

東日本大震災から 10 年を迎えて（福島県における支援研究）

上田 義勝^{1*}, 杉山 暁史¹, 徳田 陽明², 二瓶 直登³, 谷垣 実⁴

Ten years of the collaborative research in Fukushima prefecture since the Great East Japan Earthquake

Yoshikatsu Ueda^{1*}, Akifumi Sugiyama¹, Yomei Tokuda², Naoto Nihei³, Minoru Tanigaki⁴

概要

2011年3月11日に発生した東日本大震災から、10年の月日がすでに経過しつつある。我々は震災直後から福島県に赴き、現地での復興支援研究に携わってきた。現在も連携支援を模索しながら、研究活動、および研究成果を議論するシンポジウムを定期的開催している。特に震災直後には、放射性セシウムの除去のため、いち早く微細気泡技術に着目し、除染実証事業として現地での実証実験を行った。また、その後の福島県との新しい共同研究として、観葉植物の延命などの微細気泡技術の農業利用や、長期間にわたる環境放射能のリアルタイムモニタリングなど、10年を経過しつつある現在でも国際的・学際融合的研究を幅広く続けてきている。

本稿では、我々の福島県での研究に関する成果、および公開シンポジウムについてのこれまでの活動をまとめ、今後の連携支援研究にもつながる形として、ここに報告するものである。

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災による原発事故の影響は大きく、福島県内の放射性物質による土壌・水質汚染は10年を経過しつつある現在でも、まだ解決の道筋を模索している地域が存在する。原発事故により、主に放射性セシウムが環境中に飛散されたこともあり、事故直後の除染技術として、生活圏における放射性セシウムの除染や環境モニタリングを目的とした実証研究が行われてきた。我々は震災直後から福島県での連携支援研究を活発に行い、その研究成果を一般に広く公開しながら、福島県にて活動する研究者との議論を精力的に行なってきた。特に、毎年開催の生存圏シンポジウムとして、2011年度から2020年度まで都合10回のシンポジウムを継続して開催してきた事は特筆に値する。このシンポジウムで得られた知見や、参加頂いた皆様との議論を通じた共同研究の広がりや、被災された方々への支援につなぐための活動の継続につながるとともに、我々にとって貴重な経験・財産となっている。

我々の研究の一例としては、除染技術としてマイクロメートル以下のサイズである微細気泡（ウルトラファインバブル、ナノバブルなど）に着目した事である。空気と水という一般に広く存在する材料を用いた微細気泡水による除染効果についてその効果を実証し、成果報告を行った¹⁾。具体的な実

2021年4月26日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 宇宙圏電磁環境探査分野。

²〒520-0862 滋賀県大津市平津 2-5-1 滋賀大学教育学部。

³〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地 福島大学食農学類。

⁴〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2-1010 京都大学複合原子力科学研究所。

* E-mail: yueda@rish.kyoto-u.ac.jp

験としては、福島県下の砂礫ならびにコンクリート、アスファルトからのセシウム除染係数の評価である。その結果、微細気泡水の除染係数が水と比較して20%程度高いことを見いだした。特に市販の高圧洗浄機と微細気泡水を組み合わせた場合、約80%という除染係数を示している。この結果は、既存の技術との組み合わせにより、洗浄効率が飛躍的に向上することを示唆している。しかし、微細気泡水によるセシウム除染の効果には不明な点が多く、また、どんな対象であっても有効であるかは未だわかっていない部分も多い。また、年数が経過するごとに風雨などの天候で自然除染が進むと、それ以上の除染は難しくなることがわかってきている。

シンポジウム開催や微細気泡技術をきっかけとして、様々な国際的・学際融合的な研究も活発に進めてきつつある。微細気泡技術に関しては、その利用の簡便さから、福島県農業総合センターにおいて、花き類の延命試験に利用され、長期保存効果が明らかになった²⁾。国際的な活動としては、タイ王国や中国との微細気泡技術による共同研究も行ってきたが、福島県との支援研究から離れる研究課題であるため、詳細は割愛する。その他、複合原子力科学研究所が開発したGPS連動型放射線自動計測システムKURAMA-II（クラマ, Kyoto University RAdiation MApping system)^{3,4)}を用いる事で、福島県下における農耕地やその周辺の環境放射能をリアルタイム計測し、長期的な経時変化について計測を行った。特にKURAMA-IIを用いた計測では毎年の計測による経時変化を毎年行う事で、実測としての土壌サンプリング回数を減らしつつ、より広い範囲の計測結果を簡単に調査する事が出来る。2018年ごろからはNPO法人ふくしま再生の会とも協力して、主に飯舘村周辺の環境放射能の調査を行いつつある。

本稿においては、生存圏シンポジウムを中心とした我々の研究成果公開について紹介した後、そこからつながりを得て発展してきた研究活動について、特に微細気泡技術とKURAMA-IIによるモニタリングを中心に紹介していく。

2. 生存圏シンポジウム「東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて」

2011年度から、生存圏シンポジウム「東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて」を毎年開催し、2020年度までに10回開催している(図1)。福島県における研究を開始した発端は、もともとは個人的な友人としてのつながりがきっかけであった。その後、予算的には京都大学総長裁量経費の他、日本原子力研究開発機構の除染実証事業と発展し、それらの研究成果を一般向けにも公開する事を目的として、第1回目となる第191回生存圏シンポジウムを開催するに至っている。10回の生存圏シンポジウム開催の中では、国立大学協会との共催、京都府の後援などの支援を頂きつつ、延べ人数としては542人の参加があった。開催地としては、京都府、福島県、東京都での開催を行い、また第327回生存圏シンポ(第6回)では、海外の研究者を招へいして、浜通り地域における開催と現地見学も行う事で、国際シンポジウムとして非常に充実した研究集会も行う事が出来た。第390回生存圏シンポ(第8回)以降は、複合原子力科学研究所との共同開催を行う事で、これまで農業関係の研究テーマが比較的多かったシンポジウムから、環境モニタリングや情報通信分野など、さらに広い分野からの参加を募って開催してきており、さらに連携分野の幅が広がりつつある。2020年度は、COVID-19の影響もあり、オンラインと京都と福島のリモート会場による分散3元シンポジウムとして開催したが、オンライン参加の強みもあり、海外からの発表も含め、これまで通り多くの参加者による活発な議論を行う事が出来た。

生存圏シンポジウム以外の活動としては、福島県農業総合センターとの連携研究も2011年に開始したほか、生存圏研究所における新領域開拓・融合に向けた取り組みとして採択され、融合研究として関連研究者との会合を福島県・京都府において行ってきた。

その他、後方的な活動としては、京都府教育委員会が行っている子どもの好奇心をくすぐる体験授

業「出前・受入授業」がある。我々は2012年よりこの出前授業において、毎年福島県での活動を紹介しており、これまでに13の京都府内の小中高校において、出前授業を開催し、活動を紹介してきている。また、京都府以外においても、和歌山県や東京都での授業開催の他、福島県現地の見学会も随時開催してきている（東京理科大学、筑波大学附属駒場中・高等学校 灘中・高等学校など）。

