

東北大学 大学院理学研究科 出前講座
—3・11地震と放射性物質の拡散について—
2011年5月19日(木), 18:15-20:40, フォレスト仙台第5・6会議室

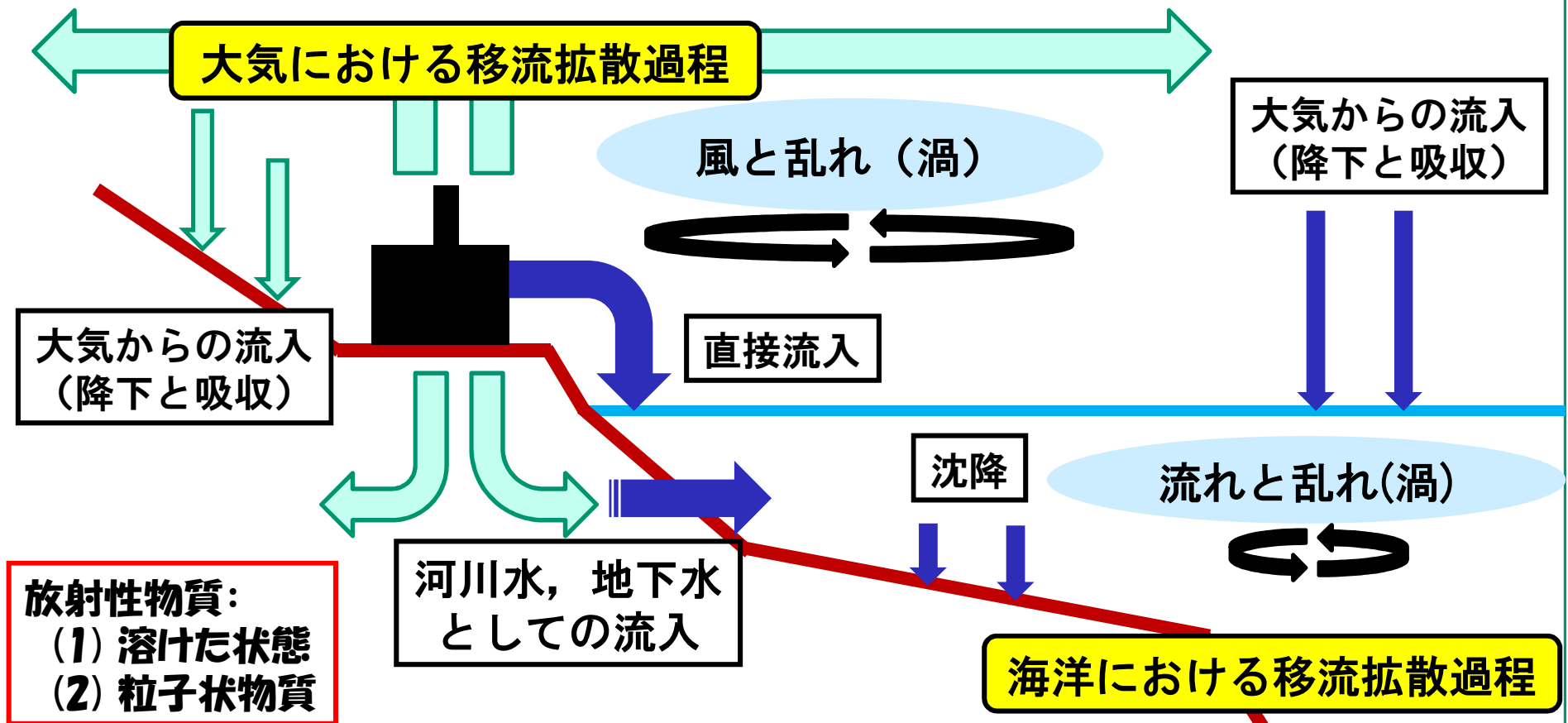
放射性物質を含んだ汚染水の 海洋における拡散

花輪 公雄

東北大学 大学院理学研究科
地球物理学専攻 地球環境物理学講座(海洋物理学分野)

福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質を含む汚染水が海洋に漏出した。本講演では、海洋における物質の移流拡散過程を概説し、これまで行われている数値モデルによる放射性物質を含んだ汚染水のシミュレーション結果を紹介する。

放射性物質の移動と拡散の模式図



海洋のシミュレーションの難しさ：

- (1) 海洋の渦の大きさは大気の渦に比べ、とても小さい。
- (2) 結果が正しいかどうかを判断するデータが、とても少ない。

海洋が放射性物質で汚染されれば・・・

- 人体への影響（漁業者，海運関係者，・・・）
- 水産物の汚染（食の安全）
- 運輸（船舶のバラスト水への心配）への影響
- 観光への不安
-

日本だけではなく、
世界中の問題！

汚染水の分布状況の把握（観測と監視）と将来予測の重要性，とりわけそれらの迅速な情報発信が必要。

新聞記事は掲載
できませんので
マスクします。

大型客船の寄港キャンセル

産経新聞 5月6日

新聞記事は掲載
できませんので
マスクします。

イカナゴ(コウナゴ)の汚染が判明

朝日新聞 4月21日

文部科学省による海水放射能濃度のモニタリング

3月下旬（23日）より開始。
船舶は海洋研究開発機構。分析は日本原子力研究開発機構。
4月のモニタリング計画：
奇数日にサンプリング，偶数日に分析・公表。

文部科学省 MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

お知らせ 政策について 白書・統計・出版物

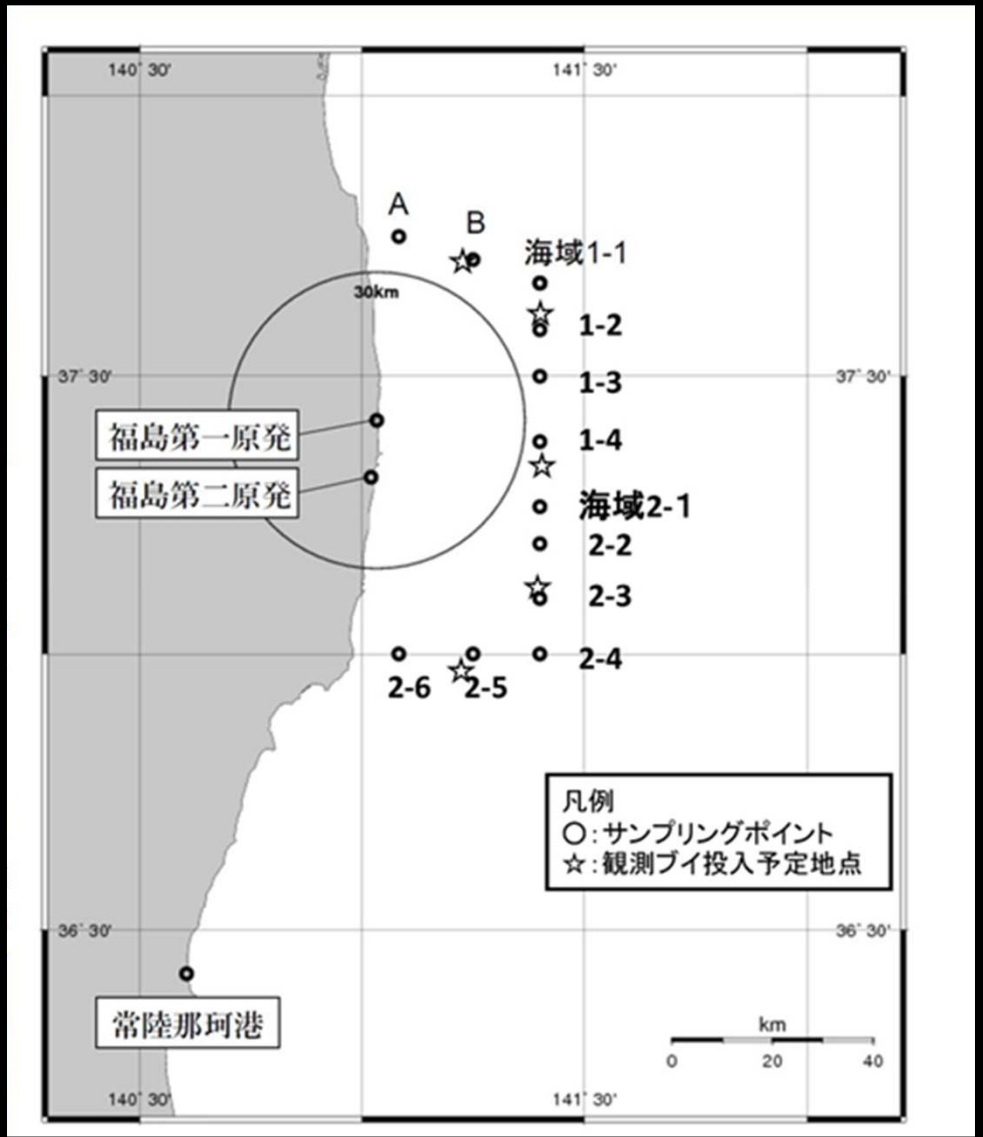
[トップ](#) > [その他](#) > [東日本大震災関連情報](#) > [福島第1原子力発電所周辺の海域モニタリング結果](#)

