

2023年度重点研究課題報告書
沿岸災害デジタルツインの創成に関する研究

土木学会 海岸工学委員会

2024年5月

目次

1	概要	4
2	研究目的と研究計画	4
2.1	研究背景・目的	4
2.2	研究の具体性・実用性	5
2.3	分野横断的な特徴	5
2.4	研究計画	5
3	研究体制	6
3.1	小委員会 WG 構成	6
3.2	小委員会参加メンバー	6
3.3	本報告書の主要な執筆者	8
4	沿岸災害デジタルツイン	9
4.1	沿岸災害におけるデジタルツインとは	9
4.2	沿岸災害デジタルツインの要素技術	9
5	津波災害におけるデジタルツイン	10
5.1	センシング・モニタリングによる広域被害把握と社会動態把握	11
5.1.1	津波浸水域の把握	11
5.1.2	建物被害の把握	12
5.1.3	瓦礫の把握	13
5.1.4	UAV（ドローン）による被災者探索	16
5.2	広域被害把握のためのモデリング	17
5.2.1	ハザードと被害のリアルタイム予測	17
5.2.2	社会動態把握	18
5.2.3	沿岸災害デジタルツインの活用	19
6	津波避難問題におけるデジタルツイン	21
6.1	津波による人的被害の想定と津波避難問題	21
6.2	実災害、避難訓練、意向調査の避難行動データ	21
6.3	実災害、避難訓練、意向調査の避難行動特性の関係	22
6.4	津波避難問題のためのモデリング	23
6.5	津波避難へのデジタルツイン活用に向けた展望	23
7	高潮・高波・気候変動におけるデジタルツイン	25
7.1	高潮・高波・気候変動におけるデジタルツインの活用	26
7.1.1	高潮・高波の観測と観測値の集約	26
7.1.2	高潮・高波・気候変動の予測	26
7.1.3	高潮・高波・気候変動におけるデジタルツインの現状、課題と将来展望	28
8	砂浜問題におけるデジタルツイン	28
8.1	砂浜問題の現状	28
8.2	気候変動の砂浜地形への影響評価とその課題	29
8.3	気候変動による砂浜消失への適応策とその課題	31

9	デジタルツインのデータ・アーカイブシステムの設計と試作	33
9.1	デジタルデータ・アーカイブシステムの現状	33
9.2	デジタルツインのアーカイブシステムの設計と試作	33
9.2.1	オープンデータを取り巻く状況	33
9.2.2	津波情報アーカイブシステムのスキーマと設計と試作	34
9.2.3	既存アーカイブシステムとの連携	34
10	まとめと今後の展望	37
11	沿岸災害デジタルツイン研究小委員会の活動	37
11.1	WG1（センシング, モニタリング）	40
11.1.1	活動目的	40
11.1.2	活動履歴	40
11.1.3	モニタリング・センシングに係る技術のレビュー小 WG	40
11.1.4	デジタルツインの中でのモニタリング・センシングに係る課題具体化	40
11.2	WG2（モデリング）	41
11.2.1	活動目的	41
11.2.2	活動履歴	41
11.3	WG3（データ駆動科学）	41
11.3.1	活動目的	41
11.3.2	活動報告	41
11.4	WG4（社会対応）	43
11.4.1	活動目的	43
11.4.2	活動内容	43
11.4.3	災害・環境・経済のテーマ別グループ活動	43
11.5	WG5（デジタルツイン基盤）	46
11.5.1	活動目的	46
11.5.2	活動履歴	46
11.5.3	デジタルツイン像の検討	46
11.5.4	デジタルツインに関するレビュー	47
11.6	WG6（アーカイブ）	48
11.6.1	活動目的	48
11.6.2	活動履歴	48
11.6.3	デジタルデータ・アーカイブシステムの設計と試作	48
	参考文献	49
	補遺	57

1 概要

本研究は、沿岸環境を対象に物理世界と仮想世界（コンピュータ上）を連携させたサイバー・フィジカルシステム（Cyber-physical systems）を構築し、物理世界では時間的・コスト的に不可能といえるような様々な検討、設計、最適解探索を仮想世界で実行しそれを物理世界にフィードバックするという「デジタルツイン」の枠組みを、土木工学、特に海岸工学に導入することを目的として活動を行った。活動は、WG0（総括班）を置き、6つのWGで構成した。WG1（センシング、モニタリング）：新たな海洋・沿岸環境のセンシング・モニタリング技術（リモートセンシング含む）のレビューと検討。WG2（モデリング）：海洋・沿岸の諸現象のリアルタイム解析等幅広い予測を行うための基盤となるモデリング技法に関する検討。WG3（データ駆動科学）：高次元のセンシング・モニタリングデータ背後に潜む潜在構造やプロセスの解明に向けたデータ駆動科学の海岸工学への適用に関する検討。WG4（社会対応）：デジタルツインにおける分析による社会へのインパクトを明らかにし、よりよい対応・適応策を探索的に明らかにする方法論の検討。WG5（デジタルツイン基盤）：沿岸災害デジタルツインの構築に向け、デジタルツインの概念設計やハードウェア・ソフトウェア面での要件の検討。WG6（アーカイブ）：研究活動において得られたレビュー結果や新たな知見・資料を格納し、デジタルツインアーカイブとしての機能要件の検討。活動の成果として、Elsevierの“Digital Twin Paradigm for Coastal Disaster Risk Reduction and Resilience”と題したBook Chapterを発刊した（発刊は2024年度内予定）。また、2023年度海岸工学講演会の特別セッションの開催に加え、Asia Oceania Geosciences Society2023において“Digital Twin Paradigm for Disaster Resilience”というセッションを開催し、国際的な情報発信と国際学術ネットワーク形成を行った。

2 研究目的と研究計画

2.1 研究背景・目的

近年の環境・社会動態のセンシング手法の高度化、モニタリングデータの大規模化とリアルタイム流通、計算機性能・シミュレーション手法の高度化、機械学習を核とするデータ駆動科学の進展を背景に、様々な分野において「デジタルツイン」の有効性が実証されている。デジタルツインとは、多様なセンサから物理世界の状況を仮想世界（コンピュータ上）にコピーして（＝ツインを作成）シミュレーションを実行し、その結果を物理世界にフィードバックする技術体系であり、先進的な分野では既に実用化されている。例えば機械系分野では、航空機エンジンのデータを仮想空間に展開して劣化をシミュレーション予測し、トラブル発生前に先回りで整備を行うなど、産業界の実用化が見られる。社会基盤の分野においては、トヨタがデジタルツインに基づく未来都市Woven Cityを建設して新たなスマートシティのあり方を構想している。シンガポールは国土全体を3Dバーチャルツイン化し、リアルタイムで都市情報を可視化するなど、世界的にも新たな潮流が生まれている。

本研究は、海岸工学委員会の下、2022年6月に設置された沿岸災害デジタルツイン小委員会の委員約60名を主要な構成員として活動し、デジタルツインコンピューティングのパラダイムの海岸工学への導入を進めるため、土木・海岸工学に関連する多様な社会的問題への適用可能性や問題点について検討し、デジタルツインの構成要素となる技術の体系化を通じて、デジタル時代の新たな海岸工学の地平を拓くことを目的とする。

2.2 研究の具体性・実用性

本研究は、沿岸環境を対象に物理世界と仮想世界（コンピュータ上）を連携させたサイバー・フィジカルシステム（Cyber-physical systems）を構築し、物理世界では時間的・コスト的に不可能といえるような様々な検討、設計、最適解探索を仮想世界で実行しそれを物理世界にフィードバックするという「デジタルツイン」のパラダイムを、土木工学、特に海岸工学に導入するものである。

データとデジタル技術を活用したサイバー・フィジカルシステムにおける対応・適応の最適化は、あらゆる産業に適用可能なパラダイムであり、本研究は土木工学・海岸工学の多様な社会的問題への導入を促進することで、デジタル時代の新たな海岸工学の地平を拓くという点で、具体的かつ実用的な研究目標を掲げている。また、本研究の構成メンバーの約1/3が民間事業者からの参画であり、海岸工学におけるデジタルツインの産業応用を加速するという点においても、実用性の高い活動である。

2.3 分野横断的な特徴

沿岸の災害に関する諸問題は、高波、高潮、津波などのハザード予測・評価に加えて、海岸侵食、水質汚濁など長期的なモニタリングに基づく分析と対応・適応策の検討が必要であり、さらに気候変動による海面上昇や海水温の変化等がリスク評価の不確実性を高めている。これら諸問題に対するリスク評価、対策、対応、適応の検討、意思決定という社会の課題に対して、共通の基盤となり得るのがデジタルツインの枠組みであり、分野横断的な協働によって沿岸災害デジタルツインの基盤を構築することが本研究の特徴である。

2.4 研究計画

沿岸災害デジタルツイン（DT）の創成に向けて、以下の7つを研究上の問い（Research Questions）として、幅広い関連分野の研究レビューを踏まえて、検討を行う。

1. DTで扱う沿岸の諸問題の設定について
2. DTのユーザ・ステークホルダーの定義
3. 物理世界から仮想世界になにをコピーするか
4. センシング、モデリング、シミュレーションの現状と課題
5. 将来予測に向けた不確実性の検討
6. エビデンスとなる沿岸の災害レジリエンス指標の検討
7. DTのアウトプット（対応策、政策、適応策など、レジリエントな社会の方向性をどのように提示するか）

デジタルツインの構成要素となるのは、センシング・モニタリング・シミュレーションの融合による「データ（Data）」から「情報（Information）」への変換、データ・情報の「解釈（Interpretation）」とデータからの推論（Inference）（データ駆動科学）、仮想世界におけるシミュレーションによって得られる「知見（Knowledge）」、知見の集積からなる最適解および政策的な「示唆（Insights）」の獲得と現実世界へのフィードバックである。これらの構成要素の体系化を、本研究の目標、すなわちデジタルツインの創成として位置づける。

デジタルツインの構成要素の体系化に向けて、具体的には以下の6つのテーマを設定して活動を行う。研究開始時点では図-1の枠組み（沿岸災害デジタルツインにおけるサイバー・フィジカルシステムの構造案、今後空白を埋めていく）の構築に取り組むことを第一義的な活動目標とする。

WG1 (センシング, モニタリング): 新たな海洋・沿岸環境のセンシング・モニタリング技術 (リモートセンシング含む) のレビューと検討を行う。

WG2 (モデリング): 海洋・沿岸の諸現象のリアルタイム解析等幅広い予測を行うための基盤となるモデリング技法に関する検討を行う。

WG3 (データ駆動科学): 高次元のセンシング・モニタリングデータ背後に潜む潜在構造やプロセスの解明に向けたデータ駆動科学の海岸工学への適用に関する検討を行う。

WG4 (社会対応): デジタルツインにおける分析による社会へのインパクトを明らかにし、よりよい対応・適応策を探索的に明らかにする方法論の検討を行う。

WG5 (デジタルツイン基盤): 沿岸災害デジタルツインの構築に向け、デジタルツインの概念設計やハードウェア・ソフトウェア面での要件を検討する。

WG6 (アーカイブ): 研究活動において得られたレビュー結果や新たな知見・資料を格納し、デジタルツインアーカイブとしての機能要件を検討する。

3 研究体制

本研究には、2022年6月に海岸工学委員会の下に設置された「沿岸災害デジタルツイン小委員会」の委員60名が参加する。総括班のマネジメントのもと6つのワーキンググループ(WG)で活動を構成する。総括班のメンバーとWG主査・副主査を以下に列挙するとともに、全メンバーのリストを掲載する。

3.1 小委員会 WG 構成

WG0 (総括班)

小委員長 (2名): 越村俊一 (東北大学・教授), 森信人 (京都大学・教授)

副小委員長 (2名): 有働恵子 (東北大学・教授), 近貞直孝 (防災科学技術研究所・主任研究員)

幹事長 (2名): 奥村与志弘 (関西大学・教授), 二宮順一 (金沢大学・准教授)

WG1 (センシング・モニタリング)

細川真也 (港湾空港技術研究所・グループ長), 志村智也 (京都大学・准教授)

WG2 (モデリング)

高川智博 (港湾空港技術研究所・グループ長), 木原直人 (電力中央研究所・上席研究員)

WG3 (データ駆動科学)

馬場俊孝 (徳島大・教授), 田村仁 (港湾空港技術研究所・主任研究官)

WG4 (社会対応)

有川太郎 (中央大・教授), 宇野喜之 (株式会社エコー・上席技師)

WG5 (デジタルツイン基盤)

鈴木進吾 (防災科学技術研究所・主任研究員), 甲斐田秀樹 (電力中央研究所・主任研究員)

WG6 (ポータルサイト)

近貞直孝 (防災科学技術研究所・主任研究員), 嶋原良典 (防衛大学校・准教授)

3.2 小委員会参加メンバー

沿岸災害デジタルツイン研究小委員会への参加メンバーリストを表1に示す。

表 1: 小委員会参加メンバー

氏名	所属機関	職名
ゴ レンケイ	東京海洋大学	助教
井上徹教	港湾空港技術研究所	グループ長
大倉翔太	国土技術政策総合研究所	主任研究官
酒井大樹	東洋建設株式会社	主任研究員
水野辰哉	五洋建設(株)	係員
二宮順一	金沢大学	准教授
熊谷健蔵	パシフィックコンサルタンツ株式会社	会社員
田村 仁	港湾空港技術研究所	主任研究官
新井田靖郎	電力中央研究所	主任研究員
宇野喜之	株式会社エコー	上席技師
越村俊一	東北大学	教授
比嘉紘士	横浜国立大学	准教授
森信人	京都大学	教授
マスエリック	東北大学	准教授
山本裕規	復建調査設計株式会社	上席主任エンジニア
田中健路	広島工業大学	教授
岡田輝久	電力中央研究所	主任研究員
有働恵子	東北大学大学院	教授
富田孝史	名古屋大学	教授
田井明	九州大学	准教授
菅原大助	東北大学	准教授
松崎義孝	港湾空港技術研究所	主任研究官
岡田清宏	パシフィックコンサルタンツ株式会社	課長補佐
成田裕也	パシフィックコンサルタンツ株式会社	技術主任
李 漢洙	広島大学	教授
木原直人	(一財)電力中央研究所	上席研究員
豊田将也	豊橋技術科学大学	助教
福井信気	鳥取大学	助教
阿部郁男	常葉大学	教授
稲垣直人	熊本大学	助教
桐 博英	農業・食品産業技術総合研究機構	領域長
岩前伸幸	鹿島建設	主任研究員
高島知行	近畿大学	准教授
高梨和光	NPO 法人環境防災コンシェルジュ	理事長
伊藤輝	東洋建設株式会社	研究員
高川智博	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所	グループ長
川崎浩司	KK 技術研究所	代表
馬場俊孝	徳島大学	教授
水谷夏樹	大阪産業大学	教授
志村智也	京都大学	准教授
高橋研也	五洋建設株式会社	担当課長

表 1: 小委員会参加メンバー

氏名	所属機関	職名
小俣哲平	大成建設株式会社	研究員
福谷 陽	関東学院大学	准教授
細川真也	港湾空港技術研究所	グループ長
本間翔太	港湾空港技術研究所	研究官
姫野一樹	国土技術政策総合研究所	主任研究官
鶴留千晶	(一財)電力中央研究所	研究員
有川太郎	中央大学	教授
長谷川夏来	清水建設株式会社	技師
田邊 晋	国際航業株式会社	主任技師
吉河 秀郎	清水建設株式会社	グループ長
鶴田 修己	港湾空港技術研究所	グループ長
大野剛	大成建設株式会社	課長
鈴木進吾	防災科学技術研究所	副部門長・主任研究員
甲斐田秀樹	(一財)電力中央研究所	主任研究員
近貞直孝	防災科学技術研究所	主任研究員
高橋成実	防災科学技術研究所	総括主任研究員
奥村与志弘	関西大学	教授
高橋智幸	関西大学	教授
嶋原良典	防衛大学校	准教授
玉田 崇	デロイトトーマツコンサルティング合同会社	マネージャー

3.3 本報告書の主要な執筆者

- 越村俊一，東北大学災害科学国際研究所（代表研究者，共同小委員長）
- 森 信人，京都大学防災研究所（共同小委員長）
- 有働恵子，東北大学大学院工学研究科（副小委員長）
- 近貞直孝，防災科学技術研究所（副小委員長，WG6 主査）
- 二宮順一，金沢大学理工研究域・地球社会基盤学系（幹事長）
- 奥村与志弘，関西大学社会安全学部（幹事長）
- 細川真也，港湾空港技術研究所（WG1 主査）
- 志村智也，京都大学防災研究所（WG1 副主査）
- 高川智博，港湾空港技術研究所（WG2 主査）
- 木原直人，電力中央研究所（WG2 副主査）
- 馬場俊孝，徳島大学大学院社会産業理工学研究部（WG3 主査）
- 田村 仁，港湾空港技術研究所（WG3 副主査）
- 有川太郎，中央大学理工学部都市環境学科（WG4 主査）
- 宇野喜之，株式会社エコー（WG4 副主査）

- 鈴木進吾, 防災科学技術研究所 (WG5 主査)
- 甲斐田秀樹, 電力中央研究所 (WG5 副主査)
- 嶋原良典, 防衛大学校システム工学部 (WG6 副主査)

4 沿岸災害デジタルツイン

4.1 沿岸災害におけるデジタルツインとは

近年の環境・社会動態のセンシング手法の高度化, モニタリングデータの大規模化とリアルタイム流通, 計算機性能・シミュレーション手法の高度化, 機械学習を核とするデータ駆動科学の進展を背景に, 様々な分野において「デジタルツイン」の有効性が実証されている。デジタルツインとは, 多様なセンサから物理世界の状況を仮想世界 (コンピュータ上) にコピーして (= ツインを作成) 分析やシミュレーションを実行し, その結果を物理世界にフィードバックする技術体系であり, ユーザーはデジタルツインからのフィードバックを通じて, 政策設計, 対応方針, および適応に対する知識・見識を獲得することができる。

デジタルツインは先進的な分野では既に実用化されている。たとえば, 航空宇宙産業では, デジタルツインは航空機や航空システムの設計最適化, 予測保守, 燃料効率化, 航空安全性の目的ですでに活用されている [1]。土木工学の分野では, デジタルツインの実際の適用はまだプロトタイプ段階にあり, 計画, 設計, 建設工程およびユースケースに適した一般的な手順と技術標準化の開発が求められている [2]。都市計画の分野では, たとえば東京都は, 都市のデジタルツインを産官学一体で実現する「東京都デジタルツイン実現プロジェクト」を推進し, デジタルツインを活用することで, 少子高齢化や人口減少, 人流・物流の変化, 気候変動対策, 首都直下型地震に対する備えなど, 多様な課題の解決と都民の QOL (クオリティ・オブ・ライフ: 生活の質) 向上を目指している [3]。シンガポールでは, 国土全体が 3 次元バーチャルツインに変換され, 都市情報をリアルタイムで視覚化している (たとえば [4, 5])。重要なのは, このプラットフォーム構築が国策として進められ, 都市計画の問題に対する新しい解決策のシミュレーションと仮想テストに対して様々な主体が使用できることである。我が国においても, PLATEAU (プラトー) という国土交通省が主導する日本全国の 3D 都市モデルの設備・オープンデータ化プロジェクトにより, 3D 都市モデルデータをオープンデータとして公開している [3]。商用利用も可能であり経済発展と社会的課題の解決に期待されている。

以上より, デジタルツインは現実世界のデータを活用して仮想世界において実行する様々なシミュレーションにより, 現実世界では不可能な様々な実験や試行を行うことが可能であり, 関心事象の結果と影響を予測することで, 現実世界での対策の最適化を実現するものである。AI, IoT, 拡張現実 (AR), バーチャルリアリティ (VR), およびミックスドリアリティ (MR) などの技術を活用することで, 物理世界と仮想世界の間の隔たりが縮まることになる。本稿では, 沿岸災害におけるデジタルツインの活用について, 2011 年東日本大震災の経験を踏まえた技術の進展と課題を含め, 今後の展望について論述する。

4.2 沿岸災害デジタルツインの要素技術

図 4.1 に示すのは, 筆者が提唱する災害デジタルツインの概念である [7]。サイバー・フィジカルシステムの重要な要素を六角形の概念で表現している。「センシング (Sensing)」と「モニタリング (Monitoring)」は, センサの展開およびリアルタイムデータの収集により, 物理的な環境, 対象物, または現象を捉え, 現実の環境を理解し解釈するための要素技術である。センシングにより得られたデータ・情報は, モデルパラメータ, 初期・境界条件, データ同化, およびキャリブ

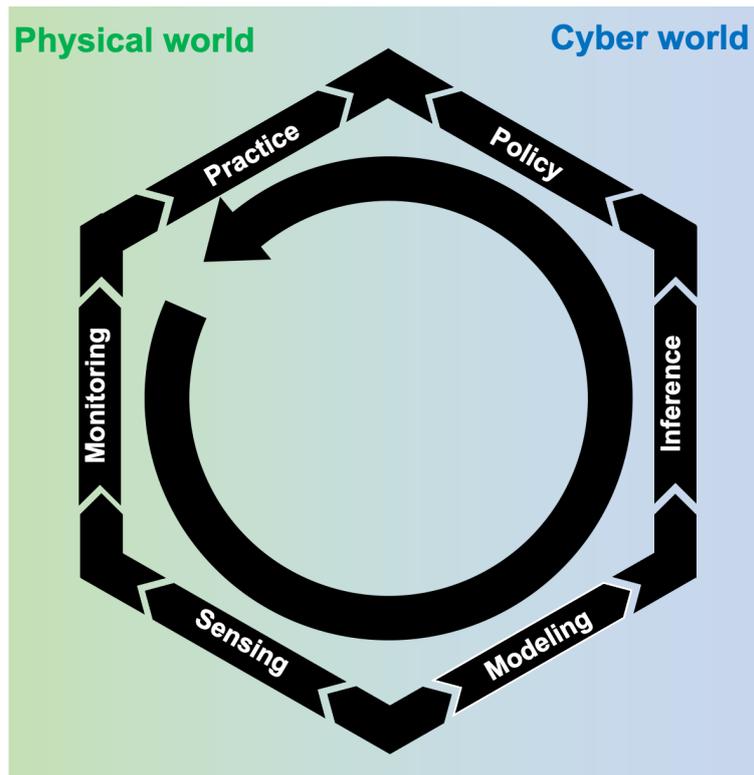


図 4.1: 災害デジタルツインを構成する要素技術と物理世界・仮想世界のフィードバックループ [7]

レーションとして「モデリング (Modeling)」の入力となる。モデリングは、対象とする現象（ハザード）の予測を提供し、エンドユーザーに対してハザードによる影響についての予測結果を提供する。モデリングと機械学習を融合したデータ駆動型のアプローチは、可能な政策（対応および適応策など）に関する「推論 (Inference)」を提供する。特に仮想世界の社会動態のシミュレーションは、複雑な社会、経済、および環境の相互作用を捉えることで、取りうる「対応策や政策の策定 (Policy)」とその評価に重要な役割を持っている。その意味で、センシングと継続的なモニタリングは、仮想世界のあらゆるシミュレーションと結合されている必要がある。仮想世界で検討される政策から最も有用なものが物理世界で採用される。したがって「実践 (Practice)」は、仮想世界からのフィードバックループを経て可能な政策と行動を実施する取り組み (Policy Implementation) と定義する。先述の通り、災害デジタルツインの要素技術は、「センシング (Sensing)」「モニタリング (Monitoring)」「モデリング (Modeling)」「推論 (Inference)」「対応策や政策の策定 (Policy)」「実践 (Practice)」と位置づけ、本稿では特にセンシング・モニタリングとモデリングについて詳述する。

5 津波災害におけるデジタルツイン

ここでは、津波災害におけるデジタルツインの活用について、2011年東日本大震災の経験を踏まえた技術の進展と課題、今後の展望について論述する。

5.1 センシング・モニタリングによる広域被害把握と社会動態把握

災害デジタルツインにおいて、物理世界で発生するハザードとそれによる被害のデータ・情報のデジタルコピー（ツイン）をどのように得るかが主要な課題である。現場での情報を取得することは困難であるから、リモートセンシングによる広域被害把握技術に依拠することとなる。

巨大災害後の対応や被災地での救援活動において最も重要なことの一つは被害の全容把握である。地震や津波といった巨大災害の発生直後は、激甚な被害を受けた地域からの情報が断片的となり、被害の全容把握が極めて困難になるとともに、被災地での救援活動や復旧活動も難航する。たとえば、2011年東日本大震災の被災地は広大で、発災直後に激甚な被災地がどこにあるかを把握することが不可能であった。現地での被害把握に関する対応は、調査期間や人的資源の制約により限界があるため、被災地外からの被害把握が必要である。ここでは、近年技術的發展が著しいリモートセンシングを活用することにより、この問題のブレークスルーを図るための技術的アプローチについて概説する [19]。

表2に広域被害把握に用いられるセンサ・プラットフォーム、および解析手法についてまとめる。災害リモートセンシングに利用されるプラットフォームは、現在では人工衛星から航空機、無人機など、幅広い選択肢がある。センサについては、主に可視光・近赤外を捉える光学センサ、合成開口レーダ、LiDAR (Light Detection and Ranging) が用いられる。把握したい項目や用途、把握したい時期、空間スケールに応じてセンサ、プラットフォームを使い分ける必要がある。なお、解析手法については、参考文献の文献番号を付してあるので、詳細については原著論文を参照されたい。

表 2: 津波の広域被害把握のためのセンサ・プラットフォーム

抽出内容	センサ・プラットフォーム	解析手法
陸上遡上特性	空撮ビデオ 目視判読	エッジ抽出 [19]
浸水域	航空写真, 無人機, 衛星センサ (光学), 合成開口レーダ	目視判読, 画像フィルタ [9], 変化抽出 [10]
建物被害	航空写真, 無人機, 合成開口レーダ	目視判読 [11], 変化抽出 [11, 12, 13], 機械学習 [14], 深層学習 [15]
瓦礫量	航空写真, 衛星センサ (光学), 合成開口レーダ, LiDAR	機械学習 [16], 3次元計測 [17]
被災者搜索	無人機	画像認識, 機械学習 [18]

5.1.1 津波浸水域の把握

広域被害把握という観点では、津波浸水域および陸上の津波の振る舞い（遡上特性）をどのようにして把握するかが最初の課題である。2011年東北地方太平洋沖地震発生直後には、複数の機関による緊急観測が実施された。たとえば JAXA は 2011 年当時、陸域観測技術衛星「だいち」を運用しており、標高などの地表の地形状況を把握するパンクロマチック立体視センサ (PRISM)、土地被覆や土地利用状況の把握のための可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2)、および昼夜を問わず陸域観測が可能な L バンド合成開口レーダ (PALSAR) の 3 つの地球観測センサを搭載していた。AVNIR-2 センサは、RGB の可視光の 3 バンドに加え、近赤外のセンサもあり、地上分解能は直下視で 10m である。

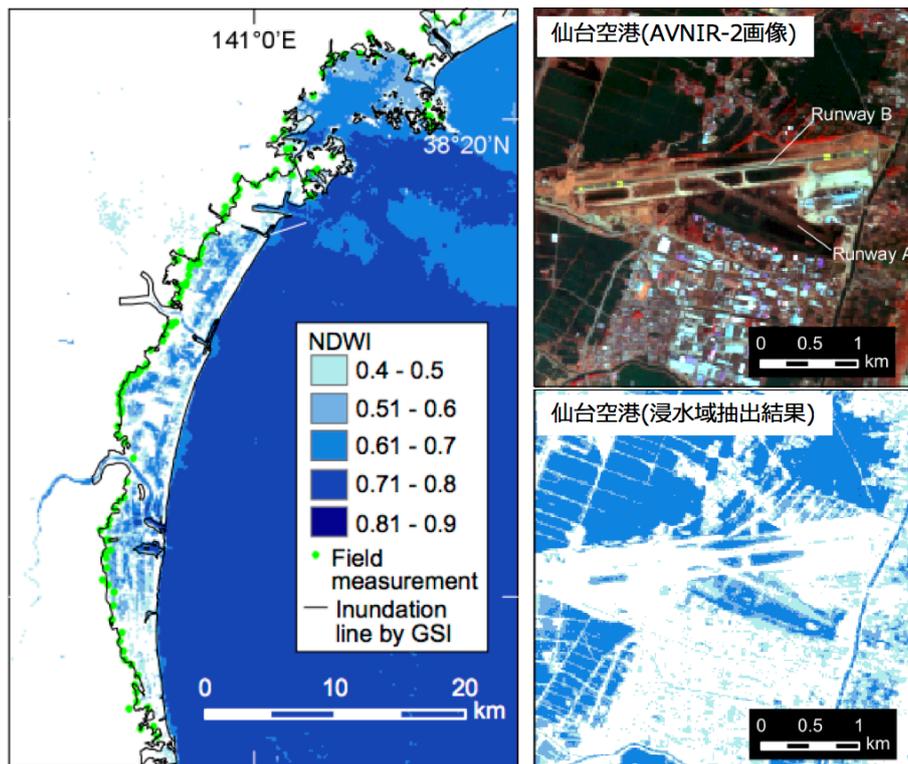


図 5.1: ALOS AVNIR-2 の画像から推定した津波浸水域. 実線は国土地理院が航空写真から抽出した浸水ライン, 緑点は現地調査結果 [19].

図 5.1 に, 2011 年 3 月 14 日に撮影された ALOS AVNIR-2 の画像を用いて作成した浸水域図を示す [9]. 津波の浸水域の抽出に, 水の分光特性に着目した指標を用いて, 現地調査結果を用いてキャリブレーションした. 報道のヘリコプタ映像やドローンによる空撮により, 現地の津波の来襲状況の映像がリアルタイムで得られる機会も増えつつある. リアルタイムで得られる空撮映像から分かることは, 特に, 陸上における津波の流速情報は, 建物に作用する流体力の定量的評価や津波数値計算の再現性の検証に有用である [10].

