

東京電力福島第一原子力事故由来の放射性物質によるスギの初期汚染状況

小川秀樹、伊藤博久、村上海、熊田淳^{*1}、
平野由里香^{*2}、伊芸滋光^{*2}、横田かほり^{*2}、吉田博久^{*2}

The early stage pollution of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*)
by radioactive nuclear from the accident of Tokyo Electric Power Company
Fukushima Dai-ichi nuclear power plant.

目 次

要旨	
I はじめに	2
II 事故 5 ヶ月後におけるスギ表面の放射性 Cs 濃度分布	2
1 調査地	2
2 サンプルングおよび測定の方法	3
3 結果と考察	3
III 事故 1 年後におけるスギ幹材部の放射性 Cs 濃度分布	7
1 サンプルングおよび測定の方法	7
2 結果と考察	8
IV おわりに	9
V 引用文献	10

要 旨

東京電力福島第一原子力発電所事故由来の放射性物質によるスギ立木の初期の汚染状況を調査するため、事故 5 ヶ月後の 2011 年 8 月に福島第一原子力発電所から約 65 km 西方に位置する郡山市の調査地においてスギ 1 本から高さ別に試料を採取し、IP 測定および放射性 Cs 濃度の測定を行った。その結果、葉・枝・樹皮の表面に放射性物質が付着し、その汚染レベルは部位や採取高、方位によって異なっていた。さらに事故 1 年後の 2012 年 5 月には福島原子力発電所から 30～60 km 圏内に位置する林分 5 地点から各 2 本のスギ立木を伐採し、幹材部の放射性 Cs 濃度分布を測定した。その結果、辺材の放射性 Cs 濃度は採取した高さにかかわらずほぼ一定であるのに対し、心材は採取した高さや径によって放射性 Cs 濃度が異なることが明らかとなった。

キーワード：セシウム、スギ、東京電力

受付日 平成 26 年 6 月 17 日

受理日 平成 26 年 7 月 22 日

課題名 立木における放射性物質の汚染実態の把握（平成 23～24 年度）

※ 1 県南農林事務所

※ 2 首都大学東京都市環境科学研究科

I はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウム（Cs）は、大気中に拡散後に広い地域に降下し（以下「フォールアウト」とする）、事故から3年が経過した現在も東日本の広範囲で観測されている。福島県では、福島第一原子力発電所から北西方面の浪江町や飯館村、中通り地方の福島市、二本松市、郡山市などに放射性Csが多く沈着している状況にある。福島県の県土の70%の面積を占める森林もその多くが汚染され、その一部は高濃度に汚染されたことから、帰宅困難区域や居住制限区域では森林内作業が制限されているほか、空間線量率が2.5 $\mu\text{Sv/h}$ を超える地域では森林施業が自粛されている⁷⁾。さらに製材品の利用にあたっては、安全・安心確保のため、県による製材品の確認調査が実施されている²⁾。

チェルノブイリ事故においても広大な面積の森林が汚染されたが、国際原子力機構（International Atomic Energy Agency, IAEA）は報告書において放射性物質による森林汚染を、樹木の枝葉や樹皮に大量に捕捉された放射性物質（以下「外部汚染」）が雨水や落葉等により地表面へと急速に移行する初期段階と、経根吸収により樹体に取り込まれた放射性物質（以下「内部汚染」）が森林生態系の中で循環し安定的に存在する定常段階の2期に分けている³⁾。今回の事故に関しては現在初期段階にあると考えられる。

現在、樹木の内部汚染は外部汚染に比べて低く、ほとんどの地域において製材品としての利用に問題が無いレベルにある²⁾。しかし、素材生産時に林地残材となる枝葉や、製材時に発生する樹皮の表面に放射性物質が付着していることから、適切な処理が必要となる。また、樹木に付着した放射性Csは急速にその分布を変化させることから、初期の汚染状況を調査し、至急現場にフィードバックすることが必要である。さらに、今後の木材利用のためには、材部の長期的な汚染の推移予測も必要であり、そのためには初期汚染に関するデータは重要な基礎資料となる。

そこで本研究では、初期のスギ立木の汚染実態を明らかにするために、事故から5ヶ月後および1年後にスギ立木の汚染状況を調査した。

II 事故5ヶ月後におけるスギ表面の放射性Cs濃度分布

1 調査地

福島第一原子力発電所から約65 km西方に位置する福島県林業研究センター内（郡山市）のスギ人工林を調査地とした。2011年8月3日に調査地内に10 m×10 mのプロットを設定し、プロットの各頂点及び中心位置の地上高100 cm、50 cm、1 cmにおいて、空間線量計（Polimatrix社製PM1703MO-1）を用いて空間線量率を測定した。その結果、地上高100 cmでは0.95 $\mu\text{Sv/h}$ 、地上高50 cmでは0.94 $\mu\text{Sv/h}$ 、地上高1 cmでは0.85 $\mu\text{Sv/h}$ であった。現在、森林施業の自粛が求められているのは2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 以上の区域であることから⁷⁾、当該調査地は通常的林業活動が実施可能なエリアとなる。

