福島前面海域における放射性汚染水の濃度解析

CONCENTRATION ANALYSIS OF RADIOACTIVE CONTAMINATION WATER IN THE PACIFIC IN FRONT OF FUKUSHIMA

中村 倫明¹・落合 実²・鷲見 浩一³・和田 明⁴
Tomoaki NAKAMURA, Minoru OCHIAI, Hirokazu Sumi and Akira WADA

¹正会員 博（工） 日本大学助手 生産工学部土木工学科（〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1）

²正会員 博（工） 日本大学教授 生産工学部土木工学科（〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1）

³正会員 博（工） 日本大学准教授 生産工学部土木工学科（〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1）

⁴正会員 工博 日本大学名誉教授 大学院総合科学研究科（〒102-0076 東京都千代田区五番町12-5）

Object of this study is to predict distribution of radioactive contamination water in front of Fukushima by means of a 3-dimensional flow model linked with a diffusion model, released by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. It was confirmed that radionuclides(Cs-137,Sr-90,H-3) distributions in coastal areas can be predicted by means of nesting from the whole Pacific Ocean model. Results were compared to the published observation data in order to examine applicability of the used models.

As a result, the impossibility of the influence humanities was suggested to be with in front of Fukushima.

Key Words : Fukushima Daiichi Power Plant, Concentration Analysis, Numerical Model

1. はじめに

平成23年3月に発生した東日本大震災に伴い、東京電力(株)福島第一原子力発電所（以下、福島第一原発）から放出される放射性物質が環境へ与える影響について、3年経った現在でも十分な影響評価がなされておらず、避難住民や帰宅する住民に不安が広がっている。特に、海洋へ放出された放射性物質は、海洋生物や海底生物に蓄積され、やがて人へも影響が及ぶことから、地場産業でもある漁業への影響が懸念されている。そこで、海洋環境中のモニタリングとして、平成24年3月30日から文部科学省・水産庁・国土交通省・海上保安庁・気象庁・環境省・福島県・東京電力株式会社を中心に「福島沖海水及び海底土の平成24年度海域モニタリング調査方針（改定版）」に従って、海水及び海底土のサンプリングが行われている。しかしながら、福島第一原発の前面海域は、太平洋に面しており広大な場所での調査となることから、3次元的な拡散状況の把握や、より広域における濃度状況の把握や今後の中・長期的な予測については困難な状況にある。

海域中の放射性物質は、溶存態物質と懸濁態物質に大別され溶存態物質は移流・拡散効果により希釈しながら

広がっていく。懸濁態物質は移流しながら、吸着した粒子と共に下層へと沈降する。海域における物質の拡散計算はこれまでに多く実施されてきた。しかしながら、放射性物質は核種の種類によっても移行に違いが生じることがあることなどから、多くの知見は存在していない。東日本大震災後の放射性物質の拡散予測について、津旨¹⁾は沿岸海洋モデル(ROMS)を利用し福島沖を中心とした日本近海の解析を、松浦²⁾はHybrid box modelによる福島沖の解析を、Honda et al.³⁾は全球モデルによる解析を実施している。これらは、海底への沈降または海底下の放射性物質の移行過程を十分に考慮していないため、短期間における再現を行ったに留まり、長期にわたる予測を行っていないほか、環境アセスメントとして評価を行っているものではない。

本研究では、2011年の福島第一原発における一時的な海洋への放射性物質の漏洩ではなく、継続的、かつ中長期的に評価を要する汚染水に対し、海水に放出された放射性物質が懸濁粒子に吸着し沈降する過程（スキヤベンジング⁴⁾）を考慮した数値モデルを展開し、5年後の放射性物質拡散状況の把握及び国際放射線防護委員会(ICRP)の評価手法による人への影響評価を行うことを目的とする。

2. 太平洋における数理モデルの概要

(1) 流動モデル概要及び結果

本研究は概要である福島沖に対し、福島第一原発から恒常的に発生する汚染水の中・長期的に海洋へ拡散させることに対する将来予測（環境影響評価）することを目的としており、考慮すべき流動場の時間・空間スケールは平均流モデルによる結果で良いと考えられる。

