

セシウム-137の地球規模降下特性とその評価

ANALYSIS AND EVALUATION OF GLOBAL FALLOUT OF RADIOACTIVE Cs-137

島田洋子^{*}、森澤眞輔^{*}、井上頼輝^{*}
Yoko SHIMADA^{*}, Shinsuke MORISAWA^{*} and Yoriteru INOUE^{*}

ABSTRACT; Cs-137 fallout from atmospheric nuclear detonation tests has been worldwide monitored since late 1950's. We analyzed these monitoring data statistically and determined the characteristics of their surface deposition. In this analysis, the scale of space(size of compartment) and the accuracy of analysis(number of compartment) are determined depending on the global-scale dispersion of Cs-137. Mathematical model was developed and examined by comparing the numerical simulation with the fallout monitoring data(including the data of Cs-137 concentration of sea water).

The main results obtained in this study are summarized as follows:

- (1)Cs-137 deposition depends on the latitude zone but not on the altitude.
- (2)The proposed mathematical model is promising for evaluating dynamic performance of Cs-137 in global atmospheric environment and its surface deposition.
- (3)Transportation rate coefficient from stratosphere to troposphere, in troposphere, and from troposphere to land/ocean is highly sensitive to surface deposition of Cs-137.
- (4)Cs-137 is accumulated more in surface water of the North Pacific and North Atlantic Ocean in 1960's than others and more in South Pacific and South Atlantic Ocean after 1970's. In deep ocean water Cs-137 is increasing more in Indian Ocean and South Pacific Ocean than the others.

KEYWORDS; Fallout Cs-137, Mathematical Model, Global dispersion, Nuclear detonation test.

1. はじめに

環境中に放出された化学物質による環境汚染は、局所的に激しい影響をもたらす型の汚染から、低濃度で長く続く型の汚染に移行しつつある。地球規模での環境汚染の多くがこの型に属している。環境に放出された物質は、様々な経路を経て地球規模に拡散され、最終的には人体へ至る。特に、核実験に由来する人工放射性物質は、地球規模に輸送され、地上に降下した後も長期的に人類に影響を及ぼす。このような汚染物質の放出から人体に至るまでの過程を量的に評価し、人体へのリスクを評価するモデルを構築して環境のリスク・アセスメントを行うことは、地球環境問題の重要性を定量的に把握し、解決策を発見し、その効果を評価するための有力な手段となる。

本研究では、環境汚染が生態学的長期にわたって人の健康に及ぼす影響（リスク）を定量的に評価するモデルを構築するための第一段階として、核実験によって放出され地上に降下した放射性核種（フォールアウト）の実測値を統計的に分析し、従来の研究成果と地球科学的理論を参考に、放射性物質が放出されて大気圏に拡散し、陸圏や水圏に降下するまでの地球規模の動態を評価するモデルを構築し、フォールアウトCs-137の降下率と海水中濃度の実測値に照らしてモデルの妥当性を検証する。

2. フォールアウトCs-137の降下特性

大気圏核実験によって大気中に放出された放射性物質の一部は、核爆発による上昇気流に乗って対流圏、さらに成層圏にまで運ばれ、大気の移動にともない地球規模に広がり長時間にわたって地表に降下する。特に、成層圏は対流

^{*} 京都大学工学部環境地球工学教室 (Dept. of Global Environmental Engineering, Kyoto University)

圏とは異なり大気安定性が高く放射性物質はより長く留まることになる。大気圏内での放射性核種の輸送媒体は風（気流）であると推定できる。大気圏において大気の循環は主な気圧帯と風帯、つまり南北両半球ごとに、寒帯偏東風帯（N90°～70°、S90°～60°）、偏西風帯（N70°～40°、S60°～40°）、亜熱帯高圧帯（40°～30°）、貿易風帯（30°～10°）、赤道低圧帯（10°～0°）の緯度帯に特徴づけられている。この気圧帯・風帯区分の最小幅は緯度10度に相当するので、緯度方向の領域区分幅の最小値を10度に設定することにする。そこで、Cs-137降下率の実測値を10度毎に区分して、降下特性を分析することにした。

