



## 福島第一原子力発電所を放出源とする放射性セシウム137の沿岸域での分散特性

内山, 雄介  
石井, 優生  
津旨, 大輔  
宮澤, 泰正

---

**(Citation)**

土木学会論文集B2(海岸工学), 68(2):I\_931-I\_935

**(Issue Date)**

2012

**(Resource Type)**

journal article

**(Version)**

Version of Record

**(Rights)**

©2012 公益社団法人 土木学会

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002931>



# 福島第一原子力発電所を放出源とする 放射性セシウム137の沿岸域での分散特性

Oceanic Dispersion of Radioactive Cesium-137 from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

内山雄介<sup>1</sup>・石井倫生<sup>2</sup>・津旨大輔<sup>3</sup>・宮澤泰正<sup>4</sup>

Yusuke UCHIYAMA, Tomomi ISHII, Daisuke TSUMUNE and Yasumasa MIYAZAWA

The 2011 Tohoku earthquake and the associated tsunami caused a severe nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (1F), leading to radioactive water leaking into the sea. We conduct a triple nested high-resolution numerical hindcast to assess oceanic dispersion of the leaked cesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) in the coastal marginal sea, and successfully reproduce fluctuations of  $^{137}\text{Cs}$  concentration. While an alongshore  $^{137}\text{Cs}$  concentration PDF indicates a prevailing northward transport, a  $^{137}\text{Cs}$  flux budget analysis exhibits that the cumulative alongshore flux is much greater than the offshore flux with latitudinal asymmetry due to the eddy transport, suggesting that  $^{137}\text{Cs}$  tend to remain in the coastal zone.

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波により、東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F）が一時制御不能に陥り、水素爆発が生じる事態になった。3月12日以降、炉心や燃料棒を冷却するため淡水や海水の注入作業が営々と行われている。しかしながら、注入された水は放射性物質を含む汚染水となって1F施設内に溜まり続け、汚染水再循環システムが稼働するまでの約1ヶ月間に、汚染水の海洋への漏洩事故が断続的に発生した。4月1日～6日に2号機から4.7 PBq、同4日～10日に低レベル汚染水の計画的放出により150 GBq、翌5月10日～11日に3号機より20 TBq（いずれも東電による推計値）の放射性物質が海洋へ漏洩したと報告されているが（2011年10月現在），現在もその正確な量は判然としない。

電力中央研究所（Tsumuneら, 2011）・JAMSTEC（Miyazawaら, 2012）・仏SIROCCO（CNRS/Toulouse University）による海洋モデルを用いたアセスメントによると、放出された放射性物質の分散は速やかに行われ、その大半は黒潮続流に乗って北太平洋上中緯度方向へ輸送されることが示唆されている。しかし、沿岸域では河川による密度流、海底地形等の影響を受けた複雑な流れ場が形成されているため、放射性物質の分布も沖合の準地衡流の流動によるものとは異なる可能性がある。また、

$^{137}\text{Cs}$ は半減期が30年と長く、沿岸部の底質に吸着されることによる長期間にわたる海洋汚染を引き起こす可能性も否定できない。そこで本研究ではROMS（Regional Ocean Modeling System, Shchepetkin・McWilliams, 2005）をベースとした多段階ネスティングにより、水平解像度約1 kmまでダウンスケーリングする高解像度数値実験を行い、沿岸域での放射性物質の分散特性の定量的な把握を試みた。本稿では $^{137}\text{Cs}$ 濃度の再現性の確認、その出現特性や河川影響に関する検討、および $^{137}\text{Cs}$ 濃度フラックス収支解析を行った結果について報告する。

## 2. 研究方法

東北・北関東太平洋沿岸域は黒潮や親潮等の外洋流動の影響を強く受ける。これらを精緻に考慮するため、3次元変分データ同化を用いた日本近海の海況再解析・予報システムJCOPE2（Miyazawaら, 2009；水平解像度約10 km）を境界条件とし、1-way offlineネスティングによりJCOPE2→ROMS-L1（水平解像度約3 km）→ROMS-L2（同1 km）へと3段階のダウンスケーリングを行い、

