

富岡漁港及び小名浜港におけるヒラメへの 放射性セシウム移行試験

守岡良晃・藤本 賢*・帰山秀樹*・安倍大介*・島村信也**・水野拓治***・榎本昌宏・鈴木章一

Experimental Studies on Radiocesium Transfer to Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*
in Tomioka and Onahama port

Yoshiaki MORIOKA, Ken FUJIMOTO*, Hideki KAERIYAMA*, Daisuke AMBE*,
Shinya SHIMAMURA**, Takuji MIZUNO***, Masahiro ENOMOTO and Syoichi SUZUKI

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）の事故から 3 年以上（試験を実施した 2014 年時点）が経過した。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から、福島県沿岸の海産魚介類は原発事故直後に流れ出た放射性物質を高濃度で含む汚染水により汚染されたが、その後放射性セシウム（以下 Cs）濃度は低下しつつあり、さらなる Cs の移行はほとんど起きていないと考えられている^{1) 2)}。しかし、実際に第一原発事故後の環境中からの Cs の移行について調査した事例は少ない。そこで福島県水産業における主要な底魚類のひとつでありながら、Cs 濃度の低下が他の魚種と比較して遅く、未だに国による出荷制限が解除されていないヒラメについて、漁港内におけるケージ（大型飼育カゴ）を用いた試験や環境調査を行い、Cs の移行について検討した。

材料および方法

ケージ試験

本試験は 2014 年 6 月末～8 月末までのおよそ 2 か月間、第一原発から直線距離で南に 55 km に位置するいわき市の小名浜港、及び 9.4 km 南に位置する双葉郡富岡町の富岡漁港にて実施した（図 1）。

ケージ試験はこれまでに 2012 年 8 月 21 日～9 月 12 日の 21 日間、2013 年 9 月 3 日～10 月 18 日までの 45 日間、2013 年 11 月 15 日～2014 年 2 月 4 日までの 81 日間の 3 回、小名浜港で実施してきた（図 1）^{3) 4)}。しかしいずれの試験もヒラメの Cs 濃度は不検出（検出下限値 1.2 Bq/kg-wet 以上）という結果であった。これを踏まえ、本試験では、より第一原発に近い海域における Cs の移行の程度を把握するため、小名浜港に加え、第一原発から近く、環境中の Cs 濃度が小名浜

*国立研究開発法人水産総合研究センター中央水産研究所

**福島県農業総合センター

***福島県水産事務所

港よりも高いと想定される富岡漁港も試験区に加えた。また、Cs 濃度は成長による希釈が起きること、過去 3 回のケージ試験では供試魚の体重の減少がみられたことから⁴⁾、本試験では港湾内でケージ試験を実施するとともに、ケージ飼育における体重変化が Cs 濃度に与える影響を考慮するため、対照区として福島県水産試験場（以下福島水試）内に給餌区と無給餌区を設定し、飼育実験を同時に実施した。

供試魚であるヒラメは 2013 年に公益財団法人山形県水産振興協会山形県栽培漁業センターから入手し、福島水試内の 2 トン FRP 丸型水槽で飼育していた 1 歳のものを用いた。試験開始前日の 2014 年 6 月 25 日に全長、体重を測定し、小名浜港及び富岡漁港のケージに収容するヒラメ 60 個体（2 試験区×3 ケージ×10 個体/ケージ）については、無眼側の体色異常の模様を写真撮影して個体識別を行った。また、試験開始前のヒラメの Cs 濃度を把握するため、飼育水槽から 6 個体を取り上げ、国立研究開発法人水産総合研究センター中央水産研究所（以下中央水産研究所）にてゲルマニウム半導体検出器（以下 Ge 検出器）を用いて個体別に Cs 濃度を測定した。

ケージはポリ塩化ビニル管でできた枠（縦 1.2 m、横 1.2 m、高さ 0.5 m、底面積 1.44 m²）に同様の形状の PE ラッセルモジ網を取り付けたものを用いた（図 2）。底面の中央には重り（約 1 kg）を取り付け、できるだけ海底に馴染むようにし、波浪により移動しないよう四つ角に土嚢を取り付けて設置した。

