

環境科学技術研究所 日本海洋科学振興財団

# 成果報告会

平成 25 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

# 目 次

解説	： 放射線の単位と影響について	1-5
1.	環境科学技術研究所	
1.1	環境研における放射線の生物影響研究の成果と今後	6-25
1.2	福島原発事故で放出されたトリチウム	
	（1）研究の背景	26-37
	（2）研究報告	38-52
2.	日本海洋科学振興財団	
2.1	青森県近海域海洋循環シミュレーション	
	（1）研究の背景	53-55
	（2）研究報告	56-70

報告内容等の問合せ先：青森県上北郡六ヶ所村大字尾駁字家ノ前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

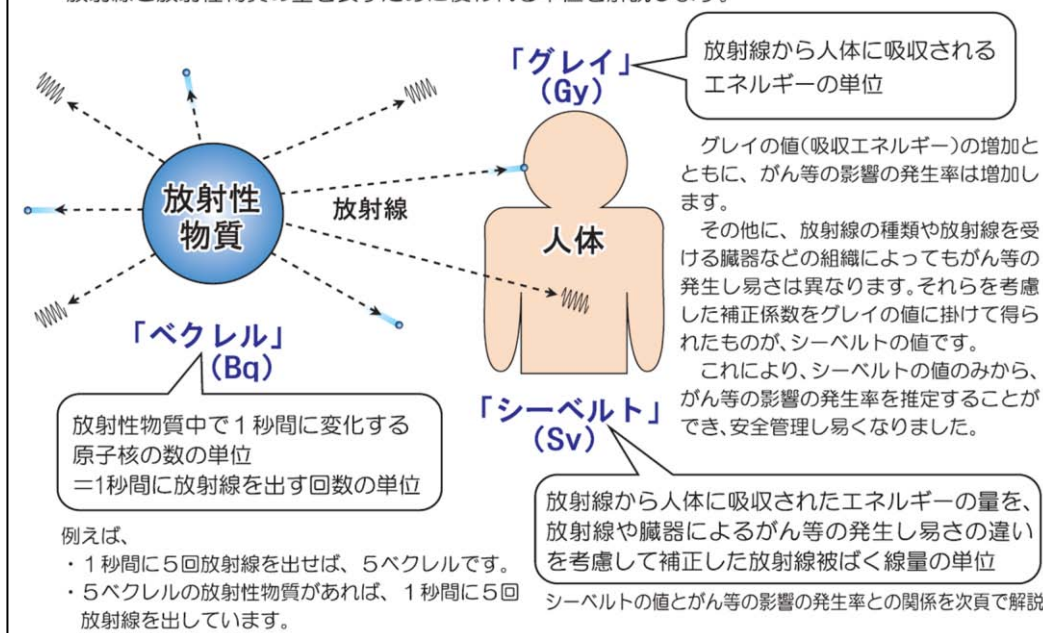
解説：  
放射線の単位と影響について

(公財)環境科学技術研究所  
総務部 企画・広報課  
石川 敏夫

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します。

## 放射線の単位

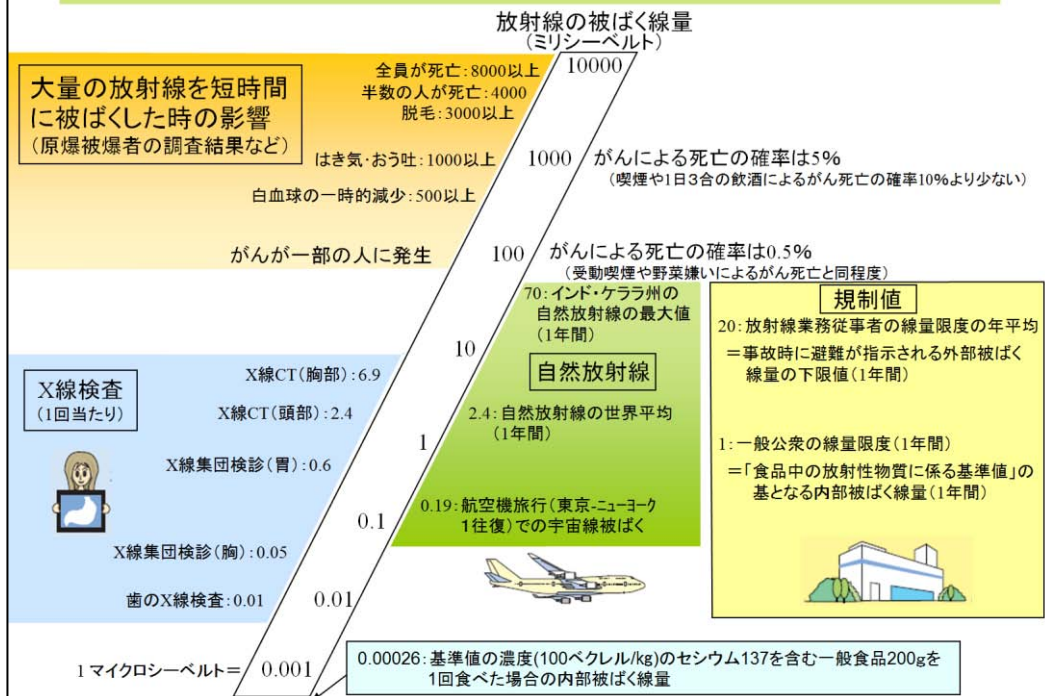
放射線と放射性物質の量を表すために使われる単位を解説します。



### — 要点 —

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 ベクレル=1個の原子核の変化/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 グレイ=1 ジュール/kg=0.24 カロリー/kg
3. シーベルトの定義に使われる補正係数
  - 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  
ガンマ線:1、ベータ線:1、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  
肺、骨髄、胃等:0.12、生殖腺:0.08、甲状腺等:0.04、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. の補正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)です。  
(全身に均等にガンマ線のエネルギーが吸収された場合には、シーベルトの値はグレイの値に等しくなります。)

# 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

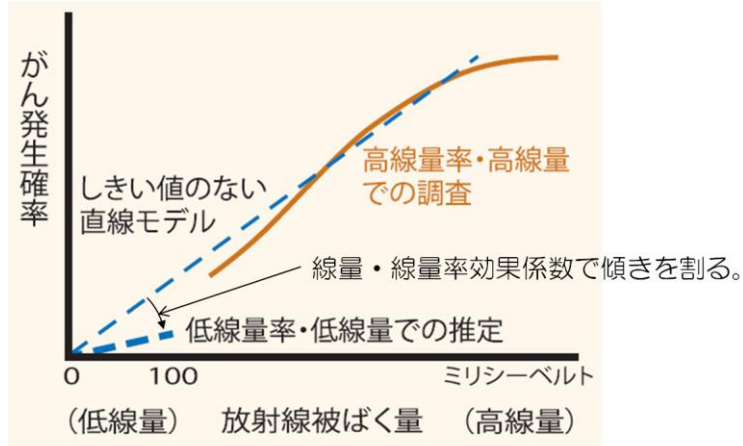
1. 大量の放射線(高線量)を短時間で被ばくした場合には、様々な影響が現れます。被ばく線量が少なくなるとともに影響も少なくなり、約100ミリシーベルト以下の少量の放射線(低線量)ではがんが発生するのかが問題になっています。
2. がんは放射線を被ばくした人が全員なる訳ではなく、例えば、1000ミリシーベルトを100人が被ばくした時、将来がんで死亡する人は約5人であり、その確率は約5%です。
3. 約100ミリシーベルト以下の低線量でのがん発生確率は、喫煙や食生活(飲酒、野菜嫌い)によるがん発生確率より低いことなどから、明らかにすることが困難です。
4. 原子力施設周辺の住民の方々が被ばくする可能性のある放射線は、低線量率ですが、長期間被ばくする可能性があります。低線量率被ばくは、同じ線量の高線量率被ばくに比べて、がん発生率が少なくなります。

## [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。
- ・線量率: 単位時間当たり(例えば、1時間当たり)に被ばくする放射線の量。原爆被爆では、1分間以内で大量の放射線を被ばく(高線量率被ばく)した。1分間当たり0.1ミリシーベルト以下が、低線量率とされている。

## 低線量率・低線量放射線によるがん発生確率の推定

高線量率・高線量の放射線によるがん発生確率の調査結果を基にして、低線量率・低線量の放射線によるがん発生確率が推定されています。



環境科学技術研究所では、低線量率・低線量放射線でのがん発生について、研究しています。その内容の概要を、次の発表で紹介します。

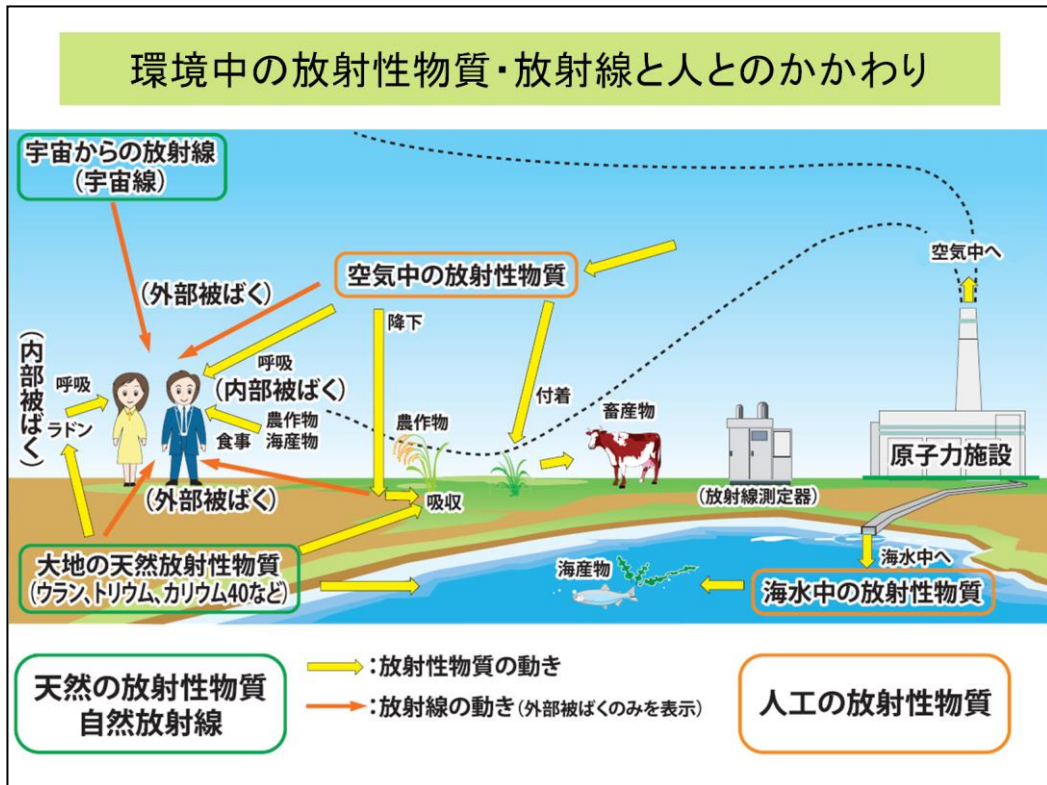
### — 要点 —

1. 低線量率・低線量の放射線によるがん発生確率は、次のように推定されています。

① 先ず、原爆被ばく者の調査などから得られた高線量率・高線量でのがん発生確率を、低線量へ直線で延長しました。

② 次に、低線量率被ばくでの影響の減少を表すため、このがん発生確率の直線の傾きをある数値で割りました。この数値を線量・線量率効果係数といい、国際放射線防護委員会では2の値を勧告しています。

2. 環境科学技術研究所では、低線量率・低線量でのがん発生について、マウスを用いて詳しく研究しています。



—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ます。
- 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ます。
- ③福島原発事故では、大量の放射性物質が空気中と海に放出されました。

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について、以下の通り発表します。

## 2. 成果報告会の発表内容

- ①再処理工場から海に排出される放射性物質の海での動きを予測するために、海水の流れをコンピュータでシミュレーションしている内容について、日本海洋科学振興財団から発表します。
- ②福島原発事故で放出された放射性物質のうち、これまで明らかにされていなかったトリチウムについて環境科学技術研究所が調査した結果について、発表します。
- ③放射線の人体への影響に関して、環境科学技術研究所でマウスを用いて研究している内容と成果について、発表します。



