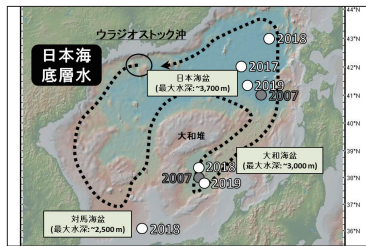




気候変化にตอบสนองする日本海深層循環の研究

松中 哲也
統合環境領域

能美市にある低レベル放射能実験施設で「環境放射化学」の研究を行っています。環境中に放出された人工放射性核種の分布と影響を調べ、天然・人工放射性核種を用いて自然界の諸現象を研究する学問です。私は、最大水深が3700mに達する日本海をフィールドとし、2017年から越境汚染物質の1つである放射性ヨウ素をトレーサーとした深層循環研究を始めました。



日本海における¹²⁹I鉛直観測の実施地点

気象庁の報道発表（2016）によると、日本海盆の底層（水深2500m～3500m）において、2010年以降、水温が5年あたり約0.01℃上昇し、溶存酸素量が5年あたり約4 μmol/kg減少していることが継続的な海洋観測によって明らかになりました。日本海の水深2500m以深に存在する底層水は、冬にロシアのウラジオストック沖で冷やされて密度が大きくなって沈み込んだ表層水に由来し、反時計回りに循環します。近年の底層水の昇温と貧酸素化は、温暖化に伴って冬に著しく気温が低下する年が減ったため、酸素を多く含む高密度水が新しく形成されにくいことを示していると考えられています。しかしながら、そのメカニズムは十分に理解されていないため、底層水の動きをより直接的に評価することが求められています。将来の日本海における深層循環の停止と海底の貧酸素化に伴う海洋生態系の変化が懸念されています。日本海において、水温と溶存酸素量の観測に加え、安定な化学トレーサーを用いて深層循環の変化を検知することは、気候変化に対する海洋循環の応答性を明らかにする上で必要不可欠です。

そこで私は長寿命の放射性ヨウ素（¹²⁹I、半減期：1,570万年）に着目しました。この放射性核種は、人為的には²³⁵Uに中性子を

吸収させて起こる核分裂反応によって生成されます。1940年代以降、人為起源の¹²⁹Iがヨーロッパ（フランスのラ・アーグや英国のセラフィールド）やロシア（マヤーク）にある核燃料再処理施設から、大気中に約5.1TBq、および河川・海洋中に約27TBq放出されてきました。日本海における人為起源¹²⁹Iはこれらの施設から主に大気經由（偏西風や北東モンスーン）で供給されます。低レベル放射能実験施設の屋上において、2017～2018年にかけて1ヶ月あたりの¹²⁹I大気降水量を観測した結果、冬に高くなる傾向が認められたことから、日本海において北東モンスーンが¹²⁹Iの重要な供給経路であることを確認しました。

海洋に供給された¹²⁹Iは主に安定ヨウ素と同じ化学形態である溶存態のIO₃⁻やI⁻で存在します。日本海における安定ヨウ素の¹²⁷Iは保存成分であるため鉛直的に一定の濃度（50～60ppb）になります。それに対して、放射性ヨウ素の¹²⁹Iは表層で高く、鉛直方向に減少した後、水深2500m以深の底層水中でおよそ一定の濃度（3.0 nBq/L）を示すことが明らかになっています（Suzuki *et al.*, 2010）。人為起源¹²⁹Iは表層から主に移流・拡散によって底層水に供給されます。従って、日本海では¹²⁹Iは主な起源が明らかである点と長寿命の点から、深層循環トレーサーとしての妥当性が高いと考えられます。

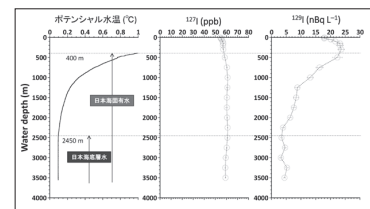


加速器質量分析計の制御室（筑波大学）



加速器質量分析計の全貌（筑波大学）

2017～2019年に実施された蒼鷹丸（中央水産研究所）とおしよろ丸（北海道大学）の研究航海にて、日本海盆、大和海盆、および対馬海盆にかけて¹²⁹Iの水平分布と鉛直分布の観測を行いました。海水試料の前処理は低レベル放射能実験施設で実施し、筑波大学の加速器質量分析計で¹²⁹Iを測定しました。長半減期核種である¹²⁹Iは放出される放射線が極微量であるため放射線測定が困