<p>2011年度(平成23年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 京都大学総長裁量経費による活動 ・ 日本原子力研究開発機構 平成23年度除染技術実証試験事業 ・ 国立大学協会 震災復興・日本再生支援事業(H23-H25) ・ 第191回生存圏シンポジウム(京都府にて開催) 2012.1.6 ・ 福島県農業総合センターとの連携研究
<p>2012年度(平成24年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第215回生存圏シンポジウム(京都府にて開催) 2012.11.30 ・ 生存圏科学の新領域開拓に向けた取り組み(福島県との連携研究) 2013. 2. 21
<p>2013年度(平成25年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第240回生存圏シンポジウム(京都府にて開催) 2013.12.20 ・ (第2回)生存圏科学の新領域開拓・融合研究に向けた取り組み 2014.3.4 ・ 第2回新化学技術研究奨励賞(特別課題) 東日本大震災関連
<p>2014年度(平成26年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第271回生存圏シンポジウム(福島県にて開催) 2014.12.7 ・ (第3回)生存圏科学の新領域開拓・融合研究に向けた取り組み 2014.12.7 ・ (第4回)生存圏科学の新領域開拓・融合研究に向けた取り組み ー福島県及び大学間連携融合研究に向けたパネルディスカッションー 2015.3.9
<p>2015年度(平成27年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第293回生存圏シンポジウム(京都府にて開催) 2015.9.8
<p>2016年度(平成28年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第327回生存圏シンポジウム(福島県にて開催)2016.10.26
<p>2017年度(平成29年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第357回生存圏シンポジウム(福島県にて開催)2017.11.27-28
<p>2018年度(平成30年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第390回生存圏シンポジウム(福島県にて開催)2018.12.11-12 ・ 複合原子力科学研究所との共同開催
<p>2019年度(令和元年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第416回生存圏シンポジウム(東京都にて開催)2019.12.11-12 ・ 複合原子力科学研究所との共同開催
<p>2020年度(令和2年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第440回生存圏シンポジウム(オンライン、福島、京都での3元開催)2020.11.30-12.1 ・ 複合原子力科学研究所との共同開催

図1：これまでの生存圏シンポジウムと関連する事業などについて

3. 微細気泡を用いた除染実証事業⁵⁾

本章では、福島県での支援研究のきっかけとなった微細気泡を用いた除染実証事業について紹介する。微細気泡を生成する方式としては、細孔を持つパイプへ気体を圧入する細孔式、液体に超音波を照射する超音波式、過飽和状態の気体を析出させる加圧溶解式、気液二相流体を遠心分離して剪断する気液混合剪断方式などが知られている。本研究では、ウルトラファインバブル発生装置 BUVITAS HYK-32-D (Ligatic 製)を用いて、気液混合剪断方式による微細気泡の生成を行った(図2)⁶⁾。

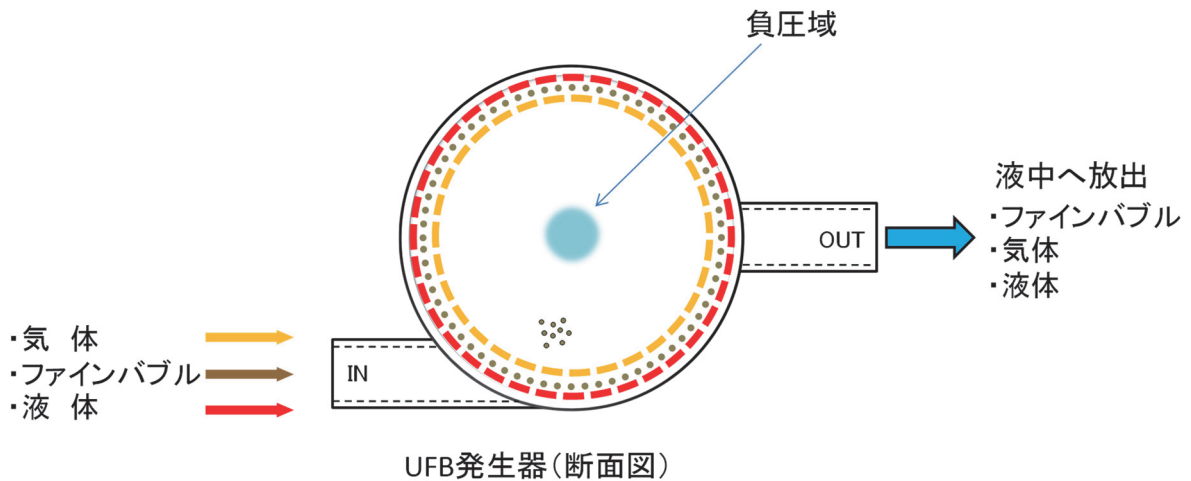


図2：気液混合せん断方式によるウルトラファインバブル(UFB)の生成。IN側から気体と液体、それらを混合させ発生させたファインバブルを、ポンプ圧力でUFB発生器に送る遠心力により、ファインバブルがせん断されUFBが発生する。

また、気泡径の評価は、NanoSight LM10 (Malvern Panalytical 社製)により行った⁷⁾。BUVITASにより生成した微細気泡水は図3に示したように、気泡の最頻直径は約100 nmであることがわかり、ウルトラファインバブルであることが確認できた。また、7日経過後にも微細気泡が水中に存在することがわかった⁷⁾。

微細気泡の安定性に関する検討と、その影響についてナノサイズのバブルの粒度と電気伝導度に関する調査を行った。電気伝導度測定には、導電率測定計(S230、METTLER TOLEDO)を用いた。一般大気を用いて微細気泡を生成した際の生成器稼働時間と濃度・電気伝導度の関係を図4に示す。比較対象として、純水を大気中に曝露した際の電気伝導度の変化も示した。大気

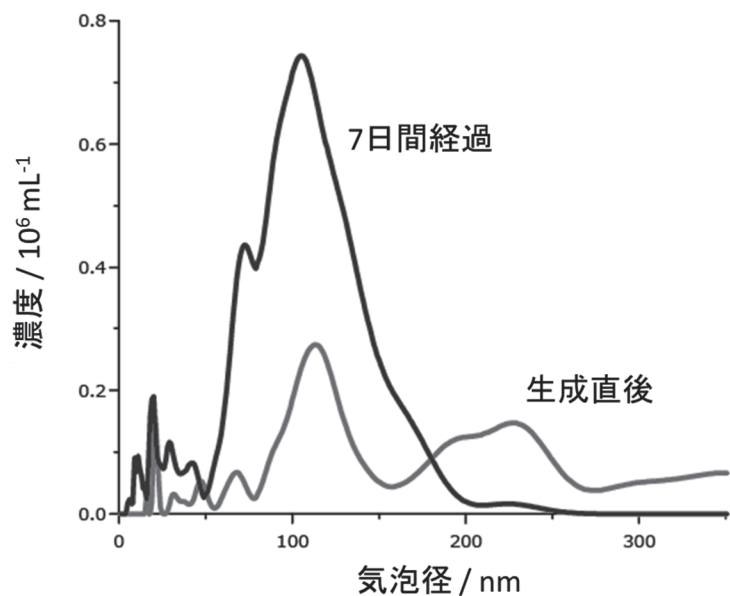


図3：気泡の直径と濃度の関係(生成直後と、7日間経過後の比較)

曝露した純水の場合、おそらく二酸化炭素などの溶解度の高い気体により伝導度が緩やかに飽和するのに対し、微細気泡水の場合には気泡濃度の上昇に伴った電気伝導度の低下が見られ、気泡近傍での拡散電気二重層の変化を示唆するものである。

