Vol.2, No.1, pp.19 - 27, 2014 / 環境放射能除染学会誌

報　告

# 千葉県立手賀沼親水広場で実施した除染効果の検証

市川 有二郎[1]*、井上 智博[1]、木村 賢文[2]、内藤 季和[1]、高橋 良彦[1]、矢沢 裕[1]
[1]千葉県環境研究センター（〒290-0046 千葉県市原市岩崎西1-8-8）
[2]千葉県環境生活部水質保全課（〒260−8667 千葉県千葉市中央区市場町1−1）

# Evaluation of the Efficacy of Decontamination Methods Examined at Chiba Prefectural Teganuma Aquatic Park

Yujiro ICHIKAWA[1]*, Tomohiro INOUE[1], Yoshifumi KIMURA[2],
Suekazu NAITO[1], Yoshihiko TAKAHASHI[1], and Yutaka YAZAWA[1]
[1]Chiba Prefectural Environmental Research Center (1-8-8 Iwasakinishi, Ichihara, Chiba 290-0046 Japan)
[2]Water Quality Division, Chiba Prefectural Environmental and Community Affairs Department
(1-1 Ichiba-cho, Chuo-ku, Chiba, Chiba 260-8667 Japan)

## Summary

Decontamination of radioactive materials (especially cesium-134 and 137) derived from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident has been fulfilled at contaminated regions. This study evaluates the efficacy of decontamination methods with the measurement of air dose rate and concentration of radioactive cesium in the ground before and after decontamination at Chiba Prefectural Teganuma Aquatic Park. Among 101 measurement sites, lawn sites and road paved with urethane foam sites showed relatively high air dose rates that were above 0.23 μSv/h (the natural air dose rate of 0.04 μSv/h derived from the ground is included). From the quantitative analysis of lawn sample by germanium detector, we confirmed that thatch (surface layer of lawn with dense accumulation of death and living grass) showed higher activity of radioactive cesium compared to the soil under the thatch, implying thatch have capability to retain radioactive cesium. Examined decontamination methods were: 1) Mowing lawns at the depth of 2 cm from the ground level (removes thatch). 2) The urethane foam was stripped and removed to the depth of 10 mm. The observed range (average) of air dose reduction rate at the height of 50 cm and 1 m above the ground at lawn sites were 8 ~ 53 % (34 %), 27 ~ 63 % (46 %), respectively. Also for road paved with urethane foam sites were 53 ~ 63 % (57 %), 43 ~ 56 % (48 %), respectively. The measurement value of air dose rate after decontamination procedure showed a decrease below 0.23 μSv/h at all of the measurement sites. Removing thatch is an effective decontamination method, but it should be noted that mowing depth is a crucial part, and we suggest during the decontamination process of removing thatch, the efficacy should be confirmed by monitoring air dose rate at the same time.

**Key Words:** Chiba Prefecture, Park, Decontamination, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Radioactive cesium

## 1. はじめに

千葉県では、県民が抱える放射性物質による健康への影響に関する不安を払拭するため「千葉県放射性物質除染実施プラン」[1)]（以下、県除染プラン）を2012 年 4 月 19 日に策定した。県除染プランでは、県が管理する施設等の中で、空間線量率の高低、子どもの生活環境の有無、多数の県民が集う施設の有無など様々な要素を考慮し、除染対象施設を選定した。

千葉県我孫子市に位置する千葉県立手賀沼親水広場（以下、親水広場）は、敷地面積が約 33,000 $m^2$ ある。敷地内には、子どもの水遊び場、自然観察を楽しめる場、手賀沼や水質浄化について学べる資料館が設置されており、子どもから大人まで楽しめる施設となっている。しかし、福島原発事故後に 0.23 μSv/h(以下、大地由来の空間線量率 0.04 μSv/hを含む）を超える空間線量率が測定され、県除染プランにおいて除染対象施設に位置づけられた。

本調査は親水広場において、除染前後の空間線量率等の

*Corresponding author: TEL: 0436-21-6371, FAX: 0436-21-6810, E-mail: y.ichkw17@pref.chiba.lg.jp

詳細な測定・解析を実施し、汚染実態の把握に併せて除染効果の検証を行うとともに、今後、除染作業が予定されているその他の除染対象施設において効率的な除染作業推進のための情報・資料として本調査結果が活用されることを目的としている。

## 2. 調査概要

### (1) 調査区域と調査時期

親水広場の敷地内で除染作業が実施されたエントランス広場・第2駐車場（Area 1、敷地面積：約 5,440 $m^2$）、ミニ手賀沼周辺（Area 2、敷地面積：約 5,745 $m^2$）、青空広場（Area 3、敷地面積：約 5,363 $m^2$）の 3 区域を対象とし、Fig. 1 に概要図を示した。また、各区域の概況を Table 1 に記載した。除染前調査は計 3 回実施し、第 1 回目調査（2012 年 6 月 4 日）では各調査区域内の全体的な空間線量率の分布を把握した。第 2 回目調査(同年 10 月 25 日)は、第 1 回目調査の計測結果が 0.23 μSv/h 以上であった地点で再測定を実施し、除染対象区域の選定を行った。第 3 回目調査（2013 年 2 月 28 日）は、除染直前期に除染対象区域の調査を行った。除染作業による効果を検証するための除染後調査については 2013 年 3 月 21 日に実施した。