福島第1原子力発電所周辺の海域モニタリング結果

海水及び海上のモニタリング結果

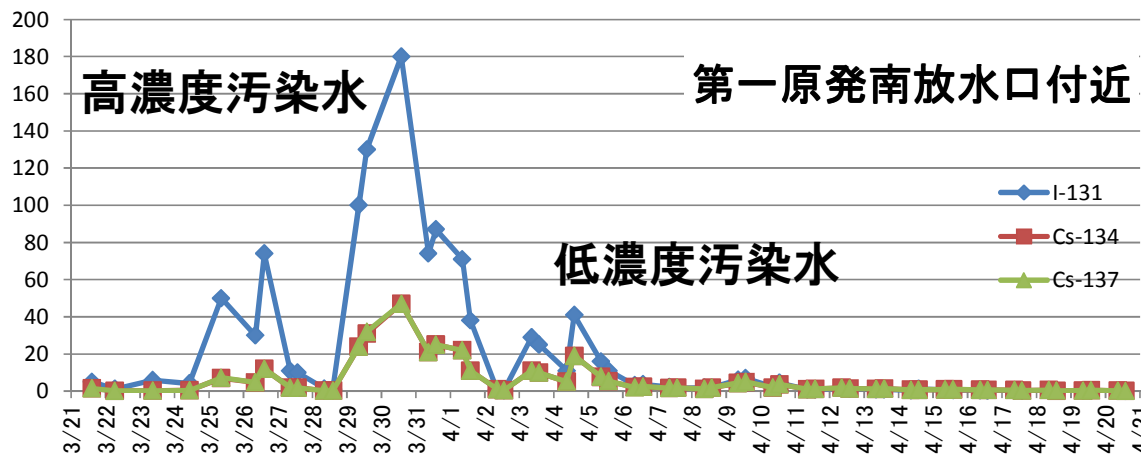
- 福島第1原子力発電所周辺の海域モニタリング結果 [平成23年5月5日]
- 福島第1原子力発電所周辺の海域モニタリング結果 [平成23年5月1日]

データは文部科学省のウェブサイトで公表



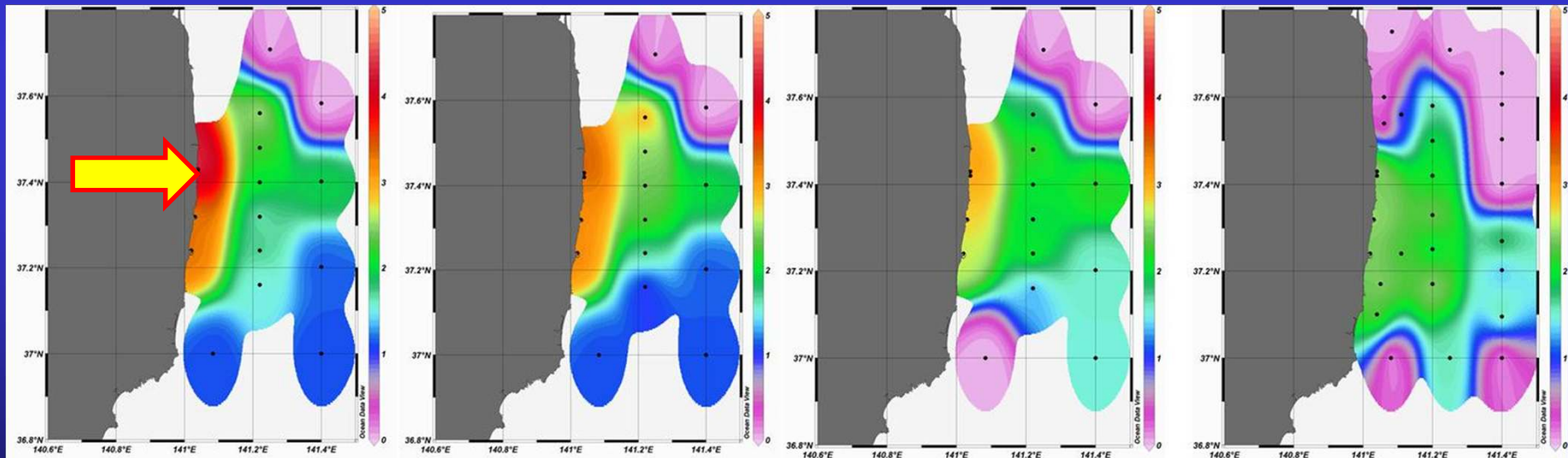
3月から4月にかけての海洋放射能汚染の監視体制（後に紹介するように，5月以降は拡大）

海水の放射能濃度のモニタリング結果(4月中旬まで)



東京電力のデータによる。
縦軸はBq/ml. 最大値
はヨウ素131の最大値は
3月31日の180Bq/ml
=>180,000Bq/l.

低濃度汚染水は意図的放出。
高濃度汚染水は？



沖合観測によるヨウ素131の表面における濃度分布. $\text{Log}(131\text{I})$ (Bq/l). 左から4月7, 11, 14, 17-19日の分布. 文部科学省公表データより石丸教授(東京海洋大学)作図. ドットは観測点の位置. 極めてまばらな観測点であることに注意.

海洋における物質の移流拡散過程 その1

移流 (advection):

流れによって、物質がある場所から別の場所へと移動すること。

拡散 (diffusion):

集合していた物質が、時間とともに散らばっていくこと。

混合 (mixing):

異なる性質を持つ流体(気体と液体の総称)が、時間とともに混じり合い、均質化していくこと。

(混在して用いることが多い。放射性物質は海洋中では自らは動かない(受動的:passive)ので、海水の動きに従って移動するとみてよい。)

分子拡散 (molecular diffusion):

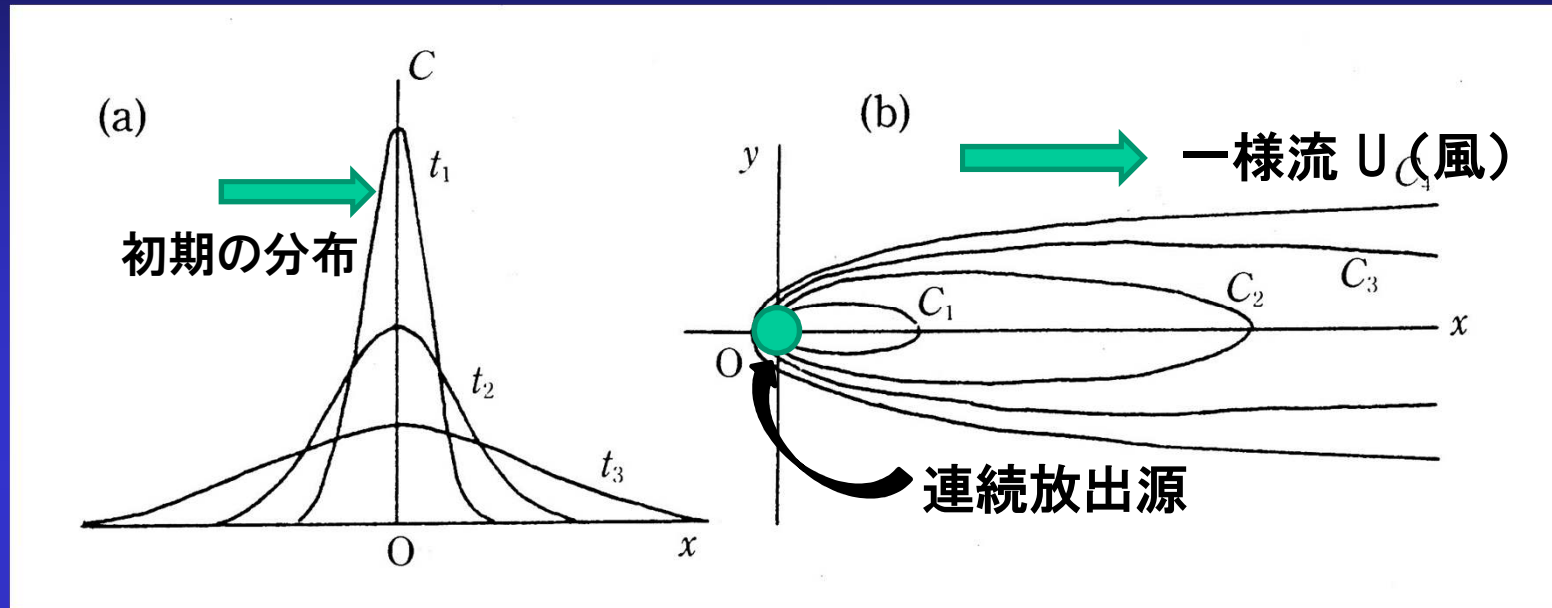
物質分子のランダムな動きによる拡散のこと。

乱流拡散 (turbulent diffusion):

