

排出放射性物質影響調査

# 成果報告会

平成 26 年度

公益財団法人 環境科学技術研究所

公益財団法人 日本海洋科学振興財団

今回の成果報告会で説明する内容は、青森県からの受託事業「排出放射性物質影響調査」及び、「六ヶ所村沖合海洋放射能等調査」により得られた成果の一部です。

# 目 次

解説	： 放射線の単位と影響について	1-5
1.	日本海洋科学振興財団	
1.1	六ヶ所村沖合の海況の特徴	
	(1) 研究の背景	6-10
	(2) 研究報告	11-23
2.	環境科学技術研究所	
2.1	トリチウムの海産生物への移行	
	(1) 研究の背景 ～生物中のトリチウム濃度を予測する～	24-35
	(2) 研究報告	36-56
2.2	放射線の子孫への影響	57-71

**解説：**  
**放射線の単位と影響について**

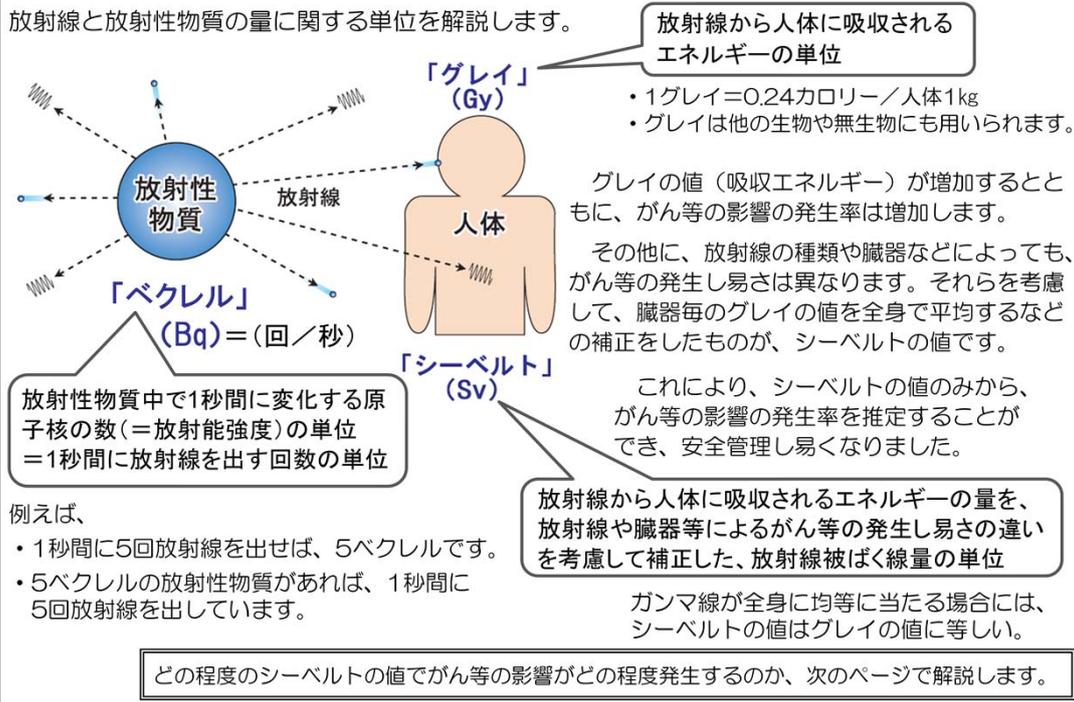
**(公財)環境科学技術研究所**  
**総務部 企画・広報課**  
**石川 敏夫**

—要点—

成果の発表にあたって、その理解の一助とするために、放射線の単位と影響の概要について解説する。

## 放射線の単位

放射線と放射性物質の量に関する単位を解説します。



### ー要点ー

1. ベクレルは、放射性物質の原子核が1秒間に変化する数 (放射能の強さ) の単位

$$1 \text{ ベクレル} = 1 \text{ 個の原子核の変化} / \text{秒}$$

2. グレイは、放射線から人体1kgに吸収されるエネルギー (吸収線量) の単位

$$1 \text{ グレイ} = 1 \text{ ジュール} / \text{kg} = 0.24 \text{ カロリー} / \text{kg}$$

(グレイは、人体に限らずマウスなどの動物に吸収されるエネルギーとしても用いられる。)

3. 放射線の量を人体への影響と単純に関係づけるために用いる係数

- ①放射線加重係数： 放射線の種類によるがん等の発生し易さの違いを、ガンマ線を基準にして表した係数

$$\text{ガンマ線} : 1、 \quad \text{ベータ線} : 1、 \quad \text{アルファ線} : 20$$

- ②組織加重係数： 臓器などの各組織のがん等の発生し易さの違いを表した係数

(遺伝的影響も考慮するため、生殖腺への加重係数も含む。)

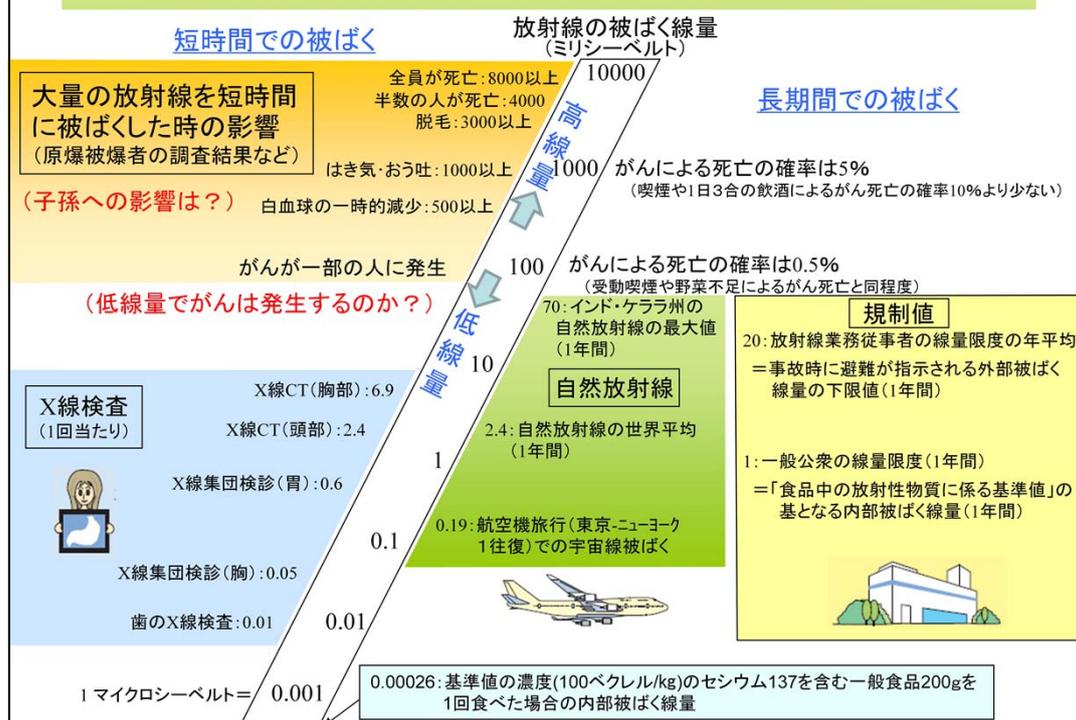
$$\text{肺、骨髄、胃等} : 0.12、 \quad \text{生殖腺} : 0.08、 \quad \text{甲状腺等} : 0.04、 \quad \text{皮膚等} : 0.01$$

(全ての組織の加重係数の合計が1になるように、決められた。)

4. シーベルトの定義

3. の加重係数を臓器などの各組織のグレイの値に掛けて、全身で合計して得られた放射線量が、シーベルトの値 (実効線量) である。

## 放射線の被ばく線量と影響などとの関係の概要

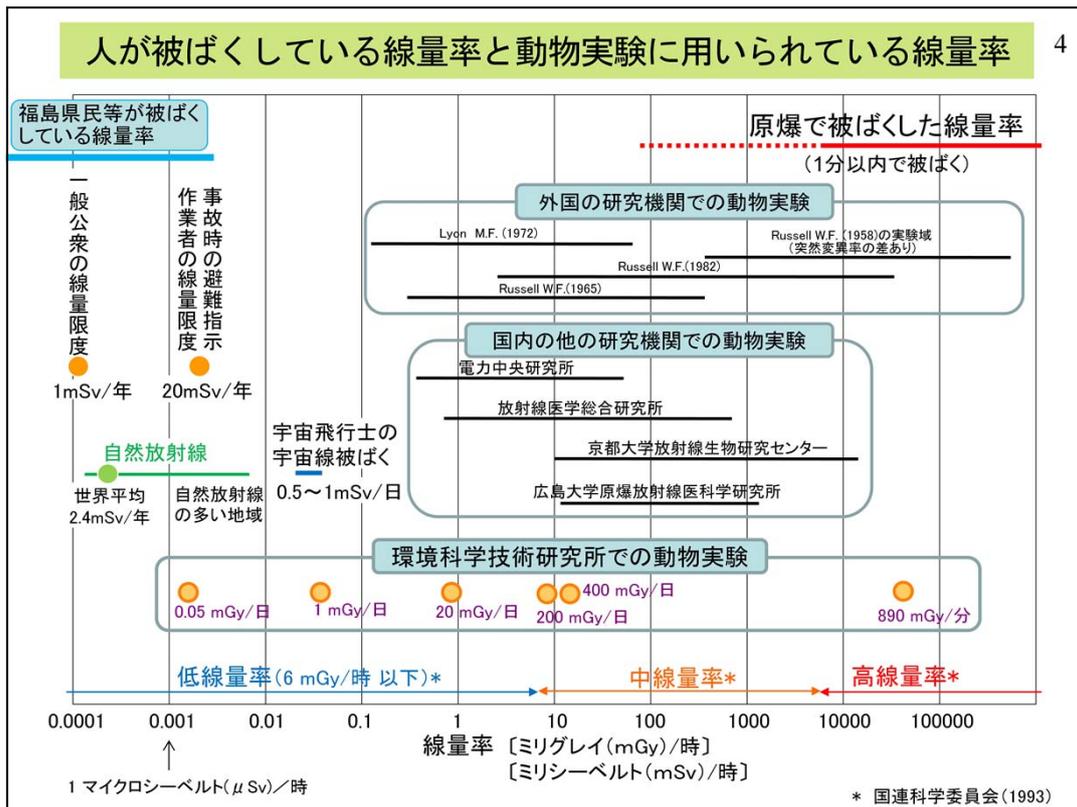


### 一要点一

1. 大量の放射線（高線量）を短時間で被ばくした場合には、様々な影響が現れる。被ばく線量が少なくなるとともに影響も少なくなり、約100ミリシーベルト以下の少量の放射線（低線量）ではがんが発生するののかどうかに関心が高まっている。
2. がんは放射線を被ばくした人が全員なる訳ではなく、例えば、1000ミリシーベルトを100人が被ばくした時、将来がんで死亡する人は約5人であり、その確率は約5%である。約100ミリシーベルト以下の低線量でのがん発生確率は、喫煙や食生活（飲酒、野菜不足）によるがん発生確率より低いことなどから、人の調査で正確に見積もることは困難である。
3. 子孫への放射線の影響については、原爆被爆者の子どもでは見られないが、動物実験では大量の放射線を照射した時に見られる場合がある。

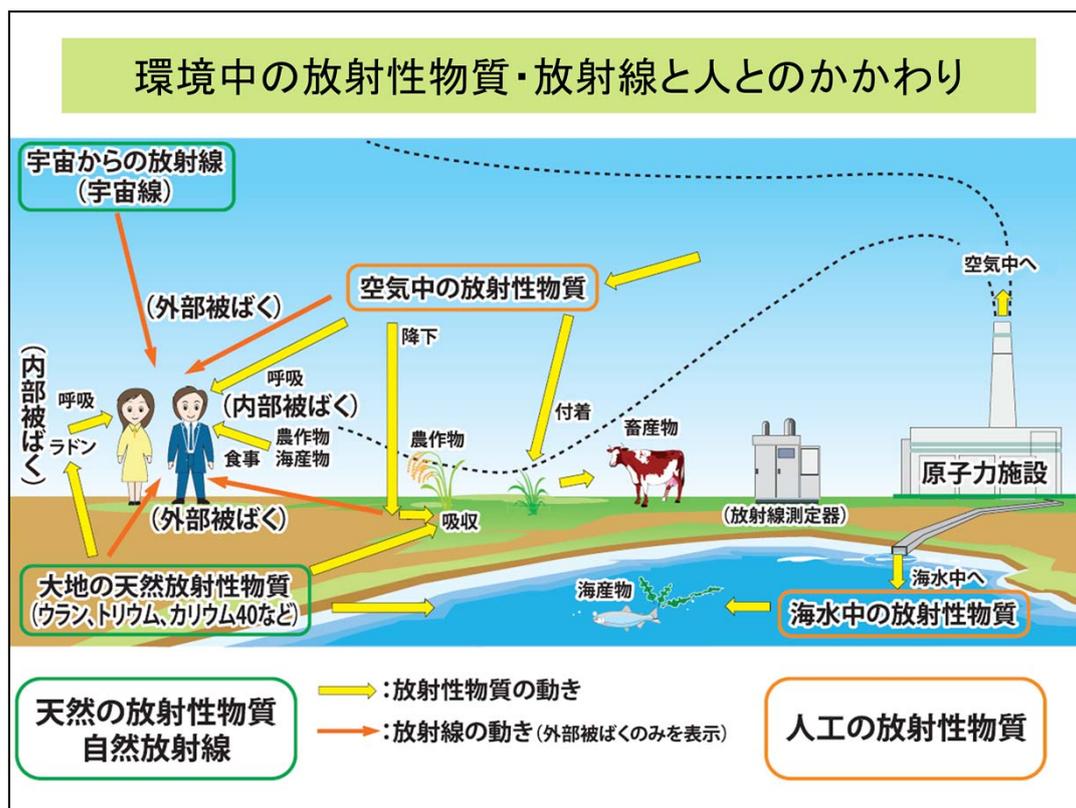
### [用語解説]

線量：被ばくする放射線の総量。約100ミリシーベルト以下が低線量とされている。



—要点—

- 線量率とは、単位時間（1分、1時間、1日または1年）あたりに被ばくする放射線の量である。
- 図は、人が被ばくしている線量率とマウスなどの動物実験で用いられている線量率を比較したものである。
- 原爆では、大量の放射線を1分以内の短時間で被ばくした。このように大量の放射線を短時間に被ばくした場合の線量率を高線量率という。
- 福島県民など原子力施設に関連した放射線被ばく量は、短い時間では少量であるが、長期間にわたって被ばくし続ける可能性がある。この場合の線量率を低線量率という。
- 環境研は、国内外の研究機関の中で最も低い線量率でマウスに放射線を照射できる設備を有している。そのため、原子力施設に関連した放射線被ばくの線量率に最も近い低線量率で照射可能である。
- 環境研では、低線量率放射線を長期間被ばくし続けた場合のがん発生と子孫への影響について、マウスを用いた動物実験で研究している。



— 要点 —

1. 環境中の放射性物質

- ①環境中には、天然の放射性物質が存在している。
- ②六ヶ所村の再処理工場から、少量の放射性物質が空気中と海に排出される。
- ③福島原発事故では、大量の放射性物質が空気中や海に放出された。

環境科学技術研究所では、これらの放射性物質の環境中での動きや、それから発生する放射線の影響に関する研究を行っている。

2. 成果報告会の発表内容

- ①再処理工場や福島原発事故で環境中に放出される放射性物質のうち、海に放出されるトリチウムの海産物への取り込みについて
- ②放射線の人体への影響のうち、子孫への影響（遺伝的影響）について、マウスを用いて研究した結果

(公財) 日本海洋科学振興財団

平成26年度成果報告会

# 六ヶ所村沖合の海況の特徴

～研究の背景～

平成26年9月26日

(公財) 日本海洋科学振興財団  
むつ海洋研究所 分析部長  
北村 敏勝



### －要点－

#### 六ヶ所村沖合海域の流れの特徴

1. 青森県太平洋沿岸(六ヶ所村沖合海域)は、黒潮から分岐し対馬海峡を通過し、日本海を北上する対馬暖流の一部が津軽海峡を通過し、太平洋側に流出する津軽暖流と、千島列島を南下する親潮の影響を受け、複雑な流れを形成し、その流れは、季節や年によって変動している。

