

わが国における海底資源開発と海洋の環境保全の現状と課題

NPO 法人 海ロマン 21 理事長 小池 勲夫

1. 概要

わが国ではこれまでエネルギー資源や鉱物資源などの供給を海外に多く依存していたが、国際関係の緊張によりその供給の確保が大きな課題となって来た。これは、エネルギー政策の原則の一つである「経済的効率性」を重視して来た結果、もう一つの原則である「安定供給」が危うくなって来た事を意味する。このような事態を受けてわが国では、1996 年に批准した国連海洋法条約により領海と合わせて世界で第 6 位の面積の排他的経済水域（Exclusive Economic Zone：EEZ）を得たことを 1 つの契機として、わが国の排他的経済水域の海底におけるメタルやエネルギー資源の開発に本腰を入れる事になった。

わが国で注目する深海の海底に存在する鉱物資源は、その鉱床の成り立ちの違いから海底熱水鉱床、コバルトリッチクラストおよびマンガン団塊の 3 つに大別される。熱水鉱床はマグマ活動により多くの鉱物元素を溶かし込んだ熱水が海底で冷却・沈殿して出来た鉱床で、生成には数千年から数万年が必要と考えられる。一方、コバルトリッチクラストやマンガンノジュールは化学堆積岩の一種であるが、これらの生成には極めて長い年月がかかるとされている。その性状は前者が海山などの海底の岩石露頭を皮殻状に覆う板状であるのに対し後者は堆積物中に団塊状で存在する。なお、最近わが国で発見された深海でのレアアース泥は、その成因がマンガン団塊やコバルトリッチクラストに近いことが分かってきた。メタンハイドレートは水分子がつくる籠構造の中にメタンが取り込まれた固体の水和物で、海底下の嫌気条件下で生成したメタンが温度と圧力が一定の条件を満たした場合メタンハイドレートが形成される。

わが国における海底鉱物資源開発について政府が主導して本格的に行われるようになったのは、排他的経済水域が確定した 21 世紀に入ってからであるが、それ以前にもマンガンノジュールとメタンハイドレートに関しては政府や民間でそれぞれ取り組んでいた経緯がある。特にメタンハイドレートは、1995 年から政府・民間が一体となってその開発に取り組んで来ており、2016 年から 2018 年にかけては、深海掘削船「地球」を使って第 2 回目の海洋産出試験が実海域で行われている。その結果、商業化への多くの課題はあるがその長い研究開発の実績から、メタンハイドレートの開発は海底資源の中ではわが国として最も社会実装に近づいた事業と考えられている。また、熱水鉱床やコバルトリッチクラストに関しても JOGMEC を中心にその開発に関しての研究が進められ、最近小規模ではあるが実海底からの鉱石の洋上への揚鉱にいずれも成功している。なお、レアアース泥に関してはその存在が 5000 - 6000m の深海であることから堆積物の揚泥には技術的な難易度が高いが、最近少し浅い海域で堆積物の揚泥に成功している。このように、わが国が目標とする深海底の鉱物・エネルギー資源については、国主導の研究開発が進展し実績を挙げているが、最も大きな課題は商業化のため多量の鉱物を如何にエネルギー政策のさらなる原則である「環境に配慮」しながら「経済効率性」を持って回収出来るかであるがこれは容易ではない。

鉱物資源等の開発対象となる深海底の生物群集に関しては熱水鉱床が極めて特異的であることが知られている。これは深海底にあって表層からの沈降有機物に依存しない生態系が存在する

らである。熱水が供給する還元性化合物をエネルギー源とする化学合成細菌が一次生産者となり、これらの細菌と共生関係にあるチューブワームなどのメガベントス等が密集した生態系を構成する。なお、メタンハイドレートを産出する海底においてもメタンをエネルギー源とする細菌群集と共生するメガベントスが見られる事が多い。また、コバルトリッチクラストはわが国の周辺海域にも多い海山と密接な関係を持つが、海山の多くはその勾配や流れなどの物理環境の影響が大きいため、堆積物を維持出来るような環境は少ないのが特徴である。従って、底生生物群集も固着性で表在性であり懸濁物食者のベントスが卓越する。一方、マンガンノジュールやレアアースなどは、堆積環境にある深海底に分布するため、表層から供給される有機物に依存する表在性や内在性の多くの底生生物がその環境に生育している。

国連海洋法条約は、沿岸国の排他的経済水域内においては海底資源の開発権をその沿岸国に認めると同時に、水域内における環境保護・保全も求めている。一方、公海の深海底での鉱物資源の管理に関して同条約によって国際海底機構（International Seabed Authority : ISA）が設立され、2013 年に主要な鉱物資源の探査における「環境への配慮」をまとめた「環境ガイドライン」を公表した。公海や排他的経済水域を問わず海底鉱物資源の探査にあたっての環境保全・生態系への配慮については、既にこのガイドラインに準拠した探査が、わが国も含めて行われている。なお、これは鉱物資源の探査におけるガイドラインであるが、探査が進展し実際の商用的な開発に進む可能性のあるケースもあり、次のステップでの基準とその認定が ISA に早急に求められており現在も検討が進行中である。

このような、深海底での鉱物資源開発に対して、海洋の生態研究者の多くは、様々な懸念を表明しており、1993 年に発効した生物多様性条約に決められた海洋保護区（MPA）のネットワークを公海上に配置して、外洋の深海域での生物多様性を保全するべきと言う考えも多い。このような動きに配慮して、実際に ISA が管理する太平洋深海のマンガンノジュールの鉱区では、鉱物採掘を禁止する海域である「Areas of Particular Environmental Interest (APEI s)」を 13 か所制定する事を決めている。また、海底での鉱物資源開発と利害関係を持つ深海漁業などでも生態的に脆弱な海域を保全するべきとの議論も起きている。

ISA は探査活動においてもベースライン調査（BL 調査）を対象海域において必須としており、探査が行われる様々な深海域での海洋学的、また深海生物群集やその生態系の調査が進展していることは確かである。わが国でも、EEZ 内における多くの BL 調査が主にエネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）によって行われている。ISA はこれらの調査研究の成果を海域別の環境管理計画に反映させることを奨励しており、同様の事は EEZ 内の BL 調査についても考えられる。つまり、鉱物探査と言う目的にしてもこれまで知見が乏しかった EEZ の内外における深海域、特に深海底の生物群集の調査研究により、これらの特性の異なる深海生態系の生物群集組成や、その生態系としての構造などの理解が進むことで、現在、言われている深海生態系の理解に対する知見のギャップの解消が進展する事が期待される。

2. 初めに

わが国は自国内での様々なエネルギー・鉱物資源に恵まれていたが、これらの多くが鉱床としての規模は小さかった。また近年では海外の大規模開発による低価格なエネルギー・鉱物資源の

輸入により、国内資源からの供給は極めて限られた割合になっていた。しかし、21 世紀に入る頃から海外からのエネルギー・鉱物資源の安定供給に様々な課題が生じていることから、国内でこれらの資源自給率を高めるための様々な施策が国として進められている。その一つの大きなターゲットになっているのが深海底のエネルギー・鉱物資源である。

海洋については 1994 年に国連海洋法条約が発効し、わが国も 1996 年にこれを批准したことから領海と合わせて世界で第 6 位の面積の排他的経済水域（Exclusive Economic Zone：EEZ）を持つことになった。この EEZ の中では天然資源の探査・開発などを含めた経済活動についてはわが国の主権的な権利が認められている。一方、同時に同条約は自国の EEZ 内での科学的調査や海洋環境の保護・保全を義務付けている。なお、どの国の管轄権も及ばない公海での海底鉱物資源の管理については、同条約の下に国際海底機構（International Seabed Authority: ISA）が設置され、各国からの海底鉱物資源の探査等の申請を受けてその管理を行っている。

このように国連海洋法条約では、EEZ に関してはその管轄国に資源開発の権利と同時に海洋生態系を含めた海洋環境の保護・保全を義務付けている。また、EEZ 外の深海底に関しては ISA が同様な趣旨で管理を行うことになっており、これらの両方が海底資源開発と深海底を持つ海洋の環境保全の両立を果たすとされている。しかし、陸域での鉱物資源開発とは異なりそのアクセスが困難な深海底における鉱床周辺の生態系については、その生物群集組成も含めて幅広い知見が得られているわけではない。例えば、化学合成細菌を基礎とする極めて特異な熱水鉱床の生態系に関しても、その発見は僅か 50 年ほど前の事であった(Jannasch & Wirsen, 1979)。また、コバルトリッチクラストが鉱物資源として注目されている外洋の海山生態系に関しては、鉱物資源の場として注目される以前から、その山頂付近での濃密な水産資源の存在が知られていた。わが国とハワイの間にある天皇海山山頂付近の水深 300 - 500m での底引き網漁業の開発当初での主要漁獲物であったクサカリツボダイは、1960 年代の後半には海山山頂付近で商業漁業の対象資源となり、わが国でも 1969 年から 10 年間弱ではその漁獲量が年間 2 万トンを超えていた（水産庁、2015）。このように、海山の山頂付近の水深 1000m 程度までは、底引きや刺し網による底生魚類の漁獲が長年にわたって行われておりそれによる海底生態系への影響が心配されていた。

この報告では現在世界で開発が進められている深海底からの石油・天然ガスとは異なるエネルギー資源である海底下のメタンハイドレートや、海底鉱物資源である熱水鉱床、海山に主に分布するコバルトリッチクラストや深海底のマンガンノジュールなどについて、海洋におけるその性状や成因についての知見をまずまとめる。また、最近発見された深海でのレアアース泥に関しても、その性状や成因、分布などに関して現在までの情報を示した。次に各海底環境における生物群集の特性について記述した後、その保全・保護と資源開発に関する国際的な動向とわが国の取り組みについて検討したい。なお、海底資源の開発についてはわが国での動きを中心とするが、環境保全・生態系保護の観点からは国際的な開発に伴う保全活動についても触れる。

3. 対象とする海底エネルギー・鉱物資源の特性

深海の海底に存在する鉱物資源はその鉱床の成り立ちの違いから、海底熱水鉱床、コバルトリッチクラストおよびマンガン団塊の 3 つに大別されている。さらに、最近わが国で発見された深

海でのレアアース泥は、その成因などがマンガン団塊やコバルトリッチクラストに近いことが分かってきた（町田他、2018）。ここでは、海底鉱物資源の起源およびそのわが国周辺での分布についてまとめる。なお、メタンハイドレートはエネルギー源であるが、海底鉱物資源の1つとされておるのでこれに含めて考えることにする。図1にレアアース泥を除く3つの海底鉱物資源の世界の海域での分布図を示した（Miller, et al., 2018）。また、海底近傍での各鉱物資源の存在状態の画像を図2に示した。

