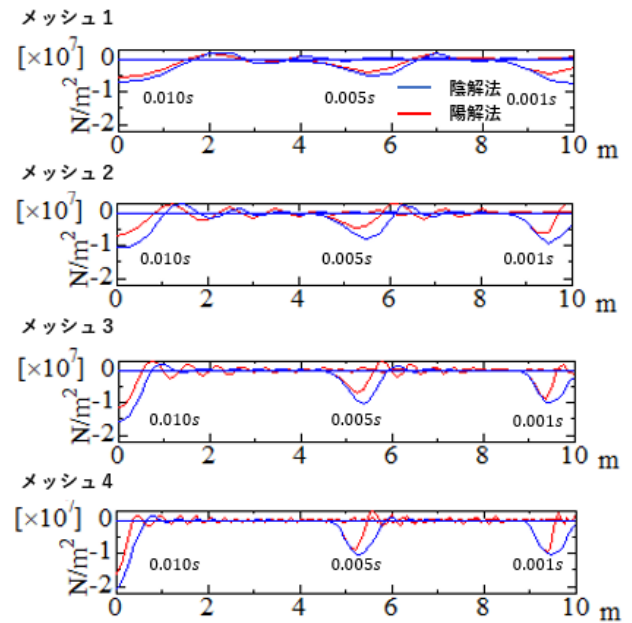


図-2  $\Delta t = 10^{-6}$  時の伝播する応力

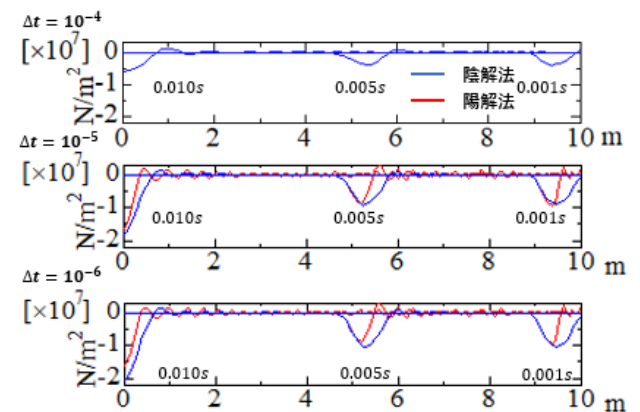


図-3 メッシュ 4 の伝播する応力

メッシュ	陽解法	陰解法
1	$3.70000 \times 10^{-4}$ (0.740)	$9.95000 \times 10^{-4}$ (1.990)
2	$1.70000 \times 10^{-4}$ (0.680)	$9.97500 \times 10^{-4}$ (3.990)
3	$8.50000 \times 10^{-5}$ (0.680)	$9.98750 \times 10^{-4}$ (7.990)
4	$4.18750 \times 10^{-5}$ (0.670)	$9.99375 \times 10^{-4}$ (15.99)

図-4 陽解法及び陰解法における取り得る最大の時間増分 (クーラン数)

## 安定化有限要素法による東京湾の流れと水質解析

Flow and water quality analysis of Tokyo Bay by the finite element method

都市環境学科 学部4年 家中 萌々子  
Momoko Ienaka

## 1. はじめに

東京湾は、大雨時の下水の流入や赤潮発生の慢性化などの水質問題を抱えている。特に COD 濃度に関して、昭和45年に水質汚濁防止法が制定されてから著しく改善したものの、近年の推移はほぼ横ばいとなっており水環境の改善は停滞状況にあるといえる。そこで、河川から流入する汚染物質の拡散の様子を数値シミュレーションによって把握することで、汚染状況の把握や予測が可能になる。本研究では、東京湾の流動性を浅水長波方程式を用いた有限要素法により再現し、河川から流入する汚染物質の移流拡散現象について考察することを目的とする。

## 2. 数値解析手法

## (1) 支配方程式

## (a) 浅水長波方程式

支配方程式として、次に示す浅水長波方程式を用いる。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} (N_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j}) + \mathbf{G} \mathbf{U} = \mathbf{R} - f \mathbf{U}' \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{U}$  は未知ベクトル、 $\mathbf{R}$  は勾配ベクトル、 $\mathbf{U}'$  はコリオリ行列、 $\mathbf{A}_i$  は移流行列、 $N_{ij}$  は拡散行列、 $\mathbf{G}$  は摩擦行列、 $H$  は全水深、 $u_i$  は各方向の流速、 $h$  は静水深、 $c$  は波速、 $z$  は河床高さ、 $g$  は重力加速度、 $\nu_e$  は渦動粘性係数、 $n$  はマンニングの粗度係数、 $f$  はコリオリ係数、 $\mathbf{C}_f$  は摩擦係数である。コリオリ係数は日本を北緯 35 度とした  $f=0.8366 \times 10^{-4}$  を与える。

## (b) 移流拡散方程式

物質の移流拡散現象を支配する移流拡散方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - k \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} = f \quad (2)$$

ここで、 $c$ :濃度、 $k$ :拡散係数、 $f$ :発生項とする。

## (2) 空間方向の離散化

空間の離散化には SUPG 法に基づく安定化有限要素法を用いる。式 (1) に重み付き残差法を適用すると、次に示す式 (3) のようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \mathbf{U}^* \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} + \mathbf{G} \mathbf{U} - \mathbf{R} + f \mathbf{U}' \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \left( \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left( N_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{nel} \int_{\Omega_e} \tau (\mathbf{A}_i)^T \left( \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} + \mathbf{G} \mathbf{U} - \mathbf{R} + f \mathbf{U}' \right) d\Omega_e \\ & + \sum_{e=1}^{nel} \int_{\Omega_e} \delta \left( \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} \right) d\Omega_e = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式 (2) にも同様に適応すると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} c^* \cdot \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - k \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} \right) d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{nel} \int_{\Omega_e} \tau (\mathbf{A}_i)^T \left( \frac{\partial c^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) d\Omega_e = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式 (3),(4) の補間に三角形一次要素を用いると、以下の有限要素方程式 (式 (5),(6)) が得られる。

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_\tau + \mathbf{D}) \dot{\mathbf{U}} + (\mathbf{S} + \mathbf{S}_\tau) \mathbf{U} + (\mathbf{H} + \mathbf{H}_\tau) \mathbf{R} + \mathbf{T} \mathbf{U} + (\mathbf{F} + \mathbf{F}_\tau) \mathbf{U} = 0 \quad (5)$$

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_\tau + \mathbf{D}) \dot{c} + (\mathbf{S} + \mathbf{S}_\tau) c + \mathbf{K} c = 0 \quad (6)$$

$\mathbf{M}$  は質量行列、 $\mathbf{D}$  は分散ベクトル、 $\mathbf{U}$  は未知ベクトル、 $\mathbf{S}$  は移流行列、 $\mathbf{K}$  は拡散行列、 $\mathbf{F}$  は摩擦行列、 $\mathbf{H}$  は勾配行列、 $\mathbf{R}$  は勾配ベクトル、 $\mathbf{F}$  はコリオリベクトル、添字  $\tau$  は SUPG 法に起因する行列で、 $\mathbf{T}$  は Shock-Capturing 項に起因する行列である。

## (3) 時間方向の離散化

時間方向の離散化には有限差分法を用いる。 $n + \theta$  ステップ ( $0 \leq \theta \leq 1$ ) で式 (5) を満足することを考えると、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}^{n+\theta} &= \frac{\mathbf{U}^{n+1} - \mathbf{U}^n}{\Delta t} \\ \mathbf{U}^{n+\theta} &= \theta \mathbf{U}^{n+1} + (1 - \theta) \mathbf{U}^n \end{aligned}$$

本報告では、 $\theta = 0.5$  の Crank-Nicolson 法で離散化を行う。

## 3. 数値解析例

図-1 のような東京湾モデルの解析メッシュを用いて、東京湾の潮流解析と汚染物質の移流拡散解析を行う。

## (1) 計算条件

境界条件として、湾口に M2 分潮を想定した式 (7) のような波高  $\eta$  を与える。

$$\eta = A \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (7)$$

ここで、 $A=0.36\text{m}$ 、 $T=45720\text{m}$  とする。

また、図-2 に示した多摩川・隅田川・荒川・旧江戸川・江戸川の 5 つの河川の流入部に、東京都環境局の公共用水域水質測定結果を参考に、流速と COD 濃度を与える。その他の境界には Non-slip 条件を与える。時間増分量は 1.0s、解析時間は 604800s(7 日間) とする。



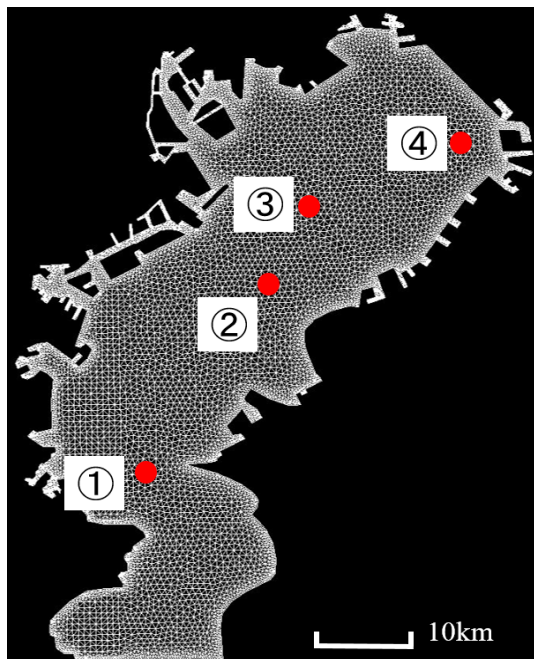


図-1 東京湾メッシュ

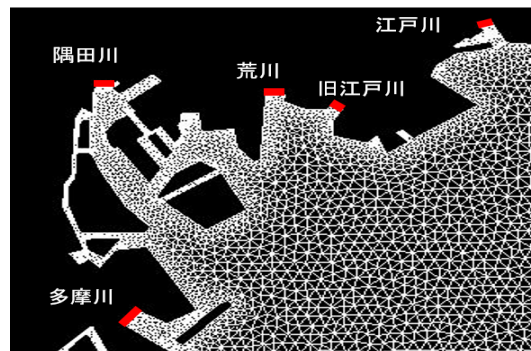


図-2 境界条件 (河口)