そこで本計算に用いたモデルはWada et al.⁵⁾や、Hasegawa et al.⁶⁾によって数十年における放射性物質をトレーサーとした再現性を十分に行っている太平洋全域の平均流モデルをもとに、福島前面海域の計算格子を著者ら⁶⁾が用いたネスティング手法により2km×2kmに詳細化し流動計算の適応が可能であるとした。

計算対象範囲は太平洋全域(110°E～70°W, 60°N～74°S, C-grid)とし水平解像度を2°×2°、鉛直方向の計算メッシュは第1層：0～20m、第2層：20～50m、第3層：50～100m、第4層：100～200m、第5層：200～400m、第6層：400～600m、第7層：600～800m、第8層：800～1000m、第9層：1000～1250m、第10層：1250～1500m、第11層：1500～1750m、第12層：1750～2000m、第13層：2000～2500m、第14層：2500～3500m、第15層：3500～4500m、第16層：4500～5500mの可変メッシュ区切りとした。沿岸域ではN34.0°～N40.0°, E140.0°～E148.0°の範囲の水平解像度を0.2°×0.2°とし、さらにN36.6°～N38.2°, E140.6°～E142.6°の範囲を0.02°×0.02°に細分化した。

図-1に福島前面海域（水平解像度0.02°）における水平及び鉛直の流速ベクトル図を示す。海岸近くでは地形に沿った流れとなり、流速が小さい傾向になった。また、この海域では黒潮の影響を受け東側に向く流れが強いことが分かる。この流れを用いて放射性物質の拡散解析を行い、再現性については拡散解析結果によって最終的な判断を行うこととする。

(2) 拡散計算の概要

放射性物質は海洋中の移流拡散のほか、希釈過程において核種毎に特有の崩壊が生ずるとともに、核種が海洋中の懸濁物質に吸着し沈殿除去される現象（スキャベンジング⁴⁾）の影響を受ける。これらを考慮した海洋中の放射性核種濃度拡散解析の基礎式を次式で表す。太平洋全域に対し座標系は球面座標（ λ , ϕ , r ）を採用し、 λ は経度、 ϕ は緯度、 r は鉛直上向き正とする。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + L(C) = R(A_h, A_v, C) - D(\lambda_n, C) - S(K_d, \rho_s, w_s, C) \quad (1)$$

・移流項

$$L(C) = \frac{1}{r \cos \phi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \lambda} (u C) + \frac{\partial}{\partial \phi} (v \cos \phi C) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (w r^2 C)}{\partial r} \quad (2)$$

・拡散項

$$R(A_h, A_v, C) = A_h \cdot \frac{1}{r \cos \phi} \left\{ \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial^2 C}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial C}{\partial \phi} \right) \right\} + A_v \cdot \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (3)$$

・崩壊項

$$D(\lambda_n, C) = \lambda_n \cdot C \quad (4)$$

・スキャベンジング項

$$S(K_d, \rho_s, w_s, C) = K_d \cdot \rho_s(r) \cdot w_s \cdot \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 C)}{\partial r} \quad (5)$$

ここで、 C ：放射性核種濃度（Bq/m³）、 t ：時間（s）、 A_h ：水平拡散係数（m²/s）、 A_v ：鉛直拡散係数（m²/s）、 λ_n ：放射性核種の崩壊定数（1/s）、 K_d ：放射性核種の分配係数（m³/g）、 ρ_s ：海洋中の懸濁物質の濃度（g/m³）、 w_s ：懸濁物質の沈降速度（m/s）である。

計算に用いた諸条件については表-1のとおりである。ここでは、海水中の放射性物質におけるパラメータの検討が行われた水落⁸⁾および津旨^{9), 10)}で用いられた値を参考とした。また負荷量として、原子力安全・保安院が6月6日に発表した放射性物質の放出量情報等をもとに独立行政法人日本原子力研究開発機構¹¹⁾が推定した8.45PBq（＝15PBq×0.5（大気を経由）＋（0.94＋0.0096）PBq（海洋へ直接））を、福島第一原子力発電所全面海域に全量を投入し、それ以降の放出はないものとした。

