

2025年度（第60回） 水工学に関する夏期研修会講義集

B コース

Lecture Notes of the
60th Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2025
Course B

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering,
Coastal Engineering Committee,
JSCE

2025年8月
August 2025

2025年度（第60回）

水工学に関する夏期研修会講義集

Bコース（海岸・港湾コース）

総合テーマ

水工学のパラダイムシフトをもたらす技術・研究

C-1	大規模アンサンブル気候予測情報活用の基礎：pythonによる取得から簡易な解析までの実践	九州大学 准教授	渡部 哲史
C-2	地域防災への地理空間情報の利活用	九州大学 教授	三谷 泰浩
C-3	防災・減災をめざしたAIの利活用	琉球大学 准教授	宮田 龍太
C-4	河川・海岸の治水計画にたずさわる技術者のための多変量と単変量の極値統計理論の基礎	名古屋工業大学 教授	北野 利一
B-1	沿岸防災における技術課題と今後の取組みに関する展望	国土技術政策総合研究所 港湾・沿岸海洋研究部 港湾・沿岸防災研究室 室長	本多 和彦
B-2	沿岸域におけるブルーカーボンと環境再生の社会実装に向けた展開	東京大学 教授	佐々木 淳
B-3	沿岸域における気候変動適応策に関する現状と課題	中央大学 教授	有川 太郎
B-4	沿岸域の環境の保全・再生・創出一過去からの変遷、今後の動向ー	国土技術政策総合研究所 港湾・沿岸海洋研究部 海洋環境・危機管理研究室 室長	岡田 知也

大規模アンサンブル気候予測情報活用の基礎： python による取得から簡易な解析までの実践

Basic training course on utilizing large ensemble climate datasets
Hands-on Practice: From Data Acquisition to Basic Analysis Using Python

渡部 哲史
Watanabe Satoshi

1. 本講義の背景と目的

大規模アンサンブル気候予測情報の活用が進んでいる。我が国においては文部科学省等により整備された地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) ¹⁾ が広く活用されている。この d4PDF シリーズのデータセットはデータ統合・解析システム(DIAS)により公開されており、ユーザ登録を行うことで公的な研究者のみならず民間企業を含めた多くの人が利用可能である。

大規模アンサンブル気候予測は最大 100 (全球実験、現在期間再現) という多数のアンサンブル実験が行われているところに特徴があり、合計数千年分のデータセットが活用できることが、気候変化による各種の影響やリスクを明らかにする際に非常に有益である。例えば、水害リスクについて分析する際に 100 年に 1 度など低頻度 (稀な) 事象について理解することの重要性は高く、その理解には 100 年に 1 度の事象が何度も含まれるデータセットが大いに役立つ。合計数千年分のデータセットはそのような稀な事象に対する統計的な分析を可能にするという点で気候予測データセットとして高い活用可能性を持っている。

大規模アンサンブル気候予測情報がその大量な情報量ゆえに気候変化リスク評価に有益である反面、データの取得や取り扱いに関するハードルが高くなっている。データサイズが限られる場合はテキストファイルなど直接内容の確認できるファイル形式を用いることができるが、データ量が膨大となる場合はファイルサイズや処理の取り扱いに適したファイル構造および形式とならざるを得ない。それらのファイルの取り扱いには GUI (Graphical User Interface、アイコンやボタン等で直感的に操作できる) ではなく何らかのプログラム言語によるデータ処理が必要となる。

また、水工学や海岸工学分野の場合、世界全体や日本全体を対象とした分析を行うよりも、ある流域やある水域といったような限られた地点を対象とした分析が行われることが一般的である。このこともまた、データの取り扱いを困難としている。気候予測情報はある時点における実験結果の 2 次元もしくは 2 次元の情報が一つのデータ単位として取り扱われている。すなわち、例えば日本のある地点における降水量を知りたい場合に、その対象地点のみならず日本全体を含むファイルを扱う必要がある。つまり、高々数地点のデータを得るためにも数万～数十万地点を含むファイルを扱うなくてはならない。このことが大規模アンサンブル気候予測の取得や利用におけるハードルの一つとなっている。

本稿では、上述の d4PDF を対象として大規模アンサンブル気候予測データを取得し、分析する方法について python を使った事例により紹介する。取得に関しては d4PDF を配布する DIAS の利用方法を踏まえた説明になるが、解析手法に関しては d4PDF に限らず他のデータセットの分析の際にも参考となるものである。取得に関しては上述のファイル構造の問題を踏まえた著者独自のデータセットの紹介について紹介する。これは地点単位の利用が主となる水工学や海岸工学分野の実態を踏まえ、ファイル構造を、ある時間における空間データからある地点における時間データへと変換したものである。このデータの活用により扱う必要のあるデータサイズを大幅に削減することが可能と

なり、場合によってはテキストファイルや csv ファイルなど直接確認することが可能なデータ形式での分析が可能となる。

大規模アンサンブル気候予測データ処理として本稿にて扱う内容は表-1 のとおりである。取得方法に加えてデータ基礎的な処理や図化、さらに気候予測情報の活用の際に広く実施されるバイアス処理の簡易的な方法について解説する。

データ処理の実例を示す python については初歩的な知識（条件式や分岐、繰り返し処理、モジュールと import など）を有していることを想定するが、できるだけそれらに不安がある場合にも理解できるように平易な解説を試みる。これらの基礎については無料で利用可能な WEB サイト等でも多数解説があるので適宜参照頂きたい。

2. データの取得

2.1. データや実験の選択

(略：本番では公開)

2.2. 取得方法

ここでは DIAS からデータを取得するための 2 つの方法を紹介する。一つは WEB サイトで用意されたインターフェースを通じてのデータの取得である。2.1 において解説した、取得したい実験内容（データセット）によりインターフェースが異なり、選択できる範囲が異なる。もう一つは WEB サイトから取得できる python スクリプトを用いたダウンロードである。いずれの場合でもデータセットの全てを取得するかそれとも切り出しを行うかという選択が可能である。切り出しを行う場合 DIAS 上のサーバにおいてユーザが必要とする実験設定、変数、期間、空間領域などに応じたデータのみ取得することが可能である。ファイル全体（複数の変数がある一つのファイルに含まれているなど、単に空間領域がすべて含まれるということの意味しているわけではないことに注意）を取得する場合に比べてデータサイズが大幅に小さくなるため、ダウンロードの通信に係る負荷を削減できる。しかしながら、切り出しの作業を DIAS サーバ側で行うため、データの準備（切り出し）に必要となる時間が必要となる点に注意が必要である。条件により異なるが、ダウンロードにかかる通信の負荷よりもデータ切り出し処理にかかる負荷の方が大きい場合も多い。データ処理能力を有している場合（本稿において解説）は、切り出すデータの内容によってはファイル全体を取得してユーザ側で切り出す方が早い時間で処理を完了できる可能性もある。

