



福島第一原発からの放射性核種の初期分散に及ぼす 沿岸ジェットとメソスケール渦の影響

内山, 雄介
山西, 琢文
津旨, 大輔
宮澤, 泰正
石井, 倫生

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 69(2):I_1051-I_1055

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002937>



福島第一原発からの放射性核種の初期分散に及ぼす 沿岸ジェットとメソスケール渦の影響

Influences of coastal jet and mesoscale eddies on initial dispersion of the radionuclides
released from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

内山雄介¹・山西琢文²・津旨大輔³・宮澤泰正⁴・石井倫生⁵

Yusuke UCHIYAMA, Takafumi YAMANISHI, Daisuke TSUMUNE
Yasumasa MIYAZAWA and Tomomi ISHII

A detailed oceanic downscaling model (Uchiyama *et al.*, 2012) is utilized to better understand the oceanic initial dispersion of the leaked radionuclides during the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (1F). Particular attention is paid to the influences of northward geostrophic coastal jet associated with an alongshore high SSH belt peaked at 50 km offshore, and mesoscale eddies shed by the jet in Sendai Bay and by the Kuroshio near the separation point. A spectral coherence analysis exhibits that alongshore wind stress is highly correlated with alongshore current on the shelf over the periods around 168 hours, suggesting that coastally trapped shelf waves are also responsible for the dispersion of the nuclide.

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に牡鹿半島沖で発生したマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F）が被災し、炉心融解に伴って大量の放射性物質が大気中へと放出された。大気への放射性セシウム137（¹³⁷Cs）の放出総量は約15 PBqと推定されており、これはチェルノブイリ原発事故による放出量約85 PBqの1/6の量に相当する（例えば、Hondaら、2012）。3月12日以降、海水や淡水を継続的に注入することによって炉心冷却が行われているが、放射性物質によって汚染された冷却水の一部は1F施設内に溜まり続け、偶発的な漏洩や計画放水によって放射性核種が直接海洋へ放出された。事故直後に生じた放射性核種の海洋漏洩としては、4月1日～6日に生じた原子炉2号機からの4.7 PBq、4月4日～10日に実施された低レベル汚染水の計画的放出による150 GBq、5月10日～11日に生じた3号機から漏洩した20 TBqが報告されている。これらの漏洩量は事故現場における簡易モニタリングデータから推定されたものであり、その精度については議論の余地がある。

モニタリングデータと海洋モデルをリンクさせることにより、漏洩量の逆推定および海洋での放射性核種分布

を推定する試みがなされている。電力中央研究所（Tsumuneら、2012）、海洋研究開発機構JAMSTEC（Miyazawaら、2012）、日本原子力研究開発機構JAEA-JAMSTEC（文部科学省、2011）、仏SIROCCO（CNRS/Toulouse University; Estournelら、2012）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、その大半は黒潮主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。これに対して著者ら（内山ら、2012；以下前報と呼称）は、外洋影響、海上風変動、浮力混入などを可能な限り精緻に考慮した高解像度海洋ダウンスケーリングモデルを構築し、沿岸域に着目した¹³⁷Cs濃度のPDF解析、フラックス収支解析などを行なった。その結果、沿岸方向への¹³⁷Cs累積輸送量はPDFピーク濃度の低い1F南側でむしろ大きく、特に1F南北での周期120日以下の流速変動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パターンが形成されていたことが示された。

本研究では、前報で明らかとなった緯度方向に非対称な輸送パターンに着目し、高濃度の¹³⁷Csが沿岸域に滞留していた漏洩初期における¹³⁷Cs濃度分布の形成機構に関する詳細な解析を行う。本稿では特に福島県沖合に発達する沿岸ジェットおよび陸棚波の影響、漏洩後に周辺海域を通過した発達した低気圧および茨城県沖で見られた時計回りのメソスケール渦の影響について検討した結果を報告する。

2. ¹³⁷Cs海洋分散モデル

本研究で用いるモデルは、前報にて構築した2段ネスティングによる福島沖ダウンスケーリング海洋モデルに放

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 神戸大学工学部 市民工学科
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
5 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