# 環境研における 放射線の生物影響研究の成果と今後

(公財)環境科学技術研究所  
理事長  
小野哲也

環境研生物影響研究部では、過去約20年にわたって低線量率放射線を長期間被ばくした時の生体影響について調査してきました。ここでは、その主な研究結果について紹介します。また、これからの計画についても簡単に紹介します。

# 放射線の健康への影響

線量が高いとき（約 5 Sv以上）→ 死亡

線量が低いとき（約 5 Sv以下）→ 癌の誘発  
遺伝的影響

線量がさらに低いとき → 分かっていない  
（低線量）

## — 要点 —

1. 放射線の生体影響を考えると、放射線の量によって影響が大きく異なるということを理解することが大切です。量が多い時と少ない時では影響の中身も程度も大きく違ってきます。
2. 放射線量が少ないときの影響はまだよくは分かっていません。

## [ 注意 ]

ヒトでの遺伝的影響はあるかないかまだ証明されていません。ただし国際的な専門家の集まりである ICRP（5ページ参照）では、実験動物での調査結果からヒトでも影響があると考えてリスク評価をしています。

# 人が被ばくする低線量放射線

1. 短時間での低線量放射線被ばく  
放射線診断; 0.1 – 100 mSv
2. 長期間にわたる低線量率放射線被ばく  
宇宙飛行士; 200 – 400 mSv/年  
放射線作業従事者の基準; 20 mSv/年  
一般人の基準; 1 mSv/年  
自然放射線; 1 – 10 mSv/年

— 要点 —

人が低線量放射線に被ばくするのは、以下のような場合です。

1. 短時間での低線量放射線被ばく
  - ・ 病院で放射線診断を受けるとき、少しの放射線を被ばくします。
2. 長期間にわたる低線量率放射線被ばく
  - ・ 宇宙飛行を1年間続けると、200～400 mSv を被ばくします。
  - ・ 原子力発電所などの施設で働く人や研究者、医療従事者などは放射線作業従事者として一定量以下の放射線被ばくが認められています。その量は5年間で100 mSv。年間では最大50 mSv。平均量としては年間20 mSv。この量は「線量限度」と呼ばれます。
  - ・ 放射線を扱う施設から外に出る放射線量は、1 mSv/年以下と決められています。
  - ・ ミリシーベルト (mSv) レベルの低線量放射線には、すべての生き物が曝されています。その原因は天然に存在する自然放射線に由来するもので、その量は場所によって異なり、1年当たり 1～10 mSv です。

# 人が低線量放射線を被ばくしたときの 健康影響は？

現時点での答え；

影響（リスク）はあるかないか分からないが  
もしあったとしても小さい。

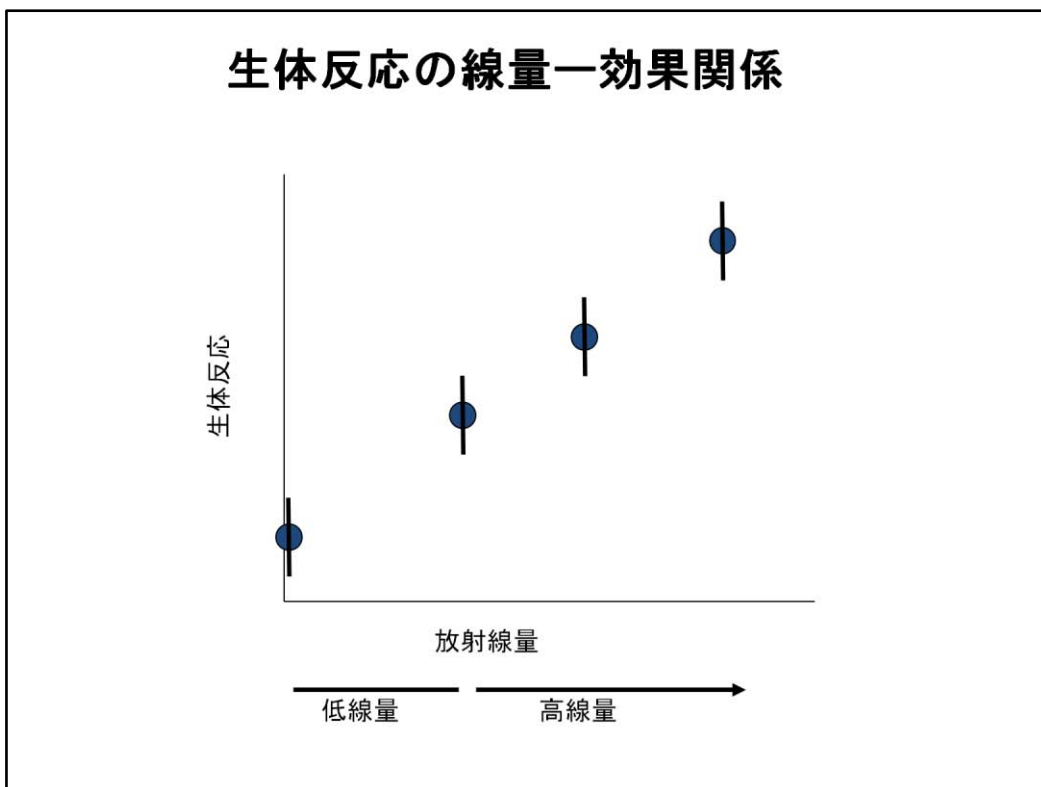
－要点－

低線量放射線による影響がどの位かについては、まだよくは分かってはいませんが、過去のさまざまな研究結果から、もしあったとしてもその影響は少ないと考えられています。

# 低線量放射線の影響についての 考え方

低線量放射線の生体影響について、国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection, ICRP) がどのように考えているかを紹介します。現在、多くの国がこの考え方を採用しています。

## 生体反応の線量－効果関係



### －要点－

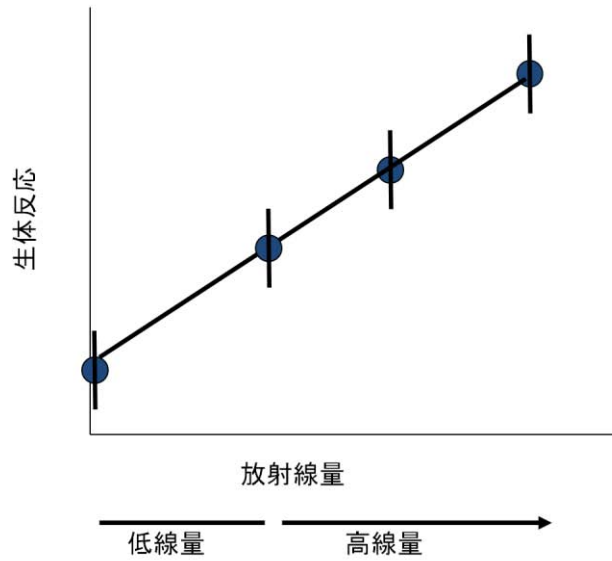
1. 放射線の生体影響を理解するためには、放射線の量とそれによる生体影響についての関連を知ることが重要です。
2. 高線量放射線に対する影響は分かっていますが、低線量域の放射線に対する影響はまだ分かっていません。

### [用語解説]

線量－効果関係；放射線の量とそれを被ばくした時の生体の反応(影響、効果)をさまざまな線量に対して示したものです。

高線量；通常は数 100 mSv (Gy) 以上の放射線量をいいます。

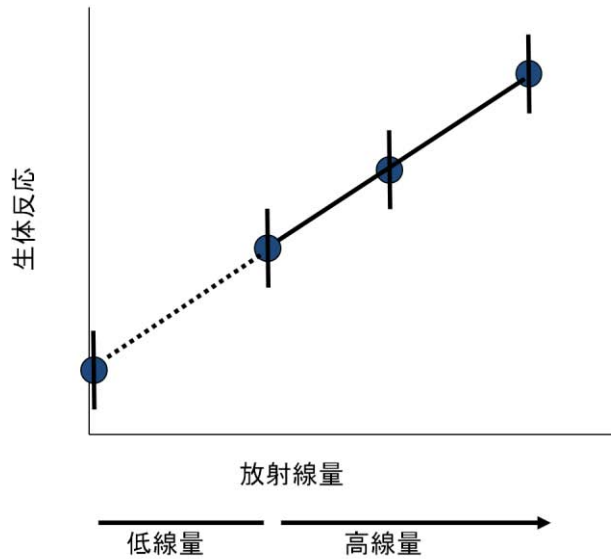
## 生体反応の線量-効果関係



—要点—

放射線量と生体反応の間には多くの場合、直線的な比例関係がみられます。

## 生体反応の線量一効果関係

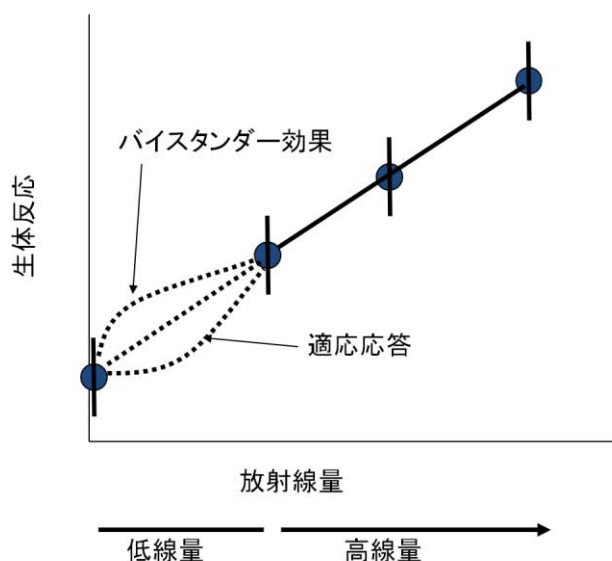


—要点—

低線量域の放射線に対する生体反応は直線関係ではない可能性を示すデータがあります。その理由は、生体が活着しているために、「物」ではみられない複雑な応答(変化)をするためであると考えられています。



## 生体反応の線量－効果関係



### －要点－

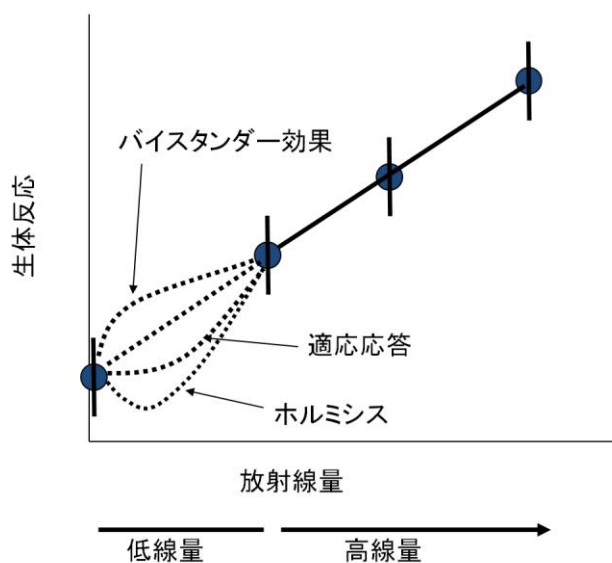
低線量放射線に対する生体反応では、バイスタンダー効果や適応応答と呼ばれる効果などによって、直線で予測される量よりもっと多い影響あるいはより少ない影響になる可能性が指摘されています。

### [用語解説]

**バイスタンダー効果；** 傍観者効果ともいわれます。被ばくした細胞と被ばくしない細胞が混在するときに、被ばくした細胞から有害物質が放出され、それによって被ばくしていない細胞が影響を受ける現象。個体内でそのようなことが起こるかどうかについては未解明です。

**適応応答；** 細胞が致死量以下の放射線を被ばくした場合、次にもう一度被ばくする時に備え自身を放射線抵抗性に変換させることがあります。このような応答を適応応答と呼びます。これが起ると、繰り返し被ばくあるいは連続被ばくのときの影響は、1回被ばくした時の影響から推測される量より少なくなります。個体内での適応応答については、まだよくは分かっていません。

