

動燃東海事故による 放射性セシウムの 関東平野への広がり

青山道夫 大原利眞 小村和久

火災・爆発事故の発生と放射性物質の放出

1997年3月11日、動力炉・核燃料開発事業団(動燃、改組され現在は核燃料サイクル開発機構)東海事業所“アスファルト固化処理施設”(茨城県東海村)で火災・爆発事故(爆発は20時04分ごろ)が発生した⁽¹⁾。その事故によって大気中に放出された放射性物質が、水戸、大洗、およびつくばで採取した大気浮遊塵の試料から検出された。

放射性セシウムのうち¹³⁷Csが上記3地点で確認されているほか、¹³⁴Csも大洗およびつくばで確認されている。放射性セシウム以外にも、この事故によってプルトニウムや放射性ルテニウム、ヨウ素、ストロンチウムなどが環境中に放出されているが⁽²⁾、量的に少なかった、あるいは揮発性が低く大気中を長い時間輸送されうるような状態にならなかったため動燃東海事業所の構内以外では確認されていない。

つくばで採取した事故後数日間の大気浮遊塵試料中からも、継続して¹³⁷Csが検出された。このことは、事故によって大気中に放出された放射性物質が事故後数日間にわたってつくば周辺に存在していたことを示している。3月17日以降は放出された放射性物質はつくばで採取する大気浮遊塵中からは検出できなくなった。これらのことから、われわれは事故由来の放射性物質が数日間の間に関東平野程度の大きさにひろがり、関東平野上を行き来した結果、上述したようなつくばでの観測結果になったと考えた。そこで事故前後に採取された大気浮遊塵および降水の精密測定さらに

事故由来放射性物質の数値シミュレーションをおこなない、事故由来の放射性物質がどのような挙動をしたのかについて検討した^{(3)*}。

事故前後に採取された大気浮遊塵 および降水の精密測定結果

茨城県つくば市長峰の気象研究所では、観測露場の地上高約1.2mのところ、大容量集塵器を用いグラスファイバー濾紙に大気浮遊塵を捕集している。集塵流量は毎分700lに自動調整され、1日ではおよそ1000m³の大気を吸引している。

通常は毎週1回月曜日10時ころに濾紙交換をおこなうが、3月12日(水)朝の事故報道から判断して、同日10時に濾紙交換を実施した。したがって、3月10日(月)に通常の濾紙交換をおこなっていたので、この試料は3月10日10時から3月12日10時までの2日間の試料となった。引き続き翌13日朝10時にも再度濾紙交換をおこなない、事態を正確に把握できるよう用意をした。その後は、4日間の試料採取をおこなったあと、3月17日(月)に通常の週1回の濾紙交換(7日分で1試料)の体制にもどした。

このような観測体制をとった背景には、この数年間、気象研究所地球化学研究部でドイツ大気放射能研究所(BfS-IAR)との国際協力によって、動燃東海事業所再処理工場から管理放出されている放射性希ガス⁸⁵Krのつくばにおける連続観測をおこなってきたことが挙げられる。そのなかで関東地方で北から東にかけての風が卓越し、かつ

* 青山道夫、五十嵐康人、宮尾孝、広瀬勝己(気象研究所地球化学研究部)が大気浮遊塵採取、放射能測定、気象データおよび放射能データの解析にあたり、大原利眞((財)計量計画研究所)が数値シミュレーション、小村和久、山本政儀(金沢大学理学部付属低レベル放射能実験施設)が極低バックグラウンドでの放射能精密測定をおこなった。なお、観測結果については、すでに専門誌上で発表しており⁽³⁾、数値シミュレーションの結果については専門誌への投稿を準備している。また、ここで紹介しきれなかった数値シミュレーションの結果についての図などは、気象研究所地球化学研究部のホームページ(<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ge/PNC-SIM.html>)上で公表している。