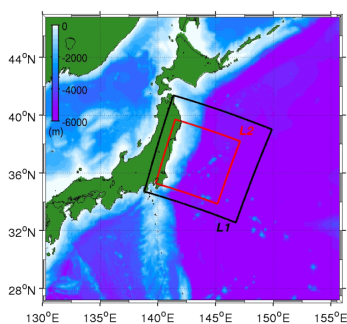


図-1 ROMSによる福島沿岸計算領域。黒枠：ROMS-L1領域、赤枠：ROMS-L2領域、カラー：水深 (m)。

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
解析期間	2011年3月11日～2011年7月19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)
海上風	JMA GPV-MSM (一時間値)
海面フラックス	COADS (月平均気候値)
海表面温度	AVHRR Pathfinder (月平均気候値)
河川流量	雨量・流量データベース (月平均気候値)
海底地形	JODC-JEGG500 + SRTM30

放射性核種 ^{137}Cs の点源モデルおよびその移流分散モデルを組み込んだものである。すなわち、3次元変分法データ同化を用いた日本近海の時系列再解析・予報システムJCOPE2 (水平解像度 $1/12^\circ$)を最外側境界条件とし、領域海洋循環モデルROMSを用いた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)へと順次ダウンスケーリングを行った (図-1)。本研究ではROMS-L2の結果を主な解析対象としており、海底地形・海上風等の各種初期・境界条件、河川流入等に関しても前報と同様のものを使用した (表-1)。

本研究の解析対象期間は、漏洩事故前から事故直後の2011年3月11日から7月19日までとした。放射性核種としては溶存態放射性セシウム137 (^{137}Cs , 半減期約30年)のみを対象とし、前報と同様に ^{137}Cs の漏洩モデルはTsumuneら (2012) によるセシウム-ヨウ素比をベースにした方法により与えた。海洋への放射性核種の流入経路は1Fからの直接流出の他にも、大気へ放出された核種の海洋への降下 (fallout) や、河川や地下水を通じた海洋への流入など複数存在するが、本研究では1Fから海洋へ直接流出した ^{137}Cs のみを考慮し、その分散挙動について検討を行うこととする。Tsumuneら (2012) による漏洩モデルにより、直接漏洩は3月26日から4月6日まで一定フラックス、4月6日から4月25日までに指数関数的にフラックスを1/100まで減少させ、その後は一定値を保持するという漏洩パターンが与えられる (前報参照)。

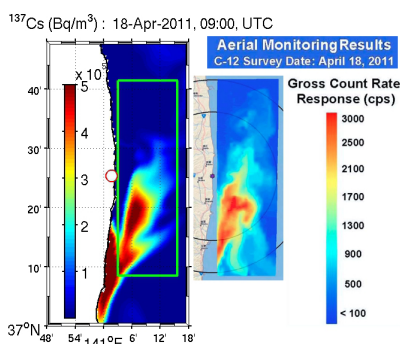


図-2 (右) NNSAによる航空機モニタリング結果 (Guss, 2011) および (左) L2モデルによる ^{137}Cs 濃度分布 (2011/4/18)。丸印は福島第一原発 (1F) の位置。

3. 結果

(1) 放射性核種の平面分布に関する再現性

黒潮流路パターン、1Fを中心とした沖合を含む複数地点における ^{137}Cs 濃度観測値と計算値の時系列比較などを行ない、いずれも高い再現性があることを確認している (前報参照)。ここでは、米国NNSAによって2011年4月18日に実施された海面放射能の航空機観測結果 (Guss, 2011) と、それに対応するL2モデルによる海洋表層 ^{137}Cs 濃度 (Bq/m^3) との比較を行う (図-2)。NNSAデータは、飛行高度150 m～700 mから計測されたものであり、全ての核種からの放射能をgross count rate response (cps) で表示しているため、モデルによる ^{137}Cs 濃度とは定量的な比較はできないが、事故直後に取得された貴重な平面データである。図-2を見ると、両者の分布パターンは良好に一致していることが確認できる。海面における放射性核種はパッチ状の構造を持っており、NNE-SSW方向に軸を有するように分布している。北方向および沖方向にはあまり分散せず、1F南側で海岸に張り付くように低緯度方向へ延伸している様子が見て取れる。Miyazawaら (2012) による解像度約3 kmのJCOPE-Tモデルでは沖方向および1Fより北側へ広く分散しており、高解像度化によって平面分布の再現性が向上し、結果として放射性核種の沿岸域への付着傾向が強化されることが分かる。以上のことから、本モデルの高い再現性と、高解像度モデルの必要性が再確認される。