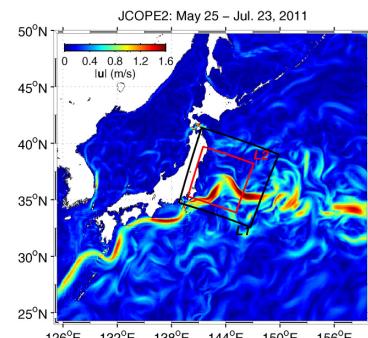


図-1 JCOPE2による海表面流速の絶対値（2011/5/25-7/23の平均値）。黒枠：ROMS-L1領域、赤枠：ROMS-L2領域

1 正会員 博(工) 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻

2 学生会員 学(工) 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

3 正会員 博(工) (一財)電力中央研究所 環境科学研究所  
4 博(理) (独法)海洋研究開発機構 地球環境変動  
領域

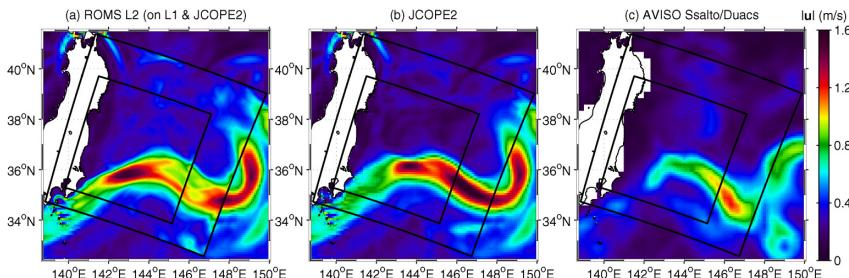


図-2 漏洩開始60日後から120日後までの海表面平均流速の絶対値。(a) ROMS-L2 (L1 & JCOPE2), (b) JCOPE2, (c) AVISO

表-1 ROMS-L2の計算条件

計算期間	2011年1月1日～2011年10月30日
格子数	512 × 512 × 32層, 水平解像度: 1 km
境界条件	ROMS-L1 (半日平均値)
外力 (海上風)	JMA GPV-MSM (一時間値)
海面フラックス	COADS (月平均値)
海表面温度	AVHRR Pathfinder (月平均値)
河川流量	雨量・流量データベース (月平均値)
海底地形	JEGG500 + SRTM30

東北・北関東太平洋沿岸域の高解像度海洋モデリングを実施した(図-1)。本研究ではROMS-L2の結果を解析対象としており、その計算条件は表-1の通りである。すなわち、海上風には気象庁のGPV-MSMの一時間値、海底地形にJEGG500(解像度500 m)をSRTM30(解像度1 km)で補完したものを、各種海面フラックスにはCOADSの月平均値、海表面温度にはAVHRR Pathfinderの月平均値を用いた。また、計算領域内には14本の一級河川が注いでいるため、それらの流量として、雨量・流量データベースから求めた1994～2003年の10年間の月平均流量を与えた。なお、本研究では漏洩した放射性物質のうち<sup>137</sup>Cs(半減期約30年)の海洋への直接漏洩のみを解析対象とするが、大気経由のfalloutや、半減期による<sup>137</sup>Csの質量減少は考慮しない。また、放射性物質の漏洩モデルにはTsumuneら(2011)によるセシウム-ヨウ素比をベースにした方法を適用した。すなわち、まず、放射性物質が海洋へ直接漏洩した期間(2011年3月26日～4月6日)にpassive tracerを1(Bq/s)の単位フラックスとして1F前面のグリッドに与える。その後、4月6日から25日までは、1F近傍の<sup>137</sup>Cs濃度のモニタリングデータが指数関数的に減少しているのに対応させて流出フラックスを減少させ、4月25日以降は初期フラックスの1/100の0.01(Bq/s)を一定値として与え、計算領域内のpassive tracerの相対濃度を算出した。相対濃度の算出後、3月26日から4月6日の1F近傍2箇所の<sup>137</sup>Cs濃度モニタリングデータの時空間平均値 $\bar{C}_m$ と、同一地点におけるモデル出力値(相対濃度)の平均値 $\bar{C}_R$ が一致するように式