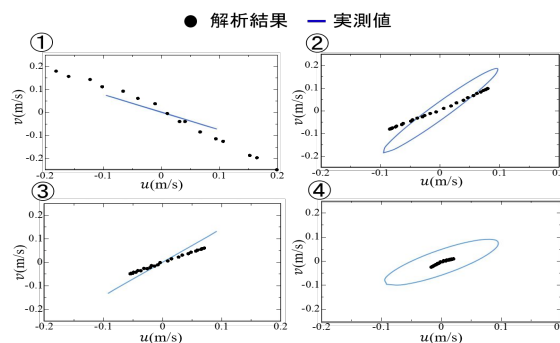


図-3 潮流楕円

## (2) 解析結果

図-3 に潮流楕円を実測値と比較したものの結果、図-4 に移流拡散解析の結果を示す。

潮流楕円は図-1 のメッシュ上に示した4点の結果を示す。いずれの点においても、流速の大きさに違いはあるものの、最大流速の流向は比較の実測値に近い値を示していることが確認できた。また、移流拡散解析の結果を見ると、河川から流入した汚染物質が長時間かけて湾内に拡散していく様子が確認できた。

また、東京湾の水位変動には湾の奥に行くほど水位が高くなるという特徴があるが、今回の解析でも、水位変動量の大きさに差異はあるものの同様の特徴がみられた。

続いて、図-5 に荒川の河口付近を拡大したものを示す。河口付近で渦を巻くような流動をしており、荒川と旧江戸川からの汚染物質の移流拡散の様子に影響を与えていると考えられる。

## 4. おわりに

東京湾の流動性を浅水長波方程式によって再現し、河川から流入する汚染物質の移流拡散現象について解析を行い、以下の結論を得た。

- 水位変動に東京湾の特徴が表れていたこと、潮流楕円の最大流速の流向が実測値に近い値を示していたことから、解析手法の妥当性を確認した。
- 移流拡散解析の結果から、河川から流入した汚染物質が潮流の影響を受けて往復運動しながら長時間かけて移流していく様子がみられた。

今後の課題として、以下のことが挙げられる

- 他の分潮の考慮
- COD の定量的な評価

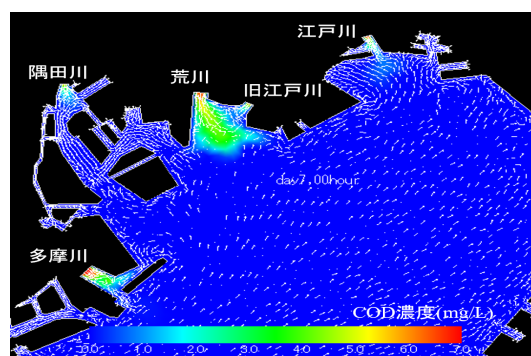


図-4 移流拡散解析

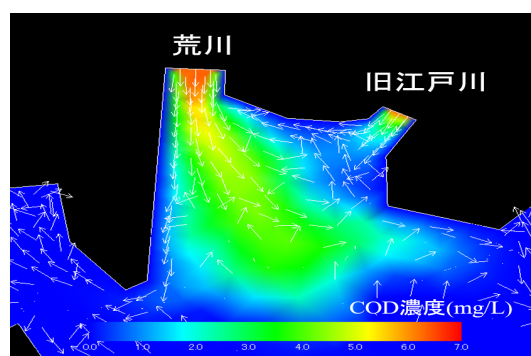


図-5 荒川河口付近

## 参考文献

- 1) 日本計算工学流れの有限要素法研究委員会：続・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・フェアラーク東京株式会社、pp.54-61,2012.
- 2) 東京都環境局 ”公共用水域水質測定結果” 2020-2-14 [https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/water/tokyo\\_ay/measurements/measurements/400300a20190925160017320.html](https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/water/tokyo_ay/measurements/measurements/400300a20190925160017320.html)(参照 2021.1.16)

## 3次元自由表面流れ解析における解析メッシュの依存性について

Study on the dependency of analytical mesh in 3D free surface flow analysis

都市環境学科 学部4年 安井 太一  
Taichi YASUI

## 1. はじめに

河川構造物や海洋構造物に対する流体力の評価は防災の観点からも重要であり、その予測には Navier-Stokes 方程式に基づく自由表面流れ解析が一般に用いられている。自由表面流れの解析手法には、界面を直接表現する界面追跡法と、界面関数により間接的に表現する界面捕捉法がある。

本研究では、界面捕捉法の一つである VOF 法<sup>1)</sup>に着目し、任意形状への適応性に優れた有限要素法を用いた3次元自由表面流れ解析を行い、有限要素分割の違いが解に与える影響について実験結果との比較のもと検証した。

## 2. 数値解析手法

## (1) 密度, 粘性係数の計算

VOF 法は、自由表面位置を VOF 関数と呼ばれるスカラー関数  $\phi$  により表現する手法である。VOF 関数  $\phi$  は各節点において液体であれば 1.0, 自由表面上であれば 0.5, 気体であれば 0.0 の値を取り、気体と液体の密度, 粘性係数は、VOF 関数  $\phi$  を用いて以下のように表現される。

$$\rho = \rho_l \phi + \rho_g (1 - \phi) \quad (1)$$

$$\mu = \mu_l \phi + \mu_g (1 - \phi) \quad (2)$$

ここで、 $\rho, \mu$  は各要素における密度と粘性係数で、 $\rho_l, \rho_g, \mu_l, \mu_g$  はそれぞれ液体の密度, 気体の密度, 液体の粘性係数, 気体の粘性係数である。

## (2) 流速, 圧力の計算

非圧縮性粘性流れの支配方程式として Navier-Stokes 方程式 (3) と非圧縮流体の連続式 (4) の二式を用いる。

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

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、 $p$  は圧力である。Dirichlet 境界条件および Neumann 境界条件は、それぞれ式 (5), (6) のように示す。

$$u_i = g_i \quad \text{on } \Gamma_g \quad (5)$$

$$\left( -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) n_j = h_i \quad \text{on } \Gamma_h \quad (6)$$

ここで、 $\Gamma_g, \Gamma_h$  はそれぞれ Dirichlet 境界条件および Neumann 境界条件が与えられる境界を表し、 $g_i, h_i$  はそれぞれ境界上での流速とトラクション、 $\delta_{ij}$  は Kronecker のデルタ、 $n_j$  は外向き単位法線ベクトルを表す。

方程式 (3), (4) に対し、空間方向に SUPG/PSPG 法に

基づく安定化有限要素法、時間方向に Crank-Nicolson 法を適用し離散化を施すと、以下の有限要素方程式を得る。

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_S) \frac{\mathbf{u}_i^{n+1} - \mathbf{u}_i^n}{\Delta t} + (\mathbf{A} + \mathbf{A}_S) \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) - (\mathbf{G}_i - \mathbf{G}_{Si}) \mathbf{p}^{n+1} + \mathbf{D}_{ij} \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) + \mathbf{S}_C \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_j \mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{M}_{Pj} \frac{\mathbf{u}_j^{n+1} - \mathbf{u}_j^n}{\Delta t} + \mathbf{A}_{Pj} \frac{1}{2} (\mathbf{u}_j^{n+1} + \mathbf{u}_j^n) + \mathbf{G}_{Pj} \mathbf{p}^{n+1} = 0 \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{M}, \mathbf{A}, \mathbf{G}, \mathbf{D}, \mathbf{S}, \mathbf{C}$  はそれぞれ時間微分項, 移流項, 圧力項, 粘性項, 衝撃捕捉項, 連続項の係数行列を表す。添字  $S, P, C$  は SUPG 項, PSPG 項, 衝撃捕捉項に起因する行列である。この連立一次方程式を GPBi-CG 法を用いて解き、未知数である流速と圧力を求めた。

## (3) 自由表面の位置の計算

界面関数の支配方程式は移流方程式 (9) を用いる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \cdot \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (9)$$

初期条件は以下のようなになる

$$\phi = \phi_0 \quad \text{at } t = 0 \quad (10)$$

ここで、 $u, \phi_0$  はそれぞれ流速, VOF 関数の初期値である。 $u$  は式 (7), (8) を解くことで得られる値を用いる。

方程式 (9) に対し、空間方向に SUPG 法に基づく安定化有限要素法、時間方向に Crank-Nicolson 法を適用し離散化を施すと、以下の有限要素方程式を得る。

$$\frac{1}{\Delta t} \{ \mathbf{M} + \mathbf{M}_S \} \phi^{n+1} + \frac{1}{2} \{ \mathbf{A} + \mathbf{A}_S \} \phi^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \{ \mathbf{M} + \mathbf{M}_S \} \phi^n - \frac{1}{2} \{ \mathbf{A} + \mathbf{A}_S \} \phi^n \quad (11)$$

導かれた式 (11) は連立一次方程式であり、これを Bi-CGSTAB 法を用いて解くことにより未知量である VOF 関数が求まる。

## (4) 流体力の計算

流れ場における支配方程式 (3), (4) に対し、重み付き残差法を適用し、圧力項と粘性項に対して部分積分を施すことにより、以下の弱形式が得られる。

$$\int_{\Omega^0} w_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) d\Omega - \int_{\Omega^0} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} p d\Omega + \int_{\Omega^0} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \int_{\Omega^0} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) d\Omega = \int_{\Gamma_{in}} w_i - p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) n_j d\Gamma \quad (12)$$

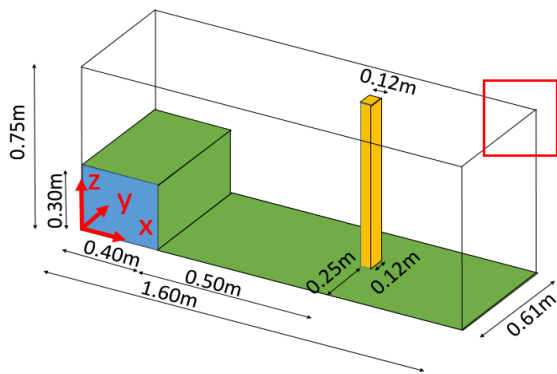


図-1 解析モデル，初期条件

表-1 解析メッシュの平均要素幅[m]

	節点数	要素数	平均要素幅[m]
メッシュ 1(構造)	749346	4327200	$1.26 \times 10^{-3}$
メッシュ 2(構造)	5882054	34617600	$0.63 \times 10^{-3}$
メッシュ 3(非構造)	787371	4608998	$1.23 \times 10^{-3}$
メッシュ 4(非構造)	6229380	36886802	$0.62 \times 10^{-3}$

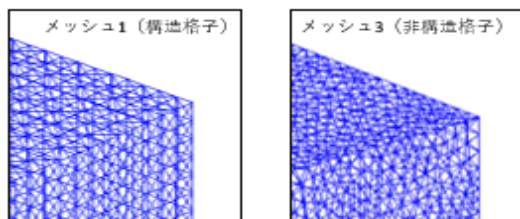


図-2 解析メッシュの拡大図 (メッシュ 1, 3)