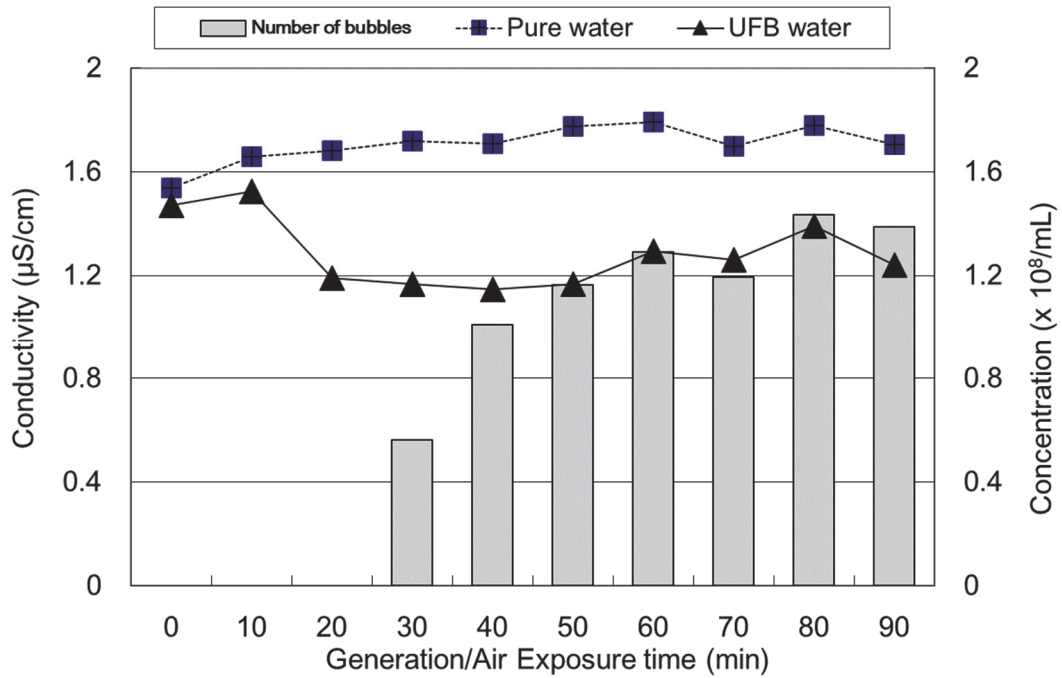


図4：装置稼働時間に対する気泡濃度（右）と電気伝導度（左）の変化。■は純水、▲はUFB水の値を表す。

また、生成時に使用する気体による電気伝導度の違いについても測定を行った。気体の違いをより精度よく見るため、純水の初期抵抗と、各種気体（酸素及び窒素）により生成した微細気泡（使用量10L、気体流量700ml/min、15分稼働）について、生成直後から1分毎の電気伝導度（μS/cm）の変位について測定を行った。初期条件を同一とするため、伝導度測定前に対象となる水を各種気体により1時間曝気し、温度変化についても初期温度40℃（生成終了時の平均温度）と設定し、外気温22℃一定として測定を行った。外気による影響もできる限り減らすため、出来るだけ表面積の小さな管瓶を用いた。測定誤差についての検討も行うため、測定回数を3回行った結果を示す（図5）。

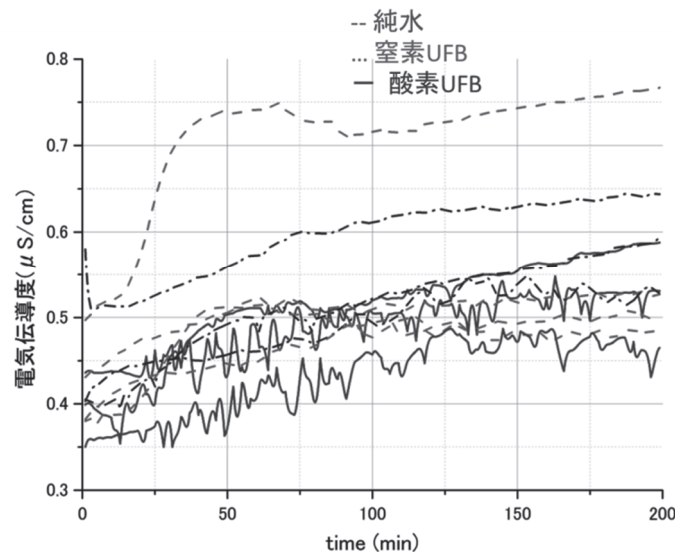


図5：純水（---）、窒素UFB水（...）、酸素UFB水（—）の電気伝導度の変化

生成直後の電気伝導度の平均値は、純水が 0.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、窒素が 0.42 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、酸素が 0.38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ となり、優位な差違がみられている。この事は液中に存在する微細気泡が電気伝導度に影響を与えている可能性を示唆するものである。

3.1 砂礫の洗浄^{1,8)}

土壤除染の一例として、微細気泡を用いた洗浄効果について紹介する。洗浄サンプルの砂礫は、福島県農業総合センター（福島県郡山市）で採取し、表面の粘土を除去するために水を用いて前洗浄を行った。洗浄後の砂礫 100g を種々の水 500ml 中にそれぞれ静置し、静置前後の乾燥状態での放射線強度を比較した。用いた水は、精製水、微細気泡水、市販の中性洗剤を 0.15wt% 添加した水（以下、石けん水）である。

図 6 に示すように、微細気泡発生装置の稼働時間とともに、気泡の最頻濃度（1ml 中の個数）が増え、¹³⁷Cs の除去率が増加することがわかった。また、精製水、石けん水との比較を行った結果を図 7 に示す。砂利の浸漬洗浄試験（12 時間及び 3 時間の静置）では、除染係数が 50-60% であり、原水と比較して 20% 以上高くなることがわかった。また、中性洗剤を原水、微細気泡水を比較すると、中性洗剤の添加効果はほとんどなく、原水と微細気泡水単体での試験結果と同様となった（図 7）。この試験においては振とうを加えていないため、この結果は微細気泡水そのものの除染作用を示しており、中性洗剤と同程度以上の洗浄効果を示したことは特筆に値する。さらに、生成後 2 週間経過した微細気泡水を用いて砂利の浸漬洗浄試験（静置）を行った結果でも同様の傾向を示しており（図 8）、原水と比較して 20% 以上の除染係数を示すことが明らかとなった。この結果は、微細気泡水が洗浄液として使用可能な保存時間が非常に長いことを示している。