## 生体反応の線量一効果関係



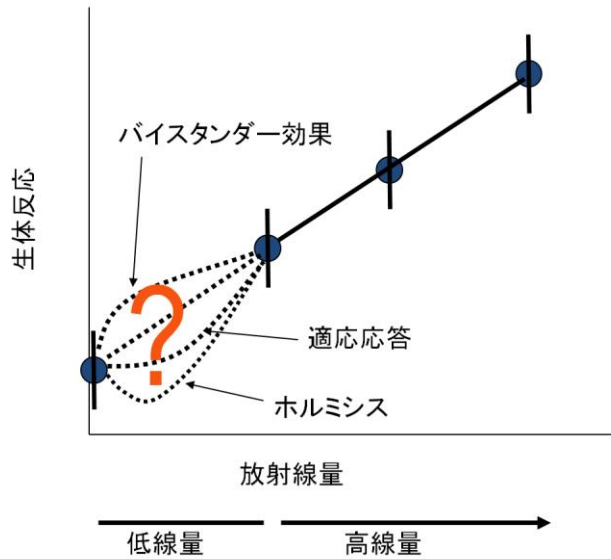
— 要点 —

わずかな放射線を被ばくするとそれがよい刺激となり体の抵抗力を増加させ、さまざまな日常的障害が起きるのを防ぐようになるという仮説があります。これをホルミシスあるいはホルミシス効果と呼びます。ラドン温泉、ラジウム温泉などの効用としても言及されますが、それが正しいかどうか証明されている訳ではありません。

[用語解説]

ホルミシス； 低線量放射線がホルモンのように働いて体によい効果を示すのではないかという考えに基づき、ラッキー博士によって提唱されたものです。

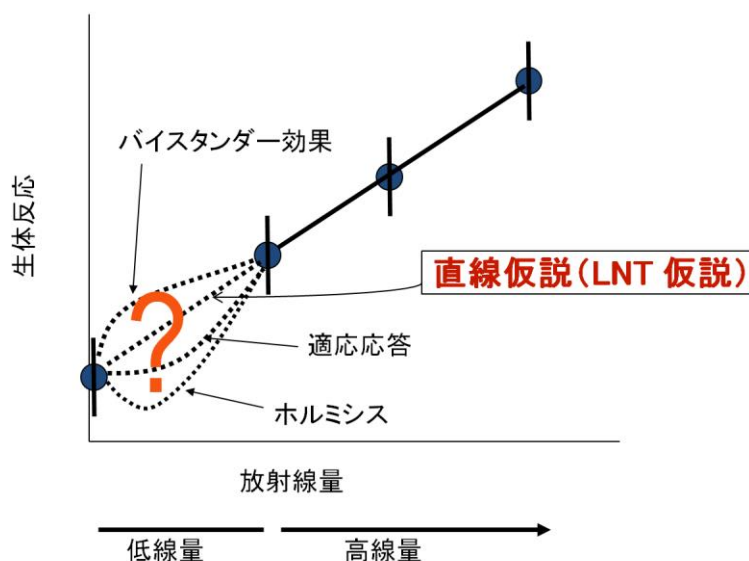
## 生体反応の線量-効果関係



— 要点 —

低線量域の放射線による生体影響が実際どの程度のものかについては、世界中の誰も知らないのが現実です。

## 生体反応の線量—効果関係



### —要点—

ICRP は、低線量放射線による生体影響はまだ分からないので、分かるまでの一時的な仮説として「高線量放射線の影響から外挿される直線関係で推測する」という暫定的なもの(直線仮説、閾値なし直線仮説、LNT仮説 などと呼ばれる)を決めています。これに基づいて線量限度が導かれています。

### [用語解説]

LNT 仮説; Linear non-threshold hypothesis の省略です。

閾値(いきち); しきい値ともいいます。その線量以下では何の影響も現れないという線量。

### [基礎知識]

直線仮説が正しいとすると、例えどのように少ない線量であってもその線量に比例した生体影響があることとなります。しかし地球上の生きものは過去40億年の歴史の中で誕生し進化してきたわけですが、その間ずっと1～10 mSv/年の自然放射線に曝されてきています。従ってこのレベルの放射線がなんらかの影響を及ぼすかどうかについては疑問が残ります。

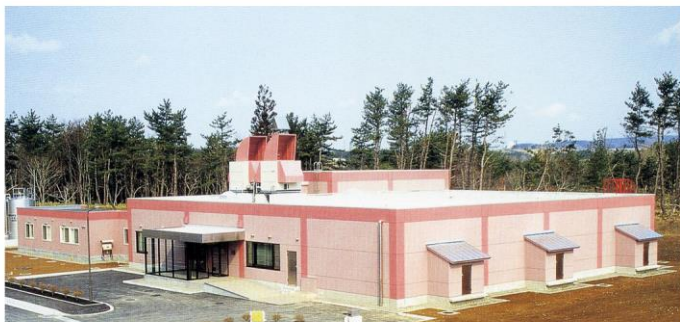
# 人が被ばくする低線量放射線

1. 短時間での低線量放射線被ばく  
放射線診断; 0.1 – 100 mSv

2. 長期間にわたる低線量率放射線被ばく  
→ 宇宙飛行士; 約 400 mSv/年  
→ 放射線作業従事者の基準; 20 mSv/年  
一般人の基準; 1 mSv/年  
自然放射線; 1 – 10 mSv/年

環境研では、宇宙ステーションでの飛行士の被ばくレベルと放射線作業従事者の線量限度レベルでの被ばくによる生体影響について、実験動物を用いて解析しています。

## 環境科学技術研究所(平成2年～)



低線量率放射線照射施設  
(平成7年～)



環境研は多数のマウスを低線量率放射線で長期間連続照射出来る施設をもっています。施設内には4つの清浄な部屋があり、そのうち3つの部屋の中央には放射線源( $^{137}\text{Cs}$ )が設置されています。

マウスはケージに入れ、同じ量の放射線を被ばくするよう線源から等距離になる所に配置され、毎日22時間被ばくし続けます。残りの2時間(10:00～12:00)は餌、水の供給、マウスの健康状態のチェックなどに使われます。照射は400日間続けられます。

## 環境研で設定した線量率と総線量

室	線量率 (mGy/日)	400 日間での総線量 (mGy)
非照射室	0	0
照射室1	0.05	20 (放射線作業従事者の線量限度)
照射室2	1	400 (宇宙ステーションでの被ばくレベル)
照射室3	20	8000 (必ず影響のみられるレベル)

### －要点－

環境研では、放射線作業従事者に認められている「線量限度」での被ばく並びに宇宙ステーションでの被ばくレベルでどのような健康影響がみられるかについて、実験動物(マウス)を用いて解析を進めています。

なお実験を行う時には、必ず影響が見られると思われる高い線量率の放射線の影響も同時に調べ、それと比較しながらデータを解析しています。

### [基礎知識]

必ず影響がみられるであろう線量率として採用している 20 mGy (=mSv)/日でも、このレベルでの放射線に対する影響研究は世界的にもあまりありません。

宇宙ステーションでの被ばく量は、太陽の活動レベルの変化に伴い上下します。年間 200 - 400 mSv。



マウス (U. H. Ehling, 1987)

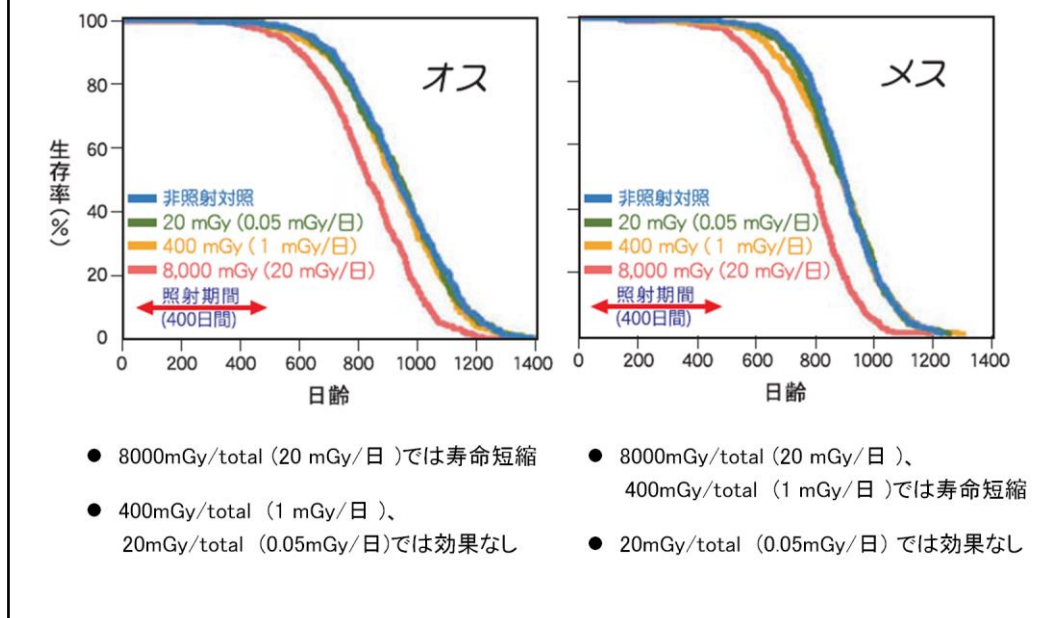


[用語解説]

マウス； 体長約5 cm、体重約30 g。妊娠期間20日。寿命は2.5～3年。ヒトとほとんど同じ機能を備えているので、ヒトのモデル動物としていろいろな研究でよく使用されています。



## 低線量率放射線による寿命短縮効果



### —要点—

低線量率放射線を400日間連続照射した時、マウスの寿命に影響があるかどうかを調べた結果が示されています。

- ・総線量として8,000 mGy 被ばくすると、雄でも雌でも約100日の寿命短縮がみられました。
- ・総線量400 mGy被ばくでは、雌に20日の短縮がみられましたが、雄では有意な短縮はみられませんでした。
- ・総線量20 mGyでも、短縮はみられませんでした。

これらの解析は1群約500匹のマウスを使って行ったものです。

(詳細については S. Tanaka et al. (2003) Radiat. Res. 160, 376-379 を参照して下さい。)

### [基礎知識]

放射線を被ばくした時に寿命が短くなるという現象は、古くから知られていました。しかしその多くは放射線を短時間の間に被ばくしたときのものであり、長期間をかけて被ばくした時の影響を解析した結果はほとんどありません。

## 低線量率放射線長期照射のマウスへの影響

指標	総線量	20 mGy	400 mGy	8,000 mGy	線量率効果
寿命短縮		-	+/-	+	+
癌誘発		-	-	+	+*
継世代影響(寿命)		-	-	+	+**
染色体異常		(-)	+	+	+
遺伝子変異		-	-	+	+
mRNA		+	+	+	+
蛋白質		-	+	+	+

+; 効果あり

-; 効果なし

+/-; 雌では効果あり。雄では効果なし

(-); 予備的な結果

\*; 他の研究グループの結果との比較

\*\*; 高線量率照射では影響なしと報告されている

### —要点—

これまでに環境研で調査した生体影響の結果をまとめたものです。

被ばく総線量が8,000 mGyになると調べたすべての指標で影響が見られましたが、400 mGyでは寿命短縮、染色体異常、遺伝子発現(mRNA、蛋白質)でだけ影響が見られました。

他方20 mGyでは影響が見られませんでした。例外的に mRNA の変化がみられましたが、それに伴うべき蛋白質の変化が見出されていないので影響ありとは言えません。

### [用語解説]

線量率効果; 同じ量の放射線でもそれを短時間で被ばくした場合は、長時間をかけて被ばくしたときよりも影響が大きくなります。この違いを線量率効果と呼びます。

mRNA; 遺伝子の情報を現実のものとして発現させるとき、遺伝情報をまずmRNAにコピーします。メッセンジャーRNAと呼ばれます。

蛋白質; mRNA にコピーされた情報をアミノ酸の連結されたもの、すなわち蛋白質としてコピーしなおします。この蛋白質が生体のさまざまな活動を押し進めます。mRNA量に変化しても蛋白質量は変化しないこともあります。

## 現時点での結論

- 1) 約1年間の連続被ばくで総線量が 8000 mGy になると、癌の誘発や寿命の短縮などさまざまな影響が出てくる。
- 2) 年間被ばく量が 400 mGy では、わずかな寿命短縮や染色体異常の増加、遺伝子発現の変化がみられる。
- 3) 年間被ばく量が 20 mGy では、ほとんど生体影響はみられない。

