

東日本大震災後の海の変化を知る—地理情報システムの活用と地理情報科学 (GIScience)



本論文は クリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。ただし、引用・転載している図表には原著物のライセンスが適用されます。ライセンスの写しをご覧いただくには、<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> にアクセスするか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。

This article is distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. Note that original licenses are applied for quoted or reprinted figures and tables. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

山北剛久 (海洋研究開発機構)

9.1 GIS は震災においてどのように用いられているか？

空間データの視覚化、操作、データベース化、解析を可能にする技術は GIS (Geographical Information System 地理情報システム) と呼ばれ、地図をコンピューター上で高度に利用することを可能にした。この技術の利用は米国で防災や軍需、公衆衛生、環境保全、都市計画などの分野で先行していた。日本では阪神・淡路大震災後の 1995 年 9 月、内閣官房に「地理情報システム (GIS) 関係省庁連絡会議」を設置。省庁横断的な情報整備と、行政や防災分野での GIS の活用が加速した (その後、測位・地理情報システム等推進会議、および地理空間情報活用推進会議へと引き継がれた)。

実際、災害や自然環境のように形や場所が刻々と変化し、紙地図と帳簿の表に番号を振っただけでは管理しきれない事象でこの技術の先進性は発揮される。例えば、神戸市では震災以前から GIS データを整備しており、瓦礫の撤去作業の進捗が、GIS データの活用があった場合に早かったことが指摘されている。なお、この事例では、神戸市が活用していた GIS データも震災で失われた。東日本大震災でも南三陸町の住民基本台帳のデータが失われた例をはじめ、様々な空間データも失われた。幸いなことに多くは作成を担当した業者に意図せず残っていたものを含む他所のデータから復旧できたとされ、本事例は GIS の有効性ととともに、有事に備えたデータ管理・システムのバックアップの重要性も示している。

東日本大震災において、発生した瓦礫の管理や都市計画に GIS がどのように用いられたかについては、震災の 1 年半後

の学会で碓井らが発表している(碓井, 2012)。ここでは、自治体によっては意思決定や作業の管理に活用できたところもあったことが示された。一方で、地盤の移動による過去の地図との根本的なずれの発生、基盤図の提供までのタイムラグなど単に利用者の技術的なリテラシー以外の課題も発生していたことが分かっている。この震災を踏まえて国土交通省国土政策局からは「震災・大規模災害対応における地理空間情報/GISの利活用マニュアル」が2014年3月に公表されている。ここでも、様々な情報をGIS上で集約・共有し、迅速・的確な意思決定と情報提供につながった事例が多数報告されたが、多くの被災団体がGISはもちろん紙地図さえも十分に活用できなかったことも指摘されている。

研究やデータ解析の実務分野では従来のGISにとらわれない動的な空間データの利用が広がった。デスクトップ上で限られた人のみが扱うシステムとしての時代から、web上に分散して機械可読な形で次々と保存されるデータを、オープンな技術を活用して各主体が独自に組み込んだwebシステムが動的に解析を行い結果を配信する、そんなクラウド情報基盤としての広がりを見せ始めたのである。

例えば、本田技研工業は自社製のカーナビゲーションシステム利用者を対象とした交通情報サービス「インターナビ」装着車によるフローティングカーデータを用いた「通行実績情報マップ」を東日本大震災の翌日に公開した。2週間後には本田技研工業、パイオニア、トヨタ自動車、日産自動車のデータをITS-Japanが集約した地図が「自動車通行実績情報マップ」としてGoogle Crisis Responseのサイトから配信された。被災や避難場所の情報の集約にあたってはオープンストリートマップ・ファウンデーション・ジャパン(OSMFJ)のメンバーが呼びかけの中心となったボランティアによって地図情報共有ツールUshahidiを搭載したサーバー「shinsai.info」が地震発生から4時間以内に公開された。その後もTwitterでエンジニアを募集して規模を増強し、各地の情報を収集した。

震災からしばらく後には、Twitterにおける発言のログなど、位置情報が付与された大量のデータが整備され、解析に利用可能になった。その他にNTTドコモが携帯電話の位置情報を一部の研究プロジェクトで利用可能にするなど、従来では考えられない大量の情報が利用可能になった。このようなビックデータを解析することにより、避難時の渋滞の発生や被災場所へのアクセスなどの、時間変動をもった空間データによって震災を振り返ることが可能になっている(東日本大震災ビッグデータワークショップ運営委員会, 2012)。

従来の静的なGISは一層当たり前に使われている。たとえば、環境省ではグリーン復興プロジェクトとして「東北地方太平洋沿岸地域自然環境調査重要自然マップ」を公表している。また、「しおかぜ自然環境ログ」や、日本自然保護協会の「SISIPA(戦略的保全地域情報システム)」に登録されたデータなども存在する。デスクトップで用いられるソフトだけではなく、オンラインで地図データを共有・配信するシステムが普及したこともあり、その存在感は大きい。

生態学の研究分野においても、近年、日本語のマニュアルや講習会、無料のソフトや比較的安価な教育機関向け商品が提供されていることから、利用者は急増している。たとえば、日本生態学会大会では2009年以降ほぼ毎年オープンソースのGISやリモートセンシングに関連する集会在開催され、空間統計を用いた高度な生息地推定や3次元データによる鳥類の採餌場所の推定などGISを用いなければ解決できない課題にも取組まれており、その進展は著しい。重要地域の検討などの合意形成ツールとしてや、情報の提供を行うプラットフォームとして、災害以外にも幅広く活用されている。

このような陸上でのGISの活用と発展と比べて、沿岸や海洋の分野においてGISの利用が進んでいるとは言い難い。これを定量的に示すために各学会の口頭・ポスター発表のタイトルにGIS等、各種キーワードが出現した発表数を比較したのが表9.1である。すると、水産分野では空間データを扱う研究事例としては、広域の物理環境のシミュレーションや衛星データ自体の取り扱いが多いものの、水産学会におけるGIS・空間というタイトルを使った発表数は2012年からの合計でそれぞれ3件と28件である。空間が関連する分野の割合に違いがあるとはいえ、同程度の全発表数である生態学会においては、それぞれ10件と122件である。この差は陸と海の他に空間データを扱う物理屋と水産データを扱う生物屋との間の分野間の隔たりが大きい可能性も指摘できる。

表 9.1 各学会の GIS や空間データに関する口頭・ポスター発表数。全発表数とタイトルにキーワードを有した発表件数の年合計値を示した。他に集会・シンポジウムなども実施されている。

		海洋学会	水産学会	生態学会	土木学会
全発表数	2012		1381	1385	
	2013		1278	1107	
	2014		1384	1164	3101
	2015	312	1244	1115	3294
	2016	459	1158	1054	3585
「GIS」	2012		2	3	
	2013		0	4	
	2014		0	3	3
	2015	0	1	0	3
	2016	1	0	0	1
「スケール」	2012		1	4	
	2013		0	11	
	2014		0	11	6
	2015	5	0	8	7
	2016	16	0	4	8
「空間」	2012		8	14	
	2013		9	28	
	2014		3	43	36
	2015	7	2	31	23
	2016	12	6	26	36
「地理」	2012		3	13	
	2013		4	15	
	2014		5	21	0
	2015	1	3	13	2
	2016	1	3	13	2
「分布」	2012		57	46	
	2013		66	74	
	2014		59	84	28
	2015	31	41	58	52
	2016	49	50	55	44



図 9.1 本稿で紹介する調査のフローチャート。

東日本大震災は巨大な津波をとめない沿岸域をはじめとする海域に甚大な被害を与えたが、その後の効率的な海域環境の管理のために GIS の利活用をさらに進めることはできるだろうか？

ここでは、環境省推進費 S9「生物多様性評価予測モデルの開発・適用と自然共生社会への政策提言」や S15「社会・生態システムの統合化による自然資本・生態系サービスの予測評価 (PANCES)」で作成したデータ・成果の利活用を含め (Yamakita *et al.*, 2015b, 2017; 山北, 2017), 東北マリンサイエンス拠点形成事業 (TEAMS) において筆者が取り組んだ、生物の分布と生息地の評価事例を中心に次のものを紹介する (図 9.1)。扱える空間スケールとデータセットに応じた目的設定と解析手法を紹介する観点から、特に沿岸と海底、広域と局所の異なる事例を取り上げた。

まず、東北太平洋側の沿岸域広域を対象に、利用できるデータが少ない場合に作成可能な評価地図の例を紹介し、作成した地図と震災被害や利用区分との重ね合わせから地域ごとの震災影響と回復可能性の特徴を紹介する。また、技術的な項目は付録 8.A, 8.B で、海域の基礎的空間データとデータ分析手法を紹介する。

次に、沖合い海底の広域を対象に、震災後の調査によって収集した生物データと震災以前から構築しているデータベースやデータを紹介します、これらを活用して震災前後の変化を比較する方法を紹介する。付録 8.C, 8.D として位置情報の取り扱いと、画像の自動認識の適用可能性を紹介する。

最後に、沖合いの海底における瓦礫分布をまず広い範囲で可視化した後に、瓦礫 1 つの局所スケールに目を向けて、生物分布と瓦礫との関係性の解析に、近年発展した画像を結合する解析技術 (付録 8.E) が活用できることを紹介する。

9.2 事前データのみが多数ある場合：沿岸の評価地図づくり

陸域のデータセットの多くが GIS ソフトですぐに利用可能な状態で用意され、近年は機械可読なフォーマットや web での配信も増加している。この整備されたデータを使って、生物の分布を推定することや地図化することが行われ、希少種の保全や管理計画の検討など様々な場面で活用されている。

これに対し、海域では前処理を要さず使えるデータは少ない（詳細を付録 8.A に示す）。新たな調査を行うにしても陸域と比べてより多くの労力と予算を要する。そのため震災後の当初は震災直後の事後情報はもちろん、事前情報もほとんど無いに等しかった。幸いなことに、日本の地理データは高い精度で作成されているものが多く、沿岸域に関しては陸域で提供されているデータや調査を拡大して見ると、海岸線周辺の線状で示されている情報が各地の沿岸環境情報として一部利用できる。またいくつかは環境省や国土交通省によって海岸や沿岸に特化した調査も実施されている。

このような沿岸の既存のデータを活用し、生物の分布の地図化や予測の例を紹介したい。ここでは特に種多様性の回復可能性（ポテンシャル）を予測する。まず粗い解像度で、環境変数のデータと、震災前に取得された対象生物の全国の分布データを用意。生物の分布と環境との関係から分布適地を推定し、結果に基づいて種多様性のポテンシャルを評価する。ここでは後述するようにデータの入手可能性と被害はリアス式海岸の湾奥で大きいことから干潟の生物分布を対象とする。なお、用いた環境データは元の解像度が 1 度や 10km と粗いものの、生物多様性にとっての重要な地域の特定期や将来予測にしばしば用いられる解像度かつ手法である (Yamakita *et al.*, 2015b, 2017; 山北, 2017)。

同様な事前データと予測に基づく災害被害を予測評価した地図は防災分野ではハザードマップとして作成される。洪水や土砂災害のように法律に基づいて作成されるものや、法律ではないものの国の総合計画や国際条約などの目標に則したものがほとんどである。例えば、海洋環境分野においてはこれまで、油の流出による影響を評価した脆弱沿岸海域図が作成されている。これは、1989 年に米国アラスカ州で発生したタンカーの座礁事故にともなう大量の油流出事故をうけた国際条約（「1990 年の油による汚染に係る準備、対応及び協力に関する国際条約」（通称 OPRC 条約）の発効、および 1997 年に島根県隠岐島沖で発生したタンカー、ナホトカ号の重油流失事故をうけて「油汚染事件への準備及び対応のための国家的な緊急時計画」が閣議決定がなされたことにより作成された。具体的には日本全国の海岸において、藻場などの生物生息場、稀少な生物や群集、保護区や文化遺産、レジャー利用や拠点、発電所や港湾など産業利用についての分布図を作成し、これらを統合評価している。

また、汎用向けの海洋情報を閲覧するための「海洋台帳」が「海洋基本計画」（2008 年 3 月閣議決定）における情報提供施策を受けたものとして作成されている（図 9.2）。ここでは上記の情報だけでなく、海図に掲載の情報や海上交通、海上保安庁が提供するデータベースにおける水温情報をはじめとする、多くの情報が掲載されている。

しかし、これらの国が作成した海域の評価図はデータは画像のみで提供されるものや、JavaScript や Flash による描画を用いて Web ページからの閲覧もしくは画像の出力のみしかできないようになっており、他の目的のためにデータの追加や編集、解析を行ったりすることはできない（ただし近年、図化のための編集機能がいくつか追加された）。また、データソースやその精度も各都道府県の担当部局に基づくなどとされており、不明な点が多い。そのため、今回の震災に対応した生物多様性の影響を評価するに当たり、新たに全国の沿岸の地理情報も整備した。

9.3 干潟の生物の潜在分布を在のみデータから推定する

干潟の生物の分布推定を回復ポテンシャルの指標とするにあたり、まず生物の分布適地推定とはどのような手法が簡単に説明したい。生物の分布を推定する方法には様々な方法があり、手法に基づいて分けると、1) 数学的なモデルの当てはめに基づく「解析的手法」、2) 既知の生物変動プロセスを記述した「シミュレーションによる手法」、3) 分布や減少のパターンを要因と対応させる「統計的な手法」に分けられる (Gallien *et al.*, 2010)。

解析的手法には数学的な曲線の当てはめや、個体群の行列モデルなどの理想的なモデルや解析と関連づけられるモデルが挙げられる。シミュレーションによる手法では、格子状のセルを生物の生息地に見立てて、1 つ前の時間の状態を参



図 9.2 海洋台帳のサイトの例。脆弱沿岸海域で評価した結果も表示できる (<http://www.kaiyoudaichou.go.jp/> より引用)。

照しながら毎年の時間変化の計算を行うセルラーオートマトンや、生物の 1 個体に見立てたオブジェクトに、あらかじめ行動や環境に対する挙動を与えておき、環境勾配のある空間上でオブジェクトの挙動についてのシミュレーションを走らせる個体ベースモデル、さらに、単純な方法として過去の景観変化を一定の変化プロセスとして、そのまま将来に当てはめる景観変化のモデルなどが挙げられる。

統計的な手法については、近年様々な手法が用いられているが、環境データと生物分布との統計的關係から生物の生息適地の空間分布を推定する方法をまとめて、「種の分布モデル (Species Distribution Models ; SDMs)」と呼ぶ (図 9.3)。解析手法が容易になったことや生物の分布データと対応させる環境データのデータベースがそろってきたことから近年多く用いられる。この方法は「ニッチモデリング」や、「最適生息地モデル」などの別名でも呼ばれるように、種の分布が環境によって規定されているという仮説に基づいている。そのため、熱帯雨林の内部の種多様性のように統合中立説で分布が説明できる範囲や、分散過程による制約が大きい場所、歴史的な要因 (攪乱など) の影響が大きい場所、種間相互作用が分布に強く影響する場合への適用は注意が必要である。一方で、グローバルな気候の影響や潜在的な分布可能域の推定などの広い範囲の分布を環境と関連づけて見るには適している。

また、詳細なプロセスを考慮するシミュレーションによる手法や、単純な数式を仮定してしまう解析的な手法と比べると、データの統計的な関係性を重視するため、詳しい生態が野外で知られていない生物の分布を現実的な範囲で推定することができ、同時に重要な要因の絞り込みを行うこともできる。そのため、生態がよく知られていないものも含む、多数の生物の潜在的な生息地を推定する目的に適している。

実際に、種の分布推定モデルを利用して震災前の環境での生物の潜在的な分布推定をおこなうにあたり、生物の分布については全国の干潟のベントスの分布について、環境省の自然環境保全基礎調査で得られた分布データを利用した。また、環境の変数として、海岸線長、海岸からの距離、地形、平年値のクロロフィル量、冬季最低水温、懸濁体無機炭素 (PIC)、自

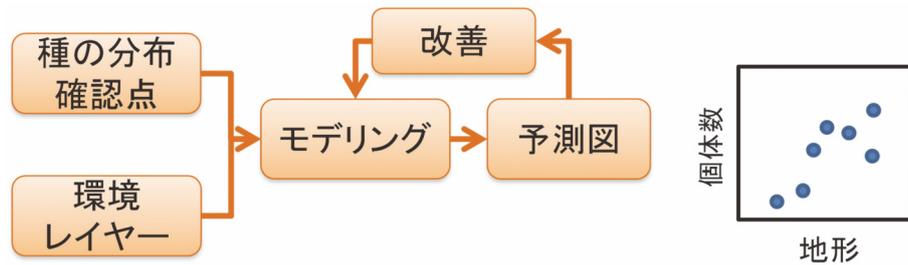


図 9.3 分布推定モデルの枠組みとモデルに用いる散布図の例。

然海岸からの距離、波高を抽出した。これら環境の変数を 1km のメッシュに集計・内挿したものを説明変数として、ソフトウェア MaxEnt を用いた最大エントロピー法による種の分布推定 (Elith *et al.*, 2006; Phillips and Dudík, 2008) を実施した。

