

食物連鎖を考慮した人体における放射性物質残留量の算出手法の検討 ～海洋生物を例として～

中央大学 学生会員 ○新澤 まゆ子
中央大学大学院 学生会員 綿貫 翔
中央大学 フェロー会員 山田 正

1. はじめに

平成 23 年 3 月に東北地方太平洋沖地震が発生し、福島第一原子力発電所から放射性物質が漏洩した。その放射性物質は、大気や海洋を介し、北は青森県から南は三重県までの太平洋側の各都県に拡散し¹⁾、農作物や水産物から放射性セシウムの食品基準値 100 Bq/kg を超える放射性物質が検出された。その後、放射性物質について、基礎的な知識を持たない多くの人が過剰な反応を示し、第一次産業への風評被害が発生した。第一次産業の中でも漁業がより大きな打撃を受けた。例えば、福島県において漁獲量(漁獲高)は平成 22 年度の場合、それぞれ約 4 万トン(約 110 億円)であったが、平成 28 年度の場合、約 9 千トン(約 10 億円)となっている²⁾。平成 22 年度と平成 28 年度で比較すると漁獲量は約 80%、漁獲高は約 90%減少している。このことから、東北地方太平洋沖地震及び福島第一原子力発電所事故の影響が今なお続いているということが言える。漁業が他の第一次産業と比べ、打撃を受けている理由として、水産物は農作物と比べて、高い放射能強度が検出されていることが挙げられる。例えば、福島第一原子力発電所の事故後、食品基準値 100 Bq/kg の 380 倍の放射能強度を持つアイナメ³⁾や同じく食品基準値の約 16 倍の放射能強度を持つヒラメが福島県沖で漁獲された⁴⁾。さらに、基準値以下ではあるが、東京湾や福島県沖以外で、高放射能強度の魚類が発見されたことがマスメディアによって大々的に報じられた。しかしながら、放射性物質が含まれている水産物を摂取した際、どの程度人体に影響を及ぼすのかということを正しく理解している人は少数であると考えられる。

そこで、本研究では、高放射能強度の魚類を摂取した際の人体の総内部被曝量、及び食物連鎖を考慮した放射性物質残留量の算出手法を検討することを目

的としている。

2. 人体における放射能強度と実効線量の計算

(1) 放射能強度の連続方程式

本研究では、国際放射線防護委員会が厳密な計算によって算出した内部被曝量と概ね同精度に算出が可能な山田・佐々木の理論⁵⁾⁶⁾を用いた。この理論は、流出解析で一般的に用いられている理論を応用したものである。

上記の理論を用いるため、放射性原子の人体における貯留量 N 、放射性原子の原子での摂取フラックス r 、放射性原子の実効的流出フラックス q_e 、原子核崩壊による放射性原子の流出フラックス q_p 、排泄による放射性原子の流出フラックス q_b それぞれの関係を 1 段タンクによって表現する。人体における放射性原子の貯留量 N と放射性原子の原子での摂取フラックス r 、実効的流出フラックスの関係は、

$$\frac{dN(t)}{dt} = r(t) - \alpha_e N(t) \quad (1)$$

の連続方程式で表される。減衰定数 α_e は実効半減期によって決められる定数である。実効半減期とは、核種のみ依存する原子核崩壊による物理学的半減期と排泄と代謝による生物学的半減期、これらの 2 つの半減期から定められる半減期のことである。

ここからはある物質内で 1 秒間に起こる原子核崩壊の回数である放射能強度[Bq]について考える。放射性同位体の原子数と放射能強度は比例関係にあり、その比例定数が物理学的減衰係数である。放射能強度を h とし、これを式で表すと、

$$\alpha_p N(t) = h(t) \quad (2)$$

となり、式(1)の両辺に α_p をかけると、

$$\frac{dh(t)}{dt} = r_r(t) - \alpha_e h(t) \quad (3)$$

キーワード 放射能、半減期、実効線量、食物連鎖、放射能強度

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部都 TEL : 03-3817-1805 E-mail : a14.76df@g.chuo-u.ac.jp

