

## 東京電力福島第一原子力発電所の 周辺における針葉樹の調査

渡辺 嘉人

Watanabe Yoshito

### 1. はじめに

2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）の事故により放出された放射性物質からの放射線による影響は、人だけでなく野生動植物に対しても懸念されている。そうした野生動植物への影響を把握するため、2011年度より警戒区域・帰還困難区域内の空間線量率が特に高い地域における調査が、環境省等の連携で行われている<sup>1)</sup>。本稿では、放射線に対する感受性が高いと考えられる針葉樹の調査について、チェルノブイリ原子力発電所事故後の周囲の森林における事例を参考にしながら、現状と課題について解説する。

### 2. チェルノブイリ原子力発電所事故における針葉樹の影響

チェルノブイリ原子力発電所は寒帯の針葉樹を中心とした森林に囲まれており、1986年春に発生した原子力発電所事故により広い範囲の森林が放射性物質に汚染した。森林植物の放射線影響について旧ソビエト連邦・ロシア・ウクライナ等で行われた調査の結果が、国際原子力機関（IAEA）の報告書にまとめられている<sup>2)</sup>。そこには、チェルノブイリ居住禁止区域（Chernobyl exclusion zone；CEZ）で森林樹木の枯死を含む放射線傷害が発生したものの、それが森林内の樹木種に均一に発生したわけではなく、また放射能汚染レベルや事故後の時期によっても放射線傷害の程度が異なっていたことが示されている。

放射性物質に汚染した森林で顕著だったのは森林を構成する針葉樹の傷害であり、この地域の在来種であるヨーロッパアカマツとドイツトウヒに明瞭な生物学的傷害が現れた。最も汚染度の高い“針葉樹枯死地域”（4 km<sup>2</sup>）ではこれらの針葉樹種は全て枯死してしまい、枯木の色から“赤い森”と呼ばれた。放射能汚染程度が低い地域ほど針葉樹の傷害は軽減し、“亜致死地域”（38 km<sup>2</sup>）では部分的な枯死や成長点部分の芯枯れ、“中程度傷害地域”（120 km<sup>2</sup>）では生殖阻害や茎葉の形態変化、“軽微傷害地域”では成長・生殖・形態の変化が観察された。一方で、これらの針葉樹と混生しているシラカバ等の広葉樹の放射線傷害は相対的にずっと小さく、針葉樹が全て枯死した“赤い森”においてさえ広葉樹では部分的傷害が観察されるに止まった。

針葉樹の枯死のような放射線傷害は原子力発電所事故発生後2～3週間以内に顕われ、その年の春～夏の間に進行した。こうした傷害に対しては事故初期の急性の放射線被ばくの寄与が大きく、大部分は植物体に付着した放射性核種からのβ線に起因すると考えられた。一方で、より長期的な慢性的放射線被ばくによる針葉樹の成長・形態の変化に関しては参照できる英語の文献が乏しいものの、“赤い森”の枯れた木立の伐採後に植栽されたヨーロッパアカマツで数年後に遅延性の形態変化が発生したとの知見が報告されている<sup>3)</sup>。

3. 福島第一原発事故後の森林の変化

福島第一原発の周囲には暖温帯の森林が多く広がり、2011年3月の事故発生後に陸地に流れた放射性核種はこうした森林に多く沈着した。この地域の森林には、コナラ等の広葉樹のほかに、アカマツ、スギ、ヒノキ、モミ等の針葉樹が混生している。警戒区域・帰還困難区域の森林では、こうした針葉樹を主な対象にして調査を行った<sup>1)</sup>。

事故発生当年11月の福島第一原発の警戒区域内の調査においては、発電所から西およそ3kmの最も汚染度の高い森林であっても、樹木の葉の黄化、形態異常のような外見的な放射線傷害の徴候は観察されなかった<sup>1,4)</sup>。したがって、チェルノブイリ原子力発電所の事故後に周囲の森林で発生したような急性の放射線被ばくによる大規模な放射線傷害は、今回の事故後には発生していないと考えられた。しかし、放射線による樹木の中長期的な影響を観察するため、その後も帰還困難区域内において継続的に調査を行った。