図1：世界の海洋底での鉱物資源の分布図 青印は Polymetallic nodules:マンガンノジュール、赤印は Polymetallic sulphides/Vents：熱水鉱床、黄色印は Cobalt-rich crusts:コバルトリッチクラストを示す。なお、沿岸域での白抜きは沿岸国の EEZ を表す。

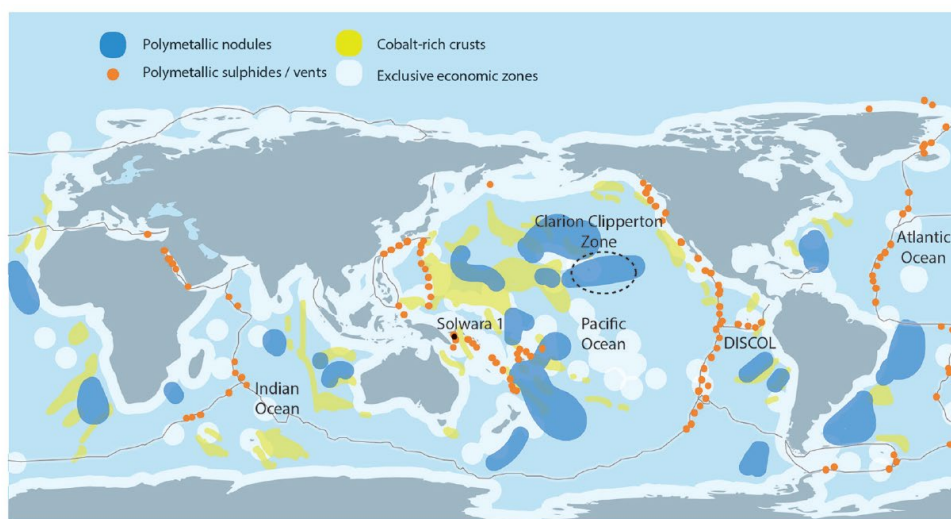
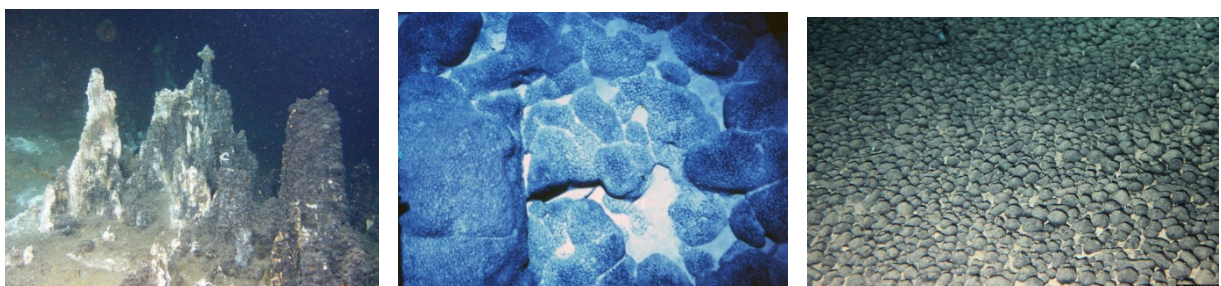


図2：海底鉱物資源の様子：左から熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガンノジュールである。資料は JOGMEC HP および JAMSETEC 画像資料による。



3－1 熱水鉱床

海底熱水鉱床はマンツルの端の島弧－海溝系や中央海嶺、背弧拡大系（背弧海盆）など、マグマ活動のある海底の地殻深部への割れ目で浸透した海水がマグマ等の熱により 300℃以上に熱せられ、水圧が高いので蒸気化すること無く地殻に含まれている多くの元素を効率的に抽出しながら

ら循環する。その後、海底に噴出しそれが冷却される過程で熱水中に含まれる銅、鉛、亜鉛、金、銀等の有用金属が硫化物等となって海底に沈殿したものである（木川編、2018）。我が国周辺海域では、背弧拡大系に属する沖縄海域及び島弧・海溝系である伊豆・小笠原海域の、水深700m～2,000mの海底に多くの海底熱水鉱床の兆候が発見されている（木川編、2018）。なお、このような熱水性の鉱床の形成には数千年から数万年の年月が必要と考えられている。熱水域海底では噴出する熱水が還元性であり硫化水素、メタン、水素なども多く含まれる。そのため、硫化水素などをエネルギー源とする化学合成細菌やそれと共生する特異な生物群集が発達することが知られている。

3-2 コバルトリッチクラスト

コバルトリッチクラストは、海山斜面から山頂部にかけて、海底の岩石露頭を厚い場合は10cm以上で皮殻状に覆う板状の化学堆積岩の一種である。一般的にはその主成分が水酸化鉄と酸化マンガンであることから、鉄マンガンクラストと呼ばれている。これらは複数の重要なレアメタルを高品位で含む特徴を持っており、この鉄マンガンクラストの内、コバルトを豊富に含む鉄マンガンクラストをコバルトリッチクラストと呼んでいる（鈴木、臼井、2018）。太平洋の海山で形成されるコバルトリッチクラストの起源はこのように海水由来の様々な元素が鉄マンガン酸化物を媒介として海底の岩石の上に沈着して出来たものであり、1-5mm厚くなるのに約百万年が必要で非常にゆっくりした生成速度である。この水酸化鉄+酸化マンガンは、微粒子であり表面積が極めて大きくなることから効率的に水中での微量金属元素を吸着しながらクラストを形成すると考えられている。このコバルトリッチクラストは公海の海山に加えて我が国のEEZ海域の海山にも存在することが判明している。また、従来は水深800m～2,400m付近の海山平頂部といった海洋鉱物資源の中でも比較的水深の浅いところに分布しているとされてきたが、最近の調査では海山の斜面、水深5500mの深海底から1000m程度の水深まで連続的に賦存するのが確認されている（鈴木、臼井、2018）。

3-3 マンガンノジュール

マンガン酸化物と鉄水酸化物が混合した海洋由来の化学堆積物であり、コバルトリッチクラストと同様に鉄マンガン堆積物の一種で、その特性や成因はコバルトリッチクラストと共通する所が多い。このようなマンガンノジュールを「海水起源ノジュール」と呼んでいる。一方、幅広い水深の堆積環境での海底にもマンガンノジュールが存在している。このようなマンガンノジュールは主に深海平原の水深4,000～6,000 mの海底堆積物中に半分位埋没した形で存在し、平均的にはジャガイモ状の形状と大きさであり、高密度で分布する海域があることからとして鉱物資源として評価されている。これらは19世紀には既にその存在が知られており、英国の海洋調査船チャレンジャー号での世界一周航でも殆どの深海底でマンガンノジュールが発見されている（細樫他、2012）。この形状のマンガンノジュールは、堆積物表層での成因であることから、間隙水中の微嫌気的な環境で間隙水中のコロイド状態の微量金属の酸化物が鉄マンガン酸化物の上に沈着して形成されると考えられている。その成長速度もコバルトリッチクラストに比べると速く、百

万年で250mmに達することもある（Verlaan & Cronan, 2022）。このような起源のマンガノジュールは「続成起源ノジュール」と呼ばれている。なお、マンガノジュールの塊の中に、周辺の堆積物には存在しないマンガンの酸化・還元に関与する細菌群集が高濃度で検出されており、マンガノジュールの成長でのこれらの微生物の働きが注目されている（Blöthe, et al. 2015）。

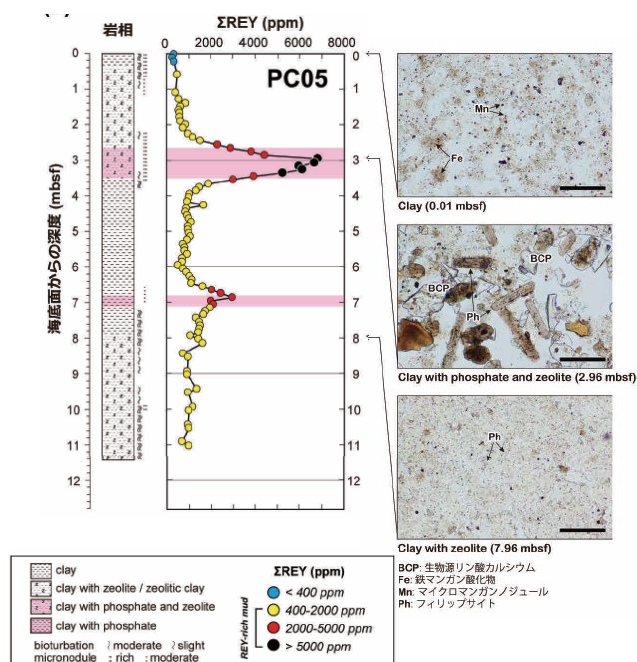
3-4 レアアース泥

レアアースとは希土類元素のことであるが周期律表の位置で主に第6周期に位置しており、原子番号が57番のLa（ランタン）から71番のLu（ルテチウム）までの15のランタノイド元素にSc（スカンジウム）、Y（イットリウム）を加えた17元素の総称であり、鉱物資源として注目されている。深海底のレアアース泥としては、堆積物での総 REY 濃度（La ~ Lu 濃度 + Y 濃度）が400ppm を超えるものを鉱物資源としてのレアアース泥としている（野崎他、2016）。これは現在世界市場をほぼ独占している中国のイオン吸着型鉱床の平均的な総 REY 濃度が400 ppm 程度であることに依っている。Kato, et al. (2011)は太平洋の中緯度から低緯度の広い海域の深海底泥中の総 REY 濃度を調査した結果、主に東部低緯度の広範囲で深海堆積物中の総 REY 濃度が1000ppm 以上である事を見出した。レアアース泥の層の厚さは海域で異なり、東南太平洋の10m 位から中央北太平洋では70m に達する海域もある。これらの海域は水深では炭酸カルシウムの結晶が溶解する深度であり、また、陸源懸濁物の供給も乏しい海域であることから、堆積速度が極めて遅い海域でレアアースの濃縮が深海底で生じていると考えられた（Yasukawa, et al., 2016）。さらに2013年の調査でわが国のEEZ内の南鳥島の南方海域で海底下の2-4m と浅い深度で極めて高濃度のレアアース泥が発見され、さらにこの鉱物資源の分布が、サブボトムプロファイラー（SBP）の音響探査で、その広がりほぼ定量的に調査出来る事も分かって来た（木川、2020）。南鳥島周辺での多数のコアサンプルでの濃度分布の調査などから、南鳥島の周辺の約2500平方キロで世界の需要の数百年分が埋蔵されているとの報告が出されている（Takaya, et al., 2018）。

