

連載講座



福島第一原発事故に伴う放射性核種の長期環境動態と将来予測

農水産における放射性セシウムの長期環境動態と将来予測 —農業現場と水産現場から—

信濃卓郎^{1,†}, 和田敏裕^{2,‡}

¹北海道大学大学院農学研究院, ²福島大学環境放射能研究所

[†]shinano@chem.agr.hokudai.ac.jp

[‡]t-wada@ipc.fukushima-u.ac.jp

東京電力福島第一原発事故に由来する福島県を中心とした農地、陸水域及び海域の放射性セシウム汚染から8年が経過し、これまでの取組と現状、今後の対策についてまとめた。農業現場では放射性セシウムの移行抑制対策として長期的な土壌のカリウムの適切な管理が求められる。水産現場では、海面・内水面漁業ともに放射能汚染に起因する様々な課題を抱えており、今後、中長期的視点に基づく漁業活動の再生や復興支援が重要となる。

Key Words: Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, radiocaesium, decontamination, mitigation of radiocaesium transfer, agriculture and fishery

1. はじまり

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島第一原発事故）に伴う放射性物質の飛散は広大な面積の農地も汚染した。事故の発生した3月中旬は水稲作においては移植前であり、稲作においては植物体への直接の汚染は認められなかった。畑作物においてもその多くは播種前であったものの、小麦や野菜の一部においては圃場に存在していた植物体は大气降下物による直接汚染を受けた¹⁾。付着した放射性セシウム（事故当初は放射性ヨウ素による汚染も報告されている）の一部は植物体内を転流して収穫部位を汚染する。この現象は茶において除染対策に利用された。茶は常緑樹であり、事故当初の放射性降下物により樹冠部分の汚染を受けた。飲用として用いる新葉は4月以降に出現するが、この時、土壌からのセシウムの移行は無視できるレベルであり、直接汚染した葉からの転流によって汚染する割合が高かった²⁾。この知見に基づき2011年度のお茶生産は東日本の

広範囲で中止され約2万ヘクタールの茶園において中切りによって汚染レベルの高い部分の除去を行った。この除去効果は大きく、2012年以降お茶での基準値超過は発生していない³⁾。同様に果樹へ付着した放射性物質の除去は高圧洗浄機を利用して2011年度に行われた。幹の表面線量は低減可能であったが、その後の果実への影響は未知であった。しかしながら、複数年にわたるモニタリングの結果、果実や葉の放射性セシウム濃度を約半減することが明らかになっている⁴⁾。このような結果は、可能であれば植物体に付着した放射性物質は速やかに除去することが望ましいことを示している。

2. これまで

一方、水田や多くの畑地では直接土壌に放射性物質が降下した。今回の福島第一原発の事故では汚染物質としては特に¹³¹I, ¹³⁴Csと¹³⁷Csであり、¹³¹Iは短半減期の放射性核種であるため圃場管理において問題となったのは比較的長寿命の¹³⁴Csと¹³⁷Csである。放射性セシウムは

土壌の粘土鉱物や有機物に強く固定され、そのため降雨等による下方浸透速度は極めて遅いことが知られている。実際に農水省が2011年に行った調査からは震災後に様々な圃場において大部分の放射性セシウムが表層数cmに残存していることが示されている⁵⁾。そのため被災地の多くの水田において表土剥ぎ取りによる除染が実施された。また、放射能汚染レベルが高くない場合は深耕を行った。グローバルフォールアウトによる土壌と玄米の汚染レベルの調査⁶⁻⁸⁾に基づき移行係数(玄米の放射性セシウム濃度/土壌の放射性セシウム濃度)の最大値は0.1と推定された⁹⁾。2011年当時は実際の水田における詳細な移行解析例はなく、グローバルフォールアウトの情報に基づき、当時の暫定基準値(500Bq/kg)を超過しないために土壌の放射性セシウム濃度が5000Bq/kg以下であれば栽培が認められたが、複数の地点で暫定基準値を超過した¹⁰⁾。その後の解析からこれらの超過地点では土壌の交換性カリウム含量が著しく低い事が明らかになり^{11, 12)}、農研機構と福島県を中心とした試験を通して土壌中の交換性カリウム濃度を一定以上に維持することの重要性

が圃場レベルで示された^{13, 14)}。カリウムの投入による土壌中の放射性セシウムの植物体への移行抑制は水稻のみならず様々な農作物において確認されており、主要な作物では大豆¹⁵⁾、そば¹⁶⁾、牧草¹⁷⁾においてもその効果が確認されている。

土壌や環境中に存在する放射性物質による農産物の直接汚染は震災当初のみならず、その後もしばしば問題が顕在化している。2015年の南相馬での玄米の放射能汚染についての汚染源は明らかにならなかったが、周辺の土壌とは考えられない付着粒子によって汚染を起こしたことが明らかになった¹⁸⁾。その一方で、土壌などによる収穫物表面の汚染はそれを避ける事によって削減が可能である。飼料用イネにおいては刈り取り高さを高くする事によって大幅に飼料中の放射性セシウム濃度の低減が認められた¹⁹⁾。同様の問題は飼料用として畦畔、法面の草の利用においても問題となっている。畦畔や法面を一部の生産者は畜産に利用しており、その際の集草方法によっては不要な表面土壌が多く混入することが明らかにされた²⁰⁾。さらにそばの実のように収穫部位が直接外部環境に

