

第9回海洋深層水利用学会賞 (2022年度)

人工海底山脈の持続可能な開発と未来

Development and Future of Sustainable Artificial Sea-Mounts

鈴木達雄¹

Tatsuo SUZUKI¹

1. はじめに

このたびは、2022年度海洋深層水利用学会賞をいただき、たいへん名誉なことと存じます。関係各位に心から御礼申し上げます。学会賞の業績題目は「人工構造物を利用した亜表層水（深層水を含む）による海域肥沃化とその事業性の実証」とあり、推薦理由は「海洋深層水を含む亜表層水による人為的の海域肥沃化は、世界的に関係者に関心を持たれてきているが、実際の事業にまで進んでいるのは、筆者の研究開発による人工海底山脈によるものにつきます」とある。

本稿では、人工海底山脈の開発が公共事業化に導かれた背景には、石炭灰を用いた世界初の新材料の開発が必要だったことを述べる。この新材料の開発の経験なしに現在提案しているシティコン海底山脈への展開はなかった。その開発途中では、必要な時に最適な指導者との出会いがあり、筆者が逡巡した時に、社会情勢が想像もしない方向に転回し、その変化を真摯に受け止め、過去の常識に捕らわれず自然が導く方向に先入観を持たずに進んだ結果が本学会賞に繋がったと感じる。

本稿後半では、本研究が日本の公共事業では終わらず、人口100億人に達する世界の食料増産で、環境負荷を最小化して自然エネルギーだけで魚介類を増産する構想について述べる。海の食料増産と同時に、世界のプレート移動で必ず発生する現代都市型地震の廃棄物の過半を占めるコンクリート構造物

を、迅速に大割の状態解体し、天然石材に代わる安全で耐久性のある資材として人工海底山脈を建設する仕組を構築し、食料増産と巨大地震からの迅速な復興に備える^{1),2)}。筆者が属す首都防災ウィーク実行委員会は、これを「シティコン海底山脈」と呼び、食料危機の回避と同時に、巨大地震からの早期復興を支援し国難を回避する提案として、有識者の賛同を得て国会で質疑されるに至っている。

2. 自然の摂理に学ぶ

筆者が一連の開発に導かれた原点は小学生の頃にあった。小学3年生から夏休みは、毎年、夜行寝台列車で東京から母の生家である山口県下関に預けられた。そこは彦島本町という自然に恵まれた山の中腹にあり、見晴らしがよく眼下には速い潮流と闘う船舶が航行し、巖流島が見える屋敷だった。そこから30分も歩いて下ると海岸があり、人の少ない砂浜に桜貝、角貝、イモガイなど珍しい貝類がたくさんあった。浮袋で遊泳しながら水中メガネで砂や岩礁の海底の珍しい形や美しい色の魚介類や付着生物を観察していた。裏山ではクマゼミ、クワガタ、蝶、爬虫類、珍しい草花、サワガニ、小川の底で微妙に変化する砂の流れをじっと観察していた。大学の土木工学科では、ヨット部の合宿で自然の風力だけで海上を滑走し、冬は艇を校庭に運び、磨き、塗装し、年間ほぼ100日以上合宿した。海の仕事に就きたいと強く願った1972年に株式会社間組海洋開発室

¹ 株式会社 人工海底山脈研究所代表取締役 (〒192-0353 八王子市鹿島945-75) President, Artificial Sea-Mount Institute

に就職し港湾構造物の専門知識³⁾と、米海軍式潜水技術の特訓を受けた。潜水調査には危険もあったが、本開発に必要な技術の礎となる経験になった。入社当初、本州四国連絡橋の施工計画等に就いたが、これは海洋開発ではなく海の陸地化なのではないかと、違和感を持つようになった。

1974年に世界に冠たる沿岸漁場整備開発法ができ、漁場整備事業の本格開始を感じた頃、尊敬する故下村嘉平衛上司より、海の食料生産の研究をしないかと挑戦的な密命を受け快諾した。この決断が世界初の人工海底山脈を生むことになろうとは、思いもしなかった。

幸い、研究開始直後、水産庁水産工学研究所の故中村充所長⁴⁾との邂逅があり意気投合した。亡くなる直前まで45年にわたり議論を肴に酒を飲み、水産土木技術に関する基礎と最先端知識を授かった。魚礁の潜水調査ではプロダイバーと北海道から沖縄まで潜水し、漁師たちと深夜まで語り合った。魚礁に魚は集まるが、獲ればいなくなる漁具だと言われ、漁師たちが頼る天然礁は漁を続けても魚が減らないと教わり、天然礁に潜ると魚が自然に再生産されていると実感した。魚を増やすには自然がつくった良い天然礁に倣い、人工の海底山脈を創ることに勝る確かな漁場開発はないと確信した。その境地に至るまでに、中村充所長には筆者が設計した高さ10mの魚礁の陸上落下試験や、形状と抗力に関する水理実験を指導頂いた。さらに晩年には、解体したコンクリート構造物を破碎せずに利用するシティコン海底山脈への助言と最大級の賛辞を頂いた。

3. 人工海底山脈の新材料

魚礁の材料はほとんどがコンクリートで、ポリコン、FRP、鉄鋼なども使われていた。しかし、巨大な人工海底山脈の建設に既往材料を使うことは考えていなかった。中でも陸の山の植生と表土を剥いで採石する石材は、自然破壊の元凶となると考え、研究対象にはしなかった。

材料の選択で悩んだ1980年、今では嘘だとわかるが、突然世界の石油がなくなると報道され、第二

次オイルショックが起きた。石油代替エネルギーの開発及び促進に関する法律が制定され、政府指導で電力会社の発電燃料は石油から石炭への転換を強いられた。多くの電力会社に石炭火力発電の問題点を問うと、口を揃えて石炭の燃焼で発生する膨大な石炭灰の処理といわれた。当時、最先端の微粉炭燃焼方式の火力発電で排出される石炭灰は、見た目はセメントと変わらないが、有害物質を含むため管理型産業廃棄物として遮蔽型の灰捨場に捨てられていた。生物生産性の高い浅海域の藻場や干潟の消失は、海洋生物にとって脅威だった。この石炭灰を人工海底山脈の材料にできれば、浅海域の生態系を救い、沖合に人工海底山脈ができるので一石二鳥だと考えた。人工海底山脈の建設に用いる膨大な材料として、研究対象を石炭灰に絞り込んだ。

当時、石炭の利用に関する研究は、科学技術庁、通商産業省、資源エネルギー庁、環境庁、建設省、土木学会など国をあげて行われ⁵⁾、石炭灰についてあらゆる研究がなされていた。その多くは技術的に適応可能と結論されていたが、石炭技術研究所の図書館で石炭灰の硬化に関する膨大な資料を読み漁ったが、あらゆる実験・研究がされているにもかかわらず、常識を破る画期的な技術はなく、石炭灰の利用を制する者は世界を制するという関係者もいる程であった。

