

海域に負荷された¹³⁷Csの影響予測

ーチェルノブイリ事故前後の資料と経年変動予測式をもとにー

当研究所は文部科学省の委託を受け、「海洋環境放射能総合評価事業」の原子力発電所および核燃料サイクル施設の沖合で海洋放射能調査を実施してきた。毎年得られる放射能分析値の妥当性を検討し、定常状態で推移した場合に、当該海域での放射能レベルがどのように推移するかを予測することは本事業の重要な課題である。また、異常放出などにより海洋環境に人工放射性核種が負荷された場合に、いつ海産生物中の核種濃度がピークに達するか、そのピークはどの程度であるか、いつ平常の水準に戻るかを予測評価することも重要な課題と考えている。以上について検討した結果について報告する。

1. 「経年変動予測式」と平常値の「変動範囲」

平常でも環境試料の放射能分析値にはばらつきが見られる。得られた分析値が妥当な値であるか否かを検討し、異常値を指摘するには、平常時に分析値がどの程度ばらつくか、すなわち「平常の変動幅」がどの程度かを知っておかなければならない。しかし、変動幅の範囲を客観的に決定する一般的で、しかも広く認められた方法はないと言わざるを得ない。

そこで、原子力発電所等周辺海域の定常調査で得られたデータを①～⑤に示す手順により処理し、海水の¹³⁷Cs濃度の平常の経年変動傾向と変動幅の範囲を推定して、放射能分析値の妥当性の評価を試みた。

①経年変動傾向を示す基本式

経年変動傾向を示す基本式を

$$Y = A \cdot \text{Exp}(-aX) \cdots \cdots (1)$$

と表す。ここで、

X：採取年（年月日を年単位に換算）

Y：¹³⁷Cs濃度（mBq/L）

である。

②変動範囲の定義

(1)式に対象とする分析値の採取年(X)を代入して算出値(Yest)を求める。次いで、分析値(Yobs)の全てについて算出値との残差(V_{1-n})を求め、残差の標準偏差(V_{S,D})を求める。

変動範囲(V_{rw})は残差の標準偏差の3倍以内と定義する。

$$V_{1-n} = Y_{obs} - Y_{est} \cdots \cdots (2)$$

$$|V_{rw}| \leq \pm 3 \times V_{S,D} \cdots \cdots (3)$$

③平常値の選定

算出値との残差が±V_{rw}をこえる分析値を除き、±V_{rw}以内の分析値を「平常値」として選定する。

④経年変動予測式の作成

平常値を(1)式に当てはめ、平常の経年変動傾向を示す「経年変動予測式」を作成する。

⑤平常の放射能レベル（平常値）の変動範囲

平常値と経年変動予測式から求めた算出値により、分析値の変動範囲の項と同様に、残差及び残差の標準偏差を計算し、「平常値の変動範囲」を求める。

2. 福島海域への適用

1984年3月から2002年4月までに福島海域の表層水で得られた¹³⁷Cs濃度の経年変化を図1に示す。各年度とも分析値にばらつきがあり、ばらつきの幅は年により異なる。1986年の値は前年度の分析値に比べて明らかに高く、チェルノブイリ事故の影響と考えられる。1987年の分析値は大幅に減少して

いるものの、事故以前の値に比べるとやや高いように読みとれる。近年では1999年の値が前年、翌年の値に比べて高いように見える。これらの年の値は果たして平常値の変動範囲内にあると言えるのか、前節に示した過程にそって平常値の経年変動予測式と変動範囲を求めて検討する。

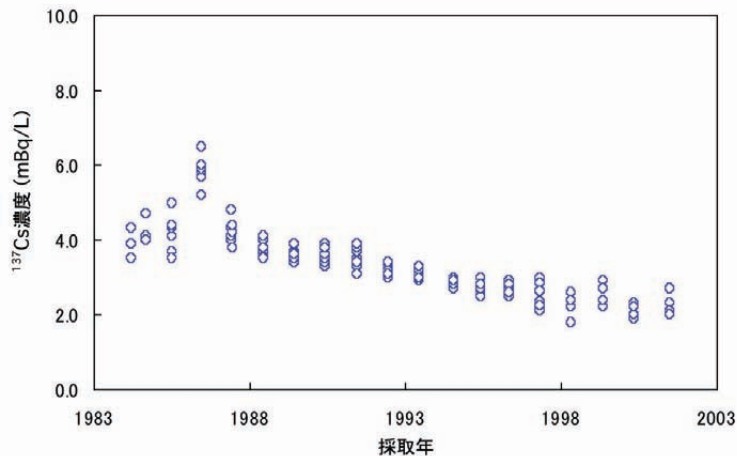


図1 福島海域表層水の¹³⁷Cs濃度の経年変化

チェルノブイリ事故の影響を受けた期間の分析値は平常値とは言えないので、事故の影響を受けた期間を推定して、その期間の分析値を除き、(1)式から「平常の経年変動傾向を示す近似式(以下「近似式」)を導く。