ここで， $\Omega^0, \Gamma_{in}$  は構造物周りの領域と構造物の境界を表す．式 (12) の右辺の積分項が構造物にはたらく流体力 (抗力) となる．式 (7)，式 (8) を解いて得た流速と圧力を式 (12) に代入することにより，構造物にはたらく流体力が求められる．

### 3. 数値解析例

本研究では，図-1 に示すように角柱構造物を有する 3 次元ダムブレイク問題<sup>2)</sup>を取り上げる．

#### (1) 解析条件

境界条件としては側壁，天井，底，角柱において slip 条件を課した．微小時間増分量は， $\Delta t = 0.001s$  とする．液体，気体の密度はそれぞれ  $998.22kg/m^3$ ， $1.205kg/m^3$ ，粘性係数は  $100.4 \times 10^{-5}Pa \cdot s$ ， $1.822 \times 10^{-5}Pa \cdot s$  とする．解析メッシュは，表-1 に示すように構造格子，非構造格子についてそれぞれ 2 通りのメッシュ幅で解析を行い，流体力を計算して実験結果と比較した．また，図-1 における赤い四角形で囲まれた部分のメッシュ 1, 2 での拡大図を図-2 に示す．メッシュ 3, 4 はこれらの半分の要素幅で領域を分割したものである．

#### (2) 解析結果

解析結果として，図-3 にメッシュ 1, 3，図-4 にメッシュ 2, 4 での角柱にかかる x 方向応力を示す．これらの結果から以下のことが確認できた．

- 構造格子，非構造格子のどちらにおいても，時刻歴において実験結果との差異がみられた．

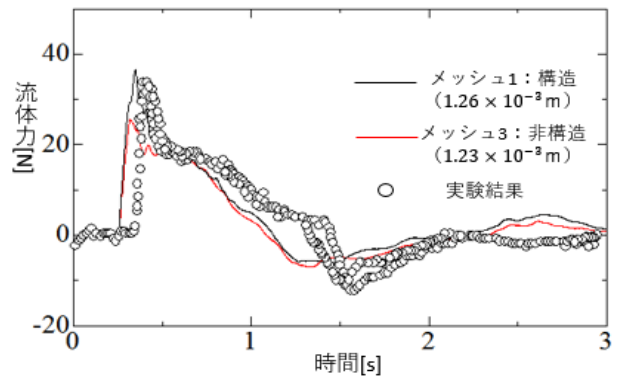


図-3 角柱に働く x 軸方向応力 (メッシュ 1, 3)

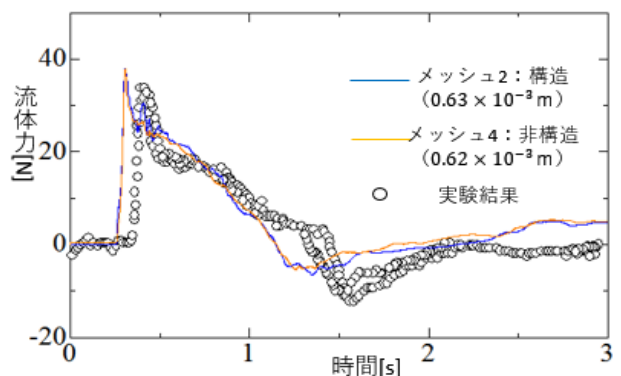


図-4 角柱に働く x 軸方向応力 (メッシュ 2, 4)

- 流体力 (抗力) の最大値について，図-3 から，構造格子であるメッシュ 1 の方が非構造格子であるメッシュ 3 に比べ実験結果と近い値が得られた．
- 図-4 から，メッシュ 2，メッシュ 4 については最大値に差は見られなかった．

### 4. おわりに

本報告では，VOF 法に基づく有限要素法を 3 次元自由表面流れ解析に適用し，有限要素分割の違いが解に与える影響について実験結果と比較，検討し，以下の結論を得た．

- ほぼ同じ要素分割幅のメッシュを用いる場合，構造格子の方が非構造格子に比べ抗力値が実験結果と近い流体力の最大値を得ることができた．
- メッシュを十分細かくすると構造格子，非構造格子での差はほぼなくなった．
- いずれの場合においても計算結果の方が実験結果に比べて早く波が到達する結果となった．

今後は，より詳細な検討を行う予定である．

#### 参考文献

- 1) Hirt, C.W. and Nichols, B.D. , Volume of fluid method for dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 2) Gomez-Gesteira, M. Dalrymple, R.A. , Using a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method for wave impact on tall structure, journal of waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.130, pp.63-69 , 2003.

## 幾何音響理論に基づく鉄道騒音評価システムの高精度化

Improvement of the numerical accuracy of  
a railway noise evaluation system based on geometric acoustic theory都市環境学科 学部4年 及川 萌  
Moe Oikawa

## 1. はじめに

世界各国において高速鉄道の計画や建設が進められている。一方で、高速鉄道は騒音問題が大きな社会的問題となっており、騒音による影響を予測し、対策を講じることが重要である。

既往の研究では、幾何音響理論を用いて数値シミュレーションを行い、VR 技術を用いて可視化・可聴化し、視覚情報と聴覚情報を同時に提示できる鉄道騒音評価システムの構築<sup>1)</sup>が行われてきた。しかし、既往のシステムでは高速鉄道における指向性の検討が十分ではなく、トンネルへの適用がなされていなかった。本研究では、高精度なシステムを構築と適用性の拡張を目的とし、指向性の検討とトンネル区間の騒音の実装を行った。

## 2. 鉄道騒音評価システム

## 2.1 VR 環境

本研究では没入型装置 HoloStage を用いる。前面と側面及び底面の3面大型スクリーンとそれぞれに対応した高性能プロジェクター、また VR 空間内において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ており、複数人での同時体験が可能である。

## 2.2 鉄道騒音の発生源

鉄道騒音の発生源は大きく、車輪・レール間音・空力音・駆動系音・構造物騒音の4つに分類される。本論文では、これらの音をまとめ、走行音としてモデル化し、移動音源として各台車に実装するものとして計算を行った。また、騒音計で走行音を測定した音源データを用いて VR システムに適用する。

## 2.3 幾何音響理論

本研究では鉄道騒音の伝搬計算に幾何音響理論に基づく計算モデル“ASJ RTN-Model2018”<sup>2)</sup>を用いる。

## 2.4 指向性の検討

指向性とは音が空気中に伝播されるとき、そのエネルギーの伝播特性が方向によって異なることを指す。

鉄道走行音の指向特性は、走行ラインには騒音が伝播しづらく、側面方向には伝播しやすい双指向性を持つ。本研究では指向性補正量に以下のモデル<sup>3)</sup>を使用した。

$$\Delta L_{dir} = 10 \log_{10}(\cos^n \theta) \cdot (0.1 + 0.9 \cos \phi) \quad (1)$$

$\theta$  は観測者から見た音源への角度、 $\phi$  は音源から見た観測点への仰角、 $n$  は指向性係数を指す。指向性係数の変化による音の伝搬の仕方の違いとして、65dB～80dB ま

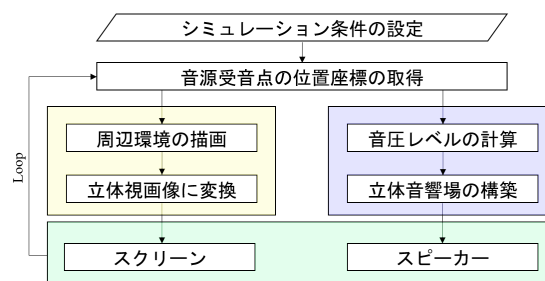


図-1 本システムの処理工程

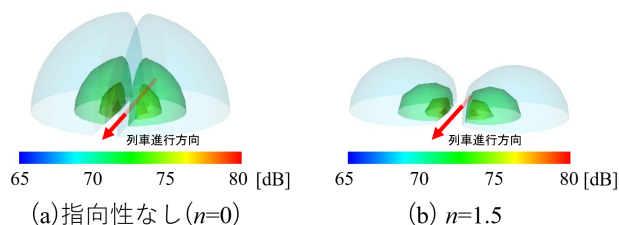


図-2 指向性係数の変化による音の伝搬の仕方の違い

で5dB ごとの等値面を図-2に示す。指向性係数が大きいほど、指向特性が強く表れる。

高速鉄道において、全車両における指向性係数を一定とした場合、列車通過後の実測との差が大きく<sup>1)</sup>、指向性を再検討する必要があるため、音源の音響パワーレベルと車両形状が異なる車両ごと指向性係数を変化させ、検討を行った。

## 2.5 トンネル坑口騒音の考慮

車両がトンネルを通過するとき坑口から放射されるトンネル内部の車両による騒音をトンネル坑口騒音<sup>2)</sup>とし、トンネル内の仮想点音源から坑口を通して放射されると仮定した直接音  $L_{A,TD}$  と、トンネル内における直接音以外の反射音が坑口に設定した仮想面音源から放射されると仮定した反射音  $L_{A,TR}$  の合成として扱う。

$$L_A = 10 \log_{10}(10^{L_{A,TD}/10} + 10^{L_{A,TR}/10}) \quad (2)$$

$L_{A,TD}$  と  $L_{A,TR}$  の値は<sup>2)</sup>から引用した。仮想点音源のパワーレベルは実音源と同じとし、その設定位置  $x'$  [m] は、吸音に関するパラメータ  $a$  と坑口から実音源までの実距離  $x$  [m] によって次式で表す。本研究では  $a = 0.04$  を使用。

$$x' = ax \quad (3)$$



## 2.6 可聴化・可視化機構

可聴化機構は C++ のプログラムで音源の位置座標、音圧レベルを計算し、MAX でこれらの情報を受信し立体音響場を構築することにより行われる。走行音は、作成した定常音を繰り返し再生し、受信した値に基づき音量及び立体音響を制御している。

可視化機構では、OpenGL を用いて周辺環境の描画を行い、CAVELib によって立体視画像に変換し、VR 空間に投影する。

## 3. 適用例

本システムの妥当性を検証するため、鉄道騒音の実測値と本手法による計算結果の比較を行った。栃木県那須塩原市で測定された、10 両編成の東北新幹線 E2 系の音源を用いた。測定は、音源位置から水平距離 7m、高さ 1.5m の位置で行われた。測定時の走行速度は時速 274km であり、同様の条件で計算を行った。 $L_{WA}$  は、先頭車両 119.54dB、中間車両 114.47dB、最後尾車両 113.65dB とした。

