

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25517005

研究課題名(和文) 農村域での代掻きと水田深水湛水による放射線量低減効果の実証的研究

研究課題名(英文) Empirical research on reduction effect of radiation dose by deep water ponding and paddling at rural area

研究代表者

久保 成隆 (KUBO, Naritaka)

東京大学・農学生命科学研究科・教授

研究者番号：40134506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：水田湛水による放射線量の低減効果を調べるために、圃場実験を実施した。実測結果と数値解析結果を比べたところ、計算結果の方が過少になる傾向が見られた。これは、解析ではコンプトン散乱を考慮していないためと考えられるが、一連の解析によって乖離量を定量化することができた。一方、水源地において、地表面の状態が異なる測定地点を複数選び、土壌中の炭素、窒素と放射性Csの深さ方向の分布を測定した。その結果、土壌炭素の多い地点で、地表から20cm以深へ放射性Csが移行が著しい結果となった。

研究成果の概要(英文)：Field experiments were carried out to examine the effect of ponded paddy field to reduce the air radiation dose. Observed results were compared with numerically calculated ones, and numerical ones showed lower values than that of observed ones. This may be caused because the Compton effect was not considered for calculation, but through the analyses the differences were quantitatively evaluated. On the other hand, in the water source areas several points with different coverage were selected to observe the vertical carbon, nitrogen and Cs distributions. As the results, it was turned out that the radioactive Cs moved downward more than 20 cm more easily at the point where soil contains much carbon.

研究分野：灌漑・排水

キーワード：飯館村 空間放射線量 放射性セシウム 水田湛水 代掻き 遮蔽効果 湛水深 用水供給自動遮断装置

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災時の原子力発電所の被災により大量の放射性物質が環境へ散乱した。降下した放射性物質による強い放射線のため今なお居住に適さない地域では、多くの人が避難生活を強いられている。避難指示を受けて避難している被災者の総数は2012年2月現在16万人と言われているが(今井, 2012), チェルノブイリ原発事故の場合にも、生活様式の変化, 精神的ストレス, 経済活動の制限といった, 長期の避難による副次的影響が人々に大きな損害をもたらしたことが指摘されており, 空間放射線量を低減させて一刻も早く帰宅できる環境を再生することが, 強く望まれている。

### 2. 研究の目的

代掻きと湛水を行うと, 土壌と水の放射線減衰効果のために, 水田土壌表層に存在している放射性セシウムから空間へ射出される放射線量を低減させることができる。特に, 地表面に対して小さい角度でほぼ側方へ射出される放射線は土壌や水を通する距離が長く, 代掻きと湛水により水田周辺の道路や家屋へ到達する放射線量を大きく低減させることが可能であると考えられる。本研究グループは既に, 放射性物質の降下による深刻な被害を受けた福島県飯館村に実験田を設け, 被災地の水田地域での空間放射線量の低減を目的として予備実験を始めている。本研究では, これまでの予備実験を格段に発展させ, 実際の水田でこの手法を適用するための一般的な指針を提案し, 実際の被災地で空間放射線量を低減させて早期の帰宅を可能とする環境を再生する方策を提言することを目的としている。

### 3. 研究の方法

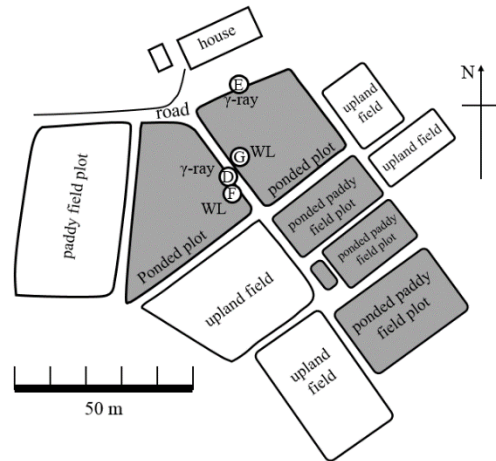
本研究では, 現地実験とモデル解析を行い, その結果から, 必要に応じて水田構造改良の指針を提言する。まず, 実際の被災地に設けた実験田で代掻きと湛水を行い, 空間放射線量を実測する。これと並行して, 理論に基づいて放射線の減衰量を計算するモデルを開発する。次に, 現地実験で得られたデータを用いてモデルの汎用化を行い, ある水田に代掻きと湛水を行った場合の空間放射線量の推定を可能にする。さらに, 本手法での放射線量の低減のために必要な水量の算定を行い, 各水田の現況に応じた水田構造改良の指針を提言する。