なお、文部科学省が実施した航空機モニタリング調査によると、当調査地の地表面に沈着した放射性Cs137量は100–300 kBq/m^2 の範囲であり⁶⁾、この範囲には福島県中通り地方の森林が広く含まれる。今後は、これらの森林資源の利活用等が課題となることから、

当該地域での立木汚染状況の調査結果は、今後の森林利用に向けての参考となる。

2 サンプルングおよび測定の方法

事故から約5か月後の2011年8月3日に、調査地林縁からおおよそ20mほど内側に位置するスギ立木1本を伐採した。調査木は樹高20.9m、林齢は46年生であった。調査木から枝・葉・樹皮を高さ別に採取した。葉・枝は立木北面から高さ方向に0.5m間隔で採取し、樹皮は高さ方向に4.2m間隔で採取した円盤から剥皮した。

さらに、採取したサンプルを粉砕し、試料分量に応じ以下2種類のNaI検出器により重量あたりの放射性Cs134濃度および放射性Cs137濃度（以下「放射性Cs濃度」とする）を求めた。枝・葉は粉砕後に350ml容器に詰めてNaI検出器（EMF社製EMF211型ガンマ線スペクトロメータ）を用い積算時間900秒で測定した。樹皮は採取した円盤の4方位からそれぞれ樹皮を採取し、粉砕後に20ml容器に詰めてNaI検出器（PerkinElmer社製2480WIZARD²オートガンマカウンター）を用い積算時間1800秒で放射性Cs濃度を求め、さらに4方位の濃度を平均した。乾燥重量当たりの放射性Cs濃度を求めるため、測定用試料と同一のサンプルから約20gを取り出し、105℃で全乾状態まで乾燥し含水率を求め、含水率補正を行った。

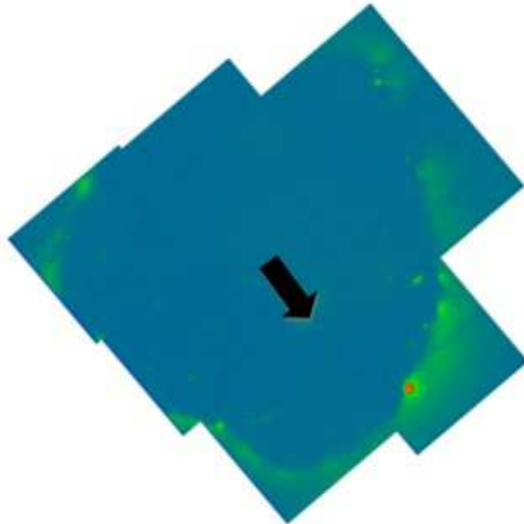
放射性物質の2次元分布状況を確認するためImaging Plate（以下「IP」とする；富士フイルム社製BAS-SR）を用いて、各部位を測定した。IPは光輝尽性蛍光体膜及びレーザービームによる画像読取装置からなる検出器であり、放射性物質の分布に応じて蛍光が発せられる。蛍光の強度は露光時間に比例することから、測定する部位の汚染度により露光時間を変えて測定を実施した。各部位の露光時間は、枝・葉部を6時間、樹皮部外皮面を6時間、樹皮部形成層面を12時間、樹皮付きの円盤木口面を72時間とした。

さらに樹幹表面の汚染状況を確認するため、高さ別に採取した円盤の樹皮の表面線量率をGM管式サーベイメータ（ALOKA社TGS-146B）で方位別に測定した。GM管式サーベイメータは、試料を非破壊で測定することが可能であることから、伐採木周辺のスギ14本の樹皮の表面線量率を立木状態のまま地上高1.0mの位置で方位別に測定した。表面線量率の測定に際しては、機器の時定数を10に設定し30秒間測定し、その値から時定数を30に設定して90秒間測定したバックグラウンド値を差し引いて求めた。

