

2. 大気・降水中の放射性核種の挙動

2-1 日本における大気・降水・落下塵中の人工放射能の推移

1958年以来、気象研究所地球化学研究部では札幌、稚内、釧路、秋田、仙台、東京、輪島、米子、福岡、石垣島及びつくば（気象研究所）の12地点における人工放射性核種（ ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 等）の月間降下量の測定を行ってきた（当初は、札幌、仙台、東京、大阪、福岡、秋田の6地点で試料の採取が行われた。1975年以降は稚内、輪島、米子の3地点が加わった。更に、1977年から、釧路、沖縄（1980年から、石垣島に変更）の2地点が加わって現在に至っている）。気象研究所は、1980年の研究所移転に伴い東京高円寺からつくばに変わった。現在までに得られた各地点の月間降下量は付録4にまとめた。

図2-1に、1959年から1994年までの、東京（1959-1979年）及びつくば（1980年以降）の気象研究所で測定された ^{90}Sr

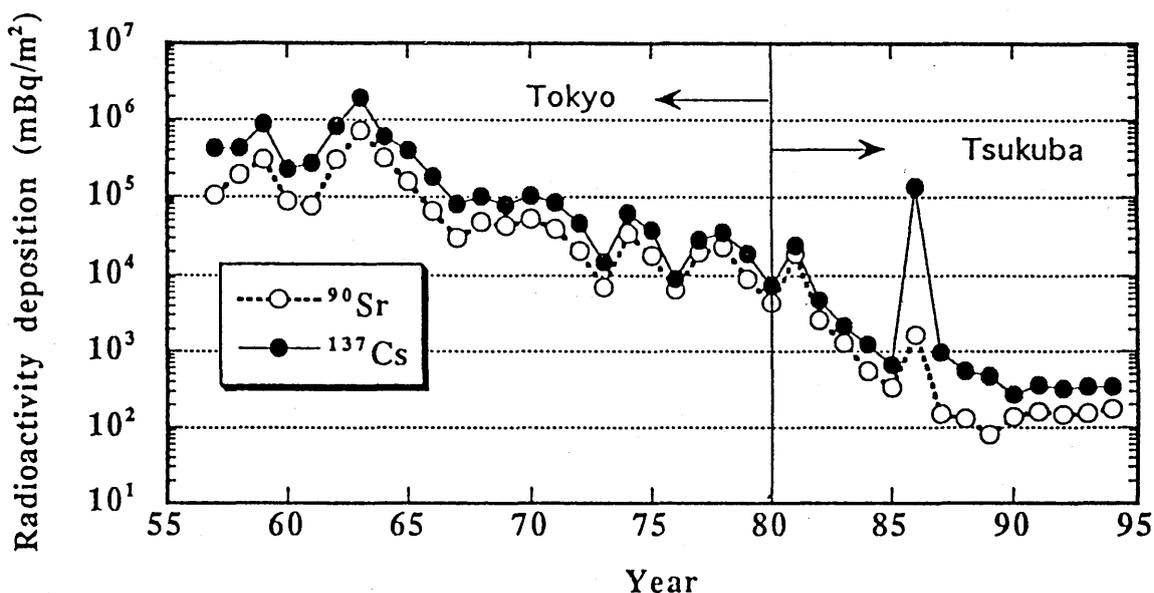


Fig. 2-1 Temporal variation in annual radioactivity deposition observed at MRI

及び ^{137}Cs の年間降下量の経年変化を示す。また、表2-1には ^{90}Sr と ^{137}Cs に加え、プルトニウム同位体の年間降下量を示す。なお、1980年に気象研究所は、東京都杉並区高円寺より、茨城県つくば市に移転した。グローバルフォールアウトによる放射性降下物の降下量は緯度に大きく依存する（Katsuragi and Aoyama, 1986）が、東京とつくばの距離はおおよそ60kmで緯度幅は20分に過ぎないので、この観測記録は連続したものとみなせる。なお、この連続性はプルトニウム同位体降下量の観測結果について確認されている（Katsuragi et al., 1983）。1959年以来の放射性降下量の観測の中で、1961-1962年の大規模大気圏核実験の翌年の1963年にいずれの核種についても最大の降下量を観測した。その後、部分核実験停止条約により大気圏で大規模な核実験が行われなかったために、約1年の成層圏滞留時間に従って降下量は減少した（Katsuragi, 1983; Hirose et al., 1987）。しかし、1965年以降は中国やフランスの大気圏内核実験により人工放射性核種の降下量は一定水準を推移した。1980年10月の第26回中国大気圏内核実験以来、大気圏では核実験は行われていないので、1981年に比較的高い降下量を観測した後、降下量は減少し、1985年には最も低いレベルになった。1986年の4月に起きたチェルノブイリ原子力発電所事故に伴い多量の放射能が大気中に放出

された。その結果、日本でも高い放射能が検出された(詳細は2-4を参照)。その後、降下物中の人工放射能は減少し、1990年代に入り放射能は低いレベルで推移している。

Table 2-1 Annual deposition of ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs and plutonium observed in MRI. (1958-1994)

Year	⁹⁰ Sr Bq m ⁻²	¹³⁷ Cs Bq m ⁻²	^{239,240} Pu Bq m ⁻²	Amount of ppt mm
1958	386	1092		1796
1959	219	692	3.59	1612
1960	64.9	168	1.6	1176
1961	56.8	197	1.37	1232
1962	219	592	4.06	1153
1963	516	1414	7.41	1657
1964	232	435	6.85	1136
1965	116	286	4.47	1761
1966	48.6	135	2.71	1796
1967	21.6	59.5	0.78	1208
1968	35.1	75.7	0.93	1644
1969	32.4	59.5	0.44	1472
1970	52.9	102	0.22	1082
1971	39.6	84	0.48	1396
1972	20.4	45.9	0.19	1701
1973	7.0	14.8	0.096	1207
1974	34	61.6	0.23	1757
1975	18.1	37.4	0.24	1621
1976	6.7	8.9	0.034	1559
1977	19.6	28.1	0.2	1617
1978	22.9	34.8	0.27	1064
1979	8.9	18.9	0.15	1575
1980	4.4	7.4	0.036	1479
1981	18.9	24.1	0.26	1222
1982	2.6	4.8	0.052	1324
1983	1.3	2.1	0.0136	1362
1984	0.56	1.2	0.0079	1826
1985	0.33	0.67	0.0026	1374
1986	1.7	135	0.0032	1182
1987	0.15	0.96	0.0032	1098
1988	0.13	0.56	0.0038	1296
1989	0.079	0.47	0.0017	1520
1990	0.19	0.29	0.0021	1284
1991	0.16	0.36	0.0030	1841
1992	0.15	0.32	0.0044	1282
1993	0.15	0.35	0.0078	1381
1994	0.18	0.42		

2-2 核実験による放射性降下物の特徴

大気圏内核実験により生成した放射性塵の大気圏の挙動については多くの研究があり成書にまとめられている (Reiter, 1978; 葛城, 1986)。その成果の概略を紹介する。大気圏内核実験の場合、爆発の規模によって放射能の打ち上げ高度が異なる。1メガトン以上の水素爆弾の爆発の場合には、爆発に伴い生成した大部分の放射能は成層圏に打ち上げられる。従って、成層圏大気の循環や成層圏と対流圏の大気の交換過程によって地表大気の人工放射性核種を含むエアロゾルの濃度やそれらの地表への降下量が支配されている。成層圏に打ち上げられた放射能の経時変化や地上で観測された降下量の経時変化の解析によって、成層圏のエアロゾルの滞留時間が約1年であることが明らかになった。しかし、実際の観測結果によると、みかけの成層圏滞留時間はかなりの変動を示し、短い場合には約0.5年 (1980年中国第26回大気圏内核実験の場合) 長い場合には1.7年 (1960-61大規模核実験で放出されたプルトニウムの経年変化から評価) にわたっていることが分かっている。この様な現象を合理的に説明するためには、成層圏を少なくとも、3層に分けて考えることが重要であることを明らかにした (Hirose et al., 1987)。各層の半減時間は、上部成層圏 (高度21km以上) が0.5年、下部成層圏 (高度21km以下) が0.7年、対流圏界面直上層が0.3年である。下部成層圏の滞留時間が最も長く、時間が経つにしたがって、地上の放射性降下物の経年変化は、下部成層圏の滞留時間で支配されることが分かる。一方、数10キロトンの原子爆弾の爆発の場合、大部分の放射能は対流圏に留まり (約3,000m~圏界面)、大気の総観気象スケールの循環に従って輸送される。例えば、ロプノールにおける中国の原爆実験の場合、季節によって必ずしも同じではないが、放射能を帯びたエアロゾル (死の灰) は500ヘクトパスカルの空気の流れにしたがって輸送され、核実験後約3日程度で日本に到達した例が知られている。さらに、北半球の中高緯度では放射能はほぼ経度線に沿って西から東に向かって輸送され、約14日程度で世界を一周することが明らかにされている。また、自由対流圏の放射性物質の滞留時間は約30日と評価されている。