4. 常識を覆す材料革命

ないものはつくればよいと、石炭灰を主成分とする安全かつ安価な硬化体を目標にした。石炭灰について全く素人であり、材料の組成から製法までゼロから研究した。1980年から技術研究所に籠り、石炭灰硬化体の研究に寝食を忘れて取り組んだ。試行錯誤の末、常識を破る石炭灰硬化用混和剤の特許を取得した⁶⁾。石炭灰はフライアッシュとも言われ、品質の良いものはセメントの原料とされ、JIS規定ではフライアッシュの使用量は、セメント重量に対して30%以下とされていた。しかし、筆者はフライアッシュの使用量をセメント重量の565%とし常識を覆した。開発した石炭灰コンクリートは、図1左

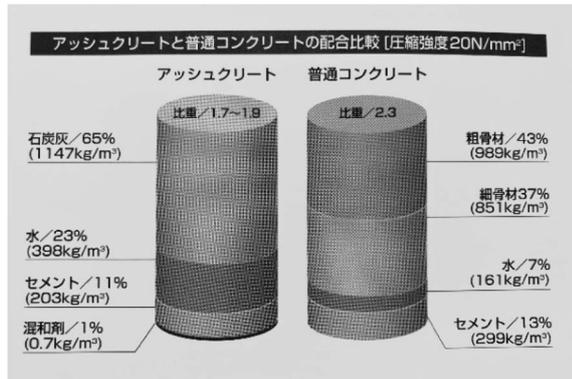


図1 普通コンクリート右と同強度の石炭灰コンクリート（アッシュクリート）左の配合比較

で、同じ20 N/mm²の強度を持つ普通コンクリートと比べ、比重が小さいのが特長で、セメント使用量を普通コンクリートの68%に削減できた。管理型廃棄物を海の公共事業に利用した例はなかったが、勿論、環境基準、強度、耐久性を十分満足するものであった。筆者の構想は期待され、複数の電力会社から研究を委託された⁷⁾。

1983年に静岡県大井町漁業協同組合の了解を得て、筆者が設計した図2①のような1基50トンのサークルリーフという石炭灰コンクリート製の底曳網に掛からない大型魚礁を4基製作し、大井川河口付近の水深25 mに沈設した⁸⁾。このブロックは比重が1.9と大井川河口の超軟弱地盤でも埋没や網がかりがなく、大井川漁協の杉本晃一組合長も大喜びだった。人工海底山脈に使う石炭灰コンクリートを多くの業界紙が報道し、大井川の甲原嘉記工場長をはじめ熟練技術者が課題を適切に解決し、中村充教授を座長とする静岡県魚礁検討委員会が立ち上がり公共事業化を試みた。しかし、水産庁は非常に慎重でこの新材料を承認せず事業化に至らなかった。

その後1986年、社団法人マリノフォーラム21が設立され、最初の課題として石炭灰コンクリート開発研究が採用され、東工大・長瀧重義教授が委員長となった。当初、長瀧教授は提案した混和剤に懐疑的だったが、故大賀博之助教授による再試験で、本混和剤が強く支持され、石炭灰コンクリートマニュアルが制作された⁹⁾。

水産庁は試験的に1988年に図2②の岡山県の底質不安定沿岸域漁場開発調査事業、1990年③の岡山市

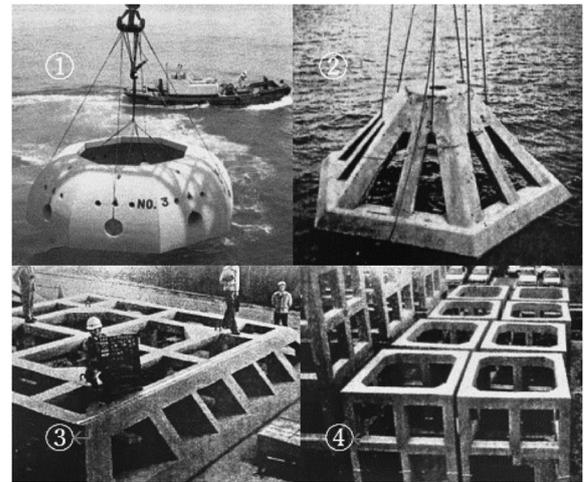


図2 石炭灰コンクリート人工魚礁、①サークルリーフ、②不安定底質用魚礁、③岡山市並型魚礁、④ホクコアカエビ礁¹⁰⁾

並型魚礁設置工事、1991年④の新潟県佐渡島の特定魚種漁場整備開発調査などを発注し、石炭灰コンクリートの実行性を確認した¹⁰⁾。そして1993年の沿岸漁場整備開発事業施設設計指針改訂版に掲載された¹¹⁾。1980年の研究開始から1993年の認可までに13年かかり、人工海底山脈の建設材料として世界初の画期的な石炭灰コンクリートを公共事業で使用するようになった。

人工海底山脈の建設に使う石炭灰コンクリートブロックを大量生産するために品質改良を続けた。石炭灰とセメントと水と混和剤を最適含水比で混練し、パサパサの状態ですて型枠に入れ高周波振動を試みた。いくら振動しても変化がなく、もう諦めようという苦情を背に、坂本守氏と強引に続けると奇跡が起こった。突然、粉体が一変し触っても手が濡れない不思議な流体化現象が起きた¹²⁾。流体化させて石炭灰コンクリートを作る製法は、コンクリートや石炭灰の専門家を驚かせた。この微粉体と水と混和剤で硬化体を造る超流体工法の特許を取得し¹³⁾、画期的な製法に複数の講演依頼があり、筆者にとって人工海底山脈の開発は材料革命で始まった。

5. 人工海底山脈の概要

人工海底山脈の実証事業の前、1988～1990年にマリノフォーラム21は、湧昇による事業の可能性調

査として「大規模人工湧昇流の開発研究」で、網羅的な机上研究を行った。中でも特記すべきは、全国各県に協力を呼びかけ、10カ所の水産試験場に表層水と底層水の採水と、同じ前処理を依頼し、広島の研究所に集めて珪藻類の培養実験を行った。象徴的な結果として図3のように栄養塩類濃度の高い底層水と、低い表層水で珪藻を培養し、最終細胞収量を比較した。底層水で培養した場合に最終細胞収量が多く、表層水で細胞収量が最も少なく、両者を1:1で混合したものがその中間になり、全国で底層水の栄養塩類濃度が表層水より高いことが実証された¹⁴⁾。重要なのは、水産庁が日本全国での事業展開の可能性を確認したことだ。