統計モデルから機械学習まで様々なモデルが SDM に用いられるが、ここで使用した最大エントロピー法とは、在データ (出現) のみから計算でき、明示的な不在を必要としない点の特徴である。そのため容易に使えるにも関わらず、他の不在データを用いる解析手法のモデルと同等以上に良いモデルが比較的少数の標本でも作成できる。ただし、不在データを明示的に用いない分、データの偏りや調査対象範囲の広さと在データの分布範囲が解析結果に強く影響する点に注意が必要である。モデルの詳細な原理は Elith による原典や、日本語の解説を参照されたいが (Elith *et al.*, 2006; 角谷, 2010), 簡易的に説明すると、在データのあった場所の環境の確率密度関数と、在データの無かった場所の環境の確率密度関数との距離を最小にするような環境変数の値を、尤度の近似値を指標として用いて、繰り返しサンプリングすることで見つけ出す手法で求めているものである。

結果の取りまとめにあたり、データとモデルの一致性の評価には感度と特異度を表示した図から積算面積の割合 (AUC) を種ごとに抽出し、値が 0.7 以上のものを用いた (図 9.4; AUC については付録 8.B を参照)。この指標はどのくらいよくモデルがデータを説明しているか、つまり適合度 (performance) の指標である。ランダムな場合に AUC が 0.5 となることから、ランダムな場合と識別できるシグナルかどうかも含めた検討ができる。モデルによる推定と実際のデータとの一致性と、実際の真の情報を指標するために使えるかは必ずしも同じではないので注意が必要であるものの、この方法でモデルが与えたデータの範囲で意味がある説明ができていくかを知ることができる。

なお、種数多様性の評価にあたっては、種ごとの比較には maximum training sensitivity + specificity logistic threshold を閾値として在不在を設定し、分布ポテンシャルの予測とした。また、種多様性の評価には AUC の大小による重み付けなどの考慮はせずに、すべての種の在不在の推定値を積算した。

分布推定モデルの予備的な結果では、二枚貝、甲殻類、多毛類を含む、多くの干潟のベントスの分布には最低水温が寄与するとともに、海岸線の量と複雑性を示すグリッド内の海岸線長が平均して 17% 以上で最も影響していた。そのほかに海岸からの距離や潮汐の大きさ、さらには濁りを代表している衛星から抽出した懸濁体無機炭素 (PIC) の値が平均して高い寄与を示した。海藻類の分布についても同様の解析を行うと水温の寄与はさらに高い 35%、海岸線長は 22%、栄養塩は 13% の寄与となり、水温との関係性が一層明瞭であった。

結果のうち、特に天然の干潟におけるマガキの分布に基づいて解析した結果をここで示す (図 9.4)。まず半分の数でほぼすべてのデータを推定できておりモデルは良く適合していた (AUC=0.87±0.06)。水温について年平均値を用いた場合には、気候変動で注目される水温の寄与は低く、結果には海岸線の長さが 33.7% と高い寄与で正に働いたほか、

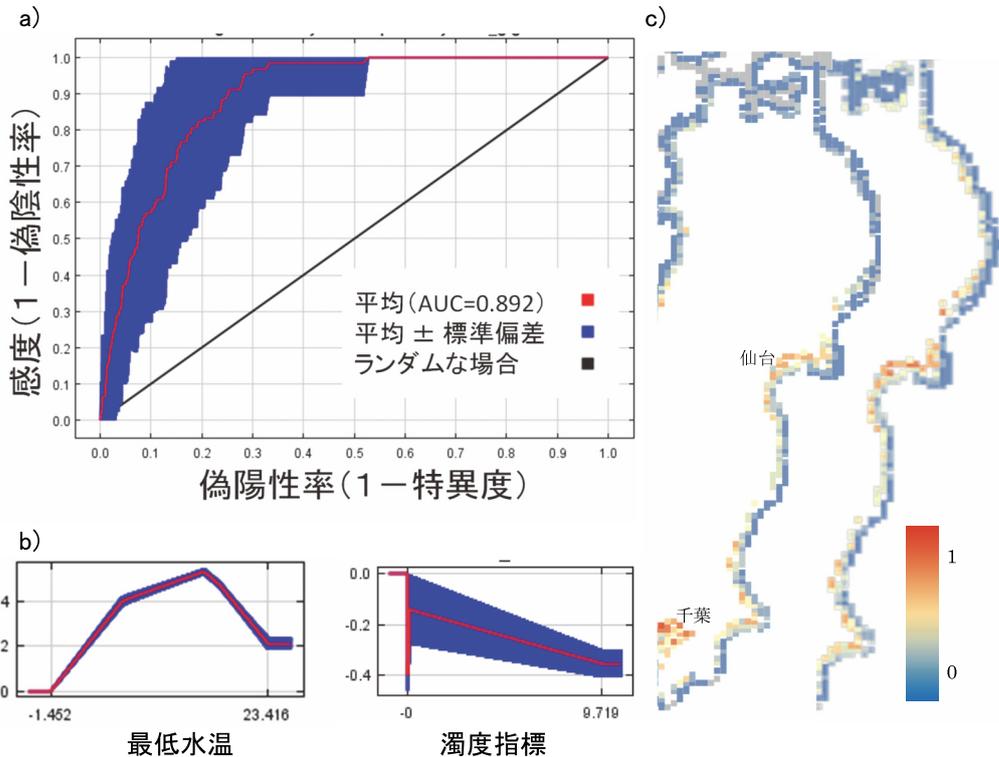


図 9.4 最低水温を用いたマガキの潜在分布域推定結果の例。a) ROC 曲線によるモデルの一致性の評価, b) 各変数と分布との関係性の例, c) 現在 (左) と将来 2050 年 (右) の潜在分布域の推定図, 色は分布確率に相当する値を示す。

PIC が 28.1%, 潮汐高が 11.3% 影響していた (Yamakita, 2016)。一方, 冬季の最低水温を変数に用いた場合の結果は水温が高く寄与した。水温と濁度の寄与が 20% 以上であり, 潮汐高が 18%, 海岸線長が 16% と続いた。なお, この寄与率という値には変数間の相関も影響するので, そうした考慮が今後必要ではある。

結果の分布ポテンシャルを調査対象域に地名が存在する湾ごとに集計したところ, 松島湾, 気仙沼湾, 女川湾, 鮫ノ浦湾で最大値は 0.5 以上の分布ポテンシャルが得られたが, 平均値にばらつきは多く同じ湾でも場所による差が大きいがわかった。例えば, 石巻湾では最大の分布確率は 0.7 であるが 0.2 を示すグリッドも隣に見られた。これらは湾口と湾奥など実際に湾の中の位置による違いで生息適地として大きな差が出た可能性と, 解析の解像度やグリッドで区切られた範囲のばらつきにより生じた可能性との双方が考えられる。そのため湾内レベルの詳細な検討には, より解像度が高いデータを充実させることが今後必要であろう。

この結果は, 単に重要な場所や再生のポテンシャルを示すだけでなく, 将来の温暖化による変化を予測することもできる (図 9.4c)。例えば, 地球温暖化シナリオのうち, 2050 年の気温変化が平均 2.0 度と最も高くなる RCP8.5 の値を適用すると, 将来東北ではマガキの生育適地がむしろ拡大する結果が示された。今回使用したデータセットに単純に基づいてよいものとするれば, 関東から瀬戸内海で一般的に多く見られるマガキの自然分布が東北地方でもかなり一般的に広がる可能性が高いと言えるかもしれない。ただし, 関東から瀬戸内海にかけての太平洋側の調査点では広い干潟が多く, マガキも頻繁に調査点に出現しやすい。そのため, MaxEnt のモデルのデメリットとされる調査地のバイアスが影響している可能性も考慮する余地はあろう。今後実験や実測によるデータとの比較が期待される。また, こうした種ごとのモデルの活用にあたっては在不在を推定しているのであって, そのポテンシャルが生産量と相関するとは必ずしも限らない点も留意が必要である。

このようにまだまだ海のデータは、その情報の充実度と利用の容易さに課題は見られるものの、既存のデータだけで迅速にモデルを作成して重要な場所を特定する枠組みは既に存在していることがわかる。全く情報が無い場合の暫定的な指針を検討する上で、こうした結果が空間データの解析によって得られることは今後様々な場面で活用できる可能性を秘めている。その例を次に紹介する。

9.4 潜在種数による評価図と空間利用や震災被害との重なり

ここまで得られた結果は、単に干潟に生息する種ごとの分布や種数のポテンシャルとして見せるだけでなく、GIS が得意とする地図の重ね合わせによって、他の要因と結果との関係性をみることができ。ここでは震災の被害に関連する情報と、管理についての情報を収集する。それらとの比較によって、種数のポテンシャルが高く、被害が大きいと予想される場所がどこか、その場所がどのような管理体制になっているのかについて示すことができる。そのような地図があれば、今後どのような管理様式を活用してどこを再生や保全していくべきなのかについて、検討が容易にできる。

震災被害に関連する情報として、震災後に出された GPS 観測による地盤の変化 (Ozawa *et al.*, 2011) の内挿、現地調査によって収集された津波の高さの情報 (東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012)、研究者へのアンケートによる被害の大きさについての情報を収集した。また、管理体制に関連する情報として、国立公園、港湾区域、漁業権区域の情報を重ね合わせた。

重ね合わせ (オーバーレイ) の結果を図 9.5 を参照しながら説明する。まず図の下から 3 つ目の生物群集への被害の度合いが点で表記されたレイヤーを見ていただきたい。これは各地点を調査地とする沿岸域の研究者にアンケートによって震災による生物への影響を問い合わせた結果である。左の凡例の緑が被害が少なく、赤が被害が大きかったことを示す。その結果は三陸のリアス式海岸の奥部 (すなわち干潟が形成されやすい場所) で大きかった。これは津波の高かった場所と一致する。この場所は分布推定から干潟の生物多様性の高いポテンシャルが示されており、今後の回復が期待される。

この地域の管理様式は国立公園と漁業権区域が該当する。漁業権区域は漁業の復興自体と沿岸の生態系そのものに直接関わり、重要であるが、ここでは国立公園について注目したい。一般に陸側が海岸まで国立公園に指定されている地域では、特に海域に注目していない場合でも海岸線から沖合い 1km にわたって国立公園の普通地域による指定がなされる。海域の普通地域はおよそ 7000km²、瀬戸内海を除いても約 3500km²見られる。そのため、海域の管理にあたり国立公園管理の視点が十分に生かされているとは限らない。一方で、海域公園 (旧称 海中公園) として指定されている地域も全国でおよそ 26km²ある。三陸においては三陸復興国立公園 (旧称 陸中海岸国立公園) のうち気仙沼に 3 か所指定があるのみである。復興事業において、国立公園の特に海域の管理の観点も含めた検討の必要性があることが指摘できる。

三陸で被害が大きかった一方で、仙台湾の奥部では震災の生物への影響は小さかった。地域によっては人的被害が多数出るほどの高さの津波があったものの (50cm でも立ってられないと言われる)、相対的には津波の高さは低く、地形によって勢いも相対的に弱かった。また、牡鹿半島で大きな地盤沈下が見られたが、少なくとも直後には干潟の生物分布への影響は少なかったと考えられる。この仙台湾奥部でもやはり干潟の生物多様性のポテンシャルが高く推定されている。三陸と比べると、漁業権区域が広く分布している点は同じであるが、港湾区域が周辺に分布し、復興にあたり港湾工事が多く行われると考えられた。こうした工事でどのような配慮ができるかの検討が重要であると指摘できる。

このように、干潟の生物の分布ポテンシャルに基づく生物多様性ポテンシャルが高い場所において被害の大小があることが分かった。被害が大きかった場所での生息地環境の回復が、または小さかった場所では保護を図ることが必要とい

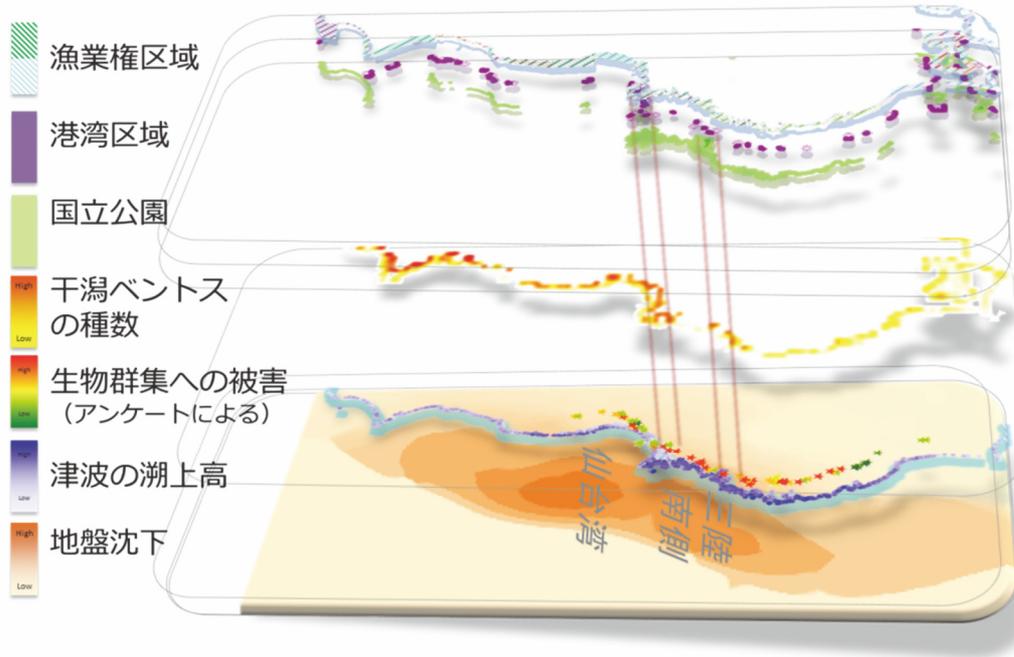


図 9.5 推定された干潟ベントスの生物多様性のポテンシャルの他, 震災被害や管理区域についての情報を重ね合わせた地図。

え, 効果的な回復や保護の実施に考慮すべき主な管理計画が抽出されたと言える。ただし, 実務上は震災後の復興計画の検討にこのような推定を直接生かす場を設けることはできなかった。推定結果どころか (公表についての議論があったとはいえ) 現状の重要な生物の分布地域を公式にまとめて地図に盛り込むこともすぐにはできなかった。データとして見られる状態にしておくだけでなく, 事前にハザードマップなどと同様に生物多様性情報の主題図として整備し (図 9.6), それも二次利用や再解析が可能な形で公開しておくことが今後有効であると考えられる。

9.5 事後データ取得と変化比較の試み：沖合い海底の生物調査

ここまで, 震災直後の暫定的な処方として, データが充実していた沿岸を対象とした検討を行ってきた。一方で沖合いにおいても震災後の調査が行われ, 徐々にデータが集積された。ここからは筆者の所属する JAMSTEC が主な対象としている沖合いの調査について, まずどのような方法でデータが得られるのかを調査手法やデータベースの例を含めて概説する。次に, それらを地図データ化する手法と解析の課題について, 底生性の生物と瓦礫を例に示す。最後に地理情報科学と並行して発展する画像解析技術の応用例を紹介する。

9.6 調査手法ごとに取得できる海底生物データとその限界

沖合いの海域において入手できる生物データとしてまず漁業活動に基づくものが挙げられる。しかしこれらは, 生物の定量化を目的としていないため科学的な調査とは異なり, データの偏りや不確実性を多くともなう。さらに漁獲を目的