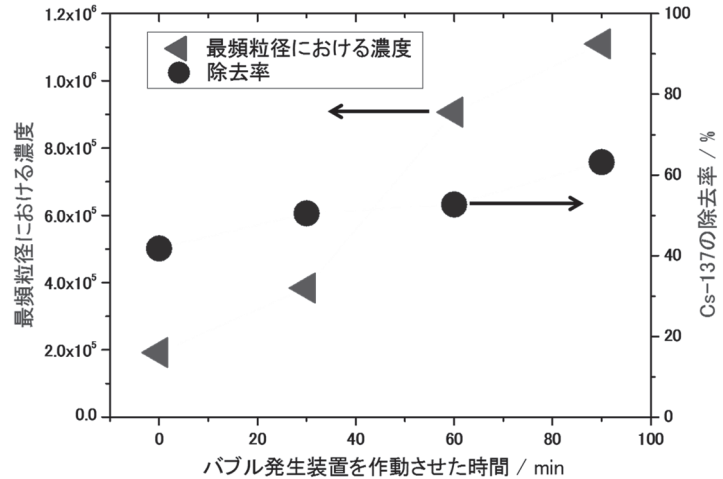


図 6：UFB 発生装置の稼働時間と、最頻粒径濃度（1ml 中の個数, ▲）、砂礫からの Cs-137 の除去率の関係（●）

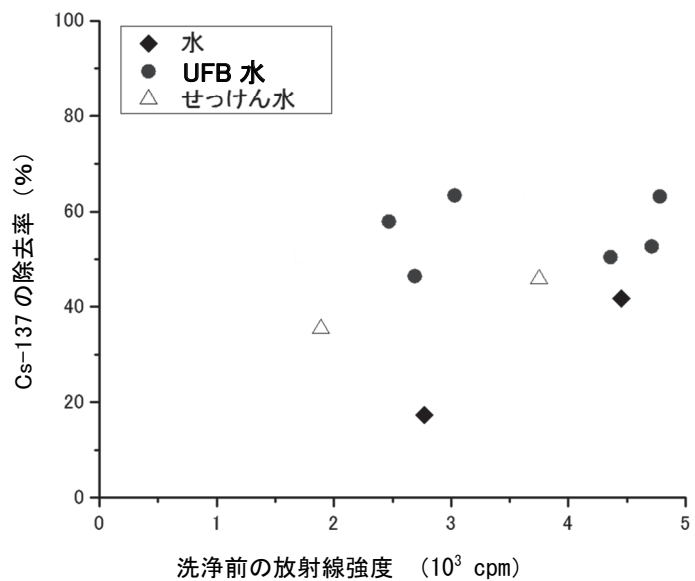


図 7：洗浄前の放射線強度（cpm）と Cs-137 除去率との関係。◆水、△せっけん水、●UFB 水。UFB 水は他の水よりも洗浄効果に優れる。

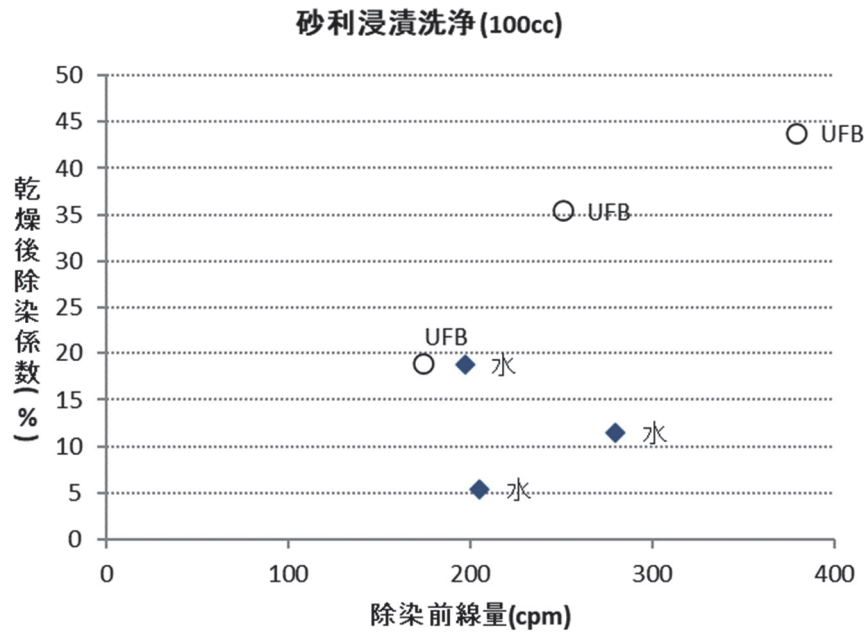


図8：砂利(100cc)の浸漬（静置）による洗浄の除染係数（乾燥後）◆は水、○はUFB水（生成15日後）を用いて行った結果である。生成15日後も洗浄効果を保持している事がわかる。

3.2 高圧洗浄との併用⁸⁾

除染対象から所定の高さ(2cm、5cm)から、7.5MPaの水圧で試験水を吐出し(2cm: 20秒、5cm: 1分)、洗浄試験を実施した。放射線密度の測定は洗浄前、洗浄面乾燥後に実施した。アスファルト舗装面、コンクリート舗装面、歩行者用タイル（多孔質面）、樹木（ポプラ）の除染試験結果を図9～13に示した。

図9～11にアスファルト舗装面とコンクリート舗装面に対して高圧洗浄の結果を示した。これより微細気泡水を用いると原水よりも除染係数が最大20%（約5-20%）向上することがわかった。また、生成後6日間経過した微細気泡水を用いた場合でも、アスファルト舗装面を除染することができた(図10)。一方で歩行者用タイルの高圧洗浄の場合（図12）、微細気泡水と原水の双方で10～40%であり、アスファルトやコンクリートと比較すると、除染効果が低いことがわかった。透水性のタイル表面の放射性セシウム（それを吸着した土等）が単に内部で移動したためではないかと考えた。以上の結果より、アスファルト舗装面ならびにコンクリート舗装面の高圧洗浄に微細気泡水を併用することにより洗浄効果が高まることが明らかとなった。

樹木（ポプラ）表皮の高圧洗浄を行った結果を図13に示す。なお、除染は樹皮表面に苔や粉塵等の付着が無い状態で行った。微細気泡水による除染係数は25%であったが、原水よりも20%以上も高いことがわかった。また、樹木の洗浄後の状態も良好であることを確認した。森林の除染方法は一般的に難しいとされているが、微細気泡水を用いた高圧洗浄は、森林汚染の低減に有効な技術だといえる。その他の応用としては、有機物を含んだ汚染物に対する洗浄にも効果があると想定される。

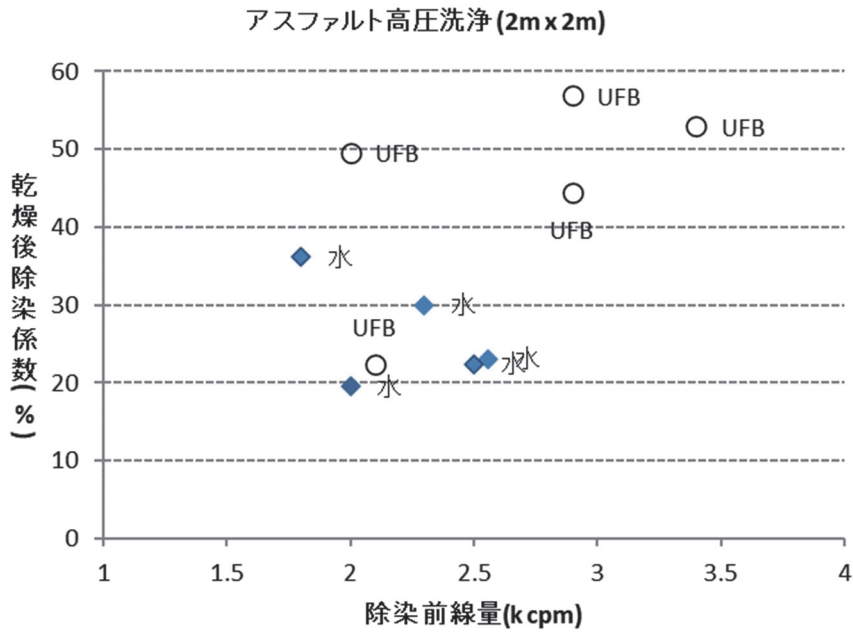


図 9 : 高圧洗浄機によるアスファルト(2m x 2m)の除染係数(乾燥後)。◆は水, ○は微細気泡水(UFB, 生成直後)を用いて除染を行った結果を表す。微細気泡水は原水よりも高い除染係数を示すことがわかる。

