

## 研究成果報告書

- ・機関及び学部、学科等名：国立大学法人 富山大学 理学部 生物圏環境科学科<sup>1</sup>  
国立大学法人 富山大学 理工学教育部 生物圏環境科学専攻<sup>2</sup>
- ・所属ゼミ：環境化学計測第Ⅱ講座<sup>a</sup>・生物圏機能Ⅲ講座<sup>b</sup>
- ・指導教員：張 勁<sup>a</sup>・酒徳 昭宏<sup>b</sup>
- ・代表学生：大塚 進平<sup>1a</sup>
- ・参加学生：勝田 裕大<sup>2a</sup>、端野 開都<sup>1b</sup>

### 【研究題目】新エネルギー メタンハイドレートの開発が海洋環境にもたらすリスク評価

#### 1. 課題解決策の要約

本研究では、メタンハイドレート(Methane Hydrate; 以下、MH)の存在が確認されている富山沖および類似した湧水現象がみられる三陸沖日本海溝を対象とし、調査を行った。富山沖ではメタン湧出周辺にみられるメタンをエネルギーとするバクテリアを基礎生産者とする食物連鎖の存在について検討した。また、三陸沖日本海溝では地震による地割れや斜面崩壊に伴う化学成分の変化を捉え、湧水現象のメカニズム解明および生態系を含む富山沖のメタン湧出現象に関連する知見の獲得を試みた。

富山沖で採取された底生生物の安定同位体比は、同海域で確認されているメタンの値とは大きく異なっており、メタンを利用していないと考えられた。また、ベニズワイガニの窒素同位体比は水深に伴って、高くなる傾向にあり、海洋表層からの栄養源を利用している可能性が示された。加えて、高い炭素同位体を示すヒトデ類や巻貝は、沈降物質とは異なる栄養源の利用が示され、MH の挙動による影響が十分な検討が必要であると考えられた。

三陸沖の間隙水化学分析の結果からは、富山沖で発見されるような海底深部からの豊富なメタンガス供給は確認されなかったが、異なる性質の湧出現象が確認できた。堆積物表層へ上昇する流体はカルシウム及びシリカを豊富に含み、低いマグネシウム濃度が特徴的で、深部に熱源を持つ流体である可能性が高い。また、シリカ濃度の極大層からの減少傾向は水平方向からの移流を示唆し、鉛直的に上昇したものではないことが推測された。さらに海底土の<sup>137</sup>セシウム濃度の測定結果は、本調査海域において東日本大震災後に堆積層の移動及び再懸濁が起きた可能性が高いことを示した。間隙水分布は地震による堆積層の変化に応答し、地震前とは分布が異なると考えられ、我々は移流による流体の上昇は巨大地震による影響の1つであると結論付けた。

これらの研究結果は富山沖のMH開発リスク評価にも応用され、今後巨大地震による影響も考慮した包括的な調査ができることが期待される。

#### 2. 調査研究の目的

MH の分解、形成に密接に関連するメタン湧出現象は、富山県沖においても確認されている(Matsumoto et al., 2009)。MH 開発にあたって、分解による温暖化への影響も注目されているが、候補地である富山県沖の調査は乏しい現状にあり、生態系を含めた海洋へのリスク評価が喫緊の課題となっている。さらに、東北地方太平洋沖地震以後の地殻運動活発化に伴うメタン動態の変化が考えられるが、2011年以降のメタン動態に関する総合的な研究は行われておらず急務である。これらのことから、本研究では、富山県沖における

底生生物から、MH の開発が底生生物へ与えるインパクトへの知見を獲得すると共に、メタン湧出の存在が示唆されている三陸沖をモデルとし、化学分析・微生物群集構造の解析から、湧水の起源およびメタン動態を明らかにし、MH 開発が海洋環境に与える影響を評価することを目的とした。