2. 津軽暖流は、夏から秋には渦を形成(渦モード)し、冬から春には青森県太平洋沿岸に沿って流れる(沿岸モード)。

#### 調査研究の必要性

大型再処理施設の操業に伴い、海洋へ放出される放射性物質による影響を把握するためには、青森県太平洋沿岸の海水の流れを正しく評価し、それに基づいた放射性物質の広がり(移行拡散)を解析する必要がある。

## 六ヶ所村沖合海洋放射能等調査の目的

大型再処理施設から周辺海域に排出される放射性物質の海洋への影響について、コンピューターによるシミュレーションモデル(固有モデル)によって解析

海水循環モデル: 海水の流れの変化を計算  
核種移行モデル: 放射性物質の拡がいを再現・予測



県民の施設への安心感の醸成

### －要点－

コンピューターによるシミュレーションによって、六ヶ所村沖合を中心とした海域に対して、海水の流れの変化を計算(海水循環モデル)し、その計算結果をもとに放射性物質の分布の変化を再現・予測(核種移行モデル)する。海水循環モデルと核種移行モデルから成るシミュレーションモデルを固有モデルと総称している。

現在、整備した固有モデルの妥当性を検証するとともに、モデルの高分解能化、高精度化を進めている。

### [用語説明]

高分解能化: 観測による当海域の特性をモデルの計算結果で再現できるように水平及び鉛直方向の解像度を高めること。

高精度化: モデル計算を行う際に設定するデータを観測データをもとに推定し、計算結果と観測データを比較して調整することでモデルの精度を高めること。

### [基礎知識]

海水の流れを再現するには、シミュレーションモデルの精度を向上することと、精度を向上するための継続的な海洋観測が必要。

## 固有モデル精度向上のための海洋観測



係留式ブイによる観測



調査船による観測



フェリーによる観測

－観測項目－

- ☆ 水温・塩分
- ☆ 流向・流速(海水の流れ)
- ☆ 放射性物質濃度 等

－要旨－

固有モデル(海水循環モデル、核種移行モデル)の精度を向上するためには、継続的な海洋観測が不可欠である。

1. 放出口周辺に設置した係留式ブイや調査船、仙台～苫小牧航路に就航しているフェリーにより、青森県太平洋沿岸の海洋物理・化学的な観測を実施している。
2. 観測には、水温塩分計、流向流速計、ガンマ線計測器等の観測機器が用いられる。

- ・係留式ブイ: 定点(放出口周辺)での水温・塩分、流向流速(海水の流れ)、風速、ガンマ線データを連続的に観測
- ・調査船観測: ある時刻での空間的な分布状況を把握するため、水温・塩分、流向流速(海水の流れ)を観測するとともに、海水を採取し放射性物質濃度等を分析
- ・フェリー観測: 定期船上から投棄式の水溫・塩分計を投入し、航路での水溫・塩分分布を定期的に観測

[基礎知識]

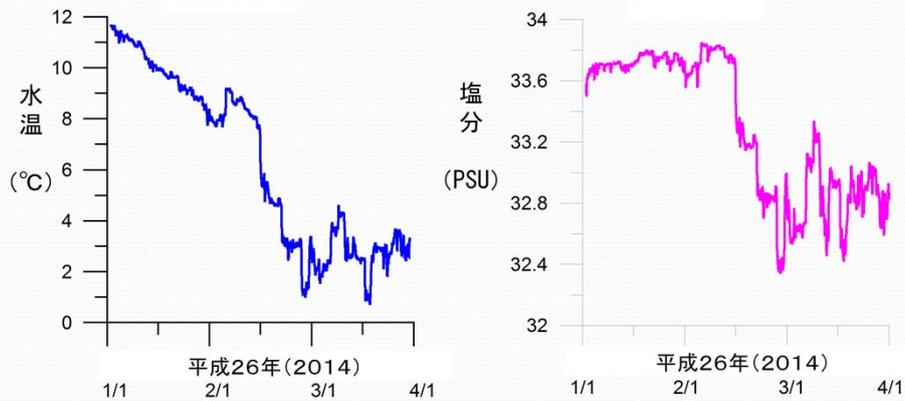
水温・塩分計(CTD; Conductivity Temperature Depth profiler):

電気伝導度、水温、深度を観測する装置。電気伝導度と水温から塩分を計算する。海洋観測の現場で良く使われる測器。

投棄式水温・塩分計(XCTD; eXpendable Conductivity Temperature Depth profiler):

水温検出部及び電気伝導度検出部を装着したプローブを海中に投下することにより、水温及び塩分の鉛直分布を観測するシステムで、船舶航走中でも使用が可能。

## 係留式フイで観測された水温&塩分



☆ 平成26年(2014年)2月中旬から、これまで観測されたことのない海水温の低下現象とその継続が観測

☆ 親潮系の水塊の接岸による

— 要旨 —

1. 平成26年2月中旬から、これまでに観測されたことのない海水温の低下とその継続が観測された。
2. 同時に塩分も低下していることから、親潮系の水塊が接岸したことが考えられる。
3. このような水温と塩分の変動は、排出水の挙動に影響を与えると考えられる。

(公財)日本海洋科学振興財団

平成26年度成果報告会

# 六ヶ所村沖合の海況の特徴

～研究報告～

平成26年9月26日

(公財)日本海洋科学振興財団  
むつ海洋研究所 分析部  
小藤久毅

## 今日の話題

- ☆ 平成26年の水温の異常低下について
- ☆ 六ヶ所村沖合の係留式ブイでの観測について
- ☆ 六ヶ所村沖合の流れの特徴について

－要点－

固有モデル(海水循環モデル及び核種移行モデル)の精度向上のために各種海洋観測を実施している。平成15年度から継続的に実施している係留式ブイでの観測結果を用いて表記の内容について説明する。

[用語説明]

固有モデル:六ヶ所村沖合を中心とした海域での放射性物質の広がりをコンピュータシミュレーションにより再現・予測するモデル。海水循環モデルと核種移行モデルから成る。

海水循環モデル:海水の流れの変化を計算するモデル。

核種移行モデル:海水循環モデルでの計算結果を元に、海での放射性物質の広がりを再現・予測するモデル。

## 平成26年の水温低下



- ☆ 平成26年はこれまでの平均より最大5~6°C低下 (親潮系の水の影響による)
- ☆ 低温状態は2ヶ月以上継続

### — 要点 —

六ヶ所村沖合の係留式ブイでの平成26年に発生した水温低下の観測例。

平成26年2月中旬に下北半島太平洋沿岸、津軽海峡で水温が急激に低下した。六ヶ所村沖合の係留式ブイでも水温低下が観測され、その水温はこれまでの同月同日の(平成16~25年の平均)と比較して最大で5~6°C低いものであった。水温は3月下旬から上昇し始めたが、5月初めまでは例年よりも低い状態が継続した。水温低下時に塩分も低下していたことから、親潮系の水の影響と考えられる。

### [基礎知識]

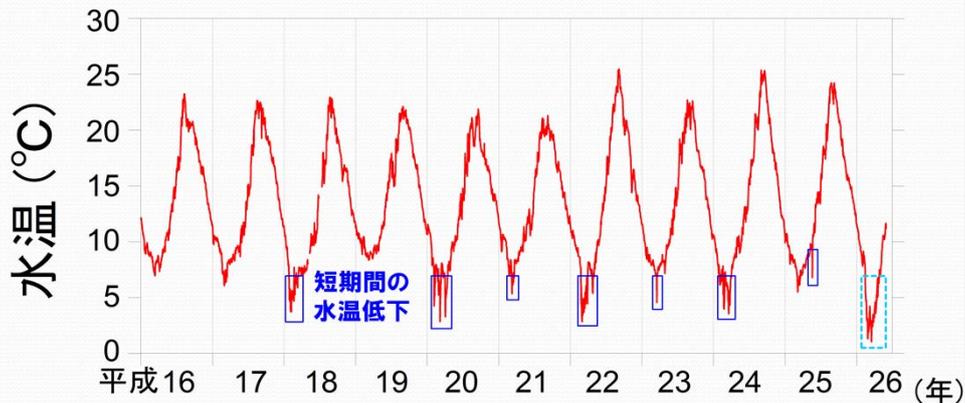
青森県の太平洋側沖合は、津軽暖流(暖かく高塩分)と親潮(冷たく低塩分)が出会う海域である。どちらの影響を強く受けるかによって水温が大きく変化する。

### [用語解説]

津軽暖流: 日本海を北上する対馬暖流の一部が津軽海峡から太平洋に流れ出た暖かく高塩分の海流(暖流)。

親潮: 千島列島に沿って南下し、日本の東に達する冷たく低塩分の海流(寒流)。栄養塩が豊富で「魚類や海藻類を育てる親にあたる潮」という意味で親潮と呼ばれる。

## 過去10年間の水温変化



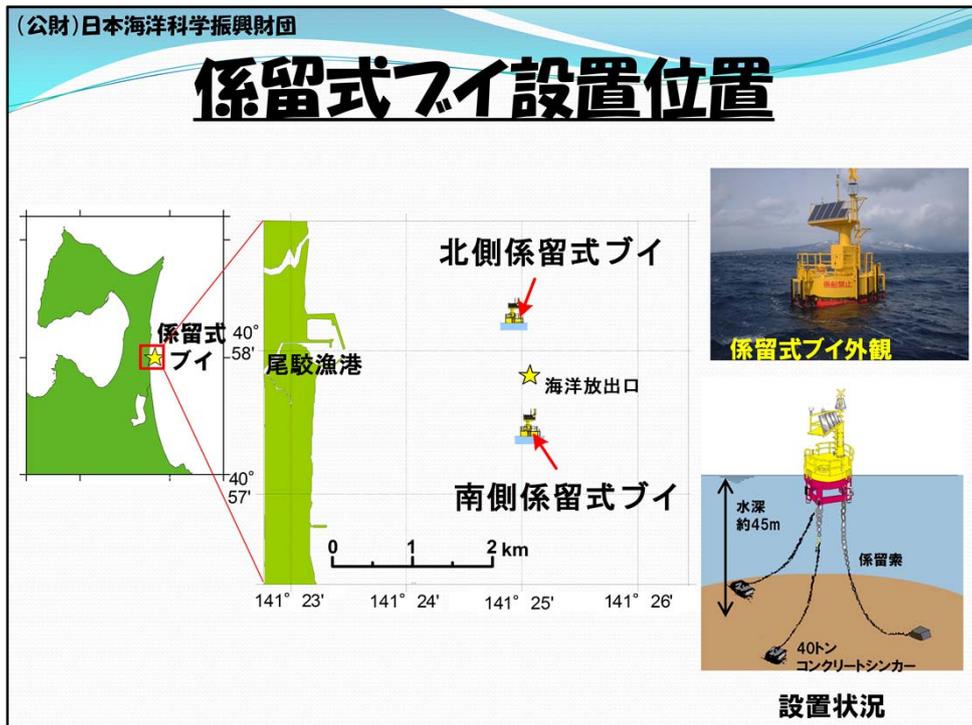
☆ 冬～春には急激な水温低下がしばしば発生

☆ 平成26年の水温低下は過去10年で最大・最長

— 要点 —

水温は8月から9月に最も高くなり、3月から4月に最も低くなる。冬から春にかけてなだらかに7～8℃まで低下した後に上昇に転じる年(平成16、17、19年)と急激に2～5℃低下した後に1日～十数日で元に戻るという変化が見られる年(平成18、20～25年)がある。冬～春にしばしば見られる急激な水温低下は、親潮系の水が観測位置近くに接近した影響と考えられる。

短期間の水温低下は冬～春によく見られる現象であるが、平成26年の低下は、温度の低下幅・継続期間共にこれまでの観測で最も大きいものであった。



— 要点 —

六ヶ所村沖合の海岸から約2.5kmの位置にブイ(係留式ブイ)を設置し、連続的な海洋観測を行っている。平成15年10月に1基目を設置し、現在は海洋放出口南北の2基で観測を実施。

[設置位置]

北側係留式ブイ: 放出口の北北西約700m

南側係留式ブイ: 放出口の南約700m

[係留式ブイ緒元]

直径	約3.5m
全高	約8m(海面から約5m)
重量	約10トン
電源	太陽電池および鉛蓄電池
シンカー	約40トン(重コンクリート製)×3個

## 係留式ブイ搭載計測機器



### －要点－

係留式ブイでは、水温・塩分計など搭載した様々な計測機器によって連続的な観測を実施している。ブイ及び各計測機器は定期的な点検整備と試料採取・分析を行い、海上標識としての安全性及び計測データの信頼性を確保している。

### [搭載計測機器]

風向・風速計:海上の風向・風速を計測。

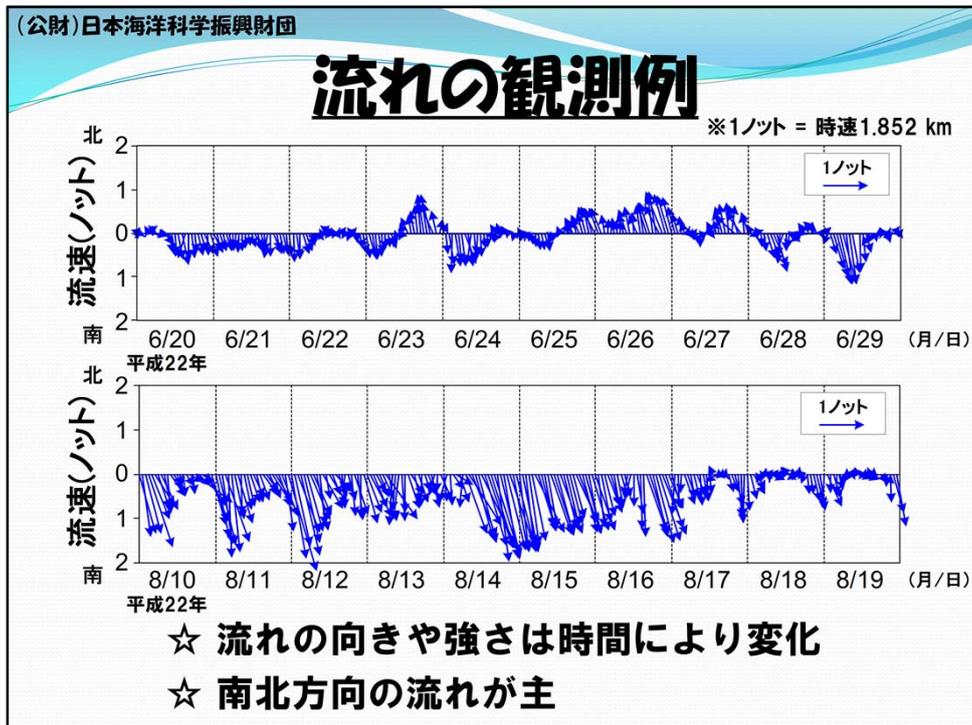
水温・塩分計:水温および塩分を計測。塩分は海水の電気伝導度と水温から算出。

流向流速計:装置から発振する超音波により、海水が流れる方向と流れの強さを計測する。

ガンマ線計測器:水中のガンマ線を計測。計測されるガンマ線のカウントとエネルギーから水中に存在するガンマ線を放出する放射性物質濃度が算出できる。

### [用語説明]

ガンマ線:放射性物質から放出される放射線の一種。他にアルファ線、ベータ線などがある。



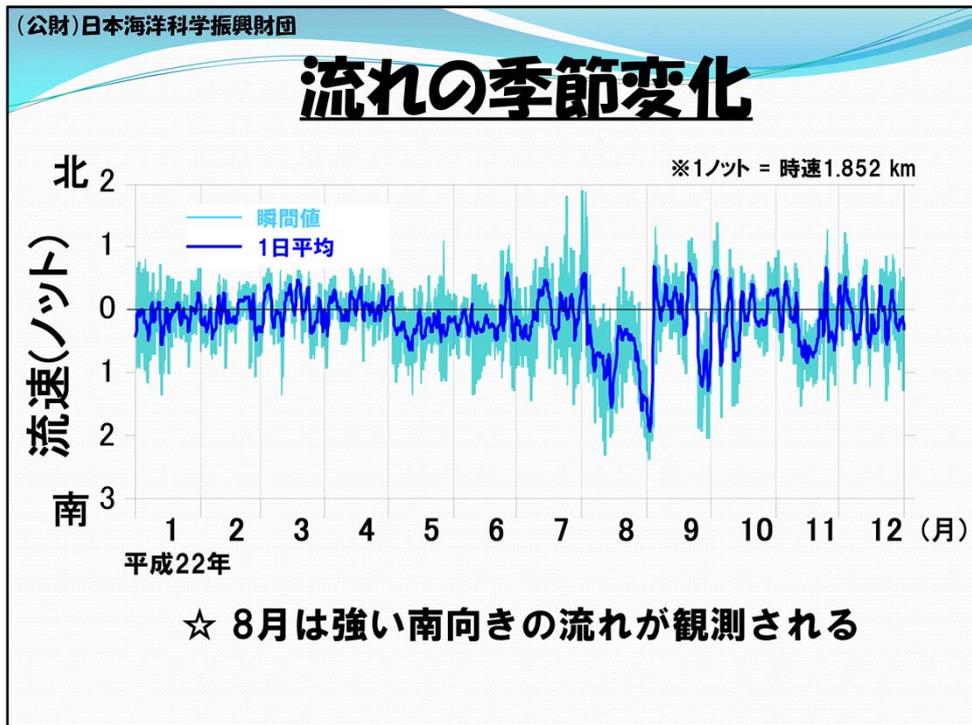
－要点－

六ヶ所村沖合の係留式ブイに搭載した流向・流速計で海水の流れる方向・流れの速さを計測している。上図は6月と8月の計測データ例。

流向・流速は時間とともに変化し、係留式ブイでは流れがほぼ止まった状態から、2ノットを超える強い流れまで観測されている。係留式ブイが位置する岸近く(岸から約2.5km)では地形の影響により南北方向の流れが主であり、東西方向の流れの割合は少なく速度も遅い。