## これからの調査予定

- ◆ 親が低線量率で被ばくした時の子、孫への影響
- ◆ 胎児期に低線量率放射線を被ばくした時の影響
- ◆ 被ばくした後の障害の発生を抑制する方法の検討

ご清聴ありがとうございました。



Photo; 環境研 一戸一晃

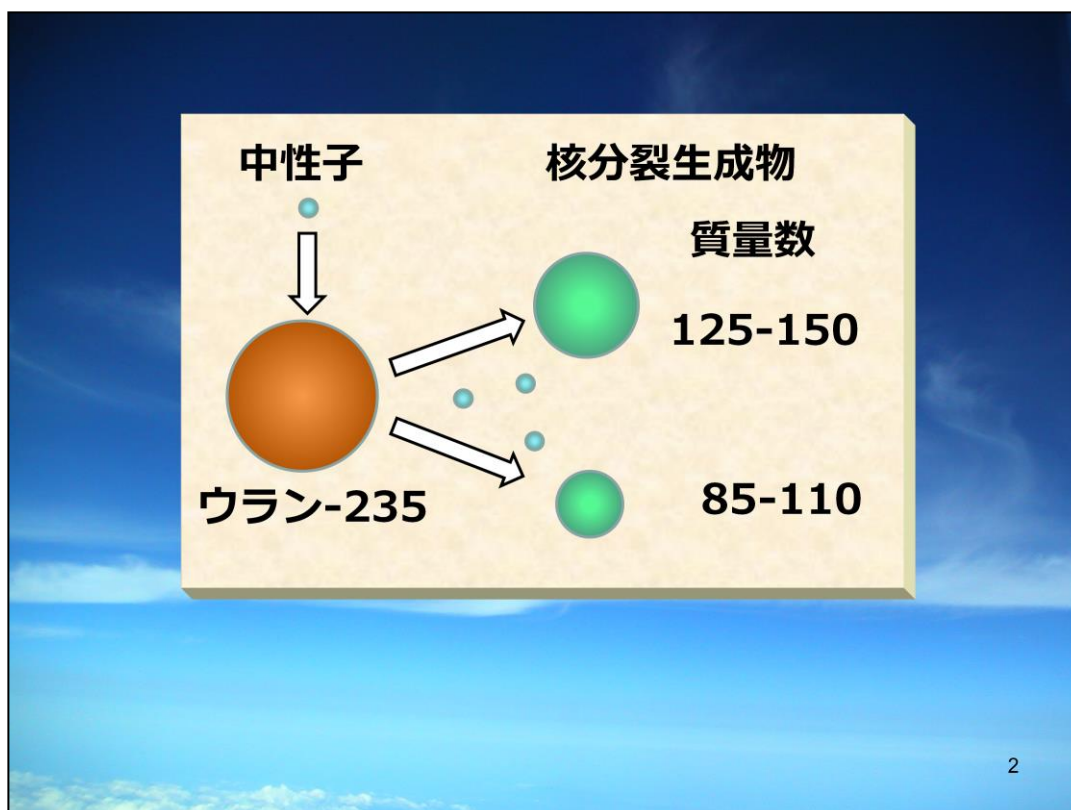
# 福島原発事故で放出されたトリチウム その背景

(公財)環境科学技術研究所  
環境影響研究部長  
久松 俊一

1

－ 要点 －

ここでは、予備知識を話します。



2

－ 要点 －

原子炉の中ではウランが燃料として使われ、原子炉に蓄積していく放射性物質は主にウランの核分裂で生じます。

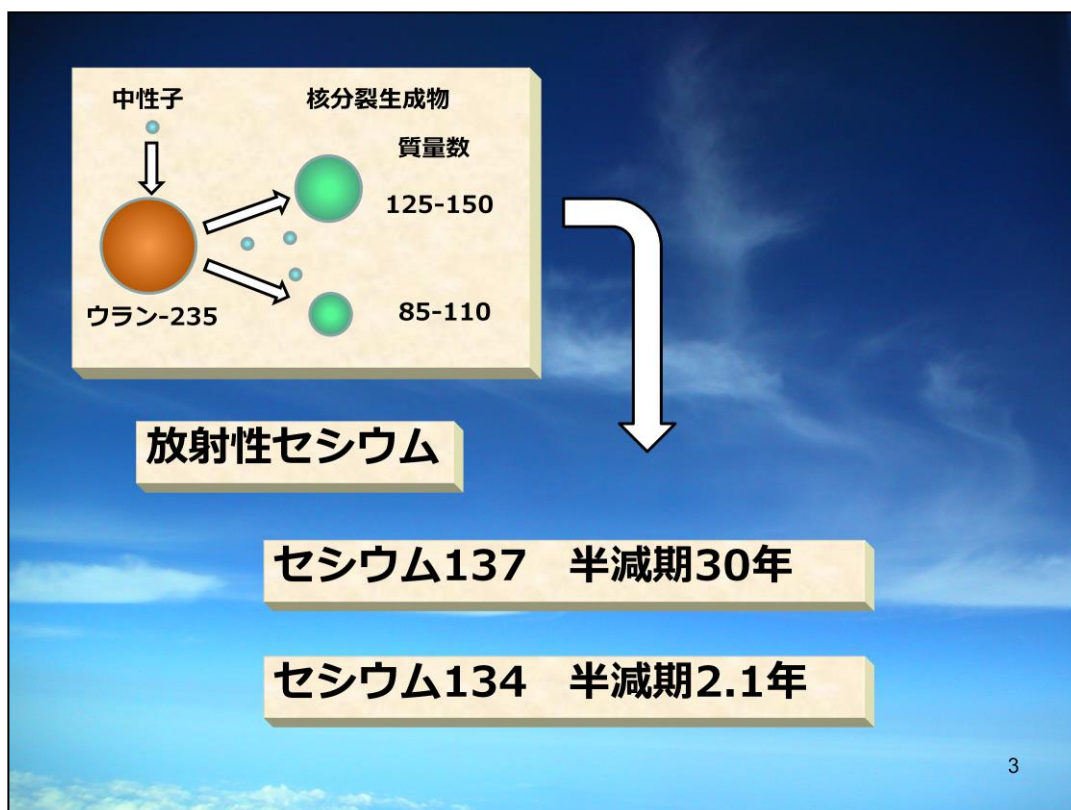
中性子を取り込んだウラン235は核分裂を起こします。

分裂は等分に起きることは稀で、質量数125-150程度の大きな原子核と85-110程度の小さな原子核に分裂する 경우가ほとんどです。

〔用語解説〕

質量数とは：原子の質量のほとんど全ては原子核にあり、原子核の質量を質量数で表します。同じウランにも質量数の異なる原子核があります。

ウラン235、ウラン238等。



－ 要点 －

質量数の大きな核分裂生成物の代表的なものがセシウム137です。

セシウム134は核分裂で生成したセシウム133が更に中性子を1つ吸収してできます。

これらの放射性セシウムは東京電力福島第一原子力発電所事故で、現在、問題となっています。

〔用語解説〕

半減期とは：放射能が半分になるまでの時間。半減期の分の時間が経つと、放射能は1/2になり、更に半減期分の時間が経つと1/2になるため、最初の1/4になります。



## 原子力施設から大気へ飛散する主な放射性物質

### 希ガス

クリプトン85、87、88

キセノン133、135 → 気体

### ヨウ素

ヨウ素131

→ 気体、粒子

### セシウム

セシウム134、137 → 粒子

4

### 要点 一

原子力施設から大気へ飛散する放射性物質は、常温で気体状の希ガス、高温で気体となり易いヨウ素やセシウムがあります。

セシウムは温度が下がると粒子となるため、施設外には粒子として出てきます。

ヨウ素は中間的な性質を持ち、一部は気体、残りは粒子として拡散します。

ストロンチウム、ウラン、プルトニウムは高温でも気体となりにくいので、飛散しにくいのです。

原子力施設が健全ならば粒子はフィルターで除去されるため、セシウム等の飛散量は極めて少ないのです。

## 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

質量数2：重水素

弱いベータ線を出してヘリウム3になる。

半減期：12.3年

－ 要点 －

セシウム-134、137等の他原子炉ではトリチウム(3重水素)も蓄積されていきます。

## 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

6

－ 要点 －

原子炉内でトリチウムができる主な反応を示しています。



－ 要点 －

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りますので、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します。

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す。

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ります。

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ります。

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

8

### － 要点 －

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ます。ただ、最大エネルギーは決まっていますので、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ました。

ベータ線はエネルギーによりどこまで飛ぶかが決まります。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ります。

トリチウムの最大飛程は0.0055 mm (5.5ミクロン) です。

人体の皮膚の角質(死滅した表皮細胞)は足の裏等の特に厚い部分を除くと10-20ミクロンですので、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ありません。

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ありません。

ただ、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ません。漏れても微量なので健康上の問題はありませんし、ステンレスのケースでは漏れたという報告はありません。

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

9

## － 要点 －

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ります。ここでは、トリチウム以外では最も被ばく線量の高い形態を上げています。

形態は以下のように分類されます。

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。

トリチウムは水素の同位体ですので、水(H<sub>2</sub>O)の水素と入れ替わり(HTO、Tはトリチウム)、トリチウム水となります。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す。

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( $\mu$  Sv) = 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( $\mu$  Sv)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。

## 東京電力福島第一原子力発電所事故時に 原子炉にあった放射性物質の量

### 原子炉中の放射性物質の量(ベクレル、Bq)\*

	セシウム137	トリチウム
1号炉	$2.0 \times 10^{17}$	$0.95 \times 10^{15}$
2号炉	$2.6 \times 10^{17}$	$1.3 \times 10^{15}$
3号炉	$2.4 \times 10^{17}$	$1.2 \times 10^{15}$
合計	$7.0 \times 10^{17}$	$3.4 \times 10^{15}$

\*西原健司他

10

### － 要点 －

東京電力福島第一原子力発電所事故の際に原子炉に入っていた放射性物質の量\*

実測はできないので、原子炉の運転状況を基にしてコンピューターによる計算で推定します。

4号炉は定期点検のため燃料を抜き取ってありました。

\* 西原健司他、福島第一原子力発電所の燃料組成評価、JAEA-Data/Code 2012-018

## 東京電力福島第一原子力発電所事故による 放出量の推定

### 原子炉からのセシウム137放出量 ( $10^{17}$ ベクレル)

原子力安全委員会、JAEA	0.13
	0.11
JAEA	0.09
原子力安全・保安院	0.061
	0.15
	0.082
東京電力	0.10

$0.10 \times 10^{17}$ Bqとすると、原子炉中の1.4%が  
放出された。

11

#### － 要点 －

東京電力福島第一原子力発電所事故の際に原子炉から放出された放射性物質の量

通常であれば、スタックモニター(排気中の放射性物質を測定するモニター)等により放出量は監視されていますが、全所停電のため、それらが使えず、放出量測定データがありません。

そこで、周辺のモニタリングポストの測定値等を基にして、大気拡散モデルを用いて放出量の推定が行われています。

セシウム137放出量の推定値は $0.061 \times 10^{17}$ Bqから $0.15 \times 10^{17}$ Bqまでばらついていません。

ここで、 $0.10 \times 10^{17}$  Bqが放出されたとすると、前のスライドにある原子炉中のセシウム137量の1.4%が放出されたこととなります。

JAEA: 日本原子力研究開発機構



# 東京電力福島第一原子力発電所事故による トリチウムの放出量は？その影響は？

事故時に原子炉中にあったのは  
 $3.4 \times 10^{15}$  ベクレル

福島第一原子力発電所の滞留水中のトリチウム  
 $0.28 \sim 1.4 \times 10^{15}$  ベクレル\*

残りは？  
環境中に放出された？  
それによる被ばく線量は？

\*東京電力

12

## － 要点 －

原子炉から放出されたトリチウムの量は分かっていません。

東京電力によれば、福島第一原子力発電所の滞留水\*\*中のトリチウム量は $0.28 \sim 1.4 \times 10^{15}$ ベクレルと推定されていますので、残りが全て放出されたとすると、 $10^{15}$ ベクレルの桁のトリチウムが放出された可能性があります。

先程の、セシウム137の放出量、 $0.1 \times 10^{17}$ ベクレルは $10 \times 10^{15}$ ベクレルですので、セシウムの1/10程度のトリチウムが放出されたかもしれません。

