

福島県海域におけるヒラメの放射性セシウムの推移

守岡良晃・佐久間徹・島村信也*・水野拓治**・榎本昌宏・佐藤美智男

Change of Radiocesium for Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*
in the Waters off Fukushima Prefecture

Yoshiaki MORIOKA, Toru SAKUMA Shinya SHIMAMURA,* Takuji MIZUNO**,
Masahiro ENOMOTO and Michio SATO

ま え が き

2011 年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による東京電力福島第一原子力発電所（以下第一原発）の事故により、放射性物質を高濃度に含んだ汚染水が海洋に流失し、福島県沿岸の海産魚介類からは放射性物質が検出され、多数の魚種で国から出荷制限がかかり、福島県の漁業は操業自粛に追い込まれた。福島県が実施している緊急時環境放射線モニタリング検査（以下モニタリング）によると、震災から 5 年近くが経過し、海産魚介類の放射性物質濃度は低下しつつあるが^{1) 2)}、28 種において未だに原子力災害対策特別措置法第 20 条第 2 項の規定に基づく食品の出荷制限が指示されている（2016 年 3 月 8 日時点）。本調査では、福島県水産業における主要な底魚類の 1 種でありながら、放射性セシウム（以下 Cs）濃度の低下が他の魚種と比較して遅く、未だに出荷制限が解除されていないヒラメについて、モニタリングの結果に加え、資源調査等で採捕されたヒラメについても Cs 濃度を測定することで、年級別や雌雄別のより詳細な Cs の推移を把握することを目的とした。

材料および方法

データは、2011 年 5 月～2014 年 12 月までの期間において、モニタリングの結果に加え、モニタリングのために採捕されたヒラメ（1 船ごとに 1 魚種 1 検体が基本となっているため、複数個体採捕された場合にモニタリングに供されなかったヒラメ）及び、こたか丸、いわき丸、拓水による資源調査等で採捕されたヒラメについて、個体別に Cs 濃度を測定した（以下個体別測定）データを用いた（計 3,291 個体）。また、Cs 濃度は放射性セシウム 134（以下 ¹³⁴Cs）濃度と放射性セシウム 137（以下 ¹³⁷Cs）濃度を測定しているが、¹³⁴Cs は物理学的半減期が約 2 年と短く、不検出（Not Detected、以下 ND）となるが多かったことから、¹³⁷Cs について結果を示し、解析した。

ヒラメは個体別に精密測定（全長・体長・体重・性別・生殖腺重量・生殖腺熟度・肝臓重量・胃内容物及びその重量）を行い、年齢査定に用いる耳石採取後、縁側を除く筋肉部を包丁または

*福島県農業総合センター

**福島県水産事務所

ミキサーを用いて細かく切り刻み、 ^{137}Cs 濃度測定を試料とした。

ヒラメの ^{137}Cs 濃度の測定は、ゲルマニウム半導体検出器を用いて ^{137}Cs 濃度を測定した。耳石の査定は、東北区水産研究所にて表面法で実施した。

得られたデータから、年級別及び雌雄別の ^{137}Cs 濃度の推移のグラフを作成するとともに、年級群及び雌雄別の比較を行うために ^{137}Cs 濃度が半減するまでにかかる期間（以下 ^{137}Cs 濃度の半減期）を求めた。また、 ^{137}Cs 濃度は成長に伴う希釈効果（以下成長希釈）の影響を受けると考えられ、 ^{137}Cs の排出による減少のみを示してはいないことから、成長による希釈効果を除いた排出による ^{137}Cs の減少の推移を把握するため、得られた個体別の ^{137}Cs 濃度にそれぞれの体重（生殖腺重量・肝臓重量・胃内容物重量は除く）を乗じて1個体あたりの ^{137}Cs 量（以下 ^{137}Cs 量）を算出し、年級別・雌雄別の ^{137}Cs 量の推移のグラフを作成し、年級群及び雌雄別の比較を行うために1個体あたりの ^{137}Cs 量が半減するまでにかかる期間（ ^{137}Cs 量の半減期）を求めた（体重・生殖腺重量・肝臓重量・胃内容物重量いずれかのデータが欠損している場合は除外した）。また、データ数が少ない2000～2007年級に関してはまとめて1つの年級とし、2008年級群、2009年級群、2010年級群、2011年級群、2012年級群、2013年級群までの結果を示した（用いたデータ数は年級の古い順からそれぞれ232個体、271個体、418個体、1873個体、197個体、205個体、95個体）を用いた。雌雄別の結果はデータ数の多い震災前の年級群（2000～2007年級群、2008年級群、2009年級群、2010年級群）のみ示した（雌雄のデータが欠損している場合は除外した）。