南鳥島南方の深海表層堆積物中で REY を直接保持しているのは主に生物起源の骨格等の成分であるリン酸カルシウムであり、これだけを抽出すると総 REY 濃度は2万 ppm と高濃度になる（野崎ほか、2016）。また、南鳥島周辺の深海底堆積物中の総 REY 濃度は表面から数 m 深い所に濃度ピークを持つことが分かった（図3）。また、このピークからは、魚の骨の化石などリン酸カルシウムを含む細かい破片などが多く見つかった。最近、この高濃度のピークを持つサンプルの年代測定が行われ、地質年代では古第三紀の3450万年前になることが分かった（Ohta, et al., 2020）。このことは、この時代に南鳥島近辺で何だかのプロセスで生物生産が高くなり、魚類が増えて来たことが想定される。この地質時代は、地球全体が温暖な気候から寒冷な気候へと急激に切り替わった時期として知られているが、魚類の生物量の増加に関しては、この海域に多く

図3：南鳥島南方の測点PC05の柱状図（左）、総レアアース濃度の深度プロファイル（中央）、および代表

的な層準の顕微鏡下写真（右）（Iijima, et al., 2016）を一部改変（町田嗣樹 他編（2018）



存在する海山による深層水湧昇が生産を高め魚類を増加させた言う仮説が出されている（Ohta, et al., 2020）。しかし、骨片などのリン酸カルシウムになぜ REY が濃縮されるかについてはまだはっきりしていない。なお、レアアース泥に関するわが国の研究については、第 1 期の SIP プロジェクト「海のジバング計画」でその成因などに関して報告書がまとめられている（町田他、2018）。

3-5 メタンハイドレート

メタンハイドレートとはメタンガスと水分子からなる固体物質であり、水分子がつくる籠構造の中にメタンが取り込まれた包接水和物（クラスレート・ハイドレート）の一種である。天然ではメタン、エタン、二酸化炭素などのガス分子をゲスト分子として持つクラスレート・ハイドレートが多く、これらを総称してガスハイドレートと呼んでいる（松本、2009）。ガス組成は必ずしもメタン100%ではなくエタンや二酸化炭素、硫化水素を含むことがある。海底下においては、十分な量のメタンと水が存在する環境で、温度と圧力が一定の条件を満たした場合、メタンハイドレートが形成される。

日本周辺海域では、海水温度が5°C程度まで下がり水深が500mより深ければ水中でも温度・圧力的にはメタンハイドレートは安定的に存在しうるが、水中ではメタン濃度が低く未飽和なため生成しない。しかし、この程度の水深でも有機物の多い堆積物や、海底下深部から大量のメタンの供給を受ける泥火山などの環境では堆積物中で過剰なメタンが存在することでメタンハイドレート結晶が生じることがある（松本、2009）。一方、堆積物は地下深層からの熱フラックスを受けて地温は深部ほど高い。例えば南海トラフでは海底から約300m深くなると温度的にメタンハイドレートは不安定になると考えられ分布の下限となる。このようにメタンハイドレートの鉛直分

布の範囲は限定されているが、海底より深い所に存在し海底下の砂層堆積物の孔隙をメタンハイドレートが充填しているような産状を、砂層型メタンハイドレートと呼んでいる（Konno & Nagao, 2021）。

なお、メタンハイドレートは大陸周辺の海底に分布しており、大陸から遠く離れた海洋の深部に有意な発見はない。堆積物中のメタンの成因には、微生物による堆積物中の有機物分解の最終形態であるメタン発酵による生物起源の場合と、プレート境界などの海底下深部での高温環境下で有機物が非生物的に熱分解してメタンが生成する場合の2つがある。しかし、いずれの場合もメタンの起源となる有機物は生物由来と考えられている。例えば、日本海の上越沖では、海底下数kmに由来する熱分解起源のメタン由来のメタンハイドレートが海底表面に露出、あるいは海底下百数十mの堆積物中に密集して生成していると推定されている（図4）。これらの海底の表層付近に存在するメタンハイドレートを最近では表層型メタンハイドレートと呼んでいる（松本、2009）。これはわが国では日本海側に多い産出の形状である。

図4 海底に露出する塊状メタンハイドレート，日本海上越沖水深900 m，マニピュレーターの指
間隔は約18 cm（松本、2009）



4 わが国における海底鉱物・エネルギー資源開発の経緯

4-1 海洋基本法に基づく海洋基本計画策定の以前

わが国は二つの海洋プレートと二つの大陸プレートの境界域に位置し沈み込み帯という地殻変動の激しい所に位置しており、島弧が成立する過程で活発な火山活動が継続していたことから大規模ではないものの多種の鉱物資源が存在している。わが国のマグマ鉱床や熱水鉱床など鉱床の多くは、このような火山活動による有用元素の濃縮と言うプロセスを経て形成されたものである。これらの鉱床の探査、採掘技術は中世から江戸時代には大きく発展し、例えば高価値である金や銀の産出量は世界でも上位であった。このことは、既に13世紀末において有名なマルコ・ポーロの東方見聞録には日本が「黄金の国ジバング」としてヨーロッパに紹介されている事にも示されている。

明治時代になると鉱山開発は国の主導で強力に進められる事になり、エネルギー源としての北海道や九州北部の石炭、足尾銅山、釜石の鉄鉱石などが官営として開発されている。これらの鉱山は比較的早い時期に民間に払い下げられ、鉄、銅、亜鉛などの金属鉱山の開発が進められてこれらを必要とする近代産業を支えた（竹内他、1991）。第二次大戦後も戦後の混乱期を経て朝鮮動乱による特需などの好条件があり、わが国の鉱業産業は戦前以上の回復を見せた。しかし、1974年の第一次オイルショック以降の金属の国際市場の低落や為替レートの円高などで、高品質で安価な鉱物資源が海外から供給されるようになった。このためわが国の鉱山の多くは採掘コストの上昇により価格競争力を失い、また資源の枯渇や低品位化もあって多くの鉱山が操業を停止することになった（竹内他、1991）。現在、大規模な操業を行っている国内の金属鉱山は金鉱床のある九州の菱刈鉱山のみとなっている。そして、わが国の鉄・非鉄金属企業は、海外から金属資源を輸入し国内でその精錬を行って製品化することで需要に対応している。

一方、非鉄金属資源は最近のレアメタルの急激な需要拡大にもあるように製造業を初めとする多くの産業に欠くことが出来ないため、現状ではわが国の非鉄金属企業・商社は海外鉱山に活路を求めている。なお、レアメタルはわが国で産業に重要な元素として選定された元素でレアアースを含む47種類の元素が選定されている。しかし、わが国で自ら探査し、あるいは開発段階から投資する自主開発で確保出来た金属資源は需要の10 - 30%程度であり、レアメタルに関しては殆どない（日本学術会議、2008）。このようなわが国の状況を受けて、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト、マンガンノジュールなどのわが国周辺の海底鉱物資源が注目をあびることになった。また、既に述べたように1996年に批准した国連海洋法条約により我が国に大きな排他的経済水域が誕生したことも、海底鉱物資源の有効活用に向けた施策に拍車をかけた要因の一つであろう。

このような動向を踏まえて、わが国が海洋鉱物・エネルギー資源の開発に関する施策を総合的に行うようになったのは、2006年に制定された海洋基本法の制定が大きなきっかけとなった。これにより翌2007年7月に、海洋に関する様々な基本的な事項を定めた「海洋基本法」が発効し、その翌2008年に同法を踏まえて海洋に関する施策を集中的かつ総合的に推進するため第1期の「海洋基本計画」が閣議決定された（内閣府、2008）。この基本計画には海洋エネルギー・鉱物資源開発への国の積極的な取り組みが示されており、これを受けて、5年毎の商業化までの工程表を示した「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」が経済産業省によって策定され、最新の改訂版は2019年である（経済産業省、2019）。中でも、第1期の海洋基本計画で、海底鉱物・エネルギー資源の内、熱水鉱床とメタンハイドレートに関しては、10年程度でその商業化を目指すものとして位置付けられた。このように、わが国の政府が全体として海洋底の鉱物資源の商業化に向けて積極的に取り組みを始めたのは今から15年ほど前の事であった。

しかし、それ以前にも政府や民間による海底鉱物資源の開発は行われていたのでその経緯を簡単に紹介する。まずマンガンノジュールに関しては1970年代から欧米を中心に企業体が幾つか結成され、わが国の企業も参加してハワイ沖で採掘試験が行われ鉱石が実際に引き上げられた（伊藤、1981）。このような民間主導での試掘に刺激され、わが国でも1981年から旧工業技術院の大型プロジェクトとして「マンガン団塊採鉱システムの研究開発」がスタートしている。この事

業は1997年まで実施されたが、その後の世界経済の低迷と陸上鉱物資源の再評価などの社会情勢の変化により要素技術の開発に変更され、最終的には水深約2000mのコバルトリッチクラストの採鉱実証試験を1997年に行って終了となり商業的な開発には至らなかった(山崎、2015)。

また、天然ガス資源の1つであるメタンハイドレートにおいても、1995年に旧石油公団と民間企業による「メタンハイドレート開発技術」が始まり、1999年には南海トラフで基礎試錐を行い「砂層型メタンハイドレート」の存在を確認している。この事業は2001年に経済産業省の「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」の策定に引き継がれ、これを受けてメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)が設立された。MH21は(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、(独)産業技術総合研究所(当時)等により構成され、メタンハイドレートの研究開発を進めた。なお、このコンソーシアムは2019年からは名称を砂層型メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム：MH21-Sと変え、そのフェーズ4における活動を続けている(砂層型メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム：MH21-S, HP)。

4-2 第1期海洋基本計画の以後

2008年の第1期海洋基本計画に基づく「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」の主たる実施機関としてはこれまでと同様に経済産業省傘下の独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)が担う事になった。JOGMECは既に述べたメタンハイドレートの研究開発に係るMH21の実施機関でもある。既に述べたようにメタンハイドレートの研究開発に関しては、これまでの研究開発の経緯を踏まえて、第1期の海洋基本計画で、海底鉱物・エネルギー資源の内、熱水鉱床と並んでメタンハイドレートに関しても10年程度でその商業化を目指すものとして位置付けられたことからその実現が期待された。MH21では経済産業省傘下の産業技術総合研究所(AIST)も生産手法開発の担当としてJOGMECと並んで管理主体となっている。このMH21による成果として、2013年に東部南海トラフの水深1000mの地点でメタンハイドレートの世界初の海洋産出試験に成功したことが挙げられる(石油天然ガス・金属鉱物資源機構：ニュースリリース、2013)。この試験では、地球深部探査船「ちきゅう」を用い海底下300mの砂層にあるメタンハイドレートを減圧法によりガス化し約6日間の連続生産でガス累計生産量：119,500 m³を達成した。なお、この第1回の試験では6日目に出砂が生じてその後の生産がストップしたことから、安定的なガス生産は確認出来ず、また商業化において重要な長期的な安定的生産に関してもデータを得る事が出来なかった。