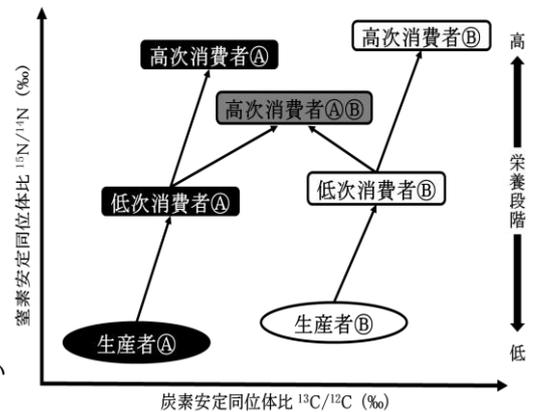
### 3. 調査研究の内容

本研究では、MH の開発が海洋環境にもたらすリスクを評価するために、以下に着目し、調査を行った。

- ①富山沖における MH が与える海洋生態系への影響
- ②三陸沖における地震による堆積環境の変化と湧水現象

#### 3-1. 炭素・窒素安定同位体比解析を用いた富山沖底生生物の栄養源の検討

炭素・窒素安定同位体分析は、採餌によって炭素・窒素の取り込みが起きることを利用しており、“食う-食われる”の関係にある生物間においてある一定の幅を持って変動することが知られている。栄養段階がひとつ上昇する毎に、炭素安定同位体比  $\delta^{13}\text{C}$  では 0~1‰、窒素安定同位体比  $\delta^{15}\text{N}$  では  $3.4 \pm 1.1\text{‰}$  の上昇があることが経験的に明らかとなっている (Minagawa and Wada, 1984, DeNiro and Epstein, 1978)。炭素安定同位体比の変化はわずかであることから、餌源の推定に用いられる。一方で、窒素安定同位体比の変化は大きいことから、栄養段階の推定に有効である。



また、炭素同位体は、メタン湧出域において著しく低い値を示し、それを利用する生物にも反映される (例えば、Levin and Michener, 2002)。さらに、MH 賦存域では、メタン非関連地域のおよそ 4.5~161.4 倍もの高密度でベニズワイガニが分布している (沼波ら, 2008 Blue Earth'08 要旨集) との報告があり、メタンをエネルギーとするバクテリアを餌とすることで、間接的にメタンを利用していることが考えられる。これらのことから、本研究では、富山沖に広く生息するベニズワイガニを代表とした底生生物を試料として、生物によるメタンの利用の可能性を検討した。

図 1. 炭素・窒素安定同位体比解析の概略図

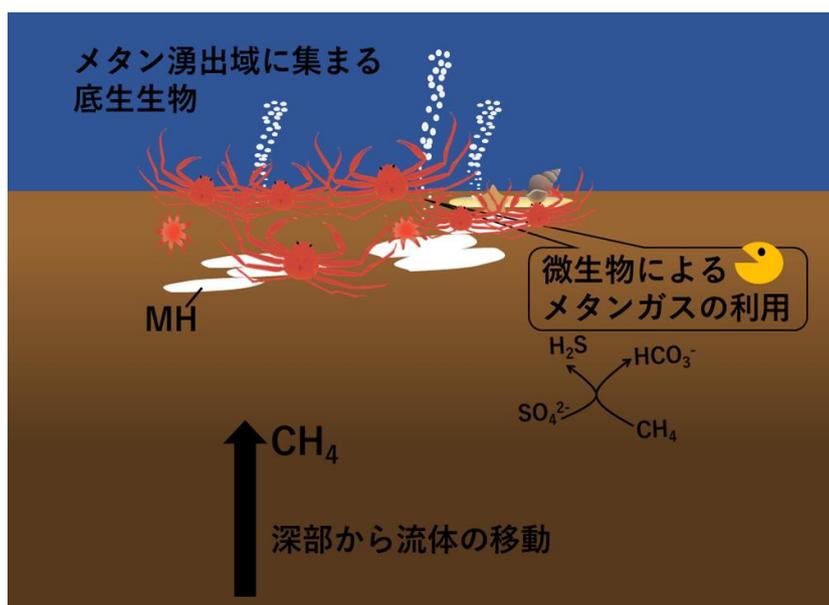


図 2. 研究概要のイメージ図

#### 3-2. 間隙水の化学組成からみる堆積状況

湧水現象は大きく熱水と冷湧水の2つに区分され、海底火山に由来する熱水とは異なり、冷湧水の起源は多岐に渡る。メタン湧出現象は冷湧水に分類され、富山沖だけでなく南海トラフなどプレート収束境界に多数分布している。湧出のメカニズムは地震を含むテクトニクス活動による絞り出しと、断層などの割れ目に沿った流動とする考えが支持されている。(月刊地球 通巻 18 号 メタンシープとメタンハイドレート)。また本研究室でも地震後の地割れや斜面崩壊と湧水現象が密接な関連性を持つこと示している (H17 佐藤修士論文)。