対象地点を選択してデータ取得する場合に必要なのが取得領域の設定である。図 1 のように取得したい領域を赤枠で設定できるが、本稿読者の場合はこの領域が広すぎであったり、詳細な設定が困難であったりという場合も少なくないと考えられる（気候や気象など、ある程度広い領域を対象とする場合は問題とならない）。かわりに上下左右端を数値で設定することも可能である。ただし、その設定は (in pixels) となっており、対象とする領域がどのピクセルに該当するかという情報が必要となる。各ピクセルの位置情報については固定値に関するファイルを取得することで理解できる。ここでは該当するピクセルを簡易に探索できる方法を紹介する。

表 1 対象範囲

内容	詳細
取得	・ データや実験の選択 ・ 取得方法 ・ 独自データセット紹介
データ処理 (基礎)	・ データの抽出 ・ 基本的な統計量の計算 ・ 図化
データ処理 (応用)	・ 簡易的なバイアス処理

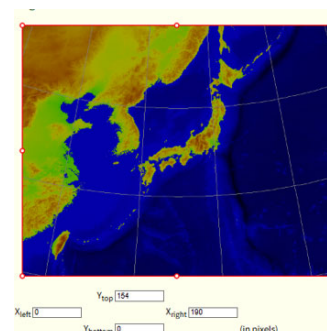


図 1 領域の設定
(DIAS d4PDF 取得サイト
スクリーンショット)

地域防災への地理空間情報の利活用

Application of Geospatial Information for Regional Disaster Prevention

三谷 泰浩
Yasuhiro MITANI

1. はじめに

近年、地理空間情報技術は急速に発展し、行政、産業、生活の各分野において不可欠な基盤技術となってきた。特に災害分野においては、地理空間情報の活用が災害リスクの評価、被害状況の把握、避難誘導、復旧支援などにおいて重要な役割を果たしており、地域防災とのかかわりも深まっている。

簡単に地理空間情報の歴史を振り返ると 1990 年代ごろから、GIS（地理情報システム）の導入が進み、自治体や研究機関において空間データの管理・分析が少しずつ可能となった。これにより、都市計画や環境管理に加え、阪神・淡路大震災では、災害リスクの可視化が実現され、ハザードマップの作成などが本格化してきた。2000 年代には、GPS（全地球測位システム）の民間利用が拡大し、個人レベルでも位置情報を活用できるようになり、さらに、衛星リモートセンシング技術の進化により、広域かつ高精度な地表観測が可能となり、災害発生時の迅速な状況把握に貢献した。

こうした技術の進展を背景に、2007 年には「地理空間情報活用推進基本法（平成 19 年法律第 63 号）」が制定された。この法律は、地理空間情報の高度な活用を通じて、国民が安心して豊かな生活を営むことができる経済社会の実現を目的としている。また、国および地方公共団体の責務を明確にし、情報整備、人材育成、連携体制の構築など、地理空間情報の活用に関する施策を総合的かつ計画的に推進することを定めている。

このような時代の変遷を経て、現在では、地理空間情報は、地域防災の各段階において活用されている。災害予防の段階では、自治体が地域の地形や過去の災害履歴をもとにハザードマップを作成し、住民への情報提供や避難計画の策定に役立てている。これにより、地域住民の防災意識の向上と事前準備の促進が図られている。また、発災後の災害対応段階では、災害発生直後に航空写真や衛星画像を用いて被害状況を迅速に把握することが可能となっており、例えば、2011 年の東日本大震災では、地理空間情報を活用した被災地のマッピングや避難所の位置情報の共有が行われ、救援活動の効率化に寄与した。また、近年では、SNS やスマートフォンから得られる位置情報をもとに、避難者の動向や支援ニーズをリアルタイムで把握する取り組みなども進められている。そして、災害復旧段階では、被害の程度や復旧の優先順位を地理空間情報に基づいて判断することで、インフラの再建や資源の配分が合理的に行われている。近年では、ドローンによる空中撮影や IoT センサーによる地盤変動の監視など、新たな技術の導入が進んでおり、災害対応の精度と速度が向上しているのが実状である。

一方で、災害に目を向けると日本各地で、度々大きな自然災害に見舞われている。2015 年の鬼怒川の堤防決壊、2016 年には北海道・東北地方で、2017 年には線状降水帯が原因の九州北部豪雨、2018 年 7 月の西日本豪雨では、西日本から東海地方を中心に広範囲で洪水氾濫や土砂災害が発生し、死者・行方不明者あわせて 220 名以上もの尊い命が失われた。また、2020 年には熊本県を中心にした豪雨災害が発生するなど、深刻な風水害が発生している。このような最近の災害の激甚化、多発化する自然災害は、地球温暖化に伴って気象が極端化していることにも起因しているとされており、これから先の将来、我々は自然災害を避けて通ることはできないような状況にある。

このような状況の下、災害による犠牲者を無くし、被害を最小限にとどめ、また、早期の復旧・復興を実現するレジリエントな社会の構築に向けた取り組みが数多く実施されている。2011年に発生した東日本大震災以降、防災に対する認識が大きく変化し、自然災害に対して、想定外のことが起こりうるという考えから、防災から減災へという考えが普及し、国土強靱化や水防災意識社会再構築などハード・ソフトの両面から、自然災害へ備える必要があると考えられるようになってきている。

本稿では、改めて、防災・減災の考え方についてハザードとリスクの考え方、情報の重要性の観点から現状の課題について整理する。そして、それらが有する課題を解決すべく地理空間情報を活用した防災への利活用として、地域防災に適用した事例、さらには、地理空間情報を活用し、構築した新たな防災情報システム（市町村災害対応統合システム）の特徴について示し、地理空間情報の災害分野および地域防災における今後の展望について考察する。

2. 防災・減災における情報の役割

防災・減災といった災害の対策において、近年重要となってきたのが、情報の利活用である。情報とは広辞苑によれば「判断を下したり行動を起こしたりするために必要な、種々の媒体を介しての知識」とされている。この情報というものは、以下のような特徴を有する。

- ① 情報そのものに価値はない。
- ② 情報は活用されて初めて価値をもつ。
- ③ 情報の価値は人によって異なる。
- ④ 情報は記号と意味（価値）から構成される。
- ⑤ 情報は記号を使って測ることができるが、価値は測ることができない