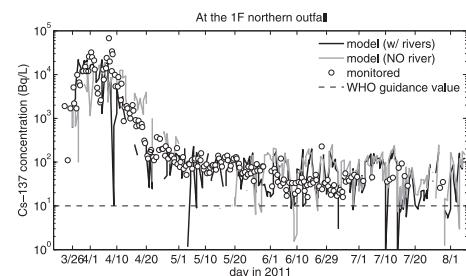


図-3 1F北側放水路における観測値とモデル推定値。(点) 観測値、(実線) モデル・河川あり、(グレー) モデル・河川なし、(点線) WHOによる飲料水の放射性物質濃度基準値

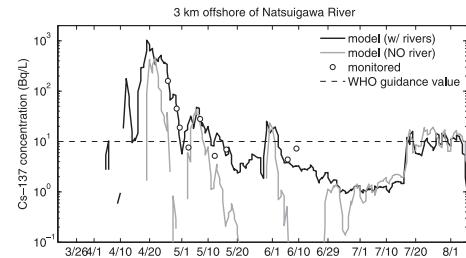


図-4 図-3と同じ。ただし夏井川沖合3 km地点における比較

(1)により倍率 $M$ を求め、モデル出力値に倍率 $M$ を乗じることで、モデルによる<sup>137</sup>Cs濃度を推定した。

$$M = \bar{C}_m / \bar{C}_R \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

### 3. 計算結果

#### (1) 流れ場の比較

モデルの再現性を確認するため、AVISO Ssaito/Duacs(衛星海面高度(SSH)データ、解像度約30 km)、境界条件として用いたJCOPE2、ROMS-L1及びL2による海表面時間平均流速の相互比較を行った(図-2)。AVISOデータに対しては、地衡流近似を用いてSSH勾配から表層地衡流速を算出した。周囲より流速の大きい箇所が黒潮流路の主軸に相当するが、ROMS、JCOPE2、AVISOの三者による総観規模の流路パターンはよく一致している。客観データであるJCOPE2を中規模以上の現象に対する真値とみなせば、ROMS-L2の良好な再現性が見て取れる。

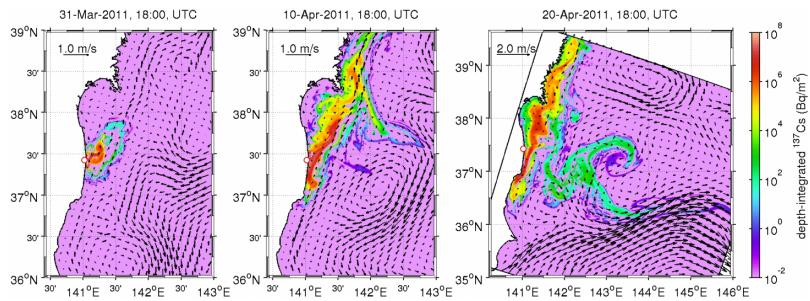


図-5  $^{137}\text{Cs}$ 濃度水深積分値(瞬間値)と海表面平均流速(河川あり). (左) 2011/3/26～3/31, (中) 4/1～4/10, (右) 4/11～4/20の平均値

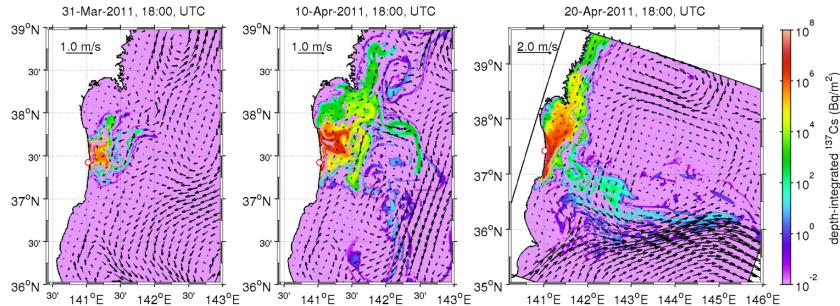


図-6 図-5と同じ(ただし河川を考慮しない場合の結果)