富岡漁港では水深約 2 m の地点に、小名浜港では水深約 5 m の地点にそれぞれ 3 つのケージを設置し、1 か月後にそれぞれ 1 ケージ、2 か月後にそれぞれ 2 ケージを取り上げた。

試験終了後回収した供試魚は魚体測定（全長、体長、体重）及び胃内容物査定後、個体全体を潰して、Cs 濃度を測定する試料とした。富岡漁港及び小名浜港で 34 日後に取り上げたヒラメについては福島水試にて個体全体を潰して 3 個体または 4 個体でプールし、Ge 検出器を用いて Cs 濃度を測定した。残りのヒラメについては中央水産研究所にて個体全体を潰し個体別に Ge 検出器を用いて測定した。福島水試内で実施した無給餌区と給餌区は 2 トン FRP 丸形水槽にそれぞれ 30 個体ずつ収容し、流水で 2 か月間飼育した後、ヒラメを取り上げて Cs 濃度を測定した。給餌区には週 5 回、体重の約 2 % の配合餌料を給餌した。また、Cs 濃度はセシウム 134（以下 ¹³⁴Cs）濃度とセシウム 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、検体の測定結果が不検出となることが多かったことから、¹³⁷Cs 濃度について結果を示し考察を行った。

環境調査

ケージ試験と併せて富岡漁港および小名浜港のケージ設置箇所の表層海水、底層海水、海底土を採取した。海水はフィルター（目合 10 μm）でろ過した後、ポリ容器（20 ℓ）に入れ硝酸 40 m



図 1 試験地点



図 2 使用したケージ

0を添加しCs濃度測定用の試料とした。海底土は小名浜港では漁業調査指導船「拓水」を用いてG.S型表層際採泥器（以下、アシュラ）により、富岡漁港ではアシュラの採泥筒部分を用いて、潜水によりコアを採取した。採取後、船上または陸上にて直ちに層別に分割し（海底土表面から0~1 cm、1~2 cm、2~4 cm、4~6 cm、6~10 cm、10~14 cm）、それぞれの分割試料を凍結保存した。また、ケージにデータロガー(JFE アドバンテック、A7CT2-USB)を括り付け、水温・塩分を測定した。

海水及び海底土の分析は中央水産研究所が行った。海水についてはリンモリブデン酸アンモニウム（AMP）を用いて海水中のCsを回収し、Ge検出器を用いてCs濃度を測定した。海底土試料はCs濃度測定・粒度組成分析・強熱減量分析に供した。海底土中のCs濃度については、60℃で7日間乾燥させた試料をGe検出器に供してガンマ線を測定し、乾燥試料1kgあたりの濃度（Bq/kg-dry）を求めた。粒度組成については、湿試料を超音波振動で分解し、レーザー式粒度組成分析計（島津製作所、SALD-3100）により計測した。強熱減量分析では、湿試料に110℃で24時間の乾燥処理を施した後、乾燥試料をマッフル炉にて750℃で1時間燃焼した。燃焼処理の前後それぞれにおける試料重量を計測し、重量の減少率を求めた。

結 果

ケージ試験

富岡漁港では6月26日に試験を開始し、34日後の7月29日に1ケージ、62日後の8月26日には残りの2ケージを取り上げた。34日後に取り上げたケージからは10個体全て回収できたが、62日後は20個体中10個体を回収した（表1）。34日後の平均体重は試験前と比較して28%、62日後では32%減少していた。胃内容物は34日後の3個体から魚類、アミ類、甲殻類を、62日後の3個体からはヨコエビ類、多毛類、エビジャコを確認したが、他は胃内容物を確認できなかった。34日後に回収した10個体は3個体、4個体、3個体でプールして測定し、¹³⁷Cs濃度は0.98~1.3 Bq/kg-wetであった。62日後に回収した10個体の¹³⁷Cs濃度は、1個体が不検出で、残りの9個体は0.91~2.1 Bq/kg-wetであった。これは試験前（6月25日）に取り上げた6個体の測定値（0.74~0.97 Bq/kg-wet、以下初期値）と比べ、有意差があると認められた（U検定、P=0.012、）（表2、図3）。U検定では不検出は最下位として扱った。