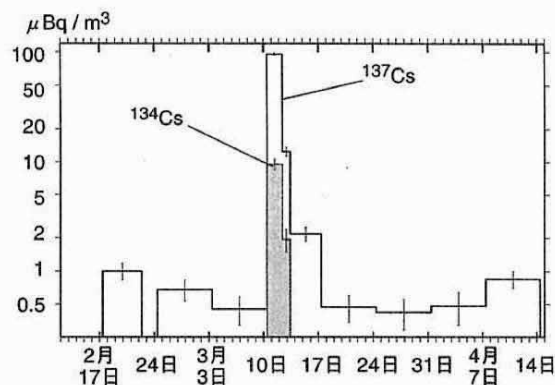


図1 つくばにおける地表大気中放射性セシウムの濃度変化。グラスファイバー濾紙を使い大気中の大気浮遊塵を捕集し計測して得られた放射性セシウムの濃度。毎分700 l(1日ではおよそ1000 m³)の大気を連続吸引しており、通常は毎週月曜日10時ごろに濾紙交換をおこなうので1週間分の大気浮遊塵を集めることになる。緊急時には、本文に示すように臨時に濾紙を交換する。この濾紙上の放射能総量を測定器によって計測し、通過した空気量で割って1 m³あたりの放射性セシウムの濃度を求めている。したがって示されている濃度は、それぞれの試料採取期間における平均値である(文献⁹⁾図3)。

東海村の再処理工場が稼働して放出がある場合、⁸⁵Krの濃度が北半球バックグラウンド値に比してつくばでは1桁上昇することを、われわれはしばしば認めてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、長寿命核種の¹²⁹Iの茨城県内での分布は、東海村地域から西あるいは南西に延びており⁽⁶⁾、⁸⁵Krの場合と同様に東海村地域から西あるいは南西方面に輸送されやすいことを示している。したがって、今回の事故によっても放射性物質が大気中に放出されていた場合には、つくばで検出されるかもしれないと考えたのである。

事故前後のつくばの大気浮遊塵10試料について、きわめて低いバックグラウンドで精密測定をおこなった、¹³⁷Csの濃度変化を図1に示す⁽⁷⁾。

図1に示すように、3月10日までの大気浮遊塵中からも、0.5~1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ の¹³⁷Csが検出されている。また、3月17日以降の大気浮遊塵中からは、0.4~0.9 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ の¹³⁷Csが検出されている。これらの微量の¹³⁷Csは、1945年7月以来の大気中核実験や1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故によって世界中にばらまかれたものが、地表付近に残留していて、土壌粒子とともに舞い上っているものと考えられ、北半球での1997年

3月の大気中の¹³⁷Cs濃度範囲(0.8 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$: ドイツのシャウインスランド~15 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$: クウェート、ともに <http://www.cdidc.org> で公開されている包括的核実験禁止条約CTBTのための監視地点での濃度)とほぼ同じか少し低い値である。

それに対して、3月10~12日につくば市で観測された¹³⁷Cs濃度は、事故前の約36時間をふくむ3月10日10時から3月12日10時までの48時間の平均で96 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ であり、実際に通過した放射性物質を含んだ空気塊の濃度はこの4倍以上(48時間/(48時間-36時間)=4倍、これを時間希釈と呼ぶこともある)の約400 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 以上と推測されるので、1945年7月以来の大気中核実験や1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故由来の¹³⁷Csでは説明できない。

さらに、9.5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ の濃度で¹³⁴Csも検出されている。したがって、つくばでの¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比は0.1となり、動燃東海事業所構内で事故直後に観測された¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比の0.09~0.12とよく一致している。これらのことは、つくばで検出された放射性セシウムが動燃東海事業所“アスファルト固化処理施設”事故に由来することを証明している。さらに3月12日~13日の試料、3月13日~17日の試料からも、大気中核実験やチェルノブイリ原子力発電所事故由来の¹³⁷Cs濃度をこえる有意なレベルで¹³⁷Csが引き続き検出された。

また、気象研究所では、1957年4月から40年以上にわたって連続して日本各地の降水を連続採取し、降水中の¹³⁷Csなどを測定し続けており、今回もその降水試料の測定をおこなった。つくばおよび東京(千代田区大手町)の降水(1997年3月1カ月の総量)の測定結果によると、¹³⁷Csは検出されたものの、過去の大気中核実験由来の¹³⁷Csの値と比較すると変動の範囲内であり、事故由来の放射性セシウムは降水ではほとんど地表に落下しなかったと思われる。

当時の気象条件

当時の関東地方の気象条件としては、3月11日朝に関東から東北地方を低気圧が通過し、その

あと12日から13日にかけて高気圧におおわれていて風も弱くなっていた。14日になって、高気圧が東に移動するとともに、つぎの低気圧が少量の雨と10 m/秒をこえる北よりの風をともなって関東平野にやってきた。つくばでは14日の深夜から風が吹き始め、15日には7.5 mm、16日には6 mmの降水を記録している。17日の夜まで北よりの風が10 m/秒程度吹いていた。関東平野全域での降水は、事故発生の日3月11日20時以降3月12日と3月13日については、アメダス観測地点のすべてで観測されていない。関東平野で、事故後最初に降水を観測したのは、関東北西部の群馬県内の6地点で3月14日23時から24時である。