日本海盆における水温、¹²⁷I、および¹²⁹Iの深度分布（2018年）

難です。一方、加速器質量分析法は、ヨウ素の原子を負イオン（¹²⁹I⁻）として引き出して同重体の¹²⁹Xeを分離した後、30MeVの加速エネルギーを与えて直接計測することにより超高感度の¹²⁹I測定を可能にします。加速器質量分析計のバックグラウンドは非常に低く、¹²⁹I/¹²⁷I比で10⁻¹⁴（百兆分の1）～10⁻¹¹（千億分の1）レベルで海水中¹²⁹Iを測定しています。鉛直観測を実施した日本海盆において、2017～2018年の底層水中¹²⁹Iは平均値で4.2nBq/Lであり、先行研究の2007年（3.0nBq/L, Suzuki *et al.*, 2010）と比べ1.2nBq/L高いことが分かりました。現時点でこの差が、底層水中¹²⁹Iの増加を示しているか判断することは難しいですが、日本海における¹²⁹I鉛直分布の観測を増やし、日本海底層水の広域的な動態の理解を進める予定です。将来的に¹²⁹Iをトレーサーとして日本海の底層水が表層水と入れ替わるのに要する時間を評価し、気候変化との応答性を解析したいと考えています。

【引用文献】
Suzuki *et al.* (2010) *Nucl. Instr. Meth. B*, **268**, 1229-1331.

日本陸水学会第84回大会 公開講演会

陸域環境領域 長谷部 徳子

当センターは日本陸水学会第84回大会の公開講演会を日本陸水学会と共催いたしました。この講演会は2019年9月29日（日）に石川県文教会館にて「北陸の陸水環境と歴史・人の営み」と題して開催されました。陸水分野の幅広い研究対象を反映し、私も含めてそれぞれ異なる研究背景をもつ6名の講演者が登壇しました。またパネルディスカッションでは中野伸一日本陸水学会会長にご登壇いただき、北陸の陸水環境の現状や研究・活動への展望について議論しました。

最初に講演されたのは、北陸大学を3月に退職されたばかりの竹井巖先生で、北陸の豊かな陸水環境をもたらす降雪・積雪・融雪水の特徴について話されました。また金沢星稜大学の本康宏先生は「兼六園と辰巳用水ー加賀藩の水利と現在ー」として、歴史的にこの地域で陸水がいかんかに利用されてきたかについて紹介されました。講演では現在どこで史跡や用水を見学できるかも示され、興味をお持ちの方は独自に「水利見学ルート」を辿るように配慮されていました。陸水生物に関する講演は3件あり、特に昆虫について石川県ふれあい昆虫館よ

り学芸員をされています渡部晃平さんが、植物については金沢星稜大学の永坂正夫先生が、また陸水学会の巡検でも見学会が企画されました河北潟の生物相全般について河北潟湖沼研究所の高橋久理事長が講演されました。これら3つの講演では、人間活動が陸水環境をいかに変えていくかの例が示されるとともに、珍しい動植物が絶滅に瀕している例や、逆に増えている例が紹介され、陸水環境がちょっとしたことですぐに影響をうけることに驚かされました。私自身は湖の堆積物による古環境変動について話題にいたしました。

聴衆は残念ながら76名と決して多くはありませんでしたが、パネルディスカッションで発言される方もいらっしゃり、陸水環境に興味をお持ちの皆さんが多く集って



環日本海域環境研究センター長の挨拶

くださいました。そのパネルディスカッションでは陸水環境のマネージメントにどう取り組むべきか、植生や水質などのモニタリングの重要性や、河北潟の再汽水化の可能性について議論されました。また中野会長は陸水研究が対象とする多岐にわたる時間スケール空間スケールについて言及され、学会を通じた研究ネットワークの重要性が皆さんに再認識されました。最後になりましたが、ご協力くださった講演者の皆さんに心よりお礼申し上げます。とくに高橋さんは研究所をあげて講演会にご協力くださり貴重な本を含めた物販で会を盛り上げてくださいました。また参加された聴衆の皆さんにも感謝申し上げます。