一方, 昼夜を問わず観測が可能な合成開口レーダ (SAR) による浸水域抽出技術にも期待が高い. マイクロ波の散乱強度を計測する場合, 浸水域はマイクロ波の鏡面反射により, 後方散乱強度は低下する. その特性を利用して, 被災前後の水域変化の抽出をうまく捉えることで浸水域の抽出が可能になる. 図 5.2 に示すのは, ドイツの X バンド合成開口レーダ TerraSAR-X の被災前後の画像を用いて, 浸水域の自動抽出を行った結果である [11].

5.1.2 建物被害の把握

建物被害把握手法には多くの研究の蓄積がある. 対象となる領域のスケール, 得られるデータやセンサの特性に応じて使い分けることが可能になっている. たとえば, 発災直後に取得が可能になりつつある航空機・無人機による写真は, 目視での解釈・判読が容易である. 筆者らは, 東日本大震災時に国土地理院が撮影した宮城県の被災地の航空写真を用いて, 県内 16 万棟の建物被害を目視判読により抽出した [12]. 人の目で解釈・判読するので時間がかかるのが難点であるが, 近年急速に発展している機械学習・深層学習の応用で, 容易に自動化が進みつつあるので, 現在は一部解消されており, 倒壊・流失といった大規模な被害であれば自動的な抽出が可能になっている [14, 15].

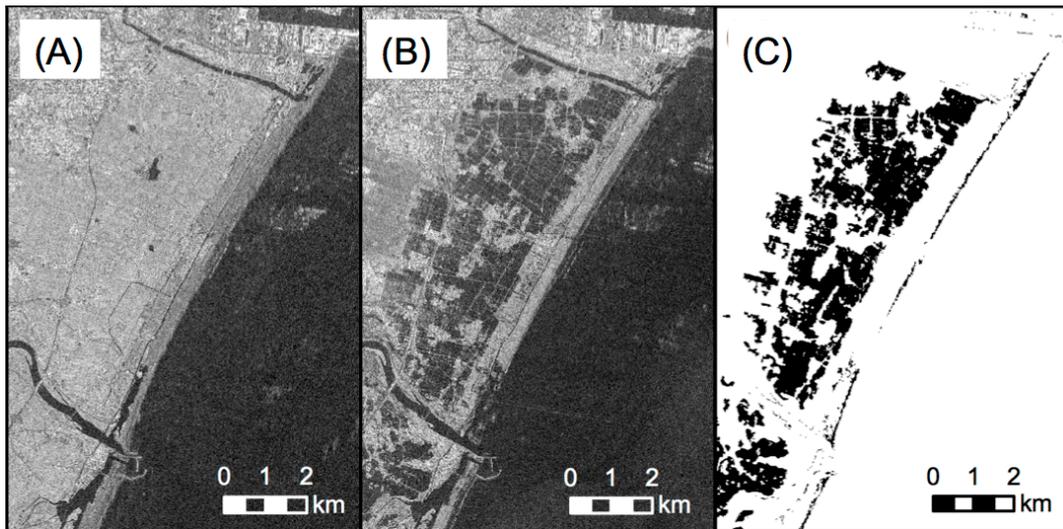


図 5.2: TerraSAR-X 画像を用いた仙台市の津波浸水域の自動抽出結果. (A) 被災前の TerraSAR-X 画像, (B) 被災後の TerraSAR-X 画像, (C) 抽出した浸水域 [11].

昼夜・天候を問わず観測が可能な合成開口レーダを利用して、建物被害の量的な把握を可能とする手法も整備されてきた。最も知見の蓄積が進んでいるのが変化抽出法である [13]。被災前後に撮像された画像データセットの変化（画素値の差分や相関係数）と建物被害程度を関連づけ、変化量に対する閾値の決定や分類器を構築するのが一般的である。図 5.3 に示すのは、2 時期の TerraSAR-X 画像から建物域をまず抽出し、Decision Tree 法に基づく分類器（Classifier）を構築して津波被災地の建物被害抽出に適用した例である。流出建物抽出に関して 80% の正解率で把握が可能であることが実証されている [14]。ただし、この変化抽出法が優れた結果を示せるのは、被災前後のデータが同じ撮像条件で得られた場合に限られる。被災後の画像しか得られていない場合に適用できないのが難点である。

この欠点を克服し得るのが、機械学習や深層学習である。事前に建物被害の学習データを整備するか、被災直後の限られた被害データを用いて学習し、被災後のデータからのみから建物被害を抽出する手法開発が進められており、一定の成果が得られている。たとえば、図 5.4 に示すのは、SqueezeNet という DNN (Deep Neural Network) を用いて建物域を抽出した後に wide residual networks (Wide ResNet) という畳み込みニューラルネットワークのアーキテクチャを用いて被害を分類した結果である [15]。変化抽出法と遜色ない結果（総合精度約 75%）を得ており、適切な学習データを整備することで正確・詳細かつ迅速な被害把握が可能となる。

5.1.3 瓦礫の把握

リモートセンシングの特徴と利点には、広域性（広い領域を観測できること）と周期性（一定の時間間隔で同じ場所を観測できること）、継続性（長期間観測を継続できること）が挙げられる。すなわち、災害発生直後の広域被害把握だけでなく、その後の被災地の広域モニタリングも可能である [16]。たとえば、東日本大震災の発生直後には、東北 3 県で 2300 万 t 以上の瓦礫が発生したと報告された。瓦礫の迅速な処理が災害復旧の迅速化において重要かつ喫緊の課題であり、そのためには正確な瓦礫量の推計が必要である。

筆者らは、合成開口レーダ、航空写真と LiDAR データから、瓦礫の堆積・分布を 3 次元かつ定量的に把握する手法を開発した。まず、航空写真のオブジェクトベース解析と機械学習により、裸地・植生域・瓦礫域の分類を行う。2 次元的に抽出された瓦礫域に対して LiDAR データか

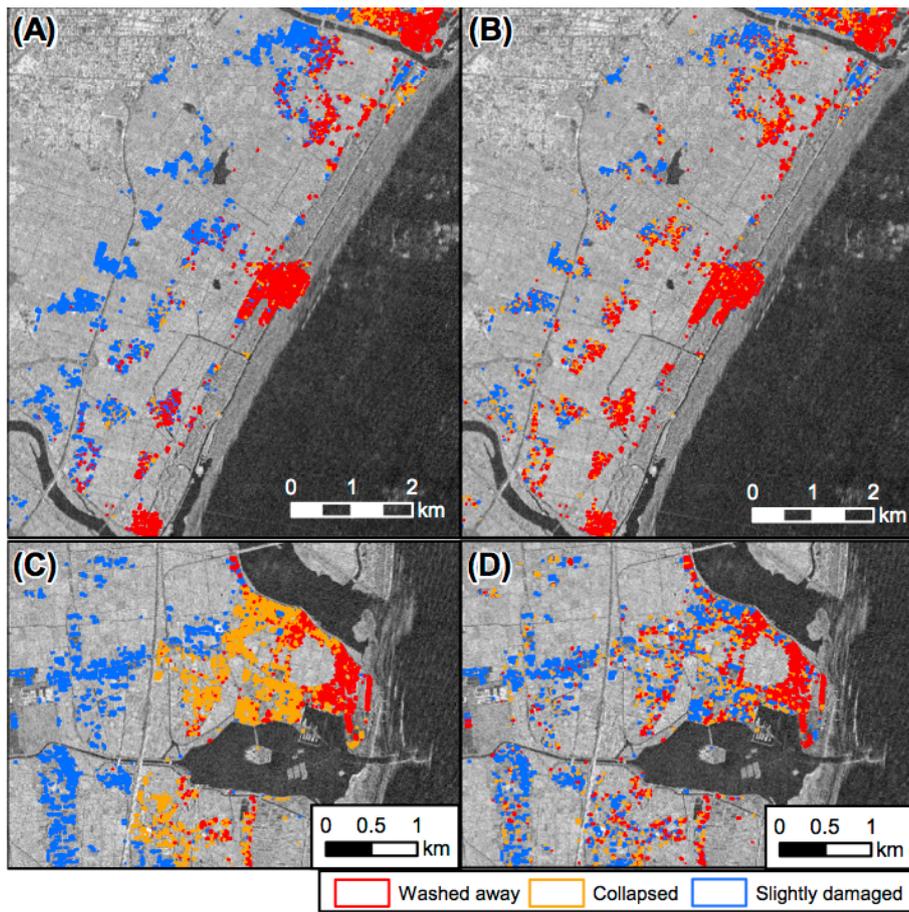


図 5.3: 仙台市と亶理町における津波による建物被害の抽出結果. (A), (C) 現地調査結果, (B), (D) TerraSAR-X 画像からの被害抽出結果 [14].

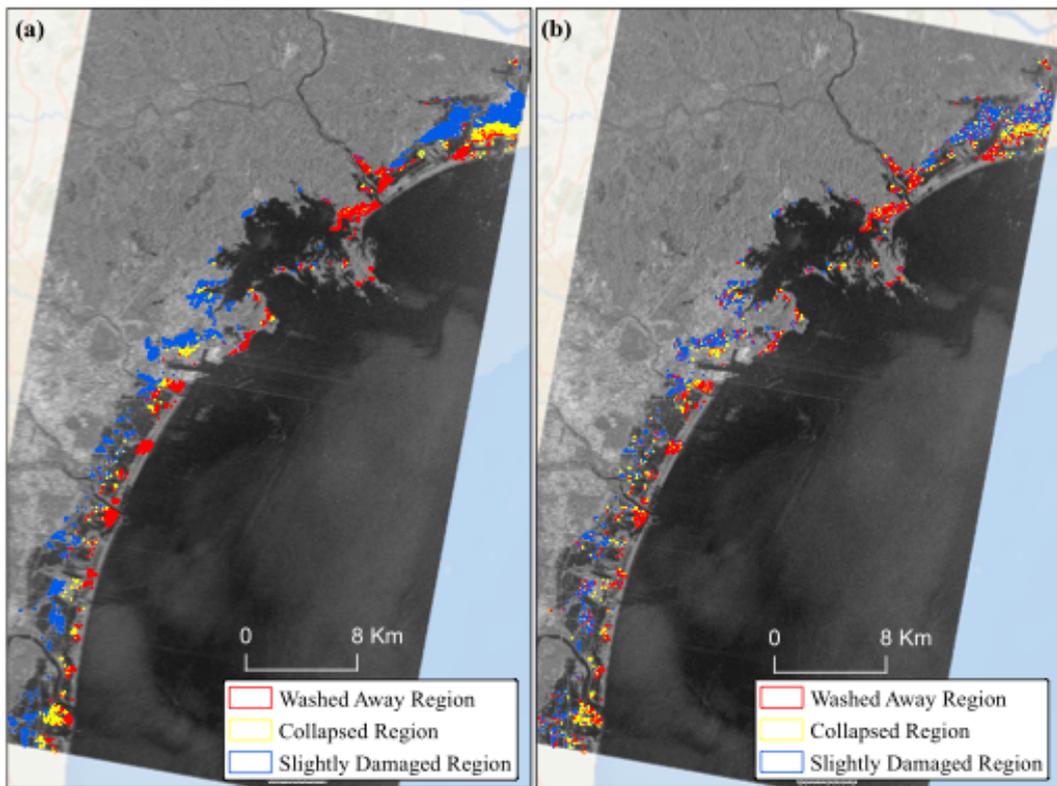


図 5.4: 仙台市と亶理町における津波による建物被害の抽出結果. (A), (C) 現地調査結果, (B), (D) TerraSAR-X 画像からの被害抽出結果 [15].

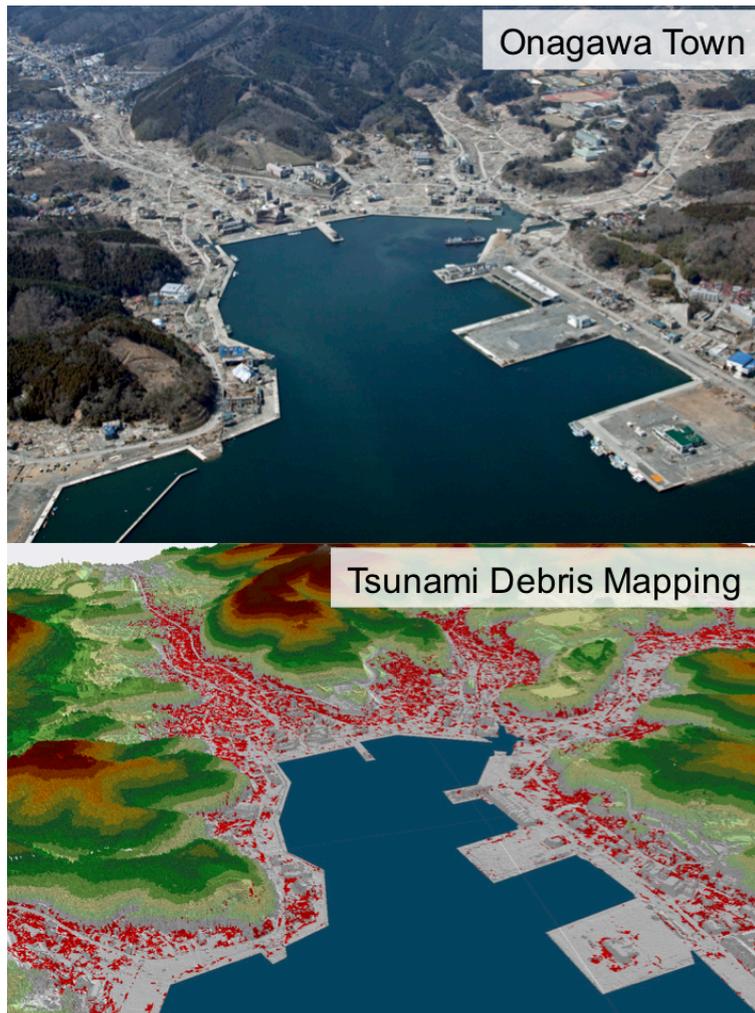


図 5.5: 宮城県女川町全域の瓦礫分布の 3 次元把握結果 [16]. 上: 女川町市街地地域の鳥瞰写真, 下: 瓦礫の分布 (推定).

らの数値標高モデルを統合することで、瓦礫体積の 3 次元判読を可能にした。図 5.5 に示すのは、宮城県女川町における瓦礫の 3 次元抽出を行った結果である [16]。同領域内の瓦礫の総体積は 23.8 万 m^3 と推定され、瓦礫の嵩比重 $1.2\text{t}/\text{m}^3$ (国立環境研究所発表) を考慮すると、総重量 28.6 万 t の推定値を得た。瓦礫を現場で直接計測し、その空間的な分布の把握を定期的・継続的に行うことは困難であり、被災直後の航空写真撮影と LiDAR 測量を実施すれば、瓦礫量を迅速かつ定量的に把握可能であることが示された。

5.1.4 UAV (ドローン) による被災者探索

2011 年東日本大震災後に、被害把握を UAV (ドローン) により実施する技術が確立されてきた。飛行時間が短く風雨に弱いという欠点もあるが、人が立ち入れない領域を調べることができるのは大きな利点である。

被害把握に加えて大きく期待できるのは、被災者の探索である。大規模な津波災害の被災地では、被災者が避難先の高台や建物などに取り残され孤立する事態が数多く発生しており、彼らの早期発見は人命救助の観点から極めて重要である。有人機が探索・救助どちらも行うことは非効率であり、サイレントタイム確保の観点からも、有人航空機の活用には課題がある。無人機による捜



図 5.6: ドローンの空撮画像から検出した被災者 [18]

索・探索と有人機を用いた救助が連携できれば、孤立した被災者の救助の技術が大きく進むはずである。空撮画像からの人の検出には、オブジェクト分類、影検出、HOG (Histograms of Oriented Gradients) 特徴量を用いた機械学習を併用することで人の識別器を構築することは可能である (図 5.6) [18]。

以上、広域被害把握のためのリモートセンシングの活用について、浸水域・遡上特性の把握、建物被害の抽出、瓦礫の把握、被災者の探索という課題に着目して、研究の現状と展望について概説した。多様なプラットフォームの利用、センサ性能と分解能の向上、情報通信技術の発展、機械学習・深層学習による画像認識の AI 化により、今後の飛躍的な発展が期待できる。近年のリモートセンシング技術の発展については、文献 [19] に詳述してあるので参照されたい。

課題は、観測の迅速性の確保であろう。たとえば人工衛星によるリモートセンシングにはコンステレーションの問題がある。災害直後に迅速に被災地を撮像できる衛星を自国のものだけでまかなうことは不可能であるから、国際的な協調が必要であり、センシング、解析技術の標準化も必要になる。また、無人機についてもタフな状況化での機動性が求められる。ハードウェアの開発、センサの開発、解析技術・解釈法の確立を連携して行うと同時に、最も重要なユーザーズに応えながら、様々な災害現場での実証が必要である。

5.2 広域被害把握のためのモデリング

5.2.1 ハザードと被害のリアルタイム予測

近年の稠密な地球観測ネットワークの整備と計算技術の進展に伴い、災害発生直後にハザード、被害をリアルタイムで予測することが可能になりつつある。

代表的なハザードとしては、地震、津波、洪水が挙げられるが、地震については 1995 年の兵庫県南部地震以降、地震観測網の整備が格段に進み、地震発生直後に震源と地震動分布を素早く把握し、時々刻々集まる観測データを即時 (リアルタイム) に分析し、的確な地震情報を発信するとともに、地震の発生や強い揺れのメカニズムを解明することによって、地震災害の軽減に貢献



図 5.7: リアルタイムシミュレーションによる津波被害の予測結果（高知県高知市）（左：浸水範囲（図中の赤いピンは避難ビル）と浸水深，右：建物被害棟数） [21]

しようとする学際的研究が進められてきた。その結果，地震動を規定する物理量（最大加速度，最大速度，計測震度等）との関連で被害を即座に推計する技術が確立された。たとえば，地震動による建物被害は，既往の地震による被害情報から地震動と家屋被害との関連性（経験則）に基づく被害関数を用いて，量的な推計を行っている [20]。

一方，津波による被害は，陸上への浸水状況を観測により知ることが不可能なため，リアルタイムシミュレーションによる予測が開発されてきた。筆者らによるリアルタイム津波浸水被害予測システムは，災害時のスーパーコンピュータの活用により，我が国太平洋岸から日本海沿岸にかけて，30分以内に被害を予測する技術が実用化されている。図 5.7 は，南海トラフ地震津波を想定して実施したリアルタイム予測結果の表示例である。現在は，津波の浸水範囲・浸水深，場所毎の建物被害棟数，浸水域内人口などの予測結果が国や自治体に配信されるようになっており，大規模災害発生直後の救援活動への活用が可能になっている [21, 22]。

5.2.2 社会動態把握

近年，携帯電話等のモバイルデバイスのセンシングから，人口動態をリアルタイムで推定する技術が普及している。たとえば，NTT ドコモが展開するモバイル空間統計は，NTT ドコモのネットワークから抽出される携帯電話の利用者の秘匿化されたデータに基づき推計した人口統計であり，日本全国 500m 毎，10 分単位，1 時間単位での人口推計を得ることができる。ユーザが利用する際のデータ遅れは約 1 時間程度であり，1 時間前の全国任意の地域での推計人口を利用することが可能になっている。前述のハザード予測情報と組み合わせることにより，想定されるハザード影響域の曝露人口を推定することが可能となる。

図 5.8 は，図 5.7 に示す高知市の津波浸水予測域内の推計人口分布である。災害リスクに対し，どこにどの程度の人が滞留していることが即座に分かれれば，たとえばドローンによる注意喚起をピンポイントで行うことも可能であろう。さらに，このような人口動態を常時監視・分析しておくことで，平常時と異なる動態のリアルタイム検知が可能になる。近い将来，災害発生時や大規模な事故発生時の覚知を，社会動態の面から行うことが可能になる [23]。

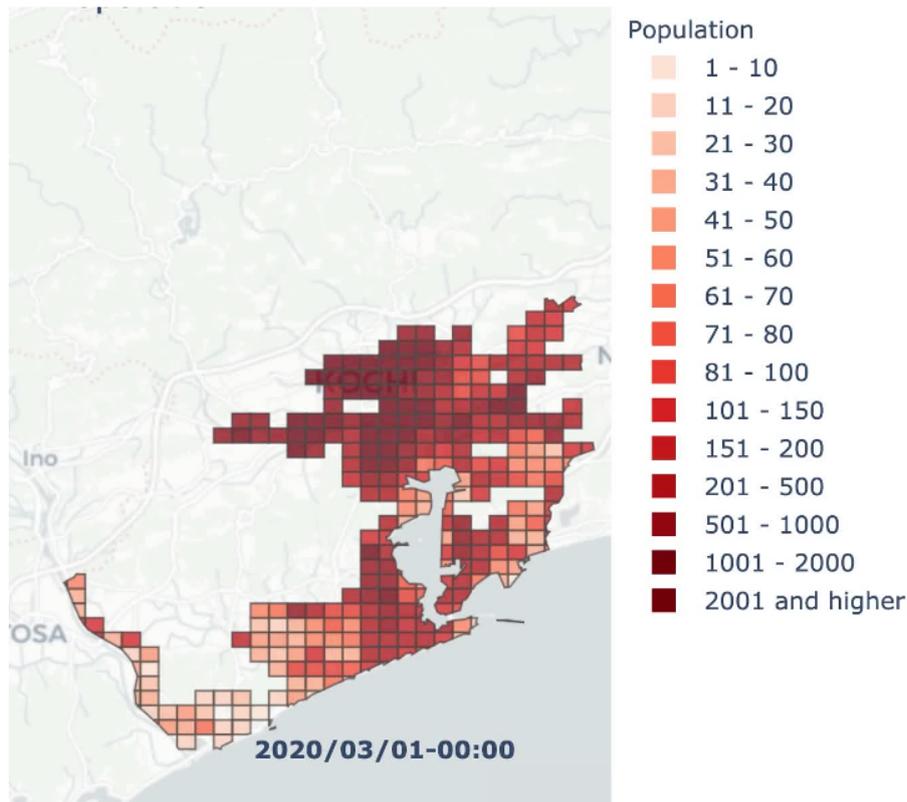


図 5.8: 高知県高知市内の津波浸水予測域に対応する推計人口 [23].

5.2.3 沿岸災害デジタルツインの活用

これまで、物理世界におけるハザードの予測、被害の把握、社会動態の把握に基づくデータ・情報について述べてきた。これらを仮想世界に展開することで、災害対応方針や適応策に関する様々なシミュレーション・試行が可能になる。

たとえば、リアルタイムシミュレーションとリモートセンシングによる広域被害把握に基づき、激甚な被害が想定される地域を抽出し、詳細な調査をドローンにより行うための飛行計画の立案が考えられる。図 5.9 に示すのは、筆者らが提案した、広域被害把握の結果から損傷の可能性が高い建物群を抽出し、ドローンによる詳細被害調査の飛行計画を立案する枠組みである。ドローンによる建物被害詳細調査のターゲットとして、高品質の空撮画像から 3 次元モデルを生成することを考える。移動するドローンが取得する大量の空撮画像から 3 次元モデルを生成する手法は SfM (Structure from Motion) を用いるのが一般的で、重複して撮影された写真から多数の特徴点を抽出し、カメラの内部評定要素や外部評定要素、特徴点の 3 次元座標を一度に推定する手法である。SfM によって求められた 3 次元幾何情報を基に複数の写真間でのマッチングを行うことにより、高密度の 3 次元点群やメッシュモデルを作成する。ドローンを用いた SfM 測量は国内でも推進されており、国土地理院により「UAV を用いた公共測量マニュアル (案)」が提示されている [24]。安価なソフトウェアも整備されており、ドローン操作と SfM 測量が一体化されたソフトウェアも一般的になっている。一方、短期間でできるだけ多くの建物の高品質な 3 次元モデルを生成することは容易ではない。図 5.10 は、詳細調査を行う建物 (ターゲット) から均質かつ高品質な 3 次元点群データを生成するための最適飛行計画を、巡回セールスマン問題に帰着させて検討した結果である。詳細については原著論文 [25] を参照されたい。

次に、災害被災地の救援活動として期待されるのは孤立した被災地に向けた物資の輸送である

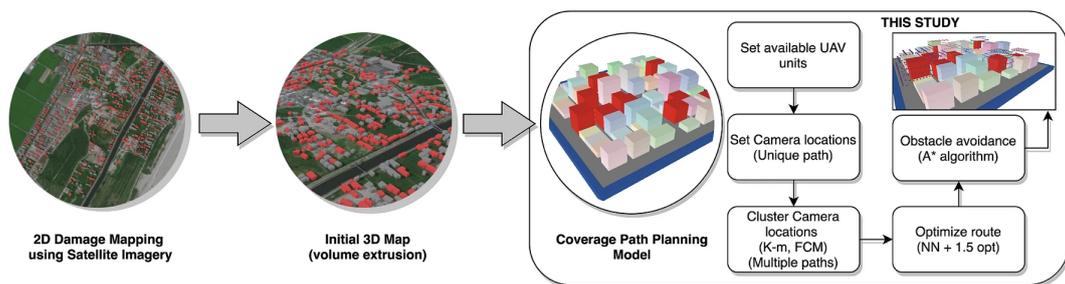


図 5.9: 広域被害把握からドローンによる建物被害の詳細調査計画を仮想区間で立案する枠組 [25].

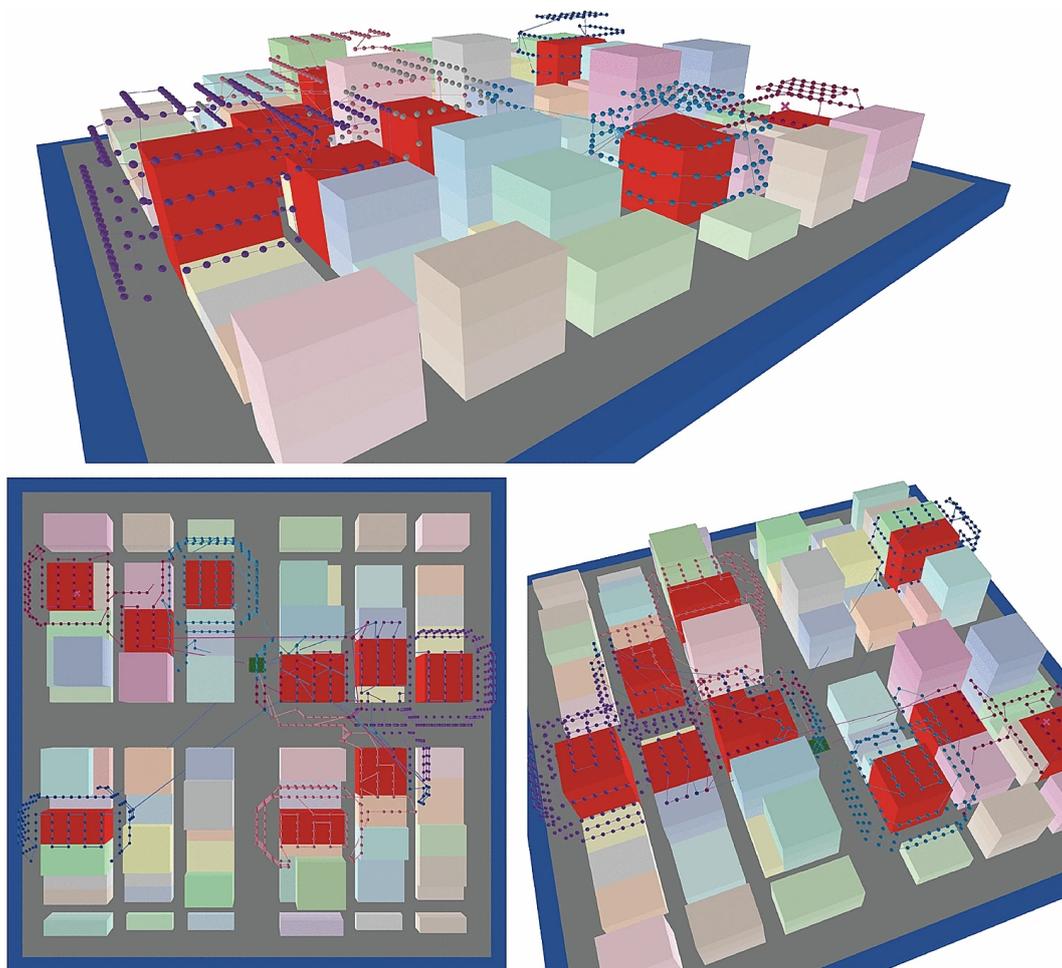


図 5.10: 仮想空間で行った被害建物群の3次元測量のためのドローン飛行計画の最適化（赤が調査対象となる建物） [25].

う。地震や津波などの大規模災害において、迅速かつ安定した緊急支援物資の供給が求められる。災害時の物資の輸送手段としては、車両やヘリコプター等が用いられてきたが、津波浸水域内でヘリポートの無い避難所への物資供給が困難であるため、その代替手段として、ドローンによる物資輸送が注目されている。ドローンには飛行可能時間と積載重量に制限があるため、ドローンを最大限活用できるような輸送計画を立案することが求められる。また、輸送先となる避難所間での物資ニーズに格差があるほか、優先度の高い物資を迅速に輸送する必要がある。筆者らは、避難所への物資輸送における避難所間の格差を最小化することと、優先度の高い物資（医療物資など）を効率化するための強化学習手法（Q 学習）を用いて、複数 UAV による災害時の避難所への緊急支援物資の最適輸送モデルを提案した [26].