小名浜港では、6月28日に試験を開始し、34日後の7月31日に1ケージ、61日後の8月27日に残りの2ケージを取り上げた。34日後に取り上げたケージからは10個体中9個体、61日後は20個体中9個体を回収した（表1）。34日後の体重は平均して20%、61日後は31%減少していた。胃内容物は全て

の個体で確認できなかった。34日後に回収した個体は3個体ずつプールして測定し、¹³⁷Cs濃度は1検体が不検出、残りの2検体は0.92 Bq/kg-wet、1.0 Bq/kg-wetであった。62日後に回収した9個体の¹³⁷Cs濃度は、5個体が不検出であり、残りの4個体は0.92~1.4 Bq/kg-wetであった。これは初期値と比較し、¹³⁷Cs濃度に有意差は認められなかった（U検定、P=0.589）（表2、図3）。

表1 試験区設定

試験区	試験日数(日)	収容数(個体)	回収数(個体)	測定数(試料)
初期値	-	-	10	6
富岡漁港①	34	10	10	3 [※]
富岡漁港②	62	10	9	9
富岡漁港③	62	10	1	1
小名浜港①	34	10	9	3 [※]
小名浜港②	61	10	3	3
小名浜港③	61	10	6	6
給餌区	61	30	22	6
無給餌区	50or51	30	6	6

※3、4個体をプールして測定

給餌区では6月26日～8月28日の64日間飼育したヒラメ6個体の¹³⁷Cs濃度を測定し、2個体が不検出で、¹³⁷Cs濃度は0.23～0.84 Bq/kg-wetであった(表1、表2、図3)。平均体重は65.4%増加していた。無給餌区では6月26日～8月28日まで飼育予定であったが、斃死が相次いだため8月14日に取り上げた3個体と8月15日に生き残っていた3個体の計6個体について(50日及び51日間飼育)¹³⁷Cs濃度を測定し、6個体中5個体が不検出で、1個体が0.65 Bq/kg-wetであった(表1、表2、図3)。平均体重は試験開始時と比べ31.1%減少していた。

表2 供試魚の魚体測定データ

試験区	試験開始時		試験終了後		¹³⁷ Cs (Bq/kg-wet)	胃内容物
	全長(mm)	体重(g)	全長(mm)	体重(g)		
初期値把握	205	88	-	-	0.84 ± 0.27	-
	206	81	-	-	0.83 ± 0.22	-
	216	94	-	-	0.85 ± 0.24	-
	205	88	-	-	0.97 ± 0.28	-
	197	73	-	-	0.87 ± 0.21	-
	196	78	-	-	0.74 ± 0.23	-
富岡①	182	68	183	50	1.1 ± 0.28	なし
	216	117	213	77		なし
	215	125	211	82		なし
	217	97	199	77	1.3 ± 0.15	甲殻類0.01g
	193	74	187	52		なし
	202	78	196	61		なし
	203	82	197	60		なし
	170	63	167	37	1.0 ± 0.26	なし
	236	130	222	101		ヒメジ0.38g
188	70	183	55	アミ類0.01g		
富岡②	183	58	179	43	2.1 ± 0.32	多毛類0.12g
	182	67	177	45	1.2 ± 0.29	なし
	196	77	189	47	1.5 ± 0.29	なし
	215	108	211	70	1.5 ± 0.30	ヨコエビ0.03g
	205	84	201	61	1.6 ± 0.25	なし
	183	60	178	39	1.0 ± 0.30	なし
	178	47	178	27	1.4 ± 0.41	エビジャコ及び多毛類0.25g
	210	90	205	66	0.9 ± 0.21	なし
富岡③	208	92	202	66	1.5 ± 0.30	なし
	198	75	195	55	ND(<1.1)	なし
小名浜①	225	107	214	83	0.92 ± 0.18	なし
	198	82	198	61		なし
	214	103	210	79		なし
	188	60	187	49	ND(<1.2)	なし
	215	92	209	72		なし
	195	70	191	58		なし
小名浜②	190	77	187	60	1.0 ± 0.22	なし
	183	60	185	49		なし
	211	91	207	77		なし
	178	60	176	43		1.1 ± 0.29
小名浜③	200	77	192	54	ND(<0.73)	なし
	201	80	192	58	1.4 ± 0.31	なし
	210	86	202	56	ND(<1.0)	なし
給餌区	208	77	202	52	ND(<0.78)	なし
	208	87	205	64	0.97 ± 0.28	なし
	203	71	197	48	0.92 ± 0.25	なし
	175	57	174	39	ND(<0.96)	なし
	192	65	187	47	ND(<0.87)	なし
	-	-	213	102	0.23 ± 0.18	-
無給餌区	-	-	228	115	0.56 ± 0.16	-
	-	-	225	109	0.65 ± 0.19	-
	-	-	210	93	ND(<0.60)	-
	-	-	217	116	ND(<0.50)	-
	-	-	192	65	0.83 ± 0.22	-
	-	-	185	49	ND(<0.73)	-
無給餌区	-	-	167	31	ND(<1.2)	-
	-	-	224	84	0.65 ± 0.21	-
	-	-	187	55	ND(<0.85)	-
	-	-	202	62	ND(<0.65)	-
	-	-	202	58	ND(<0.73)	-