パネルディスカッション

▶カンボジアのアンコール世界遺産での海外インターンシップ

学生の国際化教育支援として、10回目となるカンボジアのアンコール世界遺産での海外インターンシップを公立小松大学とともに主催しました。参加した6名の学生たちは、カンボジア国立アンコール遺跡整備機構での環境保全や地域社会支援、観光誘致などの世界遺産の維持管理業務に2週間従事しました。（2019.8.18-8.31）

▶自然システム学専攻國久亮太君がベストポスター賞を受賞

当センター松木准教授が指導する國久亮太君（自然システム学専攻博士前期課程）が広島大学東広島キャンパスで開催された第36回エアロゾル科学・技術研究討論会でベストポスター賞を受賞しました。（2019.9.5）

▶「第16回東ユーラシア国際会議」の開催

当センターが主催する「第16回東ユーラシア国際会議（The 16th East Eurasia International Workshop: Present Earth Surface Processes and Long-term Environmental Changes in East Eurasia）」がモンゴルにて開催されました。約70名の参加者の内、金沢大学からは17名が参加しました。（2019.9.16-20）

▶長尾誠也センター長のNOM7での招待講演

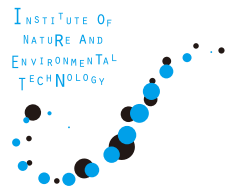
当センター長尾教授が東京の一橋講堂で開催されたInternational Water Association (IWA) 主催の「水中天然有機物に関する専門家会議（NOM7）」でJapan Young Water Professionalsが企画したセッションで招待講演を行いました。（2019.10.8）

▶国際シンポジウム「アジアにおける大気汚染物質の挙動と健康影響問題」の開催

当センター主催の国際シンポジウム「アジアにおける大気汚染物質の挙動と健康影響問題（Current Issues on Behavior and Health Effect of Air Pollutants in Asia）」が金沢大学角間キャンパスで開催されました。（2019.11.21）

環日本海域環境研究センターニュースレター 第11号

発行：環日本海域環境研究センター
編集：環日本海域環境研究センター広報委員会
ニュースレター担当：関口俊男、小木曾正造
〒920-1192 石川県金沢市角間町
電話：076-234-6830
WEBサイト：http://www.ki-net.kanazawa-u.ac.jp/
レイアウト・印刷：GoGraphics
2019年11月30日発行



News Letter

金沢大学 環日本海域環境研究センター ニュースレター 2019年11月30日発行 第11号

- ① 研究紹介1: 東京工業大学 関根 康人
- ② 研究紹介2: 海洋環境領域 鈴木 信雄
- ③ 研究紹介3: 統合環境領域 松中 哲也
- ④ 日本陸水学会第84回大会公開講演会
- ④ ニュース

研究紹介 1 Report 環境科学の宇宙への展開



関根 康人
東京工業大学

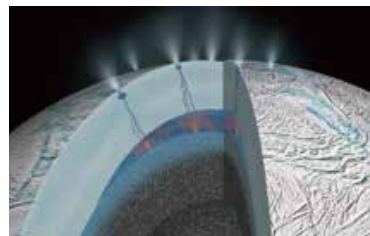
宇宙に生命は存在するのだろうか—この疑問は、誰もが一度は発する素朴ですが深い問いです。しかし、このような問いは最近まで科学者が真剣に向き合う課題ではありませんでした。液体の水、有機物、エネルギーといった生命に必須の要素が、地球外において長期間共存することは難しく、仮に存在したとしても、そのような場にアクセスするなど不可能というのが常識であったのです。



火星の湖底堆積物の上に降り立った探査車キュリオシティ (画像 NASA)

ところが、現在この常識は大きく見直されています。40~35億年前の火星では、液体の水が地表面に長期間存在し、そこに太陽光も降り注いでいました。火星探査車は、かつての湖の底の堆積物中にスメクタイトなどの粘土鉱物、鉄酸化物、有機物が含まれていることを明らかにしました。木星や土星を回る氷でできた氷衛星にも、その地下に、液体の海を持つ天体が見つかっています。土星探査機は、氷衛星エンセラダスにおいて、表面の割れ目を通じて宇宙に噴出する内部海の海水にナノシリカや炭