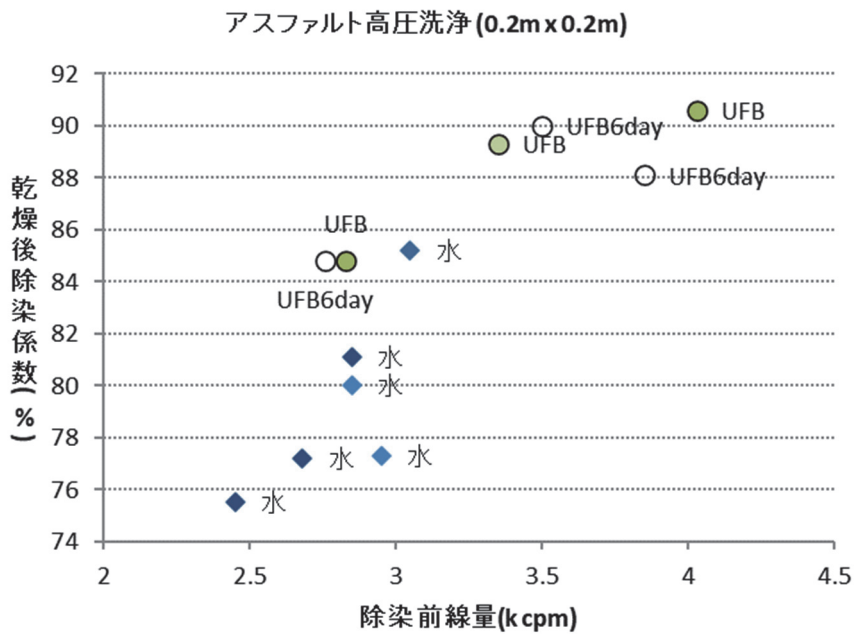


図 10 : 高圧洗浄機によるアスファルト(0.2m x 0.2m)の除染係数(乾燥後)。◆は水, ○, ●は微細気泡水(UFB (生成 6 日後), UFB7day(生成直後))を用いて除染を行った結果である。水は原水よりも高い除染係数を示すことがわかる。

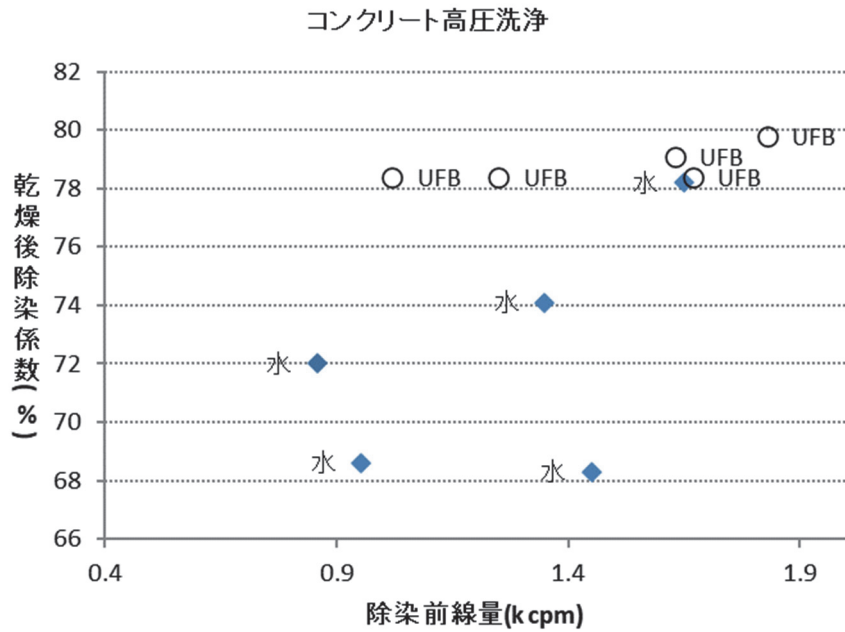


図 11 : 高圧洗浄機によるコンクリートの除染係数(乾燥後)。◆は水, ○は微細気泡水(UFB(生成直後))を用いて除染を行った結果である。微細気泡水は原水よりも高い除染係数を示すことがわかる。

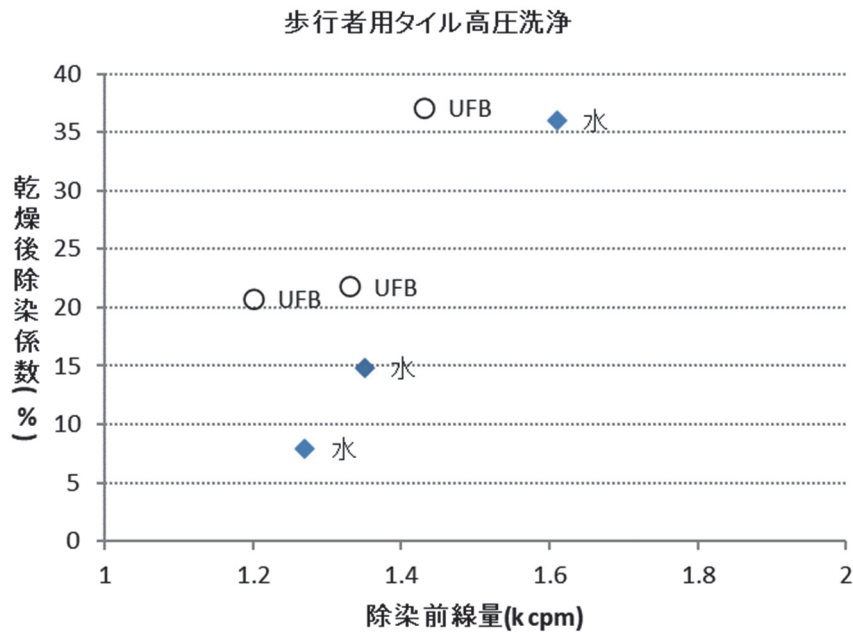


図 12 : 高圧洗浄機による歩行者用タイルの除染係数(乾燥後)。◆は水, ○は微細気泡水(UFB(生成直後))を用いて除染を行った結果である。微細気泡水による顕著な効果は認められない。

