

福島県海域における海産魚介類の放射性セシウム濃度

森下大悟・根本芳春・松本 陽・和田敏裕*・難波謙二*

Radiocesium concentration of marine products off Fukushima Prefecture

Daigo MORISHITA, Yoshiharu NEMOTO, Akira MATSUMOTO, Toshihiro WADA and KENJI NANBA

ま え が き

2011 年 3 月の東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故(以下、原発事故)により、放射性物質が大気中に放出されるとともに、海洋中に直接漏えいした。これを受けて福島県では緊急時環境放射線モニタリング(以下、モニタリング)を実施し、食品の放射性物質の濃度を測定している。原発事故で大量に放出された放射性セシウム($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$)は、物理学的半減期も長いことから(^{134}Cs : 約 2 年、 ^{137}Cs : 約 30 年)、モニタリングの必要性が高い放射性核種である。

過去に根本ら¹⁾が 2012 年までのモニタリング結果を用いて、海産魚介類の放射性セシウム濃度を報告しているが、ここでは続報として、原発事故から約 6 年経過後の海産魚介類の放射性セシウム濃度について報告する。

材料および方法

検体の採取方法および測定方法については、根本ら¹⁾が記載している内容と概ね同様である。相違点として、本報告では、福島県水産試験場の調査船であるいわき丸によって採取された検体のデータを含んでいる。また、原発周辺の海域に設定されていた警戒区域が解除されたことから、旧警戒区域で採取された検体のデータも同様に追加されている。

本報告は、モニタリングデータを検体の採取日で集計し、2011 年 4 月～2017 年 12 月までの期間について、放射性セシウム濃度の推移を整理した。加えて、生態学的半減期の算出、海域・魚介類の分類ごとの放射性セシウム濃度の比較、放射性セシウム検出個体と不検出個体の大きさの比較を実施した。

生態学的半減期

生態学的半減期の推定に際して、不検出データの処理が課題となる。便宜的に検出下限値を放射性セシウム濃度として推定する例や不検出データを除外して推定する例があるが、正確には生態学的半減期は算出できない。

そこで、本報告では不検出のデータを考慮した Okamura et al²⁾の方法を用いた。さらに、不検出データを除外した推定方法と比較することで、Okamura et al の方法を用いることによる有効性について検討した。なお、2 つの推定方法の比較に際しては、計算を簡略化するため ^{137}Cs 濃度のみのデータを用いた。

*福島大学環境放射能研究所

2017年における海域・分類毎の差異

2018年1月現在、原発事故から6年以上が経過しており、ほとんどの検体において放射性セシウム濃度が不検出となっている。そこで、2017年における海域・魚介類の分類ごとの放射性セシウム濃度の比較には、放射性セシウム濃度の平均値ではなく、不検出割合をカイ二乗検定もしくはフィッシャーの正確確率検定を実施することで解析した。なお、魚介類について、表1の通り分類し、海域については図1のとおり北緯(37.9°、37.75°、37.62°、37.25°、37.05°、36.84°)および水深50mの等深線により10区に分けた。

放射性セシウム検出個体および不検出個体の大きさの比較

モニタリングにおいて、福島県水産試験場(相馬支場測定分は除く)が測定した魚体データを用い、放射性セシウム検出個体と放射性セシウム不検出個体の全長および魚体重を種ごとに比較した。その際に、検体量が100gに満たないため複数個体をまとめて一検体としたデータについては、平均値を比較のためのデータとして用いた。なお、統計解析にはt検定を用いた。