本研究では富山沖にて MH が存在する海域を調査する予定であったが、新型コロナウイルス感染拡大によって航海が中止となった。しかしながら、東日本大震災によって大規模な地殻変動が起こったことが報告され

ている(Chester et al., 2013 他)、三陸沖日本海溝の海底調査に参加できる機会を得た。そこで、地震の影響を含めたメタン湧出現象の知見獲得のため、三陸沖日本海溝にて堆積物及び間隙水のサンプリングを実施した(白鳳丸 KH-20-8 航海)。堆積物試料は船上からマルチプルコアラーとピストンコアラー(図 3)を海底へ降ろして採取し、試料は採取後すぐに船上にてカットした。

堆積物に含まれる間隙水中の化学組成の分析はしばしば湧水起源の特定に利用されている。間隙水の起源は殆どが堆積物中へ浸透した海水であるが、微生物による有機物分解や流体-鉱物間の物質除去、付加反応によって組成が変化する。メタン湧出域ではメタンガスの供給によって微生物活動が活発化され硫酸濃度や  $\text{Ca}^{2+}$  濃度の大幅な減少が確認されている他(Hachikubo et al., 2015, Snyder et al., 2007)、熱水域では高温下での鉱物反応によってシリカや重金属元素の高濃度の溶出が確認されている(Toki et al., 2016 他)。

以上のことから、本研究ではより詳細な湧水現象のメカニズム解明のために、間隙水の主成分及び栄養塩濃度を化学的なプロキシとして、海底中の微生物組成を生物学的なプロキシとして利用した。さらに海底土の  $^{137}\text{Cs}$  濃度測定を加えることで地震後の堆積環境の変化を把握し、地震活動を考慮したリスク評価を試みた。