(2) 初期分散パターンと海表面流速

福島県沿岸域を中心とした放射性核種の初期分散過程をより詳細に把握するため、漏洩が始まった3月26日から6月17日までの期間に対し、2週間毎の時間平均された海表面 ^{137}Cs 濃度および海表面流速分布の時間経過を図-3に、海面高度 (SSH) の時間経過を図-4に示す。高濃度 ^{137}Cs は漏洩開始直後に 37°N 付近まで南下するものの、低濃度 ^{137}Cs は仙台湾から牡鹿半島北部まで北上し、南北に

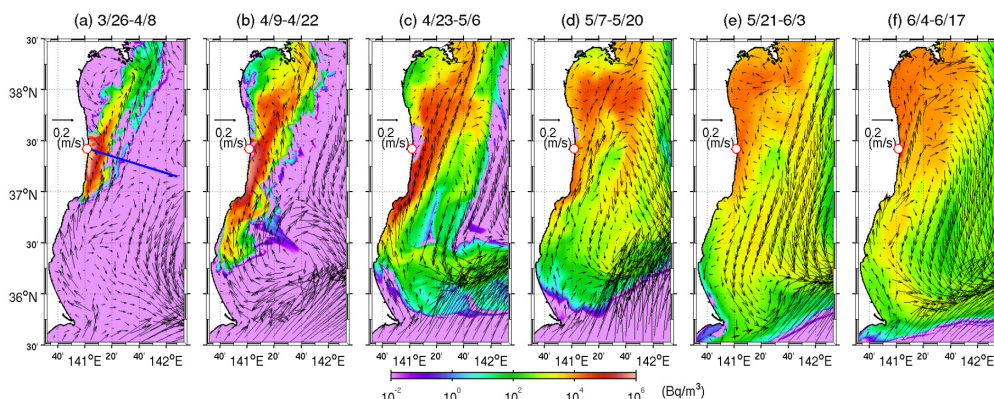


図-3 漏洩開始から2週間毎の海洋表層 ^{137}Cs の平均濃度（カラー，対数スケール）と海表面平均流速（ベクトル）．白抜き丸印は福島第一原発（1F）の位置．（a）において1FからESE方向に延びている青実線は，図-6，8で用いる検査線を示している．

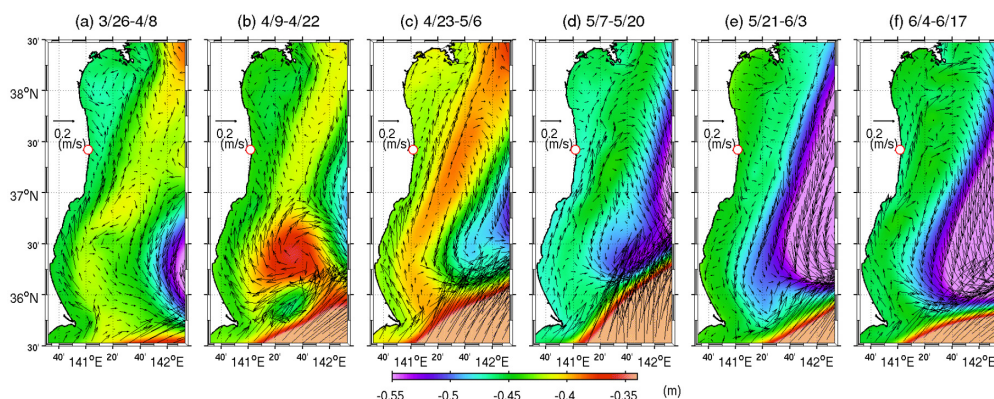


図-4 図-3と同じ．ただし，2週間平均海表面高度SSH（カラー，単位はm）と海表面平均流速（ベクトル）．

長く，沿岸域に集中した分布となる（図-3(a)）．この傾向は約1ヶ月間継続する（図-3(b)）．4月下旬以降，一部の低濃度 ^{137}Cs はそのまま南下し，黒潮主流へと至り東方へ輸送されるが，高濃度の ^{137}Cs は北上流によって5月中頃まで岸沖方向に分散しながら北上する（図-3(c)，3(d)）．