### 4. 研究成果

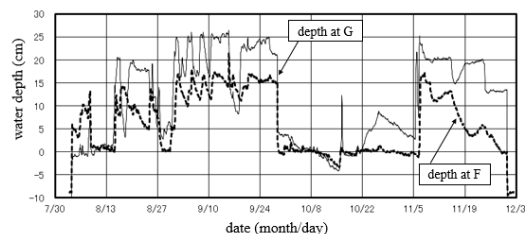
#### (1) 水田湛水実験とその解析

飯館村の佐須地区と小宮地区の2地区において, 実際に水田を湛水させることで水田周辺での放射線量がどの程度軽減されるかを現地実験により検討した。佐須での観測は予備実験的なもので, 2012.10.13 ~ 11.10 までの1ヶ月弱, 小宮での観測は

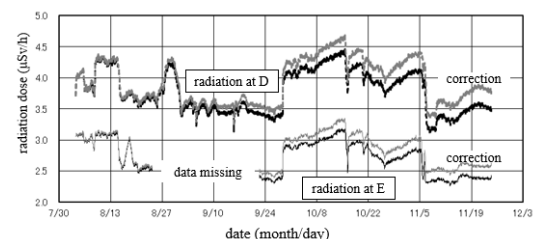
2013.8.3 ~ 12.3 までの4ヶ月である。実験水田は2枚で, 湛水深は, 左側水田ではF地点で, 右側水田ではG地点で, 水位計(Onset製, U20)を用いて測定した。放射線量はD地点とE地点で定置型線量ロガー((株)シリアルゲームズ製, GPSGMC-002-TUV)により観測した。



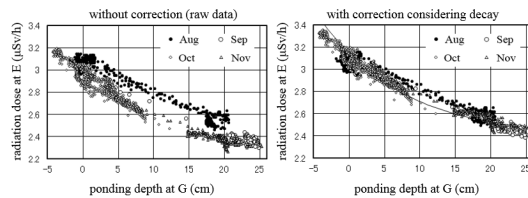
下図は, 観測期間中のF地点とG地点での湛水深の時系列である。季節変動と湛水深変化を考慮して, 観測期間を以下の4期に分けてデータを整理する。8月期は湛水深がやや深い8/3 ~ 8/31, 9月期は湛水深が非常に深い9/1 ~ 9/28, 10月期は湛水がほとんどない9/29 ~ 11/5, 11月期は湛水深がやや深い11/6 ~ 12/3とする。



下図は, 観測期間中のD地点とE地点における放射線量の時系列である。D地点では9月期に長期間にわたり, 機器不備によりデータ欠損が生じた。小宮での観測は4ヶ月に及ぶため, 放射性物質の自然崩壊による減少を考慮して割増し補正を行う必要がある。補正方法としては,  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  に対して, 半減期を2.06年と30.2年, 事故当時のベクレル比を1:1, ベクレルからシーベルトへの換算係数を5.4と2.1, 事故から観測開始時点までの経過日数を870日とし, 各観測日毎の線量の減少比率を計算して観測開始日(8月3日)の水準に戻す方法を採用した。



E 地点における放射線量と右側水田の湛水深 (G 地点で観測) の関係を見たものである。左図は割増し補正を行っていない場合で、右図は補正を行った場合である。割増し補正を行わない場合には、時間の経過と共に放射線量低下するので、観測初期のデータと終期のデータには分離が見られるが、割増し補正を行うことでデータの分離を抑えることができる。