これらの気象条件を考慮したとき、事故によって大気中に放出された放射性物質が関東平野に広がり、数日間関東周辺にとどまった結果、前述のようなつくばでの観測結果になったと推測できる。

事故によって大気中に放出された —放射性物質の数値シミュレーション

このような推測を裏づけるために、事故によって大気中に放出された放射性物質の数値シミュレーションをおこなった。数値シミュレーションには、大原らが“房総前線出現時の局地気流とNO₂高濃度汚染の数値シミュレーション”⁽⁸⁾で使用した、気流モデルと移流拡散モデルを組み合わせるモデルをそのまま用いた。計算に使用した気象データは、気象庁の高層観測、アメダス、地上の全天日射量のデータである。放射性セシウム235の放出条件は科学技術庁の事故調査委員会の最終報告書(1997年12月, <http://www.sta.go.jp/genshi/nuclear/tokai/71216.html>)に採用された結論とその下敷きとなった資料をもとに、下記のように設定した。

総量1GBqの¹³⁷Csが、3月11日の

20時10分～20時40分に総量の32.2%

20時40分～21時10分に総量の26.5%

21時10分～21時40分に総量の22.4%

21時40分～22時10分に総量の18.9%

ずつ放出されたと仮定した。この場合、想定して

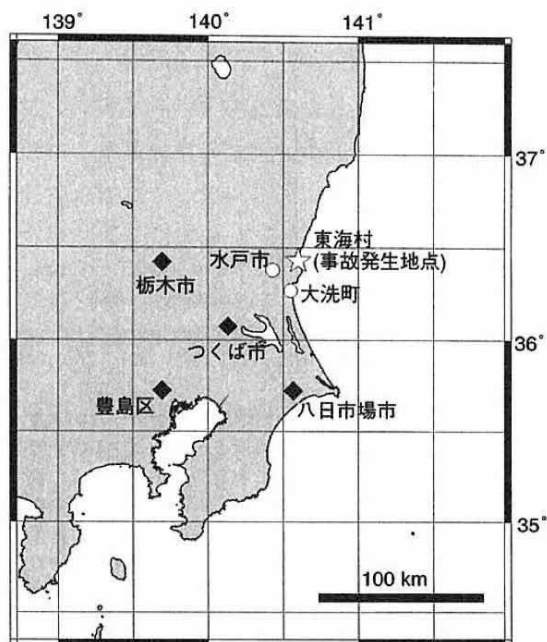


図2 数値シミュレーション移流拡散モデルの計算領域。事故発生地点の動燃東海事業所(☆)と観測値が報告されている水戸市、大洗町、つくば市(気象研究所)の位置関係を示す。また、観測値の得られている地点が、関東平野の北東に片寄っているため、つくばを中心にして東海村を北東の角とする正方形の残りの三つの角にあたる3地点(栃木市、豊島区、八日市場市)をえらび数値シミュレーションによって得られた濃度の時間変動を検討した(図4参照)。

いる¹³⁷Csの形態は、サブミクロンの粒径で大気中をすくなくとも数日間は輸送されうるとともに、降水以外では空気中から容易には除去できない粒子である*。

数値シミュレーションの計算領域は、気流モデルが北緯34度～38.75度、東経137度～142度の領域であり、移流拡散モデルは、図2に示す領域で、格子点間隔は東西・南北ともに約5.5 kmである。また、移流拡散モデルによる数値シミュレーションの対象期間は、3月11日20時～3月14日24時までとした。放出高度は0～50 m(第1層0～20 m, 第2層20～50 m)の範囲である。この範囲では、放出高度を1層としても2層としても結果はほとんどかわらない。事故前の北半球大気中の平均的¹³⁷Cs濃度は、つくばでの観測値を考

* 事故で放出された粒子には、サブミクロンサイズ(1 μm以下)よりも大きなものも存在すると考えられる。東海事業所構内では、事故をおこした施設周辺で放射性の飛散物が回収されているとともに、構内の数地点の土壌で放射性セシウム、プルトニウムなどが検出されている。