表1 米の検査結果(出典: http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_chosa/)

| 作目 | 対象地域 | 年度 | 検査点数 | 50Bq/kg以下 | 50-100Bq/kg以下 | 基準値超過* | 500Bq/kg超過** |
|-------|----------------|------|------------|------------|---------------|--------|--------------|
| 米全袋 | 福島県 | 2011 | 26,464 | 25,063 | 809 | 553 | 39 |
| | | 2012 | 1,037万 | 1,036万 | 2,086 | 84 | |
| | | 2013 | 1,104万 | 1,104万 | 816 | 28 | |
| | | 2014 | 1,101万 | 1,101万 | 14 | 2 | |
| | | 2015 | 10,498,720 | 10,498,720 | 18 | 0 | |
| | | 2016 | 10,266,008 | 10,266,003 | 5 | 0 | |
| | | 2017 | 9,976,484 | 9,976,484 | 0 | 0 | |
| | | 2018 | 9,181,347 | 9,181,347 | 0 | 0 | |
| 米抽出検査 | 福島県以外 の16都県 | 2012 | 9,213 | 9,204 | 0 | 0 | |
| | | 2013 | 2,701 | 2,700 | 1 | 0 | |
| | | 2014 | 1,354 | 1,354 | 0 | 0 | |
| | | 2015 | 818 | 818 | 0 | 0 | |
| | | 2016 | 624 | 624 | 0 | 0 | |
| | | 2017 | 365 | 365 | 0 | 0 | |
| | | 2018 | 303 | 303 | 0 | 0 | |

*2012年度から一般食品の基準値は100Bq/kg以下となった。

**2011年度は一般食品の暫定基準値として500Bq/kg以下が設定された。

表2 米以外の農産物の検査結果（出典：http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_chosa/）

| 米以外の農産物 | 福島県も含む17都県 | (2018年度からは当該年度に測定された前年度の結果も含わせて示している) | | | | | |
|---------|------------|---------------------------------------|--------|-----------|---------------|--------|---------------|
| | | 年度 | 検査点数 | 50Bq/kg以下 | 50-100Bq/kg以下 | 基準値超過* | 500Bq/kg超過** |
| | 麦 | 2011 | 557 | 431 | 99 | 26 | 1 |
| | | 2012 | 1,818 | 0 | 0 | 0 | |
| | | 2013 | 592 | 592 | 0 | 0 | |
| | | 2014 | 383 | 383 | 0 | 0 | |
| | | 2015 | 323 | 323 | 0 | 0 | |
| | | 2016 | 239 | 239 | 0 | 0 | |
| | | 2017 | 189 | 189 | 0 | 0 | |
| | | 2018 | 207 | 207 | 0 | 0 | |
| | 野菜類 | 2011 | 12,671 | 12,130 | 156 | 246 | 139 色々 |
| | | 2012 | 18,570 | 18,555 | 10 | 5 | 0 ほうれん草、小松菜など |
| | | 2013 | 19,657 | 19,657 | 2 | 0 | |
| | | 2014 | 16,712 | 16,712 | 0 | 0 | |
| | | 2015 | 12,205 | 12,203 | 2 | 0 | |
| | | 2016 | 10,810 | 10,809 | 1 | 0 | |
| | | 2017 | 8,275 | 8,724 | 1 | 0 | |
| | | 2018 | 5,786 | 5,785 | 1 | 0 | |
| | 果実 | 2011 | 2,732 | 2,316 | 206 | 182 | 28 色々 |
| | | 2012 | 4,478 | 4,405 | 60 | 13 | 0 ブルーベリー、ゆずなど |
| | | 2013 | 4,243 | 4,215 | 28 | 0 | |
| | | 2014 | 3,302 | 3,300 | 2 | 0 | |
| | | 2015 | 2,783 | 2,772 | 11 | 0 | |
| | | 2016 | 2,155 | 2,154 | 1 | 0 | |
| | | 2017 | 1,579 | 1,577 | 1 | 1 | クリ |
| | | 2018 | 1,237 | 1,236 | 1 | 0 | |
| | 大豆 | 2011 | 534 | 482 | 36 | 16 | 0 |
| | | 2012 | 5,633 | 5,316 | 256 | 59 | 2 |
| | | 2013 | 4,717 | 4,640 | 56 | 21 | 大豆 |
| | | 2014 | 3,058 | 3,037 | 17 | 4 | 大豆 |
| | | 2015 | 1,371 | 1,369 | 2 | 0 | |
| | | 2016 | 830 | 825 | 5 | 0 | |
| | | 2017 | 455 | 455 | 0 | 0 | |
| | | 2018 | 205 | 205 | 0 | 0 | |
| | その他の豆類 | 2011 | 153 | 2 | 0 | 0 | - |
| | | 2012 | | 320 | 7 | 2 | 0 小豆 |
| | | 2013 | 450 | 446 | 4 | 0 | |
| | | 2014 | 401 | 401 | 0 | 0 | |
| | | 2015 | 442 | 442 | 0 | 0 | |
| | | 2016 | 127 | 127 | 0 | 0 | |
| | | 2017 | 44 | 44 | 0 | 0 | |
| | | 2018 | 25 | 25 | 0 | 0 | |
| | 地域特産物 | 2011 | 498 | 467 | 15 | 15 | 1 そば、なたね、エゴマ |
| | | 2012 | 3,094 | 2,994 | 86 | 14 | 0 そば |
| | | 2013 | 1,618 | 1,615 | 3 | 0 | |
| | | 2014 | 1,049 | 1,048 | 1 | 0 | |
| | | 2015 | 723 | 722 | 0 | 1 | そば |
| | | 2016 | 480 | 480 | 0 | 0 | |
| | | 2017 | 332 | 332 | 0 | 0 | |
| | | 2018 | 233 | 233 | 0 | 0 | |
| | きのこ・山菜類 | 2011 | 3,856 | 2,781 | 296 | 551 | 228 色々 |
| | | 2012 | 6,588 | 5,416 | 567 | 479 | 126 色々 |
| | | 2013 | 7,582 | 7,068 | 319 | 194 | 色々 |
| | | 2014 | 8,557 | 8,236 | 218 | 103 | 色々 |
| | | 2015 | 8,433 | 8,197 | 149 | 87 | 色々 |
| | | 2016 | 9,241 | 9,009 | 163 | 69 | 色々 |
| | | 2017 | 7,885 | 7,723 | 108 | 54 | 色々 |
| | | 2018 | 7,050 | 6,728 | 189 | 133 | 色々 |

