

称号及び氏名 博士（工学） 中島 康晴

学位授与の日付 平成 24 年 9 月 30 日

論文名 「海底熱水鉱床開発に係る環境影響評価を目的とした
硫黄細菌の動態に関する研究」

論文審査委員 主査 大塚 耕司
副査 山崎 哲生
副査 馬場 信弘
副査 石井 孝定
副査 中谷 直樹
副査 宇都正太郎

論文要旨

本研究は、将来の貴重な金属鉱物資源として注目されている、海底熱水鉱床の開発に係る環境影響評価に資することを目的として、深海に生息する代表的な生物種の1つである硫黄細菌 (*Beggiatoa*) をモデル生物として、フィールド調査、ラボ実験及び生態系モデルを用いた解析により、環境因子の変動に対する *Beggiatoa* の応答特性を研究したものである。

海底熱水鉱床とは、海底から噴出した熱水に含まれていた金属硫化物が析出・沈殿し、海底に堆積することにより形成されたものである。近年の新興国の経済発展に伴う世界的な資源高を背景として、我が国では海洋エネルギー・鉱物資源開発計画において海底熱水鉱床開発のロードマップが策定されるなど、海底熱水鉱床の開発を目指す動きが加速されている。その一方、熱水噴出域には、化学合成生態系と呼ばれる固有の生物群集が存在することが知られており、海底資源の開発においては環境保全や生物多様性の保全との両立が強く求められている。このため、海底熱水鉱床開発計画では、海底熱水鉱床の資源量評価や採鉱技術等の開発と並んで、環境影響評価に関する研究開発が主要な研究項目の1つとして含まれており、開発想定海域の環境ベースライン調査、環境影響予測モデルの開発、ならびに環境保全策の策定が実施されている。このうち、環境影響予測モデルの開発では、海底での採掘による海底攪乱や海中に放出された微粒子の再堆積などの予測とともに、それにとまなう海洋生物への影響の予測を行うためのモデルの開発が行われているが、海底生物に関する知見やデータの不足、特に環境因子の変動に対する底生生物の応

答特性が明らかになっていない。

このような問題を解決するため、本研究では、貧酸素的な海底に広く生息する生物の1種である硫黄細菌 (*Beggiatoa*) に着目した。*Beggiatoa* は硫化水素を酸化することによりエネルギーを得る化学合成独立栄養細菌であり、熱水噴出域周辺のような硫化水素に富む環境においては繁殖してバクテリアマットを形成することが知られている。また、酸素を必要とする細菌ではあるものの比較的溶存酸素濃度 (DO) の低い環境でも生息することができ、貧酸素的な海底において繁殖していることが多く観察されている。そこで、海底熱水鉱床開発の影響を模擬した環境因子の変動が生じる閉鎖性沿岸域をモデルフィールドとして、環境因子である水温や DO の変動を長期的にモニタリングするとともに、バクテリアマットの消長などの *Beggiatoa* の動態調査を実施した。環境因子である水温や DO の変動に対する *Beggiatoa* の応答特性を把握することは、環境予測モデルの構築にとって、貴重な情報を提供することになる。さらに、*Beggiatoa* の生菌体を用いたラボ実験により、人為的な環境変動を与えた場合における *Beggiatoa* の応答についての知見を得た。そして、*Beggiatoa* を構成要素として含む生態系モデルを構築し、このモデルを用いて環境因子、特に水温と DO の変動が *Beggiatoa* 及びその捕食者の生物量にどのような影響を及ぼすのかを解析し、*Beggiatoa* の応答特性を解明した。

本研究で得られた成果を以下に要約する。

第1章では、研究の背景として、新たな金属鉱物資源として注目されている海底熱水鉱床の開発に関する国内外の情勢を述べた。海底熱水鉱床は、海洋底プレートが形成される中央海嶺系と、島弧-海溝系において発見されている。西太平洋の島弧-海溝系に属する我が国の排他的経済水域 (EEZ) には、海外と比較して、銅、鉛、亜鉛などの有価金属の品位が高い海底熱水鉱床が多く存在し、その水深も概ね 700~1600m の範囲に収まっていることから、将来の貴重な金属鉱物資源として期待されている。その一方、熱水噴出域には、化学合成生態系と呼ばれる固有の生物群集が存在することが知られている。近年の環境保全意識の高まりを受けて、海底資源の開発においては環境保全や生物多様性の保全との両立が強く求められていることを述べた。