この情報の5つの特徴について整理する。例えば、英語で「saury」という単語がある。この単語の意味を知っていなければ、この英語の綴りに対して価値は存在しない（①）。しかしながら、この意味を「サンマ」もしくは「秋刀魚」と日本語で表現した時点で、我々はこの意味を認識でき、この情報は価値を持つことになる（②）。しかし、例えば、米国人にサンマという魚の意味を伝えたとしても、何人の人がこのサンマという魚の価値を理解できるか不明である。つまり、サンマという魚を食べる習慣がない人にその情報を伝えたとしても価値は理解できない（③）。そして、サンマという意味を英語、カタカナ、漢字で表記したが、これはいわゆる記号であり、この記号が理解できれば意味が生まれてくる（④）。最後に、文字（記号）や図を使うことで定量的に表現ができるが、価値は前述した通り、人によって異なることから比較はできても測ることはできない（⑤）。

このようなことを踏まえて、防災・減災と情報の関係性を考えてみる。例えば、1時間に50mmの降雨があったとすると、この50mmというものは一種の情報と考えられる。しかしながら、1時間に50mmという雨の量がどのようなものか、想像がつかなければ、この情報は価値を有していないこととなる。実際には、「バケツをひっくり返したような雨」と言われるのだが、このような価値付けができていなければ、結局、危険な豪雨であることはわからない。そして、この雨量が危険な豪雨であることが分かってもそれが避難行動に結びつくかどうかは、その人の考え方次第となる。この考えをもとに災害の情報とその価値の関係性について図1に示す。

図に示すように、先の雨量の例に沿って考えると時間50mmの雨量は「データ」と呼ばれるものに相当する。このデータは量的には大量に存在するが、人による意味づけ（価値）は、ほとんどなされていないと考え

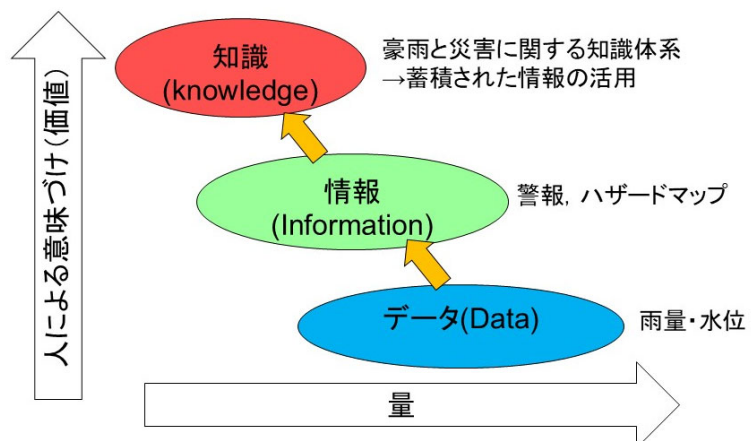


図1 災害の情報とその価値の関係性

水工学に関する夏期研修会 ～防災・減災をめざした AI の利活用～

Summer Training Course on Hydraulic Engineering - Application of AI for disaster prevention and mitigation -

宮田 龍太
Ryota Miyata

1. はじめに

日本は、台風や竜巻、地震、洪水をはじめ多様な自然災害が頻発する国であり、近年の気候変動は各地域での災害リスクを高め、また都市化の進展は被害の規模を拡大させる傾向にある。さらに昨今の少子高齢化の進行は、防災施設の整備限界や災害対応を担う人材の不足という社会構造的な脆弱性を加速させる方向に作用し、災害発生時の対応能力に強い制約をもたらしている。このような複合的な課題に直面する中で国民の生命と財産を守るべく、堤防やダムを整備などハード面に関する対策と、防災気象情報の高度化や避難訓練の改善といったソフト面の対策を両輪で推進し、効果を飛躍的に高めることが喫緊の課題となっている。

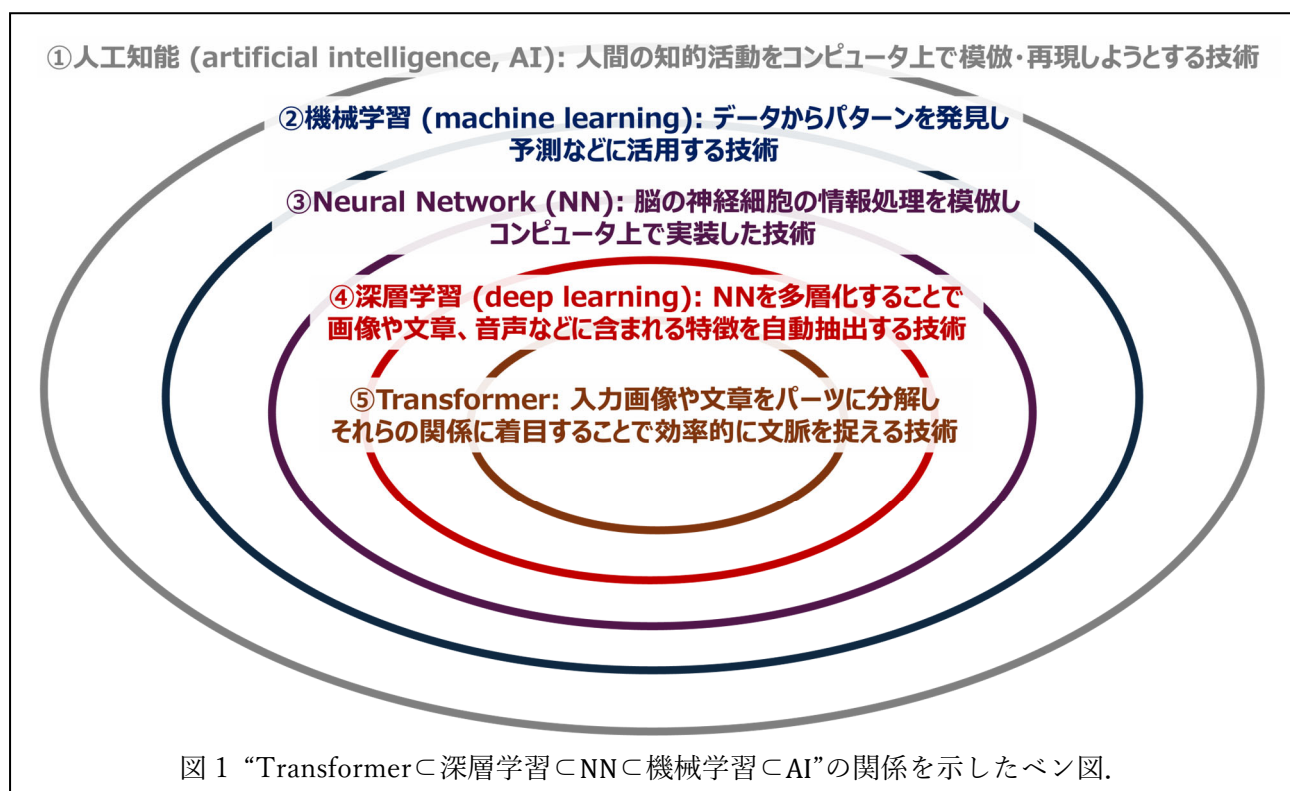
上記の背景から人工知能 (artificial intelligence, AI)、ことに機械学習 (machine learning) の利活用が防災・減災分野における変革をもたらす可能性のある技術として期待を集めている。この 10 年で画像や文章、音声といった我々が普段見聞きするデータから有意な情報を抽出する深層学習 (deep learning) が台頭してから、精度の高い予測やパターンの発見、複雑な組み合わせ最適化ができるようになった。深層学習をうまく使うと、例えばインターネット上に投稿された情報の要約や異常検知などが可能になるため、業務効率化や標準化を通じて災害発生前から復旧・復興に至るまでの多岐に渡るフェーズで貢献できるポテンシャルを秘めている。また、AI の導入によって限られた人的リソースを補完しながら状況の変化をリアルタイムで把握し、迅速かつ柔軟な意思決定を支援できる点もとても魅力的である。したがって AI の導入は単なる技術的進歩に留まらず、社会全体のレジリエンス (回復力) を向上させるための戦略的な取り組みとして位置づけられている。