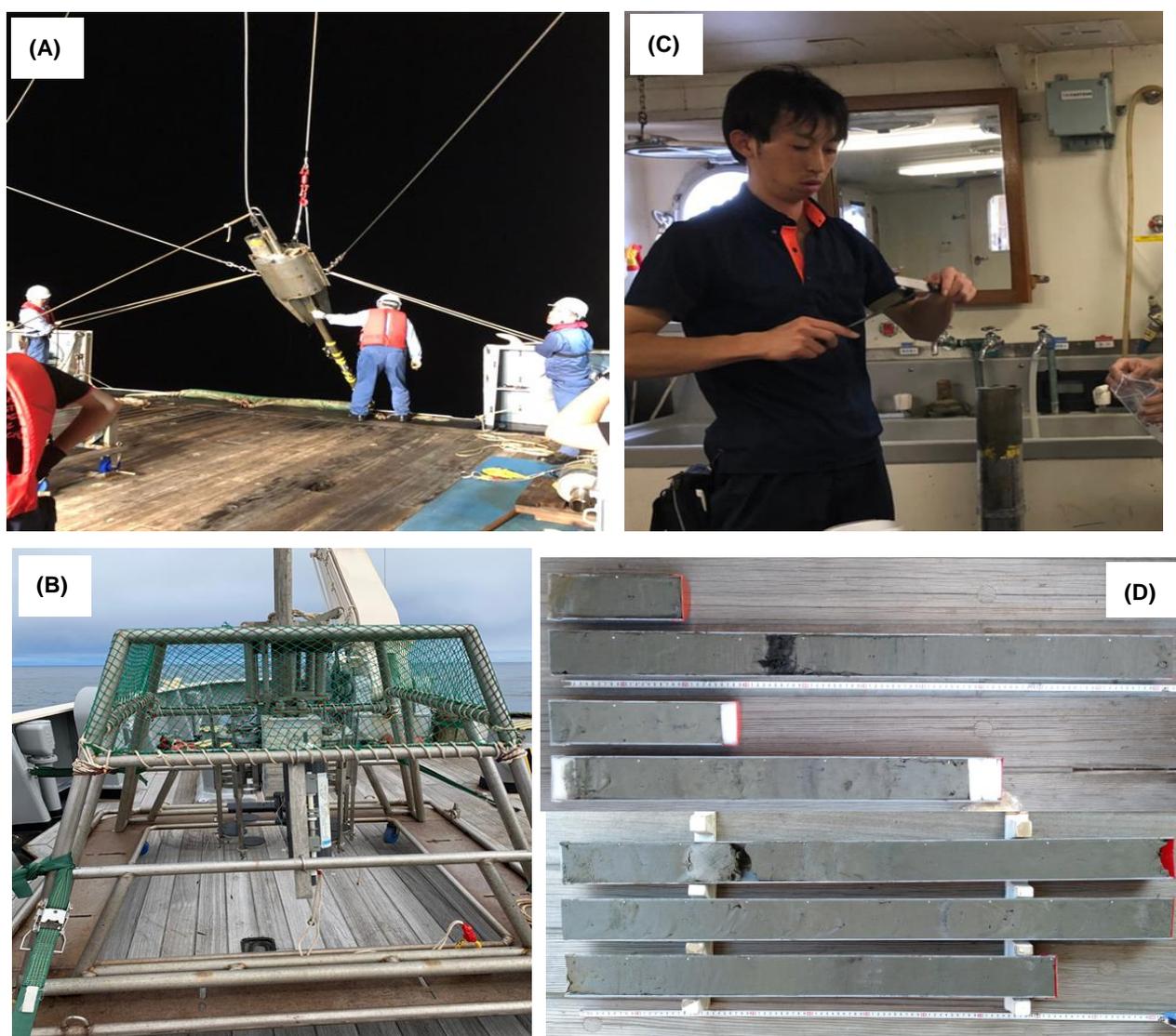


図 3.. 堆積物試料の採取及び船上処理の様子

ピストンコアラー(A)、マルチプルコアラー(B)、試料カットの様子(C)、採取した堆積物試料(D)