この結果を受けて、2016年から2018年にわたって第2回海洋産出試験が前回と同じ海域で行われた。2017年には2つの坑井を掘削して、前回と同じ減圧法でメタンハイドレートをガス化してその生産量を検討した(石油天然ガス・金属鉱物資源機構：ニュースリリース、2017)。1つ目の坑井では12日目に出砂が著しくなり停止となったが、累積ガス生産量は40,849m³であった。継続して2つ目の坑井での試験を行い、24日間の計画期間を終えての累積ガス生産量は222,587m³と前回より多かった。しかし、この2回目の坑井では生産が次第に上昇するモデル予想と大きく異なった結果を得たことや、初めの坑井で出砂による停止を余儀なくされた事など、まだ、商業化への課題は大きいと言う結果になっている。

この砂層型のメタンハイドレートに関しては、2018年に制定された第3期の海洋基本計画でも「我が国のエネルギー安定供給に資する重要なエネルギー資源として、将来の商業生産を可能とするための技術開発を進める。その際、平成30年代後半に民間企業が主導する商業化に向けたプロジェクトが開始されることを目指して、国は産業化のための取組として、民間企業が事業化する際に必要となる技術、知見、制度等を確立するための技術開発を行う。」と述べられており、近々でも近未来での商業化を目指している（内閣府、2018）。

一方、メタンハイドレートと同様に2030年までの商業化を第1期の海洋基本計画では目指した熱水鉱床に関してもJOGMECを中心に採掘のための技術開発が進められた。2013年12月に経済産業省が第2期の海洋基本計画を受けて策定した「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」では「海底熱水鉱床の開発に向けた工程表」が示されており、10年以内には、熱水鉱床における採鉱・昇鉱システムを一体化して実海域でテストしその成果に基づいて、商業機の設計・製造に向かうとされている。この工程表を受けて、主に民間企業からなる「採鉱・揚鉱パイロット試験共同企業体（コンソーシアム）」が結成され、JOGMECから委託で熱水鉱床での採鉱とその昇鉱のパイロット試験を2017年に沖縄近海で実施した。この熱水鉱床での採鉱・揚鉱試験は世界で初めての試みであり、複数回に分けて事前に海底での採掘試験機で掘削・破碎した鉱石を、集鉱試験機で海水と混ぜてスラリー状にした鉱石を吸引し、水中ポンプおよび揚鉱管を用いて、水深約1,600mの海底から洋上まで連続的に揚鉱している。実鉱石や模擬鉱石を合わせて約16トン洋上に揚鉱することに世界で初めて成功した（石油天然ガス・金属鉱物資源機構：ニュースリリース、2017）。翌年の2018年に行われたこの熱水鉱床での採鉱とその昇鉱のパイロット試験の総合評価報告書では、以下の点が挙げられた（経済産業省エネルギー資源庁・石油天然ガス・金属鉱物資源機構、2018）

（１）事業者が参入の判断ができるレベルとして 5,000 万 トンレベルの資源量把握が必要であるがその為には今後の新鉱床の発見は不可欠であり、現在実施している有望海域を絞り込むための調査フローで効率的に抽出できない海底熱水鉱床をどのように探していくかが課題である。

（２）熱水鉱床はその成因や地質構造により様々であり、商業化にあたっては対応する鉱床に適用可能な選鉱フローの検討が必要であり、さらに採鉱・揚鉱においても安定操業可能な効率的でコスト負担の少ない開発技術の検討が今後必要である。

（３）環境面では現在のポンプによる揚鉱を想定した場合、商業時にはその経済性を考慮すると揚鉱水を海底近くへ戻すことが現実的だが、現時点ではその影響評価の手法や、放流の事前に懸濁物や重金属などを除去する技術が検討されていない。このような場合に関するわが国における法の未整備の課題も含めて、揚鉱水の取扱い方針が未決定であることは商業化に向けて大きな課題である。

（４）海底熱水鉱床の鉱石から地金を製造するためには国内に選鉱場を建設する必要があるが、必要な敷地面積の確保を含めてその立地条件が大きな課題であり、尾鉱堆積場も含めた選鉱設備の国内建設の適地選定に関する不確実性がこの事業のリスクの 1 つとなっている。

（５）現在のシステムでの経済性のシミュレーション結果では、行った 2 つの条件でともに収支はマイナスであった。これをプラスにするには、より高品質の鉱石を対象にまた金属価格がより

高くなる事が必要とされた。

以上のように熱水鉱床に関しては、多くの課題をその商業化に向けて抱えているが、その中で大きな課題は、わが国の周辺海域で商業化に十分な品位・量を持つ鉱床を高い精度・確度で把握することであろう。この点に関しては、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議の府省を跨る大型研究プログラムである戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）が2014年度から始められ、研究開発法人である海洋研究開発機構（JAMSTEC）を代表研究機関として「次世代海洋資源調査技術」が採択されたことから、主に熱水鉱床に関して補完的な研究開発を行うことになった。熱水鉱床に関してはその成果として「海底熱水鉱床調査技術プロトコル（改訂版、2018）」がまとめられている（木川編、2018）。これは主に熱水鉱床を対象に、コアラーサンプリングによる調査前に地球物理学的手法などによって熱水鉱床の位置や広がりを見積もるための技術開発であるが、既に活動を停止した潜在性の熱水鉱床に関しても推定出来ることを報告している。なお、海底鉱物資源の成因に関しては、「次世代海洋資源調査技術」の一環として、「コバルトリッチクラストの成因に関して」も報告書がまとめられている（鈴木勝彦、白井朗、2018）。

コバルトリッチクラストに関しては、第3期の海洋基本計画では「コバルトリッチクラストについては、国際海底機構の規則（ISA44）に定められた期限までに鉱区の絞込みを行う。」と書かれており、これまでもJOGMECが海山を中心にその資源量の調査を続けて行っていた（内閣府、2018）。その先のステップとして、2020年には南鳥島南方のわが国のEEZ内に位置する拓洋第5海山平頂部（水深約930メートル）で、海底熱水鉱床用に開発した採掘機をクラスト用に改造して掘削試験を行っている（石油天然ガス・金属鉱物資源機構：ニュースリリース、2020）。これはコバルトリッチクラストの海洋での採掘試験としては世界初めての試みであり、649キログラムのクラスト片等を回収している。このように、表在性の熱水鉱床とコバルトリッチクラストに関しては、その採掘・揚鉱に共通する所が多いことから、その基本的なシステムを共通に利用できる利点がある。なお、この海上試験もJOGMECから委託を受けた民間企業数社からなるコンソーシアムが中心となって、産学官の連携体制で実施されている。

最後にレアアース泥に関する鉱物資源開発に関する進展をまとめる。既に述べた内閣府の大型研究開発プログラムである戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）は、第2期において「革新的深海調査技術」という課題で主に深海底のレアアース泥に関する調査研究が行われた（内閣府、2021）。その成果として2022年10月にプレスリリースを行い、「深海に堆積するレアアース泥採掘を可能にする技術を開発し、水深2,470mの地点における実海域試験を実施し、海底堆積物の揚泥に世界で初めて成功した。」と発表している。南鳥島のレアアース泥は水深が5000－6000mであるが、採用している採掘装置は南鳥島海域水深約6,000mの海底下に賦存することが確認されている「レアアース泥」を採掘することを念頭に設計されているので、パイプの延長だけで南鳥島周辺海域での揚泥が可能と述べている。なお、揚泥は海洋研究開発機構の「ちぎゅう」が用いられ、1日当たりに換算した揚泥量は約70トンとされている（内閣府、

2022)。SIP 事業は 2023 年からその第 3 期に入るが、その一つの課題「海洋安全保障プラットフォームの構築」で、第 1 期、2 期に引き続きこのレアアース泥開発を取り上げている。すなわち、そこでは南鳥島海域でのレアアース泥の資源量の調査、深海から船上へレアアース濃集部分を揚泥するための技術開発、またレアアース資源の海底での広域調査のための複数 AUV 調査手法の開発を行う事を計画している（内閣府、2023）。

5. 海底資源開発が想定される深海生態系の特性

5-1 熱水鉱床に付随する生態系の特性とその維持機構

既に述べたように 1977 年における化学合成細菌に支えられた東部太平洋の深海底における熱水生態系の発見はこれまでの深海での生態系の概念を大きく変えるものであった(Jannasch & Wirsen, 1979)。有機物の乏しい深海底にチューブワームなどのメガベントスと呼ばれる大型底生生物などが密集した生態系が存在したのである。海洋底においてもその拡大軸あるいは海嶺では海洋地殻に亀裂が出来やすく、海水がその割れ目に侵入し、地下深部で熱い岩石との相互作用で熱と物質の供給を受けて循環し海底のベント（噴出孔）から噴出する機構が存在する。このような活動的な海底では海底から熱水中の硫黄、メタン、水素、2 価鉄などの還元性の物質が供給される。化学合成細菌とは、このような還元性物質を酸化することでエネルギーを獲得し、生合成を行うことが出来る微生物である。陸域でもこのような化学合成細菌の存在とそれによる有機物の生成は古くから知られていたが、そこでの有機物の生成の主役は光合成生物であった。しかし、深海の熱水域では化学合成細菌が生態系の一次生産者として機能することで、これまでの深海底における生物群集とは全く異なった生態系となる。それは通常の深海では表層での光合成による有機物生成からの沈降有機物に支えられていることから、深層ほどエネルギー供給の乏しい生態系となっていたからである。

活動的な海底から供給される還元物質は局所的には極めて高濃度になるため、化学合成細菌/共生動物での熱水域における有機物生産速度は、東太平洋海嶺で生育が早い事で知られているチューブワーム群集では 1.25×10^3 から 1.23×10^4 gC/m²/y が見積もられている (McNichol, et al., 2018) これは同じ海域の表層での一次生産が 1×10^2 gC/m²/y と見積もられているので、これよりはるかに大きな値である。なお、熱水海域は海底上で列をなしている場合が多く、物理的にも生態的にも繋がりが生じているが、一方で、微生物群集は独自であるようで、それぞれの細かい環境場の違いが重要であるかもしれない。なお、幼生の分散は環境変動の大きな場における群集組成の変動に大きな役割を果たすことが知られている (Mullineaux, et al., 2018; Dick, 2019)。