表1 海産魚介類の分類方法

分類	検体名
浮魚 (32種)	アカカマス、イカナゴ、ウルメイワシ、カタクチイワシ、カツオ
	カンパチ、ギンザケ、クロマグロ(メジマグロ)、コノシロ
	ゴマサバ、サクラマス、サッパ、サヨリ、サワラ
	サンマ、シイラ、シマアジ、シマガツオ
	シロザケ、スマ、タチウオ、ダツ、ニシン
	ハガツオ、ハマトビウオ、ヒラソウダ、ヒラマサ、ブリ マアジ、マイワシ、マサバ、マルソウダ
底魚 (114種)	浮魚以外の魚種
甲殻類 (15種)	イセエビ、ガザミ、キシエビ、クルマエビ、ケガニ
	サルエビ、シャコ、ズワイガニ、ツノナシオキアミ
	トゲクリガニ、ヒゴロモエビ(ブドウエビ)、ヒラツメガニ、ベニズワイガニ ボタンエビ、ホッコクアカエビ
海藻 (6種)	アラメ、コンブ、ヒジキ、ヒトエグサ(アオノリ)(養殖)、マツモ ワカメ
頭足類 (11種)	アオリイカ、イダコ、エゾハリイカ(コウイカ)、ケンサキイカ、ジンドウイカ スルメイカ(マイカ)、ドスイカ、マダコ、ミスダコ、ヤナギダコ ヤリイカ
貝類 (21種)	アサリ、イガイ、イワガキ、コタマガイ、サラガイ
	ナミガイ、ビノスガイ、ホタテガイ、ホッキガイ、マガキ
	ムラサキイガイ、アヤボラ(ケツブ)、アワビ、エゾボラモドキ、シライトマキバイ
	チヂミエゾボラ、ナガバイ、ネジヌキバイ、ネジボラ、ヒメエゾボラ モスソガイ
棘皮動物 (3種)	オキナマコ、キタムラサキウニ、マナマコ
脊索動物 (1種)	マボヤ

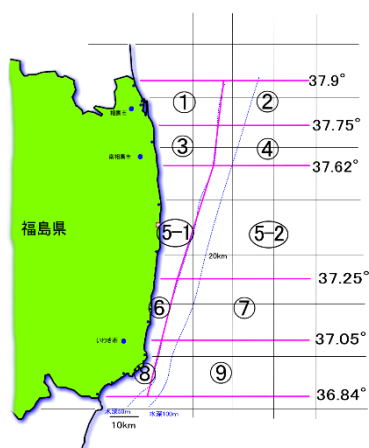


図1 海域区分

結 果

放射性セシウム濃度の推移および生態学的半減期

2011年4月7日から2017年12月28日の間に203種、49,716検体の放射性セシウム濃度が測定された。その結果、全種・全海域における月別の放射性セシウム濃度は、基準値超過(100Bq/kg)の割合が時間の経過とともに低下しており、2013年5月以降は5%を下回り、2014年6月以降は1%を下回り、2015年4月以降は0%であった。

不検出(下限値：5.2~20.1 Bq/kg)であった検体の割合は、2013年7月以降で70%、2014年6月以降で80%、2015年7月以降で90%、2016年6月以降で95%を上回っている(図2)。

また、原発事故直後には10,000Bq/kgを超える検体が確認されたが、2017年には最大でもマコガレイの36Bq/kgとなっている(図3)。

生態学的半減期について比較した結果、Okamura et alの方法では、不検出データを除外する方法と比較して短く算出された。一方で、頭足類の初期値(A0)が0.1Bq/kgとなり非常に低い値になった(表2)。不検出データを除外した推定方法では、頭足類の初期値は17.2Bq/kgとなったが、生態学的半減期は26,109日となり明確な過大推定が確認された(表3)。