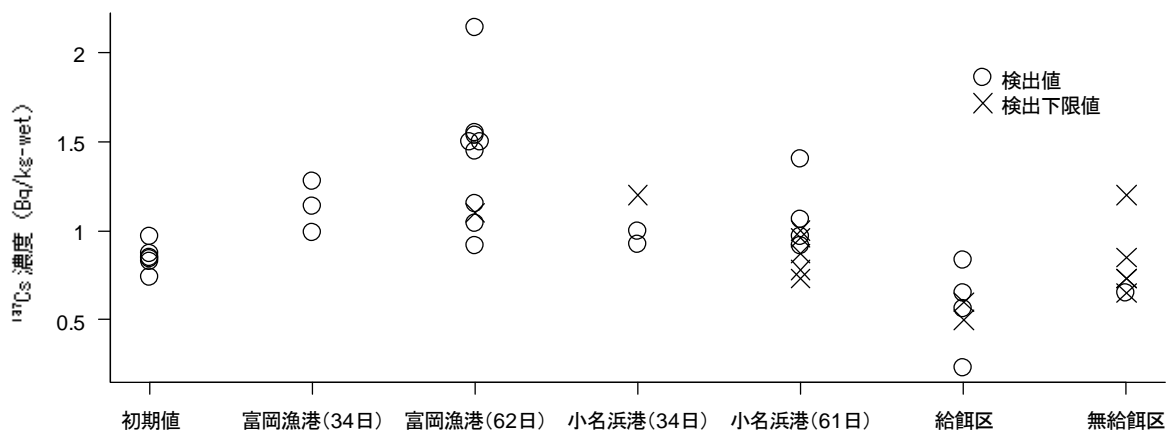


図3 供試魚の¹³⁷Cs濃度

環境調査

富岡漁港では6月26日、7月29日、8月26日に調査を実施した。海水の¹³⁷Cs濃度は底層で0.11~0.12 Bq/kg、表層では0.11~0.09 Bq/kgで推移した(図4)。海底土の中央粒径は244~299 μmであった(図5)。強熱減量分析による試料重量の減少率は1.4~3.2%であった。(図6)。¹³⁷Cs濃度は106~281 Bq/kg-dryであり、深層の¹³⁷Cs濃度は海底土の表層と比べほとんど変わらないか、わずかに高い傾向があった(図7)。塩分・水温はケージ試験開始後に砂に埋もれてしまったため、データを得られなかった。

小名浜港では6月27日、7月25日、8月27日に調査を実施した。海水の¹³⁷Cs濃度は表層で0.015~0.022 Bq/kg、底層で0.016~0.019 Bq/kgであった(図4)。海底土の中央粒径は31.6~167.7 μmであった(図8)。強熱減量分析による試料重量の減少率は5.6~10.8%であった(図9)。¹³⁷Cs濃度は22.9~662 Bq/kg-dryであり、海底表面の層で最も¹³⁷Cs濃度が高く、深くなるにつれ¹³⁷Cs濃度は低下した(図10)。水温は14~25℃、塩分は24~33 psuの範囲内で推移した。また、対照区における飼育水の¹³⁷Cs濃度は0.007~0.027 Bq/kgで推移した(図4)。水温は15~23℃、塩分は31~33 psuで推移した。

