

17. 福島第一原子力発電所事故によって海洋に放出された放射性セシウムの総量と挙動

津 旨 大輔^{1*}・坪野 考樹¹・青山 道夫²・廣瀬 勝巳³

¹電力中央研究所 環境科学研究所（〒277-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

²気象研究所 地球化学部（〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1）

³上智大学 理工学部（〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町7-1）

* E-mail: tsumune@criepi.denken.or.jp

2011年3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により環境中に放射性物質が漏洩した。海洋に面しているため、大気からの降下だけでなく、海洋への直接的な漏洩も見られた。モニタリング結果の¹³¹I/¹³⁷Cs放射能比の解析によって、直接漏洩が3月26日に生じたと推定した。また5月末までの総漏洩量は 3.5 ± 0.7 PBq と逆推定した。この漏洩シナリオを用いた領域海洋モデルのシミュレーション結果は、特に南に位置する福島第二原子力発電所近傍におけるモニタリング濃度の急激な変化をよく再現した。漏洩した¹³⁷Csは主に沿岸に沿って南下し、その後中規模渦によって、外洋に輸送され、茨城沖の濃度は相対的に低くなることが示唆された。また、海洋中の濃度は4月上旬から中旬にかけて各観測地点において最大濃度を示し、その後減少に転じることが分かった。

Key Words : Fukushima Daiichi NPP accident, ¹³⁷Cs, Oceanic Pollution, Regional Ocean model, Direct release rate

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災と津波に伴う福島第一原子力発電所（以下、1F NPP）の事故により、環境中へ放射性物質が漏洩した。1F NPPは海洋に面しているため、大気からの降下だけでなく、海洋への直接的な漏洩も生じ、海洋汚染や食物連鎖による海生生物の汚染が継続している。これに伴い、出荷停止や漁業の自粛など被害が生じている。さらには、海洋汚染の実態が明らかになっていないことから、過度の漁業自粛や海産物の売り上げ減少などの風評被害も生じている。直接漏洩量の減少と海洋の希釈能力によって、汚染度は減少に向かっているが、海洋および海生生物の汚染の実態把握が急務となっている。実態把握の一環として、まず海洋に漏洩した放射性物質の量を推定し、その拡散現象に関する検討を行う必要がある。モニタリングは継続されているが、海洋における観測には困難が伴うため、実態解明のために十分な時空間的な密度の観測は不可能である。そのため、海洋への直接漏洩量の推定において、数値シミュレーションを用いた逆推定は有効な手段となる。さらに、その漏洩量を用いた数値シミュレーションを実施し、モニタリング結果に対する比較検討を行うことによって、実態

解明につなげることも重要である。ここでは、領域海洋モデルを用いた直接漏洩量の逆推定および、モニタリングデータとの比較による検証について述べる。大気からの降下と直接漏洩を比較し、沿岸域においてより影響の大きい直接漏洩量の推定およびその挙動把握に主眼を置く。低レベル汚染水の計画放水量は、直接漏洩と比較して桁違いに小さいため（津旨ら, 2011; Tsumune et al., 2012）、評価できない。また、河川や地下水から海洋への供給についても、未解明な点が多く、初期の段階での影響は直接漏洩と比較して小さいと考えられるため、評価対象外とした。

本内容は、基本的に既発表の電力中央研究所報告書（津旨ら, 2011）および学術論文(Tsumune et al., 2012)を引用したものである。この手法および推定結果は、東京電力による事故調査報告書（東京電力, 2012）にも引用された。ここでは他機関の海洋への直接漏洩量の比較についての考察を追加した。

2. 方法

(1) モニタリングデータ

東京電力が2011年3月21日以降、1F NPP近傍、福島第二原子力発電所（以下2F NPP）近傍でモニタリングを行

っている(<http://www.tepco.co.jp/n/press/corp-com/release/>)。文部科学省が2011年3月23日から5月8日にかけて福島30km 沖合の8地点でモニタリングを行った(http://www.mext.go.jp/english/radioactivity_level/detail/1304192.htm)。また、モニタリング地点はおもに2011年4月中旬以降、それぞれの機関で拡大されているが、初期からの値が存在する地点のみを対象とする。モニタリング項目は、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs であるが、主に ^{137}Cs および $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比を解析の対象とした。また、解析対象期間は2011年3月21日から5月31日までとした。