表-1 拡散計算の諸条件

項目		設定値
入力した流速		北太平洋における3次元流動結果
メッシュ	BLOCK1 2°×2°	
	BLOCK2 0.2°×0.2°	
	BLOCK3 0.02°×0.02°	
拡散係数	水平方向渦動拡散係数	1.0×10 ³ [m ² /s] ⁸⁾
	鉛直方向渦動拡散係数	1.0×10 ⁻⁴ [m ² /s] ⁸⁾
懸濁物質の濃度		表層濃度：ps(0)=0.25 (g/m ³) ^{9), 10)} 深さd(m)方向の分布：ps(d)=ps(0)×10 ^{-0.0005d} ^{9), 10)}
沈降速度	大粒子 (50μm以上, 4%) W1=100(m/day) 小粒子 (50μm以下, 96%) W2=100(m/year)	Ws=4.93×10 ⁻⁵ (m/s) ^{9), 10)}
	核種	137Cs
負荷量	放出地点	東京電力㈱福島第一原子力発電所全面海域
	放出量	8.45×10 ¹⁵
放射性物質の半減期		30年
放射性物質の分配係数		2.0×10 ⁻³ m ³ /g
海表面からのフォールアウト		考慮しない
計算制御	時間刻み	600[s]
	反復回数	367920（7年間分）

図-1 福島前面海域の流速ベクトル(表層)

(3) 解析結果及び検証

まず、流動計算結果、放射性物質の拡散計算結果の妥当性を検証するため、2011年4月に海域へ放出された放射性物質を対象とし、太平洋全域の濃度計算を行った。太平洋全域における放射性物質の観測値は少ないことから、既にコンセンサスを得ている原子力開発研究機構(LAMER)¹⁰⁾による計算結果との比較によって本計算結果の検証を行った。LAMERの流速場のメッシュは水平2度(約200 km×200 km)、鉛直15層である。図2、図3に本計算結果及びLAMERによる1年後、7年後における¹³⁷Csの濃度計算結果を示す。

図2、図3における¹³⁷Csの分布は、概ね整合がとれている。また、本計算結果での1年後の最大濃度は0.082 Bq/Lに対し、原子力開発研究機構では0.023 Bq/Lとオーダーは同レベルとなっている。一方で、太平洋全域において、本計算結果の方が東側への広がりが小さくなっている。この理由としてLAMERでは放射性物質の沈降過程は考慮されておらず、表層濃度は課題評価されている可能性がある。また、LAMERによる結果では実測値との比較は行っていないが、本計算に結果に対する実測値との比較として、以下に説明するとおり外洋域での相関は0.89と高いものとなっている。

次に、実測値と計算値の関係性をみるため、東京電力(株)¹²⁾及び原子力規制庁¹³⁾が公表している福島第一原発近傍域、原子力規制庁¹⁴⁾が公表している福島第一原発周辺海域(20km圏内)、海上保安庁¹⁵⁾が公表している福島沖、文部科学省¹⁶⁾が公表している外洋域における¹³⁷Csの実測値と計算値の相関関係を図-4に示す。これによれば、福島第一原発周辺海域、外洋域は相関関係が高い(R=0.7, 0.89)。一方で福島沖及び福島第一原発周辺海域の2年後、3年後については、計算値が小さく相関関係は低い。放射性物質の負荷は、海洋への直接的な負荷以外に、大気

図-2 太平洋における¹³⁷Csの拡散状況(1年後:表層)
(上图:計算結果, 下图:LAMERによる結果)

図-3 太平洋における¹³⁷Csの拡散状況(7年後:表層)
(上图:計算結果, 下图:LAMER¹⁰⁾による結果)

図-4 実測値^{12), 13), 14) 15) 16)}と計算値の相関関係(1年後:表層)

からのフォールアウトが大きな負荷源である。本研究では、総負荷量として大気への放射性物質の放出量を含んでいるものの、福島沖に風による移送後に海洋へフォールアウトした面的作用は考慮していない。また、

図-5 2011年に負荷された放射性物質の実測値と計算値の比較

福島第一原発周辺における数年後の実測値と計算値の比較においても相関関係は低い。この原因として、本研究では2011年に発生した事故により負荷された放射性物質を負荷量としたが、2011年から数年後に至る過程において持続した放射性物質の漏洩が指摘されている^{17),18)}。そこで、事故直後にのみ負荷された放射性物質に対する本モデルの精度検証のため、宮城・福島・茨城県沖の高濃度時（事故から短期間）における計算値と実測値¹²⁾との比較を行った。これによれば、各時期における計算結果と実測値はほぼ同じ範囲内にあり、また両者ともに類似した濃度の減少傾向を示している。これらのことから概ね妥当な計算結果が得られていると考えられ、このモデルを用いて放射性汚染水の検討を行うこととした。