成層圏フォールアウトによる放射性降下物は、中緯度地帯では特徴的な季節変動を示す。即ち、3月から6月にかけて降下量の極大値が現れる。この現象を、スプリングピークと呼んでいる。ただし、この季節変化は地域的に異なり、放射性降下物の極大が出現する時期は地域に依存することが明らかになっている (Katsuragi and Aoyama, 1986)。

また、成層圏フォールアウトによる放射性物質の降下量は地域変化を示し、日本については、南から北に行くにしたがって、降水量は減少するにもかかわらず降下量は増大する。特に、秋田の人工放射性核種の降下量は日本で観測した内では最も高く東京の約2倍であった (Katsuragi, 1983)。秋田の高い人工放射性核種の降下量については、チェルノブイリ原子炉事故による放射性降下物でも観測されており (Aoyama et al., 1987)、地理的条件も含め原因の究明は今後の課題である。

2-3 最近の⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs 降下量

2-3-1) 月間降下量の季節変動 (Igarashi et al., 1996)

図2-2に1990年より1994年までに観測された月間の降下量変動を示す。1990年より1993年まで⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs 降下量は春季に最も増大した。春季の降下量増大は、成層圏と対流圏大気の大規模な混合が活発化することによる、いわゆるスプリングピークに相当するようにも考えられる。しかし、極大の月が2度ある年もあり、1980年代とは異なる季節変動傾向を示している。1994年になると、¹³⁷Csの月間降下量は、あきらかに従来と異なる様相を呈することが分かった。

このような観測結果を説明するためには、成層圏フォールアウトが依然として現在の放射性降下物の支配要因であるという仮説はもはや妥当ではなく、あらたにその支配要因を探る必要がある。

2-3-2) 放射性降下物をもたらす過程

放射能を地表にもたらす過程は、その経路と起源により、大まかに3つに区別できる。核実験、事故直後には対流

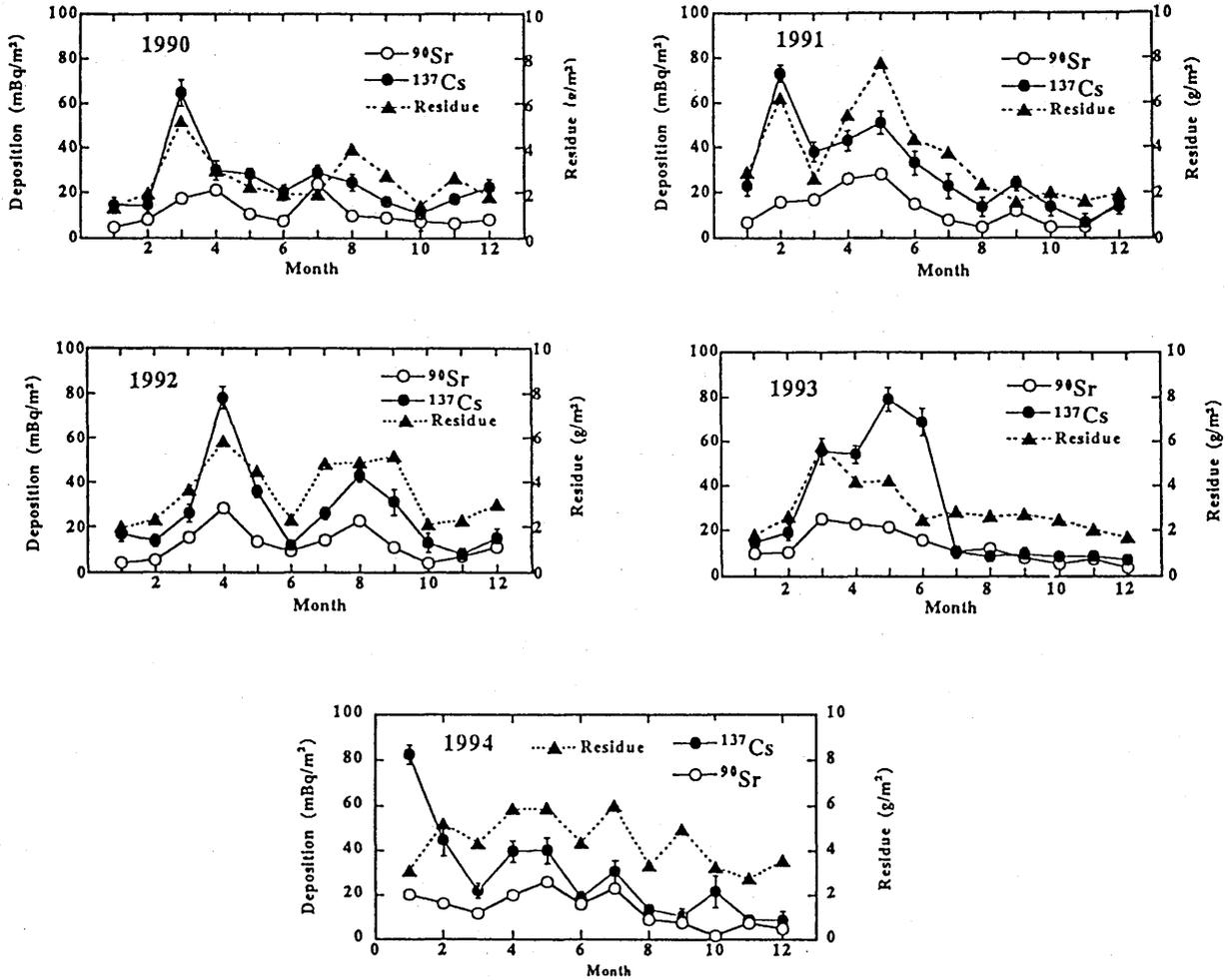


Fig. 2-2 Seasonal variation in radioactivity deposition

圈を直接経由して (T), その翌年以降には成層圏に到達し滞留していた部分 (S) が地表にもたらされる。放射性降下物は圧倒的にこの2つの過程で地表にもたらされる。しかし、これらの過程で輸送される放射能の量が減少するにしたがって、もうひとつの過程が重要となってくる。すなわち、地表に降下した放射能が土壌粒子とともに再浮遊する過程 (R) である。実際の降下量 (D) はこれら3つの過程でもたらされる量の和となる。

$$D = T + S + R$$

この三つの過程について予想される特徴を、減衰時間、放射能と相当する安定体との比 (r/s 比; 純物質に対する比放射能), $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比につき、表2-2にまとめた。これらの特徴について考察を進め、現在の放射性降下物の支配要因を明らかにする。

2-3-3) 降下量の経時変化について

まず最初に減衰時間について考える。先に述べたようにエーロゾルの対流圏での滞留半減期は1箇月程度と推定され、核実験、事故などで放出された放射能の対流圏フォールアウトは、その翌年には1/1000以下となって無視できる量となる。一方、見かけの成層圏フォールアウトの滞留半減期は約1年である。これを ^{137}Cs の年間降下量変動についてあてはめ (図2-3), 1980年10月の中国核実験以後の数年間に注目すると、1982~1985年の年間降下量 (D) は、

Table 2-2 Quantitative characteristics of processes controlling the radioactive deposition.