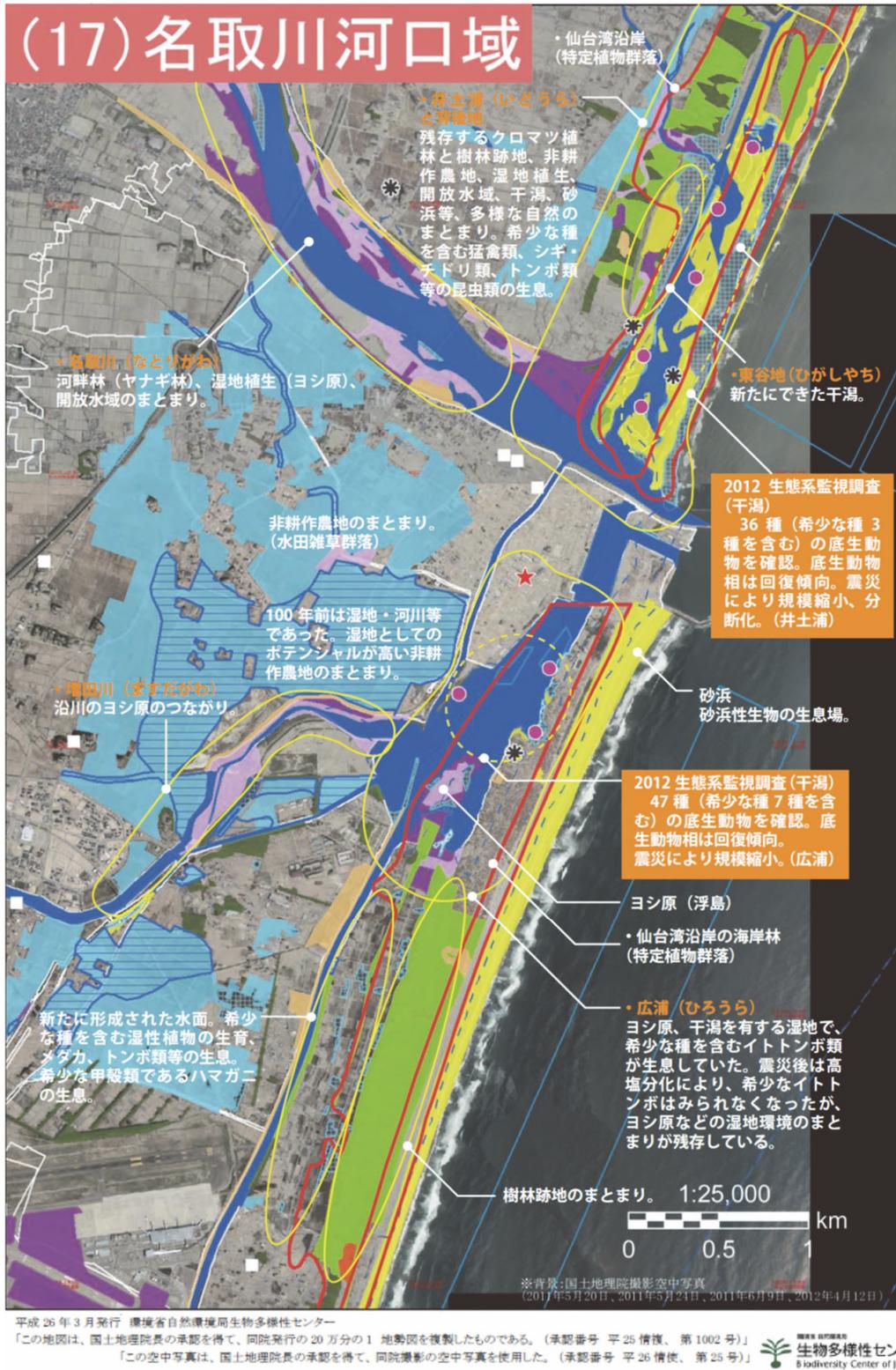


図 9.6 その後、平成 24 年度の調査結果をもとに整備された環境省の重要自然マップの例。「生物が生息・生育する環境(ハビタット)」が容易に見られるようになってきている(環境省 報道発表資料 平成 26 年 4 月 4 日～環境省グリーン復興プロジェクト～東北地方太平洋沿岸地域自然環境調査 重要自然マップの公表について <http://www.env.go.jp/press/18017.html> より引用)。

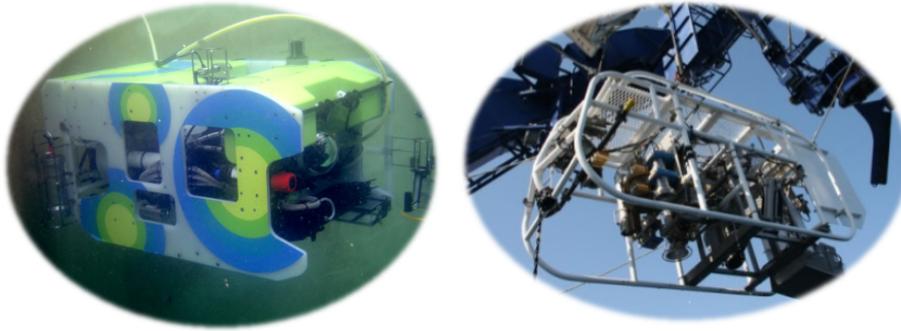


図 9.7 無人探査機 (ROV) クラムボンと曳航型カメラ (Deep tow) の写真。Copyright © JAMSTEC. All rights reserved.

としているため、対象が水産有用種に限られており、捕獲手法もそれらの生物を目的に特化したものである。プランクトンなどについては水産研究機関による幾分かの調査があるものの、海底の非水産生物に関するデータが得られることは稀である。さらに、震災後は漁港の被災や漁船の不足、さらには原子力発電所の事故の影響で試験的な操業を除き多くの漁業者が一時的あるいは現在も操業できていない。

このように既存の統計情報の継続性も震災で脅かされた一方で、震災後には震災の影響評価を目的とした海底の学術調査が複数実施された。例えば JAMSTEC では 2012 年の時点で曳航型カメラ、ディープトウによる調査を 7 回行った (図 9.7)。以降、合計 70 回の無人探査機 (ROV) による潜航を実施している (2015 年現在)。その距離はディープトウによる調査で 12 潜航 130km, 小型の ROV, クラムボンで 21 潜航 35km, 大型の ROV, ハイパードルフィンで 54 回 100km となっている。その他に採泥器に生物調査用のビデオカメラを付けた例などもある。合計すると調査距離は 250km 以上に達し、一見広範囲をカバーできているように見えるが、潜航で見える範囲はせいぜい数メートルであり、調査の対象範囲は東西に海溝から陸までの 250km, 南北には青森から福島までの 500km であるから、沖まで 1 回通過した程度の範囲に過ぎない。

限られた点から全体を推定するには、調査点の適切な配置が重要である。対象とする生物の分布傾向が全く不明な場合には、理想的には対象地域全域からランダムにサンプリングする必要がある。さらに局所的な空間変異を知るために、階層的に調査点を配置することや、時間変動と要因を知るために影響が予想される要因の有無・強弱に応じ、コントロールと処理区を用意した野外の比較対象実験が考えられる。しかし、沖合いの海洋調査の場合は刻々と変わる海況に合わせて調査地点を設定せざるを得ないことや、震災後の様々なリクエストをはじめ、複数の調査テーマを同時に実施していることから、生物分布調査のみを目的として多数のあらかじめ決めた点で調査することは容易ではない。

またオペレーションの観点からは ROV では数 km, ディープトウでは 10 数 km 程度の範囲の調査が一般的である。離れた場所間を船速を上げて移動しながら、多数の地点で投げ込み式のコアサンプラーとカメラを投下する方法も地質調査などで用いられているが、1 点底に到達させ、引き上げるまでに十数分がかかる。そのため調査範囲全域をカバーするためにかかる調査期間は月単位になる。

生物分布や生物地理的調査への関心が高い海外においては、距離当たりの調査コストが安くオペレーションが容易なディープトウを活用した研究が多く取り上げられている。生物分布調査のみを目的として海底谷とその外側に複数の側線を設けた調査を数多くの海底谷で行う米国における研究例や、1 つの海山を四方八方から網羅的に調査したニュージーランドにおける研究例がある (Anderson *et al.*, 2016; Auster *et al.*, 2005)。

このような生物地理的な研究は近年増加している一方で、ディープトウによる画像は高速で移動してぶれるために、種の判別が困難である。特に JAMSTEC のディープトウは作業や物体確認用の目的がほとんどで古いもののため、生物調査目的でも利用される ROV よりもかなり画質が粗い。高画質なカメラの普及にともない今後改善されることが期待されるが、現時点では我々の調査の多くは、調査範囲は狭いものの対象を確実にとらえ、現場での作業が可能な ROV を主に用いている。ただし、調査範囲以外にも課題もあり、高画質化の進展につれて 1 日あたりのデータ量が数百 MB から数 TB になる点もその一つに挙げられる。実際に生物の分布推定に当たってはそこから映像をコンバートする作業や、画像を一定間隔で切り出す作業を経て、生物を目視で抽出する作業が必要になる。そのため映像の取得範囲だけでなく、生物の抽出速度もデータ化の律速になるのが現状である。こうした作業の効率化についてはいくつかの提案がなされているほか、近年は自動化技術も検討されている（自動化については付録 8.D にて後述する）。

9.7 映像や画像アーカイブの活用による過去の把握

震災後の生物分布調査と評価の前に、震災前のベースラインの生物分布情報は不可欠である。そのため、まずはじめに、過去の東北沖の生物分布情報を探した。JAMSTEC ではこれまでの調査映像はすべてアーカイブされており、オンラインでサムネイルを見ることができる深海映像・画像アーカイブス (JAMSTEC E-library of Deep-sea Images (J-EDI)) というサイトが公開されている。さらに、航海の記録は一般向けの web データベースも存在するが、内部向けに ArcIMS というソフトを用いた位置情報をもつ GIS データベースサーバーが用意されている。ここには、すべての船舶による調査の調査位置や日時、記録内容などのメタデータが集約されている。検索すると図 9.8 に示したように、多数の過去の調査が見つかり、これらのデータを活用して震災前の生物の分布を再現し、変化を知ることが期待された (図 9.8 の大きな白丸が調査点である)。

この図、一見すると生物についてのコメントも多く見られ、震災前にもいくつもの調査が実施されているように見える。しかし、実際に映像を見るとほとんどが機器の設置やテスト、地震関連の調査などの生物調査以外のものであり、海底の生物分布の定量的検討には不適であった。そんななかにも生物の分布が的確に把握できそうな潜航が数潜航見られた。ただし、その潜航も古いものは ROV の位置が手書きの情報で、十分な位置情報が得られないなど、地図に落とす上での数々の課題が山積していた (海中での位置の把握については、付録 8.C を参照)。

大規模な過去の映像データベースをもってしても、生物分布の検討に使うには局所の密度程度の情報にしかならないのか。そうあきらめかけていたころ、底質の分布について旧地質調査所、現産業総合研究センターの研究協力を検討していた際に、過去の地質調査において海底を撮影していることがわかった。1980 年代に日本中の海底の地質調査を実施した際に、多くの場所で写真が撮影されていたのである。電子化されていないネガを見た瞬間に胸を躍らせながら、独法化や引っ越しを経ても廃棄されずに残った幸運に感謝した (図 9.9)。

9.8 沖合い海底の生物の状況と、クモヒトデへの注目

震災後の沖合い海域の生物にどのような変化があったのだろうか。過去のデータを探しているうちに、いくつか断片的な調査結果が届いてきた。例えば、震源付近の水深が 2000m を超えるような場所では底質が動き、亀裂からメタンが噴出したことが指摘されている (Kawagucci *et al.*, 2012)。震源から離れた沖合いの海底においては、乱泥流の痕跡が見られる (Arai *et al.*, 2013)。他に、有孔虫等の 1mm 以下のメイオベントス群集の組成は場所によって変化はその有無も含めて様々であること (Kitahashi *et al.*, 2014)、キチジ個体群は遺伝子レベルで影響はないこと (Sakaguchi *et al.*, 2014) が



図 9.8 J-EDI から抽出した生物コメントデータの分布。表示のためにデータの点を元の調査点の周りにランダムにずらしたが、調査点はまばらな点(白丸)で、海底の位置情報の特定も困難であった。背景は地形の凹凸を示す。JTOPO30 等から CS 立体図をアレンジし作成。



図 9.9 ROV クラムボンによって撮影された三陸沖の海底の様子。星型の生物はクモヒトデ, 右上に見えるのはアナゴの一種。過去のフィルム画像はここまで鮮明ではないが, 海底の様子をよく捉えていた。Copyright © JAMSTEC. All rights reserved.

示された。しかし、これらの検討はどれも数回の潜航やサンプリングによる数地点、または局所の事例であり東北沖全域でどのような変化があったのかはわかっていない。

その検証には、過去の写真にも明瞭に映っており、この海域の海底で最も優占するクモヒトデ類が最適である。さらに、クモヒトデ類はサメガレイやキチジの胃内容物から頻繁に見つかっており、主要な餌資源の 1 つであると考えられている (後藤, 2004; Hattori *et al.*, 2009; 藤田, 1996)。特にカレイ類に関して、ほぼ専食するものもいることが指摘されており、水産上重要であるといえる。したがって、この海域の海底における生産性の評価にも、海底の優占種であるクモヒトデ類の密度の推定が使えると考えた。地震と津波の影響による海底の変化の有無を調べるベースラインとしてだけでなく、底魚の漁業との関係性を含めた海底の指標生物となりうるだろう。

そのために過去に東北沖で網羅的に実施された調査の撮影画像から、クモヒトデを抽出することで、数百 km のスケールにわたる広域の分布と密度を可視化し、その要因を推定することを試みることにした。

9.9 生物データおよび環境データの整備

震災前の生物分布については、地質調査のために 1981 年 4 月から 5 月に釜石沖において、海底の底質をグラブ型のサンプラーで採集するとともに、着底直前に錘によるトリガーを用いたフィルム式のカメラによって撮影された資料を用いた。なお、画像の撮影範囲はおおよそ 3m^2 であった。撮影された画像をデジタル化し、画像をタッチパネルの上でトレースしてクモヒトデ類の数とサイズとを抽出した。なお、トレースされた画像は Image J の粒子解析機能を用いて、サイズや数が解析されるとともに、後日自動認識の教師データにもできるように、トレースの中心点から一定の範囲を切り出して保存した (自動認識については付録 8.D を参照)。

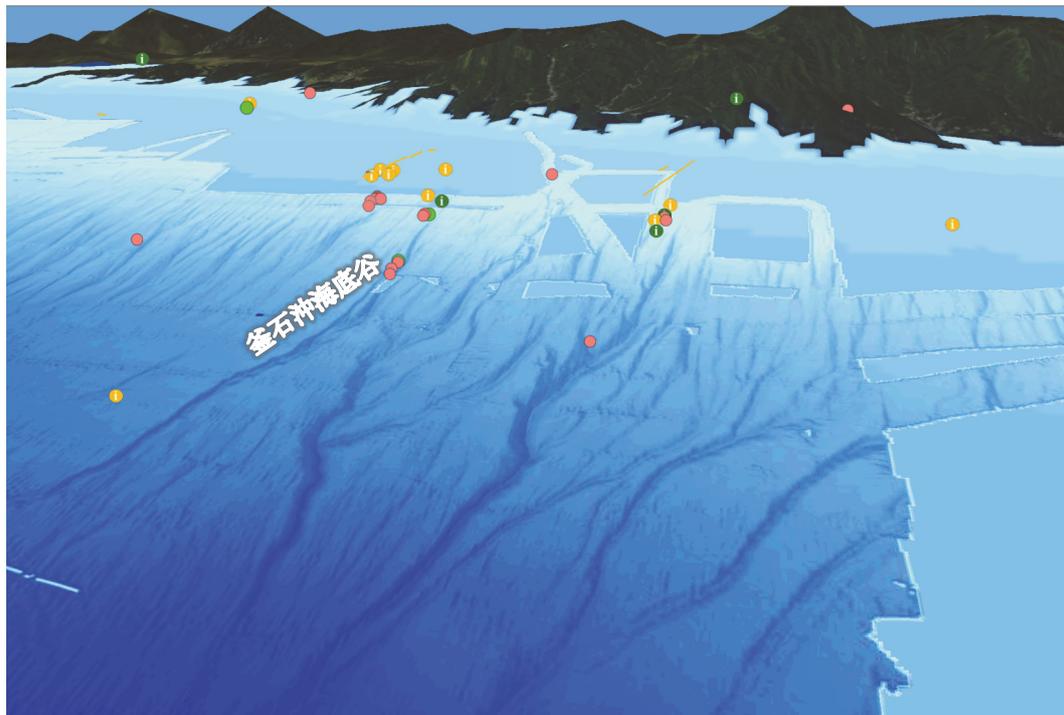


図 9.10 東北沖の地形のデータの 3 次元表示の例。海底谷が走る様子が明瞭であり、単に高さ以外の情報もここから抽出できる。点は調査点を表す。データの作成には JTOPO30 と独自に取得したデータを用いた。