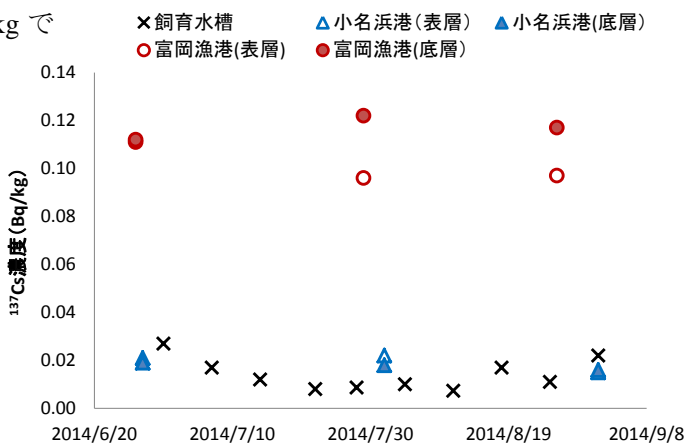


図4 海水中の¹³⁷Cs濃度

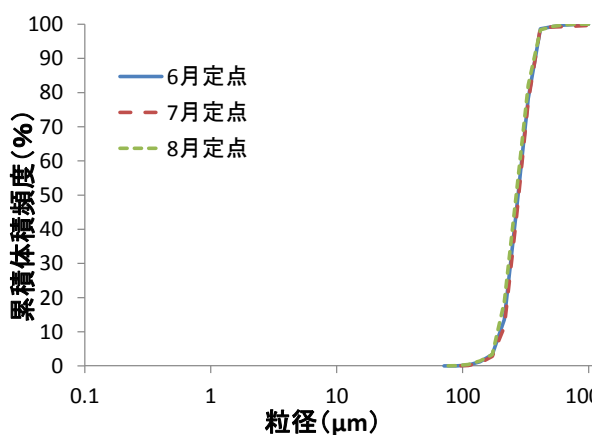


図5 富岡漁港海底土の粒度組成(0~1 cm)