AVISOによる海表面流速はROMS, JCOPE2と比較して半分程度の値を示しているが、これは解像度の違いに起因するものである。つまり、解像度が約30 kmと粗いため、黒潮フロント南北間に生じるシャープなSSH勾配を表現しきれず、地衡流速を過小評価している。

## (2) $^{137}\text{Cs}$ 濃度の再現性

2011年3月21日以降、1F近傍の海表面における $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ などの放射性物質濃度のモニタリングが東京電力等により実施されている。そこで本研究では、34の観測点について、 $^{137}\text{Cs}$ の観測値とモデル推定値との比較を行った。紙面の都合上、ここでは倍率 $M$ の算定に用いた1F最近傍地点(北放水路)、および1Fの南方約50 km地点(夏井川河口沖3 km)の2箇所における $^{137}\text{Cs}$ 濃度を示す(図-3, 4。参考のため、WHOによる飲料水の放射性物質濃度の基準値10 Bq/Lも併せて表示している)。モデルは十分な精度で観測値を再現できており、特に夏井川沖(図-4)では河川の有無による再現性の差異が顕著になり、河川を考慮した場合の方がより再現性が向上することが示されている。また、1F北側放水口(図-3)では漏洩開始から約4ヶ月後の2011年8月に至っても基準値(10 Bq/L)を下回らないが、遠方の夏井川沖では概ね基準値を下回っている。

## 4. 考察

### (1) 分散パターンの概略と流れおよび河川の影響

漏洩直後の $^{137}\text{Cs}$ の分散パターンを把握するため、水深

積分された $^{137}\text{Cs}$ 濃度と、表層流速の空間分布を図-5(河川あり)、図-6(河川なし)に示す。 $^{137}\text{Cs}$ 分布への履歴効果を見るため、海表面流速については左から2011年3月26日～31日、4月1日～10日、4月11日～20日の時間平均値を表示している。また、 $^{137}\text{Cs}$ 濃度は、左から、3月31日、4月10日、4月20日の値である。当海域では、沖合では南下流である外洋性の親潮、沿岸域では主に風に励起される陸棚波による流れが存在する。1Fから漏洩した $^{137}\text{Cs}$ は、まず、沿岸域で陸棚波による北上流と、茨城沖の時計回りの渦による南下流の抑制効果を受けて北へ輸送される(図-5左)。その後、中規模渦などによる水平拡散作用によって徐々に東に広がり、一部は親潮に捕捉されて南下し(図-5中)、黒潮続流域に至ると黒潮にトラップされ、北太平洋沖合海域へと輸送される(図-5右)。4月20日時点における $^{137}\text{Cs}$ 分布は南北に非対称であり、高濃度の汚染水は1F南側では約50 km南方までしか到達していないのに対し、1F北側では約200 km北方まで輸送されている。このとき、黒潮続流域を中心とした沖合の $^{137}\text{Cs}$ は $O(10^3)$  Bq/m<sup>2</sup>以下であるのに対し、福島・宮城県沿岸の $^{137}\text{Cs}$ は $O(10^5)$  Bq/m<sup>2</sup>以上あり、沿岸域における濃度は沖合海域の100倍以上となっている。

一方、4月10日の $^{137}\text{Cs}$ 分布の比較などから、河川を考慮しなかった場合(図-6)は、河川を考慮した場合(図-5)と比べて、 $^{137}\text{Cs}$ の高濃度域が仙台湾奥部まで拡大するなど東西(岸沖)方向の分散幅が大きく、反対に南北(沿岸)方向への輸送が抑制される傾向が見られる。例えば、