環境データの入手も沖合いの生物分布の検討にあたっては大きな課題である。しかし、地形から作成できる変数だけでも水深のほかに様々なものがあり、情報が少ない海底生物の分布推定に有効である。たとえば、海岸や震源（海溝）からの距離、地形の傾き、さらには地形上の位置の指標である TPI (Topographic Position Index) をここでは用いた (図 9.10)。TPI とは地形の傾きだけでは同じ値になってしまう谷底と山の尾根とを区別して指標できる工夫がなされた地形タイプを表す変数である。

地形のほかに、衛星データから得られる値に表層の植物プランクトン量の指標であるクロロフィル a 量や水温のデータが挙げられる。しかし、海底の値を知ることは困難であることから植物プランクトン量の指標は表層の値を用い、水温については同化データに基づく海底の値を用いた。なお、継続して衛星データが得られるのはクロロフィル a 量で 2004 年 7 月から、海表面温度で 1982 年の途中からである。そのため、調査前の期間の環境の変数が得られない。そして、そもそもここでは長期の平均的変化の影響を見ることが目的であるから、これらの変数は 2000 年代の平均値を算出した平年値として計算に用いた。

9.10 クモヒトデの分布予測と現状との比較可能性

クモヒトデの個体数を扱う場合は、沿岸域で用いた在のみのデータまたは在不在のデータの取り扱いと異なり、カウントデータとして取り扱う。そのため離散値を扱える分布型を適用したモデルを考える必要がある。離散値を扱える分布型はいくつかあり、二項分布やポアソン分布があるが、ここでは負の二項分布を用いて一般化線形モデルによる推定を行った。なお、データのタイプと GLM で用いることができる分布型の検討については久保による解説が詳しい (久保,

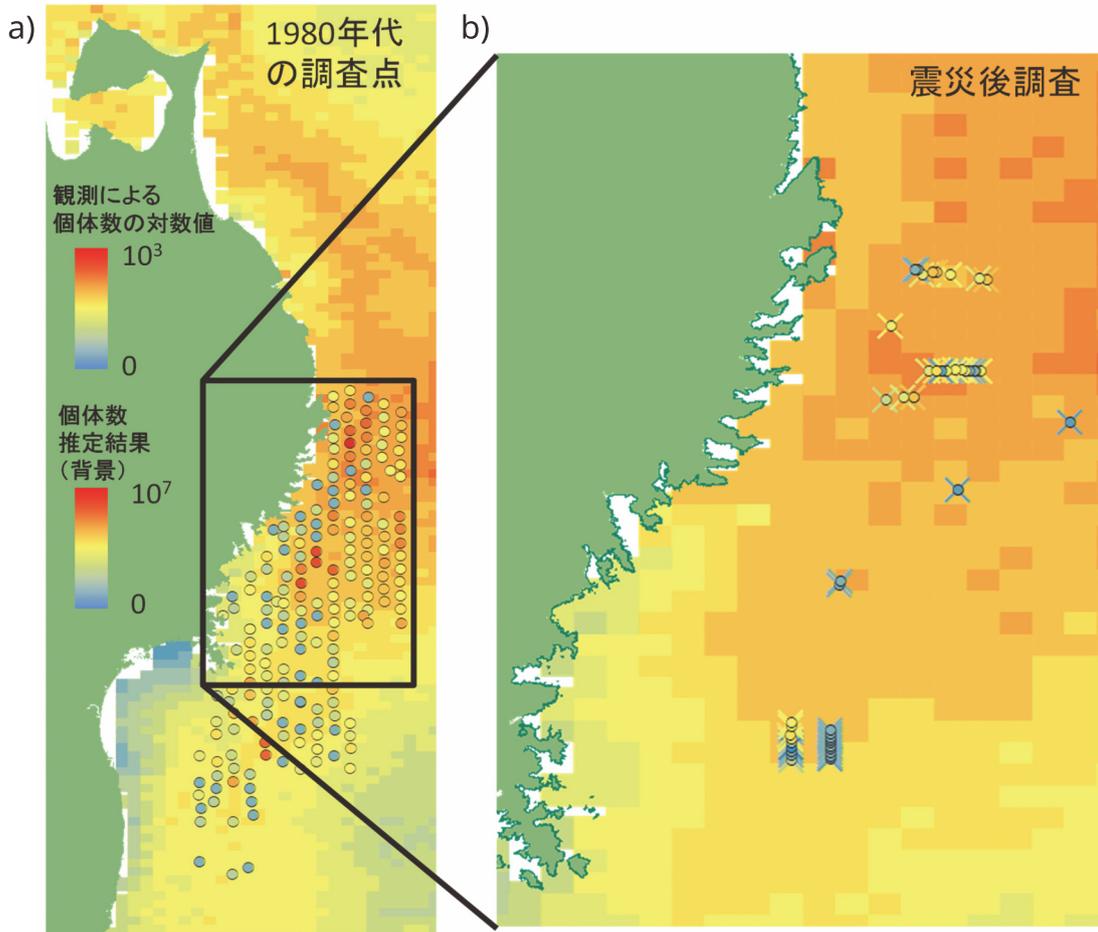


図 9.11 a) 個体数の推定モデルによる予測結果を背景に震災前の調査結果 (丸) を重ねたもの。b) 個体数の推定モデルによる予測結果 (背景) に震災後の調査結果 (丸と x) を重ね合わせた図。

2012)。このほかに連続値では正規分布やガンマ分布, 対数正規分布が, 0 か 1 かのデータでは二項分布 (ロジスティック回帰) が頻繁に用いられる。実際の野外のデータを扱う場合はゼロの値を多く含むデータが見られることが多く, その場合は在不在の部分と不在 (0) 以外の部分のモデルとを組み合わせた, zero-inflated モデルとよばれる分布をモデルに使うことも多い。

計算を実行した結果, すべての環境要因を説明変数として投入したモデルでは水温や表層のクロロフィル a 量が有意な変数とされた。AIC の値に基づき変数の数を徐々に減らすことによって, モデル選択を行った場合の結果では, TPI や傾き, 水温, クロロフィル a 量, 震源からの距離なども説明変数として入ったモデルがもっとも良いモデルとされた。

モデルの結果の空間分布を実際のデータと比較すると, 従来水深で分布が決まっていると指摘されていたほかに, パッチ状に分布の密度に濃淡が見られる点, モデルでも比較的説明できていた (図 9.11)。

さて, 震災前のデータで作成したモデルによる予測に震災後の調査で見られた密度に相当する値を重ね合わせて実際に比較してみる (図 9.11b)。すると比較的多くの点で, 推定による値と一致しないではないか。

では, 震災以前のモデルで予測された結果と一致しない理由は, 震災の影響によるものなのだろうか? 実際には, 既

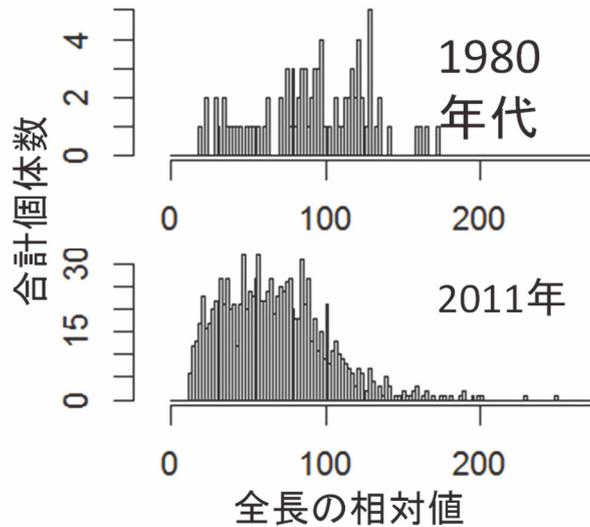


図 9.12 クモヒトデのサイズ組成の例。牡鹿半島沖のデータでは小型個体または小型種の割合の増加が見られた。

に、凶化した震災後のデータに見られるように震災前の調査と比べて調査点の間隔が狭く、細かな変動を拾っている可能性があることがわかる。このような異なるスケールの解像度やデータ範囲から得られた結果から変化を比較することは容易ではない。スケールによって見ている現象や変動、卓越する要因が異なってしまうからである (Yamakita and Nakaoka, 2011)。このような場合、たとえば同じスケールの調査になるように、複数の地点を平均値やランダムなサンプリングなどでまとめることや、空間的な相関の範囲を考慮しながら比較することができる。いずれにしても、震災前後の差が、震源からの距離や地形など、震災に関連した変数と対応しない限り、震災との明確な関係性を見出すのは困難であった。

スケールが不一致であるために、個体数だけで変化の検出が不可能な場合、もっと生物の変動プロセスを詳しく見ることで解決できる可能性がある。ここでは、クモヒトデのサイズの組成を抽出することにより、幼生の加入パターンが震災前後で変化したかについて検討した。加入が連続的ではない生物の場合には、同時に加入した 1 群を同じ年級群 (コホート) として扱うことができ、その年齢構成から加入が毎年同じくらい起きているのか、いつ多く加入し生残しているのかを知ることができる。クモヒトデのうち大型種でよく調べられているキタクシノハクモヒトデについては研究例があり、およそ年に 1 度の加入であると考えられている。そのため、コホートのピークを追っていけば、震災後に変化があるかどうかを検討できる。

この検証は調査の季節変動の調整や一定のサイズ以上になると成長が見られなくなるクモヒトデの特性を考慮した補正の必要性、サイズ組成からの種判別の困難さなどがあり、検討ははまだ予備的な段階にとどまっているが、牡鹿半島沖の 1 地点で、小型の個体の加入が多数見られるようになり、かつ大型個体が少ない場所がある (図 9.12)。この図から 1980 年代の数地点の値と 2011 年の連続的に映像から抽出した値とを比較して、年齢組成に変化があったことは明らかである。ただ、1980 年代と 20 年も異なることから変化が震災によるものかどうかの検証はこれだけでは難しい。

より直接的な短期の変動を見るためにクモヒトデの骨片から成長量の測定も試みた (図 9.13)。電子顕微鏡による写真から確かに成長輪のようなものが生じていることまでは確認できているが、数か所のサンプルを見た限りでは成長輪の広さの年による明瞭な違いは認められていない。

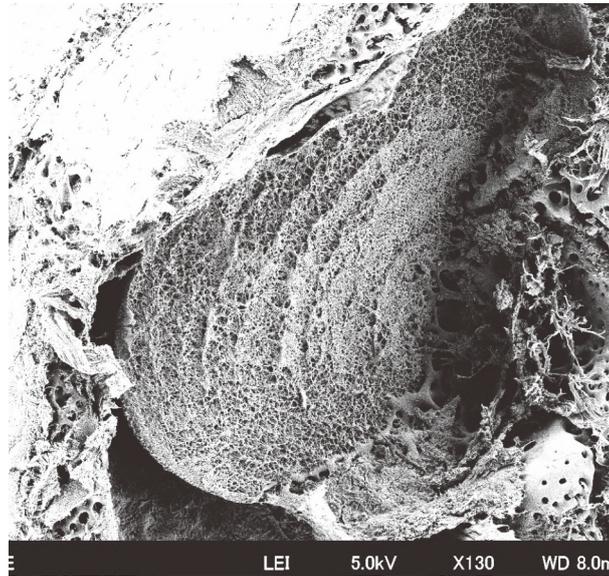


図 9.13 クモヒトデの足の付け根の断面に見られる骨片の成長輪の例 (右下に中心をもつ扇型)。一年に 1 つ輪ができると考えられるが、長期飼育は容易でなく、詳細はまだ不明である。

このような検討をしている間に、海底にカメラを設置し余震の前後の写真も撮影された。そこでは余震後に生物によるマウンドが平坦になり、クモヒトデも一時的に埋没する様子が観察されているが、数日で元と見分けがつかないレベルに戻っていた。まだ詳細な検討は行う余地はあるが、以上の状況から、東北沖の 200m から 800m の大陸棚とその斜面上のほとんどの場所においては、海底の大型の底生生物に対して震災による大きな変化は検出されていない。乱泥流などの大きな底質の変化が広くあったとされる (Arai *et al.*, 2013) が、沖合いの底層において、震災による生物へのなにかしらの直接的な影響がつづく可能性はこれまでの証拠からは薄い。

9.11 今後の課題、水産生物の分布研究への応用

上記のように広域の検討を行えるほど充実したデータが得られるものに先に挙げた漁獲等の水産有用種の情報がある。たとえば図 9.14a にキチジの 2013 年の 1 網当たりの漁獲量と市町村ごとの漁獲量の図を掲載した。こうした情報が月ごとに紙のデータで整備されている。底生生物を餌とする水産有用種のデータとこれまで述べてきた底生生物の分布とを重ね合わせ、関係性を検討することは今後の課題として掲げられている。

また、水産分野で広域の情報を集約している一方で、より局所のスケールで、実際に海底のどのような環境にどの魚がいて、どのように生活しているのかについては不明な点が多い。ROV による調査はそうした海底付近の詳細な様子を知ることに適している。例えば海底の水産有用種であるキチジやベニズワイガニの分布を映像からの抽出を行った図からは分布が固まっている場所やまばらな場所など場所により異なる様子が読み取れる (図 9.14b)。こうした局所の分布と広域の分布変動との対応関係を知ることも、海底のモニタリングによる今後の課題といえる。

水産研究・教育機構の調査によると、マダラなどは震災後に漁獲されなくなった若齢魚の生残が良く、資源量が 4 倍以上増加している (Narimatsu *et al.*, 2017; Shibata *et al.*, 2017)。一方、ズワイガニなど減少した種も見られる (図 9.15)。捕食者の増加、海流の異常高温なども影響しているのかもしれない。こうした変化についても今後 ROV の画像から生物を

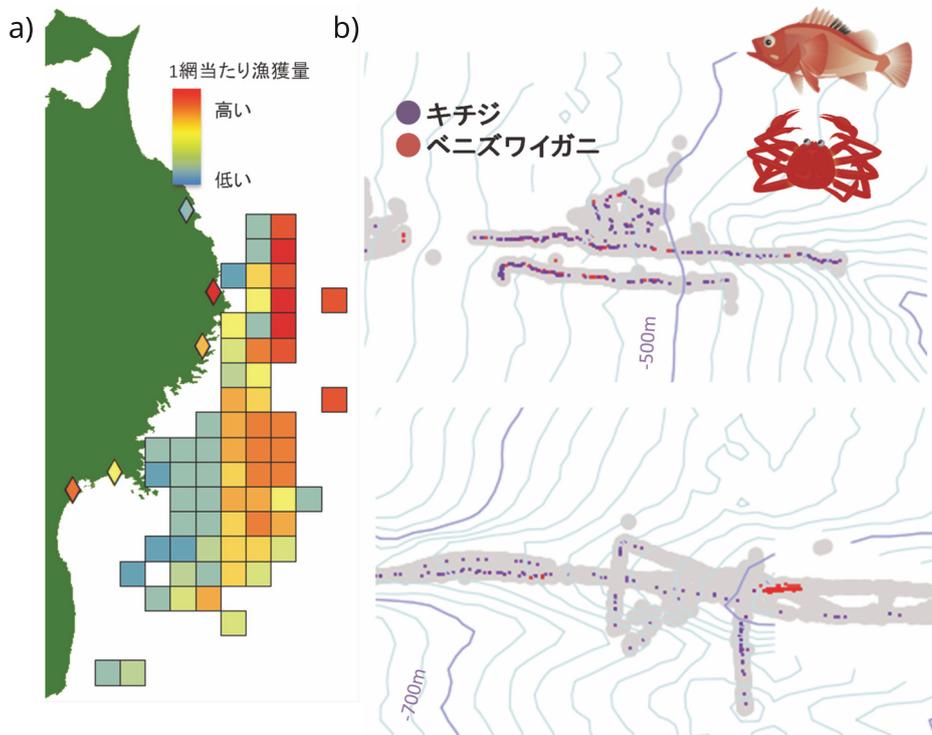


図 9.14 a) 漁獲量に基づくキチジの分布についての統計情報 (正方形) と市町村における水揚 (菱形)。b) ROV による釜石沖海底谷の調査で得られた局所の水産有用種の分布の例。灰色は調査範囲をしめす。

抽出し、海底での実測値で同様の密度の推定結果が得られるだろうか。そしてそれらの分布は、クモヒトデやその他の海底付近の生物の分布を用いた指標と関連づけられるだろうか。次の展開で、水産とのつながりの検討が期待されている。