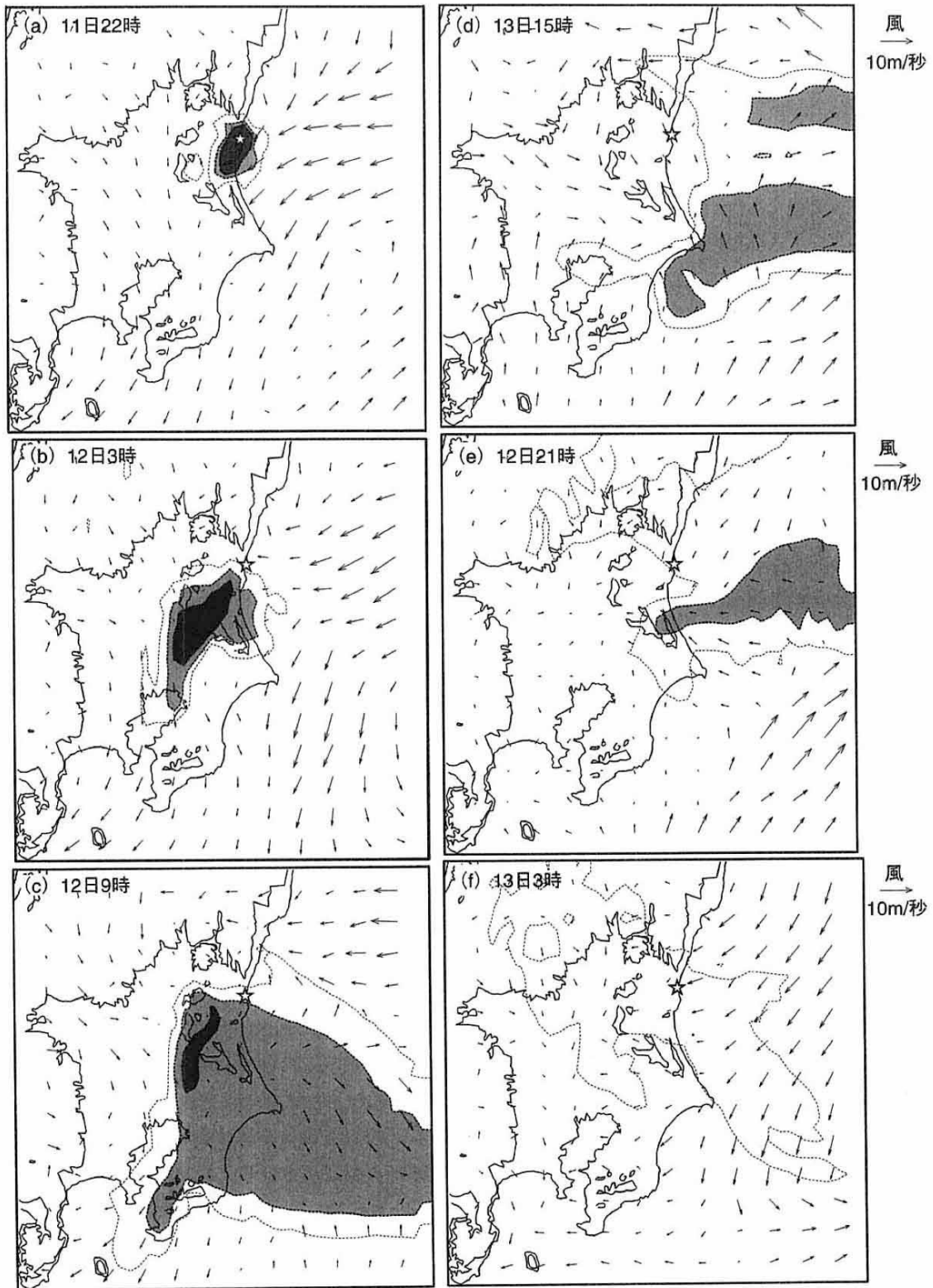


図3 爆発事故発生後2時間から27時間後までの数値シミュレーションの結果。等値線は ^{137}Cs の濃度1, 10, 100 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ を示した。網かけは10 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 以上の領域、網が濃い部分は100 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 以上の領域である。地図上の等高線は標高100 m。(a, b)放出された放射性セシウムは最初南から南西に運ばれて、数時間の間に茨城南部、千葉北部、東京東部、埼玉東部に広がった。(c)12日3時ころから東に方向を変え、房総半島を越えていったん太平洋側流れ出していく。(d, e, f)その後12日15時ころから、再び内陸の方向に入りだし、13日早朝にかけて関東平野北部に広がっていく。3月12日9時以降(c)、数値シミュレーション移流拡散モデルの計算領域の東端を越えてしまった部分については、以降の計算からは除かれている(いったん領域の外に出てしまうと計算上は戻ってこれないが、現実には戻ってくることもある)。このことによって、時間がたつにつれて数値シミュレーションの結果が観測値より低くなっている。



