

深海へ—海底採掘に向けた慎重な段取り

チャールズ・W・シュミット (Charles W. Schmidt)

『環境健康展望』(Environmental Health Perspectives) 123巻9号 (2015年9月) より

翻訳: 杉野 実 (NPO 法人市民科学研究室)

原題: Charles W. Schmidt “Going Deep: Cautious Steps toward Seabed Mining”

Environmental Health Perspectives VOLUME 123 ISSUE 9 SEPTEMBER 2015

<http://ehp.niehs.nih.gov/123-A234/>

<http://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/123/9/ehp.123-A234.alt.pdf>

海底は、たとえばこのタケサンゴ (*Isidella tentactum*) のようなつい最近発見されたものをふくむ、豊富な生物種の故郷である。海底鉱業は地上での採掘よりも生態系への打撃が少ないと、その支持者らは主張する。だが海底鉱業は深海生態系を圧倒し、海洋の健康にも影響しうると、懸念する研究者もいる。

深海はかつて、不毛で生命のないものとされていた。今日では、もっとも深い海でさえも生物であふれていて、そのなかのあるものは、生命そのものが地球に出現してからほとんどかわっていないということが、わかっている。深海はまた、世界の温度を調整し、炭素を蓄積し、かぞえきれぬ生物種に住居を提供し、海洋食物連鎖のために栄養分を循環させるなどして、地球生物圏にとって重要なものにもなっている。

汚染・商業的漁獲・石油ガス開発などにより圧迫されている、この冷たく暗い水域はいまや、鉱業という次なる挑戦にもさらされている。地上の鉱物資源がへっているいま、海底は新しく大きな未開発の領域を鉱業に提供しており、銅・亜鉛・マンガンその他の貴重な鉱物資源を、企業は急速に海底からほりだそうとしている。

科学者・規制庁および鉱業会社は、責任ある海底鉱業の戦略的枠組みをつくるために、提携しようとしている。デューク大学の海洋研究所長で、同大学の海洋保全科学部長でもあるシンディ・ファン・ドーバー氏は、海底鉱業は不可避であり、それははげみになる課題でもあるという。

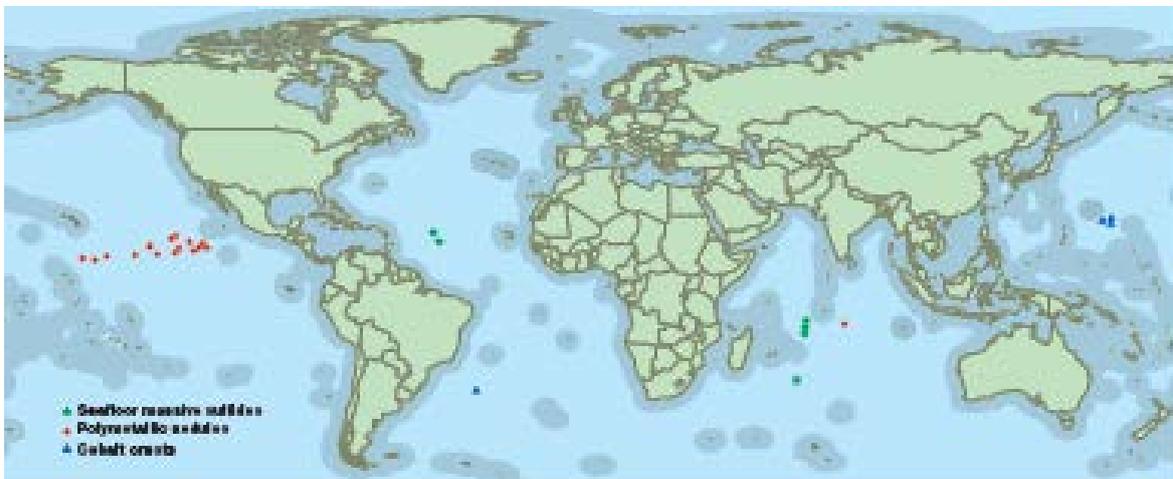
「環境に関してはさまざまな協約がなされてきました。100年後、人々は過去をふりかえり、私たちが権利をえたのかと問うでしょう。権利をえることを、保証せねばなりません。」