### 3.1 指向性係数の検討

指向性係数の検討結果が図-3 である。実測値との比較を示す。

騒音のシミュレーションにおいて、実測値より計算値が大きい値をとる場合が安全側であることを踏まえ、新幹線が観測点前を通過している最中の実測値と計算値における音圧レベルの変動の差異が少なくなるよう考慮した結果、先頭・中間・最後尾車両をそれぞれ  $n=1.0$ ,  $0.5$ ,  $0$  とした場合が実測値と近い値をとることが分かった。

この結果は、鉄道騒音の指向性が双方向性を持つ原因として考えられている車両下部騒音において、高速鉄道では先頭台車の寄与度が最大であることから、先頭車両の指向特性に双方向性が強く出ていると考えられる。一方、最後尾車両は後ろに車両がなく、後方にも音が広がりやすいことが影響し、指向特性の双方向性が弱まっていると仮定した。

また、上図より計算結果における列車が観測点前を通過している最中の音圧レベルの変動が実測値より大きいことが分かる。これは、実際の音源は線状に分布しているが、計算を簡潔にするため、音源の位置を各台車に設定した点音源として計算を行っているためだと考えられる。今後、音源のモデル化の再検討が課題となる。

### 3.2 トンネル坑口音の検討

受音点の 13.0m 手前に高さ 7.0m 幅 8.5 m のトンネルを設置したと仮定して計算を行った結果と明かり区間における計算値の比較を図-5 に示す。トンネル内の車両の騒音は、トンネル内で反射を繰り返しながら走行ライン方向に沿って伝搬し、坑口から集約されて放射されることから、車両が遠方にいる時点から坑口付近の騒音が大きいたことが確認できた。

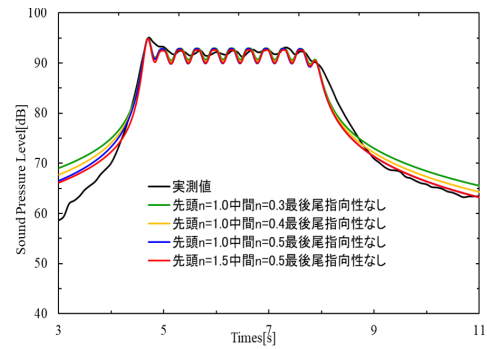


図-3 計算値と測定値の比較

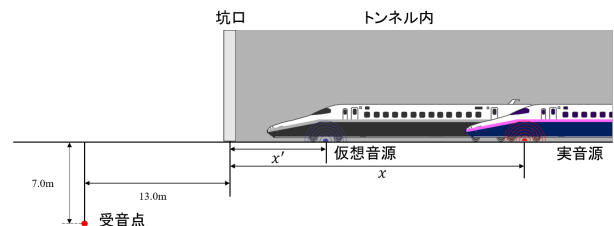


図-4 トンネル区間における受音点の位置関係

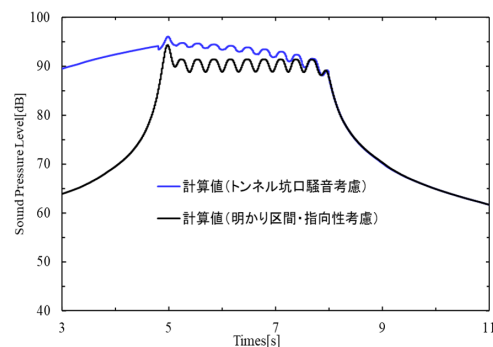


図-5 トンネル区間の計算値と明かり区間の実測の比較

## 4. おわりに

本論文では、高速鉄道の鉄道騒音評価システムにおける指向性係数の検討を行い、指向性係数を車両編成ごとに考慮して計算し、より高精度な数値シミュレーションを可能とした。また、トンネル区間の騒音を実装し、適用性の拡張を行った。

今後は、音源のモデル化を含めたより詳細な検討を行う必要がある。

### 参考文献

- 1) 木下公二, 吉町徹, 檜山和男, 志村正幸: VR 技術を用いた鉄道騒音評価システムに関する研究, 土木学会論文集 F3(土木情報学), 土木学会, Vol.73, No.2, pp1.372-I.379, 2017.
- 2) 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.
- 3) 買手正浩: 外部騒音に対する遮音設計手法 鉄道騒音の高層建物への伝搬特性, 大成建設技術センター報, Vol.43, pp52-1-52-6, 2010.

## 高速多重極境界要素法を用いた音場解析におけるメッシュ分割幅の検討

Investigation of the elements length in acoustic simulation  
using fast multipole boundary element method都市環境学科 4 年 深澤 一志  
Kazushi FUKAZAWA

## 1. はじめに

近年の都市開発や都市部の活性化に伴い、騒音被害は増加しており、その影響評価にコンピュータシミュレーションが用いられている<sup>1)</sup>。騒音の評価手法は幾何音響理論と波動音響理論に大別されるが、複雑な幾何形状を有する音場解析には波動音響理論が用いられる。

著者らは、これまで外部問題に適している境界要素法に着目し、大規模問題に対して省メモリーかつ高速に解析が可能な時間域高速多重極境界要素法<sup>2)</sup>を用いて音場解析手法の構築を行ってきた<sup>3)</sup>。しかし、既往の研究ではメッシュ分割の違いが解に与える影響については十分な検討を行っていなかった。

そこで、本研究では、遮音壁を有する 3 次元非定常の音場解析をモデルとし、メッシュ分割幅について検討を行った。

## 2. 境界要素法による音場解析

本研究で取り扱う 3 次元非定常波動問題の外部問題の支配方程式および、境界条件、初期条件を以下に示す。

・支配方程式 (波動方程式)

$$\nabla^2 u(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(\mathbf{x}, t) \quad : \text{in } \Omega \quad (1)$$

・境界条件

$$u(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}, t) \quad : \text{on } \Gamma_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t) \quad : \text{on } \Gamma_2 \quad (3)$$

・初期条件

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad : \mathbf{x} \text{ in } \Omega \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad : \mathbf{x} \text{ in } \Omega \quad (5)$$

ただし、 $\Omega$  は解析領域、 $\Gamma_1, \Gamma_2$  はその境界を表す。 $u$  は音圧、 $\frac{\partial u}{\partial n}$  は  $u$  の法線微分であり、 $n$  は解析領域から外向きの法線ベクトルである。

続いて式 (1) に対応する境界積分方程式を以下のように導出する。

・境界積分方程式

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} u(\mathbf{P}, t) &= \int_0^\infty \int_{\Gamma} u^*(\mathbf{Q}, t) \nabla u(\mathbf{Q}, t) d\Gamma dt \\ &\quad - \int_0^\infty \int_{\Gamma} \nabla u^*(\mathbf{Q}, t) u(\mathbf{Q}, t) d\Gamma dt \\ &\quad : \text{on } \Gamma \end{aligned} \quad (6)$$

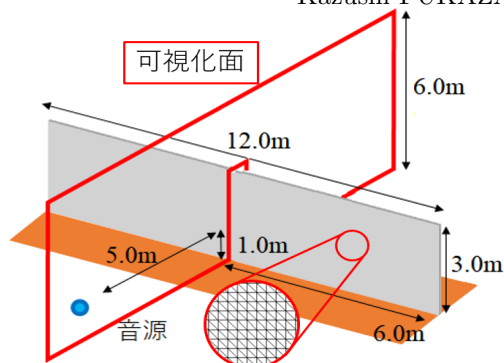


図-1 解析モデル

ここで、 $u^*(\mathbf{x}, t)$  は波動方程式の基本解であり、次式で表される。

$$u^*(\mathbf{x}, t) = \frac{\delta\left(t - \frac{r}{c}\right)}{4\pi r} \quad (7)$$

ここで、 $c$  は波速、 $\delta$  は Dirac のデルタ関数を表す。

式 (6) より求めた境界値を、以下の式に代入することにより、領域内の任意の点で音圧  $u(\mathbf{x}, t)$  が求まる。

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, t) &= \int_0^\infty \int_{\Gamma} u^*(\mathbf{x}, t) \nabla u(\mathbf{x}, t) d\Gamma dt \\ &\quad - \int_0^\infty \int_{\Gamma} \nabla u^*(\mathbf{x}, t) u(\mathbf{x}, t) d\Gamma dt \\ &\quad : \text{in } \Omega \end{aligned} \quad (8)$$

入射波は 1000Hz 程度まで一定の周波数解析を持つように生成した、Lubich の疑似インパルスを使用した<sup>4)</sup>。

・Lubich の疑似インパルス

$$u(\Delta t) \cong \frac{R^{-n}}{L} \sum_{L=0}^{L-1} \left( \frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{r}{c} \Delta t} \right) e^{-2\pi i \frac{n}{L} \Delta t} \quad (9)$$

式中のパラメータを  $L=2000, r=1.2\text{m}, \Delta t=0.0512\text{ms}$  とした。インパルスの波形を図-2に示す。

## 3. 数値解析例

## 3.1 解析条件

今回の解析に用いる解析モデルを図-1に示す。図-1は一般的な直立型遮音壁のモデルである。音速、時間増分はそれぞれ、340m/s、0.0512ms、壁面の境界条件は完全反射とした。メッシュ分割幅は、入射波の1波長をおおよそ30分割、15分割、7分割、5分割した、 $\Delta x = 0.017\text{m}, 0.034\text{m}, 0.068\text{m}, 0.113\text{m}$  の4通りとした。

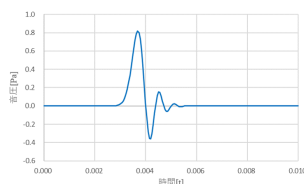


図-2 擬似インパルス

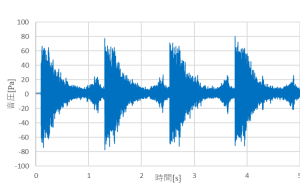


図-3 実音源 (杭打ち音)

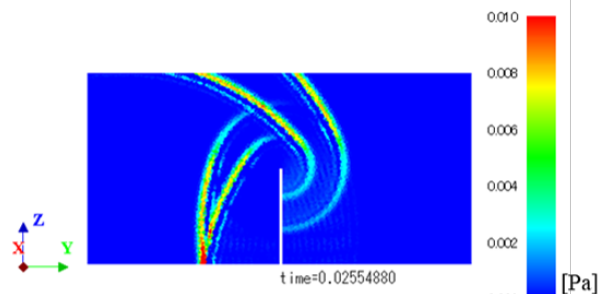


図-4 内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.017\text{m}$ )

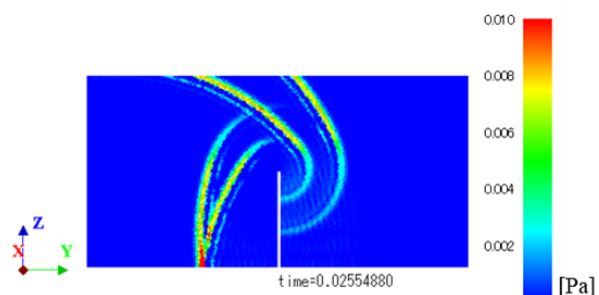


図-5 内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.034\text{m}$ )