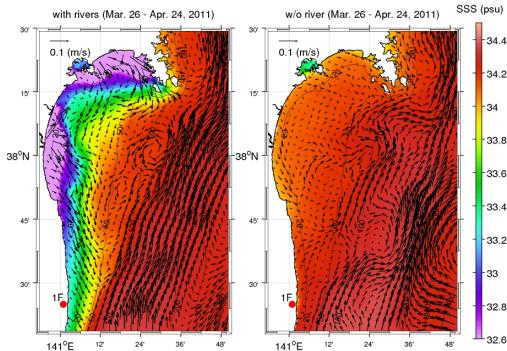


図-7 2011年3月26日から4月24日までの海表面における平均流速と平均塩分 (SSS). (左) 河川あり (右) 河川なし

河川ありの場合では北緯39度以北まで $10^5$  Bq/m<sup>2</sup>程度の高濃度域が分布しているが、河川なしでは北緯39度以北までは輸送されていない。この原因を考えるために、仙台湾の海表面塩分 (SSS) と海表面流速を調べた(図-7)。仙台湾には阿武隈川、名取川、鳴瀬川、旧北上川の4本の一級河川が注いでおり、これらの淡水流入により仙台湾周辺のSSSは大幅に低下している。河川フロント周辺では明確な沖向き平均流が生じておらず、仙台湾への外洋系水塊の波及を阻害している。また、フロント周辺での地衡流調整により、北緯38度以南の沿岸汽水域では南下流が生じている。したがって、1F北側の沿岸部を北上する流れの流軸は、河川なしの場合よりも東側へシフトし、沖合の北上流は強化され、<sup>137</sup>Csは仙台湾へと流入せずに牡鹿半島東側を迂回して北上するとともに、岸近傍では南下流の影響を受けることになる。一方、河川なしの場合、仙台湾への<sup>137</sup>Cs流入が相対的に大きくなり、また、沖合の北上流も相対的に弱いため、高濃度<sup>137</sup>Csの北限緯度は河川ありの場合よりも低下し、なおかつ岸近傍の南向き輸送も不明瞭となる。流速ベクトル分布から、<sup>137</sup>Csなどの物質分散に直接的に寄与する、直径20~30 km程度のサブメソスケール渦が複数個視認できる。

## (2) 沿岸域における<sup>137</sup>Cs出現確率密度 (PDF) 解析

沿岸域における漏洩後の<sup>137</sup>Cs分散状況をより定量的に評価するため、岸から1 km以内の岸近傍領域における水深積分された<sup>137</sup>Cs濃度の出現確率密度 (PDF, 3/26~10/30) を、北向き正とした1Fからの沿岸方向の距離 ( $y_r$ ) と<sup>137</sup>Cs濃度の関数として求めた(図-8)。ただし、<sup>137</sup>Cs濃度とPDFはいずれも対数表示されている。1F南側 ( $y_r < 0$ ) では1Fからの距離  $y_r$  に反比例してPDFピーク濃度が単調減少しているのに対し、1F北側の  $0 \leq y_r \leq 100$  km (仙台湾沖) では  $y_r$  に追従したピーク濃度変化は明確には見られない。さらに北側の  $y_r > 100$  km (三陸海岸沖) ではPDFピーク濃度が不均一に分布し、仙台湾沖より高濃度な<sup>137</sup>Csの出現頻度が多いホットスポットが出現してい

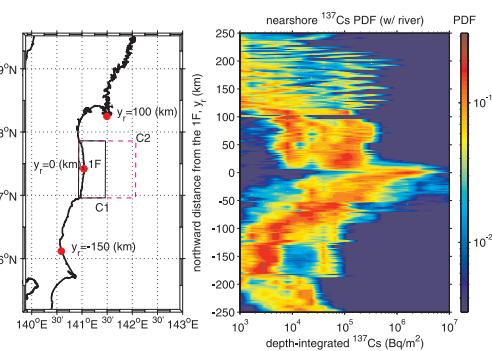


図-8 沿岸浅海域(距岸1 km以内)における<sup>137</sup>Cs濃度(水深積分値)の出現確率密度(PDF). 左図中の矩形領域C1, C2はブラックス収支解析で用いる検査領域を示している