事故から約4年後の2015年1月の調査では、森林に自生するモミ個体群の樹木形態の観察を行った<sup>5)</sup>。帰還困難区域内の3か所の試験区、及びそこから離れた地域内の1か所の対照区において、各試験区にそれぞれ800~1,200m<sup>2</sup>の区画を設けて、区画内に自生するモミの幼木(高さ40cm~5m)の全ての個体を観察対象にした(図1)。帰還困難区域内の空間線量率が特に高い地域に自生するモミ個体群では、空間線量率が低い地域の個体群と比べて形態変化の発生頻度の顕著な増加が認められた(図2)。また、空間線量率に依

存してその頻度が高くなっていることが分かった。モミは通常は1本の主幹が垂直に伸びるのに対して、形態変化個体では主幹の欠損に起因した二股様の分枝が特徴的に認められた。樹木

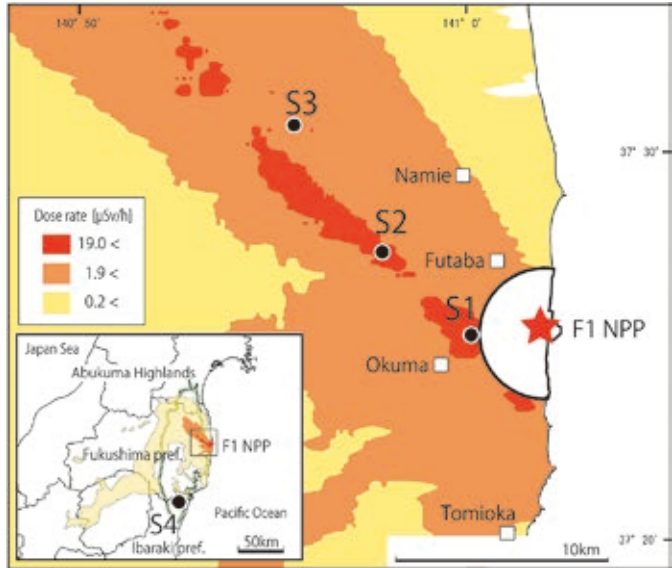


図1 観察地点  
S1~S3: 帰還困難区域内の試験区, S4: 対照区。空間線量率の表示は2013年1月19日航空機サーベいの測定値<sup>6)</sup>

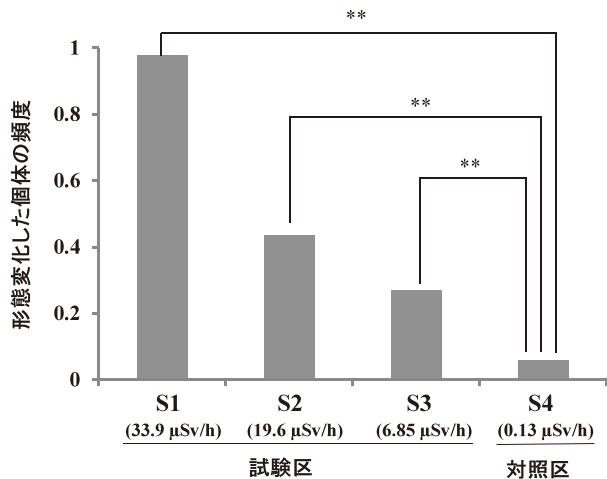


図2 各試験区におけるモミの形態変化の発生頻度  
各試験区の観測時(2015年1月)の空間線量率を( )内に示した。\*\*は、各試験区と対照区の間で変化個体の頻度に統計的有意差があることを示す

個体ごとに主幹欠損の発生部位を同定すると、帰還困難区域内の試験区では事故後の2012～2013年の伸長部位で主幹欠損の発生頻度に顕著な増加が認められた(図3)。チェルノブイリ原子力発電所事故でも示されたように針葉樹の放射線感受性が高いことを踏まえると、この結果は放射線が東電福島第一原発近くの地域におけるモミの形態変化の一因となっている可能性を示唆するものである。

#### 4. 今後の課題

以上のように、福島県の帰還困難区域内の空間線量率が特に高い地域に自生するモミ個体群で、空間線量率が低い地域の個体群と比べて形態変化の発生頻度の顕著な増加が認められた。しかし注意が必要なのは、モミで観察された形態変化自体は放射線に特異的な現象ではなく、放射線以外の環境要因や物理的傷害(食害)などで発生し得ることである。実際に、モミの形態異常は空間線量率が低い対照地域においても数%の頻度で観察されており(図2)、これは放射線以外の要因によるものと考えられる。

