



海水中トリチウムが魚で周囲の濃度を超えて蓄積しないことを飼育実験により実証
(実験結果が Science of the Total Environment 誌に論文掲載)

【発表の要点】

- ・ トリチウム水と同様に有機結合型トリチウムは体内に蓄積されることが明らかになりつつあるが、海産魚ではこれまで裏付ける実証データがなかった。
- ・ 本実験ではヒラメを対象とした重水素による飼育実験により、有機結合型トリチウム(注1)が周囲の濃度を超えて蓄積されないこと、周囲の濃度が下がれば体外へと排出されて体内に残り続けないことを明らかにした。

【概要】

公益財団法人環境科学技術研究所環境影響研究部の谷享副主任研究員及び石川義朗研究員は、トリチウムと同じ挙動をする重水素(注2)を含んだ海水によりヒラメを飼育し、海水中のトリチウムが体内で有機物となって周囲の濃度を超えて蓄積することはないこと、海水中のトリチウムの濃度が下がれば排出されることを実証するとともに、モデルのシミュレーション計算でも確認しました。

これまでの研究でも、トリチウムは魚介類の体内に蓄積しないとの結果はありますが、一方で、有機結合型トリチウムが体内で蓄積しないことについてはこれまで海産物での実験データはありませんでした。

本実験データとモデルにより、トリチウム水により、海産魚の体内で有機物となったトリチウムが周囲の濃度を超えて蓄積するという不安が解消されることが期待されます。

なお、本研究の成果は、Science of the Total Environment に発表されています。

(注1) 有機物は炭水化物、脂肪、タンパク質のような主に炭素、酸素、水素からなる化合物。この化合物の中の水素がトリチウムに替わったものを有機結合型トリチウムという。

(注2) トリチウム、重水素は水素の同位体(中性子の数が異なる)で、化学的な性質は水素と同じ。トリチウムのみ放射性。

問い合わせ先：(公財) 環境科学技術研究所 共創センター 共創推進課 伊藤
電話 0175-71-1240 Eメール kanken@ies.or.jp
所在地 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駈字家ノ前1番7
HP <https://www.ies.or.jp/>

当研究所は、六ヶ所村に建設が進められている核燃料大型再処理施設から排出される放射性物質の環境中での挙動や低線量放射線の生物影響について青森県からの委託を受けて調査・研究を行っています。

【参考資料】

海水中トリチウムが有機結合型トリチウムとして海産魚で周囲の濃度を超えて蓄積しないことを飼育実験により実証

論文の要点

- 背景： 海水中のトリチウムがトリチウム水として海産魚に取り込まれると、一部が炭水化物やタンパク質といった有機物に結合し（有機結合型トリチウム）、体を構成する有機物となる。
- 課題： 有機結合型トリチウムはトリチウム水と同様に周囲の濃度を超えて蓄積しないことが明らかにされつつあるが、海産魚では裏付けとなる実験データがない。
- 成果： トリチウム水からできた有機結合型トリチウムは、海産魚のヒラメ体内で残り続けることはなく、海水中濃度を超えて蓄積されないことを、飼育実験により明らかにした。
- 意義： この成果は、海水中トリチウムが海産魚に蓄積しないという実環境での観測データを裏付ける科学的知見となる。

実験の概要

- ① トリチウムと同じ水素の仲間で天然には少ない重水素を、重水として添加した海水（重水添加海水）でヒラメを飼育した（図1）。なお、トリチウムの代わりに重水素を用いても十分な結果が得られることは過去の調査で分かっている。
- ② 重水添加海水での飼育期間中、ヒラメの可食部である筋肉の有機結合型重水素濃度（有機物中の水素に対する重水素の存在比）は、海水の重水素濃度よりも低く推移した。
- ③ 天然海水でヒラメの飼育を継続し、有機結合型重水素が筋肉中に保持されずに排出されることを実験データとモデルのシミュレーション計算で確認した。
- ④ 以上のように、海産魚の体内でトリチウム水からできた有機結合型トリチウムが、海水中濃度を超えて蓄積されないことを示す実証データが得られた。