銅鉱の等級、すなわち採掘された地層単位あたりにふくまれる銅の比率は、19世紀末には10から20パーセントと高かったのが、現在では1パーセント未満にまで下がっている。

これに対して、パプアニューギニア沖水深1600メートルで、カナダのノーチラス社が2018年の採掘を予定している海底の銅等級は、平均7.2パーセントになる。マンガン・コバルト・ニッケル・銅がさまざまな比率でふくまれている、多重金属ノジュールが、太平洋・大西洋・インド洋の、6000メートルまでの海底に、5000億トンほどちらばっていると、推定されている。

地域社会を移動させ、生態系すべてを除去し、浸食を悪化させ、地下水や大小の河川を汚染する、地上の鉱業にくらべて、深海からの鉱物採取が、環境におよぼす影響は小さいと、その支持者らは保証する。だがハワイ大学マノア校の生物海洋学教授クレイグ・スミス氏によると、海底炭鉱もまた膨大な沈殿物を攪拌し、そのなかには鉱山それ自体よりずっと広い範囲に定着するものもあるという。そういう攪拌が広範な生態学的打撃をひきおこし、まだよく知られていない深海の動物を死滅させることを、科学者らはおそれている。海健康については、すでにさしせまっている危機がほかにあるというのに、適切な規制がなされなければ、基本的な生態学的サービスを提供する海的能力を、海底鉱業がさらに浸食することになると、かれらはいう。

「深海生態系は信じられないほど脆弱です」とスミス氏はいう。「採掘が始まってしまえば、そのなかのどれひとつとして回復する機会がないままに、広範な諸地域が影響をうけるかもしれません。」



国際海底機構はこれまでに、「領域」すなわち個別国境の外にある広大な国際海底の諸部分（地図上では灰色で表示）について、26の探査協約を発令してきた。現在までに探査協約の対象となった領域の面積は約200万平方キロメートルに達する。開発協約はまだ発令されていない。

審判席にすわる国際海底機構

海底鉱業の環境的展望はかなりの程度まで、国際海底機構とよばれる集団の考慮により左右される。国際海底機構は、世界のほとんどの国（アメリカ合衆国はふくまない）が批准した国際海洋法条約に、もとづいて設立された。国際海洋法条約は、海底資源の使用と保全を管轄する。国際海底機構はその文脈にしたがい、特定国の排他的経済水域をこえた国際海底、つまり「領域」として知られる水域における、あらゆる鉱業関連活動を、組織し規制する権限を有している。度の沿岸国も沿岸から200海里までの排他的経済水域を主張できるが、その範囲内では沿岸国が鉱業を規制する責任をおう。

国際海洋法条約は「領域」を、主権国家の直接的な請求対象とはならない、「人類の共通遺産」と定義している。国際海底機構は、「領域」における鉱業協約を、鉱業権料をはらう政府や企業に対して発令することによって、この遺産を管理している。権料が「共通遺産」からの採掘からくるといので、海底機構はその料金を発展途上国に再分配するとしているが、その詳細なしくみはまだ策定の途上にある。

鉱業権料を徴収して再配分し、また海洋環境を保全するという、ふたつの任務のあいだには伝統的な緊張があるので、懐疑派は国際海底機構を「鳥小屋のキツネ」とよぶ。同機構の法律顧問で事務次長であるマイケル・ロジ氏は、「ことなる利害集団がことなる部局にいて、全体に抑制と均衡がはたらいています」という。

国際海洋法条約が実施された1994年以前には、国際連合のもとでいわゆる先駆者体制が確立されていて、資源採掘にすでに投資していた企業に「先駆者請求権」が交付されることになっていた。1984年には、75000平方キロメートルの海域におよぶ、鉱物採掘にかかわる6件の先駆者請求権が交付されたと、ロジ氏はいう。10年後に国際海底機構が設立された際、それらの請求権は公式の協約へと移管された。

同氏によると、1984年から2011年にかけて、国際海底機構は新規の協約を交付しなかったものの、探査の規制を同機構が完成させると同時に、協約が激増したという。国際海底機構はこれまでに、約200万平方キロメートルの海底に関係する、26件の探査協約を交付してきた。鉱物を実際に採掘するための開発協約も、関連する規制が完成すれば公布されるであろう。

