

チェルノブイリ原子力発電所事故の際の 放射性物質の地球規模拡散

吉川友章

1. まえがき

1986年4月26日未明、ソ連キエフ市北西130kmほどにあるチェルノブイリ原子力発電所で事故が発生し、多量の放射性物質が大気中に放出された。この事故は常識を超える原子炉の実験と、構造上の欠陥とがあいまって、炉材の火災と水素爆発が起こり、建屋の屋根が吹きとばされるという前例のないできごとであったが、気象の面でも、日本へ到達した放射性物質があたかも「トマホーク」型ミサイルでねらったように、対流圏下部をタイミングよく細長く流れて、従来の原水爆実験では見られなかった興味ある現象が起こっている。

事故の原因、経過、原子炉の構造上の問題については、それぞれの専門家の報告を見ていただくこととして、ここでは放射性物質が大気中に放出されてから、北半球全域に拡がるまでを数値シミュレーションし、実例により検証した結果について解説する。

2. 計算モデル

チェルノブイリ原発事故のあと、ヨーロッパ諸国ではいち早く放射性物質の到達を警戒するため、実測気象データを用いて、汚染気塊の流跡を計算したほか、スウェーデン等の一部の国では拡散計算を加えて、放射性物質の濃度や線量の分布を推定した。日本では原子力研究所が SPEEDI モデル（米国の TMI 事故を契機に日本の国内事故対策の一環として開発した移流・拡散・線量計算モデル）を使って、仮定の放出量を基に東欧圏の相対濃度を求め、実測データで調整して放出量を逆算した。また、アメリカのローレンスリバモア研究所は実測気象データにより、北半球規模の移流・拡散の再現計算を行った。そこで日本の気象研究所では、現在、気象庁の週間予報に使われている全地球規模の力学的気象モデルと、ランダム・ウォーク型の粒子拡散モデルを組み合わせ、北半球を対象として放射性物質の12日間の移流・拡散を計算した。

気象モデルは気圧、温位、水蒸気量、気流等を求める各種の方程式を地表から成層圏までの12層内でスペクトル法で解き、各気象要素を球面調和関数の和として表現する手法で、週間天気予報の基礎として、毎週2回、10日位先までの予測に使われている。したがって原理的には放射性物質の放出量さえ与えられれば、事故時（4月26日）を基点として、10日以上の子測計算ができるが、今回は放出データを手入手してから事後評価を行ったため、長時間積分の誤差を実測気象データで修正するのが得策と考え、2日ごとに修正して、放射性物質がほぼ北半球全域に拡がるまで、12日間の計算を行った。

一方、放射性物質の拡散は、すでに国内の事故にそなえて、拡散方程式の差分解法モデルが用意されているが、球面座標への変換の問題、原子力研究所の SPEEDI モデルによる東欧の拡散計算やアメリカの北半球規模計算との照合を考慮して、それらと同じ概念の粒子拡散モデルを採用した。このモデルは、原子力サイトから多量の粒子の放出を想定し、個々の粒子が気流に流されながら、乱流拡散によってランダムに動くとして、全粒子を追跡する手法で、今回は水平拡散は流れに対して小さいとして省き、鉛直拡散のみを算入した。結果は風向、風速が高さにより異なるため、鉛直拡散だけでも水平に拡がり、実態に近い動きが表現された。ただし、放射性物質のうち、粒子は粒径に応じて重力落下したり、大気中水分も関係する衝突併合、雨による洗い流し効果が加わるが、現時点ではこうした現象を含む計算手法が確立されていないため、気体粒子として扱った。

表1 暫定計算の放出インプット

放出1	4月25日20～22時 (GST)*	4,800個
放出2	4月25日22～24時	4,800個
放出3	4月26日00～24時	2,880個
放出4	4月27日00時～28日24時	2,880個