[用語説明]

ノット: 速度の単位。1ノット=1.852 km/時

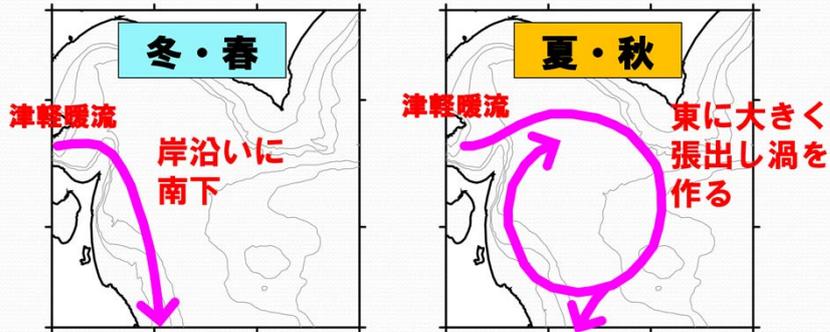


— 要点 —

係留式ブイで観測される主な流れの方向である南北方向の流れの強さを1日程度の平均で見ると、8月は南向きの流れが強いという季節変化が見られる。この傾向は係留式ブイでの観測開始後ほとんどの年で見られている。

この季節的な傾向には、青森県の太平洋側沖合の大きな海水の流れが影響していると推測される。

## 津軽暖流の季節変化



津軽暖流の季節変化パターン  
※図はConlon (1982) による推測の流れ

☆ 冬・春と夏・秋で大きく異なる流路

— 要点 —

津軽海峡から太平洋に流れ出す津軽暖流の流路は季節により変化することが知られている。

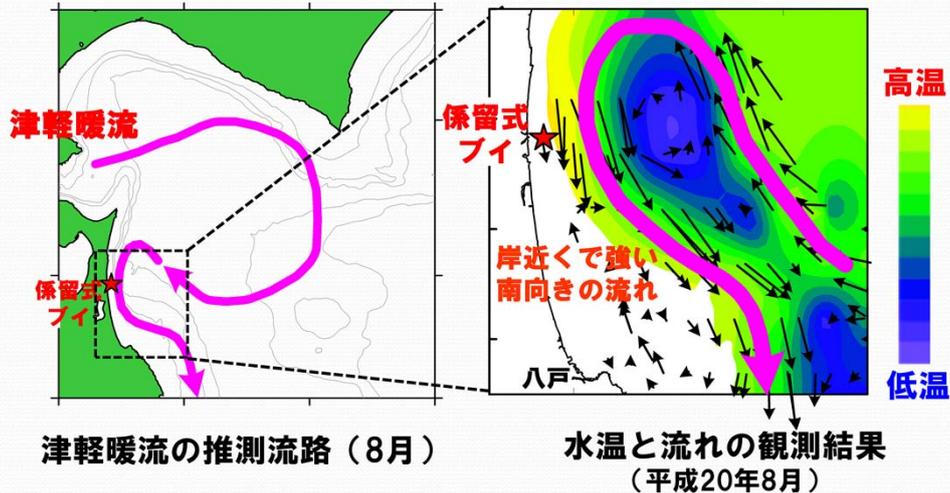
冬から春には太平洋側の岸沿いに南下し、夏から秋には津軽海峡から東に大きく張出し、時計回りの渦を作ると推測されている。

このような変化パターンには、津軽暖流の水が夏は軽く冬は重いこと、津軽暖流の流量が夏は多く冬は少ないことなどが関連しているのではないかと推測される。

[基礎知識]

海水の密度(重さ)は主に温度と塩分によって決まる。暖かい水は軽く冷たい水は重い、また塩分の高い水は重く低い水は軽い。冬は津軽暖流の温度が低いため密度が高い(重い)。

## 津軽暖流と六ヶ所村沖合の流れ



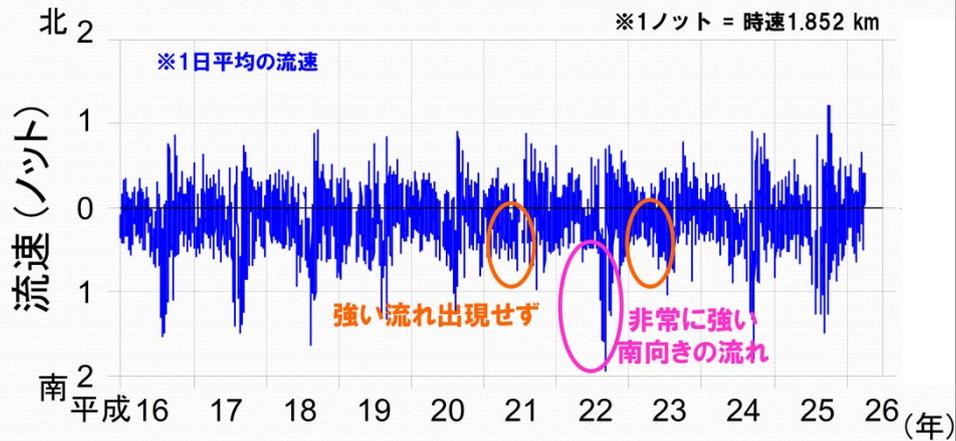
☆ 津軽暖流の複雑な流れが岸近くの流れにも影響

— 要点 —

津軽海峡から東側に大きく張出した津軽暖流が時計回りの渦を形成する過程の一時に、渦の南側から岸方向にかけて冷水が見られ、その周りに小規模な反時計回りの渦の形成が観測された例がある。

津軽暖流が渦を作る過程での複雑な流れが岸近くにも影響し、8月に係留式ブイで観測される強い南向きの流れを作る要因になっていると推測される。

## 過去10年での流れの変化



☆ 流れの強さは年により大きく異なる  
(津軽暖流の流況の違いなどが影響)

— 要点 —

係留式ブイでは、ほぼ毎年8月頃に強い南向きの流れが観測されるが、過去に何度か観測されない年(平成21,23年)がある一方、瞬間的に2ノットを超えただけでなく、1日平均でも2ノット近い強い流れが観測された年(平成22年)もある。

流れの季節的な特徴がどの程度の強さで現れるかは、年による違いが大きい。このような違いは、津軽暖流の強さや流路、渦を形成する時期の違いなどが影響している可能性がある。

## まとめ

- ☆ 冬～春の急激な水温低下は過去にも度々観測。平成26年度の水温低下は低下幅・継続期間共に過去最大。
- ☆ 夏は強い南向きの流れが見られる。
- ☆ 六ヶ所村沖合の流れには津軽暖流の流れの変化が影響。
- ☆ 流れの強さ・水温ともに年による違いが大きい。

## より確かな放射性物質分布の 再現・予測のために

### 【海洋観測】

- ・ 六ヶ所村沖合での海況の把握
- ・ 特徴的な現象の発生過程・要因

固有モデルの改良

より確かな放射性物質分布の再現・予測

－要点－

係留式ブイを設置している海洋放出口付近(岸から約2.5km)の海況にも、津軽暖流や親潮といった海流の変化が影響している。

観測により六ヶ所村沖合の海況を把握し、海況の変化や特徴的な現象がどのような過程や要因で生じるのかを明らかにすることにより、固有モデルで計算される流れや放射性物質の広がり精度を向上させて行く。

# 生物中のトリチウム濃度を予測する

(公財)環境科学技術研究所  
理事 環境影響研究部長  
久松 俊一

1

—要点—

ここでは、予備知識を話す。

## 原子炉内ではトリチウム(3重水素)もできる

トリチウムとは

質量数が3の水素同位体

質量数1：軽水素 ( $^1\text{H}$ )：99.985%

質量数2：重水素 ( $^2\text{H}$ )：0.015%

弱いベータ線を出してヘリウム3になる。

半減期：12.3年

2

—要点—

1. 水素には質量数が異なる同位体がある。
2. 自然状態では、質量数が1の軽水素が99.985%であり、質量数が2の重水素が0.015%含まれている。
3. この他、質量数が3のトリチウムがあり、自然界にもわずかながら存在する。
4. 軽水素と重水素は放射能を持たないが、トリチウムは弱いベータ線を出して半減期12.3年でヘリウム3になる。
5. トリチウムは原子炉の中でも作られ、燃料内に蓄積されていく。

## 原子炉内でのトリチウムのでき方

冷却水や制御棒中のホウ素と中性子の反応

冷却水中の重水素と中性子の反応

ウランが2つではなく、3つに核分裂した時の一番小さな塊として生成

3

—要点—

1. 原子炉内でトリチウムができる主な反応を示している。



－要点－

1. トリチウムの民生利用：トリチウムを蛍光剤と混ぜると自発発光剤となるので、夜光塗料として塗ったり、ガラス管に封入して光源として使用される。
2. 海外ではよく使われており、写真は民生品でトリチウムを使用した例である。
3. しかし、これらの物の中には国内法では放射性元素として取り扱う必要がある物も稀に含まれ、その場合には販売、廃棄や所持に制限がある。
4. トリチウムを利用した海外製発光キーホルダーを販売した業者が摘発された例もある。

〔用語解説〕

ベクレル：放射性物質の量を表す単位

## トリチウムの出す弱いベータ線とは

### ベータ線の最大エネルギーと水中での最大飛程

トリチウム	：	18 keV	0.0055 mm
ヨウ素131	：	606 keV*	2.1 mm
セシウム137	：	512 keV*	1.7 mm

\* 主なベータ線

5

### －要点－

1. ベータ線が出る時には決まったエネルギーで出るわけではなく、様々なエネルギーを持って出て来る。ただし、最大エネルギーは決まっており、ここでは、ベータ線のエネルギーの強さを最大エネルギーで表した。
2. ベータ線はエネルギーによりどこまで飛ぶかが決まる。最大エネルギーを持つベータ線が飛ぶ最大の距離が最大飛程となる。
3. トリチウムのベータ線の最大飛程は0.0055 mm (5.5ミクロン) である。
4. 人体の皮膚の角質は死滅した表皮細胞でできており、足の裏等の特に厚い部分を除くと10-20ミクロンであるので、皮膚表面のトリチウムからのベータ線が角質層を透過することはない。
5. 前述のトリチウムを利用した光源でも、時計のガラスや封入してあるガラス管をベータ線が透過することはない。
6. ただし、プラスチックのケースを使った時計でトリチウム自体が漏れた例は報告されている。漏れても微量なので健康上の問題はなく、ステンレスのケースでは漏れたという報告はない。

### 〔用語解説〕

keV：キロエレクトロンボルト、放射線のエネルギーを表す単位。

# 1 ベクレル(Bq)の摂取で、何シーベルトの 内部被ばくになるか(ICRP)

ナノシーベルト(nSv、1/10 <sup>9</sup> Sv)			
食べたとき		吸い込んだとき	
トリチウム (水)	0.018	トリチウム (水)	0.018
トリチウム (有機物)	0.042	トリチウム (S)	0.26
炭素14	0.58	炭素14 (S)	5.8
ストロンチウム90	28	ストロンチウム90(S)	160
セシウム134	19	セシウム134 (S)	20
セシウム137	13	セシウム137 (S)	39

S : とても溶けにくく肺に留まりやすい化合物

6

## －要点－

1. 吸い込んだときの被ばく線量は放射性物質の形態で変わる。トリチウム以外では最も被ばく線量の高い形態を挙げている。形態は以下のように分類。

F : fast、 溶けやすく血流に乗り全身へ移行しやすい形態。

S : slow、 とても溶けにくく肺に留まりやすい形態。

M : medium、 中間の性質を持つ形態。

2. トリチウムは水素の同位体であるので、水(H<sub>2</sub>O)の水素と入れ替わり(HTO、Tはトリチウム)、トリチウム水となる。水の形で食べたり、吸い込んだりした時のトリチウムの被ばくが特に少ないのは、水が比較的速く体外に排泄され、体内に留まる時間が短いためである。

3. 有機物の水素と置き換わったトリチウムはトリチウム水よりも体内に長く留まると考えられており、線量が増えている。

## 〔用語解説〕

シーベルト : 放射線の被ばく線量を実効線量として表す単位。

ミリシーベルト(mSv)=シーベルト(Sv)の1/1000

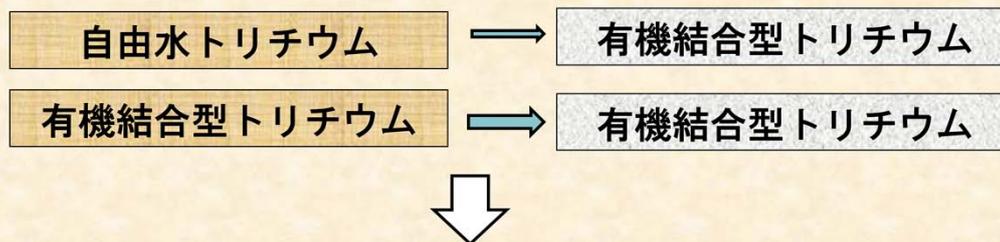
マイクロシーベルト(μSv) = ミリシーベルト(mSv)の1/1000

ナノシーベルト(nSv) = マイクロシーベルト(μSv)の1/1000

ICRP : 国際放射線防護委員会、放射線防護の考え方や基準値を示す委員会。

## 生物中のトリチウム

- 生物中のトリチウム
  - 〔 水の水素として含まれる :自由水トリチウム
  - 〔 有機物中の水素として含まれる :有機結合型トリチウム
- 一般に有機結合型トリチウムは自由水トリチウムより体内に留まり易い。
- 有機結合型トリチウムを食べると、有機結合型トリチウムに成り易い。



トリチウムは生物濃縮されないのか??

7

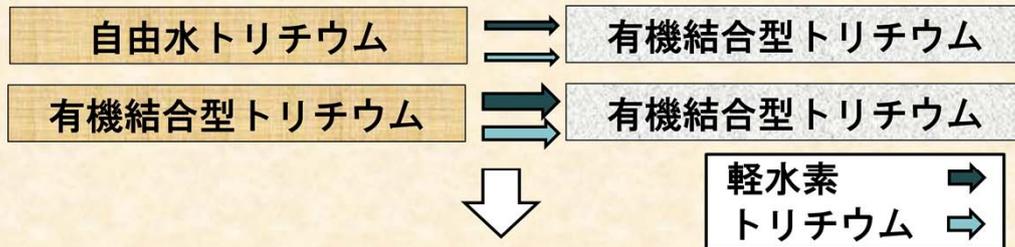
### — 要点 —

1. 生物中のトリチウムは自由水トリチウムと有機結合型トリチウムに分類される。
2. 自由水とは生物中の水分のことで、自由水トリチウムは水分に含まれるトリチウムである。
3. 有機結合型トリチウムは体内のたんぱく質や脂肪と言った有機物に含まれているトリチウムである。
4. 有機物は炭素、水素、酸素、窒素等でできている。体重60 kgの男性では4 kgの水素が水として含まれ、2 kgが有機物の形で含まれている\*。
5. 一般的に、有機結合型トリチウムを食べた場合は、自由水トリチウムより体内の有機結合型トリチウムに成り易い性質を持っている。
6. 体内の有機物中のトリチウムは、食べた有機物からだけ合成されるのではなく、自由水トリチウムからも少ないながら合成される。
7. では、トリチウムは生物濃縮されないのか? つまり、体内のトリチウム濃度が食べたものより上がることはないのか?