9.12 深海に残る震災の影響：がれきと局所の生物分布

最後に、震災による深海の変化のうち今後その影響が残るものとして、瓦礫を取り上げる。ここでは海洋ゴミのうち底に沈んで残ったものを瓦礫として取り上げるが、海洋ゴミの問題は一般的に古くから指摘されている。美観上の問題や汚染物質の流出などの問題は陸域のゴミ問題でも広く指摘される。海域においてはその他にも、絡まる、誤食、生息域の破壊・被覆、汚染物質の濃縮、清掃・回収による攪乱、外来種の侵入などが指摘されている (Derraik, 2002; Galgani *et al.*, 2013)。特に投棄された網に魚がかかりそれが誘引餌となって連鎖的に魚が網にかかってしまうゴーストフィッシングや、カメやイルカ、海鳥などの大型生物の誤食や交絡はセンセーショナルに扱われている (Cheshire *et al.*, 2009)。さらに、海洋ゴミは海流によって容易に国外に流れ出し、特定の海域に集積することから国際問題として考えられている (UNEP, 2009)。近年は細かく破碎されたプラスチック類が化学物質の濃縮の促進や採餌効率の低下を通じて生態系へ負の影響を与えている可能性も指摘され、2016 年の G7 サミットをはじめ様々な場面で取り上げられている。

東日本大震災において発生した瓦礫については、環境省が震災翌月の 2011 年 4 月時点で試算を公表している。それによると災害廃棄物量は、主に津波浸水面積 1m^2 当たり 0.024t を基本とする推定式から、岩手と宮城で 2200 万 t とされた。その後見直され、2014 年 3 月末の試算では 2 県で 1584t と当初よりも少なくなったが、津波による堆積物を含める

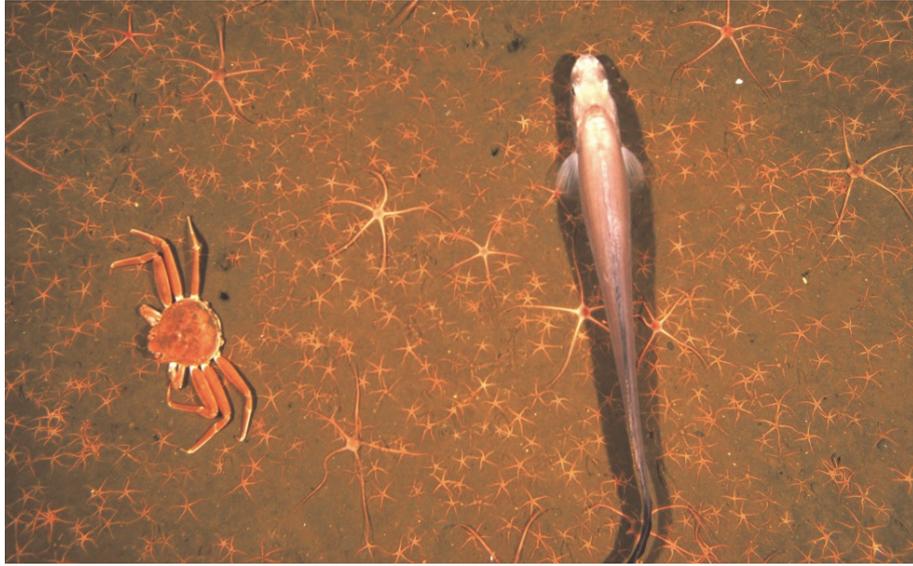


図 9.15 撮影されたズワイガニとタラ類と思われる魚。Copyright © JAMSTEC. All rights reserved.

と 2400t を超える。2011 年度の漂流・漂着・海底ごみ流出状況分析調査検討会によると、海に流出した瓦礫は約 500 万 t、そのうち 8 割程度は家屋に関するものと試算されている。仮定の根拠は発表からは明らかでないが、こうした流出瓦礫のうち 3 割が漂流し、7 割が沿岸の海底に堆積したとされる。

漂流瓦礫がどう移動するのかは、海流に基づくシミュレーションが行われている（環境省，2014）。その結果、漂流瓦礫は海流によって太平洋を横断し、太平洋の東方に広がると予想された。北米大陸西海岸への到達量を、陸のグリッドに当たった粒子数から推定すると 2013 年 6 月で 7 万 t、2014 年 10 月までに 90 万 t とされている。実際にはモデルの精度や予想できない海象の変化、到達の定義などによって結果が大小するにせよ、かなりの量が東太平洋に流れた可能性がある。

一方で、漂流したもののうちの一部は、沖合いの海底に沈降したと考えられている。実際に震災によると思われる瓦礫が多数見つかっている。例えば、震災前後に行ったトロール調査によると、震災前は漁具をはじめとする漁業関係の道具の流出が多く見られたが、震災後には家財用品や日用品の割合も増加した（図 9.16）（Goto and Shibata, 2015）。また、量についても 3~4 倍になった。

沖合いにおいても、漁業者による掃海作業が実施されているが、沿岸付近に関しては宮城県が網羅的に分布調査を実施した例がある（図 9.17）。その結果、不明やその他を除くと、割合としては、木材や家屋に関するものが多く見られている。

9.13 瓦礫の海底谷への集積

増加した瓦礫は今後どのように変化するのだろうか。海底に落ちた瓦礫のうち少なくとも一部は海底谷へ集積していると考えられた。そこで、2013 年までに実施された 16 回の潜行と、6 回のソナーによる調査で瓦礫が見られた数を定量化した。潜行については航海時の映像を通して見て記録した情報からゴミと記載されたものをすべて抽出し、調査距離あたりの数とした。ソナーによる調査については結合したソナー画像から瓦礫を抽出し、調査範囲の面積あたりの割合と

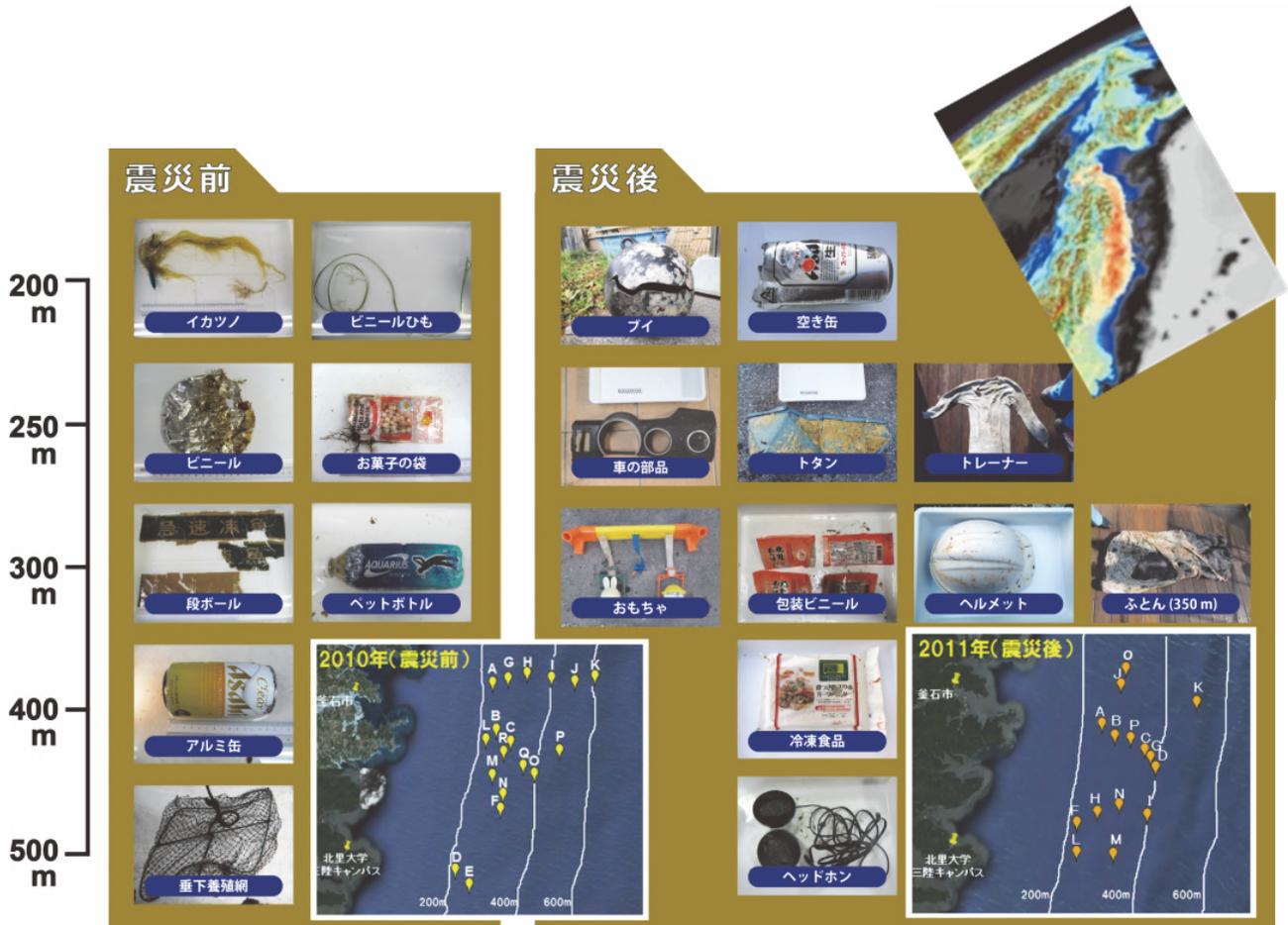


図 9.16 震災前後の瓦礫の種類の変化。右下の図は調査地点を右上の図は震災 1 週間後の漂流瓦礫の簡易的な分布推定結果を示す (柴田他, 2012; 環境省, 2014 のデータから作成)。

した (Yamakita *et al.*, 2015b)。

その結果を図 9.18 に示す。まず、水深数十メートルの付近で量が多いが、値には場所によるばらつきが大きい。少し沖合いの水深 200m 以降 1000m 以浅まで平均の数は相対的に少ない。水深 1000m であっても数は少ないながら瓦礫が見られることもわかる。ただしこの部分は、1990 年代以前により一般的に販売されていた 250ml 入りの細い空き缶などが観察され、震災によるものとは限らない。そして、水深 600m 前後の範囲で 2 箇所数が多い場所があることがわかる。600m 周辺の点のうち 3 箇所は海底谷における調査であり、サンプル数が少ないとはいえ海底谷で瓦礫が蓄積している様子がうち 2 点で明瞭に現れている。

これらの海底谷の瓦礫が沈降後に流れて集積したのか、掃海できずに残されているだけなのかは十分検証されていないが、海底を網で引いた跡が無い平坦な地形と比べても、谷に集まる瓦礫ものが多いこと、広い範囲では掃海による瓦礫の分布が時間変化している様子が観測されていること (藤原ら未発表) から、流れて集まっていると考えられる。

この瓦礫が海洋生物にどのような影響を与えるのか、今後どのように変化するのかについては明らかではない。しかし、一見してわかるのは瓦礫の集積している場所に生物が多いことである (図 9.19)。そこで、広く考えられている瓦礫の負

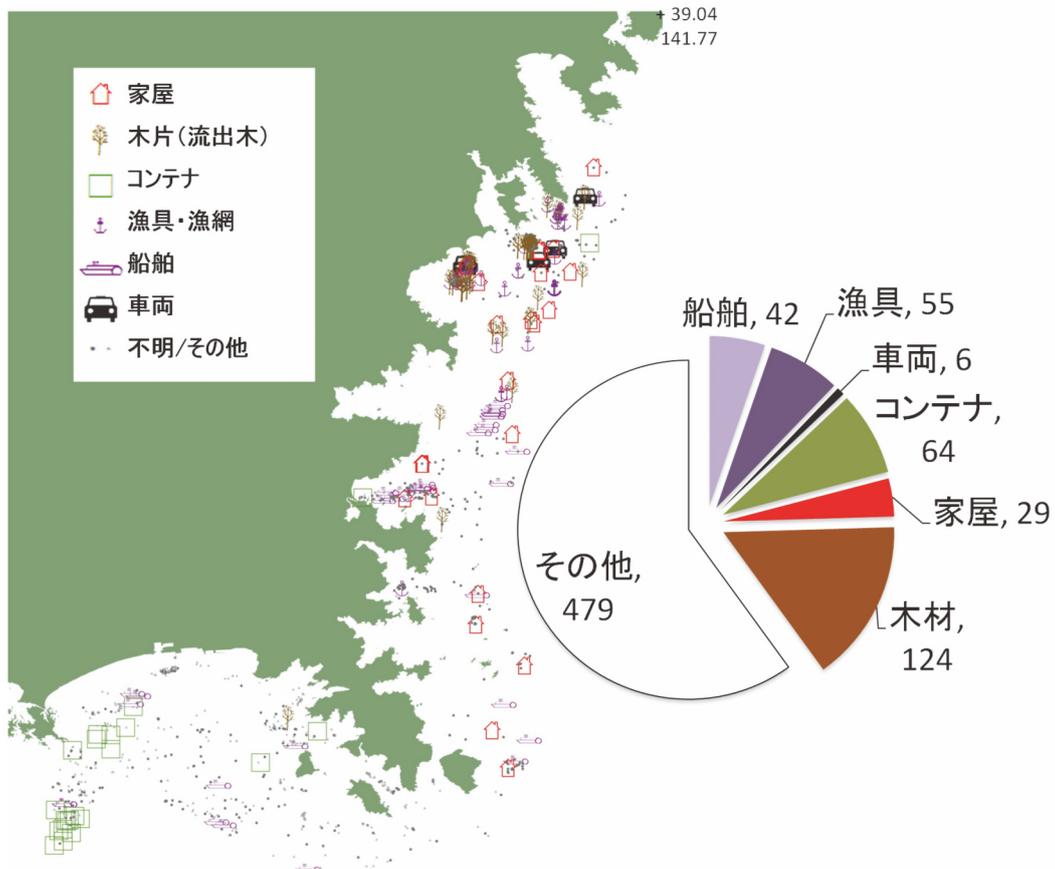


図 9.17 震災後の瓦礫の分布(左)とその個数(右)。宮城県提供のデータに基づく。

の側面はさておき、生物の分布との関係性について考えることとした。

9.14 瓦礫の生物の住処としての効果への注目

海洋ゴミが問題視される一方で、人為的に製造や投棄されたものではなく、陸から流出して分解可能なものは、自然な陸と海との相互作用の営みの一部とも考えることができる。特に物質循環の側面からは、陸と海の間と比較や連携した研究の必要性は古くから指摘されている (Glaz *et al.*, 2014; 中野, 2003; Polis and Hurd, 1996; 山北, 2010)。特に流木については、河川や河口においては、流木瓦礫があることによって、維持されている生態系があり、国外にはその重要性が指摘されている地域もある (Gurnell *et al.*, 2005; Schneider and Winemiller, 2008)。

深海においては、これまで瓦礫の分解について複数の研究があり、分解の過程について述べられている (Nishimoto *et al.*, 2009, 2015)。木材を構成するセルロースは他の生物遺骸と比べて分解が進みにくい、さらに深い 10000m 以深の海底であっても、セルロース分解酵素を持つ細菌などの存在は確認されている。そのため、対象海域でも分解自体は十分進むと考えられた。貧栄養であることが一般的である沖合い海底に有機物が供給されることは、生態系の生産性を高める (McClain and Barry, 2014)。また、瓦礫やクジラなどの大型生物遺骸に特異的な生物もいることから、海底への稀な沈降物に依存した機能群が存在し、パッチ状に個体群が維持されていると考えられている。

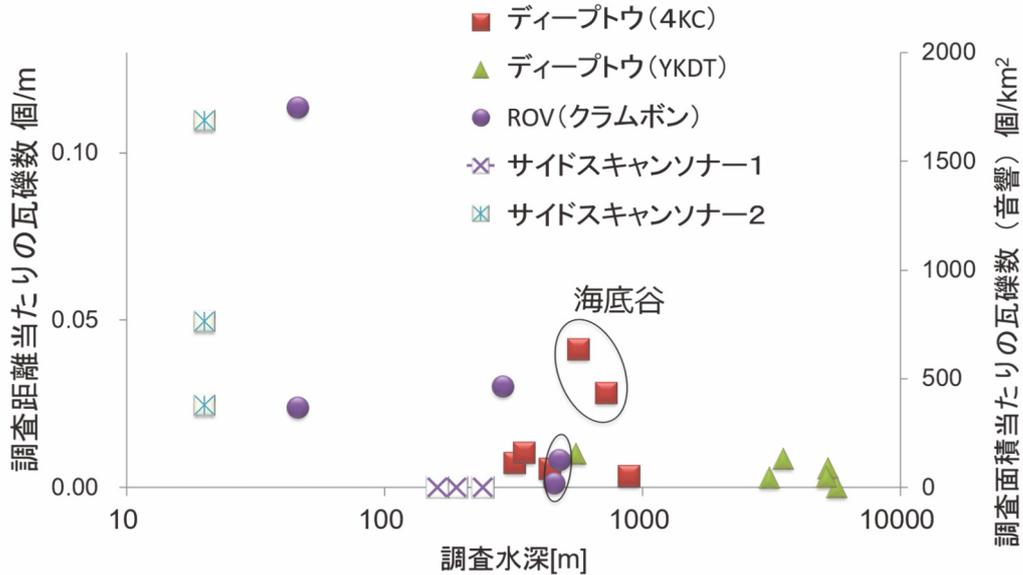


図 9.18 音響 (ソナー) 調査とカメラによる調査とで集計した、瓦礫の数の分布。楕円で囲った調査が海底谷の中の調査 (詳細は Yamakita *et al.*, 2015a, 参照)。



図 9.19 海底谷にあつまった瓦礫の写真。写真は JAMSTEC, TEAMS 動画・写真ライブラリーから引用した。Copyright © JAMSTEC. All rights reserved.