3 結果と考察

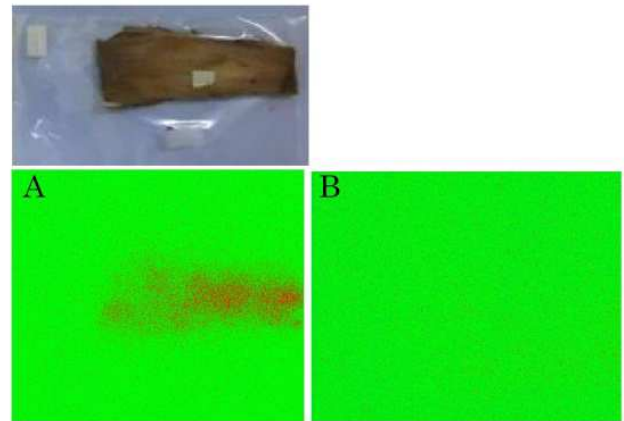
（1）各部位の放射性物質の2次元分布状況について

調査木の地際から採取した樹皮つき円盤の木口面をIP測定した結果を図-1に示す。樹皮では強い蛍光が測定されたが、材部では蛍光は測定されず、樹皮に多くの放射性物質が存在することが確認された。なお、材の一部に見られる蛍光は、蛍光の状況から円盤切断時に付着した樹皮が原因と考えられる。また、樹皮の蛍光を方位別で比較すると、立木の北西面の蛍光が他の方面に比べて強かった。



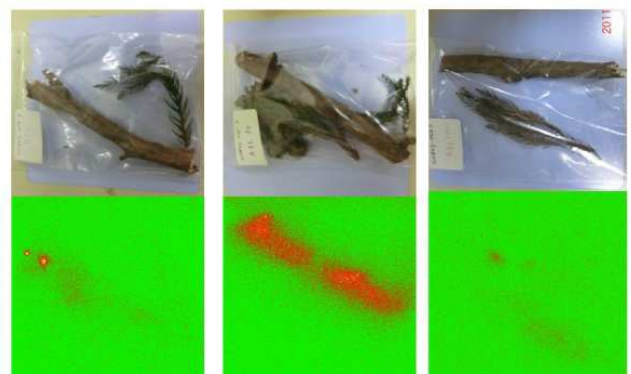
図－１ 樹皮付き円盤の IP 画像。露光時間は 72 時間。左図の矢印は北西方位を示す。

樹皮の汚染状況をより詳細に調査するため、樹高 10.9 m の位置で採取した樹皮の外皮面とその裏側となる形成層面をそれぞれ IP 測定した。その結果、外皮表面は露光 6 時間で蛍光が測定されたが、形成層面では 2 倍の露光 12 時間でも蛍光が測定されなかった（図－2）。この結果から、樹皮の汚染は表面部分に付着した放射性物質が原因であることが確認された。



図－2 樹皮の外皮面(A)と形成層面(B)の IP 画像。露光時間は外皮面が 6 時間、形成層面が 12 時間。

さらに葉と枝を樹冠の上部・中央部・下部から採取し IP 測定した（図－3）。枝の測定結果では、中央部の枝は全体が強く蛍光しているのに対して、上部・下部の枝は弱い蛍光が確認されるのみであった。このことから、樹冠の中央部の枝が強く汚染されていることがわかった。またいずれの枝でもスポット的な蛍光が測定されていることから、放射性物質の一部は粒子状で枝表面に付着したと推測される。



図－3 葉・枝部の IP 画像。露光時間は 6 時間。左から樹冠の上部、中央部、下部。

葉ではいずれの位置の試料においても蛍光はほとんど測定されなかった。このことから枝に比べると葉の汚染度は低く、葉を IP で測定するためには今回実施した 6 時間以上の露光が必要であったと考えられる。

（２） 葉・枝・樹皮の高さ別の放射性 Cs 濃度分布状況について

高さ方向の汚染分布をより詳細に把握するため、高さ別に採取した葉・枝・樹皮の乾燥重量当たりの放射性 Cs 濃度を測定した。測定結果を図-4に示す。葉は採取高によって濃度に大きなばらつきがあるが、先端から高さ 12 m までの樹冠上部がその下部に比べて濃度が高い傾向にあった。また樹皮では、立木の先端に近い位置と根元に近い位置で濃度が高くなる傾向にあった。

葉・樹皮とも立木上部で高濃度となった原因は、調査地がほぼ一定の樹高からなるスギ林分であり、フォールアウト時に放射性物質が調査木の上部に直接付着したためと考えられる。また樹皮の濃度は、枝葉がついている高さでは低いものの、その下の高さでは再び高くなっている。これは枝葉によって放射性 Cs が樹皮に直接付着することが妨げられたこと、また立木に付着した放射性 Cs が雨水などにより根元方向に流下したことが原因として考えられる。