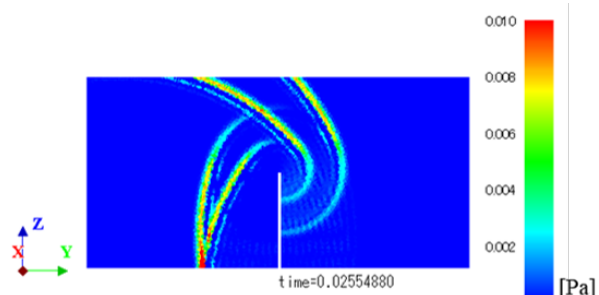


図-6 内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.068\text{m}$ )

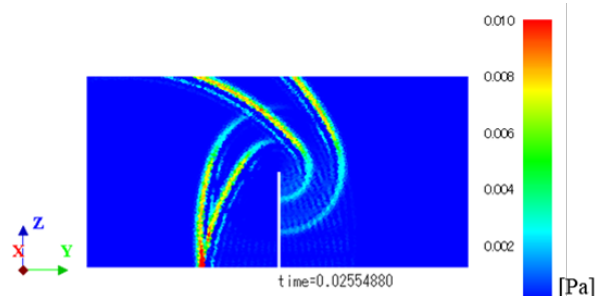


図-7 内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.113\text{m}$ )

### 3.2 解析結果

受音点で得られる応答に対して音のデータの畳み込みを行った。畳み込みに使用する音は、図-3に示す杭打ち機の音である。遮音壁から音源と逆側に3.0m、高さ0~6mに受音点を配置し(0.25mごと)、得られた音圧値分布の比較を図-8に示す。図から、メッシュ分割幅での音圧値の違いは、ほとんど見受けられないことが分かる。

また、代表点として、高さ1.5mの受音点で受け取る音

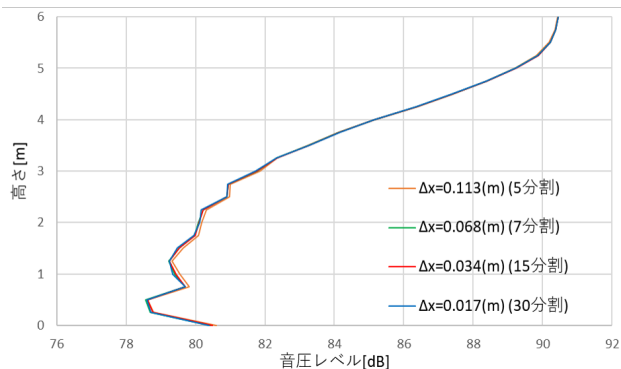


図-8 受音点の高さと音圧レベルの関係

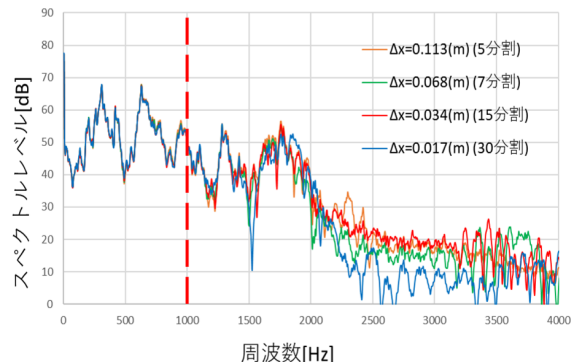


図-9 周波数解析

の時刻歴波形を周波数解析した。図-9から、1000Hzまでは4つのグラフがほぼ一致し、それより高周波になると音がカットされることが確認できる。

図-8, 9よりメッシュ分割幅を変えて解析を行っても明確な差異は見られなかった。また、今回行った条件より $\Delta x$ を大きくする(1波長3分割程度)と発散が起きることを確認した。このことから本条件の解析では入射波の1波長を5分割以上することが望ましいという結果を得た。

### 4. おわりに

本研究では、遮音壁を有する3次元非定常の音場解析において、メッシュ分割幅の検討を行った。本条件の解析ではメッシュ分割幅は解析精度にほぼ影響を与えないことが確認できた。

今後は、解析モデルを変更しても同様の結果が得られるか確認を行うとともに、反射率、移動音源に対する解析の実装を行う。

### 参考文献

- 1) 日本音響学会 (編): 音環境の数値シミュレーション-波動音響解析の技法と応用-, 丸善, 2011.
- 2) Takahashi, T.: An interpolation-based fast-multipole accelerated boundary integral equation method for the three dimensional wave equation, Journal of Computational Physics Vol.258, pp.809-832, 2014.
- 3) 庄子諒, 吉川仁, 樫山和男: 境界要素法による音場解析における遮音壁の先端形状が及ぼす影響の検討, 計算工学講演会論文集, 計算工学会, Vol.24, B-02-04, 2019.
- 4) 吉町徹, 今井啓太, 谷川将規, 樫山和男: 疑似インパルスの波形とメッシュ解像度が可聴化に及ぼす影響の検証, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.20, pp189-197, 2017.

## 津波避難シミュレーションにおける多数派同調バイアスの考慮に関する検討

A examination of consideration of majority synching bias in tsunami evacuation simulation

都市環境学科 学部4年 藤山 麗  
Uraraka Toyama

## 1. はじめに

我が国は、地震や台風を始めとする自然災害の発生率が非常に高い、世界有数の災害大国である。特に地震の発生率が高く、主な二次災害として津波被害が挙げられる。津波による甚大な被害をもたらした2011年東日本大震災を契機とし、国土交通省が定めるレベル2の様な巨大災害時にはハード面とソフト面の柔軟な対応が求められている。ソフト面の対策における、防災・減災対策の評価・検討の手法の一つとして避難が重要視され、避難シミュレーションによる検討が近年幅広く行われている。

本研究では、既往の手法<sup>1)</sup>により構築されたマルチエージェントシステムに基づく、津波避難シミュレーションにおいて、システムの適用性向上を図るため、多数派同調バイアスの考慮によるシミュレーション結果への影響を、津波による犠牲者数の推移により検討を行う。

## 2. シミュレーション手法

本研究では、周囲の環境から情報を取得し、自律的に行動するエージェントが多数共存し、相互作用を及ぼし合う環境であるマルチエージェントシステムに基づくシミュレーションを行う。地理情報の取得、避難経路の作成等、入力データの作成・読み込みにはGIS (Geographic Information System; 地理情報システム) ソフトであるArcGISを、マルチエージェントシステムの構築にはプログラミング言語であるNetLogo5.3.1を用いた。

## 2.1 地形データの作成

国土地理院が提供しているデータを基に、避難者、避難所、避難路、ノードを作成する。避難者は建物内から避難すると仮定し、避難者初期位置を建築物の重心とする。また道路中心線の情報を基に避難路を作成し、避難路上にノードを作成する。以上の様に地形データの作成を行い、作成例を図-1に示す。

## 2.2 津波シミュレーション

作成された地形データを用いて、浅水長波方程式を用いた有限要素法による津波シミュレーション<sup>2)</sup>を行う。津波の初期条件は対象地域の津波被害が最大となる条件である、中央防災会議が提供している断層モデル4から算出された水変動量を用いている。

## 2.3 避難シミュレーション

避難者は初期位置である建物内から避難すると仮定し、避難開始直後は最短距離のノードを選択する。ノード到着時に、隣接しているノードに対し(1)式で表され

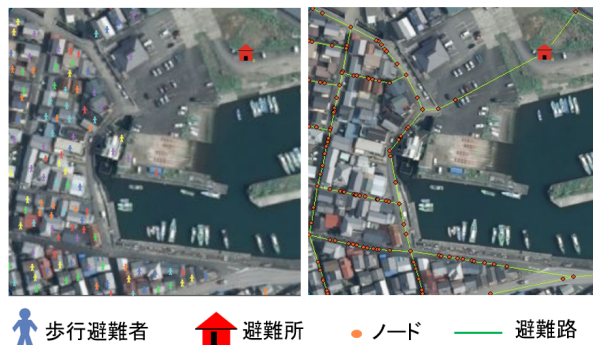


図-1 データの作成例

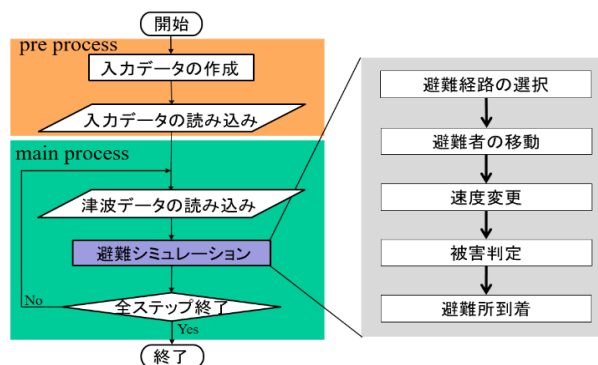


図-2 避難シミュレーションのフローチャート

る重力モデル式を用いて経路の選択が行われる。

$$S = \frac{a}{s^\alpha} - \frac{b}{z^\beta} - \frac{c}{w^\gamma} - \frac{d}{t^\delta} \quad (1)$$

ここで  $S$  は効用とし、 $s$  は避難所までの距離、 $z$  は標高、 $w$  は水際線からの距離、 $t$  は人数である。 $a, b, c, d$  は変数に対する重みであり、値が大きいほど効用に占める割合が大きくなる。 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  は変数に対する空間距離の影響度であり、値が小さくなるほど遠くまで影響を及ぼす。

避難者は  $S$  が最大となる隣接点へ移動し、図-2に示す様に避難経路の選択・移動を繰り返し、避難所に到達した時点で避難行動を終了する。

## 3. 多数派同調バイアスの考慮

災害時における人間の心理の一つである多数派同調バイアスは、周囲の人々に合わせ同様の行動をとることが安全であると判断してしまう心理傾向のことである。





図-3 多数派同調バイアス

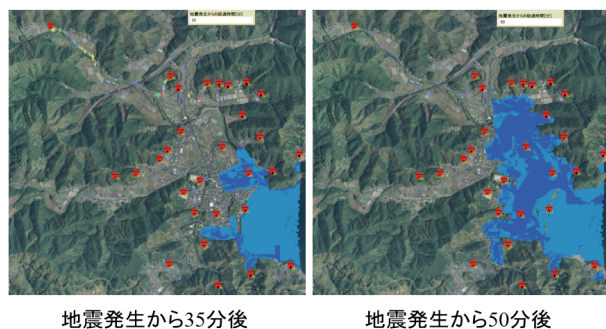


図-4 津波避難シミュレーションの実行例

図-3に示す様、道路幅 5m を直径とした範囲内に認知した避難者人数の情報を、各ノードに持たせ、経路選択式に組み込む。

#### 4. 適用例

経路選択式における最短距離、標高、水際線、多数派同調バイアスの四項全てを考慮した場合と、多数派同調バイアスを除く三項を考慮した場合の、二パターンの津波避難シミュレーションを実行し、多数派同調バイアスの考慮による影響について犠牲者数より比較を行う。