表3 お茶の検査結果（出典：http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_chosa/）。2012年度からお茶は飲料として利用する緑茶で抽出した溶液の濃度で検定をする

| | | | 5Ba/kg以下 | 5-10Bq/kg以下 | 10Bq/kg超過 | 500Bq/kg以下 | 500Bq/kg超過 |
|--|---|------|----------|-------------|-----------|------------|------------|
| | 茶 | 2011 | 2,233 | - | - | 2041 | 192 |
| | | 2012 | 867 | 804 | 50 | 13 | |
| | | 2013 | 447 | 445 | 2 | 0 | |
| | | 2014 | 206 | 206 | 0 | 0 | |
| | | 2015 | 127 | 127 | 0 | 0 | |
| | | 2016 | 102 | 102 | 0 | 0 | |
| | | 2017 | 95 | 85 | 0 | 0 | |
| | | 2018 | 41 | 41 | 0 | 0 | |

接している場合には、磨きをかける事によって放射性セシウム濃度が低減可能なことも示されている²¹⁾。このように環境中に飛散した放射性物質は土壌表面などにはいまだに高濃度で残存している場合もあることから、農産物等の収穫時の処理等に十分な注意が必要である。

このような経験から、農機具等も含めてクロスコンタミネーションの防止に努めたり、さらには土壌から植物への移行抑制の対策を徹底する事によって福島県で生産される管理された農産物の基準値の超過はほとんど認められなくなっている。

3. 今 後

広大な面積で放射能汚染対策として除染（表土剥ぎ取りなど）が行われた他、ある程度放射性セシウム濃度が低かった農地では深耕も広く行われた対策になった。いずれの場合も放射性物質は圃場に残存しており、放射性セシウムの土壌中の下方移動速度が多くの場合遅いため、今後長期間にわたって作土層に放射性セシウムは残存する事になる。そのため、生産者は除染が終わり、営農が再開してからでも長期間にわたって放射性セシウムの対策と向き合う必要がある。現在はこれまでに行われた大量のカリウムの追加投入によって土壌の交換性カリウム濃度が高まっている状況であるため一見問題は顕在化していないが、圃場へのカリウムの供給や還元（稲わらや堆肥）を十分に行わない場合には土壌中のカリウム収支は負となる。そのため、今後適切な土壌中カリウム濃度に関しての

管理が重要であると考えられる。実際には、それぞれの農地に適した交換性カリウム濃度の維持レベルを明らかにし、それに応じて施肥や堆肥や稲わら還元などの手法を導入することが重要である。また、福島県は全量全袋検査からモニタリング検査（一部の代表サンプルを検査して、これでその地域の安全性を確認する）に移行する意向を明らかにしている（基準値超過が5年間発生しなかった場合には、2020年度から²²⁾）。モニタリング検査への移行は大幅な経費削減につながる一方で、モニタリング検査による見落としは確実にないようにする事が求められている。そのため、どのような対策を行うことにより基準値超過が発生しないようにできるのかの検討が必要である。さらに、これまでの調査から放射能対策で行なった表土剥ぎ取りと客土によって、土壌の地力の低下が一部で認められている。また、カリウムは作物において欠乏症状が出にくいという事もあり、適切なカリウムの投入を行わなかった場合には、長期的には不足していく事が予想される。そのため、カリウムも含めた土壌の地力の向上をこれらの地域では積極的に取り組む必要がある。被災地では、カリウムの供給能も含めて地力の向上をはかり、将来的にはより良い土壌を持つ農地を作り出すことにより、震災前に比較してより高い生産性とより良い品質の農産物を作出することを目指すことが重要である。基準値超過は一つの要因のみで発生する場合もあるが、土壌、水、大気を原因とする相加的な結果として問題が現れる場合もある。そのため、今後も放射性

物質の環境動態を注視しつつ、農地及び周辺環境と農作物の関係を解析することが重要である。

4. 水産業への影響

2011年3月に発生した福島第一原発の過酷事故により、大量の放射性物質（主に放射性ヨウ素 ^{131}I 、放射性セシウム ^{134}Cs 及び ^{137}Cs ）が大気中に放出され、これら一部は、周辺海域や陸域に沈降した²³⁾。海域では2011年4月に原発から高濃度汚染水が漏洩し、周辺海域に大きな影響を与えた²⁴⁾。海域や陸域に拡散した放射性物質により福島県の沿岸域及び陸水域に生息する魚介類は広く汚染され、海面・内水面漁業は大きな影響を受けた²⁵⁻²⁹⁾。震災から8年以上が経過し、海産魚介類の放射性セシウム濃度は著しく低下したが（福島第一原発港内を除く）、福島沖の沿岸漁業の活動は操業場所などが制限された小規模な「試験操業」に留まっている³⁰⁾。他方、内水面漁業においてもその影響は顕著である³¹⁾。震災直後に比べて淡水魚類の放射性セシウム濃度は低下しているが、県中部を流れる一級河川の阿武隈川やその東部に位置する漁業協同組合の漁業活動が依然として休止した状況に置かれている^{32, 33)}。また、福島県のモニタリング対象となっていない避難指示区域では、依然として国の基準値100Bq/kg（湿重量）（以下、湿重量は省略）を大幅に上回る淡水魚類が存在し、原発事故による影響の長期化が懸念される²⁹⁾。