#### 4. 調査研究の成果

本研究では、富山県沖における底生生物及び三陸沖堆積物に着目して、研究を行った(図 4)。富山県

沖、三陸沖にて調査を行った結果、以下のようなことが明らかとなった。

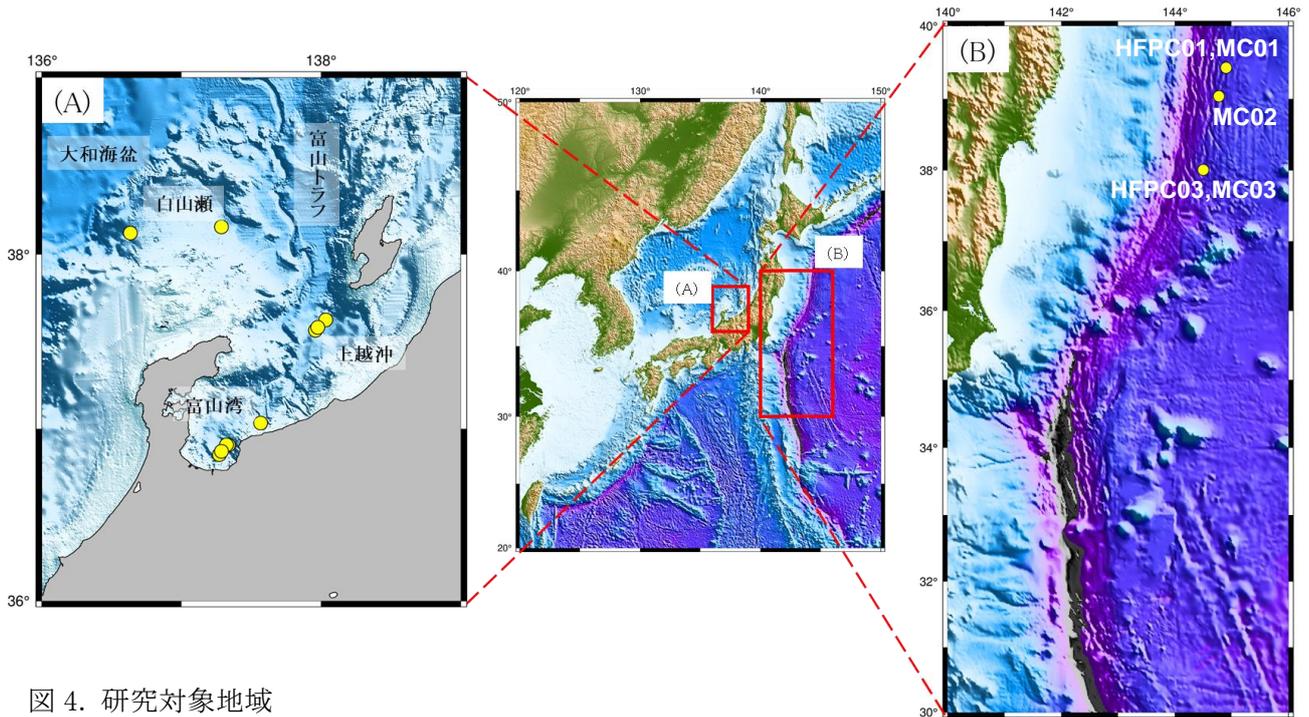


図 4. 研究対象地域

試料の採取を行った地点を●で示した。(A)富山湾および上越沖 (B)三陸沖

#### 4-1. 炭素・窒素安定同位体比解析を用いた富山沖底生生物の栄養源の検討

MH の存在が確認されている上越沖、比較地域である富山湾、白山瀬にてカニカゴ漁法で水揚げされたベニズワイガニやヒトデ類を試料として用いた。白山瀬、上越沖で採取したベニズワイガニの  $\delta^{13}\text{C}$  および  $\delta^{15}\text{N}$  に有意な差はみられなかったのに対して、富山湾内で採取された個体は 2 地域と比較して高い  $\delta^{13}\text{C}$  ( $p < 0.01$ )、低い  $\delta^{15}\text{N}$  ( $p < 0.01$ ) で特徴づけられた(図 5 左)。水深に伴って、 $\delta^{15}\text{N}$  は上昇しており、海洋表層からの沈降物質を利用して

いる可能性があると推察された(図 5 右)。これは沈降過程における、細菌が炭素と比して窒素を優先的に消費する(Lee et al., 2004)ことに伴い、軽い  $^{14}\text{N}$  が優先的に消費されたためであると考えられる。また、調査地とした地域で採取した底生生物の  $\delta^{13}\text{C}$  は、上越沖における  $\delta^{13}\text{C}$  メタン (Hiruta et al., 2015)とは大きく異なる値を示していたことから、メタンを利用していないと考えられた。しかしながら、Seabrook et al (2019)は、ミズワイガニの安定同位体分析、脂肪酸分析、胃内要物の分析から、メタンの利用を指摘しており、更なる調査の必要があると考えられる。さらに、富山湾および上越沖の底生生物の一部個体(ヒトデ類；富山湾、腹足類；上越沖)では、より高い  $\delta^{13}\text{C}$  を示しており、沈降物質以外の栄養源の利用が示唆された(図 6)。

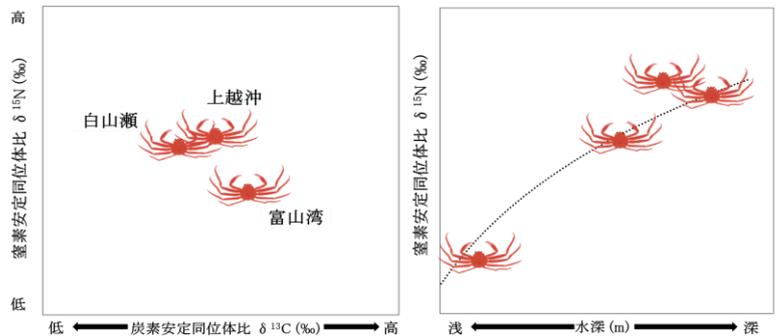


図 5. ベニズワイガニの炭素・窒素安定同位体比(左)  
ベニズワイガニの  $\delta^{15}\text{N}$  と水深との関係(右)