福島・茨城沿岸では5月中旬頃まで沖合約50 km付近に帯状のSSH上昇域が形成され，帯の両端に沿う形で沿岸域では北へ，沖合では南へ向かう流れが形成され，北上する沿岸ジェットが発達する（図-4(a)～4(d)）．5月中旬以降はSSH上昇帯の消失に伴い沿岸ジェットは一時衰退し，その後，沿岸域に南下流（図-4(e)），仙台湾沖から東へ向かう流れ（図-4(f)）が出現する．SSH勾配の変化に対応してSSH上昇帯の東側に発達する親潮等の南下流が強化されながら陸方向へ徐々に移動し，南向き ^{137}Cs 輸送を促進する（図-3(e)，3(f)）．沖合へ分散した ^{137}Cs は南下流によって低緯度方向へと輸送され，黒潮主流によって太平洋へと輸送される．

仙台湾周辺では，4月下旬まで湾中央部付近のSSH低下に伴い湾内に低気圧性（反時計回り）のメソスケール渦が停滞し，南からの ^{137}Cs の侵入を抑制している（図-3

(a)，3(b)）．このとき，湾南部から福島沿岸域では低気圧渦から分枝するように南下流が形成されて北上するジェットのさらに岸側に侵入し，沿岸に貼り付いた高濃度 ^{137}Cs の南下を助長している．この岸に沿う南下流は，仙台湾に流入する河川の影響を受けたものであると考えられる（前報参照）．低気圧渦の縮退とともに ^{137}Cs は仙台湾奥部に徐々に蓄積され，滞留する．また，4月中旬には茨城県沖に時計回りのメソスケール渦が発達し，停滞している（図-4(b)）．この渦は4月末には南下し，黒潮に吸収されて消滅する（図-4(c)）．

4. 海上風に対する海水流速の応答

福島県沖の陸棚域での海水の流速変動は，海上風の沿岸方向成分によって生じる陸棚波の影響を強く受け，周期的流速変動は自由陸棚波の第2，第3モードと密接に関連していることが知られている（Kubota, 1985）．そこでここでは，GPV-MSMによる海上風とROMS-L2モデルによる海表面流速との関係について検討する．漏洩開始日から7月中旬までの1F前面の水深8.5m地点における南北方向の風応力と海表面流速の時系列を見ると（図-5），風

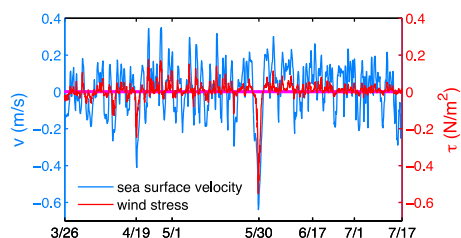
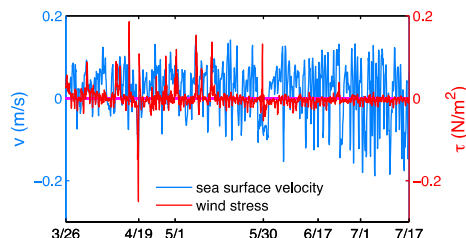
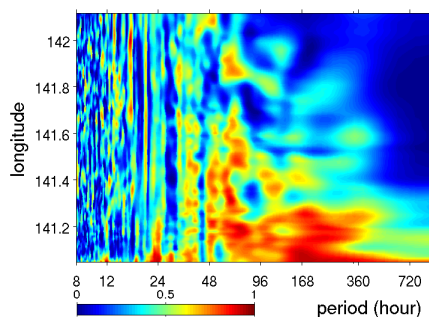
図-5 1F前面での北向き風応力 τ と北向き海表面流速.図-7 1F前面での東向き風応力 τ と東向き海表面流速.

図-6 検査線 (図-3 (a) 参照) での南北方向の風応力と南北方向の海表面流速のコヒーレンス分布.

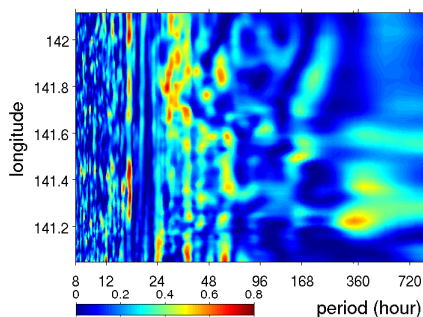


図-8 検査線 (図-3 (a) 参照) での東西方向の風応力と南北方向の海表面流速のコヒーレンス分布.