物理世界で得られる災害環境を仮想空間に展開し、デジタルツインにおいて災害対応方針や適応策に関する様々なシミュレーション・試行を行う例としてドローンの活用を紹介した。上記以外にも、災害医療チームの活動の最適化など、仮想空間内のエージェントとしてモデル化することで、機械・人間に関わらず災害対応を行う主体の活動最適化の数理的な枠組みも構築されつつある [27].

6 津波避難問題におけるデジタルツイン

6.1 津波による人的被害の想定と津波避難問題

政府は南海トラフ巨大地震による死者・行方不明者数（以下、犠牲者数）を最大で 32 万人と試算している [29]. 津波による犠牲者数は 23 万人で全体の 7 割を占める。これは建物倒壊による犠牲者数（7.6 万人）の 3 倍以上である。1981 年以前に建てられた耐震性の低い建物は建設されてから 40 年以上が経過し建て替えが進むため [81], 建物倒壊による犠牲者数は、今後、確実に減少していく。

他方で、津波による犠牲者数はそのようにはならない。なぜなら、実災害時に発生する津波や人間行動は、計画や訓練と同じという訳にはいかず、不確実性が高いためである。例えば、訪日外国人旅行者は、コロナ禍以降、その数が過去最多を記録する中で、今後、どこまで増加するのか、また、住民の避難行動にどのような影響を与えるのか、不確実性を高める要因の一つである。

津波避難問題の困難さは、さまざまな社会情勢の変化や外力条件の多様性を考慮しつつ、人的被害最小化を実現する最適な津波避難対策を模索しなければならないことにある。それ故に、デジタルツインは現実世界のデータを活用して仮想世界において実行する様々なシミュレーションにより、現実世界では不可能な様々な実験や試行を行うことが可能であり、極めて有用なツールであると言える。

6.2 実災害、避難訓練、意向調査の避難行動データ

津波避難問題のデジタルツインに使用可能な現実世界の避難行動データには大きく 3 種類ある。(1) 実災害時の避難行動データ, (2) 避難訓練時の行動データ, (3) 避難行動に関する意向調査のデータである。津波は発生頻度が低く、実際に起きた津波災害時の避難行動データは少ない。したがって避難訓練時のデータや意向調査などによって得られるデータも有効に活用すべきである。図 6.1 は避難訓練、意向調査、実災害のそれぞれに関して、避難行動データのデータ化の機会とデータの蓄積状況について整理したものである。実災害の避難行動データに関しては、データ化の機会は滅多に訪れないが、社会調査などによって比較的豊富なデータの蓄積がある。たとえば、東日本大震災時の住民の行動データをまとめた、復興支援調査アーカイブなどが知られている [31]. また、災害体験を伝える手記などの文書から避難行動データを抽出し、研究に使用されることもある [32].

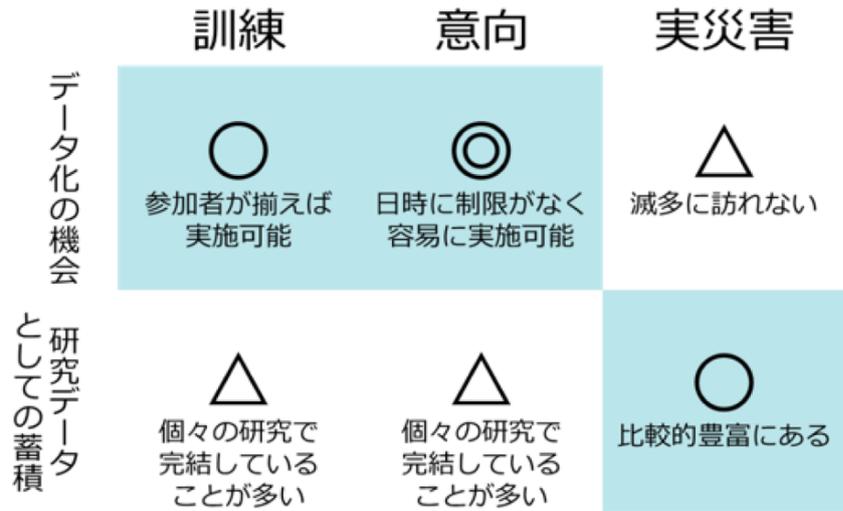


図 6.1: 津波避難行動に関するデータ化の機会とデータの蓄積状況：訓練，意向調査，実災害の違い

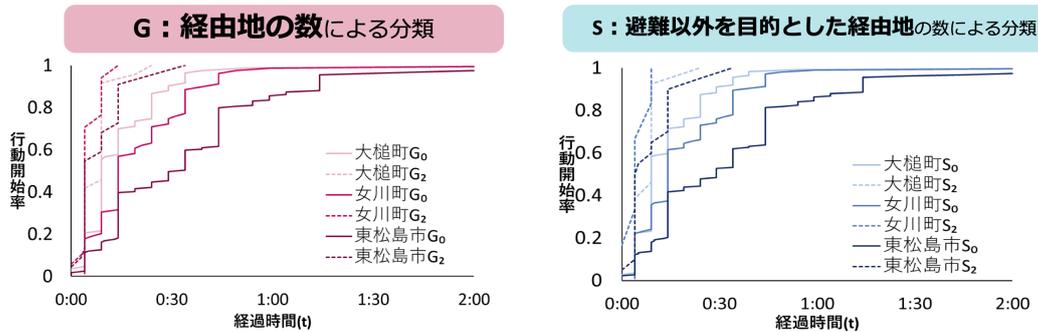


図 6.2: 行動開始率の時刻歴（東日本大震災の事例）

意向調査に基づく避難行動データに関しては、津波が発生した場合にどのような行動をするか、住民等の意向を尋ねたもので、津波避難対策の実態把握を目的に、行政機関によって度々データが採られている（たとえば [33, 34]）。しかしながら、調査によって得られた生データが2次利用されることは稀である。

避難訓練時の行動データに関しては、東日本大震災以降、最大規模の津波シナリオを想定した津波避難訓練が各地で定期的実施されるようになり、収集された訓練時の行動データが分析されることも珍しくなくなった。訓練後に訓練参加者に対して実施される質問紙調査 [35] や、訓練中にGPS機器や定点カメラ、無人航空機（UAV）を活用して訓練参加者の時空間データを取得する調査が実施されている（たとえば [36, 37]）。調査方法が高度化し、得られるデータは増加しつつあるが、それらのデータが2次利用されることも稀である。

6.3 実災害、避難訓練，意向調査の避難行動特性の関係

実災害，避難訓練，意向調査の3種類の避難行動データをデジタルツインに使用するためには、これらのデータの関係性について理解しなければならない。図 6.2 は東日本大震災における行動開始率の時刻歴である。最終避難場所に到達するまでの経由地の数による行動開始の違いを整理し

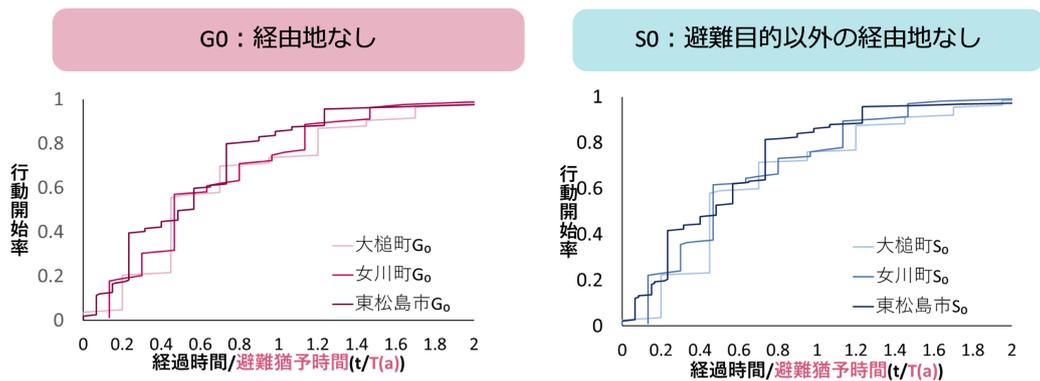


図 6.3: 経由地ゼロ住民の行動開始率の時刻歴（東日本大震災の事例）

たものである。G と S の添字はいずれも経由地の数を表している。ただし、S の添字は避難以外の目的とした経由地のみを表している。例えば、どこも経由せずに避難した場所に危険が迫り、さらに高所を目指した場合には G1, S0 となる。また、G2, S2 は経由地 2 以上を意味する。この結果から、経由地が 2ヶ所以上の住民の行動開始率は速やかに上昇していたことが分かる。市町による差は見られない。家族を迎えにいくなどして経由地が多かった住民は速やかに行動を始めていたことを示唆している。他方で、経由地ゼロの住民は、津波来襲が切迫してから行動を始めるのケースが多かった可能性がある。なぜなら、経由地ゼロの住民の行動開始率の時間経過は、避難猶予時間で正規化することで市町の差が見られなくなったからである（図 6.3）。

避難訓練では、通常、訓練開始とともに速やかに避難を始めるため、行動開始率の時間経過は実災害における G2, S2 に近くなると考えられる。避難行動に関する意向調査に関しても、揺れた後、どれくらいの時間で行動を開始できるかを尋ねると、行動開始率の時間経過は G2, S2 に近くなると考えられる。したがって、実災害においては、避難訓練や意向調査では説明がつかない住民が一定数存在し、彼らは G0, S0 に近い動きをすると予想される。

図 6.4 は G0, S0 の住民の割合を避難猶予時間との関連で整理したものである。赤線は経由地ゼロの住民 (G0) の割合を表しており、避難猶予時間が長くなるほどその割合が大きくなる。青線は避難目的以外の経由地ゼロの住民 (S0) の割合を表しており、これも避難猶予時間が長くなるほどその割合が大きくなる。青線と赤線の間は多段階避難をした住民の割合を意味している。これは避難猶予時間が長くなるほど小さくなる。比較的速やかに行動を開始した経由地有りの住民の割合は避難猶予時間に依らず 4 割未満であった。

6.4 津波避難問題のためのモデリング

現在、様々な避難行動シミュレータが提案され、実用化されている。表 3 はその一例であり、それぞれ開発元はベクトル総研 [39, 40]、構造計画研究所 [41]、東京大学堀研究室 [48, 54]、京都大学清野研究室 [52, 53] のモデルの特徴や相違点を示す。各モデルの詳細については参考文献を参照されたい。

6.5 津波避難へのデジタルツイン活用に向けた展望

デジタルツインは津波避難問題の困難さを克服する有用なツールであるが、まだまだ多く課題が残されている。1 つ目の課題として、データの質と量の問題がある。災害後の社会調査等により、実災害時の個人の位置情報に関する時空間データが得られている場合がある。しかし、人間の記

表 3: 避難行動シミュレータの比較 [54]

		シミュレータA (ベクトル)	シミュレータB (構造計画)	シミュレータC (掘研)	シミュレータD (清野研)
空間モデル	徒歩	道路ネットワーク線上を移動	道路ネットワーク線上を移動	道路ネットワークのグリッドを使って追い越し等をしながら移動 道路ネットワークのグラフを使って経路選択	矩形の組み合わせで表現した二次元の道路空間内を移動
	車両	同上	同上	同上	
避難者の発生	徒歩	設定条件に従った決定論的取扱い	設定条件に従った決定論的取扱い	設定条件に従った決定論的取扱い 位置等をばらつかせる確率論的取扱い	設定条件に従った決定論的取扱い 位置等をばらつかせる確率論的取扱い
	車両	同上	同上	同上	
避難者の移動速度	徒歩	設定条件に従う	設定条件に従う	設定条件に従う	設定条件に従う
		道路勾配に合わせた一定速度 (非混雑時)	道路勾配に合わせた一定速度 (非混雑時)	道路勾配に合わせた一定速度 (非混雑時)	道路勾配に合わせた一定速度 (非混雑時)
	相互作用	【徒歩-徒歩】 避難者の前方密度によって制御	【徒歩-徒歩】 避難者の周辺密度によって制御	【徒歩-徒歩】 追い越し・一時停止等を行う衝突回避によって決定. 独自のパラメータを設定	【徒歩-徒歩】 周辺の避難者との心理的・物理的な相互作用によって制御
		【車両-車両】 前方車と車線変更時の衝突判定により制御	【車両-車両】 同上	【車両-車両】 同上	
相互作用	【徒歩-車両】 混雑により車道にはみ出す徒歩避難者によって制御	【徒歩-車両】 移動可能範囲を分け合うことにより影響を考慮. ただし動的相互作用は考慮しない	【徒歩-車両】 同上		
			【交差点】 信号ではなく前方密度による速度制御. 右左折不能による停止も考慮		
避難者の避難路選択	徒歩	目的地までの最短経路	目的地までの最短経路	道路ネットワークのグラフを使った最短経路 視野内の道路状況を見て動的に選択	目的地までの最短経路に近い複数の経路からランダムに選択 視野内の道路状況を見て動的に選択
	車両	同上	目的地までの道路レーン数を考慮した最短経路	同上	
避難者の進行方向	徒歩	回避行動等による進行方向の変更はなし	回避行動等による進行方向の変更はなし	最短経路の方向が原則 衝突回避時には方向が変わる	最短経路の方向が原則 衝突回避時には方向が変わる
	車両	同上	同上	同上	

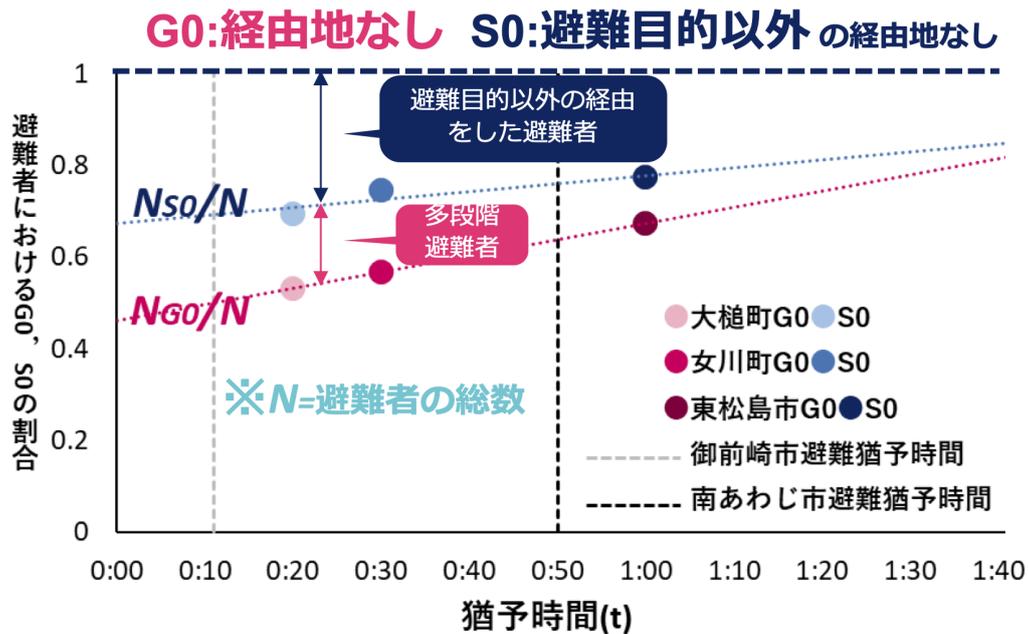


図 6.4: 避難猶予時間と G0, S0 の住民の割合 (東日本大震災の事例)

憶を頼りにしたデータに高精度は期待できず、また、協力者の数を確保することも容易ではない。それを補うために避難訓練や意向調査のデータ活用が期待されるが、実災害時の行動データとの関係性に関する検討が十分に行われていないことに加え、どのようなデータを記録・収集するべきかという蓄積すべきデータの種類に関する議論もほとんど行われていない。

2つ目の課題として、避難行動シミュレータの多くが避難行動のシミュレーションに特化しており、避難開始のタイミングに関しては設定条件として所与のものとして扱われるケースが多いという問題がある。渋滞の問題や避難所要時間など、避難を始めた住民が津波来襲までに避難ができるかどうかを議論する分には問題にならないが、津波による犠牲者を減らすためには、避難開始のタイミングに関する議論が最も重要であると言っても過言ではない。

今後、センサー技術などの進歩によって、より高精度で広範、高頻度のデータ取得が可能になると予想される。また、AIや機械学習技術の進展により、短時間でのシミュレーションや特徴分析、最適な避難対策の提案が可能になると考えられる。

7 高潮・高波・気候変動におけるデジタルツイン

これまで我が国では台風や爆弾低気圧に伴った高潮・高波災害を経験している。代表的な高潮イベントとして古くは1934年室戸台風や1951年伊勢湾台風による高潮が、近年でも2014年12月爆弾低気圧による根室での高潮や2018年台風21号による大阪湾での、2019年台風19号による東京湾での高潮が挙げられる。一方で、高潮・高波の発生要因となる台風や爆弾低気圧は地球温暖化に伴った気候変動によって強度や経路が変化することが指摘されており、災害リスク変化への対応が喫緊の課題となっている。ここでは、高潮・高波・気候変動におけるデジタルツインの活用事例、現状と課題、将来展望についてまとめる。

7.1 高潮・高波・気候変動におけるデジタルツインの活用

7.1.1 高潮・高波の観測と観測値の集約

高潮や高波の観測は海面水位の観測として行われている。観測手法としてブイやフロートを用いた直接的な方法や、音波や電波、レーダー、LiDAR, CCTV を用いた現地での間接的な方法（例えば、松長ら, 2023）[55], その他にリモートセンシングに含まれる UAV や AUV を用いた方法（例えば、三戸部ら, 2019）[56] や光学・SAR 衛星画像を用いた方法（例えば、北島ら, 2020）[57] などがある。これらの観測方法の違いはデータ提供までの時間や取得範囲に大きな特徴がある。

現地における直接的、間接的な方法は観測機器の地点もしくはその周辺のみで観測値を収集し、早いものだとほぼリアルタイムでその状況を確認できる。しかし、暴風雨下でのデータの取得は厳しく高価になりがちである。また、CCTV など画像処理による方法も精度や設置方法など技術開発が必要となっている。一方、UAV や衛星を用いたリモートセンシングでは一度に広範囲のデータを取得することが可能であるが、データの転送や解析に時間を要するため準リアルタイムにその状況を確認することができる。デジタルツインの活用法として避難や災害時の情報共有といったリアルタイム性を重視した用途や、防災・減災施設設計や避難計画、防災教育などを目的とした用途など、その利用目的に応じた観測手法の選択が重要となる。

水位に比べて、越波については現地での計測が難しい、2018 年台風 Jebi や 2019 年台風 Faxai などの台風による内湾での越波被害が目立つが、越波量リアルタイム観測にはまだ多くの技術開発のスペースが残されている。

7.1.2 高潮・高波・気候変動の予測

観測によって取得されたデータや気象予報で作成されたデータを用いたシミュレーションを行うことで、高潮や高波の発生予測が行われている。研究レベルでは、瀬戸内海を対象に気象庁 MSM や河川流量データ、MRI.COM-JPN を境界条件として海洋モデルを駆動して、高潮や海洋環境を予測システムが広島大学で開発されている [58] (図 7.1)。

また、実用化に向けた取り組みとしては、SIP のもとで国土技術研究センター、東北大学、沿岸技術研究センター、日本気象協会の共同で「高潮・高波・浸水リアルタイム予測システム」の開発が行われている [59]。このシステムでは気象庁が作成するアンサンブル気象予報で得られた複数の台風経路・風・気圧分布を、潮位・波浪観測データを同化した波浪モデル・高潮モデルに与えて波浪・高潮の予測を行う (図 7.2)。さらに沿岸の波浪条件から推定された越波流量や打ち上げ高と河川流量を氾濫モデルに与えることで浸水範囲や浸水深までの予測を一気通貫して行うシステムとなっている。

すでに実用化されている事例としては、気象庁が様々な取り組みを行っている。例えば、気象の数値予報データをもとに波浪モデルを駆動させることで 48 時間先までの波浪情報を提供している。提供される波浪情報は時々刻々の波高分布だけでなくうねり成分や多方向性の強い海域、流れの影響で波が陰しくなる海域といった利用者に向けて要約された情報が含まれる。他に、MSM を基本として 6 通りの台風気象場を作成し、高潮モデルを駆動させることで高潮のアンサンブル予測データの提供を行っている。

高潮・高波の要因である台風等は気候変動によって経路や強さを変えることが指摘されている。気候変動の予測は一般に世界各国の大気海洋結合モデルが参画してデータ提供を行っている CMIP のデータが用いられるが、台風等においては計算解像度の不足から過小評価が見られる。日本では将来予測データセットの一つである d4PDF (Mizuta et al., 2017) が作成されて以来、台風の気候変動影響評価研究が大きく進展した [60]。Webb ら (2019) が d4PDF から台風トラックデータを抽出したのをはじめに [61]、九州のような台風による影響が大きい地域を対象に局地的な評

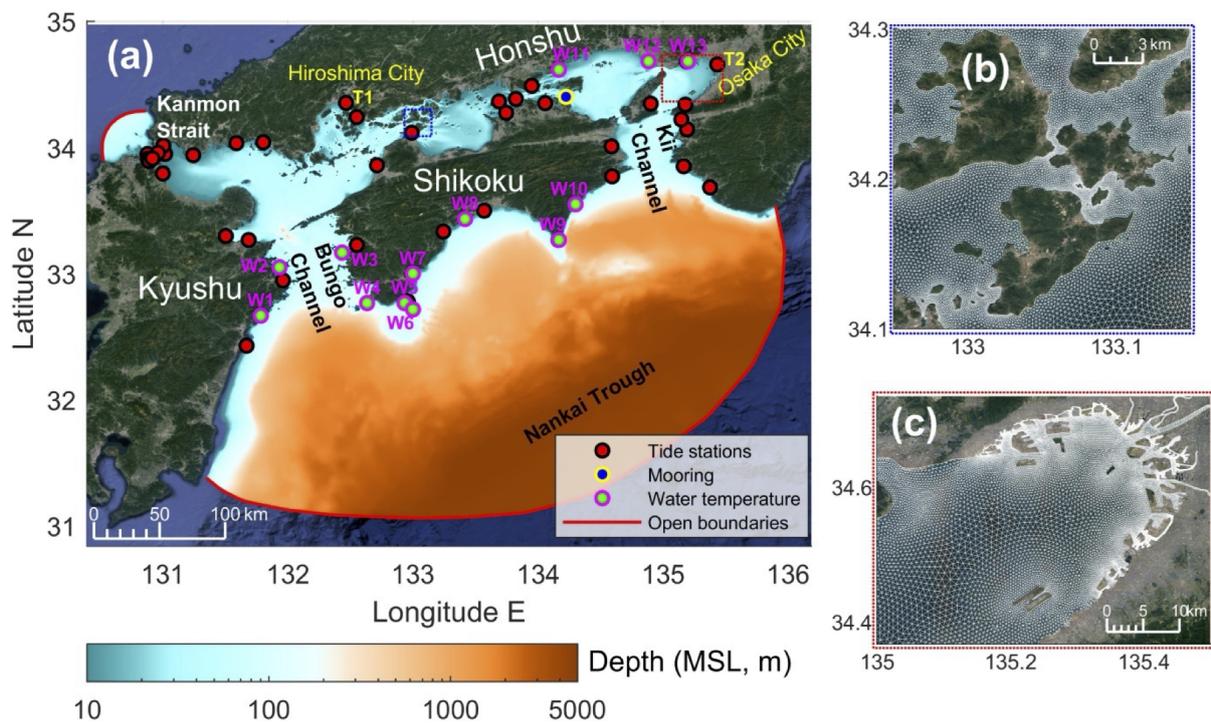


図 7.1: 瀬戸内海を対象にした海洋デジタルツイン (Jeong et al., 2023) [58]

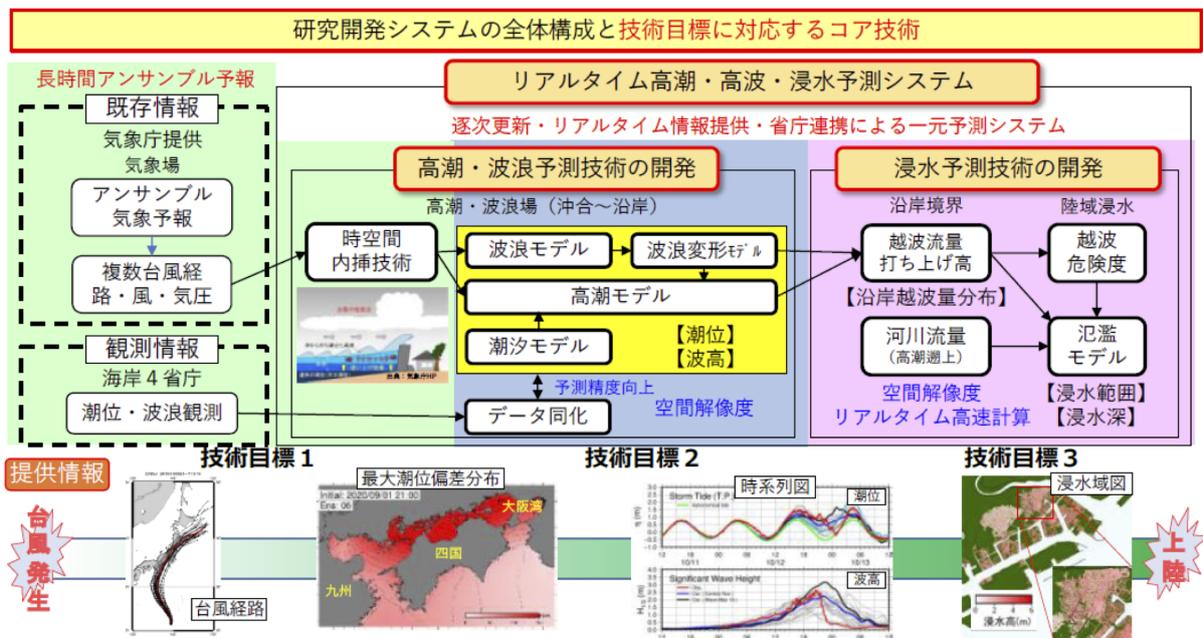


図 7.2: 高潮・高波・浸水予測システムの概要 ((一財) 国土技術研究センター, 2024) [59]

価（井手ら，2019）[62]や全球確率台風モデルの高度化（梅田ら，2019）[63]が行われた。また，d4PDFを直接的に用いて高潮・高波の将来変化を検討も行われている（例えば，五十嵐ら2022，野村ら2022）[64，65]。このように気候変動研究分野では，デジタルツインとして仮想地球環境の創出，その統計的評価が盛んに行われている。

7.1.3 高潮・高波・気候変動におけるデジタルツインの現状，課題と将来展望

デジタルツインには高潮・高波や気候変動予測において大きな可能性を持っているが，まだ発展途上の技術である。一つ目の課題として，観測データの取得精度，密度と精度の問題がある。デジタルツインは広範で高頻度なデータを数値モデルにデータ同化等で取り込むことでより，予測精度とその信頼性を高めることができる。現状では人工衛星を含めた様々な手段でデータが取得されているが，頻度，精度には限界がある。特に高潮・高波といった海洋に関する極端データの取得は一般に困難である。現地での直接的な観測については現地へのアクセスの問題や海洋の広さに対する観測密度の問題がある。また，衛星等で広範なデータを取得できるとはいえ，回帰頻度や雲の影響を受けて観測ができないといった問題がある。

次に，コンピュータの処理能力の課題がある。高潮や高波，気候変動では膨大な計算コストが必要な大気シミュレーションを前提としている。高潮・高波は大気計算結果を受けてシミュレーションが行われるため，少ない予測シナリオのもとで災害リスクの評価が行われている。

デジタルツインは様々な分野での活用が期待されている。今後のセンサー技術や衛星・通信技術の進歩によって，より高精度で広範，高頻度のデータ取得が可能になると予想される。現在ではスタンドアロンの環境で使用されている観測機器が，インターネットを介してデータ取得されるようになるだけでより理想的なデジタルツイン環境の構築につながる。また，AIや機械学習技術の取り込みにより，短時間での予測や大量のデータからの特徴抽出，複雑な現象のモデル化が可能になると考えられる。

8 砂浜問題におけるデジタルツイン

8.1 砂浜問題の現状

我が国の砂浜は，戦後の急速な国土開発の影響で侵食が進行したといわれている。国土開発の過程で治山・治水対策として整備された砂防施設やダムなどは，戦後しばらく毎年のように災害により多数の死者が出ていたことを考えれば防災面で大きな功績があったと判断される一方で，土砂の流下を遮断することとなった。また，沿岸部においても経済発展のために整備された港湾などの海岸構造物による沿岸漂砂の遮断等により局所的な侵食が進行した。過去の長期的な砂浜面積の変化についてはいくつかの解析結果があるが，有働らによれば[66]，過去100年程度の間280km²まで半減しており，土砂生産量強度，ダム堆砂量，砂利採取量を考慮した流砂系の土砂収支の解析結果によれば，河床変化や相対的海面水位変化など考慮できていない要素もあるものの，過去の砂浜侵食への砂利採取のインパクトが他の要素に比して大きかったことが示唆されている（図8.1）。

砂浜変化を考える上での重要な外力条件として，河川流量，波浪，高潮，ならびに津波などがあげられる。IPCC第6次報告書[67]によれば，気候変動による強い台風の増加や海面上昇が予測されており，前者は河川流量[68]，高潮[69]，ならびに波浪[70]などの災害外力を増大させ，後者は沿岸域におけるあらゆる水害の被害拡大要因となりうる。また，海面上昇により，沿岸域では水没領域が生じ，砂浜や干潟など比較的地形勾配が緩やかな領域においてはその消失が懸念される[71，72，73，74，75]。上記の外力について海岸地形変化への影響のみに着目すれば，河川流量の