このような観点から、特に生物の分布と瓦礫の分布の関連性について比較を始めた。しかし、瓦礫の多かった海底谷で探査機の潜航映像から抽出した瓦礫と生物分布のみでは、瓦礫に集積しているのか、海底谷に集積しているのかを判別することが困難であった。さらに、仮に瓦礫に集積していたとしても、複数の瓦礫がまばらにある状態では定量的に、瓦礫の効果はどの程度あるのかを比較することは容易ではなかった。

ところが、2012 年、我々は木のような物体が平坦な海底面に 1 つだけ独立して存在する場所を音響測深によって発見することができた。そこで、周辺の瓦礫や地形の影響と独立して、1 つの瓦礫が集積する生物の量を定量化出来ると考え

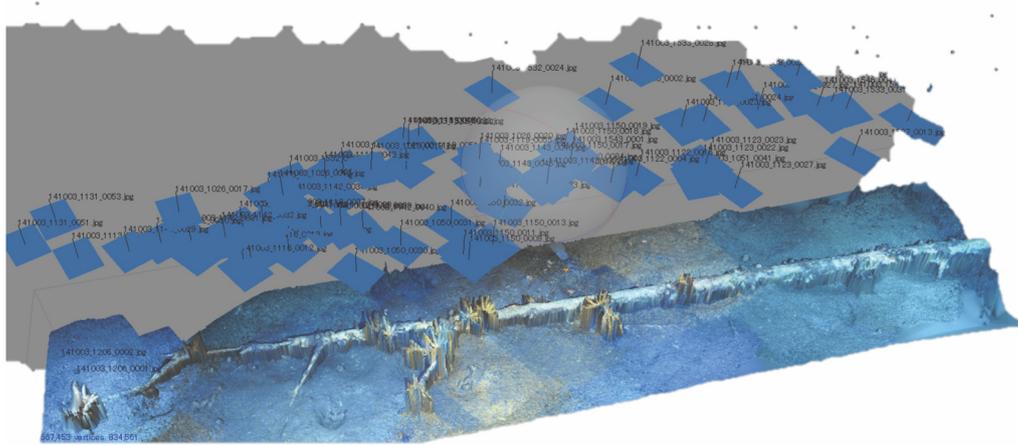


図 9.20 ROV クラムボンの下向きカメラで往復して撮影した複数の写真を SfM によって結合して生成した 1 本の木。上に浮かぶ四角は推定された元の写真の撮影位置とファイル名。枝のように付着しているのはウミシダである。

た。また、瓦礫の上を ROV を何度か通過させて撮影することで面的な画像とすれば、瓦礫からの距離に従って生物の量が減少する様子が捉えられるとの仮説を検討した。

9.15 SfM-MVS による瓦礫と生物分布のパノラマ化

海中では 1 本の木の全体像を撮影することも容易ではない。ライトが届く範囲の問題だけでなく、海水中のマリンスノーや小型の生物によるごりやノイズが生じる。三陸のような比較的水がきれいな場所でも 5m も離れると解析に使えるような画像を得ることはできない。またカメラのレンズは水中では屈折率の違いにより、焦点距離相当で約 1.33 倍に拡大される。そのため、木の上を何度も ROV で通過し、得られた多数の画像から SfM-MVS を用いた 3 次元のモデルを作成して結合した (図 9.20) (SfM-MVS (Structure from Motion 及び Multi-ViewStereo) については、付録 8.E を参照)。

理想的には SfM-MVS の結果出力されたデータから生物の抽出を行いたい、筆者の環境では 3 次元の点群を構築した際にオリジナルな画像からだいぶ劣化してしまう。結合した 3 次元のデータは点に画像を張り込んでいることから、解析後のモデルへ元の画像を付与する点を細かくしても一定の解像度以上は出ない (なお、2 次元のオルソ画像として補正ができるソフトも存在する)。幸い、SfM でない 2 次元のパノラマ画像を作成した場合は、補正がより連続的であるためか画像の解像度も高い。そこで、パノラマ画像作成ソフトである Autopano Giga を用いて調査範囲全体ではなく一部ごとに作成したパノラマ画像を幾何補正して SfM-MVS で作成したモデルに張り合わせることで、生物の抽出はパノラマのほうで、位置は SfM-MVS のほうで、と 2 つの方法を併せて生物抽出を行った。

瓦礫の周辺最大 0.5m の範囲から生物をすべて抽出した結果、ウミシダが 13 個体中 12 個体が瓦礫に付着していた他に、バイガイの仲間は平均して木から 10cm 以内の範囲に多数見られた。これらの生物は付着基盤として木材や木片を使っているようである。移動性が高い魚の瓦礫からの距離は平均 20cm、ヒトデも 22cm であり、瓦礫そのものを付着基盤としない生物も木のごく近くにいる様子が見られた。瓦礫が生物の付着基盤や隠れ家、あるいは有機物の供給源として機能していることによるものと推察される。今後、瓦礫が分解とともに、どのように変化するかを追跡することで、一層確かな結果となるだろう。

ここでは1本の木という1サンプルだけであるが、このように局所の空間分布を見ることにはコンピュータビジョン(CV)による画像解析と地理情報技術をあわせた活用ができた。今後局所のCV技術とGISの活用とがともに発達し、更なる融合ができれば、陸上と同様に海域においても、瓦礫がどこに分布しているかの迅速な地図化や、どのように処理すべきかといった議論に広域、局所の双方のスケールで地理情報技術が貢献できる潜在能力は高い。

9.16 まとめ：即時性のある解析, 可視化, 政策提案にむけて

ここまで紹介してきた例から、沖合いの生態系への震災の影響を評価する理想の方法を、今後の技術的進展の可能性と合わせてまとめたい。まず図書館や研究所に死蔵している既存の生物分布情報が電子化かつ誰でも容易に利用可能な状態に整備されること。そして、それに基づいて、脆弱性、重要性や再生ポテンシャルを示した生物分布地図があらかじめ用意されていること。影響が大きい場所と要因についての何らかの仮説と上記の生物分布地図にもとづいた階層的な調査が計画されること。調査は、自律的な探査機を用いて自動で広範囲にわたって実施され、アーカイブされること。アーカイブからは解析に適切なデータセットとそうでないものが自動で仕分けされ、適した映像・画像は自動的にモザイク結合され、さらに生物や瓦礫の分布が自動抽出されること。位置データは共通のフォーマットで補正がなされた状態で提供され、自動的に位置情報と環境情報が結合されること。などがデータ解析の事前準備として必要であることがわかる。

このように多大な努力で情報が整理された上で、震災後の生物や瓦礫の分布の推定や定量化の実施、さらにはポテンシャルとの比較や詳細な検討が可能になる。付録8.Aでデータからの情報発見のプロセスの8割以上は、データ解析の準備に費やされると述べたが、こうした新しい技術を用いるために異なる組織や部門を統合する作業は、全体の9割以上が準備に費やされるように思える。そしてこうした体制の上で、これらの情報を即時に公開するプラットフォームがあり、データをわかりやすくキュレーションする人材がおり、的確に調査計画や政策決定者への情報発信をして、調査計画や漁業活動、流出がれきの回収などの政策に生かす、という流れがあることが理想である(なお、今回紹介できなかったが、データの共有と公開のプラットフォームも用意はされている)。

理想とこれまで述べた震災後の流れとを比較すると、それぞれの段階ではまだ課題があるものの、一定の進展は見られている。例えば生物多様性のデータについて、従来はほとんど個別に公開だけが行われていたものについて、近年のグローバルな生物多様性研究の進展をうけて、データベース化や可視化、解析が進んでいる。

一方で、生物の自動抽出や画像の結合など、局所の詳細な画像データが入手できる場合の解析については、従来のGISやリモートセンシング(RS)分野での取り組みは不足しており、これからの努力によるところが大きい。しかし、自動運転などの他分野での進展を見る限り、コンピュータビジョン(CV)を用いた画像の解析技術の活用は、進み始めれば早いと考えられる。陸域においても、RS/GISとCVとの融合はこれからの課題であり、マルチバンドの情報や時系列変化など人間が容易に認知できないRS/GISの情報への活用が期待されている。海洋では音響によるリモートセンシング技術が発達しており、陸のリモートセンシングとは異なる発展を見せている。これらの技術的背景を生かして3次元の音響情報や音響自体の反射の情報などと、どのようにCV技術と融合できるのか考えたい。

さらに努力が必要と思われる点は、各段階のつながりが一連の作業として十分認識されておらず、有機的に連携できていない点である。様々なプラットフォームや観測条件で出される数々のフォーマットのデータとエラーを正規化して加工すること、異なる機関、部署とのやりとり、調査計画の交渉、適切な人員と予算の配分、手法の共有と教育など組織のマネジメントについてのノウハウは、少なくとも研究者に十分蓄積されているとは思えない。

研究プロジェクト化やデータの規格化とデータベースはそれを助けることになる。現に今回 TEAMS と S9, S15 というプロジェクトが、ここに記したデータの解析と一連の流れの検討を可能にした。ただ、任期制や成果主義の導入が進んだ研究者を集めただけのプロジェクトでは、こうした業務は難しい面があり、中心となる組織とその体制はよく検討された。たとえば、ここで紹介したプロジェクトでは技術員の確保やデータベースを専門とする常勤研究員への依頼、経験豊富なコンサルタントへの委託などを試みた。

データ解析の結果を政策に反映するという点についても、まだ課題がある。その意味では、少々逆説的な例ではあるが、震災後の復興事業に大きな成果を上げたのは防災分野と建設分野である。想定以上の津波が従来の計画による構造物を破壊したため、現状復帰以上の大掛かりな対策を迫られた。いくつもの防災計画の案が出た中から、環境分野から多くの批判はあるものの防潮堤という形で計画がまとめ上げられ、大規模事業化した。また、日ごろから災害対応を行っている航空測量分野も力を発揮している。JAXA からは ALOS をはじめとする衛星画像データの公開が迅速に行われ、国土地理院においても 2011 年 5 月から空中写真を撮影し、10 か月後には 2500m 縮尺の地図に相当する災害復興基図も提供が始まり、復興計画に活用された。

一方で、沖合いに限らず、環境や生態に関する分野では、復興計画当初はほとんど政策に反映される情報提供ができなかった。復興計画を審議する場へのチャンネルが無いことや社会的な優先順位が相当低かったことは最も大きな要因と考えられる。しかし、少なくとも沿岸に関しては震災以前の重要な生物の潜在分布地図が描けるデータがそろっていないながらも、震災の影響評価と再生可能性の地図の迅速な公開には至らなかった。2014 年 4 月になって、「東北地方太平洋沿岸地域自然環境調査 重要自然マップ」が公開された。それまでの様々な調査の情報が集約されてわかりやすくまとまっていた。だが、調査に時間がかかったとはいえ、公表までの実質的な審議期間が半年程度であったことを考えると、事前に生態系ハザードマップや再生ポテンシャルマップのようなベースとなる地図が作成され、政策的な位置づけを与えられていれば、震災直後に詳細な調査情報を盛り込む前の図をまず出すことができたのではないだろうか。暫定的なものであってもそうした地図があれば、少しは復興計画における生態系の側面の考慮について、状況が違っていたのではないかと考えさせられる。

最後に、海域における情報技術の活用についての展望でしめくりたい。沖合いの海洋環境についてはそもそも未だに解明されていない課題が多い。今回観測した範囲も地震が発生した日本海溝までのスケールを考えれば、そのごく一部に過ぎない。このように海洋は科学研究や技術開発のフロンティアでもあり、陸域で一定の成熟を見せている空間情報の取り扱いも、海域分野で独自に発達した音響技術と融合し、違った形で発展させる余地がある。また、特に水産有用種に関しては単なる科学研究にとどまらず、生産、流通など事業やマーケティングでも空間情報を含めた情報技術の利用が大きく取りざたされていることにも今後着目されたい。1 次産業では ICT 化や 6 次産業化といった掛け声が震災を機に様々な場面で使われている。研究としても、そうした社会科学や企業活動との連携が今後の課題であろう。

生物多様性そのものの調査についても同様の枠組みをアナロジーとして用いることができる。今回の震災を契機に多くの生物情報が整備された。人手で大量の生物多様性のモニタリングを行うという 1 次産業的な活動は、継続や技術開発の必要性はあるものの、手法や仕組みとしては成熟したといえる。機械の手を借りた変化と要因の抽出や影響予測、分布推定といった 2 次産業、それらの生産物を政策や保全に応用する仕組みを検討する 3 次産業的な活動は現在盛んに行われている。今後、それぞれ異なる次元で行われてきた検討から導き出される要因や施策について統合した比較を行い、社会的な受け入れ可能性や持続可能性を考慮した保全や資源の利活用を進めていく必要がある。データを地図上で解析する技術がますます、容易かつ、高度化、オンデマンド化することによって、生物多様性研究についても、モニタリングから対策の実現可能性まで一度に検討する「6 次化」が促進されていくことを期待している。

謝辞

本稿に記した研究の実施にあたり、東北マリンサイエンス拠点形成事業(文部科学省)、環境省地球環境総合推進費 S9, S15: PANCES の支援を受けたと同時に、同プロジェクトのメンバーには大変お世話になりました。航海等では多数の方々の協力で実施されており、個別の論文等で御礼を申し上げたく思いますが、特に本原稿の準備にあたっては嶋田香奈子さん、小埜幸子さん、松葉史紗子さん、屋良由美子さんにはデータの準備や原稿へコメントを頂きました。また、編集者と査読者の方々には大変丁寧かつ多岐に渡り有益なコメントをいただきました。厚く感謝申し上げます。

引用文献

- Anderson, O. F., Guinotte, J. M., Rowden, A. A., Clark, M. R., Mormede, S., Davies, A. J., and Bowden, D. A. 2016. Field validation of habitat suitability models for vulnerable marine ecosystems in the South Pacific Ocean: Implications for the use of broad-scale models in fisheries management. *Ocean & Coastal Management* **120**: 110–126, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2015.11.025.
- Arai, K., Naruse, H., Miura, R., Kawamura, K., Hino, R., Ito, Y., Inazu, D., Yokokawa, M., Izumi, N., Murayama, M., and Kasaya, T. 2013. Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geology* **41**: 1195–1198, doi: 10.1130/G34777.1.
- Auster, P. J., Moore, J., Heinonen, K. B., and Watling, L. 2005. A habitat classification scheme for seamount landscapes: assessing the functional role of deep-water corals as fish habitat. in *Cold-Water Corals and Ecosystems*. Springer, Berlin, Heidelberg: 761–769, doi: 10.1007/3-540-27673-4_40.
- Cheshire, A., Adler, E., Barbière, J., Cohen, Y., Evans, S., Jarayabhand, S., Jeftic, L., Jung, R.-T., Kinsey, S., Kusui, E. T., Lavine, I., Manyara, P., Oosterbaan, L., Pereira, M. A., Sheavly, S., Tkalin, A., Varadarajan, S., Wenneker, B., and Westphalen, G. 2009. *UNEP/IOC guidelines on survey and monitoring of marine litter*, UNEP Regional Seas Reports and Studies / IOC Technical Series, Nairobi / Paris. UNEP / IOC.
- Derraik, J. G. B. 2002. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* **44**: 842–852, doi: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S., and Zimmermann, N. E. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* **29**: 129–151, doi: 10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x.
- 藤田敏彦 1996. 仙台湾沖におけるクモヒトデ類の深度分布とサメガレイの食性について. 国立科学博物館専報 **29**: 209–222, URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/110004313374>.
- Galgani, F., Hanke, G., Werner, S., and De Vrees, L. 2013. Marine litter within the European Marine Strategy Framework Directive. *ICES Journal of Marine Science* **70**: 1055–1064, doi: 10.1093/icesjms/fst122.
- Gallien, L., Münkemüller, T., Albert, C. H., Boulangeat, I., and Thuiller, W. 2010. Predicting potential distributions of invasive species: where to go from here? *Diversity and Distributions* **16**: 331–342, doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00652.x.