半減期の算出については、NDの個体を除外し算出すると、半減期を過小に評価する可能性がある。そのため、和田らの手法を参考にし³⁾、震災後1年間のヒラメの ^{137}Cs 濃度の対数をとった分布がコルモゴロフ・スミルノフ検定により正規分布に従っているとみなせることから（ $P=0.6853$ 、図1）、ヒラメの ^{137}Cs 濃度の分布が対数正規分布であるとみなし、年級ごとに1ヶ月毎に、検出下限値未満のデータと、検出下限値以下となったデータの個数だけ ^{137}Cs 濃度の値の高いデータから順に除去した。残ったデータを用いて、指数近似によって得られた近似式から半減期を推定した。つまり下端と上端のデータを同数除去することで、より正確な半減期を求めようとした。ただし、この手法では検出下限値が一定である必要があり、 ^{137}Cs 濃度の検出下限値はモニタリングでは5.0～10.0程度で測定しているが、個体別測定ではヒラメの ^{137}Cs 濃度の低下に合わせて検出下限値を下げて測定を実施している。このため、個体別測定にてモニタリングと同程度の検出下限値で測定していた2013年10月までは同一のデータとして上記手法を適用し、個体別測定で検出下限値を下げて測定し始めた2013年11月以降はモニタリングと個体別測定でそれぞれ分けて上記手法を適用した後、データを統合し、指数近似にて得られた近似式から、半減期を求めた。ヒラメの体重は経時的に累乗増加を示すため、成長希釈による累乗的な減少と代謝に伴う指数的な減少の主に2つの要素があると考えられるが、両方で近似した結果、より当てはまりのよい指数近似を適用した。

また、 ^{137}Cs 量の半減期も同様のデータセットを用いて算出した。

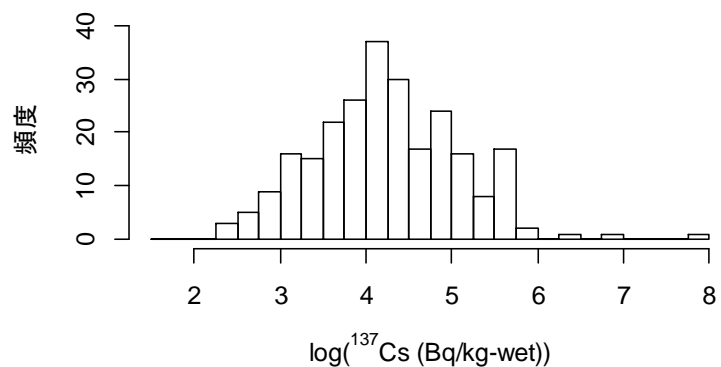


図1 震災後1年間のヒラメ ^{137}Cs 濃度の対数分布

結 果

^{137}Cs 濃度の半減期の算出、 ^{137}Cs 量の半減期の算出には年級別に表 1 の個体数を用いた(表 1)。

各年級での ^{137}Cs 濃度の半減期は 2000～2007 年級で 478 日、2008 年級 355 日、2009 年級 332 日、2010 年級 276 日、2011 年級 608 日、2012 年級 579 日、2013 年級 366 日となった。震災前の年級群は古い年級群ほど ^{137}Cs 濃度の低下が遅く、新しい年級群ほど速い傾向があった(図 2)。また、震災後の年級群は震災前の年級群よりも ^{137}Cs 濃度の低下が遅い傾向があった(図 3)。

次に雌雄別の ^{137}Cs 濃度の半減期は、2000～2007 年級の雌で 454 日、雄で 630 日、2008 年級の雌で 316 日、雄で 435 日、2009 年級の雌で 314 日、雄で 365 日、2010 年級の雌で 285 日、雄で 262 日であった。2010 年級群を除いて雌で ^{137}Cs 濃度の低下が速く、雄で遅い傾向があった。(図 4)

^{137}Cs 量の半減期は 2000～2007 年級で 817 日、2008 年級 523 日、2009 年級 611 日、2010 年級 510 日となった。 ^{137}Cs 量の低下は ^{137}Cs 濃度の低下よりも遅かった(図 5)。また、震災後の年級群(2011 年級群～2013 年級群)はわずかに上昇する傾向が見られた(図 6)。

雌雄別の ^{137}Cs 量の半減期は 2000～2007 年級群の雌で 715 日、雄で 952 日、2008 年級群の雌で 457 日、雄で 674 日、2009 年級群の雌で 595 日、雄で 589 日、2010 年級群の雌で 759 日、雄で 488 日となった。古い年級では雌で ^{137}Cs 量の低下が速く、新しい年級では雄で ^{137}Cs 量の低下は速かった(図 7)。