となる。

(2) 総内部被曝量及び実効線量の計算方法

総内部被曝量 I は体内で原子核崩壊した放射性同位体の累積個数であり、(4)式のように放射能強度 h を時間積分することで求められる。

$$I(t) = \int_0^t h(\tau) d\tau \quad (4)$$

また、(4)式より実効線量 S を求めることができる。(4)式は人体に崩壊する放射性物質の総内部被曝量に一個当たりの原子核崩壊により人体が吸収するエネルギー量をかけ、体重で割ったものである ($1.6 \times 10^{-13} [\text{J/MeV}]$ は単位換算の係数である)。

$$S(t) = \frac{I(t) \times 0.464 \times 1.6 \times 10^{-13}}{\text{Body weight}} \quad (5)$$

3. 計算条件

食物連鎖は、高放射能強度が検出されたアイナメ及びヒラメの被捕食者として、アイナメの場合はシラスを、ヒラメの場合はイカナゴ及びカタクチイワシを選んだ。アイナメ及びヒラメは、上記以外に甲殻類など⁷⁾を摂取している。しかし、甲殻類は以下の理由から被捕食者から除外した。①アイナメ及びヒラメの放射能強度を計算する際に被捕食者の体重が必要となり、甲殻の吸収量についての十分な資料が得られない。②ヒラメについては①に加え、イカナゴ及びカタクチイワシの摂取率がヒラメの全摂取量の中の9割以上を占めている⁷⁾。以上の理由から被捕食者を決定した。さらに、シラス、イカナゴ及びカタクチイワシの被捕食者である動物プランクトンにおいては、半減期や生息量など十分な資料がないため、考慮しない。

食物連鎖は多段直列タンクモデルで表現し、その概念図を図-1に示す。本研究における流出量は、原子核崩壊と排泄、代謝であり、それらを摂取することはないため、入力項目は一つ上のタンクそのものである。それに加え、1段目のシラス、イカナゴ及びカタクチイワシ、2段目のアイナメ及びヒラメに関しては、海から摂取する放射能強度を考慮した。これらを式で表現すると、1段目から順に、

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = p_1(t) - \alpha_1 N_1(t) \quad (6)$$

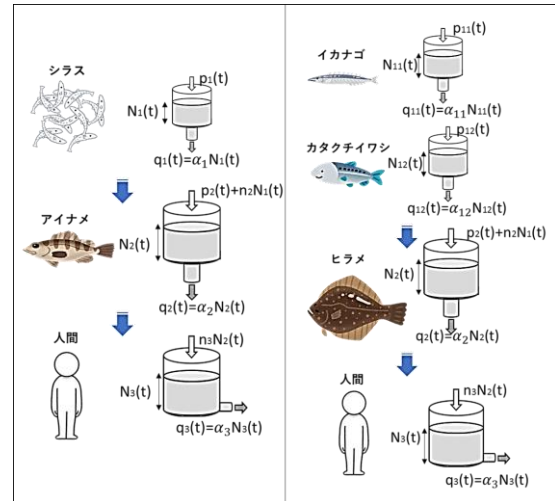


図-1 計算の概念図

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = p_2(t) + n_2 N_1(t) - \alpha_2 N_2(t) \quad (7)$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = n_3 N_2(t) - \alpha_3 N_3(t) \quad (8)$$