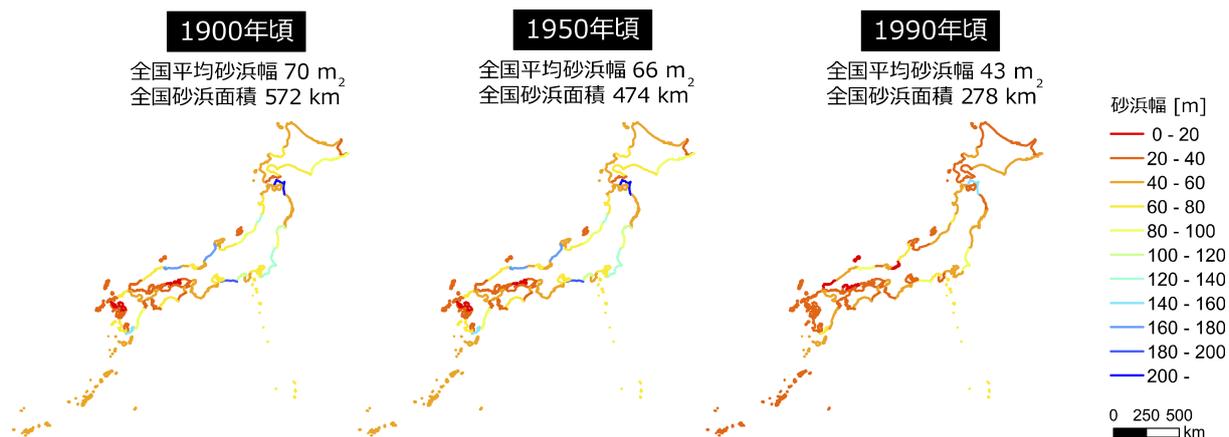


図 8.1: 1900 年, 1950 年, ならびに 1990 年頃の沿岸区分別平均砂浜幅の全国分布

増大は河川から海岸への土砂供給量の増加に、波高増大は海岸侵食に寄与する可能性がある。高潮の海岸地形への影響については比較的知見の蓄積が少ないが [76, 77, 78], 筆者らが行った台風 Pabuk (2019 年 1 月) のタイ南部 Nakhon Si Thammarat 沿岸部における災害緊急調査によれば、浸水深 2m 程度の高潮前後で、後浜に大量の土砂堆積が確認されている。Udo・Takeda [79] によれば、21 世紀末には全国の砂浜の約 40-90% が消失すると予測されており (図 8.2), 将来にわたる砂浜の維持管理に関する問題を考える上で、気候変動の影響を考慮することは不可欠である。

砂浜管理をめぐる周辺状況にも触れておきたい。2045 年の人口の推計結果は 1.06 億人で、2015 年の 1.27 億人から 30 年間で 16.3 % 減少するとされている [79]。全国の沿岸自治体では、特に北海道・東北・四国地方、近畿地方太平洋岸などで人口減少が目立つ。さらには、海岸堤防等のうち、築後 50 年以上経過する施設が 2040 年には 77% に達する見込みとされている [80]。現状でも海岸堤防等の整備率 (計画堤防高に対する充足率) が 55% という状況下において [81], 将来の砂浜予測や人口推計の結果を考慮すれば、現在の「防護」を中心とした海岸管理からの転換は喫緊の課題である。

ここでは、「総合土砂管理」を視野に入れた気候変動の砂浜への影響を予測する砂浜予測モデルについて概説するとともに、多様な価値観を反映させた砂浜価値の評価手法とデジタルツインの役割について議論する。

8.2 気候変動の砂浜地形への影響評価とその課題

砂浜に関する気候変動研究としては、大きく影響評価と適応策評価に分けられる。前者については、対象とする事象への気候変動の影響を、現在気候と将来気候における数十年間の統計的指標等 (例えば、砂浜・干潟面積や砂浜利用者数など) の変化から評価する場合が多い。後者については、対象とする気候変動の影響に対して実施する適応策の有無に対して、一般に費用便益分析を行う。例えば砂浜の影響評価の場合、まずはいくつかの温暖化シナリオに対する砂浜消失予測を行い、これによる防災・環境・利用等の価値の損失額を推計する。これに対する適応レベル (維持する砂浜幅等) や適応策 (養浜等) を設定して、その適応策にかかる費用 (コスト) とこれにより回復する価値 (便益) をそれぞれ推計する。この費用と便益を比較することで、適応策を評価する (例えば、吉田ら) [82]。

影響評価においては基本的に数十年以上の長期予測が求められることから、使用可能なデータや計算資源等を考慮すると対象領域スケールも考慮しつつ簡便なモデルを使用せざるを得ない場合が多い。世界の砂浜消失予測が Hinkel ら [83] や Luijendijk ら [84], Vousdoukas ら [75] により行わ

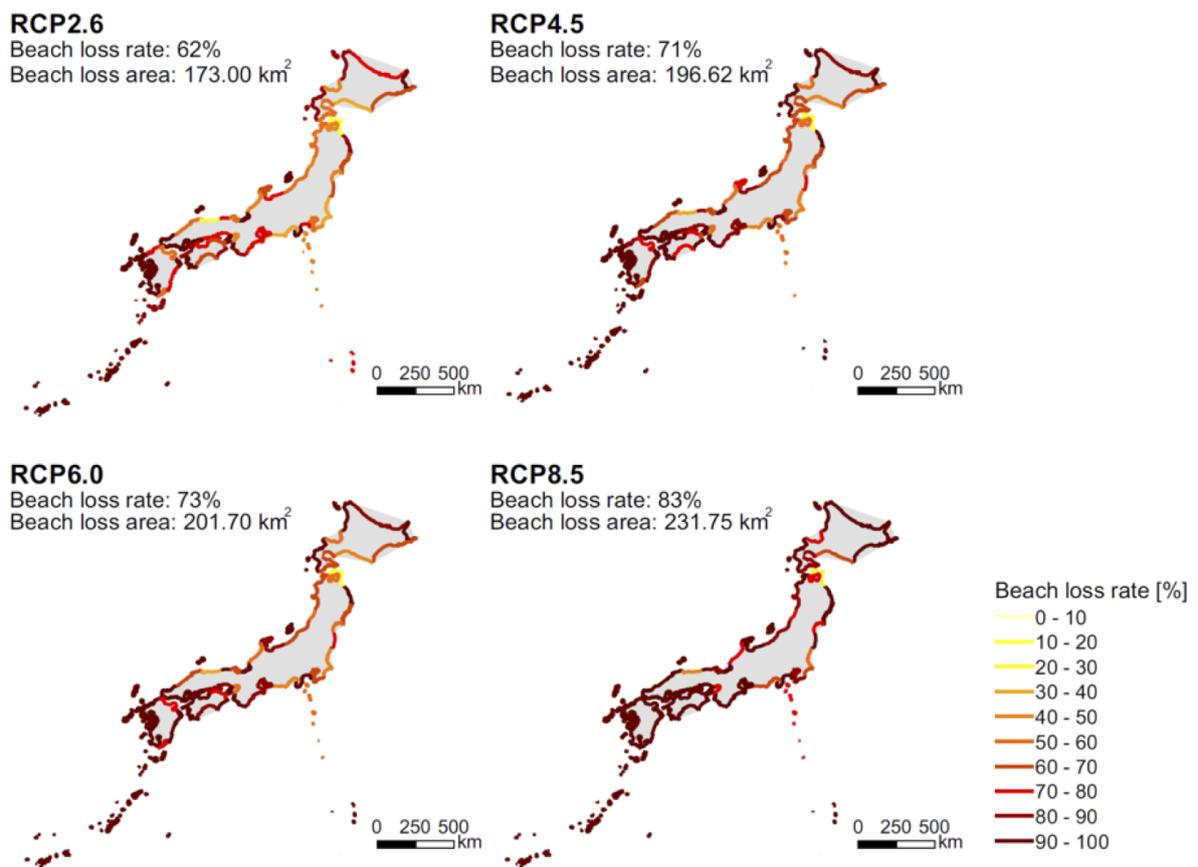


図 8.2: CMIP5 の RCP 各シナリオの海面上昇に伴う将来（2081-2100 年）の砂浜消失予測

れ、我が国においても前述のように Udo・Takeda[71] が異なる底質粒径および海面上昇シナリオ (CMIP5) に対する砂浜消失率を算定している。これらの予測で主に使用されているのは Bruun 則 [85] で、砂浜の岸沖断面地形が平衡状態を保っていると仮定して海面上昇量、砂浜の底質粒径、砂浜勾配、波浪条件から汀線後退量を算定しており、考慮されていない要因が多数存在する。中でも、降雨・波浪特性変化に伴う沿岸漂砂の砂浜地形変化への影響は、過去の砂浜侵食の解析事例から大きいと考えられるが、現時点ではこれを考慮した将来予測事例は筆者が知る限り存在しない。また、平衡断面の仮定も現実的ではないことから、Bruun 則の精度評価を行い良好な再現性を示した例もあるものの [86]、その使用については批判的に捉えられることも多い [87, 88]。一方で、既存知見や計算資源が限られることから、社会的要請に応える研究成果を得るには Bruun 則を使用せざるを得ないのが実情である。例えば、前述の砂浜の底質粒径、砂浜勾配、波浪条件に限っても、砂浜変形予測を行う際に必要とされるデータを全国レベルで入手するのは極めて困難であり、これらのデータの整備を行うことが重要である。リモートセンシングによる衛星画像などの広域データを活用した解析手法の開発が必要とされる。将来的には降水量や河川構造物等も考慮した山地から砂浜までの流域全体の土砂動態を計算できるのが理想であるが、現状では砂浜の問題に対応するために必要とされるデジタルツインの整備には多大な時間が必要とされると思われる。今後の計算性能の向上やデータの整備によるデジタルツインの進展が期待される

8.3 気候変動による砂浜消失への適応策とその課題

影響評価において許容できない被害が予測される場合には、それに対する適応策を検討することが期待される。適応策として海岸事業の実施を検討する場合、費用便益分析を行い事業の価値を評価するのが一般的であり、実施 (with ケース) により生じる費用と便益を算定し、便益から費用を差し引いた値 (純便益) が最大となるときが最適な適応策であると判断できる。例えば、適応策として養浜を行う場合には、設定した砂浜幅を維持するための費用と維持することによる便益を求めて適応策評価を行う。砂浜の便益を算定するための砂浜価値としては、海岸法の法目的として定められた、「防災」「環境」「利用」のそれぞれにおける砂浜価値の経済評価手法を開発し、これらの価値を積算することが合理的と考えられる。

海岸事業の費用便益分析指針 (改訂版) [89] に、事業に必要なすべての経費を費用とし、事業により軽減される被害額を便益として評価する手法について詳細な説明があり、この指針に則って経済評価が可能である。「防災」の価値については、ある程度手法が確立しており、困難を伴わずに評価することが可能である。「環境」や「利用」についても、仮想市場法 (CVM) やトラベルコスト法 (TCM) などがあり、全国スケールにおけるの評価例 [82, 90, 91] はあるものの、汎用性が高く簡便な方法による統一的な経済的価値の計測は一般に難しいとされる。「防災」における価値と同様に、砂浜から得られる一つ一つの要素の便益を積算するのが理想的ではあるが、現時点ではこれに関する研究の蓄積が十分でない。「利用」の中の観光面のみを考慮した分析ではあるが、日本やタイにおける沿岸のホテルのルームチャージをウェブスクレイピングにより収集し、ヘドニック法を用いて砂浜の経済価値を評価した例もある [92, 93]。ヘドニック法では、ルームチャージのように収集可能な定量的データとそれに影響を及ぼす要素を抽出し、ルームチャージを目的変数、影響要素を説明変数として、重回帰分析により関係式を求める。影響要素として砂浜の指標を取り入れることで、その価値を算出することが可能となる。また、モバイルデータを利用した砂浜の利用状況についての解析も行われている。

例えば、有働ら [94] は株式会社 NTT ドコモ (以下、ドコモと記す) の携帯電話ネットワークを使用して作成された、2019 年から 2022 年の 500 m メッシュのモバイル空間統計 [95] のリアルタイム国内人口分布データを用いて砂浜利用状況の解析を試みている。本データには、各メッシュにおける 1 時間毎の出現人口数とその内訳 (性別および年代、居住都道府県と居住市区町村) が格

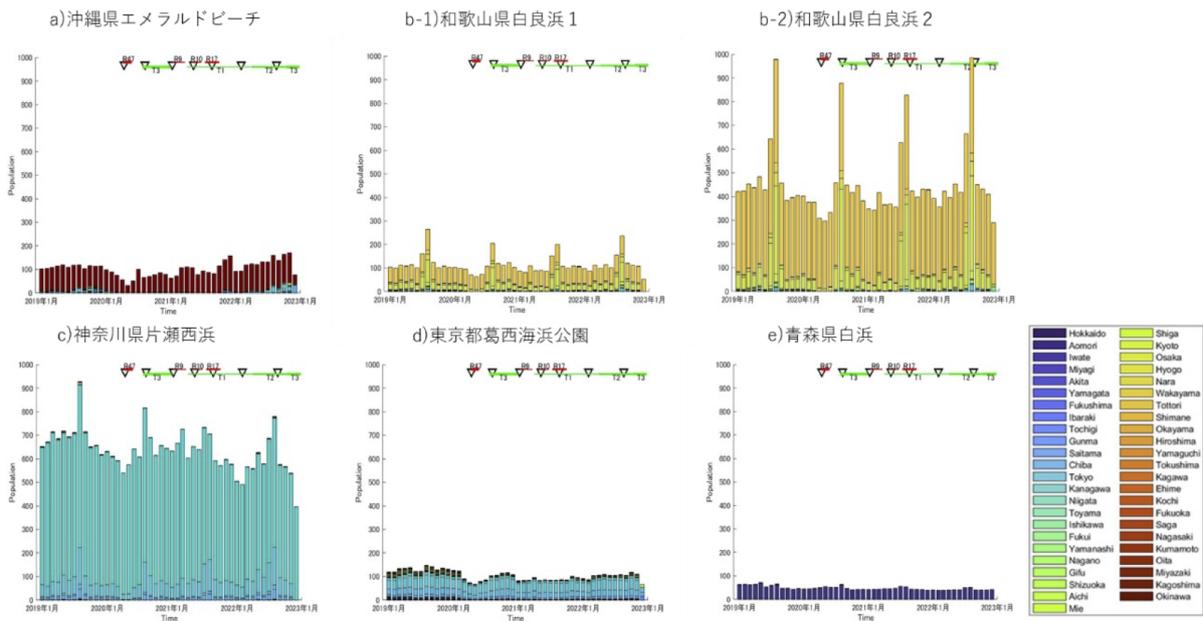


図 8.3: 時間出現人数の居住都道府県別月平均値 (▽: 全国の Covid-19 感染者数ピーク, 赤線 (R): 自粛要請期間・数字は要請対象都道府県数, 緑線 (T): 旅行支援期間・数字は対象都道府県数)

納されている。時間出現人数の居住都道府県別の月平均値を図 8.3 に例示する。データ解析期間には Covid-19 の影響期間が含まれることから、全国の Covid-19 感染者数の第 1-7 波のピーク [96] や緊急事態宣言の発出 [97], 全国旅行支援などの実施期間 [98] もあわせて示している。砂浜出現人口の居住都道府県別月平均値の経時変化の特徴については、期間を通して所属自治体の居住者が多く、同じ地方区分の居住者が多く、異なる地方区分の居住者も出現といった特徴が認められる。多くの地域の居住者が出現する（遠方からの集客が見込める地域の）メッシュ（例えば、図 8.3 (b-2)）においては、出現数が小さいメッシュで個人情報保護の観点からデータ欠損が生じやすいことに留意する必要がある [95]。和歌山県白良浜（図 8.3b）と神奈川県片瀬西浜（図 8.3c）は、夏場の利用増加がみられる。これらの砂浜は、夏季に海水浴場を開設しているため、海水浴場としての利用が増加していることがわかる。一方、沖縄県エメラルドビーチ（図 8.3a）も、夏季は海水浴場として利用できるものの、上記 2 つの海岸のような夏季の顕著な増加は認められない。Covid-19 感染拡大の影響も考えられるものの、この差異の詳細については、今後更なる解析が必要とされる。夏場の利用増加が顕著な上記の白良浜と片瀬西浜の出現者の居住地をみると、近県居住者が多く、砂浜の所在県に居住する出現人口を除いた場合の出現人数の変化は類似していることから、居住地が広範囲で含まれるエリアにおいても所在自治体の出現人数を差し引くことで、過小評価にはなってしまうものの利用実態を概ね把握可能となると考えられる。上記のヘドニック法を用いて宿泊における一人当たりの砂浜価値を計測し、本解析の利用状況と組み合わせることで、利用価値の推計を行うなどの新たな展開が期待される。

定性的であれば、汎用性の高い簡便な評価手法は提案されているものの、多様な価値観を反映した各要素にどのように重みづけをするのか、合意形成の手段としてはやや説得力に欠ける。しかし、何らかの工夫で定性・定量的評価を組み合わせることも可能かもしれない。多様な価値観を反映した合理的な評価手法の開発が必要とされる。

海岸の環境・利用機能の重要性については多くの国民に認められるところであり、毎年夏が近づくと全国的に海岸清掃が行われ、海岸植物やウミガメなどの多くの海岸環境に関する話題がメディアを賑わせる。気候変動下の海岸管理では、防災においても、グリーンインフラに代表され

るように可能な限り環境・利用価値を損なわない、あるいはそれらをより高めるような対策が求められることになるだろう。気候変動下における持続可能な海岸環境の保全に向けて、砂浜変化予測の不確実性を低減し、砂浜の価値を適切に評価するためのデジタルツイン技術の開発が期待される。

9 デジタルツインのデータ・アーカイブシステムの設計と試作

9.1 デジタルデータ・アーカイブシステムの現状

沿岸災害に限らずデジタルツイン一般においては、物理空間から仮想空間にコピーされたデジタルデータをその後の解析で利用可能な形で整備することが重要である。しかし、公開されているデジタルデータは人間が利用することを第一に想定している場合が多く、シミュレーションプログラムが直接利用することや、横断的な検索が想定されていない場合が少なくない。これは、沿岸災害に係るデジタルデータも例外ではなく、例えば津波観測のデジタルデータは各機関の独自フォーマットになっていたり、オンラインで提供されていない場合もある。

デジタルデータを統一的に解析するデジタルデータ・アーカイブシステムには、デジタルデータを解析システムと合わせて一括に集約する集中型と、デジタルデータと解析システムが分離させていることを前提とした分散型に大分される。地球科学関連分野において集中型として2006年から研究開発されているのがデータ統合・解析システム DIAS (Data Integration and Analysis System) である [99]。DIAS では、地球規模/各地域の観測で得られたデータを収集・蓄積し、システム内で統合解析することが可能になっている。このため、大規模なデータを使った大規模な解析が可能である反面、他のデジタルデータを利用するためには予めデータを収集する必要がある。一方、同時期に分散型として研究開発されていたのがグリッド基盤 [100] に基づいた地球観測グリッド (GEO Grid) [101] である。GEO Grid では、公開鍵暗号と X.509 証明書及びその拡張である代理証明書を用了グリッドセキュリティ基盤 (GSI; Grid Security Infrastructure) [102] が用いられ頑健性は高く信頼性 [106] が高いが、扱いが難しい面があった。

9.2 デジタルツインのアーカイブシステムの設計と試作

沿岸災害デジタルツインにおけるデジタルデータ・アーカイブシステムの構築に向けて、公開されている津波情報を一例として津波情報アーカイブシステムとして、研究者や自治体の防災担当者らを対象に土木学会と防災科学技術研究所が共同で構築した津波防災研究ポータル [104] に整備されている論文情報とベンチマーク問題をアーカイブしたシステムの試作を行う。例えば、嶋原らが行った様にベンチマーク問題を通じて津波遡上数値計算モデルの比較 [105] を災害デジタルツインにおける不確定性の取り扱いが可能になる。

9.2.1 オープンデータを取り巻く状況

近年の新型コロナウイルス (COVID-19) 感染症に関連して、オープンデータが様々な場面で注目された。そこでは、分散されたデータを取り扱うために、データそのものの規格とデータを参照するための方法の規格が必要になる。例えば、PDF や JPEG 等の画像フォーマットで数値データが公開されていたとしてもデータの利用は困難である。比して、XLS 等の形式であれば、データとして扱うことが可能になるが、特定のソフトウェアを用いる必要があるため汎用性に劣る。一方、XML や CSV であればテキストファイルのため特定のソフトウェアに制限されることなく利用することが出来るが、スキーマを予め共有する必要があるため、逆に自由度が高すぎるフォーマット

である。そして、一定の書式に基づいて情報についてのメタデータを記述出来る RDF (Resource Description Framework) が一定の制約の中で自由にデータを記述出来る構文として広く用いられている。RDF は、リソースを同定するための Subject (主語)、数値や文字列、日付などのリテラルかリソースを表す Object (目的語) 及び、主語と目的語の関係を同定するための Predicate (述語) で構成される。例えば、「東京都 (主語) の人口 (述語) は 1340 万人 (目的語) である」のように記述される。また、RDF が定めるのは抽象構文のみで実際の記述には、RDF/XML が用いられる場合が多く、ウェブとの親和性から RDF/JSON も利用されている。さらに RDF を用いて外部データとのリンクも含めた Linked-RDF が LOD (Linked Open Data) では広く用いられている [106]。更に、LOD 公開されたデータに対して、SQL 構文に似た形式で検索できるのが SPARQL で、クエリのためのエンドポイント URL が分かれば容易に複合検索を行うことが出来る。

9.2.2 津波情報アーカイブシステムのスキーマと設計と試作

津波防災研究ポータルには、タイトルや著者などの論文書誌情報と、研究者が入力した研究手法やキーワード等のレビュー情報が記録されている。更に論文に用いられている実験データ等の元データがベンチマークデータとして記録されている。ここでは、LOD と SPARQL を用いた津波情報アーカイブシステムの試作を目的としたため、複数の SPARQL リソースを連携して論文情報が検索できるよう設計した (図 9.1)。まず、多くの論文が日本語で記述されているため、JaLC から提供されている書誌情報 RDF を用いて論文情報としてタイトルや著者名等の基本的な情報を参照、検索可能にした。実際には SPARQL エンドポイントは JaLC から提供されていないため、本システムの中で SPARQL エンドポイントを構築した。その他、論文書誌情報だけではなく、引用情報も提供している Crossref の引用データをインデックス化した COCI や、OpenCitations と接続することで被引用情報も検索、表示可能となるように設計した。書誌情報としては、本来 dio.org の情報が源泉となりえるが、SPARQL エンドポイントは提供されておらず、REST API のみが提供されている。今回の試作では、SPARQL には拘らず現実的な実装を示すため、SPARQL クライアントと並行して doi.org の REST API クライアントも構築して一括で検索、表示を可能にした。検索の一例を図 9.2 に示す。ここでは、SPARQL の検索が確認できるようクエリ文をウェブインタフェースで表示できるようにしている。また、図 9.3 に検索された書誌情報を示す。ここでは、様々なエンドポイントからの情報を統合した様子を示すため、情報が重複したり、背景色で元のリソースを表現している。

9.2.3 既存アーカイブシステムとの連携

沿岸災害デジタルツインのデジタルデータ・アーカイブシステムの一例として、津波防災研究ポータルに登録されている論文レビュー情報とベンチマーク問題に加えて、外部の SPARQL エンドポイントを用いた統合検索の設計と試作の一例を示した。例えばここに、津波波形データベース [107] や津波痕跡データベース [108] をさらに接続することで、津波防災を研究するうえで様々なデータにアクセスすることが出来るようになり、さらにリアルタイムデータも統合することで津波防災に貢献することが出来ると期待される。これらの実現のためには統一的なスキーマの検討が必要であるため、実データを対象とした経験をさらに積む必要がある。

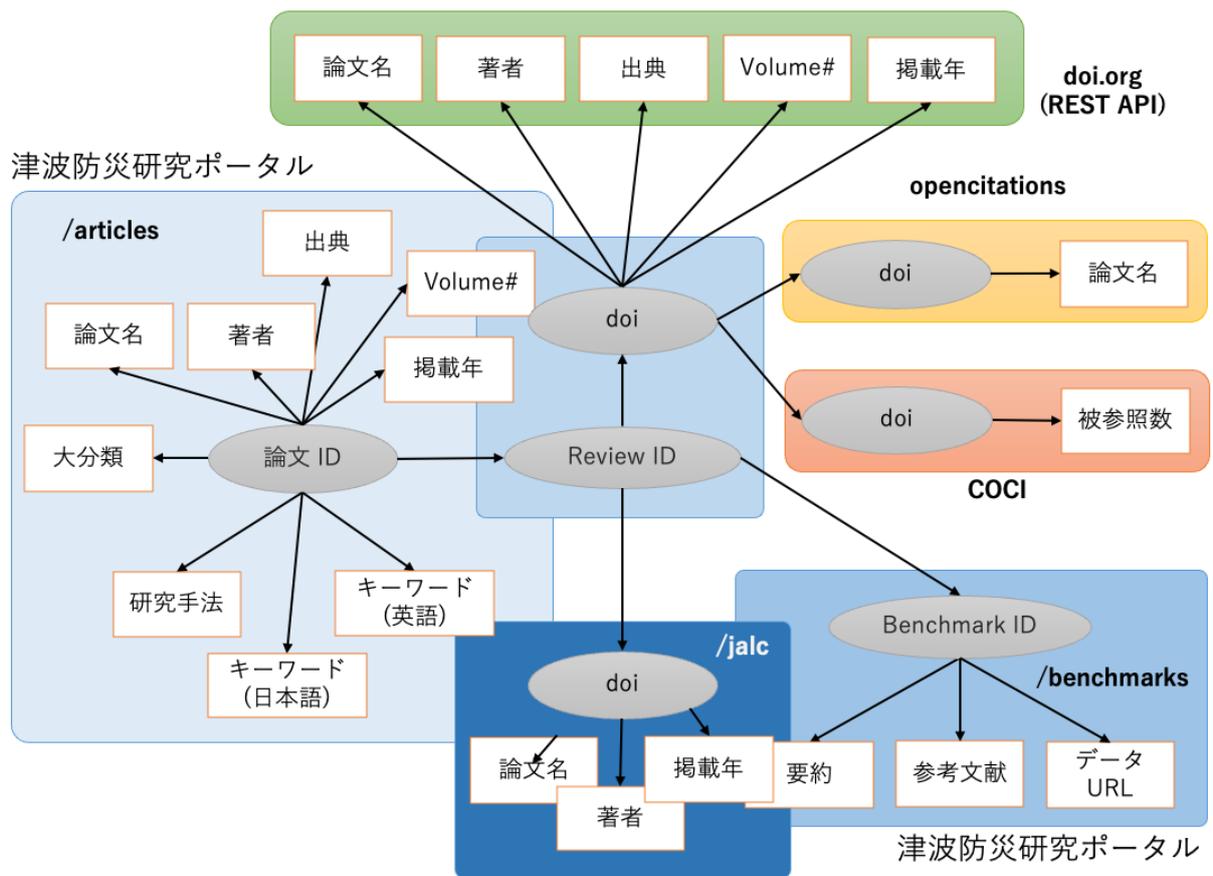


図 9.1: 津波情報データ・アーカイブシステムの全体図

論文レビュー (内部 LOD に対する SPARQL) [論文リスト | ベンチマーク]

SPARQL

```

PREFIX schema: <https://schema.org/>
PREFIX twa: <http://lod.town/twa/1.0/>
PREFIX twb: <http://lod.town/twb/1.0/>
PREFIX literal: <http://www.essepuntato.it/2010/06/literalreification/>
PREFIX datacite: <http://purl.org/spar/datacite/>
PREFIX dcterms: <http://purl.org/dc/terms/>
PREFIX prism: <http://prismstandard.org/namespaces/basic/2.0/>
SELECT distinct ?thesis ?rtitle ?rdoi ?author ?journal ?volume ?pubYear ?abstract ?method ?keyword_ja ?keyword_en ?aid ?bid
FROM <http://lod.town/articles/>
WHERE {

```

大分類: すべて 発生・伝播・遡上 波力 侵食・堆積 漂流物・建物倒壊 ベンチマークあり

41 ページのうち 1 ページ目を表示中 25 件表示 1 2 3 4 5 ... 41 次へ 内部データ検索:

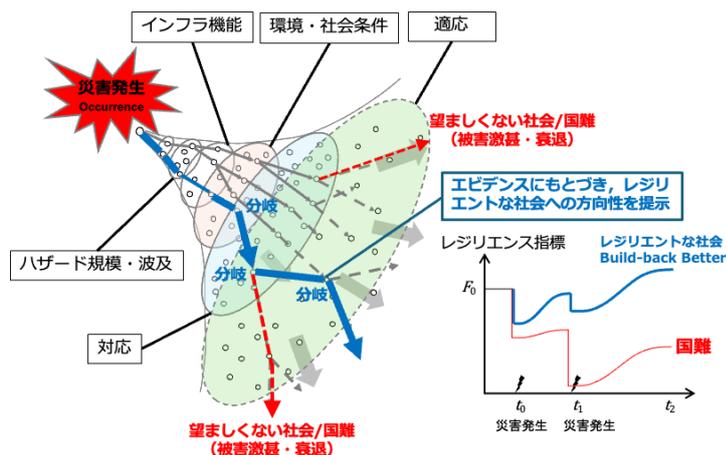
大分類	論文名	doi	著者名	出典	vol#	掲載年
発生・伝播・遡上	On Bore Dynamics and Pressure: RANS, GreenNaghdi, and SaintVenant Equations	10.1115/1.4044988	Jiaqi Liu, Masoud Hayatdavoodi, R. Cengiz Ertekin	Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering	142	2019
波力	海水群を伴う津波氾濫流の建築物近傍での水深変化と津波荷重の簡易推定法	10.2208/kaigan.75.1_421	木岡 信治, 竹内 貴弘, 渡部 靖憲	土木学会論文集B2(海岸工学)	75	2019
波力	腹付工による混成堤ケーソンの端趾圧低減効果	10.2208/jscejoe.75.1_415	高橋 英紀, 神原 晋, 福尾 原悟, 山谷 早苗	土木学会論文集B3 (海洋開発)	75	2019
波力	孤立波を対象とした耐衝撃波圧の部材設計に関する一考察	10.2208/kaigan.75.1_811	安藤 圭, 鈴木 高二朗, 森 信人	土木学会論文集B2(海岸工学)	75	2019
	A parametric study		Yusuke Yamanaka			