* グリニッチ標準時による。チェルノブイリ時刻はこれより3時間早い。立ち昇り高度は1,000mと仮定。

3. 放射性物質の放出

チェルノブイリ原発の事故による放射性物質の放出は、いまだに放出量、到達高度ともにデータが不十分で、周辺の放射線量の測定から、様々な推定がなされている。気象研究所の計算も、1986年6月頃は放出資料がなかったため、事故当時の時間帯と放出粒子数を表1のように区切り、相対的な拡散パターンを見ることとした。粒子分布は放出量がわかった段階で、粒子1個当たりの放射線量を与えて放射線量に換算することができる。これらの個数は電算機の容量と計算時間を考慮して適当に与え、放射性希ガスの放出量と比例すると仮定した。

さらに、9月頃に放出量がある程度明確に報告された時点では、図1のように日ごとに変動する放出量を与え、4月26日から5月6日までの重合効果を計算した。放出は26日に火災と水素爆発により大量に起こり、その後5日目まで、放水と砂の投下により火災をおさめたため、鎮静化したように見える。ところが、6日目に放射性の水の河川への流出を恐れて散水をやめたため、ふたたび炉内が高温となり、放射性の水蒸気がふき出し始めたが、その後の密閉が成功して、10日目には洩出がほとんど終結した。

4. 計算結果

図2 a～i に表1の放出1をインプットとして、その後の12日間の移流・拡散を計算した粒子の平面分布を示す。各高度に分布する粒子を地表面に投影した図で、10分きざみで計算された結果から、各日の0時（グリニ

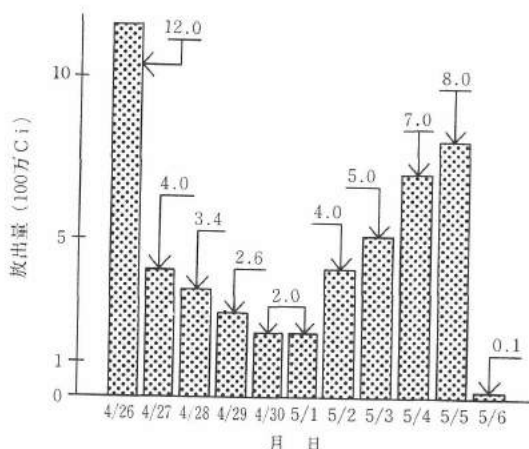


図1 チェルノブイリ原子力発電所事故により放出された放射性物質量（ソ連資料による）

チ標準時）の分布を選んで示した。また図3 a～fは南から北を見たときの高度・経度断面を示す。高度を σ 座標 ($\sigma = P/P_s$, P : 各点の気圧, P_s : 直下の地表気圧) でとって、対数表示してあるため、断面図は上空ほどびずんでいるが、図3 aの()の中に示した数字がおおよその実高度を示す。

4月25日20～22時 (GMT) に放出された放射性物質は、28日頃まで南東ないし南々東の気流に乗って直進し、バルト海に達した。当初1,000 m上空までの対流上昇を仮定した放射性物質は、鉛直方向に急速に拡散し、数時間で地上から2,000 mの間に分布したが、その後の鉛直拡散はゆるやかになった (図3 a～b)。28日、バルト海の上層に達した放射性物質の一部が強い西風により東へ流れ始めた。強い西風は26日から28日にかけて、シベリア北部をゆっくり移動した強い低気圧の後面にふき込んだもので、シベリアを横断してバイカル湖の東まで続いていた。放射性物質の一部はこのシベリア上空の西風に乗り、5月1日にはバイカル湖の上空を通過した (図2 d, e)。

さらにこのころ、シベリア北部を東進した低気圧の一部が分かれて南下し、3日に太平洋上へぬけた。放射性物質はこの低気圧後面の北風に入り、ソ連沿海州を南下して、5月2日に朝鮮半島のつけ根、5月3日に日本に到達した (図2 f, g)。放射性物質がシベリアを横断した高度は2～4 kmで (図3 d)、日本近くで低気圧後面の下降気流により下層に拡散し、3～4日に地上に達した。この結果は実測とよく一致する。