本稿では表題のテーマのもと、目覚ましい進展を遂げている画像認識 AI や生成 AI、説明可能 AI に注目し、活用事例や現場が直面している課題について解説する。具体的な構成は次の通りである：第 2 章で AI の概要について紹介し、第 3 章では当該研究室で過去実施した防災・減災をめざした AI の利活用研究として「画像認識 AI を用いた気象衛星画像からの台風強度分類および説明可能 AI を用いた判断根拠の可視化^[1]」について簡単に説明する。最後に、第 4 章で統括と今後の展望について言及する。

2. AI の概要

図 1 に本稿のキーワードである AI、機械学習、そして深層学習の包含関係をベン図により示す。機械学習を使った研究がデータ駆動型 (data-driven) と呼ばれる理由は図中②の一言解説の通り、観測データが全ての起点となるからである。計算機科学の原則として “Garbage in, garbage out” という概念があるが、ここでもそれが前提条件として適用されるため、ノイズの少ないデータは重宝

される。



コンピュータにルールを明示的にプログラミングすることなく過去の事例から傾向を自ら発見し未知のデータにも対応できる汎化性能を獲得する方法を考案する分野という趣旨での機械学習が AI 研究の主軸として 1960～1980 年代に確立されていた当初は、コンピュータの性能限界から気温や湿度のようにあらかじめ計測しておいたテーブルデータ（数値）が入力として想定されていたが、2010 年代にいわゆる④の深層学習が提案されて以降、画像や文章、音声といったスマートフォンやタブレットでも手軽に収集もできるデータが主流となっている。これにより、例えばドローンで空撮した橋梁の映像から亀裂が入っている箇所を深層学習で特定が可能になったため、従来なら人間の目視に依存していたインフラ点検作業の効率化、標準化、低コスト化、安全性、および精度の向上が実現されつつある。また近年では、AI による自動解析結果（点検履歴）をクラウドサービスで一元管理するなど、保守計画全体のスマート化をめざす取り組みも進んでいる。次の章で紹介する筆者らの研究においても、深層学習を使って人工衛星で撮影された画像を分析することで、海上という気象観測が十分には行き届いていない地域でも台風の状況把握を可能にしている。この“人間が直接確認に行かなくて済む”ことが、水工学における AI 利活用の意義になり得ると筆者は考えている。このような技術の進展は、労働人口の減少に伴う保守要員不足への対応策としても注目されている。

さらに 2020 年代からは図中⑤の Transformer^[2]の登場を機にコンピュータによる文脈理解が大幅に進んだ。実際この技術は、一般社会にも普及した ChatGPT^[3]や Gemini^[4]に代表される大規模言語モデル (large language model, LLM) の基盤になっている。それまでの機械学習、例えば犬猫分類を行う画像認識 AI として真っ先に思い浮かぶような convolutional neural network (CNN) だと、各ピクセル（説明変数）とラベル（目的変数）との紐付け（適切な入出力関係の獲得）をいかに実装するかに注力がなされていたが、Transformer では self-attention（自己注意）機構によりピクセル間の紐付け（入力データ内の前後関係の把握）を行った上で入力と出力を包括的に対応づけるため、より複雑で柔軟な情報処理を実現すると目されている。ただしこの能力を獲得するには、大量の画像や文章を用いた学習によって膨大なモデル内部パラメータを決定する必要がある。高い精度を実現できる一方で、Transformer は計算負荷が大きく学習や推論に多大な計算資源を要するため、軽量な

河川・海岸の治水計画にたずさわる技術者のための多変量と単変量の極値統計理論の基礎

Theoretical and practical foundations of multivariate and univariate extreme statistics for engineers engaging in river and coastal flood prevention plans

北野 利一

Toshikazu KITANO

1. 超過確率と生起率（極値統計解析をすることで得られるものの主産物）

1) $\exp$ が極大値と期間最大値を結ぶ（ポアソン確率）

「非超過確率」という言い回しは、混乱を招くものとして個人的にはできる限り使わないように心がけて、通常は累積確率とよんでいる。言うまでもないが、1から累積確率を引いたものが、超過確率である。もちろん、これを非累積確率という人は皆無であろう。ここではあえて、非超過確率を用いる方が、意味が明確になり、適しているかもしれない。ここで、後述に示すとおり、ポアソン確率を考えれば、次式が成り立つ。

$$\exp(-\text{生起率}) = \text{非超過確率} \quad (1)$$

ここに現れている生起率ならびに非超過確率は、いずれも「率」であり、割合を示すものである。左辺における生起率とは、ある期間が与えられた時に、降水量や高波の波高の極大値がある閾値を「超える」生起数の期待値である。時間長に対する極大値をとるイベントの生起数という割合（rate）になっている。これに対して、右辺の非超過確率は、文字どおり「超えない」割合である。時間長を例えば年単位で区切って、 n 年であるとする、年最大値がある閾値を超えなかった年数の全体の年数に対する割合（proportion）である。

$\exp$ （指数関数）が、「超える」と「超えない」を結んでいるように見えるが、年最大値に関して言えば、「超える」と「超えない」の関係は、冒頭の非の話のとおり、単純に次式で表される。

$$\text{非超過確率} (= \text{累積確率}) = 1 - \text{超過確率} \quad (2)$$

$\exp$ が中立ちしているのは、ある値 y を閾値として、極大値が閾値を超えるイベント数の時間に対する割合と期間最大値が閾値を超えない割合である。式(1)を改めて、キチンと数式で表せば、単変量極値の場合、

$$\exp\left\{-E\left(\sum_{i=1}^m 1\{Y_i > y\}\right)/n\right\} = E\left(\sum_{j=1}^n 1\{Y_j \leq y\}\right)/n \quad (3)$$