4. 汚染水における放射性物質濃度解析

(1) 計算条件

山や河川などを介して東京電力㈱福島第一原発敷地内に流入した地下水は、高濃度放射性物質によって汚染水と化している。福島第一原子力発電所は海に面していることから、こうした汚染水は何れ海域へと漏洩すると考えられる。汚染水は放射性核種除去装置（アルプス）によってトリス³Hのみが海域へ放出されることとなっているが、ここではアルプスが停止した事態や凍土による汚染水対策などを踏まえて1日に増加する汚染水が、そのまま海

表-2 拡散計算の諸条件

項目		設定値
負荷量	¹³⁷ Cs	$9.3 \times 10^7 \text{ Bq/m}^3 \times 400 \text{ m}^3/\text{day}^{12)}$ $= 2.58 \times 10^8 \text{ Bq/dt}$
	⁹⁰ Sr	$5.0 \times 10^9 \text{ Bq/m}^3 \times 400 \text{ m}^3/\text{day}^{12)}$ $= 1.39 \times 10^{10} \text{ Bq/dt}$
	³ H	$6.3 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3 \times 400 \text{ m}^3/\text{day}^{12)}$ $= 1.75 \times 10^9 \text{ Bq/dt}$
放射性物質の半減期	¹³⁷ Cs	30 年
	⁹⁰ Sr	28.8 年
	³ H	12 年
放射性物質の分配係数(Kd)	¹³⁷ Cs	$2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{g}$
	⁹⁰ Sr	$2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{g}$
	³ H	$0.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{g}$
海表面からのフォールアウト		考慮しない
初期値		0 Bq/L
計算時間		5 年間

域へ放出されることを想定する。したがって、放射性物質は¹³⁷Csの他に⁹⁰Sr、³Hの放出を想定した。負荷量は、汚染水量¹⁹⁾に福島第一原子力発電所内で東京電力㈱によって実測されている高濃度放射性物質²⁰⁾の最大濃度を掛け合わせることで算出した。なお、濃度測定は定期的に行われているが、本研究では安全側及び環境影響評価の考え方から、過去の最大濃度を用いた。放出地点は福島第一原子力発電所前面海域の1メッシュとし、放出時間及び計算時間は5年とした。表-2に計算条件を示す。

(2) 計算結果

まず、図-5に計算開始から1週間後における福島第一原子力発電所前面（N36.6°～N38.2°，E140.6°～E142.6°）の¹³⁷Cs、⁹⁰Sr、³Hの濃度計算結果を示す。3核種ともに、福島第一原子力発電所近傍での濃度上昇が見られるものの、範囲は限定的になっている。¹³⁷Csの最大濃度上昇は4.3mBq/L、⁹⁰Srの最大濃度上昇は231.43mBq/L、³Hの最大濃度上昇は29.1mBq/Lで3核種ともに福島第一原子力発電所前面が最大濃度上昇地点であった。⁹⁰Srの最大濃度上昇は比較的高く、想定した負荷量の場合早い段階（1週間）で高濃度となることが分かった。

図-6 放射性物質濃度計算結果（1週間後：表層）
（左図：¹³⁷Cs、中図：⁹⁰Sr、右図：³H）

図-7 放射性物質濃度計算結果（5年後：表層）
（左図： ^{137}Cs 、中図： ^{90}Sr 、右図： ^3H ）

また、放射性核種が放射状に拡散することから、表層での流れの影響は強くないと考えられる。

図-6に5年後における ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^3H の濃度計算結果を示す。3核種ともに、福島第一原子力発電所近傍での濃度上昇が見られるものの、範囲は限定的(50km×50km)になっている。 ^{137}Cs の最大濃度上昇は5.35mBq/L、 ^{90}Sr の最大濃度上昇は288.45mBq/L、 ^3H の最大濃度上昇は 4.4×10^4 mBq/Lで3核種ともに福島第一原子力発電所前面が最大濃度上昇地点であった。3核種の比較では ^{90}Sr の濃度上昇が最も高く、次いで ^3H 、 ^{137}Cs の順であるが大きな差はなかった。一方で、核種ごとに負荷量が異なることから濃度低減の直接的比較が難しいため、次に示す定義に基づいて低減率（低減率=計算期間中の最大濃度上昇/Δtの負荷量に対する最大濃度上昇地点での濃度）の比較を行った。この結果 ^{137}Cs の低減率は 3.2×10^{-5} 、 ^{90}Sr は 3.2×10^{-5} 、 ^3H は 2.0×10^{-5} となり、各種ごとに顕著な差は見られなかった。なお、1年後における3核種の濃度計算結果は、5年後の計算結果と比較し大きな変化は見られなかったため、ここでは図面を省略した。このことから、汚染水の拡散は1年後までにほぼ収束していることが分かった。