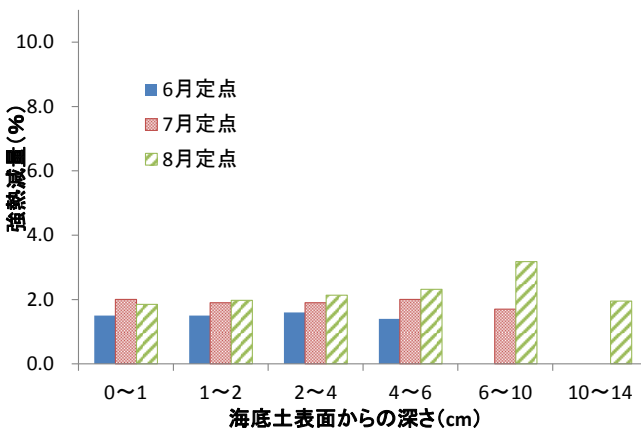


図6 富岡漁港海底土の強熱減量結果

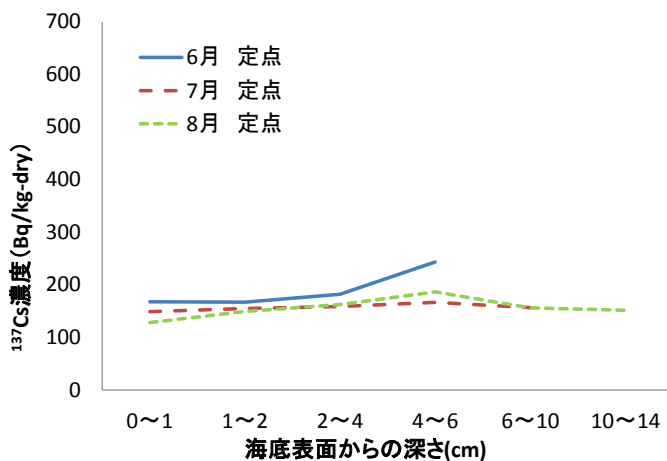


図7 富岡漁港海底土の¹³⁷Cs濃度

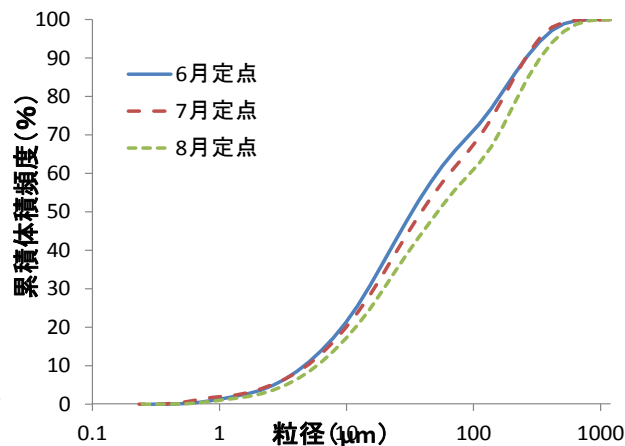


図8 小名浜港海底土の粒度組成 (0~1 cm)

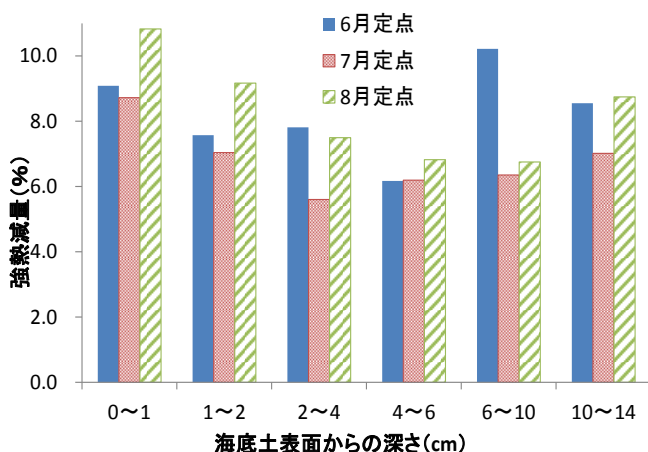


図9 小名浜港海底土の強熱減量結果

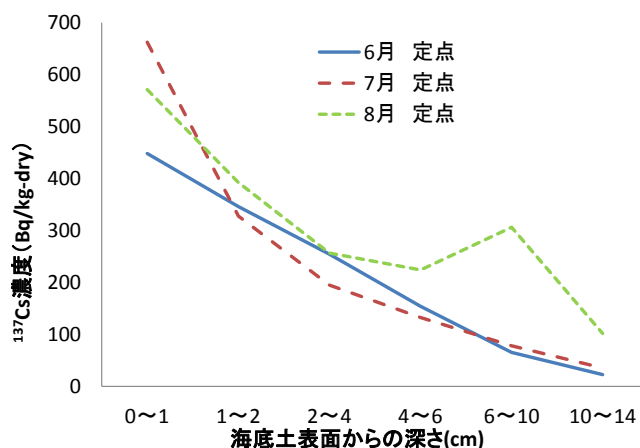


図10 小名浜港海底土の¹³⁷Cs濃度

考 察

ヒラメへのCsの移行は、海水の飲水、摂餌が主な経路であると考えられてきた。しかし、第一原発事故から3年が経過してCs濃度が低下し、食品基準値を超える海産物は少なくなっている一方で（2014年度100Bq/kg-wet超は8710検体中42検体）¹⁾、海底土からは未だ100Bq/kgを超える放射性物質濃度が検出されている⁵⁾。そのため、海底土に直接接するヒラメやカレイ等の異体類は海底土のうち細かい粒子（砂や泥）を誤飲して、Csを体内に取り込んでしまうことが心配された。その影響を調査するため、海底土から水産物への移行に関する飼育試験等が実施されているが、海底土から移行はほとんどないという結果が得られている^{6) 7)}。本研究においても、海底土表面の¹³⁷Cs濃度は小名浜港で高かったにもかかわらず、ヒラメの¹³⁷Cs濃度の上昇は認められなかったことから、天然の海域においても飼育試験と同様に海底土の放射性物質が直接水産物に取り込まれるわけではないという結果が得られた。

摂餌の影響については、富岡漁港と小名浜港ともに体重が大きく減少し、ほとんど摂餌が確認できなかったことから、摂餌による¹³⁷Csの移行は本試験では無視できると推察された。また、体重減少により、見かけ上¹³⁷Csが濃縮されたようになり、魚体中の¹³⁷Cs濃度が上昇する可能性