Component	Decay time	r/s ratio	¹³⁷ Cs/ ⁹⁰ Sr
Stratospheric	about 1 year	high	specific
Resuspension	long depending on phys. decay, etc.	low	various
Tropospheric accidental small release	about 1 month	higher than strato.	specific

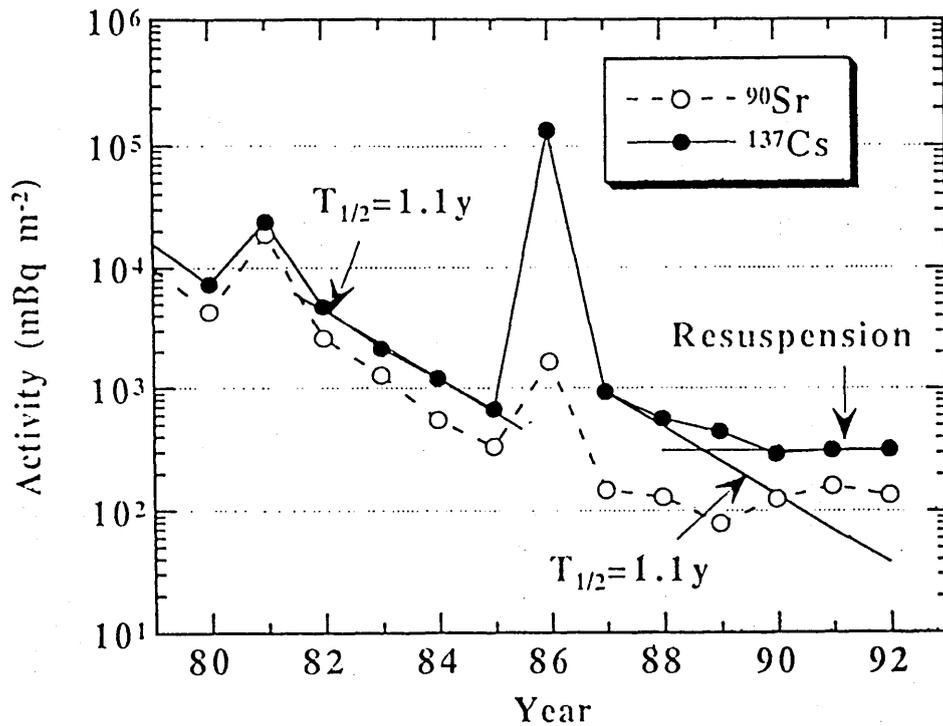


Fig. 2-3 Influence of the stratospheric component on the annual deposition of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr.

$$D_{82+t} = S_{82+t} = D_{82} \times \exp \{(-\ln 2 / ST) \times t\}$$

と表わすことができる。ここで、添え字は年をあらわし、 t は経過時間を、 ST は成層圏での滞留半減期を示す。計算により得られる滞留半減期は約1.1年となる。

次に、1986年のチェルノブイリ事故で放出された¹³⁷Csの一部は成層圏にも入ったと考えられるので、1990年代に観測された降下量の少なくとも一部は、成層圏由来と推定される (Aoyama, 1988)。仮に全量が成層圏由来とすれば、その減少の仕方は成層圏滞留半減期1.1年の減衰時間に従うはずである。図2-3に示すように、対流圏フォールア

ウトが無視できる1987年より、1.1年の減衰曲線をのばすと、1990年代の予測された¹³⁷Cs降下量は、実際の降下量よりも明らかに下回ってしまう。そこで、もう一つの因子である再浮遊 (R) を考慮する必要がある。問題はその量をもどのように見積もるかである。とりあえず、値がほぼ一定となった1990年代の降下量の平均値を再浮遊量 (R) として、1987~89年の降下量 (D) について計算すると、

$$D_{87+t} = S_{87+t} + R = D_{87} \times \exp \{ (-\ln 2 / ST) \times t \} + R$$

となって、成層圏滞留半減期として約0.89年が得られた (図2-4)。改めて同様の計算を1982~85年の降下量について行くと、約0.84年の滞留半減期が得られた。1986年のチェルノブイリ事故の前後で成層圏滞留半減期の値が一致することから、現在の放射性降下物はそのほとんど全量が再浮遊によってもたらされているとした最初の仮定は正しかったと考えられる。この結果から、再浮遊粒子に付着した人工放射性核種の降下量への寄与は、少なくとも1980年代初期から無視できない程度になり、また、その量はおおよそ1990年代の年間降下量と同じと考えて差し支えないことがわかった。

2-3-4) ⁹⁰Sr と ¹³⁷Cs について安定元素濃度との比 (r/s比) について

現在の人工放射性降下物は成層圏に由来しないことを、さらにr/s比により確認を行った。r/s比は、純物質の場合の比放射能に相当するが、環境中の化学成分を対象にしているのでr/s比という用語を用いる。核反応で生成した放射性同位体には、相当する安定同位体はほとんど付随しない。大気圏内の核爆発では周囲の物質が巻き上げられるが、量的には少ない。一方、再浮遊の場合、人工放射性同位体は、土壌粒子に付着しており安定な元素により希釈された状態にある。従って、定性的には、r/s比は成層圏フォールアウトで大で、再浮遊では小と考えられる。も

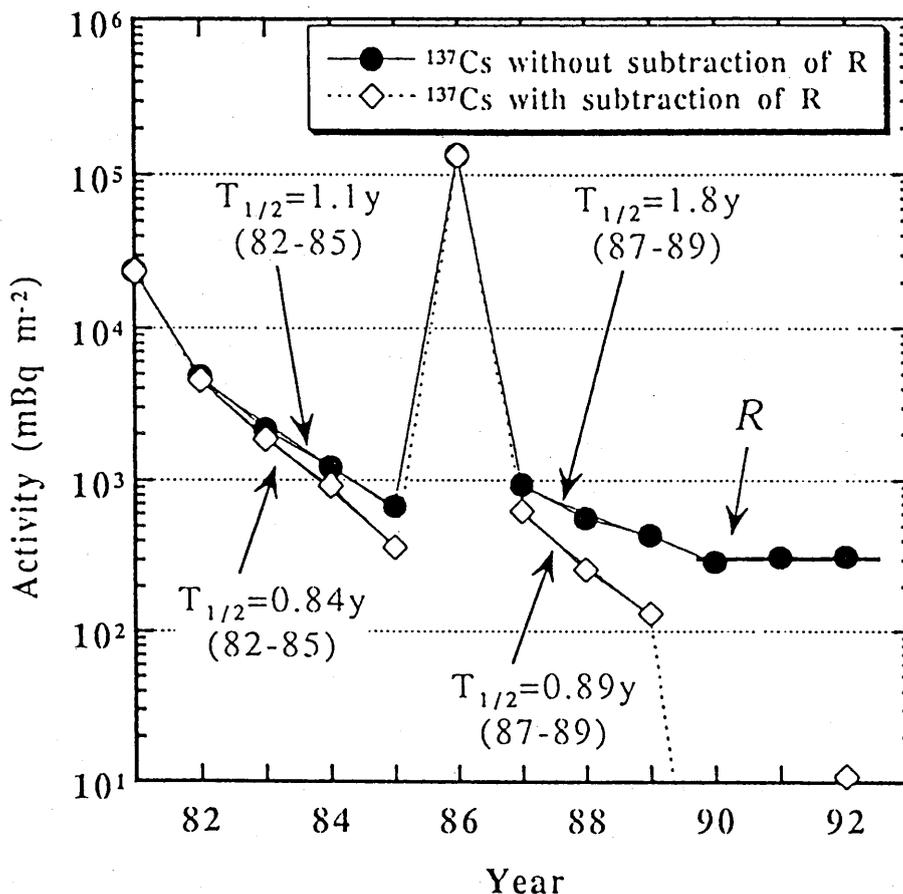


Fig. 2-4 Deconvolution of the total ¹³⁷Cs deposition into the stratosphere and the resuspension components.