##### 4.1 シミュレーション条件

対象地域は高知県中土佐町久礼地区とし、シミュレーション範囲を縦 3337m × 横 3360m、歩行避難者 4160 人、避難所 29 か所と設定する、また、歩行避難者に対し、既往の研究<sup>1)</sup>より年齢性別別歩行速度、群集速度、勾配速度、年齢性別別体重、歩行疲労割引率、浸水済み避難経路の回避、地区ごとの避難所区分けの七要素を、避難行動において考慮する。

##### 4.2 適用結果

シミュレーション開始時刻を地震発生時刻とし、避難者は避難開始時刻に一齐に避難を開始するものとする。津波は久礼川河口部を基準に、シミュレーション開始から約 29 分後に第一波が、約 42 分後に第二波が到達する。実行例を図-4 に示す。また、避難開始時刻を地震発生時刻から 1 分毎に変化させた累積犠牲者数の推移及び比較を図-5 に示す。多数派同調バイアスの考慮の有無によら

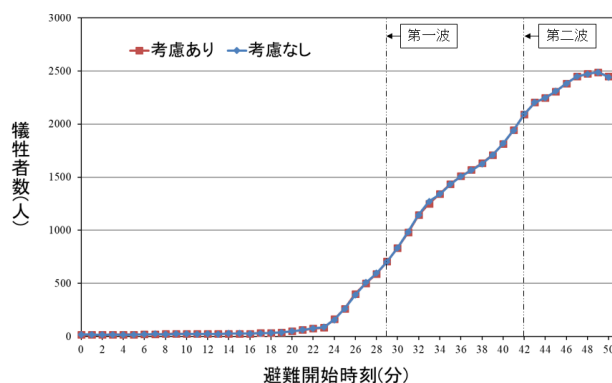


図-5 累積犠牲者数

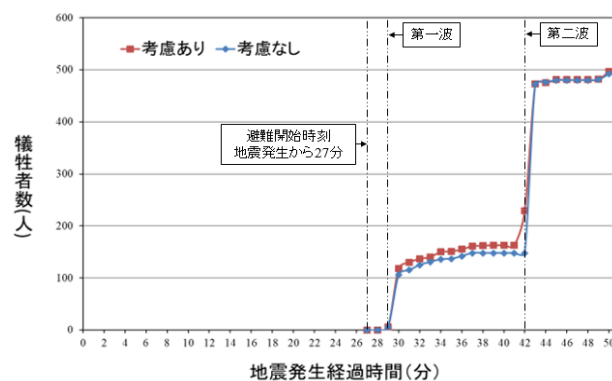


図-6 時系列犠牲者数

ず、犠牲者数の推移は概ね同様の結果となり、累積犠牲者数の比較では差が確認できなかった。

そこで地震発生から 27 分後に避難を開始するシミュレーションに着目し、時系列に沿った犠牲者数の推移及び比較を図-6 に示す。第一波到着後では、多数派同調バイアスの考慮による犠牲者の増加が見られる。避難者の密集や歩行速度の低下等、周囲に影響されやすい環境である市街地が、第一波により覆われることが犠牲者数増加の要因であると考察できる。

#### 5. おわりに

本研究では、既往のシミュレーションにおける適用性向上を図るため、多数派同調バイアスの考慮による影響について、津波による犠牲者数を基に比較を行った。多数派同調バイアスの考慮が避難行動の遅れに影響していることを確認した。

今後の課題として、多数派同調バイアスの考慮による犠牲者減少についての検討が挙げられる。

#### 参考文献

- 1) 近真弥：マルチエージェントモデルを用いた津波避難シミュレーションの適応性向上に関する研究、第 46 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、I-75, 2p., 2018.
- 2) 利根川大介、樫山和男：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.

# 高精度かつ簡便な都市モデルの作成手法の構築に関する研究

Development of a high quality and efficient modeling method for urban areas

都市環境学科 学部 4 年 須藤 瑞輝  
Mizuki SUDO

## 1. はじめに

近年、大気汚染や騒音問題といった様々な環境問題や自然災害に対する防災対策が重要視されている。このような問題の検討には数値シミュレーションが用いられ、実際に起こりうる現象を数値的に理解することが可能となっている。また、数値シミュレーションにおいて近年発達の著しい VR (Virtual Reality, 仮想現実) 技術を用いたものが注目されており、シミュレーション結果を可視化することでより直感的な理解が可能となっている。しかし、そのためには高精度な数値解析シミュレーションのみならず、より高い没入感や臨場感を得るための高精度な地形・都市モデルが必要となる。既往の研究では、領域の大きさによって異なる手法を用いていた。その中で、中領域モデルはドローンで撮影した写真から点群データを得てモデル化を行っていた<sup>1)</sup>が、点群のずれによって建物や道路の形状が歪み、現実感を損なう要因が生じていた。

本研究では上記の問題を解決するために中領域モデルに着目して、構造物モデルと非構造物モデルに分類し、異なる手法を用いることで高精度かつ簡便な都市モデルの作成手法の構築を行った。

## 2. 都市モデルの作成手法

本研究では、図-1 に示すように、領域の大きさによって異なる手法を用いてモデルの作成を行った。

### (1) 開発環境

大領域モデルでは、インフラ設計ソフトウェア (InfraWorks) に地形データと衛星写真を導入する。また、中領域モデルは構造物モデルと非構造物モデルに分類し、前者は都市景観モデリングソフトウェア (CityEngine)、後者はドローンによる点群データを用いてモデルの作成を行う。小領域モデルには 3D デザインソフトウェア (SketchUp) を用いてモデルの作成を行う。各手法で作成したモデルをゲーム開発プラットフォーム (Unity) に統合する。ここで用いる構造物データや道路データなどは GIS ソフトウェア (ArcGIS) を利用して統合する。

### (2) 大領域モデルの作成手法

大領域のモデルは、国土地理院のホームページ<sup>2)</sup>から対象地域の DEM データを取得し、GIS ソフトで地形データを統合することで作成する。図-2 にモデル作成の流れとそれによって作成されたモデルを示す。本研究では、対象地域を高知県中土佐町久礼地区として都市モデルを作成する。

### (3) 中領域モデルの作成手法

中領域モデルは、構造物モデルと非構造物モデルで異なる手法を用いる。

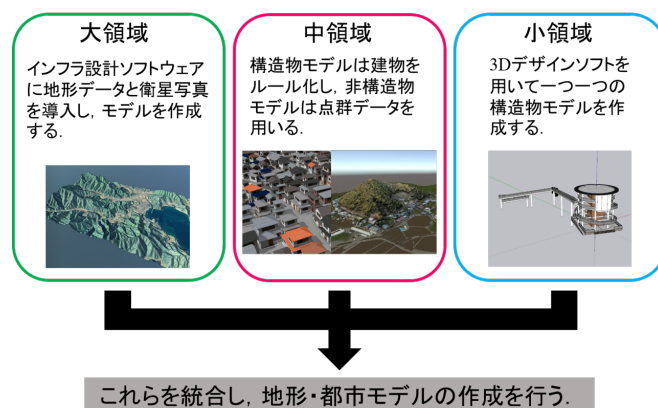


図-1 本研究のモデル作成手法

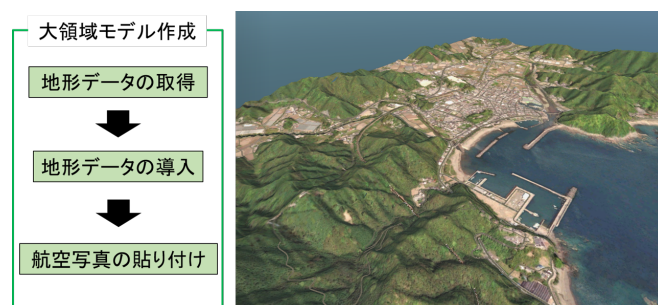


図-2 大領域モデル作成の流れ（左）と作成したモデル（右）

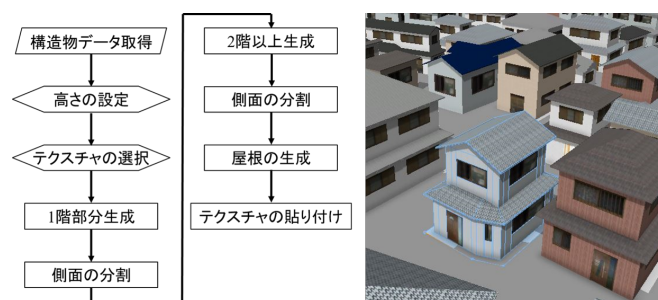


図-3 ルールの構成（左）とそれにより生成したモデル（右）

### (a) 構造物モデル

構造物モデルは、建物のルール化を行うことで大量のモデルを一斉に作成する<sup>3)</sup>。ルールとはモデルを生成するためのプログラムのことである。図-3 にモデル生成の流れとそれによって作成されたモデルを示す。1 階部分は建物の入り口を作成するために 2 階以上の部分と異なる流れで生成する。ルール化したモデルは、小領域モデルに比べて再現度が劣るため、体験者の視点から離れた位置のモデルを作成する。例えば避難シミュレーションに用いる場合は、避難経路から離れた位置のモデルの作成に利用する。モデルをルール化したことで、一つずつ作成する必要がなくなり、



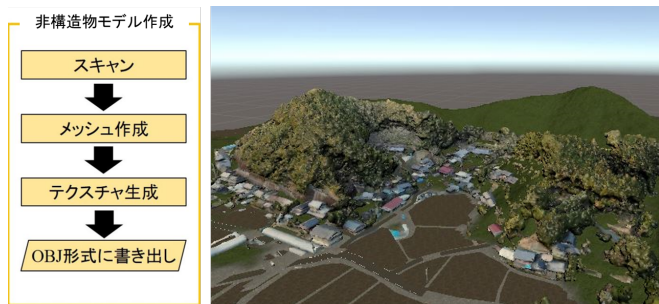


図-4 点群によるモデル生成の流れ(左)と生成したモデル(右)