中村充教授より人工海底山脈について博士論文を書くよう再三勧められたが、着手できずにいた。石炭灰コンクリートを使用した人工海底山脈の可能性を確信し、1990年の夏休みの熱い実験水槽で本田陽一氏と人工海底山脈の最適形状の研究に入った。1991年に密度成層のない流水路に考え得る様々な形状の模型を置き、底層水が表層に上昇しやすく、建設可能な形状を考慮し、最終的に自然の海底山脈に倣い、流れが剥離しやすい頂点が尖った円錐体を、

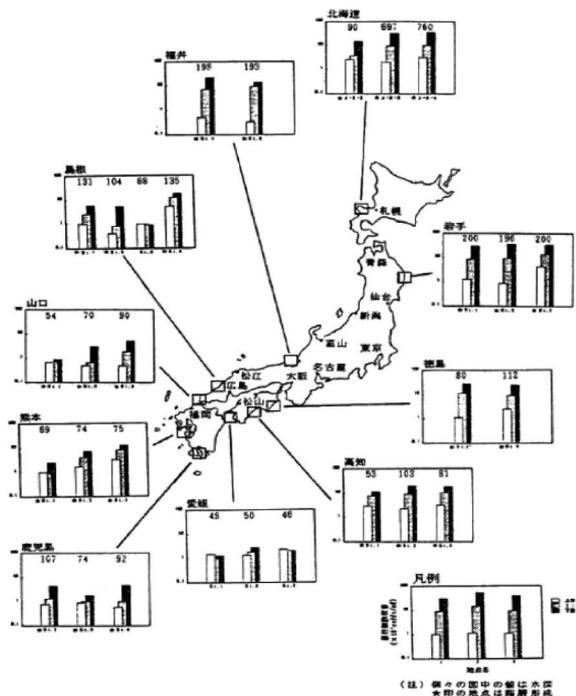


図3 全国の表層、底層水を用いた珪藻類の培養実験 (各々左の白棒が表層水、黒棒が底層水、真中が1:1混合)

流れを遮る方向に延長する形状を選択した。海底山脈模型の高さと、流れを遮る長さの関係が重要だとわかり、底層水の到達高さを比較した。模型の高さを一定にし、流れを遮る長さ、湧昇渦の到達高さの関係を調べた。長さが高さの4~6倍の場合に湧昇渦の到達高さが最も高くなった¹⁵⁾。さらに両端の円錐体を残し、頂点を結ぶ稜線の高さを若干下げても湧昇渦の到達高さは変わらないが、湧昇渦の発生頻度が高くなり、稜線の高さを下げた分だけ体積が減ることから、体積当たりの湧昇流量が多くなる2連山型の特許を取得¹⁶⁾し、実証事業で採用された。人工海底山脈周辺の流れは図4のように複雑で、海底山脈背後の反流域で水平軸と鉛直軸を持つ渦が反流域に吸い込まれ融合し、エネルギーが溜り、間欠的に大きな湧昇渦が発生し、底層水が表層近くまで湧昇する現象がわかった。

1992年、1冊の本¹⁷⁾の縁で東大理学部高橋正征助教授との念願の対面が叶った。その後、構造物周辺流況や湧昇の調査、実験の研究論文などで1994年東京大学工学部土木工学科故渡辺晃教授を主査とする委員会で推薦頂いた中村充教授、高橋正征助教授も審査に加わり「生物生産に係る礁による湧昇の研究¹⁸⁾」で工学博士号を授かり、実証事業が開始された。その世界初の実証事業を主導したのは水産庁振興部開発課、長島大四郎課長補佐、本田直久課長補佐だった。水産庁は「人工海底山脈」は恐れ多いと名称をマウンド礁に改名した。1995年、マリノフォーラム21を事業主体とし、国が50%、実証海域を提供する長崎県が25%、民間企業11社が25%負担し、マウンド礁の実証事業が12億円という水

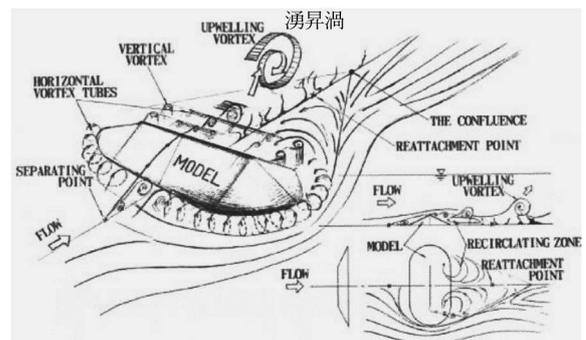


図4 人工海底山脈周辺の流れの状況と、背後で間欠的に発生する湧昇渦を示す鳥観図

産系の研究では異例の高額予算で始まり、筆者の博士論文を基に中村充座長、専門家高橋正征助教授、清水誠教授などが委員となり、16県が参画する責任重大なミッションの幹事役を仰せつかった¹⁹⁾。

6. 画期的なアッシュクリートブロック

実証事業で使用されたアッシュクリートブロックは図5に示す形状²⁰⁾で、大量生産に対応するため強度発現が速く、品質が向上する超流体工法を採用した。見学した研究会の多くの会員は、パサパサの粉体が振動によって流体に変化する様子を見て驚きを隠さなかった。ブロックの寸法は1辺が1.6 mの略立方体で、重量1基6トンのうち、主成分の石炭灰が約4トンという常識破りのブロックだが、水深82 mの海底に自由落下させても破損せず、マウンド礁の建設に約5000個製作した。

図6のように作業船に積み込む数に達するまで岸壁に仮置きした。これを海面から自由落下させて山

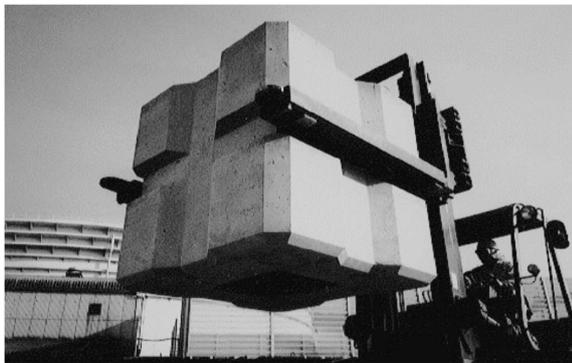


図5 石炭灰コンクリートブロック1.6 m×1.6 m×1.6 mの略立方体で1基6トン（内4トン石炭灰）、圧縮強度：20 N/mm²



図6 作業船に積み込むため岸壁に2段積みしたブロック

脈を構築する方法についても委員や参加者の多くが懐疑的だった。陸上で6トンのブロックを落下させれば、必ず破損する。また、常識では海面から海中に100 mも自由落下させれば、海の複雑な流れで大きく散乱し、設計通りの山にはならず、人工海底山脈は構築できないと疑われ、疑義を唱える委員も多かった。その心配を解消するため弊社研究所の実験棟に招き、流水水槽で模型の落下実験や解析を示し、計画した位置に設計通り山が構築できる可能性を主張した。また、別の実験でブロックを海上から自由落下させ、下のブロックに衝突しても耐えられる強度があることを実証した。