し、春季の降水量の増大が、成層圏フォールアウトに由来するのであれば、放射能は土壌中の安定体に希釈されていないから、 r/s 比が増大するはずである。1991~93年の降水物について求められた $^{90}\text{Sr}/$ 安定Sr比および $^{137}\text{Cs}/$ 安定Cs比 (r/s 比)を図2-5に示す。 r/s 比は何らかの原因で変動するが、春季の降水量極大(図2-2)に対応した r/s 比の増大は見られなかった。このように、現在降下している放射能のほとんどは成層圏由来ではなく、土壌よりの舞い上がり起源であることがあらためて示された。

2-3-5) 再浮遊の起源について

次なる疑問は、気象研究所で観測されている人工放射能を含む再浮遊土壌粒子はどこから運ばれてくるかである。これには、 $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比が手がかりを与えると思われる。図2-6に1990~93年の各月での $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比をプロットした。同比は1~5程度の範囲で変動した。1960~70年代の大気圏内核実験に由来する放射性降水物中の同比は約1.6

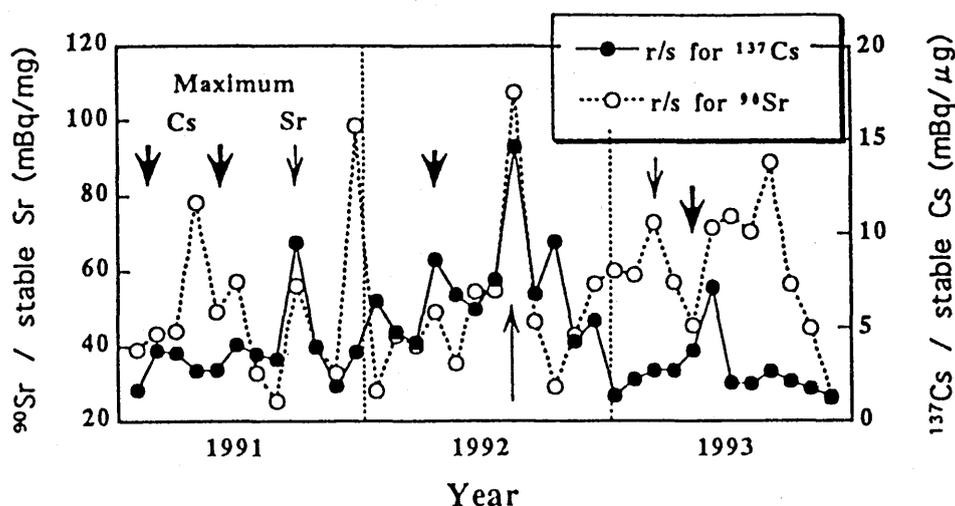


Fig. 2-5 Temporal variation in r/s ratio during 1991-93

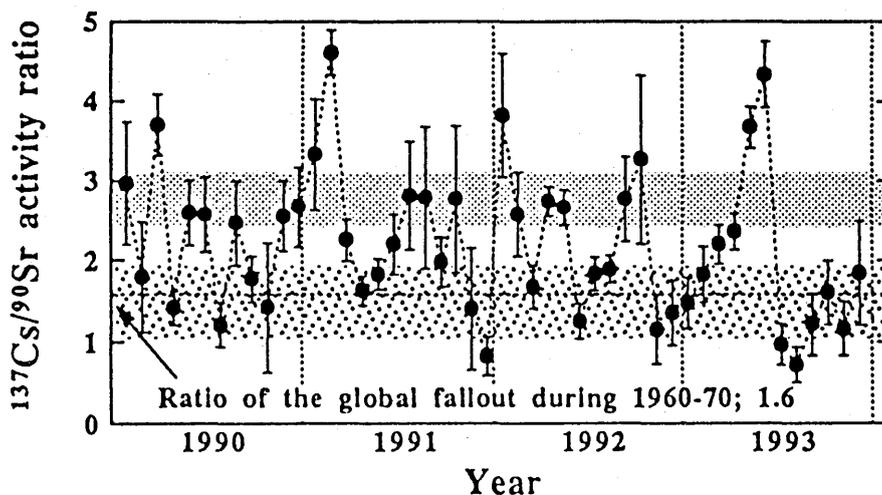


Fig. 2-6 Temporal variation in $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ activity ratio

Table 2-3 ^{90}Sr and ^{137}Cs in surface soils collected in Kanto area, Japan.

Sampling place	Date	^{90}Sr (mBq/g dry)		^{137}Cs (mBq/g dry)		$^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$	
Tochigi	1990, Jul	15 ±	0.40	45 ±	0.7	3.0 ±	0.1
Kanagawa	1990, Jul	9.9 ±	0.35	52 ±	0.8	5.3 ±	0.2
Gunma	1990, Oct	0.78 ±	0.074	3.4 ±	0.21	4.4 ±	0.5
Chiba	1991, Mar	0.13 ±	0.046	1.6 ±	0.15	12.3 ±	4.5
Ibaraki	1991, Mar	4.2 ±	0.21	43 ±	0.7	10.2 ±	0.5
Tokyo	1991, Jun	0.51 ±	0.10	3.8 ±	0.24	7.5 ±	1.5
Chiba	1991, Aug	0.20 ±	0.043	2.6 ±	0.18	13.0 ±	2.9
Kanagawa	1991, Aug	5.0 ±	0.24	16 ±	0.5	3.2 ±	0.2
Gunma	1991, Aug	1.3 ±	0.09	2.9 ±	0.19	2.2 ±	0.2
Average		4.1	5.2	19	21	6.8	4.1

Data are cited from Radioactivity Survey Data in Japan.

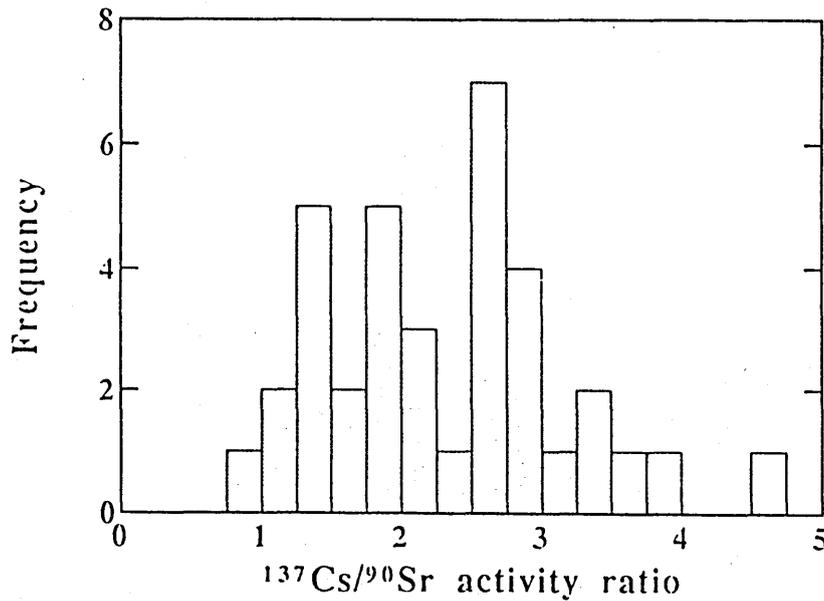


Fig. 2-7 Frequency distribution of $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ activity ratio during 1990-1992.

であった。両核種の物理半減期はともに約30年（表1-1）なので、降下した当時の組成が保持される環境下では、この比は現在でも1.6に近い値となる。実際に、先に述べた標準試料中ではこの比は1.6で保たれていることを確認している（Otsuji-Hatori et al., 1996）。地表に降下した放射性核種は、土壤粒子に吸着するが、地表からの蒸発より降水量が多い場合には、降水により徐々に地下方向に溶脱・移行していくと考えられる。移行速度は核種の属する元素の化学的性質に依存し、 ^{90}Sr と ^{137}Cs を比べると、 ^{137}Cs がより強く土壤粒子に吸着されるため、 ^{90}Sr が相対的に早く溶脱され、 ^{137}Cs が長く地表近くに残留することになる。したがって、日本（関東地方）の表層土壤での $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比は1.6よりも大きくなっており（表2-3）、 $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比は最大で10程度に達する場合がある。観測地点近傍の土壤粒子が、再浮遊の主要な起源であると仮定した場合、降下物中の $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比は常に1.6より大で、かつ、土壤の比に近い値が期待される。しかし、観測された $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比はそうした証拠を示していない。さらに、 $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比をよく検討すると、1.6前後と2.7前後に偏った分布を持つことが分かった。これを頻度分布でみると図2-7のようになり、ふたつの分布をもつことが確認できた。この頻度分布からして、二つないしはそれ以上の起源の異なる土壤粒子の再浮遊により、現在の放射性降下物は構成されていると推定される。 $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ 比が1.6を示す再浮遊塵の起源は、降水量が蒸発量を上回る日本の表層土壤粒子によると考えることは困難である。表土粒子の発塵は風の強い乾燥した季節に盛んになる。しかし、 ^{90}Sr と ^{137}Cs の降下量の季節変化は、日本の発塵の季節変化に必ずしも対応しない。太平洋側で風の強い乾燥した季節というのは、冬に対応している。一方、降下量のピークは、むしろ3ないし5月に出現している。この様に、人工放射性核種を含む再浮遊塵の起源については不明な点も多く今後の課題である。