本研究では、英国AERE(Atomic Energy Research Establishment)が蓄積している地球規模フォールアウトCs-137データを主として利用する。AEREは1958年以来3ヶ月毎に世界の25地点でCs-137降下量を測定している。このデータを用いて10°毎の緯度帯でのCs-137の降下量を統計解析した結果次の結論を得た。すなわち、(1)Cs-137の降下量や降下パターンは緯度により変化する。(2)Cs-137の降下量は核実験の実施場所（緯度）に依存しており、北半球の降下量は南半球に比較すると明らかに大きい。(3)Cs-137降下量がピーク値を取る時間には緯度帯によって有意な差が認められる。Cs-137降下量の経年変化の一例を、フォールアウトの最も多かった1960年代についてFig.1に示す。

3. Cs-137降下量を評価するモデル

3.1 評価モデルの構成

(A) 評価対象領域の区分

既に述べたように、Cs-137の降下特性には緯度による変化がみられる。大気圏内で、放射性核種は大気の大循環によって輸送される。その降下特性を評価するためには、評価対象領域を分割する必要がある。地球を緯度幅10度で分割すると、隣り合う緯度帯間のCs-137降下量に有意な差異が認められないケースがある。そこで、以下に定義する統計的な指標(以下偏差と呼ぶことにする)を用いて、緯度帯を統合する可能性について検討する。

隣り合う2つの緯度帯 a、b において実測されたCs-137降下量データ間の偏差を次式(1)で定義する。

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(a_i - b_i)^2}}{a_i + b_i} \quad (1)$$

ここに、 a_i : 緯度帯 a において時刻 i に測定されたCs-137の降下量
 b_i : 緯度帯 b において時刻 i に測定されたCs-137の降下量
 n : 測定時点数

$a_i = b_i$ 、即ち、両緯度帯における降下量が等しければ $d = 0$ となる。従って、 d が大きくなればそれだけ両緯度帯を区分して取り扱う必要が大きくなることになる。本研究では、 $d = 0.4$ を用いて緯度帯を区分することにした。その結果、南北各半球の偏西風帯を緯度50度でさらに2つに、貿易風帯を緯度20度でさらに2つに、細分する必要が生じた。尚、 $d = 0.4$ を採用することによって、Cs-137降下量のモデルによる評価結果にどの程度の影響が生じるかについては別途検討する必要がある。

地球を取り巻く大気は経度方向の流れが卓越し、大気中に放出された放射性物質は比較的短時間で緯度帯内部での分布は一樣になる。大気が経度方向に地球を一循環する時間は、対流圏では数週間、成層圏では数ヶ月で²⁾、本研究で