たことがわかる。

### (3) ブラックス収支解析

次に、1F近傍における沿岸方向・岸沖方向への<sup>137</sup>Cs輸送量の収支構造を精査するため、1Fを中心に南北100 kmの平均的な海岸線を考え、これを一辺に持つ東西50 km南北100 km (C1領域), 東西100 km南北100 km (C2領域) の検査領域内の<sup>137</sup>Cs濃度ブラックス収支の時間積分値(累積ブラックス)を検討する。領域の概形は図-8左に示されている。

まず、検査領域内のブラックス収支式は、

$$\frac{d}{dt} \int_V c dV \equiv \frac{dC_r}{dt} = f_{in} - (f_S + f_N + f_E) \quad \dots \dots \dots (2)$$

と表される。ただし、 $c$ : <sup>137</sup>Cs濃度,  $V$ : 検査領域体積,  $C_r$ :  $V$ 内の<sup>137</sup>Cs総量,  $f_{in}$ : 1Fから検査領域内へ流入する<sup>137</sup>Csブラックス,  $f_i$  ( $i = S, N, E$ ): 各境界 ( $S$ : 南,  $N$ : 北,  $E$ : 東) を通じて検査領域外へ流出する<sup>137</sup>Csブラックスであり,

$$f_i = \int_{S_i} c_i v_i dS_i \quad \dots \dots \dots (3)$$

で定義される。ここに、 $c_i$ ,  $v_i$ ,  $S_i$  ( $i = S, N, E$ ): それぞれ南北東の各境界断面における<sup>137</sup>Cs濃度, 系外方向を正とする流速の法線成分, 断面積である。各断面における<sup>137</sup>Csブラックス  $f_i$  を時間積分することにより、累積<sup>137</sup>Csブラックス  $F_i$

$$F_i = \int_{t_i} f_i dt \quad \dots \dots \dots (4)$$

が定義される。

図-9に、以上のように求めたC1, C2領域における各境界からの累積<sup>137</sup>Csブラックス(流出が正)の時間変化を示す。C1領域(図-9(a))では、沖合50 km地点からの沖向き流出量(東向き成分  $F_E$ )は沿岸成分  $F_S$ ,  $F_N$  と同程度であるが、C2領域(図-9(b))では沖合100 km地点からの沖向き流出量  $F_E$  が沿岸成分より一桁小さく、しかも

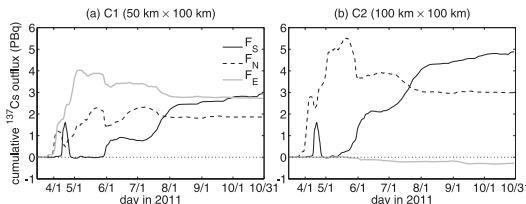


図-9 C1 および C2 領域各境界断面を通過する累積<sup>137</sup>Cs流出フラックス。(実線) 南側境界, (破線) 北側境界, (グレー) 東側境界からの流出量を表す。1 PBq = 10<sup>15</sup> Bq

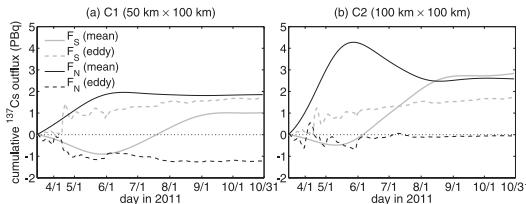


図-10 C1 および C2 領域の沿岸方向断面(南北断面)を通過する累積<sup>137</sup>Cs流出フラックス。長周期成分(実線)と乱流成分(破線)