### (2) 除染前の調査方法

#### a) 空間線量率の測定

Area 1 ～ Area 3 の空間線量率の調査地点を Fig. 2 ～ Fig. 4 にそれぞれ示した。調査地点数は、第 1 回目調査で 99 地点、第 2 回目調査で 40 地点、第 3 回目調査で 23 地点であった。測定は、エネルギー補償型 NaI（Tl）シンチレーション式サーベイメータ（日立アロカメディカル株式会社製 TCS-172 B）の検出器ヘッドを地上から50 cm と1 m の高さに固定し行った。

#### b) 芝、土壌中放射能濃度の測定

親水広場の芝生はコウライシバ（*Zoysia matrella*）が広がって

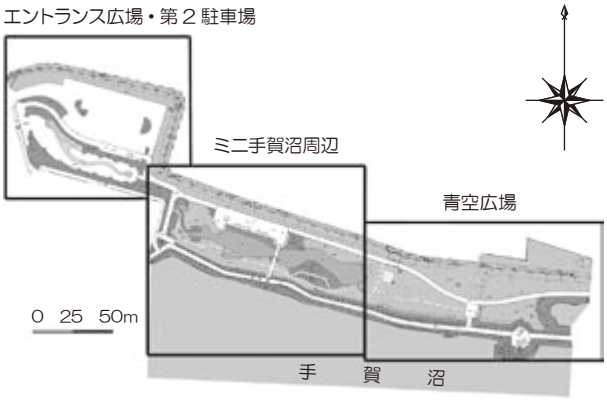


Fig. 1 親水広場の調査区域を示した概要図

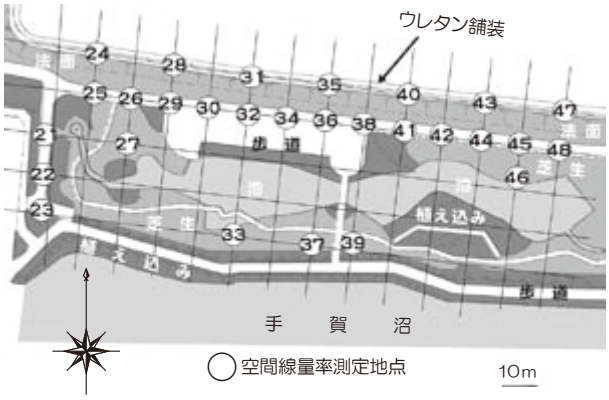


Fig. 3 ミニ手賀沼周辺（Area 2）の調査地点詳細図

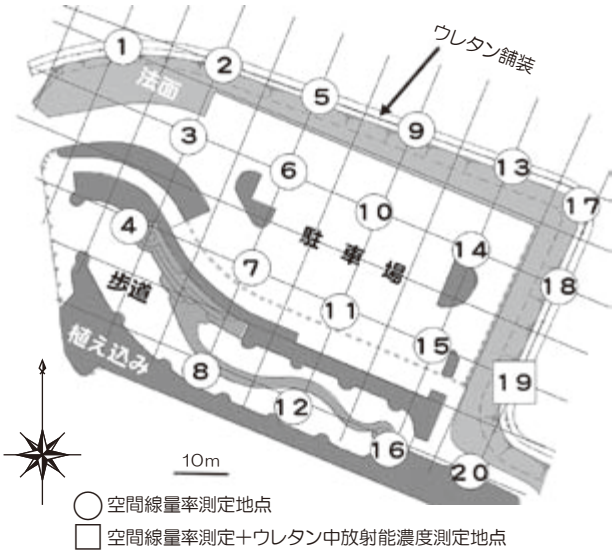


Fig. 2 エントランス広場・第 2 駐車場（Area 1）の調査地点詳細図

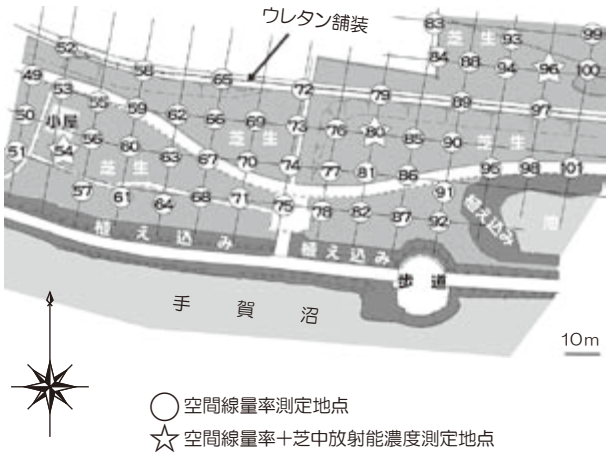


Fig. 4 青空広場（Area 3）の調査地点詳細図

Table 1　各調査区域の概況

| 調査区域 | 総面積 $m^2$ | 種別面積 $m^2$ （割合%） | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 芝生 | 植栽 | アスファルト | 水面 | インターロッキング | ウレタン |
| エントランス広場・第2駐車場 | 5,440 | 399 (7) | 1,022 (19) | 2,626 (48) | 0 (0) | 1,025 (19) | 368 (7) |
| ミニ手賀沼周辺 | 5,745 | 2,168 (38) | 644 (11) | 457 (8) | 1,600 (28) | 554 (10) | 322 (6) |
| 青空広場 | 5,363 | 4,771 (89) | 0 (0) | 153 (3) | 0 (0) | 94 (2) | 345 (6) |