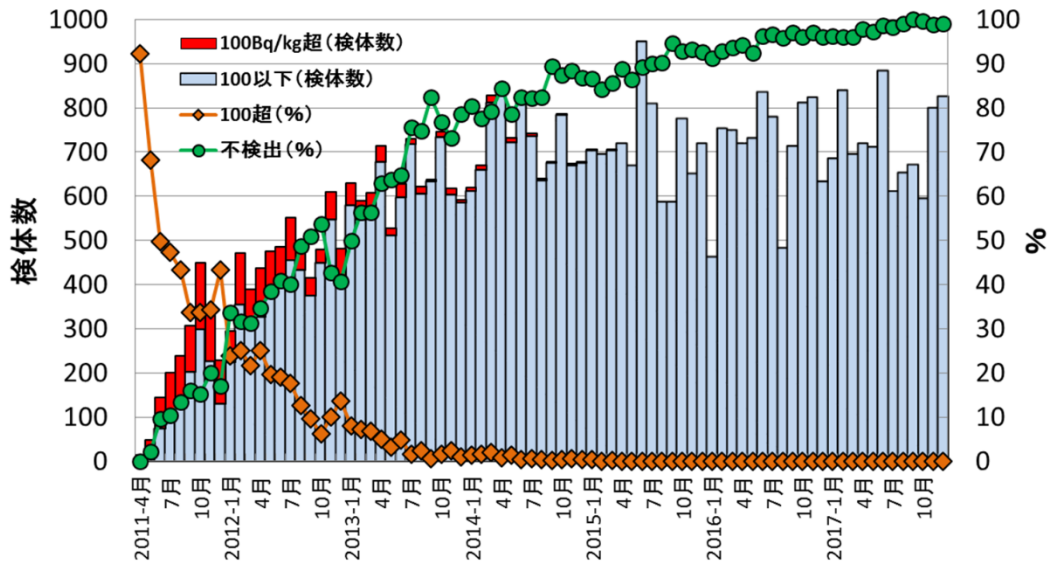


図2 月別のモニタリング検査結果

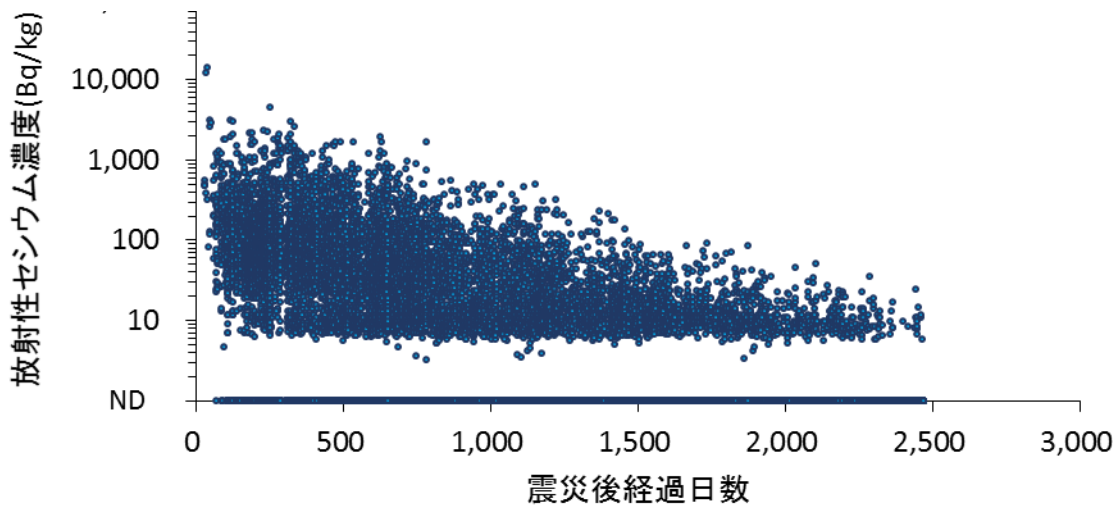


図3 全種・全海域における放射性セシウム濃度の推移

表2 Okamura et al.の方法により推定した
生態学的半減期および初期値(A0)

分類	n	A0(Bq/kg)	Teco
全検体	49,716	49.2	312
浮魚	3,871	33.1	185
底魚	38,002	70.2	320
頭足類	3,841	0.1	400

* ^{137}Cs 濃度のみで推定した。

A0は2011/4/1時点の ^{137}Cs 濃度の推定値

Tecoは生態学的半減期(物理学的半減期を除く)

表3 不検出データを除去し、推定した
生態学的半減期および初期値(A0)

分類	n	A0(Bq/kg)	Teco
全検体	10,247	57.0	767
浮魚	241	46.2	431
底魚	9,693	58.4	761
頭足類	27	17.2	26,109

* 不検出のデータを除き、 ^{137}Cs 濃度のみで推定した。

A0は2011/4/1時点の ^{137}Cs 濃度の推定値

Tecoは生態学的半減期(物理学的半減期を除く)

2017年における海域毎の差異

2017年の測定結果について、海域毎に比較したところ基準値超過割合はすべて0%となった(表4)。不検出の割合は海域毎に有意に異なり(カイ二乗検定, $p < 0.05$)、海域5-1、6において低い結果となったが、すべての海域において90%を超えており、海域5-1、6においても時間経過とともに不検出の割合が上昇する傾向が確認された(図4)。

