

放出された放射能を追いかけてわかったこと⁽³⁾

—陸上に降下したものの行方

青山道夫 あおやま みちお

筑波大学客員教授、福島大学客員教授

陸上に降下した福島第一原発事故起源セシウムの挙動とその行方は、人々の関心事の一つである。陸から海への河川経由の福島事故起源セシウムの輸送量も陸上および海洋での挙動の研究の観点で重要である。最近、示唆に富む複数の研究成果が公表された。

再浮遊について

1つ目は再浮遊に関する Kinase らの論文¹である。日本では、1957年以來、ストロンチウム 90 やセシウム 137 などの人工放射性核種の降下物を測定してきた(本誌 2019 年 5 月号の青山の論考図 1、図 2、表 1)。2011 年 3 月に福島事故が発生し、茨城県つくば市の気象研究所でストロンチウム 90 やセシウム 137 の大幅な増加が検出された。継続的な観測により、2018 年のセシウム 137 の月間降下量はピークレベルの約 1/8100 に低下したが、事故前の約 400 倍以上にとどまっていることが明らかになった。安定同位体の化学分析により、ダスト粒子がつくばで観測された再浮遊したストロンチウム 90 やセシウム 137 の主要なキャリアであることを示唆した。現在、放射性壊変とその他の環境要因によるセシウム 137 降下量の有効半減期は 4.7 年であり、セシウム 137 降下量が事故前と同じレベルに戻るには 2011 年から約 42 年が必要であることが示唆されている。一方、現在のストロンチウム 90 降下量は、事故前の季節変動を示しており、事故前と同じレベルに戻っているとされている。彼らの結果は筆者が本誌 2019 年 7 月号の論考図 4 で示した福島県双葉郡や福島市でもセシウム 137 の月間降下量が下がらな

いことと整合し、広い範囲での現象であることを共に示唆している。

陸から海への河川経由の輸送について

2つ目は河川経由の陸から海への輸送を見積もった Sakuma らの論文²である。彼らはタンクモデルと L-Q 方程式を使用して、集水域からのセシウム 137 の河川輸送を評価および予測するための簡単なモデルを開発した。このモデルを用いて、福島事故直後から 2017 年までの阿武隈川と福島沿岸地域の他の 13 河川からのセシウム 137 の輸送量と降水量との比率を推定した。セシウム 137 の輸送(および集水域の降下物インベントリーに対する流失の比)は、事故後の最初の 6 カ月間の福島沿岸地域の阿武隈川と他の 13 の河川では、それぞれ 18 TBq(3.1%)と 11 TBq(0.79%)と推定された。河川を介した事故直後の海洋への影響は福島事故による直接漏洩および海洋への降下よりも 2 桁小さかったため限定的であることがわかった。近年では台風などの大規模出水時にセシウム 137 は大部分が粒子態で海洋に輸送されていることを明らかにした。彼らの結果は、筆者が最近投稿した論文(Impact of typhoons on particulate and dissolved ¹³⁷Cs activities in seawater off the Fukushima Prefecture: results from the SOSO 5 Rivers cruise (October 2014) Biogeosciences Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/bg-2020-491>, in review, 2021.)で示した、「河川経由による陸上からの寄与は、陸上での降水量を 7 日間積分した積算降水量と良い相関があり、出水時イベントの繰り返しが、2015 年以降では福島第一原発近傍を除くと福島沿岸での ¹³⁷Cs 放射能濃度変動の主体を形成していた。」と整合している。