Fig. 5　ホールカッターにより採取した円筒形の芝と土壌

おり、刈り込み作業が年6回行われている。第3回目調査時に、Area 3において相対的に空間線量率が高かった調査地点を選び、ホールカッター（直径:10.8 cm、深さ:22.9 cm）を用いて、Fig. 5のように円筒形に芝と土壌をくり抜き採取した。採取した芝と土壌は、円筒形のかたちを崩さずカッターナイフで上部から高さ5 cmで切り分けた部分を前処理した。前処理は、105 ℃で24時間乾燥させて乾燥重量を量った後、乳棒で細かく砕き、芝と土壌をピンセットで分離した。土壌についてはステンレス製の2 mm目のふるいを通過させて得たものを十分混合した。調整した芝と土壌は、ポリプロピレン製U8容器（100 mL）に充填して分析試料とした。

c)　ウレタン中放射能濃度の測定

ウレタンは約10 mmの厚さで舗装され、表面は凹凸のある非透水性構造となっている。ウレタン中放射能濃度を調べるために、鋭利なスコップでウレタンの一部を削り取り、そのままポリプロピレン製U8容器(100 mL）に入れ分析試料とした。

d)　ゲルマニウム半導体検出器の測定条件

試料の分析はゲルマニウム半導体検出器（キャンベラ社製GC2520、分解能:放射性核種 $^{60}$Coのピークエネルギー1,332 keVに対する半値幅は1.75 keV、相対効率:32.9 %）で行い、ガンマ線スペクトロメトリーによりガンマ線放出核種濃度を定量した。測定時間は3,600 ～ 7,200秒とし、定量計算にはコベル法を用いた。各試料の採取日時に減衰補正し、また自己吸収補正及びサムピーク補正も行った。

なお、福島原発事故由来の放射性物質として $^{131}$I等の半減期が短い核種については、現在では検出下限以下に減衰していることを考慮して、本調査における検討対象核種は放射性セシウムのうち $^{134}$Cs（定量ピーク:605 keV）及び $^{137}$Cs（662 keV）とした。

(3)　除染作業

a)　芝の深刈り

芝の深刈りを実施した除染対象区域はFig. 6のとおりであり約2,600 $m^2$であった。Fig. 7のようにソードカッターと呼ばれる芝刈り機を用いて土壌表面より2 cm深さで深刈りを実施した。芝の発芽や発根を促進させるために、深刈り後の芝に厚さ10 mmで目土をスコップにより散布し、ローラーで整地した。

芝の深刈り作業で発生した刈草や土壌等の汚染物質については、流出防止策として全体を遮水シートで梱包し、同広場内の一区画を60 cm深さで掘削した穴の中に埋設（仮置き保管）した。

埋設穴は、放射性物質に汚染されていない土砂により約30 cmの覆土を行い、汚染物質由来の放射線を遮へいした。覆土による遮へい効果については、30 cm厚さで空間線量率を40分の1程度まで遮へいできると報告されている[2)]。

b)　ウレタン舗装の削り取り

遊歩道のウレタン舗装箇所の削り取りはFig. 6に示した場所で行われ、対象面積は460 $m^2$であった。Fig. 8のように重機により約10 mm厚さでウレタンを削り取った。重機での削り取り作業後に残渣物が残らないように、人力により清掃を行った。

除去したウレタンはフレキシブルコンテナバックと呼ばれる耐候性大型土のう袋内に密封し、流出防止策として更にブルーシートで覆った状態で、親水広場内の水の館と呼ばれる建屋の屋上に仮置き保管した。ブルーシートは、風雨等による転倒・飛散防止に備えて重しとロープで固定した。水の館屋上の仮置き場は、関係職員以外は立入禁止とされている。仮置場を設定したことによる影響の有無を調べるために、水の館内の空間線量率を測定したところ館内のどの場所でも0.06 ～ 0.07 μSv/hの範囲内であり影響がないことを確認した。