本稿では、原発事故に伴う水産物（主に魚類）の放射能汚染の推移と現状について、海面（海域）と内水面（陸水域）に分けて説明するとともに、福島県の海面・内水面漁業の復興状況と課題について報告する。

5. 海産物の放射能汚染の推移と海面漁業の復興状況と課題

津波による福島県沿岸域の直接的な被害は甚大であったが²⁵⁾、震災から8年以上が経過した

現在、漁船や水産関連施設など、漁業活動に必要なハード面の復旧・復興は大きく進展している。一方、水産物の放射能汚染の問題に直面した福島県の海面漁業は、被災した東北他県に比べて回復が著しく遅れている。以下、福島県のモニタリング結果を中心に水産物の放射性セシウム汚染の推移と漁業復興の現状と課題について概説する。

福島県では、原子力災害対策特別措置法に基づき、震災直後の2011年4月から福島沖で採捕された海産魚介類に含まれる放射性物質（ ^{131}I 、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs ）のモニタリング調査を実施している。2017年12月末までに分析された検体は、203種、49,716検体にも及ぶ。分析後、速やかに公表されるこれらのデータは、国の出荷制限魚種等指示やその解除、試験操業対象種の検討など、魚介類の安全性の評価において非常に重要な役割を果たしている。また、膨大なモニタリングデータは、福島沖の各エリアに生息する魚種毎の放射性物質濃度の推移や予測、各魚種の生態特性に応じた汚染履歴の把握など、魚介類における放射性物質の動態解明にも寄与しており、沿岸漁業の復興に科学的根拠を付与する点でも重要な役割を果たしている^{26, 27)}。なお、物理学的半減期が短い ^{131}I は2011年8月以降検出されておらず、影響は限定的であったため²⁶⁾、以下、放射性セシウムの影響について説明する。

福島県のモニタリング調査によると、2011年には、原発南部沿岸を中心に21種で暫定基準値500Bq/kgを超える検体が確認された。しかし、2012～2013年以降は、浮魚類に比べて放射性セシウム濃度の低下速度の遅い底魚類においても顕著な放射性セシウム濃度の低下が認められた（図1）。基準値である100Bq/kgを超える割合は、2011年には41%であったが、2015年には0.05%まで低下した。2015年4月以降には基準値を超える検体は県のモニタリング調査の枠組みでは確認されていない（東電の20キロ圏内モニタリングや試験操業における

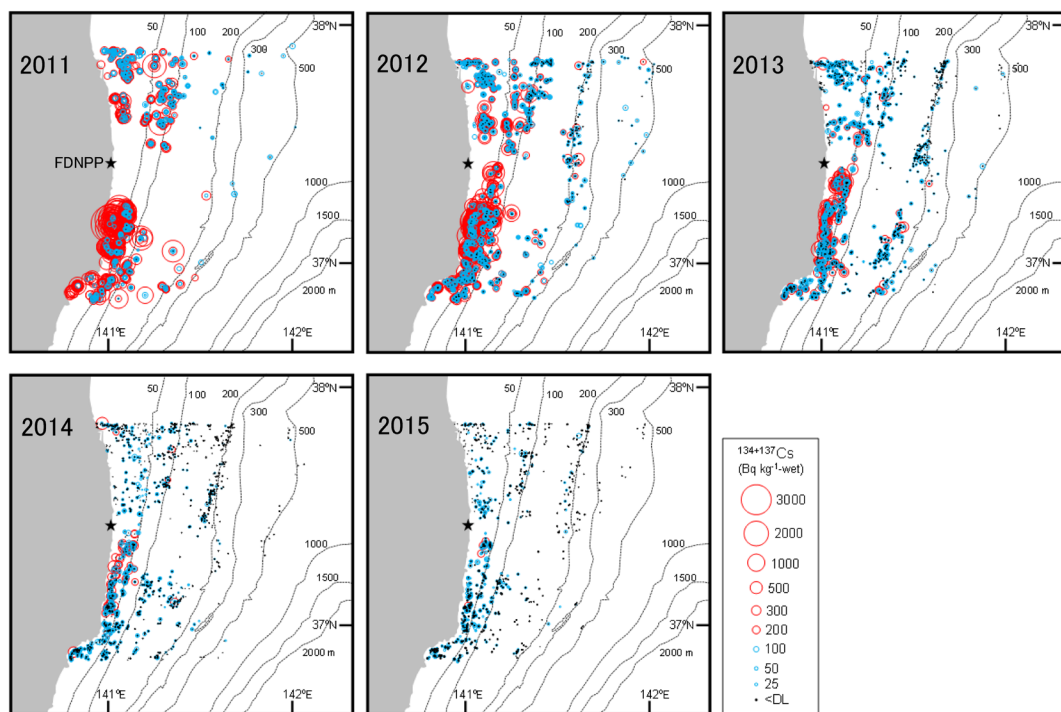


図1 福島県が2011–2015年にモニタリング調査を行った底魚類の放射性セシウム濃度 ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$, Bq/kg) の時空間変化の推移。円の大きさは放射性セシウム濃度を示しており、赤色と青色は、それぞれ基準値を越えた値 ($>100\text{Bq/kg}$) 及び 100Bq/kg 以下を示している。黒点は検出限界値未満を示している。星印は福島第一原発の位置を示す。図は、Wada et al. (2016)²⁷⁾ を改変した (Color online)