対象海区の海上保安部に対する長崎県の事前説明はなく、何度も呼び出され石炭灰コンクリートの環境安全性を問われた。石炭灰ブロックは日本初で、知られていないのは当然だが、環境基準を満足し安全だと説明しても聞く耳を持たない。最終的にブロック投入直前に、水産庁と海上保安庁の協議が行われ、ロンドン条約も満足することで、工事は中止されることなく始まった。

大水深の人工海底山脈が深層の栄養塩類をどのように有光層に添加し、それを植物プランクトンが吸収し増殖することによる、実海域での生態系変化の観測例も、シミュレーションの例もなく、全てが未知の領域であった。また、構造物の建設方法も前例がなく、この実証事業で実行可能なことを証明する以外に方法はなかった。しかも事業期間後半では建設費の大幅縮減を強いられた。

7. 常識を覆す沈設方法

ブロックを吊り降ろし海底に積み上げることも可能だが、潮汐により流速、流向が刻々変化する中、大水深にブロックを多数回吊り降ろし切り離すのは時間がかかり過ぎるので、自由落下する方法を選択したが、水深100 mの海底に設計通りの構造物を構築した例はなかった。

流れのある中での沈設が前提になるので、自由落下するブロックは下流に流される。対象海域で落下直前の流況を測り、海底の落下位置を計算すること

ができる。図7のように落下位置から逆算し作業船に投下位置を指示し、構造物頂点に落下させるシステムを構築した。また、沖合海域では霧などの影響で陸から目視できないことを考慮し、当時普及し始めたGPSを採用した²¹⁾。

図8のように積み込んだブロックを自由落下させ、海底に堆積させる。船底が左右に開く全開バージという作業船を使うことにも様々な難問があった。左右のバランスをとるため、ブロックを4区画にワイヤーで分けて縛り、船底を全開した後、はす向かいの区画のワイヤーを同時に解放し、船上でのブロックの衝突を避け、指示された海上位置で瞬時に落下する方法を開発した²²⁾。

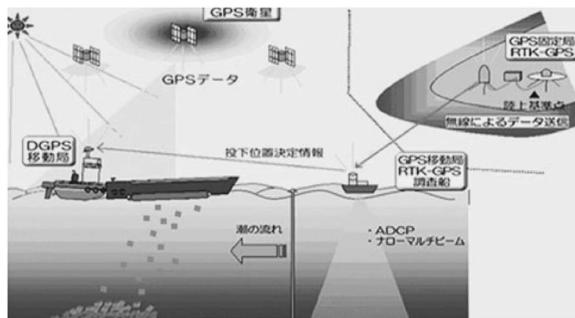


図7 ブロックの位置決め沈設システム

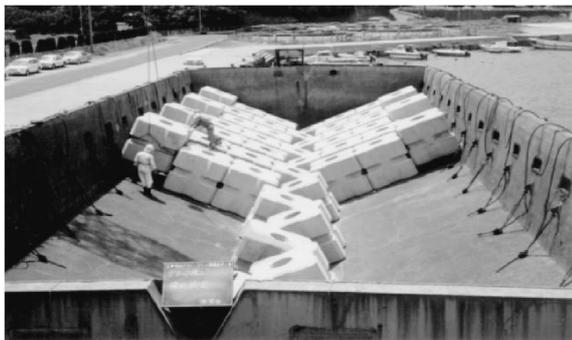


図8 ブロックの積み込み状況 (ワイヤーで制御)

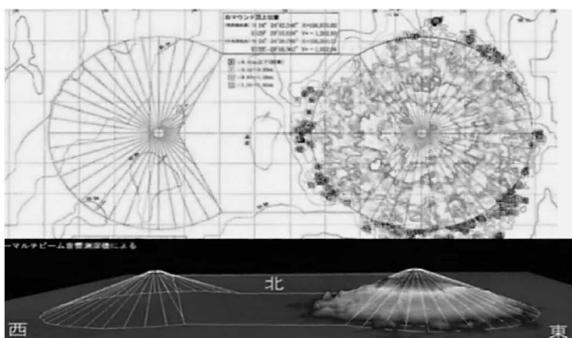


図9 自然な形状の円錐体が形成される

に落下する方法を開発した²²⁾。

緻密な連携作業が必要になるが、図9は左側の円錐体を造る前の状態の図面で、右のように円錐体を形成することは可能である。この方法では、海上でブロックをクレーンなどで吊り上げ下げする作業がないので、比較的、海象条件が厳しい沖合海域でも沈設作業ができるのが特長である。

8. 想像を遥かに超えた自然の摂理

図10の漁獲調査は前代未聞の東西60 km×南北90 kmを5×6 kmに分け1996年から4年間標本漁船の出漁日の全調査で、マウンド礁を中心に20 km×18 kmの広い海域で漁獲が1999年に1500トンと6倍に増え、過去には漁獲されなかったプランクトン食のカタクチイワシが1100トンに増えた。さらに広大な全域の漁獲量も1.5倍に増え、マウンド礁に集中しただけではなかった^{23), 24)}。

図11は建設の進捗と、人工衛星によるクロロフィルa濃度の関係で、周辺の対照区と比較し近傍ではマウンド礁の完成時には1.5倍になり、採水による現場のプランクトン計測でも同様の傾向が確認