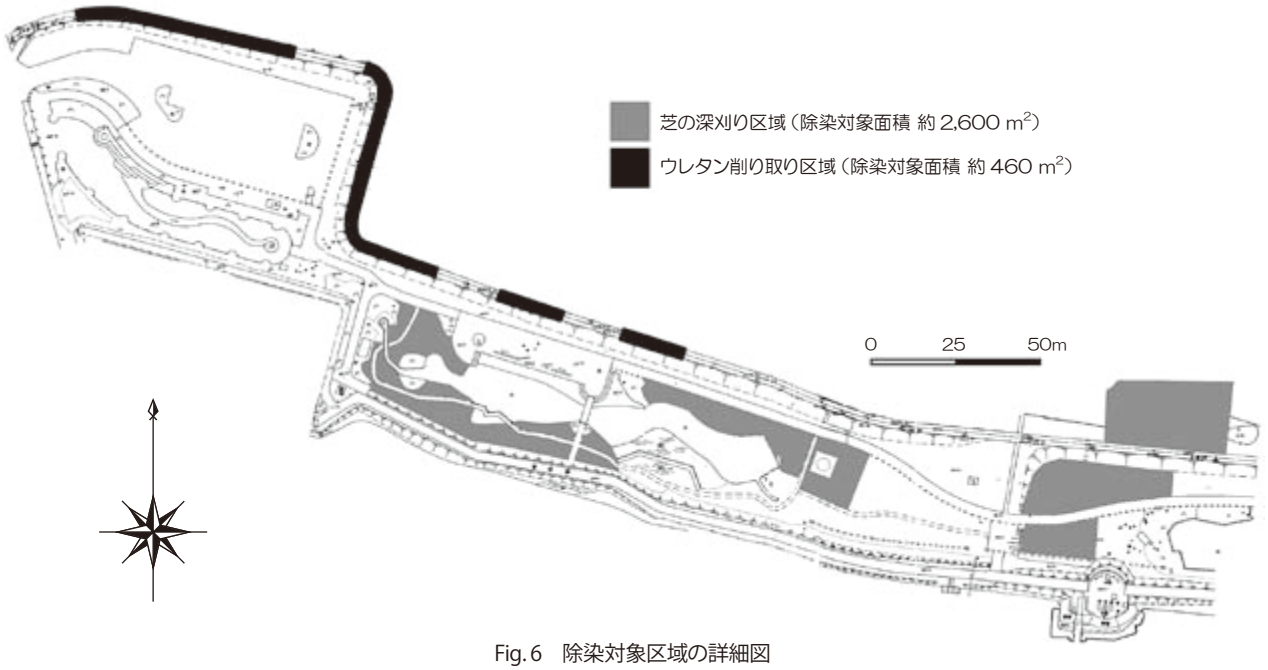


Fig. 6　除染対象区域の詳細図

Fig. 7　ソードカッターによる芝の深刈り

Fig. 8　ウレタン舗装の削り取り

### (4)　除染後の調査方法

#### a)　空間線量率の測定

第 3 回調査時と同様の調査地点（計 23 地点）と測定条件で空間線量率の測定を実施した。第 3 回目調査結果と除染後の空間線量率の結果を比較することで低減率を確認した。

なお、低減率を算出する際は、大地由来の自然放射線量率 0.04 μSv/h(バックグラウンド値）を差し引いて算出した[3]。

#### b)　目土、芝、土壌中放射能濃度の測定

除染対象区域となった芝生では深刈り作業が行われた。深刈り後の最終工程として、芝の発芽や発根を促進させる目的で芝生に10 mm 厚さで目土（産地は茨城県稲敷市）を散布した。

散布された目土は、下層土壌が混入しないように小型スコップで地表から 5 mm 程度の厚さを採取した。目土下の芝（深刈り後のため根部のみ）と土壌については除染前調査と同様にホールカッターで採取した。

目土は、2.（2）b)に記載した土壌試料と同様の手法で前処理をおこなった。調製した各試料のゲルマニウム半導体検出器による測定は2.（2）d)と同様の条件で行い除染前後の比較を行った。

## 3.　調査結果

### (1)　除染前調査

#### a)　空間線量率の測定

除染対象区域を選定する際に空間線量率が 0.23 μSv/h 以上であることが1つの目安となるため、第 1 回目調査で 0.23 μSv/h 未満であった調査地点（99 地点中 59 地点）については、第 2 回目調査では調査地点から除外した。基本的に第 2 回目調査時において 0.23 μSv/h 以上であった調査地点（40

Table 2　Area 1 における除染作業前後の空間線量率と低減率

| 調査地点 | 地面の形状 | 空間線量率（μSv/h） | | | | | | | | 低減率（%）* | | 除染手法 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 第 1 回目調査 (2012/6/4) | | 第 2 回目調査 (2012/10/25) | | 第 3 回目調査 (2013/2/28) | | 除染後調査 (2013/3/21) | | | | |
| | | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | |
| 2 | ウレタン | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.24 | 0.20 | 0.20 | 0.12 | 0.13 | 50 | 44 | 削り取り |
| 5 | ウレタン | 0.25 | 0.25 | 0.24 | 0.24 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.11 | 63 | 56 | 削り取り |
| 9 | ウレタン | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.21 | 0.19 | 0.20 | 0.10 | 0.11 | 60 | 56 | 削り取り |
| 17 | ウレタン | 0.23 | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.19 | 0.20 | 0.11 | 0.13 | 53 | 44 | 削り取り |
| 18 | ウレタン | 0.23 | 0.24 | 0.23 | 0.22 | 0.19 | 0.21 | 0.11 | 0.13 | 53 | 47 | 削り取り |
| 19 | ウレタン | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.22 | 0.19 | 0.19 | 0.10 | 0.12 | 60 | 47 | 削り取り |
| 平均 | | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.23 | 0.19 | 0.20 | 0.11 | 0.12 | 57 | 49 | |
| 標準偏差 | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 5.0 | 5.8 | |
| 変動係数 | | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.12 | |

*第 3 回目調査と除染後調査の空間線量率から低減率を算出。また、大地由来の自然放射線 0.04 μSv/h（バックグラウンド値）を差し引いて評価した。

Table 3　Area 2 における除染作業前後の空間線量率と低減率

| 調査地点 | 地面の形状 | 空間線量率（μSv/h） | | | | | | | | 低減率（%）* | | 除染手法 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 第 1 回目調査 (2012/6/4) | | 第 2 回目調査 (2012/10/25) | | 第 3 回目調査 (2013/2/28) | | 除染後調査 (2013/3/21) | | | | |
| | | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | |
| 24 | ウレタン | 0.25 | 0.24 | 0.24 | 0.23 | 0.19 | 0.19 | 0.10 | 0.12 | 60 | 47 | 削り取り |
| 27 | 芝生 | 0.25 | 0.24 | 0.24 | 0.22 | 0.18 | 0.18 | 0.14 | 0.13 | 29 | 36 | 深刈り |
| 31 | ウレタン | 0.24 | 0.24 | 0.23 | 0.22 | 0.18 | 0.18 | 0.11 | 0.12 | 50 | 43 | 削り取り |
| 33 | 芝生 | 0.25 | 0.22 | 0.24 | 0.21 | 0.19 | 0.19 | 0.13 | 0.11 | 40 | 53 | 深刈り |
| 37 | 芝生 | 0.24 | 0.22 | 0.23 | 0.21 | 0.17 | 0.17 | 0.14 | 0.13 | 23 | 31 | 深刈り |
| 39 | 芝生 | 0.25 | 0.24 | 0.24 | 0.22 | 0.17 | 0.19 | 0.16 | 0.14 | 8 | 33 | 深刈り |
| 40 | ウレタン | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.22 | 0.19 | 0.17 | 0.10 | 0.11 | 60 | 46 | 削り取り |
| 46 | 芝生 | — | | 0.23 | 0.20 | 0.18 | 0.18 | 0.13 | 0.11 | 36 | 50 | 深刈り |
| 平均 | | 0.25 | 0.23 | 0.24 | 0.22 | 0.18 | 0.18 | 0.13 | 0.12 | 38 | 42 | |
| 標準偏差 | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 18.3 | 8.2 | |
| 変動係数 | | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.17 | 0.09 | 0.48 | 0.19 | |