漁協の自主検査で基準値を越えた事例はごくわずかにある)。他方、検出限界値未満 (^{137}Cs で約 7Bq/kg 未満) の検体の割合は2011年の15%から2018年の99%にまで上昇した。なお、放射性セシウム濃度の精密測定により、2016年に福島沿岸で採集した底魚類の放射性セシウム濃度の平均値が 1.46Bq/kg であったことが報告されている²⁹⁾。これらの海産魚介類の放射性セシウム濃度の低下の理由として、①放射性セシウム (主に ^{134}Cs) の物理的な減衰、②浸透圧調節に伴う放射性セシウムの排出、③底生生態系 (餌生物) の放射性セシウム濃度の低下、④世代交代、⑤成長による希釈、及び⑥移動分散による影響、など複合的な要因が考えられている²⁹⁾。これらの結果を受け、出荷制限魚種は最大42種 (計44種) から2種にまで減少している (2019年11月現在)。また、現在、出荷制限魚種を除くすべての魚種が「試験操業」の対

象となっている^{30, 34)}。

なお、「試験操業」とは、福島県産の魚介類が流通過程でどのように評価されるかを調査することを主な目的として行われている小規模で制限のある操業である^{30, 34)}。現在においても福島県の沿岸漁業はあくまで自粛しており、「試験操業」を徐々に拡大化している状況にある。現在では、対象海域が福島第一原発10キロ圏内を除く全ての福島沖の海域に拡大化されているものの、2018年における沿岸漁業 (さし網、船びき、底びき網) の水揚量は、震災前 (2010年) の15.6%にすぎない (図2)。この状況は、水揚量が震災前の7~8割以上に回復した宮城県や岩手県との状況とは著しく異なっており、原発事故が福島県の沿岸漁業に及ぼした影響の大きさを端的に示している。ただし、2018年2月に松川浦のアオノリ (ヒトエグサ) の試験操業が再開され、全漁業種が試験操業の対象

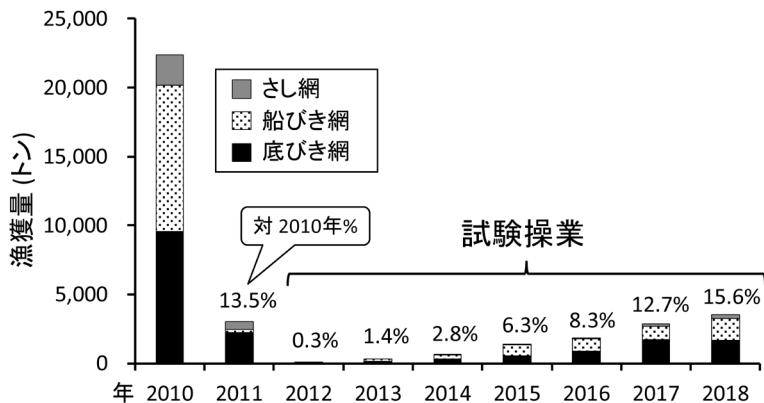


図2 震災前後の2010–2018年における福島県沿岸漁業（主要3漁業種：さし網、船びき網、底びき網）による漁獲量の年ごとの推移。棒グラフの上の数字(%)は、震災前の2010年の漁獲量に対する各年の漁獲量の割合を示す

となったことや、一部の産地市場で入札が再開されるなど、漁業復興に向けた基盤は徐々に整いつつあるのが現状である。

以上のように、福島第一原発事故により大きな影響を受けた福島県の沿岸漁業の復興は一步步着実に前に進んでいるものの、依然として道半ばという状況にあり、汚染水の処理や廃炉作業との関連等も含め、今後も乗り越えるべき様々な課題が山積している³⁴⁾。一方で、震災から8年以上が経過して、水産物の放射能汚染がかなり収束したことや、試験操業が拡大化しつつあること、福島沖で水産物の資源量が増大していることなど³⁵⁾、本格的な復興に向けた明るい材料も見受けられる。将来的な福島県の沿岸漁業の再興に向け、今後、試験操業の拡大化と資源管理方策を加味した漁獲量の増大化を図り、市場機能の回復、流通販路の再構築、風評被害対策などを段階的かつ総合的に行っていくことが重要になると考えられる。

6. 淡水魚類の放射能汚染の推移と内水面漁業の復興状況と課題

海産物と同様に、福島県では、淡水魚類（天然魚及び養殖魚）の安全性を評価するためのモニタリング検査を原発事故直後から継続的に行っている^{28, 32)}。2017年12月末までに測定さ

れた検体数は、22種4,800検体以上に及ぶ（河川で採捕されたサケを除く）。これらの測定結果は、各水域に生息する淡水魚類の採捕や出荷制限の国からの指示や県からの要請、あるいはそれらの解除の判断基準として重要な役割を果たしている（図3）。避難指示区域等を除き、県内の水域をほぼ網羅しているモニタリングデータは、以下の説明のとおり、各水域に応じた淡水魚類の放射性セシウム汚染メカニズムの解明や放射性セシウム濃度の将来予測にも役立つことが明らかにされている。

養殖魚では、事故直後を中心に一部の検体、特に粗放養殖がおこなわれた個体（ホンモロコ、モツゴ、ドジョウ）から基準値を超える放射性セシウムが検出された（図4）。ただし、2015年以降はほぼ全ての検体で検出限界値未満（不検出率99%）となっている（図5）。餌からの汚染をコントロールできる養殖魚では、放射性セシウム汚染の影響は限定的であったと言える。他方、河川・湖沼域に生息する天然魚では、事故直後だけでなく、近年においても、多くの個体から放射性セシウムが検出されている（図4）。特に、放射性セシウムの初期沈着量が多かった原発北西部の水域に生息する淡水魚類では、福島県西部に比べて放射性セシウム濃度が高く、不検出率は低い傾向にある。な

国からの指示又は県からの要請があった
河川・湖沼(ヤマメ)
(平成31年 3月14日現在)