(2) 領域海洋モデル

筆者らは放射性物質輸送物の仮想海没時の影響評価研究として、放射性物質の海洋拡散シミュレーションの高度化に取り組んできた(津旨ら, 1998, 2010; 坪野ら, 2010; Tsumune et al., 2000a, 2000b, 2007)。本研究では、これらで取り組んできた手法(坪野ら, 2010)を、いち早く IF NPP の事故による放射性物質の海洋拡散評価に適用した。

福島沖を対象とした沿岸海洋モデルシステム(Regional Ocean Modeling System, ROMS, Shchepetkin and McWilliams, 2004)を構築した。シミュレーション領域は、北緯35度20分 - 北緯38度40分、東経140度20分 - 東経142度40分とした。水平解像度は1kmとし、鉛直解像度はσ座標(海表面から海底までを、水深に関わらず同数の層で区切る座標系)で20層とした。

海表面における駆動力は、気象庁による短期気象予測(JMA-GSM)をメソスケール気象モデル(Weather Research & Forecasting Model, WRF, Skamarock et al., 2008)によって内挿する短期気象予測システム(Numerical Weather Forecasting and Analysis System (NuWFAS), 橋本ら, 2010)の結果(風速・短波・長波・気圧・気温・湿度・降水量)を用いた。NuWFASのアウトプットの時間解像度が1時間毎であり、水平解像度が5kmである。海洋シミュレーションでは1時間毎に水平方向に内挿した結果を与えた。

外洋における境界条件には、海洋の1日毎の再解析データ(Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2 (JCOPE2), Miyazawa et al., 2009またはHYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), Chassignet et al., 2006)(<http://www7320.nrlssc.navy.mil/GLBHycom1-12/skill.html>)の結果(水温、塩分、海面高度)をシミュレーション格子に内挿して用いた。さらに、外洋における中規模渦などの複雑な挙動を再現するため、ナッジング項により、シミュレーション結果をJCOPE2又はHYCOMによる温度および塩分の再解析結果に緩和させた。なお、ナッジングの緩和係数は、1日の逆数を与えた。

^{137}Cs は生物化学過程の影響を受けず、水塊とともに挙動するトレーサと考え、移流拡散方程式を解いた(Tsumune et al., 2003b)。

3. 結果と考察

(1) モニタリング結果

モニタリングされた濃度値の解析から大気からの降下と直接漏洩との寄与を分けることは困難であるため、 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比に着目した解析を行った。

^{131}I と ^{137}Cs は水中ではイオンとして溶存態で存在するため、水塊と同じ挙動を示す。そのため水中の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は ^{131}I の8日の半減期の崩壊のみに支配される。ここでは短期間なので ^{137}Cs の30年の半減期の崩壊は無視できる。水中において、 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の時系列変化は、8日の半減期曲線と一致する。また、2011年3月26日における2号機タービン建屋の溜まり水の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は5.7であった(東京電力、<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11032709-j.html>)。この溜まり水は直接漏洩のソースと考えられるため、 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の時系列変化が、2011年3月26日に5.7で、8日の半減期曲線と一致する場合に、直接漏洩であると考えることができる。

一方、 ^{131}I と ^{137}Cs は非常に高温下でガスと粒子態で原子炉から大気中に放出される。その後、常温の大気中を輸送される過程においては、 ^{131}I はガスと粒子態、 ^{137}Cs は粒子態で存在する。大気中の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は、 ^{131}I の半減期だけでなく、輸送過程にも影響されるので、2011年3月26日に5.7の8日の半減期曲線上から外れる。気象研究所において観測された大気中の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ の比の観測結果からも確認できる(Igarashi et al., 2011)。またチェルノブイリ事故で放出された ^{137}Cs の粒径はサブミクロンスケールであったが(青山, 1999)、IF NPP事故時に放出された ^{137}Cs の粒径はより大きく、1-2 μm であった(Masumoto et al., 2011)。粒径の違いはWet depositionの際の強度にも依存する(青山, 1999)。このように大気を経由し、海洋に降下する際の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は、半減期だけでなく、輸送および降下過程の影響を受け、2011年3月26日に5.7の8日の半減期曲線に対して、大きくばらつく。ただし、複雑な挙動のため、 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比が直接漏洩の放射能比に対して、大小の両側にばらつく。これは、陸上への降下フラックスの観測結果における $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比のばらつきとも整合的である(Kinoshita et al., 2011)。 $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の解析によって、以下のような推定を行った。IF NPPからの直接漏洩は、2011年3月26日以降に生じた。その影響は2F NPP近傍に2011年3月27日以降、30km沖合には2011年4月9日以降に達した。