表 1 使用したデータリスト

	測定数	ND	^{137}Cs 濃度の半減期算出に用いた個体数			生態学的半減期算出に用いた個体数			
			雄	雌	不明	雌	雄		
2000～2007年級群	232	6	221	176	44	1	206	168	38
2008年級群	271	10	254	153	99	2	238	145	93
2009年級群	418	33	357	223	134		323	209	114
2010年級群	1873	482	983	523	460		842	446	396
2011年級群	197	92	55	29	26		53	28	25
2012年級群	205	87	72	44	22	6	65	43	22
2013年級群	95	17	63	33	27	3	60	33	27
計	3291	727	2005	1181	812	12	1787	1072	715

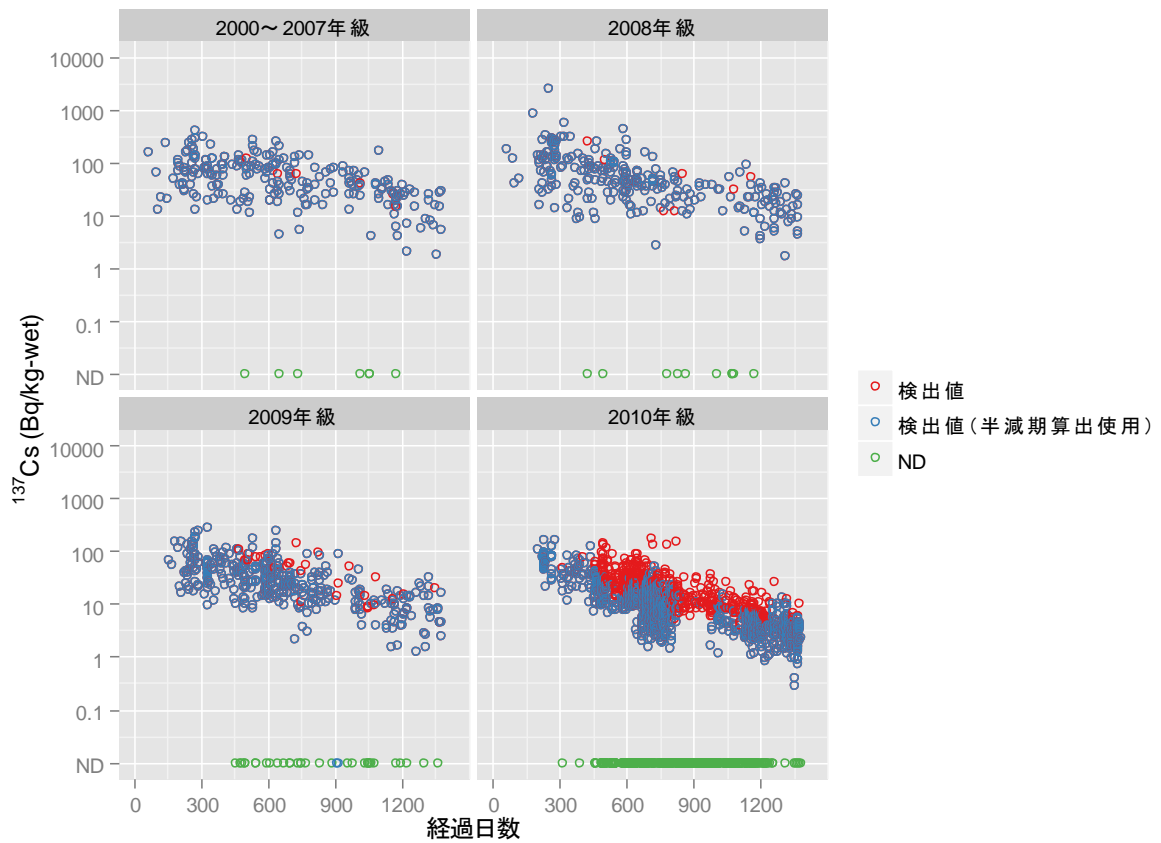


図2 震災前年級群の ^{137}Cs 濃度推移

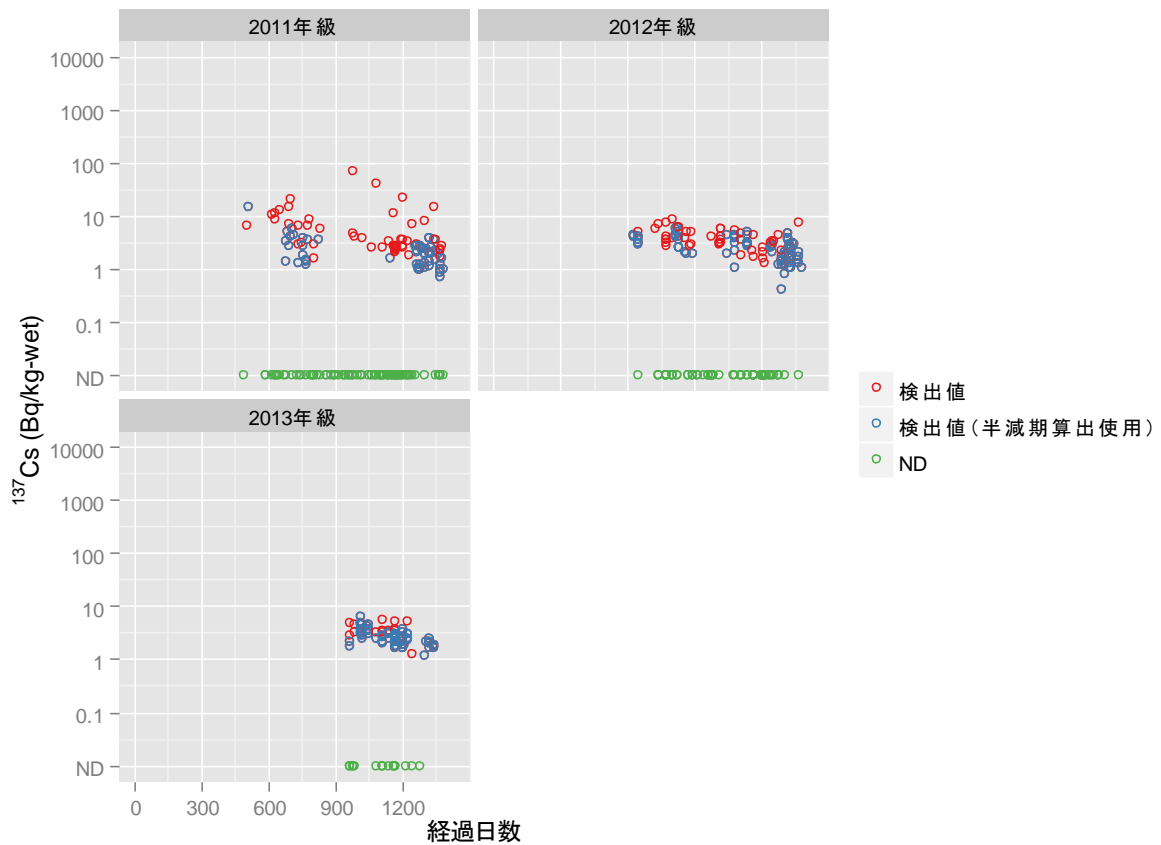


図3 震災後年級群の ^{137}Cs 濃度推移

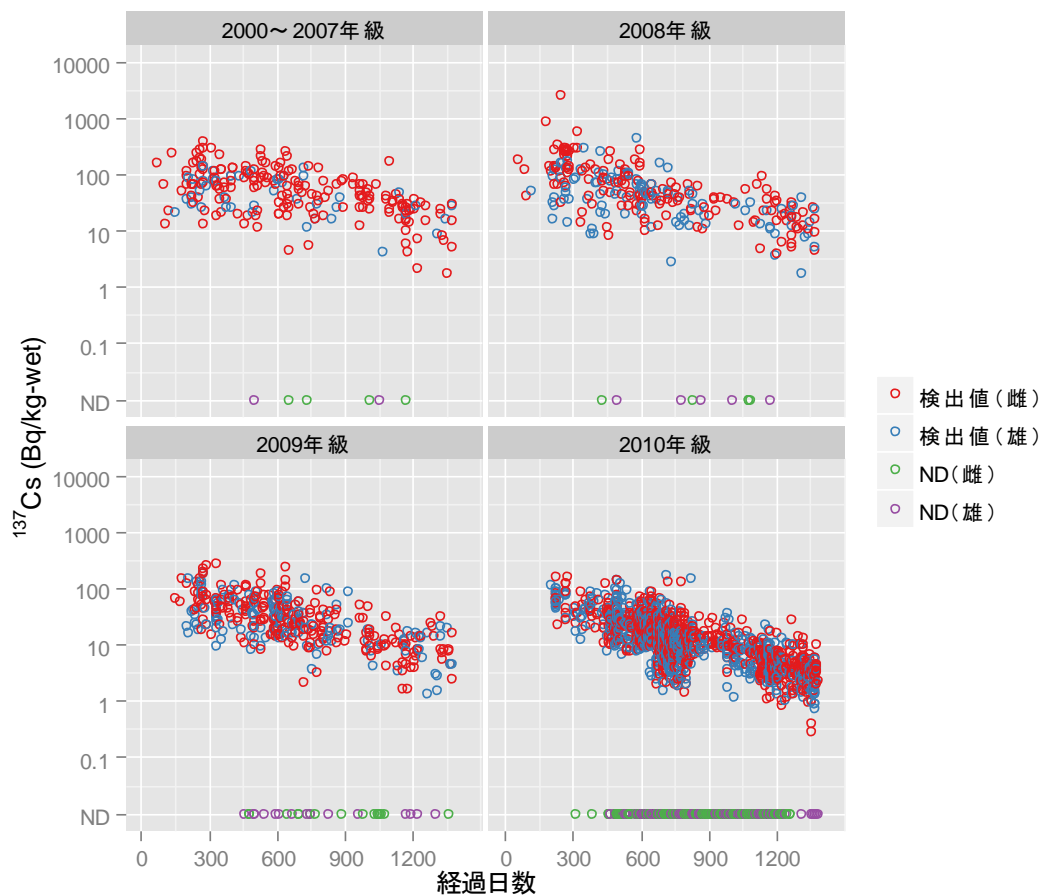


図4 震災前年級雌雄別の¹³⁷Cs濃度の推移

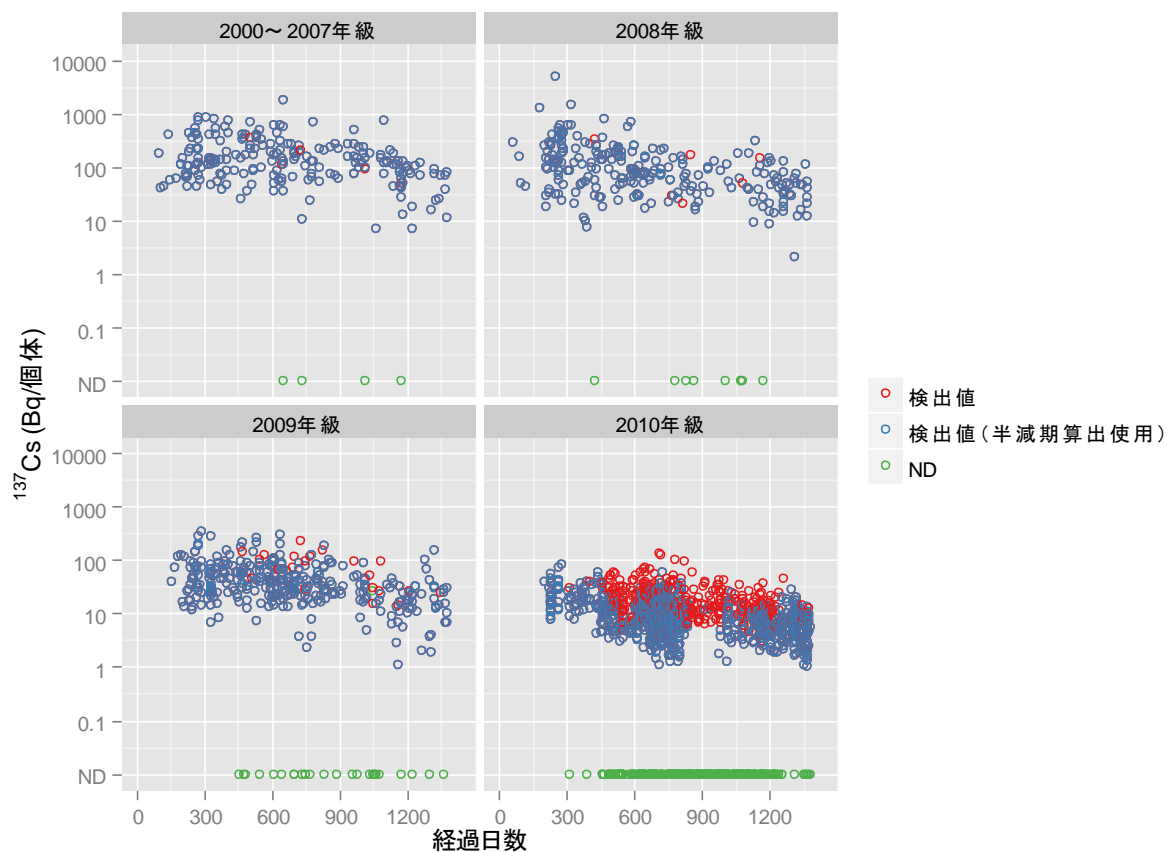


図5 震災前年級群の¹³⁷Cs量の推移

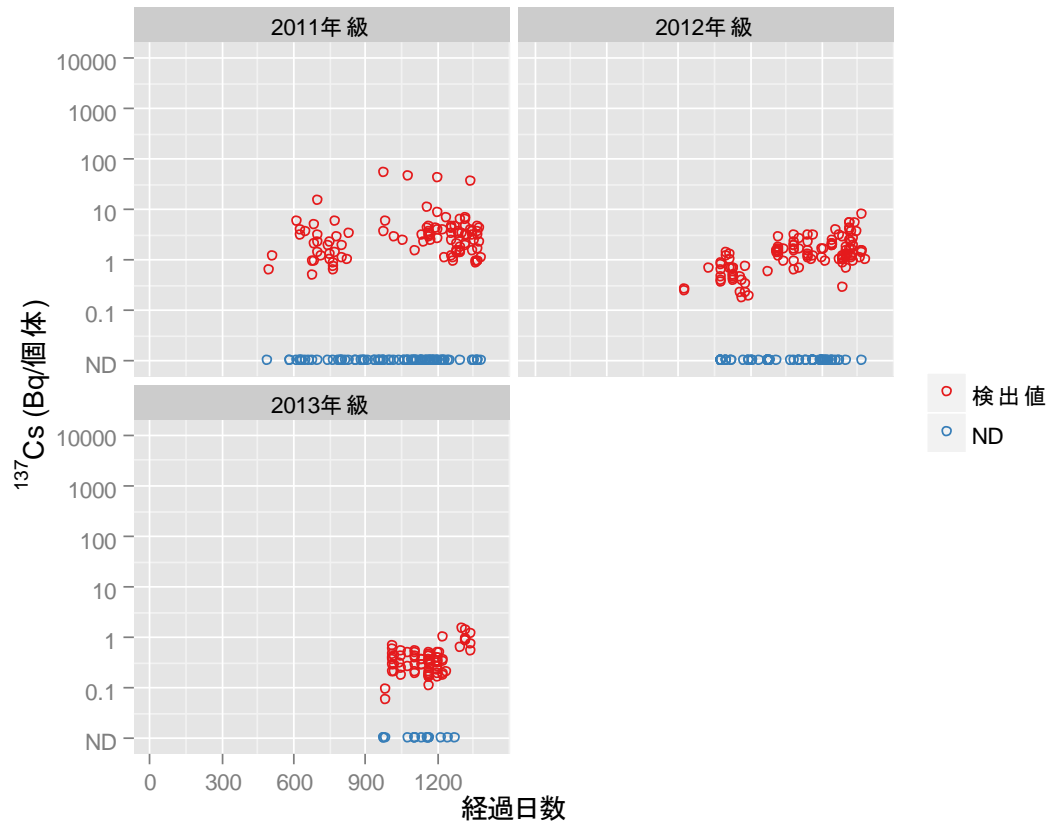


図6 震災後年級群の¹³⁷Cs量の推移

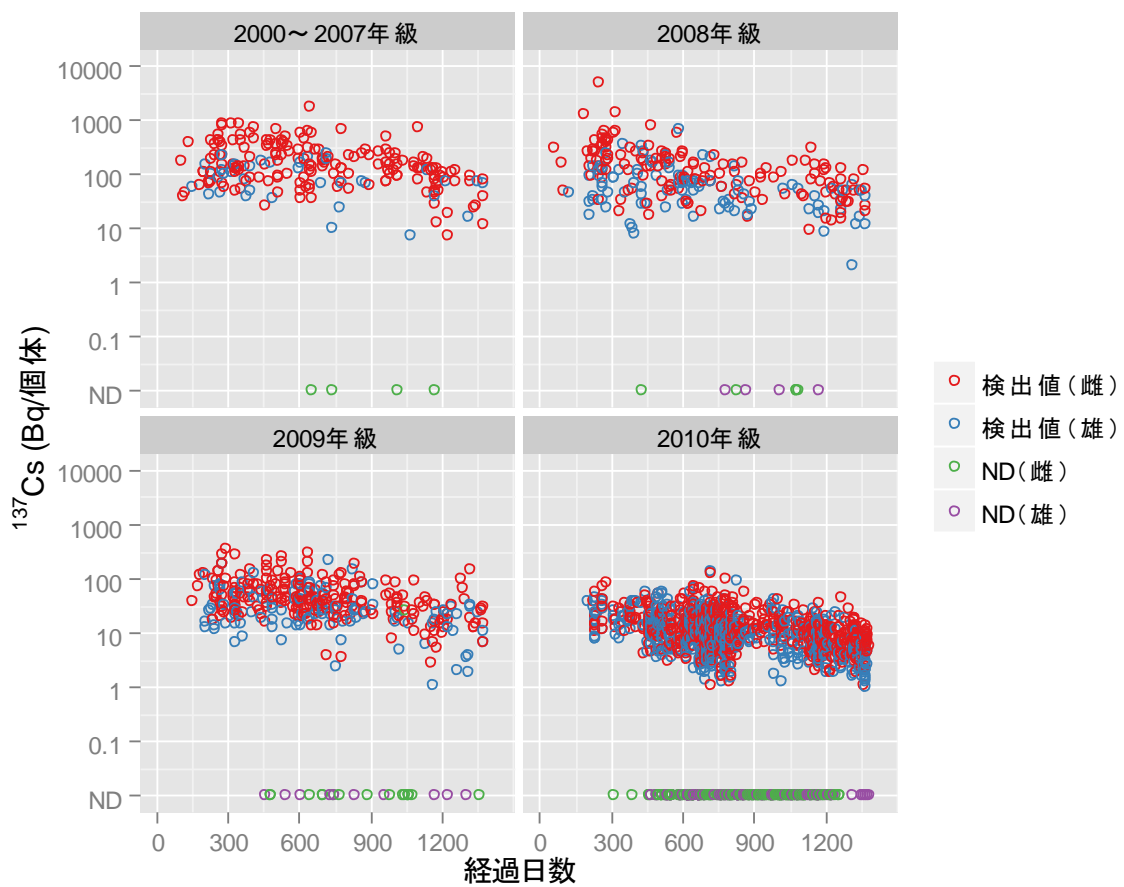


図7 震災前年級雌雄別の¹³⁷Cs量の推移