次に、想定した人口的に放出する放射性汚染水がどの程度の濃度上昇であるのかを把握するため、昭和58年から平成24年にわたる福島第一原発前面海域における実測値¹⁴⁾との比較を行った（図-8参照）。青の破線が ^{137}Cs 、緑の破線が ^{90}Sr で5年後の計算結果の最大値を示している。なお、実測値がないことから ^3H の比較は行っていない。この結果、比較的高濃度の汚染水の放出を想定した場合でも、汚染水による影響は、 ^{137}Cs では過去の海水中に観測されたレベルに留まること、 ^{90}Sr では東日本大震災当時(2011年)のレベルまで上昇することが分かった。なお、実測値では ^{137}Cs の値が ^{90}Sr と比べ高いが、計算値では ^{90}Sr が高くなっている。これは、実海域での ^{90}Sr の存在量及び海域への放出量が小さいのに対し、計算では福島第一原発内で計測された放射性物質濃度の最大値を汚染水と設定したことによるものと考えられる。

図-8 実測値¹⁴⁾と計算結果(5年後)の比較

5. 放射性物質による影響評価

放射性物質の負荷によって、懸念されることは魚類などに濃縮した放射性物質を間接的に体内に取り込むことである。特に人工的に放射性物質の放出を行うには、海産生物を介しての影響が考えられる人体への影響を把握、管理する必要がある。そこで、国際放射線防護委員会(ICRP)による計算手法を用いて、今回の汚染水の放出が人体に影響を与えるかについて検討を以下の式によって行った。内部被曝により、人体が影響を受ける程度を示す放射線量は預託実効線量と呼ばれ、海洋生産物の1年間摂取による線量によって評価される。

$$D_i = 365 H_{ik} W_j C_{fj} C_k \quad (6)$$

ここで、 D_i ：海洋生産物(i)を1年間摂取したことによる線量(Sv/y)、 H_{ik} ：Cs(k)1Bqを経口摂取したときの預託実効線量当量(Sv/Bq)、 W_j ：海洋生産物を1年間摂取する量(g/day)、 C_{fj} ： ^{137}Cs に対する魚の濃縮係数(g/cm³)、 C_k ：海水濃度(Bq/cm³)である。海洋生産物の摂取量は、厚生労働省による国民健康・栄養調査(2003～2010年)のうち、魚介類、魚介加工品、藻類の平均摂取量120.9g/日とした。また、預託実効線量当量はICRPから 1.3×10^{-8} Sv/Bq(^{137}Cs)、 2.8×10^{-8} Sv/Bq(^{90}Sr)とした。魚の濃縮係数は渡部²¹⁾を参考に、魚介類およ

び魚介加工品は $100\text{g}/\text{cm}^3$ 、藻類は $50\text{g}/\text{cm}^3$ とした。

今回の放射性物質の計算結果によれば、1年後及び5年後の放射性 ^{137}Cs は海水の最大濃度で $5.35 \times 10^3 \text{Bq/L}$ 、 ^{90}Sr は海水の最大濃度で $288.45 \times 10^3 \text{Bq/L}$ である。この値から算出された線量は $4.3 \times 10^{-4} \text{mSv/y}$ 、 $2.3 \times 10^{-2} \text{mSv/y}$ である。これは、汚染水の影響を受けた魚介系のみを摂取した場合でもICRPが定めた限界値(1mSv/y)より相当小さい値となることを示している。

6. まとめ

本研究では、東日本大震災の影響に伴う福島第一原子力発電所の放射性汚染水がもたらす海洋への中期的な影響について検討するため、太平洋循環モデルからネスティング手法によってメッシュを細分化し、放射性物質の崩壊・スキャベンジングを考慮したモデルの展開を行った。モデルの検証として、2011年に海域へ放出された放射性物質を対象とし、既往の知見及び実測値と本研究における放射性物質の濃度計算結果との比較を行いモデルが妥当であることを確認した。