表4 海域毎の放射性セシウム測定結果(2017年)

海域	検出数	不検出数	検体数	不検出 の割合(%)	基準値超過 の割合(%)
1	2	868	870	99.8	0
2	9	1,260	1,269	99.3	0
3	3	210	213	98.6	0
4	4	747	751	99.5	0
5-1	40	656	696	94.3	0
5-2	9	709	718	98.7	0
6	40	546	586	93.2	0
7	24	1,245	1,269	98.1	0
8	18	909	927	98.1	0
9	18	1,405	1,423	98.7	0

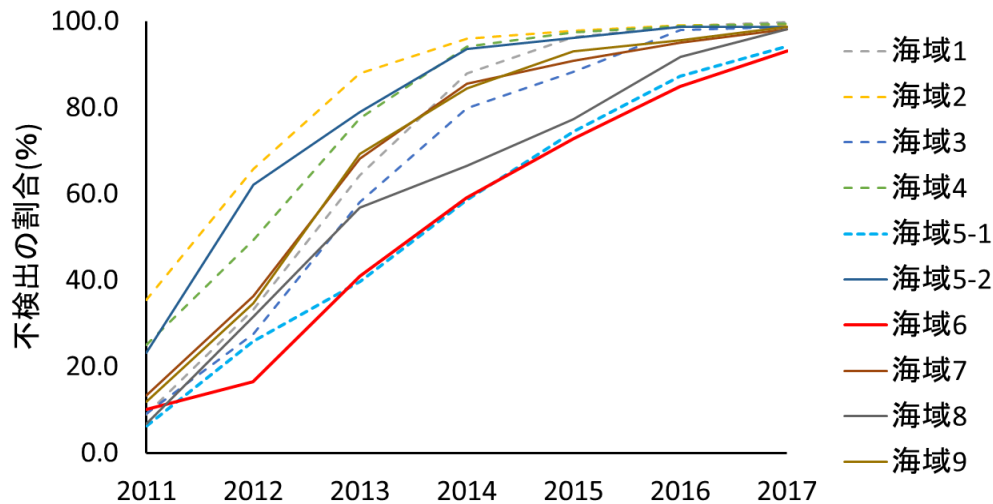


図4 海域毎の不検出割合の推移

2017年における分類毎の差異

2017年において、159種の魚介類を測定した。測定結果について、魚介類の分類毎に比較したところ、基準値超過割合はすべて0%となった(表5)。不検出の割合は分類毎に有意に異なり(フィッシャーの正確確率検定, $p < 0.05$)、底魚において不検出の割合が低い結果となったが、すべての分類において95%を超えた。また、底魚においても経年とともに不検出の割合が増加する傾向が確認されている(図5)。

各分類において、放射性セシウムが検出された種を表6に示す。放射性セシウムが検出された種は21種であり、ほとんどの種は2017年に一度も検出されていないことが確認された。

このうち、2017年において、浮魚で放射性Csが検出された1検体は、シラスの11Bq/kgであった。近年の福島県においてシラスは主にカタクチイワシの稚魚であり、毎年新たに生まれたものを捕獲しているため、原発事故時に生息していた個体は存在しない。よって、シラスは放射性セシウムが検出されにくいと予想されるため、福島大学でイメージングプレートによる放射能の可視化を行った。その結果、放射性セシウムを含有する破片(2mm程度)が混入していたことが明らかとなった(図6)。また、破片が入っていないシラスのみで放射性セシウム濃度を測定したところ、検出下限値未満($< 5.0\text{Bq}$)であった。

同様にヤナギダコについても検体を2分割し、放射性セシウム濃度を測定することで、混入物の影響を調査した。その結果として、どちらの検体においても放射性セシウムが検出されたことから、混入物の影響はないと判断した。

表5 分類毎の放射性セシウム測定結果(2017年)

分類	検出数	不検出数	検体数	不検出の割合(%)	基準値超過の割合(%)
浮魚	1	662	663	99.8	0
底魚	164	6,596	6,760	97.6	0
甲殻類	0	198	198	100.0	0
海藻	0	13	13	100.0	0
頭足類	2	682	684	99.7	0
貝類	0	254	254	100.0	0
棘皮動物	0	143	143	100.0	0
脊索動物	0	7	7	100.0	0