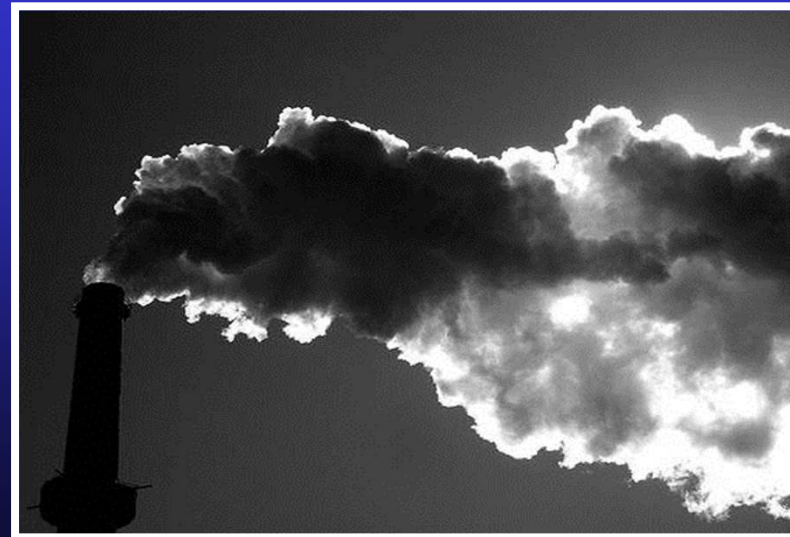
自然界には必ず乱れ(turbulence)が存在し、その乱れが拡散を実質的に担っている。したがって、分子拡散は無視でき、乱流拡散が支配的。乱れの実態は、大小さまざまな渦。どの大きさの渦がどの程度卓越しているかが問題。

海洋における物質の移流拡散過程 その2

移流拡散過程のイメージ



By Senor Codo
(原版を左右反転)

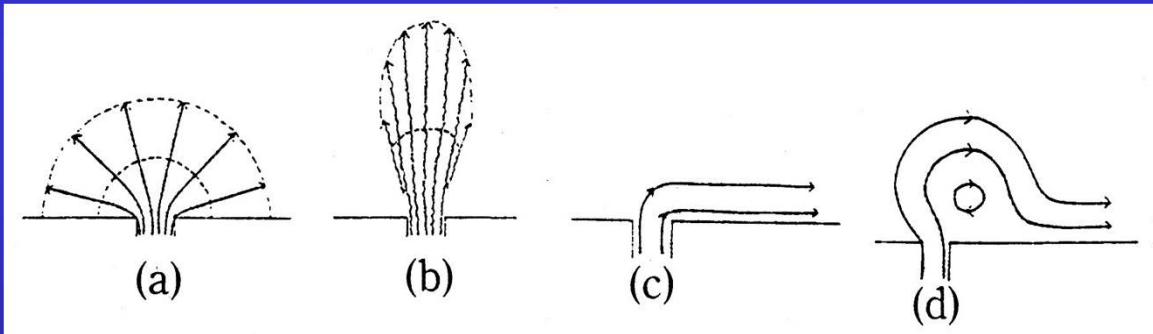


河川水や温排水の海洋への流出

図の出典は宇野木著
「沿岸の海洋物理学」
(1993年, 東海大学出版会)

二つのポイント

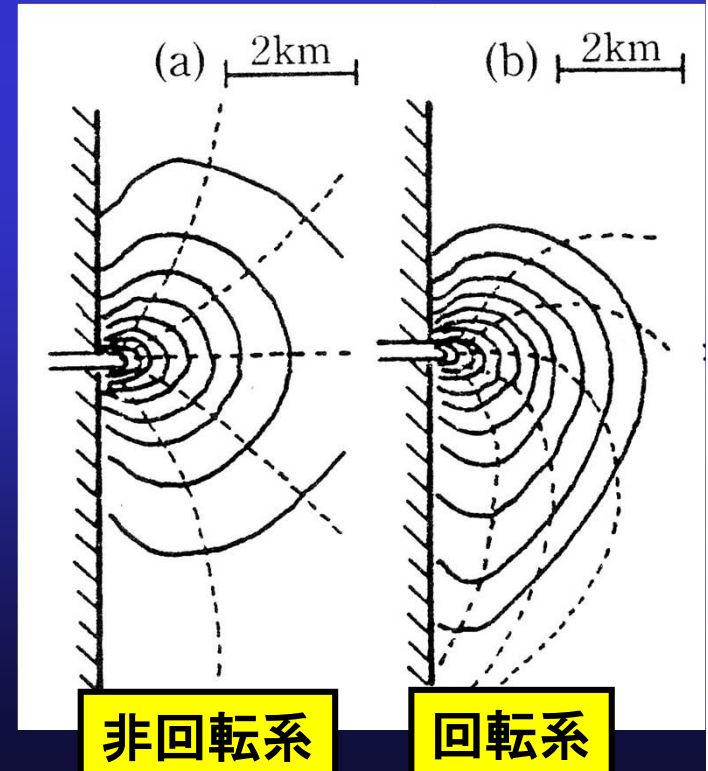
- 1) 海水に比べ、軽い水の流出であるから、
流出水は一定期間、沈むことなく海水の上に乗って流れる。
- 2) 数日以上の時間の長さを考えると、
=> 地球の回転（自転）の効果を組み入れることが必要である。
=> コリオリ力（または、転向力ともいう）の導入。
=> 運動するものには、右向き（見かけの）力を受ける（右に曲がる）。



河川水の広がりの幾つかのタイプ

- a: 流量少（小さなスケール）、流速小 b: 流量少、流速大
c: 流量大（大きなスケール）、流速小 d: 流量大、流速大

毎秒 80m^3 の河川水を流出させたときの
48時間後の広がり. 数値モデルの結果.



風による吹送流, 潮流, 沿岸補足波の効果

沿岸域の表層水の運動に及ぼすさまざまな効果 (多くのプロセスが関与)

1. 風による吹送流 (wind drift) の効果

風は海面に応力を作用し, 吹送流を作る. ごく表層の流れで, 地球の回転の効果が効く場合, 「エクマン」流となる. エクマン流は, 風の応力の右手直角方向に流れる.

⇒ 鉛直分解能の高い数値モデルであれば, 表現 (再現) 可能

2. 潮流 (tidal current) の効果

潮汐 (海面の昇降) に伴う流れで, 周期半日 (12時間程度) の潮流が卓越している. その流速は数十 cm/s. 振動流であるが, この流れにより, 海水は数 km 程度, 海岸に沿って動かされる.

⇒ 通常は潮汐を含まないモデルが多い. 入れることは可能.

3. 沿岸捕捉波 (coastally trapped wave) の効果

沿岸域には高気圧や低気圧の強制によって形成されるケルビン波や地形性ロスビー波など, 周期が数日程度の波が存在する. 潮汐と同じく, 振動流であるが海水は数 km から数十 km, 海岸に沿って動かされる.

⇒ 海岸地形, 海底地形を適切に入れば, 表現 (再現) 可能.

注:

2や3は, 沿岸域で卓越する効果. 今回の問題にしている件では, 適切に表現する必要がある. 後に示す JCOPE2 に潮流は入っていないが, SIROCCO には入っている.

数値モデルによる汚染物質・汚染水の拡散予測

1. 用いる数値モデルの準備

運動方程式（ナビエー・ストークス方程式）

水温・塩分（海水の密度）の支配方程式（水温・塩分の保存式）

汚染物質・汚染水の支配方程式

（ソース・シンク項を入れた移流拡散方程式）

2. 初期条件・境界条件の準備

流れ，水温と塩分，汚染（固形）物質・汚染水の初期の値を指定
領域を区切っているモデルの場合，境界での値を指定

3. 大気の強制（風の応力と熱・水のフラックス）の場の準備

<過去再現実験（hindcast）>

過去の変動を再現する実験。流れや水温，塩分の観測資料をモデルに入れて行うこともある（この場合，データ同化実験とも呼ぶ）。

<将来予測実験（forecast）>

将来の強制場（大気からの強制力など）を仮定して行う実験。

海洋の流れのイメージ:水温と塩分の変動から

フランスの数値モデルSIROCCOに用いられた水温と塩分の時間変動

http://sirocco.omp.obs-mip.fr/outils/Symphonie/Produits/Japan/SymphoniePreviJapan.htm#Tra1S_field