2-4 核実験以外の人工放射性核種

2-4-1 はじめに

大気中の人工放射性核種は、特定の希ガス（ ^{85}Kr 、 ^{133}Xe ）を除いて、エアロゾルに付着して存在している。大気中の人工放射性核種の代表的発生源として、大気圏核実験、原子炉事故、意図的放出をあげることができる。大気圏核実験は1945年のアラモゴードにおける史上初めての原爆実験及びヒロシマ・ナガサキの原爆投下以来、1980年10月の中国の第26回大気圏核実験まで、ビキニ、ネバダ（米国）、ノバヤゼムリア、セミパラチンスク（旧ソ連）、ムルロア（仏）、ロプノール（中国）等で500回以上行われてきた。それらによる、放射性降下物の挙動については既に述べた。一方、代表的な原子炉事故については、1957年の英国のウィンズケール原子力発電所、1979年の米国のスリーマイルアイランド原子力発電所（原子力委員会、1980）、及び1986年の旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所を挙げることができる。さらに、最近、意図的な放射能の放出実験が行われていたことが明らかになってきた。例えば、米国ハンフォードの核兵器工場から、放射能の拡散・移流の様子を明らかにする目的で、多量の ^{131}I が放出されたことが公表されている。

大気圏核実験とは異なる放射能の大気中への放出過程の中で、規模が最も大きく、しかも詳細な研究が行われたのはチェルノブイリ発電所事故である。原子力発電所は現在も世界的にみれば増加の傾向にあり、しかも今後も長期にわたり稼働する可能性が高い。その結果として、原子力発電所事故の可能性の懸念も高まっている。ここでは、チェルノブイリ発電所事故による放射性降下物についての研究成果を紹介するとともに、人工放射能を指標として用いた最近のエアロゾルの長距離輸送の到達点についてまとめる。

2-4-2 チェルノブイリ原子力発電所事故

1986年4月26日、旧ソ連（現ウクライナ）のチェルノブイリ原子力発電所で深刻な事故が起こり、多量の放射能が大気中に放出された。多量の放射能の放出は図2-8に示すように、5月5日まで続いた（IAEA, 1986）。5月6日には最大放出時の百分の一に低下し、その後ほとんど放出は止められた。この間に約1850PBq（50MCi）の希ガスと同量の放射能が放出された。全体では、約3700PBq（100MCi）の放射能が放出されたと推定されている（IAEA, 1986；原子力安全委員会, 1987）。各核種について4月26日の放出量と5月6日までの総放出量をまとめた結果を表2-4に示す。始めの爆発時には揮発性の高い放射性核種（¹³¹I等）が主に放出された。一方、⁹⁰Srや¹⁰³Ruはむしろ放出期間の後半に多く放出されている。従って、約十日にわたる放出を通じて放射性核種間の組成が次第に変化していたことがわかる。ウィンズケールとスリーマイルアイランドの原子力発電所事故時に放出された¹³¹Iは、それぞれ740TBq（20kCi）と555GBq（15Ci）でチェルノブイリ発電所事故の放出量（270PBq（7.3MCi））と比べると後者がけた違いに大きいことが分かる。

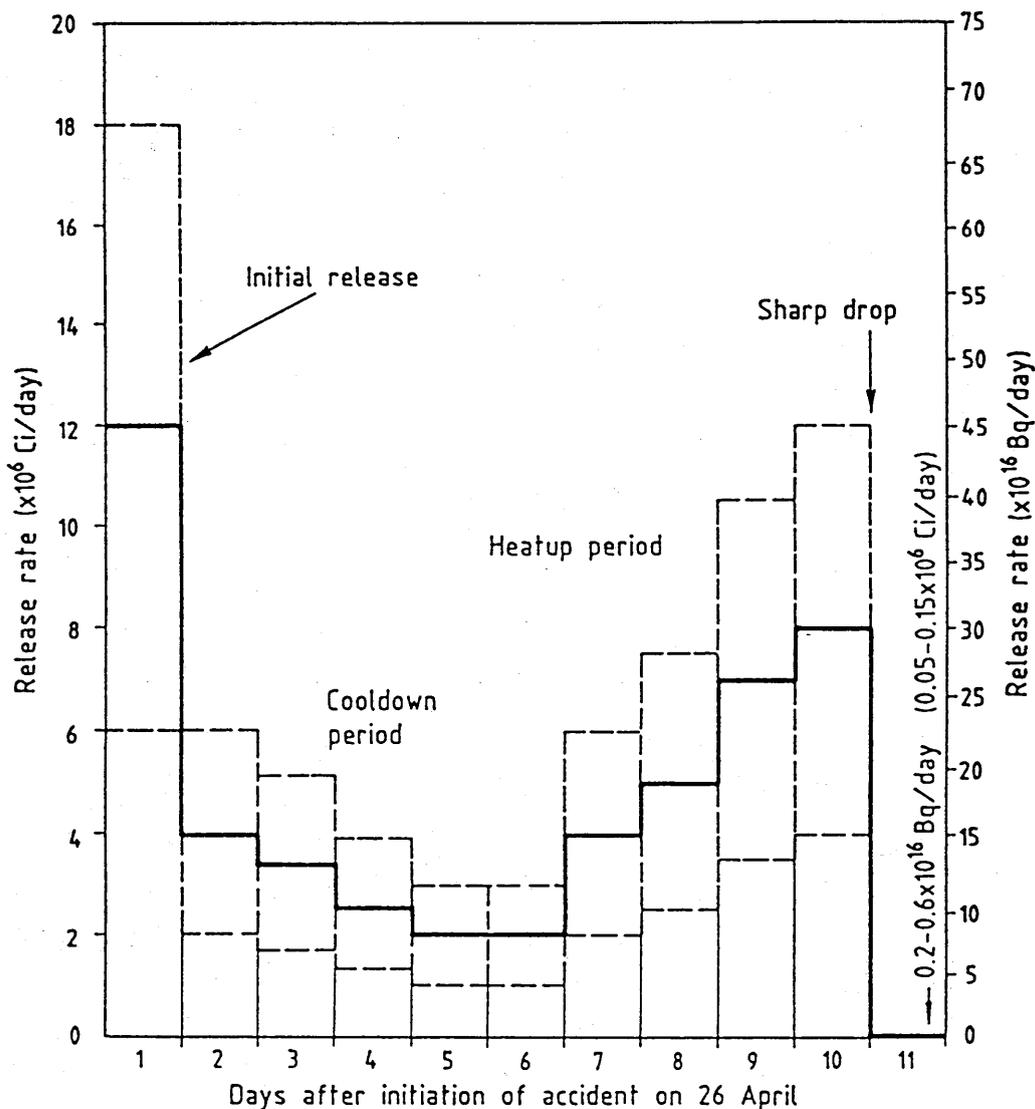


Fig. 2-8 The daily release of radioactive substances to the atmosphere during the Chernobyl accident (not including noble gases). The values shown are calculated for 6 May 1986 taking into account radioactive decay up until then. The radioactivity released on 26 April 1986 was $75-80 \times 10^{16}$ Bq ($20-22 \times 10^6$ Ci). The range of uncertainty for all releases is $\pm 50\%$.

チェルノブイリ発電所事故の顕在化は、4月27日にスウェーデンで異常に高い放射能が観測されたことに始まる (Devell et al., 1986)。それをうけて、世界の放射能観測機関で精力的に放射能調査が実施された。日本でも、特別な観測体制で大気・降水の放射能の監視が始められた。5月3日には、事故現場から約8,000km離れた日本でも初めてチェルノブイリ原子力発電所由来の放射能が観測された (Aoyama et al., 1986, 1987; Higuchi et al., 1988)。大気中の放射能は急速に増加し5月5日には極大になった。その後、やや放射能が減少した後、5月10日には、5月5日とほぼ同じレベルまで大気中の放射能は増加した。その後、徐々に減少した5月25日に第2のピークが見られた後、6月に入ると大気中の放射能レベルは急速に減少した。5月の¹³⁷Cs月間降水量は前月に比べ約4桁増加し、観測開始以来最も高い¹³⁷Cs月間降水量を記録した1961-62年の大規模核実験直後の時代と同程度であった。チェルノブイリ原子力発電所由来の放射能の影響は、日本を含め北半球のほとんど全ての地域に及んだ。図2-9には、つくばの観測結果も含め、世界のいくつかの地点の大気中の放射能の観測結果を示す (Larsen et al., 1986; Thomas and Martin, 1986)。

Table 2-4 Inventories and composition of radionuclides released from the Chernobyl accident.