となる。ここで、 N は放射性原子の人体における貯留量、 p は魚類が海から摂取する放射能強度の摂取フラックス、 α は減衰係数、 n は摂取数を表している。

(1) 実効半減期

魚類の半減期は、水産庁が定期的に行っている魚類体内のセシウム137の実測値から算出した。しかし、 10 Bq/kg 以下は機器の測定限界であるため、正確な値を知ることができない。そのため、このまま指数近似曲線を求めると、半減期が長くなる。つまり、下限値を値として用いて求めた半減期で計算を行うと、体内に貯留する期間が長くなり、実際よりも人間に対して放射性物質の影響が大きくなる計算となる（以下、この条件を危険側とする）。シラスは半減期が短く、測定限界の影響が小さいと考え、46日と固定した。アイナメの半減期は実測値の指数近似曲線から危険側で算出した値である347日及び文献より100日⁸⁾、239日⁹⁾とした。イカナゴ及びカタクチイワシの半減期はそれぞれ実測値の指数近似曲線から危険側で算出した値である347日及び9902日とした。ヒラメの半減期は実測値の指数近似曲線から危険側で算出した値である693日及び文献より205日⁹⁾、379日¹⁰⁾とした。

(2) 魚類の摂取量

アイナメ及びヒラメの餌の摂取量については、文献⁴⁾より1年間平均ではヒラメの胃の中の餌の重量は

ヒラメの体重の1%であったことから、魚類の胃の中の餌の重量と同じ量を摂取する場合¹¹⁾¹²⁾及び魚類の体重の1%⁸⁾を摂取する場合の2通りを考えた。シラスの体重は実測より0.08 gとし、アイナメの成魚の体重を300 g¹³⁾とした場合、それぞれアイナメのシラス摂取量は、48匹及び36匹である。イカナゴ及びカタクチイワシの体重は1.9 g¹⁴⁾¹⁵⁾、10 g¹⁴⁾¹⁶⁾とし、ヒラメの成魚の体重を694 g¹⁴⁾¹⁷⁾とした場合、ヒラメのイカナゴ及びカタクチイワシの摂取比率⁷⁾はどちらの場合も3:1であった。

(3) 海から魚類へのセシウム137の移行

図-2に示すのは、福島第一原子力発電所近傍における海水のセシウム137の放射能強度を表している。但し、この値が全て魚類に移行するわけではない。しかし、海から魚類へ移行するセシウム137の割合を示す既往研究や資料は非常に少ない。さらに、魚類の一日当たりの海水の取込量も正確にはわからない。そのため、魚類体内に取り込む一日当たりの海水量と取り込んだ海水からのセシウム137の吸収係数とを掛けた係数 m [L]を設定した。具体的には、シラス及びイカナゴ、カタクチイワシのそれぞれの係数 m は水産庁の観測値と一致するように決定した。アイナメ及びヒラメの係数 m は被捕食者の摂取量に応じて、観測値と一致するように決定した。魚類が海から摂取する放射能強度の摂取フラックスを表す式は以下の通りである。

$$p(t) = m \times R(t) \quad (9)$$

ここで、 p は魚類が海から摂取する放射能強度の摂取フラックス、 m は魚類体内に取り込む海水量と取り込んだ海水からのセシウム137の吸収係数との積、 R は海水のセシウム137の放射能強度である。これらより、人がアイナメ及びヒラメを摂取する場合は、アイナメ及びヒラメの半減期がそれぞれ3種類、アイナメ及びヒラメの被捕食者の摂取方法が2種類でそれぞれ計6種類の計算を行った。計算条件をまとめたものを表-1に示す。また、摂取した魚類の持つ放射能強度は全て取り込み、人間は毎日1匹のアイナメまたはヒラメを摂取するとして計算を行う。

4. 結果及び考察

人体における放射能強度の結果を図-3に示す。アイナメ及びヒラメの被捕食者の摂取方法を変えた場

表-1 アイナメ及びヒラメを摂取する際の人体における総内部被曝量

CASE	アイナメの半減期[日]	アイナメの摂取量[匹]	体内に取り込む海水量と取り込んだ海水からの放射性セシウム137の吸収係数との積m[L]
1	347	アイナメの胃の中の餌の重量	1
2	347	アイナメの体重の1%	10
3	239	アイナメの胃の中の餌の重量	15
4	239	アイナメの体重の1%	25
5	100	アイナメの胃の中の餌の重量	200
6	100	アイナメの体重の1%	250