*第 3 回目調査と除染後調査の空間線量率から低減率を算出。また、大地由来の自然放射線 0.04 μSv/h（バックグラウンド値）を差し引いて評価した。
— は未測定

Table 4　Area 3 における除染作業前後の空間線量率と低減率

| 調査地点 | 地面の形状 | 空間線量率（μSv/h） | | | | | | | | 低減率（%）* | | 除染手法 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 第 1 回目調査 (2012/6/4) | | 第 2 回目調査 (2012/10/25) | | 第 3 回目調査 (2013/2/28) | | 除染後調査 (2013/3/21) | | | | |
| | | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | 50 cm | 1 m | |
| 50 | 芝生 | 0.26 | 0.23 | 0.24 | 0.22 | 0.19 | 0.19 | 0.13 | 0.12 | 40 | 47 | 深刈り |
| 54 | 芝生 | 0.27 | 0.24 | 0.25 | 0.23 | 0.21 | 0.20 | 0.12 | 0.11 | 53 | 56 | 深刈り |
| 77 | 芝生 | 0.25 | 0.23 | 0.23 | 0.20 | 0.17 | 0.19 | 0.12 | 0.11 | 38 | 53 | 深刈り |
| 80 | 芝生 | 0.26 | 0.24 | 0.23 | 0.22 | 0.19 | 0.20 | 0.14 | 0.10 | 33 | 63 | 深刈り |
| 82 | 芝生 | 0.26 | 0.24 | 0.24 | 0.22 | 0.19 | 0.20 | 0.15 | 0.12 | 27 | 50 | 深刈り |
| 84 | 芝生 | — | | 0.24 | 0.23 | 0.19 | 0.19 | 0.12 | 0.12 | 47 | 47 | 深刈り |
| 90 | 芝生 | 0.25 | 0.23 | 0.24 | 0.22 | 0.18 | 0.19 | 0.11 | 0.10 | 50 | 60 | 深刈り |
| 93 | 芝生 | 0.24 | 0.20 | 0.24 | 0.22 | 0.20 | 0.19 | 0.16 | 0.15 | 25 | 27 | 深刈り |
| 96 | 芝生 | 0.24 | 0.23 | 0.24 | 0.24 | 0.20 | 0.20 | 0.14 | 0.14 | 38 | 38 | 深刈り |
| 平均 | | 0.25 | 0.23 | 0.24 | 0.22 | 0.19 | 0.19 | 0.13 | 0.12 | 39 | 49 | |
| 標準偏差 | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 9.7 | 11.3 | |
| 変動係数 | | 0.04 | 0.06 | 0.03 | 0.05 | 0.06 | 0.03 | 0.12 | 0.14 | 0.25 | 0.23 | |

*第 3 回目調査と除染後調査の空間線量率から低減率を算出。また、大地由来の自然放射線 0.04 μSv/h（バックグラウンド値）を差し引いて評価した。
— は未測定

地点中 23 地点）ならびにその周辺を除染対象区域として選定した。除染対象区域内の調査地点では、第 3 回目調査として除染作業が開始される 8 日前の空間線量率を測定し、除染作業による空間線量率の低減率を確認するためのデータとした。Area 1 〜 Area 3 の各々における調査地点のうちで、除染対象区域と選定された箇所のみの空間線量率の測定結果をそれぞれTable 2 〜 Table 4 に示した。

第 1 回目調査から第 3 回目調査を通して計 101 箇所の調査地点があり、それらを地表面別に分類するとウレタン、インターロッキング（敷石）、アスファルト、芝生となっており、それぞれの内訳は 22、10、27、42 箇所であった。第 1 回目調査で得られた空間線量率の測定結果から、地表面がアスファルトまたはインターロッキングであるすべての調査地点で 0.23 μSv/h 未満であったが、地表面がウレタンまたは芝生である調査地点では 0.23 μSv/h を超過する調査地点が多く見受けられ（ウレタン : 22 地点中 17 地点、芝生 : 40 地点中 28 地点）、地表面別の違いが確認された。アスファルトやインターロッキングのような地表面では、風雨による除染効果があらわれやすい環境にあると考えられる。

第 3 回目調査では第 2 回調査結果により決定した除染対象区域内の調査地点で線量率の測定を実施したが、物理的半減期等の減衰効果によって更に線量率が減少していることが確認された。

b） 芝、土壌中放射能濃度の測定結果

ホールカッターで採取した芝と土壌中の放射能濃度は Table 5 の通りである。採取した 3 地点すべてで土壌よりも芝中の放射能濃度が高い傾向を示した。水庭ら[4]は芝地の放射性物質の分布について、深度別（10 mm ごとに切り分けた）にイメージング・プレートを用いた調査を行い、芝生の刈りかすや枯れた芝生の堆積物（サッチ）を中心に放射性物質が蓄積していることを報告している。