ただし、このようにして極東へ運ばれた放射性物質は全体量から見るときわめてわずかで、大部分は東ヨーロッパを中心として長時間滞留した。28日、スカンジナビア半島へ達した放射性物質は、29日に一部が北上を続けてグリーンランド方面にぬけたが、大部分は拡散しながら逆もどりを始め、5月1～2日にはソ連国内とポーランドの一部、5月3日にはポーランドの広い範囲と南の黒海にまで達した。5日には東ヨーロッパのほぼ全域、西ドイツ、デンマーク、南はギリシャ、トルコに及んだ (図2 h)。

5月10日には、スカンジナビア半島を横断してグリーンランド方面にぬけた放射性物質が大西洋を渡り、アメリカ東岸に達した。一方、日本附近を通った放射性物質が太平洋を越えて、このころアメリカ大陸へ達して、低緯度を除く北半球のほぼ全域が汚染されたことになる (図2 i)。

図4は放出1の放射性物質が日本附近（北緯30～45度、

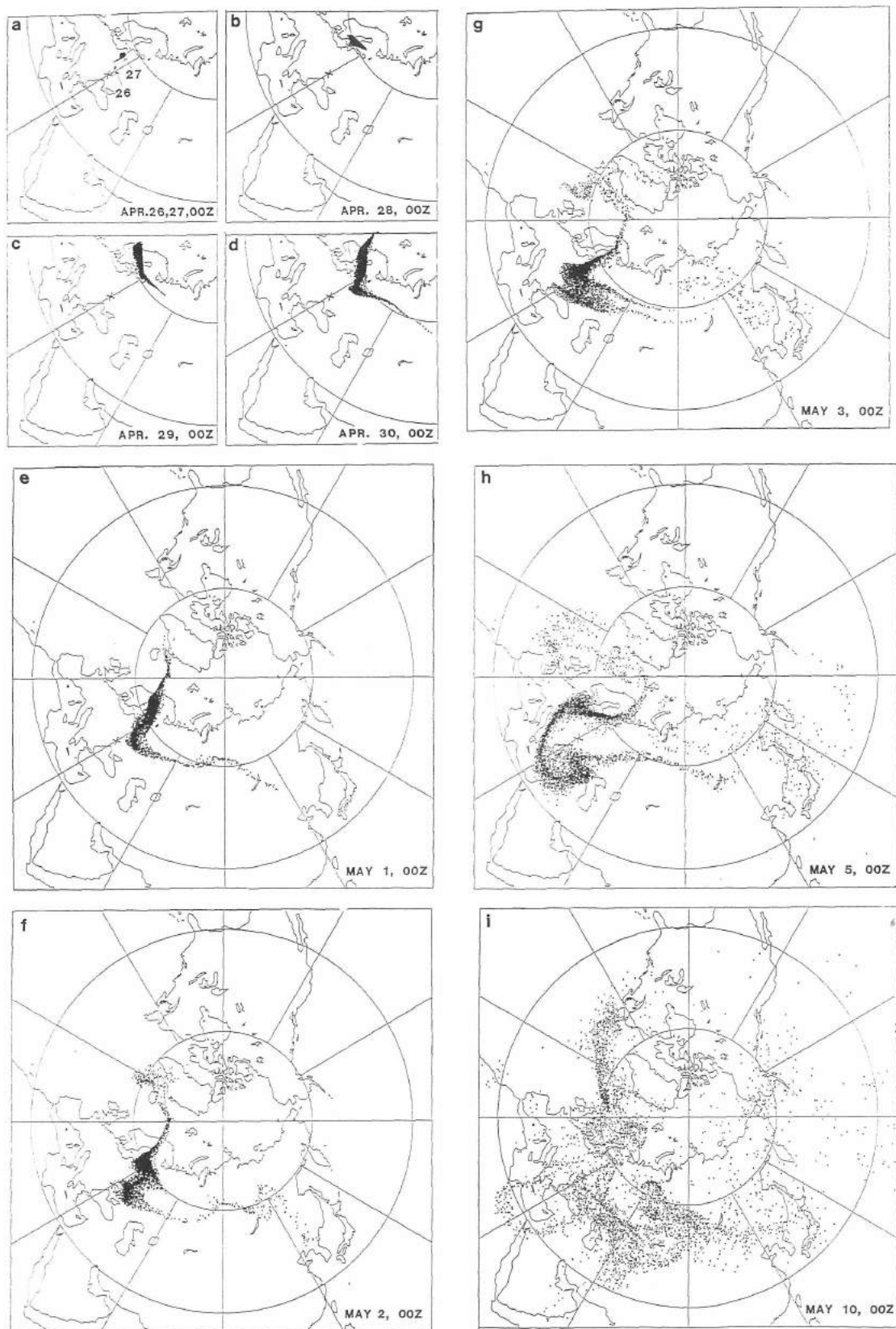


図2 特定時間に放出された放射性物質の水平分布 放出 4月25日 20:00-22:00Z 高さ $\sigma=0.9$ (約1,000m) 粒子数4,800