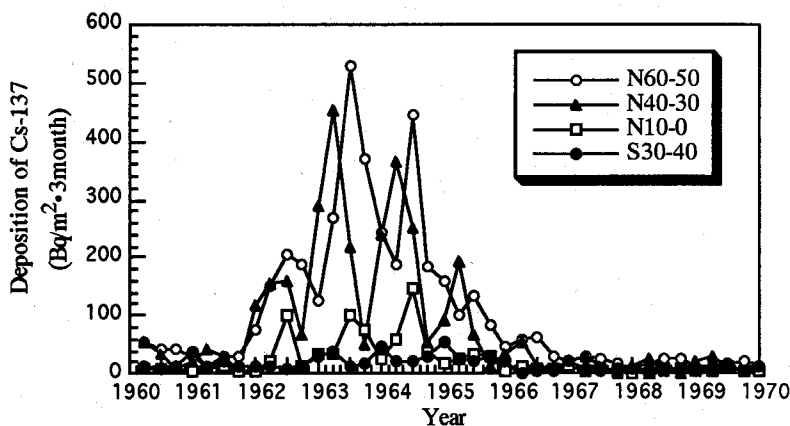


Figure 1 Observed Fallout Cs-137 Deposition

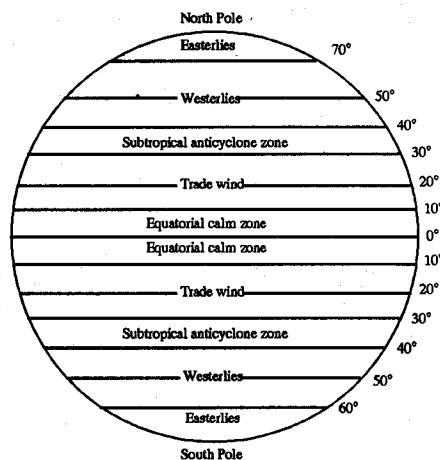


Figure 2 Zone Partition of Earth Used in This Study

用いるデータのサンプリング期間である3ヶ月以内であるので、放射性核種の降下は同緯度帯内では経度による変化は大きくないと考えられる。中国が実施した大気圏内核実験に由来する放射性物質がほぼ14日で地球を一周し、我が国における放射性降下物の量が約14日毎にピークを示す等の観測結果²⁾は、AEREのサンプリング期間3ヶ月に比べて緯度帯内部での物質輸送が十分に早いことの一つの証拠である。また、同じ緯度帯に属していて経度が大きく違うモニタリング地点でのデータそれぞれの間の偏差を式(1)を用いて解析すると、 d はすべて0.4より小さくなった。そこで、本研究では評価対象領域を経度方向には分割しないことにした(Fig.2参照)。

以上より、大気圏と陸圏を緯度によって14分割し、大気圏はさらに対流圏と成層圏とに2分割し、また、水圏は各大洋のうち太平洋、大西洋を赤道で南北に2分割して、インド洋、北極海の計6領域に分割して、さらに大洋は表層と深層に分割し、結局地球を合計55個のコンパートメントに分割することにした。

(B)コンパートメントモデルの構成

地球を55個のコンパートメントに分割し、コンパートメント間のCs-137の物質交換を考慮して構成したコンパートメントモデルをFig.3、Fig.4に示す。このモデルにおいては、核実験時の上昇流による成層圏へのCs-137の吹き上げ以外の、対流圏から成層圏へのCs-137の移行は無視する。また、放出された核種は、核実験の行われた場所に属する緯度帯の成層圏、対流圏に、核爆発の規模によって定まる割合³⁾で供給されるものとする。成層圏の各コンパートメントに供給されたCs-137は、同じ成層圏の隣り合う緯度帯のコンパートメント、同じ緯度帯の対流圏のコンパートメントへと輸送され、対流圏のコンパートメントに輸送されたCs-137は、インプットされたCs-137と共に、同じ対流圏の隣り合う緯度帯のコンパートメント、同じ緯度帯の陸圏のコンパートメント、その緯度帯の属する水圏表層のコンパートメントへと輸送されるものとする。海洋における物質交換は、Stommelによる海洋大循環モデル⁴⁾を取り入れる。

モデルは各コンパートメントごとにCs-137の存在量を従属変数にした常微分方程式群で記述される。第 i コンパートメントに存在するCs-137量を M_i (Bq)、第 j コンパートメントから第 i コンパートメントに流入するCs-137量を I_{ji} (Bq/month)、第 i コンパートメン