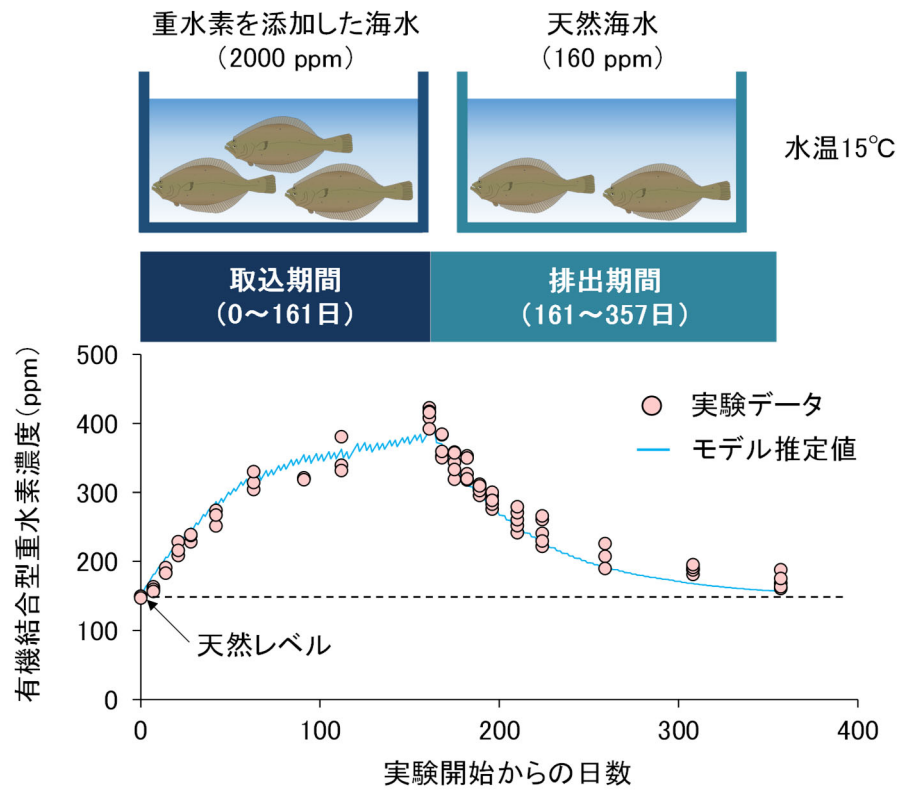


図1 ヒラメ筋肉中の有機結合型重水素濃度の推移
論文では、有機結合型重水素の動きを計算するモデルを用いて、周囲の濃度を超えた蓄積が起こらないことを再確認した。

【補足資料】

1. 発表のポイント

生物の体内に取り込まれたトリチウムは水（トリチウム水）として存在しますが、一部は体内で有機物に結合します。この有機結合型トリチウムは、トリチウム水と比べると体内に残りやすいため、周囲の濃度を超えて蓄積する可能性が議論されてきました。

現在、生物の体内で作られた有機結合型トリチウムが、トリチウム水と同様に蓄積しないことは、さまざまな研究により明らかにされつつあります。一方、魚については淡水魚で研究が進んでいるものの、海産魚では実験データがありませんでした。

今回の論文は、海水中のトリチウムが海産魚に取り込まれて有機結合型トリチウムとなり、その後排出される様子をヒラメの飼育実験により明らかにし、海洋放出されたトリチウムがヒラメ体内で有機結合型トリチウムとして周囲の濃度を超えて蓄積されないことを実験的に示したものです。

2. 研究の背景

トリチウムは、海洋放出される ALPS 処理水に含まれる放射性物質として注目されています。トリチウムは水素の同位体であり、水（トリチウム水）として海洋に放出されます。水として動くことから、トリチウム水は容易に魚に取り込まれます。魚の体内に入ったトリチウム水のほとんどは、環境科学技術研究所の調査報告書^{*1}や東京電力の処理水ポータルサイト^{*2}にあるように、1 日以内で体外へと出ていきます。加えて、魚中のトリチウム水の濃度は海水中濃度を超えない（蓄積しない）ことも明らかにされています。