\* 国際放射線防護委員会が作成した体重70 kgの標準人（男性）の値を、体重60 kgに換算した値。

## トリチウムの生物による濃縮？

- トリチウムは軽水素、重水素とほぼ同じ挙動を取る。  
実験室では、トリチウムの有機結合型への移行率は軽水素より、むしろ小さい。



トリチウムは生物によって濃縮しない。

- 実際の食品中のトリチウムを自由水と有機結合型に分けて測定すると、有機結合型の濃度が自由水より高いことがあり、生物濃縮が起きているように見える。

8

### －要点－

1. トリチウムは基本的に軽水素や重水素と同じ挙動を取り、実験室での植物栽培、動物飼育では有機物への移行率は軽水素に比べてわずかに小さいことが知られている。
2. つまり、自由水トリチウムから有機結合型トリチウムが合成される場合でも移行率は小さくなり、また、有機結合型トリチウムから有機結合型への移行でもそうなる。
3. 従って、トリチウムは生物によって濃縮されることはない、と言うのが結論である。
4. しかし、実際の食品中のトリチウムを自由水と有機結合型に分けて測定すると、有機結合型の濃度が自由水より高いことがあり、生物濃縮が起きていると誤解されることがある。

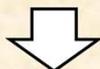
## トリチウムの生物による濃縮？その2

- トリチウムの濃度の表し方 Bq/L

自由水トリチウム : 水1リットル当たりのベクレル

有機結合型トリチウム : 燃焼水1リットル当たりのベクレル  
乾燥物を燃やしてできた水（燃焼水）を集めて測る。

- 生物濃縮が起きているように見えるとは。



自由水トリチウム濃度 < 燃焼水中トリチウム濃度

- 実際に1970-80年代に測定された食品や松葉にはそのような例がたくさんあります。

9

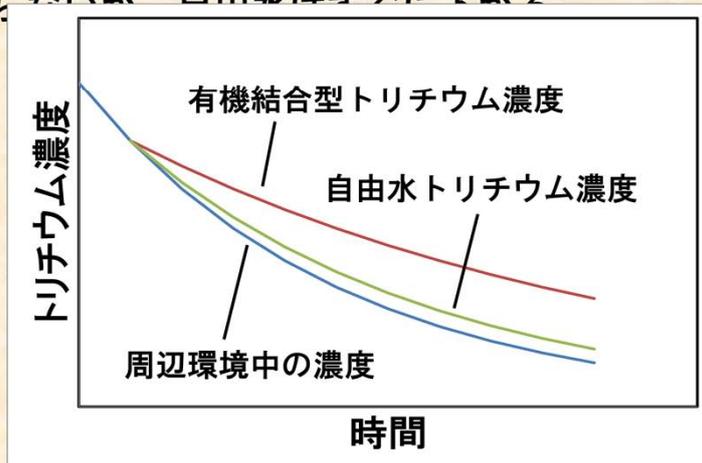
### — 要点 —

1. 最初に、トリチウムの濃度の表し方を説明する。
2. トリチウムが生物濃縮されているかどうかを判断するような場合には、トリチウムの濃度として、水1リットルに何ベクレル (Bq) のトリチウムが含まれるかを表す単位を使う。
3. 自由水トリチウムは元々水の形なので、そのままの濃度になる。
4. 有機結合型トリチウムの場合、先ず有機物を燃やす。燃やすと含まれている水素から水ができるので、トリチウムもトリチウム水の形となる。そこで、燃やしてできた燃焼水に含まれるトリチウムの量として、自由水トリチウムと同じように水1リットル当たりのベクレル数で表す。
5. 次に、生物濃縮が起きているように見えるとは、例えば、一つの食品の乾燥物を燃やした燃焼水中のトリチウム濃度が、その食品中の自由水トリチウム濃度より高くなっていることを言う。
6. 実際に、1970-80年代に測定された食品や松葉にはそのような例がたくさんある。

## トリチウムの生物による濃縮？その3

- 環境中の濃度が変動しているときに見かけの生物濃縮が現れる。

周辺環境中の濃度が高いときに生物に取り込まれると、環境中の濃度が下がっても有機物に結合したトリチウムの濃度はなかなか下がらないが、自由水はすぐに下がる。



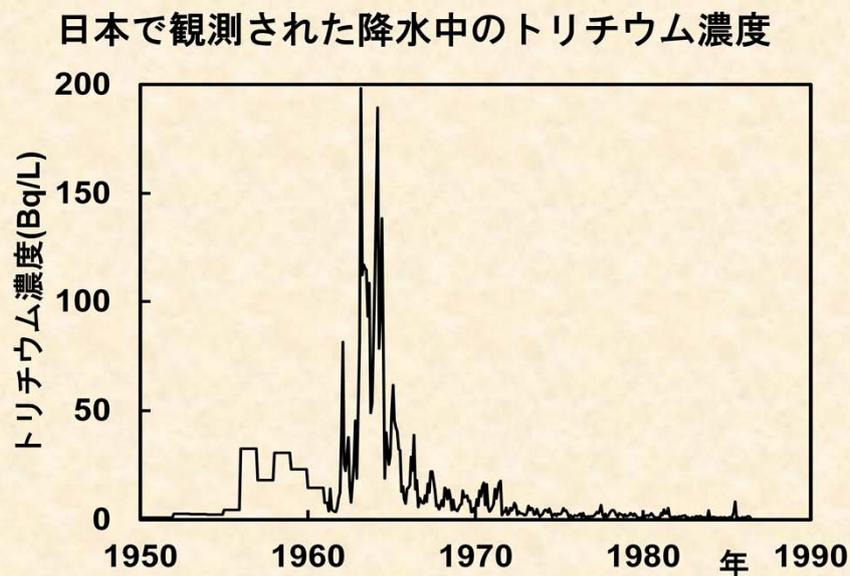
10

### — 要点 —

1. 実際の環境で、言わば見かけの生物濃縮が見られるのは、環境中でのトリチウム濃度が変動しているためである。
2. 周辺環境中の濃度が高いときに生物に取り込まれると、環境中の濃度が下がっても有機物に結合したトリチウムの濃度はなかなか下がらない。しかし、自由水はすぐに下るため、有機結合型トリチウムの濃度が自由水トリチウム濃度を超えてしまい、見かけの生物濃縮になると考えられている。

## 環境中のトリチウム濃度

- 核実験起源のトリチウム濃度が1970-80年代で減少していた。



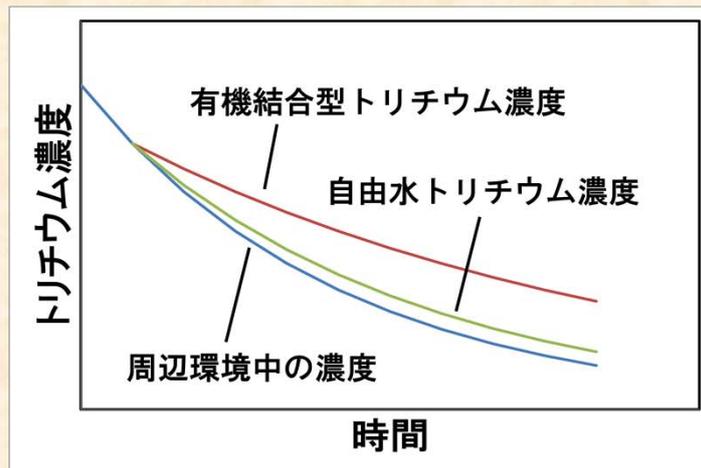
11

### —要点—

1. これは、日本で観測された降水中の濃度を示したグラフである。
2. 主に1960年代に盛んに行われた大気圏内核実験により降水中のトリチウム濃度が増加した。
3. 部分的核実験停止条約によって、大気圏内核実験は大幅に減少し、それに伴い降水中のトリチウム濃度も下がっている。
4. 見かけの生物濃縮がよく見られた1970-80年代は減少期であった。
5. 1950年代と1960年代当初のデータは降水ではなく、ワインを分析したものである。

## 生物のトリチウム濃度を予測する

- では、環境中の濃度が下のように下がるだけでなく上がった  
り下がったりを繰り返したら、生物中のトリチウム濃度はどう  
なるのでしょうか。
- そのような環境中での生物のトリチウム濃度を予測するため  
には計算モデルが必要になります。



12

### －要点－

1. 環境中のトリチウム濃度が増加する場合の生物中の濃度を予測するためには、計算モデルが必要となる。
2. 今回は、海産物のトリチウムモデルを作成したので、次の講演で紹介する。

# トリチウムの海産生物への移行

(公財) 環境科学技術研究所

環境影響研究部

柴田 敏宏

1

## 移行モデル構築の目的

- トリチウムでの放射線被ばくは内部被ばくのみ  
⇒動植物中(≒食品)トリチウム濃度が重要
- トリチウム移行モデルを作成し、動植物中トリチウム濃度を見積もる
- どれくらいの速度で濃度が上昇/低下するかわかる  
=より正確に被ばく線量が分かる
  - 環境中トリチウム濃度の変化に生体内トリチウム濃度変化が追いつかず一時的に環境中濃度より高い/低いが生じ得る
  - 線量評価は1年間の平均値で平衡状態を想定して計算

2

### －要点－

1. トリチウムは内部被ばくのみが問題になる物質である。このため、食品中のトリチウム濃度がどの程度なのかが問題となる。
2. 大気や水からどの程度の量が、どの程度の速さで動植物に移動するのかを計算するモデルを作ることで、水や大気中のトリチウム濃度変化に対し動植物中トリチウム濃度がどのような変化をするか計算することができるようになる。

## 今回作成したモデル

- 今回はアワビへの移行を評価



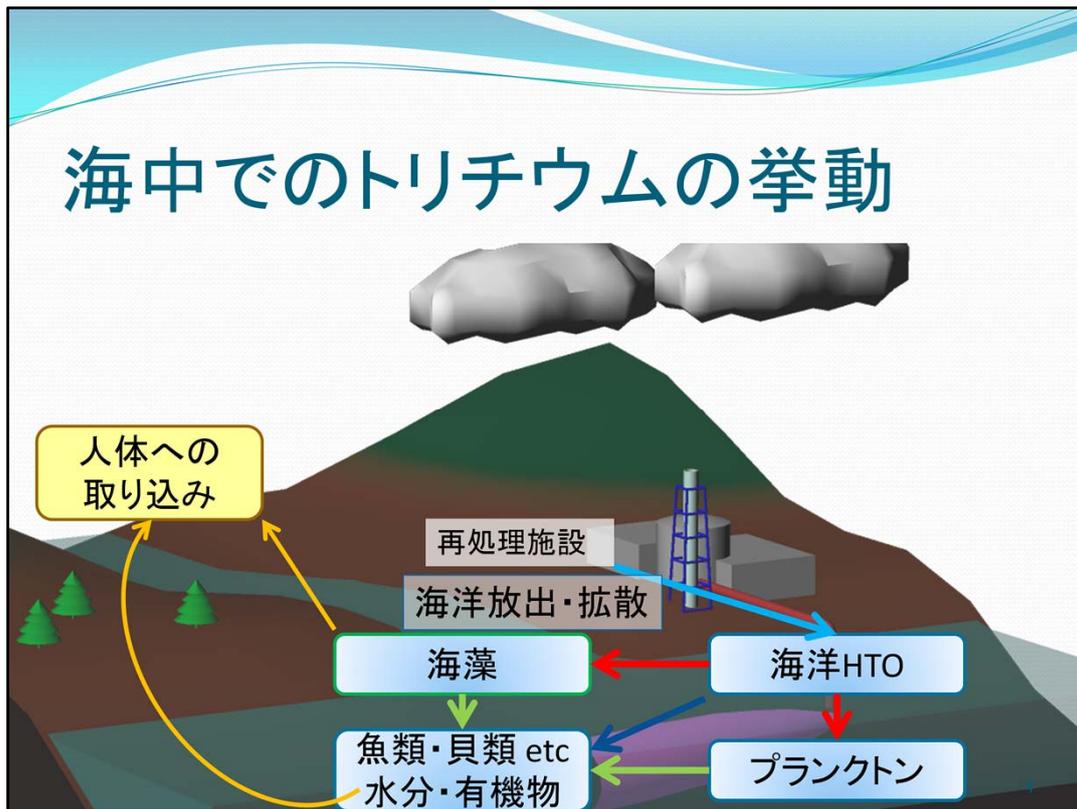
### 目的

- 環境中トリチウム濃度の変化に対する生体内トリチウム濃度変化の速度を見積もる

3

### －要点－

1. 今回はアワビにトリチウムがどのように取り込まれるか計算するモデルを作成した。

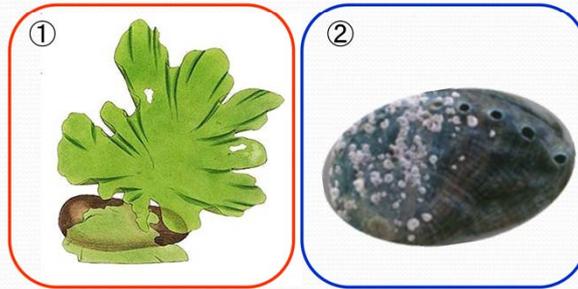


－要点－

1. 六ヶ所村の大型再処理施設では、放出されるトリチウムの大部分が海洋に放出される。
2. 放出されたトリチウムは、海流に乗って拡散し、植物性プランクトンあるいは海藻に取り込まれ、食物連鎖を通じて魚やその他の生物に取り込まれると考えられる。
3. トリチウムを取り込んだ海藻や魚等をヒトが食べれば、人の体内にトリチウムが取り込まれることになる。

## アワビの生態

- 水深20m程の岩礁に生息
- アオサ、ワカメ、コンブなどの海藻類を食べている。
- 主に夜行性

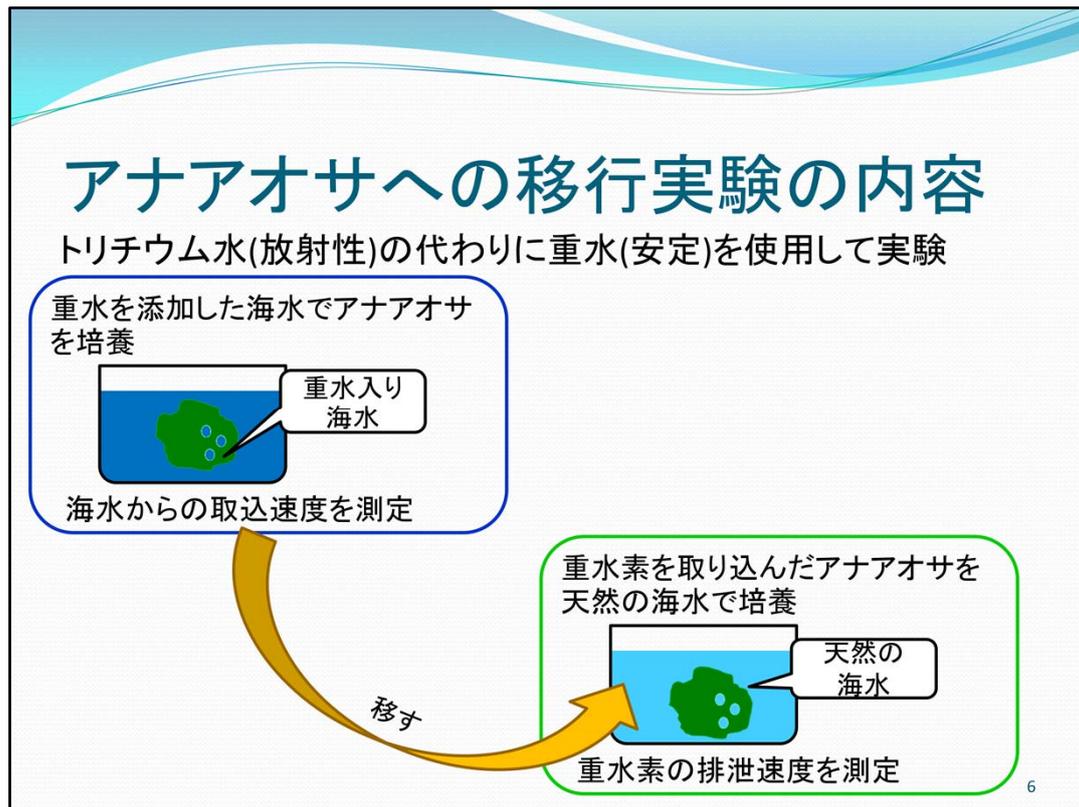


- 実験では養殖用の配合飼料とアナアオサを使用

5

### —要点—

1. アワビは沿岸部水深20m程度までの岩場に棲んでいる。
2. 餌は海藻類で、夜行性である。
3. 実験では養殖用の配合飼料と、必要に応じてアナアオサを与えた。
4. 最初に、アワビのエサでもあり、私たち自身の食卓に上ることもあるアナアオサへのトリチウム移行を測定し、続いてアワビへの移行を測定した。