なお、枝は葉に比べると濃度が低く、また高さ別の結果では先端に近づくほど濃度が高くなるなど IP の測定とは異なる結果となった。これは枝の測定試料が濃度の低い材も含めて粉砕したため濃度が薄まったことが原因であり、実際には、枝の表面には葉に比べて多くの放射性 Cs が付着していると推察される。

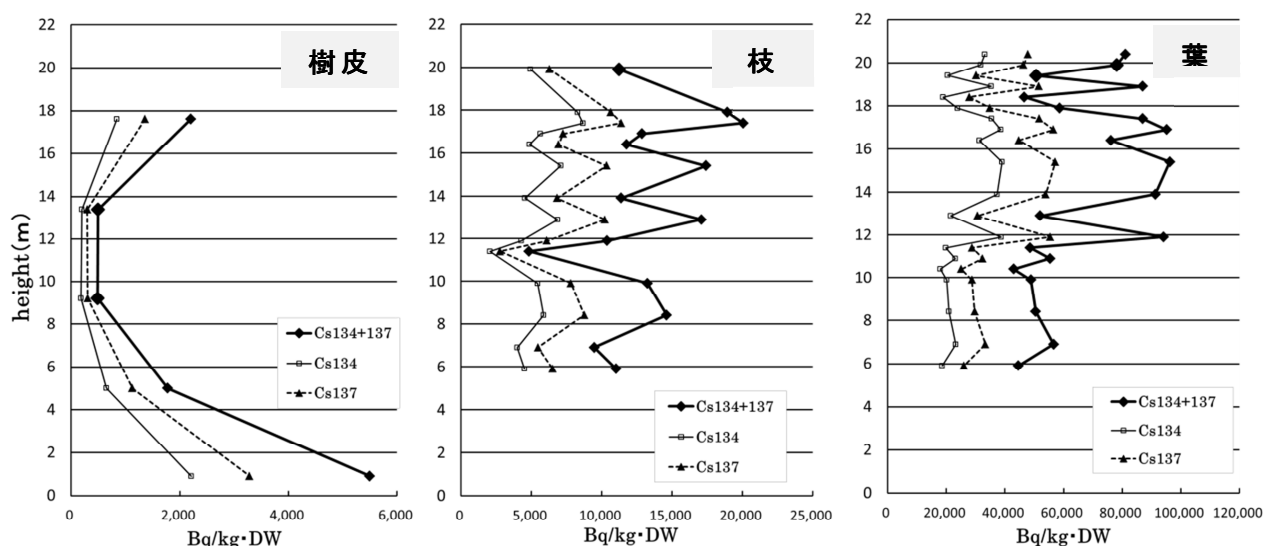


図-4 樹皮、枝、葉の放射性 Cs 濃度の垂直分布

(3) 樹幹表面の方位別の汚染状況について

立木の方角別の汚染状況を調査するため、高さ別に採取した円盤の樹皮の表面線量率を GM 管式サーベイメータを用いて方位別に測定した。測定結果は図-5のとおりであり、円盤の IP 測定結果 (図-1) と同様、すべての高さにおいて北西方面が南東方面に対して高い値となった。特に立木先端に最も近い採取高 17.6 m の円盤でその傾向が大きかった。なお、各採取高の平均値は、先端部に近い採取高 17.6 m と根元部に近い採取高 0.9 m で高い値を示しているが、これは樹皮部の放射性 Cs 濃度の測定結果 (図-4) と同様の傾向であった。さらに、調査木周辺に生育するスギ立木 14 本の樹幹の表面線量率を立木状態で測定したところ、結果は図-6 となり、ほとんどの立木で調査木と同様に北西方面が高い傾向が得られた。