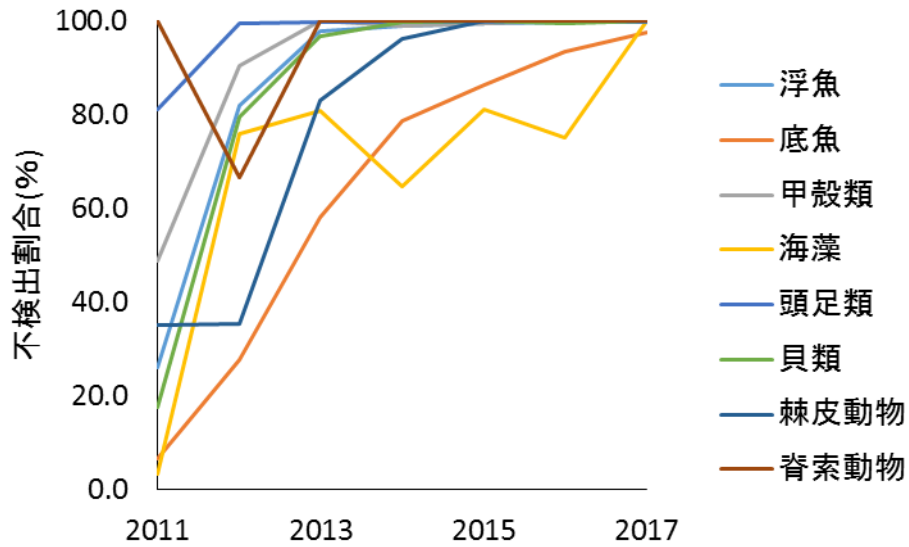


図5 分類毎の不検出割合の推移

表6 2017年に放射性セシウムが検出された種一覧

分類	検体名
浮魚 (1種)	カタクチイワシ(シラス)
底魚 (18種)	アイナメ、イシガレイ、ウスメバル、キツネメバル、クロソイ
	コモンカスベ、シロメバル、スズキ、ババガレイ(ナメタガレイ)、ヒラメ
	ホウボウ、ホシザメ、マガレイ、マコガレイ、マダイ
	ムラソイ、ヤナギノマイ、ヤナギムシガレイ
頭足類 (2種)	スルメイカ(マイカ)、ヤナギダコ

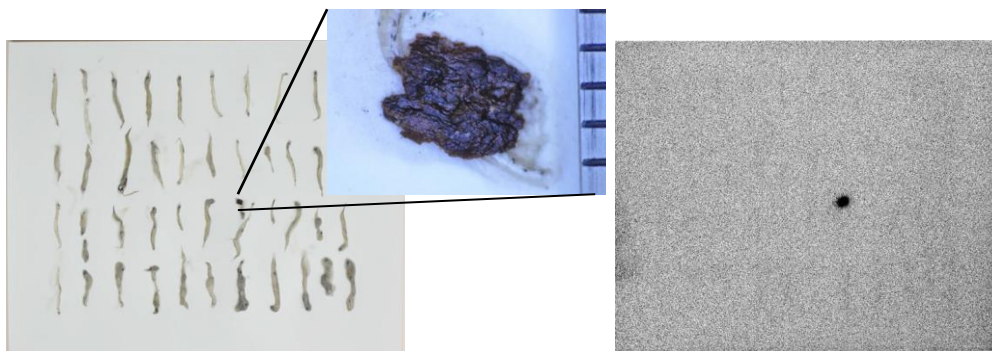


図6 カタクチイワシ(シラス)検体を用いたイメージングプレート結果
(左：写真画像、右：イメージングプレート写真、左上：破片の拡大写真)
* 破片の拡大写真のスケールは1目盛1mmを示す。

放射性セシウム検出個体および不検出個体の大きさの比較

2017年に放射性セシウムが3回以上検出された種について、検出個体および不検出個体の全長および魚体重を整理した。その結果、検出個体の全長および魚体重が大きい傾向にあり、イシガレイ、キツネメバル、ババガレイ、マコガレイで有意に全長が大きいことが確認された。