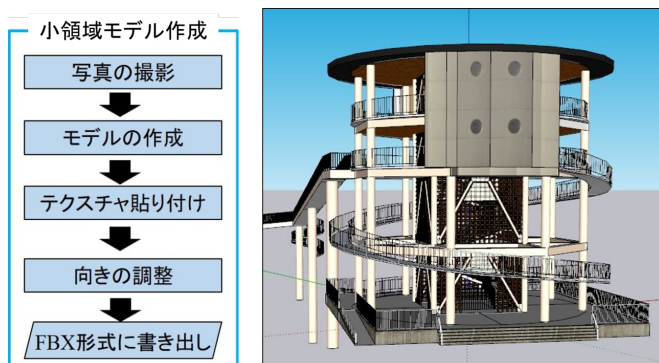


図-5 小領域モデル作成の流れ(左)と作成したモデル(右)

短時間で歪みの生じないモデルの作成が可能となった。

#### (b) 非構造物モデル

非構造物モデルはドローンによる点群データを用いてモデルの作成を行う。構造物モデルと異なり、CADソフトで表現しづらい自然地形・植生などを表現するのに適している。図-4にモデル作成の流れと作成したモデル例を示す。対象地域の空撮写真をテクスチャとして利用し、地表面との距離から点群データを得てメッシュを生成することでモデルの作成を行う。地形モデルに航空写真を貼り付けたものに比べて、より立体感のある自然地形の再現が可能になった。

#### (4) 小領域モデルの作成手法

小領域モデルは、避難所、学校、病院、役所といった重要構造物のモデルを作成するほか、避難シミュレーションに利用するモデルを作成する場合は避難経路上の民家のモデルも作成する。モデル作成の流れと作成したモデルを図-5に示す。実物の写真を用いてモデルの作成を行うため、あらかじめモデル化したい建物の写真を準備しておく。準備した写真をもとにモデルの形状を作成し、テクスチャを貼り付けることでモデルを作成する。テクスチャも実物の写真から切り取ったものを用いることで壁の質感や模様を再現する。モデルが完成した後、構造物データの座標から建物の向きを確認し、モデルの向きもそれに合わせる。これを行うことで、モデルを統合する際に向きを調整する必要がなくなる。

### 3. 適用例

各手法で作成したモデルを統合することで対象地域全体のモデルを作成する。図-6に統合したモデルの俯瞰図を示す。



図-6 統合したモデルの俯瞰図



図-7 作成したモデル(左)と現地写真(右)の比較

す。津波シミュレーションや避難シミュレーションに用いるために、避難所や避難経路を中心に小領域モデルを作成し、そのほかの構造物を中領域モデルとして作成した。図-7に避難経路上の民家のモデルと現地写真との比較を示す。実物の写真をテクスチャに用いたことで、より現実感のあるモデルの作成が可能になった。

### 4. おわりに

本研究では、高精度かつ簡便な都市モデルの作成手法の構築を行うために中領域モデルに着目し、構造物は建物のルール化を行うことによりモデルを作成した。また、非構造物はドローンによる点群データを用いてモデルの作成を行った。その結果、建物のルール化を行ったことで広範囲における構造物モデルの作成を簡便に行うことが可能になった。また、点群データを用いたことにより、非構造物に対しより精度の高いモデル化が可能になった。

今後は、作成したモデルと現地との詳細な比較に基づくルールの改良を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 陳詩凌, 金澤功樹, 植野雄貴, 大川博史, 檜山和男: GIS/CAD/ドローンを用いた高精度地域モデルの構築手法に関する研究, 第46回土木学会関東支部技術研究発表会後援会概要集, I-77, 2p., 2019
- 2) 基盤地図情報サイト, 国土地理院: <https://www.gsi.go.jp/kiban/> (2021年2月27日閲覧)
- 3) Esri ジャパン: ArcProGIS & CityEngine で行う GIS データからの 3D 都市モデル作成



# ひび割れ画像解析における ニューラルネットワークの適用に関する基礎的研究

*A basic study on image analysis of crack by neural network*

都市環境学科 学部 4 年 鈴木 雅大  
Masahiro SUZUKI

## 1. はじめに

世界では、第三次 AI ブームを迎え、あらゆるところで AI(Artificial Intelligence) という言葉を目にする。AI 技術については、コンクリート橋のひび割れ検出<sup>1)</sup>や自動車の交通量予測<sup>2)</sup>などの土木分野にも大きく貢献している。また、そのほかの分野においても多岐にわたって利用されており、その他アートや宇宙探索などで AI 技術の活用が模索されている。本研究は、土木分野における AI 技術の応用、具体的には、ニューラルネットワークを用いた画像解析を土木分野に応用することを目的とし、本発表では、AI 技術に関する基礎的研究とそのメカニズムをひび割れ画像に適用し分析したものを報告する。

## 2. AI について

### 2.1 AI の概要

AI についての定義は専門家の間においても様々である。一般にイメージしやすい身近な事例を挙げるとするならば、お掃除ロボットや自動運転技術などがある。これらは周囲の状況によって自動的に振る舞いを変えるように見える。よって、「周囲の状況によって行動を変えるプログラム」という視点から AI、すなわち人工知能を分類すると古典的な人工知能・機械学習・ディープラーニングとなる<sup>3)</sup>。ニューラルネットワークとは、機械学習の手法の一つである。そして、ニューラルネットワークにおける中間層の構成をより深くしたものを一般にディープラーニングと呼ぶ。

### 2.2 機械学習の概要

機械学習とは、プログラムされた AI 自身が、与えられたサンプルデータを通してデータに潜む特徴を学習するものである<sup>4)</sup>。機械学習には様々な学習手法があり、今回用いるニューラルネットワークによる手法は教師あり学習と呼ばれる学習手法に属する。教師あり学習とは、「与えられた正解データを持つ教師データがどのようなものであるか」を、「学習によって得たパターンをそのデータに適用し分析・予測するもの」である。

## 3. ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークとは人間の脳内の構造を模したアルゴリズムであり、学習手法の一つである。大まかな構造として、データの入力を受け取る「入力層」、得ら

れたデータを解析する「中間層」、解析結果を出力する「出力層」によって構成される。

## 4. 画像解析

### 4.1 用いたデータセット

本研究では、ひび割れ画像解析に広く用いられる画像 (カラー画像) 合計 55,800 枚のデータセットを SDNET2018<sup>5)</sup> からダウンロードし、ニューラルネットワークモデルを適用した。

### 4.2 画像データの種類

用いた画像データセットは以下の図-1 に示す 3 種類にひび割れ画像に分類される。

### 4.3 画像データの前処理

図-2 の通り、テストデータを 100 枚ずつ抽出し、残りをトレーニングデータとしてモデルに学習させた。

### 4.4 ニューラルネットワークモデルの定義

今回用いた次頁図-3 に示すニューラルネットワークモデルは試行錯誤の結果、正解率の高いものとした。特徴としては、画像解析に特化した層である畳み込み層を連続で用い、また、過学習を回避するためにドロップアウト層を適宜設けている。学習回数は 150 回とした。













ひび割れ		データセット数
有	無	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>デッキ ひび割れ有: 2,000 枚 ひび割れ無: 11,500 枚</li> </ul>
		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>舗装 ひび割れ有: 2,600 枚 ひび割れ無: 21,700 枚</li> </ul>
		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>壁 ひび割れ有: 3,800 枚 ひび割れ無: 14,200 枚</li> </ul>
		

図-1 前処理枚数

種類	ひび割れの有無	トレーニングデータ枚数(枚)	テストデータ枚数(枚)
デッキ	有	1,900	100
	無	11,400	100
舗装	有	2,500	100
	無	21,600	100
壁	有	3,700	100
	無	14,100	100

図-2 前処理枚数

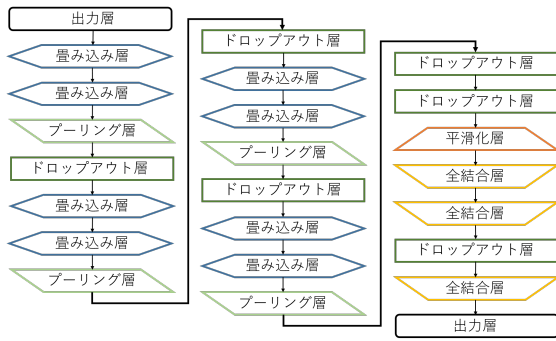


図-3 ニューラルネットワークモデル

ひび割れ		データセット数
有	無	
		・ デッキ ひび割れ有:2,000枚 ひび割れ無:11,500枚
		・ 舗装 ひび割れ有:2,600枚 ひび割れ無:21,700枚
		・ 壁 ひび割れ有:3,800枚 ひび割れ無:14,200枚

図-5 グレースケール化画像

種類	予想	有	無
	正解		
デッキ	有	35	65
	無	2	98
舗装	有	34	66
	無	0	100
壁	有	60	40
	無	11	89

単位:枚

図-4 解析結果

種類	予想	有	無
	正解		
デッキ	有	0	100
	無	0	100
舗装	有	36	64
	無	0	100
壁	有	0	100
	無	0	100

単位:枚

図-6 解析結果 (グレースケール化)

#### 4.5 解析結果

解析結果は図-4 に示すとおりである。全体の正解率は、デッキ 66.5%、舗装 67.0%、壁 74.5% となった。全体の正解率はひび割れ有画像に対しての正解率に比例している傾向があることに對し、ひび割れ有と無の正解率は反比例している。これらは教師データからひび割れ有についての特徴を検出した差にあると考えられる。

#### 4.6 グレースケール化

画像からより特徴を抽出するため、データの前処理の段階でカラー画像からグレースケールに変換し、改めて解析を行った。トレーニングデータ、テストデータの枚数 (図-5)、用いたモデル、学習回数は同じ条件として、カラー画像の解析結果と比較する。解析結果からグレースケール化による効果を確認する。

#### 4.7 解析結果 (グレースケール化)

解析結果は図-6 に示すとおり、デッキ、壁のひび割れ有画像に対し特徴をうまく抽出できず全てひび割れ無と判断していることがわかる。全体の正解率は、デッキ 50.0%、舗装 68.0%、壁 50.0% となった。グレースケール化したことによりひび割れと素材の模様の差別化が困難になったこと、目視による判断においてもひび割れ有と判断することが難しい画像においてひび割れの無い部分と近い色になったことが原因として考えられる。

#### 5. おわりに

今回は、ひび割れ画像に対してニューラルネットワークモデルを適用し、画像分類を行った。正解率に関しては前述の通り全体の正解率はひび割れ有画像に対しての正解率に比例しているため、上昇の余地が見えたため、画像に対して前処理の段階でグレースケール化を行ったが、すべての画像に対しひび割れ無という解析結果を得た。今後の課題としては、グレースケール化した画像に対して閾値を与え、画像を二値化することでひび割れがある画像に対して特徴をより抽出し解析を行うこと、Grad-CAM によるモデルの解析における特徴量抽出を可視化し、モデルの改良を行うことが挙げられる。