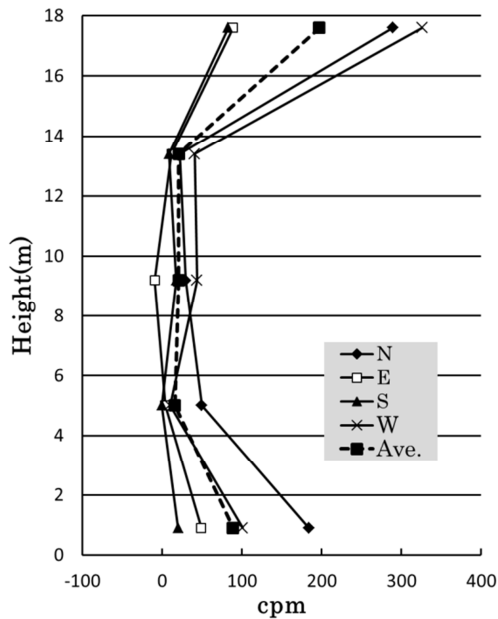


図-5 樹皮表面線量率の垂直分布

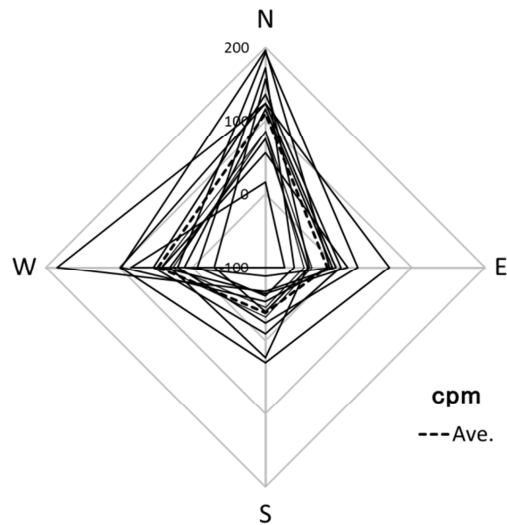


図-6 スギ14本の樹皮方位別表面線量率

以上から、当該調査地のスギ林では樹皮の北西方面に放射性物質が多く付着していることが確認された。調査木では特に採取高 17.6 m でこの傾向が顕著であったが、採取高 17.6 m は先端に最も近いいためフォールアウト時に放射性物質がより直接付着し、またその後の樹幹流の影響も受けにくいことを考えると、当初のフォールアウトに方向性があったと推測される。

図-7 は福島県が事故後から継続的に実施している郡山市の空間線量率モニタリング結果のうち、3月15日前後のデータを抜粋しグラフ化したものである¹⁾。これによると郡山市では2011年3月15日14時5分に空間線量率が最高値を記録しており、郡山市周辺ではこの時刻に放射性物質が

大規模にフォールアウトしたと考えられる。気象庁によるとその時刻に郡山市では降雨は観測されておらず、また、14時頃の風向きは北東-北西の風であり樹幹の汚染の方向とおおむね一致している⁴⁾。このことから、当該森林には霧状の放射性物質が風に乗って水平方向からフォールアウトし、そのため樹皮の汚染に方向性が生じたと推察される。

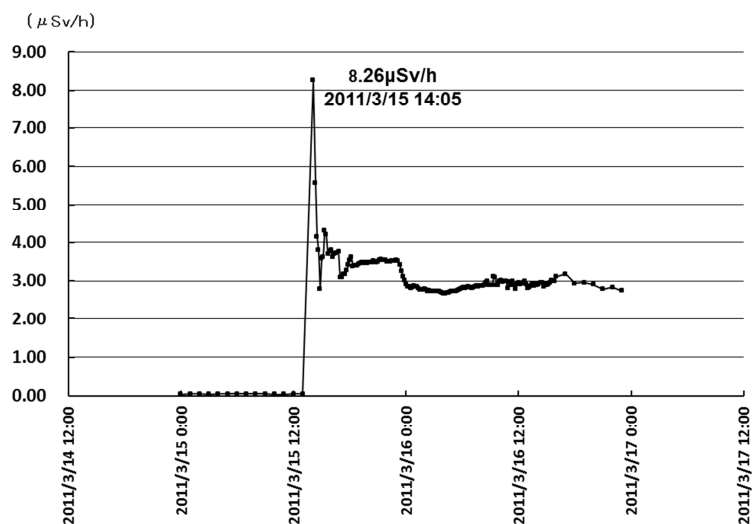


図-7 郡山市における事故前後の空間線量率の変化。福島県が実施しているモニタリング結果をもとに作成。

Ⅲ 事故 1 年後におけるスギ幹材部の放射性 Cs 濃度分布

1 サンプルングおよび測定の方法

スギ立木の幹材部の放射性 Cs による汚染実態を把握するため、事故の約 1 年後となる 2012 年 5 月に福島第一原子力発電所から 30～60 km 圏内に位置する林分 5 地点（空間線量 0.45～0.93 $\mu\text{Sv/h}$ ；放射性 Cs137 沈着量⁶⁾ 100～600 kBq/m^2 ）を選定し、各林分から 2 本（ $n=10$ 、樹高 24.0～14.9 m）のスギ立木を選木し伐採した。測定に用いた立木の基本データを表－1 に示す。

また伐採に先立ち空間線量計（Polimatrix 社製 PM1703MO-1）を用いて立木周辺の空間線量率を求めた。測定方法は、伐採する立木を中心として東西南北に斜距離で 5.0 m 離れた位置の地上高 1.0 m で 30 秒間測定し、得られた各方位の数値を平均して立木周辺の空間線量率とした。