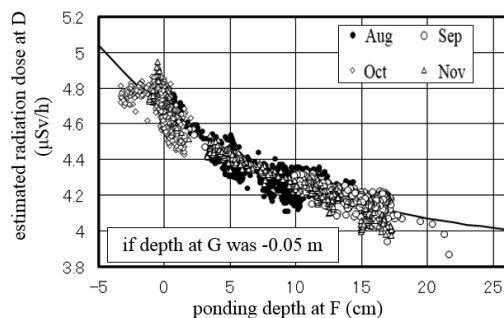
湛水深増加に対しての線量の低下は直線的ではなく、指数関数的に低減するが、その減り方は緩やかである。

E 地点における放射線量  $y$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) と水深  $h$  (m) の回帰曲線を、指数関数を用いて近似すると、

$$y = 2.38 + 1.16 \times \text{Exp}(-8.38 \times (h + 0.05)) \\ = 3.54 - 1.16 \times \{1 - \text{Exp}(-8.38 \times (h + 0.05))\}$$

を得る。この式は湛水深が  $-0.05\text{m}$  (不陸によってマイナスの水深となっている) では放射線量は  $3.54$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) であるが、湛水深を十分に大きくして当該水田からの放射線量を完全に遮断できれば、背景からの放射線量である  $2.38$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) まで低下させられることを示す。

D 地点での線量は、明らかに、上下 2 枚の水田の湛水深の影響を受ける。そこで、D 地点での線量と左側水田の湛水深 (F 地点) の関係を明確化するためには、D 地点への右側水田の影響を除く必要がある。下図は縦軸に推定放射線量、横軸に左側水田の湛水深をとったもので、多少の散らばりはあるものの、湛水深と放射線量の関係がより明確になっている。



同様に指数関数を用いて、回帰曲線を求めれば、

$$y = 3.90 + 1.06 \times \text{Exp}(-7.59 \times (h + 0.04)) \\ = 4.96 - 1.06 \times \{1 - \text{Exp}(-7.59 \times (h + 0.04))\}$$

を得る。この式は、左右の水田が共に湛水

状態でない場合は、D 地点の放射線量の強さは  $4.96$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) であるが、左側水田の湛水深のみを十分に大きくすると、 $3.90$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) にまで線量を低下させることを意味する。更に、右側水田の湛水深も十分に大きくすれば、 $3.90 - 1.16 \times 0.6 \approx 3.20$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) にまで線量を低下させることが可能である。

以上より、水田湛水によって、水田表面に沈着した Cs から放出される線の線量を大幅に低減できることが、非衝突線の線量に関する数値計算と、現地実験によって明らかとなった。しかし、水田湛水を実用化するには、幾つかの問題の解決が必要である。

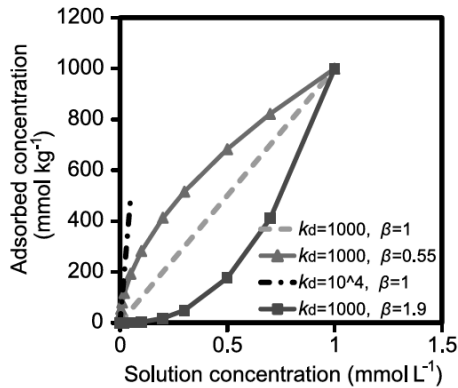
先ず、非衝突線の数値計算の結果と現地実験の結果には、低減の減り方に大きな違いが見られた。数値計算の場合は湛水深の増加に伴って、線量が指数関数的に急速に低下したが、現地実験の場合はむしろ直線的に減少した。この違いは、湛水効果を定量的に見積もる際に大きな影響を与える可能性があり、解明が必要である。