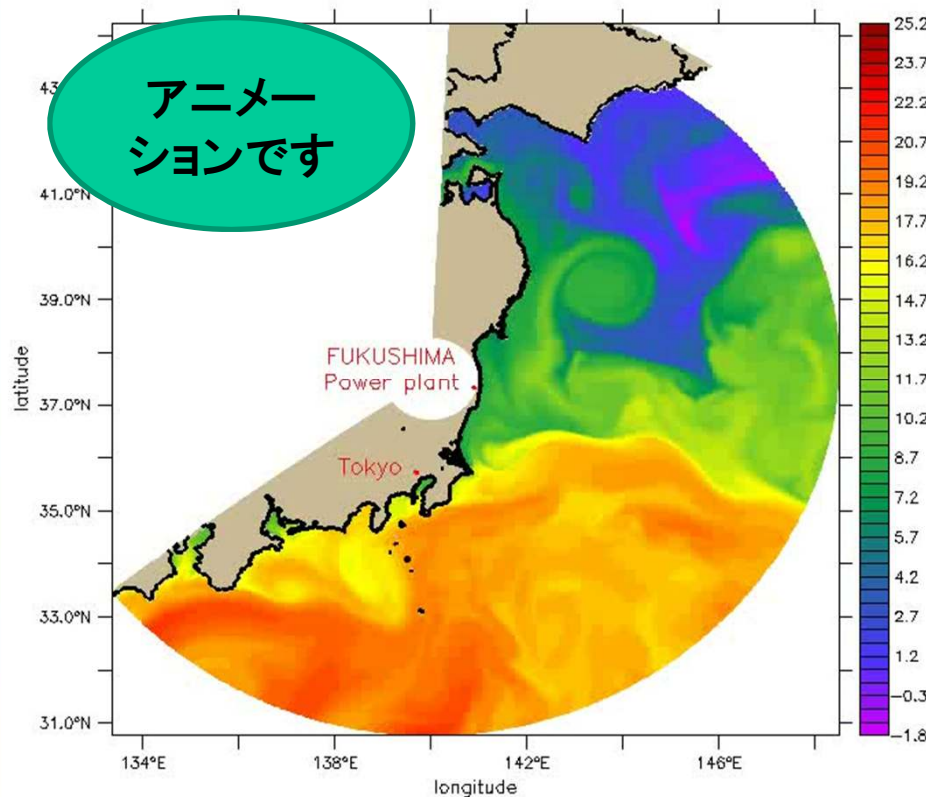
海面水温分布

3月9日から5月7日まで

海面塩分分布

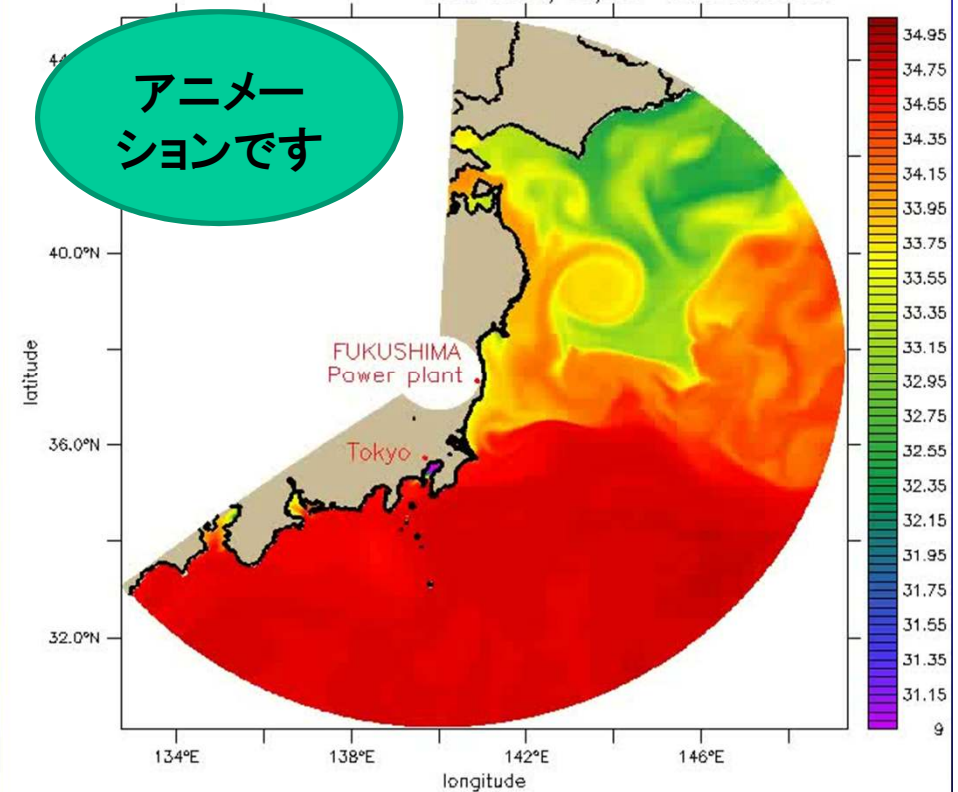
SIROCCO/OMP - Toulouse University - CNRS

Date 2011/03/09 Time 22:30:24



Temperature (deg C)

Date 2011/03/09 Time 22:30:24



sea water salinity (psu)

文部科学省による海域における放射能濃度のシミュレーション

http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afieldfile/2011/04/29/1304939_0429.pdf

文部科学省
MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

お知らせ 政策について 白書・統計・出版物 申請・手続き

[トップ](#) > [その他](#) > [東日本大震災関連情報](#) > [海域における放射能濃度のシミュレーション](#)

● 海域における放射能濃度のシミュレーション

[海域における放射能濃度のシミュレーション \(第四報\) \(平成23年5月9日\) \(PDF:578KB\)](#)

海域における放射能濃度のシミュレーションについて (第四報)

平成23年5月9日
文部科学省

1. 概要

文部科学省は、平成23年3月23日より福島第一原子力発電所沖合の海域におけるモニタリングを実施している。今般、数値海況予測システム JCOPE2 (注) による福島第一原子力発電所沖合における放射能濃度分布のシミュレーションを行った。

本シミュレーションは、5月3日時点の JCOPE2 における流速場をもとに、文部科学省及び東京電力(株)が発表した5月4日までの海水表層の放射能濃度の実測値を反映して、5月6日に海洋研究開発機構のスーパーコンピュータシステムで計算したものである。

(注) JCOPE2: 日本近海の水温や塩分変動とともに、海況に大きく影響する黒潮や親潮などの海流系について、蛇行のような流路変動や中規模渦の挙動等を予測するモデル。独立行政法人海洋研究開発機構が開発した。(再現メッシュは8 km × 8 km)

数値シミュレーションを行う際の仮定

計算条件について

計算に必要な情報がすべて得られているわけではないので、何らかの仮定を行う必要がある。

2. 方法

本シミュレーションでは、発電所から排出された放射性物質の量に関する情報が不十分なため、以下のシナリオ及び仮定を置いて海表面のみの拡散を計算した。

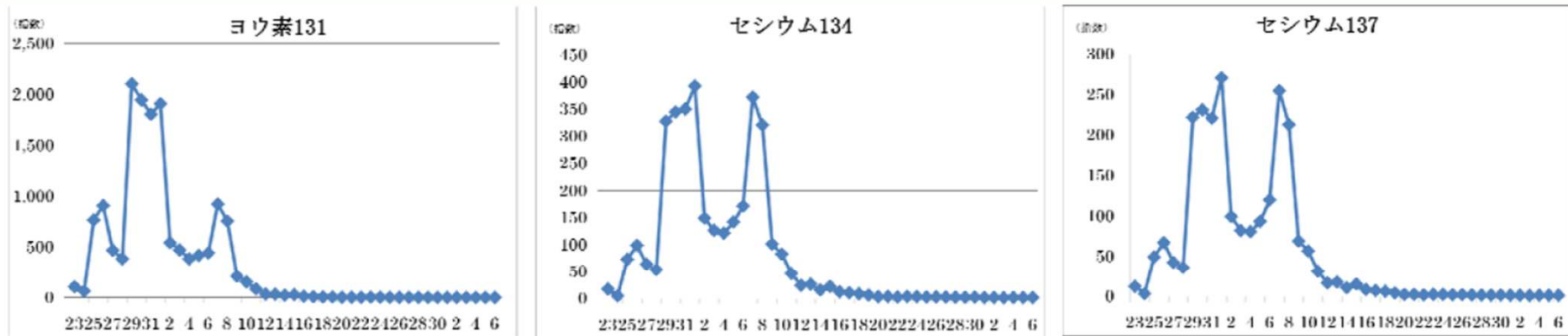
- 東京電力（株）が公表している4月22日までの海岸の海水放射能濃度をもとに保守的な想定シナリオを作成。【図1】
- 上記の海水放射能濃度が、8 km四方に、海岸の1/100の濃度で海表面のみに拡散するものと保守的に仮定。
- 放射性物質の濃度は、原子力施設の排水濃度限度の何倍であるかを指数表示する。
- 発電所から大気中に放出された放射性物質の海面への降下は考慮しない。
- 海水中の下層への拡散は考慮しない。
- 福島第一原子力発電所の放水口付近の水について、4月22日時点と同じ放射能濃度の水が4月24日まで存在していると仮定（4月25日以降については、新たな放射性物質を含む水の排出は0（ゼロ））。
- 半減期（ヨウ素131は約8日、セシウム134は約2年、セシウム137は約30年）は考慮する。

- (注) ○ 格子間隔は8kmであるので、8kmより小さなスケールの変化は表現できない。
○ 水平、鉛直にも拡散は起こるが、ここでは水平のみと仮定。
○ 大気で洋上に運ばれて海洋に降下する放射性物質もあるはずであるが、無視する。

数値シミュレーションに用いた汚染水の放出シナリオ

汚染水の放出条件について

現在のところ正確な情報はないのでシナリオを想定.