福島県

図3 福島県の第5種共同漁業権のある河川・湖沼におけるヤマメの採捕・出荷制限等区域図(赤色が対象:2019年3月14日現在)。福島県水産課ホームページより引用 (<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-suisankamonita-top.html>)。避難指示区域内を流れる河川では福島県のモニタリング調査が行われていない (Color on-line)

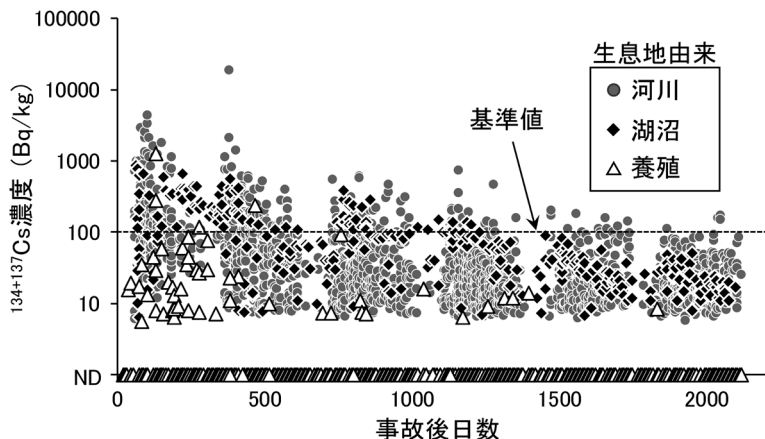


図4 福島県が2011-2016年にモニタリング調査を行った魚類の生息地由来別(河川, 湖沼, 養殖)の放射性セシウム濃度($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$, Bq/kg)の推移。図は水産庁ホームページのデータベースより作成した (<http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>)

お、2017年にモニタリングを行った淡水魚の不検出率は41%と、海産物の98%に比べて低い水準に留まっている(図5)。これらの結果を受け、現在においても県内の一部の水域に生息

するアユ、コイ、フナ、ウグイ、ヤマメ、イワナ、ウナギ等に出荷制限等の措置がかけられている(図3)。また、河川に比べて放射性セシウムが集積しやすい湖沼域では、その影響がより

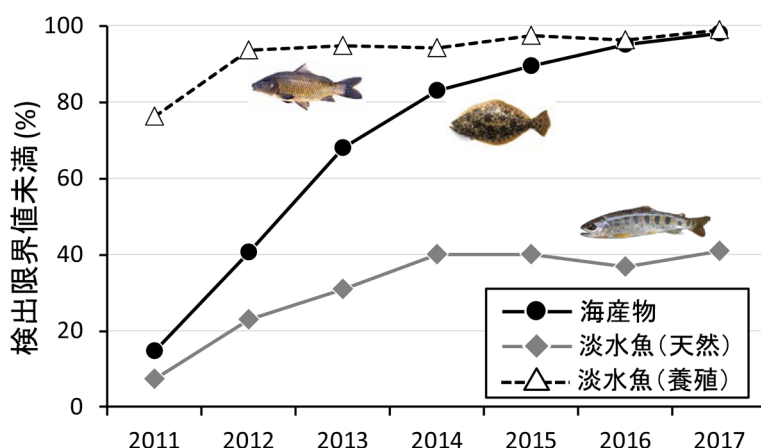


図5 福島県が2011–2017年にモニタリング調査を行った海産物、淡水魚（天然由来）及び淡水魚（養殖由来）の検出限界値未満の割合の年ごとの推移。写真は各カテゴリーにおける代表的な魚種を示す。図は水産庁ホームページのデータベースより作成した（<http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>）（Color online）

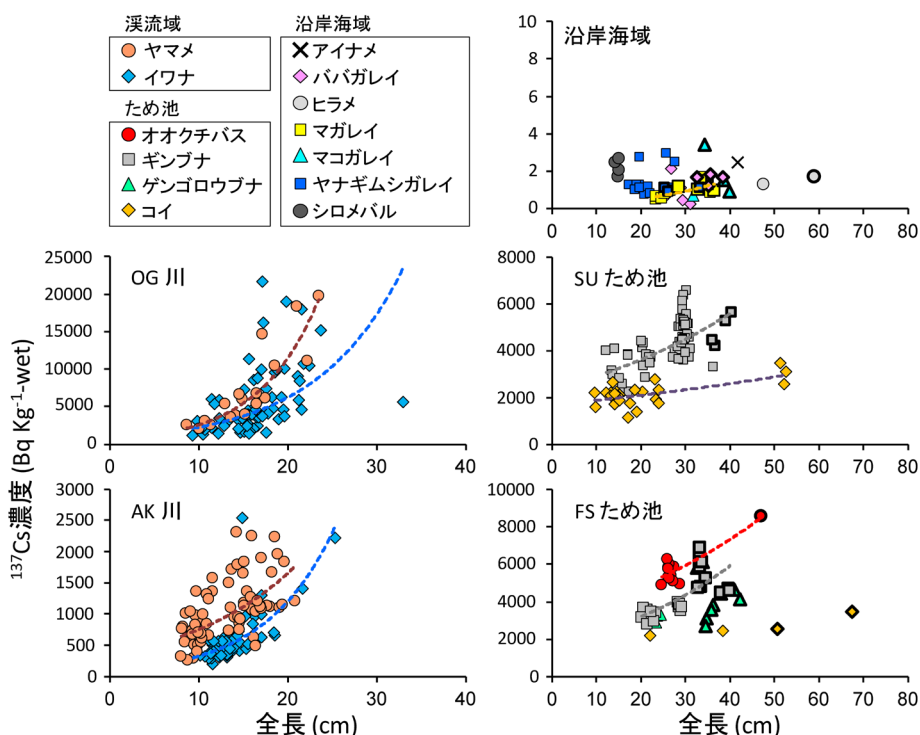


図6 福島県内の複数の海域及び陸水域で2015–2016年に採集された魚類の全長と ^{137}Cs 濃度の関係。OG川とAK川、SUため池とFSため池は帰還困難区域内に位置する。太線で囲われた値は原発事故以前に生まれた個体（5歳以上）を示す。破線は、統計的に有意な指数関係式（サイズ効果）が認められた魚種を示す。図は、Wada et al. (2019)²⁹⁾を改変した（Color online）