図4 つくばでの ^{137}Cs 濃度の時間変化. 図1に示した ^{137}Cs 濃度の時間変化を事故時を中心に拡大表示したものと、本数値シミュレーションによって得られた ^{137}Cs 濃度の時間変化. 観測された時間変化はそれぞれの期間の平均値であり、とくに3月10日10時から12日10時までは、爆発事故以前の三十数時間を含んでいることに注意されたい.

慮して $0.5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ とした.

数値シミュレーションの結果の一部を図3に示す. 事故によって大気中に放出された放射性物質は、南から南西に運ばれて、数時間の間に茨城南部、千葉北部、東京東部、埼玉東部に広がった. 12日3時ころから東に方向を変え、房総半島を越えていったん太平洋側に流れ出していく. その後12日15時ころから、内陸の方向に入りだし、13日早朝にかけて関東平野北部に広がっていく. 3月14日には、大気中の ^{137}Cs 濃度はすでに $0.5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ のレベルに戻っている(一部の数値シミュレーションの結果が現実の観測値より低いのは、事故によって大気中に放出された放射性物質が東へ移動しているあいだに計算領域の外に出てしまったためである、表1参照).

また、つくばでの ^{137}Cs 濃度の時間変化を図4に示す. 図4には、実際の測定値も同時に示してある. 11日深夜から12日昼にかけて濃度が上昇し、本数値シミュレーションによると、通過した空気塊の ^{137}Cs 濃度の最高は約 $1000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ である. その後いったん事故以前の濃度まで下がっているが、12日深夜から13日明け方にかけて再び上昇している. 3月14日には、大気中の ^{137}Cs 濃度はすでに $0.5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ のレベルに戻っている.

本数値シミュレーションの結果といくつかの観測値とを比較したのが、表1である. 計算領域の

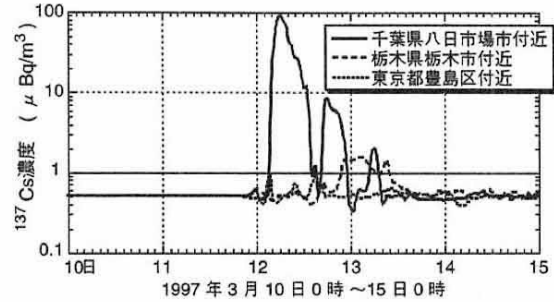


図5 関東各地での ^{137}Cs 濃度の時間変化. 数値シミュレーションによって得られた値をつくばからそれぞれ約60 km(つくばから東海村までの距離)離れた3地点について示す. つくばから南西の八日市場市での濃度の変化は、つくばでの変化と基本的には同様であり、12日明け方から濃度が上昇し、最大約 $100 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ となっている. その後、事故以前の濃度まで下がったが、12日午後から12日深夜にかけて再び上昇している. つくばから北西の栃木県栃木市では12日昼ごろと12日深夜に $10\sim 20 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 程度の濃度となっている. つくばから南西の東京都豊島区では、約 $1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 程度の濃度上昇が12日に3回みられる.

外に出てしまったためにつくばでの3月13日10時から3月17日10時までの観測値と計算値には大きな違いがあるが、それを除くとよい一致をしている. このことは、 ^{137}Cs の放出総量が 1GBq という仮定が現実とそう大きくは異なっていないことも意味している.

観測値の得られている地点が、関東平野の東に片寄っているので、数値シミュレーションによって得られた濃度だけを、つくばを中心にして東海村を北東の角とする正方形の残りの三つの角にあたる3地点(図2参照)について図5に示す. つくばから南東約60 kmの千葉県八日市場市での濃度の変化は、つくばでの変化と基本的には同様であり、最初南から南西に運ばれた影響で12日明け方から濃度が上昇し、約 $100 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ となっている. その後つくばと同様に、事故以前の濃度まで下がっているが、12日午後から12日深夜にかけて再び上昇している.