熱水域での化学合成細菌は、真正細菌や古細菌に属するが熱水域の急激な環境場の変化に対応して多様な代謝系を持っており、呼吸系の電子受容体においても、酸素だけでなく、硝酸イオン、硫酸イオン、3 価鉄を使うものも存在する (Nakagawa & Takai, 2008)。また、これらの化学合成細菌は、自由遊泳型、マットを作るもの、動物と共生関係にあるものと多様である。熱水生態系で特に注目されたのが、化学合成細菌とチューブワームやシロウリガイなどのメガベントスとの

共生関係である。この共生は、動物の様々な器官、組織で行われており、チューブワームでは栄養体部、シロウリガイでは鰓、腹足類では食道腺などから、エビやカニの外部表面まで多様である。また、内部共生では硫黄やメタンをエネルギー源として使うが、水素を使うものも多い (Dick, 2019)。なお、地質と化学合成細菌の基質との関係については、硫黄酸化の細菌は主に玄武岩ベースの熱水系に見られ、急速に拡大する中央海嶺に相当する。一方、シリカなどの珪長質鉱物を殆ど含まない超苦鉄質岩（超マフィック岩）でのシステムでは、水素やメタンがエネルギー源とする細菌が多いことが分かって来た (Mullineaux, et al., 2018)。しかし、熱水域の微生物の多くは、ゲノム解析は進んでいるものの、まだ単離培養が出来ているものが少ないため、生理・生化学的な研究は遅れている。

5-2 コバルトリッチクラスト鉱床に付随する生態系の特性とその維持機構

既に示したようにコバルトリッチクラストは海山と密接な関係にあることから、ここでは海山生態系についてこれまでに分かっているその特性等について記述する。海山の一般的な知見としては、海底地形の1つであり、海洋底からの比高が 1000m 以上のものを海山と呼んでいる。その中で頂部の水深が 200m 以深であり、且つ平坦なものを平頂海山（ギョー）と呼んでいる。その基盤岩がほぼすべて玄武岩であることから、その起源は海底火山とされる。すなわち、その一般的な成因としてはマントルブルームに関係したホットスポットによる火山活動で形成された火山島がマントルの動きによってホットスポットから外れて、浸食・沈降して海山を形成するものである。このようなホットスポットからは火山島が次々に誕生するため、海山列をなすことが多い (Clouard & Bonneville, 2005)。また、海山はその成因からサンゴ礁を伴っていることも多く、火成岩の上に石灰岩が重なっている海山も多い。

海山の周辺ではその勾配のため湧昇流が生じており、表層に栄養塩が供給されていると考えられる。一方、海山の上やその周辺でクロロフィル濃度の上昇が見られてもその持続性は乏しい事も知られている (Clark, 2012)。このことは、海山山頂付近の表層での下向きの流れとも関係し、生産された有機物が速やかに海洋深部に物理的に輸送されることを意味しているかも知れない。いずれにしても、海山の山頂付近は底引き網漁業の良い漁場となっているので、表層から深層にかけて、動物プランクトンやネクトンが豊富に存在し生産性が高いことは確かである (Clark, 2012)。

海山の多くは、その勾配や流れなどの物理環境の影響が大きいため、むき出しの岩石から構成され、堆積物を維持出来るような環境は少ないのが特徴である。従って、底生生物群集も固着性で表在性のベントスが卓越する。これらは海綿動物、石サンゴ、角サンゴ、イソギンチャク、八方サンゴ、腕足動物、ウミユリ類、ホヤ類などの懸濁物食者である。なお、中緯度域の頂上の水深が浅い海山では海藻類が繁茂していることも知られており、紅藻では290mの水深の海山に生育していることが記録されている (Rogers, 2018)。一方、これまで海山において、非堆積環境での生物群集は多く研究されているが、一方で堆積環境での生物相に関する研究例は少ない。これは海山で十分な堆積環境が乏しいこととも関係するが、特にメイオベントスなどに関する情報はあまり得られていない。

海山は深海底において際立った環境場を提供していることもあり、そこでの生態学的な役割に関しては古くから様々な説が唱えられていた。ここでは、その主なものを紹介し現在の評価に関してまとめる。初めは、「海山は海底の“島”であり生物群集では固有性が高い」という海洋における海山の隔離性についての仮説である。このような考えには、陸域生態系における大洋島が固有種に富んでいた事からの類似性の影響もあった。海山におけるサンプリングの機会が増加する事などにより、海山における種の独自性が一般的であることに関しては種ごとにその遺伝子の伝播様式が異なることなどからその多くは否定されている(Clark, et al., 2012)。一方で、移動性の乏しい固着生物に関しては、他の海山との連結性に乏しく、ローカルな意味での固有性が存在することも確かである (Rogers, 2018)。

また、海山が生物分散の中継地であり、生物多様性、生物生産性の高い“海のオアシス”で、種多様性のホットスポットであるという仮説は現在でもほぼ支持されている。さらに、海山生態系は、近傍のすそ野生態系への生物資源の供給源であり、これらの海山生態系が大規模な海洋環境変化において避難場になっている可能性も最近指摘されている。これは、海山が深海からの湧昇流を受け、また潮汐流などの影響で、海山山頂付近へ表層での一次生産有機物がアクティブに沈降する物理過程が存在すること、また、水中生物と海底生物との密接な栄養段階での繋がりなどが知られて来たことによる (Rogers, 2018)。なお、海山生態系に対する人為活動の影響に関する仮説では、海山生態系の脆弱性に関しては、固着性のサンゴなどの海山生物群集への着底トラールによる攪乱の受けやすさと、またこれら攪乱を受けた生物群集の回復力が遅いことが指摘されている。これは、海山等での冷水サンゴが極めて長寿命であることを反映したものである。

5-3 マンガンノジュール鉱床を保持する深海生態系の特性とその維持機構

マンガンノジュールが鉱床として密度の高い海域の多くは、陸域から離れたいわゆる深海底の水深が 4000m-5000m 程度ある海底である。すなわち、海底での堆積速度が極めて遅いことがマンガンノジュールの形成には必要な条件になっている。このマンガンノジュールを多く含む深海の堆積物生態系に関しては、過去に鉱物資源として北太平洋の低緯度域で試掘された事から、その生態系や試掘後の変化等に関して調査を行った論文が幾つか既に公表されている (Miljutina, et al., 2011; Vanreusel, et al, 2016; Simon-Lledó, et al., 2019)。特に熱帯・亜熱帯太平洋域の 8-17N と 120-153W の間にある Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCFZ) と呼ばれる海域がマンガンノジュール採掘との関係で注目されている。ここではこれらの成果に基づいて太平洋の熱帯・亜熱帯域でのマンガンノジュールの分布するその近傍での生態系の特徴を紹介する。

マンガンノジュールの分布する上記の海底での固着ベントスは 14 - 20 個体/100 m²である

が、それ以外の海底では最大 8 個体/100 m²で半分以下である。また卓越したグループはウミトサカやイソギンチャクの仲間で 63-91% を占めた。それ以外で多いのは海綿動物の仲間であった。これらの種類は、マンガンノジュールの有無に関わらず分布していたが、ウミトサカやイソ

ギンチャク、ツノサンゴ、海綿動物はノジュールの上に生育していた。一方、表在性であるが移動できるメガベントスでは、マンガンノジュールの存在、非存在で卓越したのは、棘皮動物の仲間である、ナマコ類、クモヒトデ、ウニ、ヒトデの類である。また、その密度はノジュールのある海域で4 - 15個体/100 m²であり、これはノジュールの無い海域での1 - 3個体/100 m²を大きく上回った (Vanreusel, et al, 2016)。このように表在性のメガメントスに関しては、移動するものと固着性のものの両方が、マンガンノジュールの密度の高い海底の方が多いと言う結果になっている。このことは特に固着性のメガベントスの多くはマンガンノジュールの表面を生育場としていることから明らかである。なお、近接海域で表層での生産性の低い海域での海底では、マンガンノジュールの密度の高い所でもメガベントスの絶対数は減少しており、表層からの沈降有機物の影響が示唆されている。

一方、このマンガンノジュールの集積海域のマクロベントスである内在性の多毛類の分布調査では、広域にわたるその分布には大きな差異は認められず、種組成や密度の差も表層からの有機物供給の差によるとされている (De Smet, et al., 2017)。さらに、マンガンノジュールはマンガンの酸化還元に関係する多様な細菌群集の生育場になっている事も最近のゲノム解析で明らかになってきた。これらの細菌群集は周辺のノジュールの無い堆積物では検出されておらず、マンガンノジュールと密接な関係を持つ微生物群集と思われる (Blöthe, et al., 2015)。以上のようにマンガンノジュールが密に存在する深海底は、マンガンノジュールと言う固相に依存する固着性で表在性のベントスと、堆積物中に多毛類のような内在性のベントスが共存している生態系を構成している事は興味深い。

6. 海底の資源開発における環境・生態系保全の考え方

既に述べたように国連海洋法条約は、沿岸国の排他的経済水域内においては海底資源の開発権をその沿岸国に認めると同時に、水域内における環境保護・保全も求めている。一方、排他的経済水域および大陸棚の外側に広がる公海の深海底に関しては、同条約では「人類の共同の財産」と規定しており、そこでの鉱物資源の管理に関しては同条約によって国際海底機構 (International Seabed Authority : ISA) が1994年に設立された。このように海底資源の開発とその環境保全に関しては、海域の違いによって異なる制度の下での運用がなされる事になった。

この国際海底鉱区に関しては2013年にISAがそこでの主要な鉱物資源の探査に関する規則をまとめて「環境ガイドライン」を制定している (International Seabed Authority, 2013)。これは法的な拘束力は持たないが、勧告という形式で鉱区における海洋学的調査、生物を含む環境ベースラインデータの収集、収集したデータを基にした探査活動を行う際に生じる可能性のある環境影響の評価、環境モニタリング手法の開発が要請されている。また、探査から商業的な採掘開発に進む場合における、環境保全・保護との関係での取り決めに関しても、ISAで議論が進められている。ここでは、国連の下部組織である国際海底機構 (ISA) の海底資源開発と海洋環境、生物多様性の保全について、どのような具体的な対応をしているか、また、わが国の対応について記述した後、これらの施策に対する深海生態系などの研究者の考え方をまとめる。なお、海山生