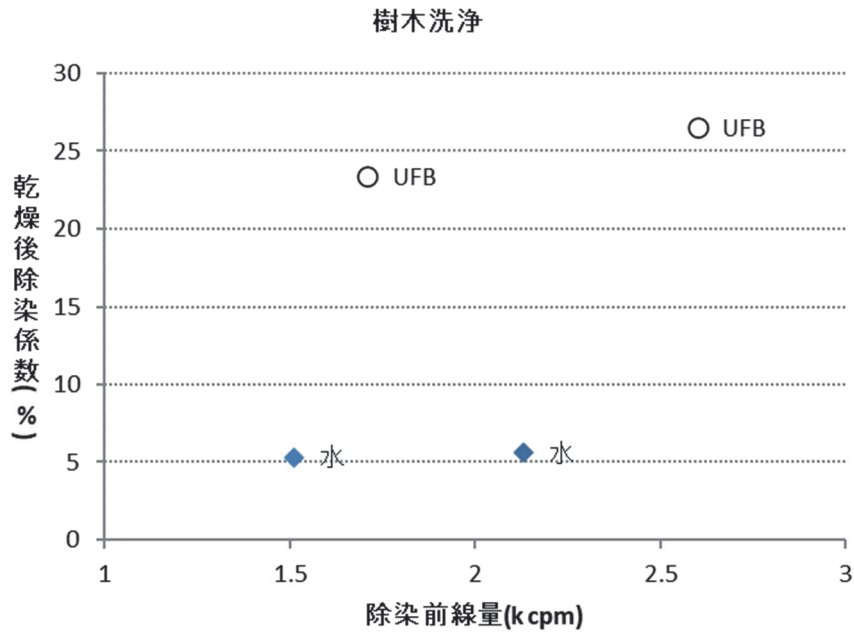


図 13 : 高圧洗浄機による樹木の除染係数(乾燥後)。◆は水、○は微細気泡水(UFB(生成 6 日後))を用いて除染を行った結果である。微細水は原水よりも高い除染係数を示すことがわかる。

3.3 洗浄のメカニズムについて

なぜ微細気泡を含む水が洗浄に有効であるかの要因として、表面吸着や表面電荷による影響、気泡が研磨剤として働く可能性、気泡の持ち上げ効果、表面張力の低下による浸み込みなどが考えられる。しかしながら現時点では、いずれの要因によるものかについての科学的説明は定かではない。ただし、微細気泡水により洗浄を行った洗浄液の方が、そうでないものと比べて濁っているため、砂礫の表面に付着した粘土質とともにセシウムが除去されたと推察される。

3.4 微細気泡水を用いる利点について

原発事故から 10 年が経過した 2021 年においては、長期間の風雨に晒された環境では、放射性セシウムなどの環境放射能はある程度移動し、土壤に含まれる雲母類等の鉱物と化学吸着する事で、除去が非常に難しくなっている部分もある。また一方で、Cesium Ball と呼ばれる状態として、微粒子状態の鉱物と一緒に、局所的に非常に高いセシウム濃度の物質が植物に付着している状況も発見されている。微細気泡水を用いた除染については、汚染された砂粒、塵を微細気泡水が洗浄面から除去したためではないかと考えている。今回の手法では水と空気のみからなる除染であるため、新たに除染効率を上げるというよりは、通常の洗浄に対して洗浄効果を高めることで、微粒子状に固着した環境放射能の除去に有効であると考えている。

4. GPS 連動型放射線自動計測システム KURAMA-II を用いた環境放射能モニタリング

福島県飯舘村にある農作物試験地とその周辺の河川、道路について環境放射能モニタリングを行った事例について紹介する。尚、計測は徒歩で行い、農作地、周辺畦畔と灌漑水路を歩行する事で、除染後の農作地に新たに流入する放射性セシウムや、水路のセシウム移動状況について調査した。環境

放射能の可視化に用いた KURAMA-II については、福島大学所有のものを用いた。本 KURAMA-II は地上歩行サーベイ型であり、Na-I シンチレーションサーベイメータ（浜松ホトニクス C12137-01 製）が2台搭載され、うち1台を厚さ1cmの鉛板コリメータで覆うことで、指向性を持たせて同時計測・校正する。2台の測定結果を用いる事で空間線量と地表線量を評価する事が可能である。また、KURAMA-II には DGPS(Differential GPS)が搭載されており、精度誤差1m以下で計測が可能である。さらに、測定結果と常にネットワーク回線を通してクラウドデータとして保存する事で、測定結果を常時どこからでも確認する事が出来る。

KURAMA-II による地図上での環境放射能可視化と同時に、除染が行われていない水田畦畔の汚染状況を把握するため、水田地帯の汚染マップ作製、畦畔の放射性セシウム濃度分布、水田地帯を流れる灌漑水中の放射性セシウム濃度も調査した。水田を取り囲んでいる畦畔の平坦部と灌漑水側の傾斜地下部（平坦部との高低差約1m）で放射性セシウム濃度を調べている。土壌採取は深さ15cmまで行い、5cm毎に分けて深さ別に測定した。

4.1 KURAMA-II による計測結果と傾向

環境放射能計測を行った場所としては、福島県飯館村にある農作物試験地とその周辺の河川、道路について計測している。また、NPO 法人ふくしま再生の会と協力して、飯館村牧場周辺の除染後の環境放射能の時間的な変化についても定期的に計測を行った。計測は徒歩で行い、農作地、周辺畦畔と灌漑水路を歩行する事で、除染後の農作地に新たに流入する放射性セシウムや、水路のセシウム移動状況について調査した。

環境放射能の可視化に用いた KURAMA-II については、福島大学所有のものを用いた。KURAMA-II は地上歩行サーベイ型であり、Na-I シンチレーションサーベイメータ（浜松ホトニクス C12137-01 製）が2台搭載され、うち1台を厚さ1cmの鉛板コリメータで覆うことで、指向性を持たせて同時計測・校正する。2台の測定結果を用いる事で空間線量と地表線量を評価する事が可能である。また、KURAMA-II には DGPS(Differential GPS)が搭載されており、精度誤差1m以下で計測が可能である。さらに、測定結果と常にネットワーク回線を通してクラウドデータとして保存する事で、測定結果を常時どこからでも確認する事が出来る。

KURAMA-II による地図上での環境放射能可視化と同時に、除染が行われていない水田畦畔の汚染状況を把握するため、水田地帯の汚染マップ作製、畦畔の放射性セシウム濃度分布、水田地帯を流れる灌漑水中の放射性セシウム濃度も調査した。水田を取り囲んでいる畦畔の平坦部と灌漑水側の傾斜地下部（平坦部との高低差約1m）で放射性セシウム濃度を調べた。土壌採取は深さ15cmまで行い、5cm毎に分けて深さ別に測定した。

KURAMA-II による計測結果を図15,16に示す。図15においては特に高低差のある畦道と灌漑水のそれぞれを土壌サンプリングし、汚染密度(Bq/kg)を計測したものを比較している。大まかな傾向としては、KURAMA-II にて高い汚染密度を計測した点(B, E, F)では、低い位置にある灌漑水側の土壌の汚染密度が高い傾向がみられた。また、また、A, C地点においてはKURAMA-II との相関がはっきり見えていないが、これら2地点は別系統から灌漑水に水が流れ込む地点でもあるため、場所による汚染密度の変化が大きいことが考えられた。KURAMA-II での測定により、誤差精度が良いため、灌漑水路内部での計測と、すぐ両側のあぜ道部分や農耕地内の測定との差がよく見て取れる事がわかる。特に灌漑水路底部に残留している¹³⁷Csや、あぜ道に拡散していく様子などが、今後の継続した計測により明らかに出来る可能性がある。図16はふくしま再生の会と共同で計測結果であるが、除染後の牧場が除染されていることが分かった一方で、山林から移行してくる環境放射能が存在する可能性もあるため、定期的な計測を今後も行っていく予定である。