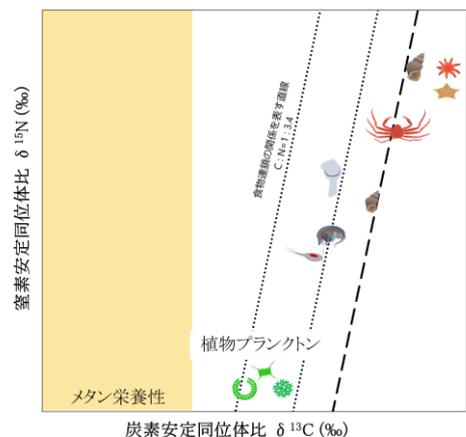


図 6. 富山県沖における底生生物の栄養

#### 4-2. 間隙水の化学組成からみる堆積状況

間隙水の化学分析の結果

を図 7 示す。MC02site 及び HFPC03site では鉛直方向に大きな変化は認められなかった。一方で HFPC01site において深度増加に伴う  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の減少が確認された。原因として微生物による硫酸還元反応と低い  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度を持った別起源の流体の混合が挙げられる。保存性成分である  $\text{Cl}^-$  が鉛直方向にほとんど変化がないことから後者による影響は非常に低いと考えられる。硫酸還元反応は  $\text{HCO}_3^-$  の放出を伴い、

$\text{Ca}^{2+}$  及び  $\text{Mg}^{2+}$  との反応によって炭酸塩の沈殿が促進される(Snyder et al., 2007)。炭酸塩形成時に利用された還元剤がメタンか海洋性の有機物であるかの判断指標として、 $\Delta[\text{SO}_4^{2-}]:\Delta[\text{Ca}^{2+}]+\Delta[\text{Mg}^{2+}]$  の比が用いられ、メタンの場合は 1:1、有機物の場合は 1:2 を示す。本研究試料はすべて 1:2 付近にプロットされることからメタンを利用した硫酸還元反応の活発性が低いことが示された。加えて、別研究室におけるメタン濃度の測定結果は微量(富山沖 MH site の 1/1000 以下: Hachikubo et al., 2015)であると報告されていることからこのことが支持される。これらのことから  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の減少は活性の低い硫酸還元反応によるものと考えられ、化学成分からメタンの湧出状況を把握できた。これらの反応の根拠となる微生物組成データについては現在解析中である。

$\text{Cl}^-$  濃度とは対照的に、HFPC01 site において  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  濃度の傾向と  $\text{Si}$  の  $1000\mu\text{M}$  を超える高い濃度は深部に熱源を持つ流体の混合を示唆するものであった。高温下で起こる流体-鉱物反応は  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  がほとんど含まず、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  など重金属元素を豊富に含む特徴的な組成を生じさせることは多くの熱水研究によって明らかにされている(Toki et al., 2016 他)。また、深部から供給される流体に豊富に含まれるシリカが比較的表層で極大値を示すことは、鉛直的な流体の移動ではなく、水平方向からの移流であることを示唆している。

さらに堆積物の  $^{137}\text{Cs}$  濃度の結果からは東日本大震災後の原発事故による影響を受けたと結論付けられた堆積層と同レベルの放射線濃度が検出された(Fujii et al., 2017)。さらに MC03 site では最小層以深で濃度が極大値を示した。この現象はいくつかの先行研究でも報告があり、これらの多くは堆積物の攪乱あるいは若い堆積層の貫入によるものと結論付けられており(Ikehara et al., 2016)、この地域でも地震による堆積層の移動が起きていたと考えられる。