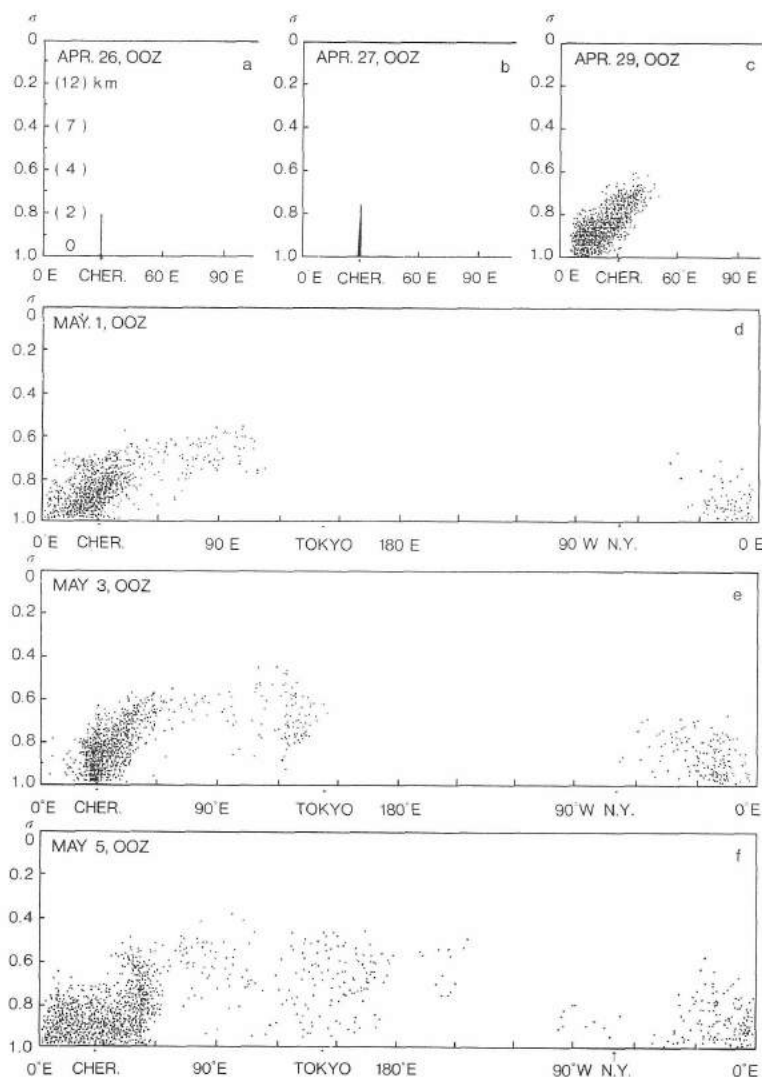


図3 放射性物質の高度—経度面投影図
放出 4月25日 20:00—22:00 高さ $\sigma=0.9$ (約1,000m), 粒子数4,800

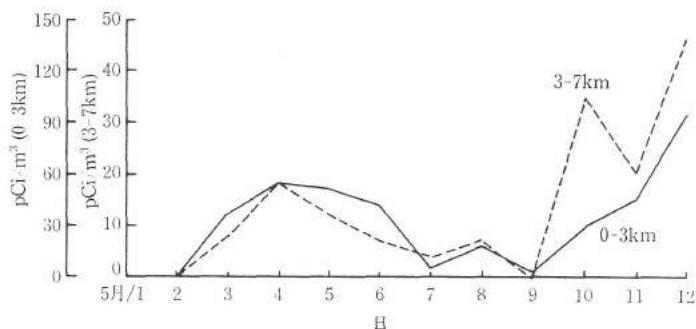


図4 日本附近の平均粒子濃度(放出1による)
放出 4月25日 20:00—22:00 Z 高さ $\sigma=0.9$ (約1,000m)
粒子数4,800 (130°—145° E, 30°—45° N)

東経130°—145度の領域)に達したときの粒子数を示す。図中の実線は地上から約3 km上空まで、破線は3～7 km上空の値を示す。この場合、7 km以上には粒子がまったく上昇していないのが注目される。放射性物質は3日にこの領域に初めて到達し、6日までに第1のピーク、10～12日に第2のピークを示す。実測でも日本では4日の測定で初めて検出され、時間的に一致する。