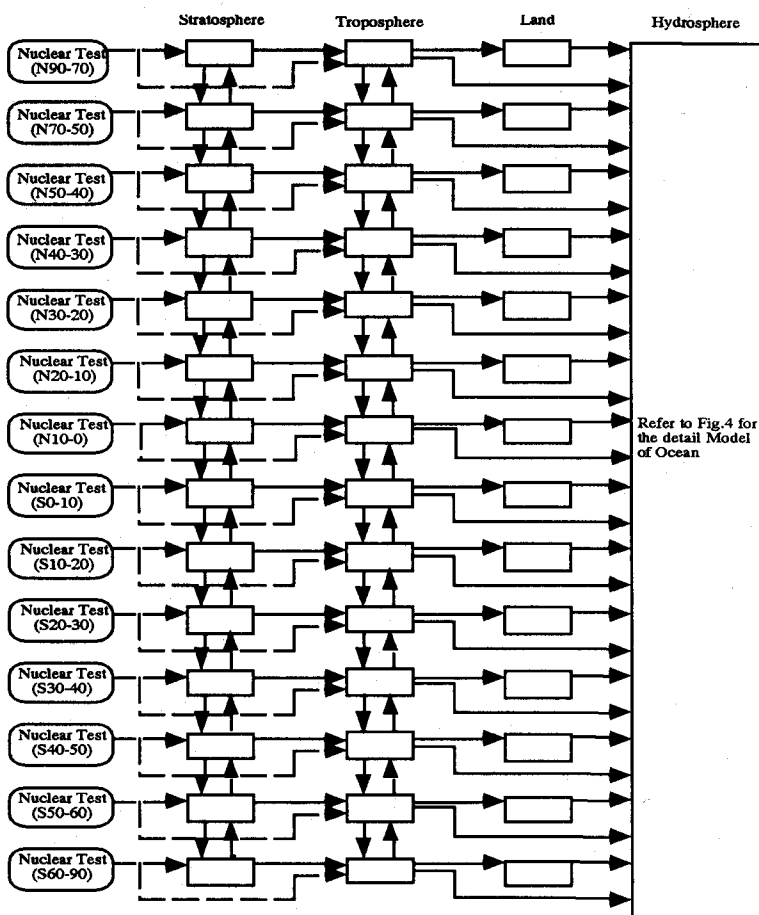


Figure 3 Compartment Model for Evaluating Dynamic Performance of Cs-137 in Global Atmosphere and its Deposition

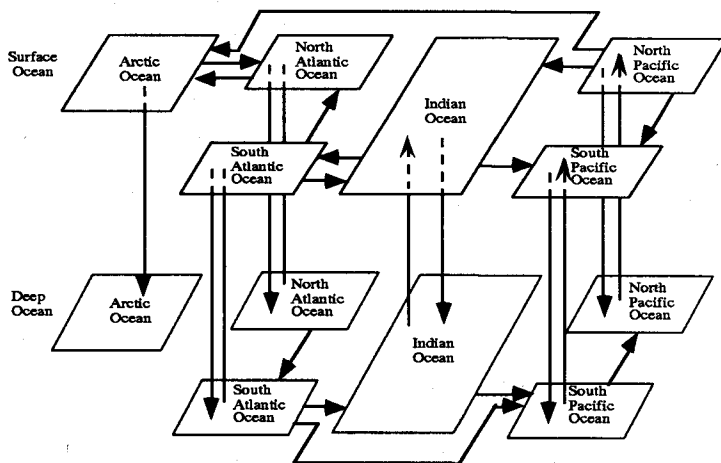


Figure 4 Ocean Compartment Model Used in This Study

トから第 j コンパートメントに流出するCs-137量を I_{ij} (Bq/month)、Cs-137の崩壊定数を λ (1/month)とすると、第 i コンパートメントに対する支配方程式として、

$$\frac{dM_i}{dt} = \sum_j I_{ji} - \sum_j I_{ij} - \lambda M_i \quad (i \neq j) \quad (2)$$

を得ることができる。ここに、 $\sum_j$ は*について算術和をとることを意味する。式(2)中の流入量 I_{ji} 、流出量 I_{ij} は、それぞれに対応する移行速度係数 K_{ji} 、 K_{ij} (1/month)を用いて、次式で表現することにする。

$$I_{ji} = K_{ji} \cdot M_j \quad (3)$$

$$I_{ij} = K_{ij} \cdot M_i \quad (4)$$

3.2 数値シミュレーション

(A) 数学モデルの数値解法

3.1で示した数学モデル(常微分方程式群)を離散化し、Lunge・Kutta・Gill法により解くことによって数値シミュレーションを行う。環境中への放射性Cs-137の供給(境界)条件を規定するために核実験データ^{2),6),7)}(年月日、場所、規模)を用いる。数値シミュレーションは1ヶ月単位に実行し、シミュレーションの初期条件としては1945年7月以前において、全環境構成要素中のCs-137蓄積量(濃度)を0とした。