Radionuclides	Released amount (PBq)		Released amount/ Reactor inventories (%)
	Apr. 26	May 6*	
¹³³ Xe	190	1,700	~100
⁸⁵ Kr	—	30	~100
¹³¹ I	170	230	20
¹³² Te	150	48	15
¹³⁴ Cs	6	19	10
¹³⁷ Cs	12	37	13
⁹⁹ Mo	17	120	2.3
⁹⁵ Zr	17	140	3.2
¹⁰³ Ru	22	120	2.9
¹⁰⁶ Ru	7	60	2.9
¹⁴⁰ Ba	19	160	5.6
¹⁴¹ Ce	15	100	2.3
¹⁴⁴ Ce	17	90	2.8
⁸⁹ Sr	9	80	4.0
⁹⁰ Sr	0.6	8	4.0
²³⁸ Pu	0.004	0.03	3.0
²³⁹ Pu	0.004	0.026	3.0
²⁴⁰ Pu	0.007	0.04	3.0
²⁴¹ Pu	0.7	5	3.0
²⁴² Cm	0.12	0.8	3.0

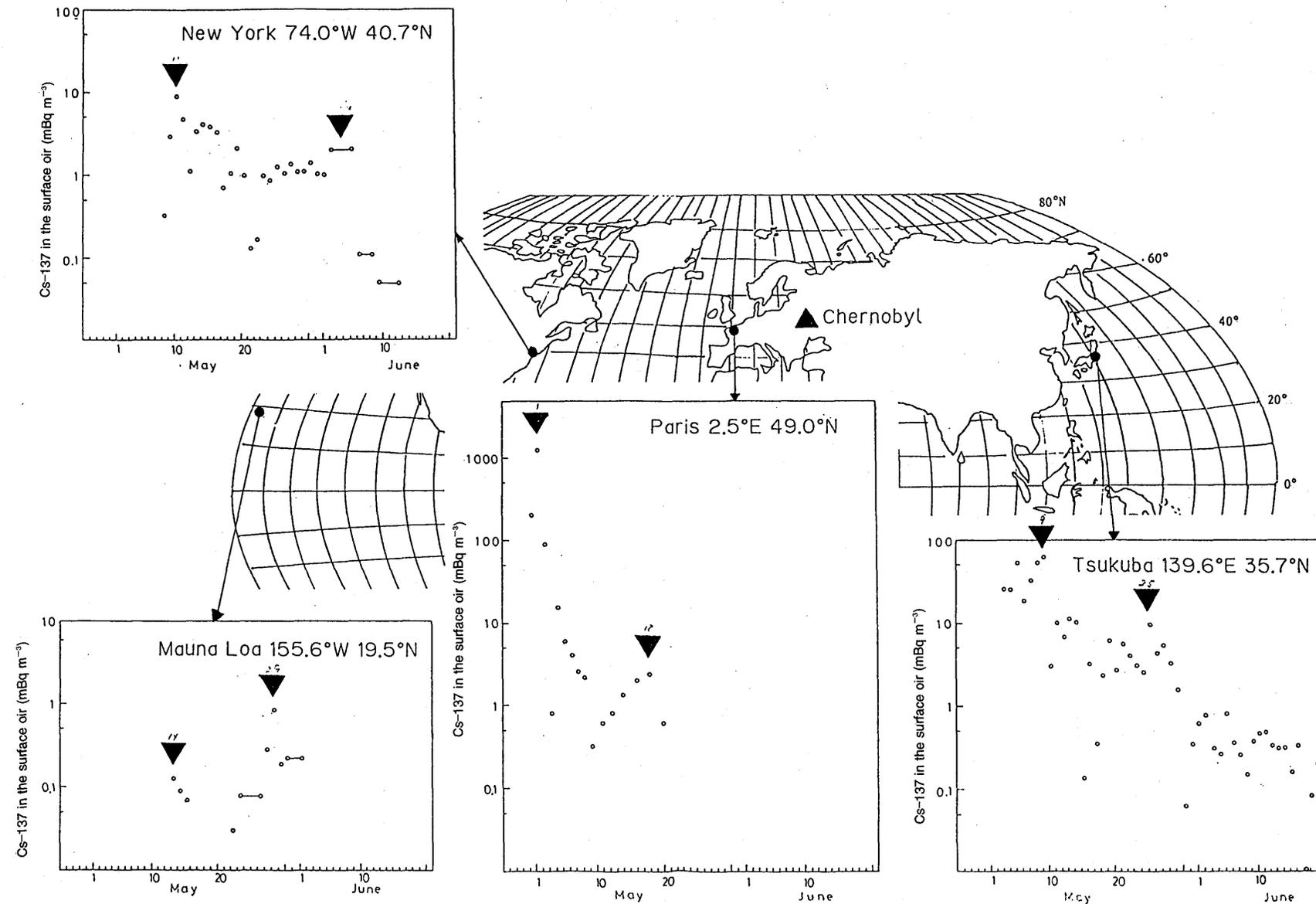


Fig. 2-9 Temporal variation of ^{137}Cs concentration in surface air derived from the Chernobyl accident (▼: peak of surface ^{137}Cs)

2-4-3 チェルノブイリ由来の放射能の輸送

原子力発電所事故は大気圏の核爆発とは異なり、放射能が放出された高度は低く、その主要な部分の高度は約1,500mと推定されている。(小規模の大気圏内核爆発の場合でも、大気中に放出された大部分の放射能は、上部対流圏まで打ち上げられるので、放射能雲の動きは500ヘクトパスカルの流跡線で解析していた。)従って、チェルノブイリ原子力発電所事故により放出された放射能雲の動きは850ヘクトパスカルの流跡線解析で行った。その結果を図2-10に示す。チェルノブイリ原子力発電所事故直後、北に輸送された放射能は偏西風により東に流されシベリアを南下しながら5月の初旬に日本に到達したことが分かる。

古典的な流跡線解析に加えて、世界的な観測が行われたために三次元物質輸送モデルの検証が行うことができるようになった (Davidson et al., 1987; Pudykiewicz, 1989)。チェルノブイリ原子力発電所事故による放射能雲の輸送拡散の様子をシミュレーションする試みは多くの研究者によって行われた。その内、1例として Pudykiewicz (1989) の結果を簡単に紹介する。モデルは3次元の移流モデルにIAEAの報告書による発生源情報と北半球の気象情報(風速、気圧等)を加えたものである。始めの2日間は放射能雲はスカンジナビア半島の方に主に流れた。一方、一部の分岐した放射能雲は中東の方向へ向かい黒海上に伸びている。始めの放射能雲の輸送は事故サイトの東にあった高気圧に支配されていたことが分かる。4月28日には気象の総観場は変化し、北の放射能雲は南下し、ポーランドを横断しドイツやオーストリアに流れた。この結果、ポーランドやオーストリアで比較的大きな放射能降下量を観測した。更に、北部の放射能雲は偏西風に乗りシベリアの横断が始まった。また一部はアイスランドの低気圧の影響を受け、グリーンランドの方向に流れた。5月2日には、グリーンランドに向かった放射能雲はグリーンランド上全体に広がり、一部北アメリカのケベックまで到達した。一方、偏西風に乘った放射能雲は5月4日にはアジア大陸を横断し太平洋に達した。この結果は流跡線解析と良く対応している。更に、5月8日には、ほぼ北半球規模で放射能雲は広がったことが分かった。