表7 放射性セシウム検出個体および不検出個体の全長・魚体重

魚種	放射性セシウム検出個体		放射性セシウム不検出個体		p値(全長)
	全長(cm)	魚体重(g)	全長(cm)	魚体重(g)	
アイナメ	420±37	869±212	389±58	806±499	0.35
イシガレイ	527±66	1,653±839	467±70	1,215±503	0.03
ウスメバル	292±12	379±74	288±19	385±70	0.70
キツネメバル	334±22	767±167	313±38	600±220	<0.01
コモンカスベ	487±47	958±128	469±69	968±199	0.10
シロメバル	295±20	466±94	281±26	413±104	0.06
ババガレイ	447±45	977±317	406±52	824±358	<0.01
ヒラメ	591±157	2,856±2,575	575±97	2,097±1,129	0.78
マコガレイ	450±38	965±287	410±48	806±285	<0.01
ムラソイ	299±71	689±473	295±57	597±383	0.90

考 察

放射性セシウム濃度の推移および生態学的半減期

モニタリング結果から、海産魚介類の放射性セシウム濃度が顕著に低下していることが確認された。この要因として、原発からの放射性セシウムが大量に流出した期間は限定的であり、海水の放射性セシウム濃度が原発事故から1年間で迅速に低下したことが挙げられる³⁾。実際に海水の放射性セシウム濃度は原発港内を除き、2017年には0.2Bq/kg未満となっている⁴⁾。また、これまでの報告では、環境中の濃縮係数は最大でも100程度となっており⁵⁾、原発港内を除き新たに100Bq/kgを超える魚介類が発生する可能性は非常に低いと考えられる。

生態学的半減期について、Okamura et alの方法により推定した結果、不検出データを除外した過大推定の値と比べ、妥当であることが確認された。一方で、頭足類の推定結果は初期値(A0)において、明らかに実際のデータとの乖離が確認された。この要因としては、2つが考えられる。1つ目の要因としては、放射性セシウム濃度が検出されたサンプル数が少なすぎることが挙げられる。頭足類においては、3,841検体中29検体のみに放射性セシウム濃度が検出されており、不検出の割合は99.3%である。これにより、正確な推定ができなかった可能性がある。

2つ目の要因として、頭足類において放射性セシウム濃度の低下率が一定の割合でない可能性が挙げられる。Okamura et alの方法は放射性セシウムの低下率が一定であることを仮定しているため、低下率が一定でない場合には、モデルとの不一致が生じる。実際に、海水の放射性セシウム濃度は、事故から約1年間で迅速に低下し、それ以降は緩やかな低下に変化したことが報告されており³⁾、頭足類の放射性セシウム濃度の低下率も海水と同様に変化した可能性も考えられる。よって、検出下限値を下げ、ごく低濃度の放射性セシウムを検出させたデータを加えることおよび低下率が変化することを加味した減衰式をモデルに加えることで、より正確な生態学的半減期および初期値が推定できる可能性がある。

2017年における海域・分類毎の差異

津旨ら⁶⁾によれば放射性セシウムを高濃度に含む海水が、原発南部の沿岸域に集中して流れた

と推定されており、これまでには原発南部の沿岸域に生息する魚介類において、放射性セシウム濃度が高いことが報告されていた⁷⁾⁸⁾。しかし、2017年には、海域間の差はあるものの、不検出の割合はすべてにおいて90%を超過しており、顕著な差は確認されなくなっている。

同様に2017年の結果においては、魚介類の分類毎に放射性セシウムの不検出割合が異なり、底魚において不検出割合が低いものの、すべての分類において95%を超過していることから、分類間においても顕著な差は確認されなくなっている。また、2017年に放射性セシウムが検出された魚種は21種であり、限定された種のみで確認されている状況である。

この中で、シラスについては混入物の影響により放射性セシウム濃度が検出されたことが確認されたことが明らかとなった。これについて、2017年の試験操業におけるスクリーニング検査でも浮魚で放射性セシウムが検出された事例があり、シラス(加工)およびイシカワシラウオで放射性セシウム濃度がそれぞれ14.9Bq/kg、17.2Bq/kgであった⁹⁾。これらの例においても混入物の影響があるかもしれないため、今後、洗浄を徹底することで安全性が担保できると考えられる。