(B) 関連パラメータの設定

Table 1にシミュレーションを実行するために必要なパラメータを整理して示す。核爆発規模(MNT)は、1945年から1985年までにかけての核実験データ^{2),6),7)}を基に、1ヶ月毎に14の緯度帯毎に与えた。また、文献²⁾によると、核爆発実験における単位核爆発量あたりのCs-137生成量は、3.9(PBq/Mt)であるので、 $CSMNT = MNT \times 3.9 \times 10^{15}$ とした。粒子状放射性物質の対流圏と成層圏の間での分配は、核爆発規模や爆発高度・緯度によって変化する。爆発規模と対流圏に放出された放射性物質の割合との関係³⁾を用いて、核実験ごとの爆発規模から、対流圏への投入率FTSと成層圏への投入率FSSを決定した。 K_{ij} は大気圏内での大気汚染物質、放射性物質の物質輸送速度や滞留時間等に関する調査報告^{2),3),8)}と、成層圏、対流圏における循環モデル等^{2),8)}を参照して決定した。 R_{ij} は大気圏から陸圏、水圏への移行は主に降水によることから、各緯度帯における陸圏、水圏への降水量データ⁹⁾を用いて、決定した。 W_{ij} はStommelの海洋大循環モデルにおける設定値⁹⁾を参考に決定した。文献¹⁰⁾によると、海水中に放出された放射性核種は、海洋の堆積物粒子に収着されて沈降する。Cs-137は粒子への収着性が弱い、ある種の粘土鉱物格子に結合されて取り込まれることがわかっているので、本研究では水圏へ移行したCs-137の内20%が粒子に取り込まれて沈降するものとし、粒子状放射性稀土類元素の沈降速度の調査結果²⁾を参照して W_{ij} を決定した。核実験によって大気中に放出されたCs-137の内、対流圏への配分率FTSにより定まる量が対流圏へ投入されるが、対流圏に投入されたCs-137の内、粒径の大きいものは実験後短時間の内に地表面に降下する。そこで、核爆発によって生成されたCs-137の対流圏への爆発直後の地表面への残留率PPPをここでは0.99とした。

Table 1 List of Parameter

Parameter	Meaning	Unit
MNT	scale of nuclear detonations	Mt
CSMNT	Cs-137 yield for unit scale of nuclear detonations	Bq/Mt
FSS	fraction of Cs-137 input to stratosphere	—
FTS	fraction of Cs-137 input to troposphere	—
K_{ij}	Cs-137 transportation rate coefficient between i & j compartment in stratosphere and troposphere	1/month
R_{ij}	Cs-137 deposition rate coefficient from troposphere to land or ocean surface	1/month
W_{ij}	Cs-137 transportation rate coefficient in ocean surface	1/month
S_{ij}	Cs-137 sedimentation rate coefficient in ocean surface	1/month
PPP	local residence rate of Cs-137 near the nuclear detonation test site	—

3.3 モデルの検証

Cs-137降下率のシミュレーション結果の一部を、英国AEREによる実測値と共にFig.5(a)、(b)に示す。また、海洋水中のCs-137濃度のシミュレーション結果のうち北太平洋における計算値を、我が国近海でのCs-137濃度測定値¹¹⁾と共にFig.6に示す。実測値と計算値とは比較的良好一致しており、本研究において構築したモデルによって核実験によって大気中に放出されたCs-137地球的な挙動の大略を把握するために使用することができるといえる。