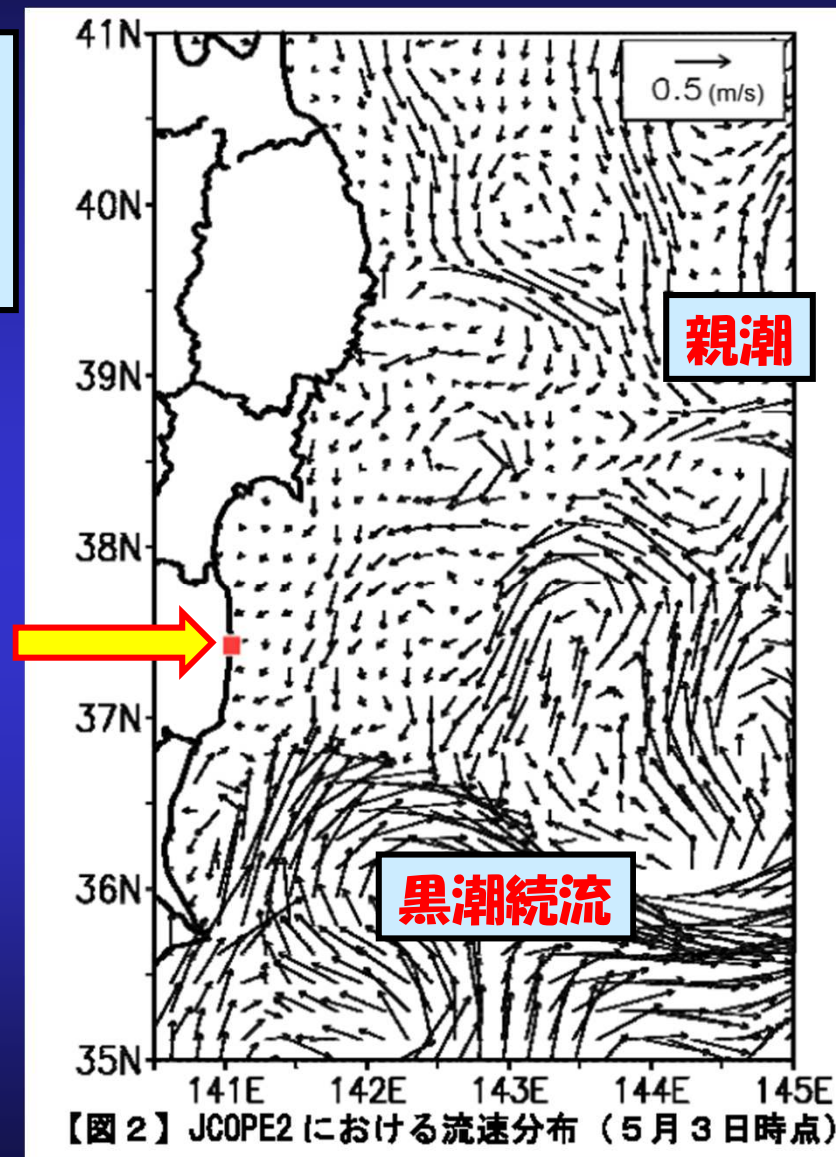
【図1】福島第一原子力発電所から排出される水の放射能濃度に関する想定シナリオ

東京電力発表の「海水核種分析結果」(3月21日～5月4日)から8km四方に海岸の1/100の濃度で表層において拡散するものと想定し、福島第一原子力発電所の放水口付近の水について、5月4日時点と同じ放射能濃度の水が5月6日まで存在していると仮定したシナリオ。なお、縦軸は想定される放射能濃度を、原子力施設の排水濃度限度の何倍であるかを示した指数で表している。

注: 3月25日や30日付近のピークは、高濃度汚染水の流出。4月6日ごろのピークは低濃度汚染水の意図的放出。

数値シミュレーションに用いた流速場と風の間

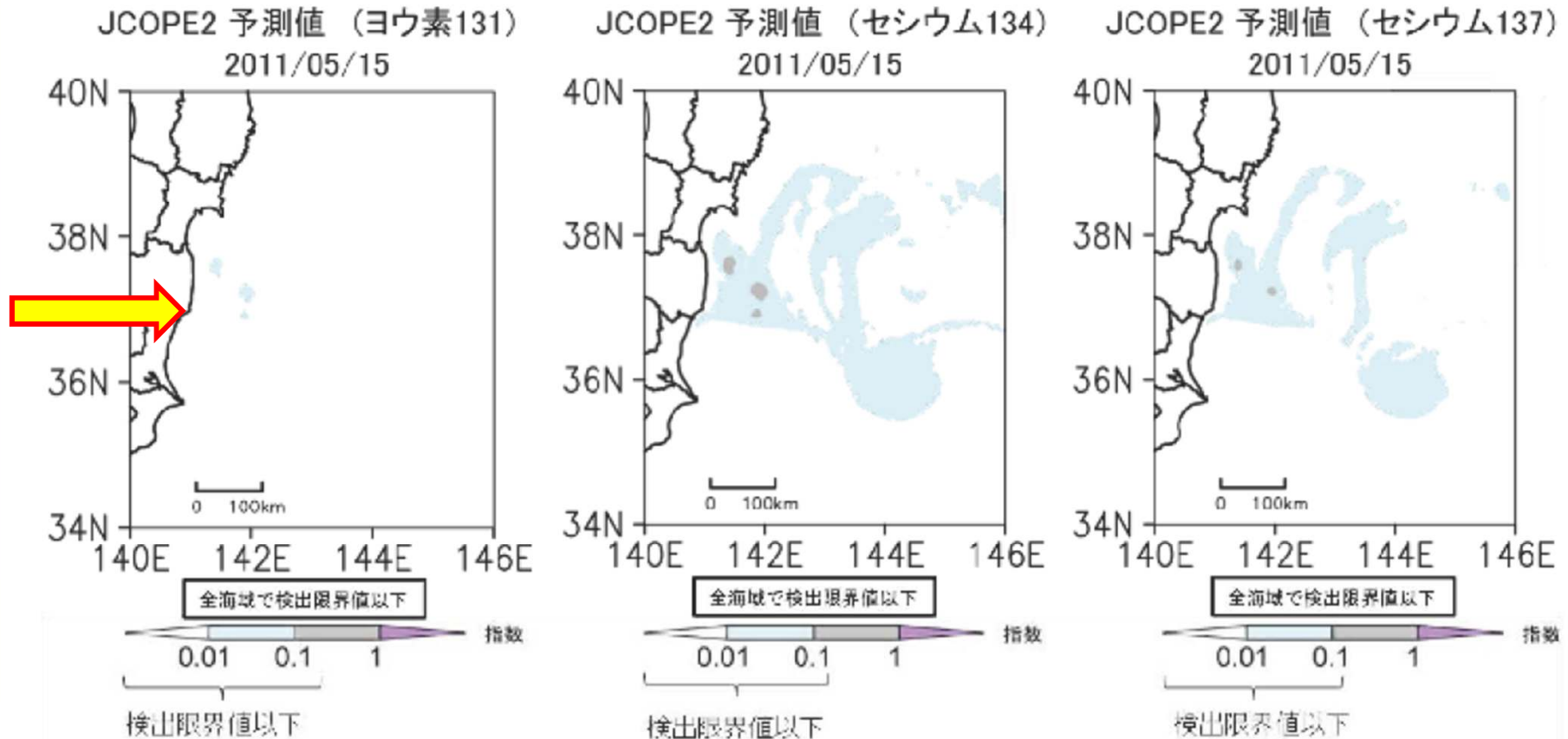
流速場:5月3日まで観測データも考慮.
3日以降は3日の流速場を固定.
風の間:5月3日まで観測データも考慮.
3日以降は3日時点の予測値.