CASE	ヒラメの半減期[日]	ヒラメの摂取量[匹]	体内に取り込む海水量と取り込んだ海水からの放射性セシウム137の吸収係数との積m[L]
1	693	ヒラメの胃の中の餌の重量	27
2	693	ヒラメの体重の1%	29
3	358	ヒラメの胃の中の餌の重量	48
4	358	ヒラメの体重の1%	51
5	205	ヒラメの胃の中の餌の重量	120
6	205	ヒラメの体重の1%	122

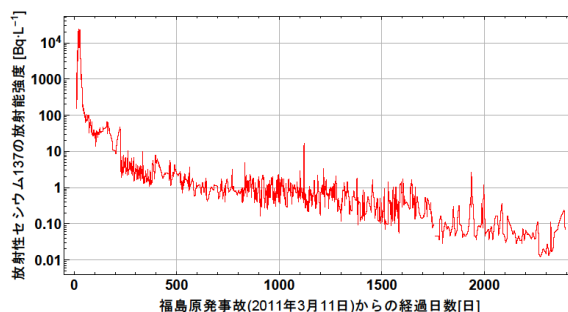


図-2 福島第一原子力発電所近傍の海水のセシウム137放射能強度

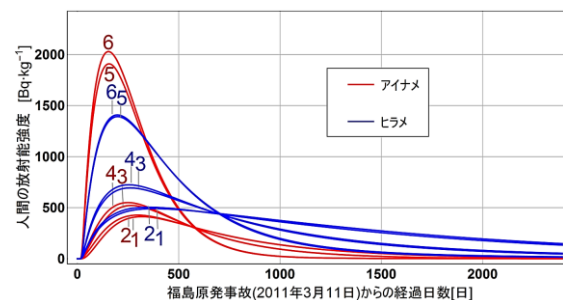


図-3 人体におけるセシウム137放射能強度

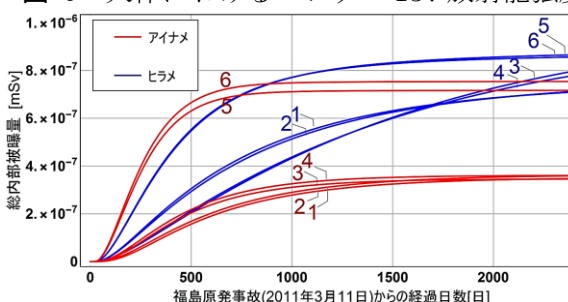


図-4 食物連鎖を考慮した際の人体が受ける総内部被曝量

合、人体における放射能強度に大きな差は見られなかった。アイナメ及びヒラメにおいて、半減期が長くなるにつれて、人体における放射能強度のピーク値が高くなり、ピーク到達時間が遅くなることがわかった。図-4は食物連鎖を考慮した際の人体が受ける総内部被曝量を表している。震災から6年後(約2,300日)までの総内部被曝量の最大値は、アイナメ及びヒ

ラメの場合でそれぞれ 7.5×10^{-7} mSv, 8.7×10^{-7} mSvであった。人の経口摂取による年間総内部被曝量は日本人平均で0.99 mSvである¹⁸⁾ため、6年間当たりの総内部被曝量割合はそれぞれ、 1.3×10^{-5} %, 1.5×10^{-5} %となり、非常に小さいことがわかった。