しかし、放出されたトリチウムがどれくらいの被ばく線量を与えたのかは不明でした。

そこで、植物に残っていたトリチウムを手掛かりにして、線量評価を試みた結果をこれから報告します。

\*\* 事故を起こした原子炉を冷却した水等で、タンクに貯めてある。

# 福島原発事故で放出されたトリチウム

(公財)環境科学技術研究所  
環境影響研究部  
柿内秀樹

## 調査の目的

福島第一原子力発電所事故に伴い放出されたトリチウムによる被ばく線量を評価する。

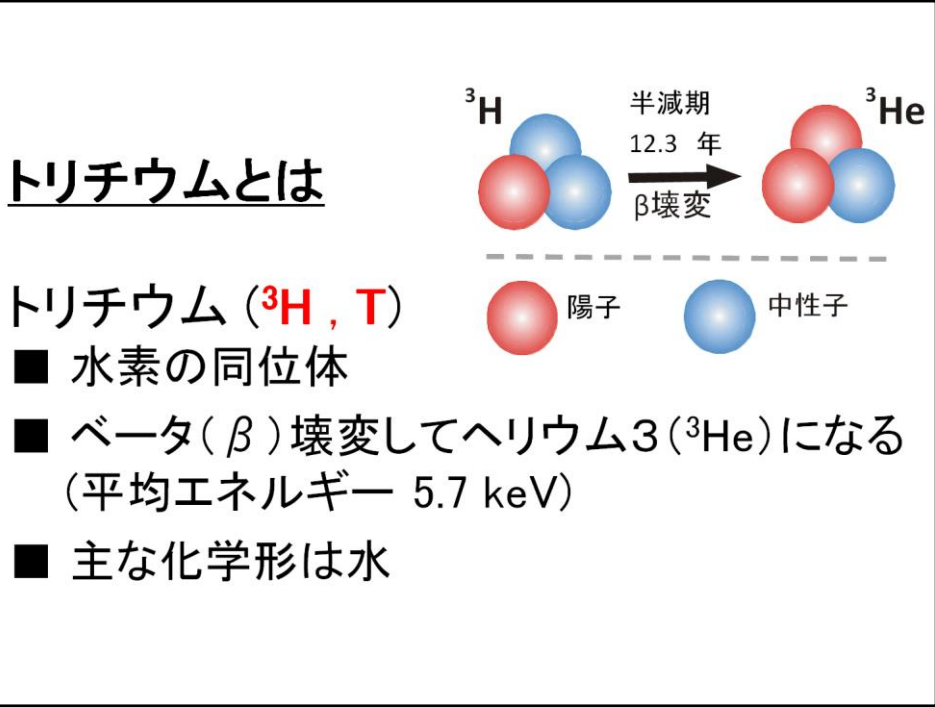
### — 要点 —

東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い、多量の放射性核種が環境中に放出されました。

トリチウムは原子炉の中で生成され、その原子炉中に蓄積しており、福島第一原子力発電所のような事故時には、その大部分が環境中に放出されると考えられます。

しかし、福島第一原子力発電所周辺においてトリチウムを測定した報告は、ほとんどありません。

そこで、福島第一原子力発電所周辺のトリチウムを測定するとともに、トリチウムによる被ばく影響を評価しました。



— 要点 —

トリチウム ( $^3\text{H}$ , T) は、水素の放射性同位体 (半減期12.3年) であり、安定同位体である軽水素 ( $^1\text{H}$ ) や重水素 ( $^2\text{H}$ ) とほとんど同じ挙動をします。

トリチウムは、ベータ( $\beta$ )壊変してヘリウム3 ( $^3\text{He}$ )になります。

トリチウムは、放出するベータ線のエネルギーが弱い (最大 18.6keV、平均5.7keV) ので、生物への影響は少ない放射性核種とされています。

トリチウムは、環境中では水などの単純な分子から複雑な有機物まで広く分布する放射性核種です。

## **(1) 天然のトリチウム**

宇宙線と空気との相互作用により生成

## **(2) 人為起源のトリチウム**

**a. 核実験由来**

**b. 原子炉由来**

— 要点 —

環境中に存在しているトリチウムの主な発生源には以下のものがあります。

### (1) 天然トリチウム

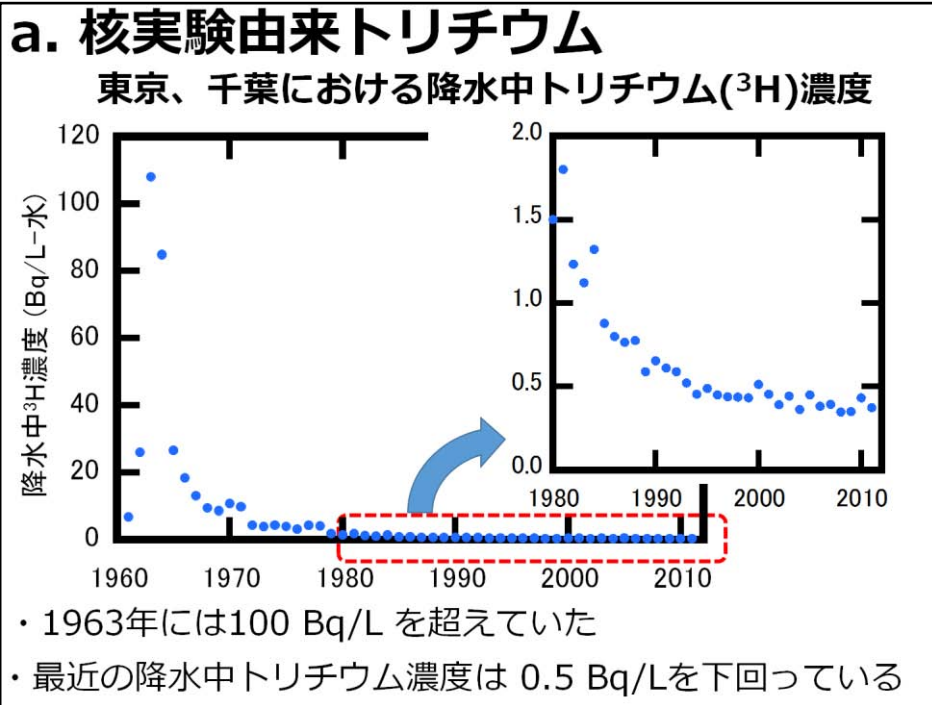
宇宙線で生成した中性子と大気中の窒素や酸素の核反応により生成するものです。

生成したトリチウムは、水として最終的に地表の水循環に組み込まれ、様々な環境中の水(雨、水蒸気等)に含まれます。

### (2) 人為起源のトリチウム

#### a. 核実験由来のトリチウム

1950-60年代に盛んに行われた大気圏内核実験で、大量のトリチウムが環境へ放出されました。その核実験由来トリチウムは、天然トリチウムと混ざり雨として世界中に降下しました。



— 要点 —

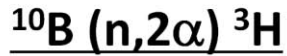
核実験によるトリチウム放出量は、天然トリチウムの存在量の200倍以上と推定されています。