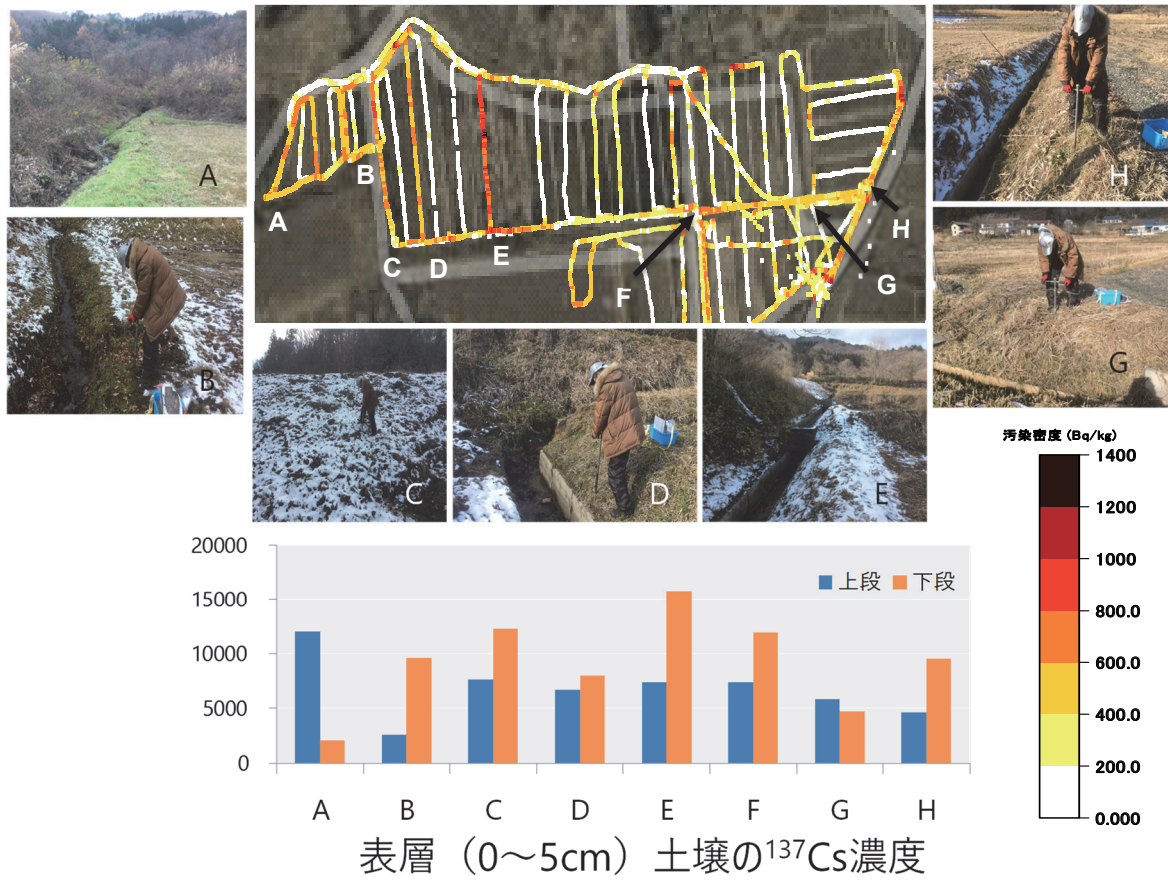


図 14 : KURAMA-II による歩行サーベイ (上部コンターマッピング) と、土壌サンプリングによる土壌中の放射性セシウム濃度との比較 (下部棒グラフの縦軸は Bq/kg)

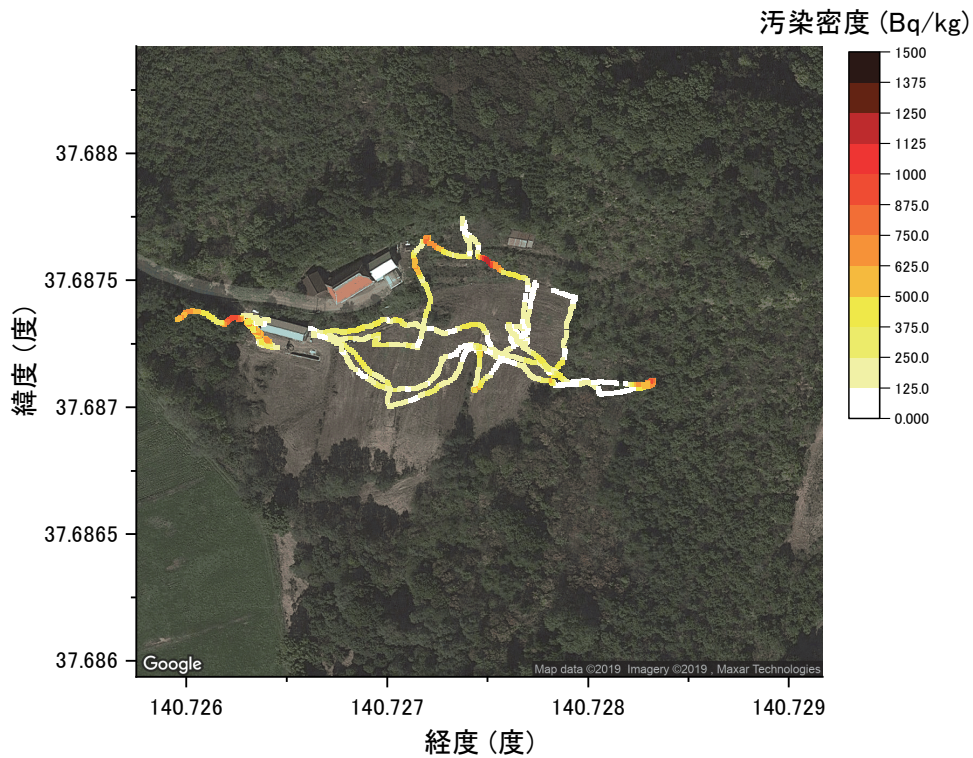


図15 : KURAMA-IIによる歩行サーベイの結果 (除染後の牧場の計測)

4.2 計測のまとめと今後の課題

東京電力福島第一原発の事故に伴い、広範囲にわたる地域が放射性セシウムにより汚染された。土壌中の放射性セシウム濃度が特に高い農地では表層約 5cm を剥ぎ取る除染が実施されている。一方、このような除染作業が行われるのは圃場の内部のみで、水田周囲の畦畔は除染作業が行われていない。原発事故から 10 年が経過し、避難指示が解除された地域でも、これから水稲の作付が徐々に行われる。本研究での計測のまとめは以下の通りとなる。