3次元物質輸送モデルによる解析結果をまとめると、次の点が指摘できる。上昇流等の気象条件により相対的に高

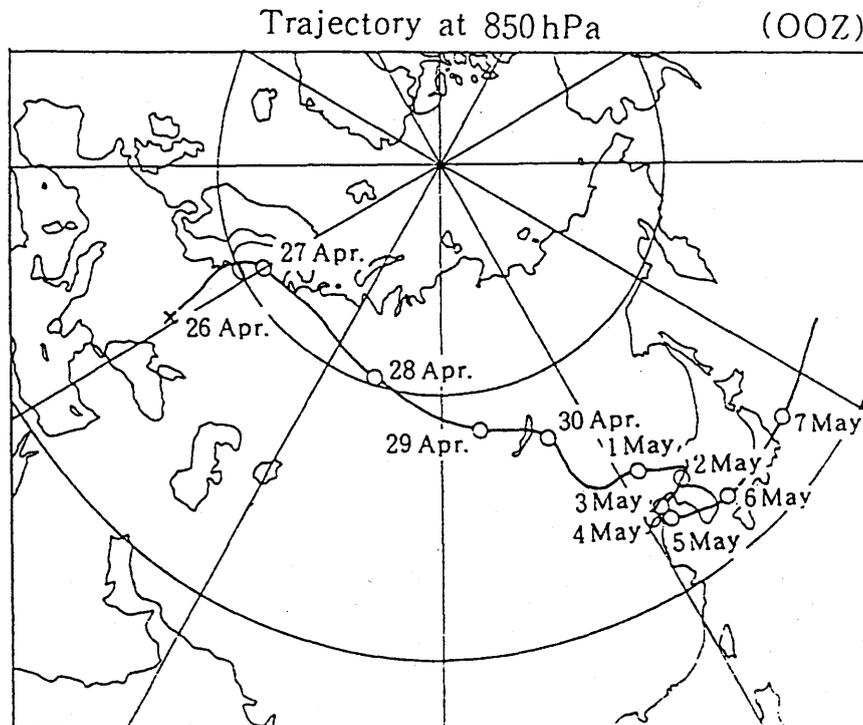


Fig. 2-10 Trajectory (850 hPa) of radioactive cloud from the Chernobyl accident.

い高度に輸送された放射性物質は主に平均的な偏西風により輸送される。米国の東海岸の北部の観測地点の放射能は、大西洋を横断したもので、低気圧の影響を受けた結果と考えられる。更に、北アメリカの高緯度地域の放射能は北極域を通過した放射能の影響を受けたものであることが明らかになった。

2-4-4 チェルノブイリ由来の放射能の分別

日本の大気・降水中で観測されたチェルノブイリ由来の放射性核種の核種組成を放出源の報告値と比較すると、放出過程の組成の変化を考慮に入れても大きく異なっている核種があることが分かってきた。図2-11につくばで観測されたエアロゾル中のチェルノブイリ放射能の核種間の比の変動を示す。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ や $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は観測期間中殆ど一定であった。ただし、放出源の放射能比と比較すると、つくばの大気中の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比はやや高いことが分かった。つくばのエアロゾル中の $^{103}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$ 比は5月の上旬は当初の放出時の放射能比と同じであったが、下旬に増加の傾向を示した。この変化は、放出過程（後半でより多くの ^{103}Ru が放出されている）による変動を反映しているものと考えられる。一方、 ^{90}Sr やプルトニウム同位体については、少なからぬ量（ ^{90}Sr の放出量の場合、 ^{137}Cs の22%、プルトニウムの場合、 ^{137}Cs の0.17%）の放出があったにも係わらず、日本の大気・降水で観測された放射能はかなり低い値であった（Hirose and Sugimura, 1990; Hirose et al., 1994）。特に、プルトニウムの場合、増加の程度が極めて小さいため、チェルノブイリ由来のプルトニウム同位体比（ $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ と $^{241}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ ）が核実験のそれと大幅に異なっていることによって、日本への飛来を確認することができた（Hirose, 1995）。この様子を明らかにするために、 ^{137}Cs を基準にして、日本に輸送されたチェルノブイリ由来の放射性核種の相対的な寄与率を次の式で計算した。

$$F_R = (D_R/D_{Cs}) \cdot (I_R/I_{Cs})^{-1} \cdot 100(\%)$$

ここで、 D_R は日本で観測された放射性核種の降下量であり、 I_R はチェルノブイリ原子力発電所からの放射性核種の放出量（表2-4）である。 ^{90}Sr とプルトニウムについて F_R の値を計算すると、それぞれ1.5%と0.18%となる。即ち、 ^{90}Sr の場合 ^{137}Cs に比べて約百分の1しか日本には輸送されてこなかったことを意味する。言い換えれば、輸送の過程で放射性核種間の分別が起こったことを示唆している。

この原因を明らかにするために、大気中からエアロゾルが除去される過程、即ちドライデポジション（乾性沈着）と降水による除去（湿性沈着）について検討を行った。つくばの大気・降水中のチェルノブイリ由来の放射能の分析結果によると、全体の降下量に対するドライデポジションの寄与は9（ ^{103}Ru ）～12（ ^{137}Cs ）%であり、大気中の放射能の大部分は降水によって除去されていることが分かった。

ドライデポジションによるチェルノブイリ由来の放射性核種の大気からの除去の様子を知るための指標として、各核種についてそれらの乾性沈着量と地表大気中の濃度からドライデポジションベロシティー（乾性沈着速度）を計算したところ、 $^{131}\text{I} < ^{137}\text{Cs} < ^{103}\text{Ru} < ^{90}\text{Sr} < ^{239,240}\text{Pu}$ という順序で大きくなることが分かった（Aoyama et al., 1992）。

即ち、放射能を帯びたエアロゾルの長距離輸送の間で、ドライデポジションを主に支配している過程である重力によって、チェルノブイリ由来の放射性核種の中ではプルトニウム同位体が最も沈降し易かったことが分かる。

降水による大気中のエアロゾルの除去には様々な要素が関係しており極めて複雑である。気象要素としては降水の性質や降水強度は重要な因子となる。降水による大気中のエアロゾルの除去を表す指標として washout ratio が使われてきた。つくばの個別降水で観測されたチェルノブイリ由来の放射能について washout ratio を計算したところ、 $^{137}\text{Cs} < ^{103}\text{Ru} < ^{90}\text{Sr}$ の順序で大きくなることが分かった（Hirose et al., 1993）。即ち、これらの核種の中では ^{90}Sr が最も降水により除去され易いことを意味している。

この様に放射性核種によって異なる除去機構を支配している要因を明らかにするために、各放射性核種を含むエア

ロゾルの粒径分布を調べた。その結果、つくばで観測されたチェルノブイリ由来の放射性核種を含むエアロゾルの平均粒径は $^{131}\text{I} < ^{137}\text{Cs} \sim ^{103}\text{Ru} < ^{90}\text{Sr} < ^{239,240}\text{Pu}$ という順序で大きくなることが分かった。この内、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 及び ^{103}Ru の平均粒径はサブミクロンであった。ドライデポジションや降水によるエアロゾルの除去のされ易さの順序と平均粒径の順序は良く対応していることが分かる。この結果は従来研究されてきた降水やドライデポジションによるエアロゾルの除去がエアロゾルの粒径と密接に関連しているという機構と良く一致している。即ち、ガス状で放出された放射性核種は、凝縮や付着等の過程によってサブミクロンのエアロゾルとなり、粒径が大きなエアロゾルに比較して大きな除去作用を受けなかったために、北半球のかなりの部分を汚染した。一方、不揮発性の放射性核種は放出時に生成した $1\mu\text{m}$ 以上のエアロゾルに含まれていたため、輸送過程で優先的に大気中から除去されたものと推定される。