ウッズホール海洋研究所の地質学者で探査機工学者であるモーリス・ティベイ氏は、ふたつの収斂する要因が探査を急増させているという。そのひとつは石油・ガス産業で強化されている技術革新であり、それは次第に深海に移動してきている。もうひとつの要因は意図された需要の激増であって、それはハイブリッドカー部品・スマートホン・コンピューター・ソーラーパネルその他多数の電子機器で使用される、銅や、あるいは「希土類」をふくむ他の鉱物においてみられる。オランダ・アムステルダムに本拠をおく「深海保全連合」の法律政治顧問ダンカン・キュリー氏は、政府や企業は海底鉱業について、鉱物が将来不足してその価格が上昇し、したがって事業が十分効率的になるであろうとの、長期

的な展望をもっているであろうという。

深海鉱物の種類

有用な鉱物をふくむ海底堆積物には3種類がある。水深1500から2500メートルの、比較的浅い水域において、もっとも容易に入手できる堆積物は、海底塊状硫化物である。それが生じるのは、海嶺とよばれる火山活動が活発な領域（地殻プレートが発散するところ）や海底火山列のように、地殻の亀裂を通じて、海水が濾過される場所においてである。冷たい海水が、それらの地質学的拠点の下にある熱い岩と反応して、水柱に過熱流体をはきだす熱水口となる。熱水口はある場合には、「黒い愛煙家」とよばれる煙突状の構造をなすが、それは硫黄をふくむ物質を雲状に放出し、それが海底塊状硫化物となって堆積する。この堆積物は典型的には銅や亜鉛を高濃度にふくみ、金銀をふくむこともある。

多重金属ノジュールは、かなりの程度、より広範にみられる堆積物である。地球表面の60パーセントにおよぶとみられる、深海底平原にそれはちらばっている。そのように平らで広大な海底は、平均して水深3000メートルから4000メートルのところに広がっている。この種の堆積物に関する探査協約の80パーセントは、クラリオン・クリッパートン破碎地帯とよばれる、メキシコからハワイにまでおよび、水深は4000メートルから5000メートルに達する、広大な地帯に位置する。直径が5から10センチメートルで半分海底にうまっている、再生可能なノジュールが、同地帯には数十億トンあるとみられる。

富コバルト地殻は、海底堆積鉱物の3種類目にあたる。これはみつかるとは、より浅い水域の、海底山脈ないし「海山」においてである。採掘可能なものの大部分は、水深700から2500メートルのところにある。富コバルト地殻は、数百万年にわたり、鉄やマンガンが海水から落下してくるところに形成される。それはまたコバルト・ニッケル・テルルや希土類元素をもふくむが、それらはかたい岩の表面上に、厚さ平均25センチメートル以下の層状に集積する。



多重金属ノジュール（左）。ナマコ的一种 *Psycholopotes longicauda* とともにみえる海底の斑点がそれだが、このような海底は地球表面の3分の2をおおうという。クラリオン・クリッパートン破碎地帯にあるとみられる、数十億トンにおよぶ、再生可能なノジュールの、一部がこれである。

黒い愛煙家として知られる、熱水口の周囲にある海底塊状硫化物（下左）。暗い「けむり」が実際に熱水口から排出され、それにふくまれる鉱物が、熱水口の土台付近に定着する。この「愛煙家」は、パプアニューギニア沖の東マヌス海盆に位置している。

水深350メートルのところで、フウセンガムサンゴ (*Paragorgia arborea*) の群落とともにみられる富コバルト地殻（下右）は、高速の海流にさらされた海底山脈で発見された。この種の堆積物を採掘するための技術に、実質的に投資している国は日本だけである。

ことなる種類の鉱物が、さまざまな生物相にかこまれている。海底塊状硫化物のなかには独自の生物多様性をもつものがあるが、その他の鉱物を住居とするのは、ハオリムシ・二枚貝・巻貝・エビ・カニおよび寒水サンゴをふくむ、生物種の豊富な集合体である。熱水口食物連鎖の底辺にいる細菌その他の単細胞生物は化学合成をするが、それはかれらが、日光による光合成ではなく、無機分子の酸素からエネルギーをえることを意味する。