- Glaz, P., Sirois, P., Archambault, P., and Nozais, C. 2014. Impact of Forest Harvesting on Trophic Structure of Eastern Canadian Boreal Shield Lakes: Insights from Stable Isotope Analyses. *PLOS ONE* **9**: e96143, doi: 10.1371/journal.pone.0096143.
- 後藤友明 2004. 岩手県沖合域に生息するキチジ *Sebastolobus macrochir* の年齢, 成長, 成熟および食性. 岩手県水産技術センター研究報告 **4**: 17–24, URL: <https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010711838>.
- Goto, T. and Shibata, H. 2015. Changes in abundance and composition of anthropogenic marine debris on the continental slope off the Pacific coast of northern Japan, after the March 2011 Tohoku earthquake. *Marine Pollution Bulletin* **95**: 234–241, doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.04.011.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ 2012. 東北地方太平洋沖地震津波情報. URL: <http://www.coastal.jp/ttjt/>.
- Gurnell, A., Tockner, K., Edwards, P., and Petts, G. 2005. Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. *Frontiers in Ecology and the Environment* **3**: 377–382, doi: 10.1890/1540-9295(2005)003[0377:EODWOB]2.0.CO;2.
- Hattori, T., Okuda, T., Narimatsu, Y., Ueda, Y., and Ito, M. 2009. Spatiotemporal variations in nutritional status and feeding habits of immature female bighead thornyhead *Sebastolobus macrochir* off the Pacific coast of northern Honshu, Japan. *Fisheries Science* **75**: 611–618, doi: 10.1007/s12562-009-0080-6.
- 角谷拓 2010. 広域スケールでの生物空間分布解析法. 保全生態学の技法—調査・研究・実践マニュアル. 東京大学出版会, 東京: 131–155.
- 環境省 2014. 東日本大震災による洋上漂流物の漂流予測結果の公表について. URL: <http://www.env.go.jp/press/17950.html>.
- Kawagucci, S., Yoshida, Y. T., Noguchi, T., Honda, M. C., Uchida, H., Ishibashi, H., Nakagawa, F., Tsunogai, U., Okamura, K., Takaki, Y., Nunoura, T., Miyazaki, J., Hirai, M., Lin, W., Kitazato, H., and Takai, K. 2012. Disturbance of deep-sea environments induced by the M9.0 Tohoku Earthquake. *Scientific Reports* **2**: 270, doi: 10.1038/srep00270.
- Kitahashi, T., Jenkins, R. G., Nomaki, H., Shimanaga, M., Fujikura, K., and Kojima, S. 2014. Effect of the 2011 Tohoku Earthquake on deep-sea meiofaunal assemblages inhabiting the landward slope of the Japan Trench. *Marine Geology* **358**: 128–137, doi: 10.1016/j.margeo.2014.05.004.
- 久保拓弥 2012. データ解析のための統計モデリング入門. 岩波書店, 東京.
- McClain, C. and Barry, J. 2014. Beta-diversity on deep-sea wood falls reflects gradients in energy availability. *Biology Letters* **10**: 20140129, doi: 10.1098/rsbl.2014.0129.
- 中野繁 2003. 川と森の生態学—中野繁論文集. 北海道大学図書刊行会, 札幌.
- Narimatsu, Y., Shibata, Y., Hattori, T., Yano, T., and Nagao, J. 2017. Effects of a marine-protected area occurred incidentally after the Great East Japan Earthquake on the Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) population off northeastern Honshu, Japan. *Fisheries Oceanography* **26**: 181–192, doi: 10.1111/fog.12201.
- Nishimoto, A., Mito, S., and Shirayama, Y. 2009. Organic carbon and nitrogen source of sunken wood communities on continental shelves around Japan inferred from stable isotope ratios. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **56**: 1683–1688, doi: 10.1016/j.dsr2.2009.05.032.
- Nishimoto, A., Haga, T., Asakura, A., and Shirayama, Y. 2015. An experimental approach for understanding the process of wood fragmentation by marine wood borers in shallow temperate waters. *Marine Ecology Progress Series* **538**: 53–65, doi: 10.3354/meps11454.
- Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M., and Imakiire, T. 2011. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature* **475**: 373, doi: 10.1038/nature10227.
- Phillips, S. J. and Dudík, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **31**: 161–175, doi: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.
- Polis, G. A. and Hurd, S. D. 1996. Linking Marine and Terrestrial Food Webs: Allochthonous Input from the Ocean

- Supports High Secondary Productivity on Small Islands and Coastal Land Communities. *The American Naturalist* **147**: 396–423, doi: 10.1086/285858.
- Sakaguchi, S. O., Takishita, K., Goto, T., Shibata, H., Kojima, S., Tsuchida, S., Kitazato, H., and Fujikura, K. 2014. Analyses of age and population genetic structure of the broadbanded thornyhead *Sebastolobus macrochir* in North Japan suggest its broad dispersion and migration before settlement. *Journal of Oceanography* **70**: 457–462, doi: 10.1007/s10872-014-0240-x.
- Schneider, K. N. and Winemiller, K. O. 2008. Structural complexity of woody debris patches influences fish and macroinvertebrate species richness in a temperate floodplain-river system. *Hydrobiologia* **610**: 235–244, doi: 10.1007/s10750-008-9438-5.
- 柴田晴佳・古島靖夫・後藤友明・三宅裕志・藤倉克則 2012. 三陸沖合における津波による漂流物および深海底蓄積ゴミについて. 水産海洋学会要旨集: 52.
- Shibata, Y., Sakuma, T., Wada, T., Kurita, Y., Tomiyama, T., Yamada, M., Iwasaki, T., Mizuno, T., and Yamanobe, A. 2017. Effect of decreased fishing effort off Fukushima on abundance of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) using an age-structured population model incorporating seasonal coastal-offshore migrations. *Fisheries Oceanography* **26**: 193–207, doi: 10.1111/fog.12179.
- UNEP 2009. *Marine Litter: A Global Challenge*, Nairobi. UNEP, URL: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/10744/MarineLitterAglobalChallenge.pdf>.
- 碓井照子 2012. 東日本大震災地域における自治体 GIS の実態と災害復興計画基図を利活用した基盤地図情報の整備・更新. 地理情報システム学会大会発表論文集 **21**: B-7-5.
- 東日本大震災ビッグデータワークショップ運営委員会 2012. 東日本大震災ビッグデータワークショップ Project 311. URL: <https://sites.google.com/site/prj311/project>.
- 山北剛久 2010. 森林と川や海とのつながり. *山林* **1515**: 17–24.
- Yamakita, T. 2016. Habitat mapping: potential distribution of the coastal benthic species and potential usefulness in offshore deep sea. in Kogure, K., Hirose, M., Kitazato, H., and Kijima, A. eds. *Marine Ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011: Our Knowledge Acquired by TEAMS*, Hiratsuka. Tokai University Press: 143–144.
- 山北剛久 2017. アジアの海洋生物多様性評価, 海の生態系サービス評価の現状. *農村計画学会誌* **36**: 25–28, doi: 10.2750/arp.36.25.
- Yamakita, T. and Nakaoka, M. 2011. Importance of considering grain and extent for the analysis on spatial dynamics: perspectives from comparison between theory and empirical example on seagrass bed dynamics in Tokyo Bay. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **21**: 177–183, doi: 10.1016/j.sbspro.2011.07.038.
- Yamakita, T., Yamamoto, H., Yokoyama, Y., Sakamoto, I., Tsuchida, S., Lindsay, D., Fujiwara, Y., Kawato, M., Kasaya, T., and Kitazato, H. 2015a. Distribution of the Marine Debris on Seafloor from the Primary Report of Five Cruises After the Great East Japan Earthquake 2011. in *Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-ecosystems*. Springer, Cham: 101–109, doi: 10.1007/978-3-319-13878-7_11.
- Yamakita, T., Yamamoto, H., Nakaoka, M., Yamano, H., Fujikura, K., Hidaka, K., Hirota, Y., Ichikawa, T., Kakehi, S., Kameda, T., Kitajima, S., Kogure, K., Komatsu, T., Kumagai, N. H., Miyamoto, H., Miyashita, K., Morimoto, H., Nakajima, R., Nishida, S., Nishiuchi, K., Sakamoto, S., Sano, M., Sudo, K., Sugisaki, H., Tadokoro, K., Tanaka, K., Jintsu-Uchifune, Y., Watanabe, K., Watanabe, H., Yara, Y., Yotsukura, N., and Shirayama, Y. 2015b. Identification of important marine areas around the Japanese Archipelago: Establishment of a protocol for evaluating a broad area using ecologically and biologically significant areas selection criteria. *Marine Policy* **51**: 136–147, doi: 10.1016/j.marpol.2014.07.009.
- Yamakita, T., Sudo, K., Jintsu-Uchifune, Y., Yamamoto, H., and Shirayama, Y. 2017. Identification of important marine

areas using ecologically or biologically significant areas (EBSAs) criteria in the East to Southeast Asia region and comparison with existing registered areas for the purpose of conservation. *Marine Policy* **81**: 273–284, doi: 10.1016/j.marpol.2017.03.040.

Yamakita, T., Yokooka, H., Fujiwara, Y., Kawato, M., Tsuchida, S., Ishibashi, S., Kurokawa, T., and Fujikura, K. 2018. Image dataset of ophiuroid and other deep sea benthic organisms in 2015 extracted from the survey off Sanriku, Japan, by the research following the Great East Japan Earthquake 2011. *Ecological Research* **33**: 285–285, doi: 10.1007/s11284-018-1571-7.

付録

8.A 海域の基盤となる地理空間データはどこにある？ (第 9.2 節の補足)

陸域と海域それぞれでどのような基盤データが利用可能だろうか。これらを比較する形で論じたものは稀である。データの量と質、および利用可能性の観点から陸域と海域を定性的に比較しながら、基盤データの提供事例を紹介する。

海洋で GIS・地理空間データの利用が少ない現状の原因として、以下の点が挙げられる。データの量質双方における不十分さ、フォーマットや分野の違い、社会的あるいは観測対象の構造的な要因などである。

最初に背景図や地形や区画などの、基本的な空間データとして利用可能な素材がどのような場所で入手可能なのかを、利用にあたって必要な手続き、費用と合わせて紹介する。

陸域に関しては基礎となる地形、河川や行政区画などのデータは基盤地図として、無料で公開されている。これらは紙の地形図や CD-ROM の数値地図として市販されている国土地理院のデータと整合する。使いやすく編集されたデータはオンラインで見られ、背景図などとして利用可能な形で配信されている。数値地図 (国土基本情報) として全国分で 70 万円近くになるものも市販されている。そのほかに、多様なデータが国土数値情報のウェブサイトから入手可能である。これらは、一部は日本独自の GML や DM という規格であるが、XML で記述されており、Shape ファイル形式などの一般的な GIS ソフトウェアで利用できるように変換は可能であり、変換ソフトが提供されているものや、Shape ファイル自体も提供されているものも多い。提供されるデータは任意の点や線、面の形式の他に、約 1km の基盤地域メッシュ (3 次メッシュ) に準拠したグリッドに集計されたデータが一般的であり、利用を容易にしている。一方でグリッドに集計されたデータについては、2002 年 4 月 1 日以前の日本測地系で集計したものと、以降の日本測地系 2000 (世界測地系) とではズレが生じる点が課題である。

上記の基盤データのスムーズな利用には、各部署の裁量による利用促進のほかに、法的な後ろ盾も存在する。2007 年に議員立法で制定された「地理空間情報活用推進基本法 (NSDI 法)」には、地理空間情報について、国と地方公共団体の責務と活用推進とがうたわれている。特に第十八条の基盤地図情報等の円滑な流通等を促進する項目では「国は、その保有する基盤地図情報等を原則としてインターネットを利用して無償で提供するもの」と定められており無償提供が法的に担保されている。同時期に改正された測量法においても、測量成果の複製承認手続に関する規制の緩和や、公共測量成果の複製・使用承認申請のワンストップ化が盛り込まれている。

海域のデータに関して、海岸線は陸域のデータに含まれる。それよりも沖合い側の基礎となる地形データは日本海洋データセンターで公開されている 500m メッシュ水深データ (J-EGG500) がある。これは沖合いでは目的によっては使

えるが、沿岸では粗すぎる。また、データのフォーマットは特殊ではないものの、テキストデータであり、GIS 上で利用するにはメッシュを自分で作成するか内挿するなどの作業が必要である。

また、陸域の基盤情報に相当する地図として海図が存在する。これは紙の地図として市販されているほかに電子データでも販売されている。底質や港の区域など様々な情報が記載されているが、描画以外にデータとして利用することは現在では高度な暗号化がなされており、容易ではない。海図のうち水深データだけであれば、同等のデータが海底地形デジタルデータとして等高線のテキストまたは Shape 形式で販売されている。これは容易に GIS 上で利用でき、便利であるが、全国分で 150 万円近くかかる点、不連続な線データであるため面に内挿したほうが使い勝手がよい点に注意が必要である。

陸上ではこのほかに衛星データなどから、独自に作成した標高モデルを販売・配布している機関があるが、海域ではデータとして流通するものは見られない。独自の測量は港湾工事などで見られるが、個人でも安価な魚群探知機でデータの取得は可能である。これらがデータとして公開されない要因はいくつかありそうだが、水路業務法に民間の測量業務を海図に反映する仕組みがあり、データ収集が統合・一本化されている面と、海上での調査、測量業務や海図類似刊行物の規制を行っている面も関係しているようである。陸域でも測量法で一定の規制がかかっているが、公共測量と判断される範囲は限定的である。海域では、航海の安全などの観点から情報精度の担保と一本化の一層の必要性は理解できるものの、運用面で陸域から学ぶべきことが多いように見える。

そのほかに海域では行政区域がないこと、陸域で用いられる約 1km の基準メッシュに準拠せず、調査主体ごとに独自のメッシュを定めているなど、陸よりも関係機関が少ないわりには情報の共通化が進んでいない点も挙げられる。

地形以外の環境データについても状況は近いものがあるが、沖合いの海洋表層に限れば、衛星によるデータや同化データが多数が見られる。例えば、陸域のメッシュ気候値のように平年値を集計したものに相当するデータは World Ocean Atlas が 2009 年版までは 1 度、2013 年版から 0.25 度グリッドで提供されている。また、日々の値については、NOAA から MODIS をはじめとする衛星の情報が断続的に公開され、海表面温度やクロロフィル a 量や濁度に相当するプロダクトが 4km の解像度で提供されている (NASA Ocean Color web <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)。さらに近年は日々の衛星データと観測値とを組み合わせ物理的に整合する値を作成した同化データの作成が進んでおり、日本沿岸であれば 0.1 度 (約 10km) と海洋物理モデルとしては高解像度のものが JAMSTEC や DIAS からダウンロード可能になった (FORA-WNP30 <http://synthesis.jamstec.go.jp/FORA/e/>; Usui under review)。ただしこれらの情報もオリジナルは 1 日ごとの NetCDF や HDF という 3 次元のデータフォーマットであり、一定期間の平均や分散の値として、2 次元の GIS 上で扱うためには、基本的なデータ処理スキルが必須だ。

海域においても海洋台帳など情報整備が進められつつあり、NSDI 法は決して陸域に限定されていないことから、今後、海の地図データの活用を促進する下地はある。活用には行政の役割はもちろんだが、利用者のニーズ等の関わり方も関係してこよう。

8.B 在不在を予測するモデルの適合性を評価する AUC (第 9.3 節の補足)

実際の在不在は、予測モデルの結果で出力された在不在では必ずしも全部を説明はできない。そのような場合にモデルの予測結果の良さを指標するものとして、ROC 曲線 (Receiver Operating Characteristic) の下の面積 (Area under the curve ; AUC) がよく用いられる。ここでその概要を説明する。