チェルノブイリ事故の影響を受けた期間を正確に決めることは困難であるので、影響を受けた可能性のある期間を事故の1年後から数年間と仮定し、その期間の分析値を1年後から順次除いて、近似式、寄与率(R^2)と実効半減期(T)を求めた(表1)。

表1に示したように、寄与率は全て0.8以上であるから、近似式はどれも良く適合していると言える。事故の影響を受けた可能性があると仮定した期間を長くとるにつれて実効半減期も伸びる傾向が見られた。しかし、影響期間を1986-1992年より長くとっても、実効半減期は18.0年で安定する。これは

チェルノブイリ事故の影響がほぼ認められなくなった結果と考えてよい。

チェルノブイリ事故以後のデータのみにより近似式、寄与率と実効半減期を求めると、事故前のデータも使った場合とは異なり、影響を受けたと仮定した期間の長さを実効半減期間に一定の関係は認められなかった。また、影響期間を長くとるにつれて分析データ数が少なくなるため、寄与率が低下し、実効半減期を精度良く求められなくなった。

そこで、1986-1992年ないし1986-1993年をチェルノブイリ事故の影響を受けた期間とし、この期間の分析値を除いて本海域の平常状態における表層水の¹³⁷Cs濃度の実効半減期及び平常の経年変動傾向を示す近似式を求めると、実効半減期は18.0年、近似式は

$$Y = 4.40 \cdot \text{Exp}(-0.0384 \cdot X) \cdots \cdots (4)$$

となった。

表1 平常の経年変動傾向を推定するための近似式

A	B	C	D	R ²	T
1983-1985, 1987-2000	1986	4.71	0.0421	0.8295	16.5
1983-1985, 1989-2000	1986-1988	4.61	0.0406	0.8141	17.1
1983-1985, 1991-2000	1986-1990	4.54	0.0397	0.8038	17.5
1983-1985, 1993-2000	1986-1992	4.42	0.0385	0.8216	18.0
1983-1985, 1994-2000	1986-1993	4.40	0.0384	0.8261	18.0

A: 平常の近似式作成に用いた分析値の年度

B: チェルノブイリ事故の影響の可能性があると近似式作成から除いた年度

C: 近似式 $Y=A \cdot \text{Exp}(-aX)$ のA項

D: 近似式 $Y=A \cdot \text{Exp}(-aX)$ のa項

3. 平常値の変動幅の範囲 近似式による変動範囲と分析値の検討

(4)式から各採取年月日に相当する¹³⁷Cs濃度の算出値を求め、チェルノブイリ事故の影響を受けたと仮定した1986-1993年間を除いて、分析値と算出値の残差の標準偏差を計算すると、変動範囲は0.854となった。1986-1993年の大部分の分析値は±0.854以内であり、変動範囲内であると判定された。しかし、事故の影響なしとした期間の残差は0.0を中心に±0.854間に偏りなく分散し、正規分布を示したのに対し、1986-1993年の残差はプラス側に偏り、正規分布を示さなかった。従って、明らかにチェルノブイリ事故の影響を受けたと推定される1986年を除き、1987-1993年の分析値は変動範囲内であっても平常値とは認められないことになる。

以上の検討結果は、前節の実効半減期の逐次変

化の検討により、1986-1992年ないし1986-1993年をチェルノブイリ事故の影響を受けた期間と推定したと矛盾しない。そこで、1986-1993年をチェルノブイリ事故の影響を受けた期間とみなすことにした。

以上の手法により選定した平常値を(1)式に当てはめ、平常の経年変動傾向を示す「経年変動予測式」を作成した。2001年度までのデータにより作成された福島海域の経年変動予測式は

$$Y=4.34 \cdot \text{Exp}(-0.0374 \cdot X) \cdots \cdots (5)$$

である。平常値の変動範囲は0.780であり、平常値と(5)式による算出値との残差は全て±0.780以内であるから、選定された分析値は全て変動範囲内であると判定された。

4. 海産生物の平常の経年変動傾向を示す近似式、変動幅の範囲、予測式

海産生物(魚類)についても、表層水の場合と同様な方法により、平常の経年変動傾向を示す近似式、変動幅の範囲、予測式を求めることができる。チェルノブイリ事故の影響を受けた期間を、表層水の場合と同様、1986-1993年間とし、福島海域で得られたスズキおよび宮城・福島海域のマダラについて、平常の経年変動傾向を示す近似式を求める