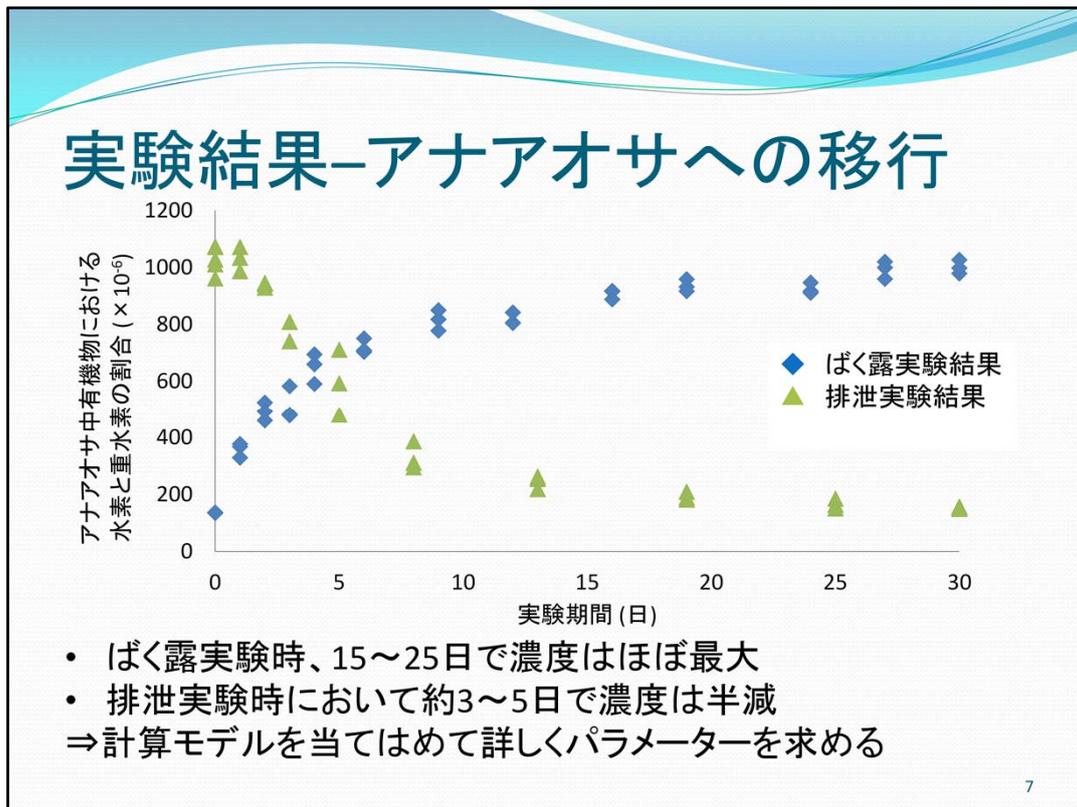
### — 要点 —

1. 実験は放射性物質であるトリチウムではなく、同じ水素の同位体である重水素を使用して行った。化学的な挙動は同じである。
2. 最初に、重水を添加した海水でアノアオサを培養し、アノアオサ中の重水素濃度変化を測定した。
3. 続いて、十分重水素を取り込んだアノアオサを、重水を添加していない海水に移して、どれくらいの速度で重水素が出ていくか測定した。
4. これらのデータを解析して、計算モデルのパラメーターを決定した。

### 〔用語解説〕

重水: 水は水素と酸素の化合物であるが、特に重水素と酸素でできている水のこと。

重水素: トリチウムと同じ水素の同位元素の一つ。放射能を持たない安定同位体。天然の水には0.015%程度含まれている。



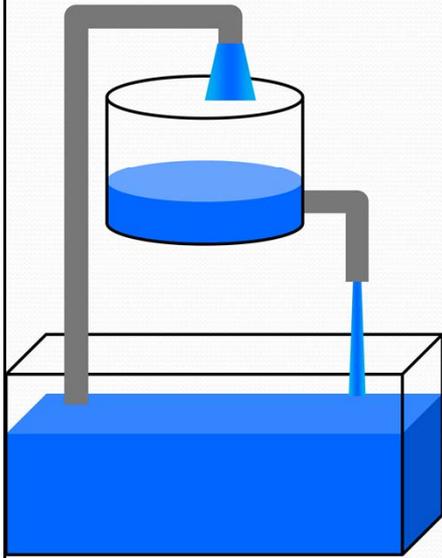
### －要点－

1. 青い点はアナアオサを重水を含んだ海水中で培養した時の重水素濃度の変化、緑の点は重水を添加していない海水に移してさらに培養した時の重水素濃度の変化である。
2. 重水素を取り込むときには、15～25日で濃度はほぼ最大になった。
3. 排泄実験時において約3～5日で濃度は半減した。
4. この結果に計算モデルを当てはめて、詳しくパラメーターを求めることとした。

### 〔補足〕

グラフの縦軸である重水素濃度は、有機物中の水素と重水素の割合で表しており、有機物を燃焼し得られた水に含まれる水素に対する重水素の割合(重水素原子の数/水素原子の数)である。

## 解析に使用した計算モデル



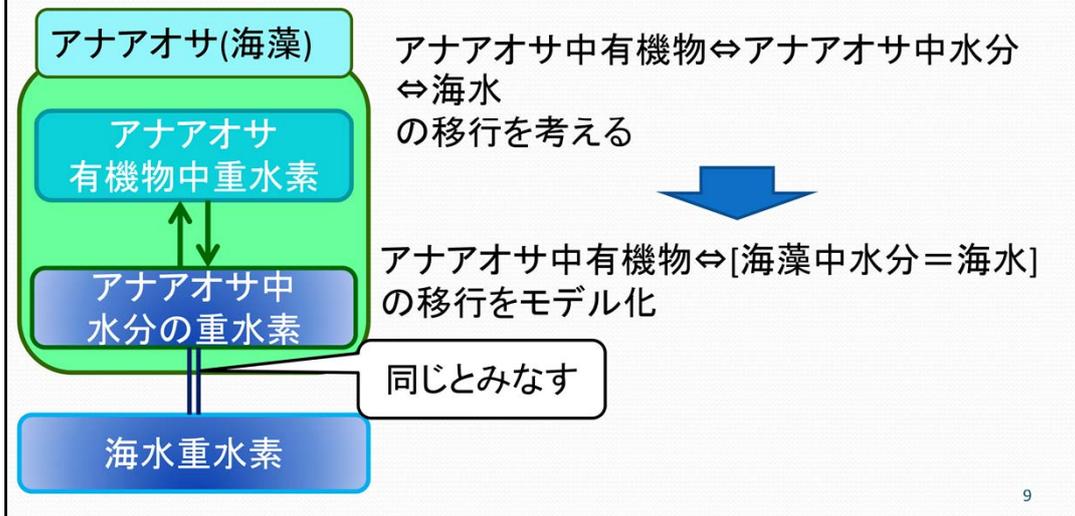
- コンパートメントモデルによるモデル
- アナアオサの有機物中の水素を一つにまとめて区画を設定
- 「入る速度」「出る速度」によって「中の濃度」=物質の移動を計算する
  - 実験による「濃度の変化」から「入る速度」「出る速度」を求める

8

### －要点－

1. 今回の実験結果解析には、コンパートメントモデルに基づく計算モデルを用いた。
2. コンパートメントとは、「区画」のことで、例えば、アナアオサの有機物中の水素をまとめて1区画とする。この区画に対して物質が「入る速度」「出る速度」を設定すると、区画にある物質の量、あるいは濃度を時間を追って計算することができる。
3. 実験の段階では出入りの速度はわからないので、測定した濃度変化から速度を求める。

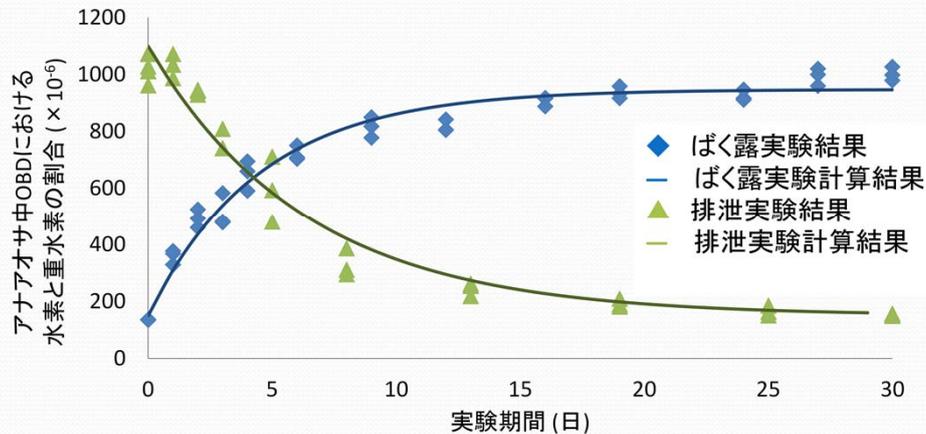
## アアナオサへの水素移行モデル



### —要点—

1. アアナオサへのトリチウムの移行を考えると、海水が組織の中に入ってきて、さらに、光合成によって有機物に取り込まれるという順序になる。
2. これをそのままモデルにすると、「海水」「アアナオサ中水分の重水素」「アアナオサの有機物中重水素」という3コンパートメントとなる。
3. しかし、海水とアアナオサ中の水分の間の入れ替わりは、有機物への水素の取込に比べて大変速いことがわかっているので、「アアナオサ中水分の重水素=海水重水素」と「アアナオサの有機物中重水素」の2コンパートメントと、その間の移行によってモデルを記述した。

## モデル計算結果-アナアオサへの移行



計算モデルは実験結果をよく再現した

- ばく露実験時、最大濃度に到達するまで約3週間
- 排泄実験時において重水素濃度が半減するまで約3日であった

10

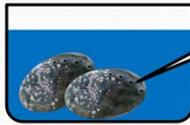
### —要点—

1. 青い点はアナアオサを重水を含んだ海水中で培養した時の重水素濃度の変化、緑の点は重水を添加していない海水に移してさらに培養した時の重水素濃度の変化である。
2. また、実線はそれぞれのモデル計算を行った計算値を示す。
3. 計算モデルは実験結果をよく再現しており、コンパートメントモデルに当てはまることを示している。
4. ばく露実験時、最大濃度に到達するまで約3週間必要であり、排泄実験時において重水素濃度が半減するまでの期間は約3日であった。

# アワビへの移行実験の内容

トリチウム水(放射性)の代わりに重水(安定)を使用して実験

重水を添加した海水でエゾアワビを飼育



重水入り  
海水

海水からの取込速度を測定

移す

重水素を取り込んだエゾアワビを天然の海水で飼育



天然の  
海水

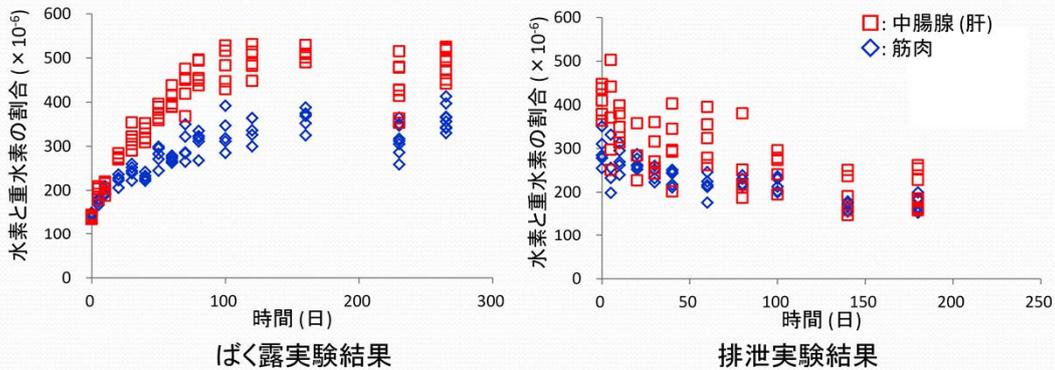
重水素の排泄速度を測定

11

## —要点—

1. 次にアワビへの海水からの移行の実験を行った。
2. ここでも、実験は放射性物質であるトリチウムではなく、水素の安定同位体である重水素を使用した。
3. 最初に、重水を添加した海水でエゾアワビを飼育して、エゾアワビ中の重水素濃度変化を測定した。
4. 続いて、十分に重水素を取り込んだエゾアワビを、重水を添加していない海水に移して、どれくらいの速度で重水素が出ていくかを測定した。

## 実験結果-エゾアワビへの移行



- 中腸腺中重水素濃度は150～200日で平衡になる
- 筋肉では300日程度でも緩やかに濃度が上昇
- 中腸腺で50日、筋肉では100日程度で重水素濃度は半減した。

12

### —要点—

1. エゾアワビに重水素を取り込ませた実験の結果である。
2. 左図は重水を添加した海水中で飼育した実験の結果、右図は重水素を取り込ませたエゾアワビを重水を添加していない海水中で飼育した実験の結果である。
3. それぞれ赤の点が中腸腺（肝）の重水素濃度、青の点が筋肉の重水素濃度を示している。
4. 重水素を取り込むときには、中腸腺中重水素濃度は150～200日で最大になり、筋肉では300日程度でも濃度が緩やかに上昇し続けていた。
5. 排泄時には、中腸腺で50日、筋肉では100日程度で濃度が概ね半減した。

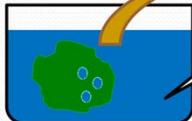
### 〔用語解説〕

中腸線: 節足動物や軟体動物の消化管の腸にある器官。哺乳動物の肝臓等と同等の機能を併せ持つ。いわゆる「肝（きも）」の部分。

# 重水素を取り込んだアナアオサの 投与実験

トリチウム水(放射性)の代わりに重水(安定)を使用して実験

重水を添加した海水でアナアオサを培養



重水入り  
海水

重水素を多く含んだアナアオサを作成

重水素を取り込んだアナアオサを  
エサにしてエゾアワビを飼育



重水素の多い  
アナアオサ

天然の  
海水

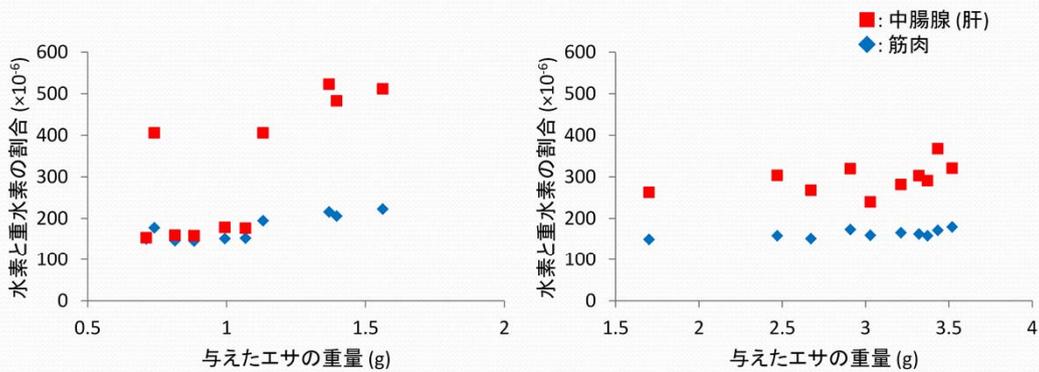
摂食時の移行速度を測定

13

## －要点－

1. アワビの場合はエサとして食べたものに含まれるトリチウムも取り込むので、エサに重水素を含ませてから与えることにより、エサからの移行を測定した。
2. 最初に、重水を添加した海水でアナアオサを培養して、重水素濃度の高いアナアオサを作成した。
3. 続いて、このアナアオサをエサとしてアワビを飼育することで、エサから取り込む重水素の量を測定した。