となる。ここで、 $1\{\text{condition}\}$ は condition が成立すれば 1 を、成立しなければ 0 をとる計数関数であり、式(3)の左右において、閾値 y は共通の値であるが、ここでの確率変数 Y_i と Y_j は異種であることに注意する必要がある。さらに言えば、右辺の n は最大値 Y_j の個数、すなわち、データのトータルの観測年数で、当然、定数であるのに対し、左辺の m は n 年間に生起する極大値 Y_i の個数であり、 m は確率変数である（確率・統計分野の慣習に従えば、大文字で記すべきであるがそうしていない）ことに留意する。

以上の議論は、多変量極値への展開に必要な布石になっている。2.3) で式(3)を多変量に拡張する。

2) $\log$ による数遊び（数字に慣れる）

前節の内容の理解のために、 $n = 40$ 年間のある地点での高波の年最大値波高 Y_j の順序統計量（昇順） $Y_{j:n}$ （ここで、時系列の年順と順序統計量の順位に同じ記号 j を用いているが、一方には $:n$ を付けるため、混乱は無いはずだ）に対して、次式に示すプロットイングポジション（pp）公式で累積確率を割付け、超過確率の逆数を再現期間として、横軸を西暦年、累積確率、再現期間（対数軸）の3種で図示したものを図-1に示す。

$$P(Y_{j:n}) = \frac{j - \alpha}{n + \beta} \quad (4)$$

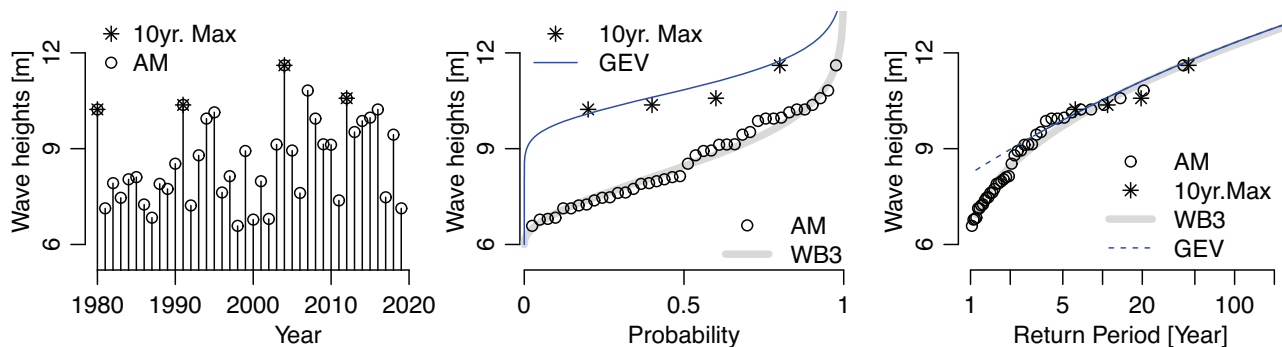


図-1 40年間の年最大値資料の表示

pp 公式の定数 α, β は、さまざまな提案がある¹⁾が、正解は無い。なぜなら、順序統計量は確率変数の実現値であり、定数では無いにもかかわらず、pp 公式により割付けられる確率は、定数であるので、根本的に対応していない。統計的変動性を考慮に入れて、なんらかの代表値（期待値、中央値、最頻値など）で代用しようとする、母分布が必要となる。そうすると、異なる母分布に対してもできるかぎり許容できるユニバーサルなものを考案しなければならないと考えたくなる²⁾が、それが本当に良い考えであろうか？むしろ、検討する状況と何を優先すべきかに応じて、適材適所で選択するのが良いように私は思う。逆に言えば、定数 α, β の取り方で、見た目の印象が大きく変わるような特性に目を向けてはいけないのが、pp 公式の本来的な使い方であろう。ここでは、単純さの観点を優先させて、ワイブル公式 $\alpha = 0, \beta = 1$ を用いている。

対数スケールでとった再現期間（逆に言えば、再現期間の対数値）に注目しよう。R を立上げれば、

```
> round(log(c(0.3, 1, 3, 10, 20, 50, 100, 200)), 3)
[1] -1.204 0.000 1.099 2.303 2.996 3.912 4.605 5.298
```

を得ることは容易であろう。 $\log 20 \approx 3.0$ というキリの良さは特筆に値する。また、 $\log 3 \approx 1$ と言いたいところである（もちろん有効数字 1 桁であれば、通用する話である）が、 $\log 3 \approx 1.1$ としておくのが良いだろう。また、 $\log 10 \approx \log_{10} 200 \approx 2.3$ であるので、 $\log 200$ に対して、

```
> 2.3 * 2.3
[1] 5.29
```

を得る³⁾（もちろん、 $\log 200 \approx 2.3 + 3.0 = 5.3$ による近似もあろう）。「数字に慣れる」とは、このような数の単純なオモシロさ（数の個性？）に気付くところにある（と私は思う）。このように見れば、残りの値（例えば、 $\log 50 \approx 3 \times 2.3 - 3.0 = 3.9$, $\log 0.3 \approx 1.1 - 2.3 = -1.2$ ）にも親しみを感じるのではなかろうか？

3) 2種類の再現期間

一般化極値分布（Generalized Extreme Value distribution, GEV）の累積確率 $G_n(y)$ は、生起率 $\lambda_n(y)$ を用いて、

$$G_n(y) = \exp \{-\lambda_n(y)\} \quad (5)$$

と表される。これは、式 (3) の左右を入替えたものに相当し、 $G_n(y)$ は n 年最大値が y を超えない累積確率である。そして、 $\lambda_n(y)$ は n 年間に発生した極大値が y を超える生起率であり、次式で与えられる。

$$\lambda_n(y) = \left(1 + \xi \frac{y - \mu_n}{\sigma_n}\right)^{-1/\xi} \quad (\text{for } \xi \neq 0), \quad \lambda_n(y) = \exp\left(-\frac{y - \mu_n}{\sigma_n}\right) \quad (\text{for } \xi = 0) \quad (6)$$

式 (5) の左右を、 $\lambda^k \exp(-\lambda)/k!$ ($k=0, \lambda=\lambda_n(y)$) で与えられるポアソン確率がつないでいる。なお、式 (6) の導出や特性などについてはここでは展開せず、3. で詳述する。式 (5) から言えることは、期間最大値データに対して、GEV の母数推定を行った場合には、期間最大値に対する累積確率が推定されただけでなく、それと同時に、極大値に対する生起率も推定されていることだ。そこで、生起率の逆数を再現期間と定義することもできる。ここで、 $\lambda_n(\mu_n) = 1$ であり、これは、 n 年間に μ_n を超える極大値のイベント数の平均が 1 回であることを意味するので、GEV の位置母数 μ_n は、再現レベル（再現期間 n 年の確率外力）である。この