直接漏洩の影響により、IF NPP 近傍では2011年4月6日に68 kBq L⁻¹ (6.8×10⁴ Bq L⁻¹)の最大濃度値が観測されたがその後減少に転じている。また2F NPP 近傍では、2011年4月5日に1.4 kBq L⁻¹ (1.4×10³ Bq L⁻¹)の最大濃度値が観測されたがその後減少に転じている。さらに30km

沖合では2011年4月15日に186 Bq L⁻¹の最大濃度値が観測されたがその後減少に転じている。直接漏洩の影響は2011年4月中旬以降、ここで対象としたすべてのモニタリング地点で減少に転じている。

(2) 直接漏洩量の推定

2011年5月末までの沿岸域において、大気からの降下などと比較し、直接漏洩の影響は大きい。1F NPPから単位量の漏洩を設定した¹³⁷Cs濃度の数値シミュレーションの結果と1F NPP近傍のモニタリング値を比較し、直説漏洩量の逆推定を行った。1F NPP近傍のモニタリング値から、大きな直接漏洩は2011年3月26日から4月6日にかけて生じたと推定する。2011年3月26日から4月6日の1F NPP 近傍のモニタリング値の平均値は、11 kBq L⁻¹ (1.1×10⁴ Bq L⁻¹)であった。漏洩量の推定を目的とし、まずは単純化のために2011年3月26日から4月6日にかけて1 Bq s⁻¹の一定の漏洩率を1Fの前面海域のメッシュ（緯度経度、全20層に一樣に）に対して与えたシミュレーションを行った。漏洩を設定したメッシュの2011年3月26日から4月6日のシミュレーション結果の平均値がモニタリング結果の平均値と一致するように、漏洩率(1Bq s⁻¹)に対する倍率を2.55×10⁹と求め、漏洩量を逆推定した。2011年4月6日以降において、濃度の減少割合と一致するように漏洩率を指数関数的に減少させ、2011年4月25日以降は約1/100の値で一定とした。ただし、長期的には、2011年4月25日以降も減少を想定する必要があると考えられる（津旨ら、2012a; 2012b）。これらのシミュレーションにより見積もった一日あたりの漏洩率の時系列変化を図1に示す。

図2に1F NPP近傍の¹³⁷Cs濃度のモニタリング結果（5-6放水口と南放水口）とシミュレーション結果（漏洩を設

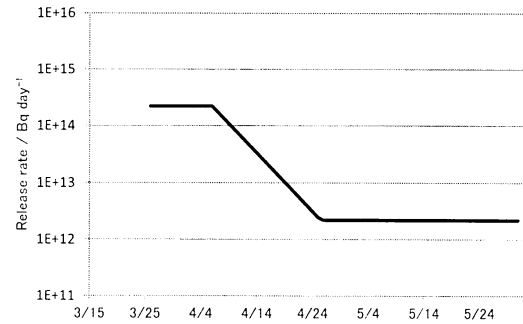


図1 見積もった¹³⁷Csの直接漏洩量の時系列変化

Figure 1 Estimated release rates of ¹³⁷Cs from observed data and simulation

定したメッシュ)の比較を示す。シミュレーション結果はモニタリング結果と概ね一致した。モニタリング結果において、2011年3月30日と4月6日に2つの濃度ピークが見られた。この2つのピークは、単純化のために漏洩率を一定にしたシミュレーションにおいても再現された。これはNuWFASによる現実的な風応力によって、沿岸流動の変動がよく再現されたためである。つまり、漏洩率が一定の場合においても、1Fの漏洩を設定したメッシュにおける流動が速い場合は濃度が低くなり、流動が遅い場合は濃度が高くなるという結果を反映したためである。2011年3月26日から4月6日の漏洩が支配的であり（この期間で2.6 PBq (2.6×10¹⁵ Bq)、2011年5月末までの¹³⁷Csの直接漏洩量の総量は3.5 PBq (3.5×10¹⁵ Bq)と推定した。日平均の濃度の分散は放出率の分散と等しいと考え、¹³⁷Csの直接漏洩量の総量は3.5±0.7 PBq ((3.5±0.7)×10¹⁵ Bq)と推定した。