長期化する傾向が報告されている^{28, 32)}。

淡水魚の放射性セシウム濃度は、全体的には低下する傾向が認められ（図4）、基準値

100 Bq/kgを超える割合は、2011年の51%から2016年の0.7%へと減少している。ただし、モニタリング検査が行われていない避難指示区域

内のため池や渓流域には、未だ放射性セシウム濃度が10,000 Bq/kgを超える淡水魚類が存在していることが明らかにされている(図6)。なお、海産魚類に比べて淡水魚類の放射性セシウム汚染が長期化する理由としては、生態系に取り込まれた放射性セシウムが抜けにくく、餌を介した放射性セシウムの取り込みが継続していることや、海産魚に比べて各種イオン(Cs^+ 含む)を保持する生理的機能が高いことなどが考えられている。実際、除染が困難な森林の渓流域に生息するヤマメやイワナでは、主に昆虫類(水生・陸生)からの放射性セシウムの取り込みが明らかにされつつある²⁹⁾。

福島県内の内水面漁業協同組合は、竿釣り等の漁業を行う組合員と県内外からの遊漁者により支えられてきた。冬季に賑わいを見せる松原湖のワカサギ釣りに代表される通り、放射能汚染による影響が少なかった漁協や、活動を再開している福島県西部や南部の漁協では原発事故による影響は軽減化していると考えられる。実際、県内の遊漁券発行数は、震災直後は震災前の70%未満まで落ち込んだが、近年は85%近くまで回復している。一方、県中東部に位置する複数の漁協では、依然として活動の制限を余儀なくされており、長期的には、組合員の高齢化や減少、漁協が担ってきた漁場(河川環境)保持機能の低下などが懸念される³¹⁾。農業とは異なり、放射能汚染に対する対策が限られ、かつ、海面と比べて放射能汚染の影響が長期化する傾向にある内水面漁業では、中長期的視点に基づく漁業活動の再生や復興支援に向けて、今後とも関係者が知恵を出し合う必要があると思われる。

文 献

- 1) 田野井慶太郎, 橋本 健, 桜井健太, 二瓶直登, 他, 福島県における降下した放射性物質のコムギ組織別イメージングとセシウム134およびセシウム137の定量, *RADIOISOTOPES*, **60**, 317–322 (2011)
- 2) 野中邦彦, 廣野祐平, 二番茶生育期間中の茶樹におけるセシウムの吸収・移行について, 茶研報, **112**, 55–59 (2011)
- 3) Hirono, Y. and Nonaka, K., Time series changes in radiocaesium distribution in tea plants (*Camelia sinensis* (L.)) after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *J. Environ. Radioact.*, **152**, 119–126 (2016)
- 4) Sato, M., Abe, K., Kikunaga, H., Takata, D., et al., Decontamination effects of bark washing with a high-pressure washer on peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] and Japanese persimmon (*Diospyros kaki* Thunb.) contaminated with radiocaesium during dormancy, *Hortic. Sci. (Prague)*, **84**, 295–304 (2018)
- 5) 農林水産省, 農地除染対策の技術書(第4編 参考資料編)(2013), <http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/sankou.pdf>
- 6) 駒村美佐子, 津村昭人, 小平 潔, わが国での⁹⁰Srと¹³⁷Csによる白米の汚染—1959年以来37年間の長期観測とその解析—, *RADIOISOTOPES*, **50**, 80–93 (2001)
- 7) 駒村美佐子, 津村昭人, 山口紀子, 藤原英司, 他, わが国の米, 小麦および土壌における⁹⁰Srと¹³⁷Cs濃度の長期モニタリングと変動解析, 農業環境技術研究所報告, **24**, 1–21 (2006)
- 8) Komamura, M., Tsumura, A., Yamaguchi, N., Kihou, N., et al., Monitoring ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in rice, wheat, and soil in Japan from 1959 to 2000, *Miscellaneous Publication of National Institute for Agro-Environmental Sciences*, **28**, 1–56 (2005)
- 9) 江口定夫, 農業環境中における放射性セシウムの挙動, 土壌の物理性, **135**, 9–23 (2017)
- 10) 福島県, 米の放射性物質の緊急調査に関する当面の対応について(2011), <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/43723.pdf>
- 11) 福島県, 二本松市旧小浜町の水田における調査結果(中間報告)(2011), http://www.pref.fukushima.jp/keieishien/kenkyuukaihatu/gijyutsufukyuu/05gensiryoku/231017_obama.pdf(神山ら2015での引用)
- 12) 福島県, 農研機構, 農環研, 放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因とその対策について(2014), http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/attach/pdf/kome_seisan_qa-1.pdf
- 13) 福島県, 「がんばろう ふくしま!」農業技術情報(第24号)水稻の放射性セシウム対策としてのカリ施用(2012) <https://www.pref.fukushima.lg.jp/download/1/ganba24H240410.pdf>
- 14) Kato, N., Kihou, N., Fujhimura, S., Ikeba, M., et al., Potassium fertilizer and other materials as counter-