沿岸防災における技術課題と 今後の取組みに関する展望

Technical Challenges and Future Prospects on Coastal Disaster Prevention

本多 和彦
HONDA Kazuhiko

1. はじめに

気象庁の台風統計資料によると、各年の台風発生数および日本への台風上陸数の平均値（1951 年～2017 年）は、それぞれ 26.2 および 2.9 となっている。このように、台風がほぼ毎年のように上陸するため、日本の沿岸部では、1934 年の室戸台風や 1959 年の伊勢湾台風による被害をはじめ、数多くの台風に伴って発達する高潮および高波によって甚大な被害を経験してきた。また、日本は、ユーラシアプレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートおよび北米プレートの 4 つのプレートが接する場所に位置していることから、日本の沿岸部では、それらのプレート境界で生じる海溝型地震に伴う津波等による甚大な被害を幾度となく経験してきた。

これら多くの津波、ならびに、高潮および高波による被害の経験から、日本では、沿岸部やその背後の人命や財産を守ることを目的に、大船渡港の湾口防波堤や名古屋港の高潮防波堤（図－1）をはじめ、防波堤、防潮堤、防潮壁、海岸堤防などの数多くの防護施設を建設してきた。しかし、これらの防護施設が既に整備されているにも関わらず、施設の設計条件を上回る津波、高潮、または、高波が来襲し、近年も被災が生じている。

一方、気候変動に伴う海水面温度の上昇による平均海面水位上昇の影響のほかに、台風の強大化によって、高潮および高波の規模が増大する可能性が指摘されており（文部科学省・気象庁，2025）、日本沿岸における被災リスクが今後増大することが懸念されている。

日本の沿岸部のうち港湾では、一般的に防護施設が平時における港湾活動に支障を来すことから、港湾内の活動区域と背後地との間に防護施設が設置されることが多いため、港湾は広い堤外地を有していて被災リスクが高い地域となっている。このように、沿岸部の利用形態によって、防護施設の設置状況などは異なることが多い。



図－1 名古屋港の高潮防波堤

以上のように、日本の沿岸部における防災については、津波や高潮・高波のように対象とする作用が複数あるとともに、気候変動に伴う被災リスクの増大や、沿岸部の利用形態による防災と利用のバランスといった視点も念頭に置く必要があり、それらの技術課題は多岐に渡る。そのため、本稿では、限られた時間の研修講義の資料の位置付けであることから、それらの技術課題を網羅的に整理して紹介するのではなく、幾つかの技術課題をトピック的に紹介することとしたい。

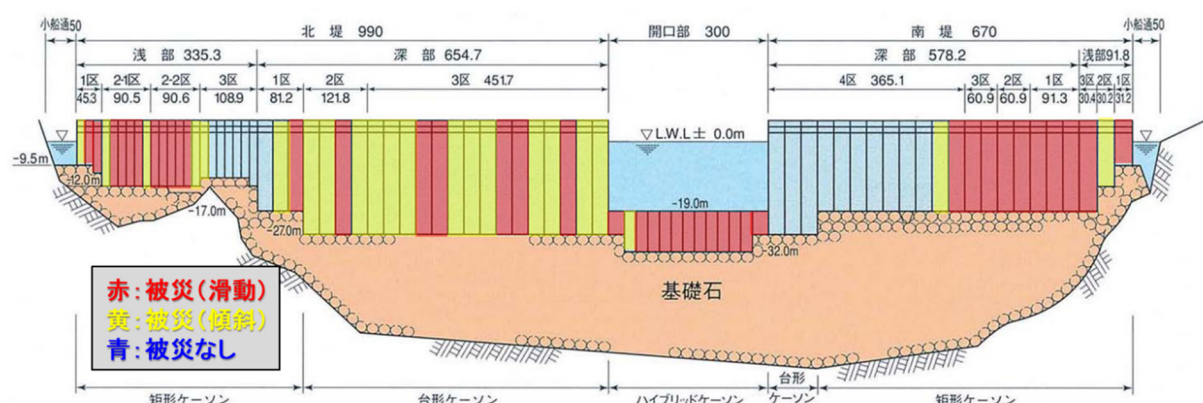
具体的には、最近の被災事例として、2011 年東北地方太平洋沖地震津波、ならびに、平成 30 年台風 21 号および令和元年台風 15 号に伴う高潮・高波等による事例を紹介するとともに、それらの災害から得られた沿岸部の防災に関する教訓や技術課題を紹介する。さらに、気候変動に関する技術課題および作用・リスクの確率評価に関する技術課題に関して、港湾における現在の取組み事例を中心に、今後の展望とともに紹介する。

2. 過去の被災事例

2.1. 東北地方太平洋沖地震津波

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に関連する犠牲者は 2 万人近くに達した。また、全壊・半壊を合わせて 40 万戸近くの建物被害をもたらしただけでなく、地震に伴って発生した非常に大きな津波により、非常に広い範囲で数多くの港湾・海岸などの沿岸の施設にも甚大な被害をもたらした。この東北地方太平洋沖地震津波は、当時まで防災計画や施設設計などの想定津波を大きく上回るものであった。

岩手県の釜石港にある湾口防波堤は、世界で最も深い水深に設置された重力式防波堤であり、これ



(ケーソン毎の被災状況の整理結果)



(北堤の被災状況)



(南堤の状況)

図－2 釜石港の湾口防波堤の被災状況

沿岸域におけるブルーカーボンと 環境再生の社会実装に向けた展開

Advancing Societal Implementation of Blue Carbon and Environmental Restoration Initiatives in Coastal Regions

佐々木 淳
Sasaki Jun

1. はじめに

気候変動影響が顕在化しているとの認識が広まり、沿岸域においても気候変動による海岸災害の激甚化等にどのように適応していくかという、適応策の検討が進められている。一方、大気中の二酸化炭素（CO₂）の上昇を抑制し、気候変動を緩和していくため、各国は CO₂ 排出量を削減する気候変動緩和策に取り組んでいる。日本では 2020 年 10 月 26 日の菅首相による所信表明演説で 2050 年までにカーボンニュートラル（ネット・ゼロ）を目指すことを宣言し、同年 12 月 25 日に「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を閣議決定した。2021 年 4 月 22 日の地球温暖化対策推進本部の決定を踏まえ、同日の米国主催気候サミットにおいて、2050 年カーボンニュートラルと整合的で野心的な目標として、2030 年度に温室効果ガス排出量を 2013 年度から 46%削減することを目指すことを表明し、2021 年 10 月 22 日の地球温暖化対策本部において、この 2030 年度の削減目標を反映した NDC（Nationally Determined Contributions：国が決定する貢献、後述する 2015 年パリ協定に基づく各国の排出削減目標）を決定し、国連気候変動枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC）事務局に提出した。さらに、2025 年 2 月 18 日に、1.5℃目標（2015 年パリ協定に盛り込まれた、産業革命前と比べて世界平均気温の上昇を 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求）に整合的で野心的な目標として、2035 年度および 2040 年度においてそれぞれ 2013 年度から 60%および 73%削減することを目指す地球温暖化対策計画を閣議決定し、2035 年度および 2040 年度の NDC（環境省日本の NDC WEB）として、UNFCCC 事務局に提出した。