応力・流速ともに全体的に向上きにバイアスがかかっており、北上傾向が見られる。そこで、1Fから沖方向へ約100 kmの長さの検査線を設定し (図-3 (a) 参照)、そこでの風応力の南北成分および海表面流速の南北成分の相関をコヒーレンスによって評価する (図-6)。岸付近では全周期帯において両者の相関は非常に高く、岸から離れるにつれて相関は低くなる。しかしながら、周期168時間 (7日) を中心とした長周期帯では、沖合約20 km (水深約100 m) あたりまでの陸棚上で相関が高くなっている。また、沖合30~40 kmの海域では72時間前後の周期帯で高い相関を示している。したがって、岸境界に相関のピークが生じること、流速変動と風応力変動はほぼ同位相で変動することから、強制波動的な性質を持つ陸棚波の存在が強く示唆される。

次に、同一検査線での海表面流速の南北成分と、風応力の東西成分について同様の解析を行ない、東西風によるエクマン輸送に伴う沿岸方向流速について評価する。まず、東西方向の風応力および海表面流速は、南北成分と比べて全体的に値が1/2程度と小さい (図-7)。東西風と南北表層流のコヒーレンス (図-9) から、ほぼ全ての周期において岸近傍の相関は極めて低く、沖合20~80 kmの海域で一部の周期成分 (168時間、360時間など) の相関が間欠的に0.6を超えている程度であり、全体的な相関は図-6より低いことが示されている。したがって、沿岸方向流速に対するエクマン輸送の影響は無視できる程度であったことが分かる。

以上の結果から、1F前面での2011年春期の福島県沖陸

棚域では、周期168時間 (7日間) 程度の南北風変動に励起された強制陸棚波による沿岸方向流速変動が生じていた可能性が高いことが分かった。陸棚波の発達範囲は、図-4に見られたSSH上昇帯岸側に発達する北上する沿岸ジェット の範囲と概ね一致しており、陸棚上における ^{137}Cs 輸送に対しては両者が重畳して影響を与えていたものと考えられる。

5. 茨城沖メソスケール渦の影響

解析対象期間中の4月19日には強いSW向きの風が、5月30日には強いSE向きの風が観測された (図-5, 7)。これらは発達した温帯低気圧の通過に伴うものである。2つの強風による岸向きエクマン輸送の影響を受けて岸近傍で顕著なSSH上昇が生じ、それに伴って沿岸域に強い南下流が発生した (図-9)。ここでは示さないが、5月30日には ^{137}Cs の犬吠埼以南への流出を伴う大規模な南下が生じたのに対し、4月19日では多少の南下はあったものの、犬吠埼以南への流出は見られなかった。これは、形成されたSSH勾配の差に起因する沿岸南下流の強度差に加え、4月19日前後に茨城県沖で発達した時計回りのメソスケール渦に伴う沿岸部での北上流成分によって南下流が相殺されたためであると考えられる。このようなメソスケール渦はL2モデルの結果に数多く見られ、解析対象領域北部で発達したのち、沖の南下流によって低緯度方向へ輸送され、黒潮に吸収されるパターンが多く確認された。図-9左の茨城県沖渦は、北部からの南下渦と、鹿島灘沖合で黒潮から切離した孤立渦の影響を同時に受

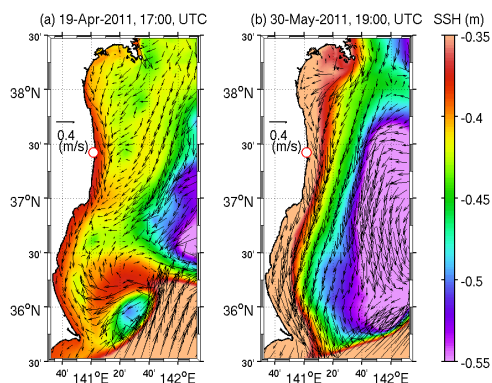


図-9 低気圧接近時における海面流速（ベクトル）および海面高度SSH（カラー）の瞬間像。（左）4月19日（SW向きの風発達時）、（右）5月30日（SE向きの風発達時）。