1963年に大気圏内の核実験が禁止されたため、1963年以降の降水中のトリチウム濃度は減少を続け、現在はほぼ天然の濃度レベルに戻ったと考えられています。

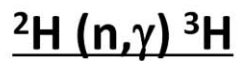
## b. 原子炉由来トリチウム

### トリチウム( $^3\text{H}$ )生成反応

- ・ 制御棒中ボロン(B)と中性子(n)との反応



- ・ 重水と中性子との反応

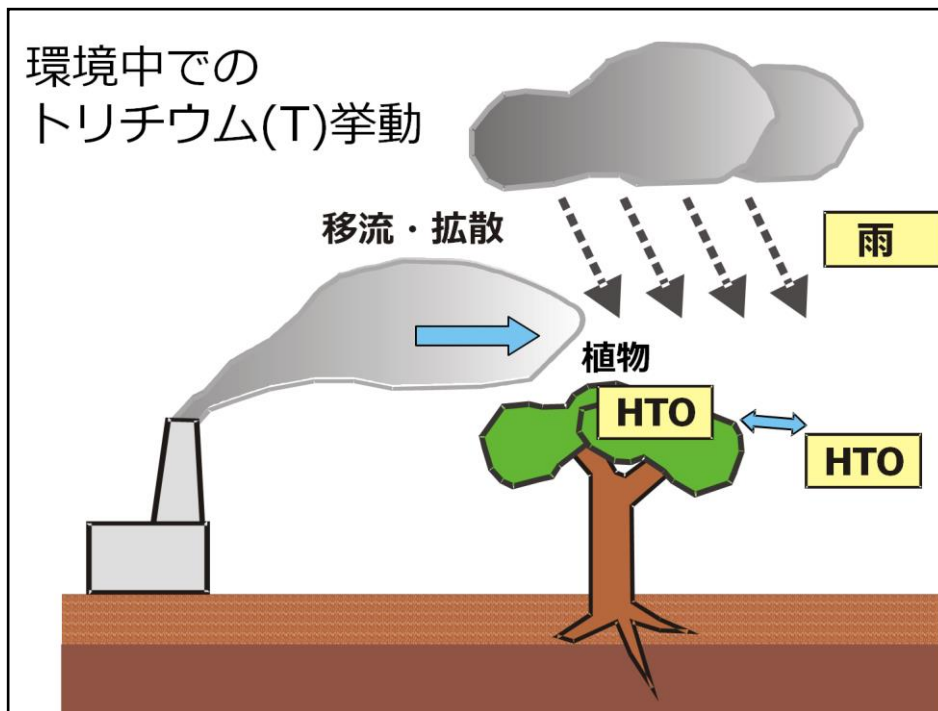


- ・ 三体核分裂



— 要点 —

以上に示した反応により、トリチウムが原子炉内で生成され蓄積しています。



— 要点 —

原子力関連施設から大気へ放出されたトリチウムの化学形は、そのほとんどが水蒸気（HTO）と考えられます。

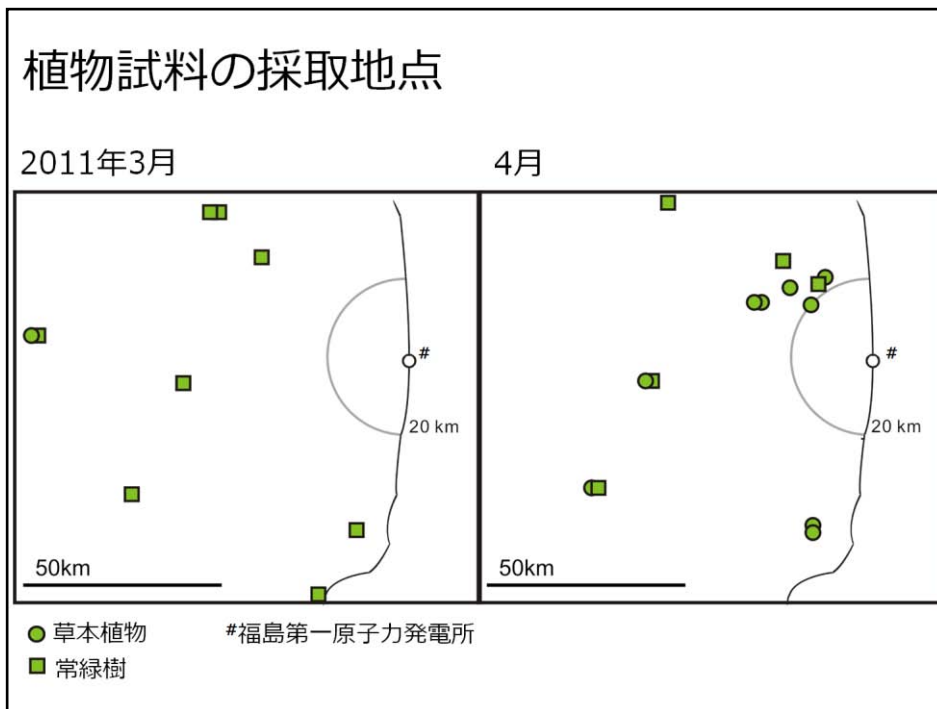
大気へ放出されたトリチウムは速やかに移流・拡散し、一部は植物に取り込まれます。

福島第一原子力発電所事故でもトリチウムが放出されたと考えられますが、空気中の濃度は測定されていませんでした。

空気中のトリチウムは葉などを通じて植物中に入ります。そこで植物中のトリチウムを測定し、大気中のトリチウム濃度を推定しました。

〔用語解説〕

HTO：トリチウム水



— 要点 —

事故直後の2011年3月に、弘前大学の協力を得て、福島第一原子力発電所周辺で植物の葉を採取しました。同様に4月にも採取しています。

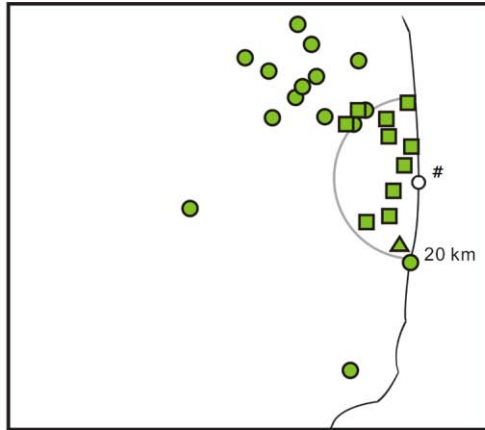
草本植物：チシマザサ、エゾノギシギシ、オオイタドリ等

常緑樹：ヒラドツツジ、ヒノキ、サワラ、サザンカ、松、スギ、アオキ



## 植物試料の採取地点

2011年7-8月



#福島第一原子力発電所

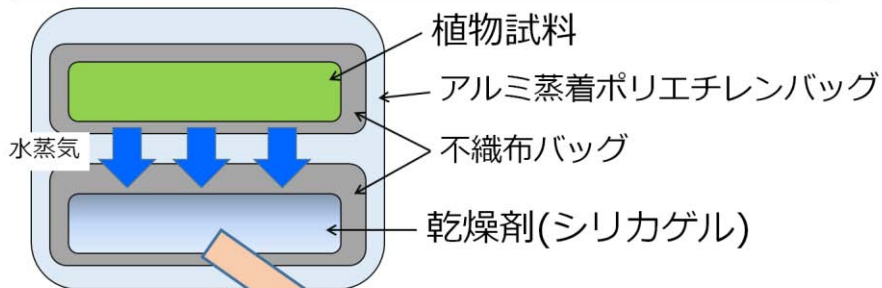
— 要点 —

2011年7月下旬から8月初旬にかけ、福島県農業総合センターの協力を得て、福島第一原子力発電所周辺で植物試料を採取しました。

草本植物：スギナ、ヨモギ、ヒメジョオン

## 植物中トリチウムの回収と測定

### ①植物中トリチウムをシリカゲルに吸着



### ②シリカゲルを加熱 水を回収

### ③シリカゲルから回収した水のトリチウム濃度を液体シンチレーションカウンターを用いて測定

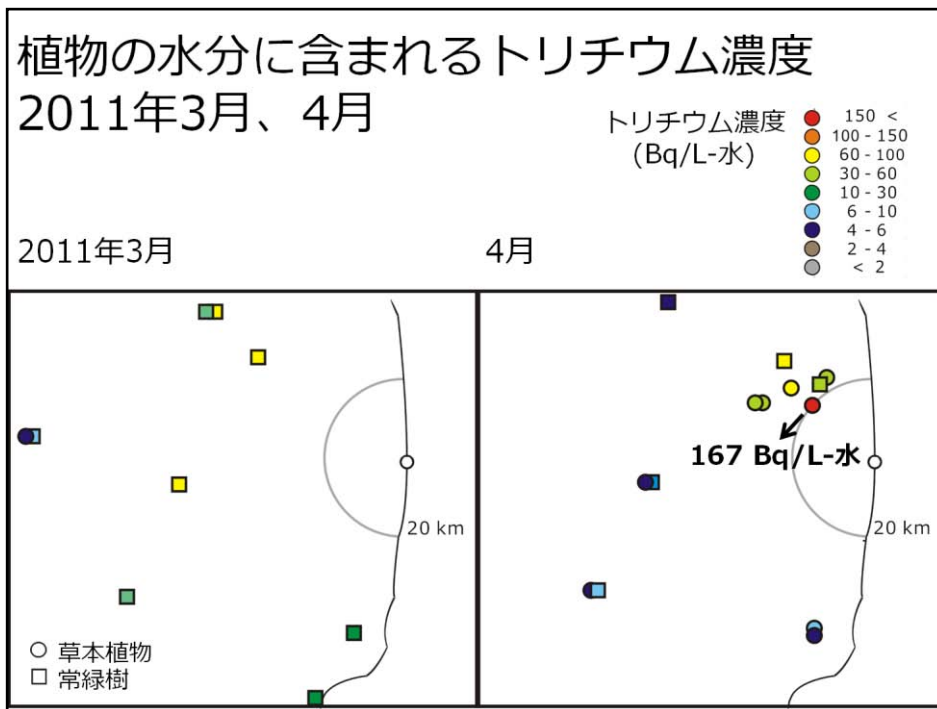
－要点－

- ①植物の水分に含まれるトリチウムを、シリカゲルに吸着させて捕集します。
- ②シリカゲルに吸着した水を加熱して脱離させ、回収します。
- ③この水のトリチウム濃度を、液体シンチレーションカウンターで測定します。

〔用語解説〕

液体シンチレーションカウンター：

低エネルギーのベータ線でも測定できる放射線検出器の一種

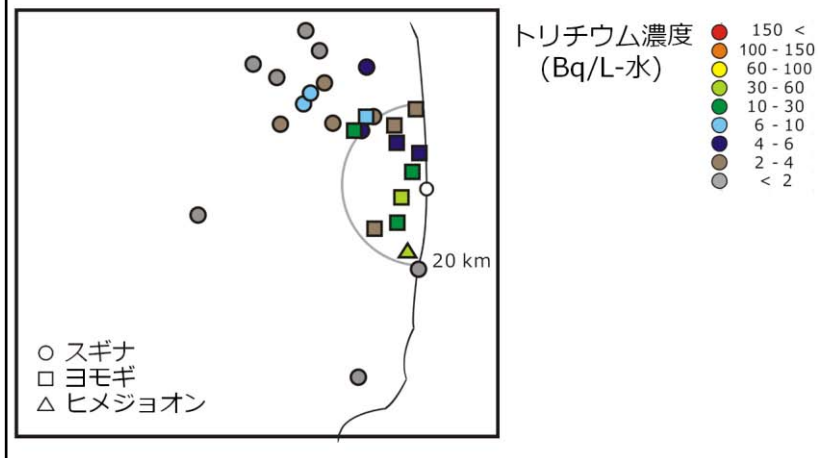


— 要点 —

図のように、3月、4月とも比較的高いトリチウム濃度が認められ、福島第一原子力発電所に近づくほど高い傾向があります。

この調査での最大濃度は、4月に発電所から約20 kmの地点で採取した試料で観測されています。3月にはもっと高濃度だったことが予想されますが、3月にはその地点で植物を採取していませんでした。

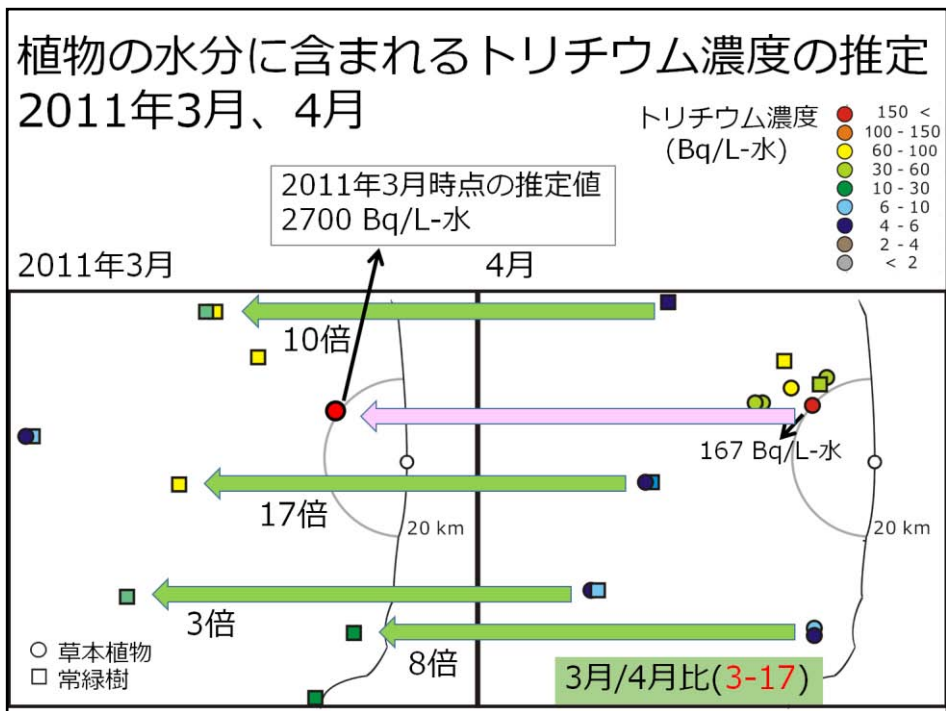
## 植物の水分に含まれるトリチウム濃度 2011年7-8月



### — 要点 —

これは、7月下旬から8月初旬に採取した植物の水分に含まれるトリチウム濃度です。

依然として、一般環境より高いトリチウム濃度が認められ、またその濃度は福島第一原子力発電所に近づくほど高い傾向があります。全体的にトリチウム濃度は、3月、4月と較べて減少しています。



— 要点 —

20 km圏外で4月に最大濃度を示した地点（図の赤丸）において、事故直後の3月に植物の水分に含まれていたトリチウム濃度を、推定します。

2011年3月と4月にほぼ同じ地点で採取した植物の水分に含まれていたトリチウム濃度の3月/4月比を求めると（図の緑色の4つの矢印）、最大17倍でした。

この比を4月の赤丸の地点におけるトリチウム濃度167 Bq/L-水に掛けて、3月の赤丸の地点における植物の水分に含まれていたトリチウム濃度を推定すると、最大2700 Bq/L-水と見積もることができます。

## 空气中トリチウム濃度の推定

植物に含まれるトリチウム濃度から空气中トリチウム濃度を推定します。

$$C_L = k C_a RH$$

$C_L$  : 植物に含まれる水分中トリチウム濃度

$C_a$  : 空気に含まれる水分中トリチウム濃度

$k$  : 比例定数

$RH$  : 相対湿度

### — 要点 —

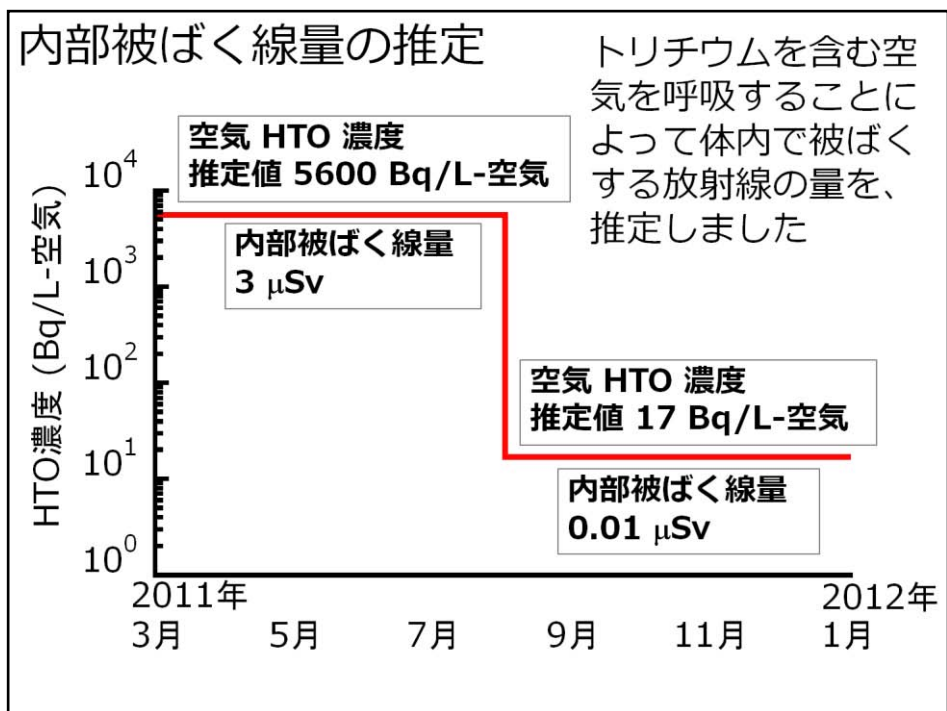
次に植物中のトリチウム濃度を元にして、空气中のトリチウム濃度を推定します。

事故直後は植物の根が分布している深さまでトリチウムが到達していないと、見なすことができます。

植物の水分に含まれるトリチウム濃度は、根から吸収されるトリチウムを無視すれば、空気水分中トリチウム濃度と相対湿度で決まります。

したがって植物の水分に含まれるトリチウム濃度と相対湿度がわかれば、空気に含まれる水分中トリチウム濃度を逆に推定することができます。

そこで前のスライドで示した最大濃度地点での空气中トリチウム濃度を推定しました。



— 要点 —

(1) 空気中トリチウム濃度の推定

福島市における相対湿度を用いて、最大濃度を示した地点における3月の空気中トリチウム(HTO)濃度を推定すると、空気1 L当たり5600 Bq (5600 Bq/L-空気)です。