図4の縦軸は領域内の粒子の個数のほか、全放出量を適当に仮定したときの空間平均放射線量を示す。今回の線量換算は、ソ連の報告がなかった時点で、イギリスの情報に従って 10^8 Ciとした結果で、第1のピークが、 60 pCi/m^3 、第2のピークが約 100 pCi/m^3 となっている。日本では放射性希ガスの測定はヨウ素しかなく、その最高値は 10 pCi/m^3 、広域平均では数 pCi/m^3 であった。希ガス中のヨウ素含有率(約10%)を考慮すると、計算と実測の対応は妥当といえる。後のソ連報告では、希ガスの全放出量は $5 \times 10^7 \text{ Ci}$ になっていた。

上空3～7 kmでは、時間変動は3 km以下とほぼ同じであるが、第2のピークが大きく計算された。上空10 kmあたりの航空機による実測では、地上より数日おくれで $0.2 \sim 0.5 \text{ pCi/m}^3$ が検出された。

放出1より2時間おくれで放出された同量の放射性希ガス(放出2)の計算では、日本への到達は放出1と同じ日であるが、3～6日の第1ピークより、10～12日の第2ピークが大きく表現された。放出3と放出4では、放射性物質は5月8日以後に日本へ到達し、上空で先に濃度が上がっている。したがって5月3日に日本へ到達した放射性物質は、4月25日の深夜から26日