カーボンニュートラルを達成するためには CO₂ 排出量を可能な限り削減した後に残る残余排出量を相殺するため、大気中の CO₂ を除去すること（Carbon Dioxide Removal: CDR）が必要であり、表 1 に示す通り、CDR を目的とした様々なネガティブエミッション技術（Negative Emission Technologies:

表 1 海洋 CDR に関わる NETs の分類と定義。経済産業省（2023）の p.4 より抜粋、一部改変

海洋肥沃化	海洋への養分散布や優良生物品種等を利用することにより生物学的生産を促して CO ₂ 吸収・固定化を人工的に加速する技術。大気中からの CO ₂ の吸収量の増加を見込む
海洋アルカリ度の向上	海水にアルカリ性の物質を添加し、海洋の自然な炭素吸収を促進する炭素除去の方法
沿岸生態系のブルーカーボン管理	マングローブ・塩性湿地・海草などの沿岸のブルーカーボン維持・再生による CDR。大型海藻類(例えば、昆布)など沿岸における他の炭素隔離の可能性を議論中
その他の海洋 CDR アプローチ	研究事例が少ないが、「人工湧昇」「作物残渣または丸太など陸上バイオマス投棄」「大型海藻養殖などの海洋バイオマス CDR オプション」「海水からの直接 CO ₂ 抽出（貯蔵あり）」などの手法がある

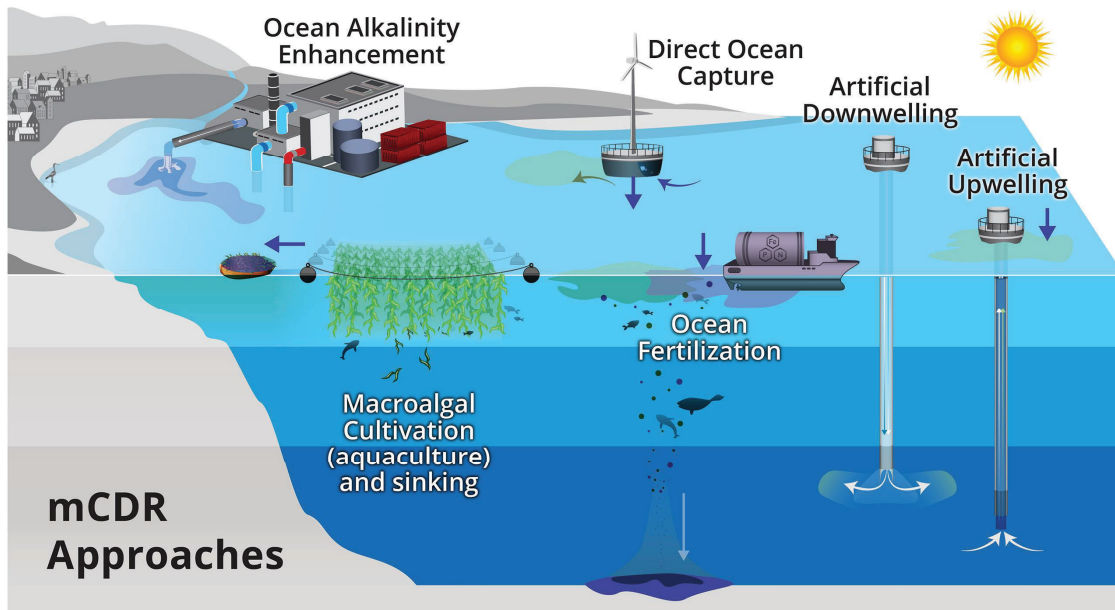


図1 ブルーカーボン以外の海洋 CDR に関わる NETs. 海洋肥沃化 (Ocean Fertilization), 海洋アルカリ度向上 (Ocean Alkalinity Enhancement), 人工沈降 (Artificial Downwelling), 人工湧昇 (Artificial Upwelling), 海洋からの直接 CO₂ 抽出 (Direct Ocean Capture), 大型海藻養殖 (Macroalgal Cultivation and sinking). なお、海藻養殖は基本的にブルーカーボンに含める場合が多い。出典：NOAA WEB b.

NETs) の開発が検討されている (経済産業省, 2023)。その中で、海洋 CDR に関わる NETs としては、「海洋肥沃化」、「海洋アルカリ度の向上」、「沿岸生態系のブルーカーボン管理」、「その他の海洋 CDR アプローチ」が挙げられている。本講義資料では「沿岸生態系のブルーカーボン管理」を主な対象とするが、ブルーカーボンの文脈で「海洋アルカリ度の向上」等の関連する他の NETs についても一部言及する。また、ブルーカーボン生態系は植物の光合成を基盤とする CO₂ 吸収源の一つと位置づけられることから、CDR の代わりに「吸収源」という用語を用いることとする。

図2 は 2050 年度までにカーボンニュートラルに向けた日本の NDC の排出量削減ロードマップと吸収源による貢献を模式的に示したものである。森林、農地土壌炭素、都市緑化等に加え、海洋生態系が隔離・貯留する炭素と定義される、ブルーカーボンが新たな吸収源として期待が高まっている。2030 年度には 4,770 万 t-CO₂/y の吸収量が見込まれているが、これは同年の排出量の 6.3% に相当するものである。NDC は 5 年毎に UNFCCC に提出する国の排出削減目標であるが、毎年の実績として温室効果ガス排出・吸収目録 (GHG インベントリ) を UNFCCC に提出する決まりとなっている。2024 年に提出された GHG インベントリでは 2022 年度のブルーカーボン由来の吸収量を 35 万 t-CO₂/y と報告した。この GHG インベントリでは世界で初めて海藻藻場による吸収を含めたことが特筆に値する。2035 年度および 2040 年度については、地球温暖化対策計画の施策一覧において、ブルーカーボンによる吸収量をそれぞれ 100 万 t-CO₂/y および 200 万 t-CO₂/y と見込むことが示された (環境省地球温暖化対策計画 (令和 7 年 2 月 18 日閣議決定) WEB)。2040 年度における排出量目標値は約 3800 万 t-CO₂/y と計算されるが、同年度のブルーカーボンによる 200 万 t-CO₂/y の吸収量は約 5% 程度に相当することとなる。2050 年度における残余排出量の政府試算は