このモデルを用いて実施した放射性汚染水の計算結果及び影響評価については、以下に示すとおりである。

- (1) 汚染水の拡散は連続的に放出しても、1年以内に収束すると想定される。
- (2) ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^3H の汚染水濃度は、福島第一原子力発電所前面海域周辺に限定され各種による希釈の差はほとんどなかった。
- (3) ^{90}Sr の最大濃度は、2011年頃と同レベルとなる。
- (4) ^{137}Cs 、 ^{90}Sr の人体への影響は汚染水の影響を受けた魚介系のみを摂取した場合でもほぼないと考えられる。

本研究では、放射性物質特有の拡散現象（スキャベンジング、崩壊）は顕著には見られなかった。これは、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^3H の分配係数が比較的小さく、計算期間が半減期より短いためと考えられる。

また、実測との比較において2011年事故当時の負荷量のみを想定した予測では長期における実測との比較に差異が生じる。したがって、長期的な予測を行うには把握可能な負荷源、負荷量を全て考慮することが望まれる。

今回の想定はアルプスの停止など、危険を想定したものではあるが、ある特定の行為（人口的な汚染水の排出）に対する環境影響評価としての知見には十分であると考えられる。今後は、他の核種での想定や総負荷量の推定、恒常的な海域への放出として河川からの負荷に対する拡散解析の検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1)津旨ほか：福島第一原子力発電所から漏洩した ^{137}Cs の海洋拡散シミュレーション，電力中央研究所報告書V11002，

2011.

- 2)松浦ほか：福島第一原子力発電所から海へ漏洩したセシウム 137 の拡散計算，土木学会論文集B1，No.4，p.I_1399-I_1404，2013.
- 3)Honda et al.: Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the western North Pacific one month after the Fukushima accident. Accepted by Geochemical Journal.
- 4)Godtberg,E.D.: Marine geochemistry, J.Geol.62, 249-265, 1954.
- 5)Wada, Nagoya: Pacific Ocean flow simulation using the data assimilation system, Flow Modeling and Turbulence Measurements VI, pp.631-637, 1996.
- 6)Hasegawa et al.: Calculations of the concentration of radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr ,Pu-239/240) in The Pacific Ocean, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering,20, 2, p.277-237, November, 2002.
- 7)中村ほか：数値モデルを用いた日本近海における CO_2 海洋隔離による CO_2 濃度影響評価，海洋調査技術学会誌，Vol.42，2009.
- 8)水落，和田：北極海における放射能濃度解析，土木学会第58回年次学術講演会，2003.
- 9)津旨ほか：海洋大循環モデルを用いた海洋中核種濃度評価手法の開発，電中研報告U99007，1999.
- 10)津旨，丸山：日本海における海洋中核種濃度計算法，電中研報告U00040，2001.
- 11)独立行政法人日本原子力研究開発機構：太平洋における放射能濃度分布のシミュレーションについて，2011.
- 12)東京電力株式会社：東京電力株式会社福島第一原子力発電所周辺の海水の放射能分布，Apr.，2014
- 13)原子力規制庁：東京電力株式会社福島第一原子力発電所周辺の海域モニタリング結果（海水），Jun.，2014
- 14)原子力規制庁：平成24年度に実施された海洋環境放射能総合評価事業の概要，2014.
- 15)海上保安庁：放射能調査報告書 平成24年調査結果，Mar.，2014.
- 16)文部科学省：外洋における海洋モニタリング（海水）の結果，Nov. 2012.
- 17)Kanda: Continuing ^{137}Cs release to the sea from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through, Biogeosciences, Vol.10, p.6107-6113, 2012.
- 18)Tsumune et al.: One-year, regional-scale simulation of ^{137}Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Biogeosciences, Vol.10, p.5601-5617, 2012.
- 19)東京電力株式会社：福島第一港湾内、放水口付近、護岸の詳細分析結果，May.，2014.
- 20)東京電力株式会社：福島第一原子力発電所における汚染水対策について，Sep.，2013.
- 21)渡部：海洋生物への放射性物質の移行，環境パラメータ・シリーズ6，原子力環境整備センター，1996.

(2014. 9. 30受付)