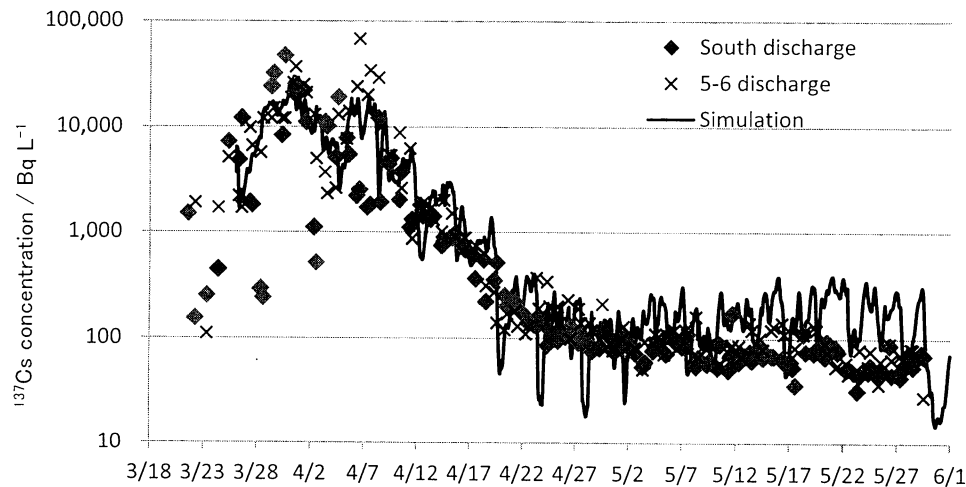


図2 1F NPP 近傍の¹³⁷Cs濃度のモニタリング結果とシミュレーション結果

Figure 2 Monitored and simulated ¹³⁷Cs concentrations at the 5-6 (north) and south discharge canals at 1F NPP.

(2) モニタリング結果との比較による検証

1F NPP からの直接漏洩を想定し、福島沖の ^{137}Cs 濃度のシミュレーションを行った。2F NPP の北放水口(1F NPP から 10km 南)と岩沢海岸 (1F NPP から 16km 南) における ^{137}Cs の表層濃度のモニタリング結果とシミュレーション結果の比較を図 3 に示す。2011 年 3 月 26 日以前にモニタリングされた ^{137}Cs 濃度は大気からの降下の影響と推定したため、直接漏洩のみを考慮したシミュレーションでは再現されていない。漏洩開始から約 1 日後の 2011 年 3 月 27 日から 1.0 kBq L^{-1} ($1.0 \times 10^3\text{ Bq L}^{-1}$) 近い濃度となり、その後 100 Bq L^{-1} 以下に低下、さらに 2011 年 4 月 5 日に 1.0 kBq L^{-1} ($1.0 \times 10^3\text{ Bq L}^{-1}$) 以上の濃度となる現象がよく再現されている。2011 年 3 月下旬に南下流に沿って運ばれ、その後、南下流成分が減少したため、濃度が下がった。その後、2011 年 4 月 3 日ぐらいから再び南下流が強化され、 ^{137}Cs 濃度が高い水塊が 2011 年 4 月 5 日にモニタリング地点に達した。NuWFAS の結果を用い、より現実に近い風応力の変動を与えたことによって、この濃度変化を再現できたと考えられる。その後、漏洩量の減少にともない、2F NPP 前のモニタリング地点においても、濃度は減少している。ただし、2011 年 4 月中旬以降は概ね 1 オーダー程度下回っている。シミュレーションでは $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ のメッシュの濃度を計算しているため、沿岸の極近傍ではモニタリングされた濃度との不-

致が生じている可能性がある。また今後、過小評価に対する別経路の漏洩による影響の可能性についても検討を行う必要がある。

(3) 表層濃度分布の挙動

図4に表層 ^{137}Cs 濃度分布を示す。直接漏洩した ^{137}Cs は、沿岸に沿って広がるとともに、外洋の中規模渦の存在により、複雑な挙動を示す。2011年4月8日では、沿岸に沿って広がり、茨城県沖の中規模渦の影響により、外洋へも運ばれている。2011年4月13日には沿岸に沿って南下し、福島県のいわき沖において比較的高濃度となっている。茨城県沖に存在した中規模渦によって、 ^{137}Cs は外洋に運ばれており、5月末までの期間は茨城県沖の濃度は低かったことを示唆している。これは、茨城県の波崎における観測結果が5月末まで低く、6月上旬の中規模渦の消滅とともに濃度が上昇したこと(Aoyama et al., 2012)と整合的である。 100 Bq L^{-1} を超える濃度が30km沖合に達しており、これは30km沖合いの観測結果と整合的である(津旨ら, 2011; Tsumune et al., 2012)。図4ではナッジングのための海洋再解析データとしてHYCOMを用いた結果を示しているが、JCOPE2に変更することによって、外洋への輸送プロセスの再現性は改善した(津旨ら, 2012a; 2012b)。2011年5月1日には千葉県沿岸部、2011年5月24日には仙台湾にも達しているが、濃度値は 10 Bq L^{-1} を大きく下回っている。外洋に運ばれた ^{137}Cs は黒潮によって、東に