一方、さまざまな生物の体内では、トリチウム水の一部が成長や生命維持にかかわる代謝によって、有機結合型トリチウムに変化します。有機結合型トリチウムは、有機物が呼吸で二酸化炭素と水に分解されるように、再びトリチウム水となって生物体内から出ていきます。しかし、有機物の全てが速やかに分解されるわけではないため、有機結合型トリチウムはトリチウム水よりも生物体内に残りやすいことが知られています。

海水からトリチウムを取り込んだ海産魚において、有機結合型トリチウムがどれくらいの濃度になり、どのように残り続けるのかという実験データはありません。このようなデータは、海産魚にトリチウムが蓄積しないことを示すために必要なため、日本の沿岸海域で重要な水産物となっているヒラメで実験を行うことにしました。

3. 今回の成果

今回の論文の実験では、トリチウムと同じ水素の同位体で放射線を出さない重水素をヒラメに取り込ませました。天然の海水では、水素に対する重水素の存在

比は約 0.016%と低く、百万分率で表すと 160 ppm です。実験では、重水素濃度を重水として人工的に 2000 ppm まで高めた海水でヒラメを 15°Cで 161 日間飼育し、ヒラメ体内で重水から作られた有機結合型重水素の濃度を調べました（参考資料、図 1）。有機結合型トリチウム及び有機結合型重水素は、魚の体内に取り込まれた水から作られるだけでなく、餌からも供給されます。実験では、海水に由来する重水素の動きを調べるために、海水の重水素濃度のみを高くして、餌の重水素濃度は天然レベルのままにしました。

161 日の飼育期間中、ヒラメの可食部である筋肉中の有機結合型重水素濃度は約 400 ppm まで上昇しました。この値は、実験に用いた海水中の重水素濃度 2000 ppm の 20%です。その後、ヒラメを天然海水に戻すと、実験終了時には有機結合型重水素濃度が天然レベル近くまで戻りました。また、モデルにより、ヒラメ筋肉中の有機結合型トリチウムの生物学的半減期は 133 日であることが初めて明らかになりました。

なお、今回の論文では、筋肉中の有機物への重水素の出入りを調べたため、図 1 の有機結合型重水素濃度は、筋肉を乾燥させて有機物として残った水素に対する有機結合型重水素の比率で表しています。一方、トリチウムの蓄積を評価する場合、生物中濃度は生鮮重あたりのベクレル数 (Bq/kg-生鮮重) として、濃縮係数は生物中濃度/海水中濃度として (Bq/kg-生鮮重) / (Bq/L) の単位で表されます。そこで、図 1 の 161 日目の有機結合型重水素濃度のデータを単位換算し、海水中濃度との比率を (g-重水素/kg-生鮮重) / (g-重水素/L) で表したところ、0.03 と低い値になりました。

図 1 の実験データから、ヒラメの筋肉における有機結合型重水素の生成速度と分解速度を求め、これらの速度を用いた計算により実験データを再現できるモデルを作成しました。このモデルを使って、海水のトリチウム濃度が ALPS 処理水放出時の運用目標値である 1500 Bq/L、餌のトリチウム濃度は天然レベルのままとする条件でヒラメを飼育し続けた場合のシミュレーション計算を行いました。その結果、筋肉中の有機結合型トリチウム濃度は、

- ①海水由来のトリチウム水から作られた有機結合型トリチウムが、筋肉に残り続けずに排出される
- ②餌由来の有機物によって、トリチウム水から作られた有機結合型トリチウムの濃度が希釈される

ことにより、約 100 Bq/kg-生鮮重で平衡に達し、これ以上は高くないという推定結果になりました。なお、このシミュレーションの条件で飼育したヒラメを食品として 1 年間摂取し続けた場合、実効線量は 0.0019 mSv/年と見積もられ、一般公衆の被ばく線量限度である 1 mSv/年を大きく下回ることを確認できました。

4. 成果の意義

今回の論文は、ヒラメの可食部である筋肉において、トリチウム水だけでなく、

①有機結合型トリチウムも蓄積し続けずに代謝によって排泄される、②有機結合型トリチウムの濃度もヒラメが経験した海水中濃度を超えない、ということを示しています。この論文の成果は、海水中トリチウムが海産魚に蓄積しないという実環境での観測データを裏付ける科学的知見となります。