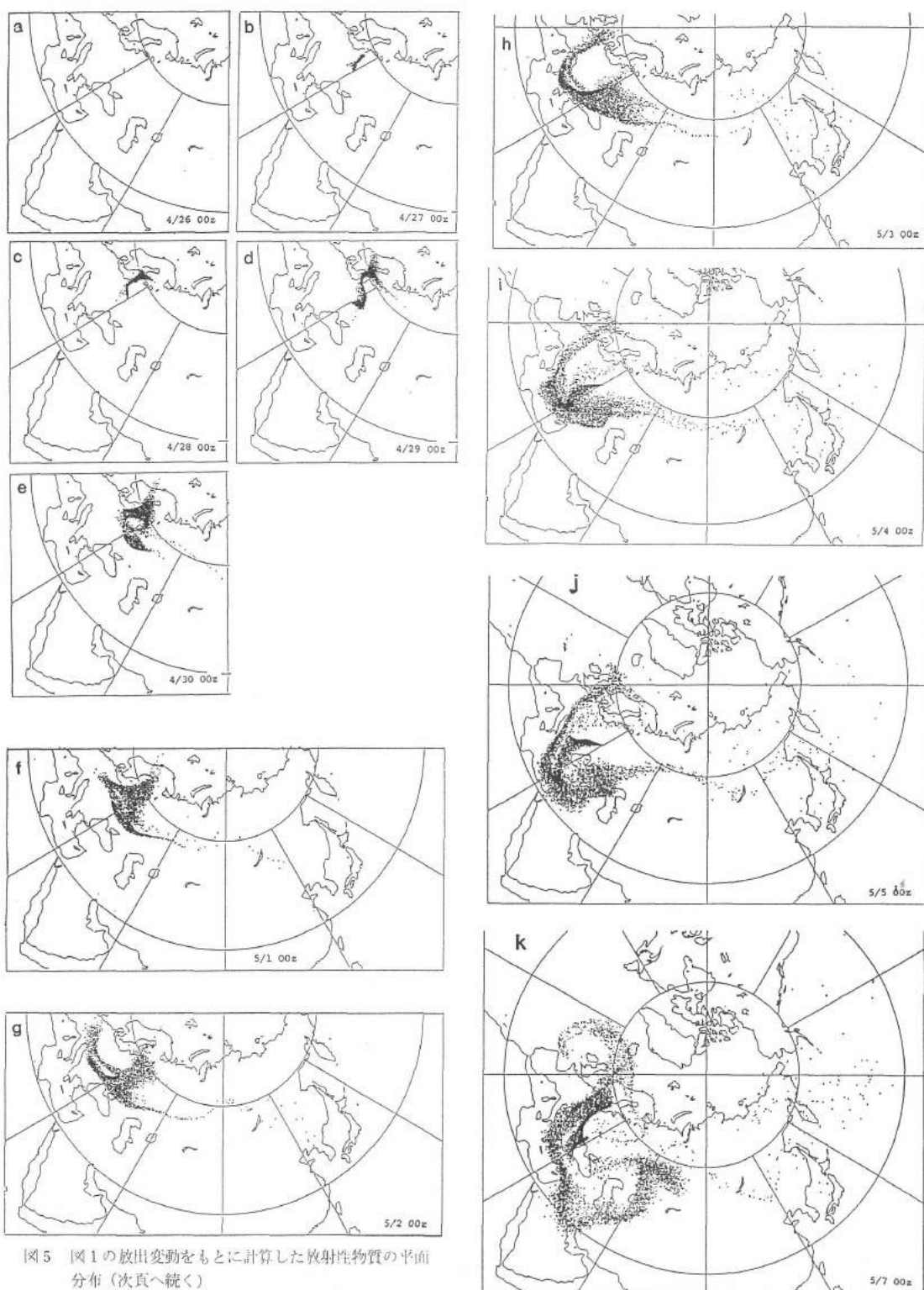


図5 図1の放出変動をもとに計算した放射性物質の平面分布(次頁へ続く)

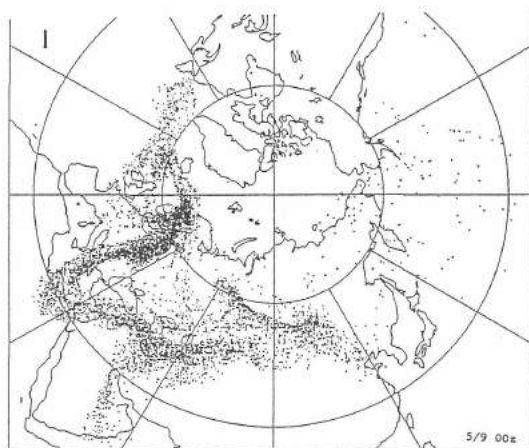


図5 (前頁から続く)