次に、今回の現地実験では、最大湛水深は  $20\text{cm} \sim 25\text{cm}$  であった。この最大湛水深は放射線をカットするのに十分な水深であるのか、また、最大湛水深を持続させるのが可能であるのか、等の問題も解決しなければならない。この最大湛水深は数値計算結果によれば、非衝突の放射線をほぼカットできる湛水深であるが、散乱線を含む実効線量をカットできるかどうかは不明である。また、通常の水田においては、湛水深を  $20\text{cm} \sim 25\text{cm}$  に保つことはかなり困難である。冷害防止のための深水灌漑の場合や、雨水を貯留する必要がある場合を除き、通常の灌漑水田の畦はあまり高くない。精々、 $20 \sim 30\text{cm}$  の高さで、しかも、畦の崩壊を防ぐため、湛水深は畦の高さの  $5 \sim 6$  割である。大きな湛水深を持続できる畦を、如何に整備するかの問題が残る。

更に、湛水された水は蒸発散と浸透によって絶えず失われる。このため、湛水深を維持するためには連続的な用水補給が必要である。その際、Cs が含まれない水を供給する必要があるため、水中の Cs 濃度のモニタリングや、用水の取水基準を検討する必要がある。水田湛水は、これまでに述べてきた様に様々なメリットがあるが、同時に、それを実行するためには解決すべき問題もまだ多く残されている。

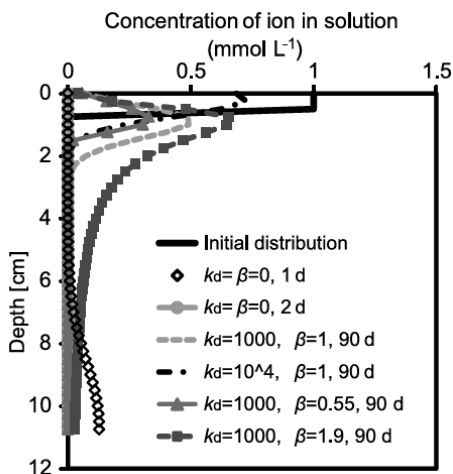
(2) 水源地の Cs 動態に関する実験と解析  
・有機物が関与しない条件下の Cs の移動に関する考察

下図 2-1 は、溶液中の Cs 濃度  $1 \text{ mmol/L}$  に対して吸着量が  $1000 \text{ mmol/kg}$  になる場合の典型的な吸着等温線の例である。



溶液濃度 1mmol/L に対して吸着量 1000mmol/kg という 1 点の吸着データがある場合、線形の吸着等温線と溶液中の Cs 濃度に対して凸もしくは凹の曲線を示す Freundlich 型吸着等温線を仮定したときの土中のイオンの移動を考える。よく用いられる線形吸着 ( $S = k_d C$ ) を仮定すると図中の破線のような吸着特性になる。一方、 Freundlich 式を想定すると、 $\beta < 1$  の時は、上に凸な曲線(図中 )を描き、 $\beta > 1$  の時は凹形の曲線(図中 )となる。ここで  $k_d$  は、選択係数である。

このような吸着特性を持った土の地表面に Cs が沈着し、その後、降雨浸透等の水の流れが生じた場合に Cs の移動がどうなるかを簡単に示したのが下図 2-2 で、吸着等温線中の、 で示した吸着特性を示す場合の、土壌中の Cs の移動ある(西村, 2014)。



この図は、土壌中の Cs の移動が移流分散方程式に従うとして、一定の流速で水が下方浸透している場合を想定し、数値モデル (Hydrus-1D) で計算した結果で、深さと土中水中の溶存 Cs 濃度を示している。

吸着が無い場合( ), 定常浸透流に乗って Cs が移動し、当初、地表面にあった Cs は、1 日程度でほぼすべてが地表から 8cm 以深に移動する。図 2-1 で線形吸着に対応するのが破線で示した Cs 濃度分布である。

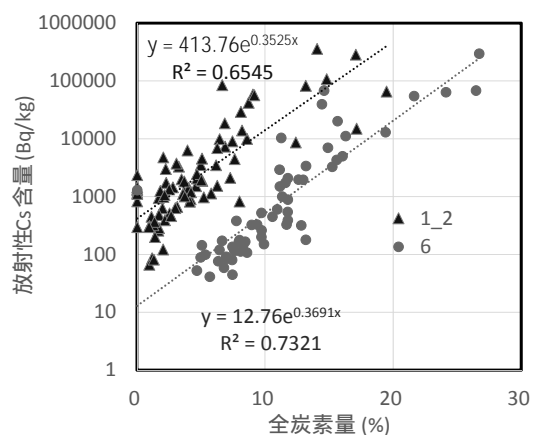
上に凸な吸着特性でも凹形の吸着特性でも、最大の濃度を示す深さは線形吸着の場合とほとんど変わらない。しかし、ピーク濃度を示す位置から下方への溶存 Cs 濃度