考 察

震災前の年級群では、古い年級群ほど¹³⁷Cs低下は遅く、新しい年級群ほど¹³⁷Cs濃度の低下は速い傾向にあった。これは、新しい年級ほど成長希釈の影響が強く¹³⁷Cs濃度が速やかに低下したためと考えられた。また、2010年級群を除いて雌で¹³⁷Cs濃度の低下が速い傾向があったが、これは雄よりも雌で成長が速いため(図8)、成長希釈の影響が雄よりも大きかったと考えられた。なお、2010年級群は若い年級であり、雄と雌の成長差が小さいため、雌雄差が表れなかったと考えられた。また、震災後の年級群では、震災前の年級群と比較して¹³⁷Cs濃度は低い水準にあるが、¹³⁷Cs濃度の低下は遅い傾向にあった。これは海水の¹³⁷Cs濃度は震災後半年で急激に減少し、その後の濃度低下が非常に緩やかであることから⁴⁾、震災後の年級群は震災直後の高濃度の汚染水に曝されていないため体内の¹³⁷Cs濃度は低いと考えられた⁵⁾。また、その後の海水の¹³⁷Cs濃度の緩やかな低下を反映する形で、体内の¹³⁷Cs濃度が低下していると考えられた。

¹³⁷Cs量の推移は、震災前の年級群では、成長希釈の影響を除いたため、¹³⁷Cs濃度の推移と比較して低下が遅く、¹³⁷Cs濃度の推移で見られたような、古い年級で低下が遅く、新しい年級で低下が速い傾向は見られず、2008年～2010年級群では低下速度は同程度であった。しかし、2000～2007年級群のみ他の級群と比較して遅かった。これと似たような事例がEuropean hake(タラの1種)やマコガレイで報告されており、高齢魚ほど、体内のCs濃度が高くなる傾向がある知見が得られている^{6) 7)}。また、その要因としては、European hakeでは食性の変化、マコガレイでは希釈の低下と代謝低下によるものと考察されており、ヒラメにおいても食性の変化や代謝の低下など、何らかの要因により、高齢魚では¹³⁷Cs量の低下が遅くなることが示唆された。