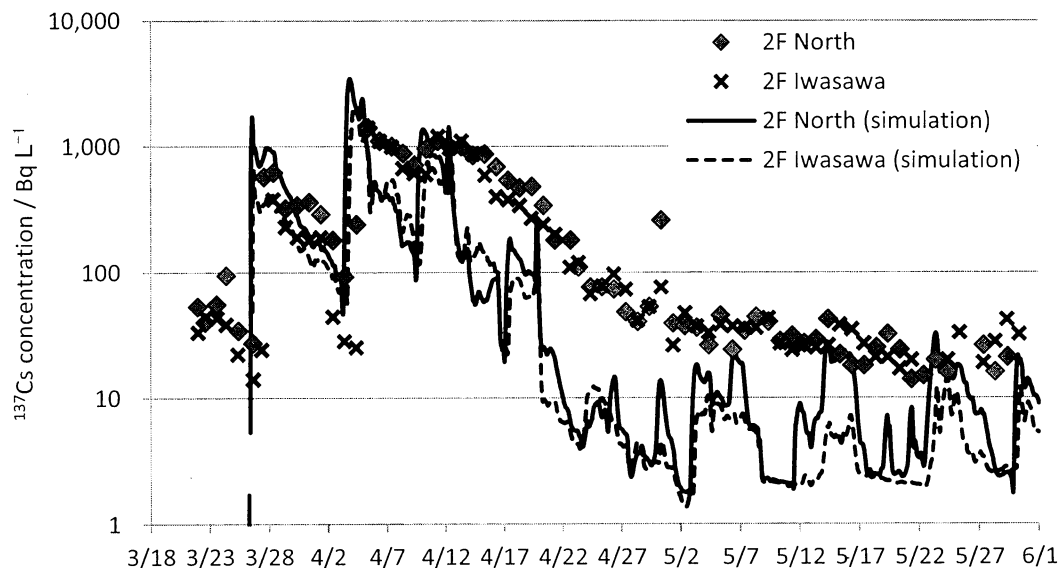


図3 2F NPP の北放水口 (1F NPP から 10km 南)と岩沢海岸 (1F NPP から 16km 南) における ^{137}Cs の表層濃度のモニタリング結果とシミュレーション結果

Figure 3 Monitored and simulated ^{137}Cs concentrations at the north discharge canals (10km south from 1F NPP) and Iwasawa coast (16km south from 1F NPP) near 2F NPP.