図 9.2: 検索結果の一例

On Bore Dynamics and Pressure: RANS, GreenNaghdi, and SaintVenant Equations (1077)

ソース	項目	内容
論文レビュー (内部 SPARQL)	論文名	On Bore Dynamics and Pressure: RANS, GreenNaghdi, and SaintVenant Equations
doi.org (REST API)		On Bore Dynamics and Pressure: RANS, Green-Naghdi, and Saint-Venant Equations
Opencitation 外部 LOD (SPARQL)		On Bore Dynamics And Pressure: RANS, Green-Naghdi, And Saint-Venant Equations
ベンチマーク (内部 SPARQL)	ベンチマーク問題	
doi.org (REST API)	著者	JiaqiLiu, MasoudHayatdavoodi, R. CengizErtekin
doi.org (REST API)	出典	Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering
doi.org (REST API)	Vol	142
doi.org (REST API)	出版年	2019,11,5
COCI 外部 LOD (SPARQL)	被参照数	4
論文レビュー (内部 SPARQL)	大分類	発生・伝播・遡上
論文レビュー (内部 SPARQL)	研究手法	数値解析
論文レビュー (内部 SPARQL)	キーワード (日本語)	
論文レビュー (内部 SPARQL)	キーワード (英語)	Dam break, initial mound of water, Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, Green-Naghdi equations, Saint Venant equations
論文レビュー (内部 SPARQL)	コメント	

図 9.3: 統合検索の結果表示の一例



Coastal Digital Twinは・・・

1. 沿岸の諸問題に対し、
2. 先進的なセンシング・モデリング・シミュレーションの融合により、
3. 将来予測の不確実性を減少し、
4. エビデンスに基づき、
5. レジリエントな社会の方向性を
6. ユーザ・ステークホルダーに提示する。

図 10.1: 沿岸災害デジタルツインの役割：災害後の不確実性（シナリオ爆発）からレジリエントな社会の方向性を提示する。

10 まとめと今後の展望

リアルタイムセンシング・モニタリングによる災害環境・被害の広域把握，リアルタイムシミュレーションによるハザード・被害の予測，社会動態の把握と異常検知にもとづく曝露人口推定など，物理世界における災害環境の把握が可能になりつつある。

デジタルツインの本質は，物理世界の情報・データが仮想世界にリアルタイムで展開・更新され，災害対応に関わる全ての主体（人・機械）をエージェント化し，仮想空間で，可能性のある全ての対策，対応，適応策の試行とその評価を行うことで，物理世界での最適な活動方針を探索することにある。物理世界の我々の活動とその結果は，再び仮想空間に展開され，次の最適解を導くための入力となり，それが再び物理世界にフィードバックされる。このフィード・フォワードのループを切れ間なく続けることができれば，災害デジタルツインの活用によるレジリエンス向上が期待できる。

災害発生後の社会は，ハザード規模，防災施設機能，人流・交通状況，避難行動，災害対応・救援の体制・機能など，膨大な不確実性（災害シナリオ爆発）と対峙することになる。様々な局面でどのような対応・対策を取るかによって，しなやかに回復できるか，望ましくない国難災害となるかの分岐点があるはずである（図 10.1）。リアルタイムで流通する観測データ・社会動態データとシミュレーション・AIの融合により，望ましくない社会に向かうのではなく，エビデンスに基づいたレジリエントな社会への方向性を提示するものである。これを実現するのが「沿岸災害デジタルツイン」である。

筆者らは，2023年度から災害デジタルツインの構築に向けたプロジェクトを戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）で開始した [28]。災害デジタルツインの実現とその活用に向けての一助となれば幸いである。

11 沿岸災害デジタルツイン研究小委員会の活動

本重点研究課題の取り組みの母体として，土木学会海岸工学委員会の下，2022年6月に設置された沿岸災害デジタルツイン小委員会（共同小委員長：越村，森）の委員約60名を主要な構成員として活動している。これまでの取り組みとして以下を列挙する。

- 第1回会議開催（2022年12月12日）※本重点研究課題研究開始前

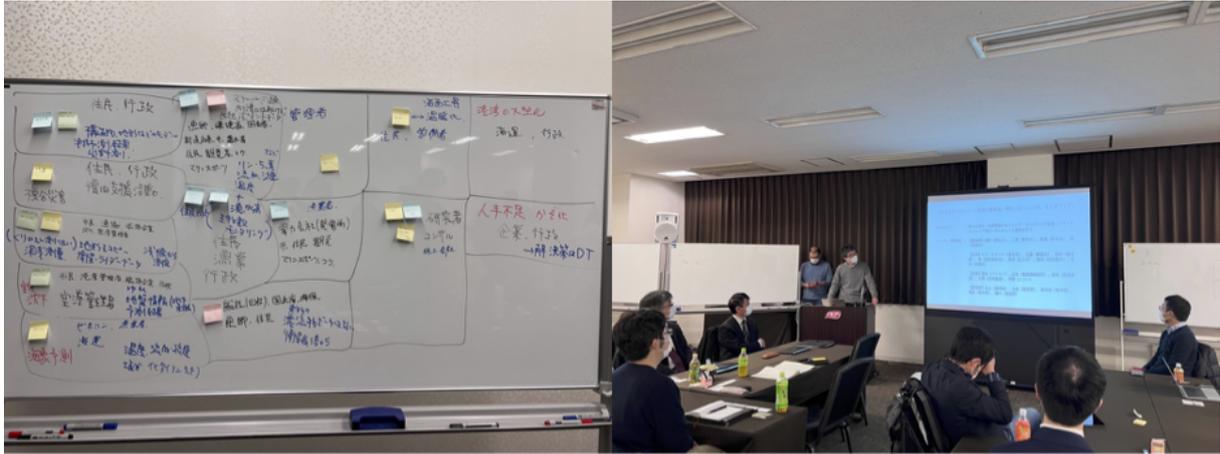


図 11.1: Project Definition Workshop での議論の様子

- 第2回会議開催（2023年1月30日）東京，Project Definition Workshop 開催
- 第3回会議開催（2023年6月22日）金沢大学
- データ駆動科学集中講義（2023年9月13-14日）徳島大学
- 第4回会議開催（2023年11月14日）京都市
- 海岸工学前日シンポジウム（2023年11月14日）京都市&オンライン

本活動のキックオフとなる Project Definition Workshop においては以下を研究上の問い（Research Questions）として議論を行った（図 11.1）。

Q1 沿岸の諸問題とはなにか？ DT で解決したい問題を具体的に

Q2 DT のユーザ・ステークホルダーは？

Q3 現実世界から仮想世界になにをコピーするか？

Q4 センシング，モデリング，シミュレーションの現状と課題

Q5 将来予測に向けた不確実性とは？

Q6 エビデンス（レジリエンス指標）とは？

Q7 アウトプットはなにか（対応策，政策，適応策など，レジリエントな社会の方向性をどのように提示するか）？

Project Definition Workshop の成果としては，主に上記 Research Questions の 1 と 2 に焦点を当てて議論し，沿岸および海洋の問題を時間スケールで分類した。図 11.2 に示すような WG の連携および，それぞれのターゲットを Thematic Digital Twin として位置づけることとした。沿岸災害デジタルツインは，沿岸環境（物理的世界）に対する包括的な洞察を提供する能力を持っているため，幅広い潜在的な利用者（ユーザ）と利害関係者（ステークホルダー）が存在する。沿岸災害デジタルツインの潜在的な利用者と利害関係者を，表 4 のようにまとめた。

活動の成果として，Elsevier の “Digital Twin Paradigm for Coastal Disaster Risk Reduction and Resilience” と題した Book Chapter[7] を発刊した（発刊は 2024 年度内予定）。また，2023 年度海岸工学講演会の特別セッションの開催に加え，Asia Oceania Geosciences Society 2023 において “Digital Twin Paradigm for Disaster Resilience” というセッションを開催し，国際的な情報発信と国際学術ネットワーク形成を行った。

以降は，各 WG の活動状況についてまとめる。

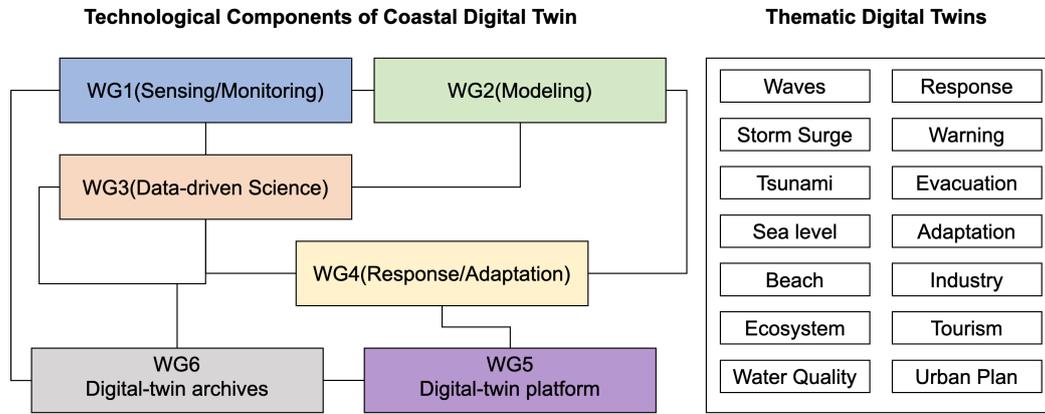


図 11.2: 沿岸災害デジタルツインの構成と活用のターゲット (Thematic Digital Twins)

表 4: 沿岸災害デジタルツインの潜在的な利用者, 利害関係者, および活用先

対象	短期的課題	長期的課題
沿岸災害対策	浸水, 高波, 越波, 塩害, 液状化, 構造物被害, 予警報, 避難計画, 曝露量評価	気候変動, 海面上昇, 極端気象予測, モビリティ
沿岸環境	水質, 環境保全, エコシステムマネジメント, 土砂移動, 海岸侵食, 漂流物, 植生	沿岸環境マネジメント, 水質・環境保全, エコシステムマネジメント, 生物生息環境保全・回復
産業, 観光業	エネルギーハーベスティング, 海岸侵食, 景観	海洋エネルギー, 経済, サプライチェーン, 環境影響評価
社会基盤	沿岸構造物の機能低下評価	老朽化対策
都市計画	景観デザイン, 土地利用	都市化, 土地利用変化

11.1 WG1（センシング、モニタリング）

11.1.1 活動目的

新たな海洋・沿岸環境のセンシング・モニタリング技術（リモートセンシング含む）のレビューと検討を行う。

11.1.2 活動履歴

- 2023年1月，WG1 第一回会合：WEB 会議
- 2023年1月，小委員会全体会合
- 2023年4月，WG1 メンバーの知識・興味に関するアンケート
- 2023年5月，アンケートとりまとめ及び2年程度の作業見通しの周知
- 2023年5月，WG1 内でモニタリング・センシングに係る技術をレビューする小 WG を結成，作業
- 2023年9月，小 WG 作業の中間とりまとめ
- 2023年11月，小委員会全体会合，モニタリング・センシングに係る技術をレビューの説明
- 2023年12月，WG1 第二回会合：デジタルツインの成熟度に関するお話（横国大比嘉先生，WEB 会議）
- 2024年1月，小 WG 作業のとりまとめ，デジタルツインの中でのモニタリング・センシングに係る課題具体化へ向けた作業の方針決定
- 2024年3月，デジタルツインの中でのモニタリング・センシングに係る課題具体化に関する中間とりまとめ，成果物へ向けた作文開始

11.1.3 モニタリング・センシングに係る技術のレビュー小 WG

デジタルツインに寄与するモニタリング・センシングについて，衛星，UAV・AUV，オンサイトでの間接測定技術，直接測定の3つにカテゴライズし，現状及び近い将来（5-10年以内に実現可能な範囲）に期待される技術の整理及び課題のまとめを行った。例えば，UAV・AUVに関してとりまとめた結果は以下の通り総括した。

これまでの時空間的な空白域を埋める期待があり，現時点でも既に応用の幅は広い。例えば，日本財団による日本の浅海域約90%の測量・地図化を目指している海の地図プロジェクトはUAVの技術的発展によるところが大きい。近年のUAV及び（AUV，ASV，ROV）の小型化や航続の長時間化等の技術的発展は，現状の応用の高精度化や更なる空白域への展開を期待させる。ただし，この期待をより現実的なものにするには，モニタリング・センシングのセンサーの高性能化（高 sampling rate 化による観測時間の減少，法に基づく高度の制限を回避する観測範囲の広域化など）などの搭載機器の技術的発展や，ドローン航路の設定などの行政的な後ろ盾も重要になるであろう。

11.1.4 デジタルツインの中でのモニタリング・センシングに係る課題具体化

モニタリング・センシングによって得られるデータがデジタルツインで活用されるまでの一連の流れについて，諸問題の例題を取り上げて具体化する作業に取り掛かっている。この具体化により，WG1 と他の WG との接続領域に存在する課題の抽出を目指す。

11.2 WG2（モデリング）

11.2.1 活動目的

海洋・沿岸の諸現象のリアルタイム解析等幅広い予測を行うための基盤となるモデリング技法に関する検討を行う。

11.2.2 活動履歴

- 2023年1月，WG2会議（WEB）
- 2023年1月，全体会議（東京）
- 2023年6月，全体会議（金沢＋WEB），アンケートで3つのサブワーキング（SWG）を設定（津波、台風、沿岸環境）
- 2023年9月，SWGリーダー会議（東京），SWGごとに実施する事例収集における情報の整理方針を決定
- 2023年10月，台風SWGキックオフ（WEB）
- 2023年10月，沿岸環境SWGキックオフ（WEB）
- 2023年10月，津波SWGキックオフ（WEB）
- 2023年11月，SWGリーダー会議（WEB），SWGの事例収集結果をまとめ企画セッションでの報告内容の整理
- 2023年11月，海岸工学企画セッション（京都＋WEB），これまでのWG2の活動状況とSWG（津波・台風・沿岸環境）の事例収集の結果を報告

11.3 WG3（データ駆動科学）

11.3.1 活動目的

WG3では特にデータ駆動科学をトピックとして，高次元のセンシング・モニタリングデータの潜在構造やプロセスの解明に向けたデータ駆動科学の海岸工学への適用に関する検討を行う。海岸工学においてデータ駆動科学は強力なツールに成り得るものの，沿岸の諸現象に関する物理，観測データの特性の理解なしに高度な予測が実現できないため，WG1のセンシング・モニタリングやWG2のモデリングとの連携が不可欠である。また，ユーザーやステークホルダーの政策意思決定に効果的な予測結果となるように配慮する必要がある。

11.3.2 活動報告

これらを踏まえてWG3ではおおまかな活動内容を次のように計画した。1年目には海岸工学分野におけるデータ駆動科学の適応例を収集するとともに，データ駆動科学に詳しい専門家を招聘し，理論や手法の概観を把握する。2年目前半に海岸工学分野におけるデータ駆動科学の適応例をレビューする。後半にはWG1およびWG2と連携し，データに加えて，モデリング手法に適したデータ駆動科学の手法を検討する。あるいは，データ駆動科学に適したセンシング，モニタリング，モデリング手法を考察する。3年目はデータ駆動科学に基づく政策決定アウトカムについて考察し，3年間の活動をレビュー論文としてまとめる。ここでは1年目の活動について報告する。

WG3のメンバーは大学関係者が12名（うち1名は博士後期課程学生），港湾空港技術研究所から3名，電力中央技術研究所から2名，民間企業から4名の21名で活動している。主査は徳島大学の馬場俊孝，副査は港湾空港技術研究所の田村仁が務めている。研究論文をはじめとするデータ駆動科学をおよそ50編の適応例を収集した。メンバーの専門性にもよるが，適応例は台風や

高潮、津波の波高を予測するものが多い。また、海洋環境を扱ったものもある。手法はニューラルネットワーク (NN) ベースのものが多く、それから派生した Multi-Layer Perceptron (MLP) や、Convolutional NN, Bayesian NN などが用いられていた。また、ガウス過程回帰や Support Vector Machine (SVM), Denoising Encoder (DAE), Variational Autoencoder (VAE) の事例もあった。この分野の特徴として、学習データを数値モデルで生成するという点があげられる。例えば、津波の予測においては、多数の地震シナリオを仮定し、その津波を数値モデルで計算し、計算結果を疑似観測データとして学習させている。これは、津波災害が低頻度であるとともに、予測モデルの精度が良いこと、また、計算機の発展によって膨大なシナリオの計算が実現できるようになったためであると考えられる。また、数値モデル計算の代わりに代理モデル (特異値分解や Karhunen-Loeve 展開など) で学習データを生成している研究もある。

欧州の事例であるが、データ駆動科学が実務に利用されている例として EurOtop¹がある。EurOtop は 2000 年代初頭の欧州を中心とした越波対策の国際プロジェクト CLASH の成果物で (初版は 2007 年)、護岸設計の際に越波流量を予測するために用いられる。特筆すべきは、NN による越波流量の予測が、実験・数値モデリングと同列に検討されている点である。越波の分野においては、データを利用する取り組みは 1990 年代後半から出現し、目的は「越波のような複雑な現象を多くの実験・観測データで帰納的に解釈する」ことであり、各種アルゴリズムの適用性に関する事例が多く紹介されている。

データ駆動科学の理論や手法の概観を把握することを目的として、講師を招聘し、講習会を開催した。講師は筑波大学の五十嵐康彦博士で、五十嵐博士はデータ駆動科学の豊富な経験がある。講習会は 2023 年 9 月 13 日、14 日の 2 日間で、90 分の講義を 10 コマ実施した。Python を用いた演習もあった。具体的な内容は表 5 に示すとおりである。

表 5: データ駆動科学講習会の内容

回	内容
1	データの特徴を知り、関係を調べる – データ同士の比較 (相関係数)
2	データをもとにした予測や分類 (線形回帰) – 機械学習の基礎 (回帰, 分類, 最小二乗法)
3	木構造を用いたデータの分類と重要変数の抽出 – 教師あり学習 1 (決定木・ランダムフォレスト, 交差検証)
4	Python の基礎と Python による演習 1
5	モデルの簡略化とスパースモデリング – 教師あり学習 2 (構築したモデルの評価と選定ステップワイズ, 情報量基準)
6	Python の基礎と Python による演習 2
7	データ間の距離を測る, 画像における重要な特徴量とは? – 教師なし学習 1 (距離 + 主成分分析)
8	Python の基礎と Python による演習 3
9	データのグループ分け – 教師学習 2 (クラスタリング, k-means)
10	深層学習, Transformer, ChatGPT との関わり

講習会は WG3 のメンバーに限らず、小委員会全体に参加を呼びかけた。対面講義を徳島大学で実施したがオンラインでも視聴可能とした。対面参加者は 11 名、オンライン参加者は 47 名であった。大学院生の参加も多くあり、教育的な観点でも有意義な講習会となった。

¹EurOtop, Second Edition 2018. http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EurOtop_II_2018_Final_version.pdf

来年度は、引き続き海岸工学分野でのデータ駆動科学の適用例のレビューを行うとともに、データ駆動解析においてキーポイントとなる“データ”の特徴や今後の見通しを得るため、センシング・モニタリング（WG1）、モデリング（WG2）班との情報共有を進める。

11.4 WG4（社会対応）

11.4.1 活動目的

社会対応WG（WG4）の活動目的は、海岸・海洋の課題に関する対応を検討し、実施する際に必要となる指標を整理することである。これらの指標は、自治体が施策を選択する際や、住民や民間が事業を選定する際の重要な意思決定材料として機能する。指標は、センシング・モニタリングによる観測データやシミュレーションに基づいた予測結果から算出される。また、意思決定を行うステークホルダーは行政担当者や住民など様々であるため、着目している課題の空間スケール・時間スケールを考慮した指標の検討が必要となる。

11.4.2 活動内容

令和4年12月に東京で開催された小委員会ワークショップで海岸・海洋における課題、デジタルツインに影響を与える影響を与える不確実性等について議論があった。WG4では、ワークショップでの議論を踏まえ、海岸・海洋における課題を整理し、指標についての議論を進めている。

海岸・海洋のあり様は、災害のみならず平常時の自然環境や海岸線背後の人間活動の変化の影響を受け、津波や高潮・高波のようにイベント的に発生する現象もあれば気候変動や人口変化等の数十年の期間で比較的緩やかに変化するものもある。WG4では、空間スケールや時間スケールが様々であることを踏まえ、表6に示す3つのテーマでグループを作り議論を進めている。

表 6: WG4 の議論のテーマ

テーマ	海岸・海洋の課題
災害	高潮、高波、津波、海岸侵食
環境	水質、生態系、潮流・海流、砂浜
経済	港湾、施設の維持管理、物流、エネルギー（洋上風力、波力発電）

11.4.3 災害・環境・経済のテーマ別グループ活動

災害 災害チームは、津波、高潮、高波、低地での洪水浸水など、様々なハザードを対象とする。海岸・海洋における事例や既往研究が存在していることから、事例収集や指標について議論した。

- デジタルツインを適用した事例について調査した。（デジタルツイン実装モデル PLATEAU の取り組み、WebGIS 技術を用いた水害対策アプリケーションの開発等
- 「デジタルツイン」をキーワードとして、日本の学術ジャーナルが検索できる検索サイト J-STAGE で建築学および土木工学に関連する雑誌を検索し、さらに「災害」や「防災」をキーワードとして、23 編の論文を抽出した。

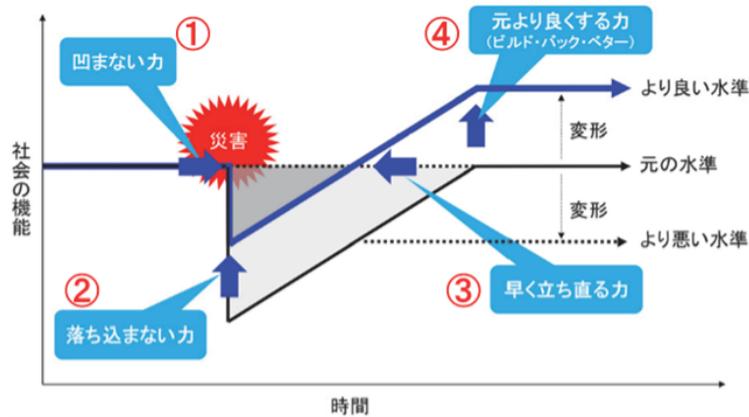


図 11.3: レジリエンスの概念. 出典：臼田（2023），レジリエンス向上のためのデジタル防災技術，AI・データサイエンス論文集，4(L2)，pp.44-59.

- リスク評価に関する指標について調査し，Carreno et al. (2007) 等の論文を整理した．次次に，Flangen et al.(2011) に挙げられている典型的な評価方法の1つを紹介する．

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times (\text{Vulnerability} - \text{Resource})$$

ここに，Risk は損失の期待値もしくは確率，Hazard は被害を起こす条件，Vulnerability は影響範囲（人，モノ），Resource は Hazard による効果を減らす資源である．

図 11.3 および表 7 には，津波災害に対するレジリエンスを対象とした変数や指標の一覧を示す．

環境 海岸の環境をテーマに議論する場合，対象とする現象や課題が多種多様であり相互に関係している．これに対応するため，海岸・海洋の課題に関する対応を検討し，実施する際に必要となる指標を整理することを目的として，SES (Social Ecological System) 図を作成し，海岸環境の包括的な理解のため連関分析を行った．

- デジタルツインには，0-5 段階の成熟度（0：No Twin，1：Status，2：Informative，3：Predictive，4：Optimization，5：Autonomous）があり，特定のユースケースに最適な成熟度レベルを目指し選択することが重要である．
- 環境の指標は，貨幣換算が可能な市場的価値（経済効果）と，貨幣価値への換算が難しい非市場的価値（well-being）に分かれる．市場的価値と非市場的価値の指標を総合して価値を最大化する手法が必要になる．
- 環境は多種多様な要素があり，それらが互いに関係している．環境チームは，対象とする海岸の課題を1つに絞ったとしても，関係する他の要素が変化することから，してしまう可能性が高いことから具体的に絞ることが難しい．現象を整理するため，SES 図（図 11.4）を作成した．

経済 経済チームは，取り扱う事象として，物流や洋上風力，施設の維持管理等の様々な経済活動があることを認識した上で，指標についての具体を議論するために，「港湾」に焦点を当てて議論した．

- 基本方針として，貨幣価値（経済性）を指標とする．

表 7: 津波に津波災害に対するレジリエンスを対象とした変数や指標の一覧

Index	Indicator / Data	
	市民	自治体
① 凹まない力 災害に遭わない力	<ul style="list-style-type: none"> 居住地、生活圏の浸水深 情報の取得経路の確保状況 要配慮者の有無 	<ul style="list-style-type: none"> 浸水範囲・浸水深 暴露人口、暴露建物数 要支援者数、分布 モニタリングの整備状況 ハザード情報の公開状況 避難情報の発信状況
② 落ち込まない力 被害を減少させる力	<ul style="list-style-type: none"> 避難訓練の参加回数 備蓄品の種類および数 自宅・職場の耐震化状況 避難場所、避難所の整備状況 避難路の混雑・浸水状況 避難場所・避難所の収容状況 	<ul style="list-style-type: none"> 被害想定 死傷者数、建物被害数、避難者数、帰宅困難者、経済被害額、etc. 避難訓練の実施状況、参加率 避難場所、避難所の整備率 構造物の耐震化率
③ 早く立ち直る力 機能水準の回復力	<ul style="list-style-type: none"> 保険への加入状況、支払の迅速度 罹災証明の取得の迅速度 雇用状況、就労状況 	<ul style="list-style-type: none"> 被害把握の迅速度 災害時協力協定の締結状況 医療の提供能力 食糧、燃料等の供給能力
④ 元より良くする力	<ul style="list-style-type: none"> 幸福度??? ・しっくりこない… 	<ul style="list-style-type: none"> 住みやすさ(利便性、快適度、etc.) 居住人口、就労人口、来訪者数 事前復興計画の策定状況
	指標①～③が発災前より良くなる仕組みの充実度	

閉鎖性水域における自然干潟

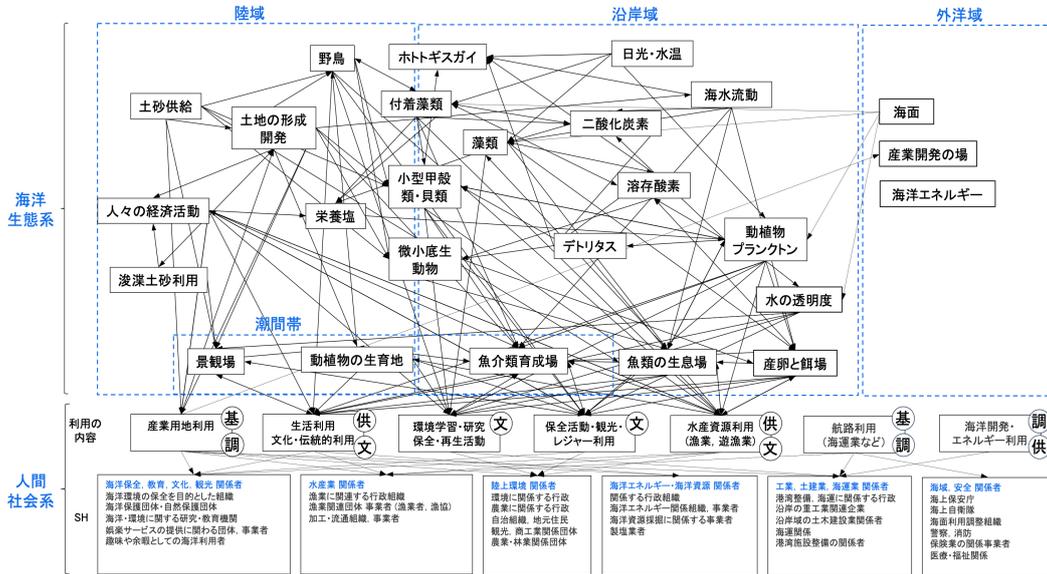


図 11.4: 閉鎖性水域における自然干潟の SES 図. 「Makino et al.(2017) : Mapping the Policy Interventions on Marine Social-Ecological Systems: Case Study of Sekisei Lagoon, Southwest Japan」に基づき作成.