5. 掲載論文

題名 : A deuterium tracer experiment for simulating accumulation and elimination of organically bound tritium in an edible flatfish, olive flounder

(重水素をトレーサとしたヒラメ中有機結合型トリチウムの蓄積と排出に関する実験)

著者 : Takashi Tani (谷享 : データ解析、論文執筆)

Yoshio Ishikawa (石川義朗 : 飼育実験、分析)

掲載誌 : Science of the Total Environment

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723054177>)

掲載日 : 2023 年 9 月 6 日 (上記 URL にて公開)

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166792>

6. 引用文献

*1 環境科学技術研究所 (2010) 平成 21 年度陸水圏生態系炭素等移行実験調査報告書. 青森県.

*2 <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/breedingtest/>

7. 用語解説

重水素

水素の同位体の一つ。天然に存在する水素の 99.99%は原子核に陽子 1 個のみを持つが、約 0.01%は陽子と中性子を 1 個ずつ持ち、重水素と呼ばれる。水素の重さが質量数で 1.008 であるのに対し、重水素は質量数 2.014 と重くなるが、化学的性質は水素と同じである。

生物学的半減期

生物体内に取り込まれた物質が、排出により半分に減少するまでの時間。

同位体

同じ元素であるが、原子核の中性子数の違いによって重さが異なる原子。水素の場合、自然界には水素、重水素、トリチウムの 3 つの同位体がある。放射線を出すトリチウムは放射性同位体、放射線を出さない水素と重水素は安定同位体と呼ばれる。

トリチウム

自然界にごくわずかに存在する水素の放射性同位体であり、原子核に陽子 1 個と中性子 2 個を持つ。中性子の 1 個が放射線を出して陽子になるという原子核の変化により、トリチウ

ムはヘリウムの安定同位体が変わる。原子核の変化によってトリチウムの量が半分になるまでの時間（半減期）は 12.32 年である。

トリチウム水

水素がトリチウムに置き換わった水のこと。水は酸素原子 (O) に水素原子 (H) が 2 つ結合した分子 (H₂O) であり、トリチウム水は一般に 2 つの H のうちの 1 つがトリチウム (Tritium) に置き換わった HTO で表される。

ベクレル (Bq)

放射性物質の量を表す単位であり、1 ベクレルは、放射線を出して変化する原子核の数が 1 秒あたり 1 個であることを意味する。

有機結合型トリチウム

有機物に含まれる水素がトリチウムに置きかわったもの。このうち、炭水化物やタンパク質といった有機物の炭素に結合し、周囲の水の水素とは容易に交換しないトリチウムは、非交換型の有機結合型トリチウムと呼ばれる。一方で、有機物の炭素以外の元素に結合したトリチウムは、周囲の水の水素と容易に交換するため、交換型の有機結合型トリチウムと呼ばれる。交換型の場合、水との交換により速やかに生物から除去されるため、有機物としての蓄積および排出を解析する際には非交換型のみを対象とすることが、国際原子力機関 (IAEA) の報告書に記載されている。今回の論文では、IAEA にしたがって非交換型のみを有機結合型トリチウムとみなした。そして、実験では非交換型の有機結合型重水素を測定及び解析の対象とし、その生物学的半減期を求めた。

8. 参考文献

IAEA (2008) Modelling the environmental transfer of tritium and carbon-14 to biota and man. Report of the tritium and carbon-14 working group of EMRAS theme 1. Environmental Modelling for RAdiation Safety (EMRAS) Programme. IAEA, Vienna.
<http://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/emras/draft-final-reports/emras-tritium-wg.pdf>.

柿内秀樹 (2018) トリチウムの環境動態及び測定技術. 日本原子力学会誌, Vol. 60, No. 9, 31-35.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/60/9/60_537/_pdf

増田毅 (2021) トリチウムの保健物理の最前線: トリチウムの体内動態研究. 日本原子力学会誌, Vol. 63, No. 10, 26-30.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/63/10/63_718/_pdf/-char/ja

宮本霧子 (2022) 海洋におけるトリチウムの動態と海生生物への蓄積. 海生研研報, 27, 71-80.
https://www.kaiseiken.or.jp/publish/reports/lib/2022_27_12.pdf