茅野ら⁽⁹⁾は、SPEEDI(緊急時迅速放射能影響予測)高度化モデルをつかい、“低濃度ではあるが分布の端につくばが含まれており、気象研で測定された ^{137}Cs が事故起因である可能性は高い”としている. また、彼らの計算によると、つくばへの放射性物質の到着時刻は12日朝5時ころとなっ

表1 大気中の¹³⁷Cs濃度(単位 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

場所	試料採取期間	観測値	計算値
つくば	3月10日10時から3月12日10時	96	130
つくば	3月12日10時から3月13日10時	13	3.7*
つくば	3月13日10時から3月17日10時	2.2	0.5*
水戸	3月7日9時から3月14日9時	41	70
大洗	3月10日10時から3月17日10時	40~60	51

* 観測値にくらべて、シミュレーションによる計算値が小さいものがあるのは3月12日9時以降、数値シミュレーション移流拡散モデルの計算領域の東端を越えてしまった部分が以降の計算からは除かれているためだと考えられる。

ており、“¹³⁷Csの放出総量が1GBqという本数値シミュレーションの仮定”を彼らの結果にあてはめると、そのときの濃度は約600~1300 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ となる。つくばへの放射性物質の到着時刻には違いがあるが、定性的には二つの数値シミュレーションの結果は一致している。

事故が教えてくれたもの

幸いにも、今回の事故によって大気中に放出された放射能量は比較的少なかったため、放射能の環境への影響は、ほとんどなかったものと判断される。しかし、この事故を教訓として、つぎのことがいえよう。

今回の事故によって放出された放射性物質は、半日の間に関東平野にひろがり、上空を行き来した結果、つくばで採取した事故直後から3月17日までの大気浮遊塵サンプル中に事故由来の放射性セシウムの¹³⁷Csが検出された。このことは、そのときの気象条件——主には風——にしたがっておきた、ごくあたりまえのできごとであったといえる。放出された放射性物質がどのような挙動をしたかが、数値シミュレーションによって示された。

また、今回の事故で放出された放射性物質は大気中から降水によって除去され関東平野の地表面に降下したのではない可能性が高いことが、アメダスによる降水記録および降水試料の測定結果から推定された。したがって、事故由来の放射性物質は、大気中を広がりながら輸送された後、対流圏でのサブミクロンの粒径をもつ物質の滞留時間である数十日の時間スケールで(チェルノブイリ

原子力発電所事故由来の¹³⁷Csの場合は約25日⁽¹⁰⁾、最終的には地球上のどこかで地表面または海面に降下したと判断できる。

注目すべきことは、数百km以内の規模での事故由来の放射性物質の移動が、単純に一方向に流れていくのではなく、再び戻ってくるような複雑な場合があることである。したがって、大気圏核実験のような対流圏上部や成層圏のような高いところに放出されたのではなく、地表付近で放射性物質が大気中に放出された場合、予測モデルによって放射線防護上の対策をとるのであれば、局地的な気象条件が正しく反映できる必要がある。

単純にいつて風速5m/秒でまっすぐ進めば1時間で18km、6時間で108km移動できることを考えれば、事故が発生してから予測モデルを動かすのではなく、あらかじめ典型的な気象条件と放出条件を想定して、拡散予測をおこなっておくことも必要かもしれない。もちろん、今回も示されたように観測データはしばしば人間が予想できないことを教えてくれるので、切れ目のない試料採取と観測・計測は事故時の評価とともに、事後の評価をおこなう上でも重要である。

(Michio AOYAMA 気象研究所地球化学研究部

Toshimasa OHARA (財)計量計画研究所

Kazuhisa KOMURA 金沢大学理学部附属低レベル放射能実験施設)

文 献

- (1) 高木仁三郎: 科学, **67**, 407(1997)
- (2) 科学技術庁原子力安全局: 原子力安全委員会月報, **224**, 65(1997)
- (3) 五十嵐康人ほか: Radioisotopes, **46**, 645(1997); Y. IGARASHI et al.: Applied Radiation and Isotopes, 印刷中(1998)
- (4) Y. IGARASHI et al.: J. Rad. Res., **37**, 320(1996)
- (5) T. MIYAO et al.: J. Rad. Res., **37**, 321(1996)
- (6) R. SEKI et al.: J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, **138**, 17(1990)
- (7) 小村和久: 放射線医学物理, **48**, 34(1996)
- (8) 大原利真・鶴野伊津志: 天気, **44**, 23(1997); 大気環境学会誌, **32**, A 39(1997)
- (9) 茅野政道・永井晴康: 日本原子力学会誌, **39**, 644(1997)
- (10) M. AOYAMA: Geophys. Res. Lett., **15**, 327(1988)