図 11.5: 港湾デジタルツインのイメージと評価指標について

- 港湾では、デジタルツインの活用により、物流・観光・エネルギー等の港湾機能を評価し、港湾BCP、港湾整備・維持管理計画、港湾経営戦略（デジタル化推進）等の立案等に活用できる。図 11.5 に、港湾デジタルツインのイメージを示す。
- 港湾デジタルツインはスマートシティと密接に関連することを考慮し、海外港湾・街づくりのデジタル化・デジタルツイン活用事例等の調査に着手することを考える。
- 海外の主要ハブ港はすでにDX・自動化を進めており、先進事例を把握したうえで、経済活動を担う港湾機能を評価するための指標について検討する。

11.5 WG5（デジタルツイン基盤）

11.5.1 活動目的

沿岸災害デジタルツインの構築に向け、デジタルツインの概念設計やハードウェア・ソフトウェア面での要件を検討する。

11.5.2 活動履歴

- 2023年1月、第1回WG（オンライン）
- 2023年1月、第1回小委員会全体会合
- 2023年6月、第2回小委員会全体会合
- 2023年10月、第2回WG（オンライン）
- 2023年10月、沿岸環境SWGキックオフ（WEB）
- 2023年10月、津波SWGキックオフ（WEB）
- 2023年11月、第3回小委員会全体会合

11.5.3 デジタルツイン像の検討

2023年1月23日に開催した第1回WGでは、沿岸災害デジタルツインとその基盤を検討していくにあたり、(1) 沿岸の諸問題とは何か、(2) ユーザー・ステークホルダーは、(3) 現実世界から仮想世界に何をコピーするか、(4) センシング、モデリング、シミュレーションの現状と課題、(5) 将来予測に向けた不確実性とは、(6) エビデンス（レジリエンス指標）とは、(7) アウトプットは何か（対応策、政策、適応策など、レジリエントな社会の方向性をどのように提示するか）の7項目について、参加者からの意見出しを実施した。

デジタルツインが解決を目指す沿岸の諸問題としては津波・高潮などの災害の他、気候変動、海岸および沖合構造物、環境、沿岸域のコミュニティレジリエンスなどが挙げられ、デジタルツインのユーザーやステークホルダーとして住民や旅行者、行政や管理者、企業など多岐にわたるものが挙げられた。これに対して、現実世界から仮想世界に、自然現象はもちろん、社会の静的および動的な状態、海岸構造物や施設の状態など、さまざまなものをコピーする必要があることが議論された。センシング、モデリング、シミュレーションの現状と課題としては、インフラやライフライン、建物、施設等のデータや状況の共有、数値モデルのオープンソースや API 化、シミュレーションの条件と結果の共有、それらのデータベースの整備などが挙げられた。将来予測に向けた不確実性としては、自然現象や気候変動の規模に加え、人の行動や人口減少など社会側についても挙げられた。エビデンスとしては社会経済活動指標、施設整備維持管理コスト、信頼性指標、被害が挙げられた。アウトプットとしては、多種多様なデータを管理・利活用し、解析、共有、可視化し、資源配分や行動の最適化等のための情報を提供することなどが議論された。

11.5.4 デジタルツインに関するレビュー

2023年10月27日に開催した第2回WGでは、沿岸災害デジタルツインのデジタルツイン基盤に関して検討しなければならない事項を抽出するため、国内外の多分野におけるデジタルツインの取り組みに関するレビューを実施し、港空研のUmi-Pochiの事例が紹介された。

製造業のデジタルツインでは、個別のデジタルツインの構築を進め、それをプラットフォーム化し、エコシステムを構築し、相互運用性を向上させ、デジタルツインを使用したDXが進められている。気象のデジタルツインでは、データレイク、デジタルツイン、サービスプラットフォームからなるアーキテクチャを作り、分担して開発している。都市のデジタルツインではデータ収集や初期のデジタルツイン構築段階にあるものが多く、データの継続的更新の仕組みづくりや活用が課題となっている。

各分野のデジタルツイン構築・活用は、(1) 関連するデータの収集・格納・共有、(2) 個別のデジタルツインの構築、(3) 複数のデジタルツインの連携、(4) 自律化と段階的に発展するが、(1)のフェーズではデータの意味づけ、継続的更新の仕組み、(2)のフェーズでは共通して必要となる機能の構築、(3)のフェーズでは境界条件としてデータをやり取りする際の取り決めなど、段階に応じてニーズを満たす基盤を作る必要があることなどがわかった。これに対して、何か事例を決めて一貫通貫のものを検討し、準備を進めておくことが効率的ではないか、巨大なデジタルツインになるほど、運用期間が長引くほど、持続的に面倒を見ていく組織も必要になる、産業的には、沿岸災害に係る各企業に対してデジタルツインの成果を展開する仕組みも考える必要がある、様々なデジタルツインにおいて、センシングとモデリングをどのように繋いでいくかが課題である、自律的にデジタルツインが稼働する仕組みも課題となっているなどの意見が挙げられた。

共通基盤として検討すべき事項としては、データ連携、一元管理、標準化や相互運用性の向上といったプラットフォーム開発、長期的にはシステムの自動化、インターフェースの整備、AIの構築と活用、セキュリティなど「データ・モデル連携」が大きなものとして挙げられた。また、デジタルツインを構築、発展させていくためには、資金の循環、産官学連携の場、データの継続的更新、デジタルツインの活用教育など、「運用・エコシステム」も大きな検討すべき事項として挙げられた。

議論の結果、これらの「データ・モデル連携」、「運用・エコシステム」に関するサブWGを設置して活動を行い、都度WG5を開催して議論を集約する方向となった。

11.6 WG6（アーカイブ）

11.6.1 活動目的

沿岸災害デジタルツインアーカイブとしての機能要件を検討する。

11.6.2 活動履歴

- 2023年1月，第1回WG（オンライン）
- 2023年1月，小委員会全体会合
- 2023年6月，津波防災研究ポータルの LOD化試作
- 2023年11月，小委員会全体会合

11.6.3 デジタルデータ・アーカイブシステムの設計と試作

デジタルツインでは，物理空間から仮想空間にコピーされたデジタルデータをその後の解析で利用可能な形で整備する必要がある。しかし，既存の多くのデジタルデータは人間が利用することを第一に想定しており，プログラムでの直接利用や横断的な検索が想定されていない場合が少なくない。そこで，津波情報を一例として，研究者や自治体の防災担当者らを対象に土木学会と防災科学技術研究所が共同で構築した津波防災研究ポータルに整備されている論文情報とベンチマーク問題を対象に津波情報アーカイブシステムを試作した。ここでは横断検索が可能となるよう SPARQL・RDF/XML を用いており，単なる設計だけではなく試作したことでその効果を明瞭に示したことで災害デジタルツインの実証試験が加速されることが期待される。

参考文献

- [1] Li L., Aslam S., Wileman A., Perinpanayagam S. (2022). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction, *IEEE Access*, vol. 10, 9543-9562. doi:10.1109/ACCESS.2021.3136458.
- [2] Pregolato, M., Gunner, S., Voyagaki, E., De Risi, R., Carhart, N., Gavriel, G., Tully, P., Tryfonas, T., Macdonald, J., Taylor, C. (2022). Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure, *Automation in Construction*, 141, 104421. doi:10.1016/j.autcon.2022.104421
- [3] 東京都, 東京都デジタルツイン実現プロジェクト. <https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp> (2024.2.5)
- [4] Gobeawan L., Lin E. S., Tandon A., Yee A. T. K., Khoo V. H. S., Teo S. N., Yi S., Lim C. W., Wong S. T., Wise D. J., Cheng P., Liew S. C., Huang X., Li Q. H., Teo L. S., Fekete G. S., Poto M. T. (2018). MODELING TREES FOR VIRTUAL SINGAPORE: FROM DATA ACQUISITION TO CITYGML MODELS, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W10, 55-62. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W10-55-2018
- [5] Singapore's National Research Foundation, the Singapore Land Authority, the Singapore Land Authority and the Government Technology Agency (2023), *Virtual Singapore*. <https://www.sla.gov.sg/geospatial/gw/virtual-singapore> (2024.2.5)
- [6] 国土交通省 PLATEAU (2024), <https://www.mlit.go.jp/plateau/> (2024.2.5)
- [7] Koshimura, S., Mori, N., Chikasada, N., Udo, K., Ninomiya, J., Okumura, Y., Mas, R. (2024). Digital Twin Paradigm for Coastal Disaster Risk Reduction and Resilience, *Digital Twin Paradigm for Coastal Disaster Risk Reduction and Resilience, Probabilistic Tsunami Hazard and Risk Analysis*, ed. Goda. K., Elsevier. (in press)
- [8] Koshimura, S., Moya, L., Mas, E., Bai, Y. (2020). Tsunami Damage Detection with Remote Sensing: A Review, *Geosciences*, 10(5), 177. doi:10.3390/geosciences10050177
- [9] Koshimura, S., Hayashi, S., Gokon, H. (2014). The impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster and implications to the reconstruction, *Soils and Foundations*, 54(4), 560-572. doi:10.1016/j.sandf.2014.06.002
- [10] Hayashi, S., Koshimura, S. (2013). The 2011 Tohoku Tsunami Flow Velocity Estimation by the Aerial Video Analysis and Numerical Modeling, *Journal of Disaster Research*, 8(4), 561-572. doi: 10.20965/jdr.2013.p0561
- [11] 郷右近英臣, 越村俊一, 松岡昌志 (2014). 合成開口レーダー画像による津波浸水ラインの半自動抽出ツールの開発, *土木学会論文集 B2*, 70(2), I.1486-I.1490. doi:10.2208/kaigan.70.I.1486
- [12] Gokon, H., Koshimura, S. (2012). Mapping of Building Damage of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami in Miyagi Prefecture, *Coastal Engineering Journal*, 54(1), 1250006. doi:10.1142/S0578563412500064
- [13] Liu, W., Yamazaki, F., Gokon, H., Koshimura, S. (2013). Extraction of Tsunami Flooded Areas and Damaged Buildings for the 2011 Tohoku, Japan Earthquake from TerraSAR-X Intensity Images, *Earthquake Spectra*, 29, 183-200. doi:10.1193/1.4000120

- [14] Gokon H., Post, J., Stein, E., Martinis, S., Twele, A., Muck, M., Geiss, C., Koshimura, S., Matsuoka, M. (2015). A Method for Detecting Devastated Buildings by the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Using Multi-temporal TerraSAR-X Data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, doi:10.1109/LGRS.2015.2392792
- [15] Bai, Y., Gao, C., Singh, S., Koch, M., Adriano, B., Mas, E., Koshimura, S. (2017). A Framework of Rapid Regional Tsunami Damage Recognition from Post-event TerraSAR-X Imagery Using Deep Neural Networks, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. doi:10.1109/LGRS.2017.2772349
- [16] Koshimura, S., Fukuoka, T. (2019). Remote Sensing Approach for Mapping and Monitoring Tsunami Debris, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4829-4832. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8899011.
- [17] Koyama, C. N., Gokon, H., Jimbo, M., Koshimura, S., Sato, M. (2016). Disaster debris estimation using high-resolution polarimetric stereo-SAR, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 120, 84-98. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.08.003
- [18] 佐藤遼次, 越村俊一. (2015). UAV を用いて撮影した光学画像における人検出の精度向上, *地域安全学会論文集*, 27, 293-301. doi:10.11314/jisss.27.293
- [19] Koshimura, S., Mas, E., Moya, L., Bai, Y. (2020). Tsunami Damage Detection with Remote Sensing: A Review, *Geosciences*, 10(5), 177. doi:10.3390/geosciences10050177
- [20] Fujiwara, H., Nakamura, H. Senna, S., Otani, H., Tomii, N., Ohtake, K. Mori, T., Kataoka, S. (2019). Development of a Real-Time Damage Estimation System, *Journal of Disaster Research*, 14(2), 315-332. doi:10.20965/jdr.2019.p0315
- [21] Koshimura S., Hino R., Ohta Y., Kobayashi H., Murashima Y., Musa A. (2017). Advances of tsunami inundation forecasting and its future perspectives, *IEEE Oceans*. doi:10.1109/OCEANSE.2017.8084753
- [22] Musa A., Watanabe O., Matsuoka H., Hokari H., Inoue T., Murashima Y., Ohta Y., Hino R., Koshimura S., Kobayashi H. (2018). Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *The Journal of Supercomputing*, 74, 3093-3113. doi:10.1007/s11227-018-2363-0
- [23] Mas, E., Koshimura, S. (2023). Anomaly Detection in Mobile Spatial Statistics for Disaster Risk Management, Available at SSRN. doi:10.2139/ssrn.4410149
- [24] 国土地理院. (2016). UAV を用いた公共測量マニュアル(案), 42p. <https://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf> (2024.2.5)
- [25] Nagasawa, R. Mas, E., Moya, L., Koshimura, S. (2021). Model-based analysis of multi-UAV path planning for surveying postdisaster building damage, *Scientific Reports*, 11, 18588. doi:10.1038/s41598-021-97804-4
- [26] Hachiya, D., Mas, E., Koshimura, S. (2022). A Reinforcement Learning Model of Multiple UAVs for Transporting Emergency Relief Supplies, *Applied Sciences*, 12(20), 10427. doi:10.3390/app122010427

- [27] Mas, E., Egawa, S., Sasaki, H., Koshimura, S. (2022). Modeling search and rescue, medical disaster team response and transportation of patients in Ishinomaki city after tsunami disaster, E3S Web Conf., 05001. doi:10.1051/e3sconf/202234005001
- [28] 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP), スマート防災ネットワークの構築. <https://www.nied-sip3.bosai.go.jp/index.html> (2024.2.5)
- [29] 中央防災会議「防災対策推進検討会議」南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 報告書, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html, (2024.5.5).
- [30] 国土交通省: 住宅・建築物の耐震化について, https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_fr_000043.html, (2022.5.22).
- [31] 国土交通省住宅局・東京大学空間情報科学研究センター: 復興支援調査アーカイブ, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>, (2024.5.5)
- [32] 高橋佑介, 奥村与志弘: 避難開始における論理的判断と直感的判断の関わりに注目した災害体験を伝える文書の分析, 土木学会論文集, Vol.80, No.13, 2024. (印刷中)
- [33] 石野好彦, 瀬尾直樹, 原田賢治: 御前崎地区住民の津波避難に関する基礎調査 -東北地方太平洋沖地震後 10 年の地域の津波避難-, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.78, No.4, pp.689-701, 2022.
- [34] 内閣府: 地震防災対策の現状調査に係る住民アンケート結果 (南海トラフ地震編), 令和 5 年 11 月, https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg_02/11/pdf/sub1.pdf (2024.5.5)
- [35] 照本清峰: 観光客を対象とした津波避難対策に関する課題の検討, 地域安全学会梗概集, No. 32, pp. 103-106, 2013.
- [36] 森田匡俊, 小池則満, 小林哲郎, 山本義幸, 中村栄治, 正木和明: GPS を用いた海水浴場避難訓練時の行動分析-愛知県南知多町を事例として-, 地域安全学会論文集, No. 23, pp. 45-54, 2014.
- [37] 土肥裕史, 奥村与志弘, 上大迫弘隆, 清野純史, 無人航空機を用いた津波避難開始行動調査手法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4 (地震工学論文集第 37 巻), pp.I.906-I.916, 2018. doi:10.2208/jscejsee.74.I.906
- [38] Affan, M., Goto, Y. and Sabti, A. : Tsunami Evacuation Simulation for Disaster Awareness Education and Mitigation Planning of Banda Aceh, Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012, http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_3525.pdf
- [39] 印南潤二, 正垣隆祥, 笥文彦, 福井潔, 山田武志, 群集シミュレーション手法を活用した大規模ターミナル駅周辺の避難誘導情報の施策検討, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), vol.45, 2012 年, ROMBUNNO.8.
- [40] ベクトル総研 ウェブサイト: https://vri.co.jp/case_cat2/solution-cat2/, (2024.5.5)
- [41] 構造計画研究所ウェブサイト http://iit.kke.co.jp/solutions/bousai_solution.html#tsunami (2024.5.5)

- [42] Burghout, W., Koutsopoulos, H. N. and Andreasson, I. : A discrete-event mesoscopic traffic simulation model for hybrid traffic simulation, International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2006.
- [43] 交通シミュレーション自主研究委員会:交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル (案), 交通シミュレーションクリアリングハウス, <http://www.jste.or.jp/sim/manuals/index.html> (2024.5.5)
- [44] J. J. フルーイン: 歩行者の空間—理論とデザイン, 長島正充訳, 鹿島出版会, 1974年, 206p.
- [45] 平井則行, 柏原士郎, 吉村英祐, 横田隆司: 歩行実験に基づく群衆密度と歩行速度の関係について, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系 (33), 1993年, pp.481-484.
- [46] Yamada, Y. : The Optimum Forest-Road Density Determined in Relation to the Cost of Walking, J. Jpn. For. Soc.71, 1989, pp. 257-264.
- [47] 財団法人日本建築センター: 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 海文堂出版株式会社, 2001年, 316p.
- [48] Hori, M. : Introduction to computational earthquake engineering, 2nd edition, Imperial College Press, 2011, pp.317-358.
- [49] Leonel Enrique Aguilar Melgar, Wijerathne Maddegedara Lalith Lakshman, Muneo Hori, Tsuyoshi Ichimura and Seizo Tanaka : On the Development of an MAS Based Evacuation Simulation System: Autonomous Navigation & Collision Avoidance, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 8291, 2013, pp.388-395.
- [50] Wijerathne Maddegedara Lalith Lakshman, Muneo Hori and Tsuyoshi Ichimura : Parallel scalability enhancements of seismic response and evacuation simulations of Integrated Earthquake Simulator, Lecture Notes in Computer Science, 7851, 2013, pp. 105-117.
- [51] Wijerathne Maddegedara Lalith Lakshman, Leonel Enrique Aguilar Melgar, Muneo Hori, Tsuyoshi Ichimura, Seizo Tanaka : HPC Enhanced Large Urban Area Evacuation Simulations with Vision based Autonomously Navigating Multi Agents, Procedia Computer Science, 18, 2013, pp.1515-1524.
- [52] 清野純史、三浦房紀、瀧本浩一、中嶋庸一: 個別要素法 (DEM) を用いた群衆行動シミュレーション、地域安全学会論文報告集 No.4、1994年、pp.322-327.
- [53] 八木宏晃、清野純史、三浦房紀: すれ違いや追い越しを考慮に入れた DEM による人間行動シミュレーション、地域安全学会論文報告集 No.5、1995年、pp.449-456.
- [54] 堀宗朗, 末松孝司, 荒木秀朗, 奥村与志弘, 土肥裕史, 避難シミュレーションにおける品質保証の現状と今後の展望, 日本地震工学論文集, 15, No.5 特集号, pp.5-144-5-157, 2015. doi:10.5610/jaee.15.5-144.
- [55] 松長 悠太, 西 広人, 水野 辰哉, 琴浦 毅, 西畑 剛, 松葉 義直, 田島 芳満, 港湾分野における面的 LiDAR を用いた観測手法の検討, 土木学会論文集, 2023, 79 巻, 18 号, doi: 10.2208/jscej.23-18115.
- [56] 三戸部 佑太, 新道 健人, 鈴木 彰容, 田中 仁, 二台の UAV によるステレオ画像を用いた波浪観測手法の基礎的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2019, 75 巻, 2 号, pp. I.1273-I.1278.

- [57] 北島夏実, 瀬戸里枝, 山崎大, Xudong ZHOU, Wenchao MA, 鼎信次郎, 小型 SAR 衛星コンステレーションによる河川氾濫域の高頻度観測の可能性, 土木学会論文集 B1(水工学), 2020, Vol.76, No.2, I.535-I.540.
- [58] Jeong J-S, Lee HS. Unstructured Grid-Based River-Coastal Ocean Circulation Modeling towards a Digital Twin of the Seto Inland Sea. *Applied Sciences*. 2023; 13(14):8143. doi: 10.3390/app13148143.
- [59] 一般財団法人国土技術研究センター, 高潮・高波・浸水リアルタイム予測システム技術仕様書, 2024, 152p.
- [60] Mizuta, R., and Coauthors, 2017: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1383-1398, doi:10.1175/BAMS-D-16-0099.1.
- [61] Adrean WEBB, Tomoya SHIMURA, Nobuhito MORI, Global Tropical Cyclone Track Detection and Analysis of the d4PDF Mega-ensemble Projection, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2019, 75 巻, 2 号, p. I.1207-I.1212.
- [62] 井手 喜彦, 竹田 聖二, 児玉 充由, 山城 賢, 橋本 典明, 大規模アンサンブル気候予測データ (d4PDF) に基づく有明海周辺での台風特性の将来変化に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 2019, 75 巻, 2 号, p. I.55-I.60.
- [63] 梅田 尋慈, 中條 壮大, 森 信人, 大規模アンサンブル気候予測データ (d4PDF) を用いた全球確率台風モデルの開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2019, 75 巻, 2 号, p. I.1195-I.1200.
- [64] 五十嵐 雄介, 野口 七海, 中園 大介, 牛木 賢司, 秩父 宏太郎, 渡邊 国広, 森 信人, 大規模アンサンブル気候予測データベース (d4PDF) を活用した設計外力相当の高潮・波浪に対する気候変動の影響評価手法の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2022, 78 巻, 2 号, p. I.967-I.972.
- [65] 野村 明弘, 佐藤 典之, 石川 浩希, 早川 哲也, 岩崎 慎介, 大塚 淳一, 森 信人, 渡部 靖憲, d4PDF を用いた設計波高の将来変化の効率的な推定手法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2022, 78 巻, 2 号, p. I.937-I.942.
- [66] 有働恵子・武田百合子・横尾善之 (2016): 日本全国の河川から海岸への土砂供給ポテンシャルと砂浜侵食との関係, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 72, No.2, I.799-I.804.
- [67] IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32.
- [68] 立川康人・滝野晶平・藤岡優子・萬和明・キムスンミン・椎葉充晴 (2011): 気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), 67, 1-15.
- [69] 森信人・福井信気・志村智也 (2020): 気候変動を考慮した我が国の三大湾の高潮最大潮位偏差についての研究レビュー, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 76, 1-6.

- [70] 森信人・志村智也・安田誠宏・間瀬肇 (2010): 地球温暖化に伴う極大波高の将来変化予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 66, 1231-1235.
- [71] Udo, K. and Takeda, Y. (2017): Projections of Future Beach Loss in Japan Due to Sea-Level Rise and Uncertainties in Projected Beach Loss, Coastal Engineering Journal, 59, 174006.
- [72] Udo, K., Y. Takeda, J. Yoshida, and A. Mano (2013): Long-term area change of two tidal flats in Japan and its future projection due to sea level rise, Journal of Coastal Research, 65(sp2), 1975-1980.
- [73] Ritphring, S., Somphong, C., Udo, K. and Kazama, S. (2018): Projections of future beach loss due to sea level rise for sandy beaches along Thailand 's coastlines, Journal of Coastal Research, Sp. Iss. 85, 541-545.
- [74] Sharaan, M. and Udo, K. (2020). Projections of future beach loss along the Mediterranean coastline of Egypt due to sea-level rise, Applied Ocean Research, 94, 101972.
- [75] Vousdoukas, M.I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L. et al. (2020): Sandy coastlines under threat of erosion. Nature Climate Change, 10, 260-263.
- [76] 孫彰培・野田英明・松原雄平・黒岩正光 (1997): 高潮による海浜変形に関する研究, 海岸工学論文集, 44, 641-645.
- [77] 柳嶋慎一・加藤一正・藤江耕二・岩渕哲治・猿田光隆・平戸誠一郎・堀謙吾 (2000): 虹ヶ浜海岸における台風第 9918 号による高潮災害, 海岸工学論文集, 47, 326-330.
- [78] Labuz, T. A. (2014): Erosion and its rate on an accumulative Polish dune coast: the effects of the January 2012 storm surge, Oceanologia, 56, 307-326.
- [79] 国立社会保障・人口問題研究所 (2018): 日本の世帯数の将来推計 (全国推計) 2018(平成 30) 年推計. <https://www.ipss.go.jp/pp-ajsetai/j/hprj2018/t-page.asp>
- [80] 国土交通省 (2021) インフラ長寿命化計画 (行動計画) 令和 3 年度-令和 7 年度, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/tyouzyumyou2honbun.pdf
- [81] 国土強靱化推進本部 (2022) 国土強靱化年次計画 2022, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kakuteihonbun.pdf
- [82] 吉田惇・有働恵子・河野達仁・真野明 (2014): 海面上昇に伴う砂浜侵食に対する適応策としての最適養浜量の推定手法の構築, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 70, I.1386-I.1390.
- [83] Hinkel, J., Nicholls, R. J., Tol, R. S. J., Wang, Z. B., Hamilton, J. M., Boot, G., Vafeidis, A. T., McFadden, L., Ganopolski, A. and Klein, R. J. T. (2013): A global analysis of coastal erosion of beaches due to sea-level rise: An application of DIVA, Global Planet. Change, 111, 150-158.
- [84] Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R. et al. (2018): The State of the World 's Beaches, Scientific Reports, 8, 6641.
- [85] Bruun, P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. Waterways and Harbors Div., ASCE, 88(WW1), pp. 117-130.

- [86] 三村信男, 井上馨子, 幾世橋真, 泉谷尊司, 信岡尚道 (1994): 砂浜に対する海面上昇の影響評価 (2) –予測モデルの妥当性の検証と全国規模の評価–, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 1161-1165.
- [87] Cooper, J.A.G. and Pilkey, O.H. (2004): Sea level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule, *Global Planet Change*, 43, 157-171.
- [88] Ranasinghe, R., Callaghan, D. and Stive, M.J.F. (2012): Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun Rule, *Climatic Change*, 110, 561-574.
- [89] 農林水産省農村振興局・農林水産省水産庁・国土交通省河川局・国土交通省港湾局 (2004): 海岸事業の費用便益分析指針 (改訂版), 103p.
- [90] 大野栄治・林山泰久・森杉壽芳・野原克仁 (2009): 地球温暖化による砂浜消失の経済評価: 旅行費用法によるアプローチ, *地球環境*, 14, 291-297.
- [91] Nakajima, K., Sakamoto, N., Udo, K., Takeda, Y., Ohno, E., Morisugi, M., and Mori, R. (2020): Cost-Benefit Analysis of Adaptation to Beach Loss Due to Climate Change in Japan. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 715.
- [92] Somphong, C., Udo, K., Ritphring, S., and Shirakawa, H. (2022) A spatial hedonic analysis to estimate the value of beachfront with respect to the hotel room rates in Thailand, *Ocean and Coastal Management*, 226, 106272.
- [93] 茅沼耕平, 有働恵子 (2023): 砂浜への近接性がホテルの宿泊価格に与える影響, *土木学会論文集*, 79(17), 23-17186.
- [94] 有働恵子, 浅野仁作, 越村俊一 (2023): モバイル空間統計を用いた砂浜利用実態の把握とその課題, *土木学会論文集*, 79(17), 23-17177.
- [95] 寺田雅之, 川上博, 岡島一郎, 篠崎俊哉, 坂下昭宏: モバイル空間統計の実用化に向けた取り組み, *デジタルプラクティス*, Vol. 6, No.1, pp. 35-42, 2015.
- [96] 厚生労働省「データからわかる–新型コロナウイルス感染症情報–」, 新規陽性者数の推移 (日別), <https://covid19.mhlw.go.jp/extensions/public/index.html>.
- [97] 内閣官房, 基本的対処方針に基づく対応, <https://corona.go.jp/emergency/>
- [98] 真子和也 (2022): Go To トラベル事業の経緯と論点: 令和 3(2021) 年度末の状況, 調査と情報–Issue brief–, No. 1193, pp.1-13.
- [99] データ統合・解析システム DIAS とは <https://diasjp.net/about/>
- [100] Foster, Ian, and Carl Kesselman, eds. *The Grid 2: Blueprint for a new computing infrastructure*. Elsevier, 2003.
- [101] Sekiguchi, Satoshi, et al. "Design principles and IT overviews of the GEO grid." *IEEE Systems Journal* 2.3 (2008): 374-389.
- [102] RFC 3820 - Internet X.509 Public Key Infrastructure (PKI) Proxy Certificate Profile
- [103] 山本直孝, et al. "分散環境下における情報システムの信頼性 (ストレージの信頼性)." *日本信頼性学会誌 信頼性* 32.3 (2010): 142-149.