なお、サッチとその下に位置する土壌の放射能濃度を比較した結果、サッチ部分で顕著に高い結果であり、当調査でも、水庭らの調査結果と同様な結果となった。

c） ウレタン中放射能濃度の測定結果

遊歩道で採取したウレタン中放射能濃度の測定結果を Table 5 に示した。ウレタンは No.19 の 1 地点のみでの分析であったが、芝や土壌と比較して高い放射能濃度が検出された。ウレタン上で空間線量率が比較的高い傾向を示したが、ウレタンに残留していた放射性物質が寄与していることが示唆された。ウレタンの表面は多孔質構造となっているため、水はけが悪く放射性物質が洗い流されずに残留していたためと考えられる。

### （2） 除染後調査

a） 空間線量率の測定結果

除染作業後の Area 1 〜 Area 3 の各々における調査地点で測定した空間線量率の測定結果はそれぞれ Table 2 〜 Table 4 のとおりである。地上から 50 cm、1 m の高さで検出された各々の空間線量率の範囲（平均）は、0.10 〜 0.16 μSv/h（0.12 μSv/h）、0.10 〜 0.15 μSv/h（0.12 μSv/h）であり、23 調査地点すべてで 0.23 μSv/h を下回った。

b） 目土、芝、土壌中放射能濃度の測定

除染作業後に採取した目土、芝（根部）、土壌の放射能濃度測定結果は Table 6 に示した。3 箇所で採取した目土の平均放射能濃度は 27 Bq/kg（乾燥重量）であった。目土は、散布数日後に採取したものを分析に供試したため、周辺土壌等の巻上げの影響で微量の放射性セシウムが検出された可能性がある。芝、土壌中の平均放射能濃度はそれぞれ 780 Bq/kg（乾燥重量）、540 Bq/kg（乾燥重量）であり、除染前の平均放射能濃度と比較してそれぞれ約 78 %、72 % 低かった。

## 4. 考察および結論

### （1） 空間線量率の期間減衰率について

現在の追加被ばく線量率に寄与する放射性核種は放射性セシウム（$^{134}$Cs と $^{137}$Cs）であることが明らかとなっている。環境中に放出された放射性セシウムは物理的半減期とウェザリング効果によって減衰する。地表面に沈着する $^{134}$Cs と $^{137}$Cs が空間線量率（一般的に地上から高さ 1 m）に与える寄与率はそれ

Table 5　除染作業前に手賀沼親水広場で採取した試料中放射能濃度*

| 調査地点 | 放射性セシウム($^{134}$Cs + $^{137}$Cs) 放射能濃度(Bq/kg - 乾) | | |
|---|---|---|---|
| | 芝 | 土壌 | ウレタン |
| 19 | | | 5300 |
| 54 | 5100 | 2100 | |
| 80 | 2750 | 1400 | |
| 96 | 2600 | 2300 | |
| 範囲 | 2600 - 5100 | 1400 - 2300 | - |
| 平均 | 3483 | 1933 | 5300 |
| 標準偏差 | 1402 | 473 | - |

*試料採取日は平成 25 年 2 月 28 日

Table 6　除染作業後に手賀沼親水広場で採取した試料中放射能濃度*

| 調査地点 | 放射性セシウム($^{134}$Cs + $^{137}$Cs) 放射能濃度(Bq/kg - 乾) | | |
|---|---|---|---|
| | 芝（根部） | 目土 | 土壌（目土下から 0 - 5 cm） |
| 54 | 890 | 20 | 350 |
| 80 | 830 | 20 | 600 |
| 96 | 620 | 40 | 670 |
| 範囲 | 620 - 890 | 20 - 40 | 350 - 670 |
| 平均 | 780 | 27 | 540 |
| 標準偏差 | 142 | 12 | 168 |

*試料採取日は平成 25 年 3 月 21 日

ぞれ 0.73 と 0.27 であると考えられており[5]、飽本はこの寄与率および放射性セシウムの物理的半減期による減衰を考慮し、以下の理論式 (1) で空間線量率の期間減衰率を算出した[6]。

$$R(t) = \frac{R(0)}{3.7}\left\{2.7\times\exp\left(-\frac{ln2}{2.07}t\right)+\exp\left(-\frac{ln2}{30.1}t\right)\right\} \quad \cdots (1)$$

$R(t)$ : 空間線量率、$R(0)$ : 空間線量率の初期値、$t$ : 時間 (年)

第 1 回目調査から第 3 回目調査のすべての期間で測定が行われた調査地点 (Table 2 〜 Table 4 に示した調査地点) を対象とし、第 1 回目調査での平均線量率 (0.19 μSv/h) に対する第 3 回目調査 (0.15 μSv/h) での線量率の期間減衰率は 21 % (実測値) であった。なお、期間減衰率の算出は、大地由来の線量率 0.04 μSv/h を差し引いた。上記 (1) 式において、第 1 回目調査から第 3 回目調査までの 269 日 (0.74 年) を $t$ として $R(0)$ を 100 として期間減衰率を算出すると 16 % (理論値) であった。

空間線量率の期間減衰率を地表面別に解析したところ、ウレタン (0.20 μSv/h から 0.15 μSv/h) と芝生 (0.19 μSv/h から 0.15 μSv/h) で得られたそれぞれの実測値は 25 %、21 % であった。理論値と実測値との差異は、ウェザリング効果に起因するものであると考えられ、ウレタンでは 9 % 程度、芝生では 5 % 程度と算出された。