海底塊状硫化物の標本が、日本の研究所で地質学的分析をまつ。深海堆積物は、貴金属・希土類その他有用鉱物の豊饒な源泉となりうる。

「地球上のすべての生命が、そういう熱水生態系から出現したということもありえます」と、海洋保全生物学者で、アラスカ・アンカレッジ在住の保全コンサルタントでもあるリチャード・シュタイナー氏はいう。「でも熱水口生態系は世界に（推定）500しかなく、それぞれが1平方キロメートルとされていますから、大変まれなものともいえます。」

海底塊状硫化物生態系は、暴力的な動乱から早急に回復するように進化したと、科学者は指摘する。現にソルワラ1サイトは、ティベイ氏らによる未発表の研究によれば、2005年から2011年のあいだに600万トンの新規堆積物を放出した活火山から、500メートルもはなれていないところに位置している。しかし鉱業は不活発な熱水口においても計画されており、それらにはそれほどの回復力がなくて、回復するとしても緩慢にしかないであろうと、スクリップス海洋学研究所のリサ・レビン教授はいう。

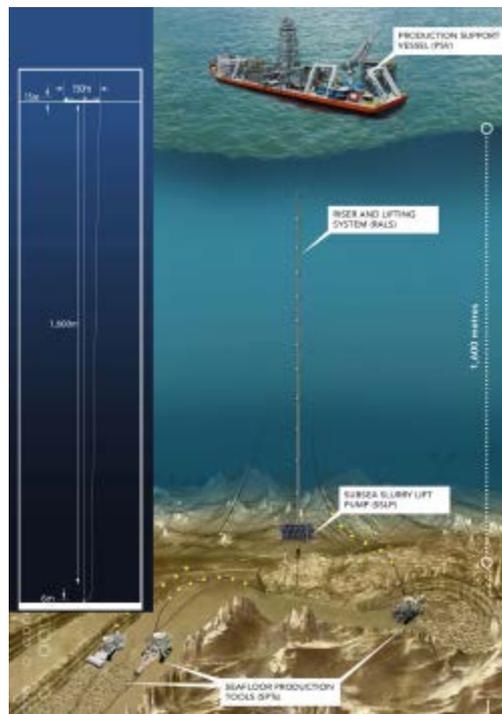
深海底平野に住む生物について科学者が知ることは少ないが、温度が氷点付近にしかなく圧力が非常に高いという環境に、かれらが大変よく適応していることはわかっている。生物の大きさが制限され、成熟がおそく、代謝・生殖および群居性の水準が非常に低いことなど、研究があきらかにしてきたことも多い。

また深海底平野へのあらたな堆積物の追加は、海表面からの粒状物質の漸次的な追加に依存している。それらにふくまれるのは、プランクトンその他生物の死骸のほか、少しずつ

風にとばされてくる無機鉱物、特に珪砂である。イギリス・ロムジーの「海洋風景コンサルタント」所長フィリップ・ウィーバー氏によると、海底平野への新規堆積物は、1000年に平均で2から3センチメートルしか蓄積しない。もっとも深い平野ともなれば、同様の時間幅でわずか0.5から1センチメートルしかふえないともいう。

ハワイ大学のスミス氏は、生物学的生産が活発でなく、堆積も緩慢な深海平野においては、鉱業からの回復は数百年間はなされないであろうという。このみかたを支持する証拠もすでにある。1978年に実験を開始した科学者らは、クラリオン・クリパートン破碎地帯から多重金属ノジュールをすくいとり、幅1.5キロメートル・深さ4.5センチメートルの堆積物に、標識をおいてきた。26年後にちがう研究チームが同一地点にもどってきたとき、まるで宇宙飛行士が月に残してきた足跡のように、その標識はまだはっきりと確認された。ところが標識中の線虫集団は、ノジュールが採取されなかった近隣地点と比較して、個体数と多様性が顕著に低いというかたちで、依然として阻害されていた。

これに対して、富コバルト地殻が発見される海山では、生物学的生産性が高くなる傾向がみられると、レビン氏はいう。「物理学的に言えば、水の動きがはげしいところでは、サンゴも魚も育ちやすいということでしょう。」しかしそのような生態系も成長はゆっくりしており、100年以上生きる魚もいるかもしれないという。「現段階では、このような生態系もまた、動乱から緩慢にしか回復しないものとみこまれます。」