## 実験結果-エゾアワビへの移行



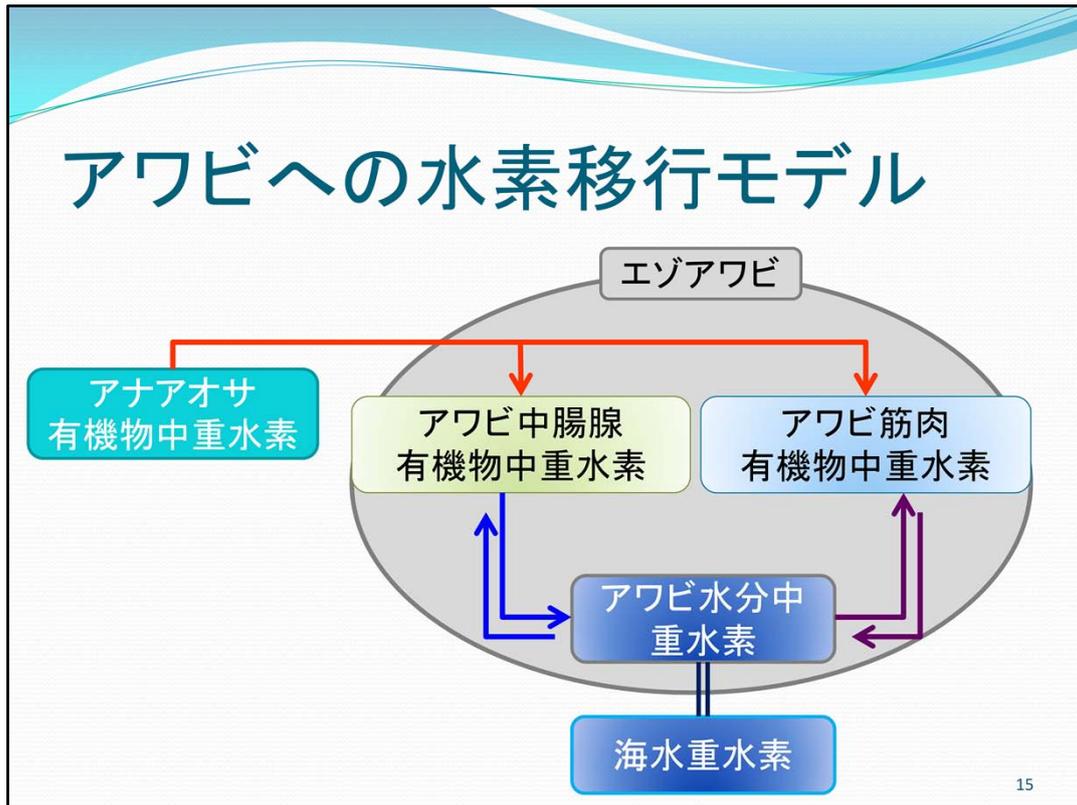
1回目の実験 (エサ中重水素濃度590 ppm)    2回目の実験 (エサ中重水素濃度620 ppm)

- エサの量とアワビ中重水素濃度に相関はあると見られる
- 飼育日数や個体の大きさなども一定ではない  
⇒計算モデルで詳しく解析する必要がある

14

### —要点—

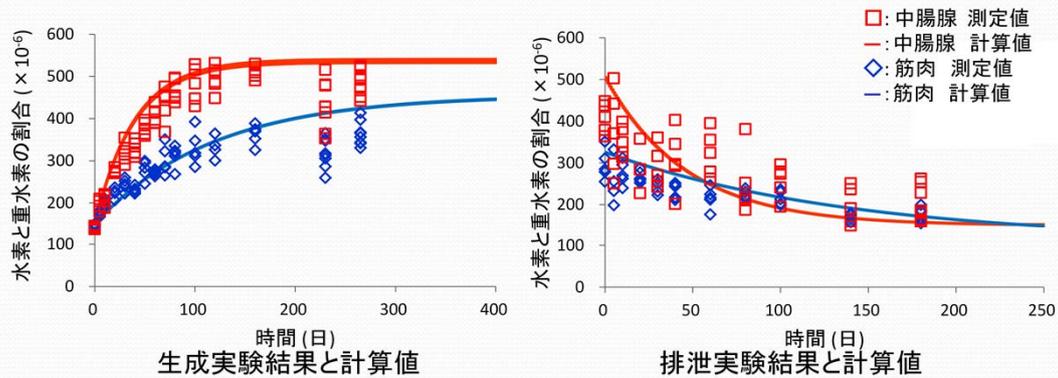
1. エゾアワビに重水素濃度を高めたアナアオサを与えた実験の結果である。
2. グラフの横軸では、実験で与えたアナアオサの重量 (g) を示している。
3. それぞれ赤の点が中腸腺 (肝) の重水素濃度、青の点が筋肉の重水素濃度を示している。



－要点－

1. アワビへのトリチウム移行モデルでは、筋肉と中腸腺の間で重水素濃度の変化が異なる実験結果が得られたので、それぞれ別のコンパートメントとしてモデル化を行った。なお、アナアオサの時と同じように、アワビ水分中の重水素は海水重水素と同じものとして扱っている。
2. アワビはアナアオサと違って、トリチウムを海水とエサの両方から取り込むので、これらを同時に考える必要がある。つまり、海水からの移行・排泄実験結果とエサからの移行実験結果を同時に説明できるモデルを作る必要がある。
3. このモデルでは、「アワビ水分中重水素=海水重水素」と「中腸腺の有機物中重水素」「筋肉の有機物中重水素」それぞれの間の移行、食べたエサの組織に取り込まれる割合が考慮されている。

# モデル計算結果 -海水～アワビへの移行



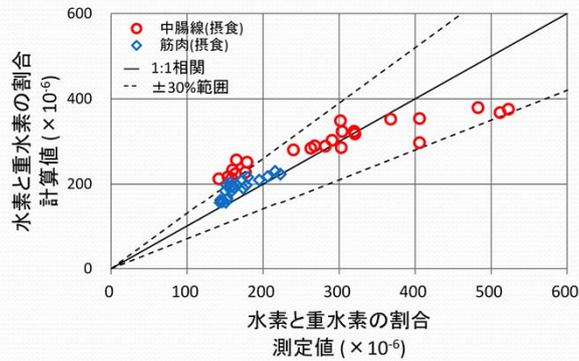
- 計算モデルは実験結果を概ね再現した
- 中腸腺中重水素の濃度が平衡になるまで約200日、筋肉では600日程度が見込まれた
- 半減期は中腸腺で40日、筋肉では100日程度であった

16

## —要点—

1. エゾアワビに重水素を取り込ませた実験と出来上がったモデルでの計算の結果である。
2. それぞれ赤の点が中腸腺（肝）の重水素濃度、青の点が筋肉の重水素濃度を示し、実線はモデル計算を行った結果を示している。
3. 計算モデルは実験結果を概ね再現できた。
4. 取込時には中腸腺中重水素濃度が最大になるまで約200日、筋肉では600日程度かかることがわかった。
5. 排泄時には中腸腺で40日、筋肉では100日程度で重水素濃度が半減することがわかった。

## モデル計算結果 - 重水素を 取り込んだアナアオサの投与



摂食実験結果と計算値の相関

- 摂食実験の結果も概ね同一の計算モデルで再現が出来た

17

### — 要点 —

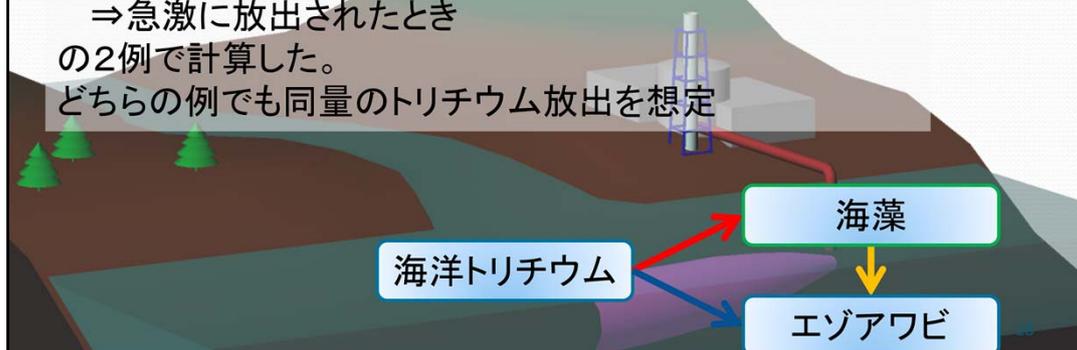
1. 重水素を含んだアナアオサをエサにして飼育した実験と計算モデルでの計算の結果である。
2. 横軸に実測値を、縦軸にモデル計算を行った値を示している。計算値と実測値が一致すると1:1の実線に乗る。
3. 計算モデルでの計算値と実験結果は概ね一致した。

## モデルによる試算

計算モデルを使用してエゾアワビ中トリチウム濃度を計算

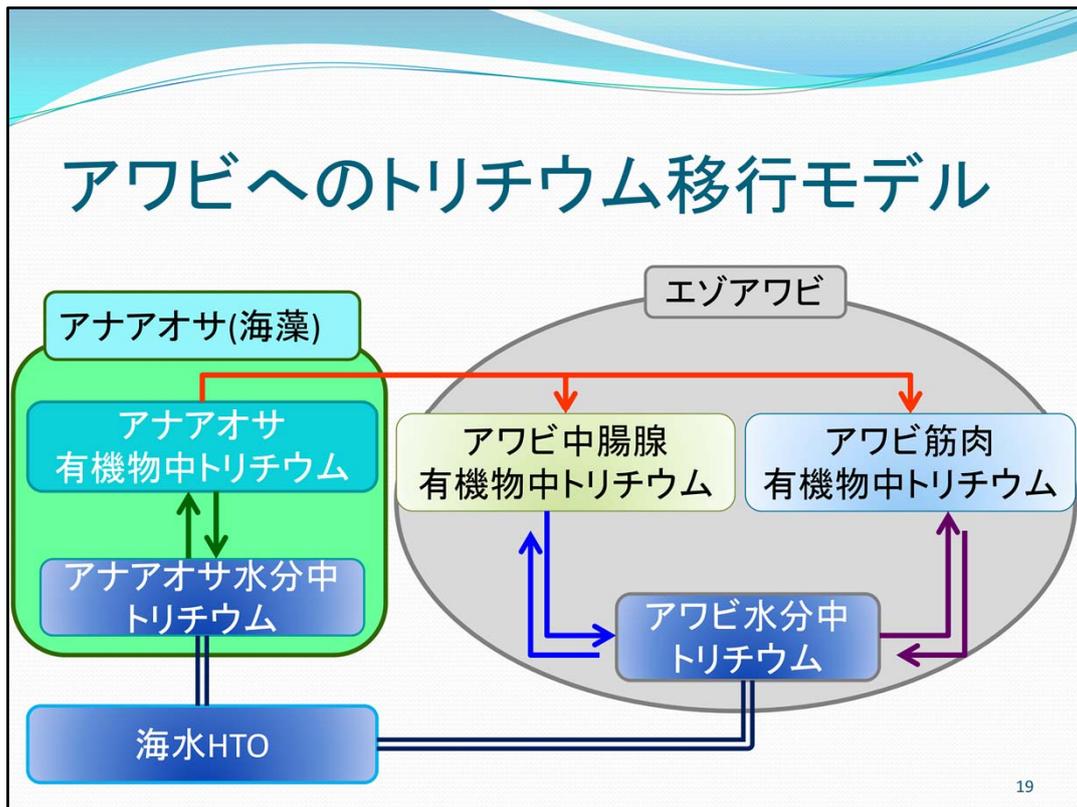
1. 海水中トリチウム濃度が一定に維持  
⇒ ゆっくりと放出されたとき
  2. 海水中トリチウム濃度が一時的に高濃度になる  
⇒ 急激に放出されたとき
- の2例で計算した。

どちらの例でも同量のトリチウム放出を想定



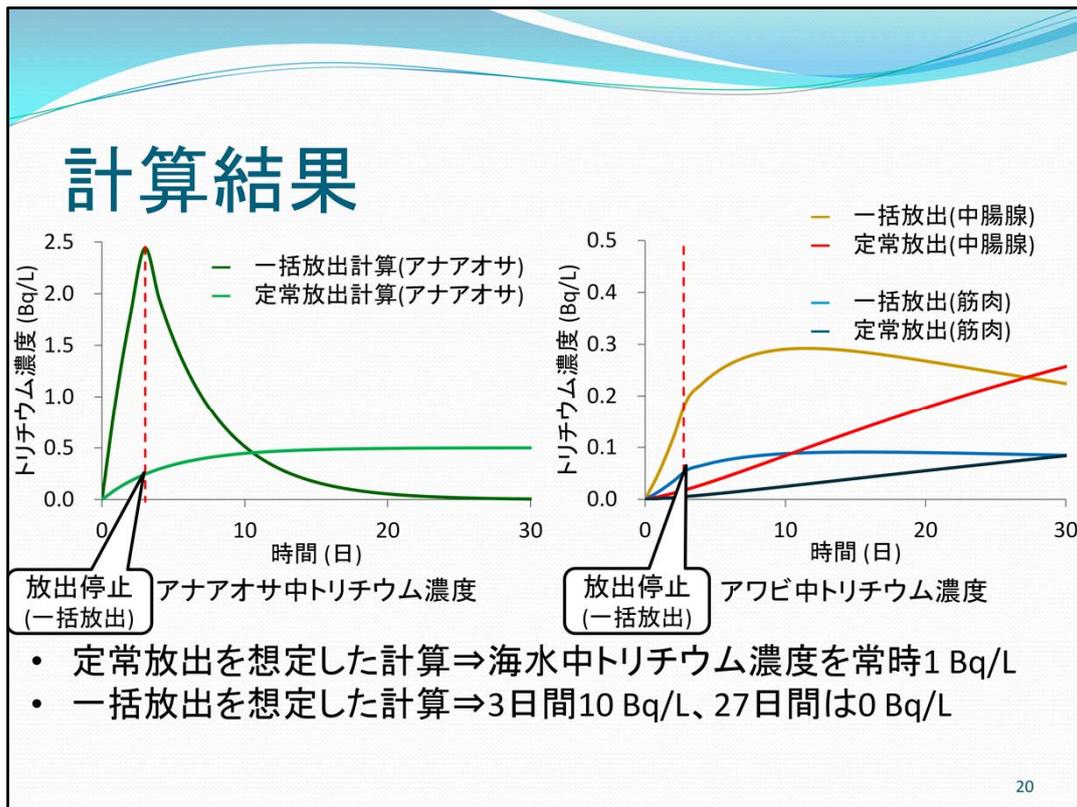
### －要点－

1. 実験データを基に計算モデルができたので、海洋にトリチウムが放出されたときどのようにアワビにトリチウムが取り込まれていくのかを計算した。
2. 計算は2通り行い、1か月間にわたって海水中のトリチウムが一定濃度に維持されたときと、同量のトリチウムが一度に放出されたときの2例を計算した。



－要点－

1. このモデルは2つのパートに分かれており、エサであるアナアオサへのトリチウム移行を計算する部分とアワビへのトリチウムの取込を計算する部分からできている。それぞれのパートはこれまで説明した二つの計算モデルである。
2. アナアオサ、アワビそれぞれの有機物に直接海水からトリチウムが取り込まれる場合と、アナアオサに取り込まれたトリチウムが、さらにエサとしてアワビに取り込まれる場合が考慮してある。それぞれのコンパートメント間の移行に係るパラメーターは実験で得られた値を使っている。
3. このモデルを用いて、海水中にトリチウムが入ってきた場合、また、海水中からトリチウムがなくなった場合のアナアオサ及びアワビ中トリチウム濃度の時間変化を計算した。