第2章では、パプアニューギニアと我が国における海底熱水鉱床の開発に係る環境影響評価に関する研究開発の事例をとりまとめた。パプアニューギニアでは、世界初の海底熱水鉱床の開発プロジェクトが進行中であるが、開発鉱区の申請に先立って詳細な環境影響評価が実施されている。我が国においても、環境ベースライン調査、環境影響予測モデルの開発、ならびに環境保全策の策定を柱とする環境影響評価の研究が実施されている。現在想定されている海底熱水鉱床の開発計画では、鉱石の採掘による直接的な海底の攪乱とともに、採掘に伴い巻き上げられた微粒子や、揚鉱廃水とともに海中に排出された微粒子の拡散及び再堆積などが発生すると予測されている。さらに、揚鉱廃水は、船上で鉱石を回収するための固液分離プロセスにおいて大気と接触するため、通常の下層海水と比較して溶存酸素濃度や水温が高くなる。商業的な資源開発では、1日あたり数万トンもの海水が海底から鉱石とともにスラリーとして揚鉱され、船上の処理プロセスを経て、再び下層へと輸送されると想定されており、揚鉱廃水の放出は、海中に広く微粒子を分散させるとともに、海上から下層に向かって酸素や熱を輸送する作用をも有している。環境影響評価においては、開発に起因するこのような環境因子の変動が海洋生物に及ぼす影響を予測することが必要となる。特に、海洋下層の生物群集への影響の予測は重要な課題であるが、予測モデルの開発に必要な、環境因子の変動に対する底生生物の応答特性はほとんど知られていないことがネックとなっていることを述べた。

第3章では、環境因子の変動に対する底生生物の応答特性を探るためのモデル生物として、貧酸素的な海底に広く生息する生物の1種である硫黄細菌 (*Beggiatoa*) に着目した。*Beggiatoa* は硫化水素を酸化することによりエネルギーを得る化学合成独立栄養細菌であり、熱水噴出域周辺のような硫化水素に富む環境においては繁殖してバクテリアマットを形成することが知られている。また、酸素を必要とする細菌ではあるものの比較的溶存酸素濃度 (DO) の低い環境でも生息することができ、貧酸素的な海底において繁殖していることが多く観察されている。さらに、海

底熱水鉱床開発による環境因子の変動を模擬するためのモデルフィールドとして閉鎖性沿岸域を選定した。このモデルフィールドでは、主要な環境因子である水温や DO が季節的に変動することが知られており、2カ年にわたって環境データの連続的なモニタリングを実施するとともに、バクテリアマット形成を中心とした *Beggiatoa* の動態調査を実施した。調査の結果、季節的な水質環境の変動特性と *Beggiatoa* の動態との関連性が示された。すなわち、夏季には底層付近の水温は比較的高いが DO はきわめて低い貧酸素的な環境となり、*Beggiatoa* が増殖してバクテリアマットを形成する。冬季には水温が低下するものの DO は比較的高くなり、*Beggiatoa* は減少してバクテリアマットが消失することが明らかになった。しかし、*Beggiatoa* は死滅するわけではなく、堆積物の深さ数 cm の位置に生息していることが確認された。このような調査の結果、フィールドにおける環境因子の変動と *Beggiatoa* の動態との因果関係についてとりまとめた。

第4章では、*Beggiatoa* の運動能力を把握するため、海底堆積物試料とともに採取した *Beggiatoa* を用いて、実験室内において動態を把握するための実験を実施した。堆積物層内の NO_x、アンモニア態窒素、硫化水素等の濃度を測定し、*Beggiatoa* の生息域と比較したところ、酸化層と還元層の中間の位置に生息すること、また、*Beggiatoa* は自己に最適な環境を求めて堆積物中を上下方向に滑走運動することが観察された。*Beggiatoa* の滑走運動は、揚鉱廃水の放出による微粒子の再堆積の影響を評価する上で、1つの尺度となりうることを示した。