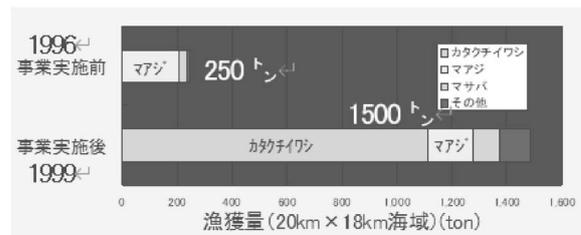


図10 4年間で漁獲量が6倍に増えた

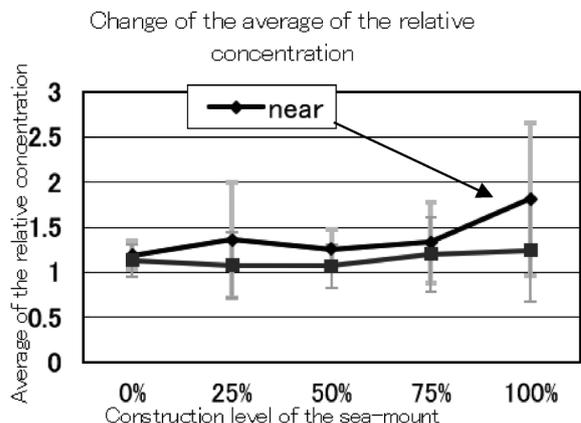


図11 衛星観測によるクロロフィルa濃度が1.5倍になった

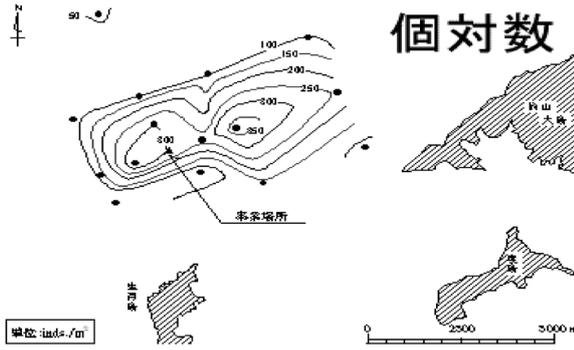


図12 表層魚の糞尿の沈降で底生生物が増えた

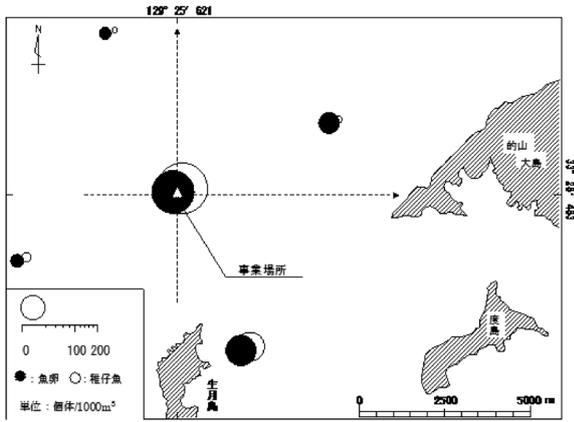


図13 多種の魚卵と稚仔魚が採取された

された²⁵⁾。

図12のように事業場所を中心に潮汐流の方向7kmで、底生生物の個体数と、図示は省略するが種の数が増加した²³⁾。

図13に示す表層のイワシに限らず岩礁性のエソ科など黒丸の魚卵が11種採取され、白丸の稚仔魚が9種と、植物プランクトンが豊富な海域で稚仔魚が採取された²⁶⁾。

マウンド礁の建設前には生物らしきものが見られない平坦な砂泥海域だったが、マウンド礁の構築により湧昇が発生し、表層では過去に漁のなかったプランクトン食のカタクチイワシが増大し、これを漁獲する巻き網船が占拠し、建設工期の後半では作業船が現場に近づけないこともあった。建設期間中に漁船からROVで海中を撮影すると、必ずというほどヒラマサの大群がマウンド礁の上で群舞しており、生月島付近の漁港にイワシの大群が押し寄せて処理に困ったという新聞記事もあった。

図14の左はマウンド礁建設前の単調な砂泥性生態系で魚類は見られなかったが、マウンド礁建設後

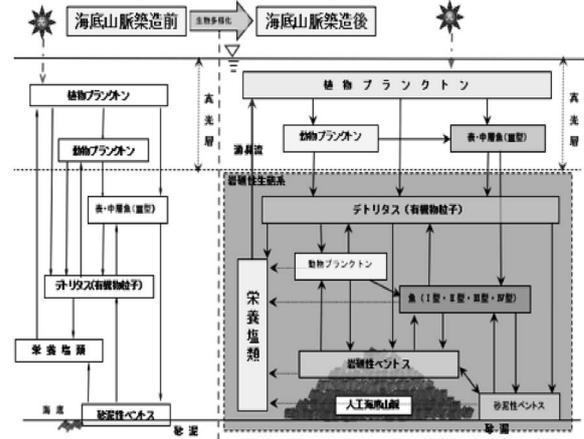


図14 左の砂泥生態系から右の岩礁生態系に変化

は図右のように、表層の湧昇生態系と、中底層の岩礁生態系とが融合し、両者の相乗効果で非常に安定した多様な生態系が形成された²⁷⁾。想像を遥かに超えた自然の摂理による変化に感動し、事業化の推進を誓った。

9. 公共事業化への道

成果は1999日本水産工学会学会賞²⁸⁾、建設省関東地方建設局建設リサイクル新技術優秀賞、日本建設機械化協会加藤賞、2002土木学会環境賞を受賞した。

中村充座長、高橋正征教授などの専門家の指導による実証事業の顕著な効果を、水産庁は吟味し新事業を創設した。この事業には民間企業の特許があり直接工事費の3%の特許料が加算されて発注され、受注業者が特許権者に支払う仕組みができた。各県を事業主体とする公共事業に国が50%補助し、事業費の下限が10億円という縛りも異例だった。補助事業開始後10年で、事業によるCO₂固定効果が国内の事業でも注目されるようになり、水産庁の橋本牧課長を支援し、国の直轄事業が始まった^{29),30)}。

図15はマウンド礁事業の実績で、実証事業1基の後、補助事業11基、直轄事業5基と全国17海域で実施され、□枠が直轄事業である。実証事業を行った破線円の長崎県が10海域と過半を占め、さらに次の設計が発注されマアジ生産日本一を維持し続けている。直轄事業では、マウンド礁中心から半径1海里内が禁漁区にもかかわらず、漁獲量が顕著に増加

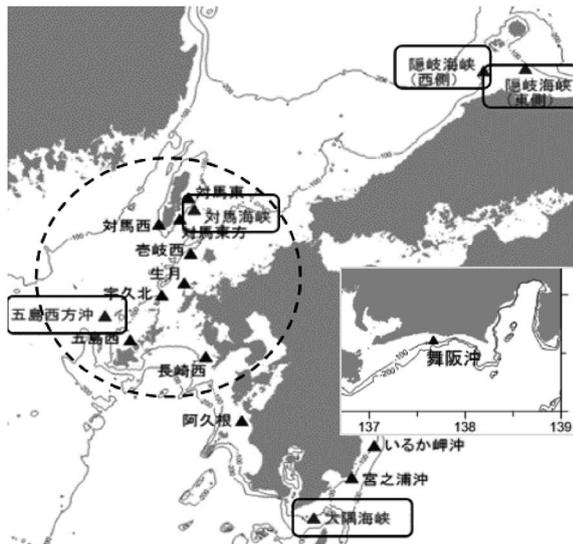


図15 マウンド礁の事業実績(黒枠が直轄事業)