同様に、8月に採取した試料のデータを用いて、8月の空気中トリチウム濃度を17 Bq/L-空気と推定できます。

(2) 内部被ばく線量の推定

時間経過とともに空気水分中トリチウム濃度は減少しますが、ここでは3月の濃度が7月まで続き、8月の濃度が12月まで続くと仮定します。これを元に成人の内部被ばく線量を計算したところ、3-7月までは3 μSv、8-12月までは0.01 μSvとなります。

合計で3.0 μSvとなり、法令で定められている1 mSv (1000 μSv)より低いものでした。

## まとめ

2011年3月から4月に採取した植物に比較的高いトリチウム濃度が認められ、その濃度は福島第一原子力発電所に近づくほど高い傾向が見られた。

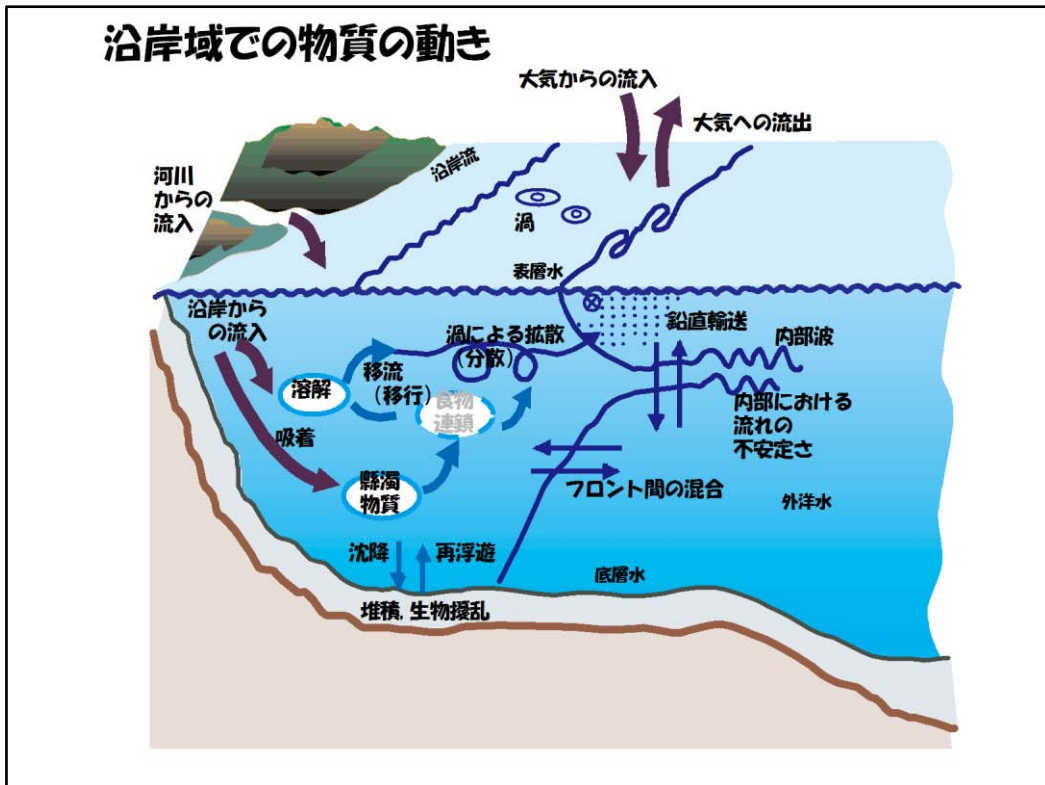
この調査での最大濃度が観測された地点（発電所から約20 km）のトリチウムによる内部被ばく線量の推定を行った結果、約3マイクロシーベルトであった。



# 青森県近海域海洋循環 シミュレーション

研究の背景

(公財) 日本海洋科学振興財団  
島 茂樹



— 要点 —

- ・海中で物質は、溶けた状態(溶存)、海水中の懸濁粒子にくっついた状態(吸着)で存在する。
- ・物質は、海水の流れとともに移行し(移流)、渦などの海水の流れの乱れによって拡散し広がって行く(分散)。
- ・懸濁粒子は海底へ沈降し堆積物に取り込まれる。
- ・取りこまれた懸濁粒子は海水の流れの乱れあるいは生物擾乱によって再び海水中に舞い上がったり、懸濁物質に取り込まれたものが再び海水に溶けることもある。
- ・沿岸域に存在する海水は擾乱による外洋水との混合によって外洋に運ばれる。
- ・日射などによって形成される躍層(水温が急激に変化する水深)の盛衰や潮汐による不安定さから鉛直への水の移動が起こり、それに伴い深層へ物質が移動する。
- ・海に物質が取り込まれる過程には、河川や大気からの供給もある。

〔用語説明〕

懸濁粒子:非常に小さな粒子で海水中を漂っているもの。生物の糞、死骸、陸地からの土壌等が含まれる。

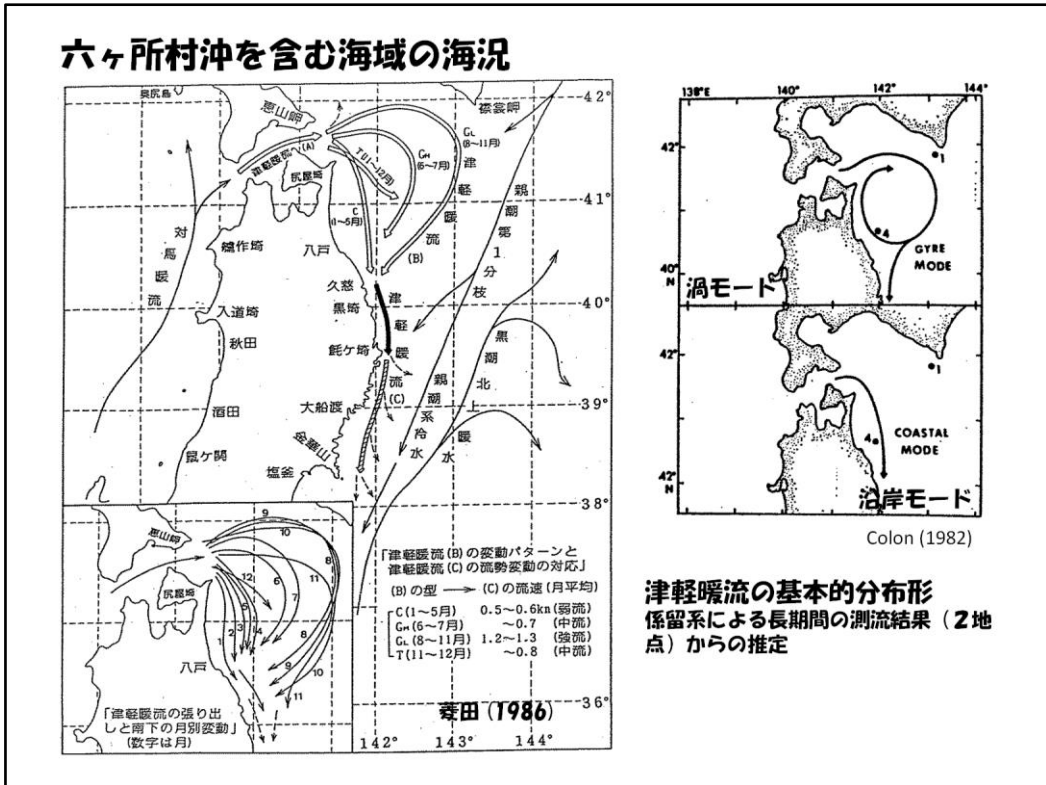
生物擾乱:海底に棲息する生物の活動によって堆積物表面が乱され、それによって堆積物の性状が変化すること。

潮汐:太陽、月の引力によって生ずる海面の高さの変化。これによって水平方向に海水の流れが生ずる。

躍層:水温、塩分あるいは密度が急激に異なる境界(フロント)。

〔基礎知識〕

海洋観測では、水温と塩分が同時に計測される。その値によって海水の密度を計算で求めることができる(海水の状態方程式)。



— 要点 —

- ・海洋放出が行われる六ヶ所村沖は三陸沖西部に属し、その海域は世界でも有数な漁場。それは黒潮(高温,高塩分)と栄養に富む親潮(低温,低塩分)が混ざり合う混合域のため。
- ・当海域には津軽海峡から津軽暖流(九州南方で黒潮から分かれ、日本海を北上する対馬海流が再び太平洋に流出し、日本海に流入した約7割)が流れ込む。
- ・津軽暖流は夏から秋には渦を形成(渦モード),冬から春では、青森県太平洋沿岸に沿って流れる(沿岸モード)。
- ・放出口付近の六ヶ所村沖では、南向きの流(60%)、北向きの流(15%)及び憩流(25%)「潮流成分を除いた平均流として、事業申請書より」。
- ・津軽暖流の流れの影響を受けていることが想定される。
- ・海洋へ放出される放射性物質による影響を把握するには、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移行拡散を解析する必要がある。

〔用語解説〕

潮流:潮汐によって生ずる日周期や半日周期で流れの向きが変わる流れ(往復流)  
平均流:潮流による流れを除いたもので、海水が全体としてどう流れているのかを表わす。

〔基礎知識〕

海の流れの場合、流れ去る方向を指して北流とか南流と呼ばれることが多い。風の場合にはこの逆である。混乱をさけるため、ここでは何々向き流れと表記している。

# 青森県近海域海洋循環 シミュレーション

日本海洋科学振興財団  
研究員 印貞治

# 海洋循環シミュレーションの目的

## 六ヶ所村沖合海域における放射性核種移行予測に必要な海水の流速等のデータを得る

- 海洋循環のシミュレーションによって、
- 時間・空間的に密なデータが得られる
  - 予測計算が可能である



核種に見立てた粒子の移動を計算する

### － 要点 －

1. 六ヶ所村沖合海域の放射性核種の拡散予測を行うのに必要な、海洋循環シミュレーションを行っている。
2. 海洋循環のシミュレーションによって得られた流速等のデータを用いて、核種に見立てた仮想の粒子の移動を計算し、核種の拡散を予想する。

### 〔基礎知識〕

流れを予測するためには、水温や塩分も予測する必要がある。

# 青森近海域の特徴

- \* 日本海・津軽海峡・太平洋・陸奥湾で構成される
- \* 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
- \* 太平洋側は親潮の影響も受ける



黒潮・対馬暖流・津軽暖流・・・亜熱帯系暖流  
親潮・・・亜寒帯系寒流

## — 要点 —

青森県の太平洋側は、日本海から津軽海峡を通過して流れる津軽暖流と、千島列島沖を南下する親潮の影響を受ける。

# 津軽暖流と親潮を構成する海水の特徴

## \* 津軽暖流

- \* 暖かい ← 暖かいところから来るため
- \* 高塩分 ← 降水が少なく・蒸発が多いところから来るため
- \* 栄養塩が少ない → 植物プランクトンが少ない

## \* 親潮

- \* 冷たい ← 寒いところから来るため
- \* 低塩分 ← 降水が多く・蒸発が少ないところから来るため
- \* 栄養塩豊富 → 植物プランクトンが豊富

## — 要点 —

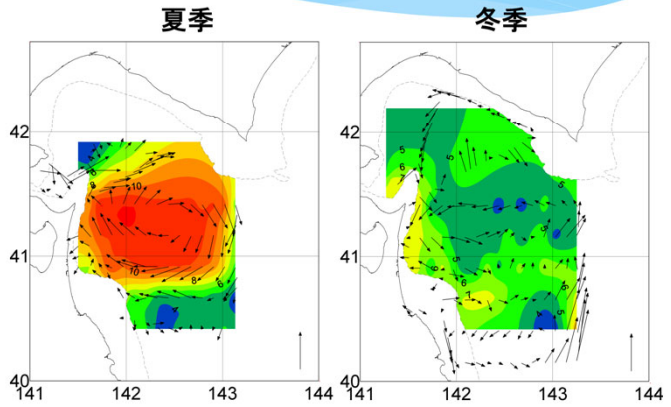
1. 津軽暖流は暖かく、塩分が高く、栄養塩が少ない。
2. 親潮は冷たく、塩分が低く、栄養塩が多い。