### — 要点 —

1. トリチウムが海中に一括で放出された場合を想定して計算を行い、定常的に放出された場合を想定した計算と比較した。計算期間は30日間とした。
2. 定常放出を想定した計算例では海水中トリチウム濃度を常時1 Bq/Lと設定した。
3. 一括放出を想定した計算では3日間10 Bq/L、その後27日間は0 Bq/Lとし、30日間の平均トリチウム濃度は1 Bq/Lで1例目の計算と同じ値とした。
4. 定常放出を想定した場合、アナアオサ中トリチウム濃度はほぼ平衡に到達して約0.5 Bq/Lとなった。アワビ中トリチウム濃度は、この期間内では概ね直線的に上昇が続いている。
5. 一括放出を想定した場合、アナアオサ中トリチウム濃度は約2.5 Bq/Lまで上昇した。この濃度は、海水中トリチウム濃度が0 Bq/Lになると同時に下がり始めた。一方、アワビ中トリチウム濃度は、海水中トリチウム濃度が0 Bq/Lとなった後も10日程度の間上昇を続ける計算結果となった。これは、エサになるアナアオサにトリチウムが残っているために、海水中トリチウム濃度が0 Bq/Lとなってもアワビがトリチウムを取り込み続けるためである。

## まとめ

- 重水素を用いた実験とモデル解析により、アナアオサとエゾアワビへのトリチウム取込速度・排出速度を求めた
- 実験データに基づき、海水中トリチウムから食物連鎖を介したエゾアワビへのトリチウム移行モデルを作成した
- 海水中トリチウムからのエゾアワビへの移行を計算した
  - 海水中トリチウム濃度の変化に従ったアオサ・アワビ中のトリチウム濃度の計算が可能になった

# 放射線の遺伝的影響

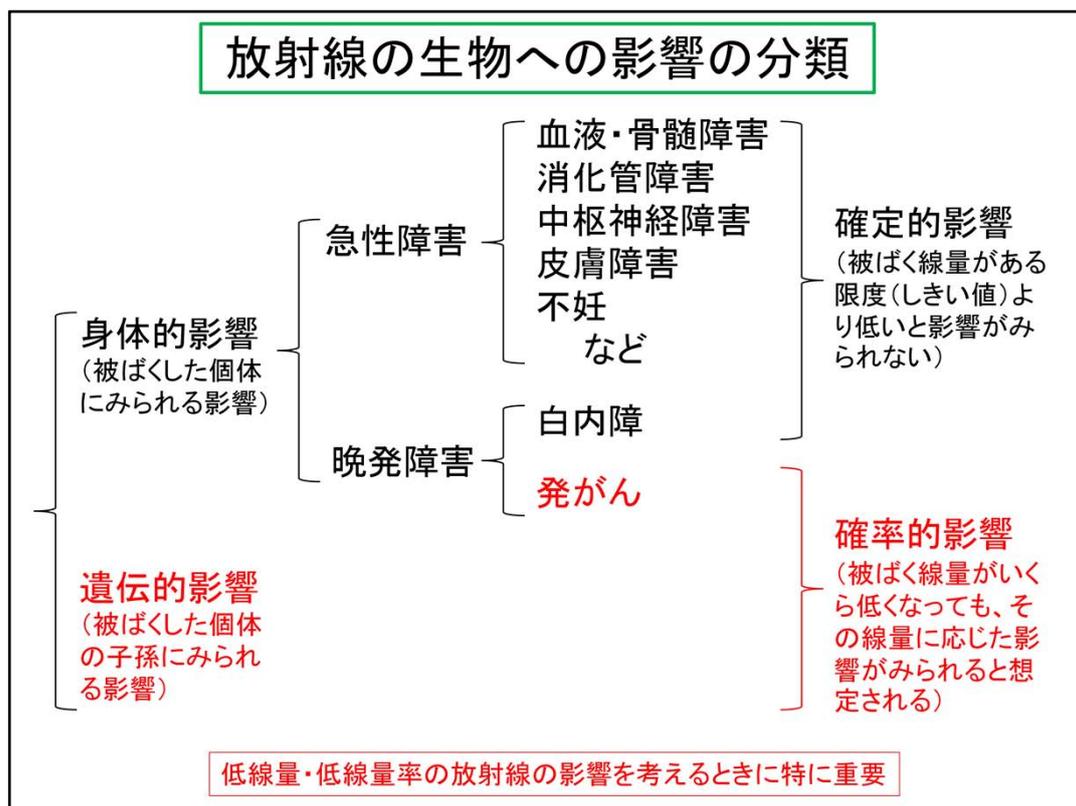
研究の背景（遺伝的影響とは）

研究報告（親マウスへの低線量率放射線照射による  
仔マウスの寿命短縮およびゲノム変異）

環境科学技術研究所  
生物影響研究部  
小村潤一郎

—要点—

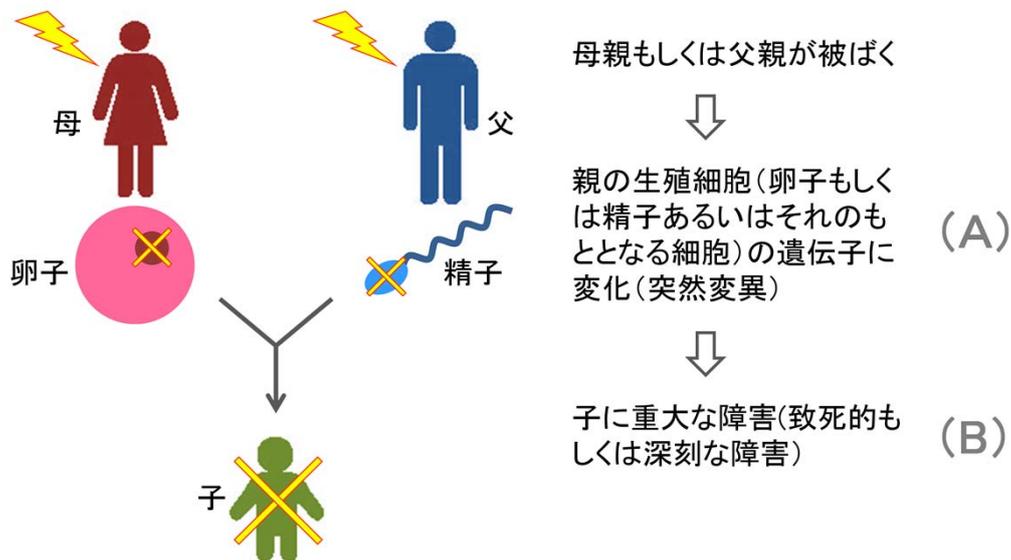
1. 前半の内容は、放射線の遺伝的影響に関する一般的な情報である。
2. 後半では、環境科学技術研究所で行われているマウスを用いた放射線の遺伝的影響の研究を紹介する。



#### —要点—

1. 放射線の人体や生物への影響は、「身体的影響」（被ばくしたその生物個体にあらわれる影響、その世代のうちにあらわれる影響）と「遺伝的影響」（被ばくしたその生物個体ではなく、その子孫にあらわれる影響、のちの世代になってあらわれる影響）に大きく分けることができる。
2. 「身体的影響」のうち「発がん」以外は、比較的大きな「しきい値」以上の線量を被ばくしたときにのみ影響があらわれるとされている。
3. 「発がん」と「遺伝的影響」に関しては、被ばく線量が低くなるにしたがい影響があらわれる頻度が低くなるものの、被ばく線量がいくら低くなくても影響がまったくあられなくなるわけではないと想定されている。
4. 放射線防護・規制基準等の策定にあたっては、特に線量が低いときの影響を考える必要があるので、「発がん」と「遺伝的影響」のリスクを正確に見積もることが重要である。

放射線の遺伝的リスク(親がどのくらいの線量を被ばくすると子にどのくらいの頻度で重大な影響が現れるか)を知る必要がある。



● ヒトに関して、放射線の遺伝的影響(上記AとB)の証拠・データは皆無。

(kotobankから改変)

## —要点—

1. 放射線の遺伝的影響のリスクを正確に見積もるためには、親が被ばくしたときに、どのくらいの頻度で生殖細胞の遺伝子に突然変異が起こり、またその結果としてどのくらいの頻度で子に重大な障害等があらわれるか、ということについてのヒトのデータが必要である。
2. しかし、ヒトに関しては、放射線被ばくによって遺伝的影響が起こるといふ確たる証拠はなく、したがって、使用できるデータがない。

## 放射線の遺伝的リスクの推定の現状

〔UNSCEAR 2001 レポート（原子放射線の影響に関する  
国連科学委員会から総会への報告書）からの抜粋〕

- 放射線被ばくはヒト集団にまだかつて遺伝的影響を及ぼすと証明されたことはない。
- しかし、植物や動物での実証的研究で、放射線は遺伝的影響を誘発することが明瞭に示されている。
- ヒトがこの点で例外であることはなさそうである。
  
- ヒトのデータが無いいため、マウス遺伝子の放射線誘発突然変異率を用いて推定された、ヒトの倍加線量は、1Gy程度。（倍加線量とは、遺伝子突然変異率を放射線被ばくのないとき（自然突然変異率）の2倍にする線量。）
- この倍加線量の値を用いて推定された、放射線の遺伝的リスクは、1Gyあたり0.3～0.5%。（被ばく後の致命的な発がんリスクの十分の一以下。）

### －要点－

1. ヒトのデータが無いので、やむを得ず、マウスのデータを用いて、放射線によりヒトの生殖細胞の遺伝子に突然変異が起こる頻度を推定している。
2. さらに、この推定値を用い、ヒトの場合に親の放射線被ばくがどのくらいの頻度で子の障害（致命的もしくはそれに近い重大なもの）につながるか（放射線の遺伝的リスク）を推定している。
3. UNSCEAR（原子放射線の影響に関する国連科学委員会）の報告書は、ICRP（国際放射線防護委員会）の勧告、米国科学アカデミーのBEIR（電離放射線の影響に関する委員会）の報告書とともに、各国の放射線防護・規制基準の策定の指針とされている。

### 〔用語解説〕

Gy：グレイ（生物等に吸収された放射線のエネルギー）

放射線被ばくはヒト集団にまだかつて遺伝的影響を及ぼすと証明されたことはない。

(UNSCEAR 2001 レポート)

広島・長崎の被爆者の子に関して、染色体異常、血液タンパク質の変異、先天性奇形、死産、新生児死亡、小児がんなどが調査されたが、これまでのところ、影響は検出されていない。

例) 血液タンパク質に関する突然変異の調査  
(放射線影響研究所)

親の被ばく線量	対照群 0.01Gy未満	被爆群 0.01Gy以上(平均0.49Gy)
調査した子どもの数	12297	11364
調査した遺伝子の数	589506	544779
検出した突然変異の数	3	2
突然変異率/遺伝子座/世代	$0.5 \times 10^{-5}$	$0.4 \times 10^{-5}$

(文光堂刊「原爆放射線の人体影響」から)

(有意差なし)

— 要点 —

1. 「放射線被ばくはヒト集団にまだかつて遺伝的影響を及ぼすと証明されたことはない」例として、これまでにヒトで行われた最大規模の調査の結果を示す。
2. 血液タンパク質に関する突然変異の調査には2つの方法が使われたが、ここでは「電気泳動法」を用いた調査の結果を示している。
3. 後出のマウスの調査と比較すると、これではまだ解析例数が少ないこと、また放射線の線量が低いことが、影響を検出することができなかった理由であると推測できる。

植物や動物での実証的研究で、放射線は遺伝的影響を誘発することが明瞭に示されている。

(UNSCEAR 2001 レポート)

### ショウジョウバエ

1927年、マラー(米)による、エックス線誘発突然変異の発見。

(ウィキペディアから)

人為突然変異の最初の例。1946年ノーベル賞。

1950年代までは、ヒトのリスク評価に使用された。

哺乳類(マウス)の場合と異なる点もある。



### 植物

主に、品種改良目的(例:ゴールド二十世紀梨)。



(農業生物資源研究所放射線育種場ホームページから)

### マウス(ハツカネズミ)

1950-60年代、ラッセル夫妻(米)らによる大規模な研究が行なわれた。

百万匹以上のマウスを使用。一匹で、7遺伝子のデータを取得。



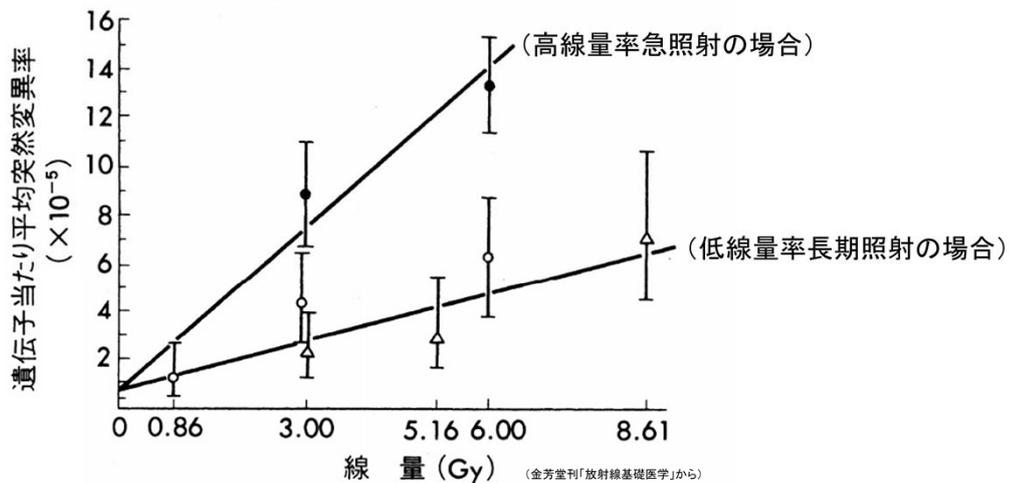
(米国科学アカデミー紀要から)

この7遺伝子を含め、マウスの34個の遺伝子の放射線誘発突然変異率が、現行のヒトのリスク評価に使用されている。

## — 要点 —

1. 放射線の遺伝的影響の研究は、初期には、おもにショウジョウバエや植物を用いて行われた。
2. 現在、ヒトの生殖細胞における放射線誘発突然変異率の推定には、比較的ヒトに近いと考えられるマウスで得られたデータが用いられている。
3. ただし、約3万個あると言われる遺伝子のうち、ごくわずかなものについてしかデータは得られておらず、実際には、4研究施設で得られた34個の遺伝子についてのデータが用いられている。

ラッセル夫妻らによる多くのマウスを用いた放射線の遺伝的影響の研究の結果のまとめ：  
雄マウスの生殖細胞(精原細胞)に放射線によって誘発された遺伝子突然変異の率



- 高線量率で急速に照射すると、低線量率で長時間かけて照射した場合に比べ、遺伝的影響が大きくなる。放射線のリスクを考えるときには、低線量率の場合の数値を用いる。
- 放射線の線量が多くなるに従い、一次の関係で(直線状に)遺伝的影響が増える。線量が非常に低いところのことはよくわからないが、放射線のリスクを考えるときには、やはり一次の関係(直線状)を想定する。

### — 要点 —

1. これまでに行われたマウスを用いた放射線の遺伝的影響の研究の中で、ラッセル夫妻らによるものが最大規模であった。
2. 現在の放射線のリスクの見積もりは、データについてだけでなく、考え方についても、この研究で得られた知見に大きく依存しているので、この研究結果のまとめをここに示す。

## 私たちの調査研究:「低線量放射線生物影響実験調査」の内容

### [身体的影響の調査] (1994～2003年度)

- マウスに低線量率放射線(20mGy/日×400日、集積線量8,000mGy)を照射すると、その世代のマウスの寿命が短くなるという結果を得ている。

### [遺伝的影響の調査] (2004～2013年度)

- ① 親マウスに低線量率放射線を照射したときの、仔マウス(次の世代)の寿命への影響を調べる。
- ② また、親マウスに低線量率放射線を照射したときにおこる仔マウス(次の世代)のゲノムの変化(遺伝子レベルの変化)を、新しい方法で検出する。