し水産庁のホームページで、五島西方沖直轄事業では漁獲量が約2倍になり、事業後の費用対効果を3.4と算出している。

直轄事業ではより大水深での沈設作業が想定され、繊細な構造は難しいので、円錐体を複数重複して構成する形状の湧昇効果と魚礁効果を算定し、3連山、4連山型を提案して国際魚礁会議(9th CARAH)で共著発表した^{31), 32)}。

縄文時代から動物タンパク質を海の魚貝類で自給した日本だが、戦後は脱脂粉乳、牛、豚などの肉類、穀類も米国からの輸入頼りの小麦になり食文化が変わり、食料自給率は37%と先進国中で最悪水準に下がり、沿岸漁業の漁獲量も30年で半減した。種子も肥料も農薬も80%が輸入なので実質食料自給率は10%程度といわれ、兵糧攻めされたら無条件降伏せざるをえない状況である³³⁾。

近年の給食は、戦後の脱脂粉乳と同様、動物タンパク質はコウロギや人工肉、穀類は遺伝子組み換え作物による食育が始まり、将来の市場創出を狙う意図も伺える。しかし、無駄なエネルギーでコウロギや人工肉を試験生産する必要はない。日本には公共事業としてマウンド礁の実績が多数あり、無給餌、無人で自然の摂理で半永久的に自然生態系が食料を増産する技術がある。マウンド礁1万 m^3 当たりの漁獲増加実績は年間約40トンであり、年間4万トンの漁獲増加に1千万 m^3 の材料が必要になるが、1基10

万 m^3 のマウンド礁100基程度で、1基10億円なら1000億円と無理な金額ではない。さらに設計過程で湧昇による植物プランクトンの増加量を算定するので、ブルーカーボンも便益になる。この純国産技術を国際レベルに格上げする過程で、膨大な CO_2 吸収によるカーボンクレジットの付加価値も加わる。これまでマウンド礁の関連で筆者を含む6名の博士が誕生したが、世界レベルの研究にする過程で多くの知見が得られよう。

10. シティコン海底山脈の可能性

人工海底山脈は実績のある事業だが、シティコンを利用することには3つの課題がある。①東日本大震災後、水産庁は漁場施設に災害廃棄物等を利用する手引き³⁴⁾を作成したが実用化していない。毎年3700万トン解体されるコンクリート構造物を廃棄物とする常識を覆す提案が実現すれば環境に優しく持続可能だが前例がない。②建設に適した候補海域となる水深200m以浅の未利用の砂泥海域は、日本国土面積より広大であるが十分認識されていない³⁵⁾。③激減する漁獲量を回復する食料自給と、巨大地震への備えは必須の国防予算であり、最優先されるべきものである。これに日本の存亡がかかっており、シティコン海底山脈の資材として利用することに政治が動き、関係省庁も連動し始めている。

10.1 持続可能な材料

現在、解体するコンクリート構造物は全て廃棄物とみなされ、資源化する唯一の道が再生砕石化である。筆者は2016年にこの常識を覆し、破碎せずに資源として人工海底山脈や藻場などに利用する提案をした。現存する埋蔵量360億トンのコンクリート構造物を都市鉱山と捉え³⁶⁾、毎年3700万トン(体積で2500万 m^3)程度解体される一部を、山から採掘する石材の代替とし、資源のない日本で処理費と環境負荷と時間を、従来の1/3程度縮減し、安全な資源とする方法が2018年に首都防災ウィーク実行委員会で多くの有識者の賛同を得た。

破碎せず環境基準を満足する安全性と、用途の要

求品質を満足するブロックを切出し、シティコンと呼ぶ。これまでマウンド礁に使われてきた材料は、図16のように石炭灰ブロック、普通コンクリートブロック、天然石材だが、マウンド礁の建設時のCO₂排出量は材料によって大きく異なる。天然石材は森林の消失を排出量とするが、右端のシティコンは、都市鉱山から切出すので森林消失がなく³⁷⁾、CO₂排出量は他の材料の1/3以下であり、完成後はブルーカーボンとしてCO₂吸収量が勝り、LCCO₂の収支が数年でマイナスになり継続する。

図17は1個1.2トン程度のシティコンの実物を、特別に許可を得て東京都慰霊堂横に展示した様子である。

しかし、シティコンで人工海底山脈を建設する場合にも課題がある。これまで利用された天然石と比べ、シティコンは形状、重量のばらつきが大きい。1個数トンから数10 kgのブロックで高さ10 m以上の山を構築するには数10段積み上げることになるが、陸で砂利を1点に落下させると円錐体ができるように、安息角が多少変わるが可能である。また、シティコンの比重は2.3程度と十分重いので自由落

下中の散乱幅は限られる。それでも山頂を結ぶ直線状の尾根を形成するのは難しい。これを解決し、円錐体を複数重複するだけで構築できる3連山、4連山型が開発された³¹⁾。この連山型は同じ体積の従来の尾根のある形状と比較し、湧昇効率は殆ど変わらず、海底山脈の総延長が20%長く、魚介類の餌となる付着生物の付着面積が20%程度増大し、魚礁効果を増大する効果がある^{32), 38)}。昨今ではシティコン海底山脈も、国交省OBの青山俊樹理事長が監修する2023年「都市防災ハンドブック³⁹⁾」に掲載され、シティコン海底山脈の環境安全性と材料の持続可能性が、有識者、関係省庁、国会議員の間で議論されている。

10.2 建設海域の拡大

マウンド礁は深層の栄養塩類を有光層に混合する目的で大水深域に建設されてきた。しかし、密度成層の強い大水深の低層水塊は重たいので軽い表層の有光層に直接添加されることはない。図18は非常に稀だが