以上の結果は東日本大震災による堆積物の移動及び再懸濁を示唆しており、地震による堆積環境の変化が流体の移流を引き起こした可能性がある。

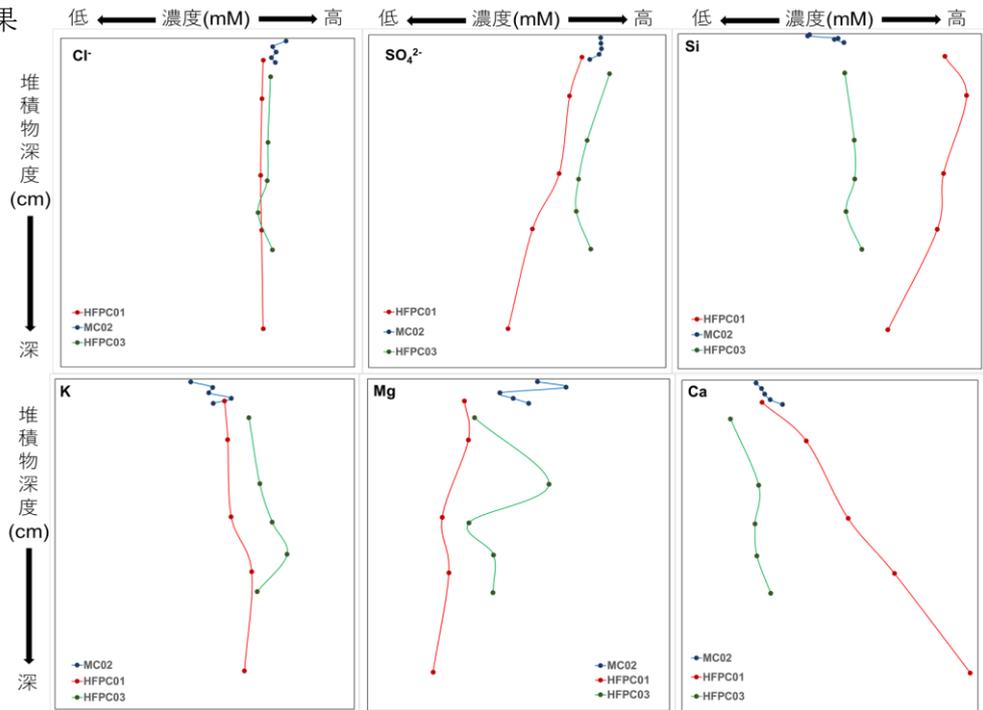


図 7. 間隙水の主成分、栄養塩濃度の鉛直分布(項目名は左上に記載)

\*MC02 ではマルチコア(24cm)の短い堆積物コアのみ採取に成功

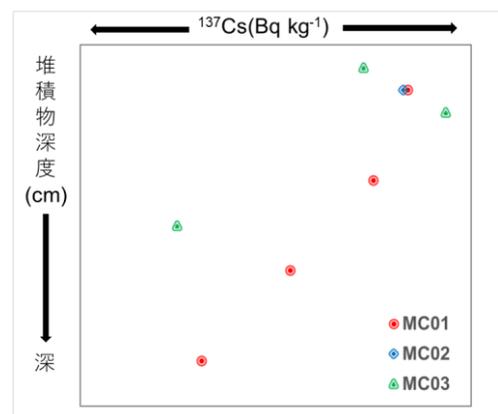


図 8. 表層堆積物の  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$  乾土)

## 5. 調査研究に基づく提言

今回の調査研究では、①富山沖における MH が与える海洋生態系への影響を生物プロキシンから評価した。さらに②三陸沖における地震による堆積環境の変化と湧水現象を間隙水の化学成分を利用し評価した。

富山沖に生息する底生生物種がメタンを利用していないことが示唆されたが、他海域における報告では、カニがメタンを利用しているとの報告もあり、更なる調査が必要であると考えられる。特に高い炭素同位体比を示す傾向の強い生物種(ヒトデ類・カニ)を支える栄養源が MH の挙動に起因するものであるのかは十分に検討する必要がある。また、三陸沖の調査からは、メタン湧出状況を間隙水化学組成から把握できることを改めて検証できたこと加えて、地震に伴う堆積層の変化を化学成分から捉えることができた。

以上の結果は、本研究で用いた手法が生態系を含めた MH の影響評価、及び富山沖における巨大地震に伴う地形変化を含めた調査だけでなく、開発後の間隙流体分布の変化の把握にも応用できることを示している。2011 年以後に統括的な調査が行われていない富山沖において、MH 開発或いは地殻変動に伴ったメタンガスの漏洩等のリスク評価をすることは最重要課題となっている。したがって、今回の研究で獲得した知見を基に、富山沖での本格的な MH 開発のリスク評価の研究に早急に着手することが望まれる。

## 6. 課題解決策の自己評価

本研究では、富山沖の底生生物および三陸沖堆積物を対象に生物学・化学的手法を用いて、MH 開発のもたらすリスク評価を試みた。その結果、富山沖生物種がメタンを利用していないことが示唆された。また、三陸沖堆積物の化学成分から、メタンの湧出状況、地震による堆積物環境の変化を捉えることができた。これらの研究結果は、富山沖の MH 開発による生態系及び堆積物環境の変化の評価に貢献できるものである。

本年度は、新型コロナウイルス流行の影響下で研究事業の縮小が強いられたこともあったが、【研究題目】である”新エネルギー メタンハイドレートの開発が海洋環境にもたらすリスク評価”を達成できた。今後も継続的な調査を行うことにより、MH 開発に伴うリスクを減少させる上でより重要かつ具体的な提言を行うことが出来ると考えられる。