4. 考察

4.1 パラメータ感度解析

構成したモデルに含まれるパラメータのうち、Cs-137の降下量に影響を及ぼす大気圏内での移行速度係数と大気圏から陸圏、水圏への移る速度係数について感度解析を実施した。成層圏から対流圏への移行の速度係数、対流圏間の移行の速度係数、対流圏から陸圏・水圏への移行速度係数がCs-137の降下量に支配的な影響を及ぼした。特に対流圏間移行の速度係数と、対流圏から陸圏への移行速度係数は、南半球のCs-137降下量に対して大きな影響を及ぼすことが明かになった。

4.2 Cs-137の蓄積についての考察

Cs-137が各大洋にどのように蓄積配分されるかを今回構築したモデルを用いて分析した結果、海洋表層において1960年代には北太平洋に最も多く、次いで北大西洋、インド洋にCs-137が多く蓄積している。1970年代以降、北太平洋、北大西洋のCs-137存在量は減少しはじめ、南太平洋、南大西洋におけるCs-137存在量が増加し、80年代には存在量に変化が認められない。また、大洋の深層

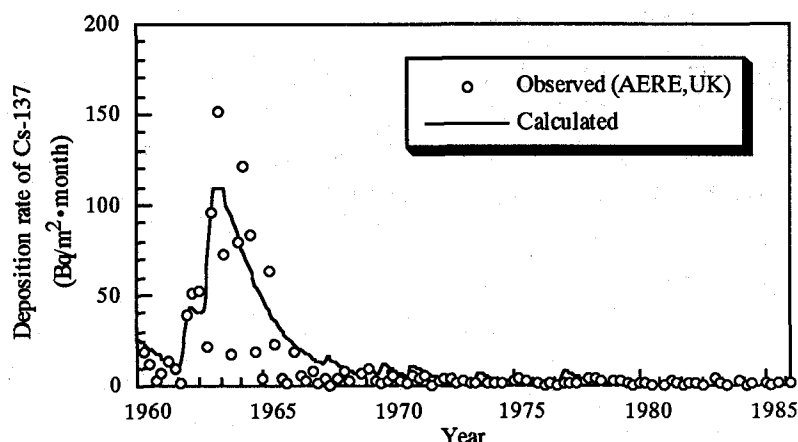


Figure 5 (a) Comparison of the Observed Fallout Cs-137 with the Calculated for the N30-40 Zone

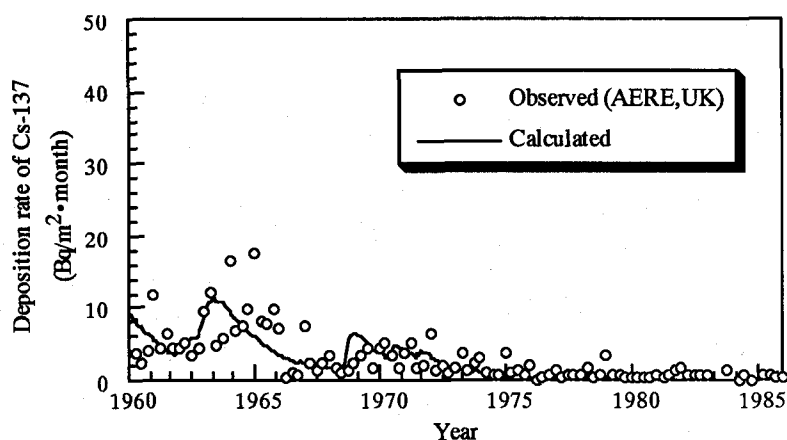


Figure 5 (b) Comparison of the Observed Fallout Cs-137 with the Calculated for the S30-40 Zone