- measures to reduce radiocesium levels in rice: Results of urgent experiments in 2011 responding to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **61**, 179–190 (2015)
- 15) 東北農研 「放射性セシウム濃度を高めないための大豆栽培の手引き」(2019) (東北農研2019, in preparation)
- 16) Kubo, K., Nemoto, K., Kobayashi, H., Kuriyama, Y., et al., Analyses and countermeasures for decreasing radioactive cesium in buckwheat in areas affected by the nuclear accident in 2011, *Field Crops Res.*, **170**, 40–46 (2015)
- 17) 岩手県農業研究センター畜産研究所, 宮城県畜産試験場, 福島県農業総合センター畜産研究所, 栃木県畜産酪農研究センター, 農研機構畜産研究部門, 草地における放射性物質対策のためのカリ施肥, 農研機構畜産研究部門技術レポート, 21 (2019)
- 18) Matsunami, H., Murakami, T., Fujiwara, H. and Shinano, T., Evaluation of the cause of unexplained radiocaesium contamination of brown rice in Fukushima 2013 using autoradiography and gamma-ray spectrometry, *Sci. Rep.*, **6**, 20386 (2016)
- 19) 原田久富美, 伊吹俊彦, 草 佳那子, 箭田 (蕪木) 佐衣子, 他, 飼料用イネにおける放射性Cs濃度に及ぼす養分管理と刈り取り高さの影響, 2012年度成果情報 (2013), http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2012/510b0_02_74.html
- 20) 東北農業研究センター, 畜産部門, 原発事故に伴う畦畔草の放射性セシウム汚染の実態と利用に当たっての留意点 (追補版) (2019), http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/Cs137LeveeWeeds_suppl.pdf
- 21) Kubo, K., Kobayashi, H., Nemoto, K., Hirayama, T., et al., Decreasing radioactive cesium in lodged buckwheat grain after harvest, *Plant Prod. Sci.*, **19**, 91–95 (2016)
- 22) 福島県, 福島県産食品の検査体制～米の全量全袋検査を中心として～ (2018), <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/262176.pdf>
- 23) Aoyama, M., Kajino, M., Tanaka, T. Y., Sekiyama, T. T., et al., ^{134}Cs and ^{137}Cs in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan. Part two: estimation of ^{134}Cs and ^{137}Cs inventories in the North Pacific Ocean, *J. Oceanogr.*, **72**, 67–76 (2016)
- 24) Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M. and Hirose, K., Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *J. Environ. Radioact.*, **111**, 100–108 (2012)
- 25) 和田敏裕, 福島県の漁場環境と漁業の現状と課題「地震・津波から3年後の東北地方太平洋沿岸域の現状—天災による自然攪乱と修復による人為的攪乱—」, 月刊海洋, **47**, 10–17 (2015)
- 26) Wada, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., Fujita, T., et al., Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima, *J. Environ. Radioact.*, **124**, 246–254 (2013)
- 27) Wada, T., Fujita, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., et al., Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima: An update after five years, *J. Environ. Radioact.*, **164**, 312–324 (2016)
- 28) Wada, T., Tomiya, A., Enomoto, M., Sato, T., et al., Radiological impact of the nuclear power plant accident on freshwater fish in Fukushima: An overview of monitoring results, *J. Environ. Radioact.*, **151**, 144–155 (2016)
- 29) Wada, T., Konoplev, A., Wakiyama, Y., Watanabe, K., et al., Strong contrast of cesium radioactivity between marine and freshwater fish in Fukushima, *J. Environ. Radioact.*, **204**, 132–142 (2019)
- 30) 根本芳春, 藤田恒雄, 渡邊昌人, 成田 薫, 福島県の実産魚介類への放射能の影響及び水産業の現状「特集 海洋環境・水産物の放射能の推移—事故後5年を経過して—」, 水生研研報, **22**, 35–42 (2016)
- 31) 大森正之, 原発事故による福島の内水面漁協の被害と賠償, 明治大学政経論叢, **85** (5・6号別冊), 32–73 (2017)
- 32) 福島県の淡水域における放射能汚染と魚類に及ぼす影響(上), 月刊海洋, **50**(1), 1–49 (2018)
- 33) 福島県の淡水域における放射能汚染と魚類に及ぼす影響(下), 月刊海洋, **50**(2), 53–84 (2018)
- 34) 林 薫平, 試験操業における検査・流通問題と消費対策, 北日本漁業, **45**, 26–37 (2017)
- 35) Narimatsu, Y., Shibata, Y., Hattori, T., Yano, T., et al., Effects of a marine-protected area occurred incidentally after the Great East Japan Earthquake on the Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) population off northeastern Honshu, Japan, *Fish. Oceanogr.*, **26**, 181–192 (2017)

Abstract

Long-term Environmental Dynamics and Prediction of Radionuclides from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident

Long-term Environmental Dynamics of Radiocaesium and Future Prediction in Agriculture and Fisheries

—From the Viewpoint of Agriculture and Fisheries—

Takuro SHINANO^{1, †} and Toshihiro WADA^{2, ‡}: ¹Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, ²Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, [†]shinano@chem.agr.hokudai.ac.jp, [‡]t-wada@ipc.fukushima-u.ac.jp

Eight years have passed since the radioactive caesium

contamination of farmland, inland waters, and coastal waters mainly in Fukushima Prefecture, which originates from the TEPCO's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident. We summarized the past activities and the current situation, and countermeasures to be considered in the future. From agricultural viewpoint, long-term appropriate management of soil potassium is required as a countermeasure to control transfer of radioactive caesium from soil to plant. From fisheries viewpoint, mid-to long-term support and intervention for restoration and revitalization of marine and freshwater fisheries will be necessary because both fisheries have more or less suffered from various problems derived from radioactive caesium contamination of fishery products.