も考えられたが、対照区である無給餌飼育でも ^{137}Cs 濃度の上昇がみられなかったことから、体重減少が富岡漁港における ^{137}Cs 濃度の上昇の一因ではないと考えられた。また、富岡漁港と小名浜港ではともに全長が小さくなっているが、これは1日～2日冷蔵後、測定したため、全長が縮んだと考えられた⁸⁾。

従って、富岡漁港にてわずかに ^{137}Cs 濃度が上昇した要因としては、小名浜港より富岡漁港で5倍程度高い ^{137}Cs 濃度を示した海水からの移行による影響が最も大きいと推察された。

ヒラメの ^{137}Cs 濃度が最大どの程度まで上昇するかについては、生物とその生息海水中の放射性物質濃度が平衡状態になった時の生物対海水の濃度比である濃縮係数が求められており、ヒラメの ^{137}Cs の濃縮係数は30～80という知見がある⁹⁾。富岡漁港の海水中の ^{137}Cs 濃度は0.11 Bq/kg程度で推移したことから、濃縮係数から想定される ^{137}Cs 濃度は最大9 Bq/kg-wet程度であると考えられる。また、実際に福島県沿岸で採捕された2013年夏に生まれたヒラメ（供試魚と同年齢）の ^{137}Cs 濃度は最大でも6.5 Bq/kg-wetとなっている（2013年12月7日採捕）。

このように福島県海域においては、第一原発事故直後に比べて海水中のCs濃度が○分の1程度まで低下し、餌料生物及び海底土のCs濃度も低下傾向にあることから^{5) 10) 11) 12)}、新たに海水のCs濃度上昇をもたらすような放射性物質の漏えいがない限り、食品基準値である100 Bq/kg-wetを超えるような汚染が水産物に起きることはないと考えられる。

要 約

1. 富岡漁港及び小名浜港でヒラメへのCsの移行を把握するためケージによる62日間の試験を実施した結果、小名浜港では ^{137}Cs 濃度の上昇は認められなかったが、富岡漁港では ^{137}Cs の濃度がわずかに上昇した。
2. 富岡漁港でわずかに ^{137}Cs 濃度が上昇した要因としては、海底土の誤飲等による移行はほとんどなく、摂餌もほとんど確認できなかったことから、海水による影響が最も大きかったと推察された。
3. 第一原発から9.4 km南に位置する富岡漁港においてもヒラメの ^{137}Cs 濃度の上昇はごくわずかであり、海水のCs濃度上昇をもたらすような新たな放射性物質の漏えい等がない限り、今後食品基準値である100 Bq/kg-wetを超えるような移行は起きることはないと考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、データロガーを貸与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の高見秀輝氏、栗田豊氏にお礼申し上げます。

本研究は国立研究開発法人水産総合研究センターの海洋生態系の放射性物質挙動調査事業（水産庁）の委託事業により行われた。

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) 福島県水産試験場：平成24年度事業概要報告書 7-8(2013)

- 4) 福島県水産試験場：平成 25 年度事業概要報告書 5-7(2014)
- 5) 福島県水産試験場：平成 26 年度事業概要報告書 51-52(2015)
- 6) 国立研究開発法人水産総合研究センター：平成 26 年度放射性物質影響解明調査事業報告書 32-37(2015)
- 7) 福島県水産試験場：平成 24 年度事業概要報告書 74-75(2013)
- 8) 福島県水産試験場：福島県水産試験場研究報告第 12 号 25-26(2004)
- 9) 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
- 10) 国立研究開発法人水産総合研究センター：平成 26 年度放射性物質影響解明調査事業報告書 6-14(2015)
- 11) 国立研究開発法人水産総合研究センター：平成 26 年度放射性物質影響解明調査事業報告書 15-17(2015)
- 12) Tadahiro Sohtome, Toshihiro Wada, Takuji Mizuno, Yoshiharu Nemoto, Satoshi Igarashi, Atsushi Nishimune, Tatsuo Aono, Yukari Ito, Jota Kanda, Takashi Ishimaru: Radiological impact of TEPCO's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident on invertebrates in the coastal benthic food web *Journal of Environmental Radioactivity* 138 (2014) 106-115