態系と底引き網漁業との関係についても国際組織との関連で触れる。

6-1 ISA の提案する海底鉱物資源開発に伴う環境保護・保全の考え方

ISA の探査規則、環境ガイドラインでは深海底での鉱物資源の探査・採掘といった活動から生じる可能性がある海洋環境に対する「危害」の影響から効果的に環境を保護するために、1992年の環境と開発に関する国連会議（UNCED）リオデジャネイロ宣言の第15原則にある「予防的アプローチ」を適用するものとしている。これは「環境を防御するため、各国はその能力に応じて、予防的取組を広く講じなければならない。重大あるいは取り返しのつかない損害の恐れがあるところでは、十分な科学的確実性がないことを、環境悪化を防ぐ費用対効果の高い対策を引き伸ばす理由にしてはならない」と言うものである。このような原則に沿って作られた探査規則・環境ガイドラインでは、海底鉱物資源の探査にあたっては、探査での採掘による海底面への直接的な生態系等への影響と、海底近傍から表層に至る水中での鉱物採取の影響を受けた濁りなど様々なプルームの影響の2つに特に注目している。また、鉱物資源探査にあたって探査や採掘手法などと共に、海洋環境の事前調査のベースラインの設定、影響の予察的評価及び影響の防止・軽減・低減への措置案、影響参照エリア（以下、IRZ）と保護参照エリア（以下、PRZ）の設定などの情報提出を求めている。このIRZとPRZに関しては、例えば熱水鉱床の場合、PRZについては開発区域とは別の場所にある海底熱水鉱床のある場所としている。また、IRZは採掘による濁りの拡散/再堆積の影響がおよぶ範囲を想定している。

表1に環境ベースラインとして収集すべき項目をまとめたが、流れなどの海洋物理学的な情報から、堆積物の特性、生物群集の組成、水中における排出プルームの動態予測まで幅広い。

表1：環境ベースラインの調査項目（要約）。（環境省の資料から、<https://www.env.go.jp/content/900488997.pdf>）。

環境ベースラインの調査項目（パラ15）＜要約＞
(a) 海洋物理学：海流・温度・濁度等の海洋学的情報、海底の地形測定、対象海域の水塊構造、排出プルームの影響水深における物理パラメーター測定、粒子濃度と組成（詳細：附属書Iパラ8～12）
(b) 地質学：地質・地形の高解像度地図、採鉱試験で排出される重金属や微量元素（詳細：附属書Iパラ46～49）
(c) 海洋化学：水柱全体の化学的データ（採鉱前と採鉱過程における放出の比較のため）、採鉱過程で放出される金属、微量元素濃度、鉱石処理工程により排出されるプルームの化学成分（詳細：附属書Iパラ13～21）
(d) 堆積物特性：表層堆積物の基本的特性（重力、密度、粒度、酸化・嫌気状態の堆積物深度）のための試料採取（詳細：附属書Iパラ22）
(e) 生物群集：動物相、海底地形、水深、海底及び堆積物特性、出現数、海底生物群集（メガ・マクロ・メイオ・ミクロ・ノジュールファウナ、底生腐食者、鉱石生息生物、遊泳性生物群集、優占種の通常時の金属含有レベル、海生哺乳類その他の大型動物（カメ、海鳥等））。水柱・海底の生物群集の時間的変化（観測点の設置）、種の地理的分布、鍵種の遺伝的交流、映像（詳細：附属書Iパラ23～43）
(f) 生物かく乱データ：可能な限り堆積物の混合に関するデータを取得（詳細：附属書Iパラ44）
(g) 堆積作用：表層から深層までの排出プルームの移動・組成の時系列データ、拡散予測数値モデル（詳細：附属書Iパラ45）

なお、ISAの概査・探査規則には、海洋環境の保護・保全のため、深海底の探査活動が海洋環境に重大な危害（Serious harm）を与えると判断された場合は、活動の影響を防止するための管理措置をとるか探査実施許可を与えないこと等が明記されている。また、契約者は「重大な危害」がないことを証明するため、海洋生態系に対する危害を軽減、抑制する必要な措置をとることを求められている。しかし、「重大な危害」の定義は定性的で、基準等も提示されているわけではないので申請者の判断によるところが大きいことが研究者からは指摘されている。

このような海底鉱物資源の探査にあたっての環境保全・生態系への配慮については、既にこのガイドラインに沿った探査が、わが国も含めて行われている。その一方で、探査が進展し実際の商用的な開発に進む可能性のあるケースも出てきており、次のステップに進むための基準作りが ISA に早急に求められていた。例えば、ナウル共和国は商業的な開発に進むための諸条件について、ISA はその申請があってから 2 年間の内にこれを決める義務があるとの商業的な開発プロセスに関する問題提起を 2021 年に行っている (Pradeep, 2021)。これに対して、ISA では対象鉱区において商業的な開発に向かう場合における様々な規則に関しての案は作成され提案されているが、ISA としての合意に達していないのが現状である。そこでは海洋環境を有効的に守るための環境条件の閾値を定める課題などについて議論があり、さらに海洋利用が人類全体の利益のためと言う原則から海底資源開発に伴う利益の配分についてはしっかりした議論がされていないとの意見もある。このような状況に対して、中には深海での鉱物開発の環境への影響の理解が十分進むまでは深海鉱物資源の商業的な開発のモラトリアムを提案する国もある。これに対して開発企業側は、現在世界で急務であるカーボンニュートラル政策を達成するためには、より多くのコバルト、ニッケルなどの金属の供給が必要であるが、陸域でのその資源開発はより環境に負荷のかかる形になって来ており、深海掘削はそれを大規模に環境に対してより安全に提供出来るという主張をしている。これに関しては ISA の役割として、深海底での採掘での利益を公平に分配する必要があると同時に陸での鉱物資源開発に負の影響を与える場合それに対する補償も義務付けられている。また、深海と陸上での鉱物資源の開発のどちらがより環境に負荷をかけないかについては議論が分かれているようである。このように環境保全と深海鉱物資源開発の両立に関しての意見はまだ収斂していない。これは 160 か国以上が ISA に参加しており、そこでの統一的な意見がまとまるのは時間がかかるということも反映している。

なお、深海における鉱物資源開発を世界で初めて目指したベンチャー企業にカナダの Nautilus Minerals Inc. がある。この会社は 1987 年に設立され、熱水鉱床からの有用金属を商業的に採掘することを目指して、パプアニューギニア政府から同国の EEZ 内での開発のライセンスを取得して、採掘システムの開発から海域調査まで幅広い活動を行ってきた。しかし、資金調達の困難さやパプアニューギニア現地での反対運動などもあって、2019 年に会社として財政的に破綻した。また、ライセンスを与えたパプアニューギニア政府も、開発についてのモラトリアムを宣言している (DSM Observer, 2020; 中田、2020)。

わが国の EEZ 外の海底鉱物資源開発に関して、JOGMEC は 2014 年に ISA と探査契約を締結して 15 年間の探査権を取得し、南鳥島南東に位置する 6 つの平頂海山で ISA ガイドラインに準拠した資源探査と環境ベースライン調査を行っている。この中でも注目されるのが、対象となる海山でのコバルトリッチクラストの採掘によるメガベントスの消滅が近傍の海山からのメガベントス等の浮遊幼生による定着などで回復するかについての検討である。これは海山でのコバルトリッチクラストの採掘のみならず、熱水鉱床での採掘でも、採掘行為によりそのサイトのベントスは消滅するため、採掘終了後の各生態系の回復の速さが問われることになる。また、この評価では各海山生態系における底生生物群集の遺伝的なつながりの評価や、海流等による幼生の拡散移動に関しては、生態系の回復と密接に関係することから詳しい調査する必要がある事を指摘し

ている（湊谷純平、2019）。なお、コバルトリッチクラストの環境やマンガンノジュールのある海底環境はその鉱物形成速度が極めて遅いことから、このような微細環境と密接に結びついた生態系がある場合にはその回復は期待出来ないことになる。

わが国で 2014 年から始まった次世代海洋資源調査技術のプロジェクトにおいても、生態系の実態調査と長期監視技術の開発が 1 つの研究の柱になっており、深海底での生態系の動態を調査する様々な技術が開発された。分析装置を使った堆積物中のメイオベントスの迅速な計測法、ゲノム解析による深海生態系の連結性を評価手法、海底設置型ブイによる画像による海底生物の長期モニターなど多岐にわたる。なお、ISA での環境ベースライン調査などでは、どのような測器を用い、どのような手法で環境調査をするかについての具体的な指針はない。これに対して ISA での海底資源開発に伴うこれらの深海生態系の調査手法・技術は、国際的な標準化が必要であることから、わが国の働きかけにより「海洋技術—海洋環境への影響評価—に関する ISO の規格」として次世代海洋資源調査技術のプロジェクトで開発された技術が認証されている（国立環境研究所、2021）。

6-2 深海生態系への影響に関する研究者グループの見解

熱水鉱床における生態系については、その発見の時期や経緯から生物群集組成やその化学合成細菌群集との共生系としての生理・生態などの研究はかなり進展してきた（Dick, 2019）。しかし、広い面積に亘る熱水域が採掘活動によってその表面が除去された時、そこでの生物群集とその環境がその後どうなるかに関しては未知の部分が大きいためさらなる研究が必要とされる（Van Dover, 2014）。さらに海山でのコバルトリッチクラストや深海底でのマンガンノジュール周辺の生態系に関しては、これらの鉱物資源が注目された後に、これらの海域での生物群集としての研究が大きく進められた経緯がある。なお、深海での生物群集に関する情報の集積に関しては、2000 年から開始された The **Census of Marine Life: CoML** での活動が大きな成果を挙げた。これは 80 を超える国々の研究者によるグローバルな海洋生物研究ネットワークであり、2000-2010 年の 10 年計画で海洋生物の多様性、分布、および個体数の調査・解析に取り組んだ大型の国際共同研究である。

この CoML において深海での生物群集を担当した研究グループが、10 年の研究成果をもとに人間活動が深海での生物群集・生物多様性に及ぼす負の影響についてまとめている（Ramirez-Llodra, et al., 2011）。それによると 20 世紀の過去は陸源の様々な物質の海洋への投棄、現在は深海での鉱物資源等の開発行為、そして将来は気候変動の三つを深海生態系への主な深刻な脅威としており、これらの人間活動は相互に関連していると述べている。また、近未来における人間活動による深海生態系への高いリスクが想定される具体的な場として、堆積物表層部のベントス群集、冷水サンゴ群集、海山のベントスおよび水中群集などを挙げている。

21 世紀に入って深海での鉱物資源の探査が活発になり、その商用的な採掘が視野に入ってきたことを受けて、海底鉱物資源の開発と深海生態系の保全・保護が両立するか、あるいは、それを両立させるにはどのような施策が必要かについての議論が深海の生態系の研究者の間で盛んに行われるようになった。深海での鉱物資源開発における生物多様性・生態系への脅威からの緩和策