ノーチラス鉱物計画は、海底塊状硫化物の堆積物を、海上から多様な切断・最終器具を使用して、採掘しようというものである。鉱物と海水からなる泥漿が、リフト昇降装置を通じて、表面にまですいあげられる。泥漿は補助船上で脱水され、鉱物だけが沿岸に輸送される。生態系への潜在的な影響を軽減するために、濾過された海水はリフト昇降装置を通じて海底にもどされ、その際に水力電気もポンプに供給される。

探査

岩石に付着している富コバルト地殻は移動させにくい。岩石は鉱石の品質を悪化させるので、鉱業者は岩を多くとりすぎることなく鉱物を回収しなければならない。国際海底機構によると、コバルト回収技術に実質的に投資しているのは日本だけである。他国ではその技術は初歩的段階にある。

海底塊状硫化物サイトにおいては、遠隔操作される機器で、厚さ30メートルまで、破碎・切断して鉱道をつくることができるので、岩盤問題の解決はより容易である。だがそういう場所に足跡を残した者も少ない。たとえばパプアニューギニア沖のノーチラス鉱物社の「ソルワラ1」サイトでは、海底下20から25メートルまで掘削されているが、そのサイトの面積は0.11から0.14平方キロメートルにすぎないと、同社環境部長レニー・グロガン氏はいう。同氏によれば、地上での鉱業にくらべ「これはとても小さな足跡にすぎません、莫大なものと予想される鉱物の収量と比較するなら」。

一方多重金属ノジュールは、海底堆積物の表面下5から10センチメートルから、「真空吸引」される。国際海底機構によれば、多重金属ノジュールは、収量が10キログラム毎平方メートルをこえなければ利益をあげない。ある推計によれば、利益のあがるサイトは毎日1平方キロメートルの海底を採掘し、そしてこの産業が成熟すれば全世界で毎年12000平方キロメートルの海底を蹂躪するであろうという。「しかし」とスミス氏はいう。「海底平野はおそらく、世界でもっとも広範囲に分散している生態系でしょう。したがって（採掘が）うまく管理されれば、影響される場所の比率はずっと低くなるはずです。」

採掘されるのがどこであろうと、海底鉱業はいくらかの堆積物を攪拌し水けむりをまきおこすが、それはときとして鉱業サイトそれ自体よりも広範囲に沈降する。水けむりはさまざまな潜在的影響をおよぼしうる。表面付近の水けむりは、日光の透過と水温を下げるが、それがまたプランクトンの成長を阻害して、食物連鎖にまで影響するかもしれない。堆積物が底生生物、特に深海平野に着生するそれらを窒息させるおそれもあるが、そういう生物は、それほど多量の堆積物が上からふってくることに適応できるようには、進化していないともみられる。

そればかりか水けむりは、とりわけ海底塊状硫化物サイトから排出される場合には有毒であり、デューク大学のファン・ドーバー氏によれば、有害な量の鉛・砒素・銅その他の、一度は廃物中に吸着された元素を放出しうる。銅は抗着生剤でもある点を同氏は指摘する。「銅が水中に放出されれば、生物はその汚染に抗してたたかわねばなりません。」

場所によっては水けむりの影響は少ないかもしれない。グロガン氏によると、あるモデルが示唆するには、ソルワラ1で生成される水けむりは、採掘地点から600メートル以内に堆積し、「域外への非常に小さい影響」しかおよぼさないという。同氏がつけくわえることには、ソルワラ1は大変活発な火山に隣接しているので、火山がそれ自体で相当量の水けむりを発生させているし、そのため生物も噴火によく適応していて、鉱業の影響はさらに

小さくなるのではないかともしいう。

MIDAS（深海資源開発の影響管理）は、深海鉱業による水けむりの潜在的な生体毒物学的効果を、現在調査している研究計画のひとつである。ヨーロッパ委員会から3カ年の贈与をえてMIDASは、深海鉱業のために最善の方法を開発するという目的をもって、複数個所で広範な調査を実施する。