第5章では、*Beggiatoa* 及びその捕食者を含む生態系モデルを構築し、環境因子である水温や DO の変動に対する *Beggiatoa* の応答特性についての解析を行った。水温及び DO の変動に対する影響を考慮するため、*Beggiatoa* 及び捕食者の収支式を改良した。水温及び DO をパラメータとしてモデルの解析を行った結果、水温上昇と DO 低下が *Beggiatoa* の生物量の増大に寄与するのに対して、捕食者の生物量は、上記の範囲内での水温及び DO の変化に対してはそれほど顕著な変化を与えないことが示された。調査フィールドでの夏季に相当する水温・DO 条件における *Beggiatoa* の生物量は、冬季に相当する条件における生物量と比較して2倍程度にまで増大していることが示された。生態系モデルを構築することにより、フィールド調査から考えられた *Beggiatoa* の動態を解析し、その特性を解明することができた。

第6章では、本論文の全体的な総括を行い、得られた結論を要約した。

本研究では、フィールド調査、ラボ実験及び生態系モデルを用いた解析により、水温と DO という2つの環境因子の変動が、*Beggiatoa* の動態に大きな影響を与えていることを明らかにした。これらの環境因子は、海底熱水鉱床開発における揚鉱廃水の放出に伴い、底層の広い範囲で変動を生じる可能性がある。本研究により、開発に起因する環境因子の変動が底生生物に与える影響の事例を解明することができた。このような知見の積み重ねは、環境影響予測モデルの開発や、環境影響評価の信頼性の向上に資するものであり、ひいては、環境保全と両立する海底資源の開発の推進に資することを述べ、本研究の総括とする。

審査結果の要旨

本論文では、海底熱水鉱床開発に伴う化学合成生態系への影響を予測するための生態系モデル開発を前提とし、そのモデルの最も重要なパートとなる化学合成細菌の一つであるベジエーターという硫黄細菌の動態を明らかにすることを目的としており、モデル開発で必要となるベジエーターの実海域での動態把握調査、ならびに室内実験による挙動観察を行ったものであり、以下のような結果が得られている。

(1) これまでの海底熱水鉱床開発に関わる研究動向、特にパプアニューギニアにおいて行われている熱水鉱床開発に関連する環境影響評価の現状を詳細に分析し、環境影響評価においては、開発に起因する環境因子の変動が海洋生物に及ぼす影響を予測することが必要であり、その

際に海洋底層の生物群集への影響の予測が最も重要な課題であること、さらに予測モデルの開発に必要な、環境因子の変動に対する底生生物の応答特性の把握に関する研究が遅れていることを指摘した。

(2) 環境因子の変動に対する底生生物の応答特性を探るためのモデル生物として、貧酸素環境の海底に広く生息する生物の1種である硫黄細菌（ベジエーター）を取り上げ、この硫黄細菌が、沿岸の浅い海域の海底でも、夏場無酸素状態になって、硫化水素が発生するような湾奥で発生していることに着目し、このような環境条件となる尼崎港の海底において長期連続でこの硫黄細菌の動態観察と環境条件の計測を行うことにより、ベジエーターの消長が海底近傍の溶存酸素と水温に依存することを明らかにした。

(3) 実際に尼崎港の海底に生息する硫黄細菌を採取し、実験室内で海底を模擬した実験装置で飼育することによって、ベジエーターが酸化層と還元層の中間の位置に生息すること、自己に最適な環境を求めて堆積物中を上下方向に運動することを明らかにするとともに、揚鉦廃水の放出による微粒子の再堆積の影響を評価する上で、このような上下運動をモデル化することが重要であることを示した。

(4) 現地海域での連続観測結果と、実験室内での飼育実験の結果を用いて、硫黄細菌ベジエーターが、水温と溶存酸素の値によってどのように成長・衰退し、上下に移動するかをモデル化し、実際に現場海域で観測された硫黄細菌の動態をシミュレーション計算により再現できることを示した。

以上の研究成果は、今後研究開発が進む海底熱水鉦床開発に伴う環境影響評価予測モデルの基礎に使われることとなり、わが国の金属資源開発に貢献するものであることを示したものである。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。