(Mitigation) の考え方には、1) 採掘を行わない保護区を設定する、2) 希少な生物群集の移植を行う、採掘に伴う環境への阻害である光、懸濁物、騒音などを最低限にする、3) 環境修復を行うなどがある (Van Dover, 2014)。陸域での鉱山開発においては、その跡地の植生等を回復させる環境修復と言う手段が多く取られその手法に関する研究も多い。しかし、深海底での人間活動による生物群集を含めた人為的な環境修復の実施に関しては、疑問視する声が多い (Van Dover, et al., 2017)。従って、深海底域での環境保全のための緩和策としては1) と2) が中心となる。

海洋における鉱物資源開発を禁止する保護区との関連では、国連の生物多様性条約では海域での生物多様性に対する環境の脆弱性やそのような海域を示す Ecologically or Biologically Significant marine Areas (EBSAs) が検討されている。また国連食糧農業機関 (FAO) の提唱する脆弱な海洋生態系 Vulnerable Marine Ecosystems (VMEs) の概念も共通してこれに該当する海洋生態系や海域を保全していくことを目指している。従って海底鉱物資源開発にあたっての商業化の契約に際しても、このような脆弱な生態系や海域を尊重する条件設定などが考えられている。

生物多様性条約を適用しこの条約の下での海洋保護区 (MPA) のネットワークを公海上に配置して、外洋域での生物多様性を保全するべきと言う考えも多い。この場合、深海鉱物資源の探査やその商業的な採掘を管理する枠組みの一つとして、海洋保護区の設定などを含む各海域での環境管理の計画を確立させることが提案されている。例えば、深海底研究者のグループは 2007 年にワークショップを開催し、ISA による各海域での海洋環境の管理計画 (Regional Environmental Management Plans : REMPs) の1つとして、熱帯域太平洋のマングンノジュールの密度の高い Clarion-Clipperton Zone (CCZ 海域) において、海洋保護区のネットワークを設定することが望ましいと ISA に勧告している (Wedding et al., 2015)。このような研究者の意見を反映して、ISA はこの CCZ 海域での REMPs の中で鉱物採掘を許可しない海域である「Areas of Particular Environmental Interest (APEI s)」を9か所制定する事を決めている (ISBA/22/LTC/12, 2016)。最近ではこの海域で4か所 (約52万平方キロ) の APEI s が追加承認されており、かなりの面積が保全されることになった。また、熱水鉱床の採掘が計画されている中部大西洋の海嶺においても保護海域を海洋保護区として設定しようとする提案がある (Dunn, et al., 2018)。ここではこの保護区の設定において評価すべき指標を決め、それに基づいて保護区のネットワークを決めて行くプロセスを取っている。

海底資源の開発によって、改変される環境は海底の表面に留まらない。その影響は、採掘による懸濁物のプルームの広がり、海底近傍での騒音の課題、人為的な光源の影響、水温変化などが挙げられる。深海海底の表層における鉱物資源の開発は必然的にその対象海域におけるローカルな生物多様性を失うことになる。また、鉱石採掘後の環境の回復については悲観的な意見が多い。このような底生生物群集の回復過程については、おそらく海域、そこでの生物群集、また採掘の期間などにより大きく変わると思われるが、特に深海生物の特徴である、ゆっくりした成長速度は回復をより困難にする。しかし、深海底におけるこれらの底生生物群集がどの位の速さで再度定着するかの情報は殆どなく、さらにこれらの群集サイズや、再生産過程、分散等の連結性に関する情報も極めて限定的である (Hilário et al., 2015)。

これまで、このような、深海底での生育環境の破壊とその後の回復過程に関しては、海底火山活動などの自然現象を利用して行われてきたが、規模などの違いがあり商用的な鉱物採掘の条件との比較は容易でない。従って、環境保全に関する予防原則からは、商業的な採掘によるその底生生物群集等への定量的な負の影響がはっきりしない以上、探査から商業的開発に移行するのは、まだ前提条件が十分でないとの意見も多い。例えば、2015 年には公海における鉱物資源開発は海洋環境への脅威を最小限に抑えるような海洋保護区の設定がなされるまでは、ISA は商業的な採掘を許可すべきではないという論説も Science に投稿されている (Wedding et al., 2015)。さらに、レアメタルなどの金属資源に関しては、資源のリサイクルやこれらの微量金属を使わない製品開発などを陸域で進めることで、海底鉱物資源の開発の必要性を減らすことも出来るという提案もある (Miller et al., 2018)。実際、現在需要が高まっている電池においても、貴重で高価なレアメタルを使わないで高い性能を発揮する固体電池の開発が各国で競われている。

深海生態系に関しては、これまでに海山などの海域で底引き網漁業が盛んだったことから、国連食糧農業機関 (FAO) による「脆弱な海洋生態系 (VME : Vulnerable Marine Ecosystem)」で主に対象になった寿命の長い冷水サンゴの保全などが国際的な課題となり、2004 年の国連総会で議論に発展した。これは VME を棄損する底着底引き網漁業等の暫定的停止を検討し、その対応を検討するものであるが、1960 年代後半から大陸棚域での底引き網漁業の伸び悩みを受けて、各国が海山周辺や大陸斜面での 200-2000m の深海漁業に進出したことの結果である (清田、2019)。加えて漁船の大型化や魚探などの進歩、さらには国連海洋条約による各国の EEZ 内での漁業の制限などが公海の深海部での漁業への道を開くことになった。しかし、このような深海漁業は比較的早く、資源の乱獲による漁業資源の枯渇と漁具による深海環境の破壊と言う二つの課題に直面することになった。このことが国連で VME が議論されるようになった原因である。

国連での議論は各海域の生物資源を管理している地域漁業管理機関が規制を行うこととし、このような管理機関が存在しない公海域ではそれを関係国で早急に組織することになった。また、VME は FAO が提唱している概念であり脆弱な海洋生態系の保全については FAO が主体的に動く必要があるとの認識から、2008 年には FAO が水産資源の持続的な利用と脆弱性のある海域生態系を管理・保護するためのガイドライン (International Guidelines for the Management of Deep-Sea Fisheries in the High Seas) を公表した (清田、2019)。また、これまで地域漁業管理機関が無かった海域においても次々にこれが設立され、公海における水産資源の管理と海洋生態系の保全を行うことになった。なお、わが国での大きな漁場を含む海域での地域管理機関である、北太平洋漁業委員会が発足したのは 2015 年である。

7. 今後の課題と展望

国際的には持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals : SDGs) の考え方が広がり地球環境への人々の関心が高まっている。その中で ISA は深海底の鉱物資源開発と深海の生物多様性・生態系の保全の問題に関し、この相反する命題にどのように折り合いを付けるかを模索しているように思われる。ISA が責任を持つ公海の海底資源開発においては、国連海洋法条約がこの

深海底を「人類の共同の財産」と定義している。また、鉱物資源の探査・採掘と言った活動から生じる可能性がある海洋環境に対する「危害」の影響から、効果的に環境を保護するために1992年の環境と開発に関する国連会議（UNCED）リオデジャネイロ宣言の第15原則にある「予防的アプローチ」を適用したことなどの趣旨を深海の環境保護に生かそうとする様々な議論が現在も続いている。従って、既に述べたように2019年にドラフトが提示された鉱物資源の開発が探査の段階から商業的な採掘に移行する場合についての開発規程は、170近い加盟国の合意を得る段階ではまだ無いようである。EEZ内の深海鉱物資源開発はその沿岸国が主体性を持って行うことになっているが、環境保全に関してはISAの環境ガイドラインの基準が準用される可能性が高い。これは国内規程で環境保全に対し独自の考え方を取った場合、ISAの基準となぜ異なる必要があるか説明しなければならない事などが挙げられる（中田、2020）。なお、わが国でのJOGMECによるEEZ内での熱水鉱床の探査の場合、ISAの探査における環境ガイドラインの方式に準拠している。

また、商業的な深海底での鉱物資源開発にあたってはその開発行為が利益を生む必要があり、世界で最初の深海熱水鉱床の採掘開発を試みていたベンチャー企業であるNautilus Minerals Inc.が最近財政的に破綻したように、民間だけでは開発にかかる資金を調達するのが難しい状況である。これは、深海生態系を含む海洋環境への影響を最小限にして、深海底から鉱物資源を得ることが技術的に完成していないと同時に、現状ではこれらにかかるコストが大きく民間では耐えられないことを示しているように思われる。わが国でも国の機関であるJOGMECが沖縄の熱水鉱床で採鉱・揚鉱パイロット試験を行ったが、この海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書（2018年）では次のように述べられている。すなわち、現状と比較して30%より経済価値の高い鉱石を想定し、起業費/操業費の比率を10%下げ、且つ金属価格が20%上昇する事を合わせると経済性が見いだせるとしている。さらに、将来十分な量と品位を持った資源量が確保され、環境影響への懸念などが解決した場合と言う条件も付いている。従って、結論としては長期的な視点に基づき商業化への取り組みを進めて行く必要があるとしている。

一方、ISAが探査活動においてもベースライン調査（BL調査）を対象海域において必須としていることから、探査が行われている様々な深海域での海洋学的、また深海生物群集やその生態系の調査が進展している。わが国でも、EEZ内における熱水鉱床、メタンハイドレート海底、海山のコバルトリッチクラストでのBL調査が主にJOGMECによって行われている。ISAはこれらの調査研究の成果を海域別の環境管理計画に反映させることを奨励しており、同様の事はEEZ内のBL調査についても言えると思われる。つまり、鉱物探査と言う目的にしてもこのようなEEZの内外における深海域、特に深海底の生物群集の調査研究により、これらの特性の異なる深海生態系の生物群集組成や、その生態系としての構造などの理解が進むことで、現在、言われている深海生態系の理解に対する知見のギャップの解消が進展すると期待される。このような、深海での様々な知見と共に、環境への影響を最小限に抑えるための深海底での採掘とそれを洋上に輸送する採鉱・揚鉱システムの技術開発の進展が合わさって、初めて商用的な海底鉱物資源の開発の準備が整ったと考えることが出来る。

なお、わが国では、海洋基本計画での海底鉱物資源の開発を国として進展させるという施策の元で、主にEEZ内でのBL調査を含む鉱物資源探査から試掘に係る技術開発まで民間の協力を仰ぎながら経済産業省の委託として国の機関であるJOGMECが行っている。このような外洋域のEEZ内における科学的な海洋調査は、例えそれが深海域鉱物資源の探査のためであっても、広大なわが国のEEZを表層から深海まで理解することに大きく貢献する事業と言う事が出来る。これは、国連海洋法条約がEEZを持つ各沿岸国に義務として求めている海洋の科学的な理解に合致するものである。