分布は大きく異なる。すなわち、上に凸な典型的な Freundlich 型の吸着特性を持つ土壌では、印で示すように、ピーク下方で Cs 濃度が急減する。これは、図 2-1 でわかるように、溶液中の Cs 濃度が低い場合に吸着等温線の傾きが大きく、低濃度において吸着が卓越し、結果として下方への Cs 移動が阻害されるためである。逆に、低濃度の Cs に対する吸着が不活発な凹形の吸着特性の場合、図 2-2 中の印が示すようにピーク位置から下層へ向かって高めの濃度分布を示す。ここでは示していないが、土壌に吸着した Cs を評価すると凸形の吸着等温線に対応するの土壌において、吸着量が多くなり、吸着量の少ない印土壌で土中水に溶存した Cs 濃度が高くなる。

このように、一点の吸着データから化学物質の移動・再分布を予測する場合には、どのような特徴をもった吸着等温線であるかを仔細に検討する必要がある。

・Cs 移動への土壌有機物の関与に関する考察

福島第一原子力発電所事故後の調査で、多くの地域で、放射性 Cs の沈着は地表 5cm 程度の範囲にとどまると報告されている。しかし、一部の地域では、それを超える深さに放射性 Cs が検出されることがある。そこで、福島県飯舘村の山林で林床にリター層があるような地点から、ほぼ裸地に近い地点まで様々な土地被覆の地点で表層 30cm の不かく乱土壌試料を採取し、土壌中の炭素量、窒素量、放射性 Cs 量の分布を調べた。流亡土砂が堆積するような場所や侵食で削られているような場所といった表層土壌のかく乱が生じている場所を除いて、地表近傍のかく乱の少ない 3 地点(図中 1, 2, 6)を選んで土壌中の全炭素量と放射性 Cs 含量の関係を示したのが下図 2-3 である。



地点 1, 2 と地点 6 で値は若干異なるが、片対数グラフでほぼ同じ傾きで土中の全炭素量と放射性 Cs 含量が関係している。このような傾向が現れるメカニズムについては、溶存有機物が Cs 移動の担体となるいわゆる colloid facilitated solute transport の可能性と有機物が粘土等の鉱物の表面を覆うことで、Cs の土壌中の吸着特性を変え

てしまった可能性などいくつかのシナリオが考えられるため、今後の課題としたい。

(3) 水田代掻きの低減効果に関する考察  
福島県飯館村小宮地区の農家の農地で、認定 NPO 法人ふくしま再生の会と協働で水田代かきに泥水を排水することによって水田土壌の放射性セシウムを除去する方法の現場実証実験を実施した。その水田でイネの栽培試験をして、放射性セシウムの吸収率を測定し、玄米の放射性セシウム濃度が基準値以下であることを確認した。また、水田の畦の2か所に放射線計を設置し、水田の状態と空間線量率との関係を調べた。その結果、水田が湛水されている期間(5-6月)や水田が雪で覆われている期間(1-2月)には水田地表面からの放射線量が低下することが明らかになった。しかしその低下量は周囲の山から放射線量に比べるとわずかであった。

#### 引用文献

Naritaka KUBO, Toshiaki IIDA, Masaru MIZOGUCHI, Springer, Reduction of Air Radiation Dose by Ponding Paddy Fields, Chapter 15 in Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident, The First Three Years, 2016, 189-204

西村 拓 (2014) 土壌中の放射性 Cs の移動、土壌の物理性、126:37-43

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### [雑誌論文](計9件)