飽本[6]は、福島県中 ・ 東部 155 か所 (調査場所の地表面等の状況は不明) における放射性セシウム起源の空間線量率を原発事故後の 2011 年 6 月 10 日から 178 日間かけて計測 ・ 解析し、ウェザリング効果による期間減衰率は 11 % であったと報告している。また、文部科学省の委託研究として (独) 日本原子力研究開発機構が中心となり福島県内で定期的に実施している放射性物質分布状況等調査[7]の第 1 次走行サーベイ結果 (2011 年 6 月) と第 3 次走行サーベイ結果 (2012 年 3 月) の比較からウェザリング効果等による減衰は 5 % 以内であると解析している。上述の 2 つの調査結果で得られたウェザリング効果による減衰率の数 % の違いについては、推察の域を出ないが調査期間の短長 (調査開始期間と終了期間の違い) や地表面の状況の違いが影響していると思われる。

一般的に放射性セシウムは、土壌中の負に帯電した有機物や粘土鉱物と高い親和性を有しており、時間の経過とともに粘土鉱物のフレイド・エッジ・サイト (雲母類の風化により層間が膨潤した鉱物における膨潤層と非膨潤層との境界に位置するくさび形に開いた部分) に特異的に吸着され、下層土壌へ浸透が極めて小さくなるという研究報告がある[8,9]。そのため、原発事故からの時間の経過とともに、放射性物質の土壌中への吸着が強固となりウェザリング効果による減衰率が減少すると推定される。

本調査から、芝生では芝 (サッチ) や土壌中へ放射性セシウムが強固に吸着されており、主に物理的半減期に従って減衰していると考えられる。一方、ウレタンについては、多孔質構造の合成ゴムであるため放射性セシウムは、物理的に孔内に入り込んだかたちでウレタン内に蓄積しており、土壌等と比べて化学的な親和性は低く、ウェザリング効果の減衰率に対する寄与が芝生よりも高かった (4 % 程度) と想像される。

以上のことから、原発事故から 2 年以上の月日が経った現在、土壌等に吸着された放射性セシウムは、ウェザリング効果等による移動 ・ 移行の割合は小さいことが予想される。したがって、放射性物質を蓄積する土壌等を有効的に除染することで環境中の空間線量率の効果的な低減が可能であると期待される。

### (2) 除染効果について

Table 2 〜 Table 4 の第 3 回目調査結果と除染後の空間線量率の結果から、芝の深刈りを実施した地点における地上から高さ 50 cm、1 m の空間線量率の低減率の範囲 (平均低減率) はそれぞれ 8 〜 53 % (34 %)、27 〜 63 % (46 %) であった。また、ウレタン舗装の削り取りを実施した地点における地上から高さ 50 cm、1 m の空間線量率の低減率の範囲 (平均低減率) はそれぞれ 53 〜 63 % (57 %)、43 〜 56 % (48 %) であった。芝の深刈りによる除染効果 (低減率で評価した場合) はウレタン舗装の削り取りに比べて低かった。著者ら[10]が、千葉県立柏の葉公園で除染手法別の効果を検証したところ、芝の深刈り (深さは本調査同様で地表面から 2 cm) による地上から高さ 50 cm の低減率は 9 〜 61 % の範囲で、平均低減率は 31 % であり、本調査とほぼ一致する結果であった。

さらに、ウレタン舗装の削り取りに対して芝の深刈りによる低減率の地点間差が目立った。それぞれの除染手法について、変動係数によって低減率のばらつきを評価すると、ウレタン舗装の削り取りは地上から 50 cm (1 m) で 0.09 (0.11) であったのに対して、芝の深刈りでは 0.38 (0.27) であり明らかな違いが確認された。本調査では、放射性セシウムが蓄積されていると考えられる芝のサッチ層を取り除くことを主眼とし、地表面から 2 cm 深さの設計値で芝の深刈りが行われたが、実際の作業では、芝地の地形的な起伏等によって深さにむらが生じ線量率の低減率に地点間差があらわれたことが原因と思われる。

一般的にサーベイメータの高度が高くなると、周辺環境 (例えば除染領域外) からのガンマ線の影響が相対的に大きくなることから、除染によって空間線量率測定地点の直下における放射性物質が除去されていれば 50 cm 高さの空間線量率は 1 m 高さのものよりもより低くなると考えられる。ウレタンを削り取ったすべての調査地点では、50 cm 高さの線量率 (平均で 0.11 μSv/h) は 1 m 高さのもの (平均で 0.12 μSv/h) よりも低い値が除染後に観測された。これとは逆に、芝生ではすべての調査地点で 50 cm 高さの線量率 (平均で 0.14 μSv/h) が 1 m 高さのもの (平均で 0.12 μSv/h) よりも高い値が観測された。この原因として Table 6 に示すように、除染前の芝や土壌中放

射能濃度に比べると下がったものの除染後においても芝（根部）と土壌中放射能濃度を合計すると1,000 Bq/kg（乾燥重量）前後の放射性セシウムが残留しているためと考えられるが、線量率が0.23 μSv/hを超過していないので特に問題になる程の影響は無いと考えられる。

サッチを取り除くことで、ある程度の除染効果が得られることは確かであるが、深刈りの深度が足りないと効果が不十分となる可能性がある。一方で深度をさらに深めた場合、地中に這っている芝のほふく茎（根の原基となる部位）も取り除かれ芝生が再生不能となるため注意を要する。

### (3) 除染区域外からの空間線量率への寄与について

ガンマ線は空気中を百メートル以上も飛程することが知られており、地上から高さ1 mにサーベイメータを設置すると、数十メートル四方の地面から飛んできたガンマ線も検知される[11]。そのため、除染作業後が完了した空間での線量率においても周辺環境に存在するガンマ線放出核種からのガンマ線の寄与を無視できない。