## 〔用語解説〕

栄養塩・・・植物プランクトンの栄養となる物質。

# 津軽暖流の季節変動

- \* 温暖期(夏~秋):
  - \* 津軽暖流が親潮の上に乗る
  - \* 渦を形成
- \* 寒冷期(冬~春)
  - \* 本州沿岸沿いを南下
  - \* 年によっては海面から見えな  
い時も



水温(トーン)と水平流速(矢印)の観測値  
暖色が高温、寒色が低温を表す  
(平成10年度六ヶ所村沖合放射能等調査の観測結果より)

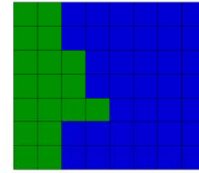
## — 要点 —

1. 津軽暖流の青森県東方での振る舞いは、季節によって異なる。
2. 夏から秋は、時計回りの循環を形成する。
3. 冬から春は、沿岸を南に流れる。

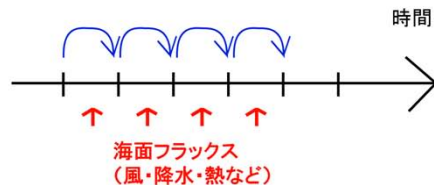


# 海洋循環の数値計算(海洋モデル)

- \* 領域をグリッド化
- \* グリッドごとに水温・塩分・海面高度・流速等の代表値を計算
- \* 海面の熱や水の出入り、風による引きずり(風応力)によって海洋を駆動
- \* 時間ステップごとに計算



空間のグリッド化  
(俯瞰)  
青 海  
緑 陸



時間ステップ計算

## — 要点 —

### 1. 数値計算手法の説明

- ・計算領域を格子状に区切り、それぞれの格子内の代表値を計算
- ・海面からの熱や淡水の出入りを与えて、時間ステップごとに計算

### [用語解説]

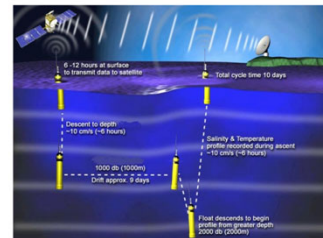
海面フラックス・・・海面から出入りする量。熱や淡水など。

# データ同化

数値モデルと観測データとを融合して、  
現実的なデータセットを作る手法

## 利用観測データ

1. 人工衛星による海面水温観測データ
2. 人工衛星による海面高度観測データ
3. 現場観測水温・塩分データ



Argo 漂流ブイ

## — 要点 —

1. 数値モデルと観測データとを組み合わせて、数値モデルのみの場合よりもより現実に近いデータセットを作る手法をデータ同化といい、本システムに用いている。
2. データ同化に利用したデータは、人工衛星による海面水温と人工衛星による海面高度及び現場観測の水温塩分値
3. 現場観測データはArgoの漂流式ブイの観測値がほとんどである。

## 〔基礎知識〕

海面高度は海洋の循環と密接に関係している。

# 高解像度化の効用

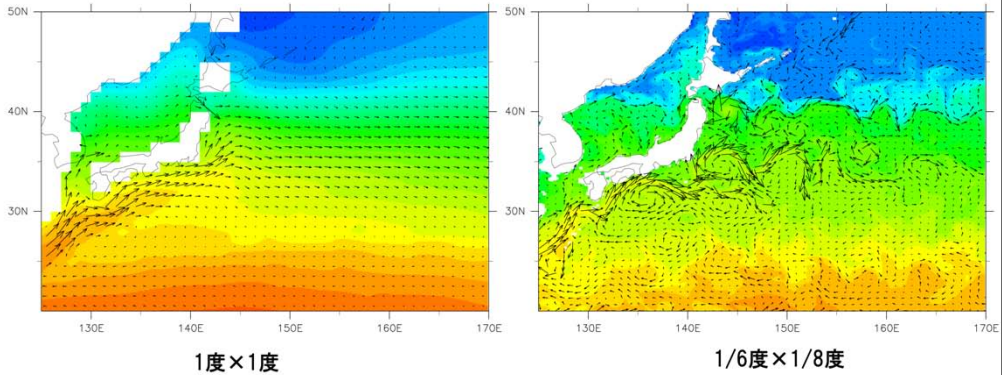
## 利点

- 陸岸がより正しく再現できる
- より細かい物理現象が再現できる

## 欠点

計算機の負荷がかかる  
計算機記憶容量 $8 \times 6 = 48$   
計算時間 $8 \times 6 \times 8 = 384$

水平解像度東西1度×南北1度と東西1/6度×南北1/8度のモデルの例  
(50m深水温・水平流速)



## — 要点 —

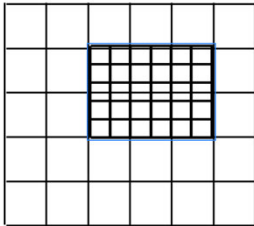
高解像度化(グリッド格子を細かく)することで、陸岸の地形がより正確に表現できたり、細かい空間スケールの現象を再現することが出来るようになる反面、多くの計算時間や記憶容量が必要とされる。

## 〔基礎知識〕

水平グリッドサイズを半分にすると時間ステップも半分にする必要があるため、より計算時間がかかる。

# ネスティング(入れ子)手法

- \* モデル領域内により高解像度化したモデルを入れ子にして、計算コストの削減と高解像度化とを両立させる手法



中解像度のモデルを駆動

中解像度モデルの結果を側面の境界条件として高解像度モデルを計算



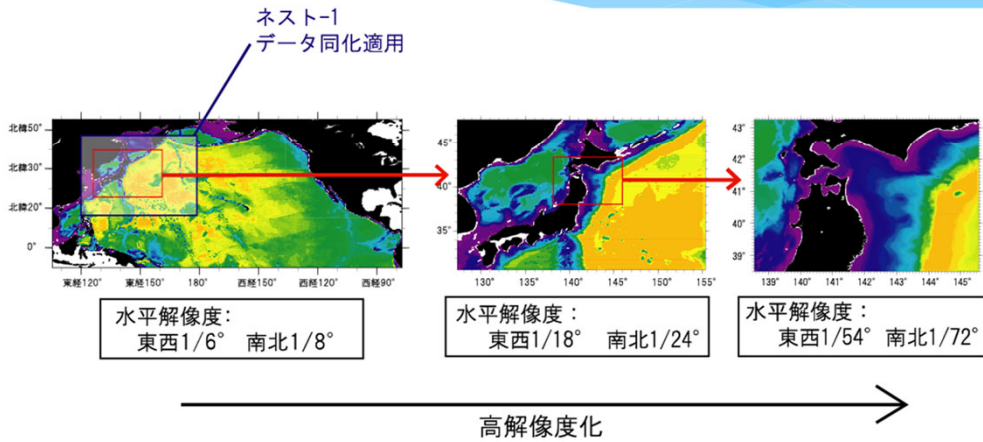
マトリョーシカ人形

## — 要点 —

ネスティング手法とは、計算資源を節約しつつ、対象とする領域を高解像度で再現する手法である。

広い領域を中解像度で計算し、その領域の中により高解像度のモデルを計算する。

# ネスティングによる領域設定

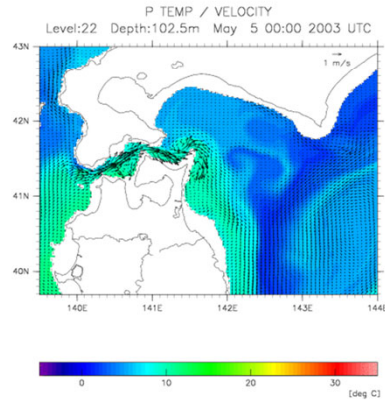


## — 要点 —

計算に用いた領域は、2段階のネスティングを用いて青森県近海域を高解像度で再現する。

# 青森県近海域の再現

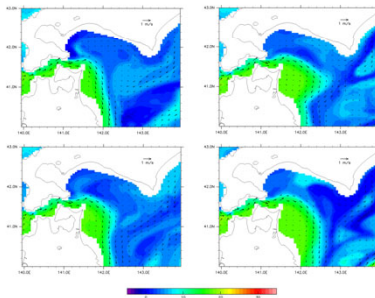
- \* 日本海側
  - \* 日本海を北上する対馬暖流
  - \* 2流路(日本沿岸沿い・沖合)
- \* 津軽海峡
  - \* 日本海から太平洋へ約1m/s
- \* 太平洋側
  - \* 津軽暖流の季節変動



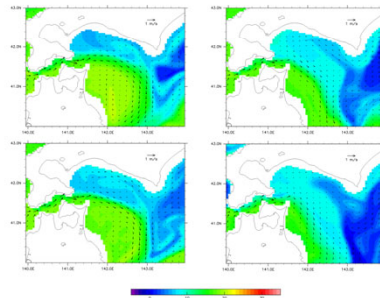
## — 要点 —

津軽暖流が日本海側を北上し、津軽海峡を通過して、太平洋の本州沿岸を南下する様子が再現されている。夏季には太平洋側で渦が形成される。

# 津軽暖流の季節変動の再現



春から夏



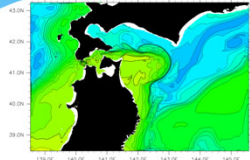
秋から冬

## — 要点 —

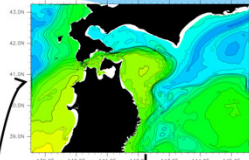
春から夏にかけての津軽暖流渦の発達と秋から冬にかけての渦の減衰が再現できている。

# 季節内変動

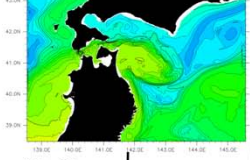
9/22



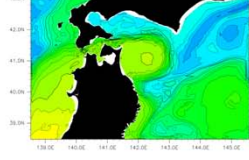
10/10



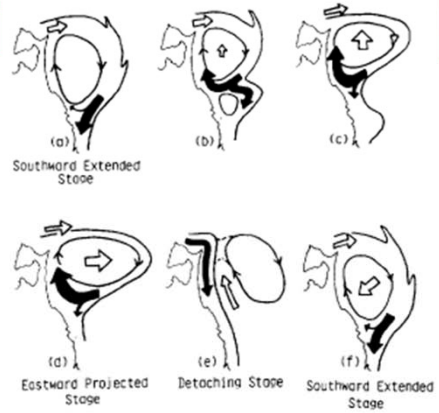
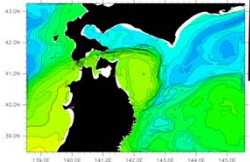
10/1



10/15



10/8



Yasuda et al.(1988)

## — 要点 —

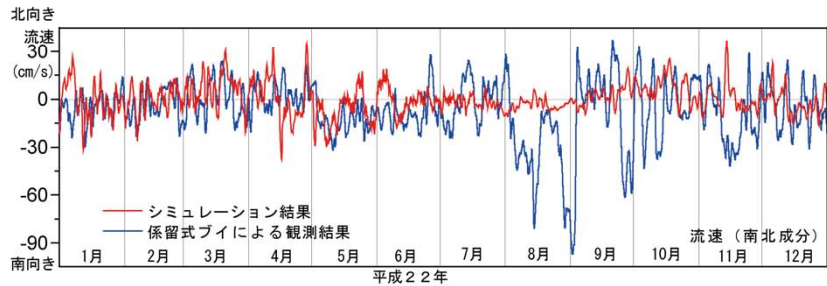
これまで観測データから推定していた、渦が東西に伸びたり、南北に長くなったりする季節内の変動が再現されている。



# 係留式ブイとの比較 (南北流)



係留式ブイ



## — 要点 —

六ヶ所村沖に設置したブイで観測された南北流速との比較を見ると、3月・4月に北向きに流れていた流れが、5月に南に流れるといった特徴が再現されている。ただし、8月に発生する強い南下流がモデルでは再現できていない点は今後の課題である。

# 現状と今後

- \* 現状:一か月程度の遅れで計算結果が出ている
- \* 数日遅れで計算出力できるよう作業中
- \* 太平洋沿岸域ではさらなる高解像度化
- \* 潮汐(潮の満ち引き)

## — 要点 —

- 現状:一か月程度の遅れで計算結果が出ている
- 数日遅れで計算出力できるよう作業中
- 太平洋沿岸域ではさらなる高解像度化
- 潮汐(潮の満ち引き)

# 謝辞

\* ここで紹介した事例の一部は、青森県からの受託事業の成果です。ここに記して感謝します。