負値(すなわち流入)となっている。したがって、1F近傍では100 km程度より沖への直接的な<sup>137</sup>Cs輸送はほとんど生じないことが分かる。C1における沖への流出量 $F_E$ は漏洩開始直後に急増し、5月初旬までは沿岸成分を上回るが、その後は漸減(流入)に転じ、10月末までの最終的な総流出量は南方向への総流出量と同程度になっている。PDF解析は1F南側より北側で高濃度の<sup>137</sup>Csの出現頻度が高いことを示していたが、フラックス収支解析結果から、漏洩直後は北側境界からの流出 $F_N$ が大きいものの、5月下旬以降は停滞し、反対に6月以降は南側流出 $F_S$ が漸増して、10月末までの累積流出は南側境界で最大となることが確認される。

このような南北間における<sup>137</sup>Csの輸送量の差を考えるために、濃度と流速を各々 Reynolds 分解し、濃度フラックスを長周期(季節変動する平均流)成分と乱流(渦・残差流)成分とに分離した。<sup>137</sup>Cs濃度は概ね120日を一周期とするような長期変動傾向を示していたため、cutoff周期を120日とした周波数フィルタを適用し、次式のようにフラックスの各成分を求めた。

$$f_i = \int_{S_i} (c_i \bar{v}_i + c_i' \bar{v}_i') dS_i \equiv \bar{f}_i + f_i' \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここに、上付きバーは長周期成分、プライムは乱流成分を表し、異なる成分間の相関は十分に小さかったため、ゼロと仮定した。すなわち、

$$\bar{c}_i \bar{v}_i' = c_i' \bar{v}_i = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

とした。このように Reynolds 分解された<sup>137</sup>Csフラックスを式(4)により時間積分し、南北境界からの成分分離された累積流出フラックスを求めた(図-10)。C1 領域で

は、南側境界では長周期、乱流成分とともに流出に寄与しているのに対し、北側境界では長周期成分が流出、乱流成分が流入に寄与している事が示されている。C2 領域では、北側境界での乱流成分がほぼゼロで、それ以外の成分はいずれも流出に寄与している。ここで考えている時空間スケールの海洋乱流は中規模現象に支配されることから、地形などに影響を受けた岸近傍のメソスケール渦の作用の差異に伴い、Reynolds フラックスの符号が逆転し、南北境界で非対称な累積流出傾向が発現したものと解釈される。

## 5. おわりに

沖合での挙動に主眼がおかれた既往の研究では、1Fから漏洩した<sup>137</sup>Csは速やかに外洋へと分散していくことが示唆されていた。しかしながら、沿岸域に着目したダウンスケーリングモデルを用いたフラックス収支解析の結果、実はその大部分は沿岸方向に輸送されていることが明らかとなった。1F 北側では<sup>137</sup>Cs の PDF ピーク濃度が高く、三陸海岸沿いではアリアス式地形の影響を受けて PDF ピーク濃度が不均一に分布して、<sup>137</sup>Cs のホットスポットが形成されていた。ところが、沿岸方向への<sup>137</sup>Cs 累積輸送量は、PDF ピーク濃度の低い1F 南側でもしろ大きく、特に南北境界における乱流成分の効果が異なることにより、緯度方向に非対称な輸送/流出傾向が形成されていたことが示された。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究C(24560622)、近畿建設協会研究助成の援助を受けた。

## 参考文献

- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu (2009): Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737-756.
- Miyazawa, Y., Y. Masumoto, S. M. Varlamov, and T. Miyama (2012): Transport simulation of the radionuclide from the shelf to open ocean around Fukushima, *Continental Shelf Res.* (in revision)
- Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams (2005): The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates oceanic model, *Ocean Modell.*, Vol. 9, pp. 347-404.
- Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama and K. Hirose (2011): Distribution of oceanic <sup>137</sup>Cs from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *J. Environ. Radioactivity*, doi.10.1016/j.jenvrad.2011.10.007.
- 東京電力株式会社 (2011)：福島第一原子力発電所放水口付近の海水からの放射性物質の検出について, <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11032201-j.html>, 2011年3月22日。
- 東京電力株式会社 (2011)：東北地方太平洋沖地震による影響などについて平成23年3月11日～7月31日の実績, [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/past-progress/images/past\\_110731-j.html](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/past-progress/images/past_110731-j.html), 2011年9月2日。