と、それぞれ、

$$Y=0.3997 \cdot \text{Exp}(-0.0353 \cdot X) \cdots \cdots (6)$$

$$Y=0.3004 \cdot \text{Exp}(-0.0392 \cdot X) \cdots \cdots (7)$$

となる。また、平常値の変動範囲は、それぞれ0.089, 0.112であった。なお、Xは基準年(スズキ: 1985年, マダラ: 1984年)から採取年までの経過年数である。

チェルノブイリ事故の影響を受けた期間と仮定した1986-1993年のスズキの分析値の大部分は変動範囲内にあり、1988年後期以降は概ね平均値を中心に分布し、大きな偏りは認められなかった。従って、1986-1988年前期までの間をチェルノブイリ事故の影響を受けた期間と推定した。マダラでもチェルノブイリ事故時に変動の範囲内の値が見られたが、残差を検討すると、大部分が0~0.112に分布し、明

らかにプラス側への偏りが認められた。

選定された平常値により、「経年変動予測式」を作成すると、スズキでは、

$$Y=0.4152 \cdot \text{Exp}(-0.0375 \cdot X) \cdots \cdots (8)$$

となったが、マダラでは1994年以降の分析値が平常値となるため、経年変動予測式は(7)式と等しくなった。実効半減期は、それぞれ18.5年、17.7年であった。

...

5. チェルノブイリ影響推定式

チェルノブイリ事故の影響を推定する基本式を次式で表す。

$$Y=a_0 \cdot \text{Exp}(-a_1 \cdot X) \{1-\text{Exp}(-a_1 \cdot X)\} \cdots \cdots (9)$$

Xは、基準年(チェルノブイリ事故発生日:1986年4月26日)から採取年までの年数である。

チェルノブイリ事故の影響が認められた分析値をYaとする。(6)式に基準年からその試料が得られた採取年までの年数(Xa)を代入して、チェルノブイリ事故が無かった場合の平常値(Yc)を求める。YaとYcの差Yeがスズキ(福島海域)のチェルノブイリ起源の¹³⁷Cs濃度の推定値になる。

(9)式とYcおよびXaから、a₀およびa₁を求めると、

スズキ(福島海域)のチェルノブイリ影響推定式は次のように表せる。

$$Y=1.216 \cdot \text{Exp}(-1.376 \cdot X) \{1-\text{Exp}(-1.376 \cdot X)\} \cdots \cdots (10)$$

これより、チェルノブイリ事故の影響によるスズキ(福島海域)の¹³⁷Cs最大濃度出現時期は1986.8年、すなわち1986年9月下旬と推定された(図2)。

(7)式を用いてマダラ(宮城・福島海域)について、影響推定式を求めると、

$$Y=0.9396 \cdot \text{Exp}(-0.849 \cdot X) \{1-\text{Exp}(-0.849 \cdot X)\} \cdots \cdots (11)$$