- [104] 津波防災研究ポータル <https://tsunami-portal.bosai.go.jp>
- [105] Shigihara, Yoshinori, et al. "Variation analysis of multiple tsunami inundation models." Coastal Engineering Journal 64.2 (2022): 344-371.
- [106] 5 Star Open Data <https://5stardata.info/>
- [107] 津波波形データベース <https://kiyuu.bosai.go.jp/TwDB/>
- [108] 津波痕跡データベース <https://irides.tohoku.ac.jp/publication/database/tsunami-db.html>

補遺

次ページ以降、補遺として、2024年5月10日に開催された重点研究課題報告会の報告・発表資料、2023年11月14日に京都市で開催した、海岸工学講演会前日シンポジウム「沿岸災害デジタルツインの構築と活用に向けて」の報告・発表資料を添付する。

沿岸災害デジタルツインの創成に関する研究

代表研究者
越村 俊一
東北大学災害科学国際研究所



研究目的

- デジタルツインコンピューティングのパラダイムを海岸工学に導入することで新たな研究課題を探索するとともに、周辺の学術分野とも連携しながら、新たな海岸工学の地平を拓く。
- 沿岸環境を対象に、物理世界では時間的・コスト的に不可能といえるような様々な検討、設計、最適解探索を仮想世界で実行し、それを物理世界にフィードバックする。
- 海岸工学および周辺分野の研究者や実務家が集い、多様な知が集まることで新たな知の体系化を図る（集合知、総合知）。

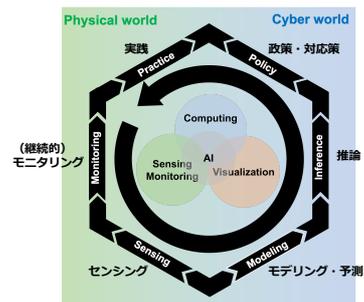
2

デジタルツインの定義



3

沿岸災害デジタルツインの枠組



Koshimura et al. (2024, Elsevier)

4

海岸工学委員会沿岸災害デジタルツイン研究小委員会

- ◆目的
デジタルツインコンピューティングのパラダイムを海岸工学に導入することで新たな研究課題を探索するとともに、周辺の学術分野とも連携しながら、新たな海岸工学の地平を拓く。
- ◆メンバー (62名)
小委員長：越村俊一・森信人，副小委員長：有働恵子・近貞直孝，幹事長：奥村与志弘・二宮順一
- ◆WG構成
WG0 (総括班)：各WGの連携を促進し、目標達成に向けた活動を加速。
WG1 (センシング, モニタリング)：新たな海洋・沿岸環境のセンシング・モニタリング技術 (リモートセンシング含む) のレビューと検討。
WG2 (モデリング)：海洋・沿岸の諸現象のリアルタイム解析等幅広い予測を行うための基盤となるモデリング技法に関する検討。
WG3 (データ駆動科学)：高次元のセンシング・モニタリングデータの潜在構造やプロセスの解明に向けたデータ駆動科学の海岸工学への適用に関する検討。
WG4 (社会対応)：デジタルツインによる沿岸災害過程の解明と対応・適応策。
WG5 (デジタルツイン基盤)：沿岸災害デジタルツインの概念設計と要件定義。
WG6 (アーカイブ)：デジタルツインアーカイブとしての機能要件検討。

WG0	6名
WG1	19名
WG2	29名
WG3	21名
WG4	17名
WG5	20名
WG6	13名

5

Research Questions Project Definitionワークショップの開催 2023年1月30日

- 沿岸の諸問題とはなにか？DTで解決したい問題を具体的に(e.g.津波の浸水をリアルタイム予測、個人向けの避難誘導を実現ー地震・沖合観測・リアルタイムシミュレーション・人流予測・避難経路最適化) 未来志向で、今できることだけではなく、将来やりたいこと。
- DTのユーザ・ステークホルダーは？ (e.g. 国、自治体、事業者、スマートデバイスをもつ一般人、自動運転車)
- 現実世界→仮想世界になにをコピーするか？
- センシング、モデリング、シミュレーションの現状と課題
- 将来予測に向けた不確実性とは？
- エビデンス (レジリエンス指標) とは？
- アウトプットはなにか (対応策、政策、適応策など、レジリエントな社会の方向性をどのように提示するか) ？

6

活動実績と成果 国内外に開かれた活動・交流・情報配信

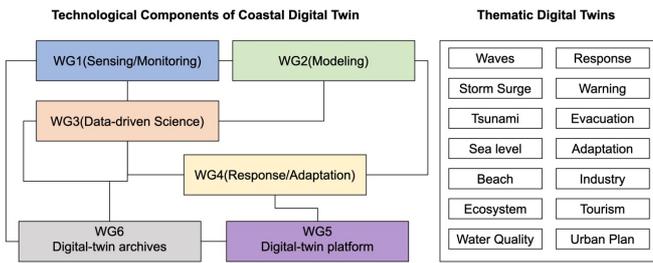
第1回会議開催 (2022年12月12日) ※開始前
 第2回会議開催 (2023年1月30日) @東京, Project Definition Workshop開催
 第3回会議開催 (2023年6月22日) @金沢大学
 データ駆動科学集中講義 (2023年9月13-14日) @徳島大学
 第4回会議開催 (2023年11月14日) @京都市
 海岸工学前日シンポジウム (2023年11月14日) @京都テルサ&オンライン

- Asia Oceania Geosciences Society (2023年7月) において企画セッション“Digital Twin Paradigm for Disaster Resilience”を開催
- R6年能登半島地震津波の調査・分析
- Elsevier Book Chapter (January 2024) のチャプター発刊“Digital-twin Paradigm for Coastal Disaster Risk Reduction and Resilience”
- 国内外の会議におけるデジタルツインをテーマにした招待講演5件

Project Definition Workshopの様子

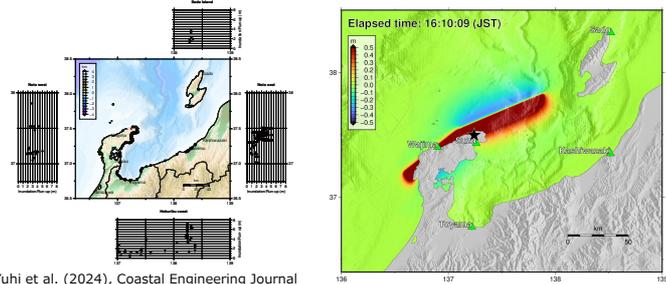


沿岸災害デジタルツインの要素と適用先 Koshimura et al. (2024)



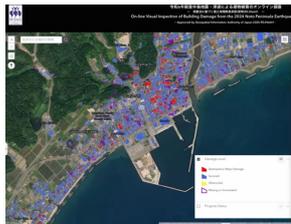
令和6年能登半島地震津波の調査分析

- 海岸工学委員会の有志により、R6年能登半島地震津波調査グループを1月3日に結成
- 先遣隊の調査 (1月4日) 実施。1月5日以降、15大学・機関が調査を開始。
- 調査データをいち早く省庁に提供し、復旧計画策定に活用された。



Yuhi et al. (2024), Coastal Engineering Journal

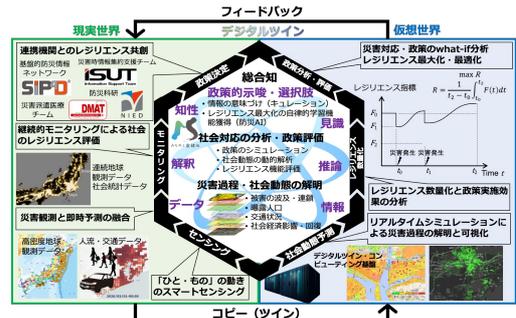
家屋13万棟のオンライン被害調査



人流データ解析による沿岸部の社会動態



津波災害デジタルツイン SIP3期 (スマート防災ネットワークの構築) に採択 (2023年9月~)



沿岸災害デジタルツイン研究小委員会, WG1 (センシング, モニタリング)

WG1のタスク: 新たな海洋・沿岸環境のセンシング・モニタリング技術(リモートセンシング含む)のレビューと検討を行う。

メンバー(敬称略): 【総括班】越村(東北大), 二宮(金沢大), 有働(東北大), 森(京大)

【大学】マス・エリック(東北大), 比嘉(横国大), 田村(港空研), 吳(東京海洋大), 田中(広工大), 富田(名古屋大), 志村(京大)

【企業】熊谷(パソコン), 山本(復建調査設計), 酒井(東洋建設), 水野(五洋建設), 宇野(エコー)

【研究所】井上(港空研), 大倉(港空研), 新井田(電中研), 岡田(電中研), 細川(港空研)

沿岸災害デジタルツイン研究小委員会
WG1 (センシング, モニタリング) 活動報告

小委員会

WG1

2023年

■ 1月13日

■ 1月17日から1月24日まで

■ 1月30日

■ 4月7日

■ 5月10日

■ 5月31日

■ 6月22日

■ 9月25日

全体会合

全体会合

第一回会合: WEB会議
・WG1に係るプレゼン, 3件
・討論
意見収集: メール,

WGメンバーの知識・興味に関するアンケート
2年程度の作業見通しの周知
小WG結成, 作業

小WG作業の中間とりまとめ

沿岸災害デジタルツイン研究小委員会
WG1 (センシング, モニタリング) 活動報告, 小WG

沿岸災害に利用できるモニタリング・センシング技術の整理

現状, 近い将来の技術(5-10年以内に実現可能な技術)の中でできることと課題をまとめる。また, 「夢」の技術についても整理しつつ, 「現状」・「近い将来」・「夢」の境目を意識して, モニタリング・センシング技術の知見の整理をする。

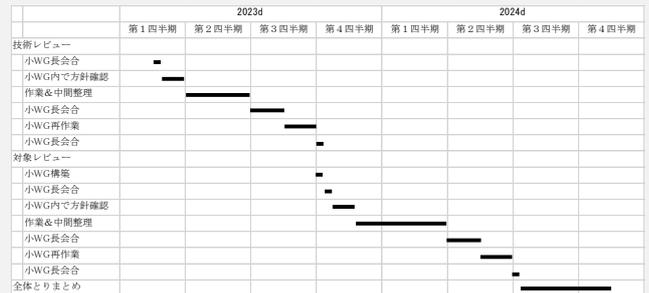
●衛星: 星(海洋大), 比嘉(横国大), 大倉(港空研)
キーワード: 衛星コンステレーション, 小型衛星

●UAV・AUV: 細川(港空研), 宇野(エコー), 新井田(電中研)
キーワード: スケール(高度による制約), 搭載できるセンサー(可視画像, SAR), 恒常化(自動化)

●オンサイトでの間接測定技術(音波・音響・電波・レーダー): 水野(五洋建設), マス・エリック(東北大), 岡田(電中研)
キーワード: ADCP, 音響トモグラフィ, 海洋レーダー, LIDAR

●直接測定(ブイ・フロート): 志村(京大防災研), 井上(港空研), 山本(復建調査設計), 熊谷(パシフィックコンサルタンツ)
キーワード: ARGOフロート, 漂流漂流ブイ, 機能&安価

沿岸災害デジタルツイン研究小委員会
WG1 (センシング, モニタリング) 活動報告, 小WG



沿岸災害デジタルツイン研究小委員会
WG1 (センシング, モニタリング) 活動報告, 小WG

海岸工学企画セッション2
沿岸災害デジタルツインの構築と活用に向けて

沿岸災害DT研究小委員会
WG2(モデリング)活動報告

2023/11/14 15:00~17:00 京都テルサ

沿岸災害デジタルツイン研究小委員会

- 目的
デジタルツインコンピューティングのバラタイムを海岸工学に導入することで新たな研究課題を探索するとともに、周辺の学術分野とも連携しながら、新たな海岸工学の地平を拓く。
- メンバー (62名)
小委員長: 越村優一・森信人, 副小委員長: 有働恵子・近貞直孝, 幹事長: 奥村与志弘・二宮順一
- WG構成
WG0 (総括用): 各WGの連携を促進し、目標達成に向けた活動を加速。
WG1 (センシング, モニタリング): 新たな海洋・沿岸環境のセンシング・モニタリング技術(リモートセンシング含む)のレビューと検討。
WG2 (モデリング): 海洋・沿岸の諸現象のリアルタイム解析等幅広い予測を行うための基盤となるモデリング技法に関する検討。
WG3 (データ駆動科学): 高次元のセンシング・モニタリングデータの潜在構造やプロセスの解明に向けたデータ駆動科学の海洋工学への適用に関する検討。
WG4 (社会対応): デジタルツインによる沿岸災害過程の解明と対応・適応策。
WG5 (デジタルツイン基盤): 沿岸災害デジタルツインの概念設計と要件定義。
WG6 (アーカイブ): デジタルツインアーカイブとしての機能要件検討。

WG0	6名
WG1	19名
WG2	29名
WG3	21名
WG4	17名
WG5	20名
WG6	13名

メンバー(29名)

氏名	所属機関または社名	部署名または部署名	職名	参加希望WG
高川 智博	海上・港湾・航空技術研究所	港湾空港技術研究所	グループ長	WG2,6
木原 直人	電力中央研究所	サステナブルシステム研究本部	上席研究員	WG2
二宮 順一	東北大学	国土基盤事業本部 港湾部	准教授	WG1,2,3
熊谷 健蔵	パシフィックコンサルタンツ株式会社	国土基盤事業本部	専任員	WG1,2,3
田村 仁	防災科学国際研究所	災害情報研究グループ	主任研究員	WG1,2,3
新井田 靖郎	電力中央研究所	サステナブルシステム研究本部	主任研究員	WG1,2,3
宇野 隆之	株式会社エコー	防災事業部	上席技術員	WG1,2,3,4,5
越村 優一	東北大学	災害科学国際研究所	教授	WG1,2,3,4,5,6
比嘉 隆士	横浜国立大学	大学院都市イノベーション研究院	准教授	WG1,2,3,4,5,6
森 信人	京都大学	防災研究所	教授	WG1,2,5
マス エリック	東北大学	災害科学国際研究所	准教授	WG1,2,5
山本 節雄	建設省設計株式会社	DX推進センターICT推進室	上席主任エンジニア	WG1,2,5
田中 健樹	広島工業大学	環境工学部環境工学系	教授	WG1,2,6
田中 明	九州大学	大学院工学研究院環境社会部門	准教授	WG2
菅原 大助	東北大学	災害科学国際研究所	准教授	WG2
松崎 義孝	港湾空港技術研究所	海洋環境制御システム研究領域 海洋汚染防除研究グループ	主任研究員	WG2
岡田 清宏	パシフィックコンサルタンツ株式会社	国土基盤事業本部 港湾部 港湾防災室	課長補佐	WG2
岡田 直人	パシフィックコンサルタンツ株式会社	国土基盤事業本部 港湾部 港湾防災室	課長主任	WG2
李 漢洙	広島大学	IDEC国際連携機構	助教	WG2
窪田 幸也	建設技術科学大学	建築・都市システム学系	助教	WG2,3
福井 信気	鳥取大学	工学部	助教	WG2,3
阿部 郁男	東宮大学	社会環境学部	教授	WG2,3,5
堀田 直人	早稲田大学大学院	社会学部	学生(後期博士課程)	WG2,3,5
堀 博英	農業・食品産業技術総合研究機構	農村工学研究部門水利工学研究領域	領域長	WG2,4
新井 尚希	建設省設計株式会社	防災研究所	主任研究員	WG2,4
高島 和行	近畿大学	理工学部	准教授	WG2,4,5
高島 拓光	NPO法人環境防災コンシェルジュ	研究部門	理事員	WG2,4,8
伊藤 理	東芝建設株式会社	情報研究所	研究員	WG2,5
川越 浩司	KK技術研究所		代表	WG2,6

活動状況

- 2023/11/17 WG2会議 (WEB)
- 2023/11/30 全体会議 (東京)
- 2023/6/22 全体会議 (金沢+WEB)
- アンケートで3つのサブワーキングを設定 (津波、台風、沿岸環境)
- 2023/9/29 SWGリーダー会議 (東京)
- 2023/10/17 台風SWGキックオフ (WEB)
- 2023/10/20 沿岸環境SWGキックオフ (WEB)
- 2023/10/25 津波SWGキックオフ (WEB)
- 2023/11/2 SWGリーダー会議 (WEB)
- 2023/11/14 海岸工学企画セッション2 (京都+WEB)

- まずは事例収集し、インプット、モデル、アウトプットに分けて情報を整理
- データの粒度・解像度、(時間空間的な)範囲、更新頻度などより細かい項目分けが考えられるが、まずは大雑把な枠で整理する
- 収集事例⇒今後どういうDTがあると良いか。それに対し、(インプットとして)どういうセンシングデータが必要か、(アウトプットを)どのようなユーザが使うか、どのようなモデルが必要か、などの議論に進んでいく

津波SWG

氏名	所属機関または社名	部署名または部署名	職名	参加WG
阿部 郁男	常葉大学	社会環境学部	教授	WG2,3,5
岡田 清宏	パシフィックコンサルタンツ株式会社	国土基盤事業本部 港湾部 港湾防災室	課長補佐	WG2
木原 直人	電力中央研究所	サステナブルシステム研究部	上席研究員	WG2
菅原 大助	東北大学	災害科学国際研究所	准教授	WG2
高梨 和光	NPO法人環境防災コンシェルジュ	研究部門	理事長	WG2,4,6
福井 信気	鳥取大学	工学部社会システム土木系学科	助教	WG2,3
マス エリック	東北大学	災害科学国際研究所	准教授	WG1,2,5

津波災害DT 事例収集

#	事例名	インプット	モデル	アウトプット
1	津波災害デジタルツイン (東北大)	災害前後の地震動・地殻変動や潮位条件・沖合水位などの多様な地球観測データ 海洋施設や重要施設など 社会基盤のセンシングデータ		地震発生から5分を目安に空間分解能10メートルという詳細な津波浸水予測
2	Real-Time Tsunami Inundation Forecasting - Leveraging AI (富士通)	Real-Time Tsunami Inundation Forecasting - Leveraging AI (富士通) 教師データ: 津波浸水計算結果 インプット: GNSS地球観測データ(49地点)	DNN (cf. Makinoshima et al., 2021)	浸水深 浸水範囲
3	DT-OEO (Digital Train for GEOphysical extremes)	Improved earthquake solutions, see level tsunami data and GNSS	Tsunami-HySEA model (Scheu et al., 2021)	
4	Real-time tsunami risk evaluation method by synthetic dynamics and Bayesian update (東北大)	地震発生時に観測される沖合の波高データ	ベイズ更新 (cf. 野村ら, 2022)	最大浸水深分布 津波到達時刻
5	Coastal tsunami prediction in Tohoku region, Japan, based on S-net observations using artificial neural network (JAMSTEC, 東大地震研等)	S-netにおける津波観測データ	ANN	沿岸部での津波高
6	沖合観測波高データに基づく津波浸水アンサンブル予測スキーム (高川・富田, 2014, 2015)	GPS波高計などによる沖合の波高データ	階層ベイズモデル	運用区間をもった浸水深、浸水範囲

台風災害DT 事例収集まとめ

- ・ 基盤的な物理ベースのモデルが多く整備されている。
- ・ インPUTは**定期的**に更新される気象GPV予測データやその**アンサンブル**など
- ・ 台風コースなどにより特定地点の被害が大きく変化するため、アンサンブル等による**予測のばらつき**の評価が重要
- ・ アウトプットもGPVやそのアンサンブルデータなど、ユーザーが特定用途に向けて**活用しやすい形**で提供されている
- ・ 過去イベントの**アーカイブ**を提供するものもある。
- ・ リアルタイム用途のモデルは**物理ベース**のシミュレーションが主体（津波に比べると比較的計算時間をとることができるため）。
- ・ 気候変動の影響評価など計画用途では、多数のアンサンブルを対象とするため、**機械学習ベース**の軽量なモデルが活用されることもある。
- ・ 海上工事の際に予報会社から波浪予測情報などを購入するが、**自前の観測データ**でバイアス補正を行うことがある。

沿岸環境SWG

氏名	所属機関または社名	部署名または部署名	職名	参加WG
新井田 雄郎	電力中央研究所	サステナブルシステム研究本部	主任研究員	WG1,2,3
山本 裕規	復建調査設計株式会社	DX推進センター-IOT推進室	上席主任エンジニア	WG1,2,5
田井 明	福岡工業大学		准教授	WG2
松崎 義幸	港湾空港技術研究所	海洋環境制御システム研究領域 海洋汚染防除研究グループ	グループ長	WG2

沿岸環境DT 事例収集

#	インPUT	モデル	アウトプット
1	伊勢湾シミュレータ/EcoPARI	気温、日射量、降雨量、大気放射量、海上風、河川流入流量・負荷量、潮汐、水質観測結果、海底地形	流動モデル 生態系モデル(DO、植物プランクトン、栄養塩等) 粒子追跡モデル 海草、魚、魚、二枚貝モデル 粒子追跡モデル ナッジング(風向風速観測値の同化)
2	DILPARI	GPV(風向風速、波浪)、油初期位置(手入力、WAVEKによるXバンドレーダ解析結果)、必要に応じて風向風速観測結果	
3	Deng et al.(2021)	無機窒素素(TN)、 PO_4 、クロロフィルa、溶存酸素、水温、水中照度、BOD、pH	人工ニューラルネットワーク(ANN)とサポートベクターマシン(SVM)
4	Zhou(2020)	DO、NH3-N、CODCr、pH、ORP、EC、濁度、水位、水温、降水量、風速、光	長・短期記憶(LSTM)
5	東京湾水質観測水場分布予測システム	気温、日射量、降雨量、大気放射量、海上風、河川流入流量・負荷量、潮汐、水質観測結果、海底地形	流動モデル 低次生態系モデル
6	大塚湾リアルタイム水質再現予測システムの開発(研究)	リアルタイムの海洋、河川、気象データ(自動的に流動水質モデルに取り込む) ・大阪湾水質観測点自動観測データ(水温、塩分、Chl、DO、濁度) ・水文水質データベース(河川水位、水温、DO) ・AmeDAS観測値(気温、湿度、気圧、雨量、雲量、風向、風速、日射量) ・気象予報GPVデータ(※)※日射量はAmeDASのみ	オープンソース海洋モデルROMS(Regional Ocean Modeling System)

沿岸環境DT 事例収集

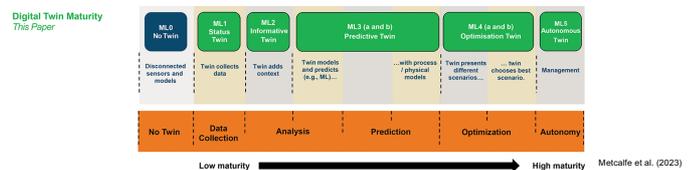
#	インPUT	モデル	アウトプット
7	日本の生物多様性地図化@プロジェクト	生物多様性ビッグデータ	GIS(日本の自然環境の可視化) 日本全土で1kmメッシュの空間解像度で可視化
8	リアルタイム水質情報配信システム(徳島県水産研究課)	水温・塩分・硝酸塩(自動観測)	データ可視化・公開サーバーでグラフ表示 処理
9	European Digital Twin of the Ocean	既存の海洋観測データをベースに基盤を構築 Copernicus Marine Service (CEMENS): https://marine.copernicus.eu/ Copernicus Data and Information access services(DIAS): https://www.copernicus.eu/en/access-data/dias European Marine Observation and Data Network(EMODnet): https://emodnet.ec.europa.eu/en	EDITO-Infra(プラットフォーム)を構築。 既存の海洋観測データ等を単一のプラットフォームに統合し、European Digital Twin Oceanの開発のためのプラットフォームを提供している。 ユーザー独自のシミュレーションを実行し、What-ifシナリオをコンピューティングプラットフォームに展開して、システム全体の領域にわたる特定のユースケースを実現するオンデマンドモデリング機能(EDITO-Infra エンジンに基づく)を提供している。

沿岸環境DT 事例収集まとめ

- ・ モデル、インPUT、アウトプットとも多様性が高い
- ・ 生態系モデルは多種多様。アウトプットの項目も多い。どれをどのように使うか？どのように提示するかが重要か
- ・ データをわかりやすく表示するだけでもデジタルツインではないか？
- ・ WEBサイト等でデータを表示することで、漁業者等が独自に活用する例も
 - ・ 海苔養殖：海水温の予測情報をもとに海苔の網出し、引き上げの判断
 - ・ アナゴ漁：DOの変化が大きい海域で良くとれる

全体のまとめ

- ・ 非専門家ニーズ(知りたいこと、知りたいタイミング)に合わせてどういったモデルコンピネーションでそれを実現するのかも、広い意味でのモデリング
- ・ 目的特化型のモデリングもあれば、汎用的なモデリングもある。
- ・ 目的特化型は最適化や不確実性の把握等に有効
- ・ 汎用モデルは思いがけない利用方法が生まれる可能性も
- ・ 今後はデジタルツイン成熟度を参考に、事例を整理する予定

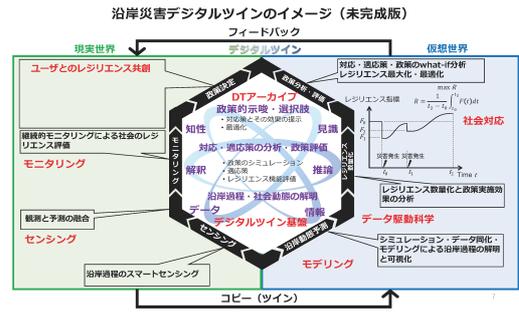


日時/場所 2023年11月14日(火) 15:00~17:00 / 京都テラス 視聴覚研修室
開催 テーマ 沿岸災害デジタルツインの構築と活用に向けて

沿岸災害DT-WG3 (データ駆動科学)からの報告

メンバー (21名)

馬場俊孝(主査, 徳島大), 田村仁(副査, 港空研), 越村俊一(東北大), 阿部郁男(富士常葉大), 二宮順一(金沢大), 水谷夏樹(大阪産業大), 熊谷健蔵(パシフィックコンサル), 比嘉紘士(横国大), 稲垣直人(早稲田大), 豊田将也(豊橋科技大), 細川真也(港空研), 本間翔太(港空研), 志村智也(京大), 高橋研也(五洋建設), 小俣哲平(大成建設), 新井田靖郎(電中研), 福谷陽(関東学院大), 宇野喜之(エコー), 福井信気(鳥取大), 岡田輝久(電中研), 上谷政人(徳島大)

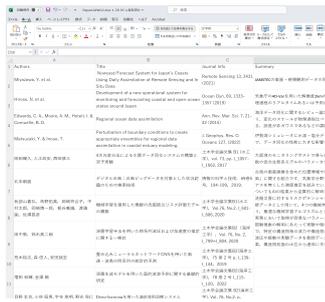


3年間の活動のイメージ (2023年1月作成)

1. 海岸工学におけるデータ駆動科学の適応例を収集し, 分析する。(1年目)
2. 海岸工学分野以外のデータ駆動科学の適応例を収集し, 分析する。(1年目)
3. データ駆動科学に詳しい専門家を招聘し, みなで理論を勉強する。(2年目)
4. カギとなるデータの情報について, センシング, モニタリング班から情報をもらおう(2年目後半)
5. モデリング班からも情報をいただき, データに加えて, モデリング手法に適したデータ駆動科学の手法を考える, あるいは, データ駆動科学に適したセンシング, モニタリング, モデリング手法を提案する(2年目後半)
6. データ駆動科学に基づく政策決定アウトカムについて考察する(3年目前半)
7. 1-7をレビューペーパーにまとめる。(3年目後半)

データ駆動科学の適応例の収集・分析

○およそ50編の関連論文(情報)を収集



データ駆動科学に詳しい専門家を招聘し, みなで理論を勉強する.