5月3日の海面流速分布

J-COPE2による数値シミュレーション結果

【図3-1】 JCOPE2による放射能濃度分布のシミュレーション—5月15日—
(5月3日までのデータに基づくシミュレーション)

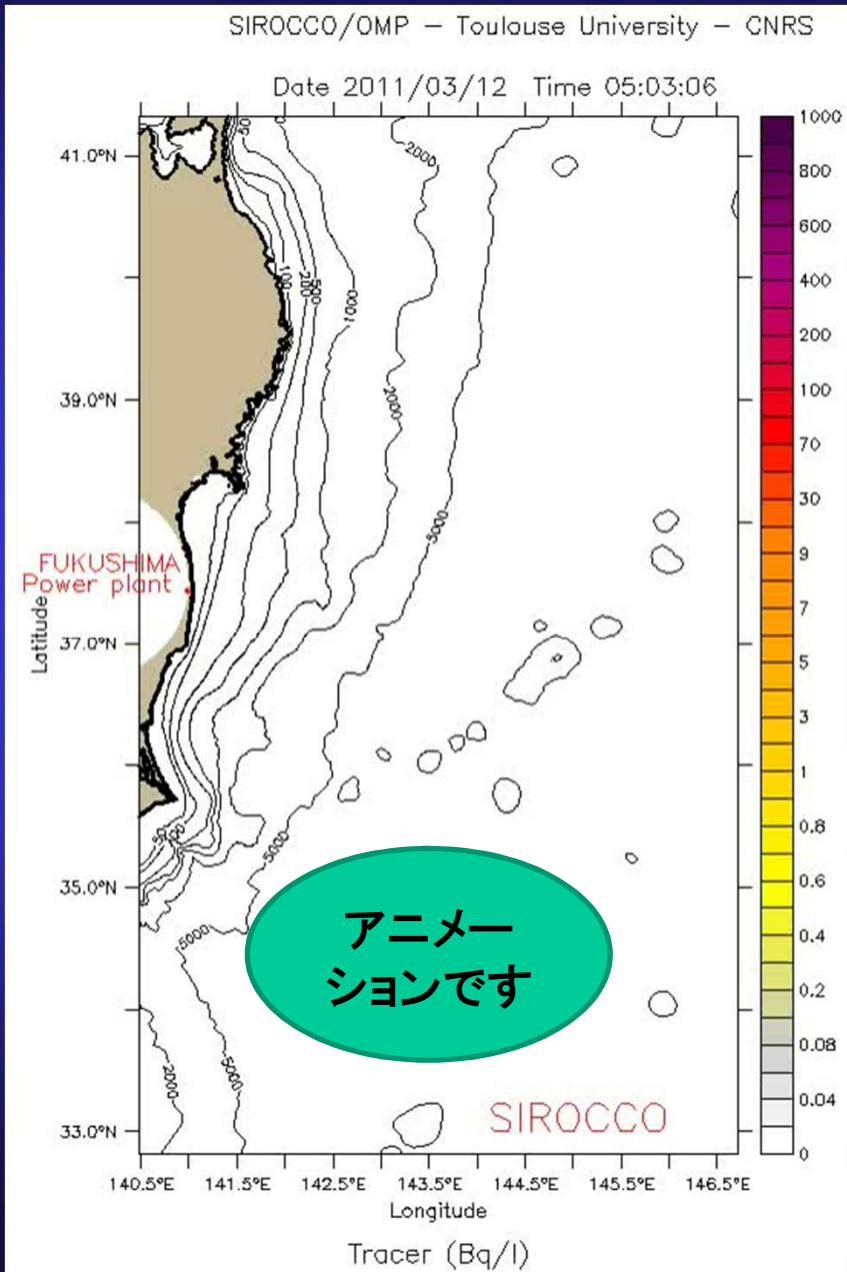


〈注：上図の指数は原子力施設の排水濃度限度（ヨウ素131は40Bq/L、セシウム134は60Bq/L、セシウム137は90Bq/L）の何倍かを示したもの〉

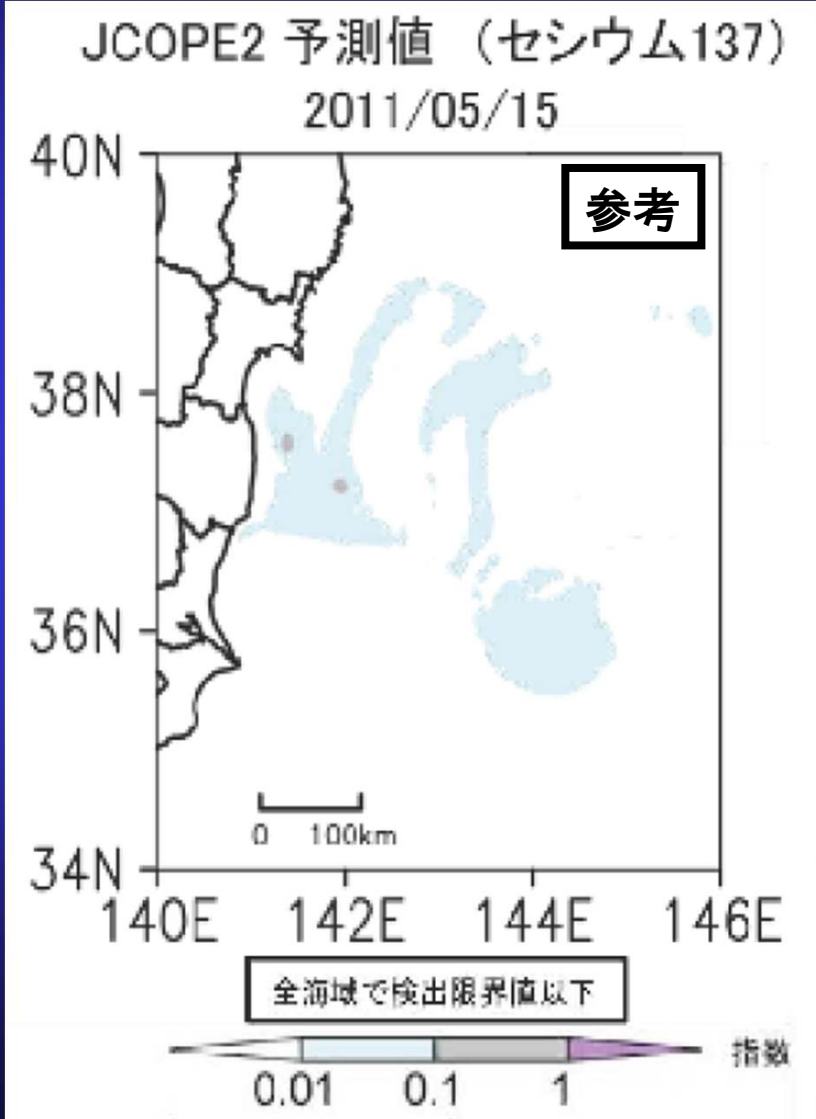
半減期が8日と短いため、
濃度は急激に減少。

原子力発電所周辺の海域モニタリングの検出限界値は約10Bq/Lとなっている。5月6日に文部科学省と水産庁「原子力発電所からの放射性物質の海洋環境への影響調査報告書」に基づくモニタリングでは、より検出限界値を下げて分析する予定。

フランスのトゥルーズ大学の数値モデル SIROCCO の結果(4月10日現在)



3月12日から5月9日まで



モデル結果の検証, より正確な再現, そして将来予測のために

モデル結果がどの程度正しいのかを評価する(validation)必要がある.

現在のところ, 検証のための実測データが不十分(との認識).