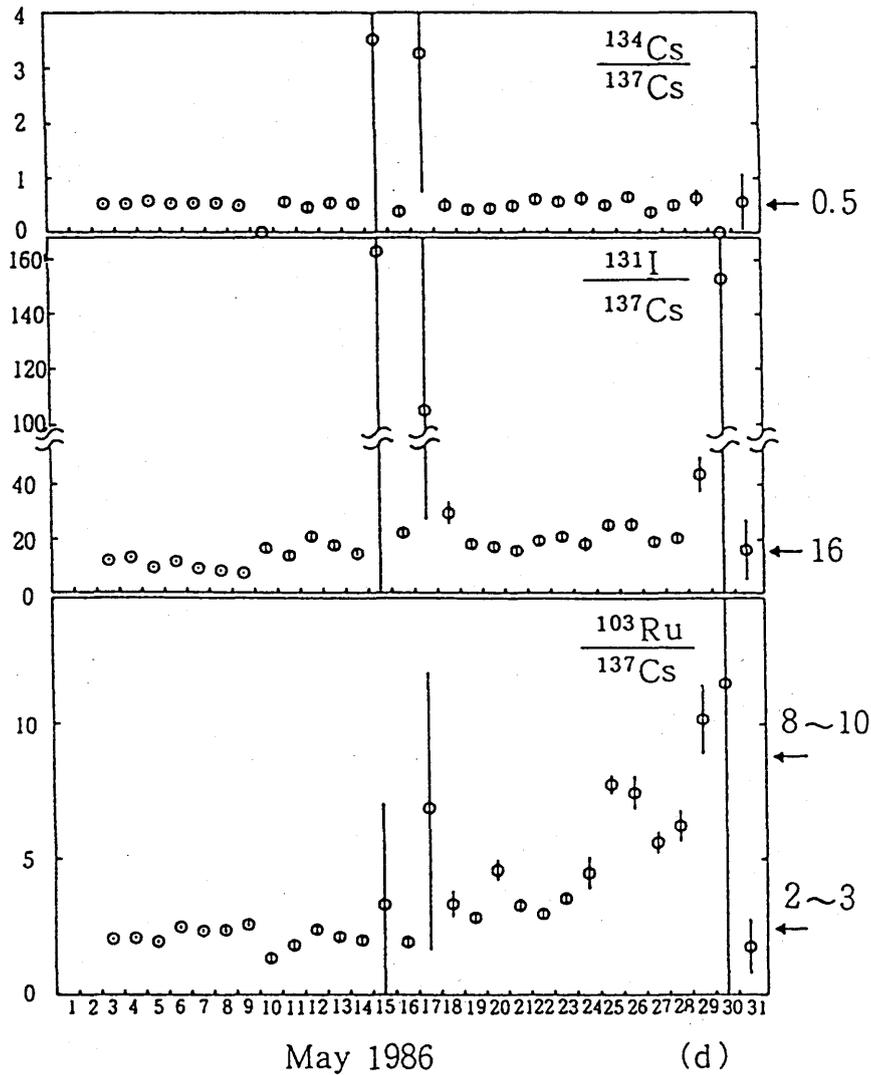


Fig. 2-11 Temporal variation of activity ratios of Chernobyl-derived radionuclides in surface air at Tsukuba.

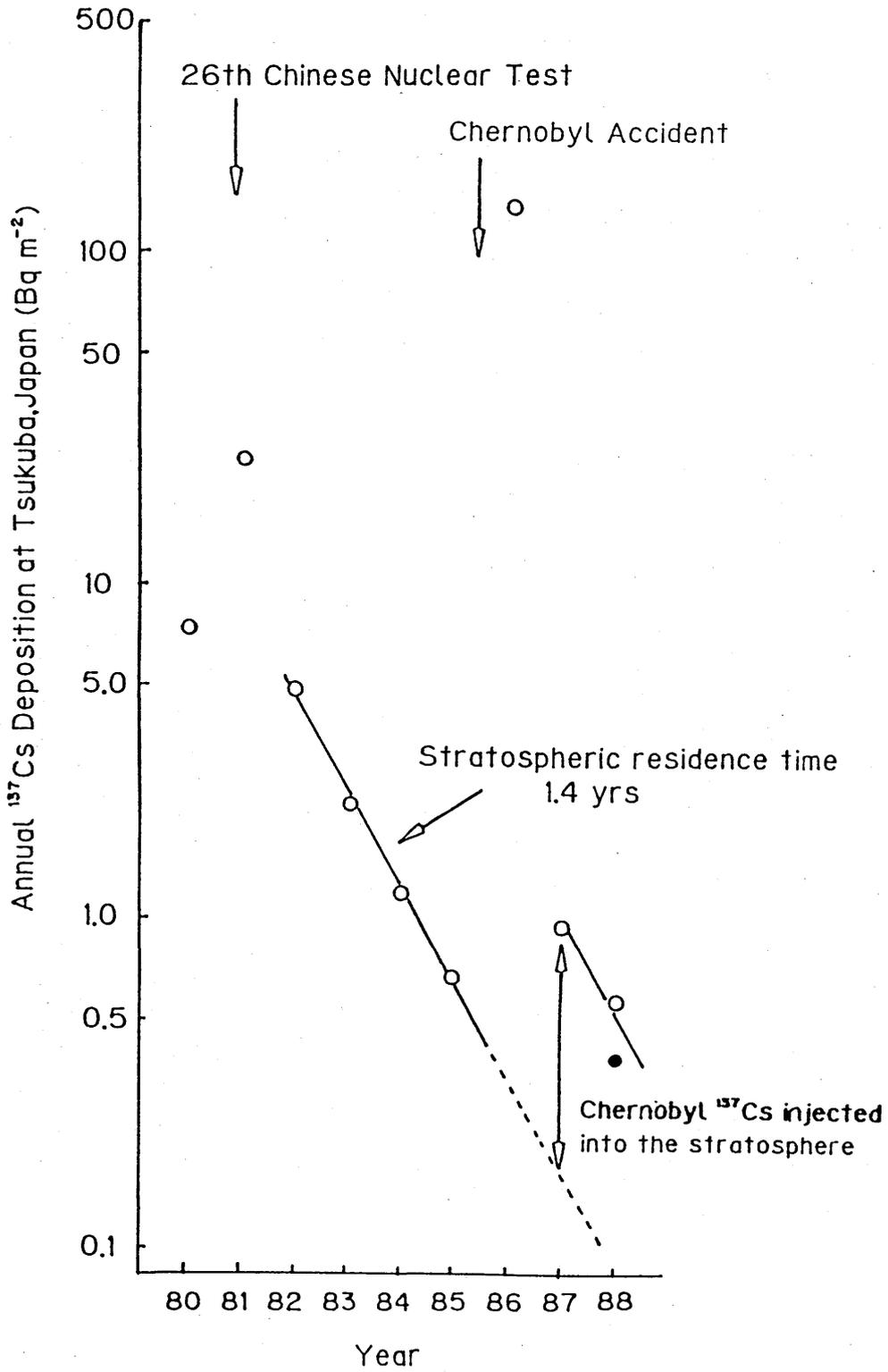


Fig. 2-12 Annual deposition of ^{137}Cs observed at Tsukuba from 1980 to 1988.

2-4-5 チェルノブイリ由来の放射能の成層圏への輸送

既に述べたようにチェルノブイリ原子力発電所事故の場合、核爆発とは異なって、放射能は比較的低い高度に放出された。放射能を含むエアロゾルが気象条件によって、成層圏まで輸送されるかどうかは重要な問題である。この様子を明らかにするために、半減期の長い¹³⁷Csの降下量の経年変化を調べた(Aoyama, 1988; Aoyama et al., 1991)。対流圏のエアロゾルの滞留時間は約30日で、成層圏に輸送されなければ、翌年に影響は見られない。これに関連して、チェルノブイリ由来の放射能の月間降下量の変化を調べたところ、25日の見かけの滞留半減期であることが分かった。¹³⁷Csの年間降下量の経年変化を図2-12に示す。1981年から1985年までの変化の延長線よりもやや高い1987年および1988年の年間降下量を観測した。また、1987年の降下物中にチェルノブイリ由来の¹³⁴Csを検出した。これらの結果は、チェルノブイリ原子力発電所事故に由来する放射能の一部が、成層圏にも輸送されたことを示している。事実、高層の飛行機観測によりこの現象は確認されている。成層圏に輸送された放射能の総量を、チェルノブイリ事故由来の放射性核種¹³⁴Csを用いて推定したところ放出量の約0.5%であることが分かった。

2-4-6 原子炉事故に付いてのまとめ

チェルノブイリ原子力発電所事故により放出された放射能は一種の大規模な拡散実験と見なすこともでき、それらの大気圏での実態の解明は、大気圏でのエアロゾルの挙動を知るための大変良い指標となる。気象条件に依存するものの、対流圏に放出された放射能は約半月で地球を一周することが原爆実験の結果分かっていたが、同時にこの時間スケールで北半球の中・高緯度のかなりの部分まで放射能汚染が広がるのが、チェルノブイリ由来の放射能の世界規模の観測結果やモデル等から確認された。さらに、影響の及ぶ広さはエアロゾルの粒径に大きく依存しており、相対的に降水等で除去されにくいサブミクロンの粒径のエアロゾルが大気中で比較的安定であることも確認された。また、放射能等の汚染質が下部対流圏に放出された場合でも、気象条件によっては一部成層圏まで輸送されることが分かった。