岩元ら[12]は、半球形状モデルを用いた3次元体系のモンテカルロ輸送シミュレーションコードPHITSにより、表面が一様に汚染された土壌（$^{137}$Csが1,000 kBq/m$^2$）の除染半径等を変化させた場合の地上における線量率を計算した。除染効果として10 %の$^{137}$Csが残存していることを想定し、除染半径を100 mとした半球中心での線量（地上から高さ1 m）は除染前の約5分の1（低減率80 %）になると予想した。また、除染領域境界内の半径が200 m以内の敷地を対象とした場合、敷地境界内のほぼ全域にわたって一様な線量の低減率を得るには、除染敷地領域からさらに外側約30 %大きな範囲まで除染する必要があると述べている。

本報では、除染前の測定値が0.23 μSv/h以上であった測定地点の直下ならびにその周辺で除染が実施された。そのため、除染領域外の線量率の寄与を完全に取り除けていないが、測定地点の直下ならびにその周辺を除染することで、芝地とウレタン舗装箇所で線量率の低減率が数%異なるにしろ、ある程度の除染効果が得られた。

また、田川[13]が福島県の公園で実施した除染調査では、除染前の高さ1 mと50 cmの線量率はそれぞれ1.5 μSv/h、1.8 μSv/hを計測していたところ汚染表土の除去により0.6 μSv/hまで低減した。これを低減率で表すと地上から1 m、50 cm高さでそれぞれ60 %、67 %となり、線量率の低減には、測定箇所直下の土壌を除染することが有効であると述べている。

除染区域外からの空間線量率への寄与を完全に取り除くことは現実的には困難を伴う。各除染対象施設の線量率の目標値を勘案し、除染手法・面積等を効果的に設計することが除染作業を効率的に進める上で必要と考える。

## 参 考 文 献


1) 千葉県災害復旧・復興本部：千葉県放射性物質除染実施プラン。平成24年4月19日（2012）
2) 環境省：福島県内の災害廃棄物の処理における一時保管。平成23年7月28日（2011）
3) 環境省：追加被ばく線量年間1ミリシーベルトの考え方。平成23年10月10日災害廃棄物安全評価検討会・環境回復検討会　第1回合同検討会資料（2011）
4) 水庭千鶴子、茂木道教、赤堀勉、近藤三雄：放射性物質で汚染された家庭の芝生の除染について ー造園式芝生除染・更新工法の検証の試みー。芝草研究、**40**, 43-46（2011）
5) 原子力災害対策本部：現在の空間線量率から将来の空間線量率を予測する考え方について。第64回原子力安全委員会資料第1-1号 平成23年8月24日（2011）
6) 飽本一裕：福島第一原発事故が及ぼしたセシウム起源空間放射線量率の福島県における経時変化と場所依存性。*RADIOISOTOPES* **61**, 373-378（2012）
7) （独）日本原子力研究開発機構：「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」の報告書の概略板について。平成25年3月1日（2013）
8) 塚田祥文、鳥山和伸、山口紀子、武田晃、中尾淳、原田久富美、高橋知之、山上睦、小林大輔、吉田聡、杉山英男、柴田尚：土壌―作物系における放射性核種の挙動。日本土壌肥料学雑誌、**82**, 408-418（2011）
9) 山口紀子、高田祐介、林健太郎、石川覚、倉俣正人、江口定夫、吉川省子、坂口敦、朝田景、和頴朗太、牧野和之、赤羽幾子、平舘俊太郎：土壌ー植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因。農業環境技術研究所報告、**31**, 75-129（2012）
10) 市川有二郎、井上智博、石井栄勇、内藤季和、高橋良彦、矢沢裕：千葉県立柏の葉公園内のアスレチックスペース「冒険のトリデ」における除染効果の検証。*RADIOISOTOPES* **63**, 13-30（2014）
11) 田崎晴明「やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識」、朝日出版社（2012）
12) 岩元洋介、佐藤大樹、遠藤章、坂本幸夫、呉田昌俊、久語輝彦：汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検証。*JAEA-Technology* **2011-26**, 18p.（2011）
13) 田川明広：平面汚染による空間放射線量率の評価 ー公園における除染試験結果ー。日本原子力学会和文論文誌、**11**, 111-117（2012）


2013年 7月29日受付
2013年12月 3日受理

## 和 文 要 約

千葉県立手賀沼親水広場において、除染前後の線量率等の詳細な測定・解析を実施し、汚染実態の把握に併せて除染効果の検証を行った。除染前調査で、地表面が芝生またはウレタンである箇所で 0.23 μSv/h を超過する調査地点が多く見受けられた。また芝生においては、芝生の刈りかすや枯れた芝生の堆積物（サッチ）にその下に位置する土壌よりも放射性物質が多く蓄積していることが確認された。除染作業として、芝の深刈り（地表面から 2 cm 深さ）と遊歩道のウレタン舗装の削り取り（厚さ 10 mm）が行われた。芝の深刈りによる地上から高さ 50 cm、1 m の線量率の低減の範囲（平均）はそれぞれ、8 ～ 53 %（34 %）、27 ～ 63 %（46 %）であった。ウレタン削り取りによる地上から高さ 50 cm、1 m の線量率の低減の範囲（平均）はそれぞれ 53 ～ 63 %（57 %）、43 ～ 56 %（48 %）であった。除染後に実施した調査では、すべての除染対象区域内の調査地点で線量率が 0.23 μSv/h 未満であった。芝の深刈りによってサッチを取り除くことで、ある程度の除染効果が得られることは確かだが、深刈りの深度が足りないと効果が不十分となる可能性があるため、芝の深刈りを実施する際は、随時線量率を測定し低減の有無を確認しながら作業の進め方や深度を配慮する必要がある。