さらに各立木について樹齢（year）、胸高直径（m）、樹高（m）、枝下高（m）、立木密度（ m^{-2} ）の測定を行った（表－1）。樹齢については採取高 0.5 m で得られた円盤の年輪数により求め、枝下高については樹冠最下部の生きた枝までの高さを求め、立木密度は伐採木を中心とした 10 m × 10 m の範囲における立木数をカウントした。なお、7-2 の立木は伐倒後に先折れが確認され、損傷の状況からフォールアウト時に既に先端が折れていたと判断された。

表－1 調査林分およびサンプル立木の特徴

No	沈着量 ^{*1} kBq/m^2	空間線量率 ^{*2} $\mu\text{Sv/h}$	縁/内 ^{*3}	林齢 ^{*4} year	直径 ^{*5} m	樹高 ^{*6} m	枝下高 ^{*7} m	密度 ^{*8} m^{-2}
3-1	100 - 300	0.65	Ed	48	0.36	19.4	6.4	-
3-2		0.61		38	0.19	17.4	3.1	-
4-1	100 - 300	0.78	In	47	0.22	13.6	3.5	15
4-2		0.79		41	0.15	12.2	3.3	15
5-1	300 - 600	0.93	In	56	0.35	22.5	13.2	13
5-2		0.86		53	0.26	24.0	15.3	13
6-1	100 - 300	0.48	In	49	0.3	22.7	9.0	6
6-2		0.45		39	0.22	19.5	8.4	11
7-1	100 - 300	0.68	In	38	0.19	17.7	3.3	10
7-2		0.57		30	0.23	14.9 ^{*9}	7.4	13

*1 航空機モニタリングより見積もられた Cs-137 の蓄積量⁶⁾

*2 サンプル立木から東西南北に 5 m 離れた位置における空間線量率の平均値

*3 「Ed」は林縁、「In」は林内

*4 高さ 0.5 m の円盤の年輪数

*5 高さ 1.2 m の位置における直径

*6 地上から立木の先端までの距離

*7 地上から最下高にある生枝までの距離

*8 立木密度（100 m^2 あたり）

*9 先折れが確認された立木

2 結果と考察

各立木における放射性 Cs 濃度の分布状況を図-8 に示す。立木の放射性 Cs 濃度分布を規格化するため、採取高 0.5 m の辺材の放射性 Cs 濃度 ($C_{sap-0.5}$) を内部基準とし、各材の放射性 Cs 濃度をそれに対する比率 ($C/C_{sap-0.5}$) で示した。縦軸を $C/C_{sap-0.5}$ 、横軸を円盤髓心からの距離 (ΔL (mm)) とし、立木毎に汚染分布を表した。