森林に降下した放射性セシウムの挙動について

3つ目として、大気圏内核実験起源の日本の森林での約 50 年間の挙動を調査した Ito らの論文³の結果を紹介する。森林内におけるセシウム 137

の動態は 1986 年のチェルノブイリ原発事故後に広範に研究されており、その結果セシウム 137 は土壌粒子に吸着されて森林土壌の表層部に留まりながら長期的には放射性壊変により減少していくと予測されていた。しかし、チェルノブイリと日本ではセシウム 137 の動態にも違いが生じる可能性がある。森林総合研究所は福島事故発生の直前(2006~2010 年)に採取された全国の土壌試料を保管していた。その試料から空間的に全国で均一になるように抽出した 316 地点を対象とし、各地点の複数採取されていた 3000 点以上の表層土壌試料の分析から、主に大気圏内核実験に由来するセシウム 137 の森林土壌中の現存蓄積量を推定した。その結果、降下から半世紀が経過したセシウム 137 の現存蓄積量は放射性壊変によりピーク時蓄積量の半分以下になっており、日本の森林域のセシウム 137 蓄積量は $2.27 \pm 1.73 \text{ kBq m}^{-2}$ (2008 年 10 月 1 日時点、表層土壌 30 cm 以内)と推定された。さらに、セシウム 137 の深度分布を調べると、同じ森林内の繰り返し調査間でも深度分布のパターンが大きく異なり、単純に深さ方向への浸透だけでは説明できないパターンもみられるとして、セシウム 137 を吸着した表土が土壌侵食などによって局所的に移動していたことを示唆しているとしている。また重要なことは、今回推定されたセシウム 137 の蓄積量が気象庁などが観測した放射性壊変補正後の累積降水量と同程度であり、森林流域外への顕著な流出はなかったことがわかったことである。したがって、表土とともに移動したセシウム 137 は移動した先の表土に取り込まれて、森林内に留まっていたと考えられ、結論として森林に降下したセシウム 137 は森林内を移動しつつも、放射性壊変により減少した残りの大半は降下から半世紀後も森林内に留まっているとした。この結論は、どのような優秀なスパコンの数値シミュレーションの結果よりも雄弁に森林に降下した福島事故起源セシウムの 50 年後の姿を示していると筆者は考える。

大気・海洋モデルの性能向上と さらなる科学的知見の集積を

福島事故起源の放射性セシウムの海洋表層での長期挙動はモデル計算でもよく再現できており、今回の福島事故の影響評価のみならず、将来もしも沿岸に立地する原子力発電所あるいは原子力施設が事故を起こし放射性物質を海洋に注入したときにどのように挙動するかは、いまでもかなり予測することができる。またもしとれるならば対策をとることに寄与できる。しかし、例えば亜熱帯モード水から東シナ海低層を經由し日本海に到達した、観測では明瞭にとらえられている輸送^{4,5}は、残念ながら世界最先端のモデルでも再現できていない。海面にどのように降下したかにも依存するのは事実であるが、大気モデルの性能向上と合わせて海洋モデルの性能向上は今後の課題である。また、2020年になって太平洋を一周し与那国島に到達した福島事故起源セシウム 134 のシグナルは、極めて弱いながらも明瞭に観察されている。この約 10 年の時間スケールでの挙動は、今後少なくとも数年間は追跡し見極める必要があると筆者は考える。

日本だけでなくアジア各国の原子力発電所は沿岸に立地しているところが多いので、海洋の放射能汚染は筆者にとって依然としてとても気になるところである。海洋は人類全体の資源であり、2015年9月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」にて記載された 2030 年までの国際目標である「持続可能な開発目標(SDGs)」においても、目標 14 として「持続可能な開発のために海洋・海洋資源を保全し、持続可能な形で利用する」としている。そのためユネスコ政府間海洋学委員会(IOC)が中心となって、「持続可能な開発のための国連海洋科学の 10 年」(UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development)の準備が進められている。このような状況において、引き続き海洋における人工放射能汚染について科学的な知見を集積し、さらに研究を

進めることが大事であると筆者は考える。さらに、海洋における放射能汚染を今後起こさないために、沿岸に立地する原子力発電所はどう巨大地震に伴う地震動や津波に備えるかを明確にして、行動を起こすべきだと考える。例えば、数年前に東北電力女川原子力発電所を見学する機会があり、国内最高レベルの海拔 29 m の防潮堤の設置工事を行っている様子を見た。計算されていた津波の高さは最大 23.1 m と言っていた。理由を尋ねたら「作ることでできる最高の高さです」との回答であった。最近公表されている南海トラフの巨大地震による津波の高さが 34 m という報道に接し、正しく備えることの難しさを感じるとともに、正しく備えるべきであることを改めて認識した。次世代を担う若者を含めてすべての世代の人が自然に対する高い見識をもつことを望むとともに、今回の論考シリーズがそのための一助となることを願って稿を終える。

文献

- 1—Kinase, T., et al., Temporal variations of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in atmospheric depositions after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident with long-term observations. *Scientific Reports*, 2020. **10**(1): 21627.
- 2—Sakuma, K., et al., A modeling approach to estimate the ¹³⁷Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017. *J. Environ. Radioact.*, 2019. **208–209**: 106041.
- 3—Ito, E., et al., Global ¹³⁷Cs fallout inventories of forest soil across Japan and their consequences half a century later. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020. **225**: 106421.
- 4—Inomata, Y., et al., Transport of FNPP1-derived radiocaesium from subtropical mode water in the western North Pacific Ocean to the Sea of Japan. *Ocean Sci.*, 2018. **14**(4): 813–826.
- 5—Aoyama, M., et al., Recirculation of FNPP1-derived radiocaesium observed in winter 2015/2016 in coastal regions of Japan. *Appl. Radiat. Isot.*, 2017. **126**: 83–87.