#### 参考文献

- 1) 野村泰稔, 村尾彩希, 阪口幸広, 古田均: 深層畳み込みニューラルネットワークに基づくコンクリート表面のひび割れ検出システム, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.73, No.2, I.186-I.198, 2017
- 2) 吉田幸司, 井上亮: 道路リンクの接続関係を考慮した畳み込みニューラルネットワークによる自動車交通量の短期予測の検討, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.75, No.75(土木計画学研究・論文集第 36 巻), I.1059-I.1067, 2019
- 3) 浅川伸一, 江間有沙, 工藤郁子, 巢籠悠輔, 瀬谷啓介, 松井孝之, 松尾豊: ディープラーニング G 検定公式テキスト, pp.4-179, 株式会社翔泳社, 2019.
- 4) 伊藤真: Python で動かして学ぶ!新しい機械学習の教科書, pp.247-340, 株式会社翔泳社, 2019.
- 5) SDNET2018(<https://www.sciencedirect.com/>) (2021 年 3 月 6 日閲覧)

# WebAR を用いた津波の AR 可視化システムの構築

## Development of an AR visualization system for tsunami using WebAR

都市環境学科 学部 6 年 三浦 大知  
Hirokazu MIURA

### 1. はじめに

近年、拡張現実 (Augmented Reality, AR) 技術を用いた可視化手法は、建設・医療・教育・マーケティング等といった様々な分野において注目・活用されている。AR とは、現実世界から得られる知覚情報に対して、コンピュータを用いて何らかの情報を加えることで現実世界の意味を拡張するというものである。

本研究室における既往研究で、仮想現実 (Virtual Reality, VR) 技術を用いた高知県中土佐町久礼地区を対象とする津波避難マップが作成されている。このマップ上に津波や地形を AR 技術を用いて重畳し、浸水の様子を俯瞰することで、更なる防災意識の向上が見込めると考えた。

またこのマップは、一般的なスマートフォン・タブレット型端末で VR 体験可能であるという特徴がある。そのため、津波を俯瞰する AR も一般的なスマートフォン・タブレット型端末で体験可能であるべきである。したがって本研究では WebAR 技術に着目し、ハザードマップの可視化等にも応用可能となる、WebAR を用いた津波の AR 可視化システムの構築を行った。

### 2. WebAR

WebAR とは、AR 技術のひとつであり、Web ブラウザ上で AR 体験ができるものである。HTML 形式でプログラムを作成し、諸データと共にサーバー上にアップロードすることで誰でもオンラインでアクセスすることができる。従来の AR 技術では AR を体験するために専用のアプリケーションを事前にインストールする必要があったが、WebAR の登場により、スマートフォン・タブレット型端末で Web ページにアクセスするだけで即座に AR を体験することができるようになった。加えて、Web ページに AR 可視化システムが紐づけられているため、QR コードを用いたアクセスやリンクの共有等、Web 特有の拡張性を利用することができる点も、他の AR 可視化システムにはない強みである。しかしながら、表示するモデルの安定性が低くなってしまう点、データ量の多いモデルの表示は時間がかかる若しくは動作しない恐れがあるという点がデメリットとして挙げられる。

本研究では、開発ライブラリとしてオープンソースソフトウェア (Open Source Soft-ware, OSS) である AR.js, フレームワークとしてこちらも OSS の A-Frame を利用し、システムを構築した。

### 3. システム概要

本システムの概要は以下に示す通りである (図-1)。

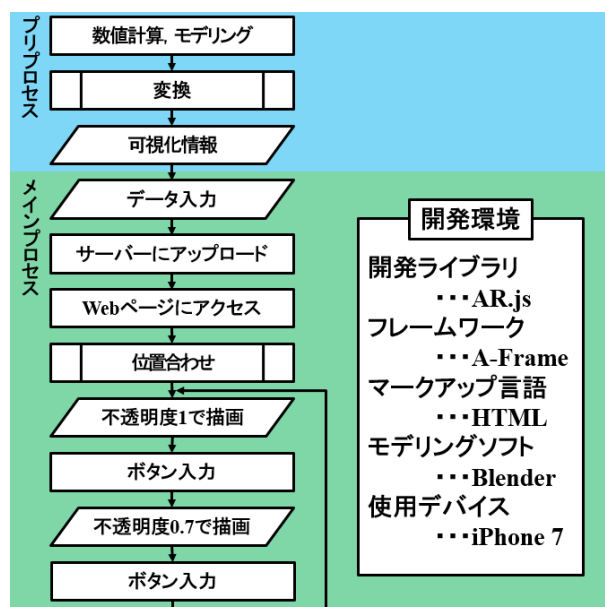


図-1 本システムのフローチャート

#### 3.1 データ入力

本システムで表示しているモデルは、3D モデリングソフトである Blender を用いて、FBX 形式の地形データと OBJ 形式の複数の津波データをひとつにまとめたものである。津波データはステップ毎 (50 秒間隔) の別々の形状データであるため、ひとつの波として動いているように見せるために、Blender の機能であるビルドモディファイアを活用して表現した。この動きを含めたひとつの glTF 形式の 3D モデルとして出力し、AR に利用する算段であったが、WebAR に用いるデータとしてはデータ量が多すぎるという点、ビルドモディファイアが出力できないという点、津波を俯瞰する目的であればある程度平面的なモデルでも問題がないという点から、glTF 形式ではなく JPG 形式の複数の画像データとして出力し、マップ上に表示させるようにした。以下に示す画像を順番に自動で切り替えながら表示する。浸水する津波の様子と地形データを理解しやすくしたもの (図-2) と、ブーリアンモディファイアを活用し、浸水深ごとに色分けをして危険性を理解しやすくしたもの (図-3) の二つのシステムを構築した。





図-2 浸水する津波

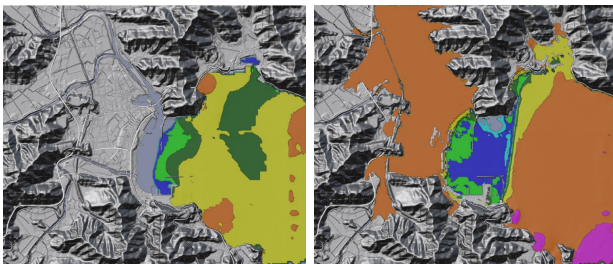


図-3 色分けした津波

### 3.2 位置合わせ

本システムでは、CG 座標系と現実世界との位置合わせを行うにあたり、マーカー画像を利用している。また、本システムは WebAR であるため、Web ページへアクセスするための QR コードをそれぞれ作成していた。そこで、作成していた QR コードの画像をマーカー画像としても用いることができるよう設定した。既往研究で作成されていたマップの右下に配置したものが図-4 であり、高知県が作成・公表している津波浸水予測図の右下に配置したものが図-5 である。図-2 を重畳するマップが図-4、図-3 を重畳するマップが図-5 である。

## 4. 可視化結果

3D モデルではなく画像での AR 可視化となったが、立体感も大きく損なわれることなく表示でき、波としての動きも表現できた。浸水深の時間変化も理解しやすくなったと考える。しかしながら、マーカー画像の認識が不安定であり、表示するモデルがぐらついてしまうことがあった。

## 5. おわりに

本研究では、WebAR を用いて、一般的なスマートフォン・タブレット型端末で体験可能である津波の AR 可視化システムの構築を行った。WebAR の簡便さと有用さが分かった。今後の課題として、AR 可視化するモデルを安定させること、他の事例に適用すること等が挙げられる。

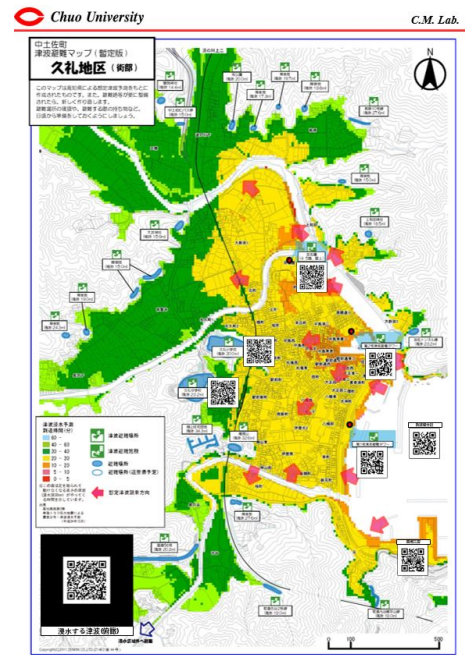


図-4 作成したマップ (1)

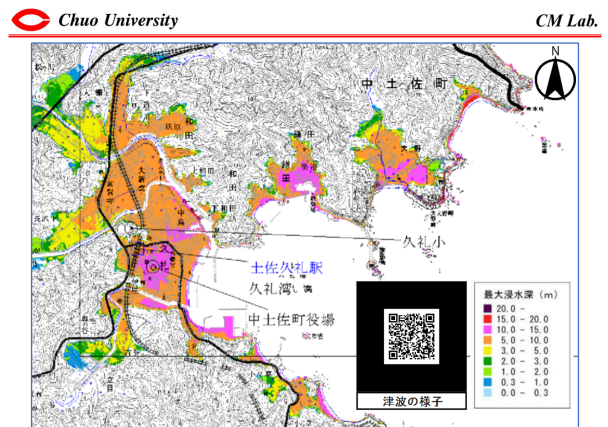


図-5 作成したマップ (2)

### 参考文献

- 1) 植野雄貴, 金澤功樹, 陳詩凌, 近真弥, 大川博史, 樫山和男: 防災教育のための VR 技術を用いた津波とその避難の疑似体験システムの構築に関する研究, 第 46 回土木学会関東支部技術研究発表講演概要集, 2019.
- 2) 陳詩凌, 金澤功樹, 植野雄貴, 大川博史, 樫山和男: GIS/CAD/ドローンを用いた高精度地域モデルの構築手法に関する研究, 第 46 回土木学会関東支部技術研究発表講演概要集, 2019.
- 3) Jerome Etienne, Nicolo Carpinoli: AR.js - Augmented Reality on the Web, <https://ar-js-org.github.io/AR.js-Docs/>; 2020 年 12 月 14 日入手
- 4) 高知県: 南海トラフ地震による震度分布・津波浸水予測, <https://www.pref.kochi.lg.jp/sonae-portal/prediction/seismic.html>; 2021 年 2 月 18 日入手