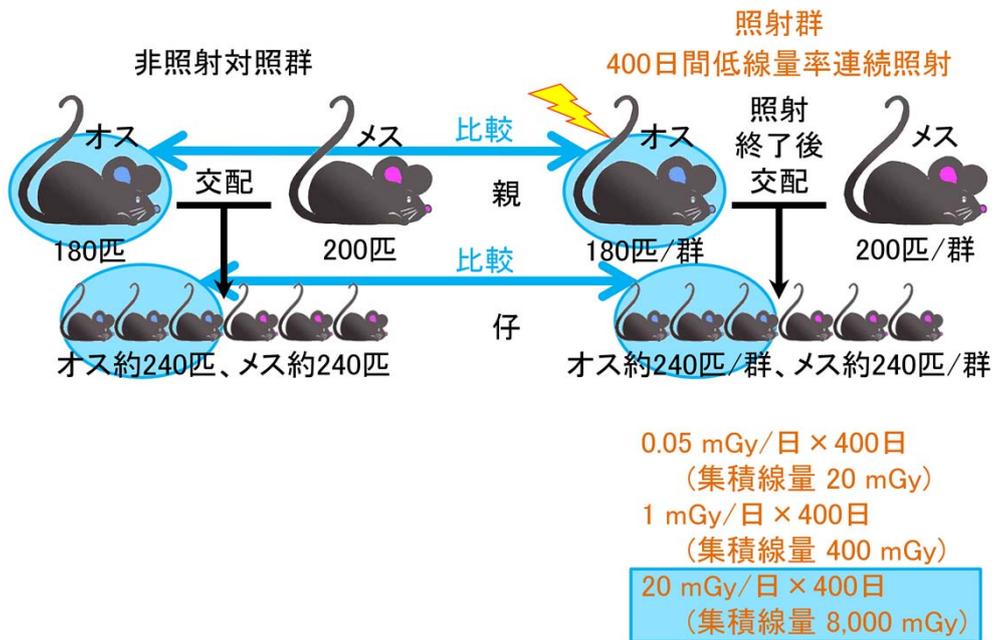
### —要点—

1. ヒトに関して、放射線の遺伝的影響のデータは皆無である。
2. マウスに関しては、生殖細胞の遺伝子の突然変異率のデータはあるが十分ではない。
3. 親マウスに照射したときに仔に重大な障害があらわれるかどうかに関しては、見解が一致していない。たとえば、親の照射によって仔にがんが増加するというデータと、増加しないというデータがある。
4. この状況を踏まえて、私たちは、マウスを用いた低線量率放射線の遺伝的影響に関する調査研究を計画・実行した。

### [用語解説]

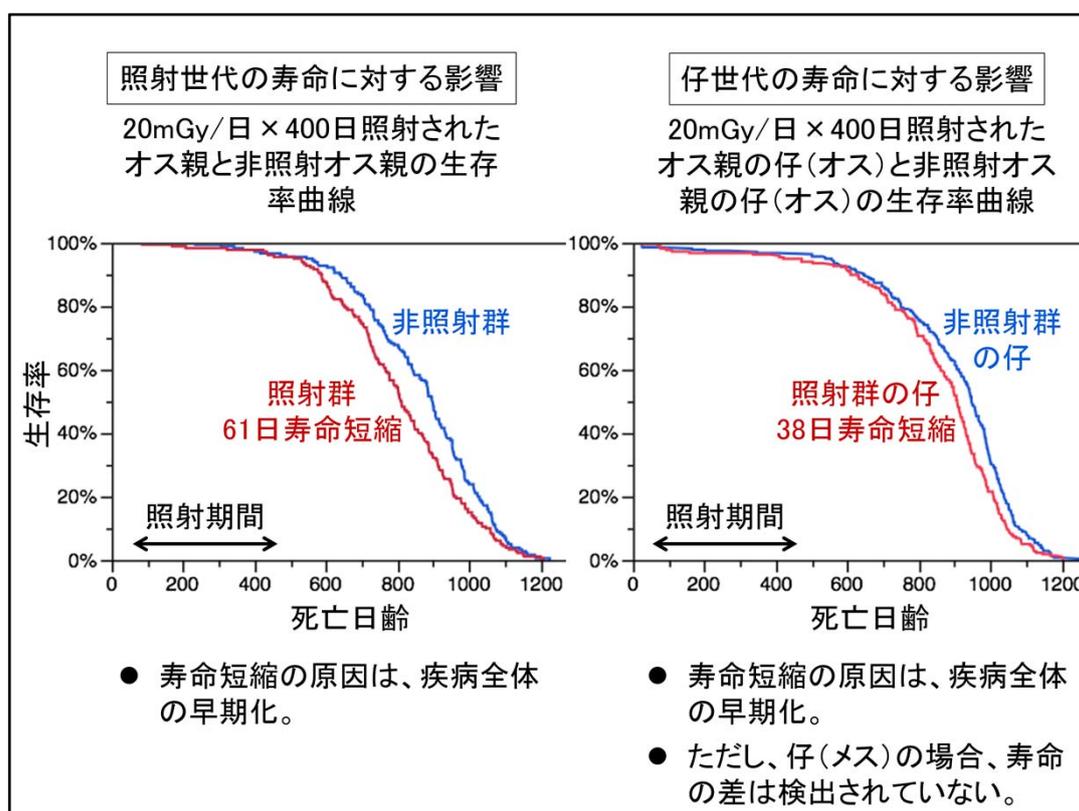
mGy : ミリグレイ (グレイの1/1000)

① 親マウスに低線量率放射線を照射したときの、  
仔マウス(次の世代)の寿命への影響の調査



—要点—

1. 親マウスに低線量率放射線を照射したときの、仔マウス（次の世代）の寿命への影響を調べる実験の方法を示す。
2. オスマウスに低線量率放射線（線量率は3種類：0.05mGy/日、1mGy/日、20mGy/日）を400日間照射し、そのあと非照射メスマウスと交配し仔を得る。オス親と仔については、死亡するまで長期飼育し、死亡時期、死因などを調査する。
3. 一番高い線量率（20mGy/日）で照射したオス親と非照射対照のオス親の寿命の比較、その照射したオス親の仔（オス）と非照射対照のオス親の仔（オス）の寿命の比較を、次のページにグラフで示す。



#### —要点—

1. 一番高い線量率（20mGy/日×400日、集積線量8,000mGy）で照射したマウスについて、以下のグラフを示す。
  - ・ 照射したオス親と非照射対照のオス親の寿命の比較
  - ・ 照射したオス親の仔（オス）と非照射対照のオス親の仔（オス）の寿命の比較
2. 照射したオス親の寿命は非照射対照のオス親に比べてかなり短いという結果が得られた。これは、私たちが以前に行った研究で確認されていたとおりである。
3. その仔の世代になると、照射オスの仔（オス）の寿命は、非照射オスの仔（オス）に比べて短い、その寿命の差は親世代の場合ほど大きくはなかった。
4. また仔のうちメスについて比較してみると、寿命の有意な差は認められなかった。

低線量率放射線を長期照射したマウス、およびその仔の寿命に関する実験結果のまとめ（仔世代については、オス親を照射した場合のみ）

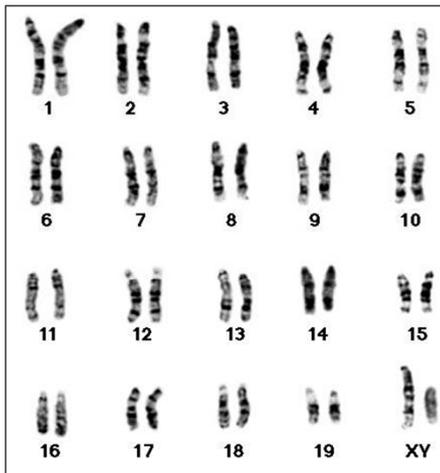
	照射世代の寿命 (1994～2003および 2004～2013年度の調査)	仔世代の寿命 (2004～2013年度の調査)
0.05mGy/日 × 400日 (集積線量20mGy)	有意差は検出されず	有意差は検出されず
1mGy/日 × 400日 (集積線量400 mGy)	条件によっては短縮	有意差は検出されず
20mGy/日 × 400日 (集積線量8,000 mGy)	短縮	条件によっては短縮

(「条件によっては」: オスマスによる差などがあることを指す)

—要点—

1. 低線量率放射線を長期照射したマウス、およびその仔の寿命に関する実験結果のまとめを示す。
2. 仔世代については、過去10年間の結果の総括であり、照射世代については、過去20年間の結果の総括である。
3. 線量率（あるいは集積線量）が高いほど、影響があらわれやすいことがわかる。また、仔世代の方が、照射世代（親世代）よりも、影響があらわれにくいことがわかる。

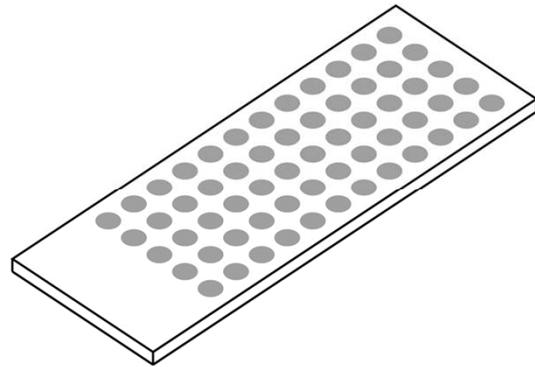
② 親マウスに低線量率放射線を照射したときにおこる仔マウス(次の世代)のゲノムの変化(遺伝子レベルの変化): 染色体マイクロアレイを用いた染色体微小領域欠失の検出



(ジャクソン研究所ホームページから)

マウスの染色体:

20対(40本)ある。マウス一匹分の遺伝情報(ゲノム)が格納されている。

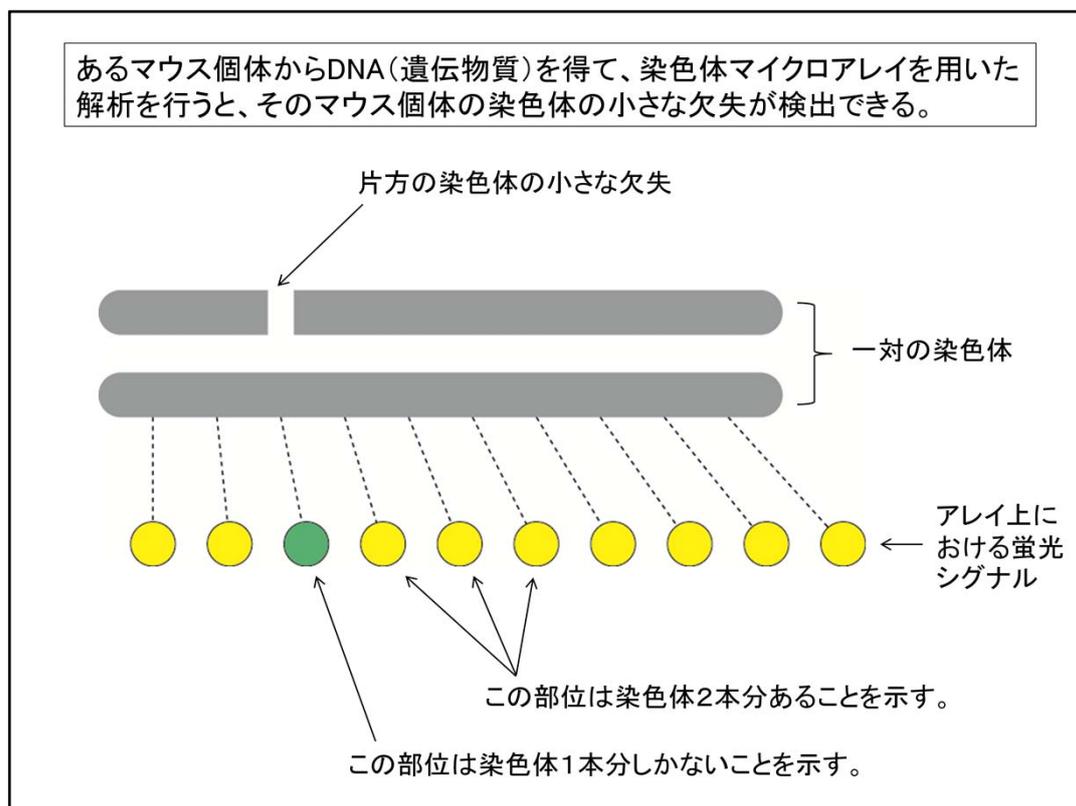


染色体マイクロアレイ:

染色体のごく小さい領域に対応するDNAの小断片約100万種類を小さなガラス板に張り付けたもの。

—要点—

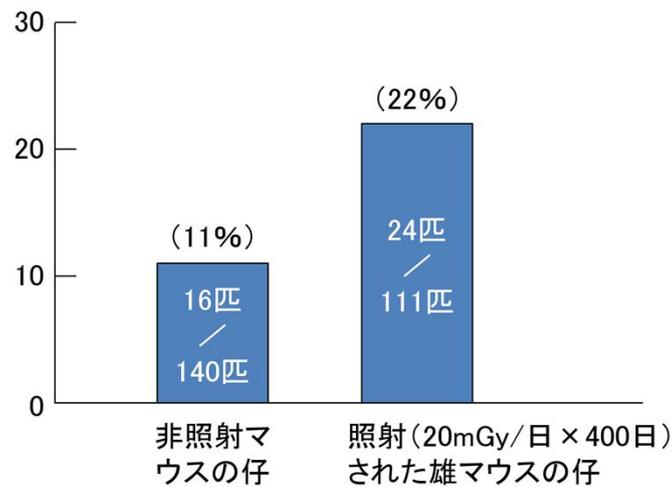
1. 遺伝的影響について更に詳しく調査を行うため、遺伝子レベルでの解析を行った。
2. 生物1個体が持っている遺伝情報1セットのことを、ゲノムという。遺伝情報を記録する媒体(遺伝物質)がDNAである。
3. 哺乳類の場合、1ゲノム、すなわち遺伝情報1セットに含まれる遺伝子の数は3万個程度と考えられているが、これらは染色体と呼ばれる細胞内の構造体(マウスでは20対、ヒトでは23対)に格納されている。
4. 放射線の遺伝的影響は、遺伝子・染色体のレベルでいうと、染色体のごく小さな領域が失われること(欠失)であることが多いと考えられている。このようなタイプの変化を効率よく検出できる新しい方法を、低線量率放射線の遺伝的影響の解析に導入した。
5. 「染色体マイクロアレイ」の「マイクロ」は、「小さい」を意味する。「アレイ」は、配列状のものを指す。小さいガラス板上に染色体の各領域に対応するDNAの断片がたくさん(この例では約100万個)ドット状に並んでいるので、このような名で呼ばれる。



—要点—

1. ある一匹のマウスの臓器から、遺伝物質であるDNAを抽出し、これを染色体マイクロアレイを用いて比較ゲノムハイブリダイゼーションと呼ばれる方法で解析すると、そのマウス個体の染色体の小さな欠失を検出し、その欠失がどの染色体上のどの部位にあるかを特定することができる。
2. このような操作を、父マウス、母マウス、仔マウスの3匹について行くと、仔マウスが父や母にはなかった新規の変異を持っているかを知ることができる。

両親にはない染色体微小領域の欠失などの  
ゲノム変異を持っていた仔マウスの割合(%)



- 比較的少ない数のマウスの調査によって、有意な差を検出することができた。1匹のマウスについてゲノム上100万か所の検索を行うので、感度はかなり高い。

—要点—

1. オスマウスを20mGy/日×400日（集積線量8,000mGy）照射することによって仔マウスのゲノムに新規の変異が増加するかどうかを、染色体マイクロアレイを用いて調べた結果である。
2. 比較的少ない数のマウスを用いた実験ではあるが、放射線照射によって仔に伝達されるようなゲノム変異が増加していることを検出することができた。
3. 0.05mGy/日×400日（集積線量20mGy）照射の場合についても解析を始めている。現在の段階では、変異を持っていた仔マウスの割合は11%（46匹中5匹）で、非照射の場合と差はみられていないが、今後解析するマウスの数をさらに増やす必要がある。

(ジャクソン研究所ホームページから)



(マウスを低線量率長期照射する部屋)



報告内容等の問合せ先：青森県上北郡六ヶ所村大字尾駸字家ノ前1番7  
公益財団法人 環境科学技術研究所

総務部 企画・広報課

TEL 0175-71-1240