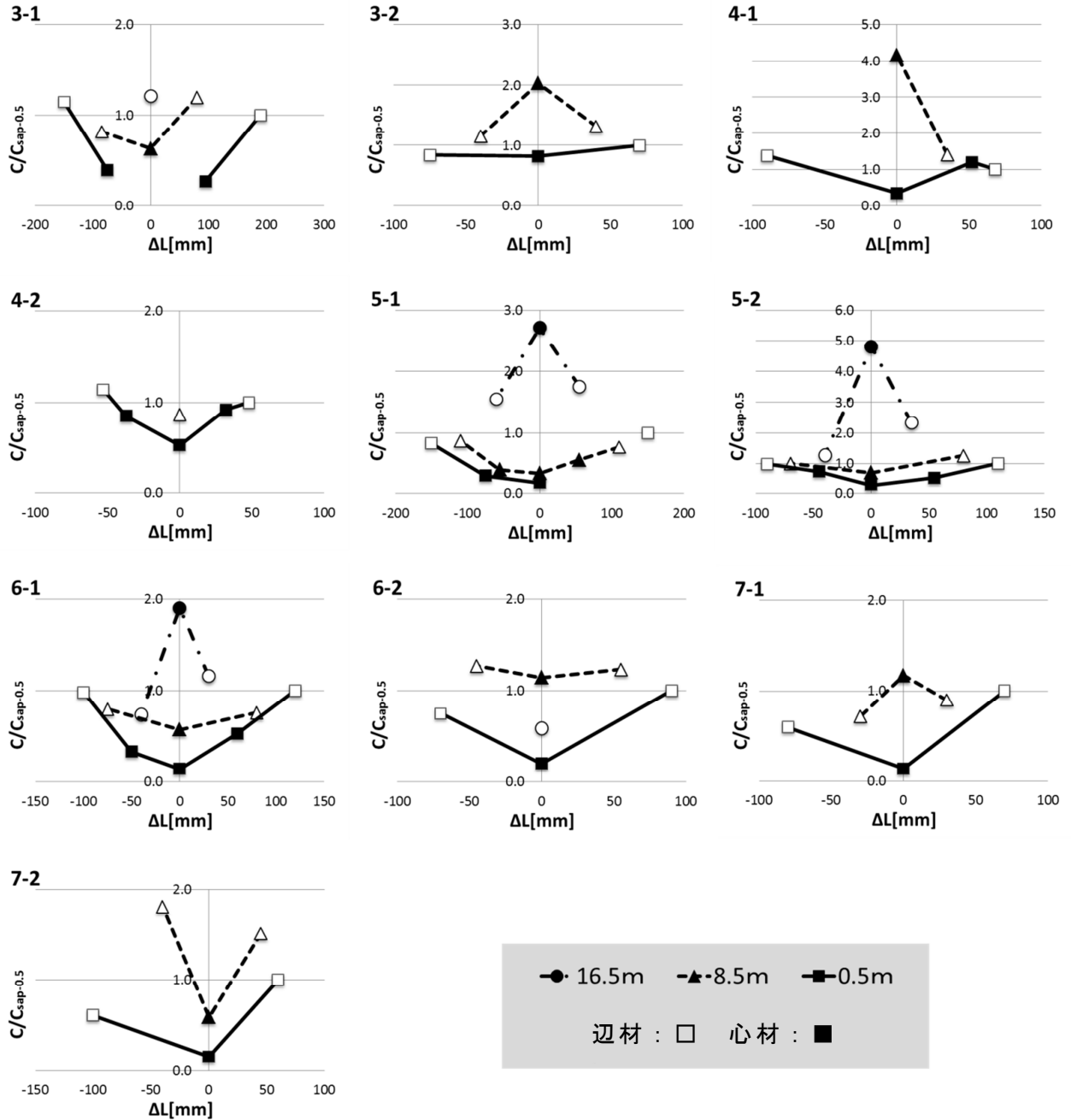


図-8 各立木における幹材部の放射性 Cs 濃度分布

各立木の放射性 Cs 濃度の水平分布をみると、採取高 0.5 m ではすべての立木 ($n=10$) で円盤の外側に位置する辺材がもっとも高くそこから髓心の心材に向かって濃度が低下する傾向がみられた。しかし、採取高 8.5 m では心材が得られた 9 本中 3 本で、採取高 16.5

mでは心材が得られた3本中3本で、辺材より心材の放射性Cs濃度が高くなる傾向が確認された。

また、垂直分布をみると、辺材は採取高にかかわらずほぼ放射性Cs濃度が一定であるのに対し、心材は採取高が高くなるにつれて放射性Cs濃度も高くなる傾向が見られた。しかし、先折れしていた7-2は、採取高0.5mより採取高8.5mの辺材の放射性Cs濃度が明らかに高く、他の立木と分布傾向が異なっていた。

さらに、円盤径と心材の放射性Cs濃度の関係についても検討を行った。円盤毎に、辺材の放射性Cs濃度の平均値(C_{sap})に対する心材の放射性Cs濃度の平均値(C_{heart})の比(C_{heart}/C_{sap})を求め、 C_{heart}/C_{sap} と円盤径(D_1 (mm))の関係を図-9に

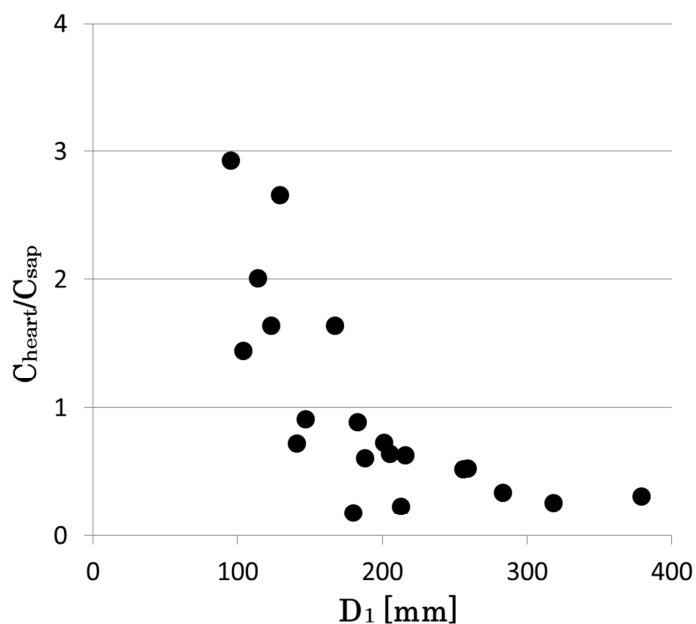


図-9 円盤径と心材の放射性Cs濃度の関係

示した。この結果、円盤径が小さくなるほど C_{heart}/C_{sap} が大きくなる傾向が認められ、特に円盤径が100-200mmを境に、 C_{heart}/C_{sap} は急激に上昇した。同一立木内であれば辺材の放射性Cs濃度が垂直方向でほとんど変わらないことを考慮すると、円盤径が小さいほど立木の先端に近い位置となり、心材の放射性Cs濃度が高くなると考えられる。