予測モデルによる在不在と実際のデータとの一致は次表でわかる (不在の扱いに議論はあるがここでは観測の在・不在

は真とする)。このなかで真の在のうちの在と予測された割合を「感度」、真の不在のうちの不在と予測された割合を「特異度」という。逆に在のうちの不在と予測された割合を「偽陰性率 (1-感度)」、不在のうちの在と予測されたものを「偽陽性率 (1-特異度)」という。

		実際 (真の状態とする)		
		在	不在	
予測	在	a) 正しく検出 (真陽性)	c) 誤って検出 (偽陽性)	在の適中率= $a/(a+c)$
	不在	b) 誤って未検出 (偽陰性)	d) 正しく不検出 (真陰性)	不在の適中率= $d/(b+d)$
		出現数= $a+b$	不在数= $c+d$	モデル全体の適中率
		感度= $a/\text{出現数}$	特異度= $d/\text{不在数}$	$= (a+d)/(a+b+c+d)$
		偽陰性率= $b/\text{出現数}$	偽陽性率= $c/\text{不在数}$	

ここで、予測モデルの結果をこの表に当てはめて評価するが、予測結果は分布確率などの連続値である。そのため、値のどこを閾値に在不在とするかにより結果は変化する。この在不在を区切る値 (閾値, カットオフ値) をいろいろ変えて、偽陽性率と感度の 2 次元の図にしたものが、ROC 曲線である (図 9.4a)。

もし、在不在の予測が全くできていないモデルであれば、閾値によらずに表の a と c の割合、すなわち偽陽性と感度とがほぼ同じになるので、対角線上を ROC 曲線が通る。反対に予測がうまくいっているモデルであれば、a の割合が多く c の割合が少ないため、偽陽性が僅かになる閾値の場合でも (x 軸左側) 高い感度があり、ROC 曲線は左上の角に近づく。

ROC 曲線の対角線からの離れ具合を表すのが曲線の下面積の割合 AUC (Area Under Curve) で、最大 1 までの値をとり、ランダムな場合 0.5 になる。AUC は在不在からランダムに 1 個ずつ選んだ場合、在の値が不在の値以上になる確率と一致するものである。なお、この計算、陽性と偽陽性いずれのエラーも同じ重みだが、現実の問題は偽陽性のほうが深刻である場合が多い。また、対象生物が全くいない場所を多数含めて解析した場合には、偽陰性の可能性が大きくなり、AUC が高くなってしまふなど工夫の余地もまだありそう。

8.C GPS の高精度化と海中での位置情報の把握 (第 9.7 節の補足)

いまでこそ当たり前前に用いられている GPS だが、かつては軍事技術として意図的なノイズ (SA) がかけられ、精度は 100m 程度であった。2000 年 5 月突如ノイズが解除された後は 8m 程度の精度となった。測量などメートル以下の精度を得るには、地上の基地局から配信された誤差情報を用いて補正する D-GPS の技術が当時から用いられていた。2005 年 2 月に打ち上げられた MTSAT-1R(ひまわり 6 号) や準天頂衛星みちびきから D-GPS の補正信号 (SBAS) の発信と天頂付近への衛星配位が実現し 2m 程度の精度が達成されている。近年は、静止時だけでなく、移動体を数 cm 以内の誤差で計測する RTK (Real Time Kinetic) 測位が安価な受信機と無料ソフト (RTK-LIB) で可能になっている。2017 年 4 月現在さらなる日本の準天頂衛星 3 機の打ち上げ計画の最中である他、ロシアや EU の衛星も今後増加し、携帯電話では基地局の位置での補正も一般的になっている。

こうした位置情報の活用は地図やナビゲーションの他にもコロプラやナイアンテックといった、ゲーム会社でも活発である。海洋でもナビゲーションには活用されているものの高精度位置情報の活用は陸上ほど盛んではない。その要因の 1 つは海底下の位置情報が音響でしか得られないことにある。USBL (Ultra Short Base Line) などの音響測位装置は調

査用船舶でなければ常備されず、調査ごとに取り付けることになる。取り付け位置や船の動揺、水温躍層、他の音との干渉により頻繁に誤差が生じる。音響の位置精度が低い一方で、船舶には SA がかかっていた時代から D-GPS が装備されており、測定の補正に活用されたと共に、船の位置自体の精度は高いものとなっている。

JAMSTEC では音響測位の生データは船舶と他の海中機器の位置情報とをまとめて音響航行装置の SOQ ファイルに出力している。しかし、後処理は人手を介して行っている。そのため調査船舶ごとの微妙な形式の違い、さらには補正した値(外れ値・欠損値・平均化処理等)や、環境情報とを結合したデータ (ROV/HPD ファイル) が作成される航海とそうでない航海が見られる。陸上で GPS の信号が機器の内部で解釈され、補正と前処理がなされた状態で NMEA という市販ソフトで扱いやすい共通形式で配信される状況のありがたみがわかる。

こうした準備はデータ解析の大部分を占めており、一般にデータからの知識発見プロセス (KDD) のうち 8 割以上はデータの準備に費やすとされる。PC 上の前処理だけでなく、データ収集系の再構築や組織改革も準備として挙げられる。みなさんも厭わずに数字以外のデータ収集系の改善に取り組んでほしい。

8.D 情報技術の見果てぬ夢、自動認識 (第 9.6 節の補足)

近年の計算機の高速化と新しい解析手法の出現にともなって画像の自動認識技術の開発がにわかに活況を帯びている。画像からの物体の自動識別は従来からも様々なものがあつた。生物分野でなじみ深いものには、Flow cam や ZooScan といったプランクトンや小型の底生生物の撮影装置に付属する背景とのコントラストを用いた粒子解析によるものや、リモートセンシングによる土地被覆分類に用いられる複数色の組合せに基づく教師付きあるいは教師なし分類、動態検知などで用いられる差分画像からの関心区域の抽出などが挙げられる。

人工知能 (AI) に用いる自動認識はこれらと異なり、特徴量抽出と教師画像とのマッチングが多い。単純なものにテンプレートマッチングと呼ばれるものがある。特徴点の分布から幾何的なずれを考慮して教師画像と一致する部分を抽出する。この特徴量の抽出や判別方法を工夫した分類器には、単なるマッチングでなく、特徴量から個別画像の検出を機械学習によって行う方法や、複数画像を同時に検出する Bags of features (bags-of-words ; BoW) などの手法がある。

実際に画像解析ライブラリの Open CV を用いてクモヒトデのような形状がはっきりしたものを教師データに与えてクモヒトデのみの検出を実行すると、7 割程度の高い精度で可能であることが試験的な結果から得られている (Yamakita *et al.*, 2018)。

近年改めて「AI」として呼ばれているものは、従来型学習で研究者が試行錯誤しながら個別に定義していた特徴量抽出や判別手法の検討も自律的に行える深層学習 (ディープラーニング) と呼ばれる方法である (図 8.21)。従来型学習でも判別器にニューラルネット (NN) が用いられることはあつた。これは一定の閾値以上の入力があると出力をする神経細胞 (ニューロン) を模したモデルを 3 層重ねたもので、入力の行列に適用後、教師データに基づき中間層のニューロンを構築し、判別器が作成される。これを応用した畳み込みニューラルネットワーク (CNN) では NN を何層にも重ねたモデルによって、特徴量相当のものも自動で検討して判別器を作成する上に、認識精度が飛躍的に高まったのである。

実際にどのくらいのもの判別に近年の自動認識技術が適用できるのだろうか。CNN を用いた判別器であるのかは不明であるが、例えば Google で提供している画像認識の API を利用することができる。図 8.22 にその結果の例を紹介した。カテゴリーは比較的良好に判別されているように見えるが、この認識精度をみなさんはどう受け止めるだろうか。

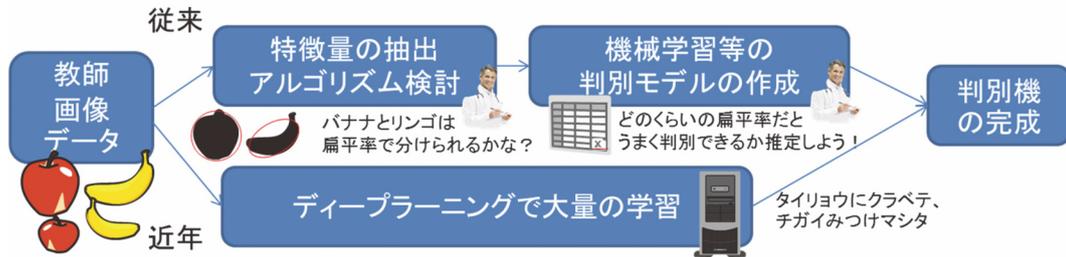


図 8.21 従来型学習と近年の「AI」による機械学習の違い。

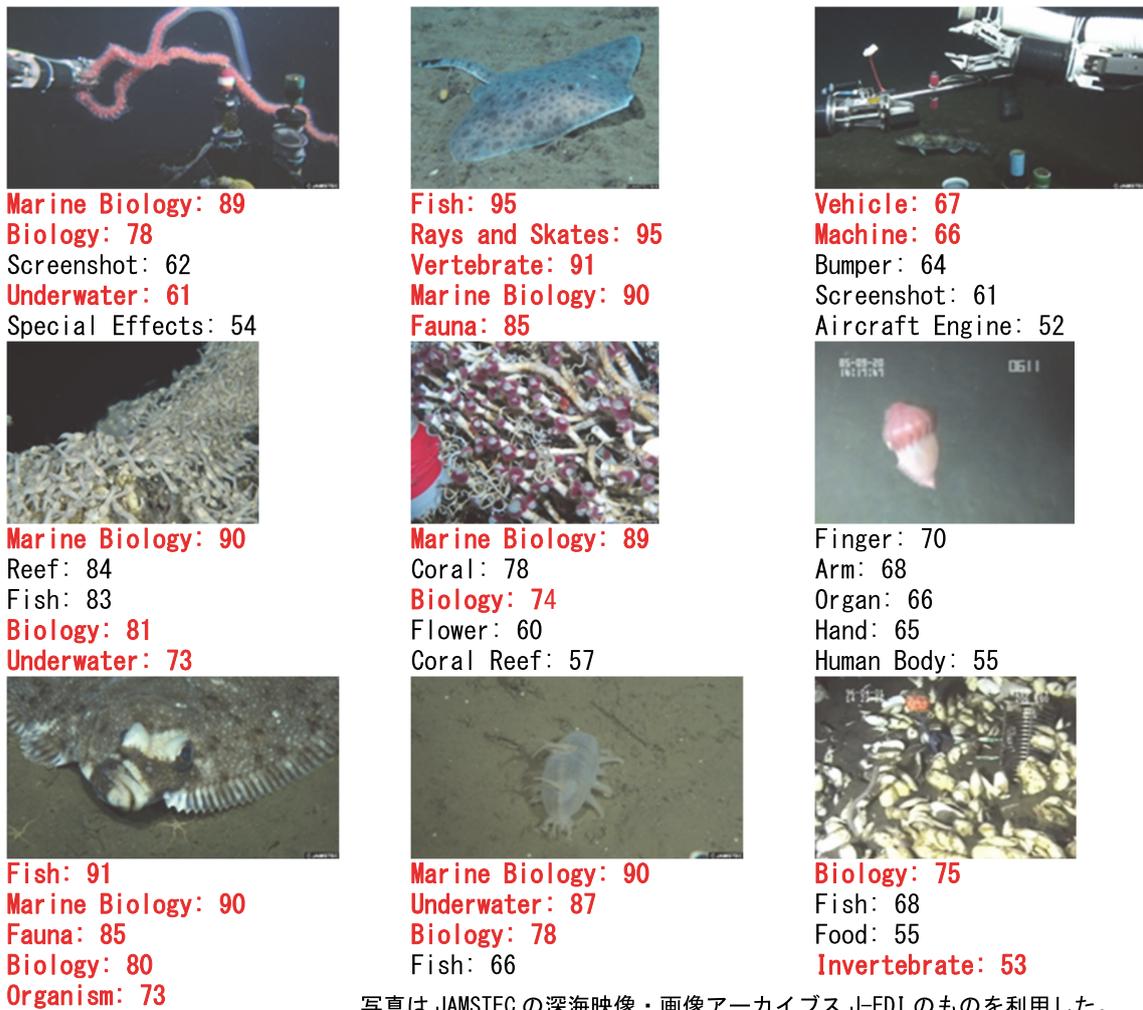


図 8.22 Google Cloud Vision API による海底生物画像の認識結果の例。数字は結果で示される % の値。正解は太字。画像はあらかじめトリミングした。Photo : Copyright © JAMSTEC. All rights reserved.

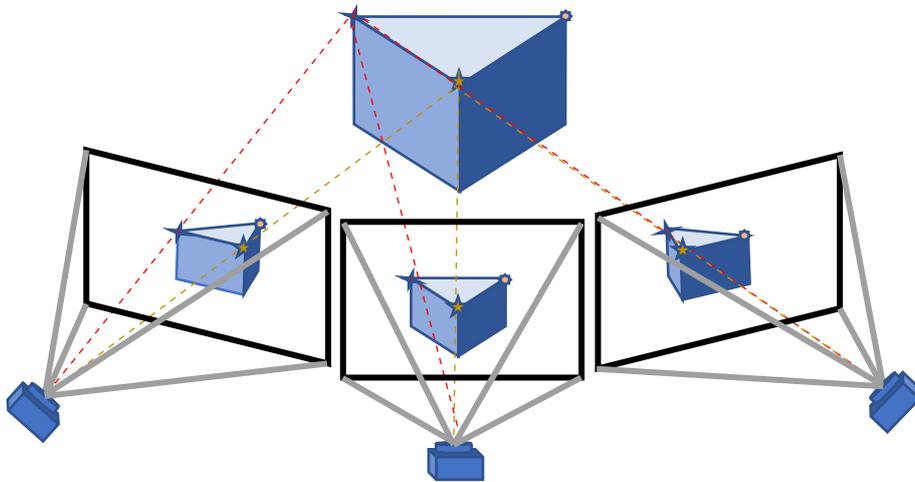


図 8.23 複数の写真から、立体形状を生成する SfM-MVS の原理の模式図。複数の 2 次元の写真(黒枠)から同一点(この場合三角錐柱の頂点)を特定して、3 次元の空間上で交わる点から、カメラの位置と、対象とした立体の形とを復元することができる。

8.E 無人機による自動マッピングと SfM-MVS による画像の自動結合 (第 9.15 節の補足)

陸上でマルチコプターなどの無人航空機 (UAV) が普及し、国土地理院などでも測量としての利用の検討を行っているところであるが、海にも同様に自律無人潜水機 (AUV)、海上を航行する自律無人艇 (ASV) が存在する。特に海上は障害物が少ないため技術的に自動化が容易であり、一部の自動航行技術はすでに多くの船舶にも実装され、実用段階にあるといえる。

だが、数万円の個人で手が届く価格で新興国メーカーが中心となる UAV と比較して、普及段階や商業ベースに至っているとはいいがたい。浅場の測量用の小型 ASV でも 800 万円台である。技術的にもスマートフォンで誰もが容易に自動航行でき、一部は Linux を搭載したオープンな技術開発をしている UAV と異なり、AUV も ASV も民生品向け技術では太刀打ちできない。

ただし、特に AUV は海域の地形の把握と姿勢調整の自動判断など、自律的機能を一部で取り入れているものも多い。実は陸域でもヘリコプター業界で以前から自動追尾など自律化の技術開発が進んでいる。今後はこれらの業務向け機能と、安価な UAV とを組み合わせ、応用したものが開発され、海陸問わず普及していくものと考えられる。

こうした無人機による近接リモートセンシング測量を近年支えている技術の一つに、SfM-MVS (Structure from Motion 及び Multi-ViewStereo) がある。これは複数の画像の同一の特徴点を特定し、特徴点に基づき、同時に複数画像の撮影位置を推定し、ゆがみを補正し、1 つの 3 次元モデルを作成する技術である (図 8.23)。以前からパノラマ画像や立体物の CAD データ作成などに類似技術が用いられたが、ここにきて計算機の高速度により、大量の画像の特徴点抽出と幾何補正により結合するソフトが登場。使い勝手も速度も向上した。

こうした画像処理で重要な点は画像が同じ好条件かつ、ゆがみなく、多数重複して撮影されていることである。前の 2 つの条件は特徴点の抽出と結合の精度に強く影響するので、あらかじめ前処理をするかカメラの変数を計測し、解析ソフト

に正しく与えることが必要である。

2018年10月2日公開

山北剛久 2018. 東日本大震災後の海の変化を知る-地理情報システムの活用と地理情報科学 (GIScience). 種生物学会電子版和文誌 **2**: ページ未定.