けたものである。

解析期間中の各地点における ^{137}Cs の最大値およびそれを観測した時間（漏洩開始日からの日数）の空間分布を図-10に示す。高濃度の ^{137}Cs は1Fを中心とした沿岸域に分布しており、沖合では黒潮流路の南側に出現することはない。鹿島灘北部（ $36^{\circ}\text{N}10'$ から 37°N ）の沿岸域では25日後（4月19日）付近で ^{137}Cs の最大値が出現しており、このときに接近した低気圧が高濃度の ^{137}Cs の漏洩初期の南部への輸送過程に影響を与えていたことがわかる。また、65日後（5月30日）付近では犬吠埼以南を含む広範囲において最大値が出現しており、このときの低気圧が ^{137}Cs の九十九里方向への拡大に大きく寄与したことが示されている。これらの傾向は、表層採水に基づく観測データ解析結果（Aoyamaら、2012）と整合している。

6. おわりに

2011年春季の福島県沖陸棚域における流速変動には海上風が大きく関わり、 ^{137}Cs の漏洩開始から5月下旬まで、陸棚波の影響を強く受けた北方向への沿岸ジェットが形成されていた。それに伴い、漏洩した ^{137}Cs はその一部は南下するものの、大部分は北へと輸送された。沖合では親潮などの南下流が発達しており、北へ輸送された ^{137}Cs は北上流の衰退に伴い南下し、黒潮続流域まで到達して北西太平洋へと拡散された。解析期間中に2つの低気圧が接近し、沿岸域での高濃度 ^{137}Cs の黒潮南側海域、続流方向への輸送を促進した。しかし、4月中旬に茨城県沖に形成された時計回りのメソスケール渦によって沿岸部では北向き流速が強化され、漏洩直後の犬吠埼以南への ^{137}Cs 流出は免れた。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究C（24560622）の援助を受けた。

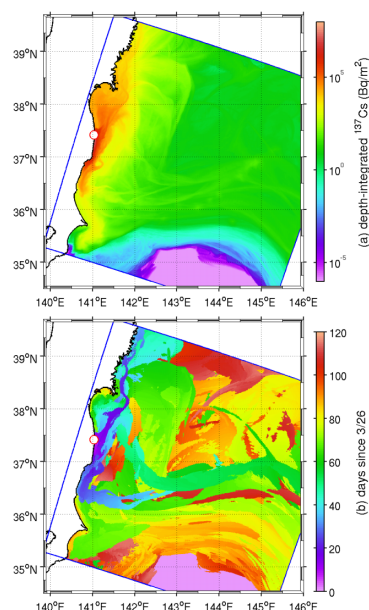


図-10 解析期間における(上)水深積分された ^{137}Cs 濃度の最大値および(下)それを観測した時間(漏洩開始からの日数)。

参考文献

- 内山雄介・石井倫生・津旨大輔・宮澤泰正（2012）：福島第一原発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，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68, No. 2, p. I_931-I_935.
- 文部科学省（2011）：Simulation of Radioactivity Concentrations in the Sea Area, <http://www.mext.go.jp/english/incident/1305758.htm>
- Aoyama, M., D. Tsumune, M. Uematsu, F. Kondo, and Y. Hamajima (2012): Temporal variation of ^{134}Cs and ^{137}Cs activities in surface water at stations along the coastline near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident site, Japan, *Geochem. J.*, 46, 321-325.
- Estournel, C., ほか11名（2012）: Assessment of the amount of Cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, C11014, doi:10.1029/2012JC007933.
- Guss, P. (2011): DOE response to the radiological release from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, DOE/NV/25946-1236, In: Proceeding of the NEI RETS/REMP Workshop, Oak Brook, IL, 30 June 2011.
- Honda, M.C., 他9名（2012）: Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the western North Pacific one month after the Fukushima accident, *Geochemical Journal*, Vol. 46, pp. e1 - e9.
- 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.*, Vol. 50-51, pp. 16-29.
- Kubota, M (1985): Continental Shelf Waves off the Fukushima Coast Part 3. Numerical Experiments. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol. 38, pp. 323-330.
- Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama and K. Hirose (2012): Distribution of oceanic ^{137}Cs from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *J. Environ. Radioactivity*, Vol. 111, pp. 100-108.