酸塩、有機物が含まれていることを明らかにしています。



土星衛星エンセラダスの内部海 (画像 NASA)

このように近年の太陽系探査では、水や有機物の存否を明らかにするだけでなく、水に関連した化学・鉱物の探査まで行われつつあります。このような中、我々は次に何を指すべきでしょうか。それは、探査データから水環境（酸化還元、pH、溶存種）を推定し、生命利用可能なエネルギーの定量化を行うことでしょう。水が天体上でどのような化学反応や物質循環を起こし、どこに化学的非平衡を作りえるのか—この知見がなければ、どこに着陸し、どんな物質を探すべきかわからず、生命探査は行えないからです。

太陽系天体における水環境の推定には、環境科学・地球化学の知見を宇宙に展開することが必要です。私はこのような背景のもと、当センターをはじめ、環境科学者・地球化学者と共同研究を行ってきました。例を挙げれば、火星探査車が得た粘土鉱物データなどから、35億年前の火星の水環

境を復元し、当時の湖が、中程度の塩分を含むpH中性の塩湖であり、生命にとって好適な水環境だったことを示しました (Fukushi, *et al.*, 2019)。また、土星衛星エンセラダスの海水に含まれるナノシリカや炭酸塩から、海底に100℃程度のアルカリ熱水噴出孔があることも示しました (Hsu, *et al.*, 2015)。現在は、当センターと共同で、アジア内部の半乾燥地域でのフィールド研究を進めています。このような半乾燥地域における水環境は、初期火星のそれと驚くほど共通点が多いのです。太陽系探査は、今後もさらに進展するでしょう。火星では2020年代後半にはサンプルリターンが、2030年代には有人探査が計画されています。そのような中、アジア・ユーラシア地域は世界的にも貴重な火星のアナログフィールドであり、そこでの水環境の知見を宇宙に展開することは、地理的優位性を活かした日本独自の貢献となるでしょう。

【引用文献】

Fukushi, Sekine *et al.* (2019) *Nature Communications*, 10, 4896.

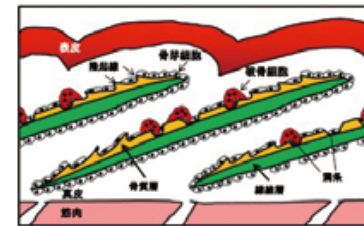
Hsu, Postberg, Sekine *et al.* (2015) *Nature*, 519, 207.



魚類のウロコを用いた環境生理学的研究

鈴木 信雄
海洋環境領域

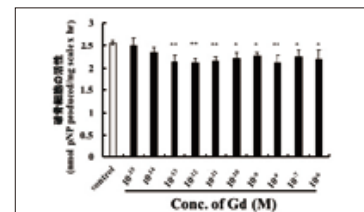
魚類のウロコには、骨を作る細胞である骨芽細胞と骨を壊す細胞である破骨細胞が石灰化した骨基質の上に共存しており、骨のモデルとして用いることができます。



ガドリニウムの破骨細胞に対する作用
Ikegame *et al.*, *J. Pineal Res.*, 2019 より改編

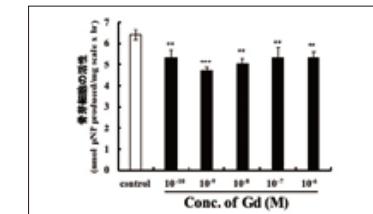
そこで、魚類の骨代謝に対する作用を調べる目的で、私は魚のウロコに注目してオリジナルなバイオアッセイ系を開発しました。現在私は、開発したアッセイ系を用いて、①環境汚染物質、②ホルモンなどの生理活性物質、③微小重力、超音波、磁場などの物理的刺激に対する応答を調べています。本稿では、2019年に受理あるいは出版した2編の論文の内容を紹介いたします。(Suzuki *et al.*, in press; Ikegame *et al.*, 2019)