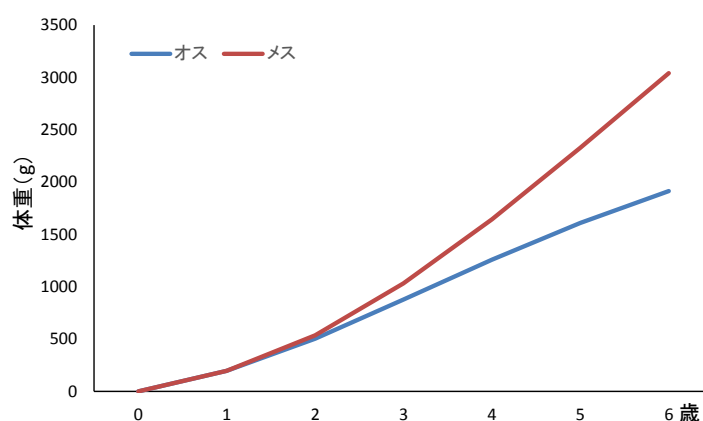


図8 雌雄の成長差

震災後の年級群では¹³⁷Cs量は緩やかに増加する傾向があった。これは前述したとおり震災後の年級群の体内の¹³⁷Cs濃度は海水の¹³⁷Cs濃度と平衡に近い状態にあると考えられ、海水の¹³⁷Cs濃度に応じて徐々に減少しているが、成長に伴い海水の¹³⁷Csを取り込んでいるためと推察された。つまり、体内の¹³⁷Cs濃度が海水の¹³⁷Cs濃度の平衡状態よりも高い水準にある震災前の年級群は、成長に伴い¹³⁷Cs濃度の希釈が起きるが、体内のCs濃度と海水の¹³⁷Cs濃度が平衡に近い状態にある震災後の年級群は、平衡状態を保つために成長に伴い¹³⁷Csを取り込んでいると推察された。