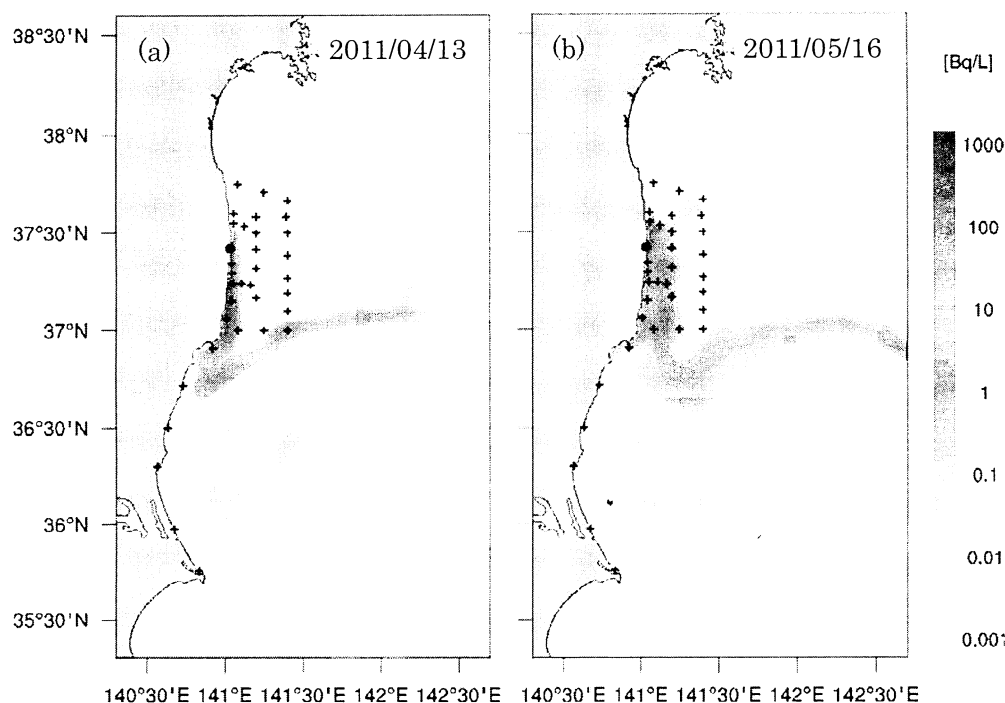


図4 表層 ^{137}Cs 濃度のシミュレーション結果、(a) 4月13日、(b) 5月16日

Figure 4 The distribution of surface ^{137}Cs concentrations at (a) April 13, (b) May 16.

運ばれる。これらのシミュレーションの結果から、2011年4月中旬には、30km圏外のいわき沖や30km沖合において、 100 Bq L^{-1} を超える濃度となるが、その後、減少に転じることが分かった。

4. まとめと他の直接漏洩量の推定結果との比較

1F NPPからの直接漏洩量は $3.5 \pm 0.7 \text{ PBq}$ と推定し、その漏洩シナリオを用いた分散シミュレーションを実施した。シミュレーション結果は、モニタリング結果と整合的であり、直接漏洩量の推定の妥当性を示すことができた。

ただし、限られたデータによる直接漏洩量の推定には不確実性が大きく、異なるモデルを用いた他機関の推定結果との比較検証が重要である。表1にMasumoto et al, (2012)の比較結果を更新し、他機関による推定結果をまとめた。東京電力は汚染水の直接漏洩量を目視により推定し、 ^{137}Cs 濃度を掛け合わせることで、4/1の昼から4/6の昼までの5日間の漏洩量が 0.94 PBq と推定していた。これはあくまでも目視によって確認された漏洩量であった。この値は電中研の推定結果と4/1-4/6の期間においてよく一致している。異なるアプローチによる推定結果の一致は、両方の推定の妥当性を示していると考えられる。東京電力の事故調査報告書においては、電中研と同様の手法で、1F NPPのモニタリングデータを元に3月26日から9月末までの漏洩量を 3.6 PBq としている。電中研との違いの 0.1 PBq は、評価期間の設定の違いによるものである。JAEAは、1F NPPのモニタリングデータと漏洩量が

比例すると想定した上で、4/1-4/6の期間の漏洩量が東京電力の目視による推定値と同じであるという想定を行い、 3.6 PBq としている。JAMSTECは複数のモニタリングデータに対するグリーン関数を用いた逆推定によって、 $5.5\text{--}5.7 \text{ PBq}$ という値を得た。IRSNは、限られたモニタリングデータから海洋の存在量を求め、 27 PBq という値を推定した。フランストゥールーズ大学のSiroccoグループは、1F NPP近傍のモニタリングデータを元にした数値シミュレーションによる逆推定によって、 4.2 PBq という値を得た。IRSNを除くと直接漏洩量の推定値は、 $3.5\text{--}5.6 \text{ PBq}$ の範囲となった。IRSNでは、推定した直接漏洩シナリオによる数値シミュレーションによる検証を行っていないので、今後の検証が望まれる。

今後は濃度評価の精度向上に加え、大気からの降下の影響の考慮、北太平洋スケールの評価、海底土や海生生物への移行過程などの課題が残されている。

謝辞：北海道大学池田元美名誉教授を初めとする日本海洋学会震災対応WG数値モデリングSWGのメンバー及び東京大学植松光夫教授から貴重な助言を得た。リアルタイム気象予測システム (NuWEAS) のデータの利用においては、電中研の平口博丸上席研究員と橋本篤主任研究員の協力を得た。数値シミュレーションにおいて電力計算センターの田口富貴子氏と丹羽亮介氏の助力を得た。ここに合わせて感謝する。シミュレーションには、電中研の大型計算機システム (SGI Altix ICE) を用いた。