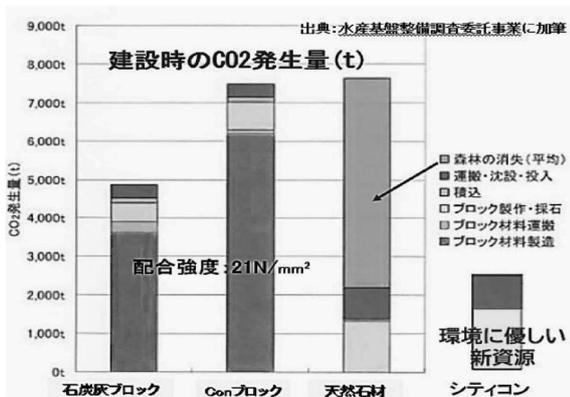


図16 マウンド礁の建設材料とCO₂発生量

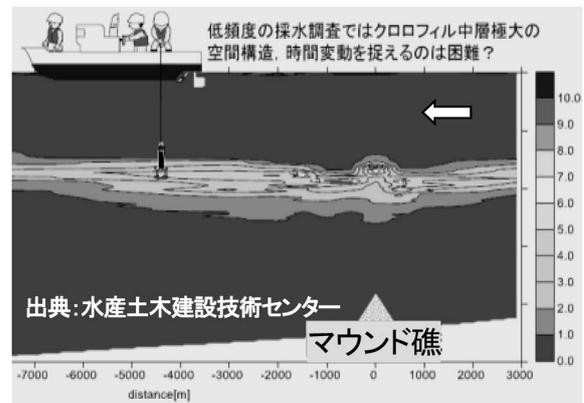


図18 マウンド礁によるクロロフィル層の混合



図17 1.2トン程度のシティコンを1個2個展示

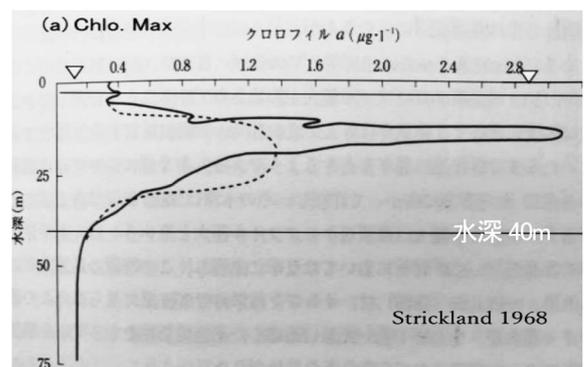


図19 クロロフィルa濃度の鉛直分布

マウンド礁直上でクロロフィル豊富層を混合する現象が観測された例である。これはマウンド礁が誘起する内部波エネルギーが、間接的にこの層を混合したと考えられるが、その発生頻度は非常に低いことが観測と実験・解析で裏付けられた⁴⁰⁾。そこで自然界のクロロフィル豊富層に海底山脈上部を突出させ、構造物でこの層を直接鉛直混合する方法を考えた。

図19は、1968年にStricklandが示したクロロフィルaの鉛直分布だが⁴¹⁾、これは自然の摂理で水深5~40mにクロロフィル極大があることを示し、このクロロフィルa豊富層が、全海洋の植物プランクトンの10~40%を生産すると云われる。この躍層内の上層には光を必要とする植物プランクトンが密集し、下層には富栄養の水塊が存在すると考えられる。この密度差の大きな躍層を混合するには大きなエネルギーが必要である。そこで人工海底山脈の上部を水深40m以浅のクロロフィル豊富層に突出させ、潮汐で変化する流向・流速の流れを海底山脈が直接左右及び上方に迂回させ、海底山脈背後で再合流する際に植物プランクトンと栄養塩類を鉛直混合させ、同時にこれが内部波を誘発する。

また、頂部の縮流は低層の低水温・富栄養水塊を直接吸い上げ、頂部の水温低下により藻類の環境改善を促す。同時にこの密度躍層で発生する内部波エネルギーが海面近くでの直接混合を促すと推察される。漁場として使われていない浅海域に海底山脈を造ることで、漁港近くでの操業が可能になる⁴²⁾。海面に近い海底山脈上部の波力に対する安定対策として魚礁ブロック等で被覆することも有効になる。

10.3 食料増産と早期復興予算は不可欠

世界の魚類養殖は海面漁船漁業を凌駕したが、10トンのイワシを1トンのブリに代える質の転換であって食料増産とはいえない。一方、人工海底山脈は人為的に自然の摂理を活かし植物プランクトンを増やし、無給餌、無人で食料生産を安価かつ持続可能にする。このマウンド礁の材料費と建設費の割合は、1:1と云われ、従来の石材をシティコンに代えることができれば、材料費を1/3以下に削減し、総事業費を40%程度削減できる可能性がある。また、

2007年IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は生物ポンプによるCO₂の深海への固定を評価しており、マウンド礁の海外実績はないが、今後人為的な植物プランクトンの増殖もブルーカーボンとして評価され付加価値が増えよう³⁰⁾。

世界に類のない事業を被災時に実行するには、平時に解体するコンクリート構造物をシティコンとして海底山脈に利用するマニュアルを策定し、これに沿って関係者が合意した計画海域にシティコン海底山脈を建設する実証事業が必要であろう。これによって技術と法制度を確立し、発災前に計画海域と海底山脈規模などに関係者が合意し、計画に沿って順次事業を推進する。

被災時には、シームレスに復興予算に切り替え、巨大地震からの早期復興の支援と、食料増産と、エネルギー、費用の削減を同時に叶え、コンクリート構造物を広域処理で長距離運搬し破碎する時間とエネルギーを削減し、合理的に喫緊の課題を解決する。

11. おわりに

常識に捕らわれず、石炭灰を大量に利用した安全な石炭灰コンクリートを開発し、海洋深層水の富栄養性を活かし実海域で自然の摂理で基礎生産を増やす世界初の人工海底山脈が事業化された。さらに、老朽化したコンクリート構造物を廃棄物とする常識を覆し、破碎せず安全かつ迅速に海底山脈の建設資材とする、これまでにない迅速な復興を支援する提案を多くの有識者と共有した。

今年元旦、近年最大級の震度7の能登半島地震で、市民の生活やライフラインの復旧は5ヵ月経った今も十分とは云えず、必ず発生する国難級の首都直下、南海トラフ地震に備える準備も十分ではない。この現状を打開し子孫の命と生活を守る方法がある。食料危機を回避し豊かな海をつくる技術と、巨大地震からの早期復興を支援し廃棄物を資源とする技術があることを、市民の声として国に訴えたい⁴³⁾。そのために沿岸漁業の再生を望む地方と、食料自給できず早期復興計画のない大都市が共生する新たな仕組をつくる必要がある⁴⁴⁾。