雌雄別では、雄では震災前の古い年級群ほど¹³⁷Cs量の低下が遅く、新しい年級ほど速い傾向があった。一方で雌では2000年～2007年級群を除き、新しい年級群ほど¹³⁷Cs量の低下が遅い傾向を示した。この要因に関しては、雄よりも雌で成長が良いこと、寿命が長いことが関係しているのではないかと推察された。

今回得られた¹³⁷Cs量の半減期は952日～457日であった。一方で従来の生物学的半減期(取り込まれた¹³⁷Csが半減する期間)は60日～70日程度である⁸⁾。生物学的半減期は環境からの取り込みがまったくない中での排出速度であり、それと比較して、第一原発事故直後の高濃度汚染水に曝された後も環境中に残存する¹³⁷Csの影響を受け続けた中で得られた今回の¹³⁷Cs量の半減期

が長くなるのは当然である。しかしながら、特に高齢魚ではその影響を考慮しても従来の生物学的半減期では説明がつかないほど大きな差がある。松本の実験ではメバルで¹³⁷Csの生物学的半減期が269日という結果が得られており⁹⁾、ヒラメについても従来の知見の生物学的半減期について再検討する余地があると推察された。

要 約

1. ¹³⁷Cs濃度の低下は震災前の年級群では成長希釈の影響が小さい古い年級群で遅く、成長希釈の影響が大きい新しい年級で速い。
2. ¹³⁷Cs量の低下は震災前の年級群では、古い年級群で遅く、新しい年級群で速い。
3. 震災後の年級群は震災前の年級群と比較し、¹³⁷Cs濃度は低い水準にあり、¹³⁷Cs濃度が下げ止まりつつあるため、成長に伴い¹³⁷Cs量としては増加傾向にある。
4. 今回得られた¹³⁷Cs量の半減期は従来の生物学的半減期と比較してあまりにも長い結果であり、従来の生物学的半減期に関して再検討する余地がある。

謝 辞

耳石査定を実施して頂いた国立研究開発法人水産総合研究センター東北区水産研究所栗田豊氏にお礼申し上げます。

文 献

- 1) 福島県水産試験場:平成26年度事業概要報告書 49-50(2015)
- 2) Toshihiro Wada, Yoshiharu Nemoto, Shinya Shimamura, Tsuneo Fujita, Takuji Mizuno, Tadahiro Sohtome, Kyoichi Kamiyama, Takami Morita, Satoshi Igarashi: Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima Journal of Environmental Radioactivity 124 (2013) 246-254
- 3) Wada et al. submitted (現在投稿中)
- 4) 原子力規制委員会:近傍・沿岸海域の放射能濃度の推移
- 5) Yutaka Kurita, Yuya Shigenobu, Toru Sakuma, and Shin-ichi Ito : Radiocesium Contamination Histories of Japanese Flounder (*Paralichthys olivaceus*) After the 2011 Fukushima Nuclear Power Plant Accident, Impacts of the Fukushima Nuclear Accident on Fish and Fishing Grounds (2016)139-154
- 6) 磯山直彦・及川信司・御園生淳・中原元和・中村良一・鈴木奈緒子・吉野美紀・鈴木千吉・佐藤肇・原猛也:誘導結合プラズマ質量分析法により定量化したマコガレイ筋肉中のセシウム濃度と成長の関連性、BUNSEKI KAGAKU Vol.57, No.9, pp.763-769(2008)
- 7) Mireille Harmelin-Vivien, Xavier Bodiguel, Sabine Charmasson, Veronique Loizeau, Capucine Mellon-Duval, Jacek Trinczynski, Dabiel Cossa : Differential biomagnification of PCB, PBDE, Hg and Radiocesium in the food web of the European hake from the NW Mediterranean Marine Pollution Bulletin 64(2012)974-983
- 8) 原子力環境整備センター:環境パラメータ・シリーズ6 海洋生物への放射性物質の移行
- 9) Akira Matsumoto a, Yu Shigeoka, Hisayuki Arakawa, Naoto Hirakawa, Yoshiaki Morioka, Takuji Mizuno : Biological half-life of radioactive cesium in Japanese rockfish *Sebastes cheni*

contaminated by the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident Journal of Environmental Radioactivity 150 (2015) 68-74