以上の結果から、同一立木内でも心材は採取する位置や円盤径によって放射性Cs濃度が異なるという汚染分布の特性が明らかとなった。また、製材品として最も利用が期待される根元部の1・2番玉は一般に径が大きいことから、幹材部の放射性Cs濃度が相対的に低いと考えられる。現時点では木材利用に関する基準値は決められてはいないものの、より放射性物質が含まれない材の提供が利用者の安心につながるという意味においては、比較的利用しやすい状況にあると考えられる。

ただし樹木による大気核実験由来の放射性物質の取り込み状況に関する過去の研究では、フォールアウトから数十年以上経過したスギの幹材部では、根元に近い位置でも辺材より心材の放射性Cs濃度が高くなることが知られており⁵⁾、今回確認された放射性セシウム濃度の分布も今後変化していくと考えられる。

なお、事故当年では根の深度まで土壌中の放射性Csが達していないことが明らかとなっており⁸⁾、このことから材部の放射性Csは葉面あるいは樹皮面から樹体内に移行した可能性が高いと推察される。

IV おわりに

事故初期のスギ立木の汚染状況を把握するため、事故から5ヶ月後にスギ1本を伐採し高さ別に採取した葉・枝・樹皮部について、放射性物質の2次元分布測定、放射性Cs濃度の測定、表面線量率の測定を行った。その結果、事故5か月後においては、葉・枝・

樹皮部の表面部分が放射性物質により汚染されており、その汚染レベルは部位、採取高や方位に依存していることが確認された。これは事故直後に放射性物質が調査地の森林にフォールアウトした際の周辺立木による遮蔽効果やフォールアウトの方向性による影響と推測された。さらに、スギの幹材部の汚染状況をより詳細に把握するため、事故1年後にスギを10本伐採後、高さ別に円盤を採取し、心材および辺材の放射性Cs濃度を測定した。その結果、心材の放射性Cs濃度が高さや径に依存する特性が明らかとなった。

今後はスギ立木表面に付着した放射性物質は雨水による流下や落葉および樹皮の剥離等により地表面に移動し、また、材内部の放射性物質分布も時間経過とともに変化すると考えられる。さらに、今後放射性Csが土壌の深度方向に移動するに従い経根吸収が行われるとすれば、材部汚染の進行も危惧されることから、今回観察された汚染状況を初期値とし、継続的な測定を実施しつつ、将来的な推移を予測していくことが必要と考えられる。

V 引用文献

- 1) 福島県. “県内7方部環境放射能測定結果(暫定値)(23.3.17~23.3.31)”. モニタリング結果(福島県). <http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/7houbu0311-0331.pdf>, (参照 2013_05_13) .
- 2) 福島県. 県産材製材品の放射線測定結果. <http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36055c/kensanzaityouusa.html>, (参照 2014__05_14) .
- 3) IAEA(2009) Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Fresh water Environments for Radiological Assessments. IAEA-TECDOC-1616. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1616_web.pdf, (参照 2014__05_14) .
- 4) 気象庁. “過去の気象データ検索(郡山市2011年3月15日)”. 気象統計情報. http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_a1.php?prec_no=36&block_no=0299&year=2011&month=03&day=15&view=p1, (参照 2013_05_13) .
- 5) Momoshima, N., Bondietti, E.A., (1994) The Radial distribution of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in Trees. *Journal of Environmental Radioactivity*, **22**, 93-109.
- 6) 文部科学省. “①第6次航空機モニタリングの測定結果, 及び②福島第一原子力発電所から80km圏外の航空機モニタリングの測定結果について”. 放射線モニタリング測定結果等(原子力規制委員会). http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6749/24/191_258_0301_18.pdf, (参照 2013_05_13) .
- 7) 林野庁. “森林内等の作業における放射線障害防止対策に関する留意事項等について(Q&A)”. 分野別情報(林野庁平成24年7月18日). <http://www.rinya.maff.go.jp/j/routai/anzen/sagyou.html>, (参照 2013_05_13) .
- 8) 林野庁. “森林内の放射性物質の分布状況調査結果について(第2報)”. 報道発表資料(林野庁平成23年12月27日). http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/hozen/111227_2.html, (参照 2014_05_14) .