表1 ^{137}Cs の直接漏洩量の推定結果Table 1. Estimated direct release rate of ^{137}Cs into the ocean

機関	期間	^{137}Cs の漏洩量 (PBq)	方法	文献
電中研	3/26-5/31	3.5±0.7	数値シミュレーションによる逆推定	津旨ら、2011; Tsumune et al., 2012
東京電力	4/1-4/6	0.94	目視により推定した漏洩水量×濃度	日本政府、2011
東京電力	3/26-9/30	3.6	数値シミュレーションによる逆推定(電中研と同様の手法で期間を延長)	東京電力、2012
IAEA	3/21-4/30	3.6	4/1-4/6 の総量が東京電力の目視による推定と同じという仮定	Kawamura et al., 2011; 小林ら、2012
JAMSTEC	3/21-4/30	5.5-5.7	数値シミュレーションによる逆推定	宮澤ら、2012
IRSN	3/25-7/18	27	観測結果から総量を推定	Bailly du Bois, et al., 2012
Sirocco	3/20-6/30	4.2	数値シミュレーションによる逆推定	Masumoto et al., 2012

参考文献

青山 道夫、1999. 金沢大学博士論文、100pp.

日本国政府、2011. http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.htm

小林 卓也ら、IAEA 公開ワークショップ、
<http://nsed.iaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/index.htm>

坪野 考樹ら、電力中央研究所研究報告書、V09040.

津旨 大輔ら、1998. 電中研研究報告書、U98029.

津旨 大輔ら、1999. 電中研研究報告書、U99007.

津旨 大輔ら、2000. 電中研研究報告書、U00040.

津旨 大輔ら、2010. 電中研研究報告書、V09041.

津旨 大輔ら、2011. 電中研研究報告書、V11002.

津旨 大輔ら、2012a. IAEA 公開ワークショップ、
<http://nsed.iaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/index.htm>

津旨 大輔ら、2012b. 経済産業省ワークショップ、
<http://www.nisa.meti.go.jp/shingikai/700/14/240723/240723.html>

東京電力、2012. 事故調査報告書、
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/interim/index-j.html>

橋本 篤ら、2010. 電中研研究報告書、N10044.

宮澤 泰正ら、2012. 経済産業省ワークショップ、
<http://www.nisa.meti.go.jp/shingikai/700/14/240723/240723.html>

Aoyama et al., 2012. Geochemical journal, 46, 321-325.

Bailly du Bois et al., 2012. J. Environ. Radioact.,
doi:10.1016/j.jenvrad.2011.11.015

Chassignet, et al., 2006. Generalized vertical coordinates for eddy-resolving
global and coastal ocean forecasts. Oceanogr. 19, 20-31.

Igarashi, et al., 2011. Urgent symposium, International Congress on Analytical
Sciences, Kyoto, Japan.

Kawamura et al., 2011. Journal of Nuclear Science and Technology, 48, 1349-
1356.

Kinoshita et al., 2011. Proceeding of the National Academy of Sciences 108:
19526-19529

Masumoto, et al., 2011. Urgent symposium, International Congress on
Analytical Sciences, Kyoto, Japan.

Masumoto et al., 2012, ELEMENT, 8, 207-212.

Miyazawa et al., 2009. Journal of Oceanography 65: 737-756

Skamarock et al., 2008. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp.

Shchepetkin and McWilliams, 2005. Ocean Modelling 9, 347-404.

Tsumune et al., 2000a. International Journal of Radioactive Materials Transport,
Vol. 11, No. 3, 239-253.,

Tsumune et al., 2000b. International Journal of Radioactive Materials
Transport, Vol. 11, 317-328, 2000b.

Tsumune et al., Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 248, 777-
783, 2001.

Tsumune et al., 2003a. J. Geophys. Res. 108(C8), 3262,
doi:10.1029/2002JC001434.

Tsumune et al., 2003b. J. Environ. Radioactivity 300, 958-961.

Tsumune et al., 2007. Journal of Packaging, Transport, Storage & Security of
Radioactive Materials, 18, 123-129.

Tsumune et al., 2011. Prog. Oceanogr., 89, 38-48,
doi:10.1016/j.pocean.2010.12.006.

Tsumune et al., 2012, J. Environ. Radioact., 111, 100-108,
doi:10.1016/j.jenvrad.2011.10.007.