アイナメ及びヒラメは平成24年から約1～4年間、福島県、宮城県及び茨城県で出荷制限対象に指定されていた。計算結果では、出荷制限の対象であったアイナメ及びヒラメを毎日1匹食べ続けても人体が受ける総内部被曝量は、人体が6年間に受ける総内部被曝量に比べ、非常に小さい値であることを示している。このことから、出荷規制の対象となっていた高放射能強度のアイナメ及びヒラメを摂取することで人体が受ける影響は、計算上では、ほとんどないと言える。また、人間が摂取するアイナメ及びヒラメの半減期が長いほど、人体における放射能強度のピークが遅くなり、影響が長く続くことから、人体における放射能強度の値も高くなることがわかった。しかし、人体に危険を及ぼすほどの値ではないため、計算上では、人体に影響はほとんどないと言える。

5. まとめ

本研究は、海洋の食物連鎖を水文学的アプローチ（多段直列タンクモデル）で表現し、高放射能強度の魚類を摂取した際の人体の総内部被曝量、及び食物連鎖を考慮した放射性物質残留量の算出手法を検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 水産庁による魚類の放射性物質調査結果に基づいて食物連鎖の計算を行うと、人体の総内部被曝量は、人体の6年間の総内部被曝量に比べ非常に小さな値となり、魚類の放射能強度は人体の総内部被曝量に影響を与えるほどの値ではないことがわかった。
- 2) アイナメ及びヒラメの半減期が長くなると、人体における放射能強度のピークが遅くなり、影響が長く続くことから、値も高くなることがわかった。

参考文献

- 1) 文部科学省；全国の放射線モニタリングデータ。
- 2) 福島県庁農林水産課；平成28年度版 福島県海面漁業漁獲高統計。
- 3) NHK NEWS WEB40年後の未来へ福島第一原発の今：<http://www3.nhk.or.jp/news/genpatsu-fukushima/>（平成30年1月10日閲覧）。
- 4) 農林水産省水産庁；水産物の放射性物質調査結果。
- 5) T. Yamada, T.J. Yamada, S. Sasaki, Proceedings of 2013 IAHR World Congress, Z1003(2013).
- 6) 佐々木翔太：A Hydrologic-based Lumped Methodology for the Internal Dose Calculation, 中央大学博士学位論文, 2016.
- 7) (独)水産総合研究センター；第10回成果発表会「海産魚の生態と放射性物質の取り込み-ヒラメとマダラ-」資料, 平成25年2月20日。
- 8) (独)水産総合研究センターら；高濃度に放射性セシウムで汚染された魚類の汚染源・汚染経路の解明のための緊急調査研究, 平成25年6月。
- 9) 福島県水産試験場；平成25年度水産試験場試験研究成果, 2014年11月25日。
- 10) (独)放射線医学総合研究所；平成25年度放射性廃棄物共通技術調査等事業「放射性核種生物圏移行評価高度化開発」, 平成26年3月。
- 11) (独)水産総合研究センター；第10回成果発表会「東日本大震災と放射能の影響解明-水産業の復興に向けた調査研究-」, 平成25年2月20日。
- 12) M. MATSUMIYA et al. ; Substrate Specificity of Chitinases from Two Species of Fish, Greenling, Hexagrammos otakii, and Common Mackerel, Scomber japonicus, and the Insect, Tobacco Hornworm, Manduca sexta , 『 Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry』, vol.69 , p.972, 公益社団法人日本農芸化学会。
- 13) 泉茂彦：常磐北部海域におけるアイナメの成長と成熟, Bull.Fukushima Pref.Fish.Exp.Stat., No. 8. Mar. 1999.
- 14) 社団法人全国豊かな海づくり推進協会；平成18年度水産基盤整備調査委託事業報告書「主要対象生物の発育段階の生態的知見の収集・整理」。
- 15) 山田浩且, 津本欣吾, 久野正博：伊勢湾産イカナゴ仔魚の成魚による捕食減耗, 日本水産学会誌64号, 807-814(1998)。
- 16) 中央水産研究所；平成28（2016）年度カタクチイワシ太平洋系郡の資源評価。
- 17) 東北区水産研究所；平成28（2016）年度ヒラメ太平洋北部系郡の資源評価。
- 18) 環境省；自然・人口放射線からの被ばく総量。