この研究に参加する、ポルトガル・アルガルベ大学のポスドク助手であるネリア・メストル氏によると、水けむりが深海の生物にどう影響するかについては、多くのことがまだわかっていないという。高圧と低温が生物による毒物の摂取可能性に影響し、したがって深海の生物はより浅いところの生物にくらべて、水けむりの毒性に対してより敏感にも鈍感にもなりうるというのである。

「耐性の相違は双方向に作用しえます」と同氏は説明する。「たとえば海底塊状硫化物と共存する生物は、『黒い愛煙家』が放出する、浅い海に生物には有毒な化学物質に適応しています。MIDAS計画がおわるまでに、浅海の生物と比較した際の、化学物質が深海の生物におよぼす潜在的影響について、指標がえられていることを希望します。」



この八射サンゴは、メキシコ湾の水深1500メートルのところに生息する。海洋は地球生物圏の基本的な調整機であり、またその深層水は、まだ発見されていない、治療効果のある物質の作用によって、人体の健康に直接の利益をおよぼすかもしれない。海洋を研究する科学者について、シンディ・ファン・ドーバー氏は「私たちは、地球の大部分をおおう領域、でも多くの人がそれについて日々考えることなどない領域について、考える新種の科学者なのです」という。海底にはまだ多くのなぞがあるが、と同氏はつけくわえる。「はっきりわかっているのは、地球の健康は海の健康に依存しているということです。」

保護の枠組み

ジャマイカ・キングストンで2週にわたり開催された2015年7月の会議で、国際海底機

構は海底資源開発のための枠組みを起草し始めた。そして同じ7月、スミス氏と10人の同僚らは『サイエンス』に論文を発表して、「海洋保護領域」を創設し、国際海底機構には「標的となる各地域において、海洋保護領域の連携が設定され実施されるまで、これ以上の開発協約の認可を（停止）する（そして、開発協約を認可しない）」ことを要請することを強調する、海底鉱業に対する予防的方策を推奨した。世界の深海生態系の一定部分が、毀損されず生命にみちていることを保証するために、海洋保護領域の連携が必要とされていると、スミス氏は論じている。

約140万平方キロメートルを保護する、クラリオン・クリッパートン破碎地域のための暫定的環境管理計画が、国際海底機構により2012年に策定された。しかし国際海底機構が探査協約を交付し続けている、太平洋・大西洋・インド洋の諸地域においては、環境管理計画が策定されていない。

スミス氏とその共著者らは、海洋保護領域がたがいに遠くはなれすぎていると、地域的絶滅をふせげるだけの連続性がなくなるのではないかと懸念している。「国際海底機構に対して批判的になりすぎたくはありませんが、そういう地域的な環境管理計画をすぐ実行する必要があります」と同氏はいう。「破碎地帯での探査の要求はすでに、その一部の地域では、環境管理計画を作成するわれわれの能力をそこなっています。」

これに対してロッジ氏は反駁する。「環境データを収集するには探査するしかないので、協約の停止にも探査猶予期間の設定にも根拠はありません。探査停止は自滅的です。」ロッジ氏によると「国際海底機構はいまや、探査協約の飽和に直面しています」。おそらく10の、有望だがいまだ探査協約がなされていない他の領域があるが、少数の計画領域の周囲に工業が集中しているとも、同氏はいう。未開発であった領域で探査が成功してこそ、深海鉱業は巨大な成長をもたらすのではないかともしいうのだ。

科学者その他、環境に関心をもつ人々が希望するのは、そういう成長が、重要な生息地を保護する努力の成功と均衡することだ。そういう努力は、ファン・ドーバー氏が「美しくめずらしく重要である」という、熱水口に焦点をあてるべきだと同氏はいう。

スミス氏は絶滅の可能性を道徳的問題とみて、「深海は進化の材料です。大量絶滅は、われわれの地球を比類なきものにしていくものに、重大な影響をおよぼします」と指摘する。そして熱帯雨林のような、やはり危険にさらされている他の生息地と同様に、深海もまた、将来医薬品や、人類に恩恵をもたらす他の産物を開発するのに利用される、生物資源を内蔵しているのかもしれない。「私たちは、世界でもっとも大きく、しかしもっともわずかにしか知られていない、生物群系について語っています」とシュタイナー氏はいう。「そしていまのところ、保護されているのはそのなかのわずかな一部だけなのです。」■