形態変化に関与する環境要因等の中に仮に空間放射線量率と類似した変化を示すものがあると、空間放射線量率とモミの形態異常頻度との間に実際には因果関係がなくても、相関関係が現れてしまう可能性がある。自然環境下の野外調査ではこのような疑似相関が現れる危険性が大きいので、試験区間の比較において統計的な相関関係を調べるだけでは、放射能汚染とモミの形態変化との間の因果関係を証明するには不十分と考えられる。こうした因果関係を明確にするためには実験室的な検証研究を加えることが必須であり、環境条件を制御した実験施設内でモミに対して人為的な放射線照射を行って野外と同様の形態変化が発生するかを調べるこ

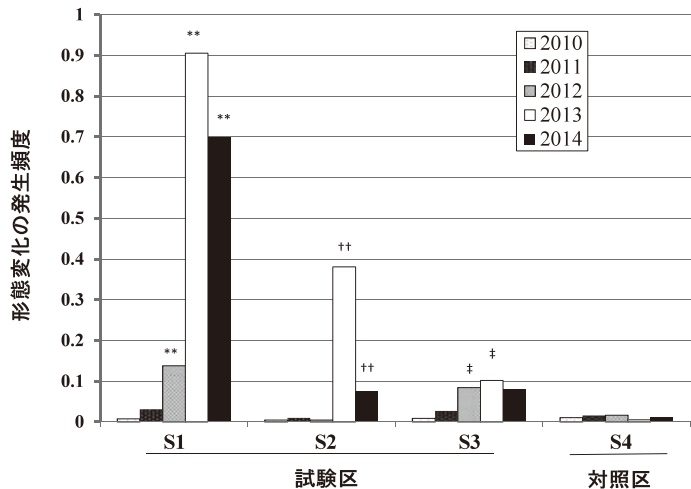


図3 モミの形態変化発生頻度の経年変化  
 \*\*, +, †等の記号は、変化個体の頻度が2010年に比べて統計的に有意に高いことを示す

を考えている。

また、こうした放射線照射施設での検証実験で帰還困難区域と同様の放射線被ばく状況を再現するためには、帰還困難区域内でモミが実際に被ばくした放射線量を正確に推定することも重要である。推定した被ばく線量と、放射線照射施設でモミに形態発生が発生する放射線量とを比較することで、帰還困難区域内での形態変化の発生を被ばく線量との因果関係で説明するのが合理的であるかを判断することが可能になる。そのために、モミのような針葉樹の成長部位における被ばく線量を推定するための線量評価モデルを構築して、福島第一原発事故後の針葉樹の被ばく線量の推移を再構築することも重要な課題であると考えている。

#### 【備考】

本稿に掲載しているモミの形態異常に関する内容は、Y. Watanabeらによる“Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”を基にしており、クリエイティブ・コモンズの下でライセンスされている。

## 参考文献

- 1) 環境省, 野生動植物モニタリングの測定結果, [https://www.env.go.jp/jishin/monitoring/results\\_r-wl.html](https://www.env.go.jp/jishin/monitoring/results_r-wl.html)
- 2) International Atomic Energy Agency, “Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience,” Report of the Chernobyl Forum Expert Group ‘Environment’, IAEA (2006)
- 3) Yoschenko, V.I., *et al.*, Chronic irradiation of scots pine trees (*Pinus Sylvestris*) in the Chernobyl exclusion zone: dosimetry and radiobiological effects, *Health Phys.*, **101**, 393–408 (2011)
- 4) Watanabe, Y., *et al.*, Effects of radionuclide contamination on forest trees in the exclusion zone around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Proceedings of the International Symposium on Environmental Monitoring and Dose Estimation of Residents after Accident of TEPCO’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations*, 2–14 (2012)
- 5) Watanabe, Y., *et al.*, Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Scientific Reports*, **5**, 13232 (2015)
- 6) 文部科学省, 放射線量等分布マップ, <http://ramap.jaea.go.jp/map/>

(放射線医学総合研究所)