溝口 勝、土壌汚染と放射線モニタリング、計測と制御、査読有、Vol.52、No.8、2013、pp.730-735

西村 拓、土壌中の放射性 Cs の移動、土壌の物理性、査読有、Vol.126、2014、pp.37-43

三輪睿太郎、宮崎 毅、南條正巳、溝口 勝、他、復興農学 東日本大震災からの復興への土壌科学の貢献と課題、日本土壌肥料学会誌、査読有、vVol.85、No.2、2014、pp.160-167

溝口 勝、伊藤 哲、農業・農村を変えるフィールド・エッセイ 技術、水土の知、査読有、Vol.83、No.2、2015、PP.3-6

#### [学会発表](計24件)

飯田俊彰、久保成隆、溝口 勝、西村 拓、登尾浩助、水田湛水による土壌からの放射線量低減効果の検討、水文・水資源学

会、2013.9.29、神戸大学

溝口 勝、伊藤 哲、田尾陽一、福島県飯館村の水田における Cs 汚染表土の埋設実験、農業農村工学会全国大会、2013.9.4、東京農大

西村 拓、コロイド性物質の移動に伴う Cs の移動、土壌物理学大会シンポジウム、2013.10.26、福島大学

西村 拓、山崎琢平、加藤千尋、大澤和敏、溝口 勝、伐採林地における土壌有機物と放射性 Cs の移動、農業農村工学会全国大会、2014.8.28、新潟朱鷺メッセ

溝口 勝、西村 拓、伊井一夫、田尾陽一、までい水田における放射性セシウムの鉛直移動、農業農村工学会全国大会、2014.8.28、新潟朱鷺メッセ

久保成隆、飯田俊彰、溝口 勝、水田湛水による空間放射線量低減効果に関する研究、農業農村工学会応用水理研究部会、2014.12.4、農林水産技術会議事務所

溝口 勝、板倉康裕、菅野宗夫、田尾陽一、汚染表土を埋設した水田土層内の放射線測定、農業農村工学会全国大会、2015.9.2、岡山大学

Masaru Mizoguchi、Radiation measurement in paddy layer buried contaminated topsoil in Iidate village, Fukushima、PAWEES2015、2015.8.19、Kuala Lumpur, Malaysia

ダン クワック テュイト、辰野宇大、西村 拓、発電所事故後の放射性セシウム移行における天然有機物の寄与、農業農村工学会大会企画セッション、2015.9.2、岡山大学

#### [図書](計4件)

Masaru Mizoguchi、Springer, Remediation of Paddy Soil Contaminated by Radiocesium in Iidate Village in Fukushima Prefecture, Chapter 13 in Agricultural Implication of the Fukushima Nuclear Accident, 2013,12/204

溝口 勝、学術会議叢書 20、農家自身でできる農地除染法の開発、放射能除染の土壌科学 - 森・田・畑から家庭菜園まで -、2013、17/175

Naritaka KUBO、Toshiaki IIDA、Masaru MIZOGUCHI、Springer, Reduction of Air Radiation Dose by Ponding Paddy Fields,

Chapter 15 in Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident, The First Three Years, 2016,14/263

Hanae Yokokawa, Masaru Mizoguchi, Springer, Collaboration Structure for the Resurrection of Iidate Village, Fukushima: A Case Study of a Nonprofitable Organization, Chapter 16 in Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident, The First Three Years, 2016,11/263

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ

・福島土壌除染技術：

<http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/edrp/fukushima/fsoil/>

・農業工学的アプローチによる農村と農地の復活：

<http://www.a.u-tokyo.ac.jp/rpjt/leaflet83.pdf>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久保 成隆 (KUBO, Naritaka)

東京大学・農学生命科学研究科・教授

研究者番号：40134506

### (2) 研究分担者

溝口 勝 (MIZOGUCHI, Masaru)

東京大学・農学生命科学研究科・教授

研究者番号：00181917

飯田 俊彰 (IIDA, Toshiaki)

東京大学・農学生命科学研究科・准教授

研究者番号：30193139

西村 拓 (NISHIMURA, Taku)

東京大学・農学生命科学研究科・教授

研究者番号：40237730

### (3) 連携研究者

ナシ