これまでには、放射性セシウムが高濃度の海水の流出状況に加え、成長率、食性、世代交代、移動等の魚介類の生態的な要因により、海域毎および分類毎に放射性セシウム濃度が顕著に異なることが報告されていた。しかし、モニタリングで測定される際の検出下限値においては、今後、不検出の割合がさらに上昇することで、海域毎および魚介類種毎の差は検出されなくなると予想される。

放射性セシウム検出個体および不検出個体の大きさの比較

放射性セシウム濃度が検出された個体は、同一種の不検出の個体に比べてサイズが大きい傾向が確認された。この要因としては、サイズが大きい個体は年齢も高齢であり、原発事故直後の放射性セシウム濃度が高い環境下で生息していた可能性が高いことや成長希釈の効果が少ないこと¹⁰⁾が挙げられる。大型個体の放射性セシウム濃度が高い現象は、世代交代により解消されると考えられるため、今後も、世代交代による放射性セシウム濃度の低下効果が見込まれる。

総括

これまでのモニタリング結果から、福島県沖の魚介類の安全性が高いと主張できる。ただし、モニタリング検査により安全性を確認することで、消費者の安心感を得るための根拠とすることができるため、今後もモニタリング検査を継続することが重要であると考えられる。

要 約

1. 2011年から2017年までのモニタリングデータを用いて解析した。
2. 福島県沖の海産魚介類の放射性セシウム濃度は、経時的に減少しており、2017年には98%が不検出であり、最大値は36Bq/kgであった。
3. 不検出データを考慮した手法により、生態学的半減期を算出した。その結果、多くの場合において、生態学的半減期の妥当な推定に有効であると考えられた。
4. 2017年のデータにおいても、海域毎・魚種毎に放射性セシウム濃度の傾向が異なることが確認された。しかし、海域毎・分類毎の差は年々縮小していることが確認された。
5. 放射性セシウムが検出された個体は、不検出個体と比較して大型である傾向が確認された。
6. モニタリング結果から、福島県沖の海産魚介類の安全性が確認された。

文 献

- 1) 根本芳春・早乙女忠弘・佐藤美智男・藤田恒雄・神山享一・島村信也：福島県海域における海

- 産魚介類への放射性物質の影響、福島水試研報、16、63-89 (2013).
- 2) Okamura H., Ikeda S., Morita T., Eguchi S.: Risk assessment of radioisotope contamination for aquatic living resources in and around Japan, PNAS 113, 3838-3843 (2016).
 - 3) Kaeriyama, H.: ^{134}Cs and ^{137}Cs in the seawater around Japan and in the north Pacific. In: Nakata, K., Sugisaki, H. (Eds.), Impacts of the Fukushima Nuclear Accident on Fish and Fishing Ground. Springer, Tokyo, pp.11-31 (2015).
 - 4) 原子力規制委員会 HP:海水モニタリング結果 <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/428/list-1.html>
 - 5) Tateda Y., and Koyanagi T.: Concentration Factors for ^{137}Cs in Japanese Coastal Fish(1984-1990), J.Rad. Res, 37, 71-79 (1996).
 - 6) 津旨大輔・塚野考樹・青山道夫・廣瀬勝巳：福島第一原子力発電所から漏洩した ^{137}Cs の海洋拡散シミュレーション、電力中央研究所報告、V11002 (2011).
 - 7) Wada, T., Fujita, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., Mizuno, T., Sohtome, T., Kamiyama, K., Narita, K., Watanabe, M., Hatta, N.: Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima: an update after five years. J. Environ. Radioact., 164, 312–324 (2016).
 - 8) 根本芳春・島村信也・五十嵐 敏：福島県における水産生物等への放射性物質の影響、水産学会誌、78(3)、514-519 (2012).
 - 9) 福島県漁連 HP：試験操業漁獲物の検査結果について
<http://www.fsgyoren.jf-net.jp/kensakekka201209.pdf>
 - 10) 鈴木 聡・山田 学・佐久間 徹：福島県沿岸における底魚 3 種の放射性セシウム濃度の経時変化と体サイズおよび年級との関係、福島水試研報、17、47-55 (2016).