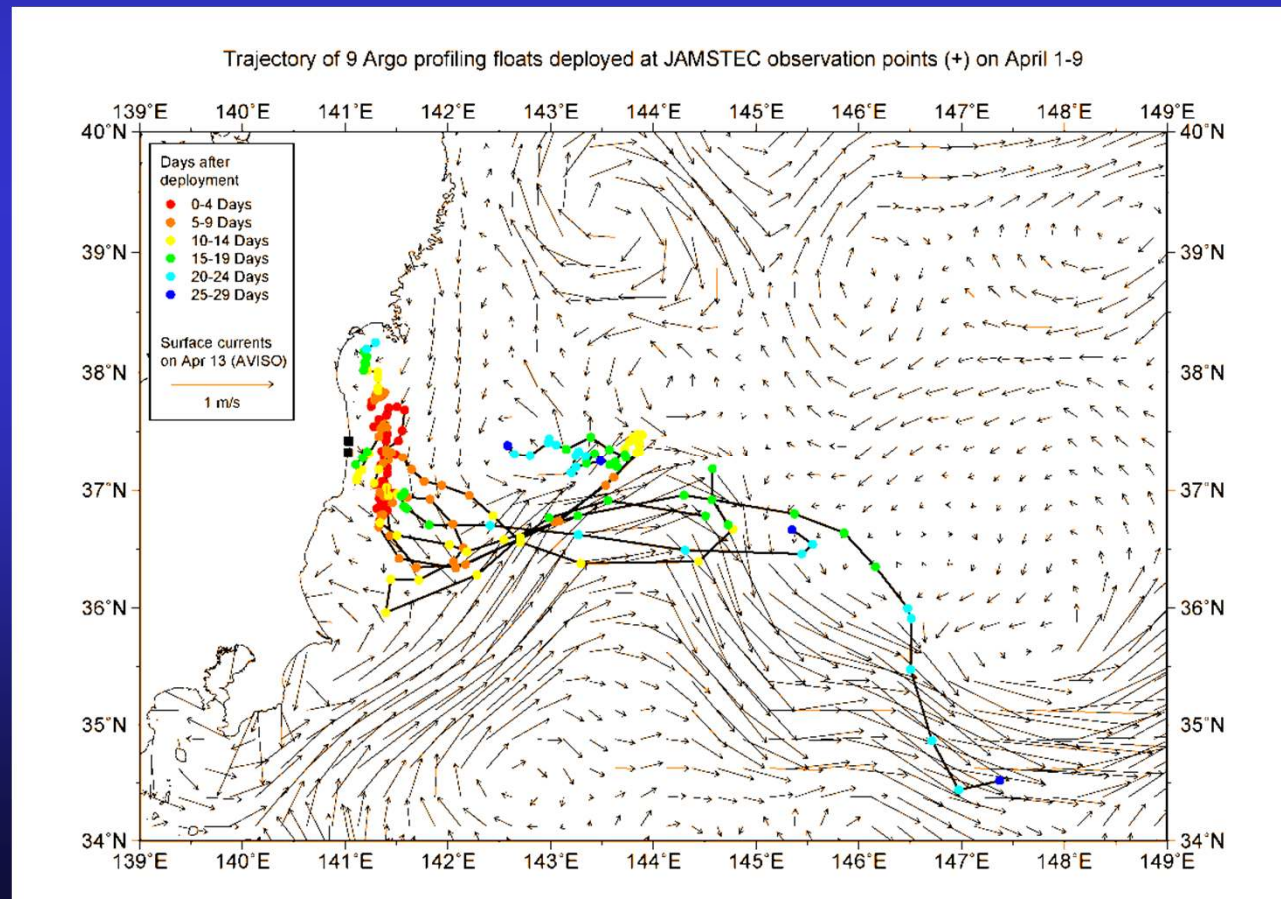
⇒観測, 監視の強化へ

ソース項(いつ, どの程度放出されたか)に関する情報がまったく不十分(との認識).

⇒東京電力は取得しているすべてのデータの開示へ

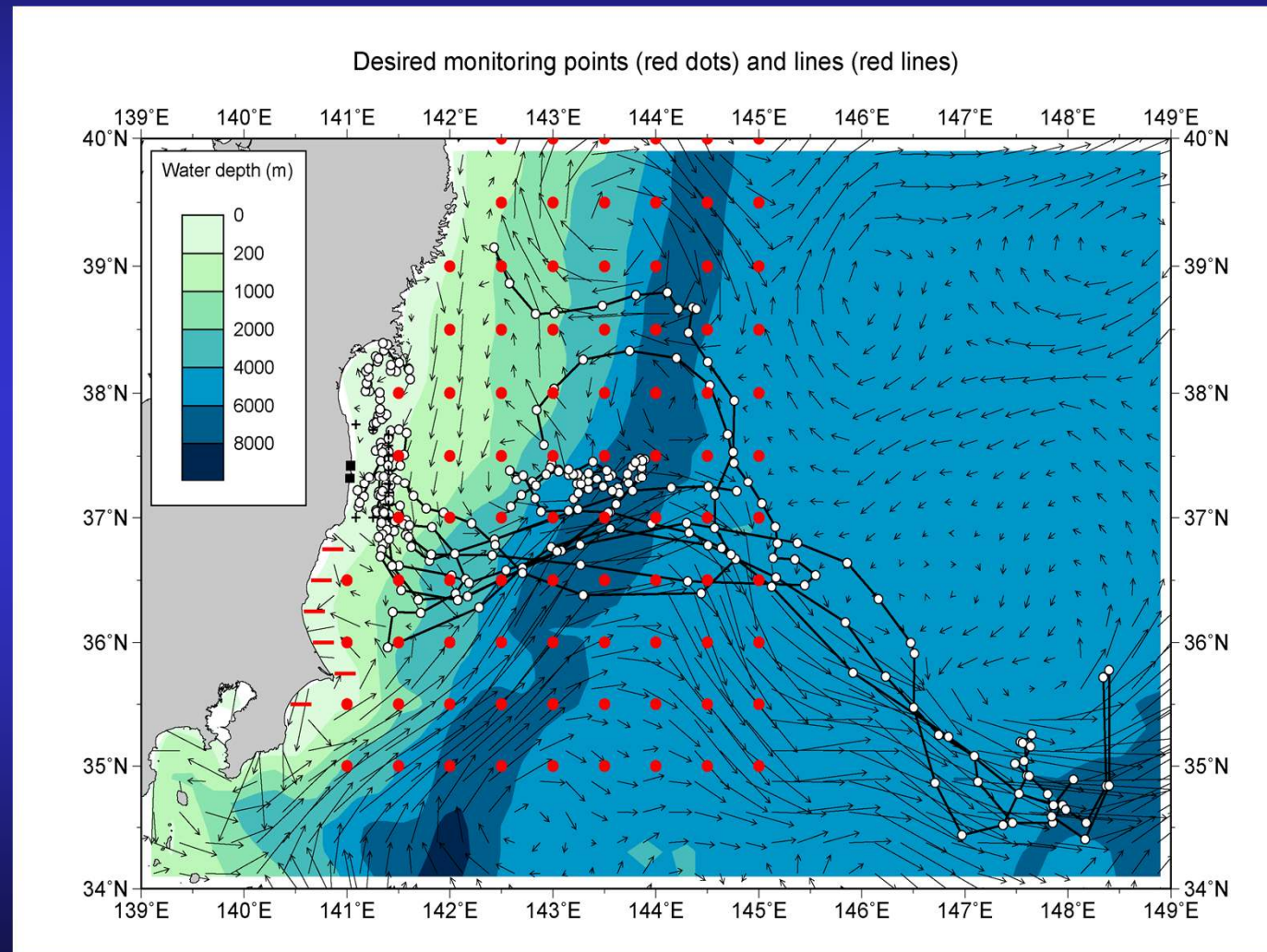
表層150m以浅を漂流する ブイ(Argo float)の軌跡

9台のブイを4月上旬に投入. 図はその軌跡. 色は経過時間を示す. 多くのブイは投入後南下し, 黒潮主流に乗り, 東進している. 岡准教授(東大大気海洋研)作図. ブイは海洋研究開発機構が展開.



放射性物質を含む水（汚染水）が流出したことに対する日本海洋学会の動き

「震災対応ワーキンググループ」の設置. 観測, 分析, モデリング, 生態系, 広報・アウトリーチ活動などのサブグループ. 今後, 提言, 企画調整等を行う予定.