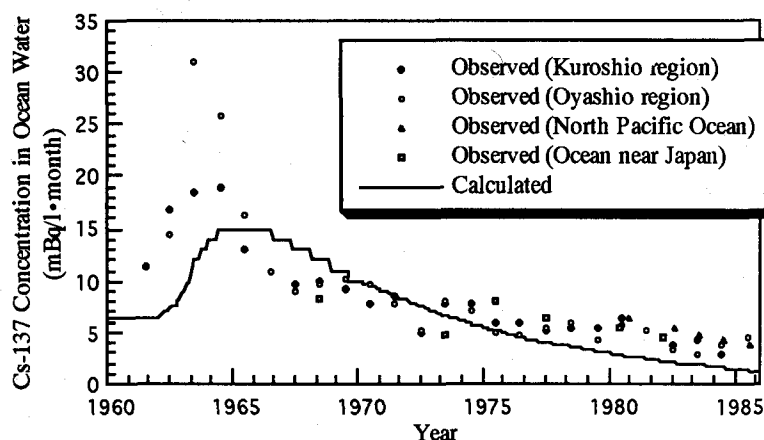


Figure 6 Comparison of the Observed Cs-137 Concentration in North Pacific Ocean near Japan with the Calculated in North Pacific Ocean Zone

においてはCs-137の蓄積量は北太平洋、北大西洋では時間の経過と共に一定になる傾向があるが、インド洋、南太平洋、南大西洋における蓄積量は増加し続けている。特に海洋深層でのインド洋、南太平洋における蓄積量の増加が著しい。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論を要約すると以下のようになる。

- (1)Cs-137の降下量や降下パターンは緯度により変化する。経度方向の変化は相対的に小さい。
- (2)Cs-137の降下量は核実験の実施場所（緯度）に依存しており、北半球の降下量は南半球の降下量に比較すると明らかに大きい。
- (3)Cs-137の降下量がピーク値を取る時間には緯度帯によって有意な差が認められる。
- (4)本研究で構築したコンパートメントモデルは、核実験によって大気中に放出されたCs-137の地球的な挙動の大略を把握するために使用することができる。
- (5)構成したモデルに含まれるパラメータのうち、成層圏から対流圏への移行速度係数、対流圏間の移行速度係数、対流圏から陸圏・水圏への移行速度係数がCs-137の降下量に支配的な影響を及ぼした。
- (6)Cs-137の存在量は、水圏表層においては1960年代には北太平洋、北大西洋に多く、1970年代以降南太平洋、南大西洋において増加しはじめ80年代以降一定になり、水圏深層においてはインド洋と南太平洋、南太平洋の蓄積量が増加し続けている。

参考文献

- 1) R.S.Cambray, K.Playford, G.N.J.Lewis & R.C.Carpenter : Radioactive Fallout in Air and Rain, AERE, United Kingdom Atomic Energy Auth., Environmental & Science Div., (1960 - 85)
- 2) 佐伯誠道編：環境放射能、ソフトサイエンス社、(1984)
- 3) 葛城幸雄：死の灰のゆくえ、新草出版、(1986)
- 4) H.Stommel : The Abyssal Circulation, Deep-Sea Research, Vol.5, P.80 - 82, (1958)
- 5) D.W.Pritchard, R.O.Reid, A.Okubo & H.H.Carter : Physical Process of Water Movement and Mixing, RADIOACTIVITY IN THE MARINE MOVEMENT, p.102 - 106, National Academy of Science, (1971)
- 6) 日本原子力産業会議編：原子力年表、各年度版、(1934 - 85)
- 7) K.M.Matthews : Radioactive Fallout in the South Pacific : A History Part 1. Deposition in New Zealand, NRL, National Radiation Lab., New Zealand, (1989)
- 8) 磯野謙治：大気汚染物質の動態、大気環境の科学 2、東京大学出版会、(1979)
- 9) A.Baumgartner & E.Reichel : The World Water Balance, p.112, Elsevier, (1975)
- 10) E.K.Duursma & M.G.Gross : Marine Sediment and Radioactivity, RADIOACTIVITY IN THE MARINE MOVEMENT, p.149, National Academy of Science, (1971)
- 11) 科学技術庁：環境放射能調査研究成果 論文抄録集 第11回～第28回、(1969 - 85)