- ① 水田地帯の汚染マップの作製：調査地は福島県飯舘村の数十枚の水田から形成される水田地帯（約 500m×200m）とした。歩行型放射能測定システム（KURAMA-II）を用いて、調査対象水田地帯の放射性セシウム汚染マップを作製した。表土剥ぎなど除染を実施した圃場内に比べ、除染が行われていない圃場や畦畔で高い傾向を確認した。
- ② 畦畔の放射性セシウム分布：畦畔の平坦部より傾斜地下部で放射性セシウム濃度は高い傾向を示し、平坦部から傾斜地下部へ放射性セシウムの移動が示唆された。なお、深さ別の放射性セシウム濃度は、各地点ともおおよそ表層 5cm に存在していた。
- ③ 水田地帯を流れる灌漑水中の放射性セシウム濃度：容量（L）当たりの放射性セシウムは採取地点の差はなかったが、重量（kg）当たりの放射性セシウム濃度は上流より下流で高かった。灌漑水をろ過したフィルターのオートラジオグラフィを取得したところ、ろ紙は全体に放射性セシウムが分布しているのではなく、粒子状の点が局在していた。水田地帯を灌漑水が通過する際に、粒状の放射性セシウムが供給されていることが示唆された。

5. まとめ

2011 年から継続している福島県における支援研究として、生存圏シンポジウムの活動の紹介と、支援研究に関わる研究成果として微細気泡研究、またリアルタイム環境放射能計測の現状についてまとめた。生存圏シンポジウムの活動をまとめた資料としては、第 293 回生存圏シンポの冊子に詳細にまとめている部分もあるため、割愛した部分も多いが、京都大学としての活動についてもいくつか報告をまとめた資料となっているため図 16 に表紙として紹介させて頂く⁹⁾。

微細気泡に関しては基礎研究や応用利用研究として個別に発展した研究活動になっており、発展研究として現在も様々な研究機関と協力して活動を続けている。また、KURAMA-II による環境放射能計測については、国際共同研究に繋がる活動として、タイ王国の Rajamangala University of Technology Lanna の Rattanaporn 助教と共同で計測も行っており（図 17）、今後の国際共同研究の発展にもつながる研究として期待されるものである。

2021 年の現在も様々な自然災害が数多く発生し、また災害に伴う事故なども発生している。我々は 2011 年の震災を体験し、その被害の大きさ、また環境中に放出された放射能に対する知識不足を経験した。生存圏研究所の理念として掲げられていた「社会的な要請を背景にして人類の生存と繁栄を脅かす諸問題の解決に取り組む事」は、まさにこの震災対応に対して、我々が一致団結して解決に取り組むべき最重要課題であった。そのため、大学・企業などの垣根を超えた関係として、様々な方々からご教授頂き、活発な議論を進めて今日までの研究活動として継続してきている。今後もまだ連携研究活動を続け、特に福島県だけでなく、他地域、また世界の生存圏繁栄のため、研究活動に邁進したい。



図 16：第 293 回生存圏シンポジウム表紙



図 17 : Rattanaorn 助教、二瓶准教授（撮影当時は東大に所属）との共同での KURAMA-II による計測

参考文献

- 1) Y. Ueda, Y. Tokuda, S. Fujimura, N. Nihei and T. Oka, Removal of Radioactive Cs from Gravel Conglomerate using, Water Containing Air Bubbles, *Water Science & Technology*, 67.5, 996-999, 2013
- 2) 上田 義勝, 徳田 陽明, 二瓶 直登, 矢島 豊, 矢吹 隆夫, 微細気泡水を用いた切り花の鮮度保持効果について, 日本混相流学会, 28, 3, 340-344, 2014
- 3) M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya, N. Sato, H. Yoshino, H. Yamana, Development of a car-borne γ -ray survey system, KURAMA-II, *Nucl. Instr. Meth. A* 726 162-168, 2013.
- 4) M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya, N. Sato, H. Yoshino, H. Yoshinaga, Y. Kobayashi, A. Uehara, H. Yamana, Development of KURAMA-II and its Operation in Fukushima *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 781 57-64 2015.
- 5) 上田 義勝, 徳田 陽明, 福島県農業総合センターとの連携研究（除染及び農業分野への応用利用）－微細気泡生成技術－, *東京大学アイソトープ総合センターニュース*, Vol. 43, No. 3, 2-10, 2012/12
- 6) Miyamoto M., Ueyama T., Washing method and washing apparatus, Japanese Patent (Kokai) 2007-083142, 2007
- 7) Gallego-Urrea, J.A.; Tuoriniemi, J.; Hassellöv, M. Applications of particle-tracking analysis to the determination of size distributions and concentrations of nanoparticles in environmental, biological and food samples. *Trends Analyt. Chem.* 30, 473-483, 2011.
- 8) 上田義勝, 日本原子力機構「2011年度除染モデル実証事業」
<http://www.jaea.go.jp/fukushima/decon04/ps11.pdf>
- 9) 第5回東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて, 第293回生存圏シンポジウム

著者プロフィール



上田 義勝 (Yoshikatsu Ueda)

＜略歴＞ 2003 年京都大学情報学研究科単位取得退学／2004 年京都大学博士（情報学）取得／2002 年京都大学宙空電波科学研究センター 助手／2004 年京都大学生存圏研究所 助手／2007 年同助教より現在に至る

＜研究テーマと抱負＞水中の微細気泡の特性計測とその応用利用。また福島県における支援研究など。＜趣味など＞合気道（五段位）、犬の散歩



杉山 暁史 (Akifumi Sugiyama)

＜略歴＞ 2008 年京都大学大学院農学研究科博士課程修了／2008 年博士（農学）／2008 年京都大学生存圏研究所研究員／2009 年コロラド州立大学客員研究員／2010 年京都大学生存圏研究所助教／2016 年 同准教授、現在に至る

＜研究テーマと抱負＞根圏領域における植物微生物相互作用と作物生産への応用。本グループではダイズセシウム吸収に関する研究。＜趣味など＞旅行、スポーツ観戦、ピザ作り



徳田 陽明 (Yomei Tokuda)

＜略歴＞ 2001 年京都大学大学院工学研究科 分子工学専攻博士後期課程 研究指導認定／2001 年京都大学博士（工学）／2001 年 日本学術振興会 研究員／2003 年 科学技術振興事業団 研究員／2003 年 京都大学化学研究所 助手・助教／2011 年 京都大学化学研究所 准教授／2016 年 滋賀大学教育学部 准教授／2018 年 滋賀大学教育学部 教授より現在に至る＜研究テーマと抱負＞化学と物理や数学との境界領域の研究。ガラスの物性が何で決まるかを探究したい。＜趣味など＞ロードバイク、盆踊り、囲碁、漫才を見ること等



二瓶 直登 (Naoto Nihei)

＜略歴＞1998 年東北大学農学研究科博士課程前期修了／2009 年東京大学 博士（農学）／1998 年福島県農業試験場勤務/2013 年東京大学大学院農学生命科学研究科准教授／2020 年福島大学食農学類准教授

＜研究テーマ＞農業環境中における放射性セシウムの挙動。作物-土壌-微生物間の相互作用解明を通じた環境保全型農業の技術開発など。

＜趣味など＞合気道（二段）



谷垣 実 (Minoru Tanigaki)

＜略歴＞ 1996 年大阪大学理学研究科単位取得退学／1999 年大阪大学博士（理学）取得／1996 年東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター 講師（研究機関研究員）／1999 年京都大学原子炉実験所 助手／2007 年同助教／2018 年京都大学複合原子力科学研究所 助教より現在に至る

＜研究テーマと抱負＞原子核物理とその関連分野、加速器及び物理計測機器制御技術。＜趣味など＞航空機や鉄道での旅行・日本酒