謝辞

本報告書の海底鉱物資源の記述に関しては、いであ（株）の木川栄一博士のご助言を受けている。

文献

- Blöthe, M., Wegorzewski, A. et al., (2015) Manganese-Cycling Microbial Communities Inside Deep-Sea Manganese Nodules. *Environ. Sci. Technol.* 49, 13, 7692–7700.
- Clark, M.R., Schlacher, T.A. et al. (2012) Science Priorities for Seamounts: Research Links to Conservation and Management. *PLoS ONE* 7(1): e29232. doi:10.1371/journal.pone.0029232
- Clouard, V. & Bonneville, A. (2005) Ages of seamounts, islands, and plateaus on the Pacific plate, in Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C., and Anderson, D.L., Plates, plumes, and paradigms: *Geol. S. A.M. S.* 388, 71–90, doi: 10.1130/2005.2388(06
- De Smet, B., Pape, E. et al. (2017) The Community Structure of Deep-Sea Macrofauna Associated with Polymetallic Nodules in the Eastern Part of the Clarion-Clipperton Fracture Zone. *Front. Mar. Sci.* 4:103. doi: 10.3389/fmars.2017.00103
- Dick, G.J. (2019) The microbiomes of deep-sea hydrothermal vents: distributed globally, shaped locally *Nat. Rev. Microbiol.*, 17, 271–283.
- DSM Observer (2020) The last days of Nautilus Minerals.
<https://dsmobserver.com/2020/05/the-last-days-of-nautilus-minerals/>
- Dunn, D.C., Van Dover, C.L. et al. (2018) A strategy for the conservation of biodiversity on mid-ocean ridges from deep-sea mining. *Sci. Adv.* 4: eaar4313
- Hilário, A. , Metaxas, A., et al. (2015) Estimating dispersal distance in the deep sea: challenges and applications to marine reserves. *Front. Mar. Sci/ Deep-Sea Environments and Ecology* . 2, 6, 1-13.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00006>
- International Seabed Authority, Legal and Technical Commission (2013) Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for marine minerals in the Area (ISBA/19/LTC/8).
https://isa.org.jm/files/files/documents/isba-19ltc-8_0.pdf
- International Seabed Authority, Legal and Technical Commission (2016) Review of the implementation of the environmental management plan for the Clarion-Clipperton Fracture Zone (ISBA/22/LTC/12).

- <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N16/180/18/PDF/N1618018.pdf>
- Jannasch, H. W. & Wirsén, C. O. (1979) Chemosynthetic primary production at East Pacific sea floor spreading centers. *Bioscience*, 29, 592–598 .
- Kato, Y., Fujinaga, K., et al. (2011) Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nat. Geosci.*, 4, 535-539 (2011)
- Konno, Y. & Nagao, J. (2021) Methane hydrate in marine sands: Its reservoir properties, gas production behaviors, and enhanced recovery methods. *J. Jap. Petro. Inst.*, 64, (3), 113-122.-
- McNichola, J., Stryhanyukb, H., et al. (2018) Primary productivity below the seafloor at deep-sea hot springs. *PNAS.*, 115, 26, 6756–6761. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1804351115
- Miljutina, D.M., Miljutinaa, et al. (2011) Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific). *Deep Sea Res. Pt. I*: 58, 885-897. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2011.06.003>
- Miller, K.A., Thompson, K.F., et al. (2018) An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps. *Front. Mar. Sci.* 4:418. doi: 10.3389/fmars.2017.00418
- Mullineaux, L.S., Metaxas, A., et al. (2018) Exploring the Ecology of Deep-Sea Hydrothermal Vents in a Metacommunity Framework. *Front. Mar. Sci.* 5:49. doi: 10.3389/fmars.2018.00049
- Nakagawa, S. & Takai, K. (2008) Deep-sea vent chemoautotrophs: diversity, biochemistry and ecological significance. *FEMS Microbiol. Ecol.* , 65, 1–14.
- Ohta, J., Yasukawa, K., et al. (2020). Fish proliferation and rare-earth deposition by topographically induced upwelling at the late Eocene cooling event. *Sci. Rep.*, 10:9896 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66835-8> 1
- Pradeep A. S. (2021) The two-year deadline to complete the International Seabed Authority’s Mining Code: Key outstanding matters that still need to be resolved. *Mar. Policy*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104804>
- Ramirez-Llodra, E., Tyler P.A., et al. (2011) Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea. *PLoS ONE* 6(7): e22588. doi:10.1371/journal.pone.0022588
- Rogers, A.D. (2018) The Biology of Seamounts: 25 Years on. *Adv. Mar. Biol.*, Volume 79,137-224. <https://doi.org/10.1016/bs.amb.2018.06.001>
- Simon-Lledó, E., Bettl, B.J., et al., (2019) Biological effects 26 years after simulated deep-sea mining. *Sci. Rep.*, 9:8040 | <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44492-w>
- Takaya, Y., Yasukawa, K., et al. (2018) The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. *Sci. Rep.*, 8:5763 | DOI:10.1038/s41598-018-23948-5
- Van Dover, C. L. (2014). Impacts of anthropogenic disturbances at deep-sea hydrothermal vent ecosystems: a review. *Mar. Environ. Res.* 102, 59–72. doi: 10.1016/j.marenvres.2014.03.008
- Van Dover, C. L., Ardrón, J. A. et al. (2017) Biodiversity loss from deep-sea mining. *Nat. Geosci.*, 10,464-465.

- Vanreusel, A., Ribeiro, P.A., et al., (2016) Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna. *Sci. Rep.*, 6:26808. DOI: 10.1038/srep26808
- Verlaan, P.A. & Cronan, D.S. (2022) Origin and variability of resource-grade marine ferromanganese nodules and crusts in the Pacific Ocean: A review of biogeochemical and physical controls. *Geochemistry*, 82 (2022) 125741
- Wedding, L. M., Reiter, S. M., et al. (2015) Managing mining of the deep seabed. *Science*, 349, 144–145. doi: 10.1126/ science.aac6647
- Yasukawa, K., Nakamura, K., et al. (2016) Tracking the spatiotemporal variations of statistically independent components involving enrichment of rare-earth elements in deep-sea sediments. *Sci. Rep.*, 6:29603 | DOI: 10.1038/srep29603 2
- 伊藤福夫 (1981) マンガンノジュールの開発の概要、エネルギー・資源、Vol.2, 2, 131-137.
- 木川栄一 編(2018) SIP「次世代海洋資源調査技術」(海のジパング計画)海底熱水鉱床調査技術プロトコル、改訂版 国立研究開発法人海洋研究開発機構/次世代海洋資源調査技術 プロジェクトチーム、59pp.
- 木川栄一(2020) 非在来型海底資源:成因と開発の現状、EXPLOSION, 30(2), 94-99.
- 清田雅史(2019) 着底漁業が脆弱な海洋生態系(VME)に及ぼす影響の評価と管理、日本水産学会誌、85(6)、562-574.
- 経済産業省 (2019) 海洋エネルギー・鉱物資源計画
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12213398/www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/strategy/pdf/report1902.pdf
- 経済産業省資源エネルギー庁・石油天然ガス・金属鉱物資源機構(2018)
 海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書 <https://www.jogmec.go.jp/content/300359550.pdf>
- 国立環境研究所(2021) 海底資源開発での環境影響評価に関わる調査手法が国際標準規格として発行。<https://www.nies.go.jp/whatsnew/20210927/20210927.html>
- 砂層型メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム:MH21-S, HP
<https://www.mh21japan.gr.jp/>
- 水産庁(2015) 平成 26 年度国際漁業資源の現況 71,クサカリツボダイ 天皇海山海域
- 鈴木勝彦、臼井朗(2018) SIP『次世代海洋資源調査技術』研究開発成果資料集 コバルトリッチクラストの成り立ちー調査手法の確立に向けてー(改訂版)、国立研究開発法人海洋研究開発機構/次世代海洋資源調査技術 プロジェクトチーム、65pp.
- 石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC: ニュースリリース (2013, 2017,2020)
www.jogmec.go.jp
- 内閣府 (2008) 海洋基本計画 第1期
<https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan01/pdf/plan01.pdf>
- 内閣府(2018)海洋基本計画 第3期
<https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan03/pdf/plan03.pdf>
- 内閣府(2021). 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期: 革新的深海資源調査技術研究開発

- 計画(https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/12_shinkai.pdf)
- 内閣府(2022) 戦略的イノベーション創造プログラム「革新的深海資源調査技術」レアアース泥採鉱装置による水深 2,470m 海域からの海底堆積物揚泥試験の成功について。
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20221018/
- 内閣府(2023) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)海洋安全保障プラットフォームの構築
社会実装に向けた戦略及び研究開発計画(案)
https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/pdf/230201_besshi_5.pdf
- 日本学術会議・総合工学委員会・持続可能なグローバル資源利活用に係る検討分科(2008)
提言：鉱物資源の安定確保に関する課題とわが国が取り組むべき総合的対策。
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-t60-6.pdf>
- 武内 壽久 禰、相原 安津 夫、小松 直 幹、土井 和 巳(1991)わが国における資源探査の歴史、地学雑誌、100(1) 93-102.
- 中田達也(2020) 国際海底機構の開発規則策定状況と日本の課題、海の論考 OPRI Perspectives 第12号、1-20.
- 野崎達生 他(2016) 第4の海底鉱物資源『レアアース泥』. Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 70, 90 – 96.
- 細縦侑貴穂, 馬場雄三, 久保田富生子, 後藤雅宏(2012)海底資源マンガノジュールの魅力と課題.
Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 66, 308–313.
- 町田嗣樹 他編(2018) SIP『次世代海洋資源調査技術』研究開発成果資料集 レアアース泥の成り立ち—調査手法の確立に向けて—(改訂版)、国立研究開発法人海洋研究開発機構/次世代海洋資源調査技術 プロジェクトチーム、39pp.
- 松本良(2009) 総説 メタンハイドレート—海底下に氷状巨大炭素リザーバー発見のインパクト—
地学雑誌、118(1), 7-42.
- 湊谷純平(2019)コバルトリッチクラストにおけると取組と成果:環境調査—国際鉱区における環境調査—、令和元年度第3回 JOGMEC 金属資源セミナー。
https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2019/07/mrseminar2019_04_08.pdf
- 山崎哲生(2015)深海底鉱物資源開発の過去・現在・未来、Journal of the MMIJ, Vol.131, 592-596.