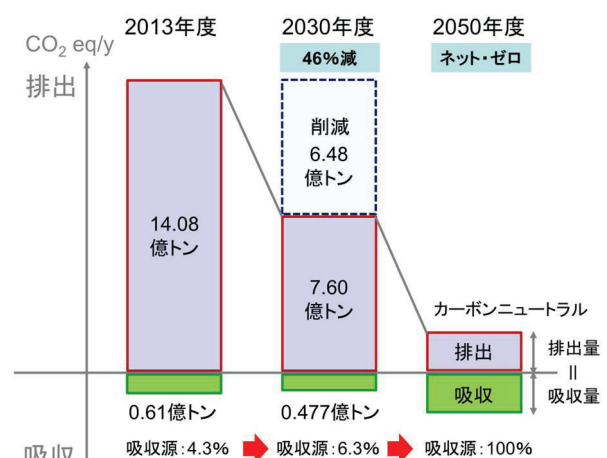


図2 2050 年度カーボンニュートラルに向けた日本の NDC における CO₂ 排出量削減ロードマップ。残余排出を吸収源が相殺するイメージ。

沿岸域の環境の保全・再生・創出 ～過去からの変遷、今後の動向～

Conservation, Restoration, and Creation of Coastal Environments -Changes from the past and future trends-

岡田 知也
Okada Tomonari

1. はじめに

本講習会の参加者と私とでは、沿岸域の環境分野に携わり始めた時点における水環境の状況が異なっているに違いない。私がこの分野に足を踏み入れた当時、沿岸域の水質は依然として悪く、海に出ればそのことを容易に実感できた。

学生時代、ある閉鎖性の湾で船に乗って海の色を観察した際、海面はまるでコーラが流出したかのように濁り、透明感はまったくなかった。また、湾奥の浅場には強い泥臭さが漂い、足を踏み入れると膝まで沈み込むほど泥が堆積していた。当時、干潟というものの存在を知らなかった私は、このような浅場は埋め立ててしまった方がよいとすら思っていた。このような経験を通じて、水質改善や自然再生の理念・概念に対して、ある程度の理解と共感を得ることができたと考えている。（とはいえ、自然再生において『再生が目指す姿は戦後あるいは高度成長期以前である』と言われても、『先生方にはその姿がイメージできても、我々には想像がつかない』と感じていたのも事実である。）では、『現在の沿岸域の水環境は、皆さんの目にはどのように映っているのでしょうか？』。そこで、海岸工学講演会や海洋開発シンポジウムの講演タイトルをテキストマイニングすることで、そこに共通する傾向が見出せるのではないかと考え、試みを行った。しかし、顕著な共通性は抽出されなかった。この結果は、私の中ではある程度予想されていた。というのも、異なる所属の研究者が、同一のテーマに対して異なるアプローチで研究を行うケースが年々減少しているという実感を持っていたからである。現在、異なる視点からの研究が進められているテーマとしては、CO₂ 吸収や環境 DNA などごく限られたものしか見られない。かつては主流であった水質改善に関する研究テーマは、今日では主流とは言い難い状況にある。このような状況から、皆さんにとって沿岸域の水環境は“改善の対象”ではなく、“中立的な状態”として認識されているのではないかと推察する。

沿岸域の水環境に対して、CO₂ 吸収に関する研究で携わっている場合、研究の主たる動機は温室効果ガスの排出削減であり、必ずしも沿岸域の水質や環境の改善ではないと考えられる。そのような中では、沿岸域の環境に関する研究や業務に従事していても、沿岸域の環境そのものへの興味や関心が希薄である場合もあるだろう。過去にも、『水質改善の研究は行っているが、海の生物には関心がない』といったケースは存在した。たとえば、水質指標として COD, Chl-a, DO 等を用いた数値モデルの開発には注力する一方で、植物プランクトンや魚類といった生物に対しては関心を持たないという研究者もいた。それでも当時は、沿岸域の環境について、ある種の“同じ景色”が存在していたように思われる。ところが現在は、その“同じ景色”が見えにくくなっているように感じられる。

ゆえに、沿岸域の環境保全・再生・創出に関する過去からの変遷を改めて見つめ直し、その上で



写真-1 水俣病の原因となった水銀を含むヘドロを封じ込める埋め立て工事を記す看板

今後の動向の位置づけを把握することで、沿岸域の環境に関する研究者や技術者が“同じ景色”を描き出すことができればと考える。

2. 沿岸域における環境の施策・取り組みの変遷

(1) 流入負荷の規制等

海域における環境への取組は、公害対策から始まった。戦後復興から高度経済成長期にかけて、公害は大きな社会問題となり、1967年（昭和42年）に「公害対策基本法」が制定され、1970年には「水質汚濁防止法」が成立した。沿岸域では、重金属やPCB等の有害物質、油分、高濃度の腐敗有機物などの汚染物質が堆積し、対策としてこれらの汚染汚泥の浚渫・除去が行われた（写真-1）。

「水質汚濁防止法」に基づく工場・事業場への排水規制強化により、海域環境は改善傾向を示したものの、国民の生活様式の変化や都市化の進展を背景として、人間活動が環境に与える影響は複雑化・多様化していった。従来のように個々の発生源に対してのみ規制を行う手法では対応が困難となり、多角的な取組が求められるようになった。

1973年（昭和48年）には、赤潮による養殖漁業の甚大な被害などを背景として、「瀬戸内海環境保全臨時措置法」が時限立法として制定され、産業排水のCOD流入負荷の半減や、埋立への特別配慮といった施策が始まった。その後、1978年（昭和53年）には同法が恒久法として「瀬戸内海環境保全特別措置法」と改称され、同年には「水質汚濁防止法」も改正され、排水基準だけでは環境基準の達成が困難な海域に対し、流入負荷削減を目的とした水質総量規制が導入された。東京湾、伊勢湾、瀬戸内海においては、CODの流入負荷に対する総量規制が1979年度（昭和54年度）から開始された。

さらに、大量生産・大量消費を基盤とする都市型生活が引き起こす環境問題が深刻化する中で、規制的手法を中心とした従来の枠組みでは対応が不十分となった。これを受けて、1993年（平成5年）には、環境政策の理念と基本的施策の方向性を示し、総合的な環境施策の展開の枠組みとして「環境基本法」が制定された。

「環境基本法」では、水環境の保全にあたって、環境負荷が水の自然的循環における浄化能力を超えないことが重要であるとされ、水質、水量、水生生物、水辺地を総合的にとらえ、水環境に関