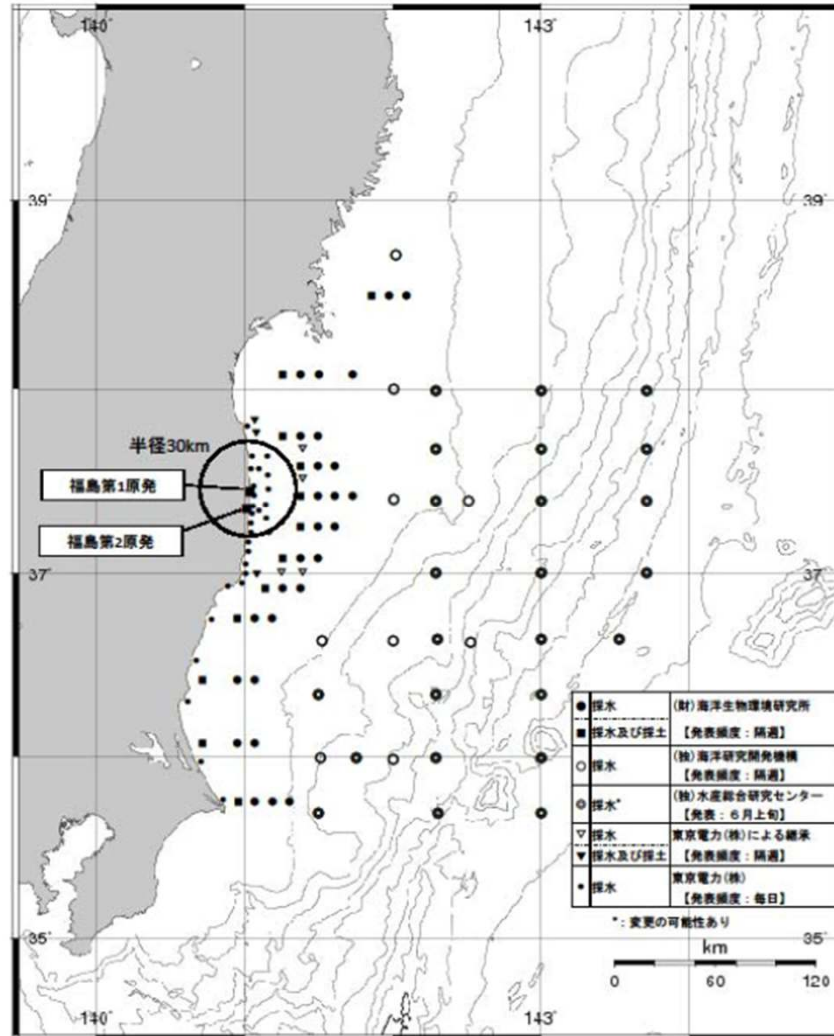


観測サブグループが提案する広域観測点の案（赤い点と赤い線）

文部科学省・水産庁による広域モニタリングの開始

5月から7月までの
観測・監視計画

海域モニタリング広域化の全体像



の広域化について

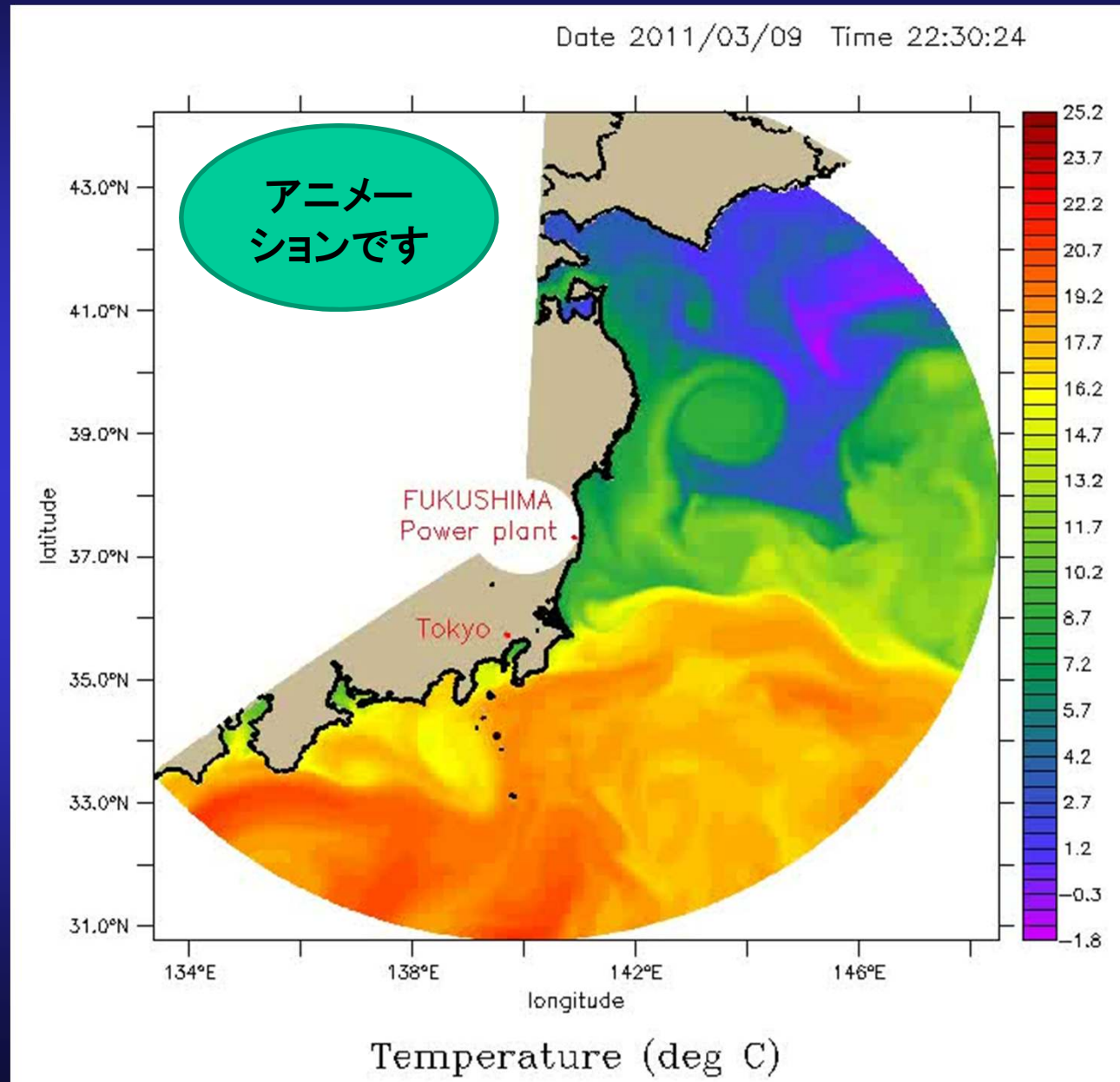
及び水深30m以浅の沿岸については東京電力(株)30m以浅の沿岸を除く)や茨城県沖について、独立船舶による採水を行ってきた。他方、海域における広域的な海域モニタリングの実施が求められる。の間、以下のとおり海域モニタリングの広域化を

平成23年5月6日
文部科学省
水産庁

墨流し



SIROCCOに用いられた海面水温分布の時間変動



まだまだ予断ならない事態が進行中では・・・

- 放射性物質を含む汚染水の漏えいが続いている・・・
- イカナゴ(コウナゴ)以外の水産物からも放射性物質が検出された・・・

新聞記事は掲載
できませんので
マスクします。

朝日新聞 5月13日

新聞記事は掲載
できませんので
マスクします。

毎日新聞 5月15日

新聞記事は掲載
できませんので
マスクします。

毎日新聞 5月12日

水産物汚染に関する水産庁の取り組み

1/5

各都道府県等における水産物放射性物質検査結果(時系列版)

2011/5/17

(注) 暫定規制値(魚介類、海藻) 放射性セシウム: 500ベクレル/kg 放射性ヨウ素: 2,000ベクレル/kg

No	魚種等	都道府県名等	採取地	公表日	検査結果		分析機関名
					セシウム (単位:ベクレル/kg)	ヨウ素131	
1	キンメダイ	千葉県	銚子沖	3月24日	検出限界未満	検出限界未満	(独)水産総合研究センター
2	マサバ	千葉県	銚子沖	3月25日	検出限界未満	3.6	(独)水産総合研究センター
3	ヤリイカ	千葉県	銚子沖	3月25日	検出限界未満	5.6	(独)水産総合研究センター
4	ヒラメ	千葉県	銚子沖	3月25日	検出限界未満	2.5	(独)水産総合研究センター
5	カタクチイワシ	千葉県	銚子沖	3月25日	3	28	(独)水産総合研究センター
6	ブリ	千葉県	鴨川沖	3月28日	検出限界未満	6.4	(独)水産総合研究センター
7	スズキ	千葉県	東京内湾	3月28日	検出限界未満	5.9	(独)水産総合研究センター
8	チョウセンハマグリ	千葉県	九十九里浜地先	3月28日	検出限界未満	29	(独)水産総合研究センター
9	ナマコ	神奈川県	八景島周辺	3月29日	検出限界未満	33	(独)水産総合研究センター
10	ゴマサバ	神奈川県	小田原市地先	3月29日	検出限界未満	検出限界未満	(独)水産総合研究センター
11	カタクチイワシ	神奈川県	小田原市地先	3月29日	検出限界未満	検出限界未満	(独)水産総合研究センター
12	マイワシ	千葉県	銚子沖	3月30日	検出限界未満	16	(独)水産総合研究センター
13	アサリ(大)	千葉県	東京内湾	3月31日	4.1	69	(独)水産総合研究センター
14	アサリ(小)	千葉県	東京内湾	3月31日	8.1	103	(独)水産総合研究センター
15	マアジ	千葉県	鴨川沖	3月31日	検出限界未満	検出限界未満	(独)水産総合研究センター
16	コイ	福島県	郡山市逢瀬町	4月1日	検出限界未満	6.3	(財)日本分析センター
17	イワナ	福島県	西郷村	4月1日	検出限界未満	13	(財)日本分析センター
18	キンメダイ	東京都	伊豆大島波浮沖	4月1日	検出限界未満	検出限界未満	(独)水産総合研究センター
19	カタクチイワシ	茨城県	大洗町沖	4月2日	30	130	茨城県環境放射線監視センター
20	イカナゴ(コウナゴ)	茨城県	大洗町沖	4月2日	66	1900	茨城県環境放射線監視センター
21	鹿島灘ハマグリ	茨城県	鹿島市沖	4月2日	19	30	茨城県環境放射線監視センター

2,000Bq/kgとしたところで。

[海流図はこちら \(PDF: 84KB\)](#)

http://www.jfa.maff.go.jp/j/kakou/Q_A/

海洋に流出した物質(流木など)の移動

ハワイ大学太平洋研究センターの数値シミュレーション

http://iprc.soest.hawaii.edu/users/nikolai/2011/Pacific_Islands/Simulation_of_Debris_from_March_11_2011_Japan_tsunami.gif