- 日時 2023年9月13日(水)8時40分~9月14日(木)17時50分
- 場所 徳島大学常三島キャンパス+オンライン

- 講師 五十嵐康彦(筑波大)
- 参加者 対面 11人
オンライン 47人

Principal Investigator (PI):
五十嵐 康彦 (Yasuhiko Igarashi)

筑波大学システム情報センターシニアサイエンス教授 准教授
科学情報情報センター主任研究員(兼任)
筑波大学 データサイエンス教育研究センター 非常勤講師(兼任)

研究班・職歴

2012.4~2014.3 日本学術振興会 特別研究員(DC)
[受入機関: 東京大学]

2014.4~2017.3 東京大学大学院工学系研究科情報科学研究所
新学術領域「数値シミュレーション」専任研究員

2017.4~2017.9 物質材料研究機構・情報科学技術材料研究拠点
NIMS系本邦研究員




データ駆動科学勉強会の内容（90分×10コマ）

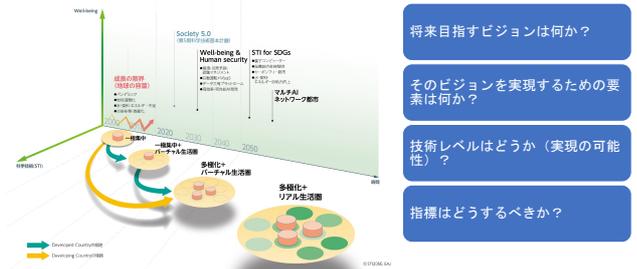
- 1. データの特徴を知り、関係を調べる — データ同士の比較（相関係数）
- 2. データをもとにした予測や分類（線形回帰） — 機械学習の基礎（回帰、分類、最小二乗法）
- 3. 木構造を用いたデータの分類と重要変数の抽出 — 教師あり学習1（決定木・ランダムフォレスト、交差検証）
- 4. Pythonの基礎とPythonによる演習1
- 5. モデルの簡略化とスパースモデリング — 教師あり学習2（構築したモデルの評価と選定ステップワイズ、情報量基準）
- 6. Pythonの基礎とPythonによる演習2
- 7. データ間の距離を測る、画像における重要な特徴量とは？ — 教師なし学習1（距離＋主成分分析）
- 8. Pythonの基礎とPythonによる演習3
- 9. データのグループ分け — 教師学習2（クラスタリング、k-means）
- 10. 深層学習、Transformer、ChatGPTとの関わり

3年間の活動のイメージ（2023年11月時点）

- ✓ 1. 海岸工学におけるデータ駆動科学の適応例を収集し、分析する。（1年目）
- ✓ 2. 海岸工学分野以外のデータ駆動科学の適応例を収集し、分析する。（1年目）
- ✓ 3. データ駆動科学に詳しい専門家を招聘し、みなで理論を勉強する。（2年目）
- 4. カギとなるデータの情報について、センシング、モニタリング班から情報もらう（2年目後半）
- 5. モデリング班からも情報をいただき、データに加えて、モデリング手法に適したデータ駆動科学の手法を考える。あるいは、データ駆動科学に適したセンシング、モニタリング、モデリング手法を提案する（2年目後半）
- 6. データ駆動科学に基づく政策決定アウトカムについて考察する（3年目前半）
- 7. 1－7をレビューペーパーにまとめる。（3年目後半）



適応という言葉を考えてみるか？



マルチAIネットワーク都市の実現に向けたロードマップ
 科学技術・イノベーション2050委員会・持続可能社会に向けた科学技術・イノベーションロードマップの提言: The Road to 2050, 日本エカ学アカデミー, 2022

- 将来目指すビジョンは何か？
- そのビジョンを実現するための要素は何か？
- 技術レベルはどうか（実現の可能性）？
- 指標はどうすべきか？

3つのサブワーキング

- 防災**
 岩前伸幸(鹿島) (主査) ・ 高島知行(近畿大) ・ 鶴留千晶(電中研),
 長谷川夏来(清水建設)
- 環境**
 比嘉純士(横国大) (主査) ・ 有働恵子(東北大) ・ 姫野一樹(国総研),
 細川真也(港空研)
- 経済**
 玉田崇(デロイト) (主査) ・ 桐博英(農研機構) ・ 田邊晋(国際航業),
 高梨和光(環境防災コンサルジェ), 富田孝史(名古屋大), 吉河秀郎(清水建設)
- 全体**
 有川太郎(中央大) (主査) ・ 宇野喜之(エコー) (副主査)

活動の記録

WG4(全体)	防災	環境	経済	備考
2023/1/17				2022/12/13小委員会 2023/1/30小委員会に向けて
2023/6/1				2023/1/30小委員会 (グループディスカッション等)
2023/7/4				2023/6/22小委員会 グループ分け
	2023/7/25	2023/7/24	2023/7/24	
	2023/8/4	2023/8/8		
	2023/8/29	2023/9/4	2023/8/29	
2023/9/8	2023/10/11	2023/10/13	2023/10/11	指標 (レジリエンス、Well-being、経済価値)
	2023/10/24		2023/10/20	
2023/11/2		2023/11/6		前日シンポにむけて



防災テーマ

岩前(鹿島) (主査) ・ 高島(近畿大) ・ 鶴留(電中研) ・ 長谷川(清水建設) ・ 宇野(エコー) ・ 有川(中央大)

津波災害に対するレジリエンスを対象とした指標の整理

Index	Indicator / Data	
	市民	自治体
① 凹まない力 災害に重ならない力	<ul style="list-style-type: none"> 居住地、生活圏の浸水深 避難の取組経路の確保状況 避難者の有無 	<ul style="list-style-type: none"> 浸水範囲、浸水深 避難人口、避難建物数 要支援者数、分屯 モニタリングの確保状況 ハザード情報の公開状況 避難情報の発信状況
② 落ち込まない力 被害を減少させる力	<ul style="list-style-type: none"> 避難訓練の参加回数 避難品の種類および数 自宅・職場の耐震化状況 避難場所、避難所の整備状況 避難場所、避難所の収容状況 	<ul style="list-style-type: none"> 被害想定 死者数、建物被害数、避難者数、住宅損壊者、経済被害額、etc. 避難訓練の実施状況、参加率 避難場所、避難所の整備率 備蓄品の耐震化率
③ 早く立ち直る力 機能水準の回復力	<ul style="list-style-type: none"> 保険への加入状況、支払の迅速度 震災証明の取得の迅速度 復旧状況、復旧状況 	<ul style="list-style-type: none"> 被害把握の迅速度 災害時対応力向上の継続状況 食糧、飲料等の供給能力
④ 元より良くなる力	<ul style="list-style-type: none"> 幸福度??? しっかりとこない 	<ul style="list-style-type: none"> 住みやすさ(利便性、快適度、etc.) 住民人口、就労人口、求職者数 事前復興計画の確定状況

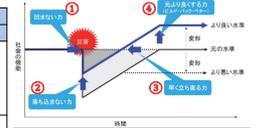


Figure from 「目田 (2023) : レジリエンス向上のためのデジタル防災技術: AI・データサイエンス論文集, 4(L), 44-59」

- 津波災害を対象に
- 凹まない力(災害に遭わない)
 - 落ち込まない力(被害を減少させる)
 - 早く立ち直る力(機能水準の回復力)
 - 元より良くなる力
- の各指標を整理
- 受益者として市民(個人や家庭)と自治体それぞれ想定

河豚外刀（地震、津波、高潮等）に対して、デジタルツイン上でリアルタイムにシミュレーションし、予防対応等を現実世界に活用することで、被害最小化や輸送円滑化、物流機能維持、被災後レジリエンス強化等を実現します

経済活動を担う港湾デジタルツイン（仮称）の目指すべき姿と適用例

目指すべき姿（やりたいこと）

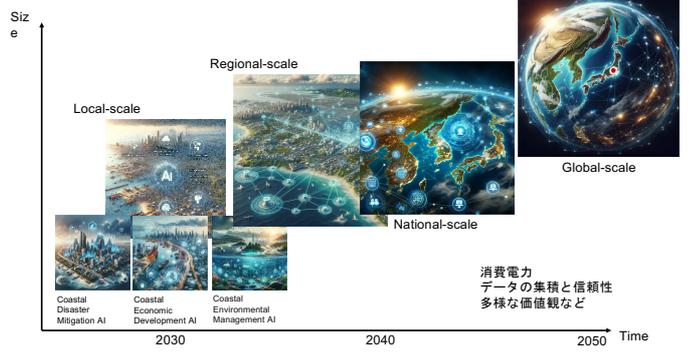
- 日本全国を網羅した空間スケールにおいて、対象外力（地震、津波、高潮等）に対して、**適用事例に応じた空間スケール・計算条件を自動設定でき、デジタルツイン上でリアルタイムにシミュレーション**できる
- シミュレーション結果の自動最適化評価（※1）**ができ、予防対応等をリアルタイムに現実世界で活用できる
- 域化評価機能—災害対策**—被害最小化や輸送円滑化、物流機能維持、被災後レジリエンス等を考慮
- 平常時から民間事業者を巻き込み、現場で活用してもらえる海運—港—船運という複合体としての自動化（※2）**を実現できる

※1: 空船人口の減少下でも物流増加トレンドに対応する技術を開発・導入

経済活動を担う港湾デジタルツイン（仮称）の適用

適用レベル	適用例
【全国レベル】 台風災害	<ol style="list-style-type: none"> 1. 現在の船舶位置、石炭・ガス等のエネルギー源の消費や搬入搬出状況をリアルタイムでデータ取得、デジタルツイン上に再現 2. 気象庁等の台風情報・進路の予測結果をデジタルツイン上に再現 3. 台風による影響がある地域で、船舶位置による物流機能停止やクルーズ船の寄港キャンセル等による経済的損失を算定 4. 現実世界の状況や外力情報等の変化をリアルタイムに追従して、経済的損失が最小となるような代替案をデジタルツイン上でシミュレーション 5. シミュレーション結果を現実世界での台風対応に活用
【都府県レベル】 有松船アクセス 経済効果算出	<ol style="list-style-type: none"> 1. 大規模災害後のアクセス道路の土砂災害も考慮し置き、背後地も含んだ物流・人流状況をデジタルツイン上に再現 2. デジタルツインの技術で、港湾業務、維持管理、リスクマネジメント、物流、商業や観光の効率化や改善ができるだけでなく、ドローン空港やデジタル島嶼として、新たな経済効果があるのを検証
【港レベル】 被災後のレジリエンス強化	<ol style="list-style-type: none"> 1. 「がれき・漂流物、土砂堆積等」は、水域だけでなく、陸域への影響が大きいため、水域だけでなく背後地も含めた空間スケールをデジタルツイン上に再現 2. 津波災害では、特に、被災後のレジリエンス強化に貢献できるデジタルツインを開発
【船レベル】 平常時 コンテナ船業務 効率化、省力化	<ol style="list-style-type: none"> 1. 空船人口の減少の一方、増えるコンテナ物流により、港内のコンテナ取扱の自動化（※） 2. 船の自動化の技術開発も進められている中、海運—港—船運という複合体としての自動化、AI導入の推進、コンテナ管理、ロボットオペレーター、自律航行

The Future Vision for a Multimodal Multi-AI Network System for Sustainable Societies



今後の活動方針

- デジタルツインを活用した適応策についての概念は、メンバー全体で共有できてきたと考えている
 - 各テーマ毎に、より目標（対象）を絞り、
 - 先行事例があるか（レビュー）
 - どのようなデータが活用できるか（足りてないか）
 - どのような指標が良いか
 - （将来を）予測できるモデルはあるか？（確率的アプローチ）
- などを議論し、デジタルツインを活用した適応策の具体例を示したいと考えている

沿岸災害デジタルツイン小委員会 WG5 (デジタルツイン基盤)

沿岸災害DTにおけるWG5の位置づけ

- DTに関する例題やWG1～WG4における検討を踏まえ、これらを実現していくためにはどういった基盤が必要であるかを検討する
- 第2回全体会議
 - ✓他分野のDTの実例やその基盤についてレビューしてはどうか

既往のデジタルツイン基盤に関する調査

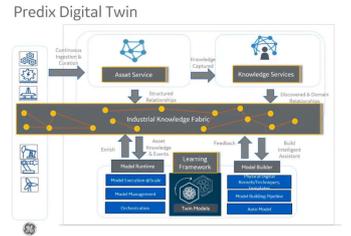
以下のデジタルツインに関連する取り組みについて調べた。

- GE (製造・プロセス技術：アメリカ)
- ヴァーチャルシンガポール (都市：シンガポール)
- 国土交通省PLATEAU (都市：日本)
- NTT IOWN (通信インフラ：日本)
- 東京都デジタルツイン実現プロジェクト (都市：日本)
- Destination Earth (地球：EU)
- Catapult Network (産業：イギリス)
- CESMII (製造・プロセス技術：アメリカ)
- Computational Man (医療：アメリカ)
- Functional Mock-up Interface (プロセス技術：欧州)
- デジタルツインに関する国内外の研究開発動向 (多分野：JST-CRDS)

既往のデジタルツイン基盤について

- GEアビエーション
 - ジェットエンジンの飛行中も多くのセンサーを稼働状態をリアルタイムでチェック
 - 燃やしている気体、砂埃といった破片の入り込み粒子の量、さらにはハードウェアで起こっている故障の予兆を分析
 - デジタル空間のモデルに反映していき、この期間で必要を把握し、保守・メンテナンスに役立てている

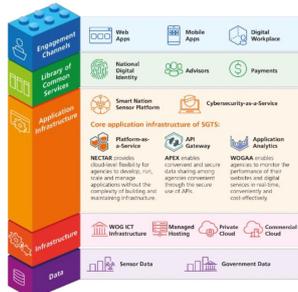
GEのIIoT (インダストリアルIoT) プラットフォーム部品・センサー・システム等の**構成管理**、ドメイン専門家による**知識化**、**組み合わせ**によるモデル構築、モデルの実行と**継続的な学習**からなる。



<https://www.gereports.jp/digital-wind-farm/>
https://www.obayashi.co.jp/kikan_obayashi/detail/kikan_61_hamura.html

既往のデジタルツイン基盤について

- ヴァーチャルシンガポール
 - シンガポールの地形や景観、建築物、交通網といった全てを3Dモデル化し、都市と人口動態などがどのように変化していくかを可視化することを第一の目的としている
 - 災害に対する影響や日照時間までシミュレーションできるように想定されているとい、街中のセンサーや公的機関のデータ、個人のスマートフォンのGPS情報など、あらゆるデータを集約することで、さまざまなシミュレーションを実行することも想定された一大事業
 - Google Earthなどは「目に見える形」を再現した地図ではないが、ヴァーチャル・シンガポールの3D都市モデルは、**セマンティクス (意味を持つモデル)**
 - 一つのビルでも外壁や屋上などそれぞれの面が分割されており、そのビルがオフィスなのか商業施設なのかという属性情報も持っている



デジタルガバメントプラットフォームイメージ

https://www.obayashi.co.jp/kikan_obayashi/detail/kikan_61_hamura.html
https://www.w3.org/WoT/ws-2019/Presentations%20-%20Day%2002_W3C%20IoT%20FINAL.pdf

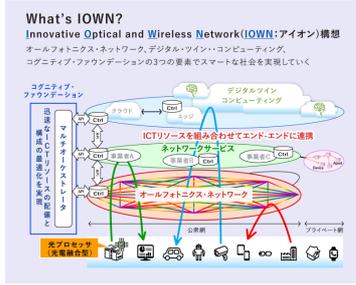
既往のデジタルツイン基盤について

- 国交省 Project "PLATEAU"
 - セマンティクスの3Dモデルであることの価値
 - 1ビジュアルライズ (視覚性)
 - 都市空間が立体的に認識できることで、説得力や説得力が向上
 - 2シミュレーション (再現性)
 - 立体情報を持った都市空間をサイバー上に再現することで、幅広く、精密なシミュレーションが可能
 - 3インタラクティブ (双方向性)
 - フィジカル空間とサイバー空間が相互に情報を交換し作用しあうためのプラットフォームを提供

既往のデジタルツイン基盤について

• NTT

- デジタルツインコンピューティングを含む、近未来のスマートな世界を支えるコミュニケーション基盤「IOWN (アイオン: Innovative Optical and Wireless Network)」の2030年頃の実現をめざし、研究開発



既往のデジタルツイン基盤について

• 東京都デジタルツイン実現プロジェクト

- あらゆる分野でのリアルタイムデータの活用が可能となり、意思決定や政策立案等で活用
- 目指す東京都のデジタルツインの姿を、「3D都市モデルやインターフェースが整備・継続的に更新され、全ての対象分野において都市の「何らかの」データが、都・企業・都民の意思決定、都の政策立案に活用できる、可変性を持った仕組みが構築されている状態」と定義
- 2030年までに実現、40年までに継続的なサイクル構築へ発展させる

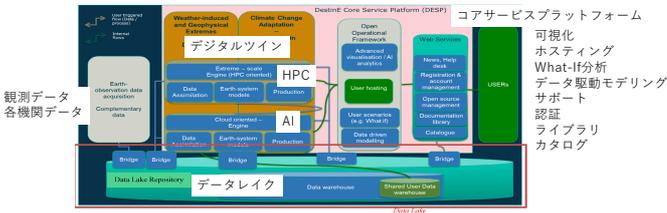


2020年度	2022年度	2030年度
デジタルツイン基盤の構築	デジタルツインの蓄積・利活用拡大	デジタルツインの発展・利活用拡大
<ul style="list-style-type: none"> 基礎業務の整備等とその役割分担の明確化 運用の主体等とその役割分担の明確化 運用に必要となるルール、仕様の確立・検討 ユースケース・サービスの検討 	<ul style="list-style-type: none"> 基礎業務の確立 各種機能拡張・連携 ルール・仕様の確立更新 集約サービスの構築 	<ul style="list-style-type: none"> デジタルツインの高度化・普及 高度化の実現にあつた役割・任務等の再検討

既往のデジタルツイン基盤について

• Destination Earth (EU, ESA, EUMETSAT, ECMWF)

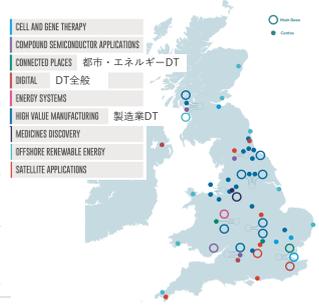
- 2021年より開始された、地球の超高解像度デジタルツインモデルを開発し、自然現象や関連する人間の活動を観測、モデル化、シミュレーションすることを目的とした「イニシアティブ」
- 自然災害、気候変動適応、海洋、生物多様性など様々な領域のテーマ別に構築されたデジタルツインを統合し、地球システム全体の包括的なデジタルツインを構築する



既往のデジタルツイン基盤について

• カタバルトネットワーク (UK)

- 国の産学連携強化策の一環として、Innovate UK が設立した産学協同の研究センタープログラム
- 投資・共同研究・人材育成・ネットワークングを進め「エコシステムを形成」



既往のデジタルツイン基盤について

• CESMII (Clean Energy Smart Manufacturing Innovation Institute)

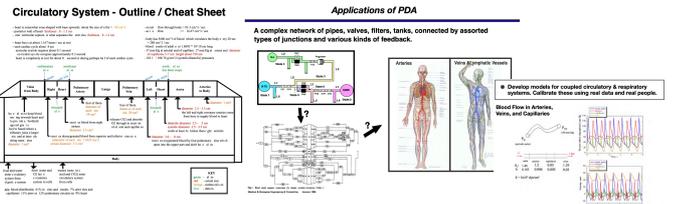
- 「Manufacturing USA」計画で設置された産学セクターのための先進製造研究基盤センター (MII: Manufacturing USA Innovation Institute) の一つ
- 製造業におけるエネルギー効率向上や産業競争力強化を目的として、デジタルツインを含むスマートマニュファクチャリングに関する研究開発、教育、エコシステムを構築



既往のデジタルツイン基盤について

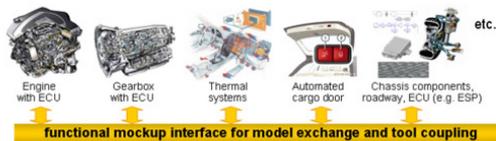
• Computational Man (US Naval Research Laboratory)

- 循環器系、呼吸器系、排泄系などの人体の生理学的システムをそれぞれモデル化し、それらをつなぎ合わせて人体のデジタルツインを作ろうとする研究



既往のデジタルツイン基盤について

- Functional Mock-up Interface (FMI)
 - 複数のシミュレーションモデルを組み合わせやすくするための、**モデル間のインターフェース**
 - モデル交換や連成シミュレーションを行う際の物理量のやりとりを規定する
 - 多数のシステムからなる車や船舶などのデジタルツイン構築を支援する



既往のデジタルツイン基盤について

- JST-CRDS調査報告書 デジタルツインに関する国内外の研究開発動向より

- 各種のデジタルツイン構築・活用のフェーズは以下の4つに分けられる
 1. 関連するデータの収集、格納、共有
 2. 部分的な問題を解決する局所的デジタルツイン
 3. 複数のデジタルツインが連携した包括的デジタルツイン
 4. 複雑な問題を解決可能な統合された自律的デジタルツイン
- 各分野に共通して見られた開発を共通基盤と捉えると以下があげられる。
 - 短期的にはプラットフォーム構築
 - データ連携、データ一元管理、データ標準化、相互運用性
 - 長期的にはシステム自動化、インタフェース（xR（拡張現実、仮想現実）、遠隔操作ロボット、自然言語処理）、AI（機械学習モデル、自己学習、エッジ処理、データの意味理解）、セキュリティ

これまでのレビューのまとめ

- 製造業DTでは、統合化されたDTを作るのではなく、個別DTの構築を進め、それをプラットフォーム化し、エコシステムを構築し、相互運用性を向上させ、DTを使用したDXが進められている。
- 気象DTでは、欧州において政府主導でイニシアチブを作り、データレイク、デジタルツイン、サービスプラットフォームからなるアーキテクチャを作り、それぞれ研究機関が分担して開発している。
- 都市DTではデータ収集・初期DT構築段階にあるものが多い。初期データは莫大な費用を投じて作成されるが、その継続的更新の仕組みづくりや活用が課題となっている。
- 多くの分野にみられた共通基盤としては、DTやシミュレーター間をつなげる「データ・モデル連携」、資金循環・産学連携・データ更新・教育など「運用・エコシステム」であった。
- データ収集・共有フェーズではデータの意味づけ、継続的更新の仕組み、局所的DTを作るフェーズでは共通して必要となる機能の構築、局所的DTを集めて包括的DTを作るフェーズでは境界条件としてデータをやり取りする際の取り決めなど、段階に応じてニーズを満たす基盤を作る必要がある。

沿岸災害デジタルツイン小委WG5の開催

- 開催日時：2023/10/27（金）10：00～12：00
- 出席者（敬称略、順不同）
 - 鈴木（防災科研）、大野（大成建設）、本間（港空研）、吉河・長谷川（清水建設）、山本（復建調査設計）、稲川（早稲田）、甲斐田（電中研）
- 議事
 - 鈴木主査（防災科研）・甲斐田副主査（電中研）より、他分野におけるデジタルツインおよびデジタルツイン基盤に関する調査結果を報告し、議論した。

沿岸災害デジタルツイン小委WG5の開催

- 主な意見の内容：
 - 業務で可視化を行う際、実際にやっていて問題に直面することが多い。その理由としてデータの扱いが煩雑であることや慣れの問題がある
 - 何か事例を決めて一気通貫のものを検討し、準備を進めておくことが効率的ではないか
 - 異なる分野同士で共通する部分／しない部分を洗い出し、しない部分が課題になると考えられる
 - 港空研でUmi-Pochiを開発した。機器スペックの提供や、検討の土台として活用することも可能。運用面には課題があると感じている
 - 巨大なDTになるほど、運用期間が長引くほど、持続的に面倒を見ていく組織も必要になる
 - 産業的には、沿岸災害に係る各企業に対してDTの成果を展開する仕組みも考える必要がある
 - 様々なDTにおいて、センシングとモデリングをどのように繋いでいくかが課題である。また自律的にDTが稼働する仕組みも課題となっている

The screenshot shows the UMI-POCHI website. At the top, there is a navigation bar with 'HOME', 'ABOUT', and 'CONTACT' links. The main header features the text 'UMI-POCHIへようこそ' (Welcome to UMI-POCHI) and identifies it as a project by '国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所' (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) and '港湾空港技術研究所 ビッグデータ研究グループ' (Port and Airport Technology Research Institute Big Data Research Group). Below the header, there is a 'お問い合わせ' (Contact Us) button. The 'Main Contents' section is divided into three columns:

- 生物多様性データベース** (Biodiversity Database): 気候変動・環境変化のデータセットも公開しています (Climate change and environmental change data sets are also released).
- 漂着した海草・海藻の写真** (Photos of Drifted Seaweed): 漂着した海草・海藻の写真をデータセットにも公開しています (Photos of drifted seaweed are also released as a data set).
- 海草・海藻の分布情報** (Seaweed Distribution Information): 海草・海藻の分布情報を公開しています (Seaweed distribution information is released).
- 海面水温分布** (Sea Surface Temperature Distribution): 海面の海草と水温の分布情報が公開されています (Sea surface seaweed and temperature distribution information is released).
- フェリーによる海洋環境データ** (Ferry Marine Environment Data): フェリーで収集した水質データ等の公開・活用データを提供しています (Water quality data collected by ferries, etc. is provided for release and use).
- net-OILPART** (net-OILPART): ネットワーク対応リアルタイム油質データ提供システム (Network-enabled real-time oil quality data provision system).

今後の予定と課題

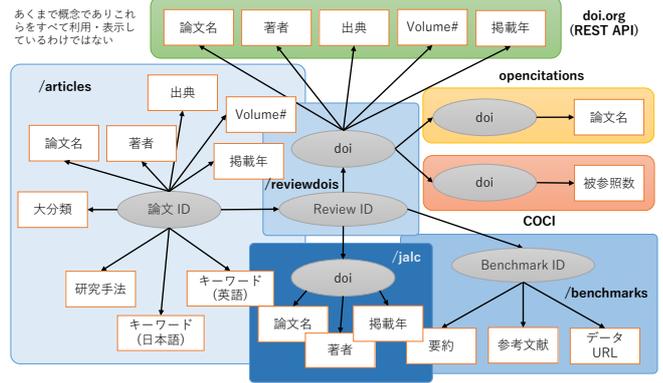
- 「データ・モデル連携」、「運用・エコシステム」の2つのテーマを設定し、SWGを設置
- WG5メンバーはいずれか（もしくは両方）のSWGに参加して活動を行い、都度WG5を開催して議論を集約する
- 他のWGとの連携

WG6 (アーカイブ・ポータル)

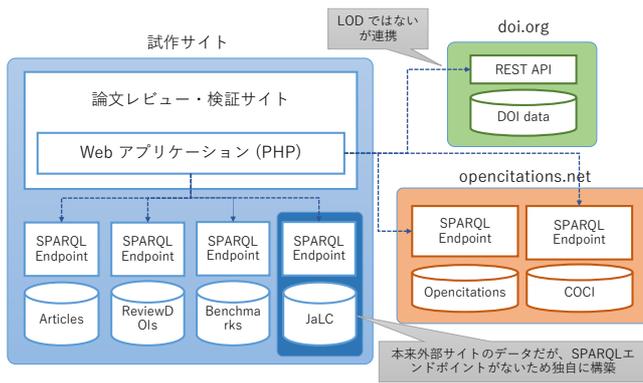
- 災害デジタルツインにおいては、物理空間から仮想空間にコピーされたデジタルデータをその後の解析で利用可能な形で整備する必要がある。しかし、既存の多くの公開されているデジタルデータは人間が利用することを第一に想定しており、シミュレーションプログラムが直接利用することや、横断的な検索が想定されていない場合が少なくない。そこで、本研究では、災害デジタルツインにおけるデジタルデータ・アーカイブシステムの構築に向けて、津波情報を一例としてデジタルデータ・アーカイブシステムの設計と論文やそれに用いられた観測や実験結果を対象に**試作**を行う。
- まずは作ってみる。
 - 津波アーカイブ防災研究ポータル



データ関連性グラフ (抜粋)



今回のデータ連携の概要



試作ウェブポータル

ベンチマーク問題一覧に切り替え



論文詳細ウインドウ (1)

ソース	項目	内容
論文レビュー (内部 SPARQL)	論文名	On Bore Dynamics and Pressure: RANS, Green-Naghdi, and Saint-Venant Equations
doi.org (REST API)	論文名	On Bore Dynamics and Pressure: RANS, Green-Naghdi, and Saint-Venant Equations
Opencitation 外部 LOD (SPARQL)	論文名	On Bore Dynamics And Pressure: RANS, Green-Naghdi, And Saint-Venant Equations
ベンチマーク (内部 SPARQL)	ベンチマーク問題	ベンチマーク問題
doi.org (REST API)	著者	Jiaqi Liu, Masoud Hayatdavoodi, R. Cengiz Ertekin
doi.org (REST API)	出典	Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering
doi.org (REST API)	Vol	142
doi.org (REST API)	出版年	2019, 11, 5
COCI 外部 LOD (SPARQL)	被参照数	4
論文レビュー (内部 SPARQL)	大分類	発生・伝播・選上
論文レビュー (内部 SPARQL)	研究手法	数値解析
論文レビュー (内部 SPARQL)	キーワード (日本語)	数値解析
論文レビュー (内部 SPARQL)	キーワード (英語)	Dam break, initial mound of water, Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, Green-Naghdi equations, Saint Venant equations
論文レビュー (内部 SPARQL)	コメント	

タイトルはデータソースにより微妙な違いがあるため、全て表示

COCI より取得した、この論文の被参照数

論文詳細ウインドウ (2)

doi.org REST API による情報

```

{
  "id": "10.1115/1.4044988",
  "type": "article",
  "year": 2019,
  "month": 11,
  "day": 5
}

```

JaLC SPARQL (内部 LOD) による情報

データがありません。

Opencitation SPARQL (外部 LOD) による情報

```

{
  "title": "literal",
  "year": "literal",
  "value": "On Bore Dynamics And Pressure: RANS, Green-Naghdi, And Saint-Venant Equations"
}

```

COCI SPARQL (外部 LOD) による情報

```

{
  "id": "10.1115/1.4044988",
  "type": "article",
  "year": "literal",
  "month": "literal",
  "day": "literal",
  "value": "2019-11-05"
}

```

- doi.org
- JaLC
- Opencitation
- COCI

の参照データ (JSON) をそのまま表示

ベンチマーク一覧

論文レビュー一覧に切り替え

SPARQL 文の表示を on/off する

下段一覧の表示をするための SPARQL 文が表示される

論文名をクリックすると、詳細がウィンドウ表示される

doi をクリックすると、論文本体のページへ

論文本体をクリックすると、SPARQL クエリした結果である

ベンチマーク問題詳細

- ベンチマーク問題の詳細ウィンドウ中の「ベンチマーク問題・表示」ボタンをクリックすると、下記のような詳細ウィンドウが表示される。
- 下部の JSON は Benchmarks.rdf を SPARQL クエリした結果である

名称	発生・伝播・遡上
実験計画手順によるリソトロン分岐の物理実験	
観測 (2003) による海扇域を伝播する津波を対象とし、非線形分散モデルの検討を行うために実施した海岸防護 (リソトロン効果) と津波に伴う水位変動とその後の過程を対象とした断面水理による水理実験である。提供データは、波高計による水位変動データおよび流速計 (水位と位置) である。論文レビュー	
参考文獻	高橋久之, 坂本雅也, 磯藤賢司 (2004) リソトロン効果の物理的変形に関する水理実験と数値計算, 海洋工学論文集, Vol. 48, pp. 308-310.
参考文献 URL	https://doi.org/10.2208/1989-48-308
ダウンロード URL	https://www.w3.org/2001/XMLSchema#date

```

{
  "@type": "List",
  "list": [
    {
      "@type": "Text",
      "text": "実験計画手順によるリソトロン分岐の物理実験"
    },
    {
      "@type": "Text",
      "text": "観測 (2003) による海扇域を伝播する津波を対象とし、非線形分散モデルの検討を行うために実施した海岸防護 (リソトロン効果) と津波に伴う水位変動とその後の過程を対象とした断面水理による水理実験である。提供データは、波高計による水位変動データおよび流速計 (水位と位置) である。論文レビュー"
    },
    {
      "@type": "Text",
      "text": "高橋久之, 坂本雅也, 磯藤賢司 (2004) リソトロン効果の物理的変形に関する水理実験と数値計算, 海洋工学論文集, Vol. 48, pp. 308-310."
    },
    {
      "@type": "Text",
      "text": "https://doi.org/10.2208/1989-48-308"
    },
    {
      "@type": "Text",
      "text": "https://www.w3.org/2001/XMLSchema#date"
    }
  ]
}
    
```

津波波形データベース (TwDB)

- 現状の津波波形データベース (<https://kiyuu.bosai.go.jp/TwDB/>) は LOD 化されていない
- まずはこれを LOD 化する必要がある

津波波形データベース

観測情報データベース

計算波形データベース

その他

試みに TwDB のイベント情報を RDF 化

- 試みに、津波情報データベースの Events データを RDF 化してみた
- これを SPARQL で公開することで、ポータル (および他の誰からでも) 参照できるようになる

```

<rdf:Description rdf:about="http://lod/resources/e00001">
  <schema:name>1894年根室半島南東沖</schema:name>
  <schema:longitude>146</schema:longitude>
  <schema:latitude>42.5</schema:latitude><tw:magnitude>7.9</tw:magnitude>
  <tw:date rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#dateTime">1894/3/22</tw:date>
  <tw:rid rdf:resource="http://lod/resources/r00004"/>
</rdf:Description>
<rdf:Description rdf:about="http://lod/resources/e00002">
  <schema:name>1896年明治三陸</schema:name>
  <schema:longitude>144</schema:longitude>
  <schema:latitude>39.5</schema:latitude>
  <tw:magnitude>7.2</tw:magnitude>
  <tw:date rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#dateTime">1896/6/15</tw:date>
  <tw:rid rdf:resource="http://lod/resources/r00004"/>
</rdf:Description>
    
```