ガドリニウムは、MRIの造影剤として使用されており、使用されたガドリニウムが環境中に排出され、現在、ガドリニウムの環境汚染が問題になっています。ガドリニウムは、人体の中ではキレート剤で保護されて毒性のない状態になっており、尿から体外に排出されます。その排出されたキレート剤は、紫外線により分解されるため、ガドリニウムイオンは環境中に存在することになります。さらにガドリニウムは、カルシウムチャンネルのブロック剤として知られているため、骨代謝にも関与する可能性があります。そこで、ガドリニウムの魚類の骨代謝に対する影響を評価しました。キンギョのウロコをガドリニウム含有培地で6時間培養した結果、 10^{-13} M という極めて



ガドリニウムの破骨細胞に対する作用
Suzuki *et al.*, *Am. J. Environ. Sci.*, 2019 より改編
*: P < 0.05; **: P < 0.01; ***: P < 0.001

低い濃度のガドリニウムにおいても、ウロコの破骨細胞の活性を抑制しました。骨芽細胞においても、 10^{-10} M のガドリニウムは、その活性を低下させることがわかりました。キンギョのウロコを用いた実験に



ガドリニウムの骨芽細胞に対する作用
Suzuki *et al.*, *Am. J. Environ. Sci.*, 2019 より改編
: P < 0.01; *: P < 0.001

より、低い濃度のガドリニウムでも、骨に対して毒性があることがわかりました。特に破骨細胞においては、 10^{-13} M という極めて低い濃度のガドリニウムでも毒性があることがわかりました。(Suzuki *et al.*, in press)。この毒性は、カドミウムと同程度です。骨芽細胞においては、海洋汚染として知られているトリブチルスズと同程度の毒性がありました。したがって、カドミウムやトリブチルスズと同程度に骨代謝に毒性があるガドリニウム汚染について、早急に対応すべきだと思います。

物理的刺激に対する応答についても、魚のウロコを骨モデルとして用いて研究しています。キンギョのウロコを骨モデルとして用いた宇宙実験を実施しました。私たちの宇宙実験を担当していただいたのは、野口聡一宇宙飛行士です。野口聡一氏にお越しいただき、講演していただいたシンポジウムを金沢市文化ホールで開催いたしました。



金沢大学・JAXA 連携シンポジウム (2019年7月) シンポジウム時の記念写真、前列の中央が野口聡一宇宙飛行士、前列の左端が著者

宇宙実験後、地上実験に時間を要しましたが、メラトニン関係のトップジャーナルである *Journal of Pineal Research* (IF:15.221)

に掲載されました。以下に成果の概要を示します。

まず、ウロコの骨芽細胞でメラトニンが作られるとともに、宇宙空間ではメラトニンの合成が低下することを明らかにしました。そこで、メラトニンを添加した培地と無添加の培地でウロコを培養して比較したところ、メラトニン無添加の培地では、わずか3日間の培養でいくつもの破骨細胞が融合して多核化の活性型の破骨細胞になり、その破骨細胞がウロコにある骨質層の溝の幅を広げ、ウロコの骨吸収を促進していることがわかりました。さらに、骨吸収を促進する因子である *Rankl* の遺伝子発現が上昇し、骨吸収を抑制するホルモンであるカルシトニンの遺伝子発現を抑制することもわかりました。他方、メラトニンを添加した培地で培養すると、*Rankl* の発現が抑制され、カルシトニンの発現が正常に戻るということが明らかになりました。(Ikegame *et al.*, 2019)。

これまで宇宙空間において、メラトニンが低下することを調べた研究はなく、宇宙でメラトニンが低下して、カルシトニンの分泌が抑制されることが微小重力下での骨吸収を促進させる機構の一つである可能性が高いと考えています。実際、別の研究グループによって、サルを用いた宇宙実験での血液中のカルシトニン濃度の低下や、ヒトを寝たきりの状態 (擬似微小重力のモデル実験) にした時も、血液中のカルシトニン濃度の低下が報告されています。これらの知見から将来、メラトニンが宇宙飛行士の骨量低下の予防・治療薬に活用されることが期待されます。

以上のように、ウロコは骨のモデルとして使用可能であり、様々な物質や環境に対する応答を解析する優れたモデルだと思います。

【引用文献】

Suzuki *et al.*, *Am. J. Environ. Sci.*, in press.
Ikegame *et al.* (2019) *J. Pineal Res.* 67, e12594.