早期に放出された部分に限られ、わずか2時間の放出時間差でも、前に述べたシベリヤ北部を東進した低気圧後面の西風に乗る量が変わり、その後の濃度分布を大きく変えることを示唆している。

その後、IAEA へのソ連の公式報告等から、最も確からしい放射性物質の放出量として、図1のような日放出量が得られたため、これをもとに時間変動を推定し、放出1～4の暫定計算と同じモデルで再計算した。その結果から、図2と同じ平面図をとり出すと、図5 a～1のようになる。4月29～30日に、スカンジナビア半島附近で、低気圧にふき込む上空の南東風と下層の西風によって、放射性物質がV字型に分かれるしくみは図2と同じである。またその一部が東へ流れて、日本へ到達する様子も変わらないことから、極東方向へ流れた放射性物質は26日未明の数時間内に放出された部分に限られ、図2の短時間放出の計算結果でも、極東への流れを定性的に表現していたといえる。ただし、そのあと放出された放射性物質は先に放出されたV字型分布の下方から内部へつき進み、ほとんどがヨーロッパ地域に留まっている。したがって、図3と同じ鉛直断面もパターンはほとんど同じで、放出源周辺の濃度のみが一層高くなっている。

さらに、放射性ヨウ素ガスに限定して、各国の濃度の推定計算と実測の結果を示すと図6のようになる。図中の実線は実測の日変動、太い横棒は実測最高レベルを示す。点線あるいは破線は計算値で、スウェーデンがやや過小、バルチック海上空がやや過大に評価されているのは、計算と実測はほとんど一致している。

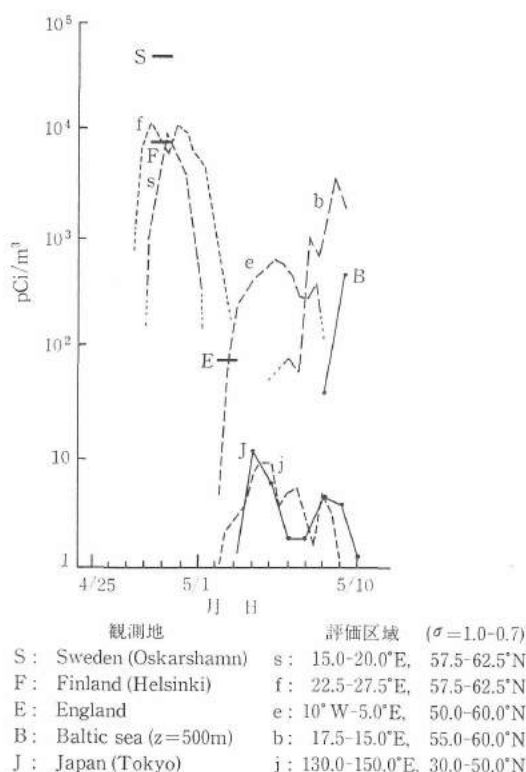


図6 各地の推定計算濃度と実測値

5. あとがき

放射性希ガスの移流・拡散の数値シミュレーションにより、地球規模の挙動を理解することができた。変動する気象条件では、放出高度や放出時間のわずかな差がその後の拡散、特に放出源から遠方の濃度分布に大きく影響することがわかった。気流の計算精度もさることながら、不正確なインプットデータが大きな予測差をもたらすことから、予測に際しては、限られた仮定の計算だけでなく、少しずつ条件を変えたシミュレーションを行い、実況と照合しながら、総合判断する必要がある。今回のチェルノブイリからの放射性物質の日本への到達は、事故の発生時刻と二つの低気圧のまわりの気流のタイミングのよい受け渡しが一一致したためで、これらのうちのどれかがずれていれば、日本への到達濃度は当初予想されたようにバックグラウンドと同じレベルで、検出限界すれすれであったと考えられる。

さらに粒子の沈着、衝突併合、雨の効果等もモデル化して、局所高汚染の予測をする必要があるが、今後の課題として研究することとしたい。

(気象研究所)