となり、チェルノブイリ事故の影響による¹³⁷Cs最大濃度出現時期は1987.13年、1987年1月上旬と推定された。

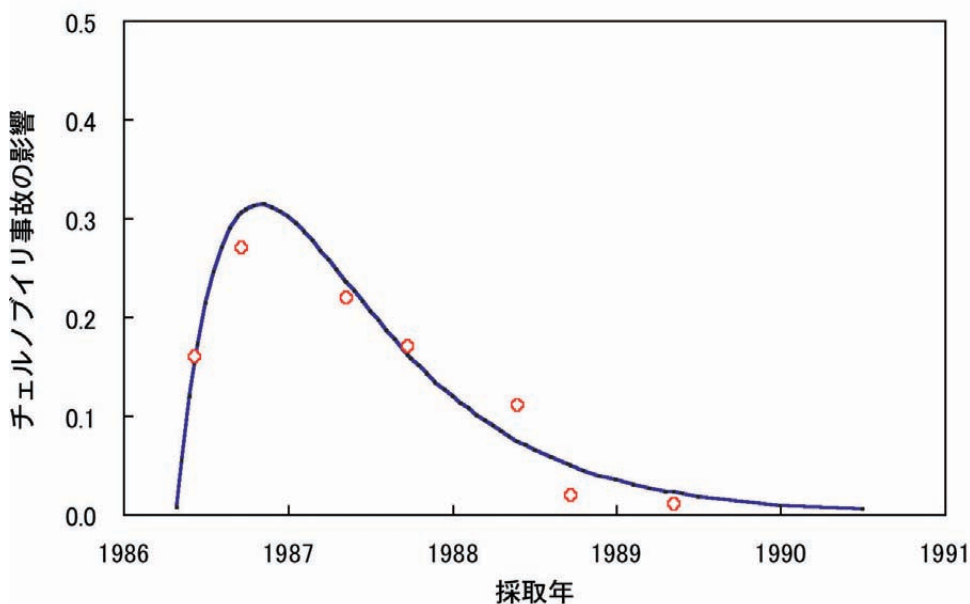


図2 チェルノブイリ事故の影響の近似

6. 最高濃度の出現時期と継続期間の比較

福島海域の表層水のチェルノブイリ影響推定曲線をスズキ、マダラのチェルノブイリ影響推定曲線と併せて図3に示す(縦軸の単位は、海水：10 mBq/L, 魚類：Bq/kg, wet)。チェルノブイリ事故の影響による¹³⁷Csの最大濃度出現時期は、表層水では事故から約1ヶ月後、スズキでは5～6ヶ月後、マダラでは約9ヶ月後であった。

スズキ、マダラの経年変動予測式から得られた平常値の変動幅はほぼ±0.1であった。従って、放射能レベルから見て、チェルノブイリ事故の影響が明らかに認められる期間は分析値から平常値を差し引いた値が0.1を超える期間である。

表層水では、事故後半年以内に放射能レベルは事故以前の濃度に回復したが、スズキ、マダラでは表層水の¹³⁷Cs濃度が事故以前の濃度に回復した後に最大濃度になり、事故以前の濃度レベルに回復するのはスズキで1.7年後、マダラでは更に遅く、2.5年後であった。

先に述べたように、マダラはスズキと異なり、最大濃度出現時でも汚染が認められない個体が存在する。スズキは表層魚であり、マダラは水深200m付近に生息する底魚である。¹³⁷Cs蓄積傾向の両魚種の違いは生息域、食性の違いが反映された結果と考えられる。

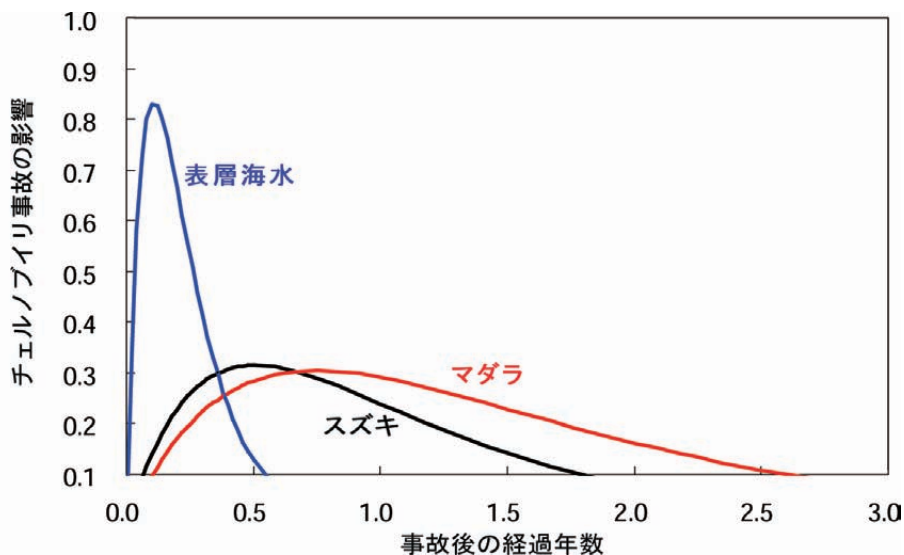


図3 チェルノブイリ事故の影響の比較：平常値を差し引いた値の推移

今後の課題

チェルノブイリ事故前後の分析値と経年変動予測式をもとに、海域に¹³⁷Csの負荷があった場合の表層水および海産魚類の最高濃度の出現時期と継続期間を推定した。今後、下層水をも含め、成育環境水の放射能濃度の経年変動、食物連鎖による餌生物からの放射性物質の移行過程などから、魚種による蓄積傾向の特性を解明したい。

参考文献

吉田勝彦, 鈴木奈緒子, 友定 彰(2004):¹³⁷Csの海域への負荷に対する海産魚類の最高濃度の出現時期と継続期間 —チェルノブイリ事故前後の資料と経年変動予測式をもとに— 第46回環境放射能調査研究成果論文抄録集(平成15年度), 85-86.

(事務局 研究調査グループ 御園生 淳)