参考文献

- 1) 鈴木達雄 (2019) 震災コンクリート殻を漁場施設に利用する早期復興と食糧増産, 土木学会全国大会, VII-84.
- 2) 鈴木達雄 (2019) 震災廃棄物の迅速な資材化と利用による早期復興, 第30回廃棄物資源循環学会, B3-1, 115-116.
- 3) 運輸省 (1968) 港湾構造物設計基準, 日本港湾協会.
- 4) 中村充 (1979) 水産土木学, INA工業時事通信社, 508頁.
- 5) エネルギー土木委員会 (2003) 石炭灰有効利用技術について. 土木学会平成15年度全国大会, 研究討論会研-16.
- 6) 鈴木達雄 (1982) 石炭灰硬化用混和剤組成物, 特許第1432672号, 出願.
- 7) 鈴木達雄 (1985) 石炭灰人工漁礁の実用化に関する研究. 九州電力総合研究所研究報告 No.85003. 1-21.
- 8) 鈴木達雄, 門馬尚義 (1986) 石炭灰を有効利用した人工魚礁(サークルリーフ)の開発, 間組研究年報, 45-50.
- 9) 漁場施設開発研究会 (1989) 石炭灰コンクリートマニュアル, マリノフォーラム21, 石炭灰硬化体に関する開発研究, 3-10.
- 10) 鈴木達雄 (1996) 石炭灰を利用した人工海底山脈. 日本水産工学会, 学術講演会, pp. 55-60.
- 11) 全国沿岸漁業振興協会 (1993) 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針, 1993年改訂版.
- 12) 福留和人, 坂本守, 長瀧重義, 鈴木達雄, 喜多達夫 (1999) 最適含水比近傍で練り混ぜたフライアッシュセメント混合物の振動締固め特性に関する研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, 55-66.
- 13) 鈴木達雄, 坂本守 (1995) 微粉体の硬化体製造方法, 特許第3201934号, 出願.
- 14) 漁場施設開発研究会 (1989) 大規模人工湧昇流発生技術の開発研究. マリノフォーラム21, 4編1-90.
- 15) 鈴木達雄, 本田陽一 (1992) 3次元物体背後に発生する湧昇渦に関する研究. 海岸工学論文集 (第39回) pp. 901-905.
- 16) 鈴木達雄 (1991) 湧昇流発生構造物(2連山), 特許第2992940号, 出願.
- 17) 高橋正征 (1991) 海にねむる資源が地球を救う, あすなろ書房, 191頁.
- 18) 鈴木達雄 (1994) 生物生産に係る礁による湧昇の研究. 東京大学大学院工学系学位論文. 208頁.
- 19) 漁場施設開発研究会 (1995~2000) マウンド漁場造成システムの開発. マリノフォーラム21.
- 20) 鈴木達雄 (1996) 立体ブロック. 特許第3755935号, 出願1996.
- 21) 黒台昌弘, 沖正和, 木下正生, 宮川健三 (1997) 海洋工事におけるGPS測量の適用可能範囲について, 土木学会年次学術講演会, VI.9, 54-55.
- 22) 鈴木達雄, 齊藤栄一 (2000) 石炭灰硬化体によるブロックの製造と沈設, 建設の機械化, 24-31.
- 23) 友田啓二郎, 西村和雄 (2000) 築堤式構造物による漁場造成効果, 月刊海洋, 32(7), 474-479.
- 24) 高橋正征 (2020) 海の魚を増やす方法. 魚の疑問50, 成山堂書店, 91-99.
- 25) 熊谷典幸, 鈴木達雄, 橋本牧, 本田陽一, 今井康貴, 高橋正征 (2007) 衛星を用いたマウンド魚礁の湧昇効果評価の可能性, 海洋開発論文集, 357-361.
- 26) 漁場施設開発研究会 (2000) 生物の種と生物量調査. マリノフォーラム21, 27-50.
- 27) 鈴木達雄 (2019) 人工海底山脈による海の生態系活性化, 土木技術, 78(2), 42-47.
- 28) 鈴木達雄 (1999) 人工海底山脈開発の背景(学会賞). 水産工学, 36(2), 133-136.
- 29) Magi, M. Honda, Y. Suzuki, T. and K. Azuma (2005) Possibility of the CO2 absorption effect for artificial upwelling system for creation of fish-breeding ground as an additional function, CARAH8.
- 30) 鈴木達雄, 橋本牧, 間木道政, 中村充, 高橋正征 (2008) 人工海底山脈による二酸化炭素固定の可能性. 海洋開発論文集, 24. 387-392.
- 31) Suzuki, T. and O. Hashimoto (2010) Enhancing food production on the continental shelf by artificial Seamounts, CRC Press, 297-309.
- 32) 鈴木達雄 (2009) 人工海底山脈. 特許第4633848号, 出願.
- 33) 鈴木宣弘 (2023) 世界で最初に飢えるのは日本. 講談社.
- 34) 水産庁 (2012) 漁場施設への災害廃棄物等再生利用の手引, 52頁.
- 35) 全国漁業組合連合会 (1977) 日本近海底質図.
- 36) 鈴木達雄 (2021) 日本にはどれくらいのシティコン資源があるのか. 月刊アクアネット, 281. 66-67.
- 37) 川原真ら (2009) 湧昇マウンド礁のCO2固定効果等把握調査. 21年度水産基盤整備調査委託事業, 71頁.
- 38) 鈴木達雄 (2019) 人工海底山脈による海の生態系活性化, 土木技術, 74 (2), 46-47.

- 39) 鈴木達雄 (2023) 震災コンクリート殻の迅速な活用による海の食料増産. 都市防災ハンドブック, NTS, 485-495.
- 40) 武田真典, 吉塚靖浩, 岡野崇祐, 高野聖之, 岡野隆行, 本田陽一, 鈴木達雄 (2014) 人工海底山脈による鉛直混合現象の実態把握, 海洋開発論文集B3 (海洋開発), 70(2), I_169-I_174.
- 41) Strickland, J. D. H., (1968) A comparison of profiles of nutrient and chlorophyll concentrations taken from discrete depths and by continuous recording. *Limnol. Oceanogr.*, 13, 388-391.
- 42) 鈴木達雄 (2022) 垂表層を活性化する人工海底山脈による海域肥沃化と資源循環. *DOWAS*, 23(1), 7.
- 43) 鈴木達雄 (2022) あなたの声が瀬死の海を救う. *amazon*, 78頁.
- 44) 鈴木達雄 (2024) 人工海底山脈の持続可能な開発と未来. 第9回海洋深層水利用学 (2024年4月11日受付; 2024年4月22日受理)

職歴

- 1972年 株式会社間組技術研究部海洋開発室入社
- 1980年 間組エネルギー対策本部石油備蓄部
- 1985年 間組技術本部海洋土木部 副主査
- 1986年 MF21石炭灰硬化体の研究 幹事
- 1995年 MF21マウンド漁場造成システムの開発 幹事
- 2000年 間組技術環境本部環境事業開発部 部長
- 2002年 株式会社アッシュクリート設立, 代表取締役社長 (出向)
- 2009年 株式会社間組定年退職, 株式会社人工海底山脈研究設立, 代表取締役就任
- 2024年 現在に至る
- 受賞歴
- 1999年 日本水産工学会学会賞
- 1999年 建設省関東地方建設局建設リサイクル新技術優秀賞
- 2001年 日本建設機械化協会加藤賞
- 2002年 土木学会環境賞
- 2022年度 第9回海洋深層水利用学会賞 資格
- 1987年 技術士 建設部門 (20312号)
- 1994年 東京大学大学院研究科 工学博士12497号
- 2005年 RCCM水産土木 (04-1190009号)

著者略歴

鈴木 達雄 (すずき たつお)

1949年3月14日 (魚座), 母の生家, 山口県下関で生まれる.

学歴

1972年 東京都立大学工学部土木工学科 (ヨット部) 卒